발간등록번호
11-1721000-000719-10

2023 양자정보기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

과학기술정보통신부
NIA 한국지능정보사회진흥원
미래양자융합포럼
Future Quantum Convergence Forum

2023 양자정보기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

발간사



대한민국 정부는 퀀텀코리아 2023에서 "대한민국 양자과학기술 전략"을 발표하고 양자기술 대도약을 위해 2023년을 "국가 양자과학기술 원년"으로 선포하였습니다. 국회에서는 양자과학기술 연구 기반을 조성하고 관련 산업을 육성하기 위해 "양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안"이 통과되어 2024년 11월 시행을 앞두고 있습니다. 미국 정부 또한 양자기술 실증을 위한 테스트베드 조성, 산업화 촉진 및 인력양성을 위한 허브 구축 등을 포함한 "국가양자이니셔티브법" 개정을 추진하고 있어, 2023년은 양자산업 활성화를 위한 주요한 정책적 토대가 마련된 한 해였습니다.

양자산업 및 생태계 활성화 전담기관인 한국지능정보사회진흥원은 이러한 기대에 부응하고자, 작년에 이어 올해 두 번째로 더욱 알찬 내용을 담아 『2023 양자정보기술 백서』 개정판을 발간하였습니다. 2022년 12월에 최초 발간된 『2022 양자정보기술 백서』는 그동안 흩어져 있던 양자기술 관련 정보를 통합하고 집대성하여, 발간 이후 관련분야 종사자라면 반드시 참고해야 하는 문헌으로서 양자분야 진입장벽을 해소하고 산업화를 위한 활용력을 제고하여 국내 "양자기술 백과사전"으로 자리매김하였다는 평가를 받았습니다.

2023년 올해 백서는 사용자 접근성과 편의성을 고려한 디지털화를 통해 양자산업생태계지원센터(kqic.kr)에서 정보를 쉽게 찾아볼 수 있도록 온라인으로 구현하였고, 양자 통신·센서·컴퓨터 분야의 국내외 시장, 정책, 투자, 표준화, 연구개발 동향과 소재·부품·장비 산업생태계 동향을 최신화하였습니다. 또한 양자인터넷과 양자네트워크 연구개발을 위한 핵심 요소기술(메모리, 중계기)과 양자컴퓨팅 소프트웨어 관련 동향을 추가하였으며 기존 첨단산업에 양자기술을 접목하여 파급력을 낼 수 있는 다양한 산업화 모델을 제시하여 활용 범위를 확대하였습니다.

『2023 양자정보기술 백서』에 수록된 풍성하고 폭넓은 지식을 기반으로 전 산업영역으로 양자기술의 저변이 확대되고 우리나라 양자기술의 발전과 양자산업 생태계 혁신을 위한 귀중한 자료로 활용되기를 기대합니다. 또한 이번 백서 발간으로 양자기술의 생산적 활용성이 더욱 모색되어, 우리나라가 양자컴퓨터를 비롯하여 양자기술을 세계에서 가장 잘 활용하는 나라로 우뚝 설 수 있기를 바랍니다.

한국지능정보사회진흥원은 양자산업생태계지원센터를 중심으로 올해 4월에 세계 최초 시행된 양자암호통신 보안검증제도 마련을 지원하였고 양자기술의 연구개발과 산업화를 연계하는 선순환 생태계 구축 및 국내외 산·학·연 기관들과의 교류와 협력 강화에 지속적으로 노력하여 양자과학기술 및 산업이 대한민국의 미래 30년을 책임지는 핵심 분야로 발전할 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

끝으로 『2023 양자정보기술 백서』의 발간을 위해 노고와 헌신을 마다하지 않으신 김재완 편찬위원장님과 편찬위원님들, 그리고 집필진분들께 깊은 감사를 전합니다. 또한, 기획과 편집 등 보이지 않는 곳에서 백서 발간을 위해 힘써주신 모든 분께도 감사의 인사를 전합니다. 감사합니다.

한국지능정보사회진흥원 원장 황종성

추천사



전 세계적으로 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 등 양자기술은 하루가 다르게 발전하고 있으며, 양자기술 산업계도 막대한 투자를 바탕으로 치열한 경쟁을 펼치며 성장을 거듭하고 있습니다.

대한민국 정부도 2023년을 "국가 양자과학기술의 원년"으로 선포한 데 이어 "퀀텀코리아 2023"을 개최하면서 "대한민국 양자과학기술 전략"을 발표하였습니다. 특히 2022년 우리나라 양자기술산업 생태계 조성에 힘이 되고자 처음 발간된 양자정보기술 백서는 큰 반향을 일으켰고, 영어 요약판 역시 세계 여러 나라와의 양자기술 교류 측면에서 크게 이바지했습니다. 그리고 2023년, 더욱 속도를 높이며 빠르게 발전하는 양자기술에 대한 경쟁력 확보와 우리나라 양자기술산업 생태계 발전을 위해 "2023년판 양자정보기술 백서"를 발간하게 되었습니다.

"2023년판 양자정보기술 백서"는 각종 양자기술의 연구개발 동향은 물론, 시장, 정책, 투자, 표준화 동향과 양자기술 산업화 모델까지 폭넓게 기술되어 우리나라 양자기술산업 생태계가 발전하는 데에 큰 도움이 될 것입니다. 특히 양자기술산업 발전에 절대 빠질 수 없는 양자기술 소부장(소재-부품-장비) 생태계 동향과 양자전문인력 통계를 포함한 각종 양자기술 관련 통계는 사업체 운영자는 물론 실무자들에게도 매우 유용하게 쓰일 것이라 기대합니다.

우리나라의 경우 양자기술에 대한 투자가 다소 늦고, 다른 기술 선진국들에 비해 미진한 수준이지만, 전반적인 과학기술 수준을 비춰보았을 때 따라잡을 수 있는 역량이 충분하다고 생각합니다. 그리고 우리만의 노력에 더해 미국과 유럽 등 양자기술 선진국들이 그러했듯이 전 세계를 대상으로 전문인력과 기술을 교류하는 것도 절대적으로 필요합니다. 특히 이들 나라의 양자기술 협의체 동향은 양자기술 국제교류를 통해 양자기술 산업을 발전시키는 데에 크게 도움이 될 것입니다.

반도체와 레이저 등 하드웨어로 대표되는 1차 양자혁명을 넘어, 양자정보의 중첩과 얽힘으로 시작된 2차 양자혁명에서 우리나라가 중심 역할을 하도록 성장하는 데 "2023년판 양자정보기술 백서"가 큰 쓰임새가 되기를 기대합니다. 방대한 자료를 수집하여 작성하고 편집하는 데에 애쓰신 분들께 깊이 감사드립니다.

미래양자융합포럼 학계·연구계 공동의장 김재완

목차

들어가며

발간사 2
추천사 3

Ⅰ. 양자기술 동향

1장. 국내외 시장동향 30
2장. 국내외 정책동향 52
3장. 국내외 투자동향 94
4장. 국내외 표준화동향 116
참고문헌 140

Ⅱ. 양자기술 R&D 동향

1장. 국내외 양자통신 R&D 동향 146
2장. 국내외 양자센싱 R&D 동향 242
3장. 국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향 330
참고문헌 456

Ⅲ. 양자기술 소재·부품·장비 산업생태계 동향

1장. 양자통신분야 주요기술과 소부장 486
2장. 양자센싱분야 주요기술과 소부장 532
3장. 양자컴퓨팅분야 주요기술과 소부장 606
참고문헌 696

Ⅳ. 양자기술 통계

1장. 국내외 논문 통계 _____ 706
2장. 국내외 특허 통계 _____ 730
3장. 국내 인력 현황 _____ 788
참고문헌 _____ 808

Ⅴ. 양자기술 산업화 모델

1장. 산업화 모델 개요 _____ 812
2장. 양자통신 산업화 모델 _____ 820
3장. 양자센싱 산업화 모델 _____ 858
4장. 양자컴퓨팅 산업화 모델 _____ 898
5장. 시사점 _____ 952
참고문헌 _____ 958

Ⅵ. 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 동향

1장. 북미(미국 QED-C, 캐나다 QIC) _____ 966
2장. 유럽(유럽 QuIC, 핀란드 InstituteQ, 독일 QUTAC, 영국 UKQuantum) _____ 1006
3장. 기타(일본 Q-STAR, 호주 AQA) _____ 1036
참고문헌 _____ 1050

부록

편찬위원회 _____ 1054
집필전문가 _____ 1055

「2023 양자정보기술 백서」

주요 업데이트 키워드

편	장	업데이트 주요 키워드
Ⅰ. 양자기술 동향	1장. 시 장	• 국내외 시장에 대해 맥킨지앤컴퍼니(McKinsey & Company), 마인드커머스(Mind Commerce) 등의 최신 시장전망 자료를 통한 시장 동향 최신화
	2장. 정 책	• 미국 국가양자이니셔티브(NQI) 재승인법 등을 포함하여, 영국, 호주, 캐나다, 독일, 한국 등이 2023년에 발표한 양자기술 관련 전략 및 계획 동향 신규 추가
	3장. 투 자	• 미국 양자정보과학 R&D 예산과 더불어 영국, 독일, 캐나다, 한국 등이 2023년에 발표한 양자기술 관련 전략 및 계획을 토대로 세계 주요국 양자기술 투자 동향 최신화
	4장. 표준화	• ITU-T, ETSI, ISO/IEC JTC1, IEEE, IETF/IRTF, TTA 등 국내외 표준화기구 동향 최신화 및 유럽지역 표준화기구인 CEN/CENELEC 동향 신규 추가
Ⅱ. 양자기술 R&D 동향	1장. 통 신	• 양자인터넷 구축을 위한 양자 네트워크 관련 국내외 R&D 동향 신규 추가를 포함하여, 양자통신 분야 최신 R&D 동향 반영
	2장. 센 싱	• 양자계측 관련 국내외 R&D 동향 신규 추가를 포함하여, 양자 관성센서 및 양자 시간·주파수측정센서 등 양자센싱 분야 최신 R&D 동향 반영
	3장. 컴퓨팅	• 양자컴퓨팅 소프트웨어 관련 국내외 R&D 동향 신규 추가를 포함하여, 양자컴퓨팅 분야 최신 R&D 동향 반영
Ⅲ. 양자기술 소재·부품·장비 산업생태계 동향	1장. 통 신	• 양자통신 분야에 필요한 대표적인 소재 7개, 부품 8개, 장비 5개에 대해 주요 공급망 파악 및 시사점 제시
	2장. 센 싱	• 양자센싱 분야에 필요한 대표적인 소재 11개, 부품 24개, 장비 14개에 대해 주요 공급망 파악 및 시사점 제시
	3장. 컴퓨팅	• 양자컴퓨팅 분야에 필요한 대표적인 소재 19개, 부품 43개, 장비 39개에 대해 주요 공급망 파악 및 시사점 제시
Ⅳ. 양자기술 통계	1장. 논 문	• 한국과학기술정보연구원(KISTI), 정보통신기획평가원(IITP), 한국연구재단(NRF) 자료를 기반으로 작년 백서에는 생략된 논문 통계 신규 추가
	2장. 특 허	• 한국과학기술정보연구원(KISTI), 정보통신기획평가원(IITP), 한국지식재산연구원(KIIP) 자료를 기반으로 특허 통계 보완
	3장. 인 력	• 양자기술 전문인력 전수조사를 통한 양자기술 분야 산업계·연구계 인력 현황 및 향후 10년간 소요인력 최신화(학계는 기존 2022년 백서 자료 활용) * 양자핵심인력(박사급) : 384명('22) → 403명('23)
Ⅴ. 양자기술 산업화 모델		• 전년 64개 대비 약 65% 증가한 106개의 산업화 모델 제시 • 전체 106개의 산업화 모델을 3개의 기술 분야(양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅), 8개의 산업 분야(국방·안보, 제조·반도체, 의료·제약 등) 시기(단기, 중장기)별로 체계화
Ⅵ. 글로벌 양자 분야 주요 산·학·연 협의체 동향		• 미국 QED-C, 캐나다 QIC, 일본 Q-STAR에 대한 회원사 등 동향 최신화 • 유럽 QuIC, 핀란드 InstituteQ, 영국 UKQuantum, 독일 QUTAC, 호주 AQA 등 글로벌 양자 분야 산·학·연 협의체 신규 추가

그림 목차

Ⅰ 양자기술 동향

1장
그림 Ⅰ-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망 32
그림 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비 33
그림 Ⅰ-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비 34
그림 Ⅰ-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망 35
그림 Ⅰ-1-5 국내 양자통신 시장 전망 36
그림 Ⅰ-1-6 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망 38
그림 Ⅰ-1-7 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망 39
그림 Ⅰ-1-8 글로벌 양자센싱 부문별 시장 전망 41
그림 Ⅰ-1-9 주요국 및 지역의 양자센싱 시장 전망 42
그림 Ⅰ-1-10 부문별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망 43
그림 Ⅰ-1-11 부문별 글로벌 양자자력계 시장 전망 44
그림 Ⅰ-1-12 수요산업별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망 45
그림 Ⅰ-1-13 수요산업별 글로벌 양자자력계 시장 전망 46
그림 Ⅰ-1-14 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 전망 47
그림 Ⅰ-1-15 국내 양자컴퓨팅 시장 전망 48
그림 Ⅰ-1-16 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 49
그림 Ⅰ-1-17 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 50
그림 Ⅰ-1-18 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 51

2장
그림 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책 및 입법 현황 53
그림 Ⅰ-2-2 미국 양자 이니셔티브 추진 타임라인(2017~2021) 56
그림 Ⅰ-2-3 미국 내 양자인터넷 설계 61
그림 Ⅰ-2-4 양자선언문의 기술개발 로드맵 61
그림 Ⅰ-2-5 5대 전략적 연구 어젠다 63
그림 Ⅰ-2-6 EU 양자지원 계획 및 정책의 흐름 65
그림 Ⅰ-2-7 영국 NQTP 거버넌스 체계 및 투자 66
그림 Ⅰ-2-8 6개 이니셔티브 추진내용 68
그림 Ⅰ-2-9 캐나다 BC주 CREATE 프로그램 72
그림 Ⅰ-2-10 중국 양자기술 연구 관련 주요기관 현황 75
그림 Ⅰ-2-11 일본 양자 미래사회 비전 실현을 향한 개관 79
그림 Ⅰ-2-12 양자기술 연구개발 투자전략 85
그림 Ⅰ-2-13 미래양자융합포럼 조직도 88
그림 Ⅰ-2-14 양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안 90
그림 Ⅰ-2-15 양자기술 전략로드맵 91
그림 Ⅰ-2-16 대한민국 양자과학기술 비전 및 정책목표 92

3장
그림 Ⅰ-3-1 세계 주요국 양자산업 투자 규모 96
그림 Ⅰ-3-2 미국 양자정보과학 R&D 예산 97
그림 Ⅰ-3-3 미국 양자정보과학 R&D 예산(NQI 프로그램별) 98
그림 Ⅰ-3-4 미국 양자정보과학(QIS) R&D 예산(NQI 기관별) 98
그림 Ⅰ-3-5 양자정보과학(QIS) 2024 회계연도 요청액(NQI 기관별) 99
그림 Ⅰ-3-6 NSF QLCI 프로그램 참여 기관 분포도 100
그림 Ⅰ-3-7 양자정보과학 연구센터 구성 기관 분포도 102
그림 Ⅰ-3-8 EU 양자플래그십 프로젝트별 투자 구조 103
그림 Ⅰ-3-9 EU 양자플래그십 1단계 과제 연구개발비 구성 비율 104
그림 Ⅰ-3-10 영국 국가양자기술프로그램 허브 네트워크 105
그림 Ⅰ-3-11 영국 지역별 양자산업 프로젝트 투자금(2022년 8월 기준) 106
그림 Ⅰ-3-12 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 구성 비율 108
그림 Ⅰ-3-13 국내 양자 R&D 전용사업 투자 추이 113
그림 Ⅰ-3-14 국내 양자 R&D 전용사업(기술개발) 투자 추이 114
그림 Ⅰ-3-15 국내 양자 R&D 전용사업(기반 구축) 투자 추이 114

4장
그림 I-4-1 ITU 조직구조 118
그림 I-4-2 ITU-T 양자기술 표준화 연구그룹 관계 119
그림 I-4-3 ITU-T 연구그룹별 주요 표준화 내용 120
그림 I-4-4 양자 키 분배 네트워크 개요 120
그림 I-4-5 ETSI 조직구조 126
그림 I-4-6 ISO/IEC JTC1 조직구조 128
그림 I-4-7 IEEE 조직구조 130
그림 I-4-8 TTA 표준화위원회 조직구조 133

II 양자기술 R&D 동향

1장
그림 II-1-1 LuxQuanta의 상용 CV-QKD 모듈 149
그림 II-1-2 Transmitted Local Oscillator(TLO)-CV-QKD 151
그림 II-1-3 에너지-시간 얽힘광자쌍을 이용한 고차원 QKD 실험 구성도 154
그림 II-1-4 수동적 QKD 개념도 155
그림 II-1-5 기기무관 QKD 160
그림 II-1-6 SD-QKD 네트워크 모델 및 인터페이스 기능 정의 164
그림 II-1-7 양자키 전달 방안 165
그림 II-1-8 DARPA QKD 네트워크 구성도 167
그림 II-1-9 SECOQC 양자 키 분배 네트워크 구성도 168
그림 II-1-10 Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크 구성도 169
그림 II-1-11 Madrid 양자 키 분배 네트워크 구성도 170
그림 II-1-12 드론을 이용한 양자 키 분배 실험 175
그림 II-1-13 빔 스플리터 기반 양자난수생성기 개요 176
그림 II-1-14 방사선 붕괴 기반 양자난수 생성기 및 측정 방법 177
그림 II-1-15 진공기반 연속변수 기반 양자난수 생성기 178
그림 II-1-16 Hadamard 게이트를 이용한 양자 난수 생성 방법 179
그림 II-1-17 양자기술 기반 스트림 암호화 186
그림 II-1-18 (왼쪽) OpenQKD 베를린, (오른쪽) 마드리드 테스트베드 188
그림 II-1-19 Beijing-Shanghai 구간 설치된 백본 네트워크 개요도 190
그림 II-1-20 오스트리아-중국 간 QKD 링크 구현 191
그림 II-1-21 DC-QNet 구성도 191
그림 II-1-22 ISO/IEC 23837-2 구성 195
그림 II-1-23 ISO/IEC 23837 표준화 진행 현황 196
그림 II-1-24 양자 네트워크 단계 197
그림 II-1-25 양자 메모리 큐비트를 고려한 3개 노드 양자 네트워크 구현 199
그림 II-1-26 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 개요도 203
그림 II-1-27 간섭계 안정화를 적용한 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 구성도 204
그림 II-1-28 Plug&Play BB84 QKD 시스템의 실험 구성도 205
그림 II-1-29 COW-QKD 시스템의 구조 207
그림 II-1-30 DPS-QKD 프로토콜 실험 개요도 207
그림 II-1-31 RRDPS-QKD의 실험 개요도 208
그림 II-1-32 RRDPS QKD 실험 구성도 208
그림 II-1-33 MDI-QKD의 실험 개요도 210
그림 II-1-34 MDI-QKD 실험 구성도 211
그림 II-1-35 TF-QKD 실험 개요도 212
그림 II-1-36 Mode-pairing QKD 개념도 213
그림 II-1-37 광섬유 기반 MDI-QKD 시스템 216
그림 II-1-38 2×N Plug&Play TF-QKD 네트워크 실험 개요도 216
그림 II-1-39 양자 얽힘 217
그림 II-1-40 BBM92 프로토콜 217
그림 II-1-41 위성 QKD 225
그림 II-1-42 IDQ 양자 난수 생성기 난수 생성 원리 227
그림 II-1-43 IDQ QRNG 제품과 고전적 TRNG의 성능 비교 227
그림 II-1-44 EYL QRNG 난수생성 원리 228
그림 II-1-45 베타선을 이용한 양자난수생성기 229
그림 II-1-46 양자중계기 동작 방식 230
그림 II-1-47 양자 암호기술과 암호서비스의 상관관계 234
그림 II-1-48 GHZ 양자상태 235
그림 II-1-49 비밀공유 양자원격전송 개념도 239
그림 II-1-50 양자직접통신 구성도 240

2장
그림 II-2-1 양자 중력 센싱 기술 현황 비교표 248
그림 II-2-2 미국 양자센서 로드맵 249
그림 II-2-3 차세대 소형화 기술 연구 및 백팩 크기의 양자 중력센서개발 비전 250
그림 II-2-4 (왼쪽) 버밍엄 대학에서 개발 중인 양자중력센서, (오른쪽) 양자센서 로드맵 251
그림 II-2-5 양자중력구배계를 이용한 지하공동 탐지 및 위치 측정 252
그림 II-2-6 SYRTE의 양자중력계 252
그림 II-2-7 Muquans사의 상용 양자중력계 253
그림 II-2-8 항공기에 탑재한 양자중력계 실험 253
그림 II-2-9 선박에 설치된 저온 원자중력계 254
그림 II-2-10 원자중력계로 측정하여 작성된 중력지도 254
그림 II-2-11 항공 탑재용 원자중력계의 사진과 중력지도 254
그림 II-2-12 (왼쪽) 양자중력구배계 사진, (오른쪽) 양자중력구배계 개념도 255
그림 II-2-13 하노버 대학에서 연구한 원자칩 기반 중력계 상상도 256
그림 II-2-14 훔볼트대에서 개발한 이동형 양자중력계 256
그림 II-2-15 NIM에서 개발한 양자중력계를 이용한 상대중력계 교정 257
그림 II-2-16 휴대용 양자센서 개발 로드맵 258
그림 II-2-17 기존 고전 중력계와 양자중력센서 감도 및 정밀도 비교 259
그림 II-2-18 휴대용 원자간섭계의 활용 예시 260
그림 II-2-19 도심의 지하구조물 탐지 261
그림 II-2-20 버클리대에서 수행한 버클리힐즈의 중력 측정 연구 261
그림 II-2-21 에트나 화산 정상 분화구 지역에 배치한 양자중력계 사진과 시간에 따른 중력 변화 측정 결과 262
그림 II-2-22 Sandia 국립연구소의 Dual-axis, high data-rate atom interferometer 263
그림 II-2-23 Cold-Atom accelerometer-gyroscope 264
그림 II-2-24 Phase II 프로토타입 개략도 264
그림 II-2-25 (왼쪽) 가속도계의 개략도 및 광섬유가 결합된 캐비티 프로토타입 (오른쪽) 광기계 가속도계의 그림 265
그림 II-2-26 Demonstration of Diamond Nuclear Spin Gyroscope 266
그림 II-2-27 Northrop Grumann에서 개발한 항법급 원자스핀 자이로 266
그림 II-2-28 영국 국가양자기술프로그램의 양자센서 로드맵 267
그림 II-2-29 Imperial College London과 M Squared가 개발한 항법용 양자가속도계 268
그림 II-2-30 프랑스에서 수행 중인 원자간섭계 연구 268
그림 II-2-31 자이로스코프의 실험 원리 269
그림 II-2-32 프랑스에 SYRTE에서 개발중인 원간섭계 기반 양자 가속도계/회전속도계 269
그림 II-2-33 원자시계 분류 271
그림 II-2-34 초고정밀 원자시계의 정확도 비교 271
그림 II-2-35 NIST에서 개발한 원자분수시계 사진 272
그림 II-2-36 NIST에서 Yb 광격자시계와 이동형 광격자 시계 사진 272
그림 II-2-37 NIST에서 개발한 CSAC 기술 273
그림 II-2-38 NIST-on-a-Chip 프로그램을 통해 기초 기술이 구현된 광주파수 합성칩 개념도 274
그림 II-2-39 NIST에서 개발된 광도파로와 결합된 Rb 증기셀 연구 274
그림 II-2-40 유럽에서 발간된 Quantum Manifesto의 양자기술 개발을 위한 타임라인 275
그림 II-2-41 독일에서 발표한 양자기술 로드맵 276
그림 II-2-42 독일 PTB의 Th-229 이온 트랩장치 277
그림 II-2-43 스위스의 CSEM에서 개발한 판상형 웨이퍼 레벨 패키지 기반의 칩스케일 원자시계 277
그림 II-2-44 양자 시간·주파수 센서 활용 분야 278
그림 II-2-45 기본 단위와 기본물리상수 연관도 및 정확도 수준 278
그림 II-2-46 레벨 다이어그램 및 실험 개략도 280
그림 II-2-47 GRIN 렌즈, 광섬유 페룰, Cs 원자증기셀 및 슬리브를 이용한 광섬유 결합형 원자증기셀 280
그림 II-2-48 광섬유 연결형 원자증기셀을 이용한 전기장 측정 실험 사진 281
그림 II-2-49 (왼쪽) 양자전기장 센서와 믹서를 이용한 위상 측정 장치도 (오른쪽) 광검출기 감지 신호 281
그림 II-2-50 (왼쪽) 양자전기장 센서 기반 방향탐지 기술 개념도 (오른쪽) 실제 방향탐지 실험 사진 282
그림 II-2-51 전자파 방향탐지 측정 결과 282
그림 II-2-52 DARPA에서 연구 중인 고감도 광대역 무선 주파수 양자수신기의 QA 프로그램 개념도 282
그림 II-2-53 적설량, 빙상 역학, 강수량 등 지구 수자원 관측을 위한 위성탑재 리드버그 레이더 개념도 283
그림 II-2-54 원자광학 형광을 사용한 실시간 근거리 테라헤르츠 이미징 284
그림 II-2-55 초고속 THz 비디오 285
그림 II-2-56 기존 수신기와 비교한 양자전기장 센서의 장점 및 한계 286
그림 II-2-57 주파수에 따른 양자전기장 센서 측정 감도와 수신부 크기 비교 286
그림 II-2-58 미국 양자센서 개발 사례 287
그림 II-2-59 미국 Rydberg Technologies사 홈페이지 공개 내용 288
그림 II-2-60 미국 기업들이 판매 중인 소형 상용 원자자력계 290
그림 II-2-61 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 양자자기장 센서 290
그림 II-2-62 소형 양자자력계를 이용한 Wearable 뇌자도 이미징 시스템 개발 발전상 290

그림 II-2-63	스위스 Qnami, Qzabre에서 제작 및 판매 중인 다이아몬드 스캐닝 프로브와 나노 자기장 이미징 스캐너	291
그림 II-2-64	원자자력계를 이용한 무인 드론 기반 지뢰 탐지 연구	292
그림 II-2-65	중국 CIQTEK의 다이아몬드 NV 센터 기반 나노 자기장 이미징 스캐너	292
그림 II-2-66	나노/마이크로미터 양자 MRI 개념도	293
그림 II-2-67	양자자력계의 국방 분야 활용 예시	293
그림 II-2-68	고분해능 양자자기장 이미징을 통해 반도체와 배터리의 결함 분석 및 첨단 산업 활용 예시	294
그림 II-2-69	양자 고스트 이미징 기술	294
그림 II-2-70	(a) 양자비선형 간섭계 실험 장치도, (b) 근적외선광과 중적외선광의 간섭 이미지	295
그림 II-2-71	양자 OCT 기술 개발 통한 깊이 정보 토모그래피 이미징	295
그림 II-2-72	양자 분광 센서 기술 통한 메탄 가스(CH_4) 이산화질소(N_2O) 가스 고감도 검출	296
그림 II-2-73	(위) 결정 초격자를 갖는 비선형 간섭계, (아래) 가스감지실험 간섭무늬 분석 결과	296
그림 II-2-74	(왼쪽) 실험적 이미지, (오른쪽) 실험 장치도	297
그림 II-2-75	단일 방출체 기반 양자이미징 기술	297
그림 II-2-76	얽힘 이광자 흡수 양자 이미징 기술 개발 통한 암세포 이미징	298
그림 II-2-77	스텔스 비행기 탐지 스파이 위성 관련 중국 사례	298
그림 II-2-78	양자 상관관계 기반 이미징 기술	299
그림 II-2-79	양자현미경을 통한 생체 시료 센싱 기술	299
그림 II-2-80	양자 라이다 신호대잡음비 향상 기술	300
그림 II-2-81	양자조명 대상 물체 이미지	300
그림 II-2-82	제브라피시 생체 시료의 양자 이미징	301
그림 II-2-83	4-모드 얽힌 압축 상태를 이용한 분산 양자 센싱 실험	302
그림 II-2-84	6개의 얽힌 광자를 이용한 분산 위상 추정 실험	303
그림 II-2-85	얽힌 스핀 압축 원자 상태를 이용한 센싱의 원자 센싱 절차	303
그림 II-2-86	양자 암호 네트워크를 이용한 지진파 센싱	304
그림 II-2-87	적응 제어 방식을 이용한 다중 위상 정밀도 실험	304
그림 II-2-88	광학 매개 증폭기를 이용한 양자 조명 실험	305
그림 II-2-89	디지털 수신기를 이용한 마이크로파 양자 조명	306
그림 II-2-90	광자 수 측정을 이용한 양자 리딩(Quantum reading) 실험	306
그림 II-2-91	극저온에서 광학 매개 증폭기 방법을 이용한 양자 조명 실험	307
그림 II-2-92	KRISS에서 개발 중인 양자중력센서	309
그림 II-2-93	KRISS의 양자중력센서 성능 비교표	309
그림 II-2-94	KRISS의 개발중인 원자분수방식의 양자중력센서	310
그림 II-2-95	양자중력센서 소형화 핵심기술 개념도 및 사진	310
그림 II-2-96	양자중력센서 적용 분야	311
그림 II-2-97	초정밀 無-위성 항법 시스템 개념도	312
그림 II-2-98	KRISS에서 개발한 원자시계	314
그림 II-2-99	개발된 초소형 Chip-Scale 원자시계	316
그림 II-2-100	Chip-Scale 원자시계 기술의 파급 분야	316
그림 II-2-101	KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 개발한 소형 고정밀 원자시계	317
그림 II-2-102	칩 상에서 제작된 원반형 실리카 광공진기	319
그림 II-2-103	양자자기장 센서의 대표적인 예	321
그림 II-2-104	양자자기장 센서 활용 예시	323
그림 II-2-105	N00N상태를 이용한 다중 위상 센싱	326
그림 II-2-106	국내 양자센서 기술현황 및 국가 지원 방식(안)	327
그림 II-2-107	국내 양자센서 발전 전망도	328

3장

그림 II-3-1	(왼쪽) Google의 Sycamore 프로세서 (오른쪽) IBM의 Eagle 프로세서 큐비트 레이아웃	336
그림 II-3-2	(위) 트랜스몬 큐비트 회로도 및 이미지 (아래) 플럭소니움 큐비트 회로도 및 이미지	339
그림 II-3-3	오류정정 코드 크기에 따른 논리 큐비트의 오류 발생률 감소	345
그림 II-3-4	알루미늄 동축케이블로 연결된 양자프로세서 모듈	350
그림 II-3-5	확장형 실리콘 큐비트를 위한 Intel – QuTech 투자 협약	351
그림 II-3-6	양자게이트의 물리적 구현을 위한 제어신호 예시	355
그림 II-3-7	학계연구소 커스텀 공정을 이용한 반도체 스핀 큐비트 소자	358
그림 II-3-8	프랑스 CEA 중심의 유럽 연구소 컨소시엄의 확장형 반도체 양자프로세서 로드맵	359
그림 II-3-9	마이크로 포획 장치	363
그림 II-3-10	(왼쪽) IonQ에서 달성한 29개 알고리듬 큐비트, (오른쪽) Quantinuum의 양자 부피 달성 경과	365
그림 II-3-11	양자컴퓨터의 확장을 위한 다양한 큐비트 개별 제어 방법	367
그림 II-3-12	이온 포획 기반 양자컴퓨터의 확장 아이디어	369
그림 II-3-13	양자컴퓨터의 활용이 예상되는 분야와 그 내용	369
그림 II-3-14	양자광원의 분류에 따른 인코딩 방법과 주요 성능 지표	370
그림 II-3-15	(왼쪽) AlN 비선형 물질로 나노 공진기를 제작해 광자쌍을 생성한 결과 (오른쪽) $LiNbO_3$ 비선형 물질로 제작한 나노 공진기	372

그림 II-3-16	(왼쪽) 프랑스 CNRS 연구소에서 개발한 양자점 기반 단일광자 광원 (오른쪽) 독일 막스 플랑크 연구소에서 개발한 15dB 압축광 생성 및 측정 장치	373
그림 II-3-17	(왼쪽) 일본 NTT에서 개발한 PPLN 도파로 기반 압축광원 (오른쪽) 이를 이용한 시간 다중화 압축광원 실험 구상도 (동경대 다케다 교수)	373
그림 II-3-18	미국 NIST에서 개발한 검출 효율 98%의 초전도 나노와이어 단일광자 검출기	375
그림 II-3-19	(왼쪽) 미국 예일대학교, (오른쪽) 독일 Munster 대학교에서 개발한 나노포토닉스에 집적화한 초전도 나노와이어 단일광자 검출기	375
그림 II-3-20	이탈리아 CNR 연구소와 네덜란드 Eindhoven University of Technology에서 공동으로 개발한, 24개 단일광자를 검출할 수 있는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기	376
그림 II-3-21	최고 수준 초전도 단일광자 검출기의 광자 개수 검출 성능 비교	376
그림 II-3-22	한국표준과학연구원의 6 광자 양자정보 실험 장치	377
그림 II-3-23	(위) 중국 USTC의 12 광자 양자얽힘 생성 실험 장치 (아래) 중국 USTC의 6 광자 18 큐비트 양자얽힘 생성 실험 장치	378
그림 II-3-24	(위) 중국 USTC의 양자점 단일광자를 이용한 20 광자 인풋 14 광자 보존 샘플링 실험 장치 (아래) 일본 동경대의 Time-Domain-Multiplexing 기반 연속변수 양자연산공간 확장 실험 장치	379
그림 II-3-25	4광자를 이용해 분자의 진동스펙트럼을 시뮬레이션하는 실험 장치와 실험 결과	381
그림 II-3-26	(왼쪽) 중국 USTC의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치 (오른쪽) 캐나다 Xanadu의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치 (아래) 가우시안 보존샘플링을 이용해 Protein docking 문제를 푸는 실험 장치	381
그림 II-3-27	Quandela에서 개발한 단일광자 기반 6 큐비트 양자컴퓨터	382
그림 II-3-28	단일 스핀들의 ^{12}C 농도에 따른 결맞음 시간 비교	383
그림 II-3-29	이온 주입 후 Praseodymium Color Center Array의 형광 이미지	384
그림 II-3-30	나노 패터닝 기술 활용 여부에 따른 나노필라 형태 구조물 제작의 차이점에 대한 도식	385
그림 II-3-31	Dynamical Decoupling 펄스 개수에 따른 결맞음 특성 변화 그래프	386
그림 II-3-32	다이아몬드 스핀을 이용한 분산형 양자정보 처리를 위한 아키텍쳐 모식도	387
그림 II-3-33	시간에 따른 핵스핀 메모리 신뢰성 그래프	388
그림 II-3-34	오류내성을 가진 논리 큐비트 기반 다이아몬드 양자 프로세서 모식도	389
그림 II-3-35	상온 Single Shot Readout 측정 방법 및 실시간 핵스핀 상태 변화 그래프	390
그림 II-3-36	레이저 주파수에 따른 형광 스펙트럼과 시간에 따른 변화 그래프	390
그림 II-3-37	NV-이온화와 회복 프로세스를 통한 Charge-Carrier 생성 과정 모식도	391
그림 II-3-38	NV 센터 Pair 모식도	392
그림 II-3-39	NV 센터와 주변 ^{13}C 원자핵스핀 간 상호작용 모식도	393
그림 II-3-40	두 개의 NV 센터 큐비트를 이용한 장거리 양자얽힘 생성 실험 모식도	394
그림 II-3-41	오류정정 큐비트 개요	399
그림 II-3-42	양자 연산 기술을 이용한 양자 메트롤로지	400
그림 II-3-43	리드버그 양자 연산시스템으로 구현한 dipolar XY model	401
그림 II-3-44	리드버그 상호작용을 이용한 spin squeezed state 형성	402
그림 II-3-45	리드버그 상호작용을 이용한 스핀 스퀴징	402
그림 II-3-46	(a) 주파수 조정 가능한 트랜스몬의 SEM 이미지 (b) 공진기 주파수와 트랜스몬 주파수 차이에 따른 T_1 결맞음 시간 변화	411
그림 II-3-47	4K 극저온 양자제어 칩	412
그림 II-3-48	스핀 큐비트용 주요 반도체 소재의 단면도	414
그림 II-3-49	반도체 스핀 큐비트 소자의 모식도	416
그림 II-3-50	반도체 스핀 큐비트 소장 공정 흐름도	417
그림 II-3-51	(왼쪽) 양자점 소자 배열의 광학현미경 사진 (가운데) GaAs Depletion-mode형 양자점 소자 + 마이크로 마그넷 구조 전자현미경 사진 (오른쪽) 완성된 Si Accumulation-mode형 다층 게이트 소자의 전자 현미경 사진	417
그림 II-3-52	대표적인 양자소자용 재료의 thermal budget	418
그림 II-3-53	금속/반도체 계면의 팽창계수 차이에 따른 스트레인의 모식도	418
그림 II-3-54	양자컴퓨터 계층별 인터페이스와 IBM의 양자컴퓨터	421
그림 II-3-55	기존 마이크로 프로세서와 양자프로세서의 소자 수와 외부 I/O핀 수 비교	422
그림 II-3-56	(a), (b) Paul 포획 장치의 예시 (c), (d) 다중 전극들을 가지며 표면 위에서 포획하는 장치	424
그림 II-3-57	국내에서 사용 중인 매크로 포획 장치들	425
그림 II-3-58	(a) 서울대에서 개발한 반도체 칩 기반의 이온 포획 장치 사진 (b) 다중 전극을 가지는 칩 포획 장치의 확대 사진	425
그림 II-3-59	(왼쪽) KRISS와 (오른쪽) 미국 일리노이 주립대학에서 개발한 시간 다중화 (Time-Multiplexing) 기반의 확정적 단일광자 생성 실험 장치	428
그림 II-3-60	(왼쪽) 고려대에서 개발한 양자점 기반 단광자 광원 (오른쪽) KIST에서 개발한 다이아몬드 점결함 기반 단광자 광원	429
그림 II-3-61	(위) KAIST에서 개발한 압축광 기반 클러스터 상태 생성 장치 (아래) 3차원 클러스터 양자상태 생성 실험 결과	430
그림 II-3-62	㈜우리로에서 상용화에 성공한 InGaAs APD 기반 단일광자 검출 소자	431
그림 II-3-63	(위) KIST에서 구현한 집적광학계 기반 양자간섭 실험 (아래) KIST에서 개발한 $LiNbO_3$ 기반 양자키분배 집적광소자	432

그림 II-3-64 KIST에서 구현한 양자광학 양자 시뮬레이터와 이원자 분자의 바닥에너지 계산 결과 433
그림 II-3-65 한국공학대학교가 보유한 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비 434
그림 II-3-66 구축 중인 초고진공 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비 434
그림 II-3-67 KIST에서 개발한 다이아몬드 나노구조물을 이용한 NV 센터 광자 포집효율 증대 구조물 436
그림 II-3-68 2023년 퀀텀코리아에서 공개한 5큐비트 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 437
그림 II-3-69 공초점 현미경 시스템 모식도와 실물 사진 437
그림 II-3-70 초점 현미경의 다이아몬드 샘플과 자기장 및 마이크로웨이브 인가 방법 438
그림 II-3-71 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 제어 프로그램 438
그림 II-3-72 다이아몬드 NV 센터 부근 질소 및 탄소동위체를 포함한 격자 모형 439
그림 II-3-73 다이나믹 디커플링 시퀀스와 반복 주기에 따른 중첩 시간 증가 확인 그래프 440
그림 II-3-74 다이나믹 디커플링 결과 440
그림 II-3-75 핵스핀 초기화 전후 NV 센터의 Ramsey 신호 변화 441
그림 II-3-76 근접한 두 개의 NV 센터 간의 결합 모식도 442
그림 II-3-77 NV 센터 주변의 핵스핀 모식도 443
그림 II-3-78 광자를 이용한 큐비트 시스템의 확장 444
그림 II-3-79 리드버그 원자 배열로 구성한 platonic graph 450

III 양자기술 소재·부품·장비 산업생태계 동향

1장

그림 III-1-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자통신) 488
그림 III-1-2 QKD를 이용한 통신망 구성도 489
그림 III-1-3 유사 단일광자 생성 개념도 490
그림 III-1-4 포아송(Poisson) 분포 491
그림 III-1-5 BB84 프로토콜 예시 492
그림 III-1-6 유선 2-Way 방식 위상제어를 이용한 BB84 프로토콜 장비구현 예시 492
그림 III-1-7 후처리 흐름도 494
그림 III-1-8 반도체 레이저 다이오드 기본 구성도 495
그림 III-1-9 APD의 두 모드(Linear and Geiger Mode) 497
그림 III-1-10 가이거 모드(Geiger mode)와 게이트 모드(Gate mode) 497
그림 III-1-11 InP 기판 498
그림 III-1-12 실리카 PLC 웨이퍼 499
그림 III-1-13 (a) 실리콘 결정 구조, (b) 실리콘 잉곳과 웨이퍼, (c) 반도체 공정이 진행된 실리콘 기반 전자(또는 광)소자의 예 500
그림 III-1-14 (왼쪽) $LiNbO_3$의 분자구조, (오른쪽) 웨이퍼 501
그림 III-1-15 초전도 소재 이용한 단일광자 검출기 작동 원리 502
그림 III-1-16 Meander 구조의 초전도 소재 503
그림 III-1-17 SMF 클래딩 규격 504
그림 III-1-18 실리카 기반 SMF의 파장에 따른 손실 특성 504
그림 III-1-19 SMF의 구조 505
그림 III-1-20 레이저 출력 방향에 따른 분류 506
그림 III-1-21 연속 발진 모드와 펄스 발진 모드의 시간에 따른 출력 파워 507
그림 III-1-22 LD의 구조 507
그림 III-1-23 III-V족 화합물 반도체 격자 상수 vs 밴드갭 에너지 508
그림 III-1-24 III-V족 화합물 반도체 기반 단일광자 검출소자 510
그림 III-1-25 빛 진행 방향과 전압이 가해지는 방향에 따른 포켈 셀 분류 511
그림 III-1-26 음향 광학 변조기의 빛 투과 특성 512
그림 III-1-27 전기 광학 변조기의 진폭변조 방식 513
그림 III-1-28 가변광감쇄기의 광출력 파워 변경 방식 514
그림 III-1-29 광섬유 기반 VOA 515
그림 III-1-30 MEMS 기반 VOA 515
그림 III-1-31 광반도체 공정으로 제작된 광도파로 소자 예시 516
그림 III-1-32 마하 젠더 간섭계 구조 517
그림 III-1-33 광섬유 구조를 이용한 마이켈슨 간섭계 517
그림 III-1-34 FRM이 부착되어 제작된 마이켈슨 간섭계 518
그림 III-1-35 QKD 장치 구성 (2-Way 방식 예) 520
그림 III-1-36 주요 QKD 장비 예 520
그림 III-1-37 양자암호통신 네트워크 구성도 521
그림 III-1-38 IDQ의 QRNG 개념도 524
그림 III-1-39 반투명 거울을 이용한 QRNG 개념도 524

그림 III-1-40 이와이엘의 방사성 동위원소를 이용한 QRNG 개념도 525
그림 III-1-41 이와이엘의 비화단말기 528
그림 III-1-42 이와이엘의 구간 암호화 장치 529
그림 III-1-43 옥타코의 지문인식 카드 'EzQuant' 529

2장
그림 III-2-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자센싱) 534
그림 III-2-2 (왼쪽) 세슘 앰풀, (오른쪽) 알칼리 메탈 디스펜서 538
그림 III-2-3 (왼쪽) 시트 형태 자기 차폐 합금, (오른쪽) 다양한 형태의 자기차폐 합금 539
그림 III-2-4 레이저 다이오드 540
그림 III-2-5 gMOT 개념도와 사진 543
그림 III-2-6 제작된 MEMS 증기셀 구조와 사진 550
그림 III-2-7 기존 전기장센서와 양자 전기장센서 비교 553
그림 III-2-8 (왼쪽) 양자 전기장센서, (오른쪽) 전통적 전자파 수신기의 일반적 구성 553
그림 III-2-9 (왼쪽) 원자를 리드버그 상태로 들뜨게 하는 과정 554
(오른쪽) 루비듐과 세슘을 리드버그 상태로 들뜨게 하는 과정
그림 III-2-10 이상적인 상황에서 투과된 조사광에 의한 투과 스펙트럼 555
그림 III-2-11 실린더형 원자증기셀 557
그림 III-2-12 조사광 및 분석광용 레이저 558
그림 III-2-13 SERF-OPM 시스템 구성 563
그림 III-2-14 다이아몬드 NV 센서 구성 565
그림 III-2-15 DD 펄스열을 이용한 AC 자기장 센싱 기술 567
그림 III-2-16 Type 1b 단결정 다이아몬드 568
그림 III-2-17 Electronic-grade 단결정 다이아몬드 569
그림 III-2-18 Electronic-grade 단결정 다이아몬드 569
그림 III-2-19 MEMS 증기셀 제품 570
그림 III-2-20 자기차폐 챔버 571
그림 III-2-21 High Index 반구 렌즈 573
그림 III-2-22 DPSS 532 nm 레이저 574
그림 III-2-23 Microwave 생성기 575
그림 III-2-24 High-speed Timing Generator 577
그림 III-2-25 양자광학 이미징 기술의 분류 및 구성요소 580
그림 III-2-26 (왼쪽) 서브-샷-노이즈 양자 이미징, (오른쪽) 양자 고스트 이미징 원리 모식도 580
그림 III-2-27 자발적 매개 하향변환 및 위상정합 조건 581
그림 III-2-28 비선형 크리스탈 종류에 따른 자발적 매개 하향변환의 구분 582
그림 III-2-29 비선형 크리스탈의 종류에 따른 굴절률 타원체(Index ellipsoid) 표현 583
그림 III-2-30 비선형 크리스탈 기반 광자쌍 광원 생성 방법의 구분 584
그림 III-2-31 단일 방출체 광원 생성원리 585
그림 III-2-32 (a) 준위상정합을 위한 비선형 크리스탈의 분극반전 영역 및 격자주기 588
(b) 준위상정합 조건 (c) 위상정합 형태에 따라 파장변환된 광의 생성 효율
그림 III-2-33 반도체 양자점 단면 모식도 589
그림 III-2-34 독일 QuTools의 Entanglement Demonstrator 591
그림 III-2-35 중국 QuantumCTek의 편광 얽힘 광자쌍 발생기 592
그림 III-2-36 스위스 IDQ의 id350 PPNL 광자쌍 광원 592
그림 III-2-37 프랑스 AUREA의 얽힘 광자 광원 592
그림 III-2-38 글로벌 마켓 Thorlabs에서 판매되고 있는 광자쌍 광원 593
그림 III-2-39 OZ Optics에서 판매되고 있는 다양한 양자광원 593
그림 III-2-40 미국 Qubitekk의 얽힘광자 광원 모듈 QBTK001 594
그림 III-2-41 싱가포르 S-fifteen Instruments의 얽힘광자 광원 모듈 EPPS-O 594
그림 III-2-42 (왼쪽) Quandela, (오른쪽) Sparrow Quantum의 단일광자 광원 595
그림 III-2-43 Quandela Stand-alone 단일광자 광원 시스템 Prometheus 596
그림 III-2-44 양자 광자쌍 이용한 광시야 기반 서브-샷-노이즈 양자현미경 기술 597
그림 III-2-45 압축광 이용한 콘포컬 기반 서브-샷-노이즈 양자현미경 기술 598
그림 III-2-46 HOM 간섭 이용한 신호대잡음비 향상 양자현미경 599
그림 III-2-47 생체 시료 이미징 신호대잡음비 및 분해능 향상 양자현미경 599
그림 III-2-48 고속(video-rate) 미관측 광자 양자 이미징 시스템 600
그림 III-2-49 얽힘 간섭 기반 양자 라이다 통한 신호대잡음비 향상 기술 600
그림 III-2-50 양자 고스트 이미징 기술 601
그림 III-2-51 광자 상관관계 기반 양자 라이다 잡음 제거 기술 601

3장

그림 III-3-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자컴퓨팅) 609
그림 III-3-2 Low Noise Factory사의 LNF-LNC4_8C 614
그림 III-3-3 Quantuware사의 Crescendo TWPA 615
그림 III-3-4 Low Noise Factory사의 Dual Junction Isolator/Circulator 616
그림 III-3-5 K&L Microwave사의 Tubular Low-pass Filter 617
그림 III-3-6 Quantum Microwave사의 IF filter, QMC-CRYOIRF-002 618
그림 III-3-7 (왼쪽) BlueFors사의 LD400, (오른쪽) BlueFors사의 XLD1000s 621
그림 III-3-8 Zurich Instruments사의 HDAWG 622
그림 III-3-9 Keysight사의 E8257D 623
그림 III-3-10 (왼쪽) Zurich Instruments사의 SHFQC, (오른쪽) Keysight사의 Quantum Control System 624
그림 III-3-11 반도체 스핀 큐비트용 실리콘 웨이퍼 예시 629
그림 III-3-12 Cosmic Microwave Technology사의 CITLF2 631
그림 III-3-13 Delft-circuits사의 Cri/oFlex-1 – 3 632
그림 III-3-14 Intel사의 Horse Ridge 633
그림 III-3-15 Oxford Instruments사의 Triton Dilution Refrigerator 634
그림 III-3-16 AnaPico사의 APMS40G-4 636
그림 III-3-17 Zurich Instruments사의 HDAWG 637
그림 III-3-18 Quantum Machines사의 OPX+ 637
그림 III-3-19 Quantum Machines사의 Octave 638
그림 III-3-20 온칩 실리콘 도파로를 이용한 구별 불가능한 양자광원 구현 651
그림 III-3-21 광섬유를 이용한 사광자 혼합 652
그림 III-3-22 질화 실리콘에 집적화된 가시광선 양자 광원 653
그림 III-3-23 리튬 나이오베이트 박막 기반 광소자 654
그림 III-3-24 질화 알루미늄 기반 전기변조 소자 655
그림 III-3-25 탄탈라 소재 기반 저손실 광소자 656
그림 III-3-26 4μm 광섬유와 광도파로 커플링 후 패키징한 소자 657
그림 III-3-27 대표적인 광학부품 제작 및 판매 회사인 Thorlabs에서 판매 중인 광 분할기 658
그림 III-3-28 PPLN을 이용한 SPDC 개략도 659
그림 III-3-29 Thorlabs에서 판매 중인 얽힘 광원 생성장비 660
그림 III-3-30 나노와이어를 이용한 단일광원 검출 개략도 660
그림 III-3-31 Time Tagger를 이용한 측정 예시 661
그림 III-3-32 APD를 패키징한 모듈 662
그림 III-3-33 파운드리 서비스 가능한 모듈 663
그림 III-3-34 실리콘 파운드리 서비스 예시 664
그림 III-3-35 리튬 나이오베이트 파운드리 서비스 현황 665
그림 III-3-36 탄탈라 파운드리 서비스 가능 제품군 666

IV 양자기술 통계

1장

그림 IV-1-1 양자통신 연도별 논문 수 (2016~2020년) 708
그림 IV-1-2 양자통신 기관별 & 한국 논문 수 (2016~2020년) 710
그림 IV-1-3 양자통신 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년) 711
그림 IV-1-4 양자센서 연도별 논문수 (2016~2020년) 715
그림 IV-1-5 양자센서 기관별 논문수 (2016~2020년) 718
그림 IV-1-6 양자센서 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년) 719
그림 IV-1-7 양자컴퓨터 연도별 논문수 (2016~2020년) 722
그림 IV-1-8 양자컴퓨팅 기관별 논문수 (2016~2020년) 725
그림 IV-1-9 양자컴퓨터 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년) 726

2장

그림 IV-2-1 양자기술 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년) 733
그림 IV-2-2 양자기술의 연도별 출원 건수 (2002~2021년) 735
그림 IV-2-3 양자기술 분야 출원인별 국내외 출원 특허 수 (2014년~2020년) 737
그림 IV-2-4 산업 분야별 전체 기술의 연도별 특허출원 건수 (2002~2021년) 740
그림 IV-2-5 산업 분야별 전체 기술 및 양자기술의 이전 기간 대비 출원 증가율 (2002~2021년) 741
그림 IV-2-6 양자통신 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 743
그림 IV-2-7 양자통신 분야 국가별 특허 증가율 744
그림 IV-2-8 양자통신 분야 국가별 특허 점유율 745
그림 IV-2-9 양자통신 분야 출원 특허 수 (2014~2020년) 746

그림 IV-2-10 양자통신 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 747
그림 IV-2-11 양자통신의 연도별 출원 건수 (2002~2021년) 748
그림 IV-2-12 양자통신 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년) 749
그림 IV-2-13 양자통신 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년) 750
그림 IV-2-14 양자통신 분야 국내 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년) 751
그림 IV-2-15 양자통신 분야 국가별 외국인 출원 비중 752
그림 IV-2-16 양자통신 분야 국가별 IP4 출원 비중 753
그림 IV-2-17 양자통신 분야 국가별 HHI (2010~2019년) 754
그림 IV-2-18 양자통신 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS (2010~2019년) 754
그림 IV-2-19 양자통신 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년) 755
그림 IV-2-20 양자센싱·계측 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 758
그림 IV-2-21 양자센싱·계측 분야 국가별 특허 증가율 759
그림 IV-2-22 양자센싱·계측 분야 국가별 특허 점유율 759
그림 IV-2-23 양자센싱·계측 분야 출원 특허 수(2014~2020년) 760
그림 IV-2-24 양자센싱·계측 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 762
그림 IV-2-25 양자센싱의 연도별 출원 건수 (2002~2021년) 762
그림 IV-2-26 양자센싱·계측 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년) 764
그림 IV-2-27 양자센싱·계측 분야의 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년) 765
그림 IV-2-28 양자센싱·계측 분야 국가별 외국인 출원 비중 767
그림 IV-2-29 양자센싱·계측 분야 국가별 IP4 출원 비중 767
그림 IV-2-30 양자센싱·계측 분야 국가별 HHI (2010~2019년) 768
그림 IV-2-31 양자센싱·계측 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년) 768
그림 IV-2-32 양자센싱·계측 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년) 769
그림 IV-2-33 양자컴퓨팅 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 771
그림 IV-2-34 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 증가율 772
그림 IV-2-35 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 점유율 773
그림 IV-2-36 양자컴퓨팅 분야 출원 특허 수 (2014~2020년) 774
그림 IV-2-37 양자컴퓨팅 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 775
그림 IV-2-38 양자컴퓨팅의 연도별 출원 건수 (2002~2021년) 776
그림 IV-2-39 양자컴퓨팅 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년) 777
그림 IV-2-40 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년) 778
그림 IV-2-41 양자컴퓨팅 분야 국가별 외국인 출원 비중 780
그림 IV-2-42 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 출원 비중 781
그림 IV-2-43 양자컴퓨팅 분야 국가별 HHI (2010~2019년) 781
그림 IV-2-44 양자컴퓨팅 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS (2010~2019년) 782
그림 IV-2-45 양자컴퓨팅 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년) 783
그림 IV-2-46 양자기술 특허의 세부 기술별 IP5 국가와 PCT 등록 비중 (2002~2021년) 785

3장 그림 IV-3-1 기관유형별 2023년 국내 전체 양자기술 전문인력 현황 (학계, 2022년 기준) 792
그림 IV-3-2 기관유형별 2023년 국내 전체 양자기술 핵심인력 현황 (학계, 2022년 기준) 792
그림 IV-3-3 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용) 793
그림 IV-3-4 기술분야별 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 793
그림 IV-3-5 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용) 794
그림 IV-3-6 기술분야별 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 795
그림 IV-3-7 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준) 795
그림 IV-3-8 학위별 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준) 796
그림 IV-3-9 기술분야별 국내 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033) (종합) 797
그림 IV-3-10 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033) 798
그림 IV-3-11 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율 799
그림 IV-3-12 학위별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율 799
그림 IV-3-13 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 학위별 비율 800
그림 IV-3-14 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033) 801
그림 IV-3-15 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율 802
그림 IV-3-16 학위별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율 802
그림 IV-3-17 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 학위별 비율 803
그림 IV-3-18 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망 (2022년 기준) 804
그림 IV-3-19 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망(석 · 박사) (2022년 기준) 805

Ⅴ 양자기술 산업화 모델

2장

그림 V-2-1	양자보안 솔루션 53개 기업	823
그림 V-2-2	중국의 묵자(Micius)호 양자통신 및 과정	825
그림 V-2-3	드론용 양자암호화 모듈(케이씨에스)	827
그림 V-2-4	얽힘 기반 양자네트워크 환경 (NASA)	829
그림 V-2-5	국내외 상용 양자 키 분배 시스템 소형화 동향	830
그림 V-2-6	EYL 개발 초소형 암호칩과 퀀텀크립토칩	831
그림 V-2-7	양자암호통신을 포함한 양자인터넷 개념도	832
그림 V-2-8	테라헤르츠(THz) 주파수 범위의 단거리 무선 통신용 칩 규모 시스템	834
그림 V-2-9	DARPA와 SECOQC 양자네트워크	835
그림 V-2-10	중국 양자 백본 네트워크 및 유무선 양자암호 시험망	836
그림 V-2-11	국내 양자통신 현황(KT, SK텔레콤)	837
그림 V-2-12	양자암호통신 테스트베드 구축현황	837
그림 V-2-13	양자암호 적용 사례(LG유플러스)	838
그림 V-2-14	퀀텀코리아 엔드투엔드 데이터 플랫폼	840
그림 V-2-15	IP카메라 해킹 및 양자기술 기반 보안문제 차단 개발	841
그림 V-2-16	양자가 가져올 미래 공장	842
그림 V-2-17	실시간 압연기 스핀들 응력 모니터링 체계(포스코)	843
그림 V-2-18	클라우드 기반 P-HIS	845
그림 V-2-19	양자암호통신 클라우드 의료서비스 구성도	846
그림 V-2-20	의료 사이버 보안 시스템 구조 모델	847
그림 V-2-21	미국 금융망 양자통신 적용 사례	849
그림 V-2-22	블록체인과 양자컴퓨팅 비교	850
그림 V-2-23	미국 아마존 배송 드론 및 로봇	851
그림 V-2-24	한국 물류 사각지대 운영 드론 서비스 모델	852
그림 V-2-25	양자인터넷의 네트워크 계층	853
그림 V-2-26	양자 환경 구축을 위한 전문 계측 장비군 (Keysight)	855

3장

그림 V-3-1	양자센싱의 주요 산업 적용 영역	859
그림 V-3-2	영국 양자기술 산업 생태계 관련 주요기업	861
그림 V-3-3	양자센서의 산업화 동향	862
그림 V-3-4	원자스핀 자이로스코프	863
그림 V-3-5	자기장을 이용한 탐지 체계	865
그림 V-3-6	RF와 마이크로파 센서	865
그림 V-3-7	해외 양자 이미징 센서 적용 사례	866
그림 V-3-8	무선 주파수 통신 양자 센서 (US ARMY)	867
그림 V-3-9	양자레이더 원리 및 스텔라 탐지 모식도와 영상	868
그림 V-3-10	양자라이다를 이용한 파이프(오른쪽)의 3D 이미지와 물 속에 잠긴 파이프의 라이다로 측정한 영상(왼쪽)	869
그림 V-3-11	양자항법장치 수송용 컨테이너(우)와 양자항법장치(좌)	870
그림 V-3-12	전 세계 우주 감시 네트워크	871
그림 V-3-13	OLED 기술 적용 양자 센서	872
그림 V-3-14	자기장과 온도를 정밀측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서	873
그림 V-3-15	양자센싱 기술 응용(배터리/반도체 검사)	874
그림 V-3-16	양자기반 가스 누출 영상화 장비(한국 퀀텀센싱)	875
그림 V-3-17	한국 양자기반 가스센싱 기술	876
그림 V-3-18	기존 PCR 진단과 양자 분자 진단 기술 차이점	877
그림 V-3-19	뇌자도 측정장치	876
그림 V-3-20	양자현미경(호주 퀸즈랜드대학교)	880
그림 V-3-21	수소 분자의 양자센서 전환 시연(미국 캘리포니아대학교)	881
그림 V-3-22	양자 MRI를 통한 미세암 진단	882
그림 V-3-23	MRI 스캔 이미지	883
그림 V-3-24	양자 MRI 응용 예	884
그림 V-3-25	고스트이미징 측정 방법	887
그림 V-3-26	항공 시스템 모니터링 및 유지보수	888
그림 V-3-27	자율주행을 위한 단일 광자 라이다	889
그림 V-3-28	지하통신시설물 피해 현장	890
그림 V-3-29	지하시설물 모니터링 기술	891
그림 V-3-30	칩 스케일 원자시계(미국 NIST)	893
그림 V-3-31	뇌자도 측정장치(KAIST)	893

	그림 V-3-32	절대 양자 중력계 (하와이 지진 연구소)	894
	그림 V-3-33	양자센서의 에너지 응용 분야	895
	그림 V-3-34	가스 모니터링 시스템	897
4장	**그림 V-4-1**	양자컴퓨팅 시장지도(2022년)	902
	그림 V-4-2	양자컴퓨팅 시장지도(2023년)	903
	그림 V-4-3	양자컴퓨터 활용이 기대되는 분야	904
	그림 V-4-4	자동차용 배터리 개발 (현대자동차)	908
	그림 V-4-5	양자기술이 도입된 전자 부품 제조 시설 사례	909
	그림 V-4-6	화학 물질 양산 프로세스	910
	그림 V-4-7	CODEX 다중 조직 영상화 이미지(미국 스탠포드 의과대학교)	911
	그림 V-4-8	CyTOF 실험 방법 및 데이터 클러스터	911
	그림 V-4-9	양자컴퓨터 적용 사례 : 암치료 접근 방법 (미국 텍사스대학교)	912
	그림 V-4-10	양자컴퓨터 적용 사례(신약 개발)	913
	그림 V-4-11	세계 최초 의료 연구 전용 양자컴퓨터	915
	그림 V-4-12	양자컴퓨팅 기반 맞춤 의료 사례	917
	그림 V-4-13	맞춤 의료의 포괄적 및 정확성에 근거한 접근방식	918
	그림 V-4-14	적응 방사선 치료 (양자 심층 강화 학습)	919
	그림 V-4-15	게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역	920
	그림 V-4-16	양자 어닐링을 이용한 게놈 조립	920
	그림 V-4-17	양자컴퓨터 지원 약물 설계도	921
	그림 V-4-18	단백질 서열 분석을 위한 워크플로우 (Quantum Si)	923
	그림 V-4-19	양자컴퓨터 적용 사례(독일 Daimler AG)	926
	그림 V-4-20	수소 연료 전지 개발 양자 프로세서와 개념	927
	그림 V-4-21	양자역학 계산을 활용한 촉매 설계	927
	그림 V-4-22	화학산업의 양자컴퓨팅 적용 단계	928
	그림 V-4-23	JP Morgan Chase, Toshiba, Ciena의 블록체인 보호 사례	931
	그림 V-4-24	양자컴퓨팅 활용 금융 플랫폼	932
	그림 V-4-25	기존과 양자 구현에 따른 시장 위험 계산 비교	934
	그림 V-4-26	양자컴퓨터 적용 사례(Volksagen)	935
	그림 V-4-27	양자컴퓨터 적용 사례(Airbus)	938
	그림 V-4-28	양자컴퓨팅 활용 (Airbus)	938
	그림 V-4-29	게이트 α에서의 총 환승 시간 비용 계산	939
	그림 V-4-30	항공 화물 적재 최적화	940
	그림 V-4-31	항공 운항 시스템 최적화	941
	그림 V-4-32	게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역	943
	그림 V-4-33	일본 Fujitsu의 자동차 생산 지원 최적화	944
	그림 V-4-34	디지털 어닐러를 이용한 물류 자원 최적화 프로세스	945
	그림 V-4-35	UAM 교통체계 및 드론시스템	946
	그림 V-4-36	사이버-물리적 전력 시스템	948
	그림 V-4-37	일기예보 분야의 양자컴퓨팅을 위한 수학적 모델	951
5장	**그림 V-5-1**	양자기술이 가져올 미래상	956
	그림 V-5-2	양자 가치 사슬	957

VI 글로벌 양자분야 주요 산학연 협의체 동향

1장

그림 VI-1-1	양자정보과학기술(QIST) 현황 및 QED-C 목표	969
그림 VI-1-2	QED-C 조직도	969
그림 VI-1-3	QED-C 참여 기관 현황 (2022년 5월과 2023년 9월 비교)	970
그림 VI-1-4	QED-C 양자시장 대분류 및 소분류 (2023년 9월 기준)	971
그림 VI-1-5	응용/시스템 분야의 소분류 및 관련 기업명	972
그림 VI-1-6	하드웨어 분야의 소분류 및 관련 기업명	972
그림 VI-1-7	서비스 분야의 소분류 및 관련 기업명	973
그림 VI-1-8	소프트웨어 및 실수요자 분야의 소분류 및 관련 기업명	973
그림 VI-1-9	QED-C 참여 대학교 (미국, 2022년 기준)	989
그림 VI-1-10	QED-C 정부 파트너 및 연방 자금 지원 R&D 센터 회원	993
그림 VI-1-11	페르미 국립연구소 양자연구소 협력 기관	994
그림 VI-1-12	로렌스 버클리 국립 연구소 양자기술 관련 연구 그룹	995
그림 VI-1-13	오크리지 국립 연구소 양자 연구	996
그림 VI-1-14	샌디아 국립 연구소 양자기술 연구 분야	997
그림 VI-1-15	캐나다 QIC 활동 목표	999
그림 VI-1-16	QIC-OCI 파트너십 체결(2022)	1001

2장

그림 VI-2-1	QuIC 실무 그룹과 역할	1009
그림 VI-2-2	InstituteQ 조직도 및 구성원	1021
그림 VI-2-3	BusinessQ 생태계 플레이어	1023
그림 VI-2-4	BusinessQ 주요 기능	1024
그림 VI-2-5	QUTAC Focus	1028
그림 VI-2-6	QUTAC 집중 영역별 조치	1029
그림 VI-2-7	QUTAC 조력자	1029
그림 VI-2-8	QUTAC members	1030
그림 VI-2-9	QUTAC의 24개 핵심성과지표 (KPI)	1032
그림 VI-2-10	UKQuantum 회원 기관 및 기업	1034
그림 VI-2-11	UKQuantum 실무 그룹	1034

3장

그림 VI-3-1	전세계 양자 협의체 (2023년 10월 기준)	1037
그림 VI-3-2	일본 Q-STAR 활동 범위	1038
그림 VI-3-3	일본 Q-STAR 조직도	1039
그림 VI-3-4	호주 AQA 창립 기업들	1046
그림 VI-3-5	호주 AQA 회원 기업 및 기관	1048
그림 VI-3-6	호주 AQA 제휴 프로그램 가입 기업	1048

표 목차

Ⅰ 양자기술 동향

1장

표 Ⅰ-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망 32
표 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비 33
표 Ⅰ-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비 34
표 Ⅰ-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망 35
표 Ⅰ-1-5 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망 38
표 Ⅰ-1-6 수요산업별 글로벌 기타 양자암호통신 시장 전망 39
표 Ⅰ-1-7 글로벌 양자센싱 부문별 시장 전망 40
표 Ⅰ-1-8 주요국 및 지역의 양자센싱 시장 전망 41
표 Ⅰ-1-9 부문별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망 43
표 Ⅰ-1-10 부문별 글로벌 양자자력계 시장 전망 44
표 Ⅰ-1-11 수요산업별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망 45
표 Ⅰ-1-12 수요산업별 글로벌 양자자력계 시장 전망 46
표 Ⅰ-1-13 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 전망 47
표 Ⅰ-1-14 국내 양자컴퓨팅 시장 전망 48
표 Ⅰ-1-15 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 49
표 Ⅰ-1-16 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 50
표 Ⅰ-1-17 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 51

2장

표 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책 54
표 Ⅰ-2-2 미국 양자이니셔티브 프로그램 구성요소 57
표 Ⅰ-2-3 미국 양자정보과학 네트워크 전략 비전의 장단기 목표 58
표 Ⅰ-2-4 연방기관별 양자기술 연구개발 현황 59
표 Ⅰ-2-5 미국 주요 양자정보과학(QIS) 연구센터 현황 60
표 Ⅰ-2-6 미국 양자인터넷 로드맵 5단계 60
표 Ⅰ-2-7 양자 선언문의 분야별 기술적 목표 62
표 Ⅰ-2-8 유럽 양자기술 발전 단기 · 중장기 로드맵 63
표 Ⅰ-2-9 2030 Digital Compass 목표 64
표 Ⅰ-2-10 영국의 NQTP 사업별 추진동향 67
표 Ⅰ-2-11 프랑스 국가 양자기술 전략의 6개 기술 축과 1개 보조 축 70
표 Ⅰ-2-12 프랑스 PEPR의 10대 우선과제 71
표 Ⅰ-2-13 캐나다에서 추진 중인 양자 R&D 프로젝트 73
표 Ⅰ-2-14 일본의 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략 주요내용 77
표 Ⅰ-2-15 일본의 양자기술 혁신로드맵 구성 및 예시 78
표 Ⅰ-2-16 2020년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관 83
표 Ⅰ-2-17 2021년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관 84
표 Ⅰ-2-18 2022년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관 84
표 Ⅰ-2-19 양자기술 R&D 투자전략의 단계별 추진 목표 85
표 Ⅰ-2-20 양자센서 기술목표 86
표 Ⅰ-2-21 양자팹 구축 사업 개요 86
표 Ⅰ-2-22 미래양자융합포럼 위원회 및 분과별 역할 88

3장

표 Ⅰ-3-1 국가별 양자기술의 공공·민간 투자 규모(2001~2022년) 96
표 Ⅰ-3-2 NSF 연도별 양자정보과학 R&D 예산 100
표 Ⅰ-3-3 DOE 양자정보과학 R&D 예산 101
표 Ⅰ-3-4 DOE 연도별 양자정보과학 R&D 예산 102
표 Ⅰ-3-5 EU 양자플래그십 1단계 과제 104
표 Ⅰ-3-6 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 108
표 Ⅰ-3-7 캐나다 국가양자전략 투자 예산 110
표 Ⅰ-3-8 양자제어 국가중대과학연구프로그램 중앙재정 조달 자금(2008~2017) 110
표 Ⅰ-3-9 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 중앙재정 조달 자금(2016~2020) 111

4장 표 I-4-1 ITU-T 연구그룹(Study Group, SG) 구조 119
표 I-4-2 ITU-T SG13 표준개발 현황 121
표 I-4-3 ITU-T SG17 표준개발 현황 123
표 I-4-4 ITU-T FG QIT4N 표준개발 현황 124
표 I-4-5 ITU-T SG11 표준개발 현황 125
표 I-4-6 ETSI QKD ISG 표준개발 현황 127
표 I-4-7 ISO/IEC JTC1 SC27 표준개발 현황 129
표 I-4-8 ISO/IEC JTC1 WG14 표준개발 현황 129
표 I-4-9 IEEE SA 표준개발 현황 130
표 I-4-10 IRTF QIRG 표준개발 현황 131
표 I-4-11 CEN/CENELEC FGQT 표준개발 현황 132
표 I-4-12 TTA PG201 표준개발 현황(PG225로 이관) 134
표 I-4-13 TTA PG501 표준개발 현황 135
표 I-4-14 TTA PG503 표준개발 현황 135
표 I-4-15 TTA PG504 표준개발 현황 135
표 I-4-16 TTA PG225 표준개발 현황(PG201에서 이관 및 자체개발) 136

II 양자기술 R&D 동향

1장 표 II-1-1 디코이 상태 QKD 실험과 성능 목록 157
표 II-1-2 현재까지 알려진 공격 방법 194
표 II-1-3 단일광자의 편광 상태를 이용한 BB84 QKD 프로토콜의 과정 201
표 II-1-4 2020년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목 222
표 II-1-5 2021년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목 222

2장 표 II-2-1 원자간섭계 기반의 양자 중력 및 관성 센싱 기술 개발 현황 247

3장 표 II-3-1 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 세부 사항에 대한 기록 361
표 II-3-2 양자 소인수 분해 문제에 대한 계산 복잡도 비교: $N=2^n$ 405
표 II-3-3 이온 주입 시점에 따른 장단점 435

III 양자기술 소재·부품·장비 산업생태계 동향

1장 표 III-1-1 소재·부품·장비·서비스 정의 487
표 III-1-2 유사 단일광자 상태에서 펄스 당 발견된 광자 수의 확률 491
표 III-1-3 유선 2-Way 방식 위상제어를 이용해 검출된 부호화 값 예시 493
표 III-1-4 후처리 목록 및 사용되는 알고리듬 예시 494
표 III-1-5 대표적인 소재(InP 웨이퍼) 공급처 498
표 III-1-6 대표적인 소재(에피택셜 웨이퍼) 공급처 498
표 III-1-7 대표적인 소재(Zn_3P_2) 공급처 498
표 III-1-8 대표적인 소재(SiO_2) 공급처 499
표 III-1-9 대표적인 소재(Si) 공급처 500
표 III-1-10 대표적인 소재($LiNbO_3$) 공급처 501
표 III-1-11 대표적인 소재(초전도 소재) 공급처 503
표 III-1-12 대표적인 부품(단일 모드 광섬유) 공급처 505
표 III-1-13 LD 물질들의 출력 파장에 따른 용도 506
표 III-1-14 대표적인 부품(레이저 다이오드) 공급처 507
표 III-1-15 대표적인 부품(아발란치 포토 다이오드) 공급처 510
표 III-1-16 대표적인 부품(위상변조기) 공급처 512
표 III-1-17 대표적인 부품(강도변조기) 공급처 514
표 III-1-18 대표적인 부품(가변광감쇄기) 공급처 516
표 III-1-19 대표적인 장비(QKD) 공급처 520
표 III-1-20 대표적인 장비(KMS) 공급처 522
표 III-1-21 국내외 주요기관별 QRNG 구현방식 525
표 III-1-22 QRNG 개발 시의 권장사항 526

	표 III-1-23	대표적인 부품(QRNG) 공급처	526
	표 III-1-24	대표적인 부품(암호모듈) 공급처	527
	표 III-1-25	대표적인 장비(Q-VPN) 공급처	527
	표 III-1-26	대표적인 장비(스마트폰) 공급처	528
	표 III-1-27	대표적인 생체인증 솔루션 공급처	529
2장	표 III-2-1	양자중력계 구현을 위한 주요 소부장	537
	표 III-2-2	대표적인 소재(원자 소스) 공급처	538
	표 III-2-3	대표적인 소재(자기차폐 합금) 공급처	539
	표 III-2-4	대표적인 부품(레이저 다이오드) 공급처	540
	표 III-2-5	대표적인 부품(원자증기셀) 공급처	541
	표 III-2-6	대표적인 부품(냉각 원자빔 소스) 공급처	541
	표 III-2-7	대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처	542
	표 III-2-8	대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처	542
	표 III-2-9	대표적인 부품(PM 광섬유) 공급처	542
	표 III-2-10	대표적인 부품(광섬유 커플러 및 콜리메이터) 공급처	542
	표 III-2-11	대표적인 부품(gMOT용 회절격자) 공급처	543
	표 III-2-12	대표적인 부품(잔류가스 분석기) 공급처	544
	표 III-2-13	대표적인 부품(진공 압력 게이지) 공급처	544
	표 III-2-14	대표적인 부품(이온 게터 진공펌프) 공급처	544
	표 III-2-15	대표적인 부품(저잡음 발진기) 공급처	545
	표 III-2-16	대표적인 부품(주파수 합성기) 공급처	545
	표 III-2-17	대표적인 장비(가변 및 고출력 다이오드 레이저) 공급처	546
	표 III-2-18	대표적인 장비(파형 생성기) 공급처	546
	표 III-2-19	대표적인 장비(제진대) 공급처	546
	표 III-2-20	원자분광셀 기반 원자시계 구현에 필요한 소부장	549
	표 III-2-21	대표적인 부품(VCSEL) 공급처	551
	표 III-2-22	대표적인 부품(원자증기셀) 공급처	557
	표 III-2-23	대표적인 부품(이득 조정가능 검출기) 공급처	557
	표 III-2-24	대표적인 장비(조사광 및 분석광용 레이저) 공급처	558
	표 III-2-25	대표적인 장비(오실로스코프) 공급처	558
	표 III-2-26	대표적인 장비(파장계) 공급처	559
	표 III-2-27	대표적인 장비(RF 신호원) 공급처	559
	표 III-2-28	대표적인 장비(밀리미터파 신호원) 공급처	559
	표 III-2-29	대표적인 소재(Type 1b 단결정 다이아몬드) 공급처	568
	표 III-2-30	대표적인 소재(고순도 단결정 다이아몬드) 공급처	569
	표 III-2-31	대표적인 소재(양자 품질 NV 다이아몬드) 공급처	569
	표 III-2-32	대표적인 부품(원자증기셀) 공급처	570
	표 III-2-33	대표적인 부품(자기차폐 챔버) 공급처	571
	표 III-2-34	대표적인 부품(포토다이오드) 공급처	572
	표 III-2-35	대표적인 부품(전류증폭기) 공급처	572
	표 III-2-36	대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처	573
	표 III-2-37	대표적인 부품(특수렌즈) 공급처	574
	표 III-2-38	대표적인 장비(DPSS 레이저) 공급처	574
	표 III-2-39	대표적인 장비(DFB 레이저) 공급처	575
	표 III-2-40	대표적인 장비(마이크로파 생성기) 공급처	576
	표 III-2-41	대표적인 장비(임의파형 생성기) 공급처	576
	표 III-2-42	대표적인 장비(락인앰프) 공급처	577
	표 III-2-43	대표적인 장비(다채널 TTL 신호 생성기) 공급처	577
	표 III-2-44	대표적인 비선형 크리스탈 종류 및 복굴절 특성	586
	표 III-2-45	대표적인 소재(벌크형 비선형 결정) 공급처	587
	표 III-2-46	대표적인 소재(준위상정합용 비선형 결정) 공급처	588
	표 III-2-47	대표적인 부품(상용 비선형 기반 양자광원) 공급처	591
	표 III-2-48	대표적인 부품(상용 단일광자 광원) 공급처	595
	표 III-2-49	대표적인 부품(비선형 결정 광원용 부가 부품) 공급처	596

3장

표 III-3-1	대표적인 소재(기판) 공급처	612
표 III-3-2	대표적인 소재(스퍼터링 타겟) 공급처	612
표 III-3-3	대표적인 소재(액화가스) 공급처	612
표 III-3-4	대표적인 부품(증폭기) 공급처	614
표 III-3-5	대표적인 부품(증폭기) 공급처	614
표 III-3-6	대표적인 부품(써큘레이터) 공급처	616
표 III-3-7	대표적인 부품(아이솔레이터) 공급처	616
표 III-3-8	대표적인 부품(로우패스/밴드패스 필터) 공급처	617
표 III-3-9	대표적인 부품(IR 필터) 공급처	618
표 III-3-10	대표적인 부품(동축 케이블) 공급처	619
표 III-3-11	대표적인 부품(동축 케이블) 공급처	620
표 III-3-12	대표적인 부품(저온용 자기 차폐) 공급처	620
표 III-3-13	대표적인 장비(무냉매 희석 냉동기) 공급처	621
표 III-3-14	대표적인 장비(임의파형 발생기) 공급처	622
표 III-3-15	대표적인 장비(고주파 신호 발생기) 공급처	623
표 III-3-16	대표적인 장비(양자 제어분석 시스템) 공급처	624
표 III-3-17	대표적인 장비(와이어 본더) 공급처	624
표 III-3-18	대표적인 시뮬레이션 공급처	625
표 III-3-19	대표적인 소재(GaAs HEMT) 공급처	628
표 III-3-20	대표적인 소재(^{28}Si) 공급처	628
표 III-3-21	대표적인 소재(^{28}Si 기반 웨이퍼) 공급처	629
표 III-3-22	대표적인 소재(Ge 기반 웨이퍼) 공급처	630
표 III-3-23	대표적인 부품(극저온 신호 증폭기) 공급처	630
표 III-3-24	대표적인 부품(극저온 고주파 초전도 케이블) 공급처	631
표 III-3-25	대표적인 부품(극저온 신호 증폭기) 공급처	632
표 III-3-26	대표적인 부품(극저온 방향성 결합기) 공급처	633
표 III-3-27	대표적인 장비(무냉매 극저온 희석 냉동기) 공급처	634
표 III-3-28	대표적인 장비(고안정도 정전압 발생기) 공급처	635
표 III-3-29	대표적인 장비(고주파 신호 발생기) 공급처	635
표 III-3-30	대표적인 장비(다채널 임의함수 발생기) 공급처	636
표 III-3-31	대표적인 장비(다채널 양자제어기) 공급처	637
표 III-3-32	대표적인 장비(다채널 업-다운 컨버터) 공급처	638
표 III-3-33	대표적인 범용 측정기기 제어 소프트웨어 공급처	638
표 III-3-34	대표적인 소재(원자) 공급처	641
표 III-3-35	대표적인 소재(마이크로트랩 제작용 웨이퍼) 공급처	641
표 III-3-36	대표적인 부품(신호 증폭기) 공급처	642
표 III-3-37	대표적인 부품(광섬유) 공급처	642
표 III-3-38	대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처	643
표 III-3-39	대표적인 부품(전자 광학 변조기) 공급처	643
표 III-3-40	대표적인 부품(라디오파/마이크로파 스위치) 공급처	643
표 III-3-41	대표적인 장비(다이오드 레이저) 공급처	644
표 III-3-42	대표적인 장비(펄스 레이저) 공급처	644
표 III-3-43	대표적인 장비(단일채널 단일광자 검출기) 공급처	645
표 III-3-44	대표적인 장비(다채널 단일광자 검출기) 공급처	645
표 III-3-45	대표적인 장비(파장 측정기) 공급처	645
표 III-3-46	대표적인 장비(이미징 장치) 공급처	646
표 III-3-47	대표적인 장비(신호발생기) 공급처	646
표 III-3-48	대표적인 장비(ARTIQ) 공급처	647
표 III-3-49	대표적인 시뮬레이션 소프트웨어 공급처	647
표 III-3-50	양자광학 기반 양자컴퓨팅 주요 소부장	650
표 III-3-51	대표적인 소재(Si) 공급처	651
표 III-3-52	대표적인 소재(SiO_2) 공급처	652
표 III-3-53	대표적인 소재(SiN) 공급처	653
표 III-3-54	대표적인 소재($LiNbO_3$) 공급처	654
표 III-3-55	대표적인 소재(AlN) 공급처	654
표 III-3-56	대표적인 소재(Ta_2O_5) 공급처	655
표 III-3-57	대표적인 부품(광섬유) 공급처	657
표 III-3-58	대표적인 부품(광학부품) 공급처	657
표 III-3-59	대표적인 부품(비선형 결정) 공급처	658
표 III-3-60	대표적인 장비(광자쌍 생성장비) 공급처	659
표 III-3-61	대표적인 장비(SNSPD) 공급처	660

표 III-3-62	대표적인 장비(TCSPC) 공급처	661
표 III-3-63	대표적인 장비(APD) 공급처	662
표 III-3-64	대표적인 질화 실리콘 파운드리 서비스 업체	663
표 III-3-65	대표적인 실리콘 파운드리 서비스 업체	664
표 III-3-66	대표적인 리튬 나이오베이트 파운드리 서비스 업체	665
표 III-3-67	대표적인 탄탈라 파운드리 서비스 업체	666
표 III-3-68	대표적인 소재(단결정 다이아몬드) 공급처	669
표 III-3-69	대표적인 소재(질소이온) 공급처	669
표 III-3-70	대표적인 소재(다이아몬드 나노 구조물) 공급처	670
표 III-3-71	대표적인 부품(핀홀) 공급처	670
표 III-3-72	대표적인 부품(대물렌즈) 공급처	671
표 III-3-73	대표적인 부품(이색성 미러) 공급처	671
표 III-3-74	대표적인 부품(광학 필터) 공급처	671
표 III-3-75	대표적인 부품(마이크로파 증폭기) 공급처	672
표 III-3-76	대표적인 부품(RF & 마이크로파 스위치) 공급처	672
표 III-3-77	대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처	673
표 III-3-78	대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처	673
표 III-3-79	대표적인 장비(DPSSL) 공급처	674
표 III-3-80	대표적인 장비(ECDL) 공급처	674
표 III-3-81	대표적인 장비(단일광자 검출기) 공급처	674
표 III-3-82	대표적인 장비(TTL 펄스 발생기) 공급처	675
표 III-3-83	대표적인 장비(벡터 신호 발생기) 공급처	676
표 III-3-84	대표적인 장비(임의파형 발생기) 공급처	676
표 III-3-85	대표적인 장비(피에조 스테이지) 공급처	677
표 III-3-86	대표적인 장비(펄스 카운터) 공급처	677
표 III-3-87	대표적인 극저온 냉각기 공급처	678
표 III-3-88	대표적인 소재(원자) 공급처	682
표 III-3-89	대표적인 부품(원자 셀) 공급처	682
표 III-3-90	대표적인 부품(원자 셀) 공급처	682
표 III-3-91	대표적인 부품(UHV 글래스 셀) 공급처	683
표 III-3-92	대표적인 부품(터보 펌프) 공급처	683
표 III-3-93	대표적인 부품(이온 펌프) 공급처	683
표 III-3-94	대표적인 부품(게터 펌프) 공급처	683
표 III-3-95	대표적인 부품(전자증폭 카메라) 공급처	684
표 III-3-96	대표적인 부품(액정소자) 공급처	684
표 III-3-97	대표적인 부품(페브리 페로 공진기) 공급처	684
표 III-3-98	대표적인 부품(위상 고정 서보) 공급처	685
표 III-3-99	대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처	685
표 III-3-100	대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처	686
표 III-3-101	대표적인 부품(광학용품) 공급처	686
표 III-3-102	대표적인 부품(정밀 이미징 광학계) 공급처	686
표 III-3-103	대표적인 부품(레이저 주파수 안정화 서보) 공급처	687
표 III-3-104	대표적인 장비(다이오드 레이저) 공급처	687
표 III-3-105	대표적인 장비(다이오드 레이저 서보) 공급처	687
표 III-3-106	대표적인 장비(다이오드 고출력 레이저) 공급처	688
표 III-3-107	대표적인 장비(분광용 레이저) 공급처	688
표 III-3-108	대표적인 장비(다이오드 레이저 발진기) 공급처	688
표 III-3-109	대표적인 장비(다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기) 공급처	689
표 III-3-110	대표적인 장비(전류 공급 장치) 공급처	689
표 III-3-111	대표적인 장비(디지털/아날로그 I/O 장치) 공급처	689
표 III-3-112	대표적인 장비(광주파수 빗) 공급처	690

Ⅳ 양자기술 통계

1장

표 Ⅳ-1-1	양자통신 분야 분석 지표 (2016~2020년)	709
표 Ⅳ-1-2	양자통신 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)	710
표 Ⅳ-1-3	양자통신 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)	712
표 Ⅳ-1-4	양자통신 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)	712
표 Ⅳ-1-5	양자통신 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문	713
표 Ⅳ-1-6	양자센서 분야 분석 지표 (2016~2020년)	716
표 Ⅳ-1-7	양자센서 국가별-연도별 논문수 (2016~2020년)	716
표 Ⅳ-1-8	양자센서 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)	719
표 Ⅳ-1-6	양자센서 분야 분석 지표 (2016~2020년)	716
표 Ⅳ-1-7	양자센서 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)	716
표 Ⅳ-1-8	양자센서 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)	719
표 Ⅳ-1-9	양자센서 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)	720
표 Ⅳ-1-10	양자센서 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문	721
표 Ⅳ-1-11	양자컴퓨팅 분야 분석 지표 (2016~2020년)	723
표 Ⅳ-1-12	양자컴퓨팅 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)	724
표 Ⅳ-1-13	양자센서 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)	726
표 Ⅳ-1-14	양자컴퓨팅 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)	727
표 Ⅳ-1-15	양자센서 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문	728

2장

표 Ⅳ-2-1	양자기술 분야 연도별 출원 특허 수	733
표 Ⅳ-2-2	IP 국가별 양자기술 특허 출원·등록 건수 (2002~2021년 누적)	734
표 Ⅳ-2-3	기업 유형별 국내 특허(KIPO) 출원·등록 건수 (2002~2021년 누적)	735
표 Ⅳ-2-4	양자기술의 연도별 출원 비중 (전체 기술 대비)	736
표 Ⅳ-2-5	양자기술 분야 상위 10위 출원인 국적별 출원 특허 수 (2014~2020년)	737
표 Ⅳ-2-6	양자기술 특허 상위 출원 기관 국가별 10위 (2017~2021년)	738
표 Ⅳ-2-7	양자기술 분류 및 관련 산업 분야별 특허 출원 및 등록 건수와 비중	740
표 Ⅳ-2-8	양자통신 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)	749
표 Ⅳ-2-9	양자통신 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)	752
표 Ⅳ-2-10	HHI 범위에 따른 집중 수준	753
표 Ⅳ-2-11	양자통신 분야 분석 지표	757
표 Ⅳ-2-12	양자센싱·계측 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)	763
표 Ⅳ-2-13	양자센서 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)	766
표 Ⅳ-2-14	양자센서 분야 분석 지표	770
표 Ⅳ-2-15	양자컴퓨팅 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)	776
표 Ⅳ-2-16	양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)	779
표 Ⅳ-2-17	양자컴퓨팅 분야 분석 지표	783

3장

표 Ⅳ-3-1	2023년 국내 양자기술 전문인력 현황 (학계, 2022년 기준)	791
표 Ⅳ-3-2	2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)	793
표 Ⅳ-3-3	2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)	794
표 Ⅳ-3-4	국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준)	795
표 Ⅳ-3-5	향후 10년간 국내 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033) (종합)	797
표 Ⅳ-3-6	향후 10년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033)	798
표 Ⅳ-3-7	향후 10년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033)	801
표 Ⅳ-3-8	향후 11년간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망(누적) (2022년 기준)	804
표 Ⅳ-3-9	주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망 (2022년 기준)	805

V 양자기술 산업화 모델

1장	표 V-1-1	주요 분야별 산업화 모델 개요	813
	표 V-1-2	주요 분야별 단기 산업화 모델(단기 산업화 검토 대상)	816
	표 V-1-3	주요 분야별 중장기 산업화 모델(중장기 산업화 검토 대상)	817
2장	표 V-2-1	양자통신 주요 분야별 산업화 모델 개요	821
	표 V-2-2	글로벌 양자통신 기업 동향	822
3장	표 V-3-1	양자센싱 주요 분야별 산업화 모델 개요	860
	표 V-3-2	화학 에너지 분야 양자 센싱의 잠재적 응용	896
4장	표 V-4-1	양자컴퓨팅 주요 분야별 산업화 모델 개요	900
	표 V-4-2	주요 양자컴퓨터 기업 동향	901

VI 글로벌 양자분야 주요 산학연 협의체 동향

1장	표 VI-1-1	QED-C 회원 기업 소개	974
	표 VI-1-2	QED-C 회원 대학 및 연구소 내 양자 관련 기관	989
	표 VI-1-3	캐나다 QIC 이사회 개요	1000
	표 VI-1-4	양자통신 기업 개요 (QIC)	1002
	표 VI-1-5	양자센서 기업 개요 (QIC)	1003
	표 VI-1-6	양자컴퓨팅 기업 개요 (QIC)	1003
	표 VI-1-7	양자소재·부품·장비·기타 기업 개요 (QIC)	1005
2장	표 VI-2-1	QuIC 회원 분포 (2023년 9월 기준)	1010
	표 VI-2-2	QuIC 회원 국가별 분포 (2022년 10월 기준)	1010
	표 VI-2-3	QuIC 대기업 정회원 (2023년 9월 기준)	1011
	표 VI-2-4	QuIC 중소기업 및 VC 정회원 (2023년 9월 기준)	1012
	표 VI-2-5	QuIC 중소기업 준회원 (2023년 9월 기준)	1016
	표 VI-2-6	QuIC 학계, 연구계, RTO 준회원 (2023년 9월 기준)	1018
	표 VI-2-7	QuIC 기타 준회원 (2023년 9월 기준)	1020
	표 VI-2-8	InstituteQ 조직 실무 그룹 구성원	1022
	표 VI-2-9	BusinessQ 단기/중기/장기적 실행 계획	1024
	표 VI-2-10	InsituteQ 참여 연구 그룹 (알토 대학교)	1025
	표 VI-2-11	InsituteQ 참여 연구 그룹 (헬싱키 대학교)	1026
	표 VI-2-12	InsituteQ 참여 연구 그룹 (VTT)	1027
	표 VI-2-13	QUTAC 구성원 소개 및 기여도 (2023년 10월 기준)	1030
3장	표 VI-3-1	Q-STAR 주요 특별 회원(Special Member) 개요	1040
	표 VI-3-2	Q-STAR 주요 기업회원(Corporate Member) 개요	1042
	표 VI-3-3	Q-STAR 주요 준회원(Associate Member) 개요	1043
	표 VI-3-4	Q-STAR 주요 중소기업 및 스타트업(Small and Medium/Start-up Member) 개요	1044
	표 VI-3-5	Q-STAR 학계 회원 개요	1045

I 양자기술 동향

제1장 **국내외 시장동향**

제2장 **국내외 정책동향**

제3장 **국내외 투자동향**

제4장 **국내외 표준화동향**

제1장
국내외 시장 동향

제1절 개요

양자기술은 새로운 시대의 게임체인저로 부상하고 있는 기술로, 높은 진입 장벽에도 불구하고 향후 시장에 미칠 영향이 큰 까닭에 각국 정부가 주목하는 분야이기도 하다. 맥킨지 보고서의 분석에 따르면, 양자통신과 양자센싱은 가까운 미래에 상용화 가능성이 크며, 양자컴퓨팅은 통신, 센싱과 상호 연관성을 가지고 차츰 시장을 형성해 결국 모든 산업에 걸쳐 양자기술이 큰 파급효과를 불러올 것으로 예측했다.[1] 다른 글로벌 시장조사 전문기관들의 보고서에서도 수치 차이는 다소 있으나 머지않은 미래에 양자기술 시장이 본격적으로 열리며 폭발적으로 성장할 것이라는 전망에는 이견이 없다.

본 백서는 해외 주요국 및 국내 양자기술의 2023~2030년 시장 규모를 양자통신·센싱·컴퓨팅 3개 분야로 구분해 전체시장과 분야별로 전망했다. 각 시장 규모를 추정하기 위해 글로벌 시장보고서를 주로 활용했으나 양자기술 시장은 기존 국가 통계에는 존재하지 않는 새로운 시장 영역이고, 스타트업 회사의 진입이 전 세계적으로 활발하게 일어나는 특성으로 인해, 자료 수집 시점과 측정 방법론에 따라 수치의 차이가 존재할 수밖에 없다. 따라서 본 백서는 하나의 보고서에만 의존하지 않고, 여러 회사의 시장보고서를 참고해 시장 규모와 성장률의 변화를 재구성했다.

전 세계 양자기술 시장의 총규모는 2023년 25조 9,024억 원이며, 연평균 29.2%의 높은 성장률을 지속해 2030년에는 155조 5,112억 원으로 커질 것으로 전망된다. 부문별로 살펴보면 양자통신 시장은 2023년 5조 209억 원에서 연평균 25.6% 성장해 2030년 24조 7,368억 원으로 커질 전망이다. 양자센싱은 2023년 2조 464억 원에서 연평균 19.1% 성장해 2030년 6조 9,482억 원으로 확대될 예정이다. 한편 양자컴퓨팅 시장은 2023년 18조 8,352억 원에서 연평균 30.9% 성장해 2030년 123조 8,263억 원을 기록할 것으로 보인다. 이처럼 양자통신과 양자컴퓨팅은 무척 빠르게 성장할 예정이며, 양자센싱은 통신과 컴퓨팅보다 규모는 작지만 산업화 과정이 비교적 일찍 진행될 것으로 전망된다.[2]

1) McKinsey (2021)

2) NSTC (2022)

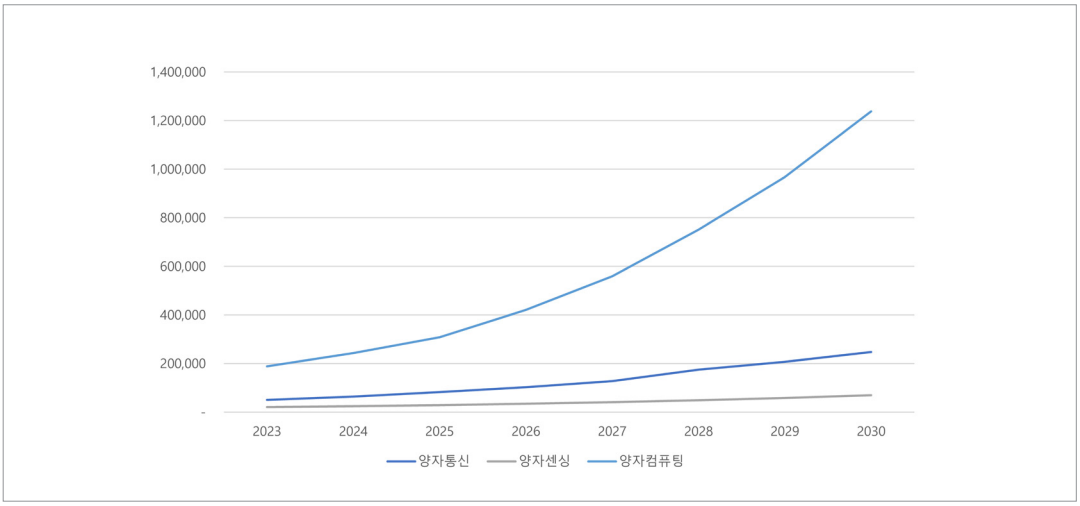
표 I-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자통신	50,209	63,521	82,519	102,196	127,843	174,782	207,092	247,368	25.6%
양자센싱	20,464	24,278	28,841	34,306	40,860	48,729	58,188	69,482	19.1%
양자컴퓨팅	188,352	242,903	307,903	420,534	559,491	751,235	968,084	1,238,263	30.9%
합계[3)]	**259,024**	**330,702**	**419,263**	**557,036**	**728,194**	**974,746**	**1,233,363**	**1,555,112**	**29.2%**

※ McKinsey (2023) & Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망



※ McKinsey (2023) & Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

양자기술은 다양한 산업 분야에서 활용될 것으로 기대된다. 특히 양자기술에 기반을 둔 항공·우주 분야의 매출이 가장 크게 발생하리라 예상하는데, 〈표 I-1-2〉에서 보듯이 2023~2030년 동안 전체 산업에서 차지하는 비율이 30%를 상회할 것으로 보인다. 국방 및 에너지·석유 분야도 양자기술의 산업 기여 효과가 클 것으로 보이며, 2023~2030년 동안 전체 산업에서 차지하는 비율이 각각 평균 24.2%, 21.5%일 것으로 전망된다. 동기간 금융·보험 분야는 10.5%, 물류·유통 분야는 4.4%, 그리고 보건·의료는 2.8% 정도를 차지할 것으로 보이며, 특히 보건·의료 분야는 양자기술 기반의 매출성장률이 2023~2030년 동안 35.9%를 기록해 가장 클 것으로 예상된다.

3) 반올림으로 인해 세부항목 합계와 총계가 일치하지 않을 수 있음 (본 백서의 모든 표에 적용됨)

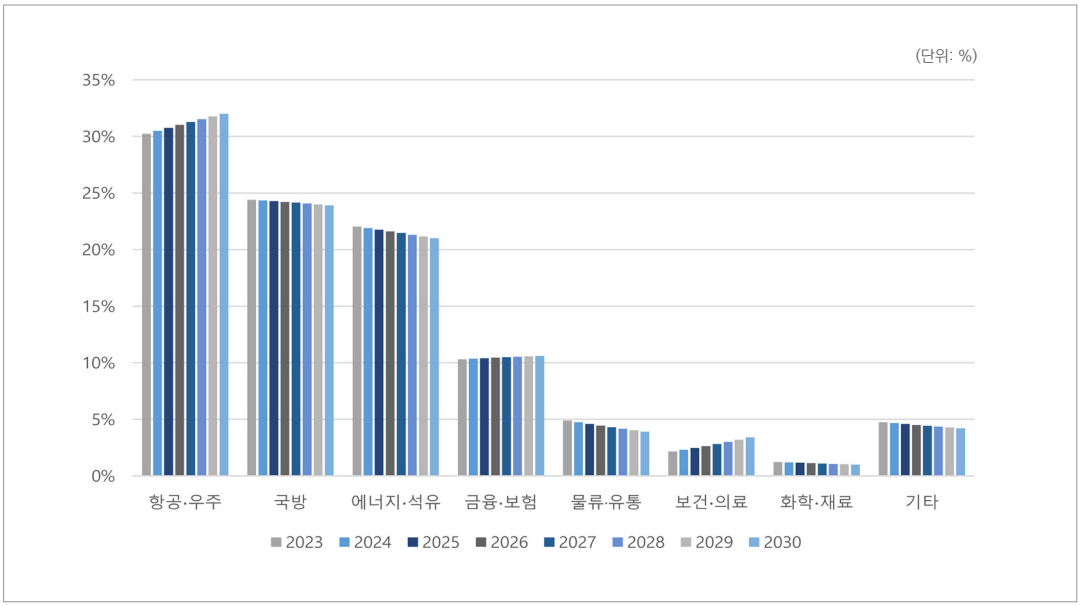
표 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비

(단위: %)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
항공·우주	30.2	30.5	30.8	31.0	31.3	31.5	31.8	32.0
국방	24.4	24.3	24.3	24.2	24.1	24.1	24.0	23.9
에너지·석유	22.0	21.9	21.8	21.6	21.5	21.3	21.2	21.0
금융·보험	10.3	10.4	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6
물류·유통	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.2	4.0	3.9
보건·의료	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
화학·재료	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
기타	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2
합계	100	100	100	100	100	100	100	100

※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비



※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

양자기술 기반의 제품 종류를 크게 하드웨어, 소프트웨어, 서비스로 나눌 수 있다. 현재는 양자기술 하드웨어 제품의 매출이 가장 큰 비율을 차지하고 있으나, 소프트웨어 및 서비스 제품의 매출 비중이 꾸준하게 상승할 것으로 보인다. 〈표Ⅰ-1-3〉에서 보듯이 2023년 하드웨어 기반의 매출 비중은 74.0% 정도로 높지만 2030년은 32.4% 정도로 줄어든다. 반면 2023년 소프트웨어와 서비스 매출 비중은 각각 15.5%와 10.5%였으나, 2030년에 33.1%와 34.5%로 비중이 커진다. 2021년 기준 정부의 양자기술

관련 하드웨어 제품 투자는 1조 원에 육박하나, 소프트웨어와 서비스 제품 투자는 각각 1,500억 원 정도에 머물고 있다.[4] 이처럼 현재 정부 및 민간 투자 대부분은 하드웨어에 초점을 맞추고 있지만, 소프트웨어 및 서비스 시장이 2030년까지 연평균 14.3% 성장할 것으로 전망되므로 이를 고려한 균형 잡힌 투자가 필요한 시점이다.

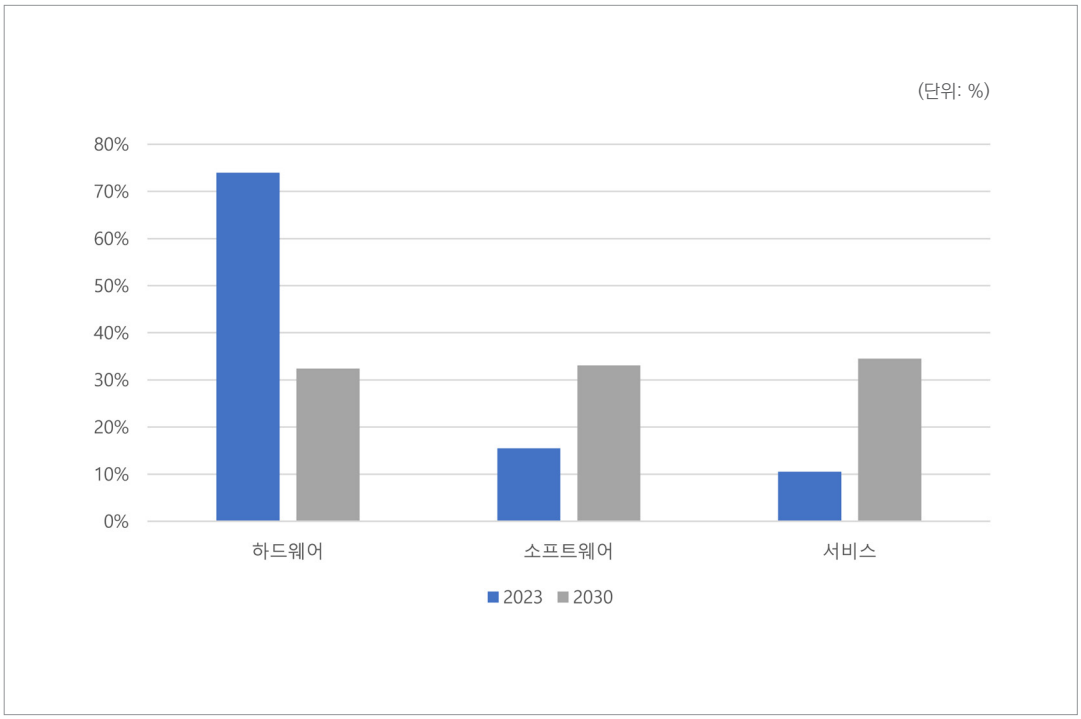
표 I-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비

(단위: %)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
하드웨어	74.0	70.2	65.9	61.0	55.4	48.7	41.2	32.4
소프트웨어	15.5	17.3	19.3	21.5	23.9	26.7	29.7	33.1
서비스	10.5	12.5	14.8	17.5	20.7	24.6	29.1	34.5
합계	100	100	100	100	100	100	100	100

※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비



※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

4) IQ4I (2022)

제2절 양자통신 시장동향

1. 국내외 시장

글로벌 시장조사 전문기관 Mind Commerce에 따르면, 글로벌 양자통신 시장 규모는 2023년 말 5조 209억 원 정도로 추정되며 이후 빠른 성장이 예상된다. 〈표 I-1-4〉에서 보듯이 향후 3년 후 글로벌 양자통신 시장 매출액은 10조 원을 초과하고, 연평균 25.6% 성장해 2030년에는 24조 7,368억 원 규모가 될 것으로 전망하고 있다. 그 중 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD) 시장은 3조 4,196억 원 정도이며, 연평균 19.9% 성장해 2030년에 12조 1,723억 원 규모가 될 것으로 예상된다.

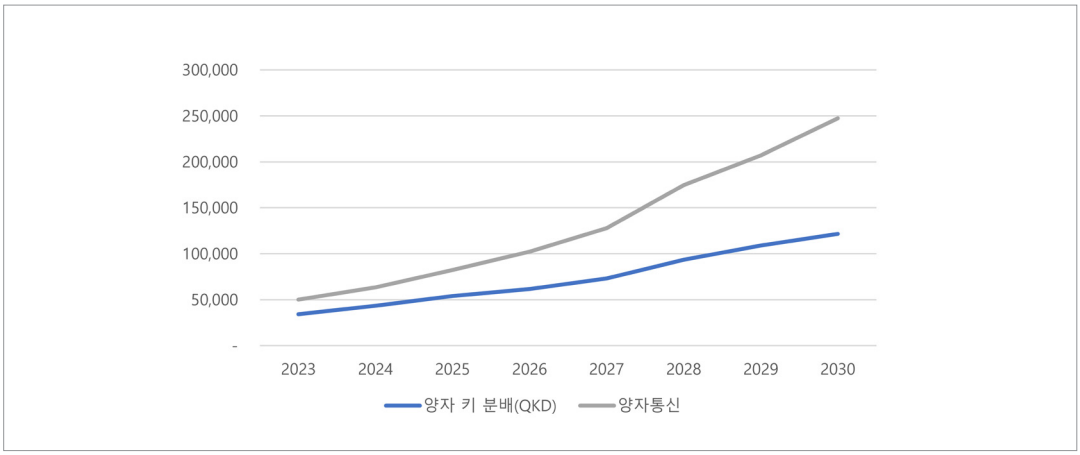
표 I-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자통신 시장	50,209	63,521	82,519	102,196	127,843	174,782	207,092	247,368	25.6%
양자 키 분배(QKD)	34,196	43,424	54,009	61,744	73,278	93,633	108,967	121,723	19.9%

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

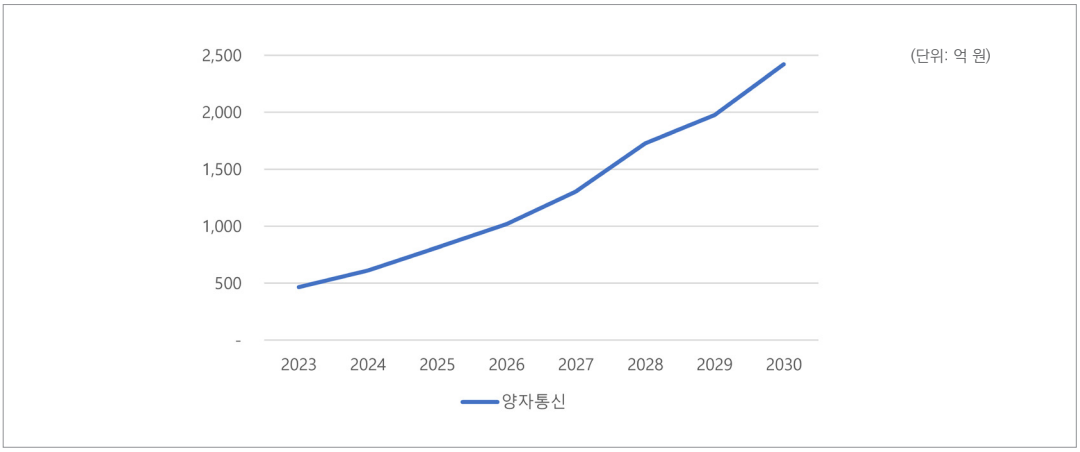
그림 I-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

우리나라 양자통신 시장은 2023년 말 약 466억 원 규모로 추정된다.[5] 다만 기술 분야마다 상용화 정도의 수준 차이가 있고 특정 영역은 상용화가 본격적으로 이뤄지지 않은 상태이므로, 정부가 시범사업을 위해 출연금을 지원하고 이후 국내 통신사들의 투자가 발생한다면, 이러한 투자 유발 금액으로 인해 추정치는 달라질 수 있다. [그림I-1-5]에서 보듯이 우리나라는 해마다 평균 26.5% 성장률을 기록해 2030년에는 2,422억 원 정도의 양자통신 시장을 기대하고 있다. 현재 우리나라가 글로벌 양자통신 시장에서 차지하는 비율은 0.9% 정도로 추정되고 향후 성장 속도에 따라 2030년에는 1.0%까지 시장점유율을 확대할 것으로 기대하고 있다.[6] 한편 일본과 중국의 2030년 글로벌 양자통신 시장점유율은 각각 1.7%, 13.1% 정도로 전망하고 있다.[7]

그림 I-1-5 국내 양자통신 시장 전망



※ Mind Commerce(2023), IQ4I (2022) 집필진 재구성

양자통신 산업은 우리나라 양자산업에서 가장 활발하게 상용화 전략을 펼치고 있는 부문이다. 우리나라 주요 통신회사들은 지금까지 양자암호통신 시범사업을 통한 지식과 경험을 축적하고 있으며 양자암호 기술의 고도화에 힘을 쏟고 있다.[8] 2022년 4월에 LGU+는 양자내성암호(PQC) 전용회선 서비스를 세계 최초 출시했고,[9] SKT도 QKD 및 양자내성암호 상용화를 완료해 서비스를 출시했으며,[10] 2022년 7월에 KT는 기업간거래(B2B) 양자암호 전용회선 서비스를 세계 최초로 제공한 바 있다.[11]

5) Mind Commerce(2023), IQ4I (2022)
6) Mind Commerce(2023), IQ4I (2022)
7) Mind Commerce(2023), IQ4I (2022)
8) 강소현 (2022)
9) 박종진 (2022)
10) 이종현 (2022)
11) KT (2022)

또한 2022년 5월 한국과학기술연구원은 SKT와 협력을 강화해 QKD 기반의 양자암호통신 기기 사업화를 위해 노력하고 있으며,[12] KT는 Toshiba Group과 QKD 시범 프로젝트를 진행하기로 했다.[13]

현재 양자통신 기술에 대한 수요는 보안 통신을 적용하는 산업 분야에 한정돼 있고, 이에 적용된 양자통신 소프트웨어의 대부분은 이메일, 은행 이체 등을 위한 양자암호 솔루션이라고 볼 수 있다. 이처럼 양자통신 상용화가 본격적으로 이뤄지지 않은 상태에서 추정하는 현재의 매출액 규모는 매우 가변적이며, 기술적 난제들을 해결함으로써 시장의 빠른 성장을 기대할 수 있다. 예를 들어 양자컴퓨팅 능력은 양자통신 시장에 큰 영향을 주는 근본적 요인인데, 복수의 물리적 거리에 있는 노드 간 수많은 양자프로세싱을 병렬적으로 수행하기 위해 고성능 양자컴퓨팅 능력을 요구하기 때문이다. 즉 양자컴퓨팅의 기술적 발전은 양자통신 시장의 성장과도 직결되는 것이다. 그렇기에 양자통신 하드웨어 시장이 성숙화된 이후 양자통신 소프트웨어 시장 또한 열리게 될 것이라는 관측도 있다.[14]

2. 수요산업별 글로벌 양자통신 시장

가. 양자 키 분배(QKD) 시장

글로벌 양자통신에서 QKD 시장은 향후 2030년까지 연평균 19.9%의 높은 성장률을 기록해 12조 원 이상의 시장이 펼쳐질 것으로 전망된다. 그중 은행·금융·보험 분야는 2030년에 2조 3,205억 원으로 가장 큰 QKD 수요를 형성할 것이며, 두 번째로 큰 QKD 수요산업은 비즈니스 통신으로 2030년 1조 8,184억 원의 시장으로 성장하리라 기대하고 있다. 특히 정부, 국가안보, 군사 분야는 연평균 24.0%, 21.2%, 21.9%의 높은 성장률을 보여줄 것으로 예상된다.

12) Kovacs (2022)
13) Toshiba (2022)
14) McKinsey (2021)

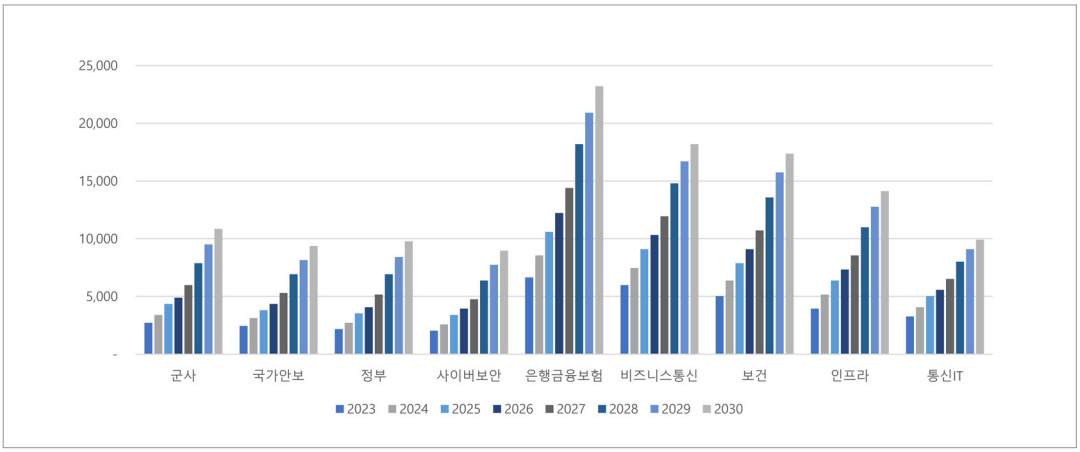
표 I-1-5 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
군사	2,714	3,393	4,342	4,885	5,971	7,871	9,499	10,856	21.9%
국가안보	2,443	3,121	3,800	4,342	5,292	6,921	8,142	9,363	21.2%
정부	2,171	2,714	3,528	4,071	5,157	6,921	8,413	9,770	24.0%
사이버보안	2,036	2,578	3,393	3,935	4,750	6,378	7,735	8,956	23.6%
은행·금융·보험	6,649	8,549	10,585	12,213	14,384	18,184	20,898	23,205	19.5%
비즈니스 통신	5,971	7,464	9,092	10,313	11,942	14,791	16,691	18,184	17.2%
보건	5,021	6,378	7,871	9,092	10,720	13,570	15,741	17,370	19.4%
인프라	3,935	5,157	6,378	7,328	8,549	10,992	12,756	14,113	20.0%
통신·IT	3,257	4,071	5,021	5,564	6,514	8,006	9,092	9,906	17.2%
합계	**34,196**	**43,424**	**54,009**	**61,744**	**73,278**	**93,633**	**108,967**	**121,723**	**19.9%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-6 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

나. 양자암호통신(Quantum Cryptography Communication) 시장

양자암호통신은 보건·의료, 은행·금융·보험 같은 일상생활뿐 아니라 자동차, 국방, 공공안전 등 매우 다양한 분야에서 수요가 존재한다. 〈표 I-1-6〉에서 보듯이 보건·의료 분야는 2023년 3,338억 원으로 가장 큰 산업 수요를 보여주고 있으며, 은행·금융·보험 분야는 조금 낮은 2,904억 원의 시장을 형성하고 있다. 그러나 은행·금융·보험 분야는 연평균 38.8% 성장률로 보건·의료(31.4%) 분야보다 빠르게 성장할 것이며, 정부·공공안전(38.1%), 에너지(37.0%), 자동차·운송(40.4%) 제조·공급망(39.0%) 등도 연평균 30% 이상의 높은 성장을 할 것으로 추정된다. 높은 성장률에 힘입은 은행·금융·보험 분야는 2030년 2조 8,891억 원으로 성장해, 가장 큰 산업 시장을 형성할 것으로 보인다.

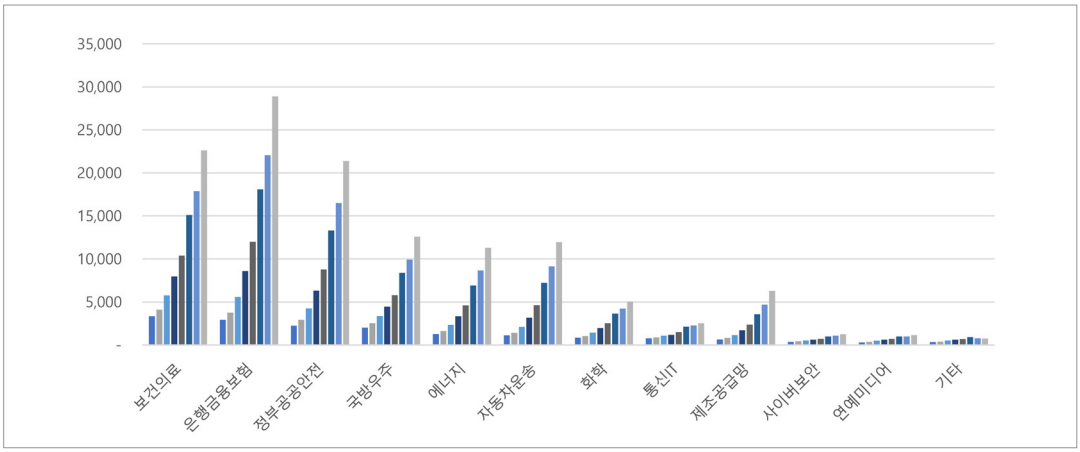
표 Ⅰ-1-6 수요산업별 글로벌 기타 양자암호통신 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
보건·의료	3,338	4,112	5,767	7,966	10,381	15,103	17,872	22,621	31.4%
은행·금융·보험	2,904	3,759	5,577	8,576	11,996	18,089	22,065	28,891	38.8%
정부·공공안전	2,225	2,904	4,234	6,296	8,766	13,312	16,501	21,373	38.1%
국방·우주	2,008	2,510	3,365	4,451	5,781	8,373	9,920	12,579	30.0%
에너지	1,248	1,615	2,334	3,338	4,587	6,894	8,658	11,304	37.0%
자동차·운송	1,113	1,384	2,090	3,162	4,627	7,219	9,119	11,942	40.4%
화학	841	1,031	1,425	1,954	2,524	3,637	4,220	5,034	29.1%
통신·IT	760	855	1,072	1,167	1,479	2,117	2,253	2,510	18.6%
제조·공급망	624	801	1,140	1,710	2,348	3,555	4,695	6,269	39.0%
사이버보안	353	407	516	611	706	977	1,072	1,235	19.6%
연예·미디어	271	339	475	611	706	977	977	1,140	22.8%
기타	326	380	516	611	665	896	773	746	12.6%
합계	16,013	20,097	28,511	40,452	54,565	81,149	98,125	125,645	34.2%

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-7 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

제3절 양자센싱 시장동향

1. 국내외 시장

앞서 글로벌 양자센싱 시장 규모는 2023년 말 2조 464억 원을 형성하고, 연평균 19.1% 성장해 2030년에 6조 9,482억 원의 매출액을 거둘 것이라 밝힌 바 있다.[15] 양자센싱 시장은 기초 및 개발 연구에서 통합 시스템을 제작하는 방향으로 발전하여 주로 하드웨어 위주로 상용화가 진행되는 특성이 있어, 초기 양자기술 수준으로 양자센싱 시장이 형성될 것으로 보인다. 따라서 위에 언급한 수치는 센싱 시장이 통신 및 컴퓨팅 부문보다 상용화 단계에 먼저 접어든다는 시나리오에 무게를 두고, 다수의 보고서를 종합적으로 고려한 전망치를 활용하여 양자센싱 시장규모와 성장률을 추산한 것이다.

본 장에서는 글로벌 양자센싱 시장을 크게 양자센싱·이미징 시장(양자자력계를 제외한)과 양자자력계 시장으로 구분한다. 〈표 I-1-7〉에서 보듯이 양자센싱·이미징 시장은 2023년 말 1조 1,670억 원에서 연평균 22.2% 성장해 2030년에는 4조 7,495억 원 규모가 될 것으로 전망되고 있다. 양자자력계 시장은 2023년 말에는 8,793억 원에서 연평균 14.0% 성장해 2030년에는 2조 1,987억 원 규모가 될 것으로 예상된다.

표 I-1-7 글로벌 양자센싱 부문별 시장 전망

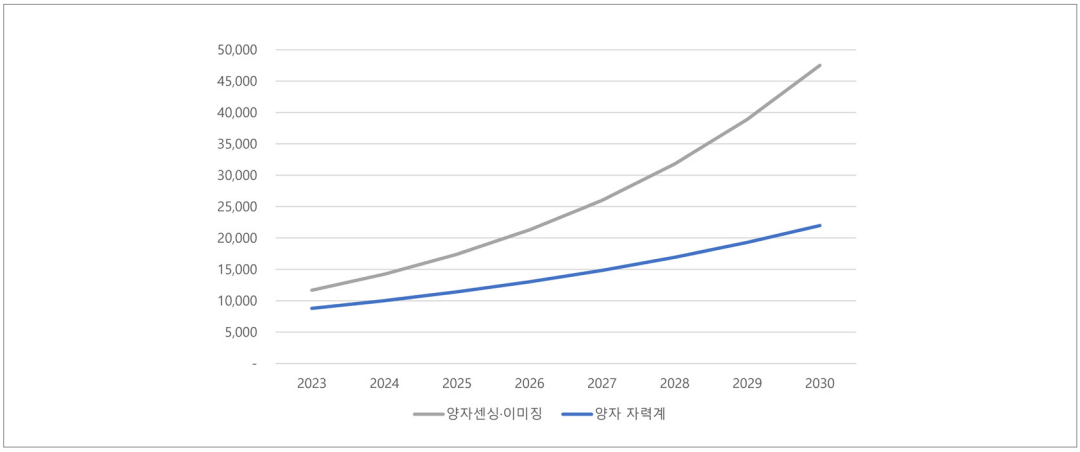
(단위: 억 원)

구분		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자센싱 시장		20,464	24,278	28,841	34,306	40,860	48,729	58,188	69,482	19.1%
	양자센싱·이미징	11,670	14,255	17,415	21,282	26,015	31,807	38,899	47,495	22.2%
	양자자력계	8,793	10,023	11,425	13,023	14,845	16,922	19,289	21,987	14.0%

※ Mind Commerce (2023), McKinsey (2023) 집필진 재구성

15) Mind Commerce(2023), McKinsey (2023)

그림 I-1-8 글로벌 양자센싱 부문별 시장 전망



※ Mind Commerce (2023), McKinsey (2023) 집필진 재구성

글로벌 양자센싱 시장을 지역별로 살펴보면, 가장 큰 시장인 서유럽은 2023년 7,775억 원을 시점으로 연평균 15.0% 성장해 2030년 2조 695억 원에 이를 것이며, 북미는 2023년 5,525억 원의 매출을 거두고 연평균 17.7% 성장해 2030년 1조 7,312억억 원으로 성장하리라 예측된다. 한편 한국, 일본, 중국 동아시아 3개국은 2023년 합계 4,708억 원의 매출로 서유럽과 북미보다 작지만, 향후 연평균 23.7% 이상의 성장률로 서유럽과 북미보다 빠르게 성장해 2030년엔 2조 913억 원으로 가장 큰 지역 시장을 형성할 것으로 전망된다.

우리나라의 양자센싱 시장은 2023년 약 419억 원 규모로 추정되며, 연평균 21.4% 성장해 2030년에는 1,628억 원에 이를 것으로 보인다. 일본은 우리나라보다 약 2.5배 규모로 추정되며, 연평균 성장률도 우리와 비슷한 21.4% 수준으로 전망하고 있다. 한편 중국은 2023년 3,406억 원이지만 2030년까지 연평균 23.8% 성장률로 서유럽(15.5%), 북미(17.9%), 우리나라(21.4%), 일본(21.4%)보다 빠르게 성장해, 2030년에는 1조 5,214억 원 이상의 세계 선두권의 시장을 형성할 것으로 보인다.

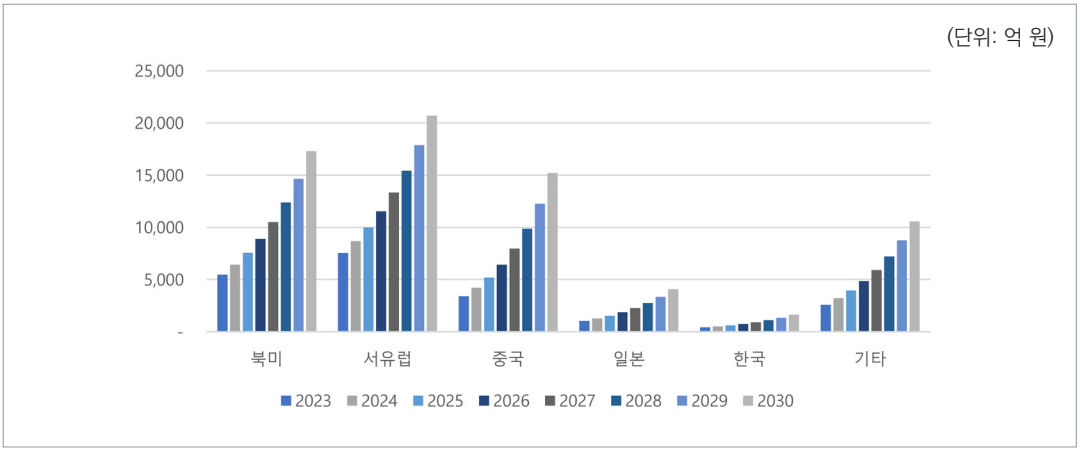
표 I-1-8 주요국 및 지역의 양자센싱 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
북미	5,473	6,423	7,559	8,895	10,494	12,386	14,644	17,312	17.9%
서유럽	7,543	8,681	9,999	11,541	13,334	15,426	17,863	20,695	15.5%
중국	3,406	4,201	5,188	6,419	7,956	9,865	12,252	15,214	23.8%
일본	1,045	1,266	1,529	1,856	2,256	2,742	3,340	4,071	21.4%
한국	419	501	614	742	902	1,100	1,337	1,628	21.4%
기타	2,585	3,206	3,948	4,849	5,926	7,209	8,752	10,561	22.3%
합계	**20,464**	**24,278**	**28,841**	**34,306**	**40,860**	**48,729**	**58,188**	**69,482**	**19.1%**

※ Mind Commerce(2023), Mckinsey(2023), Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-9 주요국 및 지역의 양자센싱 시장 전망



※ Mind Commerce(2023), Mckinsey(2023), Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

2. 부문별 글로벌 양자센싱 시장

가. 양자센싱·이미징 시장

양자센싱·이미징 시장을 부문별로 살펴보면 원자시계(Atomic Clock)가 가장 큰 시장을 형성하고 있다. 원자시계는 2023년 1,715억 원 규모로 전 세계 양자센싱·이미징 시장의 16.0%를 차지하고 있다. 그 외 중력센서(Gravity Sensor), 양자자기센서(Magnetic Sensors), 이미징센서(Imaging Sensor), 온도센서(Temperature sensors) 등 다양한 제품별로 시장이 형성되어 있다.

양자센싱·이미징 부문별 시장의 균형적인 성장을 통해 2030년 양자자기센서(Magnetic Sensors)는 1,945억 원, 양자중력 센서(Gravity Sensor)는 2,121억 원, 이미징 센서(Imaging Sensor)는 2,031억 원으로 성장하리라 예상한다.

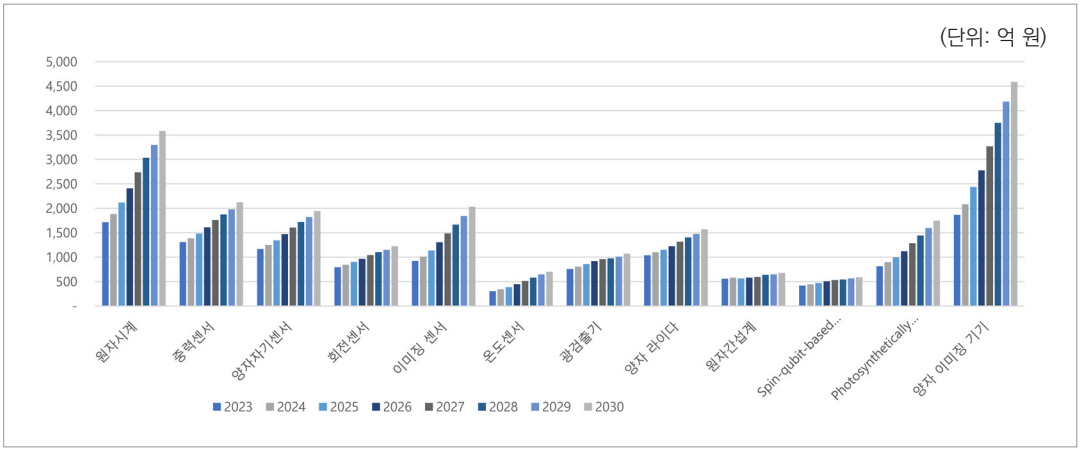
표 Ⅰ-1-9 부문별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
원자시계(Atomic Clock)	1,715	1,879	2,118	2,407	2,737	3,033	3,296	3,584	11.1%
중력센서(Gravity Sensor)	1,308	1,387	1,482	1,609	1,760	1,873	1,981	2,121	7.1%
양자자기센서 (Magnetic Sensor)	1,168	1,250	1,345	1,472	1,608	1,722	1,820	1,945	7.5%
회전센서 (Rotation sensors)	792	844	900	966	1,042	1,105	1,151	1,224	6.4%
이미징센서 (Imaging sensors)	923	1,011	1,134	1,304	1,487	1,666	1,841	2,031	11.9%
온도센서 (Temperature sensors)	304	342	387	445	514	582	647	700	12.6%
광검출기 (Light Detectors)	759	806	859	920	957	974	1,012	1,071	5.1%
양자 라이다 (Quantum LiDAR)	1,038	1,099	1,149	1,225	1,315	1,406	1,476	1,573	6.1%
원자간섭계 (Atomic Interferometers)	559	581	567	582	597	638	647	676	2.7%
Spin-qubit-based sensing	419	442	470	506	532	543	566	589	5.0%
Photosynthetically Active Radiation (PAR) Sensor	817	896	996	1,120	1,282	1,442	1,597	1,748	11.5%
양자 이미징 기기 (Quantum Imaging Devices)	1,867	2,083	2,436	2,775	3,266	3,745	4,185	4,588	13.7%
합계	**11,670**	**12,620**	**13,843**	**15,333**	**17,098**	**18,729**	**20,221**	**21,849**	**9.4%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-10 부문별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

나. 양자자력계 시장

양자자력계 시장을 부문별로 살펴보면 SERF 원자 자력계(SERFs)가 가장 큰 시장을 형성하고 있다. SERF 원자 자력계(SERFs)는 2023년 2,198억 원 규모로 전 세계 양자자력계 시장의 25.0%를 차지하고 있다. 그 외 SQUID 자력계(SQUIDs), NV센터 센서(NV-Centers Sensors), 양성자 자력계(Proton Magnetometers), 오버하우저 간섭계(Overhauser Magnetometers) 등 다양한 제품별로 시장이 형성되어 있다.

양자자력계 부문별 시장의 균형적인 성장을 통해 2030년 SERF 원자 자력계(SERFs)는 2,565억 원, SQUID 자력계(SQUIDs)는 2,348억 원, NV센터 센서(NV-Centers Sensors)는 1,669억 원, 양성자 자력계(Proton Magnetometers)는 1,343억 원, 오버하우저 간섭계(Overhauser Magnetometers)는 1,452억 원으로 성장하리라 예상한다.

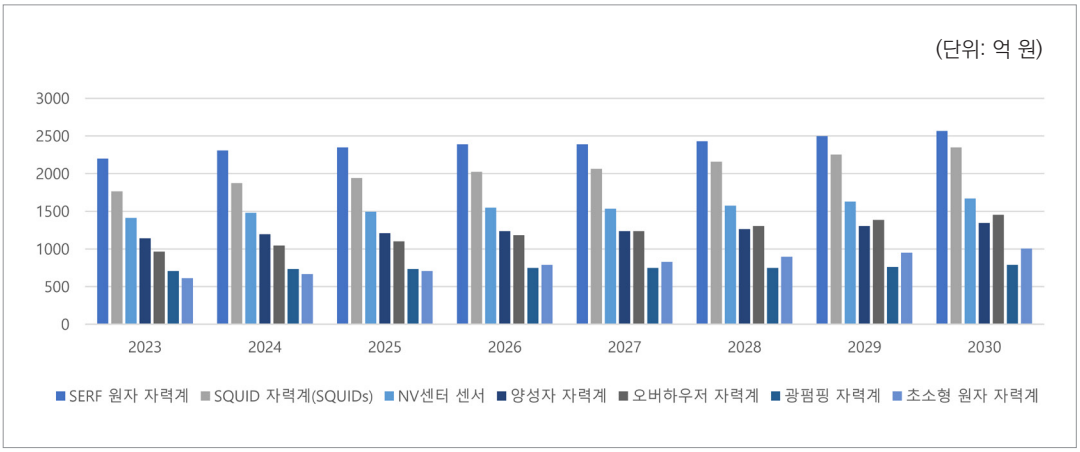
표 I-1-10 부문별 글로벌 양자자력계 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
SERF 원자 자력계	2,198	2,307	2,348	2,388	2,388	2,429	2,497	2,565	2.2%
SQUID 자력(SQUIDs)	1,764	1,873	1,941	2,022	2,063	2,158	2,253	2,348	4.2%
NV센터 센서	1,411	1,479	1,493	1,547	1,533	1,574	1,628	1,669	2.5%
양성자 자력계	1,140	1,194	1,208	1,235	1,235	1,262	1,303	1,343	2.3%
오버하우저 자력계	963	1,045	1,099	1,181	1,235	1,303	1,384	1,452	6.0%
광펌핑 자력계	706	733	733	746	746	746	760	787	1.5%
초소형 원자 자력계	611	665	706	787	828	896	950	1,004	7.3%
합계	**8,793**	**9,282**	**9,526**	**9,893**	**10,015**	**10,381**	**10,761**	**11,168**	**3.5%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-11 부문별 글로벌 양자자력계 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

3. 수요산업별 글로벌 양자센싱 시장

가. 양자센싱·이미징 시장

양자센싱·이미징 시장을 수요자 부문별로 살펴보면 국방산업이 가장 큰 수요자로서, 2023년 글로벌 센서 시장에서 점유율 20.8%로 2,426억 원의 매출을 형성할 것으로 보인다. 두 번째로 큰 수요는 교통 분야로 전체 양자센싱·이미징 시장에서 18.0% 비중을 차지하고 있다. 그 외 공공안전(14.0%), 농업(12.6%), 정유가스(7.9%)도 양자센싱·이미징의 주요 활용 부문으로 자리 잡고 있다. 2023년 기준 국방산업이 가장 큰 비중을 차지하고 있지만 향후 7년 후에는 교통 분야가 13.3% 정도의 높은 성장이 예상되므로 가장 큰 시장 규모(5,025억 원)를 형성할 것으로 전망한다.

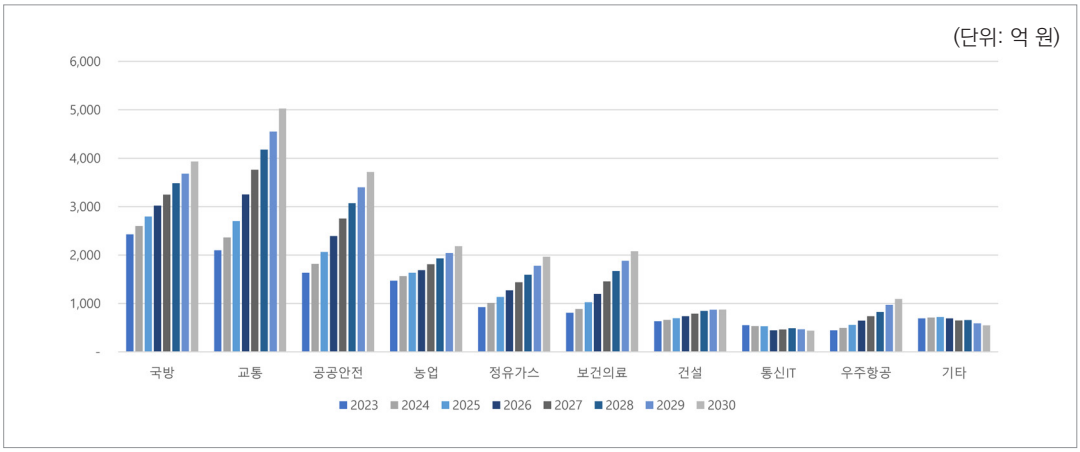
표 Ⅰ-1-11 수요산업별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
국방	2,426	2,600	2,794	3,021	3,247	3,482	3,679	3,934	7.1%
교통	2,099	2,361	2,700	3,251	3,762	4,175	4,549	5,025	13.3%
공공안전	1,634	1,817	2,063	2,392	2,753	3,071	3,397	3,715	12.5%
농업	1,470	1,563	1,634	1,688	1,812	1,930	2,042	2,183	5.8%
정유가스	923	1,011	1,133	1,272	1,436	1,592	1,779	1,965	11.4%
보건의료	805	882	1,025	1,196	1,453	1,668	1,881	2,076	14.5%
건설	631	657	692	737	787	844	870	874	4.8%
통신·IT	550	531	528	445	463	487	464	437	-3.2%
우주항공	444	493	555	643	735	824	972	1092	13.7%
기타	689	707	719	689	649	654	588	547	-3.3%
합계	11,670	12,621	13,843	15,334	17,097	18,727	20,219	21,849	9.4%

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-12 수요산업별 글로벌 양자센싱·이미징 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

나. 양자자력계 시장

양자자력계 시장을 수요자 부문별로 살펴보면 보건의료산업이 가장 큰 수요자로서, 2023년 글로벌 센서 시장에서 점유율 24.1%로 2,117억 원의 매출을 형성할 것으로 보인다. 두 번째로 큰 수요는 국방 우주 분야로 전체 양자자력계 시장에서 22.1% 비중을 차지하고 있다. 그 외 글로벌 포지셔닝 및 통신(20.1%), 지구물리학응용(18.1%), 과학기술 R&D(16.0%)도 양자자력계의 주요 활용 부문으로 자리 잡고 있다.

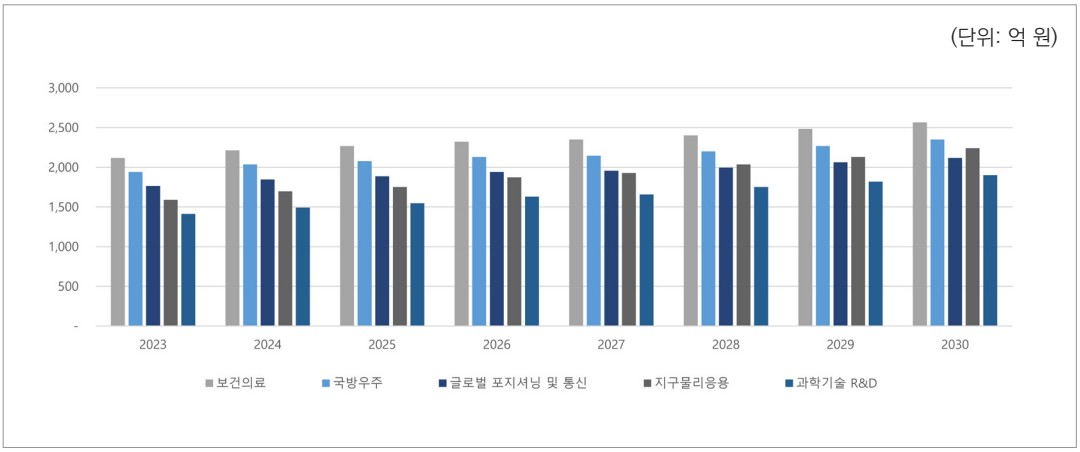
표 I-1-12 수요산업별 글로벌 양자자력계 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
국방	2,426	2,600	2,794	3,021	3,247	3,482	3,679	3,934	7.1%
교통	2,099	2,361	2,700	3,251	3,762	4,175	4,549	5,025	13.3%
공공안전	1,634	1,817	2,063	2,392	2,753	3,071	3,397	3,715	12.5%
농업	1,470	1,563	1,634	1,688	1,812	1,930	2,042	2,183	5.8%
정유가스	923	1,011	1,133	1,272	1,436	1,592	1,779	1,965	11.4%
보건의료	805	882	1,025	1,196	1,453	1,668	1,881	2,076	14.5%
건설	631	657	692	737	787	844	870	874	4.8%
통신·IT	550	531	528	445	463	487	464	437	-3.2%
우주항공	444	493	555	643	735	824	972	1092	13.7%
기타	689	707	719	689	649	654	588	547	-3.3%
합계	**11,670**	**12,621**	**13,843**	**15,334**	**17,097**	**18,727**	**20,219**	**21,849**	**9.4%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-13 수요산업별 글로벌 양자자력계 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

제4절 양자컴퓨팅 시장동향

1. 국내외 시장

글로벌 양자컴퓨팅 시장 규모는 2023년 말 18조 8,352억 원으로 추정하며, 연평균 30.9% 성장을 지속해 2030년에는 123조 8,263억 원으로 늘어날 것으로 전망된다.[16] 〈표 I-1-13〉에서 보듯이 현재 양자컴퓨팅 시장에서 하드웨어는 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 2023년 하드웨어는 매출 15조 627억 원으로 전체 양자컴퓨팅 시장에서 80.0% 정도를 점유하며, 응용 소프트웨어는 3조 원으로 17.0%, 양자컴퓨팅 서비스(Quantum Computing as a Service, QCaaS)는 3.0% 정도의 점유율을 차지할 것으로 보인다. 그러나 응용 소프트웨어는 연평균 43.9% 성장을 지속하며 하드웨어(25.6%)보다 빠르게 성장해, 2030년엔 매출 40조 8,593억 원으로 하드웨어(74조 2,958억 원)와 점유율 격차를 크게 줄일 것으로 전망된다.

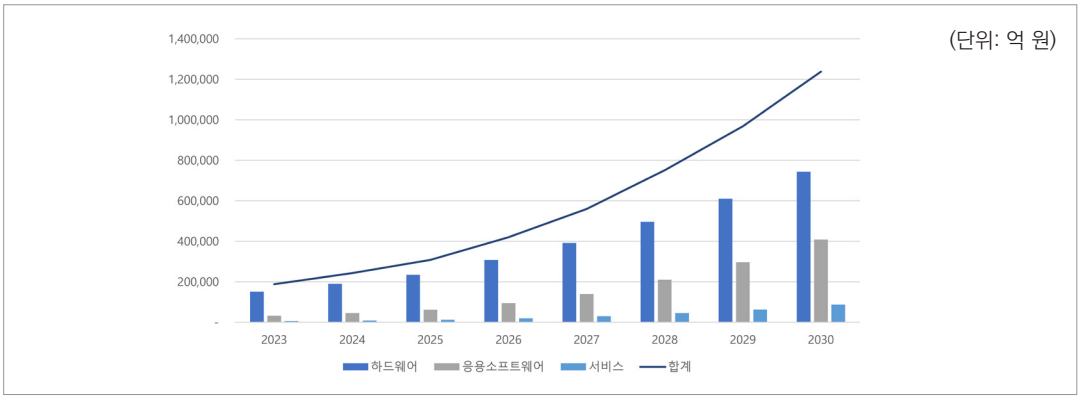
표 I-1-13 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
하드웨어	150,627	189,437	233,947	306,953	391,630	495,848	609,836	74,2958	25.6%
응용 소프트웨어	32,025	44,917	61,608	94,176	138,821	210,335	29,6233	40,8593	43.9%
양자컴퓨팅 서비스	5,699	8,549	12,349	1,9405	29,040	45,052	6,2015	8,6712	47.5%
합계	**188,352**	**242,903**	**307,903**	**420,534**	**559,491**	**751,235**	**968,084**	**1,238,263**	**30.9%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-14 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

16) Mind Commerce (2023)

한편 국내 양자컴퓨팅 시장은 2023년 1,750억 원 정도로 추정하고 있다.[17] 국내 양자컴퓨팅 시장은 연평균 31.9% 성장을 지속해 2030년엔 6,866억 원에 이를 것으로 전망된다.

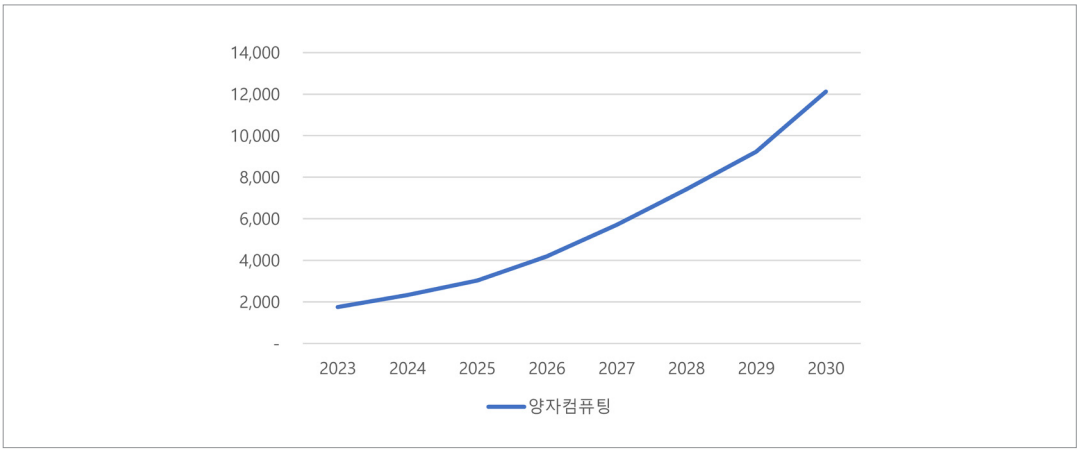
표 I-1-14 국내 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

연도	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자컴퓨팅	1,750	2,339	3,036	4,195	5,708	7,424	9,233	12,125	31.9%

※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-15 국내 양자컴퓨팅 시장 전망



※ Mind Commerce (2023), IQ4I (2022) 집필진 재구성

17) Mind Commerce (2023), IQ4I (2022)

2. 부문별 글로벌 양자컴퓨팅 시장

글로벌 양자컴퓨팅 시장은 구축 방식에 따라서 크게 온프레미스(On-Premise)와 클라우드로 구분할 수 있다.[18] 2023년 온프레미스 방식은 1조 9,211억 원 규모이며, 해마다 27.5% 증가해 2030년에는 10조 5,253억 원으로 성장할 것으로 보인다. 한편 클라우드 방식은 2023년 16조 9,141억 원 규모이며, 연평균 31.2% 성장해 2030년 약 113조 3,010억 원의 시장을 형성할 것으로 전망돼, 온프레미스 방식보다 10배 정도 큰 규모로 예측된다. 온프레미스는 컴퓨터 구매부터 하드웨어·소프트웨어 업그레이드, 신뢰성(Reliability) 문제, 부품 조달 등의 비용이 발생하는 단점이 있고, 클라우드는 보안·개인정보 등을 원격 사용자의 요구사항대로 통제하기 어렵다. 게다가 양자알고리듬이 클라우드 공급업체에 무방비로 노출될 수 있다는 단점이 있다. 결국 각 구축 방식의 경제적 효용성은 사용자의 판단 영역이다. 예를 들어 온프레미스 방식을 선택하게 되면, 양자컴퓨팅 관련 내부 인력을 구축할 수 있어 자신들의 요구사항을 좀 더 정확히 파악하고 적용할 수 있는 혁신적 사용자가 될 수 있다.[19] 그러므로 향후 사용자들이 양자컴퓨팅을 도입하는 경우 각각의 장단점을 고려하게 될 것이며, 이러한 구축 방식이 산업 분야마다 어떤 식으로 확산할 것인지에 관심을 둬야 할 때이다.

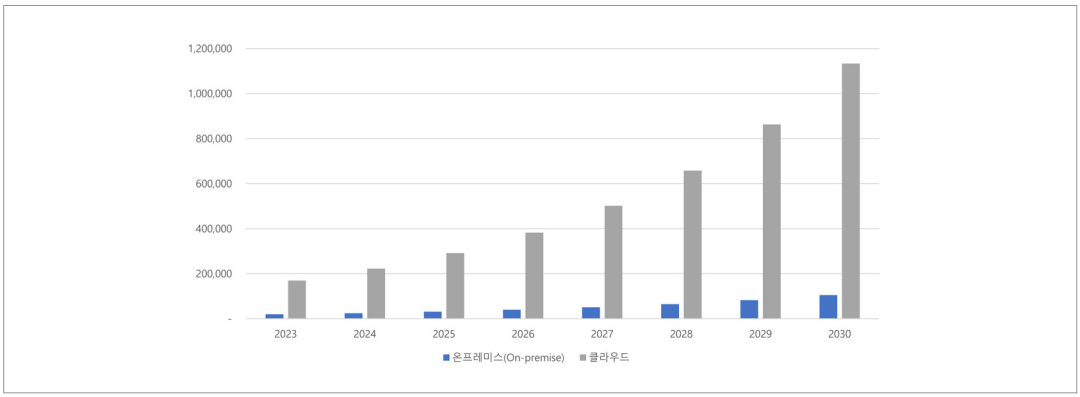
표 Ⅰ-1-15 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
온프레미스(On-premise)	19,211	24,495	31,231	39,819	50,769	64,731	82,532	105,253	27.5%
클라우드	169,141	221,912	291,149	381,988	501,168	657,532	862,682	1,133,010	31.2%
합계	**188,352**	**246,407**	**322,380**	**421,807**	**551,937**	**722,263**	**945,214**	**1,238,263**	**30.9%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-16 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

18) 온프레미스(On-Premise)란 하드웨어, 소프트웨어 등을 원격 환경이 아닌 자체 보유 공간에서 직접 운영하는 방식을 의미함

19) Swinhoe (2021)

양자컴퓨팅의 애플리케이션은 기계학습, 최적화, 시뮬레이션, 금융서비스, 전자소자, 사이버보안 등으로 구분할 수 있다. 2023년 기계학습의 시장 규모는 4조 7,088억 원으로 전체 애플리케이션 시장에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 다음으로 최적화(22.0%), 시뮬레이션(18.0%)이 뒤를 이어 높은 비중을 차지하고 있다. 한편, 향후 7년간 시뮬레이션 모델링 분야가 32.8% 규모로 가장 큰 성장이 전망되며, 2030년에 이르러서는 24조 7,653억 원의 매출을 달성할 것으로 전망한다. 그 외에도 전자소자, 사이버보안 등이 각각 34.3%, 24.7% 규모의 높은 성장을 기록하여 두 분야 합산 10조 원 이상의 시장이 전망된다.

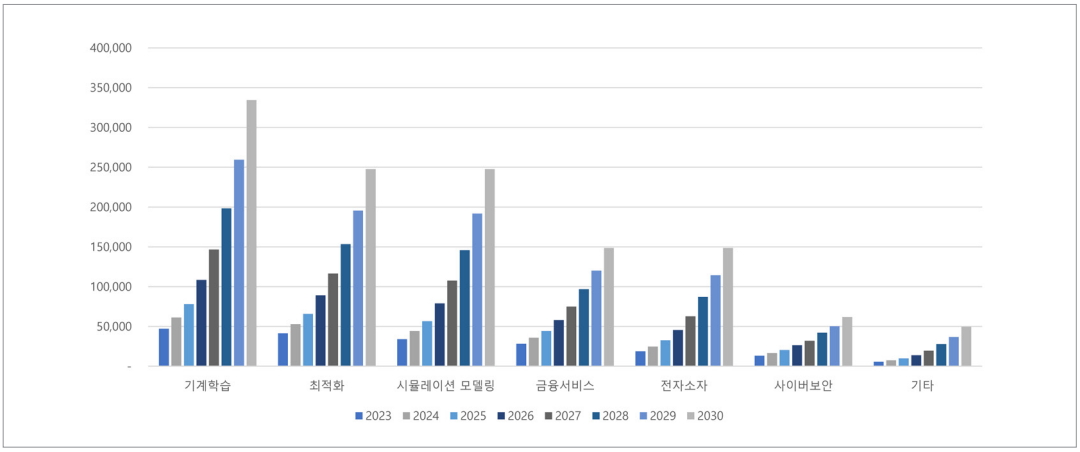
표 I-1-16 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
기계학습	47,088	61,201	78,163	108,424	146,556	198,393	259,458	334,365	32.3%
최적화	41,389	52,923	65,815	89,155	116,431	153,341	195,544	247,653	29.1%
시뮬레이션 모델링	33,925	44,238	56,587	78,977	107,474	145,742	191,744	247,653	32.8%
금융서비스	28,226	35,689	44,374	58,080	74,906	96,890	120,095	148,592	26.8%
전자소자	18,862	24,697	32,568	45,460	62,693	87,119	114,259	148,592	34.3%
사이버보안	13,163	16,555	20,355	26,462	31,890	42,067	50,345	61,879	24.7%
기타	5,699	7,464	9,906	13,841	19,541	27,819	36,775	49,531	36.2%
합계	**188,352**	**242,767**	**307,768**	**420,399**	**559,491**	**751,371**	**968,220**	**1,238,263**	**30.9%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 I-1-17 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

3. 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장

양자컴퓨팅 기술에 대한 산업 수요는 매우 다양하다. 현재 보건·의료, 은행·금융·보험, 공공안전 및 국방 등은 양자컴퓨팅 기술에 대한 수요가 가장 큰 산업 부문들이다. 보건·의료는 2023년 3조 9,082억 원의 관련 매출이 발생할 예정이며, 연평균 28.2% 성장해 2030년에는 22조 2,819억 원에 이를 것으로 전망된다. 은행·금융·보험은 2023년 3조 3,789억 원이며 연평균 35.6%의 높은 성장률을 지속해 2030년 28조 4,699억 원의 가장 큰 시장을 형성할 것으로 보인다. 정부·공공안전 및 국방·우주 분야도 양자컴퓨팅에 대한 수요가 매우 클 것으로 보여, 2030년 두 부문에서만 총 30조 원 규모 이상의 매출을 기대하고 있다.

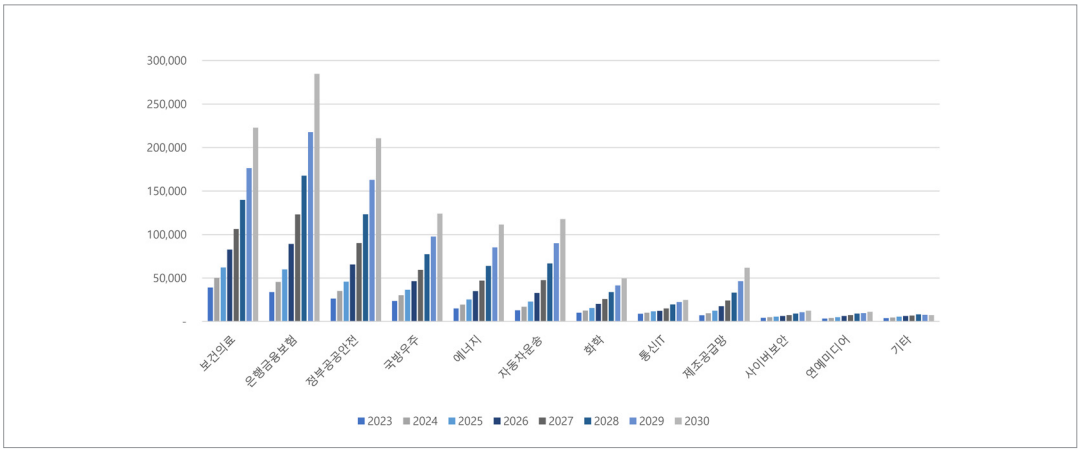
표 Ⅰ-1-17 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
보건·의료	39,082	50,073	62,151	82,777	106,389	139,771	176,274	222,819	28.2%
은행·금융·보험	33,789	45,460	59,979	89,155	123,080	167,590	217,799	284,699	35.6%
정부·공공안전	26,326	35,011	45,867	65,543	90,105	123,216	162,704	210,606	34.6%
국방·우주	23,612	30,125	36,368	46,274	59,301	77,349	97,704	123,894	26.7%
에너지	14,927	19,405	25,240	34,875	47,088	63,915	85,220	111,410	33.3%
자동차·운송	12,892	16,969	22,798	32,839	47,631	66,764	89,969	117,652	37.1%
화학	10,178	12,620	15,471	20,219	25,783	33,789	41,524	49,531	25.4%
통신·IT	8,956	10,178	11,670	12,213	15,063	19,541	22,255	24,833	15.7%
제조·공급망	7,192	9,363	12,349	17,641	24,019	33,111	46,409	61,879	36.0%
사이버보안	4,207	4,885	5,564	6,242	7,328	9,092	10,585	12,349	16.6%
연예·미디어	3,257	4,071	4,885	6,242	7,328	9,092	9,635	11,127	19.2%
기타	3,800	4,614	5,564	6,242	6,785	8,278	7,735	7,328	9.8%
합계	**188,216**	**242,767**	**307,903**	**420,263**	**559,898**	**751,507**	**967,812**	**1,238,127**	**30.9%**

※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-18 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



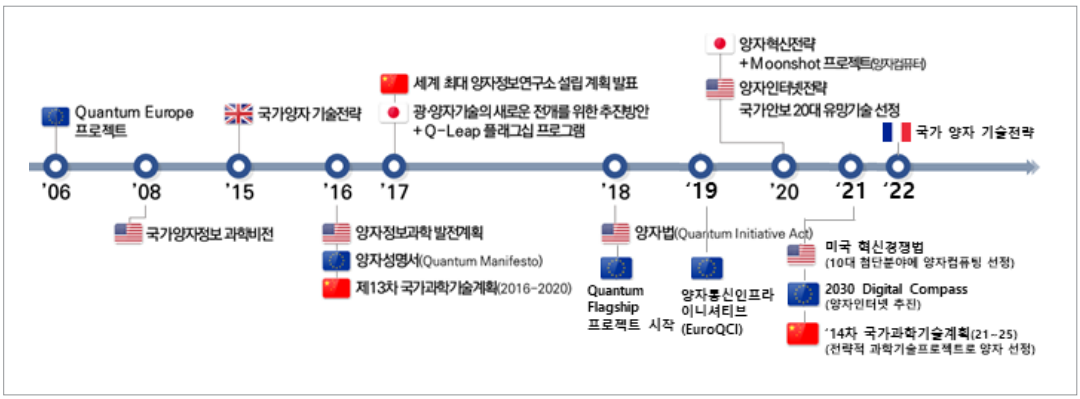
※ Mind Commerce (2023) 집필진 재구성

제2장
국내외 정책동향

제1절 개요

해외 주요국들은 양자분야 활성화를 위해 정부 주도로 법·제도적 기반 마련과 함께 국가 양자기술 확보 정책 및 로드맵 수립에 나서고 있다. 이를 기반으로 대규모 예산을 장기적으로 투입해 기초연구를 지원하고, 산업적 응용 가능성이 높은 분야를 중심으로 산업화를 촉진하고 있다.

그림 I-2-1 주요국 양자분야 정책 및 입법 현황



※ 과학기술정보통신부 (2023)

미국에서는 2020년 7월 네트워크 전략비전을 수립해 향후 10년 내 양자네트워크를 전국적으로 구현한다는 방침을 제시했다.[20] 단기적으로는 2025년까지 양자 상호연결과 양자중계기, 양자메모리 개발 등에 역점을 둔다는 계획이며, 장기적으로는 2040년까지 국가 차원에서 양자네트워크를 통합한다는 전략이다. 양자센서 분야의 밑그림은 2022년 3월 백악관 국가과학기술심의회 양자정보과학 소위원회를 통해 제시됐다. 그 내용을 들여다보면 양자센서는 양자컴퓨팅 및 양자통신에 비해 비교적 성숙시장이나, 전체적으로는 아직 초기단계에 불과하고 향후 다양한 산업영역에서의 활용이 기대되므로 지속적 투자를 통한 단기적 산업 활성화가 필요하다는 방향성을 담고 있었다.

유럽은 '양자 선언문(Quantum Manifesto)'에 근거한 10억 유로(약 1조 3,500억 원) 규모의 연구개발 투자가 진행 중에 있다. 과학 연구와 산업경쟁력을 강화해 '제2의 양자 혁명'에 불을 붙이는 것이 목적으로 영국, 독일, 네덜란드 등의 국가에서는 독자적인 양자기술 전략과 정부 투자도 준비하고 있다.

20) The White House National Quantum Coordination Office (2022)

중국은 국가적으로 양자기술에 주력하고 있다. 특히 양자통신 분야에서의 기술이 눈에 띄게 발전 중인데, 베이징과 상하이를 연결하는 총 2,000km가 넘는 양자통신 간선 네트워크를 구축했고 인공위성 '묵자'에 의해 양자암호키를 분배하고 양자 텔레포테이션 실험에 성공하는 등 대표적인 성과들을 내놓고 있다. 양자컴퓨터 분야에서도 '지우장(九章) 2호', '쭈충즈(祖沖之) 2호'를 통해 양자초월 실험을 검증하는 등 매우 적극적으로 연구개발을 진행하고 있다.

일본은 2017년 8월 문부과학성이 '양자과학기술(광·양자기술)의 새로운 추진 방책'을 발표하며 양자기술 육성의 신호탄을 쐈다. 이어 2018년 12월에는 내각부가 "향후 이노베이션을 추진하는데 있어 중요한 3가지 분야"로 AI, 바이오와 더불어 '광·양자'를 언급했다. 또 2020년 1월에는 일본 최초의 양자기술에 관한 통합 전략인 '양자기술 이노베이션 전략'을 발표하며, 양자기술 개발에 대한 글로벌 트렌드에 합류하기 시작했다. 또한 2022년 4월 '양자미래사회비전'을 공표하여 양자기술을 사회경제시스템 전체에 도입하고 기존 기술 시스템과의 융합을 통해 일본 산업의 성장기회를 창출하고 사회 과제를 해결하기 위한 노력을 진행하고 있다.

우리나라의 경우 출발이 상대적으로 늦은 탓에 다른 나라에 비해 큰 기술격차를 보이고 있다. 이에 과학기술정보통신부에서는 2019년부터 양자센서 분야·양자컴퓨터 분야·양자암호통신 분야 신규사업 지원을 확대하고 있다. 구체적으로 대학, 연구소 등 연구조직을 강화하고, 양자암호통신인프라 시범사업을 추진 중에 있으며, 산업 생태계 활성화를 위한 다양한 노력을 기울이고 있다.

표 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책

국가	주요 내용	예산
미국	• 세계 최초 '국가 양자 이니셔티브 법' 제정(2018.12)으로 10년간 양자 연구개발 지원, 백악관 주도 범부처 계획 조정 및 연방기관 간 활동 연계, 민관 협력 지원 • '미국 양자네트워크 전략적 비전' 발표(2020.02, 2020.07)로 10년 내 양자네트워크의 전국적 구현으로 국가 차원에서 양자 정보네트워크 통합 • 혁신경쟁법 내 10대 첨단기술 분야 중 하나로 양자컴퓨팅을 포함(2021.06) • 'Bringing Quantum Sensors to Fruition(2022.03)'을 통한 양자센서 산업화의 단기 목표 설정 • 백악관 산하에 '국가 양자 이니셔티브 위원회' 설치, 양자컴퓨터를 통한 사비어 보안 리스크 대응을 위한 '국가안보각서' 서명(2022.05) • 2023년 11월에 발의된 NQI Act Reauthorization(국가 양자 이니셔티브 재승인법)에서 NIST에 양자센싱 관련 센터 최대 3개 설립 권한 부여('24-'28 간 매년 최대 5,400만 달러 지원)	국가 양자 이니셔티브 법 예산 2019-2023년 최대 12억 달러

국가		주요 내용	예산
유럽	EU	• 중장기 양자기술 로드맵 하에서 10년간 10억 유로를 투입하는 '양자기술 플래그십' 프로젝트 운영 • '2030 Digital Compass'에서 25년까지 유럽 최초의 양자컴퓨터 개발 목표 제시(2021.03) • 양자기술 경쟁력·양자경제·산업 촉진을 위한 중소기업, 대기업, 투자기업 및 연구기관 등의 '유럽양자기업컨소시업' 출범(2021.04)	양자 플래그십 예산 2018-2027년 10억 유로
	영국	• 장기적 양자기술 R&D 투자 유도를 위한 '양자기술 국가전략' 발표 • 양자컴퓨팅 상용화 및 사업화 지원(2019.06) 및 양자분야 산업화를 위해 38개 과제 투자 발표	국가 양자기술 프로그램 허브 구축 예산 2014-2018년 2.7억 파운드
	독일	• 연방정부 차원의 양자기술 관련 프레임워크 프로그램을 마련하여 연구 환경, 산업경쟁력 등을 개선 • 연방교육연구부 주도로 세계 최고수준의 기술 주권 확보를 위한 '양자기술 실행 컨셉' 승인(2023.04)	연방정부 프레임워크 프로그램 예산 2018-2022년 6.5억 유로
	프랑스	• 양자컴퓨터 개발을 통한 기술주권 보장을 위한 '양자 전략계획' 개시(2021.01) • 양자기술 국가전략 수립과 연구개발 프로젝트 선정(2022.03)	-
캐나다		• 우주항공·국방·보안 등 양자기술 적용으로 시너지 효과 창출이 예상되는 분야에 연구 집중 • 대학을 양자분야 혁신거점으로 육성하기 위해 전폭 지원 • 양자기술 개발, 기업 및 인재 양성을 위한 '국가양자전략' 수립(2023.02)	연방정부 연간 1억 달러 수준의 예산 투입
중국		• 양자제어·양자정보를 국가전략 분야로 격상시키고 세계 최대 규모의 연구소 설립 등을 통해 양자기술 강국 도약 준비 • 지방정부 단위에서 생태계 구축을 목표로 한 양자산업 클러스터 조성 • 2014.5 규획에서 전략적 과학기술 프로젝트로 '양자정보' 선정(2020.10)	양자정보과학국가연구소 사업 예산 2018-2022년 1,000억 위안
일본		• 첨단 연구 프로그램에서 수행된 기초연구 성과를 토대로 사업화·산업화 촉진. '양자기술 이노베이션 전략' 수립(2020.01) • 소사이어티 5.0 실현 목표 하에 자국 강점분야뿐만 아니라 주변기술까지 대상을 확대해 지원 • '양자기술의 실용화·산업화를 위한 방침 및 실행계획 전략' 발표(2022.03)	Q-Leap 프로그램 예산 2018년 22억 엔, 2019년 22억 엔
호주		• 양자산업 육성을 위한 투자 확대 추진 중 • '국가양자전략'을 발표 2045년 46억 달러(A$) 가기창출 및 대규모 고용창출 목표 제시(2023.05)	호주연구위원회 예산 1.3억 호주달러
한국		• 양자기술 연구개발 투자전략 수립을 통한 투자의 확대와 양자암호통신인프라 시범사업 등 양자정보통신 저변 확대 및 산업 전반 활성화를 노력 중 • 글로벌 양자경제 선도를 위한 '양자기술 로드맵' 및 '양자과학기술 비전' 발표(2023.06) • 양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안 제정(국회본회의 통과, 2023.10)	2022년 양자분야 정부지원 규모 790억 원 수준 (실제 예산 지원금액 약 818억 원)

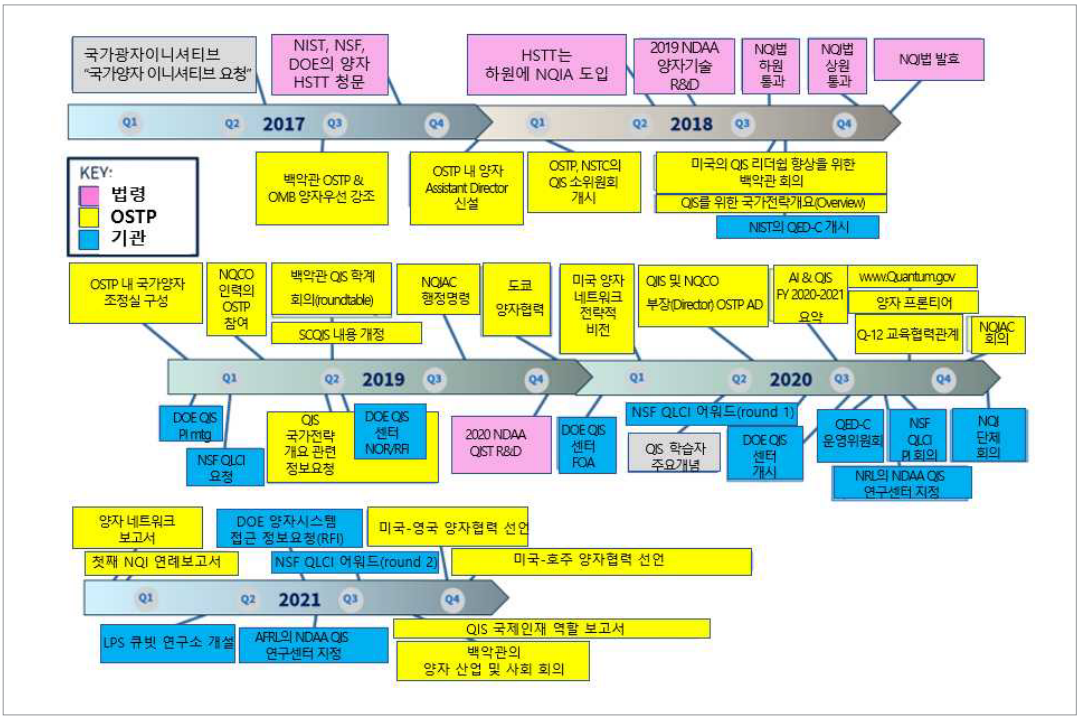
※ IITP (2022) 집필진 재구성

제2절 해외 정책 동향

1. 미국

미국은 양자기술 분야의 글로벌 리더십 확보를 가속화하기 위해 2018년 12월 세계 최초로 '국가 양자이니셔티브(National Quantum Initiative Act, NQI) 법'을 제정했다. 해당 법령의 현실화를 위해 이후 범정부적 양자 관련 거버넌스 추진체계[21]를 구성하고 연구센터 설립, 지원 법률 제정, 국제적인 협력 강화 등 다양한 정책을 펼쳐 나갔다.

그림 I-2-2 미국 양자 이니셔티브 추진 타임라인(2017~2021)



※ NSTC (2021) IITP (2022)

또한 2023년 11월 국가 양자 이니셔티브 재승인법(NQI Act Reauthorization)이 발의되면서 NIST에 양자센싱 관련 센터가 최대 3개 설립 권한이 부여되어 2024년부터 2028년까지 매년 최대 5,400만 달러를 지원하게 된다.

21) 백악관 직속 국가양자조정실(National Quantum Coordination Office, NQCO), 국가과학기술자문위원회(National Science and Technology Council, NSTC) 산하 양자정보과학소위원회(Subcommittee on Quantum Information Science, SCQIS) 신설을 통해 양자정보과학(Quntum Information Science) 전략계획 수립

국가 양자이니셔티브(NQI) 연구개발 프로그램은 양자컴퓨터, 양자통신, 양자센서를 모두 포괄한다. 양자기술의 기반을 이루는 과학기술에 대한 종합적인 연구 수행 프로그램인 것이다.

표 Ⅰ-2-2 미국 양자이니셔티브 프로그램 구성요소

연구개발 분야		주요 연구내용
센서	QSENS (Quantum Sensing and Metrology)	양자 중첩 및 얽힘, 비고전적인 빛 상태, 새로운 계측 체계 또는 양식, 원자시계 등 양자제어로 가능해진 정확성 및 정밀도 향상 과업의 실현을 위한 제반 연구들
컴퓨터	QCOMP (Quantum Computing)	양자 비트(큐비트) 및 얽힘 게이트(gate), 양자 알고리듬 및 소프트웨어, 프로그래밍 가능한 양자장치를 사용한 디지털 및 아날로그 양자 시뮬레이터, 양자 컴퓨터 및 프로토타입, 양자+고전 컴퓨팅 시스템 개발 등
통신	QNET (Quantum Networking)	새로운 정보기술 응용 및 기초 과학을 위해 얽힌 양자 상태(장거리에 걸쳐 분산되고 여러 당사자가 공유)를 생성 및 이용, 고전적 컴퓨팅 능력을 뛰어넘는 향상된 중간 규모 양자 컴퓨터(모듈)의 네트워킹 연구 등
기반 과학 기술	QADV (QIS for Advancing Fundamental Science)	다른 학문 분야의 기본 지식을 확장하기 위해 양자 장치 및 QIS 이론을 적용하기 위한 연구를 수행하며 생물학, 화학, 계산, 우주론, 에너지 과학, 공학, 재료, 핵 물질 등 기타 기초과학 측면에 대한 이해를 향상
	QT (Quantum Technology)	다양한 주제에 걸쳐 연구를 수행 - 최종 이용자와 협력해 현장에서 양자기술을 배포하고 사용 사례를 개발 - 전자 · 광학 · 극저온을 위한 기반 시설 및 제조 기술 등 양자 과학 · 공학 지원을 위한 기초연구 - 양자기술(예: 양자 후 암호화)에 의해 발생하는 위험을 이해하고 완화

※ NSTC (2021) IITP (2022)

미·중 패권 경쟁에서의 안보 우위를 점하고자 2019년에는 양자정보과학을 5G, AI, 빅데이터, 로봇, 항공우주와 함께 우선순위 집중투자 대상으로 선정했다.[22] 같은 해 12월에는 백악관 과학기술정책실(Office of Science and Technology Policy, OSTP)에서 국가 최상위 사이버보안 연구개발 4개년 전략계획 보고서를 발표했으며, 사이버 보안 6대 중점 분야로 양자정보과학을 선정했다. 세부적으로 양자 소프트웨어 및 하드웨어 안정성 강화, 효율적 양자 암호화 프로토콜 개발, 양자정보과학 기반 사이버 공격 예측 및 대응 등이 중점분야로 지정되었다.

또한 백악관 과학기술정책실 국가양자과학정책처에서는 2020년 2월과 7월 '국가 양자정보과학(Quntum Information Science) 네트워크 전략 비전'을 발표했다. 단기적으로는 2025년까지 양자 상호연결과 양자중계기, 양자메모리 개발 등에 역점을 둔다는 계획이며, 장기적으로는 2040년까지 국가 차원에서 양자네트워크를 통합한다는 전략을 제시했다.

22) https://www.nextgov.com/artificial-intelligence/2020/10/white-house-strategy-names-20-emerging-technologies-crucial-national-security/169293/

표 Ⅰ-2-3 미국 양자정보과학 네트워크 전략 비전의 장단기 목표

기간	기간별 목표
단기 5년 (2020~2025년)	양자정보과학(QIS) 분야의 기초과학 지식과 핵심기술 발전을 통해 기존의 양자연결명(Interconnects), 양자순환기(Repeaters) 및 양자메모리(Memories)로부터 새로운 고성능 양자채널(High-throughput Quantum Channels) 및 효율적 장거리 연결망 재배치로의 대대적 전환 추진
	국가안보 강화, 보건복지 증진, 경제적 수익 창출 및 과학적 진보를 위해 새로운 고성능 양자채널과 장거리 연결망 재배치로 인한 파급효과의 새로운 응용 가능성 규명
장기 20년 (2020~2040년)	단기 5년 목표를 통해 구축된 새로운 양자정보 네트워크를 바탕으로 기존의 전통적 정보통신 네트워크에서 실현하지 못한 초고속 고성능 업무와 정보처리 추진
	국가 차원의 양자정보 네트워크 통합의 파급효과와 그 한계점 및 개선 가능성 파악

※ KISTEP (2021a)

2022년 3월 미국 백악관 국가과학기술자문위원회(NSTC)의 양자정보과학 소위원회(SCQIS)는 정부기관이 사용자와 파트너십을 형성하는 '양자센서 산업화 정책'을 추진 중에 있다. 양자센서 산업화 정책은 정부기관, 산업계, 학계 모두 잠재적 최종 소비자로 인식하며 센싱 기술을 사용하는 기관들의 자발적인 파트너십 형성을 추구한다. 구체적으로 사용자로서 양자기술 연구개발 커뮤니티와 협력해 연구보고서 발간을 비롯한 지식공유 행위뿐 아니라, 양자기술 상용화에 필요한 기술 시스템 및 인프라[23] 관련 R&D 지원에 집중하고 있다.

더불어 2022년 5월 백악관 산하에 '국가 양자 이니셔티브 위원회'를 설치하는 행정명령에 서명하였다. 위원회는 백악관 산하에서 양자 정보 과학기술에 대한 가장 최신의 정확하고 적절한 정보를 대통령과 의회, 연방 기관과 국민에게 제공하는 역할을 담당한다. 또한 양자컴퓨터가 미국의 사이버보안에 제기하는 리스크에 대응할 수 있는 '국가 안보 각서(National Security Memorandum)에 서명하였다.

또한 NIST, NSF, DOE 등 연방 정부기관들은 양자기술 분야 중 양자 컴퓨터·통신·센서·기반기술 등의 부문에서 다각적인 연구개발을 추진하고 있다.

23) 특수재료, 제조시설, 집적광자기술, 레이저, 진공시스템 등

표 Ⅰ-2-4 연방기관별 양자기술 연구개발 현황

기관	주요 연구내용
NIST	• 양자시대(Post-quantum) 이후 암호기술 표준화 작업 진행 중 – 양자기술의 고전 암호에 대한 영향, 차세대 암호 전이계획 등을 담은 포스트 퀀텀 암호 준비(Getting Ready for Post Quantum Cryptography) 보고서 발표(2021.04)
NSF	• 미래 10대 Big Idea 중 하나로 "양자도약(Quantum Leap)"을 제시하고, 퀀텀 도약을 위한 연구과제 추진(광자를 이용한 양자 머신러닝 등 40여 과제 추진 중) • 2022 회계연도는 다음 3개 목표를 중점으로 연구과제 추진 (1) 양자 현상 및 체계에 대한 근본적인 이해와 그 기본 지식을 기술 응용으로 변환 촉진 (2) 입증 가능한 양자 이점을 가진 개념 증명의 기기, 어플리케이션, 도구 또는 시스템 제공 (3) NSF가 접근할 수 있는 모든 역량을 강화하고, 양자기술의 혁신을 구현할 양자 지식인력을 양성
DoE	• 2020년 5개의 국가양자정보과학연구센터(Q-Next, C2QA, SQMS, QSA, QSC)를 설립하고, 산학협력에 기반을 둔 양자연구 수행 • 고등양자과학기술 관련 재료 및 화학 연구에 7,300만 달러 투입 발표(2021.07)
DoD	• 양자기술을 국방부의 11개 우선순위 중 하나로 선택하고 국방과학연구소(DARPA), 육해군 연구소(ARL, NRL, AFRL) 등을 통해 연구를 수행 – 국방 분야 활용 가능한 선도적인 원자시계, 양자센서, 양자컴퓨터, 양자네트워크 등에 대한 포괄적인 연구 수행
NASA	• 지식, 교육, 혁신, 경제적 활력 및 지구 관리를 강화하기 위해 양자과학 기술그룹, 연구센터들(Glenn, Ames, Goddard Space Flight) 등을 운영해 항공우주 관련 양자연구 수행
NSA	• 물리과학연구소(LPS)를 통해 양자기술과 활용기술을 연구하고, 대학들의 연구를 지원 – 고성능 큐비트 시스템 프로그램(SHiFT), 중간 규모 시스템의 양자특성 프로그램(QCISS), 신흥 큐비트 과학기술(NEQST), 교차 양자기술 프로그램(CQTS) 등을 통해 연구 수행
IARPA	• 정보기관과 연방정부에 혁신적인 기술을 제공하기 위해 고위험 · 고혜택 R&D 후원 – 최근 양자 어닐링에 대한 QEO(Quantum Enhanced Optimization) 및 논리 큐비트 개발을 위한 LogiQ 프로그램 개발 추진

※ NSTC (2021) IITP (2022)

에너지부(DoE)는 연구소, 대학, 민간기업과 파트너십을 통해 5개의 국가양자기술연구센터(Q-NEXT, C2QA, SQMS, QSA, QSC)를 구축했다. 국가양자기술연구센터에서는 강력한 양자컴퓨터, 해킹할 수 없는 통신 네트워크, 초고감도 기기 및 센서, 획기적인 신소재 분야 등에 대한 집중적인 연구개발을 수행 중에 있다.

표 I-2-5 미국 주요 양자정보과학(QIS) 연구센터 현황

연구센터명	주관기관	주요 연구내용
차세대 양자과학 및 공학 (Next Generation Quantum Science and Engineering, Q-NEXT)	Argonne 국가연구소	• 양자 상호연결 제공, 통신 링크, 센서 네트워크 및 시뮬레이션 테스트베드를 시연하기 위한 집중적이고 상호 연결된 생태계 조성 • 양자 스마트 인력을 구축하고, 국가 양자장치 데이터베이스를 구축하여 양자표준 개발 • 신생기업에 대한 인센티브 제공 등을 통해 양자기술의 실질적인 상업화 경로 제공
양자이점을 위한 공동설계 센터 (Co-design Center for Quantum Advantage, C2QA)	Brookhaven 국가연구소	• 고에너지 · 핵 · 화학 · 응집 물질 물리학의 과학적 계산을 위한 양자 이점 달성을 위해 오늘날 잡음이 많은 중간 규모 양자(NISQ) 컴퓨터 시스템의 한계 극복 • 연구소 통합 5개년 목표는 소프트웨어 최적화, 기본재료 개발 및 장치 속성 정립, 양자 오류 수정 등이며 각 분야별로 10배 개선을 달성하고 이러한 분야별 개선사항을 결합해 1,000배 개선 제공
초전도 양자재료 및 시스템 센터 (Superconducting Quantum Materials and Systems Center, SQMS)	Fermi 국가가속기 연구소	• 컴퓨팅 및 센서 기술 수준이 우수한 양자 시스템 구축과 보급을 위해 초전도 2D 및 3D 장치의 문제점을 개선하고, 주요 융합과제에서 혁신적인 발전 실현 • 국가 양자기술 생태계에 광범위하게 기여할 수 있는 재료, 물리학, 알고리듬 및 시뮬레이션 등의 현실화를 위한 고유한 파운드리 기능을 실현하고 양자 테스트베드 형태의 유형 결과물을 생성
양자시스템 가속기 (Quantum Systems Accelerator, QSA)	Lawrence Berkeley 국가연구소	• 과학적인 응용 분야에서 인증된 양자 이점 제공에 필요한 알고리듬, 양자장치 및 엔지니어링 솔루션 공동 설계 • 양자기술 프로토타입을 제공해 상업기술의 성숙을 가속화하기 위한 기초과학 기반 마련
양자과학센터 (Quantum Science Center, QSC)	Oak Ridge 국가연구소	• 양자기술의 양자상태 복원력과 제어 가능성을 향상시키고 궁극적으로 확장성의 주요 장애물을 극복하기 위해 혁신적인 토폴로지 양자물질과 알고리듬 및 센서를 발견 · 설계 · 시연하고 혁신적인 기술개발을 촉진 • 새로운 양자기술 응용 프로그램을 민간 부문으로 전환하기 위해 업계와 긴밀한 협력 속에 차세대 양자기술 인력 양성

※ DOE(National QIS Research Centers) IITP (2022)

또한 에너지부 고등과학컴퓨팅연구실은 2020년 2월 양자인터넷 청사진(Quantum Internet Blueprint) 워크숍에서 5개 단계로 구분된 미국 최초의 양자인터넷 로드맵을 제시했는데 그 내용은 〈표 I-2-6〉과 같다.

표 I-2-6 미국 양자인터넷 로드맵 5단계

단계	주요 실행과업
마일스톤1	광 네트워크 상에서 안전한 양자프로토콜 검증
마일스톤2	인프라 캠퍼스 및 시티의 얽힘(Entanglement) 분산
마일스톤3	얽힘 스와핑(Swapping)을 이용한 각 주 간(Intercity)의 양자통신 실현
마일스톤4	양자리피터(Repeater)를 이용한 주 내(Intrastate) 양자얽힘 분산
마일스톤5	실증에서 운영 인프라로 전이하기 위해 기관(연구소, 대학, 산업계) 간 생태계 구축

※ DOE (2020b) IITP (2022) 집필진 재구성

그림 I-2-3 미국 내 양자인터넷 설계

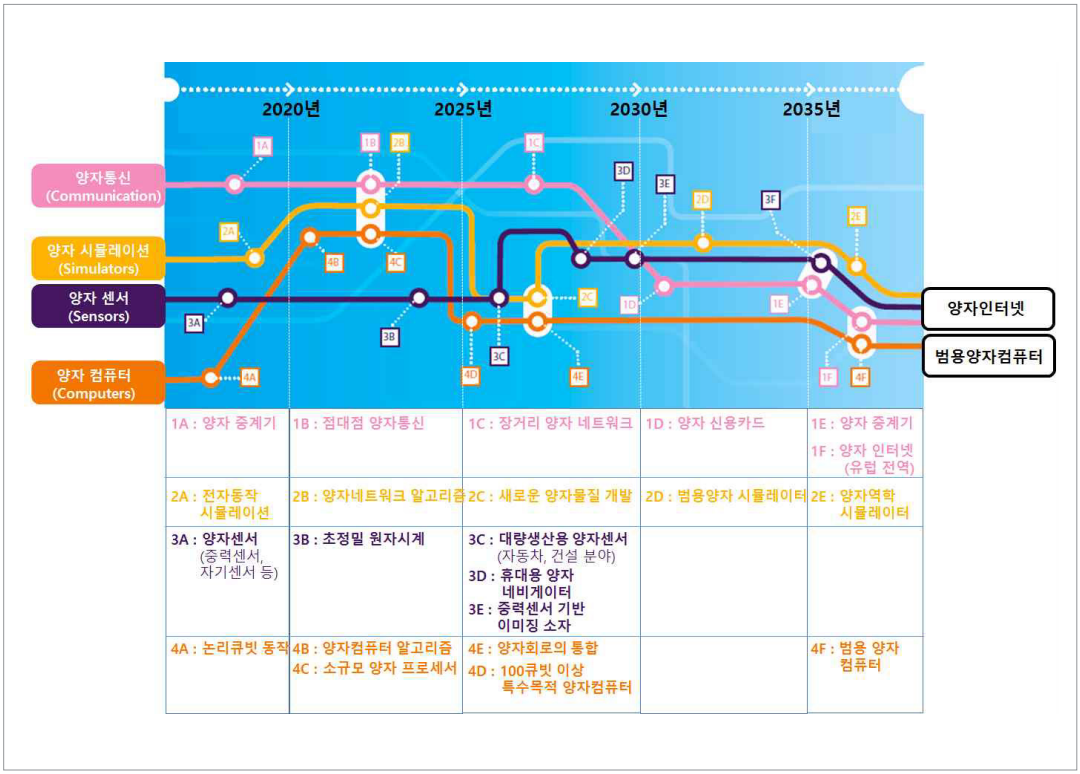


※ Brookhaven National Laboratory 웹사이트

2. 유럽연합(EU)

EU는 양자 R&D 투자 촉구를 위해 2016년 5월 '양자선언문(Quantum Manifesto)'을 발표했다. EU 내 3,400개 이상 양자 물리학자와 기업들을 비롯해 산업계와 학계, 그리고 정부 측이 모두 참여해 작성한 선언문으로 이를 통해 단기·중기·장기 양자기술 로드맵과 분야별 목표를 제시했다.

그림 I-2-4 양자선언문의 기술개발 로드맵



※ IITP (2022)

표 I-2-7 양자 선언문의 분야별 기술적 목표

구분	최종 목표	정의 및 범위
양자통신	양자인터넷	기존 정보 및 보안 수단과 양자정보기술을 결합한 양자인터넷 기술
양자센서	양자센서 기반의 새로운 응용기술	양자 중첩과 얽힘을 활용해 감도 및 해상도를 향상한 센서
양자 시뮬레이션 및 양자컴퓨터	범용 양자컴퓨터	전통 방식 컴퓨터 성능을 넘어서는 계산 능력을 갖춘 양자컴퓨터

※ IITP (2022)

이후 IT분야 내 새로운 아이디어와 주제를 탐색하고 관련 연구를 촉진하기 위한 장기 R&D 지원 프로그램인 '미래신흥기술(FET) 프로그램[24]'의 일환으로, 2018년 10월 5개 영역[25]으로 구성된 '양자 플래그십(Quantum Flagship, QF)[26] 프로젝트'를 시작했다. EU집행위원회 및 회원국이 각각 5,000만 유로를 부담해 10년에 걸쳐 10억 유로를 투입한다는 계획이다.

양자 플래그십은 양자 컴퓨터·시뮬레이터·센서의 양자네트워크를 통한 상호 연결과 얽힘 등 고유 특성을 활용해 양자 자원을 분산하는 '양자웹(Quantum Web)'을 중장기 비전으로 제시했다. 또 혁신적인 양자기술 연구를 전개해 관련 산업 발전을 촉진하고, 양자기술 분야에서 국제적인 리더십을 확보하며, 이를 통해 유럽이 양자기술 분야 연구·사업·투자를 이끌어 내는 활동적이고 매력적 지역으로 도약하는 것을 목표로 설정했다.

유럽 전역 전문가 2,000여명이 참여해 18개월에 걸쳐 연구를 진행한 끝에, 2020년 2월에는 '전략적 연구 어젠다(Strategic Research Agenda)' 5대 방향을 설정했다. 세부적으로 양자기술 응용 유형(통신, 컴퓨팅 등), 교차(Cross-cutting) 영역(공학, 교육, SW 등)을 고려해 9대 영역[27]을 설정하고, 영역별 연구과제를 제시했다.

24) https://ec.europa.eu/futurium/en/content/fet-flagships.html
25) ① 양자컴퓨팅, ② 양자 시뮬레이션, ③ 양자센싱과 측정학, ④ 양자통신, ⑤ 기초 양자과학
26) European Commission (2020)
27) 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자시뮬레이션, 양자센싱과 계측, 과학기술자원, 혁신, 국제협력, 양성평등, 교육훈련

그림 I-2-5 5대 전략적 연구 어젠다



※ European Commission (2020)

양자기술 발전을 위한 3년 단기 목표와 6~10년 중장기 로드맵은 〈표 I-2-8〉과 같다.

표 I-2-8 유럽 양자기술 발전 단기·중장기 로드맵

목표	주요 내용
단기 목표 (~3년)	• 효율적이고 확장 가능한 양자네트워크 하드웨어 개발 • 암호 키 처리 및 사용 인터페이스를 포함한 소프트웨어 개발 • 위성 기반 양자네트워크 구축을 위한 핵심기술 개발 및 시연 • QKD 및 QRNG 기술 성능평가를 위한 인증기준 마련 • IoT와 5G기술에 적용하기 위한 QKD 및 QRNG 시스템 단순화 및 성능 개선 • 소규모 양자중계기 기술 시연
중·장기 목표 (6~10년)	• 양자중계기 망을 이용한 800km 이상 양자통신 시연 • 최소 20개 큐비트가 연결된 양자네트워크 시연 • 인공위성을 이용한 원거리 양자얽힘 생성 시연 • 양자네트워크 기술을 위한 산업 공급망 구축

※ European Commission (2020) IITP (2022)

27개국이 참여했고 2019년 6월 발표된 '양자통신 인프라 이니셔티브 선언(EuroQCI)'을 근거로 유럽뿐 아니라 세계 곳곳에 유선·무선·위성을 활용해 안전한 양자인터넷 인프라를 구축하는 사업이 2021년부터 추진되기 시작했다. Digital Europe 프로그램 재원을 통해 추진된 이 사업은 2027년 1단계 개발 완료를 목표로 진행 중에 있다.

구체적으로 4개 양자컴퓨터 노드를 양자중계기(얽힘, 텔레포트)로 연결하는 다중 양자네트워크 기술 및 양자인터넷용 소프트웨어 프로토콜 스택 등이 개발 중이며, 각 회원국은 개별적인 정책 추진보다 EU 양자 플래그십 차원에서 양자 R&D 투자 및 산업화를 지원하고 있다.

한편 EU는 2020년 2월 발표된 '유럽 디지털 미래 준비 전략(Shaping Europe's Digital Future)[28]'을 통해 인간의 삶을 풍요롭게 할 수 있는 기술로 5G, AI와 함께 양자기술을 선정했다. 또 2021년 3월 수립된 '디지털 컴퍼스 전략'을 통해 미래 전략 구현을 위한 한 축으로 양자컴퓨팅을 설정하고 개발 선도의지를 명확히 표명했다. 2030년까지 최첨단 양자역량을 확보하고 2025년에는 최초의 양자컴퓨터를 유럽이 보유한다는 것이 세부 목표였고, 동시에 유럽 전역을 대상으로 한 초안전(Ultra-Secure) 양자통신 인프라 개발 및 보급을 지향점으로 삼았다.

표 Ⅰ-2-9 2030 Digital Compass 목표

4대 방향	2030 Digital Compass (2030년 기준 목표)
숙련된 디지털 인재 양성	• 모든 성인 80% 이상 디지털 교육 • 2,000만 명 ICT 전문가 확보(현재 780만 명)
디지털 인프라	• (양자) 양자컴퓨터 개발(~2025), (클라우드) 1만 개 에지노드 • (연결) 모든 가정 기가비트, (반도체) 세계 생산량 20% 달성
디지털 비즈니스 전환	• 기업 75% 클라우드 컴퓨팅 서비스, 빅데이터·AI 사용
공공서비스 디지털화	• 공공서비스 100% 온라인화, 모든 시민 전자의료 기록 등록

※ European Commission (2020)

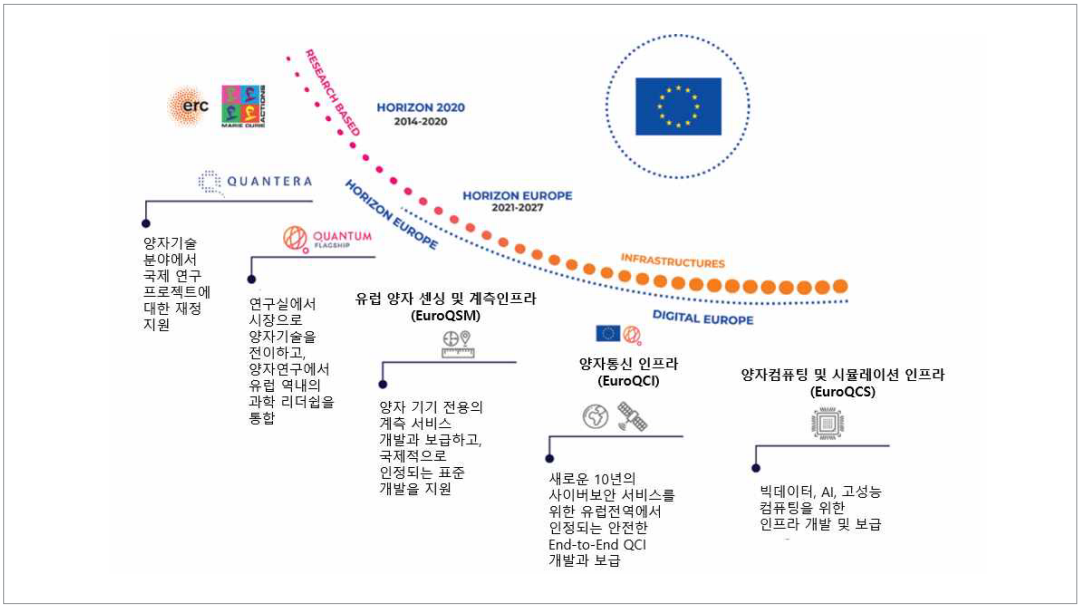
'디지털 컴퍼스 전략' 내 최대 연구개발 프로젝트인 'Horizon 2020', 'Horizon Europe' 등과 EU 회원국 간 긴밀한 협력을 통해 국가 간 양자네트워크 인프라 구축사업을 전개하고 있다. 또 통신보안 측면의 양자 키 분배(Quantum Key Distribution) 기술을 넘어 양자시스템을 상호 연결하는 양자인터넷 연구도 지속적으로 추진하고 있다.

2021년 4월에는 '유럽양자기업컨소시엄(QuIC)'이 출범하여 유럽 양자기술의 경쟁력과 양자경제·산업 촉진을 위해 중소기업, 대기업, 투자기업 및 연구기관 간의 긴밀한 협력 생태계를 구축할 수 있는 허브 역할을 담당했다.

나아가 2022년 4월에는 양자기술 관련 KPI(Key Performance Indicator)를 제시함으로써 양자통신(성능, 유럽 기술 리더십, 도입률 등)과 양자컴퓨팅(유럽 영향 리더십 등), 양자센서 및 계측 분야를 넘어 양자시뮬레이션과 생태계(투자, 연구의 상용화 등) 구축을 포괄하는 체계적인 목표관리 수단을 정립하기도 했다.

28) European Commission (2022)

그림 I-2-6 EU 양자지원 계획 및 정책의 흐름



※ European Commission (2020) IITP (2022)

3. 영국

영국은 2013년부터 양자기술 리더의 위상 확보와 세계시장 주도를 목표로 10년간 정부 및 민간이 10억 파운드 이상을 투자하는 '국가 양자기술 프로그램(UK National Quantum Technologies Programme, NQTP)'을 추진 중에 있다.

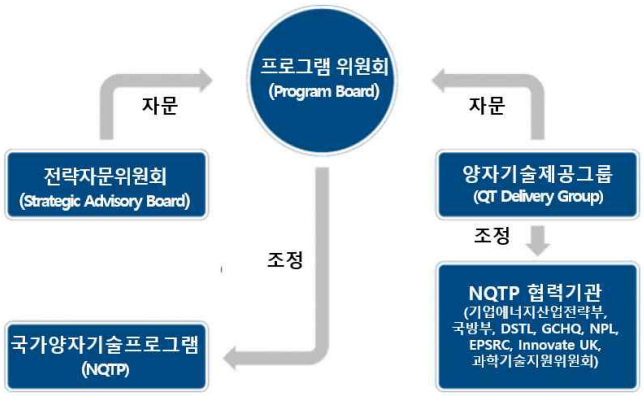
NQTP는 5개 분야를 중심으로 사업을 추진하고 있다. 우선 양자기술에 관한 국가역량 강화를 목표로 삼고 있으며, 둘째로 관련 연구개발 수준 향상을 꾀하고 있다. 또한 세계 최고 수준 인재 육성 및 확보를 목표로 설정하고 있고, 양자기술의 상업화 및 산업화에 초점을 두고 있다. 마지막으로 주요 참여기관은 BEIS, EPSRC, NPL, GCHQ, DSTL 등[29]인데, 4개 양자기술 허브를 중심으로 사업을 추진 중에 있다.

영국 정부는 이 계획에 따라 2014년부터 2019년까지 양자기술 허브 구축, 인력 양성, 10개 스타트업 창출 등에 약 4억 파운드를 지원했다. 2020년부터 시작돼 2024년까지 이어질 2단계 과정을 통해서는 추가로 약 10억 파운드의 지원이 이뤄질 것으로 예상되고 있다. 2022년 6월 기준 NQTP를 통해 투자된 금액의 세부를 살펴보면 산업전략챌리지기금 1.47억 파운드, 국가양자컴퓨팅센터 0.93억 파운드, 양자기술허브 2.14억 파운드, 기반물리를 위한 양자기술 0.4억 파운드 등으로 집계되고 있다.

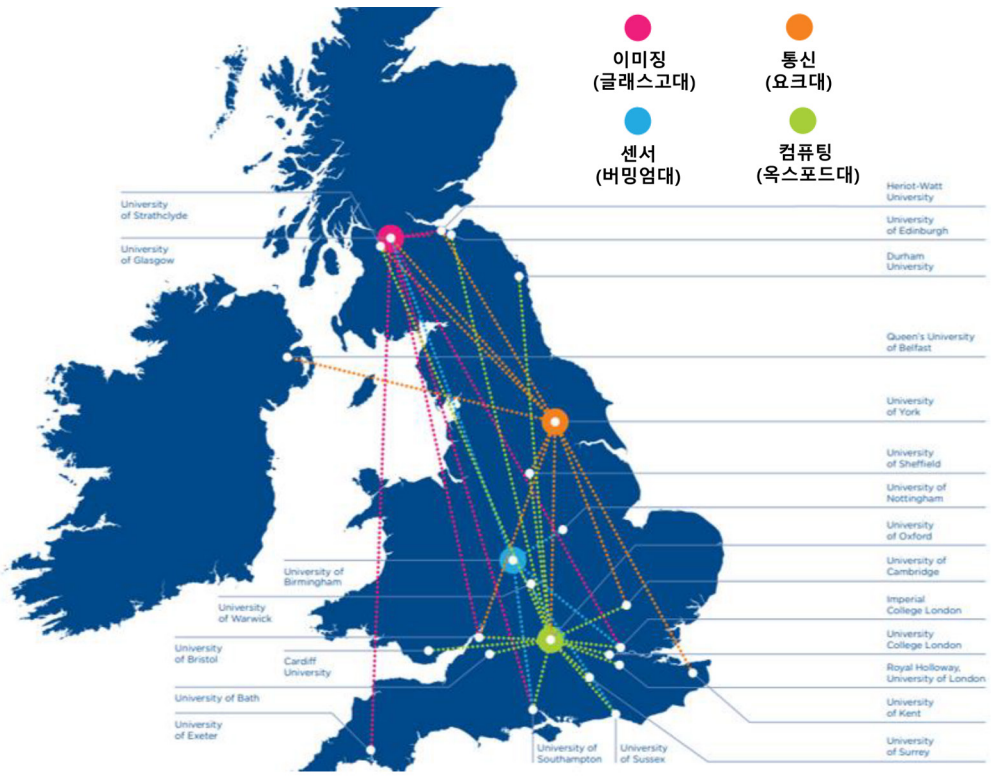
29) https://thequantuminsider.com

그림 I-2-7 영국 NQTP 거버넌스 체계 및 투자

NQTP 거버넌스 체계



NQTP 국가 허브 대학 네트워크



※ Global Advantage (2022) IITP (2022)

표 Ⅰ-2-10 영국의 NQTP 사업별 추진동향

기관	주요 연구내용
4대 양자기술 허브 운영	• 양자컴퓨팅 및 시뮬레이션 허브(Quantum Computing and Simulation Hub, QCS) – 애플리케이션, 알고리듬, 아키텍처, 양자 고전 인터페이스, 양자 하드웨어 관련 연구 • 양자통신 허브(Quantum Communications Hub) – 양자통신보안, 네트워크, 양자 키 분배(QKD), 우주 및 위성통신, 양자인터넷, 칩 기반 기술, 양자후 암호화, 표준, 차세대 기술 등 연구 • 영국양자기술센서시계허브(UK Quantum Technology Sensors and Timing Hub) – 의료, 에너지, 운송, 토목, 제조, 국방, 측량용 중력 센서, 항법 위성 시스템용 양자시계 등 연구 • QuantIC(The UK Quantum Technology Hub in Quantum Enhanced Imaging) – 단일광자 카메라, 단일 픽셀 카메라, 극한시간 분해능 이미징, 3D 프로파일링, 초분광 · 초저속 조명, 국부 중력장의 이미징 등 연구
국가역량 강화	• 국가양자컴퓨팅센터(National Quantum Computing Centre, NQCC) 설립 추진(2023년 완료 예정) – 산업계, 정부, 연구 커뮤니티 전반의 파트너와 협력해 새로운 시설 운영 모색 – 기술 프로그램 조정 및 제공 통해 필요한 R&D 수행 계획 • NPT 양자계측연구소(Quantum Metrology Institute at NPL) 운영(2015년 설립) – 양자시계, 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자센서 및 양자재료를 포함한 여러 과학 분야에서 전국의 산업 및 학계 파트너와 협력 • SPEQTRE(Space Photon Entanglement Quantum Technology Readiness Experiment) – 영국과 싱가포르 간의 양자 키 분야 프로그램에 1,000만 파운드 투입 예정
연구	• 기반물리를 위한 양자기술(QTFP) – 4,000만 파운드의 전략우선펀드(ISPF) 투입해 우주 및 진화 연구 접근법 혁신
상업화 및 산업화 촉진	• 산업전략도전펀드(Industrial Strategy Challenge Fund, ISCF) – NQTP를 뒷받침하는 가치 제공 – 관련 기업에 멘토링 및 사업기회를 제공함으로써 상업화 촉진 – ISCF가 지원하는 1억 5,300만 파운드의 사업체는 프로그램 시작 이후 민간 부문 자금조달로 4억 2,500만 파운드 모금(민간부문 지원의 경우 2025년까지 7억 1,500만 파운드 모금 예상) – 미국 Rigetti와 같은 해외 기업이 영국에 투자하고 협력하도록 독려하는 데 성공 • UK-캐나다 협업 프로그램 – 양자기술 신제품 · 프로세스 · 서비스로 상용화와 관련해 Innovate UK와 NSERC(캐나다 국립 과학 공학 연구 위원회) 간 양자 합의 도출(2020년) – UKRI로부터 200만 파운드의 보조금 지원 실현, 캐나다로부터 440만 캐나다 달러의 투자 유치

※ IITP (2022)

영국 정부는 2022년 2월 양자분야 기술혁신 중요성과 사회경제적 편익의 잠재력을 고려해 국가 차원의 양자전략(National Quantum Strategy) 개발에 착수하고, 2023년 3월에 최종 발표하며 향후 10년간 총 25억 파운드의 자금을 배분할 것이라 밝혔다. 영국은 해당 전략을 통해 2033년까지 영국이 양자 분야에서 선도국이 되기 위한 구체적인 목표를 설정하고, 2024년부터 다양한 양자 연구개발 프로젝트에 투자할 예정이다. 이를 통해 영국은 양자 산업의 잠재력을 최대한 끌어내기 위해 규제 및 투자 환경을 강화하고, 이를 위해 기업들이 양자기술을 적극적으로 채택할 수 있도록 훈련 프로그램과 지원 체계를 강화할 것임을 밝혔다.[30)]

30) Department for Science, Innovation & Technology (2023)

4. 독일

독일은 오랫동안 학계와 연구계가 양자물리학의 기초과학 업적을 이뤄 왔으며 중소기업화, 전문화, 소규모 생산이라는 특징을 지니고 있었다.

EU의 '양자기술 플래그십 이니셔티브' 대응 차원에서 독일 내 양자기술 이니셔티브 수립을 결정한 것은 2017년 1월이었다. 이후 2018년 9월에 들어 양자기술 연구 중심 국가로의 성장을 목표로 연방정부 차원의 양자기술 프레임워크인 '양자기술-기초에서 시장까지'를 마련하고, 이를 바탕으로 2018년에서 2022년까지 양자컴퓨터, 양자통신, 양자기반 측정기술, 양자시스템 기술 등을 중심으로 6개 이니셔티브를 추진 중이다.

그림 I-2-8 6개 이니셔티브 추진내용



연방교육연구부(BMBF), 연방경제에너지부(BMWi), 연방국방부(BMVg), 연방내무부(BMI) 등 다양한 연방정부의 주체는 여러 산업군의 기업들이 양자기술에 관심을 가지고 민간 주도의 협력연구를 수행할 수 있도록 프로젝트를 추진했다. 특히 독일국가측정연구소 내 '양자기술우수센터'는 산업 지원과 연구결과의 애플리케이션 전환을 주도하는 역할을 수행했다. 또 연방정부는 스타트업 지원(EXIST, INVEST, High-Tech Gruenderfonds 등), 중간 단계로 성장한 벤처기업 지원(European Recovery Programme), 이종 산업간 연구개발 제휴(WIPANO, IGF, INNOKOM 등), 시장에 초점을 둔 연구개발 지원(ZIM 등), 혁신 및 디지털화 프로젝트(ERP 디지털 혁신 신용 프로그램 등) 등에 다양한 펀딩 소스 소개 등을 시행했고, 이러한 프로젝트들의 주요 수혜자는 중소기업이었다.

총 6.5억 유로가 투입된 이니셔티브의 예산은 독일연구재단(DFG), 프라운호퍼연구소(Fraunhofer-Gesellschaft) 등 공공 연구기관을 통해 집행된다. DFG는 현재 양자 관련 초점을 가진 양자정보 물질과 광(ML4Q), 뮌헨 양자과학기술(MCQST), 양자프론티어(Quantum Frontiers), 양자 복잡성과 토폴로지 재료(CT.QMAT), 물질 이미징(CUI) 구조(STRUCTURES), 대규모 적대자 대처 사이버보안(CASA) 등 7개 우수 클러스터에 자금을 지원 중이다.

연방교육연구부(BMBF)·프라운호퍼연구소·막스플라크연구소(Max Planck Institute)·독일항공센터(German Aerospace Center)는 독일 및 유럽 데이터 공간에 양자통신을 위한 중앙 플랫폼을 설계하기 위해 QuNET 관련 협력을 진행하고 있다.

2020년 1월에는 양자컴퓨터 분야 전략시책을 펼쳐 3억 유로의 추가 투자를 발표했다. 이어 2020년 7월에는 해당 프로그램에 20억 유로의 미래 패키지[31]를 추가 투자하는 계획도 발표했다. 이에 따라 2020년에서 2025년까지 11억 유로가 양자컴퓨팅 분야에, 8.78억 유로가 실용 응용분야에 투입된다.

한편 2020년 3월 프라운호퍼 연구소는 IBM과 공동으로 독일 양자컴퓨팅 개발 추진에 합의하고, 2021년 6월 양자컴퓨터 'Quantum System One'을 설치했다.

2023년 4월 연방고육연구부 주도로 '양자기술 실행 컨셉(concept of action for quantum technologies)'을 승인하였으며, 2026년까지 30억 유로의 투자계획을 제시하였다. 또한 독일이 보유한 양자기술 잠재력을 극대화하는 한편, 기술 주권 관점에서 세계 최고 수준을 달성한다는 정책목표를 제시하였다. 제시한 목표 가운데는 글로벌 경쟁에서의 독자적인 위치 확보, 즉각적인 산업적용이 가능한 제품개발 지원, 미래시장 확보 및 글로벌 시장에서의 주도적 역할을 담당할 수 있는 표적형 기술개발 및 글로벌 표준 확보, 양자기술 생태계 강화를 위한 인재 확보 및 네트워크 강화 등이 있다.

5. 프랑스

프랑스는 2021년 1월 일반 양자컴퓨터 개발을 통한 기술 주권 보장과 전략적 우위 성취를 목표로, '프랑스 양자 전략계획'을 개시했다. 2023년까지 일반 양자컴퓨터 프로토타입을 최초로 개발하는 것이 제1 목표였다. 이를 위해 양자 가속기 및 시뮬레이터, 대규모 양자 컴퓨터 및 소프트웨어, 센서, 커뮤니케이션, 암호 등 5대 전략기술 영역의 전문성 확보에 돌입한 상황이다.

프랑스는 코로나 회복 자금의 일부를 양자기술 분야에 투자할 계획이다. 구체적으로 정부 10억 유로, 민간기업 5억 유로, EU기금 2억 유로, 스타트업 투자자들 1억 유로 등 총 18억 유로의 자금을 해당 분야에 투자할 설계도를 세워놓고 있다. 프랑스 정부는 구체적인 양자기술 전략계획을 제시하기에 앞서 그 사회·경제적 영향을 면밀히 정리했으며, 이를 바탕으로 '양자기술'을 미래가 유망한 차세대 기술로 확인했다.

31) 포스트 코로나 보정 예산 패키지 및 2020년 1월의 전략적 시책 포함

국가 양자기술 전략은 6개 기술 축과 1개 보조 축 등 총 7개 축으로 구성됐다. 2030년까지 1만 6,000개의 일자리를 창출하고, 양자기술 관련 과학자·엔지니어·의학자 등 5,000명의 새로운 인재를 양성하는 것을 목표로 잡았다. 또 2025년까지 연간 200개의 새로운 논문 및 자료를 산출하는 것을 목표로 약 1,700명의 젊은 연구자를 적극 지원하고, 스타트업 전용 펀드 형태로 최대 1억 2,000만 유로를 기업가에 제공하며, 산업 생태계 구축 및 혁신을 선도하겠다는 계획이다.

표 Ⅰ-2-11 프랑스 국가 양자기술 전략의 6개 기술 축과 1개 보조 축

구분	프로젝트	추진 내용
기술	NISQ 시뮬레이터와 양자 가속기 개발 및 보급	• 양자가속기, 시뮬레이터 및 컴퓨터, 양자 컴퓨팅용 소프트웨어 · 센서 · 통신 시스템을 포함해 결정적인 기술적 이점을 제공하는 양자기술 마스터 • LSQ 양자컴퓨터가 도래하기를 기다리는 동안 NISQ 시뮬레이터와 컴퓨터는 이미 현실이 되었으며, 상업적으로도 이용 가능한 수준
	LSQ로 확장된 양자 컴퓨터 개발	• 2023년부터 1세대 양자컴퓨터 통합 프로토타입을 보유한 최초 국가로 성장 • LSQ가 가능한 양자컴퓨터 개발을 통해 슈퍼컴퓨터로 처리할 수 있는 것보다 더 복잡성 높은 계산을 수행하는 것을 목표로 NISQ 큐비트 가속화
	양자센서의 기술과 응용 프로그램 개발	• 양자센서는 지구 관측, 지질학 등 다양한 응용분야에 활용되고 있으나 복잡한 구현으로 인해 산업적 활용성이 낮은 상태. 이를 개선하기 위해 시장 및 응용 분야 모두에서 기술적 성장이 동반되어야 하는 필요성과 시스템 통합 촉진의 당위성 인식 – 저온 원자센서 관련해 차세대 관성 센서, 자기 센서 개발을 목표로 설정
	포스트 양자암호 개발	• 포스트 양자 암호화를 향한 마이그레이션(migration) 구성과 성능 및 보안성을 확보할 수 있는 하드웨어 구현을 위해 알고리듬 개발 하드웨어 구현과 실험 검증 영역에 집중 • 갑작스러운 포스트 양자알고리듬 전환보다 포스트 양자알고리듬과 현재 메커니즘이 공존하는 '과도기' 필요함을 인지
	양자통신 시스템 개발	• 양자통신의 실제 사용은 특별한 배치 없이 기존 통신 인프라에 통합 가능한 양자 및 광자 구성 요소를 개발하는 능력을 기반으로 하고 있으며, 이 분야의 활동방향을 확립하는 것에 중점을 두고 실행 • 기존 광섬유 통신 네트워크에서 양자 구성요소의 배치에 대한 실험 및 평가와 관련해 3가지 측면(속도, 거리, 보안기준)을 강조 – 니스 지역과 일드프랑스 지역의 광섬유 통신 네트워크를 통해 새로운 통신 구성요소와 프로토콜을 실제 조건에서 테스트하고 최적화
	경쟁력 있는 기반 기술 제공 및 개발	• 극저온 환경에서도 양자프로세서 당 큐비트 수를 늘려야 하는 필요성 가중. 배선 및 전자 장치를 포함해 대용량 냉각에 필요한 전력 상태를 유지 – 양자컴퓨터 규모 확장의 전제조건으로 큐비트 온도 허용 오차와 극저온 기술의 성능 사이에서 최적 균형점을 찾는 것에 집중 – 원자 냉각 처리를 위한 새로운 레이저 기술과 유망한 양자특성을 가진 컴퓨팅을 위한 레이저 기술 개발을 지원
보조	산업 생태계의 수평적인 구조화	• 과학 및 기술 사업 지원과 지속적인 경쟁력 유지를 위해 지속적인 훈련과 기술 인프라 강화 통한 기술·인적자본의 개발이 요구되는 상황. 기업가 정신과 기술 이전에 대한 관심을 높이는 데 도움되는 환경을 조성

※ 국가나노기술정책센터 (2022) 집필진 재구성

2022년 3월에는 양자분야에서 우선적인 연구개발 프로그램과 장비개발 프로그램(Priority Research Programs and Equipment, PEPR, 1억 5천만 유로)에 착수하며 일차적으로 4대 영역, 10개 프로젝트를 개시했다.

표 Ⅰ-2-12 프랑스 PEPR의 10대 우선과제

분야	프로젝트	추진 내용
양자컴퓨팅을 위한 솔리드(Solid) 상태의 강력한 큐비트 개발	PRESQUILE	• 정립된 CMOS 기술에서 스핀(Spin) 큐비트의 통합에 대한 과학적 · 기술적 장애물을 식별하고 제거
	RobustSuperQ	• 초전도 및 하이브리드 큐비트에 대한 R&D 가속화(5년 내 제어 가능하고 측정 가능한 고충실도 양자프로세서 시연)
저온 원자 기반 큐비트 및 센서 개발	QubitAF	• 처리 양자 수 증가와 이러한 결과를 인증할 수 있는 플랫폼 성능의 향상을 도모하는 방향으로 양자 시뮬레이션 위한 저온 원자 플랫폼 개선
	QAFCA	• 기후 변화 분석 및 자연재해 예측, 토목 공학 또는 CO_2 저장에 응용하여 중력장을 측정하기 위한 소형의 이동 가능한 저온 원자 센서를 개발
오류 수정 코드, 양자 알고리듬 및 양자 후 암호화 솔루션의 개발	NISQ2LSQ	• 내결함성 양자컴퓨터를 구현하는 데 필요한 새로운 오류 수정 전략을 개선하고 개발
	EpiQ	• 양자프로세서의 기능(컴파일, 조작, 최적화, 중간 언어, 인증 등)에 필요한 소프트웨어를 정의하고 기계학습, 최적화 등의 영역에서 새로운 양자알고리듬을 개발하며, 현재 기계의 작동에 대한 이해를 개선하는 시뮬레이션 촉진
	PQ-TLS	• 양자 기반의 다양한 접근방식 통해 새로운 암호화 및 서명 체계 개발
양자통신	DIQKD	• "블랙박스" 유형 키의 양자분포를 적용한 장치가 부분적으로 특성화되지 않은 경우에도 통신보안 보장
	Qmemo	• 장거리에 양자네트워크를 배포하는 데 중요한 요소인 양자메모리의 성능 최적화
	QcommTestbed	• 양자통신 응용 프로그램의 시연에 사용되는, 국가적 규모로 조정된 테스트 플랫폼 구축

※ L'USINENOUVELLE IITP (2022)

6. 캐나다

캐나다는 양자 과학 및 기술 연구를 지원하고 이제 막 형성되기 시작한 양자산업의 강화와 연결을 위해 '국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)[32]을 발표했다. 7년간 3.6억 캐나다달러[33](약 3,500억 원)를 투자하는 대규모 계획이었다. 캐나다는 미국·중국·영국 등이 대규모 투자에 나서기 전인 2002년부터 '양자컴퓨팅연구소(Institute for Quantum Computing, IQC)'를 워털루 대학에 설립하고, 양자 연구개발에 대한 투자와 양자기술 산업 육성에 주력해온 터였다.

혁신과학경제부(Innovation, Science and Economic Development Canada, ISED)는 국가양자전략 수립과 시행을 위해 다양한 이해관계자와 일련의 원탁회의를 개최했다. 이 자리에서는 양자기술 연구 및 상용화, 인재 양성, 보안, 국제협력 등에 대한 집중적 논의가 이뤄졌고 이를 통해 양자연구 역량 강화, 양자기술 개발, 관련 기업 및 인재의 육성, 양자기술 분야 글로벌 리더십 강화 등을 목표로 7년간 중장기 예산을 배정하는 모멘텀이 만들어질 수 있었다.

32) https://qmi.ubc.ca (2021.04), https://ised-isde.canada.ca

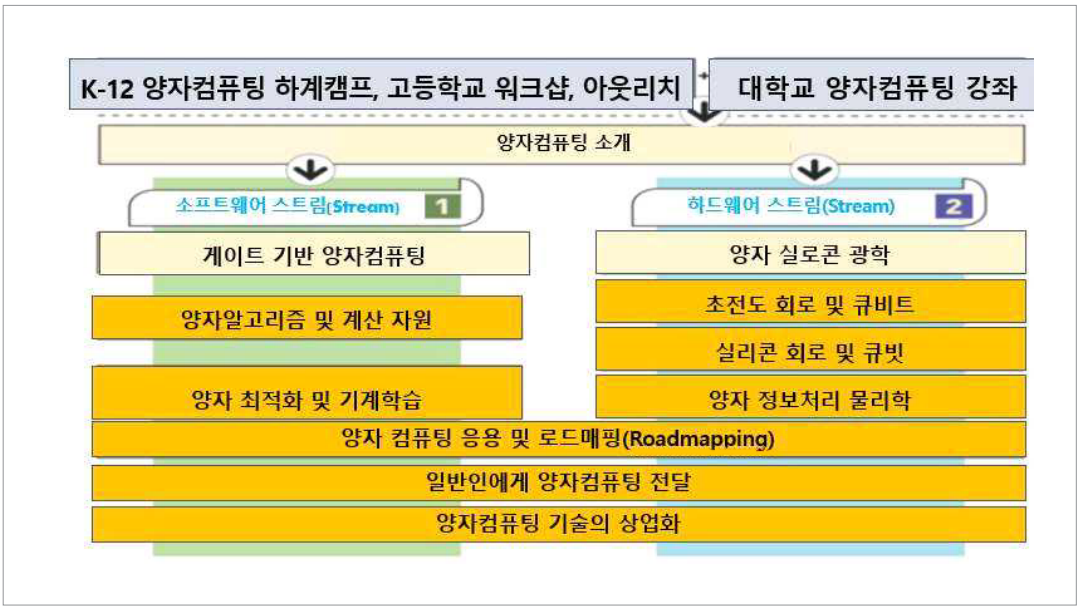
33) https://ised-isde.canada.ca

양자기술 개발 가속화를 위해 2019년 12월 브리티시컬럼비아(BC) 주정부는 사이먼프레이저대학(Simon Fraser University, SFU)에 '양자 알고리듬 연구소(Quantum Algorithms Institute)'를 설립했다. 2020년 9월 캐나다 국가연구위원회(NRC, National Research Council of Canada)는 환경, 천연자원, 의료 및 국방 분야에 적용할 양자센서 개발을 목적으로 '양자센서 챌린지 프로그램'을 개시하며 본격적인 연구기반 확충에 나섰다.

캐나다과학공학연구회(NSERC)와 영국연구혁신기구(UK Research and Innovation, UKRI)는 2020년 11월 양자기술 개발을 위한 8개 영국-캐나다 산학 컨소시엄 프로젝트[34](양자기술 개발 가속화 등)를 개시했다. 한편 NRC, 국방부 내 국방연구개발조직(DRDC), 공공안전부 내 통신보안원(CSE)은 '양자보안기술접근센터(QSTAC)'를 운영하며 양자연구 관련 정부정책의 조정자 역할을 수행하고 있다.

또한, 2020년에 들어 브리티시컬럼비아주 내 종합대학(UBC, SFU, UVic)들은 공동으로 양자컴퓨팅 대학원 프로그램인 'CREATE'를 신설해 운영하기 시작했다. 캐나다 기반 양자컴퓨터 기업인 D-Wave를 포함해 Microsoft, Google, Quantum Silicon 등과 같은 글로벌 기업들이 해당 프로그램에 대한 협력과 지원을 아끼지 않고 있으며, 이를 통해 관련 석·박사 학생들에게 연구개발 및 교육 기회와 산업계 인턴십 등의 특전을 제공하고 있다.

그림 I-2-9 캐나다 BC주 CREATE 프로그램



※ quantum-bc.ca (2020)

34) https://www.ukri.org

표 Ⅰ-2-13 캐나다에서 추진 중인 양자 R&D 프로젝트

프로젝트명	내 용
QVIL	• 양자 연구자, 엔지니어 및 기술전문가로 구성된 전담팀 구성 • 양자센서, 내비게이션, 보안, 암호화 및 컴퓨터 분야에서 새로운 혁신기술 개발 • 비영리 자선단체인 QVIL이 새로운 양자 관련 제품 및 비즈니스를 창출할 독특한 시설을 개발하기 위해 2,000만 캐나다달러 지원
High Q	• 양자기술 활용해 낭성 섬유증과 같은 질병에 대한 새로운 치료기술 개발 • High Q Technologies가 650만 캐나다달러 지원
ISARA	• 양자시대에 중요한 데이터, IT 인프라 및 네트워크를 보호하기 위해 양자 안전 · 보안에 대한 새로운 접근방식 개발 • 쉽게 구현 가능하고 실질적이며 표준화된 양자 암호화 도구 및 솔루션 개발 • ISARA Corporation이 730만 캐나다달러 지원

※ IITP (2022)

또한 2023년 2월 '국가양자전략(National Quantum Strategy)'을 수립하여 양자기술 개발, 기업 및 인재 양성을 위한 투자방향을 제시하였다. 양자기술 개발은 컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어, 통신, 센서 등 3가지 양자기술 축을 우선적으로 지원한다. 먼저, 기술개발을 위해 기초 및 응용 연구 지원에 1억 4,100만 달러를 투자하고 양자전문 지식과 인재 개발을 위해 4,500만 달러를 투자하며 연구결과의 상용화 및 서비스로의 전환을 위해 1억 6,900만 달러를 투자할 예정이다.

7. 중국

중국은 2015년 5월 제조강국으로 발돋움하기 위한 연구개발 장려와 산업구조 재편을 내용으로 '중국제조 2025'를 발표하며, 차세대 기술인 양자기술 개발에 대한 의지를 천명했다. '양자굴기'를 국가 중대과제로 삼아 적극 추진한다는 방침이었다. 이후 중국 정부는 5년 단위로 양자기술 연구개발 활성화를 위한 전략을 제시했다. 이후 중국제조 2025 계획과 5개년 계획에서 제시된 연구개발 정책과제들을 포함해, 관련 정책들을 지속적으로 추진하기 시작했다. 2016년에서 2020년까지 진행된 제13차 국가과학기술혁신계획에서는 양자 통신 및 컴퓨터를 2030년까지 추진할 중대 과학기술 프로젝트로 규정하고, 2016년 6월부터 양자통신기술, 양자 시뮬레이터 등의 연구개발에 착수했다.

이어 2021년부터 2025년까지 추진될 제14차 계획 및 2035 중장기 목표에서는 과학기술 이노베이션과 관련해 연구개발의 장 마련, 최첨단 과학기술 연구 강화 등을 지향했다. 또 산업 및 경제 기반 강화와 관련해 전략적 신흥기업의 발전과 성장을 목표로 내걸었다. 나아가 디지털 중국 건설을 위해 디지털 기술이 적용된 혁신 애플리케이션 개발 강화를 중점 추진사항으로 설정하기도 했다. 그리고 국방 및 군대와 관련된 '군민 공동개발 지속' 항목의 현실화를 위해 양자정보·양자컴퓨팅·양자통신 등 양자기

술 도입을 결정하고 연구개발을 넘어 관련 산업의 육성과 사회 변혁, 안전 보장 등에 대해서도 규정했다. 계획 제시 이후에는 연구개발비를 매년 7% 이상 증액하며, 양자기술 육성에 주력하고 있다.

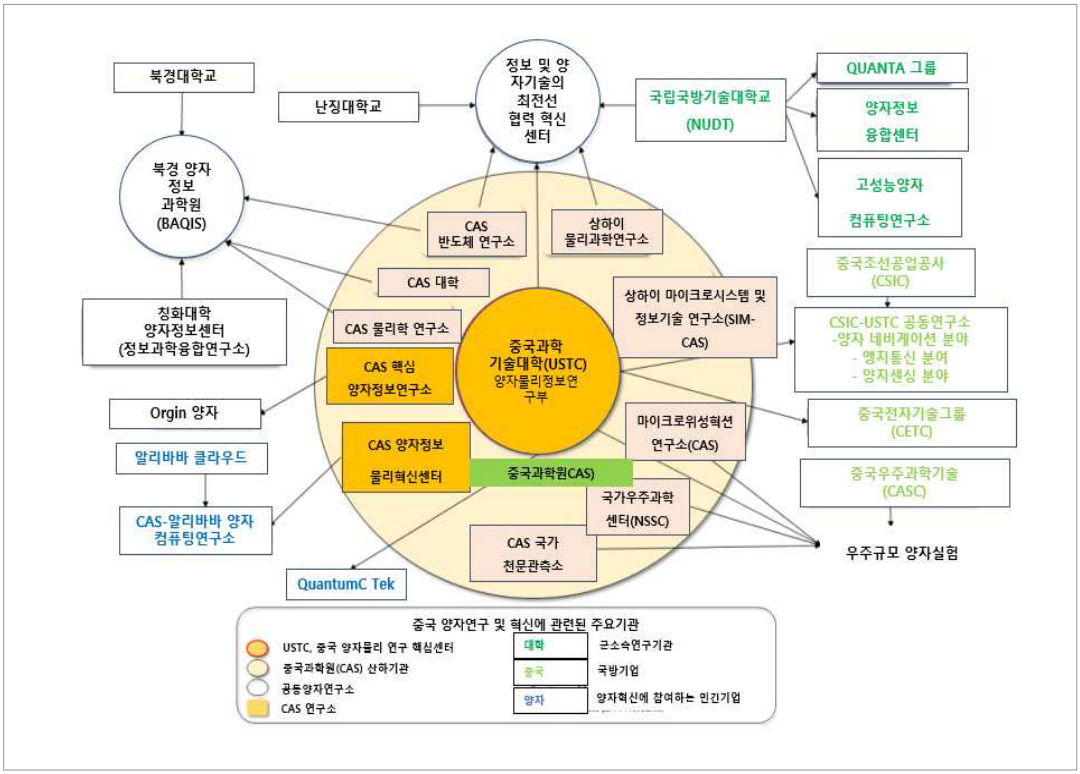
중국 과기부는 2018년 8월 발표된 '2019년도 국가중점연구개발계획'에서 양자 전자시스템, 소형 양자시스템, 양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션, 양자정밀계측 등 양자제어와 양자정보 관련 4개 프로젝트에 1.6억 위안의 예산을 책정했다.

시진핑 주석은 2010년 10월 중앙공산당 연설에서 국가발전을 촉진하고 국가안전을 보장하기 위해 양자과학기술의 발전이 가속화될 필요가 있음을 역설했고 이 뜻을 이어 중국 정부는 양자기술 연구개발 및 전략산업 육성에 주력하고, 정책 지원 및 투자를 확대하며, 양자 관련 과학기술 프로젝트 추진에 본격적으로 시동을 걸었다. 또한 핵심기술 혁신과 공급망 안정성 확보, 그리고 인재 육성 활성화와 산학연 협력 촉진에도 힘을 기울여 나갔다.

중국 정부는 2022년 1월 열린 '국가과학기술 고용대회'에서도 국가 위업 성취에서 기술혁신이 갖는 전략적 중요성을 재차 강조하며, 특히 양자과학기술 혁신, 양자 우위 달성 등에 관한 기초연구촉진 의지를 밝혔다.

한편 중국과학원(Chinese Academy of Sciences, CAS)은 산하 대학 및 연구소를 통해 기업과 협력하며 양자 컴퓨터·통신·시뮬레이션·계측 등 양자 기반 기술에 관한 종합적인 연구를 수행하고 있다. 그 중 과학기술대학(USTC)의 '양자물리 및 양자정보연구소'에서는 양자물리 및 양자통신 기반 기술, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션, 양자정밀계측, 양자이론 등을 연구하고 있다. 또 같은 대학 내의 '양자혁신연구소'에서는 특수 양자컴퓨팅 및 시뮬레이터를 개발하고 일반 양자컴퓨터의 실현 가능성을 연구 중에 있으며, '양자정보핵심연구소'에서는 양자정보 분야 최초의 성·부처급 핵심 실험실을 마련하고 양자통신과 양자컴퓨팅에 대한 이론 및 실험 연구를 진행 중에 있다.

그림 I-2-10 중국 양자기술 연구 관련 주요기관 현황



※ ifrI (2022) IITP (2022)

지방정부 차원에서도 양자강국 도약을 위한 다양한 개별 프로그램을 추진하고 있다. 안후이성은 2017년 12월 '양자과학 산업발전기금'으로 명명한 100억 위안 규모 양자 컴퓨팅 및 측정 분야 기금 조성계획을 발표했다. 이후 2018년도부터는 허페이시에서 5년간 1,000억 위안을 투입해 세계 최대 규모 '양자정보과학국가연구소' 본원을 짓는 사업을 진행 중이고 양자 컴퓨터·통신·측정 등 제 분야에 걸쳐 종합적인 연구를 수행하고 있으며, 최고 수준의 양자컴퓨터 개발을 위한 프로젝트도 전개하고 있다.

2018년 3월에는 산둥성이 '양자 기술혁신 및 개발계획'을 발표했다. 이어 같은 해 5월에는 수도인 지난시를 양자기술 생태계의 새로운 중심지로 부상시킨다는 목표 아래, 100억 위안 규모 산업클러스터를 건설하는 '지난양자밸리(济南量子谷) 조성계획'을 발표했다. 1단계에선 양자정보과학국가연구소의 지난 분원을 유치하고, 2단계에는 인큐베이터를, 3단계로는 엑셀러레이터를 중점 구축하는 계획이었다. 이후 지난시는 2019년 3월 양자통신 실험망을 보유했을 뿐 아니라 지역산업 규모도 큰 여러 이점들을 활용하기 위해 '양자 플러스 응용 시범구역' 신설을 핵심으로 하는 양자산업 발전계획을 수립하기도 했다.

8. 일본

일본은 2008년부터 문부과학성 주관으로 10년에 걸친 장기 지원사업인 '최첨단 광 실현을 목표로 하는 네트워크 연구거점 프로그램'과 '광·양자 융합연계 개발 프로그램'을 추진하기 시작했다.

2009년부터 2013년까지는 양자신경망, 양자 시뮬레이션, 양자컴퓨팅, 양자통신 등에 관한 30개 프로젝트를 추진했다. 이는 양자기술의 실제 적용에 특별히 중점을 두었던 'ImPACT(Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program) 프로그램'으로 이어졌다. 이 프로그램에서는 다양한 최적화 문제를 해결하기 위한 4개 양자 광학시스템이 양자신경망(QNN)을 구성했다. 또한 국가 기밀, 의료 및 게놈 정보 등을 안전하게 전송하기 위한 양자보안 네트워크 개발계획을 포함하고 있었다.

다양한 물리적 시스템에서 양자 상태의 일관된 제어와 유지, 전송을 실현할 수 있는 연구들을 지원한 '양자 사이버네틱스 프로그램'은 2009년에서 2014년까지 진행되었다. 이는 2015년에서 2020년까지 이어진 '하이브리드 양자시스템 과학(Science of Hybrid Quantum Systems) 프로그램'으로 계승되기도 했다. 또 2010년부터는 일본 정보통신기술연구소(National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 주도로 도쿄에 양자암호 시험망을 구축하며 양자정보통신 기술 개발을 시작했고, 2040년까지 기밀성이 보장된 로드맵에 따라 기술 개발에 착수했으며, 4년간에 걸쳐 430억 원이 투입된 '퍼스트(FIRST) 프로그램'을 진행하기도 했다.

2016년에는 본격적인 기술 개발을 위해 양자과학기술을 총괄할 연구법인인 '양자과학기술연구개발기구(QST)'를 설립했다. 이후 제5기 과학기술 기본계획을 발표하며 양자기술을 우선순위 과제로 포함시켰고, 별도의 양자지원법을 마련하는 대신 2021년 4월부터 시행에 들어간 개정 '과학기술혁신기본법'을 통해 연구개발 지원책을 보강했다.

2016년 3월에는 문부과학성에서 과학기술진흥원(Japan Science and Technology Agency, JST)의 전략적 창조연구 추진사업의 전략목표에 '양자상태의 고도제어를 통한 새로운 생물·정보과학 프론티어 개척'을 포함시켰다. 현재 이러한 전략목표에 입각해 관련 기초연구[35]를 활발히 추진 중에 있다.

이후 일본 정부는 2017년 2월 '양자과학기술의 새로운 전개방안', 2018년 '광·양자 퀀텀 도약 플래그십(Q-LEAP)', 2020년 1월 '양자기술 이노베이션 전략', 2020년 2월 '문샷 프로그램' 등을 잇달아 발표하며 범용 양자컴퓨터 확보를 비롯한 다양한 목표를 제시하고 해당 분야에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 이 중 양자기술 이노베이션 전략의 경우 수상 관저에서 직접 통합혁신 전략회의를 개최한 뒤에 수립한, 향후 20년 성장을 내다 본 양자기술에 관한 새로운 전략이었다. 그간 부처별[36]로 각자 진행해

35) 일본 과학기술진흥기구의 연구조성 사업

36) 내각부, 총무부, 문부성, 경제산업성

오던 단위 사업들을 국가 차원의 중장기 로드맵으로 확장시킨 전략이기도 했다. 이를 통해 일본은 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략을 정립하고, 슈퍼컴퓨터 성능보다 훨씬 뛰어난 양자컴퓨터의 현실화를 목표로 4대 중점분야를 설정할 수 있었다.

이처럼 일본은 지난 30년간 꾸준히 양자기술 관련 투자를 이어오고 있으며 후반 15년 동안에는 일본 정부를 포함해 과학기술진흥원(JST), 일본 정보통신기술연구소(NICT), 일본 과학진흥회(Japan Society for the Promotion of Science, JSPS) 등에서 지원한 총 투자액이 2억 5,000만 달러를 기록하고 있다. 비록 미국, 중국 등에 비해 연간 규모는 크지 않으나, 그 기간이 긴데다 민간부문에서도 비슷한 규모의 투자가 이뤄지고 있는 것으로 추정하고 있다.[37] 특히 2019년 12월에는 미국과의 기술동맹을 크게 강화하며 '미·일 양자협력에 관한 도쿄 성명'을 발표하고 양자 연구거점 정비에 대한 125억 엔 규모 투자를 결정함으로써 양자강국 도약을 위한 발판을 놓을 수 있었다.

표 Ⅰ-2-14 일본의 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략 주요내용

분 야	주요 내용
기술개발	• 4대 주요 기술영역별(양자 컴퓨터·시뮬레이션, 양자 측정·센싱, 양자 통신·암호, 양자재료 중점기술 및 기초 기반기술) 과제 도출 – (양자 컴퓨터·시뮬레이션) 실용화까지 이르는 20~30년 후를 조망하며, 지배기술 부재를 극복하기 위한 연구 시행 – (양자 측정·감지) 실온에서 사용 가능한 고체 양자센서의 경쟁이 치열하므로 중단기적으로 실용화 및 사업화를 추진 – (양자 통신·암호) 양자암호통신은 실용화·사업화 단계이므로 연구개발 이외에도 정부가 관여해 산업 형성을 촉진, 양자위성은 안보 중요성을 고려해 전략적으로 추진 – (양자재료) 소재·재료는 일본이 세계적으로도 강점을 가진 분야이므로, 경쟁력을 계속 유지하기 위한 기초 연구과제 추진 • 타 분야와의 융합(양자AI, 양자바이오, 양자암호화)을 촉진하고, 민간투자를 유도하며, 대규모 산학협력 연구를 지원 • 기술·인력 생태계를 안착시킬 수 있는 중장기적 기초 기반연구 추진
국제협력	• 미국, 영국, 독일 등과 정부 차원 협력관계 강화 • 해외 선진국 규제에 맞춰 안정보장 무역관리 추진 및 체제 정비
산업혁신	• 5년간 5개 이상 양자기술 혁신거점(국제 허브) 운영 • 양자AI, 양자바이오, 양자재료, 관성센서, 보안 분야에서 거점을 설치하고 재정 및 세제 지원 • 특정 기술 영역별 대학·연구소·기업 등을 묶어 '양자기술 혁신 협의회(가칭)' 창설 • 국가에서 양자기술 활용한 제품 및 서비스의 선행적인 도입 추진
지적재산권 및 표준화	• 지적재산 전략으로 권리화 및 활용 등 추진 • 일본이 강점을 가진 경제적 파급효과 높은 영역을 중심으로 국제표준화 지원
인재	• 젊은 연구자들 대상으로 양자기술 습득 기회 확대, 대학·대학원 전공과 강좌 개설 및 개편 지원 • 양자기술 혁신거점을 통해 국내외 최고 수준의 연구자 확보, 신진연구자(학생 포함)의 해외 연수 기회 확대 • 고등학교와 고등 전문학교 등의 학생들을 대상으로 학습 기회 제공하고 폭넓은 과학 커뮤니케이션 활동 지원

※ 일본 총리실 IITP (2022)

37) https://iopscience.iop.org

일본의 내각부는 2022년 4월 제11차 통합혁신추진회의에서 양자기술 및 융합영역별로 2040년까지의 혁신 과정을 담은 '양자기술 혁신전략 로드맵'을 발표했다. 해당 로드맵은 양자기술 영역별로 그 경제·사회적 임팩트, 기술 발전 전망, 각 기술을 지원하는 주변 기술 진전 등을 기술하고 있다. 또 기술 및 융합 영역별로는 양자 컴퓨터·시뮬레이션, 양자 계측·센싱, 양자 통신·암호 등 3개 분야로 구분하고 각각에 관해 세부기술별 로드맵을 제시하고 있다.

표 Ⅰ-2-15 일본의 양자기술 혁신로드맵 구성 및 예시

기술 분류	기술 로드맵	양자 컴퓨터 · 시뮬레이션	① 양자컴퓨터(초전도 큐비트) ② 양자 소프트웨어(게이트형) ③ 양자 소프트웨어(어닐링형) ④ 양자 시뮬레이션(냉각 원자) ⑤ 양자 어닐링 머신(초전도 큐비트) ⑥ 양자컴퓨터(이온 트랩 큐비트) ⑦ 양자컴퓨터(실리콘 큐비트) ⑧ 양자컴퓨터(광 큐비트)
		양자 계측·센싱	⑨ 고체 양자센서(다이아몬드 NV 중심 등) ⑩ 양자 관성 센서 ⑪ 광 격자 시계 ⑫ 양자 얽힌 광 센서 ⑬ 양자 스핀 트로닉스 센서
		양자 통신·암호	⑭ 양자 통신·암호 링크 기술 ⑮ 양자 중계 기술(양자 메모리·얽힘 등) ⑯ 네트워크화 기술(구축, 운용, 보수 등)
	융합 영역	양자 컴퓨터 · 시뮬레이션	① 양자 AI 기술
		양자 계측·센싱	② 양자생명과학(생체 나노 양자센서) ③ 양자생명과학(양자기술을 이용한 초고감도 MRI/NMR) ④ 양자생명 학(양자론적 생명현상의 해명·모방)
		양자 통신·암호	⑤ 양자보안기술
로드맵 예시 양자 컴퓨터 (초전도 큐비트)		

※ 일본 내각부 (2022) IITP (2022)

2022년 3월에는 '신자본주의 실현회의'를 개최하고, 과학기술 분야의 성장 전략을 논의한 끝에 AI와 양자기술 등 첨단기술에 관한 국가전략을 표명했다. 국가전략의 실행계획에 담긴 첨단기술 중점분야로는 AI, 양자기술 외에 바이오기술을 활용한 제조, 차세대 의료, 청정에너지 등 5개 기술분야를 제시하고 있다. 같은 해 4월에는 양자컴퓨터의 국제경쟁 격화, 코로나19 사태로 인한 디지털 변혁의 급속한 진전, 탄소 중립 등 급격한 환경 변화에 대처하기 위해 '양자 미래사회 비전'을 발표했다. 양자기술을 경제안보 측면의 전략기술이자 국제경쟁력 확보 수단, 산업 성장의 새로운 기회, 탄소중립을 포함한 떠오르는 사회적 이슈의 해결책 등으로 보고, 이를 바탕으로 수립한 미래사회 비전과 전략을 담고 있었다. 추가적으로 양자미래사회비전(안)에서는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅에 대한 비약적 향상 전략 방향을 제시하고 있다는 점이 주목할 만하다.

그림 I-2-11 일본 양자 미래사회 비전 실현을 향한 개관



※ 일본 내각부 (2022) IITP (2022)

2022년 3월 내각부 통합혁신전략추진회의에서 '양자기술의 실용화·산업화를 위한 방침 및 실행계획에 대한 전략'을 발표하였다. 양자기술의 실용화·산업화를 위한 협력(Collaboration), 접근성(Accessibility), 인큐베이션(Incubation) 등 세 가지 관점을 제시하였다. 협력 관점에서 살펴보면 양자컴퓨터 등의 실용화를 위해서는 양자기술 분야와 함께 소재·부품·장비, 일렉트로닉스, 반도체 등의 기업 참여가 요구된다. 또, 다양한 기업의 참여를 촉진하기 위해서는 수요기업의 어플리케이션 창출 지원 및 협력이 필요하다. 접근성 관점에서 살펴보면 다양한 분야의 수요기업이 양자기술을 이용해 새로운 가치를 창출할 수 있도록 양자컴퓨터, 양자센싱, 양자보안·네트워크 등의 환경정비가 필요하다. 마지막으로 인큐베이션 관점에서 살펴보면 양자산업과 같은 신행시장에서 스타트업, 벤처기업 등이 중요한 플레이어로 인식하고 새로운 시장을 개척하는 스타트업들의 창업·지원과 동시에 미래의 벤처기업들의 생태계 시스템을 구축하는 것이 중요하다.

9. 호주

호주 정부의 호주연구위원회(Australian Research Council, ARC)는 2015년 2월 '국가 혁신 및 과학 의제(National Innovation and Seicnce Agenda, NISA)'의 일부로 5년간 26억 달러(약 230억 원)를 투입해 양자컴퓨팅 기술개발 계획을 발표했다. 또한 해당 위원회는 2017년에서 2024년까지 양자기술 중심의 4개 산학기반 혁신센터(Centre of Excellence, CoE)에 약 1.3억 호주 달러를 투자할 계획이다. 특히 양자정보과학 연구 전략의 측면에서 타 국가와 차별화를 두며, 실리콘 칩 기반의 양자컴퓨터 개발을 추진 중이다.

2003년에 설립된 호주연구위원회(ARC) 산하 '양자컴퓨팅 및 통신기술 연구센터(Centre for Quantum Computation and Communication Technology, CQC2T)[38]는 전 세계 파트너와 공동연구를 수행하며 호주의 양자정보과학 발전을 주도하고 있다. 2017년에는 우수센터로 지정되어 3,300만 호주달러를 추가로 지원 받았으며, 현재 산학연 32개 파트너가 참여 중이고 이를 지속적으로 확대해 나가고 있다.

호주 국방부는 2017년부터 양자 키 분배(QKD) 기술개발을 위해 '국방혁신허브(Defence Innovation Hub)' 구축에 투자하고 있고, 국방 분야 양자기술 활용을 위해 2018년부터 차세대 양자기술 개발과제 제안 요청을 시작했다.

2019년에는 차세대 양자 과학자 및 엔지니어를 양성하기 위해 4개 대학이 파트너십을 맺어 '시드니 양자 아카데미(Sydney Quantum Academy, SQA)'를 설립했다. 출범 이후 대학 및 석박사 장학금 수여, 학자를 위한 펠로우십 진행, 창업 지원 및 지역사회 지원 등의 활동을 추진하고 있다.

호주 국립과학연구기관(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)은 2020년 5월 양자기술 R&D 및 산업 육성을 위한 '호주 양자기술 산업육성(Growing Australia's Quantum Technology Industry) 로드맵[39]을 발표했다. 이 로드맵에서는 양자기술 산업 전반의 협력 및 투자 확대를 통해 2040년까지 40조 달러 이상의 사업과 1만 6,000개 이상의 일자리 창출을 예상하고 있었다. 이를 위해 국가 차원의 양자전략 개발, 양자기술 실증 및 사업화 추진, 관련 인력 양성, 산업기반 및 양자 생태계 구축 등에 대한 정부와 이용자의 적극적인 참여를 권고하고 있다.

한편 2021년 5월 호주 전략 정책 연구소(Australian Strategic Policy Institute, ASPI)는 코로나에 대한 대책 중 하나로 '양자혁명을 위한 국가 전략안'을 제시하고 30억~40억 호주달러 규모의 자금

38) www.cqc2t.org

39) CSIRO (2020)

을 양자기술에 사용할 것을 제언하고 있다.[40]

2023년 5월 산업과학자원부는 양자산업 육성을 위해 '국가 양자전략(National Quantum Strategy)'을 발표하였다. 양자기술 분야의 글로벌 경쟁력 강화 및 2045년까지 46억 달러(A$) 가치창출 및 석유·가스 부문의 고용 창출을 위해 연구개발 투자 및 기술활용 확대, 연구개발 지원을 위한 필수 인프라 및 소부장 확보, 우수한 양자인력 양성, 글로벌 표준활동 촉진 및 양자기업 보호·국익 보호를 위한 규제, 신뢰할 수 있는 포용적 양자생태계 조성 등의 5가지 테마를 제시하였다.

40) www.aspi.org.au/report/australian-strategy-quantum-revolution

제3절 국내 정책 동향

1. 양자정보통신 중장기 추진전략(2014) 및 네트워크 구축전략(2017) 수립

국내에서는 2005년 일부 기업과 대학, 출연연을 중심으로 양자정보통신과 관련된 기초연구가 시작됐다. 기술개발 촉진을 위한 정부의 정책적 노력에 시동이 걸린 건 2010년대 초반이었다. 우선 2012년 4월 지식경제부의 '2020 IT 최강국을 위한 IT 10대 핵심기술'에 양자정보통신 시스템이 선정됐다. 2013년 3월에는 '국가 초고성능 컴퓨팅 활용 및 육성에 관한 법률'이 제정되며 양자컴퓨팅 기술개발의 근거가 마련됐다. 또 같은 해 7월에는 미래창조과학부에서 수립한 '정보보호산업 발전 종합대책' 중 정보보호 핵심기술 개발분야에 양자암호기술이 포함됐고, 2014년 2월 한국과학기술평가원이 선정한 '미래 10대 유망기술'에 양자정보통신 기술이 꼽히기도 했다.

2014년은 국가 차원의 양자정보통신 발전에 획기적인 전기가 마련된 한 해였다. 그해 1월부터 관련 기술 개발 및 정책 지원을 위한 관계부처 과장급 회의가 개최됐고, 2월에서 10월까지는 산학연 전문가 30여명으로 구성된 TF팀이 꾸려져 중장기 추진전략 수립을 위한 작업이 전개되었다. 그 결과 같은 해 12월에는 미래창조과학부에 의해 '양자정보통신 중장기 추진전략'이 수립돼, 국가 차원의 기술 개발 및 인력 양성, 기반 조성 노력의 필요성을 강조할 수 있었다.

한편 2015년 7월에는 KAIST를 중심으로 진행된 '초고성능 컴퓨팅 발전 포럼'을 통해 양자컴퓨팅 기술개발 방안이 마련됐다. 이어진 2016년은 투자 확대를 위한 끊임없는 노력이 현실의 높은 벽에 부딪혀 좌절된 한 해였다. 그해 5월 'K-ICT 전략 2016'에 양자정보통신을 포함한 ICT 유망분야에 대한 투자 확대 의견이 개진됐다. 탄력을 받아 같은 해 7월 과학기술정보통신부는 '양자정보통신 중장기 기술개발사업'을 위한 예비타당성 조사를 신청했으나 통과에 실패했다. 굴하지 않고 다음 달 양자 수요기술을 조사해 그 결과를 바탕으로 양자암호통신, 양자소자 등 총 12개 핵심과제를 도출하고 변경 기획안을 다시 제출했으나 이번에도 현실의 관문을 넘는 데는 실패하고 말았다.

투자 확대의 계기가 마련된 건 2017년이었다. 이해 1월 '양자정보통신기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안'이 발의됐고, 같은 해 12월 과학기술정보통신부에 의해 '4차 산업혁명 대비 초연결 지능형 네트워크 구축전략'이 발표되며 분위기가 무르익기 시작했다.

이와 같은 노력을 거쳐 2019년 과학기술정보통신부는 양자컴퓨팅 부문에 대한 예산 60억 원을 배정받았다. 이에 그해에는 양자정보통신 진흥을 위한 종합계획 수립을 위해 통신 3사와 장비제조사, 대학, 연구기관 등의 약 30명 전문가로 작업반을 구성하고, 관련 산업 육성을 위한 인프라 및 제도 지원

방안과 인력 양성 전략에 대해 논의했다. 2020년에는 양자 R&D 생태계 조성, 슈퍼컴퓨터 자체 개발 등 미래컴퓨팅 신규분야 사업에 317억 원의 예산을 확보했다. 세부적으로 슈퍼컴퓨터 개발 선도에 120억 원, 양자정보과학 연구개발 생태계 조성에 64억 원, 양자컴퓨팅 기술개발에 84억 원, 양자암호통신 집적화 및 전송기술 고도화에 49억 원이 편성되었다.

2. 양자암호통신 시범사업 추진(2020~2022) 추진

과학기술정보통신부는 미래 핵심기술인 양자 정보통신기술(ICT) 산업의 초석을 다지고 양자암호통신 활용사례를 발굴하기 위해 2020년 9월 약 150억 원, 2021년 5월 약 140억 원, 2022년 약 70억 원을 투입해 '양자암호통신 구축 시범사업'을 진행했다. 연도 및 분야별 과제 수행기관은 다음과 같다.

표 Ⅰ-2-16 2020년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (4개구간)	KT	전남도청(해군3함대사령부)	비화통신
		강원도청(춘천시청)	CCTV 데이터 저장
	SKB/ SKT	광주광역시청(CCTV센터, 교통정보센터)	CCTV 패스워드 관리,
			차량 정보 관리
의료분야 (6개구간)	SKB/ SKT	세브란스병원(신촌·강남·용인)	블록체인 실손보험청구
			의료 빅데이터 전송
			사고예방 알림 시스템
	KT	성모병원(서울·은평)	AI음성인식 진료기록 시스템
			의료기록 데이터 저장
	LGU+	을지대병원(노원·대전)	의료 데이터 전송
산업분야 (6개구간)	SKB/ SKT	한화시스템(본사·데이터센터)	스마트 오피스 시스템
		우리은행(콜센터·전산센터)	비대면 생체정보(안면인식) 측정
		CJ ICD 센터	VPN 서비스
	KT	현대중공업	산업기밀 데이터 전송
			AR 원격시설 점검
	LGU+	LG이노텍(평택·부산)	산업기밀 데이터 관리

※ 과학기술정보통신부 (2021c)

표 Ⅰ-2-17 2021년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (7개구간)	SKB/ SKT	대전상수도사업본부(송촌사업소, 대전광역시)	AI 실시간 얼굴인식 통제
			USB 보안토큰
		광주보건환경연구원(북구보건소)	Quatum-스마트폰
		한국수력원자력발전소(새울-고리)	-
	KT	강원도청(2군단사령부)	Quatum-액화수소드론
		제주도청(교통안전체험관)	Quatum-자율주행차
	LGU+	충남도청(공무원교육원)	DB 암호화 및 IC카드
민간분야 (10개구간)	SKB/ SKT	대구계명대병원 (성서-중구)	자율주행 로봇(지정맥인증)
			IoT 스마트 빌딩 관리 시스템
		ADT 캡스 (보라매, 장안, 삼성)	무인센서 보안시스템
			보안 출입ID카드
			USB 보안토큰
		고려대병원(안암-K-Bio)	클라우드 병원시스템
		평화홀딩스	수소차 설계도 PDF 암호화
	KT	순천향대병원(서울-부천)	Quatum-원격의료협진
		현대로보틱스	Quatum-IoT 로봇관제
		블록체인컴퍼니	Quatum-비트코인거래
	LGU+	빅히트엔터테인먼트	USIM
		GS EPS	안면인식 출입보안

※ 과학기술정보통신부 (2021c)

표 Ⅰ-2-18 2022년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (4개구간)	SKB	동국대학교-국민대학교	5G 기반 하이브리드 IoT 암호 기술
		광주환경공단(본부-전기실)	양자기반 가스누출 영상화 솔루션
	KT	국립암센터-아주대병원	Quantum-FL
	LGU+	전라남도청(무안)-전라남도 동부지역본부(순천)	PQC 사용자 인증 서비스(영상회의)
민간분야 (3개구간)	SKB	하나금융그룹(통합데이터센터-정보지원센터)	생체 인증 모바일 보안
	KT	제주국제대학교(연구동A-연구동B)	Quantum-공유플랫폼
	LGU+	카카오모빌리티(센터필드-평촌IDC)	PQC 유무선 단말 인증 서비스(결제)

3. 양자기술 연구개발 투자전략(2021) 수립

2021년 4월 과학기술정보통신부는 '양자기술 연구개발 투자전략'을 발표했다. '디지털을 넘어 퀀텀의 시대로'를 비전으로, '2030년대 양자기술 4대 강국 진입(全 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화)'을 목표로 한다. 이러한 이상의 현실을 위해 4대 중점전략도 수립했는데 도전적 원천연구 강화, 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, 양자기술 활용 및 산업혁신 촉진 등이 그 내용이었다.

그림 Ⅰ-2-12 양자기술 연구개발 투자전략



※ 과학기술정보통신부 (2021b)

표 Ⅰ-2-19 양자기술 R&D 투자전략의 단계별 추진 목표

단계	목표	주요 내용
1단계 ('21~'24)	인력 양성, 요소기술 개발 등 기반 마련	50큐비트급 양자프로세서 확보
		초소형 유선 양자암호통신 확보
		요소기술(공간해상도, 정밀도 등) 고도화 및 소형화
2단계 ('25~'30)	학문적, 산업적 활용 가능성(성공사례) 입증	NISQ 양자컴퓨팅 시스템 확보
		초고속·정밀 무선 양자암호통신 (양자 드론·항공기) 확보
		양자센서 산업(반도체, 의료) 활용
3단계 ('31~'35)	양자기술 상용화 본격 추진	오류정정 범용 양자컴퓨터 확보
		양자인터넷 기술 확보
		양자센서 응용 영역 확대 (초장거리 망원경, 양자현미경 등)

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

4대 중점전략 중 '도전적 원천연구 강화' 부문에서는 양자컴퓨터 상용화에 필요한 양자프로세서, 알고리듬, 오류 보정, 응용 SW 등 4대 핵심 요소기술에 집중 투자하는 세부전략을 수립했다. 특히 유선 양자암호통신 분야에선 성능 고도화 및 국제표준 선점 등 시장성 강화를 통해 기술우위를 확보하고, 무선 양자암호통신 분야에선 유선 양자통신의 한계를 넘어 커버리지를 확장하는 방향으로 기술개발을 지원하는 전략을 수립했다. 또 양자센서 분야의 경우 국내 수요가 분명하다 판단해 수요 연계형 연구개발을 통한 이른 상용화에 방점을 찍었으며, 연구 및 산업의 선순환 고리를 확보하는 방향으로 세부전략을 수립했다.

표 Ⅰ-2-20 양자센서 기술목표

구분	자기장 센서	관성 센서	이미징 센서
개발 목표	기존 센서 대비 100배 이상 공간분해능의 자기장 측정센서 개발	기존 센서 대비 10배 이상 정밀도를 가진 가속도 측정센서 개발	광학현미경 대비 10배 이상 분해능 확보, 가시적 관찰이 불가능한 대상 센싱
활용 분야	반도체 소자 누설전류 측정 미세암·뇌질환 검진	양자콤파스와 중력 지도를 이용한 無GPS 항법, 자원탐사, 자연재해 예측시스템 등	반도체 설계, 의료·미생물용 양자현미경, 초장거리 이미지(양자라이다) 등

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

'전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축' 부문에서는 양자 특화 핵심인력을 중점 육성하고 국내외 협력 생태계를 구축하기 위한 세부전략을 수립했다. 2030년까지 양자 핵심인력 1,000명 확보를 목표로 설정했으며 이론과 실습, 그리고 기업 프로젝트를 통합 제공하는 박사급 전문과정의 개설 및 운영을 내용에 반영했다.

'특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화'에서는 양자연구 인프라를 확충하고 단계적 고도화를 추진하는 방향으로 세부전략을 수립했다. 양자 전용 팹(파운드리)을 신속히 구축해 산학연 공동 활용을 지원하고, 알고리듬에 대한 연구검증 지원을 위해 양자컴퓨터를 모사하는 양자가상머신을 구축 및 제공한다는 내용을 포함시켰다.

표 Ⅰ-2-21 양자팹 구축 사업 개요

구분	개요
기간	2020년 ~ 2024년
예산	총 235억 원
위치	한국나노기술원(KANC) 및 성균관대(수원) 내
규모	약 470㎡ 규모
주요장비	증착, 노광, 식각, 후처리 장비 등 공동 활용 지원 * 초전도 박막증착 스퍼터, 전자빔 증착기, 광학적 접촉 노광 장비, 고속 전자빔 리소그래피 등

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

‘양자기술의 활용 및 산업혁신 촉진’ 부문에는 양자기술을 활용한 산업 혁신 및 공공난제 해결을 목표로 하는 ‘Q-플래그쉽 프로젝트’를 통해 경제·사회적으로 유용한 성과 사례를 창출하도록 적극 지원한다는 내용이 포함됐다. 또 국제 표준화 그룹의 활동 등에 참여함으로써 국제 표준화를 전략적으로 지원한다는 계획도 내용에 반영했다.

4. 미래양자융합포럼 창립 및 양자생태계지원 활성화 추진

가. 미래양자융합포럼 창립

과학기술정보통신부에서는 2021년 6월 국내 산·학·연·관의 대표적 전문기관 및 전문가로 구성된 ‘미래양자융합포럼’을 민·관 합동으로 출범시켰다. 미래양자융합포럼은 그동안 연구개발에만 초점을 맞춰왔던 양자기술 분야에 산업계의 폭넓은 참여를 이끌며 연구개발 분야와 산업계 사이 활발한 연계가 이뤄질 수 있도록 관련 역할을 수행하고 있다. 대상으로 하는 분야는 양자 통신·센서·컴퓨팅을 아우르고 있으며 대·중·소 기업 등 산업계 및 수요기관과 학계, 연구계 등의 대표적 기관 및 전문가를 대상으로 하고 있다.

미래양자융합포럼이 하는 역할은 산업 초기 단계인 양자분야의 산·학·연 교류를 통해 양자기술 기술 교류 및 자문, 산업화 모델 발굴 및 지원 협력 체계 구축, 산업 수요와 연계된 학계·연구계의 활성화 기획, 산·학·연 연계 공동 인력양성 및 연구과제 발굴 지원 등의 역할을 수행하고 있다.

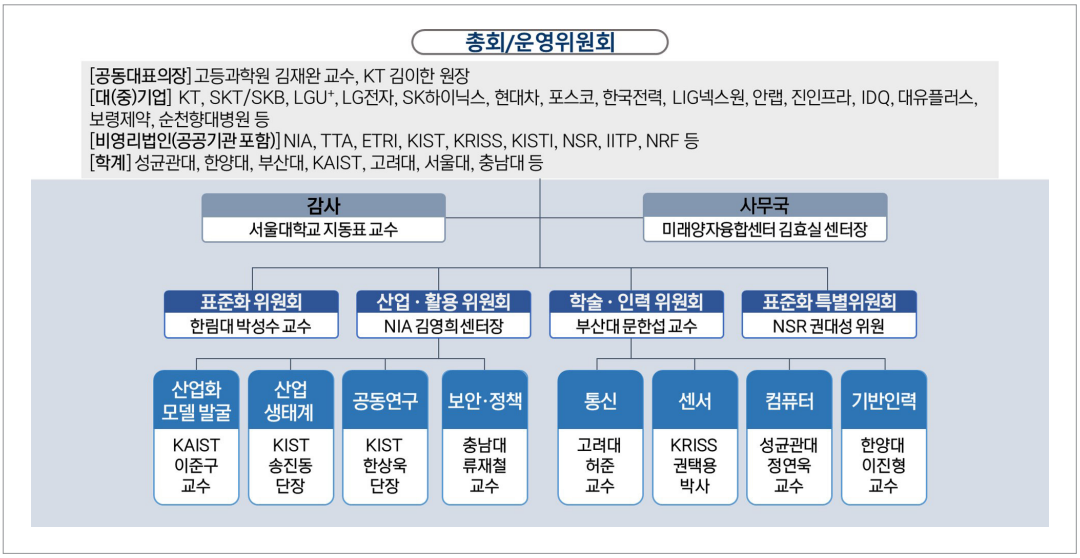
포럼 창립 당시 25개 대·중·소 기업, 27개 대학, 12개 출연연·공공기관 등 64개 기관 162명이 참여했고, 2023년 9월 현재 110개 기관, 472명까지 확대됐다. 특히 산업계 참여가 활성화됨에 따라 양자분야 연구결과의 산업적 활용을 견인하는 한편, 양자산업 생태계 구축에 기여할 수 있도록 노력하고 있다. 또한, 2023년부터는 해외기업의 본격적인 유치가 진행중이다.

표 Ⅰ-2-22 미래양자융합포럼 위원회 및 분과별 역할

위원회	분과	주요 역할
산업활용위원회	산업화 모델발굴	· 양자기술관련 서비스 및 상용화 모델 발굴, 시장창출 정책
	산업생태계	· 양자기술관련 산·학·연 생태계 활성화 방안
	공동연구	· 양자기술의 산·학·연 공동연구과제 발굴
	보안정책협력	· 양자기술 기반의 보안 및 암호화 협력 및 상용화 방안
학술인력위원회	통신	· 양자통신 원천기술분야 관련기술 자문
	센서	· 양자센서 원천기술분야 관련기술 자문
	컴퓨터	· 양자컴퓨터 원천기술분야 관련기술 자문
	기반인력	· 양자 전문인력 선순환 및 산·학·연 전문인력 연계 방안
표준화위원회		· 국내외 표준화 활동 및 표준화 전문가 연계·협력
표준화 특별위원회		· 양자암호통신 표준화 전략수립 및 추진을 위한 전문가 연계·협력

※ 미래양자융합포럼

그림 Ⅰ-2-13 미래양자융합포럼 조직도



※ 미래양자융합포럼

나. 양자산업생태계지원센터

과학기술정보통신부에서는 2022년 양자산업활성화 및 생태계 지원 전담기관으로 한국지능정보사회진흥원을 지정한 바 있으며, 경기도 판교 기업지원허브에 양자 기술 산업화를 위한 집중 지원과 양자기술·산업을 잇는 산학연 협력의 구심점 역할을 담당할 양자산업생태계지원센터를 2022년 1월에 개소하였다.

양자산업생태계지원센터의 역할은 우선, 양자 기술의 사업화를 추진하고 양자기술 기반의 혁신기업을 육성하는 것이다. 양자기술이 사장되지 않고 시장에 활용되기 위한 기술사업화를 추진하는 한편, 양자기술을 연구·개발하는 혁신기업의 육성에 매진하고 있다. 둘째로는, 양자정보통신 테스트베드를 구축하고 테스트베드 기반에서 양자 시험 및 검증을 추진하고 있다. 이는 양자정보통신 테스트베드를 통해 양자관련 기업의 기술개발과 성장의 기반을 마련하려 하는 것이다. 셋째로는, 국내외 양자정보통신관련 동향과 소·부·장 공급망 정보를 제공하고 있다. 양자관련 다양한 국내외 동향 정보와 국가 및 기업의 정보를 공유하고, 소부장 공급망 정보를 제공해 기업의 글로벌 진출 및 산·학·연 협력을 강화하고자 노력하고 있다. 넷째로, 수요기관과 산업계에서 필요로 하는 양자기술 핵심·지원 인력을 양성하기 위해서 노력하고 있다. 산업계의 수요에 비해 부족한 양자산업 전문인력확보를 위해 양자 관련 다양한 교육프로그램 제공 등의 역할을 수행하고 있다.

2023년의 경우 대·중·소기업 연계 지원(인턴십), 양자관련 대학 연계 실습교육, 양자 전환 기업 발굴 등 양자산업 생태계 교육 활성화를 위한 노력을 진행하였다.

다. 양자정보연구지원센터

과학기술정보통신부에서는 '양자정보과학 연구개발생태계 조성사업'에 따라 국내 양자정보과학 분야 연구활동을 지원하기 위해 2020년 8월 성균관대학교에 양자정보연구지원센터를 개소하였다.

양자정보연구지원센터의 역할은 우선, 해외 연수 및 교육프로그램을 제공하는 것이다. 선진연구인력에게 새로운 지식과 정보를 제공하기 위해 해외 연수를 지원하고 폭넓은 신규 인재 유입을 위한 교육프로그램을 제공하는 것이다. 이를 통해 양자정보분야의 신진 연구인력을 양성하고 저변확대를 위한 국내 생태계를 구축하는 것이 목적이다. 둘째, 양자팹 공정 활용지원과 양자 컴퓨터 클라우드 활용지원을 확대하는 것이다. 양자소자에 전문화된 양자팹을 구축하여 양자소자공정을 지원하며, IonQ클라우드, IBM클라우드, D-Wave 클라우드 등 양자컴퓨터 클라우드의 활용을 지원하고 있다. 또한 양자 팹(파운드리) 구축을 진행중이며, 양자 팹을 통한 양자소자공정 인프라(파운드리 구축) 및 공정 서비스를 제공하는 등 다양한 양자정보연구지원 역할을 수행하고 있다.

라. 양자정보과학기술연구회 및 한국양자정보학회

양자정보과학기술은 수학, 물리학, 화학 등 기초과학 전문가 뿐만 아니라 컴퓨터공학을 비롯한 다양한 공학 기술 전문가들 사이의 긴밀한 협력이 있어야 발전할 수 있다. 우리나라에서는 한국물리학회(KPS)의 '원자 및 분자물리 분과'와 한국광학회(OSK)의 '양자광학 및 양자정보 분과', '양자암호포럼' 등으로 나누어져 있던 양자정보과학기술 연구생태계를 다학제적으로 심화 발전시키기 위하여 2019년

‘양자정보과학기술연구회(The Korean Association of Quantum Information Science and Technology, QuIST)’가 출범하였다. 연구회는 ICQC(International Conference on Quantum Computing), 정기세미나 및 워크샵, 계절학교 등을 개최하여 국내외 학계, 연구계, 산업계 연구주체들의 연구 교류를 활성화하고, 학생들과 이 분야에 새로 진입하는 연구자들에게 기회를 제공하는 역할을 해 왔다. 또한 양자기술의 개념과 용어가 쉽게 이해되도록 ‘양자기술백서’를 발간하여 널리 알리는 데에 도움을 주었다. 연구회는 양자정보과학기술 분야 학술단체로서의 역할을 공고히 하기 위하여 2022년 10월 ‘한국양자정보학회(Quantum Information Society of Korea, QisK)’로 사단법인화하였다.

5. 양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안(2023)

2023년 10월 양자과학기술과 산업을 집중 육성하기 위한 ‘양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률’이 국회 본회의를 통과했다. 법률에는 양자과학기술과 산업을 집중 육성하기 위한 종합계획 수립, 기술개발 및 상용화 촉진, 인력양성, 연구거점·클러스터, 국제협력 등의 장기적·종합적 육성 등에 관한 내용이 포함되었다.

그림 I-2-14 양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안

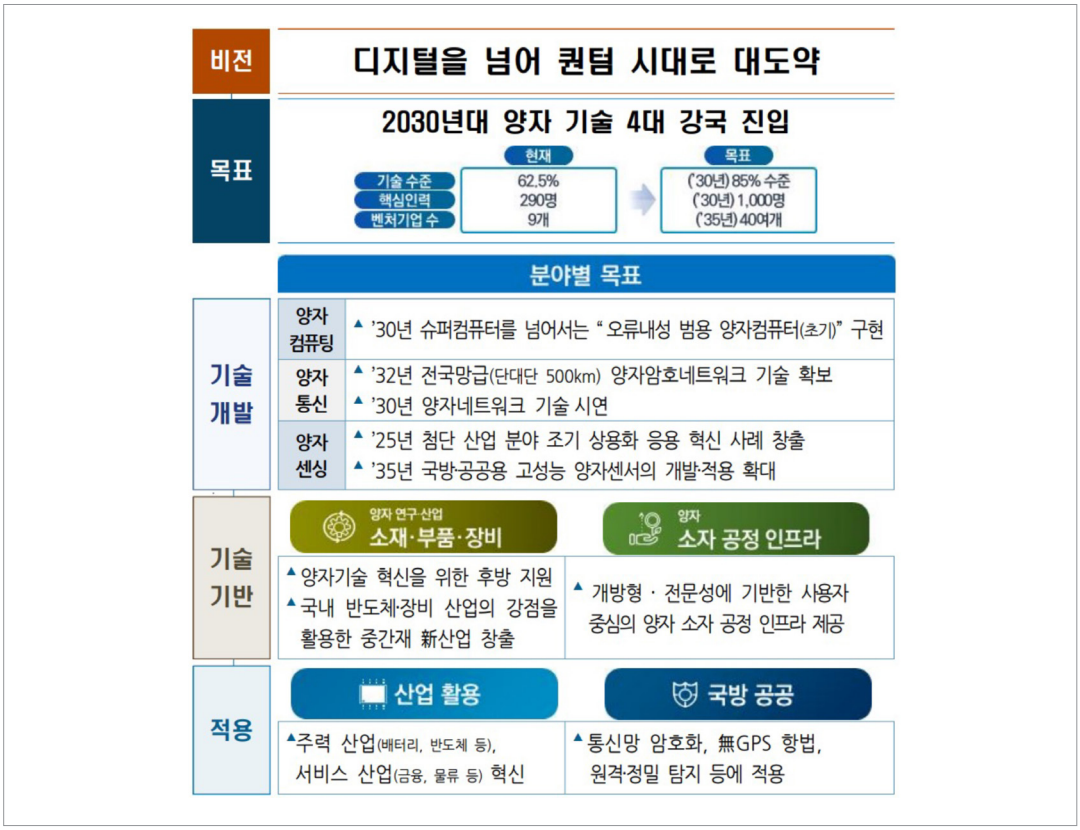
「양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률안」
[2023.10.6. 국회 본회의 통과(2024년 10월 시행 예정)]

- (양자과학기술 정의) 양자(量子)역학적 특성에 기반하여 시스템을 만들거나 정보를 생성·제어·계측·전송·저장·처리하는 기술로서 양자암호, 양자통신, 양자센서, 양자소자, 양자컴퓨터, 양자시뮬레이터 등을 구현하기 위한 과학과 기술 일체(제2조)
- (연구개발의 추진) 양자과학기술 발전전략의 수립, 연구개발 투자방향의 설정 등을 위해 양자과학기술 분야의 기술지도(技術地圖)를 작성(제11조)
- (표준화 추진) 양자과학기술 및 양자산업 육성을 위해 표준 제정·개정 및 폐지, 표준의 조사·보급·확산, 표준 관련 인력 양성 및 국제교류 사업 추진(제15조)
- (양자과학기술 연구센터) 기업·대학·연구소 등이 협력하여 원천기술을 확보하고 양자산업으로 연계 지원을 위해 연구센터를 지정(제18조)
- (인력양성·전문교육기관) 양자과학기술에 특화된 인력을 양성하기 위해 전문인력과 시설을 갖춘 대학 및 대학원 중 공모를 통해 전문교유긱관을 선정하고 행정적·재정적 지원의 근거를 마련(제22조)

6. 양자기술 전략로드맵(2022)

양자기술의 후발주자로서 전략적 선택과 과감한 투자를 통한 신속한 기술 추격을 위해 2022년 12월 '양자기술 전략로드맵'을 수립하였으며, 2030년대 양자기술 4대 강국 진입을 목표로 기술개발, 기술기반, 적용 등의 3대 분야별 세부 목표를 도출하였다.

그림 I-2-15 양자기술 전략로드맵



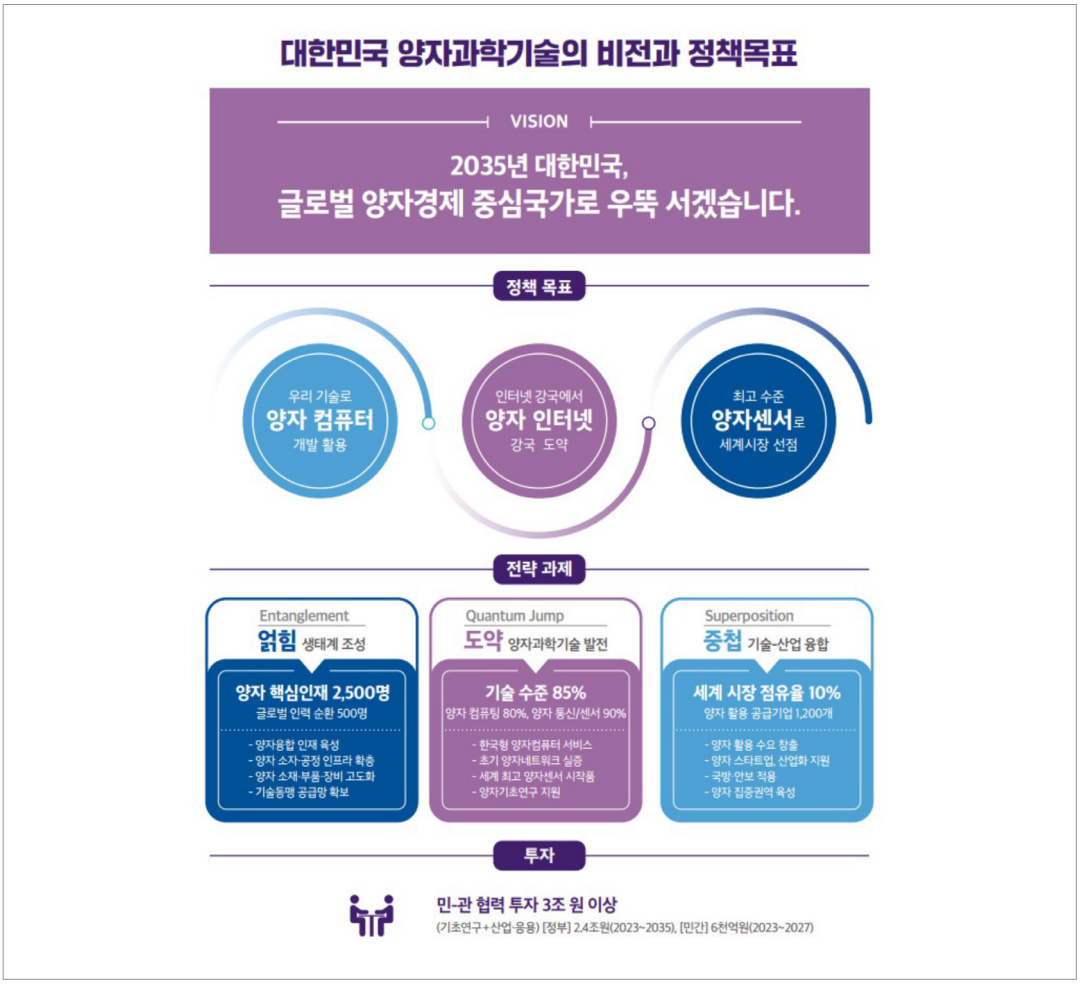
※ 과학기술정보통신부 (2022)

기술개발 측면에서 양자컴퓨팅은 2030년 슈퍼컴퓨터를 넘어서는 '오류내성 범용 양자컴퓨터 구현', 양자통신은 2030년 '양자네트워크 기술시연'. 양자센싱은 2035년 국방·공공 분야에 고성능 양자센서의 개발·적용 확대를 추진할 예정이다. 그리고 기술기반 측면에서는 양자기술 혁신을 위한 후방 지원 및 국내 반도체·장비 산업의 강점을 활용, 중간재 신산업 창출을 위한 소재·부품·장비 개발을 추진하며, 개방형·전문성에 기반한 사용자 중심의 양자 소자 공정 인프라 구축을 지원할 계획이다. 마지막으로 산업적 활용 측면에서는 우선적으로 주력산업(베터리, 반도체 등) 및 서비스 산업(금융·물류 등)의 혁신을 도모하고 국방·공공 분야는 통신망 암호화, 無-GPS 항법, 원격·정밀 탐지 등의 분야에 적용할 계획이다.

7. 양자과학기술 비전(2023)

과학기술정보통신부에서는 2023년 6월 “2035년 글로벌 양자경제 중심 국가로 우뚝 서기” 위해 ‘대한민국 양자과학기술전략’을 발표하였다. 그리고 우리나라 최초의 중장기 비전과 발전전략을 담은 국가전략으로 3대 정책목표와 전략 과제를 제시하였다.

그림 I-2-16 대한민국 양자과학기술 비전 및 정책목표



※ 과학기술정보통신부 (2023)

양자기술 3대기술 분야(컴퓨팅, 통신, 센싱)의 정책목표로 ‘우리 기술로 양자컴퓨터 개발·활용’, ‘인터넷 강국에서 양자 인터넷 강국 도약’, ‘최고 수준 양자센서로 세계시장 선점’ 등을 제시하였다. 목표 달성을 위한 전략과제로써 양자과학기술 생태계 조성을 위한 양자 핵심인재를 양성하고 양자과학기술 발전을 위해 기초연구·산업응용 분야에 2조 4,000억원을 투자할 계획이다. 또한 기술-산업 융합을 위해 양자 활용 공급기업을 집중적으로 육성할 예정이다.

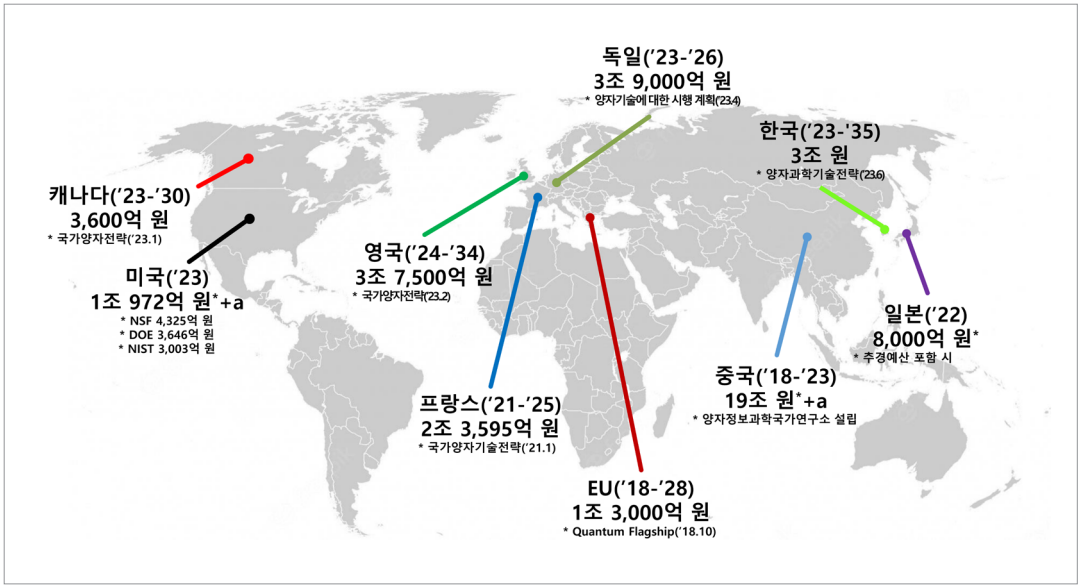
제3장
국내외 투자동향

제1절 개요

해외 주요국은 양자시장을 초기 선점하기 위해, 경쟁적으로 대규모 관련 예산을 편성하고 장기적 관점에서 투자를 확대하고 있다. 미국, 중국 등 선진국 간 패권 경쟁에 의한 국가 차원의 투자는 물론이고, 민간 차원의 투자 규모도 대폭 늘어나는 추세이다.

현재 세계 주요국의 양자분야 투자 규모를 간략히 살펴보면 다음과 같다. 미국의 경우 2023년 美 연방정부 및 각 기관으로부터 요청된 관련 예산 총합은 8억 4,400만 달러(약 1조 972억 원)이다. 2022년의 경우 8억 7,700만 달러(약 1조 1,401억 원)가 요청됐지만, 실제로는 9억 1,800만 달러(약 1조 1,934억 원)가 투입된 것으로 추정된다. 유럽연합(EU)은 2018년 10월 양자플래그십(Quantum Flagship)을 출범시키고, 이를 통해 2018년부터 향후 10년간 양자기술에 10억 유로(약 1조 3,000억 원)의 예산 투입 계획을 밝히고, 현재 활발한 투자를 진행하고 있다. 2014년 영국은 향후 10년 동안 민관 공동으로 10억 파운드(약 1조 5,000억 원)의 투자를 발표한 바 있다. 이후 2023년 2월 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)를 통해 2024년부터 향후 10년간 양자기술에 25억 파운드(약 3조 7,500억 원)를 투자할 계획임을 밝혔다. 독일은 양자기술-기초에서 시장까지(Quantum technologies-from basic research to market)라는 이름의 프레임워크 프로그램을 통해 2018년부터 2022년까지 양자기술 R&D에 6억 5,000만 유로(약 8,450억 원)를 투자했으며, 2023년 4월 양자기술에 대한 실행 계획(Germany's Action Plan for Quantum Technologies)을 발표하며 2026년까지 30억 유로(약 3조 9,000억 원)를 투자할 계획임을 밝혔다. 프랑스는 2021년 국가양자기술전략(Stratégie nationale sur les technologies quantiques)을 발표하면서 2025년까지 5년 동안 양자기술에 18억 1,500만 유로(약 2조 3,595억 원)를 투자할 것이라고 밝혔다. 캐나다의 경우, 2023년 1월 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)을 통해 향후 7년간 양자기술에 3억 6,000만 캐나다 달러(약 3,600억 원)의 투자를 발표했다. 중국은 제14차 5개년 계획(2021~2025) 및 2035 중장기 목표를 발표하며 양자통신과 양자컴퓨터에 투입되는 연구개발비를 매년 7% 이상 증액하겠다고 밝혔다. 일본은 양자기술 이노베이션 전략을 수립하며 추경 예산을 통해 양자기술에 대한 예산을 증액했고, 2022 회계연도 예산은 추경 예산까지 포함된다면 기존 대비 2배 이상 확대된 800억 엔(약 8,000억 원)이 투입된 것으로 추정되고 있다. 한국의 경우, 2022년 양자 R&D 전용사업에 699억 원 수준의 예산이 투입됐으며, 2023년 6월에는 과학기술정보통신부가 대한민국 양자과학기술전략을 발표하면서 2035년까지 민관 공동으로 3조 원을 투자할 것임을 밝혔다.

그림 Ⅰ-3-1 세계 주요국 양자산업 투자 규모



※ 집필진 작성

지난 22년간 양자기술에 대한 공공과 민간 부문의 투자를 살펴보면, 미국은 약 4조 3,329억 원으로 가장 많은 투자를 했고, 캐나다(약 1조 5,171억 원), 영국(약 1조 4,664억 원) 등이 각각 미국의 뒤를 이었다.[41] 지난 22년간 양자기술 분야 투자의 대부분은 민간에서 유치됐다.

표 Ⅰ-3-1 국가별 양자기술의 공공·민간 투자 규모(2001~2022년)

(단위: 억 원)

국가	공공	민간	기업의 외부 투자	특수	합계
미국	988	29,848	4,121	8,385	43,329
유럽	715	5,265	520	-	6,487
영국	494	4,862	923	8,385	14,664
캐나다	767	8,047	2,457	3,900	15,171
중국	-	3,679	273	-	3,952
기타	533	5,044	1,222	-	6,799
합계	3,497	56,745	9,516	20,670	90,402

※ McKinsey (2023)

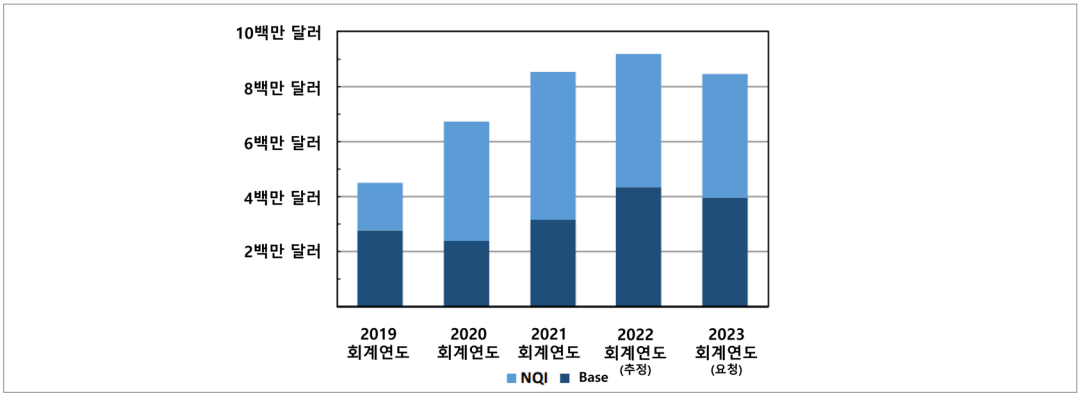
41) McKinsey (2023)

제2절 해외 투자 동향

1. 미국

미국은 양자정보과학(Quantum Information Science, QIS) 연도별 R&D 예산으로 2019년에 4억 4,900만 달러(약 5,837억 원), 2020년에 6억 7,200만 달러(약 8,736억 원)를 실제 투입했다. 2022년에 발간된 보고서에서는 2021년에 7억 9,300만 달러(약 1조 309억 원)를 투입한 것으로 추정했지만, 올해 발간된 보고서에 따르면 추정치보다 6,200만 달러(약 806억 원) 많은 8억 5,500만 달러(약 1조 1,115억 원)를 실제 투입했고, 2022년에는 9억 1,800만 달러(약 1조 1,934억 원)를 투입한 것으로 추정했다. 2023년 美 연방정부 및 각 기관으로부터 요청된 예산 총합은 8억 4,400만 달러(약 1조 972억 원)로 2021년과 비슷한 수치이다.[42]

그림 I-3-2 미국 양자정보과학 R&D 예산



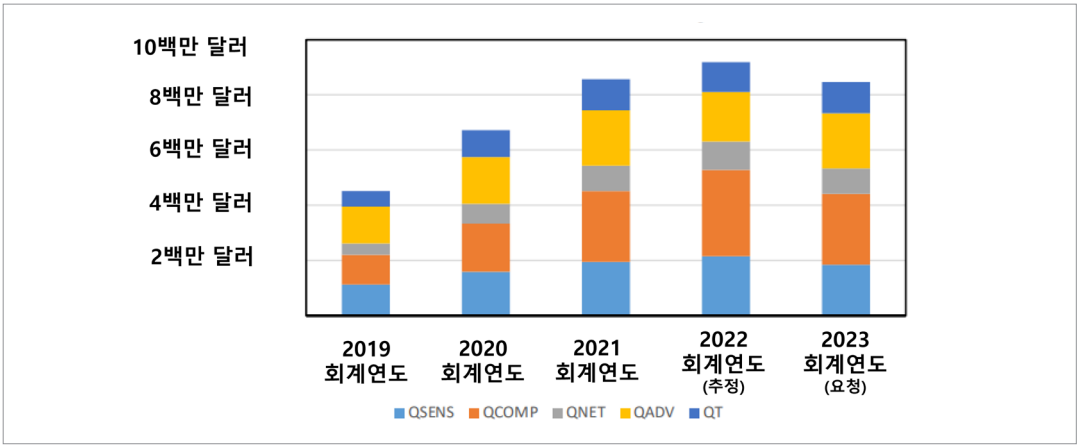
※ SCQIS (2023)

해당 예산을 국가양자이니셔티브(National Quantum Initiative, NQI) 프로그램별로 구분하자면 양자센싱 및 계측(Quantum Sensing and Metrology, QSENS), 양자컴퓨팅(Quantum Computing, QCOMP), 양자네트워크 및 통신(Quantum Networks and Communications, QNET), 기초양자정보과학(Foundational Quantum Information Science Advances, QADV), 양자기술(Quantum Technology, QT) 등으로 나눌 수 있다. 이 중 양자기술(QT)은 미래 애플리케이션(Future Application, QTAPP), 위험 관리(Risk Mitigation, QTRM), 지원 기술(Supporting Technology, QTSUP)로 세분화할 수 있다. 프로그램별 정확한 투자 예산 수치는 발표된 바 없지만, 그

42) SCQIS (2023)

래프를 통해 양자컴퓨팅에 투입되는 예산이 2022년에 대폭 증가하였다가 2023년에 다시 2021년과 비슷한 수치로 감소하였음을 확인할 수 있다.[43] 또한, 2023년 11월에 발표한 2024년도 NQI기반 예산 요청안에서는 양자통신·컴퓨팅 예산은 줄었으나, 양자센싱 관련 예산이 증액된 것은 참고할 만한 점이라고 하겠다.

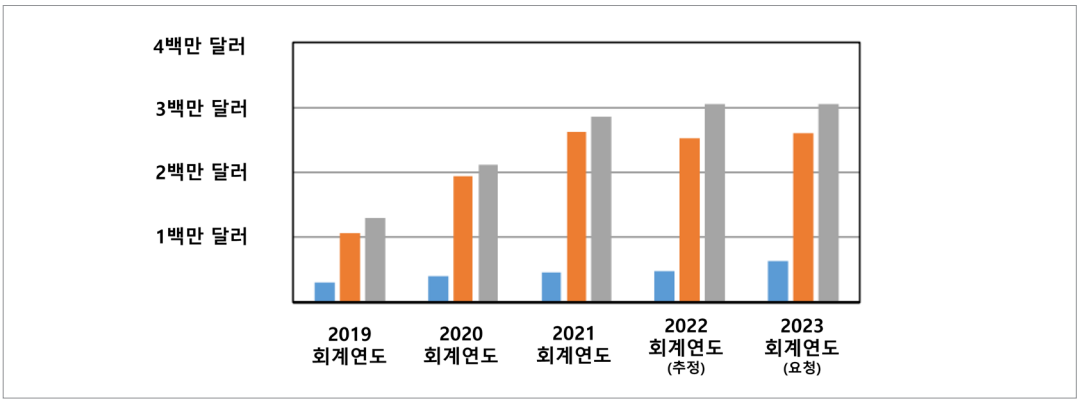
그림 I-3-3 미국 양자정보과학 R&D 예산(NQI 프로그램별)



※ SCQIS (2023)

현재 미국은 여러 연방기관을 통해 양자정보과학에 전방위적 투자를 이어가고 있으며, 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF), 미국 에너지부(Department of Energy, DOE), 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST) 세 기관을 NQI 법안 기관(NQI Act Agency)으로 지정해 관련 예산을 집행 중이다.[44]

그림 I-3-4 미국 양자정보과학(QIS) R&D 예산(NQI 기관별)

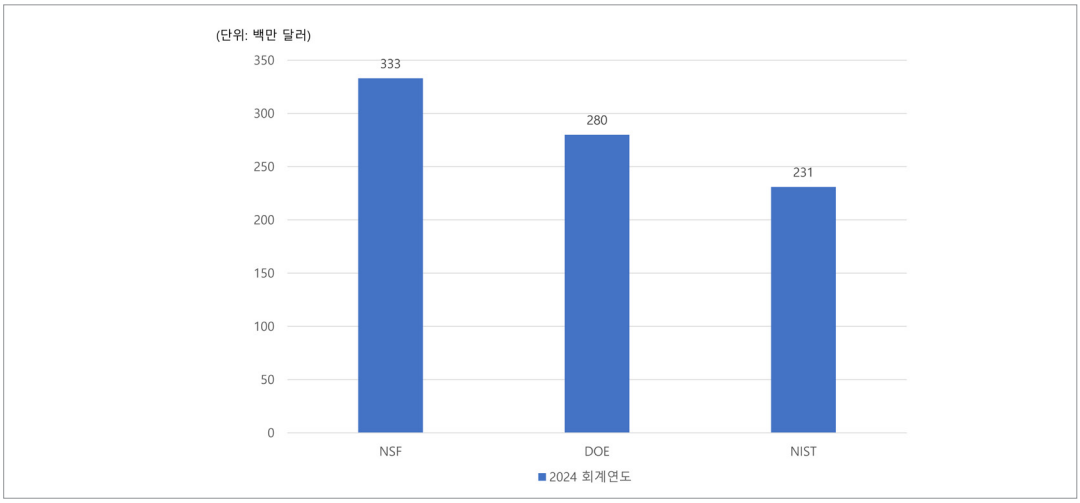


※ SCQIS (2023)

43) SCQIS (2023)
44) SCQIS (2023)

세 곳의 양자정보과학 R&D 예산은 2019년 이후 꾸준히 늘어 2023년까지 약 두 배 이상 증가했는데, 구체적인 수치를 파악하기 위해서는 각 기관의 연도별 예산 요청안을 살펴볼 필요가 있다. 각 기관의 예산 요청안을 통해 2024년까지의 예산 요청액을 확인할 수 있는데, NSF는 3억 3,267만 달러(약 4,325억 원), DOE는 2억 8,043만 달러(약 3,646억 원), NIST는 2억 3,100만 달러(약 3,003억 원)를 요청하였다. 이외에도 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency) 등 다른 기관에서도 양자정보과학 관련 예산 요청액이 있지만, 본 백서에서는 NSF, DOE, NIST 세 기관만 다룰 예정이다.

그림 I-3-5 양자정보과학(QIS) 2024 회계연도 요청액(NQI 기관별)



※ SCQIS (2023)

가. 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF)

먼저 NSF의 국가양자이니셔티브(NQI) 프로그램별 양자정보과학 R&D 예산을 아래 표를 통해 파악할 수 있다. 표에서 보듯이 양자정보과학 R&D에 대한 NSF의 예산은 2020년부터 2024년까지 계속 증가하는 추세를 보인다. 다만 2022 회계연도의 경우, 우수한 예산 요청을 예상보다 더 많이 받았기 때문에 미래 회계연도보다 예산액이 높을 수 있다는 점을 감안할 필요가 있다. 표에서 가장 주목할 점은 기초양자 정보과학과 미래 애플리케이션 분야에 대한 2024년 예산이 2020년 대비 약 3배로 증가했다는 점이다. 이는 미국이 양자기술과 관련된 기초과학뿐만 아니라 양자기술 상용화에도 주목하고 있음을 알려주는 단서가 될 수 있다. 양자기술을 분야별로 살펴봤을 때는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 등 모든 분야에서 2024년 예산이 전년보다 증가했다. 각 기술 분야별로 증가율로 보자면 양자통신은 약 21%(715만 달러), 양자센싱은 약 27%(790만 달러), 양자컴퓨팅은 약 26%(1,130만 달러)로 양자센싱 분야의 예산액이 타 분야 대비 적지만 예산 증가율은 가장 높음을 확인할 수 있다.[45]

45) NSF (2023)

표 I-3-2 NSF 연도별 양자정보과학 R&D 예산

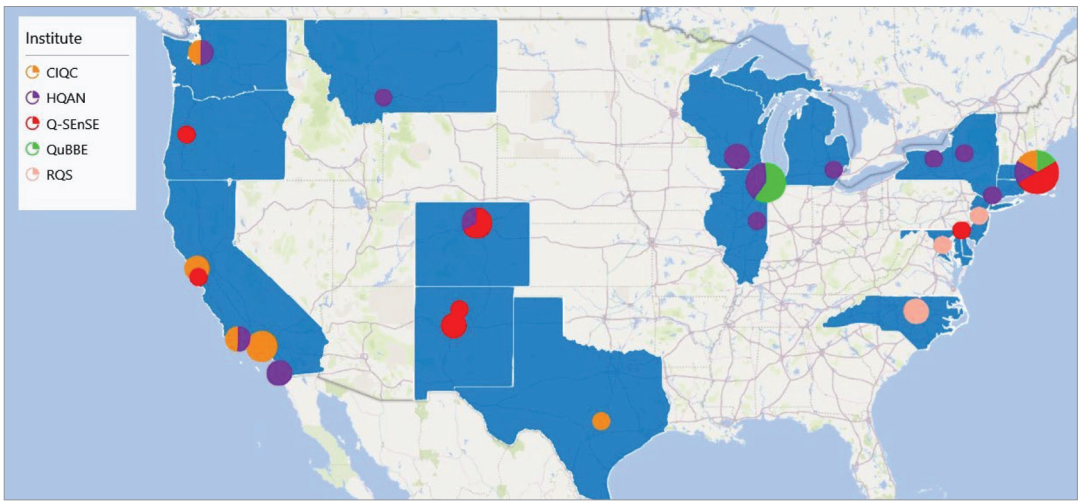
(Dollars in Millions)	2020 회계연도	2021 회계연도	2022 회계연도*	2023회계연도 (추정)	2024 회계연도 (요청)
양자네트워크 및 통신(QNET)	32.71	37.14	35.35	34.50	41.65
양자센싱 및 계측(QSENS)	37.09	46.05	29.25	29.52	37.42
양자컴퓨팅(QCOMP)	51.18	67.02	41.85	44.11	55.41
기초양자 정보과학(QADV)	47.65	71.64	185.10	123.84	138.45
미래 애플리케이션(QTAPP)	13.03	17.37	39.06	34.32	46.45
위험 관리(QTRM)	7.09	9.54	4.52	4.37	6.60
지원 기술(QTSUP)	5.77	6.30	12.65	5.25	6.69
합계	**194.52**	**255.06**	**347.78**	**275.91**	**332.67**

* 2022 회계연도의 경우, 우수한 예산 요청을 예상보다 더 많이 받았기 때문에 미래 회계연도보다 예산액이 높을 수 있음.

※ NSF (2021 & 2022 & 2023) 집필진 재구성

NSF의 양자정보과학 R&D 주요 프로그램 중 하나로 양자도약과제연구소(Quantum Leap Challenge Institutes, QLCI)를 꼽을 수 있다. NSF는 5개의 연구소를 통해 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션 등 양자기술 전반에 걸쳐 연구를 진행하고 있으며, 해당 프로그램에는 17개 대학, 10개 기업, 5개 국립 연구소, 1개 R&D 연방기관이 참여한다. 다음은 NSF의 양자도약과제연구소(QLCI) 프로그램 파트너 기관의 분포를 보여주는 그림이다.[46]

그림 I-3-6 NSF QLCI 프로그램 참여 기관 분포도



※ SCQIS (2021)

46) SCQIS (2021)

나. 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)

NSF, DOE, NIST 가운데 2023 회계연도를 기준으로 가장 많은 예산을 투자하고 있는 기관인 DOE의 경우 NSF, NIST와 달리 양자정보과학 R&D 예산은 점점 줄어드는 추세를 보였다. 2022년에는 추정액보다 1,661만 달러(약 22억 원) 많은 2억 9,307만 달러(약 3,810억 원)가 실제 투입됐다. 2023년에는 요청액보다 4,677만 달러(약 61억 원) 적은 2억 8,875만 달러(약 3,754억 원)가 투입된 것으로 확인된다. 2024년에는 2023년 실제 투입 예산보다 8,320만 달러(약 108억 원) 적은 2억 8,043만 달러(약 3,646억 원)가 요청됐다.[47]

표 Ⅰ-3-3 DOE 양자정보과학 R&D 예산

(Dollars in Thousands)	2022 회계연도	2023 회계연도	2024 회계연도(요청)
양자정보과학(Quantum Information Science)	293,075	288,749	280,429

※ DOE (2023) 집필진 재구성

DOE의 올해 예산 자료에는 세부 연구 분야별 예산액을 기재하지 않은 관계로 2021년과 2022년 자료를 토대로 표를 재구성하였다. DOE의 양자정보과학 R&D 연구 분야 중 양자센서와 관련된 연구 분야는 바이오&환경 연구, 융합에너지과학, 고에너지물리학, 핵물리학 등이고, 주요 연구 내용으로는 바이오센서 및 바이오이미징 애플리케이션, 차세대 검출기 및 특성화 도구 제작, 플라즈마 및 융합과학을 위한 진단 능력 향상, 현대물리학 및 암흑 우주 탐구 실험 등이 있다. 양자컴퓨팅의 경우, 고급과학컴퓨팅 연구와 더불어 다양한 분야에서 알고리듬, 소프트웨어, 하드웨어, 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이터 애플리케이션에 관련된 연구가 진행되고 있다. 양자네크워크 및 통신 연구는 얽힘 분배, 양자전송, 양자센서 네트워크, 양자네트워크 애플리케이션 및 테스트베드 구축 등을 포함한다. 마지막으로 지원기술의 경우, 동위원소 연구개발 및 생산과 관련된 연구가 진행되고 있다.[48]

47) DOE (2023)

48) DOE (2021 & 2022) QCI 재구성

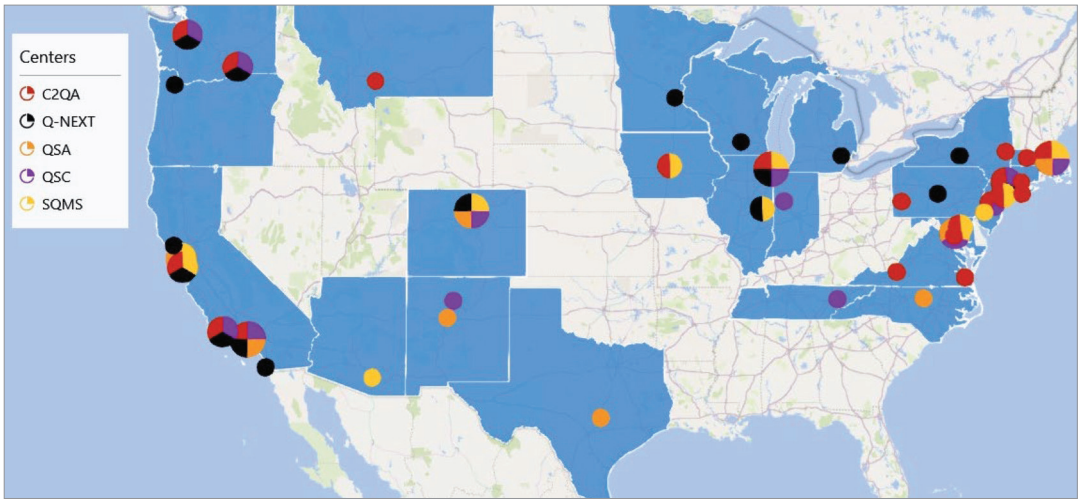
표 I-3-4 DOE 연도별 양자정보과학 R&D 예산

(Dollars in Thousands)	2019 회계연도	2020 회계연도	2021 회계연도	2022 회계연도 (추정)	2023 회계연도 (요청)
고급과학컴퓨팅 연구 (Advanced Scientific Computing Research)	33,666	54,680	98,402	100,695	101,194
기초에너지과학(Basic Energy Sciences)	49,517	72,270	92,050	92,050	102,000
바이오&환경 연구 (Biological and Environmental Research)	4,500	12,000	12,000	14,500	14,500
융합에너지과학(Fusion Energy Sciences)	-	7,250	9,520	10,000	10,000
고에너지물리학(High Energy Physics)	27,500	38,500	45,072	45,072	50,566
핵물리학(Nuclear Physics)	8,300	10,300	13,347	9,847	10,866
동위원소 연구개발 및 생산 (Isotope R&D and Production)	-	-	-	4,300	4,300
합계	123,483	195,000	270,391	276,464	293,426

※ DOE (2021 & 2022) 집필진 재구성

DOE가 2020년에 설립한 5개의 양자정보과학 연구센터는 국립 연구소에 의해 운영되며, 미국뿐만 아니라 캐나다, 독일 등의 총 69개 산학연 기관으로 구성된다. [그림 I-3-7]은 DOE의 양자정보과학 연구센터를 구성하는 38개 대학, 15개 기업, 12개 국립 연구소, 2개 연방 R&D 기관의 분포도이다.

그림 I-3-7 양자정보과학 연구센터 구성 기관 분포도



※ SCQIS (2021)

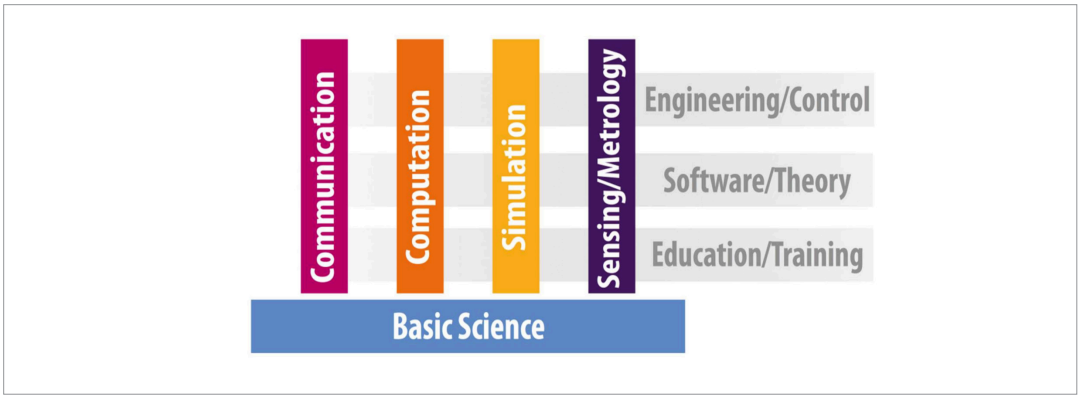
다. 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)

NIST는 양자정보과학 전 분야에 걸쳐 연구를 진행 중임에도 불구하고, 앞서 언급한 두 기관과 다르게 분야별 투자 예산 규모를 가늠하기 어렵다. 다만, NIST가 양자정보과학 R&D에 투입하는 예산이 2019년 이후 꾸준한 증가 추세이며, 2024년의 예산 요청 규모는 2억 3,100만 달러(약 3,003억 원)로 확인된다.[49)]

2. 유럽연합(EU)

EU는 2018년 10월 양자플래그십(Quantum Flagship)을 출범시키고, 이를 통해 2018년부터 향후 10년간 양자기술에 10억 유로(약 1조 3,000억 원)의 예산 투입 계획을 밝혔다. 양자플래그십의 주요 목표는 유럽이 차세대 양자정보기술 산업을 주도할 수 있도록 발판을 마련해, 향후 양자정보기술 분야의 메카로 군림하게끔 만드는 것이다.

그림 I-3-8 EU 양자플래그십 프로젝트별 투자 구조



※ High-Level Steering Committee (2017)

양자플래그십 첫 번째 단계(Ramp-Up Phase)는 2018년 10월부터 본격적으로 시작되어 2021년 9월까지 3년간 1억 3,200만 유로(약 1,716억 원)의 예산이 투입됐다. 총 140개의 기술 수요 중에서 선정된 20개의 프로젝트는 분야별로 양자통신 4개, 양자센싱/계측 3개, 양자컴퓨팅 5개, 양자 시뮬레이션 3개, 기초과학 5개 프로젝트로 구성된다. 〈표 I-3-5〉를 통해 분야별 개별과제에 대한 연구개발비 내역을 확인할 수 있다.

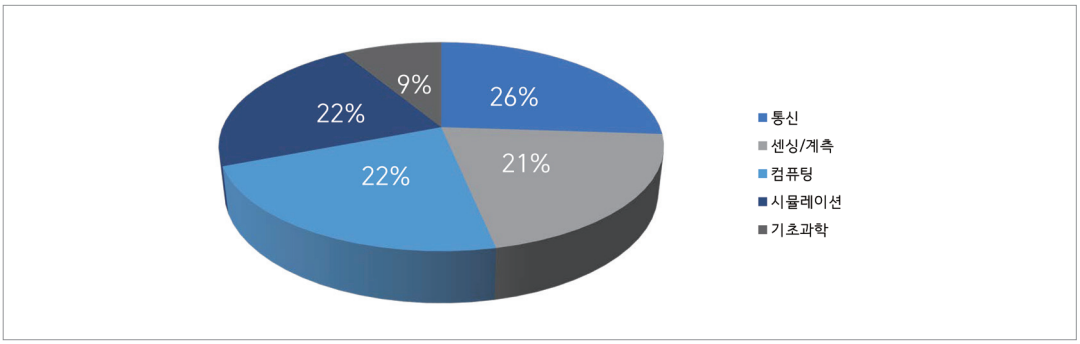
49) https://iq.govwin.com/neo/marketAnalysis/view/Federal-Investment-in-Quantum-Information-Science-in-FY-2024/7457?researchTypeId=1&researchMarket=

표 I-3-5 EU 양자플래그십 1단계 과제

영역	과제명	연구비(억 원)	영역	과제명	연구비(억 원)
통신	CiViQ	129	컴퓨팅	OpenSuperQ	133
	QIA	134		AQTION	124
	QRANGE	42		2D SIPC	39
	UNIQORN	130		S2QUIP	39
시뮬레이션	Qombs	121		QMiCS	39
	PASQuanSiqClock	120	기초과학	SQUARE	39
	iqClock	130		PhoG	36
센싱/계측	MetaboliQs	86		PhoQuS	39
	macQsimal	133		MicroQC	31
	ASTERIQS	126	과제지원	QFLAG	46

※ ETRI (2019) 집필진 재구성

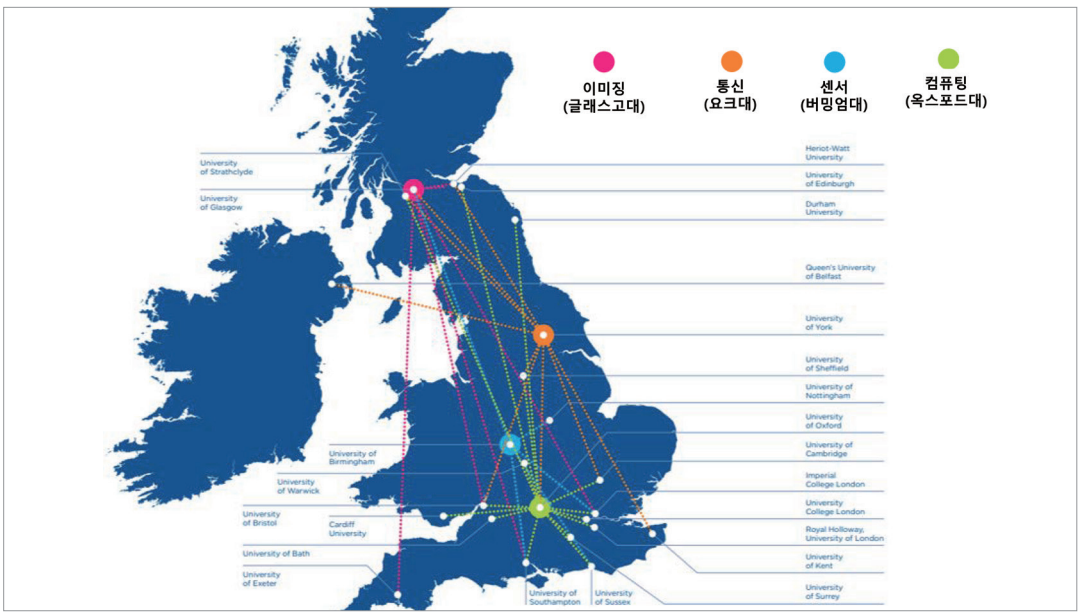
그림 I-3-9 EU 양자플래그십 1단계 과제 연구개발비 구성 비율



3. 영국

영국은 2014년에 국가양자기술프로그램(UK National Quantum Technologies Programme, UKNQTP)을 도입하고, 2024년까지 향후 10년 동안 민관 공동으로 10억 파운드(약 1조 5,000억 원) 투자를 발표했다. 국가양자기술프로그램의 주요 활동에 대한 투자금은 영국의 과학기술혁신부(Department for Science, Innovation & Technology, DSIT)가 올해 3월에 발표한 국가양자전략(National Quantum Strategy)에서 확인할 수 있다.[50] 먼저, 국가양자기술프로그램의 주요 축으로 볼 수 있는 양자기술허브에는 2억 1,400만 파운드(약 3,210억 원)가 투자되었으며, 이는 영국과학공학연구위원회(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)의 자금으로 지원됐다. 양자기술허브는 통신(요크대), 센서(버밍엄대), 이미징(글래스고대), 컴퓨팅(옥스포드대)에 대한 연구개발 및 상용화의 가속화를 목표로 영국 전역의 30개 이상 연구 기관이 참여하였다.[51]

그림 I-3-10 영국 국가양자기술프로그램 허브 네트워크



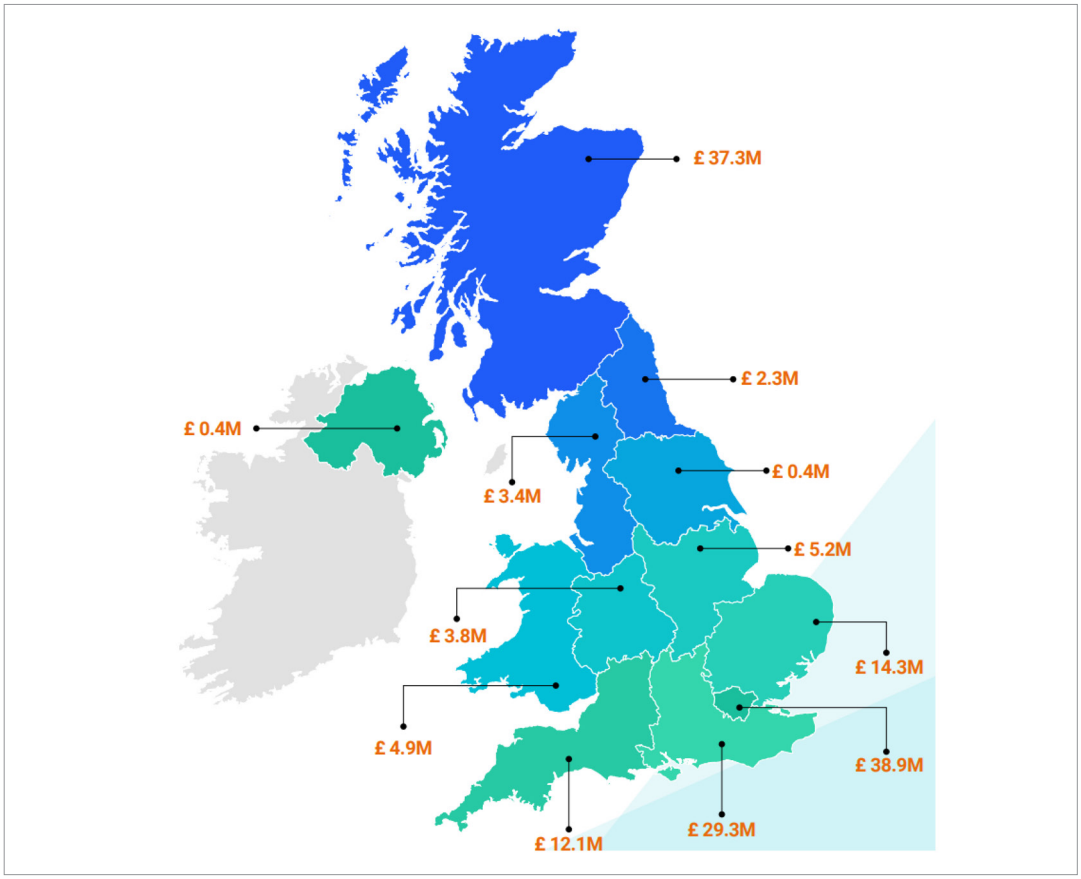
※ UKNQTP (2019)

두 번째로는 영국연구혁신기구(UK Research and Innovation, UKRI)가 운영하는 양자산업 프로젝트(Commercialising Quantum Technologies Challenge)이다. 해당 프로젝트에는 2023년에 추가로 1,000만 파운드(약 150억 원)가 투자되어 총 1억 8,400만 파운드(약 2,760억 원)가 투자되었다. 양자산업 프로젝트는 양자 과학의 발전을 기반으로 한 새로운 제품과 기술을 개발하기 위해 영국의 대학과 기업이 협력하여 양자기술을 연구 개발하는 데 자금을 제공했다. 세 번째로 국가양자컴퓨팅센터

50) Department for Science, Innovation & Technology (2023)
51) UKNQTP (2019)

(National Quantum Computing Centre, NQCC)를 설립하는 데에 영국연구혁신기구의 자금 9,300만 유로(약 1,395억 원)가 투자된 바 있다.

그림 I-3-11 영국 지역별 양자산업 프로젝트 투자금(2022년 8월 기준)



※ UKRI (2022)

영국은 2023년 2월 과학기술 분야 정부 조직을 개편하면서 기존 거대부처였던 기업에너지산업전략부(Department for Business, Energy & Industrial Strategy, BEIS)에서 과학혁신기술부(DSIT)를 분리 신설하였다. 이는 30여 년 만에 장관급 과학기술 전담부처를 설립한 것으로 영국이 과학기술 경쟁력 강화를 도모하기 위해 과학기술에 대한 국가적 역할을 강화한 것으로 볼 수 있다.[52] 과학혁신기술부는 신설된 이후 잇따라 주요 정책 및 전략을 발표하였으며, 앞서 언급한 바와 같이 2023년 3월에 국가양자전략을 발표하였다. 영국은 국가양자전략을 통해 2024년부터 향후 10년간 양자기술에 대해 25억 파운드(약 3조 7,500억 원)를 투자할 것임을 발표하면서, 현재 공공 투자를 두 배 이상 늘리고, 민간으로부터 10억 파운드(약 1조 5,000억 원)의 투자를 유치할 계획임을 밝혔다.

52) STEPI (2023)

4. 독일

독일 연방정부는 2006년 하이테크 전략 수립을 시작으로 꾸준히 하이테크 전략 2020(2010), 신하이테크 전략(2014)을 발표하며 글로벌 기술 선도국인 독일의 위상 유지를 위해 힘써왔다. 2018년 수립된 하이테크전략 2025에는 양자통신·센서 분야의 잠재력 극대화를 위한 예산 지원 확대 필요성이 포함되기도 했다.[53] 이런 흐름 속에서 독일 연방교육연구부(Federal Ministry of Education and Research, BMBF)는 2018년 정책 보고서를 발표하며 양자기술: 기초에서 시장까지(Quantum technologies-from basic research to market)라는 이름의 프레임워크 프로그램을 발표했다. 독일은 해당 프로그램을 통해 2018년부터 2022년까지 양자기술 R&D에 6억 5,000만 유로(약 8,450억 원)를 투자하고, 2028년까지의 투자 연장 가능성을 시사했다.[54] 또한 양자기술 분야의 상용화 가능성을 긍정적으로 검토하고, 독일 산업계를 전략적 세력으로 변화시키기 위한 일환으로 양자통신과 양자컴퓨터 분야에서 각 1개의 주요 프로젝트를 예고했다.

2019년 5월 독일 연방교육연구부는 양자통신 상용화를 목표로 QuNET 이니셔티브를 출범했고, 총 1억 6,500만 유로(약 2,145억 원)의 예산을 지원하며 7년간 3단계로 나누어 진행할 것을 발표했다. QuNET 이니셔티브는 유럽 내의 연구개발을 촉진하고, 미래 양자인터넷 개발의 기초를 제공할 것으로 기대되며, 2년 동안 진행된 1단계에는 2,500만 유로(약 325억 원)가 투입됐다. 2021년 7월에는 독일 연방교육연구부와 연방경제에너지부(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, BMWi)가 2025년까지 5년간 양자기술 분야 연구개발에 각 11억 유로(약 1조 4,500억 원)와 8억 7,800만 유로(약 1조 1,414억 원) 규모의 투자계획을 발표했다.

독일 정부는 2023년 4월에 양자기술에 대한 실행 계획(Germany's Action Plan for Quantum Technologies)을 발표하며, 2026년까지 30억 유로(약 3조 9,000억 원)를 투자할 계획임을 밝혔다. 이 중 13억 7,000만 유로(약 1조 7,810억 원)는 연구부처로, 나머지 8억 유로(약 1조 400억 원)는 국유 연구기관으로 할당될 예정이다.[55]

53) 과학기술정보통신부 (2018)

54) www.iof.fraunhofer.de/en/News/BMBF-promotes-quantum-research.html

55) https://www.quantumbusinessnews.com/deals-partnerships/germany-launches-3-3b-quantum-technology-plan

5. 프랑스

프랑스는 2021년 1월 국가양자기술전략(Stratégie Nationale Sur Les Technologies Quantiques)을 발표하며 2021년부터 2025년까지 5년 동안 양자기술에 18억 1,500만 유로(약 2조 3,595억 원)를 투자할 것이라고 밝혔다. 해당 예산은 정부자금 약 10억 5,000만 유로(약 1조 3,650억 원)와 민간자금 약 5억 5,000만 유로(약 7,150억 원), EU 기금 약 2억 유로(약 2,600억 원)로 구성된다. 이를 분야별로 구분하면 양자통신에 4억 8,100만 유로(약 6,253억 원), 양자센서에 2억 5,800만 유로(약 3,354억 원), 양자컴퓨터에 7억 8,400만 유로(약 1조 1,920억 원), 지원기술에 2억 9,200만 유로(약 3,796억 원)가 투자됨을 확인할 수 있다.[56]

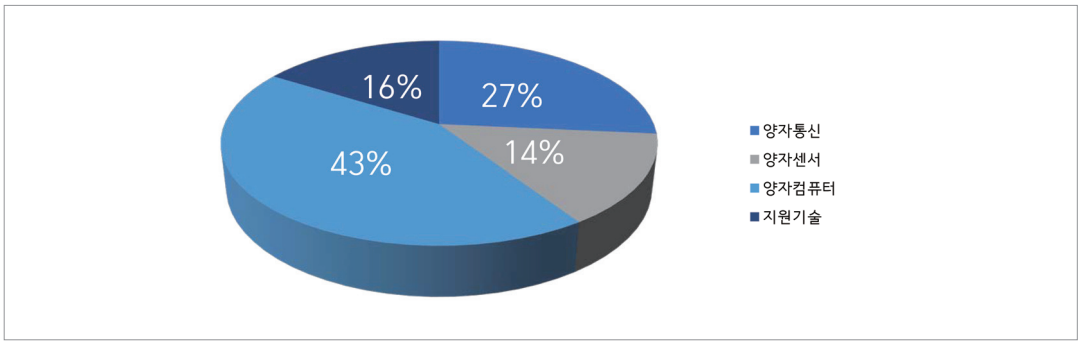
표 I-3-6 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산

(단위: 억 유로)

구분	양자통신		양자센서	양자컴퓨터		지원기술	합계
	양자통신	양자내성암호		소규모(NISQ) 양자컴퓨터	대규모(LSQ) 양자컴퓨터		
예산	3.25	1.56	2.58	3.52	4.32	2.92	**18.15**

※ 프랑스 정부 (2021) 집필진 재구성

그림 I-3-12 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 구성 비율



56) 프랑스 정부 (2021)

6. 캐나다

캐나다는 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)을 수립하겠다고 발표하며, 2021년 4월 향후 7년간 양자기술에 3억 6,000만 캐나다 달러(약 3,600억 원) 투자를 발표했다.[57] 이는 앞서 언급된 미국, EU 등에 비해 적은 수치지만, 캐나다는 이미 2009년부터 2020년까지 지난 10년간 양자기술에 10억 캐나다 달러(약 1조 원) 이상을 투자한 바 있다.[58] 그 중 주요한 국가적 지원으로 다음 세 가지를 열거할 수 있다. 먼저 캐나다는 학계 기반의 연구 혁신과 산·학 협력 네트워크 구축을 위해 2006년부터 2015년까지 9년간 캐나다 자연과학·공학 연구위원회(Natural Science and Engineering Research Council of Canada, NSERC)에 2억 6,700만 캐나다 달러(약 2,670억 원)를 투자했다. 다음으로 캐나다 혁신재단(Canada Foundation for Innovation, CFI)에 1억 달러(약 1,000억 원) 이상을 투자해 양자 관련 연구 인프라를 구축함으로써, 양자분야 최고 전문가 확보 및 유지를 위해 노력했다. 마지막으로 CFREF(Canada First Research Excellence Fund) 펀드를 조성하고 셔브룩대학의 IQ(Institut Quantique)에 3,350만 캐나다 달러(약 335억 원), 브리티시컬럼비아대학의 QMI(Quantum Matter Institute)에 6,650만 캐나다 달러(약 665억 원), 워털루대학의 TQT(Transformative Quantum Technologies)에 7,600만 캐나다 달러(약 760억 원), 총합 1억 7,600만 캐나다 달러(약 1,760억 원)를 투자했다.

2023년 1월 캐나다는 국가양자전략(NQS)을 통해 3억 6,000만 캐나다 달러(약 3,600억 원) 규모의 자금을 연구, 인재, 상용화 등 세 가지 부문 걸쳐 다양한 프로젝트에 배분하겠다고 발표했다. 먼저 연구 부문에는 1억 4,100만 캐나다 달러(약 1,410억 원)를 제공하여, 캐나다의 양자기술 분야에서 새로운 솔루션과 혁신을 실현하기 위한 기본 및 응용 연구를 지원한다. 두 번째로 인재 부문에서는 캐나다 및 글로벌 전문가들을 유치하고, 캐나다의 양자 분야의 전문성과 재능을 개발 및 유지하는 데 4,500만 캐나다 달러(약 450억 원)를 투자한다. 마지막으로 상용화 부문은 1억 6,900만 캐나다 달러(약 1,690억 원)를 투자하여 연구 단계에서 상용화 단계로의 전환을 위한 다양한 활동을 지원한다. 각 부문에 대한 세부 예산을 표로 정리하면 다음과 같다.[59]

57) 캐나다 정부 (2021)
58) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab029d
59) 캐나다 정부 (2023)

표 I-3-7 캐나다 국가양자전략 투자 예산

(단위: 백만 캐나다 달러)

부문	내용	기간	예산
연구	NSERC Alliance grants program	7년	132.5
	Alliance Quantum grants	7년	62.4
	Alliance International Quantum grant	7년	29.7
	Alliance Consortia Quantum grants	7년	40.4
	NRC's Quantum Research and Development Initiative	6년	9
인재	NSERC CREATE grants program	6년	5.4
	Mitacs	6년	40
상용화	ISED's Global Innovation Clusters	7년	14
	ISED's Innovative Solutions Canada	7년	35
	NRC Challenges Program	7년	50
	NSERC Alliance grants program	7년	70
	Canada Economic Development for Quebec Regions (CED)	7년	23.3
	Federal Economic Development Agency for Southern Ontario (FedDev Ontario)	7년	23.3
	Prairies Economic Development Canada (PrairiesCan)	7년	9.4
	Pacific Economic Development Canada (PacifiCan)	7년	14

※ 캐나다 정부 (2023) 집필진 재구성

7. 중국

중국 국무원은 2006년에 국가 중장기 과학기술 발전계획 요강(2006~2020)을 발표하며 국가전략 6대 분야 중 하나로 양자 연구를 선정했고, 이에 연간 약 17억 1,700만 위안(약 3,262억 원)을 투자했다. 중국 과학기술부는 양자암호의 상용화와 양자통신기술 선도를 위해 양자제어연구 국가중대과학연구프로그램 12차 5개년 특별규획을 제정 및 실시하며, 중앙재정 조달을 통해 양자정보 분야에 지속적인 연구개발을 지원해왔다. 해당 프로그램은 '양자정보', '소규모 양자시스템', '강상관성 전자시스템', '인공갭시스템' 4대 임무로 구성돼 있다. 한편 2008년부터 2017년까지 중국 과학기술부가 양자정보 분야 연구에 투입한 투자 예산은 총 16억 4,595만 위안(약 3,127억 원)에 달하며, 〈표 I-3-6〉을 통해 연도별 투자액을 확인할 수 있다.[60]

표 I-3-8 양자제어 국가중대과학연구프로그램 중앙재정 조달 자금(2008~2017)

(단위: 만 위안)

연도	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	합계
중앙재정	8,622	1억 2,499	1억 5,876	2억 1,694	1억 8,697	1억 9,085	1억 8,944	2억 6,954	1억 5,897	6,327	**16억 4,595**

※ 한중과학기술협력센터 (2020)

60) 한중과학기술협력센터 (2020)

13차 5개년 기간 국가중점연구개발계획에서는 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 실시를 위한 방안을 편성 및 지원했다. 해당 계획에서 주목할 부분은 지난 프로그램의 4대 임무 중 하나인 양자정보를 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자정밀측정으로 세분화해 총 6대 추진 분야로 구성됐다.[61]

표 Ⅰ-3-9 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 중앙재정 조달 자금(2016~2020)

(단위: 만 위안)

연도	2016	2017	2018	2019	2020	합계
예산	-	8억 7,747	3억 2,222	1억 1,000	9,138	**14억 107**

※ 한중과학기술협력센터 (2020)

중국 과학기술부는 2018년에 2019년도 국가 중점 연구개발 계획을 발표하며, 양자제어 및 양자정보와 관련된 '양자전자시스템', '소형양자시스템', '양자컴퓨팅 및 시뮬레이션', '양자정밀계측' 4개의 프로젝트에 1억 6,000만 위안(약 304억 원)을 예산으로 책정한 바 있다. 또한 중국 정부는 2018년부터 5년간 1,000억 위안(약 19조 원)을 투입해 양자정보과학국가연구소를 설립하고, 원거리 양자통신망 구축과 양자컴퓨터 개발에 집중하고 있다.[62] 가장 최근에 발표된 제14차 5개년 계획(2021~2025) 및 2035 중장기 목표에서는 전략적으로 육성할 7대 분야에 양자통신과 양자컴퓨터를 추가하고, 연구개발비를 매년 7% 이상 증액해 양자기술 분야를 집중적으로 양성할 계획임을 밝혔다.[63]

8. 일본

양자기술에 대한 일본의 투자전략은 2020년 1월을 기점으로 차이를 보인다.[64] 2020년 이전에는 부처별로 양자기술에 개별 투자하는 전략 방식을 취했었다. 예를 들어 2018년 문부과학성(Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, MEXT)은 광양자도약 플래그십 프로그램(Quantum Leap Flagship Program, Q-LEAP)을 통해 향후 10년 동안 양자 시뮬레이터 및 컴퓨터, 양자센싱 및 계측에 220억 엔(약 2,200억 원) 규모의 투자를 발표했는데, 같은 해 총무성(Ministry of Internal Affairs and Communications, MIC)과 내각부(Cabinet Office, CAO)도 향후 5년 동안 각각 위성양자암호기술(Satellite Quantum Crypto-technology)과 양자암호 관련 전략혁신 창조프로그램(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP)에 투자할 것임을 발표했다. 그러나 2018년부터 시작된 양자기술 관련 전문가 회의를 통해 2020년 1월 양자기술 이노베이션

61) 한중과학기술협력센터 (2020)
62) 한중과학기술협력센터 (2019)
63) IITP (2022) & ICT SPOT ISSUE (2022)
64) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab0077

전략을 수립한 이후에는, 국가 차원의 중장기 양자기술 전략 방식으로 전환했다. 해당 전략 발표 이전에 160억 엔(약 1,600억 원)이 양자기술 예산으로 배정됐으나, 발표 후 추경 예산으로 2019년에 330억 엔(약 3,300억 원)이 지원됐으며, 2020년에도 330억 엔(약 3,300억 원) 투입을 예고했다. 그 후로도 투자는 계속 늘어나, 2020년 추경 예산과 2021년 예산으로 352억 엔(약 3,520억 원)이 편성됐고,[65] 2022 회계연도 예산은 추경 예산까지 포함된다면 기존 대비 2배 이상 확대된 800억 엔(약 8,000억 원)이 투입된 것으로 추정된다.[66]

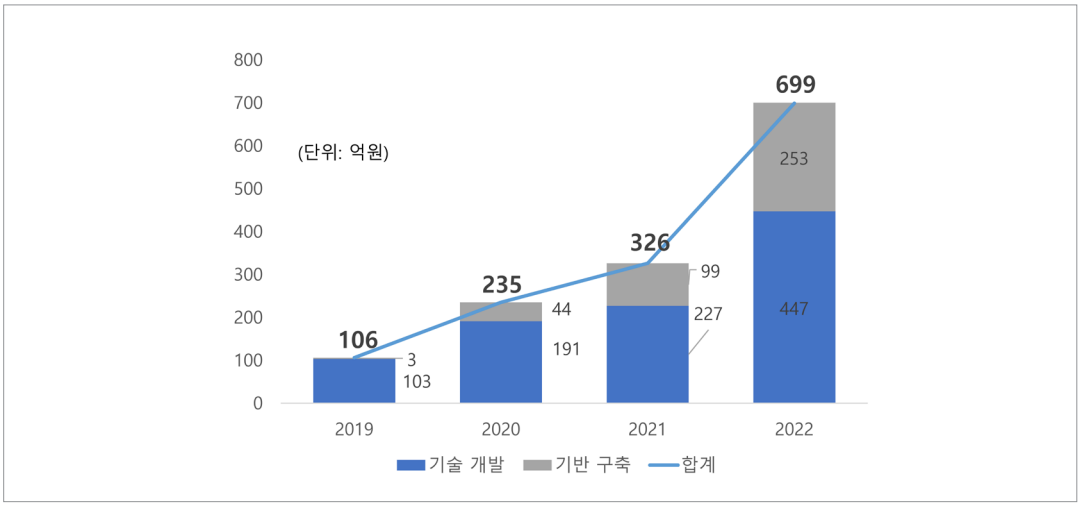
65) https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01901/00004/

66) IITP (2022) & ICT SPOT ISSUE (2022), https://sj.jst.go.jp/news/202205/n0523-03k.html

제3절 국내 투자동향

2019년 이전까지 국내 양자기술 R&D는 기초 연구나 출연(연) 사업 등 소액과제 위주로 추진됐기에, 선도국과 비교하면 연구과제 개수와 관련 예산액 모두 현저히 낮은 수준이었다. 하지만 2019년을 기점으로 전용 사업이 다수 신설되며 전용 사업 예산은 2019년 106억 원에서 연평균 87.5% 증가해 2022년에는 699억 원으로 대폭 증액됐다. 전용 사업은 기술 개발과 기반 구축으로 구분되는데 4년간 기술 개발에는 969억 원, 기반 구축에는 399억 원이 투입돼 총 1,368억 원이 투자됐다.

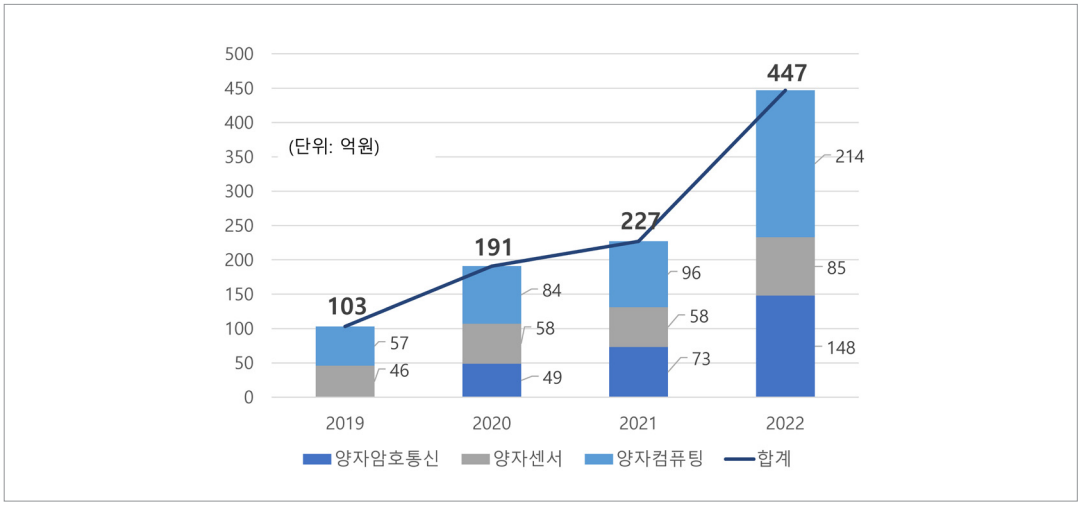
그림 I-3-13 국내 양자 R&D 전용사업 투자 추이



※ 과학기술정보통신부(2022) 집필진 재구성

기술 개발은 다시 양자암호통신, 양자센서, 양자컴퓨팅으로 나뉜다. 양자암호통신은 지난 4년간 총 270억 원이 투입됐고, 세부적으로는 유선 양자암호통신 상용화를 위한 시스템 집적화와 단일광자 생성 얽힘 기술 등 원천기술 고도화, 양자인터넷 원천기술 개발에 투자됐다. 양자센서는 관성 센서와 이미징 센서, 자기장 센서, 기타 기반기술 및 주력산업 연계 응용기술 개발에 247억 원이 투입됐다. 양자컴퓨팅은 한국형 양자컴퓨팅시스템, 양자 프로세서, 양자 시뮬레이터, SW 및 알고리듬 등 개발에 452억 원이 투자됐다.

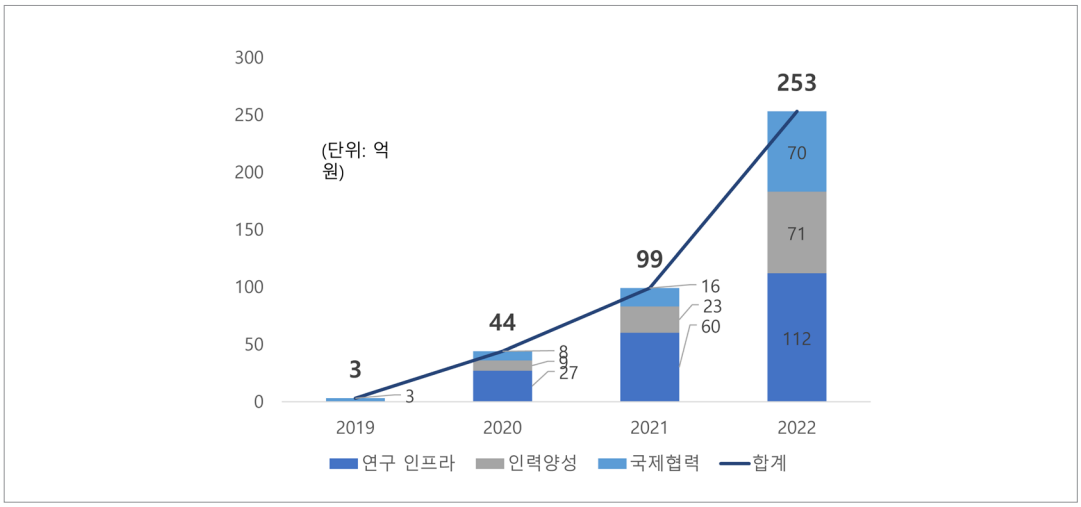
그림 I-3-14 국내 양자 R&D 전용사업(기술개발) 투자 추이



※ 과학기술정보통신부(2022) 집필진 재구성

기반 구축은 크게 연구인프라, 인력양성, 국제협력 3가지로 구분된다. 연구 인프라는 양자팹 구축, 해외클라우드 사용 지원 등에 지난 4년간 총 199억 원이 지원됐다. 인력양성에는 석·박사, Post-Doc 단기 해외연수를 중심으로 총 103억 원이 지원됐다. 이 외에도 ITRC 사업으로 양자 분야 3개의 센터에 연간 약 20억 원이 지원된 바 있다. 마지막으로 국제협력은 해외 양자기술협력센터 운영 및 신진연구자 교류 등에 97억 원이 투입됐다.

그림 I-3-15 국내 양자 R&D 전용사업(기반 구축) 투자 추이



※ 과학기술정보통신부(2022) 집필진 재구성

이와는 별도로 출연연 기관 주요사업의 경우 2019년에 2021년까지 각 114억 원, 109억 원, 133억 원의 예산이 지원됐다. 정부는 2023년 양자기술 R&D 전용사업 예산으로 953억 원을 편성했다.

정부는 2021년 4월 양자기술 연구개발 투자전략을 마련하고, 본격적으로 투자를 확대한 바 있다. 그 이후로 2023년 3월, 8년간 양자과학기술 플래그십 프로젝트를 기획하고 예비타당성 조사를 신청함으로써 양자 선도국 수준의 기술과 산업화 역량을 조기 확보하기 위한 노력에 만반을 기했다. 2023년 6월에는 '대한민국 양자과학기술전략'을 발표하며 2035년까지 민·관 공동으로 3조 원을 투자할 계획임을 밝혔다. 투자 규모는 정부 2조 4,000억 원, 민간 6,000억 원이다.

제4장
국내외 표준화동향

제1절 개요

양자기술은 크게 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨팅 세 분야로 구분할 수 있다. 그 중 국내외 표준화가 가장 활발한 분야는 양자통신(양자암호통신/양자 키 분배 중심)이며, 다음으로 양자컴퓨팅과 양자센서 순으로 활성화가 예상된다. 이와 동시에 세 분야의 양자디바이스를 네트워크 형태로 묶기 위한 양자네트워크 혹은 양자인터넷도 표준화 시도가 한창이다. 본 백서에서는 초기 단계이나마 현재까지의 진행현황과 앞으로의 동향을 살펴, 국가 양자기술 표준화의 방향성을 제시하고자 한다.

양자암호통신은 2008년 ETSI(유럽전기통신표준화기구, European Telecommunication Standard Institute)에서 QKD ISG(Quantum Key Distribution Industry Specification Group)가 설립되면서 표준화가 시작됐다. 주로 양자암호통신 시스템 구현을 위한 표준기술이 연구됐으며, 장비 제조사와 대학 및 연구기관들이 주로 참여했다. 반면 ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union)에서는 2018년 한국의 KT 및 SKT가 각각 양자암호 네트워크 표준 및 양자암호 보안 표준화 제안이 착수됐다. 그동안 ETSI 표준이 제공하지 못하던, 비용효율적인 양자암호 인프라 구축과 서비스를 위한 기술 표준개발이 시작된 것이다. 현재 ETSI는 20여 개의 산업규격 문서를 발간했고, ITU는 50개 이상의 권고안을 개발하는 등 국제표준 기반 상용화가 어느 정도 준비된 것으로 여겨지고 있다. 특히 ITU의 양자암호 네트워크 국제 표준화는 한국이 선도하고 있다.

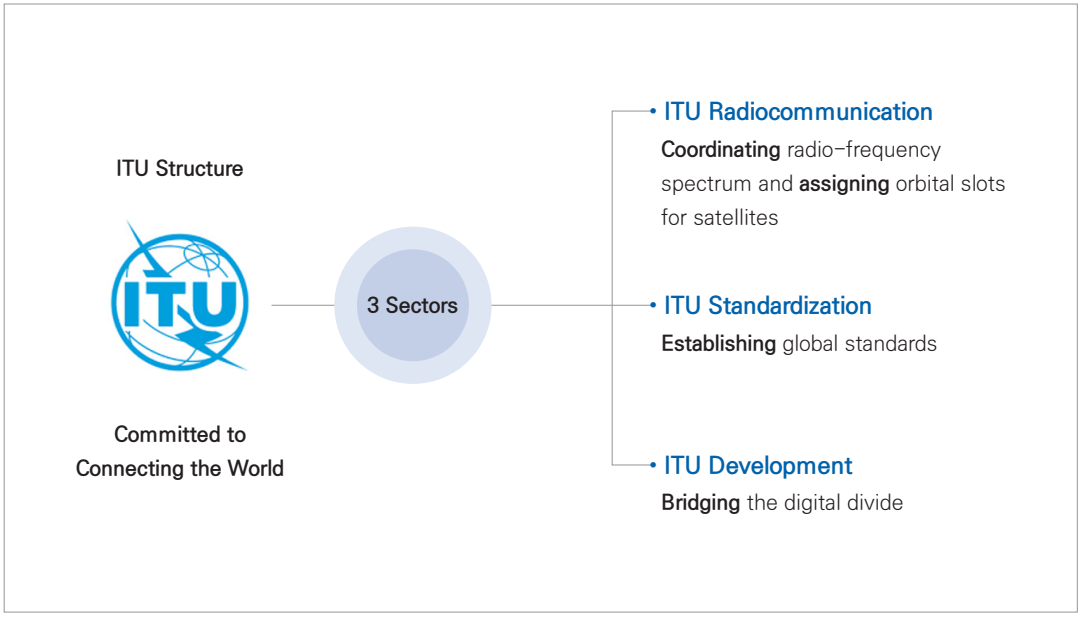
양자컴퓨팅은 ISO/IEC(국제표준화기구, International Organization for Standardization/국제전기기술위원회, International Electrotechnical Commission) 중심으로 표준화를 준비하고 있으나, 실질적인 표준 문서의 개발은 미진한 상황이다. 최근 IEC에서 한국 주도하에 Quantum SEG(Standardization Evaluation Group)가 설립된 후 ISO/IEC 간에 JTC-Q(Joint Technical Committee – Quantum)를 설립하고 QT(Quantum Technology) 분야에 대한 실제 표준화에 착수하기로 잠정 합의되었기에, 향후 해당 분야의 국제 표준화 과정에서 한국의 활약이 기대된다. 한편 양자디바이스(양자컴퓨터, 양자센서, 양자 키 분배 시스템 등) 간 정보를 양자상태로 교환할 수 있는 양자네트워크 혹은 양자인터넷에 대한 국제표준화도 ITU와 IETF/IRTF(인터넷 기술 전문위원회, Internet Engineering Task Force/인터넷 연구 전문위원회, Internet Research Task Force)에서 착수에 들어가 주요 표준화 경쟁 이슈로 대두하고 있다.

제2절 해외 표준화 기구

1. ITU-T

ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union)[67]는 국제연합의 14개 전문기구 중 하나로 전기통신 관련 세계 최고 권위의 국제기구이며, 국제전기통신과 국가별 통신 정책의 조화를 위해 회원국 상호 간 국제 협력·규제·표준화 및 개발도상국에 대한 지원업무를 수행하고 있다. ITU는 산하에 전기통신 부문(ITU-T, International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector), 전파통신 부문(ITU-R, International Telecommunication Union – Radiocommunication Secotr), 개발 부문(ITU-D, International Telecommunication Union – Telecommunication Development Sector)을 두고, 전기통신 표준화, 주파수 스펙트럼 배분 및 주파수 할당 등록, 회원국 간 협력을 통한 적정요금의 통신서비스 제공 촉진, 개발도상국에 대한 기술 협력, 제반 규칙 제정, 관련 정보의 수집 및 발표 등 많은 역할을 담당하고 있다.

그림 I-4-1 ITU 조직구조



※ 집필진 작성

67) www.itu.int

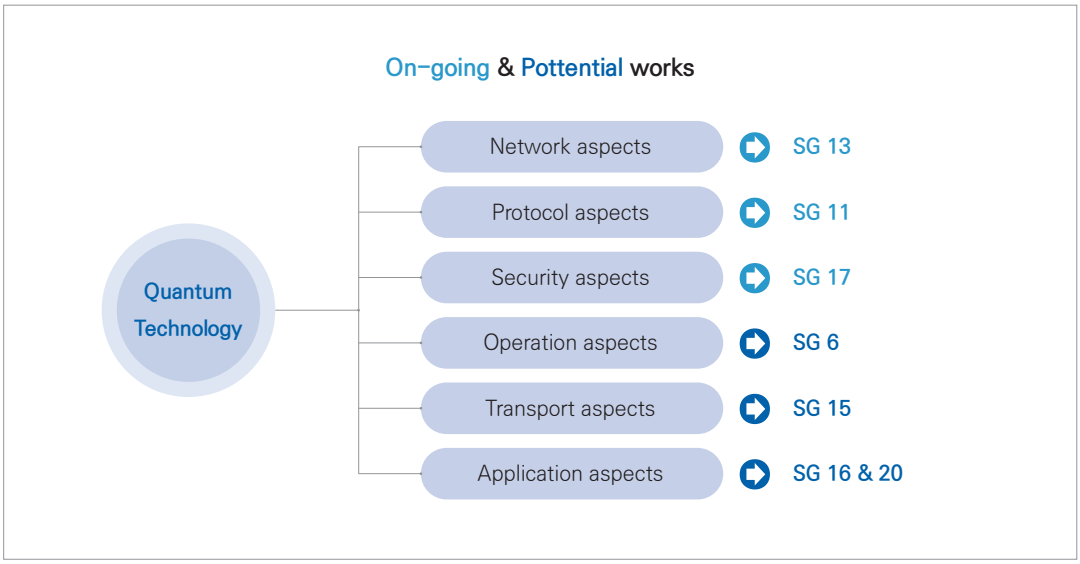
ITU 내 양자기술 관련 표준화는 ITU-T에서 담당하고 있으며, ITU-T는 표준화 주제별로 SG(Study Group)2에서 SG20에 이르기까지 11개 연구그룹으로 나뉘어 있다. 이 중 양자 관련 표준화 연구는 ITU-T TSAG(Telecommunication Standardization Advisory Group), SG11, SG13, SG17에서 담당하고 있다. 그 중 SG11은 프로토콜 및 시험평가 기술 표준화를 담당하고 있고, SG13은 미래 통신망과 클라우드 분야를, SG17은 보안 분야 표준화를 맡고 있다. 예를 들어 SG13은 양자 키 분배 네트워크(Quantum Key Distribution Networks, QKDN) 표준을, SG17은 양자 키 분배 네트워크 보안표준을, SG11은 양자 키 분배 네트워크 인터페이스 및 프로토콜을 개발하는 구조로 진행되고 있다.

표 Ⅰ-4-1 ITU-T 연구그룹(Study Group, SG) 구조

연구그룹	주관 표준화 분야
SG 2	Operational aspects
SG 3	Economic & policy issues
SG 5	Environment, EMF & circular economy
SG 9	Broadbandcable & TV
SG 11	Protocols, testing & combating counterfeiting
SG 12	Performance, QoS& QoE
SG 13	Future networks
SG 15	Transport, access & home
SG 16	Multimedia & digital technologies
SG 17	Security
SG 20	IoT, smart cities & communities

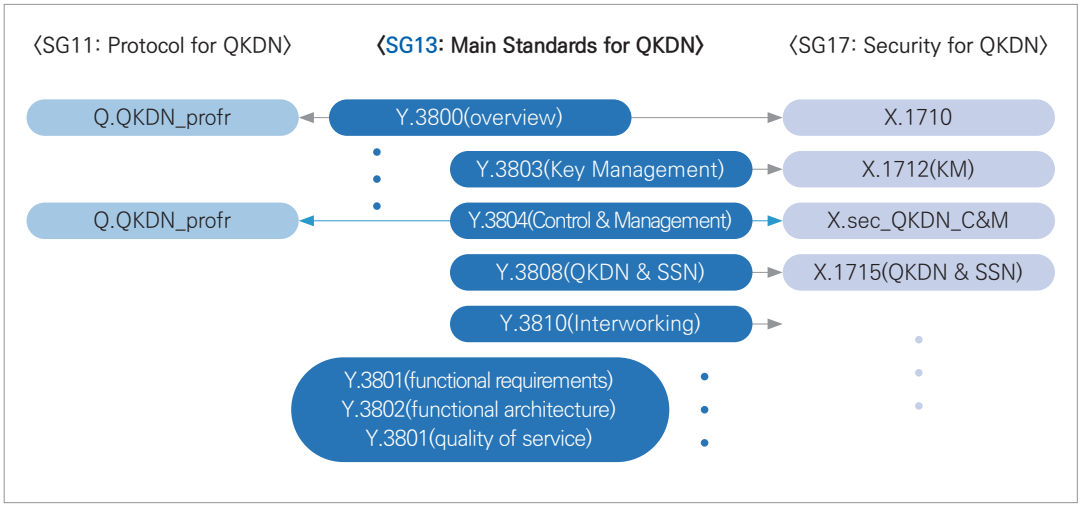
※ 집필진 작성

그림 Ⅰ-4-2 ITU-T 양자기술 표준화 연구그룹 관계



※ 집필진 작성

그림 I-4-3 ITU-T 연구그룹별 주요 표준화 내용

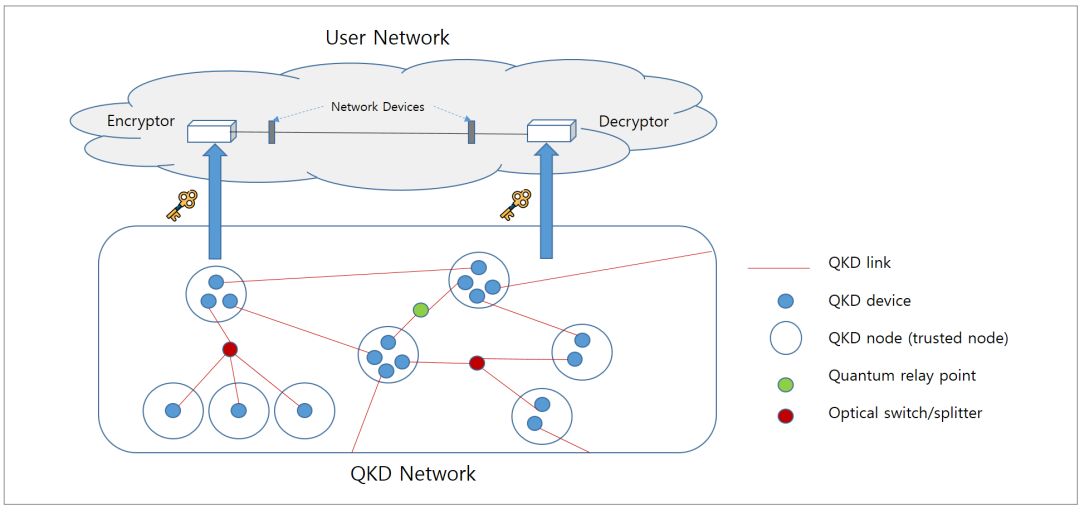


※ 집필진 작성

가. SG13

ITU-T SG13은 미래 통신망(Future Networks) 분야 표준화를 담당하는 그룹으로 IMT-2020 and beyond(5G 및 6G), 클라우드와 빅데이터, 신뢰 네트워크와 양자암호 네트워크를 주요 표준화 분야로 수행하고 있다. 양자분야 표준화는 2018년 Working Party 3의 Question 16에서 한국 KT가 양자암호 네트워크 표준화를 처음 제안해 채택됐다. 이후 Question 6에서의 양자암호 서비스 품질 표준화와 함께 현재까지 약 36여 편의 표준 문서를 개발하고 있다. 또한 KT가 2021년 말 제안한 미래양자통신망(Quantum Enabled Future Network, QEFN)을 주제로 양자인터넷 표준개발에 착수하는 등 한국이 주도적으로 표준화를 이끌어가고 있다.

그림 I-4-4 양자 키 분배 네트워크 개요



※ 집필진 작성

한국은 SG13 부의장, Working Party 1 의장, Working Party 3 의장, Q.6 라포타(Rapporteur), Q.16 라포타를 비롯하여 양자암호 네트워크 표준 문서 20여 건의 에디터(Editor)를 맡아 표준개발을 선도하고 있다.

표 Ⅰ-4-2 ITU-T SG13 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	Y.3817, Quantum key distribution networks interworking – Requirements of quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 간 연동 – 서비스 품질 보장 요구사항)	2023
2	Y.QKDN-qos-mmq, Quantum key distribution Networks – Measurement methodology for QoS parameters (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 파라미터 측정 방법)	2024
3	Y.3818, Quantum key distribution networks interworking – architecture (양자 키 분배 네트워크 연동 – 구조)	2023
4	Y.QKDNf-fr, Framework of Quantum Key Distribution Network Federation (양자 키 분배 네트워크 페더레이션 기본구조)	2023
5	Y.QKDNi-SDNC, Quantum Key Distribution Network Interworking – Software Defined Networking Control (양자 키 분배 네트워크 연동 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어)	2023
6	Suppl.74 to ITU-T Y.3800-series, Standardization roadmap on Quantum Key Distribution Networks (양자 키 분배 네트워크 표준 로드맵)	2023
7	Y.3807, Quantum key distribution networks – Quality of service parameters (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 파라미터)	2022
8	Y.3808, Framework for integration of quantum key distribution network and secure storage network (양자 키 분배 네트워크 및 보안 저장 네트워크 통합 기본구조)	2021
9	Y.3809, A role-based model in quantum key distribution networks deployment (양자 키 분배 네트워크 전개 시 역할기반 모델)	2021
10	Y.3810, Quantum key distribution network interworking-framework (양자 키 분배 네트워크 연동 – 기본구조)	2023
11	Y.3811, Quantum key distribution networks – Functional architecture for quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 보장 기능 구조)	2022
12	Y.3812, Quantum key distribution network – Requirements for machine learning based quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 머신러닝 기반 서비스 품질보장 요구사항)	2022
13	Y.3813, Quantum key distribution networks interworking – functional requirements (양자 키 분배 네트워크 연동 – 기능 요구사항)	2022
14	Y.3814, Quantum key distribution networks – functional requirements and architecture for machine learning enablement (양자 키 분배 네트워크 – 머신러닝 기반 기능 요구사항 및 구조)	2022
15	Y.3815, Quantum key distribution networks – overview of resilience (양자 키 분배 네트워크 신뢰성 기본구조)	2023
16	Suppl.75 to ITU-T Y.3800-series – Quantum key distribution networks – Quantum-Enabled Future Networks (양자기반 미래 통신망)	2023
17	Y.3805, Quantum key distribution networks – Software-defined networking control (양자 키 분배 네트워크 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어)	2021
18	Y.3806, Quantum key distribution networks – Requirements for QoS assurance (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 보장 요구사항)	2021
19	Y.3801, Functional requirements for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크 기능 요구사항)	2020
20	Y.3802, Quantum key distribution networks – Functional architecture (양자 키 분배 네트워크 – 기능 구조)	2020

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
21	Y.3803, Quantum key distribution networks – Key management (양자 키 분배 네트워크 – 키 관리)	2020
22	Y.3804, Quantum key distribution networks – Control and management (양자 키 분배 네트워크 – 제어 및 관리)	2020
23	Y.3800, Overview on networks supporting quantum key distribution (양자 키 분배 네트워크 개요)	2019
24	Y.TR-QK-UC, Use cases of quantum networks beyond QKDN (양자 키 분배 네트워크 이후 양자 네트워크 활용 사례)	2023
25	Y.supp.QKDN-UC, Use cases of quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크 활용 사례)	2023
26	Y.QKDN-amc, Quantum key distribution networks – Requirements and architectural model for autonomic management and control (양자 키 분배 네트워크 – 자동 관리/제어를 위한 요구사항과 구조 모델	2024
27	Y.QKDN_SSNreq, Functional requirements for integration of quantum key distribution network and secure storage network (양자 키 분배 네트워크와 보안 스토리지 네트워크 통합을 위한 기능 요구사항)	2024
28	Y.QKDN_SSNarch, Functional requirements for integration of quantum key distribution network and secure storage network (양자 키 분배 네트워크와 보안 스토리지 네트워크 통합을 위한 기능 요구사항)	2024
29	TR-QKDN-nq, Overview for integration of quantum key distribution network with non-quantum cryptographies (양자 키 분배 네트워크와 비양자 암호화 기술과의 통합 개요)	2023
30	Y.supp.QKDN_sync, Analysis of Time Synchronization in Quantum Key Distribution Networks (양자 키 분배 네트워크에서 시간 동기 분석)	2024
31	Y.QKDN_TSNfr, Framework for integration of quantum key distribution network and time sensitive network (양자 키 분배 네트워크와 시간 민감 네트워크간 통합 프레임워크)	2024
32	Y.QKDN_rsrq, Requirements for quantum key distribution network resilience (양자 키 분배 네트워크 신뢰성 요구사항)	2024
33	Supplement 70 to ITU-T Y.3800-series – Quantum key distribution networks – Applications of machine learning (양자 키 분배 네트워크 – 머신 러닝 응용)	2021
34	Y.3816, Quantum key distribution networks – Functional architecture enhancement of machine learning based quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 머신 러닝 기반 서비스 품질 보장 강화 기능 구조)	2023
35	Y.QKDN_qos-iw-req, Requirements of QoS assurance for QKDN interworking (양자 키 분배 네트워크 연동을 위한 서비스 품질 보장 요구사항)	2023
36	Y.QKDN_qos-auto-rq, Quantum key distribution networks – Requirements for autonomic quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 자동 서비스 품질 보장 요구사항)	2024

※ ITU-T

나. SG17

ITU-T에서 보안 분야 표준화를 담당하는 그룹으로 Question 15(이하 Q.15) 에서 양자 키 분배(Quntum Key Distribution, QKD) 네트워크 및 양자 난수 발생기(Quantum Random Number Generator, QRNG)에 대한 보안 요구 사항 및 이를 준수하기 위한 실행 방안 등의 표준화를 진행하고 있다. SG17은 보안 영역 전반을 다루고 있으며, 특히 양자 키 분배 네트워크 보안 요구사항, 키 관리 보안 요구사항, QRNG 구조, 양자 키와 현대암호키를 결합하는 하이브리드 키 교환, 양자 키 분배 네트워크와 암호 인프라와의 연동을 위한 보안 요구 사항과 실행 방안 등에 대한 표준화를 완료했다. 그리고 현재는 양자 키 분배 네트워크 내부 인증 및 허가, 관리 기능 영역의 보안 요구사항과 신뢰 노드에 대한 보안 요구사항 표준화를 진행하고 있다. 최근에는 다수의 양자 키 분배 네트워크를 연동하기 위한 보안 요구사항, 양자 키 분배 네트워크의 양자키 분배 프로토콜 프레임워크, 양자컴퓨터의 공격에도 안전한 통신을 수행하기 위한 양자 내성 암호 및 양자 키 분배 기술을 결합하는 하이브리드 키 관리 개요에 대한 신규 표준화 과제를 승인하여 표준화를 진행 중에 있다. 한국은 Q.15 라포타 및 부라포타를 비롯해 다수의 양자암호 네트워크 보안표준 에디터를 맡았으며, SG17 내에서 표준개발을 이끌어가고 있다.

표 Ⅰ-4-3 ITU-T SG17 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	X.sec_QKDN_AA, Authentication and authorization in QKDN using quantum safe cryptography (양자 보안 암호를 사용하는 양자 키 분배 네트워크에서 인증)	2024
2	X.sec_QKDN_CM, Security requirements and measures for quantum key distribution networks – control and management (양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 요구사항 및 실행 방안 – 제어 및 관리)	2024
3	X.sec_QKDN_tn, Security requirements and designs for quantum key distribution networks – trusted node (양자 키 분배 네트워크 보안 요구 사항 – 신뢰 노드)	2024
4	X.STR-HYB-QKD, Overview of hybrid approaches for key exchange with QKD (양자 키 분배 기반 복합 키 교환 개요)	2022
5	X.1710, Security framework for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크 보안 프레임워크)	2020
6	X.1712, Security requirements and measures for QKD networks – key management (양자 키 분배 네트워크 보안 요구사항 및 실행 방안 – 키 관리)	2021
7	X.1714, Key combination and confidential key supply for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크를 위한 키 혼합 및 키 공급)	2020
8	X.STR.SEC-QKD, Security considerations for quantum key distribution network (양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 고려사항)	2020
9	X.1702, Quantum noise random number generator architecture (양자 난수 생성기 구조)	2019
10	X.1715, Security requirements and measures for integration of QKDN and secure storage network (양자 키 분배 네트워크와 보안 저장 네트워크의 연동을 위한 보안 요구 사항과 실행 방안)	2022
11	X.sec-qkd-profr, Framework of quantum key distribution (QKD) protocols in QKD network (양자키 분배 네트워크의 양자키 분배 프로토콜 프레임워크)	2025
12	TR.hyb-qsafe, Overview of key management of hybrid approaches for quantum-safe communications (양자 내성 통신을 위한 하이브리드 키 관리 개요)	2025

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
13	X.sec-QKDNi, Security requirements for Quantum Key Distribution Network interworking (양자 키 분배 네트워크 연동을 위한 보안 요구 사항)	2025
14	TR.kdc_qkdn, Key distribution center based approaches in the service layer to manage keys supplied by QKDN (키 분배 센터 기반 서비스 계층에서의 양자 키 분배 네트워크 키 관리 방법)	2025

다. FG-QIT4N

TSAG(Telecommunication Standardization Advisory Group)은 ITU-T의 조직과 활동에 대한 자문그룹으로, 연구그룹 간 혹은 다른 표준개발조직(SDO)과의 협력을 총괄 담당하고 있다. 예를 들어 특정 SG 단독으로 수행하기 어렵거나 표준화를 위해 여러 SG의 협력이 필요한 상황에서, TSAG 산하에 Focus Group을 설립해 해당 표준화를 진행하기도 한다. 즉 SG는 4년마다 진행되는 ITU-T 총회에서 회원국의 승인을 받아 운용되는 정기 조직인 반면, Focus Group은 특정 주제로 제한된 기간(평균 2년)만 운용되는 임시 조직이다. 양자네트워크와 관련해서는 지난 2019년 한국의 KT가 중국 산업계와 공동으로 신규 설립을 제안한 ITU-T Focus Group on QIT4N(Quantum Information Technology for Networks)을 예로 들 수 있다. Focus Group의 연구 결과물은 공식 표준으로 인정되지 않지만, SG로 이관해 추가 개발 혹은 즉시 승인 과정을 통해 정식 표준으로 인정받기도 한다. 이와 관련해 한국은 2명의 부의장을 배출하며 선행표준 개발을 이끌어왔다.

표 Ⅰ-4-4 ITU-T FG QIT4N 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	D1.1 Quantum information technology for networks terminology: Network aspects of quantum information technologies (양자정보기술 네트워크 용어: 양자정보기술의 네트워크 측면)	2021
2	D1.2 Quantum information technology for networks use cases: Network aspects of quantum information technologies (양자정보기술 네트워크 유즈 케이스: 양자정보기술의 네트워크 측면)	2021
3	D1.4 Standardization outlook and technology maturity: Network aspects of quantum information technologies (표준화 개요 및 기술성숙도: 양자정보기술 네트워크 측면)	2021
4	D2.1 Quantum information technology for networks terminology: QKDN (양자정보기술 네트워크 용어: 양자 키 분배 네트워크)	2021
5	D2.2 Quantum information technology for networks use cases: QKDN (양자정보기술 네트워크 유즈 케이스: 양자 키 분배 네트워크)	2021
6	D2.3 Quantum key distribution network protocols: Quantum layer (양자 키 분배 네트워크 프로토콜: 양자계층)	2021
7	D2.3 Quantum key distribution network protocols: Key management layer, QKDN control layer and QKDN management layer (양자 키 분배 네트워크 프로토콜: 키 관리 계층, 양자 키 분배 네트워크 제어계층, 양자 키 분배 네트워크 관리 계층)	2021
8	D2.4 Quantum key distribution network transport technologies (양자 키 분배 네트워크 전송 기술)	2021
9	D2.5 Standardization outlook and technology maturity: Quantum key distribution network (표준화 개요 및 기술성숙도: 양자 키 분배 네트워크)	2021

※ ITU-T

라. SG11

SG11은 ITU-T에서 신호 방식을 위한 프로토콜 구조 및 응용제어, 세션 및 접속제어, 신호처리, 적합성 및 상호운용성 시험 분야를 연구하고 있다. SG13에서 시작한 양자 키 분배 네크워크 구조 및 기능 요구사항에서 정의된 양자 키 분배 네트워크 구현에 필요한 계층 혹은 기능 간 인터페이스별 세부 프로토콜을 표준화하고 있으며, 현재 7개의 표준 문서를 개발하고 있다.

표 Ⅰ-4-5 ITU-T SG11 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	Q.QKDN_profr, Quantum key distribution networks – Protocol framework (양자 키 분배 네트워크 – 프로토콜 기본구조)	2023
2	Q.QKDN_Ak, Protocols for Ak interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Ak 인터페이스 프로토콜)	2023
3	Q.QKDN_Ck, Protocols for Ck interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Ck 인터페이스 프로토콜)	2023
4	Q.QKDN_Kq-1, Protocols for Kq-1 interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Kq-1 인터페이스 프로토콜)	2023
5	Q.QKDN_Kx, Protocols for Kx interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Kx 인터페이스 프로토콜)	2023
6	Q.QKDN_Mk, Protocols for Mk interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Mx 인터페이스 프로토콜)	2024
7	Q.QKDNi_profr, Quantum key distribution networks Interworking – Protocol framework (양자 키 분배 네트워크 연동 – 프로토콜 기본구조)	2024

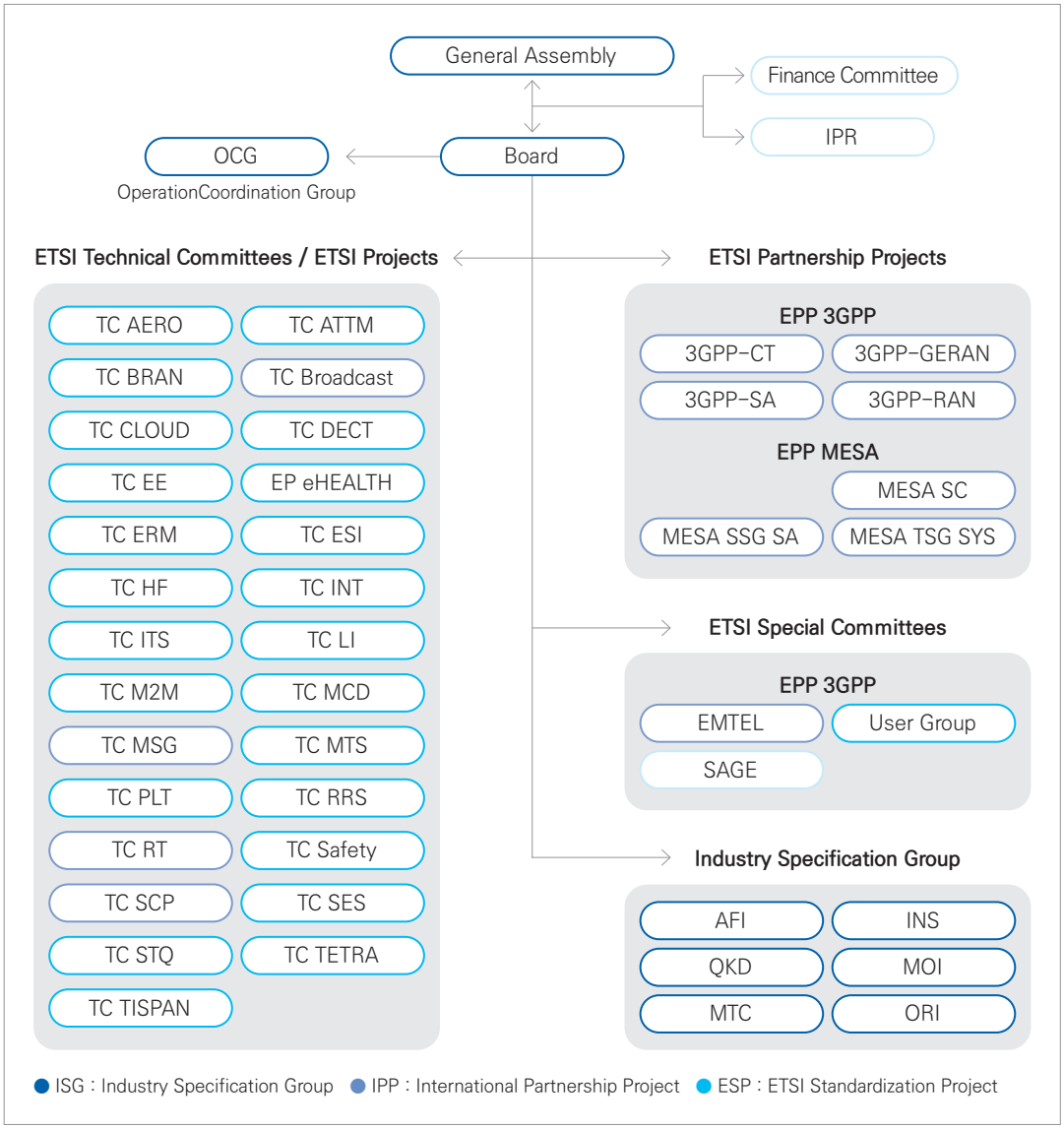
※ ITU-T

2. ETSI

ETSI(유럽전기통신표준화기구, European Telecommunications Standards Institute)[68]는 1987년 CEPT(유럽우편전기통신주관청회의, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) 회의에서 설립이 결정되었다. 이후 1988년 1월 런던회의에서 유럽 국가들이 준수해야 하는 표준을 전담하는 기구로서 ETSI 설립이 공식 승인되었다. 이후에는 유럽 국가뿐만 아니라, 글로벌 장비 제조사, 통신사업자, 대학, 연구기관 등 글로벌 산·학·연 기관을 회원사로 받아들이면서 이들을 위한 표준을 제정하고 있다. ETSI는 전기통신 분야뿐만 아니라 전기통신과 정보기술의 공통 분야, 전기통신과 방송의 공통 분야에서 글로벌 통신표준을 제정하고 있으며 국제적으로 통용되고 있다. 특히 3G부터 5G에 이르는 이동통신 기술 규격을 제정하는 3GPP를 구성하는 데 주도적인 역할을 한 바 있으며 3GPP 사무국을 맡고 있다. ETSI의 목적은 회원국들이 요구하는 기술 표준을 제정하고 유지하는 것이며, 또한 다른 유럽 및 글로벌 표준화 기구와의 협력을 유지하면서 정보통신 분야의 기술적 조화를 구현하는 것이다.

68) www.etsiorg

그림 I-4-5 ETSI 조직구조



※ 집필진 작성

가. QKD ISG(Quantum Key Distribution Industry Specification Group)

QKD ISG는 2008년 창설된 ETSI의 산업규격 그룹이며, 양자암호통신 장비 제조사, 통신사업자, 대학과 연구기관들 대부분이 참여하고 있다. 이 그룹을 통해 양자 키 분배 시스템을 구현하기 위한 기능, 인터페이스, 보안 요구사항 등이 개발됐다. 지금까지 양자 키 분배 기술 및 시스템에 대해 20개가 넘는 산업규격 문서를 발간했으며, 업계에서 통용되고 있다.

표 Ⅰ-4-6 ETSI QKD ISG 표준개발 현황

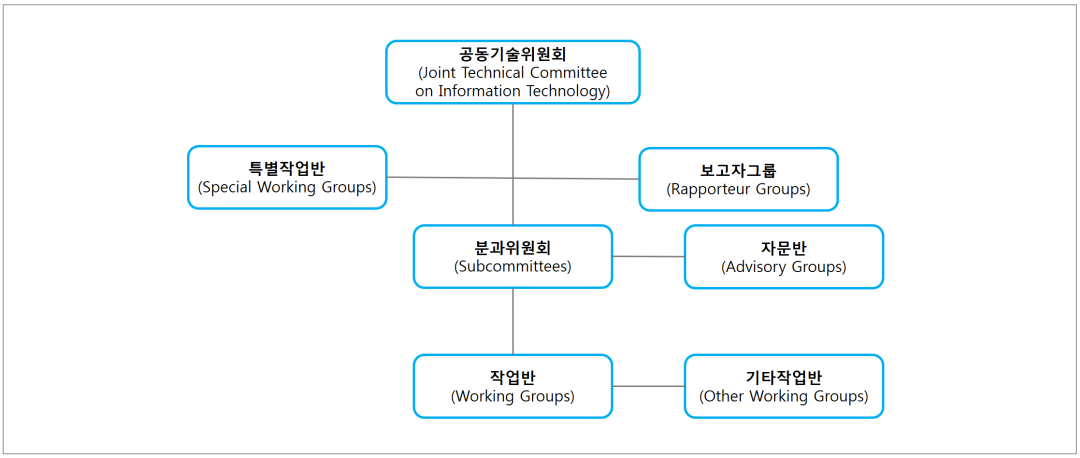
구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	GS QKD 018, Quantum Key Distribution; Ochestration Interface for Software Devfined Networks (양자 키 분배; 소프트웨어 정의 네트워크용 오케스트레이션 인터페이스)	2022
2	GS QKD 015, Quantum Key Distribution; Control Interface for Software Defined Networks (양자 키 분배; 소프트웨어 정의 네트워크용 제어 인터페이스)	2022 (현재 개정 중)
3	GS QKD 004, Quantum Key Distribution; Application Interface (양자 키 분배; 응용 인터페이스)	2020 (현재 개정 중)
4	GS QKD 014, Quantum Key Distribution; Protocol and data format of REST-based key delivery API (양자 키 분배; REST 기반 키 전달 API의 프로토콜과 데이터 포맷)	2019 (현재 개정 중)
5	GS QKD 012, Quantum Key Distribution; Device and Communication Channel Parameters for QKD Deployment (양자 키 분배; 양자 키 분배 전개를 위한 디바이스 및 통신 채널 파라미터)	2019
6	GR QKD 007, Quantum Key Distribution; Vocabulary (양자 키 분배; 용어)	2018 (현재 개정 중)
7	GS QKD 003, Quantum Key Distribution; Components and Internal Interfaces (양자 키 분배; 요소 및 내부 인터페이스)	2018
8	GS QKD 011, Quantum Key Distribution; Component Characterization: Characterizing optical components for QKD systems (양자 키 분배; 요소 특성, 양자 키 분배 시스템을 위한 광학 요소 특성)	2016
9	GS QKD 008, Quantum Key Distribution; QKD Module Security Specification (양자 키 분배; 양자 키 분배 모듈 보안 규격)	2010
10	GS QKD 005, Quantum Key Distribution; Security Proofs (양자 키 분배; 보안 검증)	2010 (현재 개정 중)
11	GS QKD 002, Quantum Key Distribution; Use Cases (양자 키 분배; 유즈 케이스)	2010
12	GS QKD 010, Quantum Key Distribution; Implementation secruity: protection against Trojan horse attacks in one-way QKD systems (양자 키 분배; 트로이목마 공격 보안 대응)	2023(예정)
13	GS QKD 013, Quantum Key Distribution; Characterization of Optical Output of QKD transmitter modules (양자 키 분배 송신부 광출력)	2023(예정)
14	GS QKD 016, Quantum Key Distribution; Common Criteria Protection Profile – Pair of Prepare and Measure Quantum Key Distribution Modules (양자 키 분배; 공통평가기준)	2023(예정)
15	GR QKD 017, Quantum Key Distribution; Network architectures (양자 키 분배망; 망 구조)	2023(예정)
16	GR QKD 019, Quantum Key Distribution; Design of QKD interfaces with Authentication (양자 키 분배; 인증 인터페이스)	2023(예정)
17	GS QKD 020, Quantum Key Distribution; Protocol and data format of REST-based interoperable Key Management Systems API (양자 키 분배; 상호호환 키 분배 인터페이스)	2023(예정)
18	GS QKD 021, Quantum Key Distribution; Orchestration Interface of Software-Defined Networks for Interoperable key management system (양자 키 분배; 상호호환 키분배 인터페이스를 위한 소프트웨어 정의 네트워크 오케스트레이션 인터페이스)	2024(예정)
19	Quantum Key Distribution (QKD); Application Interface (양자 키 분배 (QKD); 응용 프로그램 인터페이스)	2010

※ ETSI

3. ISO/IEC JTC1

ISO/IEC JTC1(ISO/IEC 공동기술위원회, Joint Technology Committee 1)[69]은 정보처리시스템에 대한 국제 표준화 기구(ISO/TC97)와 정보기기에 대한 국제전기기술위원회(IEC/TC83)를 통합해 1987년 설립한 공동기술위원회다. JTC1은 정보기술에 대한 국제 표준화를 목표로 하며, IT시스템과 툴의 설계 및 개발, IT 제품과 시스템의 품질과 성능, IT시스템과 정보의 보안성, IT 제품과 시스템의 상호운용성 확보, 단일화된 툴과 시스템 환경 구축, IT에 관련된 어휘의 조화, 친숙한 사용자 인터페이스와 관련된 업무를 수행한다. JTC1은 20개의 분과위원회(Subcommittee, SC)와 8개의 특별작업반(Special Working Groups, SWG)으로 구성돼 있다.

그림 I-4-6 ISO/IEC JTC1 조직구조



※ 집필진 작성

가. SC27

SC27(Subcommittee 27)은 정보보호, 사이버보안, 개인정보보호 관련 표준을 개발하는 그룹이다. 세부적으로는 정보 및 ICT 보안 관리, 정보 암호화 및 기타 보안 메커니즘, 보안 관리 지침, 신원 관리, 정보보안 시스템 적합성 평가 및 평가 방법론 등의 표준들을 개발하고 있다. JTC1 SC27 산하 WG3(Working Group 3)에서는 보안 평가 방법, 테스트 방법 및 명세서 정의 표준을 개발하고 있다. 양자분야와 관련해서는 CC(공통평가기준, Common Criteria)를 기반으로, 양자 키 분배 장치의 보안 요구사항과 시험평가 방법에 대한 표준개발을 진행하고 있다. 최근 ETSI의 PP(Protection Profile)를 반영하여 CC를 기반으로 QKD 보안 요구사항 표준을 DIS(Draft International Standard)의 형태로 개발하였고 동시에 QKD 시험 요구사항 표준을 과제로 제안하여 진행 중이다.

69) www.iso.org

표 Ⅰ-4-7 ISO/IEC JTC1 SC27 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	ISO/IEC 23837-1, Information technology security techniques - Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution - Part 12: Requirements (정보기술 보안기술 – 양자 키 분배 보안 요구사항, 시험, 평가 방법 – 요구사항)	2023
2	ISO/IEC 23837-2, Information technology security techniques - Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution - Part 2: Evaluation and testing methods (정보기술 보안기술 – 양자 키 분배 보안 요구사항, 시험, 평가 방법 – 평가 및 시험 방법)	2023

나. WG14

WG14(Working Group 14)는 양자컴퓨팅 표준화를 위해 설립됐다. 양자컴퓨팅의 격차를 확인하고 그것과 관련된 결과물을 개발하는 것을 목표로 삼고 있으며, 양자컴퓨팅 용어 정의에 관한 표준화 작업을 진행하고 있다.

표 Ⅰ-4-8 ISO/IEC JTC1 WG14 표준개발 현황

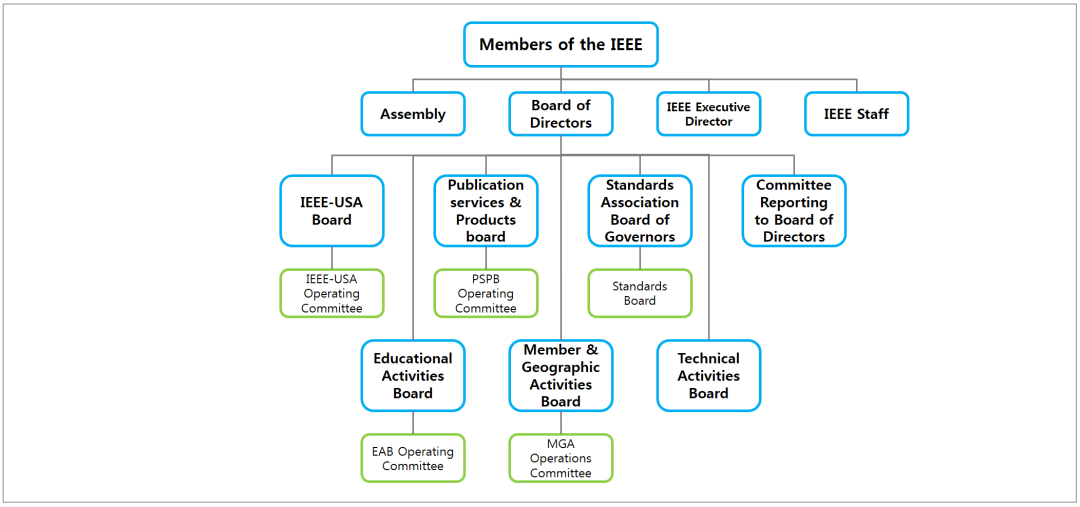
구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	ISO/IEC CD 4879, Quantum computing – Terminology and vocabulary (양자컴퓨팅 – 용어 및 단어)	2023

4. IEEE

IEEE(미국전기전자학회, Institute of Electrical and Electronics Engineers)[70]는 IRE(전파공학자협회, Institute of Radio Engineers)와 AIEE(미국전기공학자협회, American Institute of Electrical Engineers)를 통합해 설립된 전기전자공학 전문가들의 국제조직이다. IEEE는 전기통신공학부터 전력, 항공우주, 소비전자공학, 컴퓨터 엔지니어링, 생물의학 기술까지 다양한 기술들을 다룬다. 이와 관련된 기술적 출판물, 학회 및 전기공학, 컴퓨터 및 제어 기술 분야 전 세계 출판물의 30%를 제작하고, 연간 300개 이상의 주요 학회를 주관하고 있다.

70) www.ieee.org

그림 I-4-7 IEEE 조직구조



※ 집필진 작성

가. IEEE SA

IEEE SA(표준협회, Standards Association)에서는 현재 약 1,500여 개의 표준을 개발 중이다. 전기와 정보기술 및 인류번영과 전문 분야에 대한 지식을 창조, 개발, 통합, 공유하고 실제로 적용해 엔지니어링 과정을 촉진하는 것이 목적이다. 이를 통해 IEEE는 향후 양자컴퓨팅 관련 기술 표준 및 산업 솔루션 개발 과정에서, 사람들이 함께 일할 수 있도록 전 세계적으로 합의된 개방형 플랫폼을 제공하고자 한다. 양자컴퓨팅 용어, 성능지표 및 벤치마크, 시스템 아키텍처, 알고리듬 개발, 시뮬레이터 등에 관한 표준화 작업을 진행하고 있다.

표 I-4-9 IEEE SA 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	IEEE P3329, Standard for Quantum Computing Energy Efficiency (양자 컴퓨팅 에너지 효율 표준)	2023
2	IEEE P3185, Standard for Hybrid Quantum-Classical Computing (하이브리드 양자-클래식 컴퓨팅 표준)	2022
3	IEEE P3172, Recommended Practice for Post-Quantum Cryptography Migration (포스트-양자 암호화 마이그레이션 권장 사례)	2022
4	IEEE P7130, Standard for Quantum Technologies Definitions (양자기술 정의 표준)	2021
5	IEEE P2995, Trial-Use Standard for a Quantum Algorithm Design and Development (양자 알고리즘 설계 및 개발 시험 사용 표준)	2021
6	IEEE P7131, Standard for Quantum Computing Performance Metrics & Performance Benchmarking (양자 컴퓨팅 성능 지표 및 성능 벤치마킹 표준)	2021

5. IETF/IRTF[71)]

IETF(인터넷 기술 전문위원회, Internet Engineering Task Force)는 인터넷 관련 엔지니어링과 표준화에 집중하고 있다. 반면 IRTF(인터넷 연구 전문위원회, Internet Research Task Force)는 상대적으로 장기간이 예상되는 연구주제에 집중하고 있는데, 산하에 QIRG(양자인터넷 연구그룹, Quantum Internet Research Group)을 구성하고, 양자인터넷 표준화를 위한 연구 및 선행 표준화를 진행하고 있다. 해당 그룹에서 2019년 3월부터 개발하기 시작한 양자인터넷 구조원리(Architecture Principle for a Quantum Internet)와 양자인터넷 응용시나리오(Application Scenarios for the Quantum Internet) 표준 문서는 본격적인 양자인터넷 표준화 이전에 양자물리학을 포함한 기초기술에 대한 이해도를 높이고 공유하는 것을 목표로 삼고 있다. 양자인터넷 구조원리 문서는 지난 3월에 RFC 9340으로 완성되었다.

표 Ⅰ-4-10 IRTF QIRG 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	RFC 9340, Architectural Principle for the Quantum Internet	2023
2	draft-irtf-qirg-quantum-internet-use-cases, Application Scenarios for the Quantum Internet	2023

※ IRTF

71) https://www.ietf.org/about/groups/irtf/

6. CEN/CENELEC[72)]

CEN(유럽표준화위원회, European Committee for Standardization)과 CENELEC(유럽전기표준위원회, European Committee for Electrotechnical Standardization)은 ISO/IEC와 연계한 유럽지역 표준화 기구이다. 현재 CEN/CENELEC JTC 22(합동 기술 위원회 22)에서 양자기술과 관련된 표준화를 착수하였으며, 양자기술 포커스 그룹(Focus Group on Quantum Technologies)을 결성하고 양자기술 표준화 로드맵(Standardization Roadmap on Quantum Technologies) 및 양자기술 활용 사례(Quantum Technologies Use Cases) 등 2편의 발간물(Deliverable)을 완성하였다.

표 Ⅰ-4-11 CEN/CENELEC FGQT 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	FGQT Q01, Terms of Reference (업무 범위)	2020
2	FGQT Q02, Work Programme (작업 내역)	2023
3	FGQT Q03, Towards Standardization for Quantum Technologies (양자기술 표준화 방향)	2023
4	FGQT Q04, Standarization Roadmap on Quantum Technologies – release 1 (양자기술 표준화 로드맵)	2023
5	FGQT Q05, Quantum Technologies Use Cases – release 1 (양자기술 활용 사례)	2023

※ CEN/CENELEC

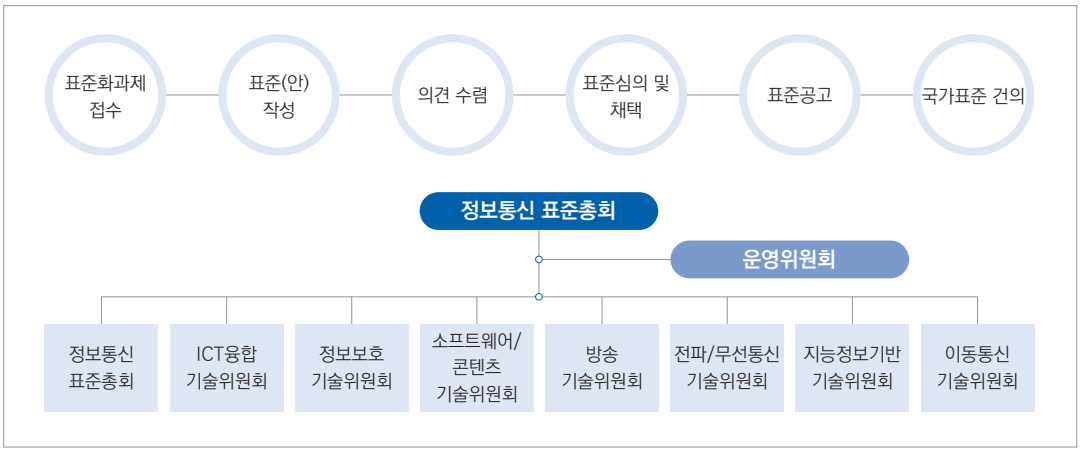
72) www.cencenelec.eu

제3절 국내 표준화 기구

1. TTA

1988년 12월에 설립된 재단법인 TTA(한국통신기술협회, Telecommunications Technology Association)[73]는 통신사업자, 산업체, 학계, 연구기관 및 단체 등의 상호협력과 유대를 강화하는 것이 목적이다. 더불어 국내외 정보통신 분야의 최신 기술 및 표준에 관한 각종 정보를 수집·연구해 이를 보급·활용하게 하며, 효율적인 표준화를 추진함으로써 정보통신 산업 및 국민경제 발전에 이바지하고자 한다. 표준제정은 시장 선점을 위한 핵심 요소로, 해당 기술·표준을 가진 개인이나 단체는 누구든지 TTA 표준으로 제안할 수 있다. 표준(안) 제안 시 제안자의 특허(IPR)가 인정되며, 표준제정에는 평균 약 6~12개월이 소요된다.

그림 I-4-8 TTA 표준화위원회 조직구조



※ TTA

양자기술 관련 표준화는 여러 그룹(표준화 위원회 및 프로젝트 그룹)에서 진행되어 왔으나, 보안 분야를 제외한 양자 키 분배 중심 표준화는 신설 PG225(양자통신)에서 담당하여 활성화되고 있다.

73) 한국정보통신기술협회 홈페이지 (www.tta.or.kr)

가. TTA 광전송 프로젝트 그룹(PG201)

PG201은 광전송 기술에 대한 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 전달망 구조 기술, 액세스망 기술, 광소자 및 광케이블 기술 같은 물리 인프라 기술의 표준화를 추진하고 있다. 양자암호통신 네트워크 관련 ITU-T SG13, ETSI QKD ISG에서 개발된 국제표준의 영문 준용 표준과, KT에서 자체 개발한 양자암호 전달 네트워크 기능 구조 표준 등 총 15건의 표준이 개발 완료됐다. 현재는 신설 양자통신 프로젝트 그룹인 PG225에 양자분야 표준화 업무를 이관하였다.

표 Ⅰ-4-12 TTA PG201 표준개발 현황(PG225로 이관)

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	2019-1309, 양자 키 분배-REST 기반의 키 전달 응용 프로토콜과 데이터 형식	2023
2	2022-0616, 양자 키 분배(QKD); 소프트웨어 정의 네트워킹을 위한 오케스트레이션 인터페이스	2023
3	TTAE.IT-Y.3806, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 보장 요구사항	2022
4	TTAE.IT-Y.3807, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 파라미터	2022
5	2021-2357, 양자 키 분배망 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어	2022
6	TTAE.IT-Y.3801, 양자 키 분배망 기능적 요구사항	2021
7	TTAE.IT-Y.3802, 양자 키 분배망 – 기능 구조	2021
8	TTAE.IT-Y.3804, 양자 키 분배망 – 제어 및 관리	2021
9	TTAR-01.0021, 머신러닝 기반 양자암호 분배 네트워크 (QKDN) 상호운용 (Interworking) 제어 및 관리를 위한 유스 케이스(기술보고서)	2021
10	TTAR-01-0022, 양자암호 네트워크의 유스 케이스(기술보고서)	2021
11	TTAK.KO-01.0230, 양자 키 분배(QKD) 용어 정의	2021
12	TTAK.KO-01.0214/R1, 양자암호 전달 네트워크의 기능 구조	2021
13	TTAK.KO-01.0225/R1, QKD 네트워크 (QKDN); QKD 시스템과 양자 암호키 관리 시스템 간 인터페이스 및 YANG 데이터 모델	2021
14	TTAE.IT-Y.3800, 양자 키 분배망 개요	2020
15	TTAE.ET-GS QKD 011, 양자 키 분배(QKD): 구성 요소 특성화: QKD 시스템의 광학 구성 요소 특성화	2018
16	TTAE.ET-GS QKD 008, 양자 키 분배(QKD): 모듈 보안 규격	2018
17	TTAE.ET-GS QKD 003, 양자 키 분배: 구성 요소 및 내부 인터페이스	2017
18	TTAE.ET-GS QKD 004, 양자 키 분배망: 응용 인터페이스	2017

※ TTA

나. TTA 정보보호 기반 프로젝트 그룹(PG501)

PG501은 암호 기술에 대한 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 암호알고리듬/프로토콜, 양자정보통신의 암호키 관리, 암호 응용 기술, PKI 시스템, OTP 기술, 인증/접근제어 및 권한관리 기술 등의 표준화를 진행하고 있다. 2018년에 양자 키 분배 기술에 대해 일반적인 모델과 절차를 제시하고, 대표적인 양자 키 분배 프로토콜인 BB84 프로토콜에 대한 절차를 제시하는 2개의 표준을 완성했다.

표 Ⅰ-4-13 TTA PG501 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	TTAK.KO-12.0329-Part1, 양자 키 분배 – 제1부: 일반	2018
2	TTAK.KO-12.0329-Part2, 양자 키 분배 – 제2부: BB84 프로토콜	2018

※ TTA

다. TTA 사이버보안 프로젝트 그룹(PG503)

PG503은 사이버보안 기술 관련 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 클라우드 컴퓨팅, 미래인터넷, 스마트 모바일 네트워크 보안, 사이버보안 기술, 사이버 범죄 대응 기술(디지털 포렌식) 등의 표준화를 진행하고 있다. 네트워크 보안을 위해 개발된 IPsec(IP 보안프로토콜) 장비에 양자 키 분배 장치에서 제공하는 양자암호키를 적용하기 위한 표준 1건의 개발에 착수하였으나, 진행이 미진한 상황이다.

표 Ⅰ-4-14 TTA PG503 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	2019-1114, IP 보안프로토콜(IPsec)과 양자암호키 분배 장비 간 연동 규격	2023

※ TTA

라. TTA 응용 보안/평가인증 프로젝트 그룹(PG504)

PG504는 금융보안, IoT, 클라우드 컴퓨팅, 스마트그리드, 스마트 워크, 디지털 저작권 보호 기술 등 응용/융합 보안기술과 그것을 지원하는 구현/관리 지침, 정보보호 관리체계(ISMS), 공통평가기준(CC), 암호모듈 검증(CMVP) 등 보안성 인증 및 평가기술에 대한 표준화를 진행하고 있다. 양자 키 분배 시스템의 안전성을 보장하기 위한 요구사항 표준이 완성돼있고, 2023년도에 양자 키 분배 장비 보안 요구사항 확인을 위한 시험 방법 표준화가 진행될 예정이다.

표 Ⅰ-4-15 TTA PG504 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	TTAK.KO-12.0356, 양자 키 분배 보안 요구사항	2019
2	2023-0472, 양자 키 분배 장비 보안요구사항 확인을 위한 시험 방법	2023

※ TTA

마. TTA 양자통신 프로젝트 그룹(PG225)

PG225는 양자 키 분배 네트워크 및 연동 요구사항, 아키텍처 기술과 서비스 품질 보장, 양자 키 전달 프로토콜, 양자통신 프레임워크, 구조 및 라우팅에 대한 표준화를 진행하고 있다. 신설 프로젝트 그룹으로 기존 PG201에서 개발한 표준을 이관받고, 양자 키 분배망의 공공기관 도입 운영 지침 및 활용 사례, 양자 키 분배망 연동(기능요구사항, 프레임워크) 등의 표준화가 진행될 예정이다.

표 Ⅰ-4-16 TTA PG225 표준개발 현황(PG201에서 이관 및 자체개발)

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	2019-1309, 양자 키 분배-REST 기반의 키 전달 응용 프로토콜과 데이터 형식	2023
2	TTAE.ET-GS QKD 018, 양자 키 분배(QKD); 소프트웨어 정의 네트워킹을 위한 오케스트레이션 인터페이스	2023
3	TTAE.IT-Y.3806, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 보장 요구사항	2022
4	TTAE.IT-Y.3807, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 파라미터	2022
5	TTAE.IT-Y.3805, 양자 키 분배망 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어	2022
6	TTAE.IT-Y.3801, 양자 키 분배망 기능적 요구사항	2021
7	TTAE.IT-Y.3802, 양자 키 분배망 – 기능 구조	2021
8	TTAE.IT-Y.3804, 양자 키 분배망 – 제어 및 관리	2021
9	TTAR-01.0021, 머신러닝 기반 양자암호 분배 네트워크 (QKDN) 상호운용 (Interworking) 제어 및 관리를 위한 유스 케이스(기술보고서)	2021
10	TTAR-01-0022, 양자암호 네트워크의 유스 케이스(기술보고서)	2021
11	TTAK.KO-01.0230, 양자 키 분배(QKD) 용어 정의	2021
12	TTAK.KO-01.0214/R1, 양자암호 전달 네트워크의 기능 구조	2021
13	TTAK.KO-01.0225/R1, QKD 네트워크 (QKDN); QKD 시스템과 양자 암호키 관리 시스템 간 인터페이스 및 YANG 데이터 모델	2021
14	TTAE.IT-Y.3800, 양자 키 분배망 개요	2020
15	TTAE.ET-GS QKD 011, 양자 키 분배(QKD): 구성 요소 특성화: QKD 시스템의 광학 구성 요소 특성화	2018
16	TTAE.ET-GS QKD 008, 양자 키 분배(QKD): 모듈 보안 규격	2018
17	TTAE.ET-GS QKD 003, 양자 키 분배: 구성 요소 및 내부 인터페이스	2017
18	TTAE.ET-GS QKD 004, 양자 키 분배망: 응용 인터페이스	2017
19	2023-0443, 양자 키 분배망의 공공기관 도입 운영 지침 및 활용 사례	2023
20	2023-0442, 양자 키 분배망 연동 – 기능요구사항	2023
21	2023-0441, 양자 키 분배망 연동 – 프레임워크	2022

제4절 시사점

양자기술 관련 표준화 경향을 국내외 기구별로 분석해 보면 다음과 같다. 첫째, ITU-T 기구이다. ITU-T는 ETSI 대비 국제 표준화 착수가 늦었으나, 양자 키 분배 기술의 네트워크 구조로 표준화 연구를 착수하고 상용화를 위한 기술 표준을 꾸준히 개발한 결과, 양자암호 기술 표준화 분야에서 활발한 표준화 활동을 진행 중이다. 여기에서 한국은 양자암호 네트워크 구조와 양자암호 보안 표준을 비롯해 양자암호 서비스 품질, 양자암호 네트워크 연동과 같은 핵심 표준 의제를 지속 제시함으로써, ITU의 양자기술 표준화를 실질적으로 이끌고 있다. 그뿐만 아니라 세계 최초 양자암호 네트워크 국제표준 Y.3800을 필두로 20여 건의 양자암호 표준을 직접 개발하고 있어, 보유 역량과 리더십을 바탕으로 향후 양자컴퓨터, 양자센서, 양자네트워크, 양자인터넷 등의 후속 국제 표준화에서도 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

둘째, ETSI 기구에 관한 것이다. 유럽 회원사들을 중심으로 가장 먼저 양자암호, 특히 양자 키 분배 기술에 대한 국제 표준화에 착수했고, 시스템 기능과 시스템 간 인터페이스를 비롯해 장비 구현을 위한 표준을 충실히 개발해왔다. 유럽, 한국, 일본, 미국, 캐나다 등 양자암호 분야에서 활발한 활동을 진행 중인 국가들이 참여하고 있다. ETSI QKD ISG는 전세계 글로벌 장비 제조사, 통신사업자, 대학, 연구기관 등 매우 다양한 기업과 기관이 활동 중인 그룹으로 양자 표준화의 기준이 되고 있다. 일례로 최근 ISO/IEC JTC1 SC27 WG3에서 ETSI가 제안한 PP를 중심으로 CC 기반 QKD 보안 요구사항 표준이 DIS(Draft International Standard) 형태로 제정된 바 있다.

셋째, ISO/IEC JTC1은 CC(공통평가기준, Common Criteria)를 비롯한 전통적인 보안성 시험평가 표준을 개발하는 국제기구이다. 보안 시스템의 사업화를 위해서는 공통평가기준(CC), 암호모듈 검증(CMVP) 등 보안성 인증 및 평가기술에 대한 표준 시험인증체계의 수립이 필수적인데, 물리계층 보안 시스템인 양자암호시스템에 대해 기존 보안인증시스템과 공존하면서 특수성을 지원할 수 있는 새로운 인증체계 수립이 선행되어야 한다. ISO/IEC JTC1 SC27 WG3에서 CC를 기반으로 QKD의 보안 요구사항 표준이 DIS의 형태로 제정되었고, 또한 ISO/IEC JTC1 SC27에서 2023년에 QKD 시험 요구사항 표준의 과제 제안이 진행 중이다.

넷째, CEN/CENELEC JTC22 기구이다. 양자기술 포커스 그룹을 결성하고 표준화 로드맵과 활용 사례를 표준화하는 등 유럽 국가 중심으로 양자기술 전반에 대한 표준화 리더십을 추구하고 있다. ISO/IEC JTC1과 연계하여 활동하는 유럽지역 기구인 만큼, 한국의 표준화 전략도 향후 ISO/IEC JTC-Q 설립 및 주도 추진과 연계하여 대응할 필요가 있다.

다섯째, 국내 TTA 기구에 관한 것이다. 양자기술 분야 국내표준화는 ITU와 ETSI 표준의 국내 부합화 위주로 진행됐으며, 그로 인해 TTA 표준화위원회 내 여러 프로젝트 그룹에서 분산 수행되다가 2022년 新 프로젝트 그룹인 PG225(양자통신)가 신설되어 양자분야를 총괄해 수행하고 있다. ITU 같은 국제표준화기구에서 양자암호 분야 표준의 선제적 제안과 개발을 한국이 주도하는 현황을 반영한다면, 국내에서 선 표준화 후 국제표준으로 제안하는 방식도 기대된다. 양자기술은 양자암호, 양자컴퓨터, 양자센서 간에 비슷한 혹은 같은 물리적 특성을 공유하고 있고, 향후 양자네트워크, 양자인터넷으로 통합되는 방향성까지 고려할 때, 이를 총괄해 수행하는 PG225(양자통신)가 신설된 것은 적절한 방향성을 설정한 것으로 이해된다. 표준화 역량과 양자기술 전문성을 바탕으로 향후 상당한 성과가 기대된다.

지금까지 양자기술에 관한 표준화는 ITU 및 ETSI 등의 국제 표준화 기구에서 먼저 진행한 후, 그 결과물을 국내 표준으로 부합화하는 순서로 진행돼왔다. 이는 국내 산학연이 국내 표준보다 국제 표준을 선제적으로 수행한 방법론에 기인하는데, 이러한 현상은 양자암호, 양자 키 분배 기술의 기술성숙도 차이와 연관이 있다. 다만 국제표준화기구에서도 양자컴퓨터나 양자센서의 경우, 이제야 표준화 방향성을 고민하는 수준에 그치고 있음을 고려할 필요가 있다. 즉 양자기술 분야별 기술성숙도의 차이로 인해, 양자암호 표준화는 ITU와 ETSI가 주도하고 있으나, 양자컴퓨터와 양자센서 표준화는 ISO/IEC JTC1과 IEEE에서 진행 중이며, IRTF와 ITU는 양자인터넷을 표준화하는 등 기술과 국제표준화기구에 따라 개별적으로 진행되고 있다는 점이다.

이 같은 상황은 국내표준화를 선행한 후 국제 표준화를 실행하기에 적합한 환경으로 고려된다. 우선 양자기술을 아우르는 국내표준화 그룹을 신설하고, 국내 전문가 간 협업을 통해 통합적 관점에서 양자기술 전반(양자컴퓨팅, 양자센서, 양자 키 분배, 양자네트워크 등)을 표준화함으로써, 국제표준화기구들보다 먼저 포괄적 범위의 양자기술 표준화를 주도할 수 있을 것이다. 물론 기존 국제표준 리더십 지속 강화를 위한 양자암호 기술 고도화 표준, 실증사업을 통한 시장요구사항 연계 양자암호 표준의 강화도 병행돼야 할 것이다. 이를 위해선 중장기 표준화 로드맵이 선결돼야 함을 주지하고, 실행을 위한 전문인력 양성과 국내외 협력 네트워크의 구축 및 운용, 그리고 국제 표준화 회의의 국내 유치를 통한 국내 산학연 생태계의 관심 제고와 정부의 지속적 지원이 요구된다.

참고문헌

• 국내문헌

1	강소현(2022), “통신 3사, 올 하반기 양자사업 전략 키워드는?”, 디지털데일리.
2	과학기술정보통신부(2018), "과학기술&ICT 정책·기술 동향" 130호.
3	과학기술정보통신부(2021a), "과학기술&ICT 정책·기술 동향" 203호.
4	과학기술정보통신부(2021b), “양자기술 연구개발 투자전략”.
5	과학기술정보통신부(2021c), "한미정상회담 후속조치 이행을 위한 양자암홑옷니 시범사업 본격 착수".
6	과학기술정보통신부(2022), "양자기술 전략로드맵(안)".
7	과학기술정보통신부(2023), "대한민국 양자과학기술 전략".
8	과학기술정책연구원(2023), "영국과 중국의 과학기술 최상위 행정체계 개편과 시사점" 과학기술정책 Brief Vol9.
9	국가나노기술정책센터(2022), "글로벌 나노정책 및 기술동향" 50호.
10	박종진(2022), “LG유플러스, 양자내성암호 전용회선 세계 첫 상용화”, 전자신문.
11	이종현(2022), “노르마-SKT, 손잡고 양자내성암호 상용화 추진”, 디지털데일리.
12	정보통신기획평가원(2019), “ICT의 새로운 진화, 양자정보통신을 향한 주요국의 도전”, ICT SPOT ISSUE.
13	정보통신기획평가원(2020), “ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자”.
14	정보통신기획평가원(2022), “주요국 양자기술 개발과 투자전략”, ICT SPOT ISSUE 2022-5호.
15	한국과학기술기획평가원(2021), “S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스”.
16	한국전자통신연구원(2019), “양자정보기술 연구개발의 거대한 물결”.
17	한중과학기술협력센터(2019), “중국의 양자컴퓨팅 R&D 정책 동향”.
18	한중과학기술협력센터(2020), “중국의 양자정보 연구개발 동향”.
19	한중과학기술협력센터(2021), “중국의 양자정보 연구개발 동향”.
20	IRS Global(2022), “4차 산업혁명의 엔진, 양자기술 글로벌 혁신 기술 트렌드 및 향후 전망”.
21	KT(2022), “KT, 양자암호 전용회선 서비스 출시”.

• 해외문헌

1	Andrew Shipilov and Nathan Furr(2022), Making Quantum Computing a Reality, Harvard Business Review.
2	Austrian Institute of Technology(2022), New Applications of Quantum Communication for Europe, Austrian Institute of Technology News & Events.
3	Department for Science, Innovation & Technology(2023), National Quantum Strategy.
4	DOE(2018), Quantum Networks for Open Science Workshop.

5	DOE(2020a), FY 2021 Congressional Budget Justification.
6	DOE(2020b), Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop.
7	DOE(2021), FY 2022 Congressional Budget Justification.
8	DOE(2022), FY 2023 Congressional Budget Justification.
9	DOE(2023), FY 2024 Congressional Budget Justification.
10	Economist Impact(2022), From qubits to profits: achieving near-term quantum advantage, Commercializing Quantum 2022 Conference at London, UK.
11	EU(2020), Midterm Report of The Quantum Technology Flagship.
12	EU(2022), Quantum Internet Alliance Project In EU Quantum Flagship.
13	European Commission(2020), Strategic Research Agenda.
14	European Commission(2021), 2030 Digital Compass: the European Way for the Digital Decade.
15	European Commission(2022), Shaping Europe's Digital Future.
16	Federal Ministry of Education and Research(2018), "A Federal Government Framework Programme: Quantum technologies–from basic research to market".
17	Fintan Burke(2020), Qubit to get ahead: Germany is racing to catch up with the quantum revolution, Science Business.
18	Fortune Business Insights(2021), Quantum Computing Market to Grow Exponentially; Increasing Product Applications to Generate Remunerative Market Opportunities.
19	Fraunhofer(2021), Curtain up: Fraunhofer and IBM to unveil quantum computer.
20	High-Level Steering Committee(2017), Quantum Technologies Flagship Intermediate Report.
21	IFRI(2022), The Chinese Quantum Dream.
22	Industry Research(2022), Global quantum sensors market insights: Forecast to 2028.
23	Inside Quantum Technology(2019), Quantum Sensors Markets.
24	Inside Quantum Technology(2022), Quantum Sensors: Market Evolution 2022 to 2031.
25	IQ4I(2022), Quantum Technologies Global Market.
26	Kagermann, H., Süssenguth F. et al.(2020), The Innovation Potential of Second-generation Quantum Technologies, Acatech.
27	Markets And Markets(2022), Research Quantum Computing Market by Offering(Systems and Services), Deployment(On Premises and Cloud Based), Application, Technology, End-use Industry and Region(2021-2026).
28	McKinsey & Company(2021), Shaping The Long Race In Quantum Communication and Quantum Sensing.
29	McKinsey & Company(2022), Quantum Technology Monitor.
30	McKinsey & Company(2023), Quantum Technology Monitor.
31	Mind Commerce(2023), Quantum Technology Market by Computing, Communications, Imaging, Security, Sensing, Modeling and Simulation 2023 – 2030.
32	Natasha Kovacs(2022), Quantum Communication Technology Spurs Quantum Device Commercialization in Korea, Newswires.
33	National Quantum Computing Centre(2021), Annual Report 2021.

34	NIST(2021), NIST FY 2022 President's Budget Request.
35	NQTP, UK National Quantum Technologies Programme.
36	NSF(2021a), FY 2022 Budget Request to Congress.
37	NSF(2021b), Enabling Quantum Leap: Quantum Interconnect Challenges for Transformational Advances in Quantum Systems.
38	NSF(2023), FY 2024 Budget Request to Congress.
39	NSTC(2020), A Strategic Vision for America's Quantum Networks.
40	NSTC(2021), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2022 Budget.
41	NSTC(2022), Bringing Quantum Sensors to Fruition. A Report by The Subcommittee On Quantum Information Science Committee on Science of the National Science & Technology Council.
42	Quantum Science and Technology(2019), Quantum information science and technology in Japan.
43	Quantum.Tech(2022), Driving quantum adoption across global enterprise, Quantum.Tech Boston Conference 2022 at Boston, MA.
44	Reuters Technology News(2021), Germany to support quantum computing with 2 billion euros.
45	SCQIS(2021), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2022 budget.
46	SCQIS(2023), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2023 budget.
47	Swinhoe, Dan(2021), Why Would You Want an On-Premise Quantum Computer? Data Center Dynamics.
48	TechUK(2022), Quantum commercialization: Positioning the UK for success.
49	The White House National Quantum Coordination Office(2022), A strategic vision for america's quantum networks.
50	Toshiba Digital Solutions Corporation(2022), Toshiba Group and KT Collaborate On Quantum Key Distribution Pilot Projects in South Korea, Toshiba News.
51	UK Quantum Strategy(2022), Department for Business, Energy and Industrial Strategy.
52	UKNQTP(2019), Strategic Intent.
53	일본 내각부(2022), 量子未来社会ビジョンについて.
54	캐나다 정부(2021), Budget 2021.
55	캐나다 정부(2023), Canada's National Quantum Strategy.
56	프랑스 정부(2021), Stratégie Nationale Sur Les Technologies Quantiques.

• 사이트

1	http://lqcc.ustc.edu.cn
2	http://quantum-bc.ca/learn/quantum-computing-program/
3	http://quantumcas.ac.cn/yjyjj/list.htm
4	https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/enabling-quantum-leap-quantum-interconnect-challenges-transformational

5	https://bnl.gov/instrumentation/quantum/research.php
6	https://en.acatech.de/wp-content/uploads/sites/6/2020/07/acatech_IMPULS_Quantentechnologie_en_web.pdf
7	https://etsi.org
8	https://fraunhofer. de/en/press/research-news/2021/june-2021/fraunhofer-and-ibm-to-unveil-quantum-computer.html
9	https://globaladvantageconsulting.com/the-united-kingdoms-quantum-technologies-ecosystem/
10	https://gov.uk/government/consultations/uk-quantum-strategy-call-for-evidence
11	https://ieee.org
12	https://ietf.org
13	https://iof.fraunhofer.de/en/News/BMBF-promotes-quantum-research.html
14	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab0077
15	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab029d
16	https://iotworldtoday.com/2022/06/15/quantum-summit-2022-uk-government-invests-in-quantum-computing/
17	https://iq.govwin.com/neo/marketAnalysis/view/Federal-Investment-in-Quantum-Information-Science-in-FY-2024/7457?researchTypeId=1&researchMarket=
18	https://iso.org
19	https://itu.int
20	https://kitchener.citynews.ca/local-news/feds-investing-20-million-in-waterloos-quantum-valley-ideas-lab-1382446
21	https://m.dongascience.com/news.php?idx=54043
22	https://nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/quantum.jsp
23	https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/european-quantum-internet-alliance/
24	https://reuters.com/article/us-germany-quantumcomputer-idUSKBN2CS0W9
25	https://science.osti.gov/-/media/QIS/pdf/QuantumBrochure2021.pdf
26	https://science.osti.gov/Initiatives/QIS/QIS-Centers
27	https://sj.jst.go.jp/news/202205/n0523-03k.html
28	https://tta.or.kr
29	https://uknqt.ukri.org/
30	https://usinenouvelle.com/article/pepr-quantique-cnrs-cea-et-inria-ont-voulu-couvrir-tous-les-domaines-du-secteur-et-mailler-tout-le-territoire-francais-temoigne-sebastien-tanzilli-cnrs.N1804702
31	https://wintelips.com
32	https://www.cencenelec.eu/
33	https://www.fqcf.org/
34	https://www.quantumbusinessnews.com/deals-partnerships/germany-launches-3-3b-quantum-technology-plan
35	https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01901/00004/

II 양자기술 R&D 동향

제1장 국내외 양자통신 R&D 동향

제2장 국내외 양자센싱 R&D 동향

제3장 국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향

제1장 국내외 양자통신 R&D 동향

제1절 개요

양자통신은 양자시스템을 이용해 정보를 전달하는 기술을 통칭한다. 통신에 활용되는 양자기술은 주로 빛의 입자적 특성을 가지는 광자이다. 기존의 광통신기술은 빛 다발(100만 개 이상의 광자)을 이용해 정보를 전달한다. 반면 양자통신은 단일광자 혹은 결맞음 광자를 이용하기 때문에, 양자역학을 이용한 보안성 강화에 활용할 수 있는 장점이 있지만, 구현상 많은 제약이 존재한다. 양자통신은 양자 상태로부터 암호키를 추출하는 양자 키 분배 기술과 양자상태를 전송하는 양자 네트워킹 기술이 주로 구현되고 있으며, 거리를 확장하기 위한 중계기 기술들이 연구되고 있다.

구현 방법에 따라 전용 광 선로가 필요한 유선 방법과 대기 중으로 신호를 송수신하는 무선 방법이 있는데, 국내외 기술은 유선과 무선에서 차이가 있다. 유선의 경우 국내 양자 키 분배 기술은 주요 선진국의 기술을 바짝 추격하고 있으며 최근 대기업 및 중소기업들이 양자 키 분배 장비를 생산하며 산업생태계도 활성화되었다. 2020년부터 양자암호통신을 공공 및 민간 분야 26개 기관에 시범 구축하여 실제 망에서의 운용 레퍼런스를 확보함으로써 2023년에는 산업체가 개발한 양자 키 분배 장비를 국내 국가공공망에 도입하기 위한 인증 제도가 세계 최초로 시행되었다. 양자 키 분배 외에 양자를 이용한 보안 기술 제공을 위해서는 양자 인증 및 서명 등이 필요한데, 국내외 기술 수준은 연구 단계로서 실험실 수준에 머물러 있으나 양자 인증을 중심으로 점차 실증 단계에 접어들 것으로 예상된다. 무선의 경우 국내외 격차가 작지 않다. 국내 무선 양자통신은 2018년 한국전자통신연구원(ETRI)이 100 m 실험을 성공한 뒤 KT가 2022년에 1 km 실험에 성공한 것이 주목할 성과이다. 최근에는 드론을 이용한 양자통신 연구도 진행 중이나 아직은 가시적 성과를 나타내기엔 이르다. 반면 해외의 경우 중국을 중심으로 위성을 이용한 무선 양자암호통신이 상당한 성과를 보이고 있다. 최근에는 지상의 유선 양자통신과 결합하여 총 4,600 km의 양자암호통신에 성공하였다. 여기에 유럽, 일본, 캐나다 등의 주요 선진국들이 위성을 이용한 양자통신 계획을 수립하여 진행 중이다. 현재는 양자 키 분배를 넘어 양자인터넷으로 가기 위한 기술개발이 국내외에서 활발히 이루어지고 있다.

본 장에서는 양자통신 중에서 가장 활발하게 기술개발이 이루어지고 있는 유·무선 양자 키 분배, 양자암호 프로토콜 요소기술인 양자 난수 생성기, 양자인터넷의 핵심 요소인 양자중계기, 양자인터넷의 보안을 위한 양자보안기술, 양자통신 시험망 구축기술, 양자보안기술을 도입하기 위한 시험평가기술, 양자인터넷 구축을 위한 양자네트워크기술에 대한 국내외 R&D 현황을 살펴본다.

제2절 해외 양자통신 R&D 동향

1. 유선 양자 키 분배

가. 양자 키 분배

(1) 기술 동향

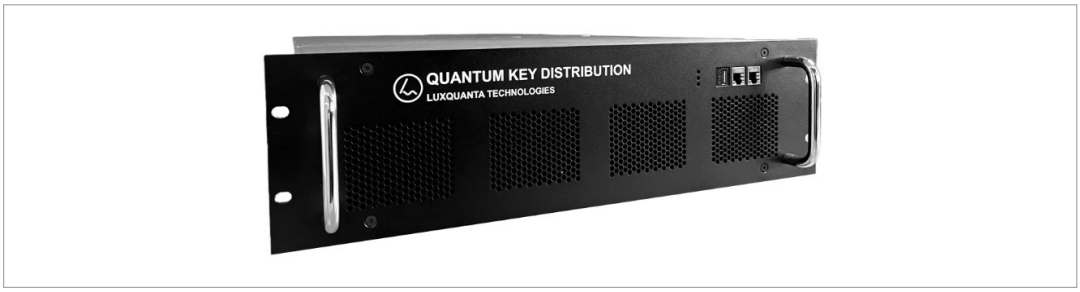
① 연속변수 QKD

단일광자광원과 단일광자검출기를 사용하지 않고 QKD를 할 수 있는 방법을 연속변수(Continuous Variable, CV) 기반 QKD라고 한다. (3절에서 설명하는 다양한 QKD 프로토콜들은 단일광자 양자상태 생성과 측정을 기반으로 한 불연속변수(Discrete Variable, DV) 기반 프로토콜이다.) CV-QKD는 빛, 즉 전자기장의 쿼드러처(Quadrature)라는 연속적인 변수 특성으로 암호화하고 코히어런트 검출(Coherent Detection)이라는 고전 광 검출 기술로 복호화하여 비밀키를 만들어낸다. 코히어런트 검출기는 단일광자검출기와 달리 별도의 냉각 과정 없이도 높은 검출 효율(90 %)을 보이고, 현존하는 광통신 장치들과의 호환성이 좋기 때문에 기존 단일광자검출기보다 실용적이다. CV-QKD 프로토콜은 준비하는 양자상태의 종류, 신호 변조 방법, 검출 방법, 오류 정정 방법에 따라 여러 가지 항목으로 분류할 수 있다. 준비하는 양자상태는 크게 결맞음(Coherent) 상태와 압축(Squeezed) 상태가 있고, 신호 변조 방법에는 가우시안(Gaussian) 변조와 불연속적인 변조가 있으며, 검출 방법으로는 호모다인(Homodyne) 혹은 헤테로다인(Heterodyne) 방법이, 마지막으로 오류 정정 방법에는 직접 혹은 역방향 조정(Reconciliation) 방법 등이 있다.

CV-QKD의 이점은 기존의 고전 광통신 기술을 이용해 구현할 수 있다는 점 뿐만 아니라, 단일모드 필터 역할을 하는 LO(Local Oscillator, LO)의 특성 덕분에 배경잡음의 영향을 잘 받지 않는다는 점도 있다. 이 특성 때문에 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)으로 고전 채널들과 다중화할 때 유용하며, 낮 시간에 자유공간(무선)에서 CV 통신을 하는 것도 가능하다. 그러나 CV-QKD는 일반적으로 광손실에 민감하기 때문에 보안 전송거리가 보통 100 km 이하 정도로 제한된다. 그렇지만 단거리 전송의 경우 고차원(High Dimensionality) 특성을 통해 이론적으로 더 높은 키 생성률을 보여줄 수 있다. CV-QKD의 키 생성률을 더 높이기 위해서는 저잡음 호모다인 검출기, 효율적인 오류정정 코드, 정확한 매개변수 추정 등의 기술이 더 필요하며, 일반적인 도청 공격에 대한 보안성 증명도 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

CV-QKD 기술 연구와 사업화는 유럽에서 활발하게 진행되고 있다. CiViQ라는 과제는 Quantum Flagship 프로젝트의 사업 중 하나로서 ICFO(스페인), AIT(오스트리아), Max Plank Institute(독일) 등 유럽 내 여러 연구기관과 통신 회사 등 총 24개 파트너들의 공동 연구로 진행되고 있다. 이들은 궁극적으로 칩 레벨 집적화를 통해 대량생산에 적합한 저가형 CV-QKD 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 그 예시로 관련 기관인 스페인의 ICFO 연구소에서 2021년에 LuxQuanta라는 회사를 창업하여 상용 CV-QKD 시스템을 판매하기 시작했다.

그림 II-1-1 LuxQuanta의 상용 CV-QKD 모듈



※ https://www.luxquanta.com/solutions

CV-QKD에서 보안성을 보장하는 두 연속변수는 결맞음 상태의 두 쿼드러처에 해당하는 전자기장의 실수 성분과 허수 성분이다. 송신부 Alice는 약한 결맞음 신호광(신호 하나당 광자 수 〈5)의 위상과 진폭을 가우시안 변조 혹은 불연속 변조를 이용하여 변조한다. 수신부 Bob에서 양자 채널을 통과하면서 감쇠된 신호는 국부 진동자(LO)라 불리는 강한 신호와 섞이게 되는데, 간섭계의 두 출력부는 광검출기로 검출한다. 두 광검출기의 전류 차이는 두 광 입력부의 출력과 두 전자기파 사이의 위상차에 대응되는 양을 곱한 값의 제곱근에 비례하고, 이 특성 덕분에 측정하고자 하는 신호와 섞인 LO의 세기만큼 증폭되게 된다. 결맞음 상태에 존재하는 위상과 진폭 사이의 고유한 불확도(Uncertainty)는 광검출기에서 측정되는 '샷 잡음(Shot Noise)'으로써 정량화할 수 있다. 이 샷 잡음 한계를 넘어가는 추가적인 잡음 값을 추정하면 도청 공격을 감지할 수 있는데, DV-QKD에서 사용했던 양자 비트 오류율(Quantum Bit Error Rate, QBER)과 비슷한 기능을 한다고 생각하면 된다.

송신부에서 전자기장의 실/허수 성분은 '위상 기준(Phase Reference)'과 비교하여 정의된다. 이 위상 기준을 송·수신부 사이에서 동기화하는 방법은 송신부에서 강한 광신호인 "Transmitted Local Oscillator(TLO)"를 수신부에 직접 전송하는 방식과, 별도의 약한 신호를 양자 채널에서 전송하여 구내 레이저 소스 "Local Local Oscillator (LLO)"와 동기화하는 방식이 있다. TLO 방식에서는 전송된 강한 신호가 LO로써 코히어런트 검출기에 직접 사용되는 데 반해, LLO 방식은 수신단 내에 있는 동기화된 레이저가 LO로 사용된다.

㉮ Transmitted Local Oscillator(TLO) CV-QKD

CV-QKD를 TLO 방식으로 설계하면 송신부가 위상 기준이 잘 정의된 LO와 신호 상태(Signal State) 펄스를 생성해야 하는데, 이는 같은 레이저 광원을 사용하면 된다. 펄스는 진폭을 변조하거나 다이오드 레이저에 펄스 형태의 전류를 인가하여 만들 수 있다. 실제 실험에서는 레이저 펄스를 99:1 혹은 90:10 광 커플러와 같이 결합비 불균형도가 높은(Highly Unbalanced) 광 커플러를 사용하여 나누어 준 다음 광세기가 큰 쪽의 출력부를 LO 채널, 작은 쪽 출력부를 양자 신호 채널로 사용한다. 양자 신호는 변조된 다음 LO와 다중화되어 전송 채널을 통과한다. 예를 들어 시간다중화를 한다고 하면 다음 그림과 같이 두 채널 중 하나에 광섬유 지연선을 삽입하는데, 이때 생긴 시간지연은 두 펄스의 폭보다는 훨씬 길어야 한다. 수신단에서는 역다중화를 해야 하는데, 이 과정에서 신호에 추가되는 잡음이 최소화될 수 있도록 구성해야 한다. 여기서 역다중화는 신호와 LO가 물리적으로 각각 분리된 채널로 결합되는 것으로, 간단하게는 비대칭 광 커플러를 이용하여 구현할 수 있다. 예를 들어 90:10 광 커플러를 이용하여 송신단의 경우와 반대로 입사광의 90%를 신호 채널에 결합하고 10%를 LO채널에 결합하면 된다. 그럼에도 불구하고 이 과정에서 신호 펄스에 10%의 잡음이 더해지고, TLO는 90%의 손실을 겪는다. 이와 같은 광 손실을 최소화하면서 양 채널을 효과적으로 분리하기 위한 대안으로 편광 다중화 방법을 활용할 수 있다. 송신단에서 편광 빔 분할기(Polarizing Beam Splitter, PBS)를 이용해 편광 방향이 서로 수직한 신호와 LO를 결합하여 전송한 다음 수신단 쪽에서 능동 편광조절기를 통해 펄스의 초기 편광 상태를 복원할 수 있다. 그 다음 또 다른 PBS를 이용해 신호와 LO를 다시 분리하여 각각의 채널로 보내주면 된다.

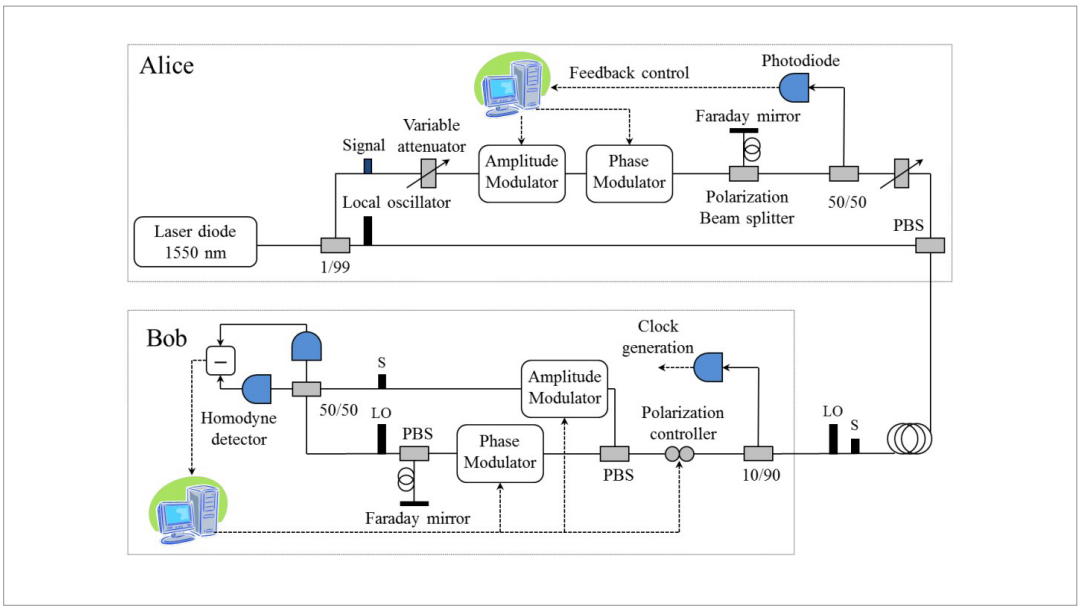
[그림 II-1-2]에서와 같이 총 시간지연이 T인 광섬유 지연선에 서큘레이터(Optical Circulator, OC)와 패러데이 거울(Faraday Rotation Mirror, FRM)을 삽입하면, 광 신호가 OC-지연선-FRM-지연선-OC 경로를 진행하면서 겪는 총 시간지연은 2×T가 된다. FRM에서 반사될 때 편광이 90도 회전하므로 처음 광섬유 지연선을 지나며 겪은 편광 변화가 반사 후 동일한 광섬유 지연선을 지나고 나서 보상되게 된다. 이렇게 시간, 편광을 둘 다 이용한 이중 다중화 방법으로 수신단에서 두 펄스를 효율적으로 결합할 수 있다.

LO와 신호 펄스를 다중화하지 않고 두 개의 광 채널을 이용하여 전송할 수도 있지만, 이러한 구성은 두 채널 사이의 서로 다른 위상 드리프트 때문에 두 펄스 사이의 위상 기준 동기화가 깨질 수 있다는 점을 고려해야 한다. 독립적인 채널을 두 개나 사용해야 한다는 점도 단점이다. 따라서 실제 실험에서는 두 펄스를 같은 전송 채널에서 다중화한다. 같은 광섬유를 통해 전파되면 신호와 LO가 같은 위상변화를 겪으므로 계속 같은 위상차를 유지할 수 있다.

송신부 레이저에 대한 위상 잡음은 이 디자인에서 크게 중요하지 않으나, 역다중화 단계에서 사용하는 간섭계는 반드시 안정되어 있어야 한다. LO 펄스와 신호 펄스가 역다중화되고 나서 간섭하기 위해서는 코히어런트 검출기에 동시에 도달해야 하기 때문이다. 이를 위해 먼저 도달한 펄스의 채널에 두 펄스 사이의 지연과 일치하는 광섬유 지연선을 연결해 준다. 마지막으로 두 펄스 사이의 간섭 신호를 샷 잡음

제한(Shot-Noise Limited) 호모다인 검출기를 통해 측정하면, 세기(Intensity)가 신호와 LO 사이의 위상차 ϕ에 대응하는 쿼드러처 x_ϕ에 비례하는 전기 신호를 얻을 수 있다. 사용하는 프로토콜에 따라 Bob은 x_0나 $x_{\pi/2}$ 중 하나를 랜덤하게 선택하여 측정하는데, LO 경로 쪽에 위상변조기를 통해 $\pi/2$의 위상을 랜덤하게 인가해주면 된다.

그림 II-1-2 Transmitted Local Oscillator(TLO)-CV-QKD



※ Grosshans, F. & Grangier, P. (2002)

㉯ Local Local Oscillator(LLO) CV-QKD

LLO 방식으로 CV-QKD를 설계하려면 송·수신단 모두에 각각 레이저가 있어야 한다. 송신단의 레이저로는 신호 상태를 만들고, 수신단에 위치한 구내(Local) 레이저로는 LO를 만든다. LO가 실제로도 'Local'하므로 완전한 의미의 LO라고 할 수 있다.

양 레이저 사이의 위상 변화를 모니터링하면서 능동적으로 조절해 주는 과정이 필요한데, 다만 조절을 위해서는 두 레이저의 위상 노이즈에 대한 조건이 TLO 방법에서와 달리 까다로워진다. 송신단은 연속발진 레이저를 IQ 변조기를 사용하여 변조함으로써 양자 신호를 만들고, 가변 광 감쇠기 VOA를 이용하여 감쇠한다. 수신단에서 (능동 편광변조기를 통해) 편광이 교정된 양자 신호는 LO 신호와 함께 섞여서 균형 호모다인 검출기를 통해 측정된다. DAC, ADC와 같은 전자 부품들은 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing, DSP)를 위한 것인데, 이 DSP 과정은 두 레이저 사이의 위상 동기를 맞추기 위해 필요하다.

두 CW 레이저의 주파수를 잠그기 위해 일반적으로는 동기화 펄스 시퀀스를 사용한다. 이 동기화 펄스는 양자 정보와 상관없는 고전 광신호이고, 진폭이 양자신호보다 훨씬 크기 때문에 위상을 비교적 정확하게 결정할 수 있다. 또 다른 대안으로 수신단 쪽 CW 레이저의 파장과 위상을 조절하기 위한 피드백 루프를 구성하는 방법이 있는데, 파일럿 톤(Pilot Tone)의 편광을 양자 신호의 편광과 수직하도록 변조하여 전송하면 된다. 이를 위해서는 사용하는 IQ 변조기와 코히어런트 검출 시스템(Optical Hybrid)이 이중 편광을 지원하는 제품이어야 하고 파일럿 톤을 측정하기 위해 추가적인 검출기가 필요하다. 또 다른 주파수 잠금 방법으로 DSP를 이용해 두 레이저의 위상 드리프트를 직접 교정하는 방법이 있다.

㉠ 가우시안 변조 결맞음 상태(Gaussian-Modulated Coherent-State, GMCS) 프로토콜[1)]

처음 발표된 가우시안 연속 변조 프로토콜은 가우시안 변조된 압축 상태 프로토콜로, 여기서는 압축상태의 변위(Displacement)로 키를 암호화하는 것이었다. 이 과정에서 압축을 적용할 방향을 랜덤하게 선택하게 되는데, 이는 BB84 프로토콜의 기저 선택 과정과 유사하다. 이 프로토콜은 나중에 결맞음 상태를 이용한 GMCS 프로토콜로 확장되는데, 결맞음 상태가 압축 상태보다 실험적으로 구현하기에 용이하기 때문이다. 결맞음 상태를 이용한 CV-QKD 프로토콜이 DV-QKD 프로토콜과 다른 점은 사용되는 채널마다 양쪽 기저의 키 정보가 준비된 양자상태에 동시에 암호화된다는 점이다. 따라서 Bob의 측정 결과가 Alice의 기저들의 키와 상관관계를 가질 수 있는 것이다. GMCS 프로토콜에서의 광원은 쿼드러쳐 성분 x_j와 p_j로 구성된 결맞음 상태 $|\alpha_j\rangle = |x_j + ip_j\rangle$들이 혼합되어 있다. x_j와 p_j는 랜덤한 변수 집합 X와 P에서 각각 선택되는 것으로, 가우시안 분포 $N(0, V_m)$을 따른다. (V_m : 변조 분산) 가우시안 변조된 광원의 총 분산값은 결맞음 상태의 고유 쿼드러처 불확도인 V_s와 V_m의 합으로 표현된다. 현재 널리 쓰이는 가장 간단한 형태의 GMCS 프로토콜은 2002년에 Grosshans와 Grangierrk 제안한 GG02 프로토콜로, 전체 프로토콜의 단계별 설명은 다음과 같다.[2)]

- Alice가 고전 변수값 $\alpha_j = x_j + ip_j$를 빛의 결맞음 상태에 변조하여 암호화한다. 총 N개의 결맞음 상태 $|\alpha_1\rangle, |\alpha_2\rangle, \cdots, |\alpha_N\rangle$를 Bob에게 전송한다면, 평균 0, 분산 V인 가우시안 분포 내에서 랜덤한 2N개의 변수 값을 고르게 된다.
- Alice가 양자채널을 통해 변조된 상태의 신호를 전달한다. 이는 흔히 열 손실 채널로 기술할 수 있는데, 채널의 투과율과 열 잡음으로 채널의 특성이 결정된다.
- Bob이 입사된 신호에 대해 호모다인 혹은 헤테로다인 검출을 통해 고전 변수값 β_j를 측정한다. 예를 들어 호모다인 측정을 할 경우 신호와 LO의 위상 차이에 따라 x와 p 쿼드러처 중 하나를 선택할 수 있다.

1) Cerf, N. J. et al. (2001)

2) Grosshans, F. & Grangier, P. (2002)

- Alice와 Bob이 쿼드러처를 랜덤하게 바꿔 가면서 각각 상태 준비와 측정을 수행했다면, 고전 채널을 통해 기저 선택을 공유하고 같은 쿼드러처를 선택한 경우만 남겨준다.(Sifting)
- Alice와 Bob은 시프팅된 데이터를 공유하고 비교함으로써 매개변수 추정을 수행한다. 사전에 알고 있던 양자채널의 매개변수를 이용하여 Eve에게 새어나간 정보량의 최대값을 추정한다. 만약 이 정보량이 특정 보안 문턱값을 넘어가면, 프로토콜을 종료한다.
- Alice와 Bob이 오류정정과 비밀성증폭을 수행한다. Bob이 Alice의 변수를 추정하는 방식을 Direct Reconcillation, 반대로 Alice가 Bob의 변수를 추정하는 방식을 Reverse Reconciliation이라 부른다. (CV-QKD의 오류정정은 DV-QKD와 비교했을 때 훨씬 복잡하기 때문에 현재 시점에서 CV-QKD 프로토콜의 복잡도와 전체 시스템의 성능에 영향을 미치는 핵심 요인이라고 할 수 있으나, 아직 관련 연구가 많지 않은 상황이다.)[3)]

신뢰할 수 있는 열 노이즈(Trusted Thermal Noise)와 혼합된 광원을 이용하는 GMCS 프로토콜도 있는데, 이 경우의 분산값은 열적 분산값을 추가로 더한 값인 $V = V_s + V_m + V_{th}$이다. 이런 프로토콜은 양자상태를 준비하는 과정의 비용이 상대적으로 적게 들고, 광 대역폭보다 긴 파장에서 QKD 구현이 가능하다는 점에서 널리 사용되고 있다. 복호화 과정은 빛의 전자기장의 쿼드러처를 코히어런트 검출을 이용해 측정함으로써 이루어진다. CV-QKD에는 호모다인과 헤테로다인 검출 방법을 주로 사용하는데, 호모다인 검출을 이용한 결맞음 상태 프로토콜은 헤테로다인 검출을 이용한 No-Switching 프로토콜로 변형할 경우 양쪽 쿼드러처 모두를 측정함으로써 키를 추출할 수 있다. GMCS 프로토콜이 현재까지 보안성과 적용 면에서 가장 잘 알려진 프로토콜로, 기존의 광통신 표준 기술만을 활용하므로 상대적으로 간단하게 구현이 가능하다.

㉡ 불연속변조 프로토콜

불연속변조 프로토콜은 광원으로 N개의 불연속적으로 랜덤화된 결맞음 상태의 혼합 광 $|\alpha_k\rangle = ||\alpha|e^{i2k\pi/N}\rangle$을 이용하고, 키는 이 결맞음 상태들의 랜덤한 위상으로 암호화된다. 사실 이 프로토콜은 가우시안 프로토콜보다 먼저 제안되었으나, 쓸만한 키 생성률을 확인할 수 있는 보안성 증명이 어렵다. 불연속변조 프로토콜은 N개의 결맞음 상태로 구성된 알파벳을 준비하는데, 위상값에 적용된 k값이 비밀키이다. Bob은 호모다인이나 헤테로다인 측정을 통해 k값을 추정한다. 실제로 완벽하게 가우시안 변조를 구현하는 게 불가능하고, 불연속 변조를 할 경우 오류정정의 주요 단계가 간단해지기 때문에 상태 개수 N에 대한 일반화된 보안성 증명 문제가 해결될 경우 실용적인 대안이 될 수 있다.

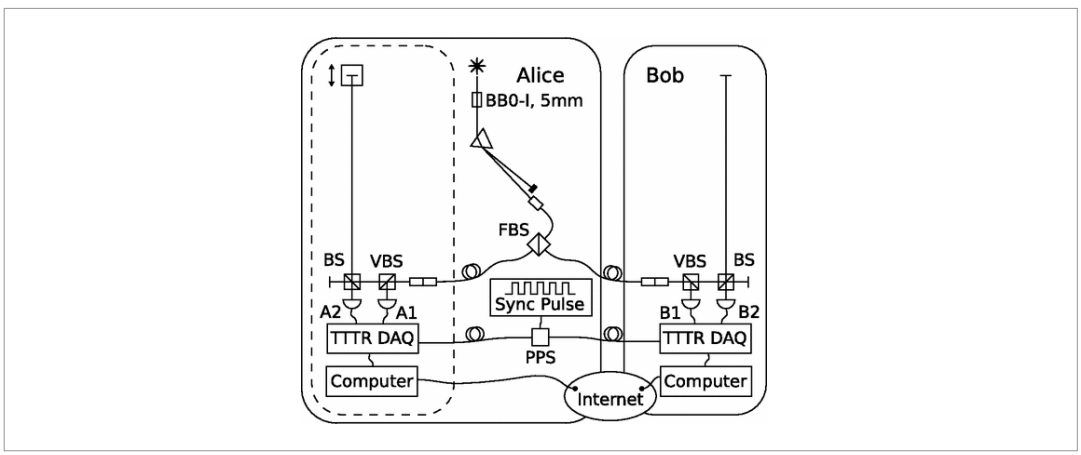
3) Gümüş, K. et al. (2021)

② 고차원(High-Dimensional) QKD

고차원 QKD(High-Dimensional QKD, HD-QKD)는 다중레벨 시스템으로 키를 인코딩하는 QKD를 지칭하며, 기존의 큐비트 기반 시스템보다 입자 하나당 더 높은 키 생성률을 보이며, 잡음 내성도 더 뛰어나다.[4] 2006년에 광자의 공간 자유도를 이용한 고차원 알파벳을 이용하여 처음 실험으로 구현되었고,[5] 2007년에는 에너지-시간 얽힘 광자쌍을 이용하여 구현되었다.[6]

[그림 II-1-3]에서 에너지-시간 얽힘 광자쌍을 이용한 실험 구성도를 확인할 수 있는데, 잡음이 많은 환경에서도 광자쌍 하나당 10비트가 넘는 정보가 담긴 알파벳 키를 생성하였다. 광자쌍 하나당 4비트의 정보를 전송할 경우 양자 비트 오류율(QBER)이 5%이고, 양자채널의 보안성은 Franson 간섭무늬의 가시도를 측정하여 결정할 수 있다. 2017년에는 타임 빈 큐비트(Qubit)를 이용한 고속 QKD가 보고된 바 있다.[7] 이런 시간-에너지 HD-QKD는 일정한 클록 주파수를 이용할 때 단일광자검출기의 시간 분해능이 높을 경우 더 많은 시간 슬롯(Slot)을 할애할 수 있다는 점에서 유용하나, 클록 주파수를 단일광자검출기의 대역폭 이상으로 확장할 경우에는 이야기가 달라진다. 하지만 광 각운동량(Optical Angular Momentum, OAM)과 같은 공간 모드를 이용하면 이런 문제를 해결할 수 있다. OAM을 이용한 HD-QKD는 2006년에 E91 프로토콜을 이용하여 처음 구현되었고,[8] 2013년에는 16개 차원으로 구현되었다.[9] 2019년에는 1.2 km 길이의 다중모드광섬유를 이용하여 전송에 성공했고, 다중코어(Multicore) 광섬유 기반 공간다중화를 이용하여 구현된 사례들도 있다.[10]

그림 II-1-3 에너지-시간 얽힘광자쌍을 이용한 고차원 QKD 실험 구성도



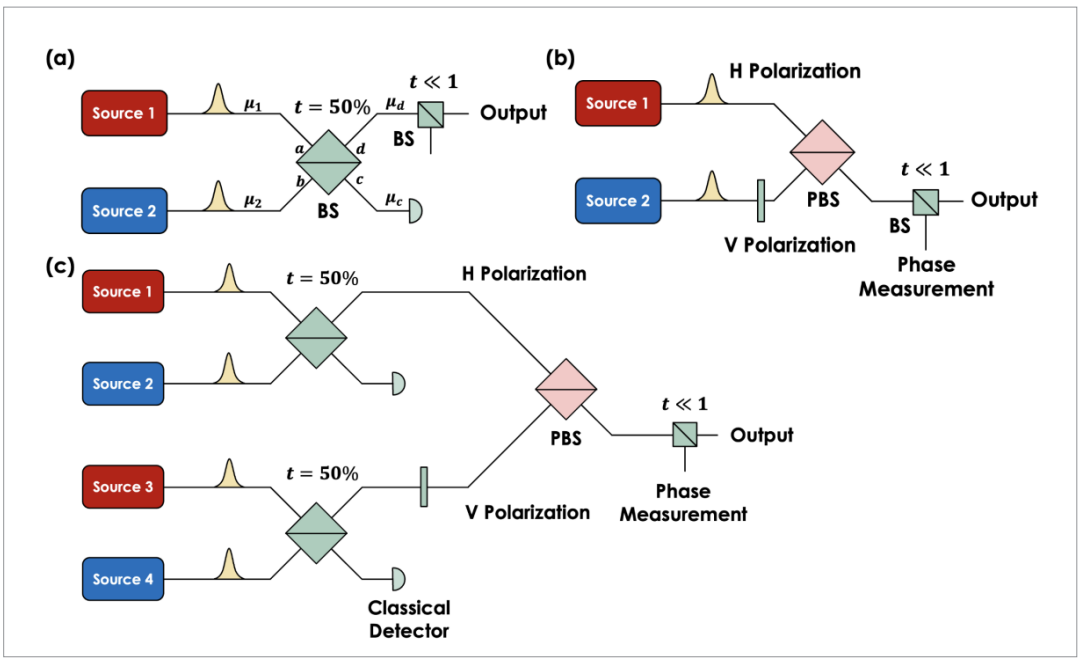
※ Ali-Khan, I. et al. (2007)

4) Bourennane, M. et al. (2001)
5) Walborn, S. et al. (2006)
6) Ali-Khan, I. et al. (2007)
7) Islam, N. T. et al. (2017)
8) Simon Gröblacher et al. (2006)
9) Etcheverry, S. et al. (2013)
10) Ding, Y. et al. (2017)

③ 수동적(Passive) QKD

MDI-QKD의 개념이 나오면서 QKD 구현에서 측정기에 대한 많은 부채널 문제는 해결되었다. 하지만 아직까지 양자 광원에 대한 양자 해킹은 DI-QKD의 구현이 아니고서는 해결되지 않은 문제가 있다. decoy BB84 프로토콜에서 광원 쪽 광학기기에서는 레이저 세기 변조를 통해 decoy와 시그널을 만들고, 편광 혹은 시간-위상 변조를 통해 축과 인코딩되는 고전 정보를 인코딩한다. 여기서 이러한 변조는 모두 QRNG를 통해 생성된 난수를 이용해서 어떻게 변조할 것인지가 결정되고, 만일 QRNG가 잘 동작한다면 이는 정보-이론적 안전성을 갖는 QKD 구현이 가능할 것으로 기대할 수 있다. 하지만 이때 변조하는 장치로부터 도청자가 정보를 빼낼 수 있다면 QRNG의 동작과는 상관없이 도청자는 인코딩되는 축, 고전 정보부터 decoy와 시그널을 구별할 수 있는 정보까지 모두 변조장치를 통해 정보를 빼낼 수 있는 것이다. 이러한 공격으로 대표적인 것이 바로 트로이 목마 공격이다. 이는 도청자가 광 변조기 안에 강한 레이저를 숨기고, 광 변조기가 변조할 때 강한 빛을 쏜 후 반사된 빛을 통해 변조 방식에 대한 정보를 얻는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 수동적 QKD라는 방식이 제안되었다.

그림 II-1-4 수동적 QKD 개념도



※ W. Wang, et. al. (2023)

먼저 그림 (a)에서 보면 두 개의 광원에서 나온 신호가 빔 스플리터(Beam Splitter, BM)를 통해 간섭을 일으킬 수 있는데 두 레이저 광원의 위상차가 무작위이기 때문에 간섭을 일으키는 정도도 무작위가 된다. 즉 50:50 BS를 쓰더라도 두 광원의 위상차가 무작위이기 때문에 간섭을 일으키는 확률이 달라질 수 있다. 그렇게 되면 어느 한쪽으로 가는 신호의 세기는 가변일 수밖에 없다. 다른 한쪽에 고전적인 측정기를 통한 측정을 통해 빛의 세기를 후선택(Post-Selection) 할 수 있다. 그림 (b)에서는 편광을 이

용한 QKD에서 편광상태를 결정하는 방식이다. 즉, 하나의 광원에서는 수평 편광의 빛을, 다른 한쪽에서는 수직 편광의 빛을 생성하고 편광 빔 스플리터(Polarization Beam Splitter, PBS)에 보낸다. 이때 이 두 광원의 상대적 위상 역시 무작위이기 때문에 나오는 빛도 수직 편광과 수평 편광의 임의 중첩 상태가 된다. 이때 PBS를 빠져나온 빛의 위상 측정을 통해 편광상태 후선택을 할 수 있다. 최근에는 이 두 가지 방식을 모두 써서 광세기 및 양자상태 인코딩을 모두 수동적으로 하는 그림 (c)와 같은 방식도 제안되고 구현되었다. 이러한 수동적 변조가 가능한 이유는 우리가 사용하는 광원이 광자 수 분포가 Poisson인 레이저 빛을 사용하기 때문이다. 즉 BS에서의 레이저 빛들의 상호 간섭 때문에 수동 변조가 가능한 것이다.

이러한 수동적 QKD는 QRNG를 활용한 능동 변조 QKD에 비해 키 생성율이 작고, 최대 안전거리도 짧지만, 변조기를 통한 트로이 목마 공격 등에 대해 안전하므로 광원을 신뢰할 수 없는 상황에서는 이러한 구현 방식이 안전성을 높일 수 있을 것이다.

(2) 연구 동향

QKD가 이론적으로는 물리법칙에 근거한 무조건적 안전성을 보장한다. 하지만, 실제 시스템에 적용할 때 사용되는 소자나 장치들이 100% 이상적으로 동작하지 않기 때문에 몇 가지 도청 공격(Quantum Hacking)의 위험에 노출될 수밖에 없다. 최근 QKD 연구는 시스템의 전체 효율을 개선하여 키 발생률과 전송거리를 늘리는 것뿐 아니라, 이러한 도청 공격들로부터 안전한 새로운 프로토콜을 제안하고 실험으로 구현하는 방향으로도 계속 진행되고 있다. 예를 들어, 잘 알려진 도청 공격 중 하나로 광자수 분할(Photon Number Splitting, PNS) 공격이 있다. DV-QKD에서는 이상적인 단일광자광원을 가정하지만, 실제로는 단일광자가 확률적으로 발생하고 두 개 이상의 광자가 발생할 확률도 존재한다. PNS 공격은 이 점을 이용한 것으로, Alice가 암호화하여 보낸 양자상태가 두 개 이상의 광자를 포함하고 있을 때 빔 분할기로 광자 일부를 이용, 탈취하여 양자 메모리에 보관하고 있다가 기저 공표 과정에서 알게 된 Alice의 암호화 기저를 이용해 측정하면 공격을 들키지 않고 정보를 얻을 수 있게 된다는 원리이다. 이러한 QKD의 광원 공격을 방지하기 위해 디코이 상태 프로토콜이 개발되었고, 이는 현재 유·무선 QKD 시스템의 성능 개선에 큰 기여를 하였다. 다음 표는 디코이 상태 프로토콜을 이용한 최근까지의 QKD 실험 결과를 요약한 것이다.

그러나 광원 외 다른 소자들을 공격하는 해킹 방법들이 다양하게 제안되면서 디코이 상태를 이용하는 것만으로는 안전성을 보장하기 충분하지 않다고 밝혀지게 되었다. 특히 검출 시스템 공격에 대한 보안상의 허점을 제거할 수 있는 MDI 프로토콜이 등장하면서 비신뢰 릴레이가 있는 QKD 네트워크에서의 보안성을 강화할 수 있게 되었다. 현재까지 달성한 최대 전송거리는 2016년에 중국의 J. W. Pan

그룹이 달성한 404 km[11]이고, 연속변수를 이용한 구현,[12] 저가형 레이저와 FPGA 기반 하드웨어를 이용한 타임 빈(Time Bin) 기반 유선 MDI-QKD,[13] 실리콘 포토닉스 공정을 이용한 MDI-QKD 송수신기 칩,[14] RFI-MDI-QKD 시스템[15] 등 다양한 형태로 구현이 되고 있다.

표 II-1-1 디코이 상태 QKD 실험과 성능 목록

저자	클록 주파수	암호화 방법	채널 종류	최대 전송거리	키 발생률 (bits/s)	발표 연도
Zhao et al.	5 MHz	위상	광섬유	60 km	422.5	2006
Peng et al.	2.5 MHz	편광	광섬유	102 km	8.1	2007
Rosenberg et al.	2.5 MHz	위상	광섬유	107 km	14.5	2007
Schmitt-Manderbach et al.	10 MHz	편광	자유공간	144 km	12.8	2007
Yuan et al.	7.1 MHz	위상	광섬유	25.3 km	5.5 K	2007
Yin et al.	1 MHz	위상	광섬유	123.6 km	1.0	2008
Wang et al.	0.65 MHz	위상	광섬유	25 km	0.9	2008
Dixon et al.	1 GHz	위상	광섬유	100.8 km	10.1 K	2008
Peev et al.	7 MHz	위상	광섬유 네트워크	33 km	3.1 K	2009
Rosenberg et al.	10 MHz	위상	광섬유	135 km	0.2	2009
Yuan et al.	1.036 GHz	위상	광섬유	100 km	10.1 K	2009
Chen et al.	4 MHz	위상	광섬유 네트워크	20 km	1.5 K	2009
Liu et al.	320 MHz	편광	광섬유	200 km	15.0	2010
Chen et al.	320 MHz	편광	광섬유 네트워크	130 km	0.2 K	2010
Sasaki et al.	1 GHz	위상	광섬유	45 km	304.0 K	2011
Wang et al.	100 MHz	편광	광섬유 네트워크	96 km	48.0	2013
Fröhlich et al.	125 MHz	위상	광섬유 네트워크	19.9 km	43.1 K	2013
Lucamarini et al.	1 GHz	위상	광섬유	80 km	120.0 K	2013
Fröhlich et al.	1 GHz	위상	광섬유	240 km	8.4	2017
Liao et al.	100 MHz	편광	자유공간	1200 km	1.1 K	2017
Yuan et al.	1 GHz	위상	광섬유	2 dB	13.7 M	2018
Boaron et al.	2.5 GHz	시간	광섬유	421 km	6.5	2018

11) Yin, H.-L. et al. (2016)
12) Pirandola, S. et al. (2015)
13) Valivarthi, R. et al. (2017)
14) Kejin Wei et al. (2020)
15) Wang, C. et al. (2015)

국내에서는 아직까지 CV-QKD 관련 연구가 많이 이루어지지 않았지만, 유럽과 미국의 경우 활발하게 이루어지고 있다. CV-QKD 연구에는 크게 보안성 증명과 후처리 방법 개선과 같은 이론 연구와 실험 구현 연구가 있다. CV-QKD에서는 코히어런트 검출기를 사용하기 때문에 (단일광자검출기를 사용하는) DV-QKD에 대한 주요 도청 공격 중 하나인 "Detector Blinding Attack"에 대해 안전하긴 하지만, 위상 기준 신호인 LO 신호에 대한 공격에는 아직 취약하다. 또한 보안성도 무한 번의 통신 횟수를 가정한 점근적 한계(Asymptotic Limit)에서만 분석되어 있기 때문에 아직까지 완전한 보안성 증명은 이루어지지 않았다. 후처리의 경우 2003년에 역방향 Reconciliation 오류정정 방법이 적용되면서 GMCS 프로토콜 기반 CV-QKD 시스템이 3-dB 손실 제한을 극복할 수 있게 되었다.[16] 이후로 후처리 기술의 효율이 개선되어 전송거리가 지속적으로 확장되었고, 2016년에는 잡음을 통제함으로써 100 km의 일반 광섬유 채널로 전송하는 데 성공했다.[17] 초저손실 광섬유로는 2020년에 약 200 km까지 전송에 성공했으며,[18] 2019년에는 칩 기반 구현 결과도 발표되었다.[19] GMCS가 아닌 다른 프로토콜로는 2018년에 연속변수 얽힘상태를 이용한 50 km 전송 사례가 있다.[20]

16) Grosshans, F. & P. Grangier. (2002)
17) Huang, D. et al. (2016)
18) Zhang, Y. et al. (2020)
19) Zeng, P. et al. (2019)
20) Wang, N. et al. (2018)

나. 얽힘 기반 양자 키 분배

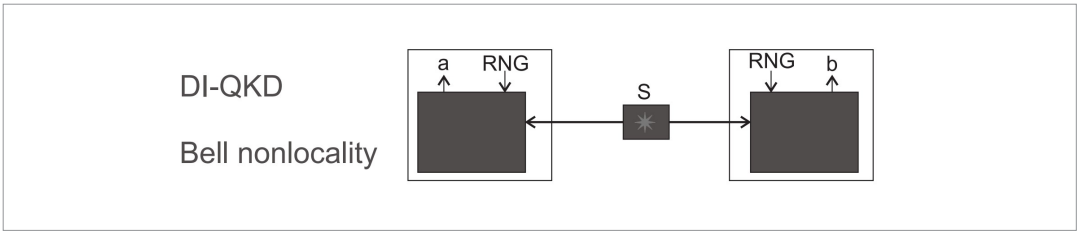
(1) 기술 동향

얽힘 기반 QKD에 대한 연구는 처음 1991년 Eckert에 의해 제안되었는데,[21] 이는 다음과 같은 방식이다. 먼저 Alice와 Bob이 얽힘 광원을 하나씩 나누어 가진 상태에서 각자 자신의 양자 상태를 무작위로 선택된 기저로 측정을 하게 된다. 충분한 측정결과가 모이면 Alice와 Bob의 측정결과의 일부분을 공개해서 양자 비국소성(Quantum Nonlocality)를 확인하는 벨 부등식[22] 위배를 확인한다. 만일 벨 부등식이 위배되면 남은 측정결과를 통해 비밀키를 생성할 수 있다. 후에 이 방식은 BBM92 방식[23]과 거의 동일하다는 것이 밝혀졌다. 즉, Alice와 Bob이 BB84 프로토콜에서처럼 각각 2개의 랜덤 측정축을 선택해서 얽힘 광자쌍 중 자신의 광자에 측정을 하고, 나중에 같은 축으로 측정하는 경우에 키를 남기게 된다. 이 경우에도 측정 결과의 일부를 벨 부등식의 하나인 CHSH 부등식[24]의 위배 여부 확인에 사용하게 되면 최종 생성되는 비밀키의 안전성을 보장받을 수 있다. 얽힘을 활용한 QKD는 프로토콜의 안전성을 증명하는 데에도 이용될 수 있다. 이는 Lo와 Chau가 얽힘을 활용한 BBM92가 무조건적인 안전성을 가진다는 것을 증명할 때 다음과 같은 사실을 보임으로써 증명하였다.[25] 잡음이 섞인 여러 개의 얽힘 광자쌍을 통해 키를 얻어내는 것이 얽힘 증류를 통해 완벽한 얽힘 광자쌍을 통해 키를 얻어낼 수 있는 방식으로 변형될 수 있다면, 즉, 잡음이 충분히 작다면, QKD는 무조건적인 안전성을 가질 수 있다는 것이다. 후에 Shor와 Preskill 등에 의해 Lo와 Chau가 양자오류정정 부호 등을 통해 BB84 방식으로 환원될 수 있다는 것이 밝혀졌다.[26] 즉, 얽힘을 활용하여 QKD 방식이 얽힘을 활용하지 않는 BB84 QKD로 환원될 수 있다는 것을 보인 것이다. 하지만 이는 어디까지나 안전성을 증명하는 수학적 도구일 뿐 벨 부등식의 위배 확인을 통한 QKD 구현의 장점을 보인 것은 아니다.

21) A. K. Ekert. (1991)
22) J. S. Bell. (1964)
23) C. H. Bennett et al. (1992)
24) J. F. Clauser et al. (1969)
25) H.-K. Lo & H. F. Chau. (1999)
26) P. W. Shor & J. Preskill. (2000)

이처럼 얽힘 광원을 키분배에 사용하는 것에서 필요한 것은 벨 부등식 위배 확인이 될 수 있다. 하지만 벨 부등식의 위배 확인을 위해서는 결함 없는(Loophole-Free) 벨 부등식 실험이 필수인데, 이는 높은 충실도의 양자 얽힘 광원과 높은 측정효율의 측정기가 필요하므로 과거 기술력으로는 어려운 일이었다. 그래서 얽힘 광원을 활용하여 QKD를 하는 연구보다는 결함 없는 벨 부등식 위배에 대한 학문적인 연구들이 2000년 중반까지 진행되었지만 2007년 Acin 등에 의해 얽힘 광원을 활용하여 벨 부등식의 위배를 확인하는 QKD 방식이 기기무관(Device-Independent, DI) QKD에 활용될 수 있다는 것이 밝혀지면서[27] 다시금 큰 주목을 받기 시작했다.

그림 II-1-5 기기무관 QKD



※ Cyril Branciard et al. (2018)

위의 그림에서 보는 것처럼 Alice와 Bob이 사용하는 양자 광원 및 측정 장치들을 신뢰할 수 없을 때에도, 즉, 광원과 측정장치가 Black Box일 때에도, 벨 부등식의 위배만 확인할 수 있다면 항상 비밀키를 뽑아낼 수 있다는 것이다. 이는 다른 말로 하면 광원과 측정기를 도청자가 제공해도 Black Box의 입력, 출력 값을 통해 벨 부등식의 위배만 확인된다면 최종 비밀키를 추출할 수 있다는 말이다. 이는 광원, 양자채널, 측정 장치에 대한 어떠한 부채널 공격에도 안전한 QKD가 될 수 있다는 의미이기도 하다. 하지만 그럼에도 불구하고 DI-QKD가 안전하게 동작하기 위한 최소한의 가정들은 필요하다.

1. 양자역학은 옳은 이론이다.
2. 두 명의 사용자는 인증된 고전채널을 사용한다.
3. 사용자들은 그들의 측정장치의 입력 값으로 신뢰할 수 있고, 비밀성이 유지되는 RNG를 사용한다.
4. Alice와 Bob은 결함 없는 벨 부등식 테스트를 할 수 있어야 한다.

이러한 4가지 정도의 가정들은 다른 QKD 프로토콜들의 정보이론적 안전성을 증명하기 위한 가정들에 비해 굉장히 적은 개수의 가정들이다. 아직까지 DI-QKD의 기술적 성숙도는 구현의 관점에서는 막 시작하는 단계라 볼 수 있고, 이론적 안전성의 증명의 관점에서는 성숙하는 단계로 진입하는 중이라

27) A. Acin et al. (2007)

고 볼 수 있다. 물론 얽힘을 사용하는 모든 QKD 프로토콜의 구현이 시작하는 단계라고는 볼 수 없다. 최근에 BBM92 방식이 50km 정도의 실망에서 구현되었는데,[28] 키생성 속도 등은 최대 수 kbps 정도로 상당히 좋은 편이다. 하지만 안전성 측면에서는 DI-QKD와는 거리가 있다.

(2) 연구 동향

DI-QKD에 대한 연구는 크게 4가지 관점에서 진행되었다. 먼저 높은 충실도를 갖는 양자 얽힘을 의미 있는 거리까지 분배하는 것, 결함 없는 벨 부등식의 위배 확인, 안전성에 대한 이론연구, 그리고 DI-QKD 구현을 통한 비밀키의 생성이 그것들이다. 물론 각각 따로 연구되기도 하지만 복합적으로 연구되고 있기도 하다. 즉, 얽힘을 분배하여 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인한다거나 이론적으로 안전성을 확인하기 위해 결함 없는 벨 부등식의 위배를 어떠한 성능의 광원 및 측정기로 수행하는 것 등이다.

실제 DI-QKD의 구현은 아직 시작하는 단계이지만 최근 의미 있는 결과들이 중국 Jian-Wei Pan 그룹[29]과 독일의 H. Weinfurter 그룹[30]에서 진행되었다. 그들은 수백 미터 떨어진 두 지점에서 높은 충실도의 양자 얽힘을 분배하고, 그 양자 상태들에 대해 측정 축의 선택과 결과 값들을 통해 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인하였고, 남은 결과들을 통해 키를 생성해 낸 것이다. 하지만 수십 시간의 측정 시간 등을 통해 키를 생성한 것이라 키생성 속도를 논의하는 것은 의미가 없다. 실제 키를 뽑아내는 것이 아닌 결함 없는 벨 부등식의 대한 실험은 꽤 많이 진행되었다(많이라는 것은 단순히 상대적인 것이지 실제로 실험 자체가 지극히 고난도이기 때문에 수천, 수만의 결과를 의미하지는 않는다). 이러한 실험들은 넓게 두 가지로 분류될 수 있다. 첫 번째는 얽힌 상태가 모두 광자만으로 이루어진 경우이고, 다른 하나는 하나의 광자와 이온, 중성 원자, NV-센터 등 양자 상태가 오래 유지될 수 있는 시스템과의 얽힘을 이용하는 경우이다.

양자 얽힘 상태가 모두 광자만으로 이루어진 실험들[31) 32)]의 경우는 대개 비선형 물질에 펌프 광을 보내서 나온 물리적 자유도가 얽힌 광자쌍을 이용한다. 생성된 광자쌍은 거리가 떨어져 있는 두 명의 사용자인 Alice와 Bob에게 가고 둘은 높은 측정효율의 SNSPD 측정기를 사용하여 측정한다. 광자만을 이용한 실험의 장점은 빠른 생성 속도 및 낮은 QBER을 들 수 있고, 단점은 광섬유를 통과할 때의 손실이 너무 크다는 점이다. 광자와 다른 물리적 시스템의 얽힘을 이용한 실험의 방법은 다음과 같다. 먼저 떨어진 두 지점에서 각각 하나의 광자의 물리적 자유도와 원자 등의 안정적인 시스템에서 하나의 자유도를 상호 작용을 통해 얽힌 상태로 만든다. 이후 떨어진 두 지점에서 중간으로 각각의 광자를 보내고, 중간에서 Bell 측정을 한다. 만일 Bell 측정이 성공적이라면 떨어진 두 지점의 안정적인 물리시스

28) Y. Pelet et al. (2022)
29) W.-Z Liu et al. (2022)
30) W. Zhang et al. (2022)
31) M. Giustina et al. (2015)
32) L. K. Shalm et al. (2021)

템의 물리적 자유도는 얽힘 교환의 원리에 의해 얽힌 상태가 된다. 그리고 이 얽힌 시스템에 대한 측정을 통해 Bell 부등식의 위배를 확인하면 된다. 이러한 방법의 장점은 안정적인 시스템에 대한 측정효율이 자연적으로 매우 높다는 점이다. 물론 단점은 많은 구축비용과 느린 얽힘 생성 속도 등이 있을 수 있다.

DI-QKD에서 가장 많은 연구는 이론적 안전성에 대한 연구이다. 이 연구에서는 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인하기 위해 측정기의 문턱(Threshold) 효율, 광원의 충실도, 유한키 안전성 분석, 그리고 실제 키를 생성하기 위한 최소한의 가정들 등에 대한 연구가 주를 이룬다. 특히 최근에 유한키 안전성 분석법까지 적용된 많은 이론 연구들이 존재하는데 이는 논문[33]에 최신 연구 동향 등이 잘 정리되어 있다.

보통의 경우 DI-QKD는 두 명의 사용자 간 키분배를 위한 방식인데, 최근에는 여러 사용자 간 DI 방식의 양자 컨퍼런스 키합의(Quantum Conference Key Agreement, QCKA)도 이론적으로 제안되었다.[34] 이 방식은 n〉2 명의 사용자가 DI 방식을 통해 동일한 키를 나누는 프로토콜이다. 즉, 다중 측정자가 있는 경우 CHSH 부등식을 Bell 부등식으로 확장하고, 다중 얽힘 광자 상태인 GHZ 상태를 이용하여 키합의를 하는 프로토콜이다. 이 연구에서는 잡음의 정도가 충분히 낮다면 DI-QCKA가 다중 사용자 간 CHSH를 여러 번 사용하는 DI-QKD보다 더 높은 키 생성율을 갖는다는 것을 보였다.

(3) 적용 분야

얽힘을 활용한 QKD 자체는 일반적인 레이저 빛을 사용하는 QKD에 비해 구현 비용이 많이 들고 기술의 구현도 어려운 편이다. 하지만 DI-QKD는 거의 대부분의 부채널 공격으로 부터 안전한 비밀키 분배 방식이므로 극도의 안전성이 필요한 국방, 원자력, 국가 공공망 등에 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

다. 양자 키 분배 네트워크

(1) 기술 동향

① 국제 표준화 기술 동향

양자 키 분배 네트워크와 관련하여 유럽전기통신표준협회(ETSI), 국제전기통신연합 전기통신표준화부문(ITU-T) 국제 표준화 그룹에서 QKD 네트워크 계층, 양자키 관리 계층, 서비스 계층으로 구성되는 양자암호통신망 구조 및 절차, 보안 요구사항 등에 대하여 활발하게 정의하고 있다.

㉮ ETSI

33) Ernest Y.-Z. Tan. (2021)

34) T. Holz, H. Kampermann et al. (2020)

ETSI ISG-QKD(Industry Specification Group for QKD)는 QKD를 보편적으로 수용하기 위한 표준을 만들기 위한 포럼을 제공하고 QKD 연구, 기술 개발 및 비즈니스 적용을 위한 조정, 협력 및 수렴에 대한 상당한 레버리지 효과를 촉진하기 위하여 2008년에 설립되었다. ETSI ISG-QKD에서는 QKDN의 구성요소와 프로토콜의 상호 운용성을 보장하고 공통 인터페이스 정의를 통하여 QKD를 네트워크에 통합하고 상용화를 촉진하기 위한 표준을 제정 중에 있다.

현재까지 발간된 문서의 주제는 애플리케이션 인터페이스, 보안 증명, 모듈 사양, 구성 요소의 특성화, 애플리케이션에 핵심 자료를 제공하는 표준 인터페이스, QKD 배포를 위한 장치 및 통신 채널 매개변수이며, 현재 작업 중인 문서의 주제는 QKD 시스템용 보호 프로파일, 단방향 QKD 시스템에서 트로이 목마 공격 보호, QKD 송신기 모듈의 광 출력 특성화, 소프트웨어 정의 네트워킹을 위한 제어 인터페이스, 네트워크 아키텍처 검토, 새로운 네트워크 발전에 대응하는 API 등이다.

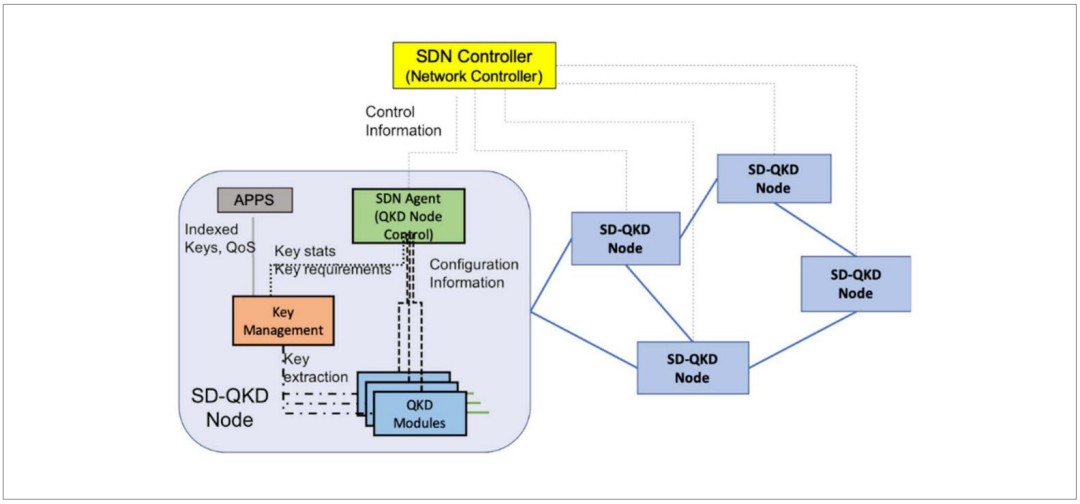
㉯ ITU-T

ITU-T SG13 산하 Q16과 Q6에서는 2018년부터 양자암호 분배 네트워크 관련 기술 표준 제정 작업 중이며, 첫 번째 제정된 표준인 Y.3800(Overview on networks supporting quantum key distribution)에서 양자 키 분배 네트워크의 설계, 배치, 운용 및 관리에 대한 개념 구조, 계층 모델, 그리고 기본 기능을 정의하였다. 이후 이를 기반으로 QKDN 기능 요구사항, QKDN 기능 구조, 키 관리, 그리고 QoS를 포함하는 QKDN 제어 및 관리 등의 표준으로 세분화하여 정의하는 작업을 진행 중이다. 마찬가지로 2018년부터 시작된 ITU-T SG17 산하 Q15, Q4에서는 양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 요구 사항에 대한 표준 제정 작업 중이며, X.1710 시리즈에서 양자 키 분배 네트워크 구성요소의 보안 위협, 보안 요구사항, 조치, 인증 등 전반적인 양자암호통신망 보안 프레임워크에 대하여 정의하는 작업을 진행 중이다.

② 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN)

ETSI ISG-QKD에서는 양자 키 분배 네트워크에 SDN 기술을 적용하여 효율적인 네트워크 제어 및 관리를 수행하기 위하여 [그림 II-1-6]과 같은 네트워크 모델과 인터페이스를 정의하였다. 해당 표준에서는 다수의 QKD 모듈과 양자키 관리 시스템 그리고 SDN 에이전트를 동일한 물리적 위치에 배치하고, SDN 에이전트와 SDN 컨트롤러와의 인터페이스를 통하여 전체 양자 키 분배 네트워크의 정보 수집, 성능 장애 모니터링, 경로 설정, 네트워크 구성요소 제어, 노스바운드 인터페이스 기반 애플리케이션 서비스 개발 등을 가능케 한다. 또한, ETSI ISG-QKD에서 이기종 양자키 관리시스템을 연계하여 통합하기 위한 인터페이스 및 양자 키 분배 네트워크와 광 전달망을 통합 제어하기 위한 인터페이스에 대한 표준화도 진행 중에 있다.

그림 II-1-6 SD-QKD 네트워크 모델 및 인터페이스 기능 정의



※ ETSI GS QKD 015 V1.1.1. (2021)

한편, SDN 기반 QKDN 모델과 라우팅 방안이나, SDN 기반의 프로그래밍 가능한 양자 스위치를 사용하여 양자 채널 설정을 지원하는 양자 네트워크 스위칭 기술 등 SDN 기반의 네트워킹 기술 연구가 진행 중에 있다. 또한 양자 키 분배 기반의 암호화키 서비스 제공을 위한 QaaS(Quantum as a Service), KoD(Key on Demand)에 SDN 기술이 접목되어 유연하고 효율적인 암호화키 서비스 제공 기술이 연구 중에 있다.[35]

③ 자원 할당(Resource Allocation)

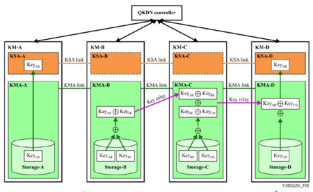
양자 키 분배 네트워크를 운영하기 위해서는 양자 채널, 일반 채널, 데이터 채널을 모두 고려해야 한다. 이에 따라, 다양한 네트워크 채널의 효율적인 자원 할당을 위한 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM), 시간 분할 다중화(Time Division Multiplexing, TDM), 공간 분할 다중화(Space Division Multiplexing, SDM) 등의 다중화 기술에 관한 연구가 추진되었다.

초기에는 QKD/WDM 네트워크에서 서로 다른 채널에 대해 한 쌍의 파장 할당 기술에 대한 연구가 시작되었으며,[36] 이후 양자 키 분배 네트워크를 일반 네트워크에 통합하여 네트워크 자원을 활용도를 향상시키기 위한 QKD/WDM 기술에 TDM 기술을 결합한 형태의 연구가 진행되었다.[37]

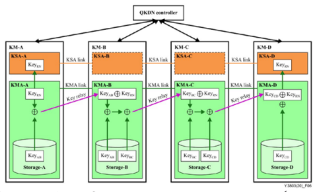
또한 최근에는 MCF(Multi-Core Fibers) 및 SDM 기술을 활용해 기존 SMF(Single Mode Fibers)의 용량 한계를 극복하고 주파수 슬롯의 수를 최소화하는 기술이 주목 받고 있다.[38]

35) Cao, Y. et al. (2022)
36) Cao, Y. et al. (2019)
37) Zhao, Y. et al. (2018)
38) Moghaddam, E. E. et al. (2021)

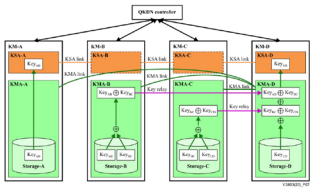
그림 II-1-7 양자키 전달 방안



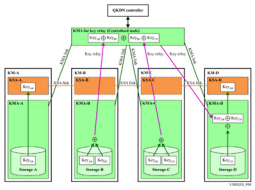
(a) key relay from point to point (case 1)



(b) key relay from point to point (case 2)



(c) key relay with XORs uniformly processed at destination node



(d) key relay with XORs collected at one centralized node

※ ITU-T Y3803 (2020)

한편, 양자 키 분배 네트워크에서 고유 자원인 양자키는 핵심 자원이기 때문에 효율적인 양자키 할당을 위한 다양한 연구가 추진 중에 있다. 대표적으로, 양자키를 할당함에 있어 보안 요구 사항을 적시에 충족하기 위한 KoD 기술이나 가상 광 네트워크(Virtualized Optical Network, VON), 수동 광 네트워크(Passive Optical Network, PON), 멀티캐스트 서비스를 보호하기 위한 양자키 할당 방안도 고안되었다.

④ 키 전달(Key Relay) 및 라우팅(Routing)

QKD는 단대단 양자 키 분배 기술이기 때문에 QKD 노드 사이에 직접적인 QKD 채널이 없을 경우, 네트워크 단위의 양자 키 분배를 위해서는 임의의 두 노드 간의 양자키 전달이 요구된다. 하지만 양자 특성에 의하여 보호되는 QKD 간 양자 키 분배와 달리 양자 키 분배 네트워크에서의 양자 키 분배는 디지털 영역에서 이뤄지기 때문에 암호학적으로 안전하다고 증명된 일회성 패드(One-Time Pad, OTP) 기반의 양자키 전달이 이뤄져야 한다.

ITU-T Y.3803에서는 Y.3800 양자 키 분배 네트워크 계층 구조 및 참조 모델 하에 양자키를 전달하는 방법으로 출발지부터 목적지까지 양자키를 단대단 방식으로 연속적으로 전달하는 방식, KMA(Key Management Agent) 링크를 이웃 노드와 연결하지 않고 목적지 KMA와 연결하는 방식, 양자키 릴레이를 위한 KMA를 중앙 노드에 두는 방식 등을 제안하였다.

한편, 네트워크 단위의 양자 키 분배를 위한 양자키 관리 시스템이 별도로 존재하지 않는 경우 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기(Trusted Repeater, Trusted Node, 이하 신뢰중계기) 기반 양자 키 분배 네트워크 구성 및 양자키 전달을 위한 라우팅 프로토콜이 요구된다. 이와 관련하여 기 구축된 미국, 유럽, 일본, 중국 등의 양자 키 분배 네트워크에서는 최단 경로 우선 프로토콜(Open Shortest

Path First, OSPF)을 기반으로 양자 키 분배 네트워크의 요구사항 및 특성을 반영하여 적용한 바 있다.[39]

⑤ 서비스 연속성(Service Continuity)

일반적으로 단대단 QKD 시스템에서 달성 가능한 양자키 생성 속도는 QKD 프로토콜 및 거리에 따라 상이하겠지만 매우 낮기 때문에 충분한 양자키 암호화 서비스를 제공하기에 한계가 있다.[40] 이에 따라, 희소한 양자키 자원을 효율적으로 활용해 양자키 암호화 서비스의 연속성을 보장하기 위한 키 풀링(Key Pooling) 기술이 연구되었다.

양자키 암호화 서비스의 연속성을 보장하기 위한 양자키 풀(Quantum Key Pool, QKP)은 각 QKD 도메인을 담당하는 QKMS에 관리되며, 불법적인 수단으로 접근 불가능하도록 물리적인 보안 경계 하에 보호되어야 한다. 또한 상응하는 타 도메인의 QKP과 동기화가 유지되어야 한다. 그리고 QKP에 저장되는 양자키의 생성, 저장, 중계, 공급, 파기 등 생애주기가 엄밀하게 관리되어야 한다. 이에 따라, QKP 관리 및 모니터링을 위한 다양한 키 풀링 기술이 제안된 바 있다.[41]

양자키 암호화 서비스 연속성을 보장하기 위한 또 다른 주요 이슈는 양자암호통신망 보호와 복구이다. 양자암호통신망을 구성하는 노드 및 채널 등의 물리적인 인프라에 장애가 발생하더라도 양자 키 분배 네트워크가 중단 없이 정상적으로 운영되어야 하며 제공 중인 서비스에 영향을 주어서는 안 된다. 이와 관련하여 양자 키 분배 네트워크를 다중 경로로 구성하고 임의의 두 노드 간의 일반 경로 외에 보호 경로와 복구 경로를 선 지정하고 필요에 따라 선택하는 체계가 고안되었다.[42] 또한 양자암호통신망 장애에 대응하기 위하여 양자 키 분배 네트워크의 채널 오류 원인 및 외부 공격에 따른 변화 등을 사전 분석하여 활용하는 기술에 대한 연구도 수행 중에 있다.[43]

⑥ 비용 최적화(Cost Optimization)

양자암호통신망을 구축하고 운영함에 있어 주요 진입 장벽 중 하나는 많은 비용이 소요되는 QKD 장비와 이들을 연결하는 다크 파이버다. 특히 QKD 백본 네트워크 구축은 규모가 크고 고려해야 할 사항이 다양하기 때문에 비용 최적화가 더욱 요구된다.

QKD 백본 네트워크가 신뢰중계기 기반으로 구축되는 모델의 경우 중계기를 어떻게 배치하는지에 따라 QKD 성능과 비용이 상이해진다. 이에 따라, 최소의 비용으로 양자암호통신망 사용자의 성능 요구사항을 충족하기 위한 중계기 노드 및 채널 배치 최적화 기술에 대한 연구가 추진되었다.[44] 또한 최

39) Mehic, M. et al. (2020)
40) Boaron, A. et al. (2018)
41) Maeda, W. et al. (2009)
42) Wang, H. et al. (2019)
43) Hugues-Salas, E. et al. (2019)
44) Alleaume, R. et al. (2009)

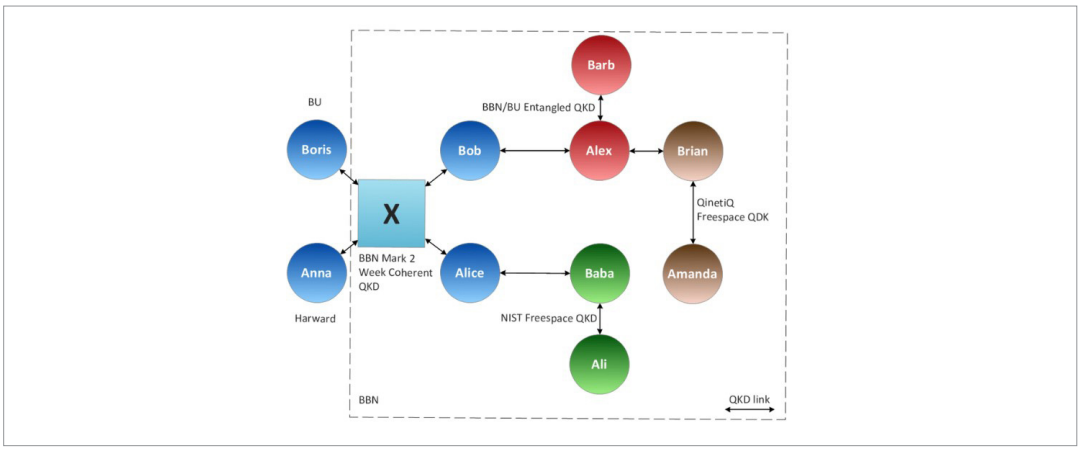
근에는 신뢰중계기와 비신뢰 노드가 함께 포함된 양자암호통신망 환경을 상정하여 양자 키 분배 네트워크의 최적화 배치 기술에 관한 연구가 수행되기도 하였다.[45] 한편, 채널 다중화 기술 기반의 양자암호통신망 환경을 상정하고 QKD 노드 트랜시버, 네트워킹 장비, 다중화 채널 비용 등을 대상으로 양자 키 분배 네트워크 배치 최적화 기술 연구 또한 추진된 바 있다.[46]

(2) 구축 사례

① DARPA 양자 키 분배 네트워크

DARPA 양자 키 분배 네트워크는 세계 최초의 양자 키 분배 네트워크로 2002년 12월 BBN 테크놀로지스와 하버드, 보스턴 대학교 연구진에 의해 공개되었다. DARPA는 하버드 대학교와 보스턴 대학교 사이의 광 스위치를 통하여 구성되었으며 최대 거리 29km, 최대 양자키 생성 속도는 400bps이다.[47]

그림 II-1-8 DARPA QKD 네트워크 구성도



※ Mehic, M. et al. (2020)

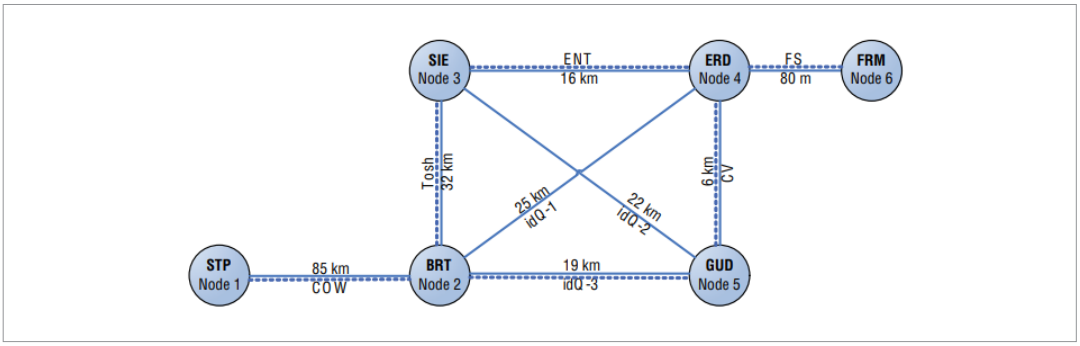
DARPA는 QKD 시스템 간의 거리 한계를 극복하기 위하여 신뢰중계기와 스위칭 방식을 모두 활용하여 양자 키 분배 네트워크를 구축하였으며 키 중계기 프로토콜을 자체 개발하여 사용하였다. 또한 양자 키 분배 네트워크에서의 양자 키분배 생성 암호키 전달을 위하여 OSPF 프로토콜을 수정하여 활용하였다. 핵심 아이디어는 각 노드별 인접 노드와 특성 수의 비트를 교환하여 교환 비율과 교환된 총 비트 수를 측정하고 이를 OSPF 프로토콜 가중치에 반영하는 일이다.

45) Cao, Y. et al. (2021)
46) Cao, Y. et al. (2019)
47) Elliott, C. et al. (2005)

② Secure Communication based on Quantum Cryptography(SECOQC) 양자 키 분배 네트워크

SECOQC 양자 키 분배 네트워크는 2004년에 유럽 위원회(European Commission)의 FP6 프로젝트로 11개 유럽 연합 국가, 러시아, 스위스의 41개 연구 그룹 및 산업 파트너들이 참여했다. SECOQC 프로젝트의 주요 목표는 QKD 네트워크 프로토콜의 보안, 설계 및 아키텍처, 통신 프로토콜, 구현, 데모 및 테스트 운영을 포함하여 QKD 네트워크 문제를 체계적으로 정리하는 것이다.

그림 II-1-9 SECOQC 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Peev, M. et al. (2009)

SECOQC는 신뢰중계기 기반 양자 키 분배 네트워크를 구축, Hop-by-Hop 메시지 전송 방식을 채택하였다. 양자 키 분배 네트워크에서의 양자키 전달을 위하여 OSPFv2 프로토콜을 수정하여 활용하였다. SECOQC의 라우팅 프로토콜과 기존 OSPFv2와의 주요한 차이는 단일 최단 경로에 중점을 둔 OSPFv2와 달리 네트워크의 부하 분산과 보호 및 복구 등의 요구사항을 충족하기 위하여 다중 경로를 고려한 점이다.[48)]

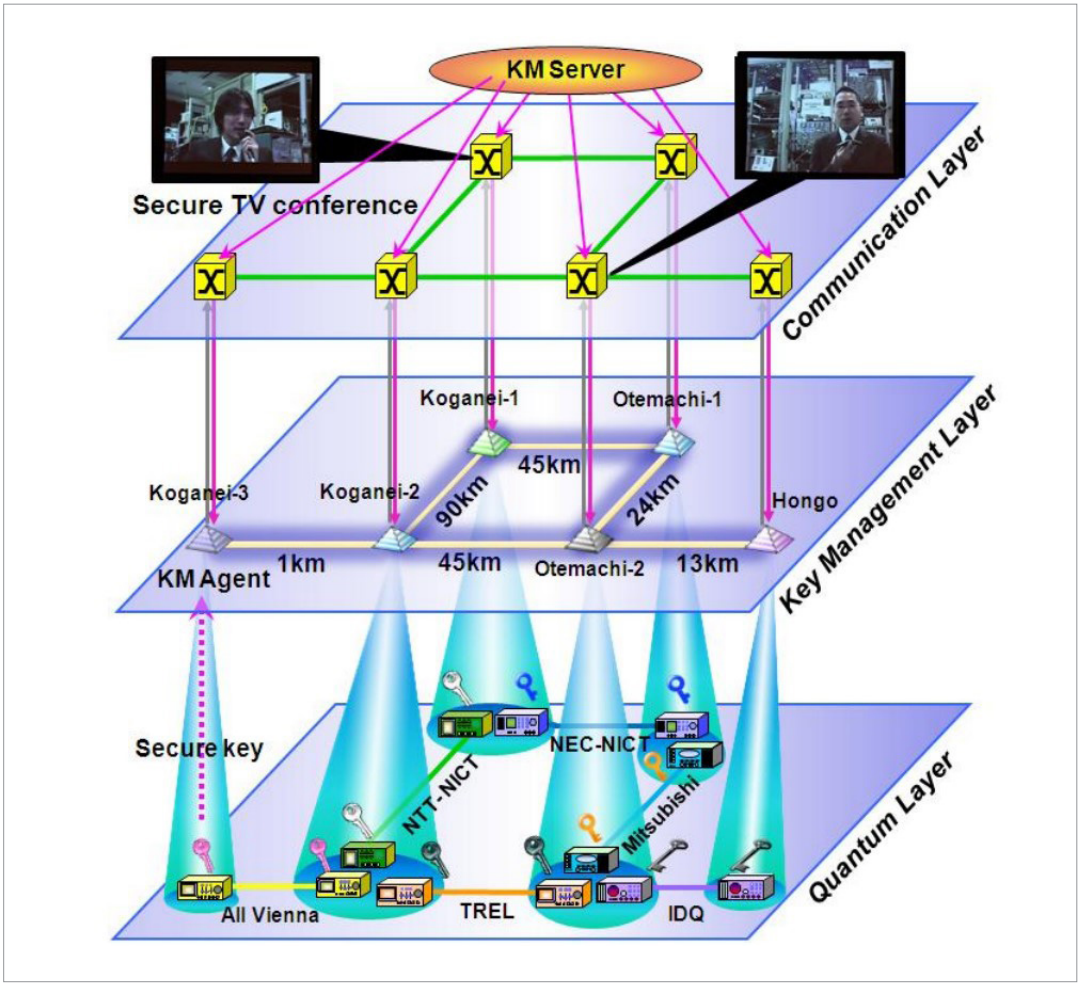
③ Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크

Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크는 2010년에 일본과 유럽 연합의 9개 기관이 참여한 NICT가 추진하는 Japan Giga Bit Network 2 Plus 프로젝트 일환으로 추진된 테스트베드 네트워크이다.[49)]

Tokyo UQCC는 SECOQC와 유사한 3-layer 구조를 사용하여 점대점 통신 백본망 형태로 구성하였다. 그러나 기존 양자 키 분배 네트워크는 달리 중앙 집중식 관리를 위하여 양자키 관리 서버(KMS)를 처음으로 사용하였으며 KMS를 활용하여 양자키를 저장하고 망 운영 관리 데이터를 수집하였다.

48) Peev, M. et al. (2009)
49) Sasaki, M. et al. (2011)

그림 II-1-10 Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Sasaki, M. et al. (2011)

④ 중국 위성-광섬유 통합 광대역 양자 키 분배 네트워크

중국에서는 광섬유 기반 베이징~상하이 간 백본 양자 키 분배 네트워크, 허페이/지난/베이징/상하이 도시 내의 Metropolitan 규모 양자 키 분배 네트워크에 위성 네트워크를 통합한 총 4,600km 규모의 QKD 네트워크를 구축하여 양자 암호키 전달 실험에 성공하였다.[50)]

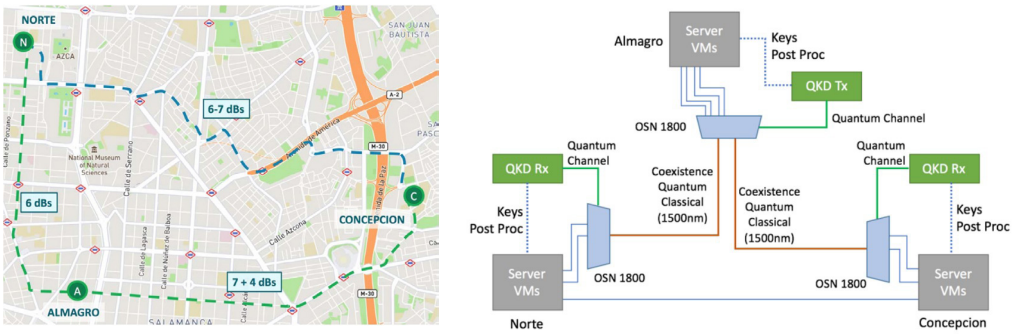
중국 위성-광섬유 통합 광대역 양자 키 분배 네트워크는 5개 계층(Application, Cassical Logical, Classical Physical, Quantum Logical, Quantum Physical)으로 네트워크를 구성하였다. 광섬유 구간 양자 키 분배 네트워크의 라우팅을 위하여 중앙 제어 서버를 두고 각 네트워크 노드에 대한 라우팅 테이블을 관리하였으며, 클라이언트 서버 구조를 활용하여 채널 효율성을 높이고 사용자 요구(On-Demand)에 따른 양자 키분배 생성 암호키를 제공하였다.

50) Yin, J. et al. (2017)

⑤ Madrid 양자 키 분배 네트워크

스페인 Madrid 양자 키 분배 네트워크는 최초로 구축된 SDN 기반 양자 키 분배 네트워크이다. 해당 네트워크는 SDN 기술을 사용하여 양자 및 클래식 채널 간에 물리적 및 논리적 인프라를 공유하는 양자-고전 네트워크를 생성하고 시연함으로써 현재 네트워크 사업자 인프라에서 QKD 시스템의 통합 가능성을 보여주었다.[51] Madrid 양자 키 분배 네트워크는 ETSI 표준에 따른 3 계층(QKD 계층, 양자 키 관리 계층, 서비스 계층) 구조에 따라 구성되었으며 네트워크에서 사용되는 SDN 지원 QKD 노드의 추상화 모델은 ETSI GS QKD 015 표준을 채택하였다.

그림 II-1-11 Madrid 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Aguado, A. et al. (2019)

(3) 적용 분야

① 금융 산업

금융 산업은 자본주의 사회에서 매우 중요한 거래 및 개인 정보를 취급한다. 이에 따라, 다양한 양자 키 분배 네트워크에서 금융 산업을 주요 적용 분야로 보고 있다. 가령, 중국에서는 기 구축된 양자 키 분배 네트워크를 기반으로 많은 중국 은행이 QKD 보안 데이터 전송과 기업 사용자를 위한 온라인 뱅킹 및 거래를 구현하였다. 또한 2018년에 시작된 스타트업 퀀텀 엑스체인지(Quantum Xchange)는 미국 최초의 상용 양자 통신망 파이오(Phio)를 발표하였다. Phio는 월스트리트의 금융 시장과 뉴저지의 데이터 센터를 연결하는 링크를 포함하여 워싱턴 DC 및 뉴욕시에서 운영하는 양자 키 분배 네트워크이다.[52] 스위스의 금융 기관도 재난 복구 목적의 네트워크 보안을 위해 상용 QKD 시스템을 사용하였으며, 스위스의 중요한 금융 거래를 보호하기 위해 IPsec 내에서 QKD를 사용하는 시나리오를 공개하기도 하였다.[53]

51) Aguado, A. et al. (2019)

52) https://www.idquantique.com/quantum-xchange-and-id-quantique-make-ultra-secure-quantum -networks-a-reality-for-leading-us-industries/

53) Ghernaouti-Hélie, S. & Sfaxi, M. A. (2005)

② 정부 및 국방

정부와 국방 기관의 기밀 데이터는 장기간 보호되어야 하는 등 엄밀한 보안 요구사항을 지닌다. 양자 키 분배 네트워크는 이러한 정부 및 국방 기관의 보안 요구사항을 보장하고 데이터 주권을 확립하기 위하여 적용될 수 있다. 가령, 스위스 정부는 2007년 총선 개표 전용선 확보를 위해 양자 키 분배 네트워크를 적용하였으며,[54] 호주 수도 캔버라에서는 정부 기관 간 통신 보안을 확보하기 위하여 양자 키 분배 네트워크를 구현 중에 있다. 또한 Quantum Xchange는 미국 기관 간의 국가 보안 통신을 암호화하기 위한 양자 키 분배 네트워크를 제안하기도 하였다.

③ 클라우드 및 데이터 센터

점점 더 많은 조직에서 클라우드와 데이터 센터를 사용하여 데이터를 백업, 저장 및 복구함에 따라 데이터 개인 정보 보호 및 보안을 보장하는 것이 중요해지고 있다. 기존 보안 솔루션이 양자컴퓨팅이 제기하는 위협에 취약해짐을 감안할 때 양자 키 분배 네트워크는 클라우드 데이터 보호 및 데이터 센터 상호 연결의 보안을 강화하는 데 적용될 수 있다. 가령, 네덜란드에서는 헤이그와 로테르담에 있는 KPN 데이터 센터 간의 종단 간 양자 키 분배 네트워크를 구축하고 데이터 전송을 보호함을 입증한 바 있다.[55] 중국의 Beijing-Shanghai QKD 네트워크가 베이징과 상하이 간의 데이터 센터 백업을 보호하는 데 사용되기도 하였다.[56] 또한 기업 클라우드 보안 애플리케이션 분야에서도 Acronis 및 Alibaba와 같은 여러 회사도 퀀텀 세이프 암호화 기술을 클라우드 데이터 보호에 적용하고 있다.

④ 국가 기반 시설

에너지, 운송 및 통신과 같은 국가 기반 시설은 사회를 뒷받침하는 필수 서비스를 지원하며, 해당 인프라에 가해지는 위협은 국가 및 기업 서비스에 지장을 주고 큰 경제적 피해를 초래할 수 있다. 양자 키 분배 네트워크는 이러한 국가 기반 시설 인프라의 데이터 보호 및 기밀성을 제공하기 위하여 활용될 수 있다. 가령, 중국의 State Grid Corp, Oak Ridge, Los Alamos National Labs 등의 기관에서는 에너지 그리드 보호를 위한 양자 키 분배 네트워크 적용을 연구 중이며, Quantum Xchange는 미국의 중요 기반 시설을 보호하고 침입 탐지를 위한 양자 키 분배 네트워크를 제안하기도 하였다. 한편, 전 세계의 일부 통신 사업자 및 서비스 제공업체 (예: Telefónica, China Telecom, British Telecom 등)는 통신 네트워크를 통한 데이터 전송을 보호하기 위해 양자 키 분배 네트워크를 기존 광섬유 인프라와 통합하는 연구를 수행 중에 있다.

54) https://www.idquantique.com/idq-celebrates-10-year-anniversary-of-the-worlds-first-real-life -quantum-cryptography-installation/

55) https://www.overons.kpn/nieuws/en/kpn-to-implement-quantum-encrypted-connection-qkd

56) Zhang, Q. et al. (2019)

⑤ 의료

의료 기관은 환자 개인 정보 및 의료 기록과 같은 민감 정보를 다루기 때문에 매우 안정적인 네트워크가 필요한데 이에 양자 키 분배 네트워크가 적절한 대안이 될 수 있다. 가령, Toshiba와 ToMMo는 양자 키 분배 네트워크를 통하여 확보한 게놈 염기서열 데이터의 실시간 전송을 성공적으로 입증함으로써 QKD가 유전체 의학 분야에서 실제 적용될 수 있음을 보였으며,[57] 평생 보호되어야 하는 개인 의료 정보를 위하여 데이터 저장 수명이 탁월한 QKD 기반 저장 시스템이 제시되기도 하였다.[58]

2. 무선 양자 키 분배

가. 위성 양자 키 분배

(1) 기술 동향

무선 양자 키 분배에 대한 기술은 장거리 양자 키 분배에 대한 연구의 결실이다. 1989년, 처음으로 광학용 테이블 위에서 31cm 거리의 양자 키 분배를 구현[59]한 이래로 장거리 구현은 반드시 해결해야 하는 과제였다. 단대단 통신 사이 광채널에서 발생하는 광자 손실은 길이에 따라 심각하게 증가함에도 양자복제불가 이론에 제한되어 고전 통신에서처럼 양자 신호를 증폭할 수 없으므로 안전한 양자 키 분배는 수백 km 거리에 제한된다. 이러한 거리 제한을 극복하기 위한 해결책 중 하나로 양자얽힘 교환, 양자 순수화, 양자 메모리 등 차세대 양자 기술의 종합체인 양자중계기를 도입하는 것이나 현재는 실험실 수준 기술로 실제 기술로 활용되기까지는 적지 않은 연구와 시간이 필요하다. 반면 광채널이 아닌 자유공간, 특히 위성을 이용한 양자 키 분배는 양자중계기 없이도 수백 km 거리 제한을 벗어난 장거리 통신이 가능하다. 위성 양자 키 분배에서 위성과 지상국 사이의 거리 중 주요 광자 손실이 발생하는 구간인 대기권은 10km 내외에 불과하고 그 외 대부분의 구간이 비어있는 우주공간으로 광자 손실이 거의 발생하지 않으므로 국가의 경계를 넘어선 장거리 구현이 가능하다. 따라서 잡음의 영향을 받는 10km 내외의 대기권에서 안정적으로 광자를 전송하고 수신하는 기술을 개발하는 것이 위성 양자 키 분배의 핵심 과제이다. 다행히도 이 기술은 2004년, 대기권 내 13km 거리에서 양자얽힘 상태를 안정적으로 분배하는 소기의 목적을 달성[60] 한 이래로 꾸준한 연구가 축적되어 상당한 기술 수준에 다다른 것으로 평가된다.

57) https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/20/2001-01.html
58) Sasaki, M. (2018)
59) Bennett, C. H. & Brassard, G. (1989)
60) Peng, C.-Z. et al. (2005)

(2) 연구 동향

2016년 8월 16일, 세계 최초의 양자 전용 위성인 중국의 묵자호(Micius)가 주취안 위성발사센터에서 성공적으로 발사하여 성공하면서 위성 양자통신의 시대가 열렸다. 묵자호는 500km 상공을 선회하며 싱룽에 위치한 지상국과 1,200km 거리에서 양자 키 분배를 시연하였다.[61] 이 위성을 이용하여 2019년 9월에는 베이징에서 산둥성 지난과 안후이성 허페이를 거쳐 상하이를 연결하는 2,000km 거리의 양자통신 네트워크에 성공한다. 이어 2018년에는 허베이성 싱룽 기지국과 비엔나 그라츠 기지국이 묵자호를 이용하여 양자 키 분배로 75분 동안 화상 회의를 진행하였다. 2021년에는 지상의 광섬유 링크들과 양자 위성을 조합하여 4,600km의 양자암호통신에 성공한다. 중국은 위성을 이용한 양자통신을 연구에만 그치지 않고 국가 기간망에 도입하는 계획을 세웠다. 실제 2021년에는 에너지 분야에 양자통신 시스템을 적용하고 묵자호를 활용하여 대만의 푸젠성과 베이징의 국가비상지휘센터를 연결, 각종 해킹의 위협 하에서도 운영자가 2,200km 거리의 푸젠성 전력망을 안전하게 통제하는 모의 훈련에 성공하였다. 중국은 현재 양자기술 패권을 차지하기 위해 양자통신을 포함한 양자과학의 육성에 전력투구를 하는 모양새다.

중국의 양자위성에 자극받은 주요국들은 저마다 위성을 이용한 양자 키 분배 계획을 세워 충실히 추진 중이다. 그 주요 동향은 다음과 같다.

① 2016년 일본의 NICT는 고도 628km를 주회하는 저궤도위성과 NICT 코가네이 본부에 건조한 지상국 사이에서 위성-지상국 간에서의 양자통신의 실증실험을 했다. 사용된 위성 SOCRATES는 크기가 약 50cm^3, 질량이 약 50kg정도의 초소형 위성이다. 최근 일본은 연구개발비 5억 엔을 별도로 편성하여 양자통신 전용위성 개발을 추진 중이다.

② 2016년 싱가포르는 양자통신을 위한 초소형 위성인 S-fifteen space system을 발사하였다.

③ 2017년 3월, 유럽우주기관이 주체로 되어 위성광통신의 국제프로젝트 ScyLight를 설립하였다. 14 개 국가가 참가하는 이 프로젝트에서 위성 양자 암호기술의 연구개발 및 시장개척에 장기적으로 대처할 계획을 담았다

④ 2017년 싱가포르 국립대학의 양자기술센터에서 분할한 SpeQtral은 위성 방식의 QKD 솔루션을 개발하고 있다. 대륙 간 장거리 양자암호통신에 적용하기 위해 도시바와 협업 중이다.

⑤ 2019년 시작된 Euro QCI에서 27개 EU 국가가 참여하여 위성을 이용한 양자통신 네트워크 구축을 계획하여 진행 중이다.

⑥ 2021년 영국에 기반을 둔 Arqit은 2023년, 미국 국방 대기업 노스롭 그루먼과 영국 통신 업체 BT의 협력 아래 영국의 스페이스포트 콘월에서 두 개의 양자 키 분배 위성 발사 계획을 공개하였다.

61) Sheng-Kai Liao. et al. (2017)

⑦ 2021년 5월 캐나다와 영국의 연구팀은 2022년 이후 양자암호 및 과학 위성 QEYSSat에서 테스트할 실험적인 QKD 페이로드를 개발할 계획을 발표하였다. 이 계획은 대서양을 횡단하여 지상간에 양자암호키를 전송하는 것을 목표로 한다.

⑧ 2022년 중반부터 유럽에서는 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)을 중심으로 유럽위원회와 유럽 내 20개 이상의 관련 기업들이 연합하여 우주-지상 QKD 구현을 위한 2,000억원 규모의 Eagle-1 프로젝트가 시작되었다. 이 결과는 중장기적으로 EuroQCI를 지원한다.

⑨ 2022년 7월 27일에는 중국 양자통신 초기 위성인 묵자호(2016. 8.)의 여러 식별된 문제를 해결-소형화, 경량화, 향상된 추적 시스템, 운용시간 확대-한 Jinan-1를 발사하여 운영되고 있다.

⑩ 2023년 1월 이스라엘의 텔아비브 대학 나노위성 센터에서 광학과 양자 기술에 기반한 위성 통신 채널을 구성하기 위해 TAU-SAT3를 목적한 궤도에 올려 차후에 수백 km의 양자통신 구현을 목적으로 한 부가적인 연구들이 진행되고 있다.

(3) 적용 분야

위성을 이용한 양자 키 분배 기술은 연구성과를 넘어 온전한 실증 기술이다. 광섬유를 이용하는 경우 수백 km에 한정된 양자 키 분배 거리를 그 이상으로 확장하는 장거리 양자 키 분배 기술의 확실한 대안인 동시에 미래 네트워크 기술로 주목받는 양자 인터넷의 핵심 요소로 활용될 것이다.

광섬유를 이용한 양자 키 분배 기술은 연구가 지속적으로 진행 중인 양자중계기의 활용으로 그 거리를 원하는대로 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 대양을 넘어 대륙 간 통신에 광섬유의 물리적 특성은 근본적인 한계로 작용한다. 따라서 초장거리 양자 키 분배의 실현은 양자중계기가 상용화 된 시점에서도 여전히 양자 위성은 초장거리 양자통신의 필수요소이다.

네트워크 또는 인터넷 상에서 양자를 전송하는 양자 인터넷 기술은 장거리 통신을 바탕으로 구상된다. 따라서 위성 양자 키 분배를 구성하는 양자 위성의 핵심 요소기술들이 대부분 양자 인터넷에서도 사용된다.

위성 양자 키 분배의 미래는 밝다. 양자 키 분배에서 장거리 구현은 반드시 해결해야 할 숙제였고 여기에 양자 위성은 가장 현실적이고 확실하게 그 해결책임을 증명하였다. 앞으로는 양자통신과 양자컴퓨팅을 연결하는 양자인터넷의 핵심 기술로 위성 양자 키 분배가 활용될 것으로 예상된다.

나. 드론 양자 키 분배

(1) 기술 동향

드론에 양자 키 분배 장치가 탑재되기 위해서는 경량화가 최우선 과제이다. 여기에 드론은 대기권에서 동작하므로 날씨로 인한 드론의 동작 환경이 수시로 변하는 조건과 자유공간에서의 광자 손실을 최소화하기 위한 기술들이 집결되어야 한다. 이를 위해 광 지시 정밀도, 정밀 광수신, 정교한 추적 기술 등

이 균형적으로 적용되어야 한다. 양자 키 분배의 특성상 특정 드론은 그 역할이 정해지게 되는데 (양자의 송신단 또는 수신단) 드론 양자 키 분배 기술의 최고봉은 송·수신 드론을 이용한 완전 양자 키 분배 시스템의 구성이다.

(2) 연구 동향

드론을 이용한 양자 키 분배뿐 아니라 드론의 양자 교환 역할을 통해 양자 네트워크를 구성하는 실험들이 성과를 거두었다.[62) 63) 64)] 현재까지 드론을 이용한 양자 키 분배 실험들은 대부분 수십 미터의 통신 거리를 보인다.[65) 66)] 앞서 기술한 여러 어려움들로 인해 아직은 초보적 단계에 머물러 있으나 앞으로의 활용 분야가 많은 만큼 지속적인 연구가 이루어지고 있는 분야이다.

그림 II-1-12 드론을 이용한 양자 키 분배 실험



※ Free-Space Laser Communications XXXIII: 116780

(3) 적용 분야

드론을 이용한 양자통신은 앞서의 위성을 이용한 양자통신과 다르게 짧은 거리의 자유공간에서 양자를 송·수신하는 영역을 담당한다. 위성을 이용한 통신은 고비용이 요구되고 지상의 동적인 상황에 유연한 대처가 어려워 대안 통신 체계가 검토되어야 하는데 드론을 이용한 양자통신이 주요 해결책이다.

드론의 유연성은 사적이거나 비공개 성격의 네트워크 구성을 가능하게 한다. 따라서 군사적 목적의 감시 체계, 소규모 개인 네트워크 등에 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

62) M. Schirber (2021)
63) H.Y. Liu. et al. (2021)
64) L.D.F. de Parny. et al. (2022)
65) Samantha Isaac. et al. (2020)
66) Andrew Conrad. et al. (2021)

3. 양자난수생성기

(1) 기술 동향

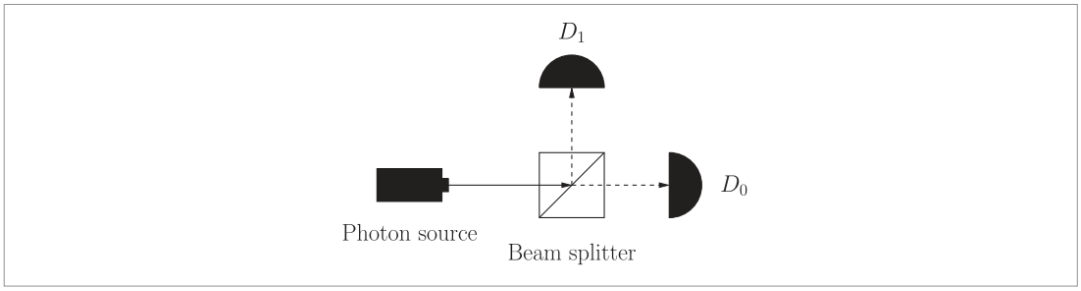
① 광학 양자난수생성기

양자 난수 생성기는 방사능, 전기 회로 시스템의 무작위성에 기반한 양자난수생성기, 광학 양자난수생성기 등 다양한 방식으로 구현되고 있다. 이 중 광학 양자난수생성기는 가장 다양한 방식으로 활발히 연구 개발이 이루어지고 있는 구현 방식 중 하나이다. 대표적인 구현 방식 중 하나인 경로 분기(Branching Path) 방식에서는 다음과 같은 양자 상태에 대한 측정 결과의 무작위성을 활용한다.

$$\frac{|1\rangle_1|0\rangle_2+|0\rangle_1|1\rangle_2}{\sqrt{2}}$$

위의 양자 상태에서 아래첨자 1, 2는 경로를 나타낸다. 결과적으로 위 상태는 $|1\rangle$, $|0\rangle$상태가 각각 1, 2 경로에 있는 경우와 2, 1 경로에 있는 경우의 중첩 상태라 할 수 있다. 위와 같은 상태는 빔 스플리터, 간섭계와 같은 광학 장치로 구현할 수 있다. 위 상태에서 광자를 측정할 경우 각 경로 당 광자가 측정될 확률은 1/2로 무작위하게 주어진다. 이 같은 방식의 양자난수생성기는 1994년 초기 구현 방법이 제안된 후[67] 그 구현 방식이 지속적으로 발전하였다. 최근에는 36시간 동안 2GB의 난수를 생성한 결과가 보고된 바 있다.[68] 경로 분기 방식 외에도, 레이저의 노이즈, 자연 방출(Spontaneous Emission)을 이용한 방식 등 다양한 방식의 광학 양자난수생성기가 제안되고 있다.

그림 II-1-13 빔 스플리터 기반 양자난수생성기 개요



※ Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin (2017)

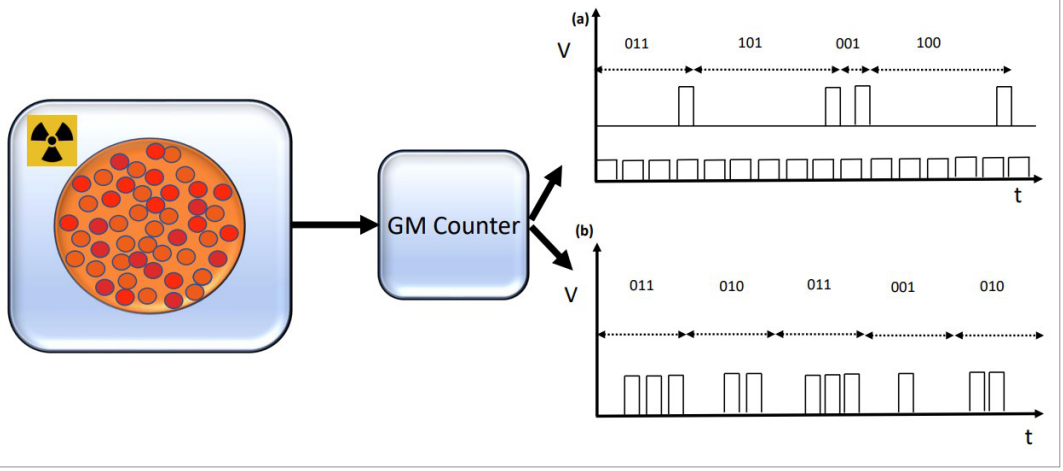
67) John Rarity et al. (1994)

68) Joakim Argillander et al. (2022)

② 비광학 양자난수생성기

비광학 양자난수생성기의 대표적 구현 방식으로, 방사성 붕괴(Radioactive Decay)를 이용한 방식과 전기 회로의 잡음을 이용한 방식이 있다. 방사성 붕괴의 난수성을 이용한 방식은 최초의 양자난수생성기 개발을 위해 활용되었던 방식이다. 이 방식에서는 정해진 시간 동안 방사성 물질에서 펄스가 방출될 확률의 무작위성을 활용한다. 방사성 물질에서 방출된 입자가 만든 펄스의 도달 시간을 디지털 난수로 변환하는 방식에는 다양한 방식이 제안된 바 있다.[69]

그림 II-1-14 방사선 붕괴 기반 양자난수 생성기 및 측정 방법



※ Vaisakh Mannalatha et al. (2022)

전기 회로 잡음을 이용한 양자 난수성 구현 방식에서 주로 활용한 방식 중 하나는 Zener Diode에 기반한 방식이다. 이 방식에서는 잡음으로 인한 전압 섭동(Voltage Perturbation)을 증폭하는 방식으로 난수를 생성한다. 예컨대, 섭동으로 인해 전압이 임계치를 넘으면 1을 기록하고 넘지 않으면 0을 기록하는 방식이 가능하다. Zener Diode를 활용한 방식 외에도 Electrical Shot Noise를 이용한 방식도 양자 난수 생성기를 구현하는 방법 중 하나로 활용되고 있다.

69) Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin. (2017)

(2) 연구 동향

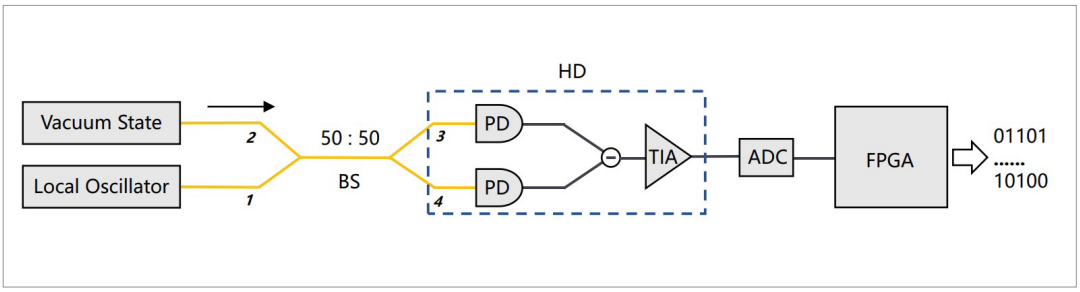
① 고속 양자 난수 생성기 구현

양자 난수 생성기 구현에 있어 가장 중요한 성능 요소 중 하나는 난수 생성 속도이다. 2020년에는 Cambridge 연구 그룹에서 고속 양자 난수 생성기 실험을 보고하였다. 이 실험에서 특기할 점은 고차원 양자 시스템을 활용하여 QRNG의 난수 생성 속도를 높인 점이다. 구현한 난수 생성기의 난수성 생성 속도는 24Mbps로 보고되었다. 2021년에는 USTC Jian Wei Pan 연구그룹에서 광학 칩 방식으로 기존보다 비약적으로 난수 생성 속도를 높인 실험 결과를 보고하였다. 해당 결과의 양자 난수 생성 속도는 18.8Gbps로 알려져 있다. 이 같이 높은 속도의 난수 생성률을 얻기 위하여 최적화된 양자 난수성 추출(Randomness Extraction) 방식이 활용되었다.

② 연속변수 기반 양자난수생성기

진공(vacuum) 기반 연속변수(CV)-QRNG는 진공 변동성의 양자 난수성을 샘플링하여 고속으로 난수를 생성하는 기술이다. 기존의 이산변수(DV) 양자난수생성기의 경우, 측정 확률이 낮은데, 이 기법은 연속변수의 경우 호모다인 검출 기법을 이용하면 측정 확률이 높아 고속으로 생성이 가능하다. 호모다인 검출기법으로 진공 상태의 직교 진폭을 측정하는데, 측정 결과는 가우시안 확률 함수를 따른다.

그림 II-1-15 진공기반 연속변수 기반 양자난수 생성기



※ Weinan Huang et al. (2020)

이 방식으로 얻은 모든 난수가 안전한 것은 아니므로, 양자 난수성 추출(Randomness Extraction) 등의 후처리를 이용하여 안전한 난수를 얻는다. 여기에서 추출 비율 결정은 시스템의 조건적 최소 엔트로피에 의하여 결정된다.

③ 기기 독립적 양자 난수성 확인

기기 독립적 양자난수성 확인 연구는 양자난수생성기의 안전성을 높이기 위한 연구 분야 중 하나이다. 기기 독립적 양자 암호 프로토콜에 관한 연구는 1998년 개념적 제안이 이루어진 후, 지속적으로 이

루어지고 있다.[70] 기기 독립적 양자난수생성기를 구현할 경우, 구현을 위해 사용된 기기를 신뢰할 필요 없이 난수성이 보장된다. 기기 독립적 양자난수성 확인을 위해서는 벨 테스트 실험 수행이 필수적이다. 2010년, CHSH 벨 부등식 테스트 실험을 활용한 최초의 양자난수성 확인 연구 결과가 보고되었다.[71] 이후 주어진 Hilbert 공간 차원에서 확인되는 양자난수성의 양을 이론적 최대치까지 높이기 위한 연구가 수행되었다. 2차원에서 두 큐비트 얽힘 상태를 활용할 경우, 확인 가능한 양자난수성의 이론적 최대치인 2Bit의 난수성을 기기 독립적 방식으로 확인할 수 있는 방법을 제안한 연구 결과가 보고된 바 있다.[72] 최근에는 SIC-POVM(Symmetric Informationally Complete POVM)이 존재하는 임의의 d차원에서 기기와 무관한 방식으로 $2\log_2 d$ 비트의 국소 양자난수성 확인 방법을 제안한 연구 결과가 보고되었다.[73]

④ 양자 컴퓨터에서의 양자난수생성기 구현

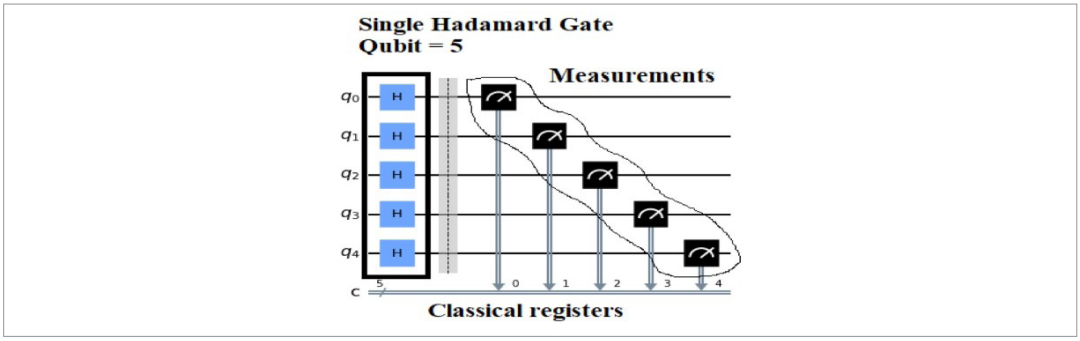
양자 컴퓨터에서는 양자 컴퓨터를 구성하는 요소들을 이용하여, 양자난수생성기를 구현할 수 있다. 이 방법으로 구현하면, 양자 컴퓨터를 이용하는 언어로 양자 난수를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.

여기에서 이용하는 원리는 간단하다. 양자 컴퓨터를 구성하는 게이트 중 하나가 '하다마드(Hadamard) 게이트'인데, 이 게이트는 $|0\rangle$인 상태를 중첩 상태로 변환시켜 주기 때문에, 이 후, 측정을 하게 되면 0과 1이 랜덤하게 얻어진다.

일반적으로 n개의 큐비트를 이용하면, n비트 난수를 생성할 수 있고, 하다마드 게이트를 홀수번 반복하여 적용할 수도 있다.

IBM에서는 IBM 양자컴퓨터를 클라우드로 이용하기 위한 툴킷인 Qiskit을 제공하고 있다. Qiskit을 이용하여, IBM 클라우드에서 양자난수생성기를 프로그램하고 테스트하는 방법들이 제시되고 있다.[74]

그림 II-1-16 Hadamard 게이트를 이용한 양자 난수 생성 방법



※ Vaishnavi Kumar et al. (2022)

70) Dominic Mayers & Andrew Yao (1998)
71) Stefano Pironio et al. (2010)
72) Ole Andersson et al. (2018)
73) Armin Tavakoli et al. (2021)
74) Vaishnavi Kumar, et al. (2022)

(3) 적용 분야

QRNG는 양자적으로 안전한 난수를 생성하는 방법이지만, 생성된 난수가 양자적 성질을 가지고 있는 것은 아니다.

양자 난수 생성기는 다양한 암호화 프로토콜에서 활용될 수 있다. 가장 널리 활용되는 QKD 프로토콜인 BB84 프로토콜에서 측정 기저 선택 시 양자난수생성기가 활용되고 있다. 또한 차세대 양자 암호 프로토콜 구현 방식 중 하나인 기기 무관 양자 암호 프로토콜 구현을 위해서는 벨 테스트 실험이 필수적이며, 이를 위해서도 양자난수생성기가 필수적으로 활용된다.

이외에도 안전한 난수생성기라고 볼 수 있는 IPSec, TSL와 같은 암호화 프로토콜은 기존 보안 방법으로써 현대 암호체계에서 필수적이다. 기존 보안 방법인 IPSec, TLS와 같은 암호화 프로토콜, 현대 암호체계에서 안전한 난수생성기는 필수적이다. 물리적 디바이스를 기반으로 다른 난수생성기들도 많이 활용되고 있지만, 양자난수생성기는 생성되는 난수 예측 불가능성 등이 양자역학으로 보장되는 장점을 가지고 있어, 모바일, 자동차, IoT 기기 보안 등 기존 보안 영역에도 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

4. 양자중계기

(1) 기술 동향

일찍부터 양자 기술에 많은 투자를 해온 해외 국가들은 양자중계기 기술도 상당히 앞서 있다. 메모리가 없는 양자중계기는 국내 동향에서 언급하였다시피 양자 메모리가 있는 상황에 도달하기 위한 중간 단계 기술에 가깝다. 이러한 이유로 현재 앞선 양자 기술을 보유하고 있는 국가들에서는 메모리 없는 양자중계기 기술 보다는 양자 컴퓨터 및 양자 인터넷 기술 확보를 위한 양자 메모리 기술 개발에 더 집중하고 있다. 다만 얽힘의 장거리 분배 및 얽힘 교환 등은 메모리가 없는 경우에도 필요하고 구현 가능한 기술이기 때문에 이러한 연구들도 개별적으로 진행되고 있다. 오스트리아 Rupert Ursin 그룹은 이탈리아 Sicily 섬과 Malta 섬 사이에 연결된 해저 광케이블(96km 이상)을 이용해 양자얽힘 분배 실험 성공하였다.[75] 또한 중국의 J.-W. Pan 그룹에서는 12.5km 떨어진 두 지점 사이에서 총 길이 103km의 광통신망을 이용하여 시간-빈 양자얽힘 교환 실험에 성공하였다.[76] 이 실험에서 Alice와 Charlie 사이 14.7km, Bob과 Charlie 사이 11.1km 구간은 실용 광통신망을 이용하였고, 나머지 77km는 연구실 내 광섬유 스풀을 이용하였다.

장거리 양자 통신 뿐 아니라 양자컴퓨터에도 응용될 수 있는 양자 메모리의 경우 다양한 국가에서 많은 기술 확보가 진행되고 있다. 예를 들어, 미국 Maryland 대학의 Monroe 교수 연구팀은 Yb이온을

75) Soren Wengerowsky et al. (2019)

76) Qi-Chao Sun et al. (2017)

양자 메모리로 사용하여 1m 떨어진 거리에서 평균 90%의 신뢰도로 1개 큐비트의 제한적인 형태의 양자정보 전송을 구현(2009)했다. 또 1m 떨어진 2개의 노드 사이의 얽힘 신뢰도 0.78을 가진 얽힌 상태를 초당 4.5개씩 생성하고 얽힌 상태를 1초 이상 보존(2015)에 성공하였다. 미국 Caltech의 Jeff Kimble 교수 연구팀은 중성원자 앙상블 기반의 양자 메모리 사이의 얽힘을 실험적으로 구현(2007) 하였다. 캐나다 Calgary대학 Tittel 교수 연구팀은 얽힘 광자쌍의 광자를 Er-doped 광섬유를 양자메모리로 활용하여 저장할 수 있음을 처음으로 실험적으로 선보였다(2015).

(2) 연구 동향

유럽, 미국, 중국의 양자통신 연구는 다양한 물리적 시스템의 양자메모리 기술이 포함된 양자중계기 실현과 수년 내 도시 간 양자중계기 네트워크 구현에 집중 투자하고 있다. 네덜란드 Delft 대학의 Hanson 교수 연구팀에 의해 다이아몬드 NV 센터를 양자메모리로 이용한 양자중계기 실용 가능성 검증 및 양자 원격 이동을 구현(2014)하고 두 양자 노드 사이의 양자 얽힘 실용성(Quantum Link Efficiency 〉 1) 검증(2018) 및 다중 노드 간 양자 얽힘을 구현(2021) 하였다. 중국 USTC의 경우 50km 광섬유로 연결된 2개의 중성원자 앙상블 기반의 양자 메모리간의 양자 얽힘을 실험적(신뢰도 72%, 얽힘 생성률 1.5 Hz)으로 구현 하였다 (2020). 영국 Oxford 대학교의 David Lucas 연구팀 연구진들은 Sr이온을 활용하여 초당 182개의 얽힘 상태를 생성하고 94%의 얽힘 상태 신뢰도를 달성(2020) 하였다. 중국 칭화대 김기환 교수 연구팀은 2021년에 Yb이온을 이용하여 960초 동안의 측정 결과의 exponential decay fit을 통해 양자 결맞음 시간이 5,500초인 실험 결과를 발표하였다. 독일 막스-플랑크 연구소의 Gerhard Rempe 교수 연구팀은 2021년에 2개의 Rb 중성 원자들 사이에 광자를 매개로 하여 88%의 신뢰도로 하나의 양자메모리에서 다른 양자메모리로 양자상태를 전달하는 연구를 진행 실험하였다.

네덜란드 Delft대학 Ronald Hanson 교수 연구팀은 2018년에는 두 양자 노드 사이 quantum link efficiency가 약 8에 가까움으로써 양자 얽힘의 실용성을 검증하였고, 2021년에는 다중 노드 간 양자 얽힘을 구현하였다. 미국 메릴랜드 대학 그룹은 공진기와 결합된 반도체 양자점을 이용하여 단일 광자 수준의 스핀-광자 인터페이스 구현이 가능함을 실험적으로 보였다(2020).

앞의 최신연구 동향에서 보는 것처럼 양자메모리의 대부분 연구결과는 양자메모리 효율을 높이는 것과 저장 시간을 증가시키는 연구에 집중하고 있다.

최근에는 공간적으로 33km 떨어진 두 개의 원자의 얽힘을 생성해내는 양자 메모리 실험이 H. Weinfurter 그룹에서 진행되었다.[77] 이 실험 결과가 고무적인 점은 양자 메모리에 쓰이는 두 개의 단일 원자들의 양자 상태들이 통신 파장 영역의 빛을 사용하여 장거리 얽힘이 되었다는 것이다. 즉, 미래 양자 메모리, 더 나아가서 양자 컴퓨터들 사이의 얽힘 생성을 통해 DI-QKD가 가능해지고 이는 양자 인터넷 시대의 보안성을 크게 향상 시킬 수 있다.

77) T. van Leent et al. (2022).

(3) 적용 분야

양자인터넷 환경에서 장거리 양자통신 및 얽힘 기반 양자 키 분배를 할 때 사용될 수 있고, 양자컴퓨터 구현의 핵심 기술로 활용될 수 있다.

5. 양자보안기술

가. 양자 인증/서명 기술

(1) 기술 동향

인증 및 전자서명은 양자인터넷에서 중요한 역할을 하는데, 현대 인증 및 전자서명 기술은 복잡도 기반의 안전성을 제공하기 때문에 양자컴퓨터 등 컴퓨팅의 발전에 따라 안전성이 저하된다. 양자 키 분배 기술이 1984년도에 개발되면서, 이를 이용한 양자 인증 및 양자 전자서명 기법이 1998년과 2001년에 처음 발표되었다.[78) 79)] 이 기법들은 현대암호와 달리 정보이론적 안전성을 양자역학법칙에 기반하여 제공하는 것이 특징이라고 할 수 있다.

처음에 제안된 양자 전자서명은 장기간 사용할 수 있는 양자메모리를 필요로 하여 구현이 어려웠기 때문에, 후속 연구들은 실험적으로 구현이 가능하고, 성능을 높이는 방향으로 진행되었다.

최근 연구들은 양자 전자서명을 구현하는 복잡도를 양자 키 분배 구현 수준으로 낮추는 결과들을 내고 있다. 양자 상태도 단일광자 소스 대신 디코이 방법을 적용하여 구현하면 된다. 양자 전자서명과 양자 키 분배의 구현은 많은 면에서 유사한데, 차이점은 양자 전자서명은 양자 키 분배와 달리 에러보정과 비밀증폭을 하지 않아도 된다는 것이다. 그리고, 2016년에는 양자 키 분배에서 필요로 했던 안전한 공개 채널이 필요로 하지 않는 방식의 실용적인 양자 전자서명이 발표되었다. 그리고 100km 정도 거리에서 실험실 수준으로 구현되는 결과와 측정기기무관 양자서명기법도 발표되었다. 2020년도에 들어서는 200km이상의 거리에서 실험실 수준의 실험결과도 발표되었다. 양자 인증은 초기에는 양자오류정정 기술로 발표되었는데, 이후에는 양자 키 분배, 양자비밀공유 프로토콜 등에서 사용되는 방법들을 이용하고 있다.

(2) 연구 동향

국외에서는 캐나다 Perimeter Institute, 영국 Heriot-Watt 대학 등에서 양자인증, 양자서명에 대한 이론 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 영국 Heriot-Watt 대학은 양자통신 허브기관의 하나로,

78) Miloslav Dusek et al. (1998)

79) Daniel Gottesman et al. (2001)

양자 디지털서명 기술을 실험적으로 구현한 바 있다.[80] 이들은 도시바 유럽 연구소와 함께 측정기기무관 기술을 적용한 실험까지 확장하여 연구를 수행하였다.[81]

중국 난징대학은 TF 양자디지털서명 기술을,[82] 서북대학(Northwest Univ.)에서는 디코이 적용 TF-QKD를 이용하여 TF-QDS 프로토콜을 개발하였다.[83] 중국 난징대학은 양자 디지털서명 구현실험을 280km에서 성공한 바 있다.[84]

2021년 발표된 보고서[85]에 따르면 양자 인증 및 서명과 직접 연계된 논문의 수는 2009년부터 2019년까지 10년 간 36건으로 확인된다. 양자 디지털 서명에서 서명이 메시지의 길이에 의존하거나 서명의 확인이 확률에 기반한 기술에 의존하는 프로토콜들이 다수로, 효율성이 떨어진다. 최근 양자 디지털 서명의 실험 결과 280km 거리를 달성하였다. 그러나 이 기술은 완전 양자 디지털 서명의 구현이 아닌 고전 전자 서명에 양자 키 분배 기술로 키를 분배하는 과정을 도입한 것으로 표명된 거리는 양자 키 분배 기술의 거리이다.

(3) 적용 분야

양자 인증 및 서명 기술은 우선 양자 키 분배 장치에 적용하여, 양자 키 분배 장치를 이용한 네트워크 구성에 활용될 수 있을 것이다.

미국 NSA(National Security Agency, 국가안보국)에서 양자 키 분배 장치가 국가기관에 도입될 때의 제약사항 중 하나로, 양자 키 분배 장치의 기능이 암호키 분배 기능에 국한되어, 다양한 보안기능을 제공하지 못한다고 발표하였다. 양자 인증 및 서명 기술의 적용을 통해 이러한 걸림돌을 해소하여 양자 키 분배 장치가 본격적으로 활용될 수 있는 기반을 제공할 수 있다. 또한, 현 인터넷을 이용한 데이터 송수신, 전자상거래의 보안에 암호기술이 핵심 역할을 하듯, 양자인터넷의 보안에는 양자를 이용한 양자암호기술이 핵심 역할을 할 수 있을 것이다.

나. 비밀분산

(1) 기술 동향

양자 비밀분산(Secret Sharing)은 양자 키 분배 기술 중 얽힘 쌍을 이용한 방법을 세 개 이상의 얽힘 상태로 확장한 기술이라고 볼 수 있다. 1998년에 M. Hillery, V. Bužek, A. Berthiaume에 의하여 비밀분산 방법으로 3개의 양자가 얽힌 상태인 GHZ(Greenberger–Horne–Zeilinger) 양자상태를 이

80) Patrick J. Clarke et al. (2012)
81) G. L. Roberts et al. (2017)
82) Chun-Hui Zhang et al. (2021)
83) Ming-Hui Zhang et al. (2022)
84) Hua-Jian Ding et al. (2020)
85) Ritajit Majumdar & Sanchari Das. (2021)

용하는 방법이 제안되었다.[86] 이 방법을 기반으로 Shamir, Blakey가 제안한 기본적인 비밀분산기법에 적용하여, 사용자 n명 중 k명 이상이 동의해야 암호키를 복구할 수 방법으로 확장되기도 하였다.[87] [88]

양자 비밀분산기법은 도청과 비정상 사용자에 대한 정보이론적 안전성을 제공하는데, 이때 안전성은 No-Cloning Theorem에 기반을 두고 있다. 현대암호의 비밀공유 기법은 도청에 대한 안전성을 제공하지 못한다. 실험적 구현은 2001년에 접어들어 양자 광학의 발전으로 이루어졌는데, 초기에는 GHZ 상태 구현은 어려워 2개 양자의 얽힘을 이용한 실험들이 이루어졌다. 현재는 GHZ 상태를 구현하는 기반 연구가 주로 이루어지고 있다.

비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 일정 수 이상의 사용자가 합의하는 경우 암호키를 복원할 수 있게 하는 기법이다. 가장 널리 알려진 것은 Shamir의 Secret Sharing Scheme이다.[89] 이 방식은 정보이론적 안전성을 제공하는 방식으로, 어느 한 사용자가 정보를 독점하지 못하게 하는 용도로 사용한다. 최근에는 다중 사용자가 암호키 전부를 모르는 상태에서 연산을 수행한 다음 일정 수 이상의 사용자가 합의하여, 연산의 최종값에 대한 정보를 복원하는 용도로 사용한다. 최근, 분산 작업의 필요성이 증가함에 따라 비밀분산 기법 및 이를 활용하는 기법들의 ISO/IEC 표준화가 추진되었거나, 추진 중에 있다.

(2) 연구 동향

양자 비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 모두가 합의하는 경우 복호화를 할 수 있게 하는 비밀분산을, 양자적으로 얽힘 큐비트를 활용하여 구현하는 기술이다. 다중 얽힘을 만들어야 하는 기술적인 어려움이 있어, 구현의 난도가 높은 편이다. 양자 비밀분산 이론은 뉴욕시립대학교에서 처음 제안되었으며,[90] 스위스 제네바대학에서 실험적으로 구현한 바 있다.[91]

3개의 큐비트로 구성된 GHZ State(편광 얽힘상태)를 A노드에서 생성하고, A에서 각각 772m, 686m 떨어진 노드 B, C에 자유 공간을 통해 3광자 양자얽힘상태를 분배하여 양자 비국소성(Nonlocality) 측정에 성공하였다. 베이징 양자정보과학 아카데미의 J. Wang과 그 공동연구그룹은, 실리콘 기반의 On Chip 환경에서 4-큐비트 GHZ 상태를 구현하고 양자얽힘 교환을 통하여 90%의 높은 충실도로 노드 간 양자얽힘을 집적 소자 상에서 구현하였다. 일본 오사카대학의 이모토 노부유키 그룹은 통신파장대역에서 3 큐비트 GHZ State를 70%의 충실도로 구현하고, 양자얽힘 교환을 84% 충실도로 실험실 환경에서 구현하였다.

86) Mark Hillery et al. (1998)
87) Richard Cleve et al. (1999)
88) Daniel Gottesman (2000)
89) Adi Shamir (1979)
90) Mark Hillery et al. (1998)
91) Wolfgang Tittel et al. (2001)

(3) 적용 분야

비밀 분산기법은 비밀을 분산 저장하여, 특정 사용자가 비밀을 독점하지 못하게 하거나, 특정 사용자가 공격당하더라도 비밀을 복원하지 못하게 하는 용도로 사용된다. 현대 암호의 비밀분산 기술은 계산적 복잡도에 안전성을 기반으로 하여 정보이론적 안전성을 보장하는 장점을 가지고 있다. 양자를 이용하는 양자 비밀분산 기술은 양자 머니, 양자 네트워크, 분산 양자 계산 등 양자 인터넷 시대에 적합한 비밀분산 기법이라고 할 수 있다.

다. 양자 기반 암호화

(1) 기술 동향

양자 기술의 보안에 있어 양자기술의 활용으로 대표적인 것이 양자 키 분배이며, 점차 양자 인증/전자서명, 양자 비밀분산 등으로 확대되고 있다. 이러한 기술은 양자통신의 도청 불가능성이라는 특징에 기반하고 있으며 현대 암호의 일부 요소기술이기도 하다.

이러한 기술 외에도 양자 기술을 이용하여, 다양한 암호 기능을 설계하려는 연구가 진행 중이다.

① 암호문을 양자신호로 전송하기 위한 양자기반 스트림 암호화 (양자 키 분배는 암호키를 양자적으로 공유)

② 암호인프라의 기반이 되는 공개키 암호의 양자화

③ 개인정보 보호 이슈로 현대 암호에서 이슈가 되고 있는 암호화된 상태로 연산이 가능한 동형암호의 양자화

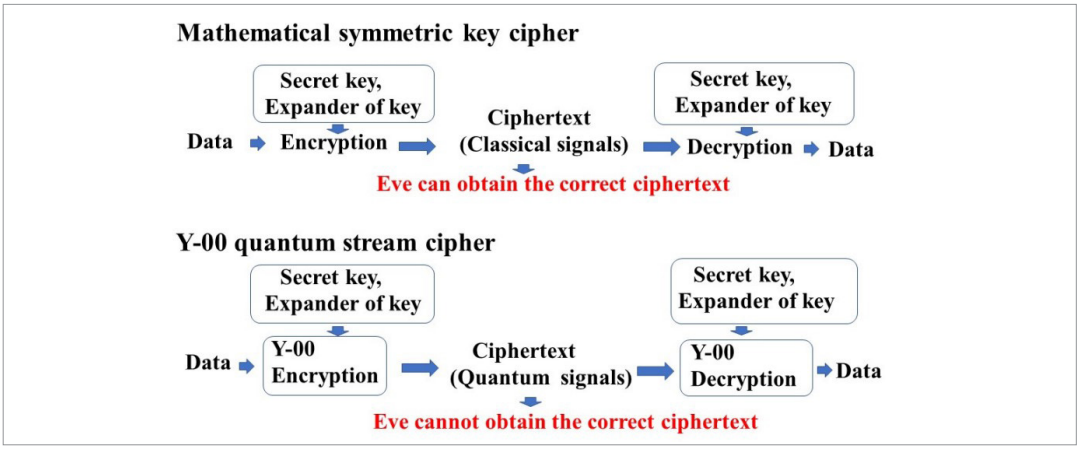
(2) 연구 동향

① 양자기반 스트림 암호화

양자 스트림 암호는 Holevo-Yuen 이론에 기반한 것으로, 양자기술을 이용하여 스트림 암호를 만드는 방법들이 연구되고 있다.[92)]

92) Makaki Sohma, Osamu Hirota (2022)

그림 II-1-17 양자기술 기반 스트림 암호화



※ Makaki Sohma, Osamu Hirota (2022)

이러한 연구는 일본, 중국을 중심으로 진행되고 있는데, 암호문이 양자 신호로 전송되기 때문에 암호문를 얻기 힘들다는 장점을 가지고 있다. 그런데, 스트림 암호 구동을 위해서는 암호키 분배가 필요하며 양자 암호키 분배 또는 공개키 암호가 사용될 수 있다. 이러한 방식의 장점은 절대적인 안전성을 제공하는 것인데, 최근 강한 정보이론적 안전성을 제공하기 어렵다는 논문이 발표[93]되어 전체적인 활용에 모호한 부분이 있다. 그렇지만, 일본, 중국 등을 중심으로 이를 보완하기 위한 연구들이 지속적으로 진행 중에 있다.

② 공개키 암호의 양자화

공개키 암호는 양자컴퓨터의 등장으로 안전성에 큰 위협을 받고 있다. 현재 사용 중인 공개키 암호인 RSA, ECC가 양자컴퓨터로 쉽게 해독되기 때문이다. 이에 대응하기 위하여 현대암호 분야에서는 양자컴퓨터 계산 공격에 안전한 새로운 수학적 프리미티브를 이용한 공개키 암호를 개발하고 있는데, 양자 분야에서도 양자를 기반으로 하는 새로운 공개키 암호의 연구가 진행 중이다.[94) 95)] 양자 기반 공개키 암호에 있어 핵심적인 부분은 어떤 가정을 가지고 trap-door 일방향 함수를 만드는 것이며, 이를 위해 PRF 패밀리, 대칭키암호 패밀리, 중첩 탐지 어려움에 기반한 방식 등이 제안되었다.

③ 동형암호의 양자화

양자기반 동형암호는 양자기술을 기반으로 암호 기능을 설계하는 데에 있어 흥미로운 분야이다. 동형암호는 암호화된 상태로 연산을 할 수 있는 암호화 기법으로 복호화를 하지 않고 연산을 적용할 수

93) Tregubov, P.A., Trushechkin, A.S (2021)
94) Alex B. Grilo et al. (2023)
95) Minki Hhan et al. (2023)

있기 때문에, 정보누출을 막을 수 있어서 머신러닝 등의 데이터 학습에서 많은 관심을 받고 있다.

2015년에 Pauli OTP(One-Time Pad) 암호화를 기반으로 Broadbent and Jeffery가 처음 제안하였다. Pauli OTP를 기반으로 동형암호를 만드는 것의 핵심은 암호문을 복호화하지 않고 연산을 수행하는 Evaluation 과정인데, Clifford 게이트들은 공개적 연산으로 쉽게 이 과정을 수행할 수 있으며, non-Clifford 게이트인 T-게이트에 대해서도 수행할 수 있음을 보였다.

2018년에는 Mahadev가 Toffoli 게이트를 Evaluate하기 위하여 암호화된 CNOT operation을 도입하였고, 이를 제어하기 위한 비트를 암호화 하는 데에 현대암호의 동형암호가 사용되기도 한다.

2021년에는 실험 결과들이 나오는 등 양자 컴퓨터를 이용한 데이터 처리에서 데이터 프라이버시 문제 해결을 위한 연구들이 활발히 진행 중이다.[96) 97) 98)]

(3) 적용 분야

양자 기반의 다양한 암호화 기술은 양자 컴퓨터가 보편화되고 이를 연결하는 양자 인터넷이 활성화될 경우, 양자 인터넷 보안을 위하여 필요한 암호기술이다. 인터넷 보안의 근간을 암호가 형성하고 있는데, 양자 인터넷에서 양자 정보를 보호하면서 다양한 서비스를 하기 위해서는 이를 가능하게 하는 핵심 기술인 양자 암호기술이 필요하다.

뿐만 아니라 데이터 암호화 기술에 대한 연구도 필요하다. 현재 양자암호통신에서의 통신 및 저장 데이터에 대한 암호화는 양자 키 분배로 생성된 암호키를 기반으로 하며, AES, LEA 등의 현대암호로 수행된다. 현대암호는 컴퓨터의 연산 능력에 의존적인 안전성을 가지고 있어 컴퓨터가 발전된다면 안전성이 저하될 수 있다. 따라서, 컴퓨터의 발전, 즉 공격기술의 발전에 의존하지 않는 절대적 안전성을 가지는 데이터 암호화 기술 연구도 필요하다.

데이터 프라이버시 이슈로 인하여 동형 암호, 다자간 계산 등의 기술들이 최근 부각되고 있는데, 양자 머신러닝, 양자 인터넷 등이 확산되면 이러한 기술 또한 핵심 기술로 활용될 수 있을 것이다.

96) Zeuner, J. et al. (2021)

97) Ben Hamlin et al. (2017)

98) Liu, J. et al. (2022)

6. 양자통신 시험망

(1) 기술 동향

① OpenQKD

㉮ 베를린 테스트베드

2019년 9월, Horizon2020 지원 프로그램의 일환으로 유럽 내 양자통신 인프라 설치 목적의 OpenQKD 프로젝트가 시작되었다. OpenQKD는 유럽 산·학·연 38개 파트너가 참가하여 진행되는 프로젝트로서, 3년간 진행되어 2023년 3월 종료된다. OpenQKD의 주된 목적 중 하나는 QKD 네트워크 구축을 위한 다수의 테스트베드를 구축하는 것이다. 본 항목을 통하여 베를린, 마드리드, 포즈난, 비엔나에 위치한 주요 4개 테스트베드 중 베를린 테스트베드 구축 결과에 대하여 기술한다.

베를린 테스트베드는 Deutsche Telekom이 향후 QKD 산업에서 수행할 프로젝트를 지원하는 것을 목적으로 한다. 베를린 테스트베드의 QKD 네트워크는 Winterfeldtstrasse(WFD)에 위치한 중앙 노드로부터 Dark Fiber로 연결된 5개 노드로 구성돼 있다. 2020년 4월까지 노드 간 다양한 길이의 8개 이상 링크가 구현되었으며, 다양한 Topology가 구현 가능한 형태로 개발되고 있다. 각 네트워크 노드의 연구소에는 양자 광학 장비, 방화벽, 암호화 장비, 서버와 키 저장을 위한 하드웨어 보안 모듈(Hardware Security Module)이 19인치 규격 캐비닛 형태로 설치되어있다. 베를린 테스트베드에서는 향후 Use-Case 실현을 위한 자원에 접속하기 위한 완전-가상화된 서버 인프라 구현, 네트워크 자원의 동적 배정(Dynamic Assignment), QKD 시스템 내 모바일 네트워크 통합을 위한 5G 연결 등의 연구개발이 진행될 것으로 예상되고 있다.[99]

그림 II-1-18 (왼쪽) OpenQKD 베를린, (오른쪽) 마드리드 테스트베드



※ Hugo Zbinden (2020)

99) Francesco Vedovato et al. (2021)

㉯ 마드리드 테스트베드

마드리드 테스트베드는 중앙의 15km 길이 원형 'Telefonica Spain production' 네트워크([그림 Ⅱ-1-18] 오른쪽의 붉은색 선)와 나머지 마드리드 연구 네트워크, REDIMadrid([그림 Ⅱ-1-18] 오른쪽의 푸른색, 녹색, 보라색 선)로 구성되어있다. 원형 네트워크는 다양한 제약 조건으로 인해 높은 기술 성숙도를 보이는 기술 구현에 적합하다. 한편, 이 네트워크는 양자 채널로 구성되어 새로운 양자 서비스를 제공하는데 활용될 가능성은 존재한다. 나머지 REDIMadrid 네트워크 상 노드들은 다양한 구현 방식에 열려있으므로, 낮은 기술 성숙도의 서비스 구현에 활용될 수 있다. 네트워크 상 연결은 양자-고전 채널 동시 운용 방식으로 구현되어 있다. 총 13개 네트워크 링크가 구현되어 있으며, 원형의 Production 네트워크 상에는 새로운 노드가 쉽게 추가될 수 있다.[100)]

㉰ 포즈난 테스트베드

PSNC(Poznan Supercomputing and Networking Center) 네트워크는 OpenQKD의 일부로서 포즈난 지역에 기반하고 있다. 이 네트워크는 QKD 기술 구현을 목적으로 개발되어, 병원, 정부 기관 등 다양한 민간 시설과 연계한 서비스를 제공할 예정이다. 2020년까지 설치한 9개 링크 중 4개 링크가 구동될 준비를 마쳤다. 그 중 최장거리 링크는 71 km 길이로 구현되었으나, Dark Fiber로 구현되지 않았으며 25 dB의 Channel Loss가 존재한다. 이외 링크는 Dark Fiber 형태로 구현되어 있다.

㉱ 비엔나 테스트베드

비엔나 테스트베드는 다양한 길이의 7개 링크로 구현되어 있으며, IQOQI(Institute for Quantum Optics and Quantum Information)에 의해 운영된다. 네트워크 상 장거리 링크는 비엔나 도심과 St.Polten, Bratislava를 잇는 구간에 구현되어 있다. 비엔나 테스트베드에서는 양자 광원에 대한 기술력을 바탕으로 편광-얽힘 기반 BBM92 QKD 프로토콜을 운용하고 있다. 편광은 단일모드 광섬유를 통해 전달되며, 전달 시 편광 변화를 모니터링하고 보상하는 기술을 적용하고 있다.[101)]

② 중국 양자 네트워크

㉮ 광섬유 네트워크

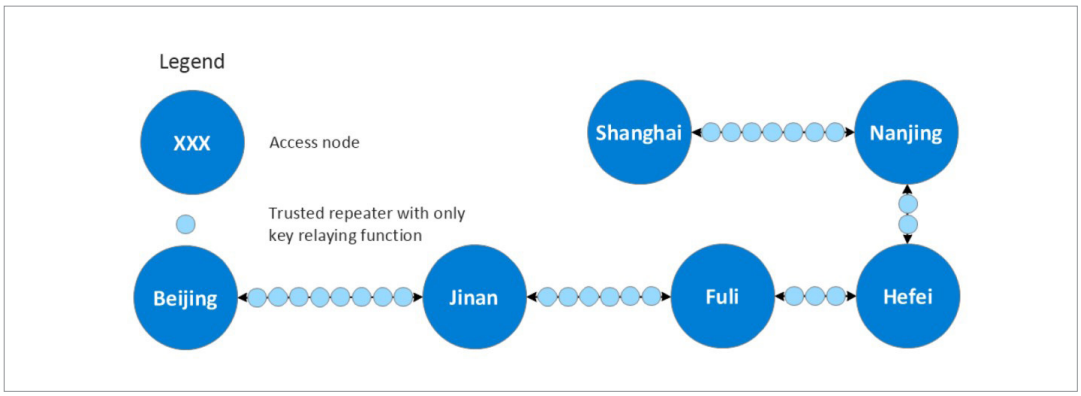
중국은 대규모 지상 광섬유 네트워크 상에 QKD 프로토콜을 구현하는 프로젝트를 추진해왔다. 광섬유 네트워크는 크게 베이징, 상하이를 잇는 백본(Backbone) 네트워크와 지난(Jinan), 우한(Wuhan) 등에 구성된 도시 규모 메트로폴리탄 네트워크로 구분할 수 있다. 2020년 이전까지 2,000km 거리 백본 네트워크 상에 32개 노드, 135개 링크를 구현하였으며, Jinan, Wuhan 네트워크 상에 각 32개, 71개 노드를 구현하였다. Jinan 네트워크에서는 최소 1.7km 최대 64.7km 거리의 QKD 링크를 구현하였

100) Ibid.

101) Hugo Zbinden (2020)

다.[102] QKD 프로토콜은 주로 Decoy 상태 생성 기법을 적용한 BB84 프로토콜을 활용하였다. 네트워크 구축을 위해 필요한 광섬유는 중국의 QuantumCTek 사(社)가 공급하였다. 네트워크 구현 시 QKD의 후처리 정보를 전달하는 고전 채널과 양자 채널을 다중화하기 위하여 WDM 기술을 활용하였다. QKD의 암호화 장비는 양자키 공급 뿐 아니라 IPSec VPN 프로토콜과 연계하여 개발되었다.

그림 II-1-19 Beijing-Shanghai 구간 설치된 백본 네트워크 개요도



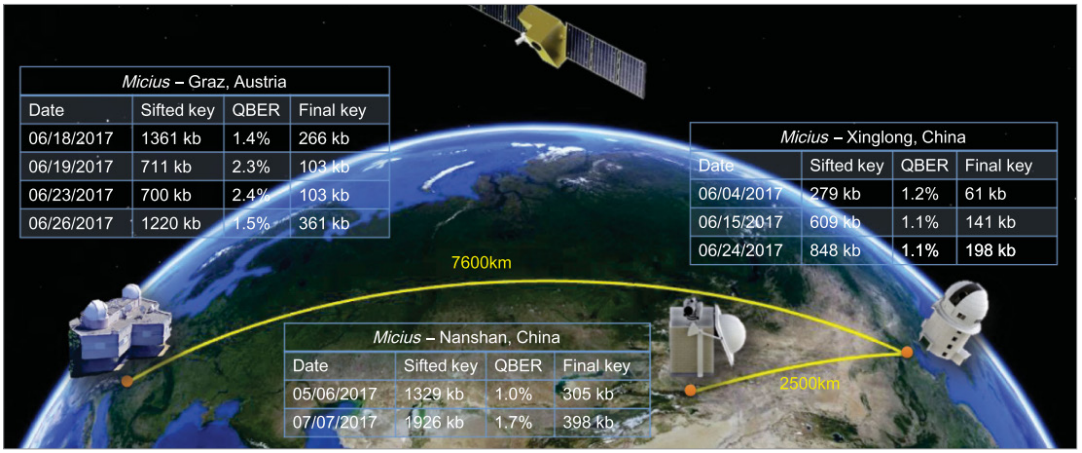
※ Miralem Mehic et al. (2020)

② Free-space 네트워크

중국은 지상 광섬유 QKD 네트워크 구현 외에도, Free-Space QKD 네트워크 구현에서도 높은 성취를 보이고 있다. 특히, 위성-기반 QKD 구현에 있어서는 오스트리아 IQOQI와 더불어 독보적인 기술력을 확보하고 있다. 위성을 활용할 경우 증폭되기 어려운 양자 신호를 멀리 보내는데 효과적이므로, 현재 기술력으로 대륙 규모 단-대-단 QKD 링크 구현이 가능하다. 2018년에는 중국 USTC의 Jian Wei Pan 연구그룹과 IQOQI, 비엔나대학 등의 협력으로 위성을 릴레이로 활용한 대륙 간 QKD 링크 구현 성공이 보고된 바 있다.[103] 해당 결과에서 지상 7,600km 거리의 오스트리아 Graz와 중국 Xinglong 구간이 위성 릴레이 기술을 통해 연결되었다. 850nm 광자를 활용한 편광 모드 기반 Decoy BB84 프로토콜이 구현되었으며, QKD 신호 보안이 적용된 대륙 간 화상회의가 시연되었다. 실험에서는 태양-동기화된 지구 저궤도(Low Earth Orbit) 위성을 활용하였으나, 추후 지구-동기화된 위성을 활용한 QKD 실험 계획을 밝힌 바 있다.

102) Ibid.
103) Sheng-Kai Liao et al. (2018)

그림 II-1-20 오스트리아-중국 간 QKD 링크 구현



※ Sheng-Kai Liao et al. (2018)

③ Washington Metropolitan 양자 네트워크

미국 워싱턴 DC 인근 정부기관들은 Washington Metropolitan 양자 네트워크 컨소시엄을 만들어, 이들 기관 간 양자 네트워크(DC-QNet)를 구축하였다. 이 컨소시엄은 DC-QNet을 통해 4가지 주제를 연구하고 있다. 양자 네트워크 기술의 핵심인 단일광자 광원, 양자 인터페이스, 양자 메모리, 단일광자 측정기 개발을 통해, 양자중계기, 고정밀 시간 동기화, 양자네트워크용 새로운 프로토콜, 양자네트워크의 성능시험, 도청 등의 안전성 위협 요인 등 다양한 연구를 진행하고 있다. 현재 DC-QNet에 참여하고 있는 기관은 NRL(Naval Research Laboratory), ARL(Army Research Laboratory), NIST, LTS(Latoratory of Telecommunication Service at National Security Agency), USNO(US Naval Observatory), NASA 등 6개 기관이 양자 네트워크로 연결되어 있고, NIWC(Naval Information Warfare Center, CA), AFRL(Air Force Research Lab, NY)이 연구에 참여하고 있다.

그림 II-1-21 DC-QNet 구성도



※ https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-communications-and-networks

(2) 연구 동향

① OpenQKD

네트워크 상에서 QKD 서비스를 제공하기 위한 기술에 대한 연구가 OpenQKD 프로젝트를 통해 이루어지고 있다. 2020년 2월에는 Trusted Relay QKD 네트워크 상에서 QoS(Quality of Service) 기술을 제안한 연구 결과를 보고하였다. 같은 해 4월에는 마드리드 테스트베드 네트워크 상에서 노드에 전달되는 신호가 적절한 경로를 통하여 전달된 것인지 검증하는 OPoT(Ordered Proof-of-Transit) 기술을 제안한 결과가 보고되었다.[104] 2020년 9월에는, 네트워크 관점에서 QKD에 대한 기술 동향을 정리한 보고서가 OpenQKD 참여 연구진에 의해 발간되었다.[105]

② 중국 양자 네트워크

광섬유 기반 단-대-단 QKD는 Twin-field QKD와 같은 특수한 QKD 프로토콜을 활용할 경우 그 거리를 수백 km까지 늘릴 수 있기는 하나, 보통 100km 내외의 거리 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 Trusted Repeater를 활용할 경우, 구현에 활용된 Trusted 노드가 보안상 허점이 될 수 있다. 이에 USTC의 Jian Wei Pan 그룹에서는 2020년, QKD 거리 한계를 극복하기 위하여 위성을 활용한 장거리 얽힘-기반 QKD 구현 결과를 보고한 바 있다.[106] 해당 결과에서는 1,120km 거리의 단-대-단 QKD 링크에 BBM92 프로토콜이 구현되었다. 또한 분배된 얽힘을 활용한 CHSH 벨 부등식 테스트 실험이 수행되었다.

2021년에는 광섬유 기반 지상 QKD 네트워크와 위성 릴레이를 결합한 대륙 규모 통합 QKD 네트워크 구현이 보고되었다.[107] 해당 네트워크 상에서는 총 700개 QKD 링크가 지상 2,600km 거리 사이에서 구현되었다. 네트워크 구현을 위해, 2,000km 이상의 광섬유가 활용되었다. 또한 Nanshan과 Xinglong를 잇는 구간에는 지상-위성 간 2개의 고속 QKD 링크가 설치되었다. 지상-위성 간 평균 암호키 생성률은 47.8kbps 이었으며, 이는 지난 결과의 암호키 생성률을 40배 정도 개선한 결과로 알려져 있다.

(3) 적용 분야

① Open QKD

베를린 테스트베드에서는 Deutsche Telekom, IDQuantique, Toshiba 등 파트너를 중심으로 QKD 기반 암호체계를 무선 5G 서비스에까지 확장하는 Use-Case를 고려하고 있다. 구현을 위하여 Post-Quantum Cryptography(PQC) / Quantum-Resistant-Algorithms(QRA) 등 추가적 보안 수단을 QKD 시스템에 적용할 계획을 갖고있다. 마드리드 테스트베드에서도 산학연 협력을 통하여 5G

104) Alejandro Aguado et al. (2020)
105) Miralem Mehic et al. (2020)
106) Juan Yin et al. (2020)
107) Yu-Ao Chen et al. (2021)

테스트베드를 구현할 계획을 갖고있다. 또한, 클라우드 데이터센터 구축에 QKD 보안체계를 적용하는 연구도 진행 중이다. 이외에 포즈난, 비엔나 테스트베드에서도 고성능 연산, 병원/정부기관 등 보안 필요 기관의 데이터 보안 등을 목적으로 하는 QKD 기반 Use-Case 발굴이 집중적으로 이루어지고 있다.

② 중국 양자 네트워크

중국의 대규모 통합 QKD 네트워크 구현 결과는 대도시 규모의 End-User에게 암호키를 전달하기 위한 목적, 장거리 단-대-단 QKD 링크 구현 목적 등에 활용될 수 있다. 2021년 구현 결과에서 고려한 백본 네트워크의 5계층 네트워크 구조는 최상단에 응용 네트워크 계층을 포함하고 있다. 해당 네트워크 구조는 응용 계층의 유저 컴퓨터에서 암호키를 요청하면, 하부의 4개 계층에서 암호키를 전달/생성/저장/관리하는 형태로 구성되어있다. 이같은 네트워크 구조를 기반으로 QKD 성능이 보다 발전한다면, 도시 규모 사용자에게 QKD 기반 암호 서비스를 제공하는 것을 현실적인 목표로서 고려할 수 있을 것이다.

③ European Quantum Communication Infrastructure(EuroQCI)

EuroQCI 이니셔티브는 해외 영토를 포함하여 EU 전체에 걸쳐 안전한 양자 통신 인프라를 구축하는 것을 목표로 추진 중이다. 27개 EU 회원국 모두 유럽 양자 통신 인프라(EuroQCI) 선언에 서명하였고, EuroQCI를 설계, 개발 및 배포하기 위해 유럽 위원회(EC) 및 유럽 우주국(ESA)과 협력하고 있다. EuroQCI는 2027년까지 완전 가동하는 것을 목표로 한다.

EuroQCI는 양자 기반 시스템을 기존 통신 인프라에 통합하여, 양자 물리학을 기반으로 한 추가 보안계층을 제공함으로써, 데이터 및 인프라를 보호하고자 한다. 유럽의 정부 기관, 데이터 센터, 병원, 에너지 그리드 등의 보호 강화 등, 향후 수십 년을 위한 EU의 새로운 사이버 보안 전략의 중요한 기둥 중 하나로 키울 계획이다.

7. 양자암호통신 시험 검증

(1) 기술 동향

양자 키 분배 장치는 이론적으로는 완벽한 안전성을 제공하지만 광학 요소기술들(광원생성, 광전송, 광자 측정 등)의 불완전성을 이용한 다양한 방식의 도청 공격이 가능할 수 있다. 미국 NSA에서는 고비용과 더불어 이러한 공격들에 대한 안전성이 성숙되지 않았다는 이유로 시험검증이 어렵고 이에 따라 국가기관 도입이 이르다는 입장을 견지하고 있다.[108] 양자 키 분배는 암호화장치에 필요한 암호키를 만드는 것이므로, 미국 연방정부의 암호정책을 총괄하는 NIST에서는 암호모듈검증(Cryptographic

108) https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/

Module Validation Program, CMVP)의 일환으로 검증을 추진하는 것이 어떻겠냐는 의견을 내기도 하였다.

ISO/IEC에 시험/검증 표준화를 제안하였던 중국에서도 초기에는 암호모듈검증 입장에서 표준을 제안하였지만, 현재는 프로토콜 표준화를 담당하는 ISO/IEC에서 표준화 추진이 어렵게 되고, ETSI의 CC 타입 시험평가 방법론이 받아들여져서, CC 타입의 시험평가 표준화가 추진되고 있다. 이러한 움직임은 양자 키 분배 장치가 현재는 양자 네트워크 요소로 개발되고 있고, 주로 네트워크 장치 개념으로 개발되고 있어, 네트워크 장치에 대한 시험평가를 확장하는 개념으로 받아들여지고 있는 것으로 보인다.

(2) 연구 동향

양자 키 분배장치 구현에 대한 공격 방법은 다양하게 알려져 있으며, 2020년에는 캐나다 V. Makarov 그룹에서 스위스 ID Quantique Clavis 2 QKD 장치에 대한 공격 가능성을 제시하기도 하였다.[109] 현재까지 알려진 연구되어진 공격 방법들은 다음과 같다.

표 II-1-2 현재까지 알려진 공격 방법

공격명	공격 기법	취약점
차단 재전송 공격	공격자가 중간에 광신호를 차단, 측정한 후, 측정된 결과에 따라 새로운 신호를 수신자에게 전송	사용자인증, 양자채널
광자수 분리 공격	실제 시스템에서는 평균 광자수가 0.1개로 감쇄된 레이저를 사용하게 됨. 따라서 한 신호에 두 개 이상의 광자가 존재할 확률이 존재함. 공격자가 각 신호의 광자수를 확인 후 단일광자 수준의 경우는 차단하고, 다중광자 수준인 경우는 광분할기를 이용하여 한 개의 광자를 분리하고 나머지는 수신자에게 전송	양자소스 부채널[110]
암전 공격	공격자가 강한 펄스 신호를 수신자에게 보내면 수신자의 검출기가 단일 광자를 측정할 수 없는 암전(blind) 상태가 됨. 이때 공격자가 더 강한 펄스를 조사하여 수신자의 검출기가 단일 광자가 도달한 것과 같은 신호를 생성함	광검출기 부채널
트로이 목마 공격	공격자가 강한 펄스 신호를 송신자에게 보냄. 송신자 시스템에 입사된 광신호는 시스템을 구성하는 광부품에서 반사되어 공격자에게 되돌아와 송신자 시스템의 구성을 유추할 수 있는 정보를 제공할 수 있음	양자소스, 광검출기 부채널
시간 전이 공격	광검출기들의 동작시간이 외부 환경의 영향으로 다른 동작시간을 가진다는 점을 이용하여 수신자의 측정 결과를 공격자가 선택하는 방법	광검출기 부채널
검출기 불감시간 공격	단일광자 검출기는 광자가 도달하여 측정이 끝난 후 일정시간 동안 검출기가 동작하지 않는 불감시간을 가짐. 이러한 검출기의 특성을 이용하여 공격자가 송신자의 신호보다 앞서 수신자에게 신호를 보내 수신자의 측정 결과를 제어할 수 있음	광검출기 부채널
검출기 불일치 공격	광이 입사하는 각도를 변화시키면 검출기의 최대 효율의 위치를 벗어남. 각 검출기의 정렬상태, 광학계의 효율 등에 따라서 광자의 입사각에 따라 효율이 다르게 나타남을 이용한 공격	광검출기 부채널
파장 의존형 빔분할기 공격	수신자의 빔분할기(BS)가 광의 파장에 의존하는 특성을 이용하는 공격 기법	빔분할기

109) Juan Carlos Garcia-Escartin et al. (2020)

110) A.R. Dixon et al. (2017)

이러한 광학계에 대한 공격을 막고, QKD를 네트워크 장치로 보았을 때, QKD를 구성하는 요소들의 안전성을 시험하고자 하는 기준의 표준화가 ISO/IEC의 JTC 1/SC 27(Information security, cybersecurity and privacy protection)의 WG 3(Security evaluation, testing and specification) 분과에서 2019년부터 시작되었다. 표준명은 "ISO/IEC 23837 Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution"로 Part 1: Requirements, Part 2: Evaluation and testing methods의 두 개의 파트로 나누어져 있다.

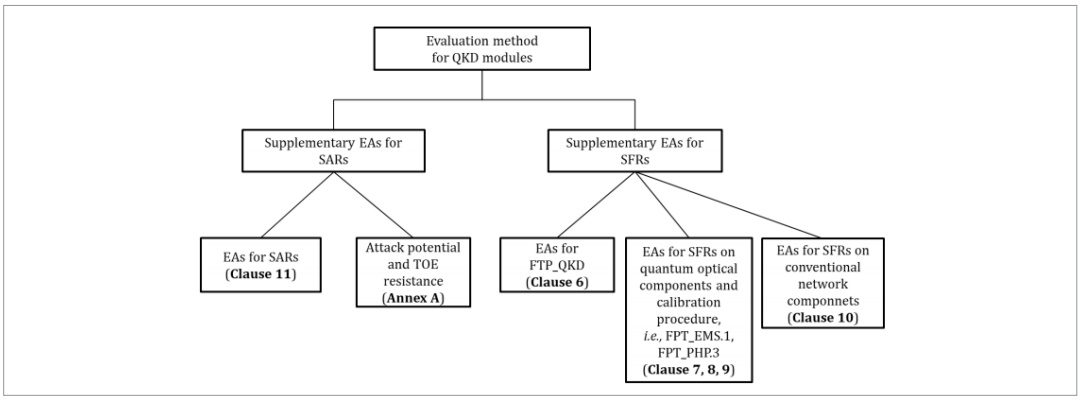
Part 1은 다음과 같은 사항으로 구성되어 있다.

- Theoretical aspects of QKD protocols: QKD 원리, 분류, 구조
- Implementation modules of QKD protocols: 외부 인터페인스, 내부 구조, TOE(Target of Evaluation) scope 등
- Security problems analysis of QKD modules: 안전성 가정, Asset 분석, 네트워크 컴포넌트에 대한 위협, 양자 광학 컴포넌트에 대한 위협
- Extended security functional components for QKD implementation
- Security functional requirements for QKD modules
- Conformance statement

Part 2는 다음과 같은 사항으로 구성되어 있다.

- Overview of the evaluation method for QKD modules: EA(Evaluation Activities),
- SFRs(Security Functional Requirements), SARs(Security Assurance Requirements)

그림 II-1-22 ISO/IEC 23837-2 구성



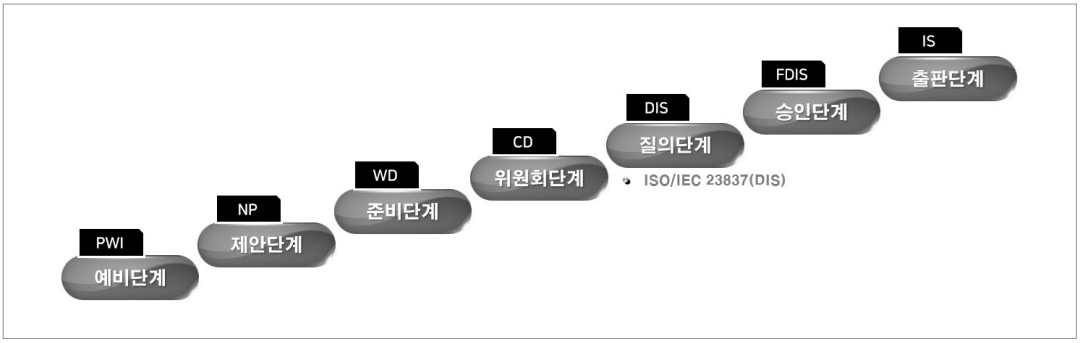
※ ISO/IEC 23837 part. 2

- Supplementary activities for the evaluation of FTP_QKD: 양자 키 분배에 과정에 대한 세부 시험평가

- Supplementary activities for the evaluation of quantum optical components in the transmitter module: 광자수 분포, 평균 광자수/광펄스 안정성, 광펄스 세기의 독립성, 인코딩 정확성, 인코딩 상태의 구별 불가능성 등에 대한 시험평가
- Supplementary activities for the evaluation of quantum optical components in the receiver module: 수신부의 탐지 확률에 대한 일치성, 수신부의 광학적 isolation degree 등
- Supplementary activities for the evaluation of parameter adjustment procedures:
- Supplementary activities for the evaluation of SFRs on conventional network components
- Conformance statement

이 표준은 현재 출판의 전 단계인 FDIS(Final Draft International Standard)에 있으며, 큰 이견이 없다면 2023년 중에 표준으로 출판될 것으로 예상된다.

그림 II-1-23 ISO/IEC 23837 표준화 진행 현황



유럽 표준협회 ETSI에서는 CC 평가에 활용하기 위한 양자 키 분배의 기능과 보증요구사항을 정의하기 위한 보호프로파일(Protection Profile, PP) "Quantum Key Distribution(QKD): Common Criteria Protection Profile Pair of Prepare and Measure Quantum Key Distribution Module" 작업을 2019년부터 진행하고 있다. 현재는 v1.1.1로 여러 번의 업데이트가 진행되었다. 이 문서는 기존 CC에서 특정 QKD 제품군(pair of prepare and measure QKD modules)에 대해 PP(Protection Profile)를 구성한 것으로 PP를 구성하는 방법서에 대한 표준인 ISO/IEC 23837 문서를 준용하지 않은 것으로 확인되었다.

(3) 적용 분야

ISO/IEC 및 ETSI의 양자 키 분배 시험평가 기준은 기존 보안제품의 시험평가 활용되어온 국제공통평가기준(Common Criteria, ISO/IEC 15408)에 맞추어 개발되고 있다. 공통평가기준은 보안 문제에 대한 인증을 하기 위한 제도이다. 양자통신에서 보안문제가 중요 요소인 기술은 우선 양자 키 분배인데, 이론적으로는 완벽한 안전성을 제공하지만 구현에 있어서는 다양한 공격 가능성이 제기되기도 하는 기

술이다. 양자 키 분배를 보안 분야에 적용하기 위해서는 구현에 따른 보안 위협을 식별하고 개발된 제품이 이런 위협들에 대한 대응을 적절하게 하고 있는지 시험검증하는 절차가 필요하다. ISO/IEC 및 ETSI의 표준들은 이러한 시험검증에 활용될 수 있을 것이다.

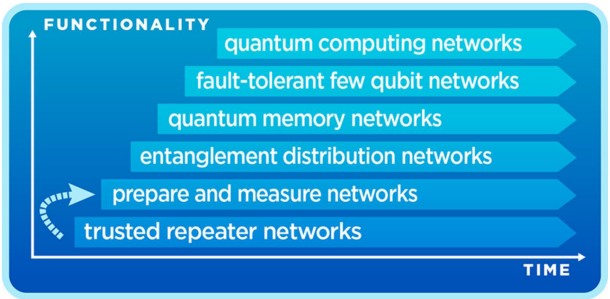
8. 양자 네트워크

(1) 기술 동향

양자 네트워크는 큐비트 등 양자 상태에 인코딩된 정보를 물리적으로 떨어진 공간에 전달하는 역할을 수행한다. 양자 네트워크는 기본적으로 양자 노드(Node)와 각 양자 노드를 연결하는 양자 채널로 구성된다. 양자 네트워크에서 정보는 주로 광자(Photon) 상태에 인코딩되어 전달되며, 양자 채널은 광섬유(Optical Fiber) 또는 자유공간(Free-space) 형태로 구현될 수 있다. 각 양자 노드에는 간단한 연산을 수행하는 양자 프로세서 또는 기술 발전에 따라, 보다 발전된 수준의 연산 능력을 갖춘 양자 컴퓨터가 위치할 수 있다. 양자 메모리 또한 양자 네트워크 구현에 있어 핵심적인 요소이다. 양자 메모리는 각 양자 노드에서 환경의 교란에 대단히 민감한 양자정보를 저장하는 기능을 할 뿐 아니라, 장거리 양자통신의 핵심 요소기술인 양자 중계기에 활용되기도 한다. 현재 양자 메모리는 개발 단계에 있다. 위성을 활용하면 양자 네트워크 상 단일 링크 간 거리를 대륙규모로 늘릴 수 있으며, 이를 QKD 또는 얽힘 분배에 적용하는 연구가 진행되고 있다.

S. Wehner 등 QuTech 연구진들은 양자 네트워크 구현을 위한 필요기술의 난이도에 따라 신뢰할 수 있는 중계기(Trusted Repeater), 준비 및 측정(Prepare and Measure), 얽힘 분배(Entanglement Distribution), 양자 메모리(Quantum Memory), 결함 허용 양자연산(Fault-tolerant Quantum Computation) 단계로 구분하였다.[111] 현재는 장거리 얽힘 분배의 실험적 구현이 가능해진 상황이며, 얽힘 분배의 구현가능성을 높이는 연구가 이루어지는 한편 이를 활용하는 얽힘 기반 양자정보 프로토콜에 대한 연구도 함께 이루어지고 있다.

그림 II-1-24 양자 네트워크 단계



※ S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson (2018)

111) S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson (2018)

(2) 연구 동향

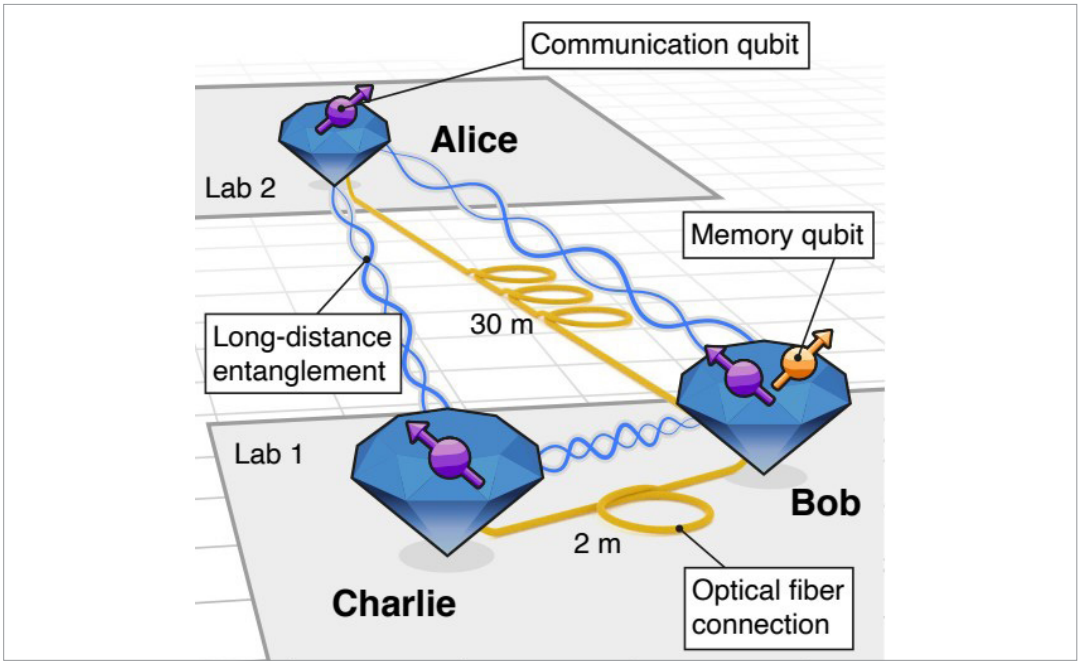
양자 상태는 환경에 의해 쉽게 교란되는 특성을 가지는데, 이러한 양자 상태에 인코딩된 정보를 안전하게 멀리 전달하는 것은 양자 네트워크의 중요한 연구 분야 중 하나이다. 2017년에는 자유공간에서 위성 기반 1,200km 거리 간 양자 키 분배(Quantum Key Distribution)와[112] 1,400km 거리 간 양자 전송(Quantum Teleportation) 실험 성공이 보고된 바 있다.[113] 광섬유 기반 양자 키 분배 실험으로는, 획기적으로 양자 키 분배 거리를 늘릴 수 있는 Twin-Field 양자 키 분배 프로토콜이 833km 거리 간 구현된 바 있다.[114] 중국 연구진들에 의해 광섬유 기반 QKD 네트워크와 자유공간에 기반한 위성 QKD 링크를 통합한 대규모 QKD 네트워크의 구현 또한 알려진 바 있다.[115]

대규모로 양자 네트워크를 구현하는 연구 외에 양자 네트워크의 기술 단계를 기존의 trusted repeater, prepare-and-measure 단계 기술 수준보다 높이기 위한 노력도 지속되고 있다. 얽힘 상태를 구성하는 두 개의 국소 양자계를 공간상에서 분배하는 얽힘 분배 연구도 그러한 연구 방향 중 하나이다. 광섬유, 자유공간 채널을 활용한 장거리 얽힘 분배 실험의 성공이 지속적으로 보고되고 있다.[116]

한편, 양자 상태를 공간상으로 멀리 떨어진 곳으로 전송하는 기술인 양자 전송(Quantum Teleportation)을 양자 네트워크 상에 구현하기 위한 실험도 이루어지고 있다.[117] 양자 중계기는 양자 전송을 활용하여 얽힘의 장거리 전송을 가능케 하는 장치이다. 양자 중계기의 구현을 위해서는 두 개의 얽힘 생성장치에서 생성된 신호가 중계기 노드에 도착하는 시점을 동기화하는 것이 필요하다. 하지만, 얽힘 생성의 확률적 특성으로 인해 동기화를 구현하는 것이 현재 기술 수준으로는 쉽지 않다. 이에 양자 메모리를 활용하여 하나의 신호를 양자 메모리에 저장해두고 다른 신호가 올 때까지 기다리는 방식을 활용할 수 있다. 현재는 이를 위한 양자 메모리 개발이 이루어지는 단계에 있다. 이 밖에도 양자 노드에 양자 메모리 큐비트를 위치시킨 소규모 양자 네트워크를 구현하기 위한 연구가 계속되고 있다.[118]

112) Sheng-Kai Liao et al. (2017)
113) Ji-Gang Ren et al. (2017)
114) Shuang Wang et al. (2022)
115) Yu-Ao Chen et al. (2021)
116) Juan Yin et al. (2017); Sebastian Philipp Neumann et al. (2022)
117) Raju Valivarthi et al. (2016)
118) Yong Yu et al. (2020); Matteo Pompili et al. (2021)

그림 II-1-25 양자 메모리 큐비트를 고려한 3개 노드 양자 네트워크 구현



※ Matteo Pompili et al. (2021)

(3) 적용 분야

얽힘을 활용한 양자 네트워크는 구현을 위한 핵심 요소기술들이 아직 개발 단계에 있으므로, 당장 실용적 필요 분야를 찾기는 쉽지 않다. 비록 기술적으로 trusted repeater 또는 prepare-and-measure 방식에 기반하기는 하나 대규모 QKD 네트워크의 구현은 괄목할만한 구현 성과라 할 수 있다. 예상되는 양자 네트워크 활용 분야로는 양자 네트워크를 활용한 높은 정확도의 양자 센싱, 분산 양자 연산(Distributed Quantum Computing), 높은 안전성을 보장하는 양자 통신 등이 있다.

제3절 국내 양자통신 R&D 동향

1. 유선 양자 키 분배 (Fiber-based Quantum Key Distribution)

유선 양자 키 분배 기술은 광섬유 선로를 전송 채널로 사용하는 QKD 기술을 의미한다. 1989년에 편광 인코딩 기반 BB84 프로토콜을 광학테이블 위 자유공간(Free Space)에서 처음 실험적으로 구현하였고,[119] 1993년 스위스 제네바 대학의 Gisin 그룹에서 1km 이상의 광섬유 스풀(Spool)을 통해 첫 유선 QKD 구현에 성공하였다.[120] 이후에 위상 인코딩 기반 BB84,[121] Coherent One Way(COW),[122] Differential Phase Shift(DPS),[123] Measurement Device Independent(MDI) 프로토콜,[124] Twin Field(TF)[125] 프로토콜 등 광섬유 시스템에 적용하기 용이한 새로운 프로토콜들이 등장하고, 단일광자 검출기의 효율 개선 및 광 신호 고속 변조, 광 간섭계 안정화 기술 등이 적용되면서 QKD의 전송 거리가 점점 증가하고 있다. 현 시점에서 양자중계기(Repeater) 없이 도달할 수 있는 최대 전송거리는 2022년에 중국에서 Twin-field 프로토콜로 구현한 833.80km[126]로 알려져 있다.

QKD에서 전송 거리만큼이나 중요한 요소는 여러 가지 도청 공격에 대한 보안성의 확보이다. 가장 널리 쓰이고 있는 BB84 프로토콜만 하더라도 정보이론적으로 보안성이 잘 증명되었지만 실제 시스템에 적용할 때는 광원, 광소자, 검출기 등의 불완전성으로 인해 여러 가지 부채널(Side-Channel) 공격에 취약해질 가능성이 있다. 따라서 장치의 불완전한 요소에 관계없이 안전하게 동작하는(Device-independent) QKD가 제안되었으나,[127] 현재 기술로 구현하기에 한계가 있기 때문에 보다 실용적인 대안인 측정 장치에 무관한(Measurement-Device-Independent, MDI) QKD 프로토콜이 제안되어 2013년 실험적으로 처음 구현되었고[128] 지금까지도 여러 플랫폼을 통해 활발히 연구되고 있다.

국내에서는 2000년대 중반부터 양자암호통신 요소기술을 연구하기 시작했고, 통신사 SK텔레콤, KT와 한국과학기술연구원(KIST), ETRI, 고려대가 유선 QKD 기술 개발에 앞장서고 있다. 이 장에서는 현재까지 연구·개발된 유선 QKD 기술에 대해 설명하고자 한다. 국내 동향의 경우 QKD 시스템 전체

119) Charles H. Bennett & Gilles Brassard. (1989)
120) A. Muller et al. (1993)
121) P.D. Townsend (1994)
122) Stucki, D. et al. (2005)
123) Inoue, K. et al. (2002)
124) Lo, Hoi-Kwong et al. (2012)
125) Lucamarini, M. et al. (2018)
126) Wang, S. et al. (2022)
127) Barrett, J. et al. (2005)
128) A. Rubenok et al. (2013)

에 대한 개발 경험이 있는 업체와 연구소의 공개된 성과를 기준으로 작성하였으며, 단일광자광원이나 단일광자검출기 개발과 같이 QKD를 포함한 광자 기반 양자 통신 시스템을 구성하는 세부 요소 기술들은 포함하지 않았다.

가. 양자 키 분배 프로토콜

(1) 기술 동향

① BB84 QKD

1984년 Bennett과 Brassard가 처음으로 제안한 것으로, 광 채널을 통해 전송되는 단일광자들의 양자 상태를 이용한 키 분배 방법이다.

단일광자광원의 사용을 가정하고 있으며, 비트 정보를 서로 직교하지 않은 두 기저 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, $\{|+\rangle, |-\rangle\}$로 구성된 네 개의 상태 $\{|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle\}$에 암호화한다. 이 과정에서 주로 사용되는 물리량은 빛의 편광이나 두 펄스 사이의 상대적인 위상 차이이다. 아래 표와 같이, 송신자 Alice는 비트 값 하나와 기저를 비트 시퀀스 x_A, y_A로부터 랜덤하게 선택하여 단일광자 펄스에 암호화하며, 수신자 Bob은 복호화를 위해 측정 기저를 비트 시퀀스 y_B로부터 랜덤하게 선택하여 측정을 수행하고 그 결과 생긴 측정 비트 시퀀스(x_B)를 기록한다. 이 때 수신단에서는 전송 과정에서의 광 손실 등으로 인해 단일광자가 검출되지 않는 이벤트(Non-detection Event)도 존재하게 된다. 또한 검출 과정에서 단일광자가 유실되기 때문에 측정은 단 한 번만 가능하다. 광 펄스 송수신이 끝난 후 인증된 공개 채널을 통해 Alice와 Bob이 사용한 모든 기저 y_A, y_B를 공개하며, 수신자는 광자가 실제로 검출된 타임 슬롯도 공개한다. 이후에 Alice와 Bob은 단일광자가 검출된 이벤트 중에서 서로 같은 기저를 선택한 이벤트의 비트 값만 남기는데, 이 과정을 키 시프팅(Key Sifting)이라고 한다.

표 II-1-3 단일광자의 편광 상태를 이용한 BB84 QKD 프로토콜의 과정

단계	Alice	전송									Bob
1	비트 시퀀스 x_A	1	1	0	0	1	0	1	0	1	
	비트 시퀀스 y_A	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
2	준비 기저	×	+	+	+	+	×	×	×	×	
	큐빗 시퀀스	A	V	H	H	V	D	A	D	A	
3		1	1	0	1	0	0	1	1	0	비트 시퀀스 y_B
		×	×	+	×	+	+	×	×	+	측정 기저
		1	1	0	1	1	1	1	0	1	측정된 비트 x_B
4	기저 비교 ($y_A = y_B$?)	○		○		○		○	○		기저 비교 ($y_A = y_B$?)
5	Sifted key x'_A	1	-	0	-	1	-	1	0	-	Sifted key $x'_B = x'_A$

* H : 수평 편광, V : 수직 편광, D : 45° (Diagonal) 편광, A : -45°(Antidiagonal) 편광

시프팅된 키의 일부를 인증된 공개 채널로 공개하여 매개 변수를 추정하고, 적절한 오류 정정 부호와 비밀성 증폭(Privacy Amplification)을 위한 해쉬 함수(Hash Function)를 선택한다. 이후 공개되지 않은 나머지 키를 앞서 선택한 오류정정부호화 해쉬함수를 사용하여 비밀키로 전환한다. 추정된 양자 비트 오류율(QBER)이 문턱값보다 작다면 분배된 키는 정보이론적으로 안전하게 된다. 초기 QKD 실험 구현은 1989년에 Bennett 등이 빛의 편광상태를 이용하여 32cm의 자유 공간(Free Space) 양자 채널을 통해 이루어졌고, 그로부터 4년 뒤 제네바 대학의 Gisin 그룹에서 1km 길이의 광섬유를 양자 채널로 사용하여 실험에 성공함으로써 유선 QKD 기술 개발의 시작을 알렸다.

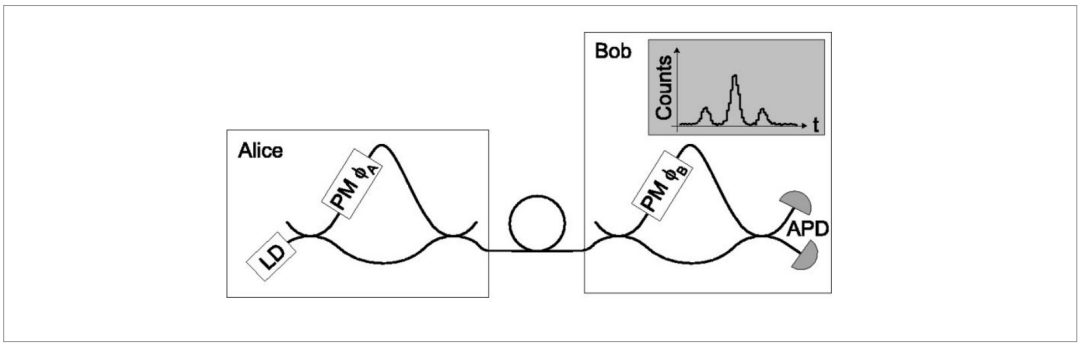
㉠ 위상 인코딩 기반 BB84 QKD

빛의 편광 상태를 이용하여 인코딩할 경우 일반적인 단일 모드 광섬유 양자 채널로 전송하는 과정에서 편광 상태가 잘 유지되지 않고 광섬유의 꼬임이나 텐션(Tension) 등으로 유도된 복굴절(Birefringence)에 의해 계속 변화하게 된다. 특정 방향으로 빛의 편광을 정렬하여 입사시키면 편광 상태를 오랫동안 유지할 수 있는 편광 유지 광섬유(Polarization Maintaining Fiber)라는 특수 광섬유를 이용할 수도 있으나, 일반 광섬유에 비해서는 가격이 고가이기 때문에 수십 km 이상의 전송거리가 필요한 상황에서는 적절하지 않다. 편광 대신에 두 펄스 사이의 위상차를 이용하여 인코딩하면 광섬유 기반 광학계에서 상대적으로 쉽게 구현할 수 있는데, [그림 II-1-26]과 같이 송·수신단에 동일한 광섬유 마하젠더 간섭계가 각각 하나씩 있는 이중 비대칭 마하젠더 간섭계 구조를 이용한다. 이 마하젠더 간섭계는 50:50 광 커플러(Optical Coupler) 두 개와 위상 변조기(Phase Modulator), 광섬유 지연선로로 구성되어 있고, 두 경로의 길이차가 다르기 때문에 단일광자 펄스가 간섭계를 통과한 후 이 광 경로 차이에 해당하는 시간 지연을 가지는 두 개의 타임 슬롯 중 하나에 광자가 확률적으로 존재할 수 있게 된다. 다시 말해서, 광자가 간섭계의 짧은 경로를 통과하는 상태를 $|S\rangle$, 긴 경로를 통과하는 상태를 $|L\rangle$이라고 정의하면 간섭계 통과 후 단일광자의 양자상태는 $e^{i\phi_A}|S\rangle+|L\rangle$이 된다. Alice는 두 경로 중 하나에만 위상 변조기를 이용하여 $\{0,\pi/2,\pi,3\pi/2\}$ 네 값 중 하나를 랜덤하게 골라 위상 변화를 인가하고, Bob은 $\{0,\pi/2\}$ 중 하나를 골라 위상을 마찬가지로 랜덤하게 변조한 뒤 측정 결과를 기록한다. 수신단에서 Bob의 간섭계를 통과한 후 단일광자는 총 3개의 타임 슬롯($|SS\rangle, |SL\rangle+e^{i\triangle\phi}|LS\rangle, |LL\rangle$)에 존재할 수 있다. 실험적으로 Time-to-Amplitude Converter (TAC) 혹은 Time-Correlated Single Photon Counting (TCSPC) 시스템과 같이 검출된 광자의 도착 시간 간격을 분석할 수 있는 장비를 이용하여 시간에 대한 광자수 시간 분포를 측정할 경우, 총 3개의 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 중 가운데 피크에 해당하는 것이 단일광자 간섭이 발생할 수 있는 타임 슬롯이며, 양 옆의 피크는 단일광자 펄스가 각 간섭계에서 어떤 경로를 통과하였는지 확정할 수 있으므로 간섭과 관련이 없는 타임 슬롯이다. 따라서 측정 시간 윈도우를 가운데 피크(peak)의 영역에 맞추고 두 단일광자검출기(그림의 APD)의 검출 정보를 확인하면 수신단의 키 비트열을 만들어 낼 수 있다. 이 단계에서 단일 광자 간섭의 가시도가 높을수록, 즉 간섭이 이상적으로 일어날수록 낮은 양자 비트 오류율(QBER)을 얻을 수 있기 때문에 본격적인 QKD를 수행하기에 앞서 간섭계의 특성을 측정하고 최적화하는 작업이 꼭 필

요하다. 높은 가시도의 간섭무늬를 얻기 위해서는 간섭계의 경로차에 해당하는 시간지연이 광자의 결맞음 시간(Coherence Time)이나 펄스 폭, 단일광자검출기의 시간 불확도(Timing Jitter)보다 길어야 하고, 두 간섭계의 시간지연 차이가 결맞음 시간보다는 짧아야 하며, 두 간섭계의 상대적 위상 변화가 빛의 파장 범위 내에서 안정적으로 유지되어야 한다. 키 시프팅 과정은 편광 기반 BB84에서와 같이 각자 사용한 기저를 공개하고 같은 기저를 사용한 비트 정보만 남김으로써 이루어진다. $\{0,\pi\}$를 기저 0, $\{\pi/2,3\pi/2\}$를 기저 1로 정의하면 Bob은 $\{0,\pi/2\}$ 중 하나의 위상값을 적용함으로써 두 기저 중 하나를 선택할 수 있는데, 같은 기저를 선택한 경우 최종적으로 간섭하는 단일 광자 양자상태의 위상 차이가 0 또는 π이므로 어느 검출기를 클릭할지 확정적으로 알 수 있어 대칭 키를 만들어낼 수 있다.

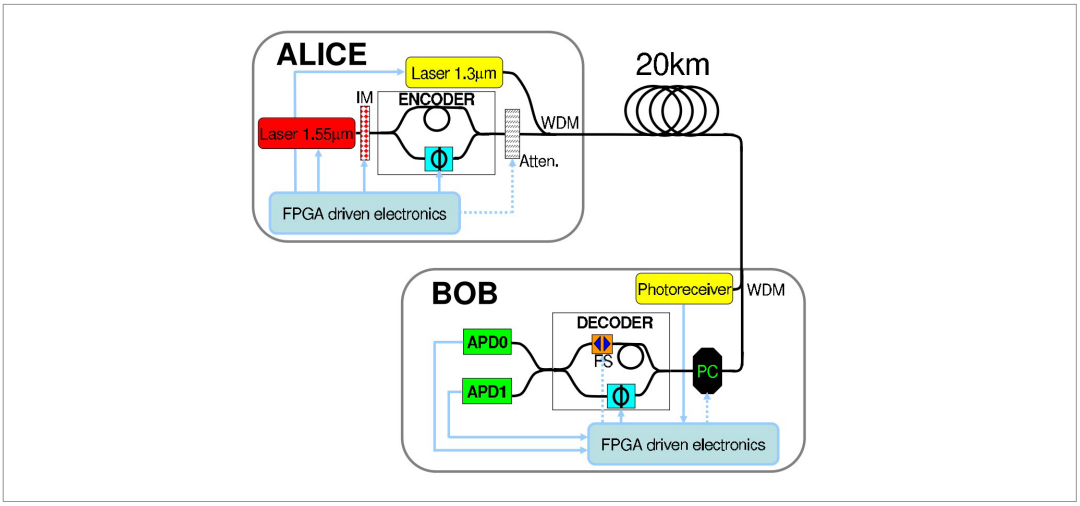
이 시스템에서 중요한 것은 키를 교환하는 과정에서 두 마하젠더 간섭계의 경로차와 편광상태를 안정적으로 유지하는 것이다. 온도나 압력, 진동 등 외부 환경 변화로 인해 광경로가 변하면 Alice와 Bob 사이 위상관계가 틀어지고 비트열에 오류를 일으키게 된다. 이를 방지하기 위하여 다음 그림과 같이 두 간섭계 중 하나를 선택하여 한 경로(Arm)에 Fiber Stretcher(FS)를 삽입하고 고전 광 특성을 가지는 레퍼런스 펄스의 간섭 신호를 이용하여 압전소자가 들어있는 FS에 피드백 해주면 광섬유의 길이를 자동으로 조절하여 장시간 동안 간섭계의 위상을 안정화할 수 있다. 위상과 마찬가지로 간섭계를 통과하는 빛의 편광상태도 시간에 따라 변화하면서 간섭 결과에 영향을 미치는데, 이를 안정화하기 위해 전기적으로 구동하는 편광 조절기를 이용한다. 두 단일광자검출기의 시간 당 검출 광자수(Count Rate)의 합을 피드백 신호로 하여 편광조절기의 축에 전압을 인가해 주면 편광 드리프트가 보상된다.

그림 II-1-26 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 개요도



※ Nicolas Gisin et al. (2002)

그림 II-1-27 간섭계 안정화를 적용한 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 구성도



※ J. F. Dynes et al. (2007)

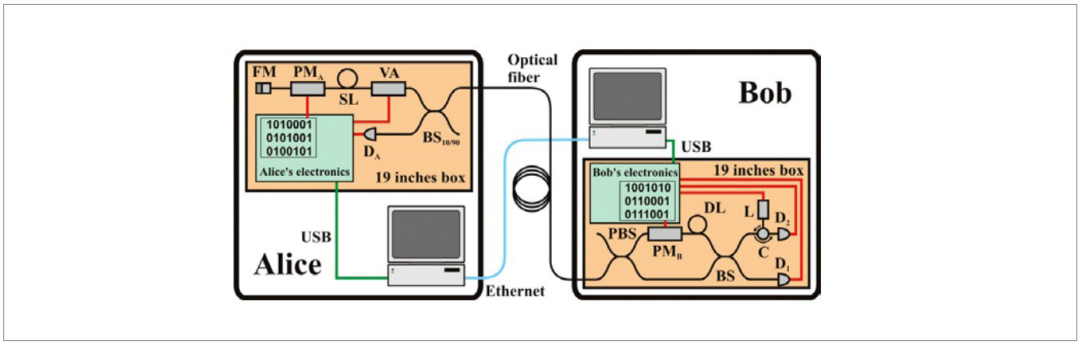
㉡ Two-way(Plug&Play) BB84 QKD

Plug&Play 방식 QKD는 기존의 위상 인코딩 기반 One-Way BB84 QKD 실험 구성을 변형한 것으로, 별도의 능동 안정화가 필요 없기 때문에 상대적으로 구현이 쉬운 프로토콜이다. 1997년에 Müller 등이 처음 제안하였고, 같은 해에 Zbinden 등에 의해 실험적으로 구현되었다. 이 시스템의 특징을 살펴보면 우선 수신단에만 레이저와 비대칭 마하젠더 간섭계, 단일광자검출기가 존재하며, 레이저와 단일광자검출기는 광 서큘레이터(Circulator)를 통해 서로 분리되어 있다. 또, 마하젠더 간섭계의 출(입)력부에 일반적인 광 커플러가 아닌 편광 빔 분할기(Polariz Beam Splitter, PBS)가 있어 서로 수직한 두 편광을 다중화/역다중화할 수 있다. 이 때 긴 경로와 짧은 경로를 통과하는 빛의 편광을 각각 조절하여 PBS를 통과할 때 생길 수 있는 광 손실(쓰지 않는 포트로 출력되는 광량)을 최소화하도록 한다. Bob의 광원에서 광 펄스를 생성한 후 간섭계를 통과하면(이 때 위상변조는 하지 않음) 간섭계 광경로 차이로 인한 시간 지연만큼 분리되어 있는 두 펄스가 생성된다. 이들을 양자채널을 통해 Alice에게 전송한다. Alice의 시스템 종단에 있는 패러데이 거울(Faraday Mirror)이 중요한 소자인데, 빛을 반사하여 Bob으로 다시 재전송하는 역할을 한다. 반사 과정에서 빛의 편광상태가 90도 만큼 변화하기 때문에 지나온 경로를 다시 통과하면서 광섬유 내 임의의 복굴절에 의한 편광 상태 변화가 보상되어 Bob의 시스템으로 다시 되돌아올 때의 편광 상태가 출발할 때와 서로 수직이 된다. 따라서 두 번째로 PBS를 통과할 때 이전에 지나온 경로와 다른 경로를 통과하므로 광 경로차가 자동으로 보상되어 하나의 타임 슬롯에서만 단일광자 간섭이 일어나게 된다. (One-Way 이중 간섭계 구조에서 관찰할 수 있었던 간섭과 관계없는 피크가 나타나지 않음.)

펄스들이 패러데이 거울에서 반사되고 나면 Alice는 광 감쇠기를 이용하여 단일광자 수준으로 출력을 낮추고, 나중에 도착한 펄스($|L\rangle$)에 자신이 가진 위상 변조기로 One-Way 방법과 같이 네 개의

위상 중 하나를 랜덤하게 골라 비트 정보를 인코딩하여 Bob에게 다시 전송한다. 나머지 과정은 One-Way 방식과 동일하다.

그림 II-1-28 Plug&Play BB84 QKD 시스템의 실험 구성도



※ Stucki, D et al. (2002)

② Distributed-phase-reference(DPR) 프로토콜

DPR 프로토콜은 서로 이웃한 약한 결맞음 펄스(Weak Coherent Pulse, WCP) 사이의 시간 혹은 위상에 비트 정보를 기록하는 방식으로, 인코딩 및 측정을 위해 랜덤한 기저 선택이 필요하지 않기 때문에 상대적으로 시스템 구성이 간편하다는 장점이 있다. 다만 프로토콜이 성립하기 위해서는 전송하는 광 펄스열 전체에 걸쳐서 일정한 위상관계를 가져야 한다는 가정이 있다. (예 : 모드 잠금(Mode-locked) 레이저) 인접한 펄스 사이에 결맞음이 유지되어야 간섭을 확인할 수 있으므로, 레이저의 선폭(결맞음 시간)과 광 펄스의 간격 등을 고려하여 실험을 설계해야 한다.

㉠ Coherent One-Way (COW) QKD

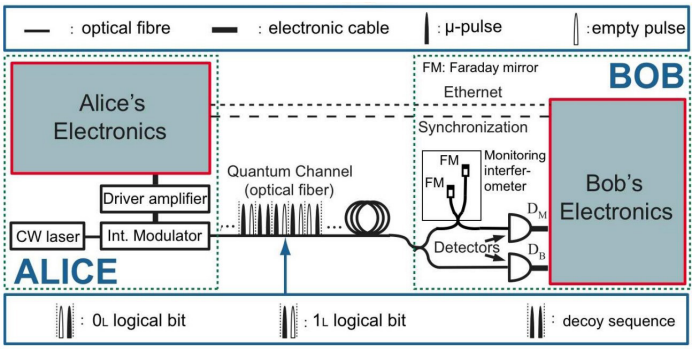
앞서 소개한 위상 인코딩 방식의 BB84 QKD 프로토콜은 Alice가 광자의 (타임 빈) 양자상태를 4개 중 하나로 변조하고, Bob이 기저를 선택하여 측정하는 방식이었기 때문에 대칭 키를 생성할 때 간섭이 일어나는 검출 시점과 그 때의 상대 위상 차이 정보를 같이 알아야 한다. 광자가 존재할 수 있는 두 타임 빈을 시간 순서대로 $|S\rangle, |L\rangle$이라 할 때 Alice는 $|S\rangle + e^{i\phi_A}|L\rangle (\phi_A \in 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$과 같이 양자상태를 인코딩하여 전송하고, Bob이 측정 기저(ϕ_B)를 선택하여 간섭계 출력 결과 기록할 때 실제 간섭에 관여한 양자상태는 $|SL\rangle + e^{i\Delta\phi}|LS\rangle (\Delta\phi = \phi_A - \phi_B)$으로 기술할 수 있다. 여기서 $|SL\rangle$은 앞 타임 빈에 존재하는 단일광자가 간섭계의 긴 경로(Long Arm)를 통과하는 상태를 의미하고, $|LS\rangle$는 반대로 뒤 타임 빈에 존재하는 단일광자가 간섭계의 짧은 경로(Short Arm)를 통과하는 상태를 의미한다. $\Delta\phi$는 Alice와 Bob이 인가한 위상의 차이이며, 둘의 준비/측정 기저가 동일할 경우 보강 혹은 상쇄 간섭을 확인할 수 있다. 만약 Alice가 처음부터 두 타임 빈에 대한 논리 큐비트($0 : |S\rangle|L\rangle, 1 : |L\rangle|S\rangle$)로 인코딩할 수 있다면, Bob은 광자의 도착 시간 정보만 측정해서 비트 정보를 알아낼 수 있으므로 전체 시

스템이 간편해지고 외부 환경 변화에 대한 오류가 생길 가능성이 더 낮다. COW 프로토콜은 이 아이디어에서 출발한 것으로, 실제 시스템에서는 연속발진(Continous-Wave, CW) 레이저를 소광률이 높은 진폭 변조기(Intensity Modulator)로 변조하여 특정 타임 빈에 약한 세기의 광 펄스를 만들어주는 비트 정보 인코딩을 수행한다. 두 개의 타임 빈 중 하나에 약한 결맞음 펄스를 보내고, 나머지 타임 빈은 진공(Vacuum) 상태가 되도록 하여 논리 큐비트($0 : |S\rangle|L\rangle, 1 : |L\rangle|S\rangle$)를 만들어 낸다. 예를 들어 [그림 II-1-29]와 같이 첫 번째 타임 빈이 진공이고 두 번째 타임 빈에 펄스가 존재하면 비트 0, 반대로 첫 번째 타임 빈에만 펄스가 있고 두 번째에는 진공 상태이면 비트 1이 된다. 이렇게 인코딩된 상태들은 각 상태에 대해 간단한 도착 시간(Time Stamp) 측정을 함으로써 구분할 수 있다. 추가적으로 디코이(Decoy) 시퀀스라 불리는 세 번째 상태도 있는데, 여기서는 두 타임 빈 모두가 약한 결맞음 펄스를 포함하고 있으며 비트 상태들과 마찬가지로 랜덤하게 준비된다.

Alice는 CW 레이저의 진폭을 랜덤하게 변조하여 양자 상태를 만들고, 단일 광자 수준으로 감쇠하여 Bob에게 전송한다. Bob은 두 개의 단일 광자 검출기로 비트 정보(펄스의 도착 시간)를 읽고 결맞음의 정도를 모니터링(Monitoring) 한다. 검출기 하나는 펄스의 도착 시간을 측정하고, 나머지 검출기는 결맞음을 측정하는 광섬유 간섭계의 출력부에 위치하여 연속한 두 광 펄스 사이의 결맞음을 측정한다. 광 펄스가 인접한 타임 슬롯에 모두 존재하는 경우는 디코이 시퀀스, 1-0 비트 시퀀스가 있다. 둘 중 어느 경우에나 결맞음이 똑같이 존재하므로 도청자 Eve가 중간에 PNS 공격 등을 시도하여 결맞음이 깨지면 모니터링 간섭계 출력부의 검출 결과에 바로 영향을 주어 도청 공격 여부를 확인할 수 있다. 예를 들어 Bob이 $t = 2k_d$에서 디코이 시퀀스 펄스 사이의 간섭을 측정했을 때 [그림 II-1-29]의 모니터링 검출기 D_M에서 광자가 검출되면 결맞음이 깨진 것이다. Bob의 측정과 원본 키 생성이 끝난 후 Alice가 디코이 시퀀스의 인덱스 k_d를 공개하면, Bob은 디코이 시퀀스에 해당하는 키를 지운 다음(키 시프팅) D_M에서의 검출 여부를 확인하여 결맞음이 깨진 정도를 추정할 수 있다. 이후의 후처리 과정은 기존 프로토콜과 동일하게 수행하면 된다.

프로토콜의 전체 과정에서 알 수 있듯이 시프팅 과정에서 버려지는 키의 양이 작기 때문에 효율적이고, 기존에 기저 선택을 위해 필요했던 능동 소자(위상 변조기)들을 제거하고 수동 소자들로 수신부를 구성할 수 있기 때문에 광 손실이 작고 경제적이다. 또, 수신단에 도착하기 전까지 모든 광 펄스들이 하나의 광섬유 선로를 공유하기 때문에 별도의 편광 조절이 필요하지 않다는 점도 COW 프로토콜의 장점이다. 물론 수신부의 모니터링 간섭계도 온도 변화에 대한 안정화를 해야 하지만 기존의 One-Way BB84 QKD 시스템에서보다 훨씬 적은 빈도로 조정해 주어도 잘 동작하며, 펄스 반복률(클록 주파수)을 높이면 키 생성률을 높이면서 안정화하기도 더 용이해진다. 이러한 특징들로 인해 COW 프로토콜은 장거리 전송에 매우 유리하며, 현재 스위스의 QKD 장비 제조사 중 하나인 ID Quantique에서 COW 프로토콜을 이용한 제품을 생산하고 있다.

그림 II-1-29 COW-QKD 시스템의 구조

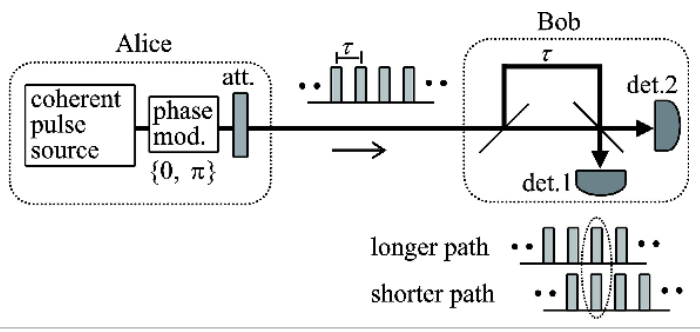


※ Stucki, D et al. (2009)

㉡ Differential Phase Shift QKD

Differential Phase Shift QKD는 두 펄스 사이의 상대 위상으로 비트 정보를 기록한다. 이를 위해 Alice는 결맞음 광 펄스열을 만들고, 각 펄스마다 랜덤하게 위상 변조를 수행하여 Bob에게 전송한다. 결맞음 광 펄스열은 선폭이 좁은 연속발진 레이저를 진폭변조기를 이용하여 펄스 형태로 변조하거나 모드잠금(Mode-locked) 레이저를 통해 구현할 수 있다. Bob은 비대칭 간섭계를 이용하여 Alice가 보낸 펄스열을 측정하는데, 간섭계의 경로차로 인한 시간 지연이 펄스열의 주기와 일치하기 때문에 이 측정을 통해 이웃한 펄스 사이의 위상 차이(비트 정보)를 알아낼 수 있다. Bob은 이 측정결과를 시프팅된 비트로 저장한다. Alice의 비트를 시프팅하기 위해 Bob은 그가 측정에 성공한 검출 시점(타임 빈)을 공개한다. Alice는 해당 정보를 토대로 Bob이 측정에 성공한 시점의 비트열만 남기는 시프팅 과정을 거친다. 이후는 Alice와 Bob이 다른 QKD 과정과 마찬가지로 오류정정과 비밀성 증폭을 수행하여 비밀키를 생성한다.

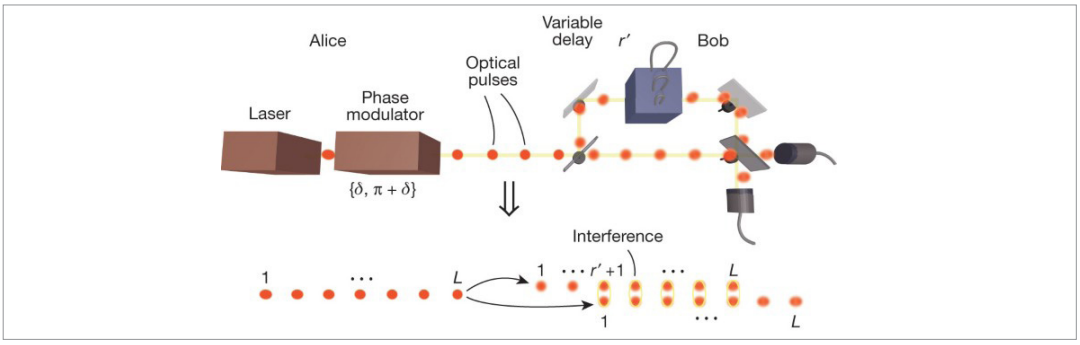
그림 II-1-30 DPS-QKD 프로토콜 실험 개요도



※ Kyo Inoue (2015)

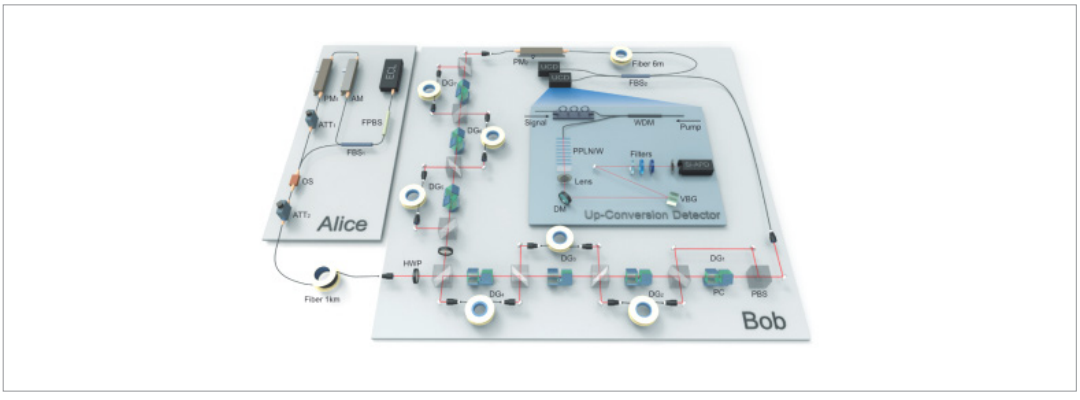
정통 DPS-QKD 프로토콜에서는 Bob이 가진 간섭계의 광 시간 지연이 펄스의 주기와 일치하기 때문에 이웃한 펄스들 사이의 위상 정보만을 인코딩할 수 있었다. 수신단의 간섭계에 광 스위치 같은 능동 소자를 추가하여 가변 광 지연선로(Variable Delay Line)를 구성하면 펄스열 중 임의의 두 펄스 사이의 위상차를 측정할 수 있다. Alice가 총 N개의 펄스를 보냈다고 가정했을 때, 펄스 주기 T만큼의 광경로차를 L이라고 하면 임의의 펄스 사이의 간섭을 측정하기 위해 Bob이 가진 가변 광 지연선로는 광경로의 길이를 $\{0, L, 2L, \cdots, (N-1)L\}$중 하나로 자유자재로 바꿀 수 있어야 한다. 예를 들어 i번째 펄스와 $i+r$번째 펄스 사이의 간섭을 측정할 때는 가변 광 지연선로의 길이를 rL로 구성한다. Bob은 r을 $\{0, 1, 2, \cdots, N-1\}$ 중 하나를 랜덤하게 선택하여 rT만큼의 시간차를 가진 펄스들의 간섭을 측정하고, 공개 채널을 통해 검출 시점 i와 r을 공개하여 Alice가 키 시프팅을 할 수 있도록 한다. 도청자는 이 상황에서 시퀀스 전체를 알아내기 어렵기 때문에 기존 DPS-QKD보다 보안성이 더 강화된다. 이를 Round-Robin DPS 프로토콜이라고 하며, 2014년에 일본의 Sasaki 등이 처음으로 제안하였고 2016년에 중국의 J. W. Pan 그룹에서 처음으로 구현하였다.

그림 II-1-31 RRDPS-QKD의 실험 개요도



※ Sasaki, Toshihiko et al. (2014)

그림 II-1-32 RRDPS QKD 실험 구성도



※ Li, Yu-Huai et al. (2006)

③ 측정 장치에 무관한 프로토콜

불연속변수(Discrete-Variable) 기반 양자 키 분배 시스템은 단일광자검출기 사용을 전제로 한다. 단일광자검출기는 검출 신호(펄스) 발생 유/무만 판단할 수 있기 때문에 광자수 상태를 정확히 구분할 수 없고, 불완전한 성질(검출효율<100%, 암계수(Dark Count) 존재) 때문에 QKD 시스템의 성능에 많은 영향을 미친다. 여기서 소개할 두 프로토콜은 검출 시스템에 대한 부채널 공격 요소를 제거하여 높은 보안성과 전송 거리를 달성할 수 있는 프로토콜이다.

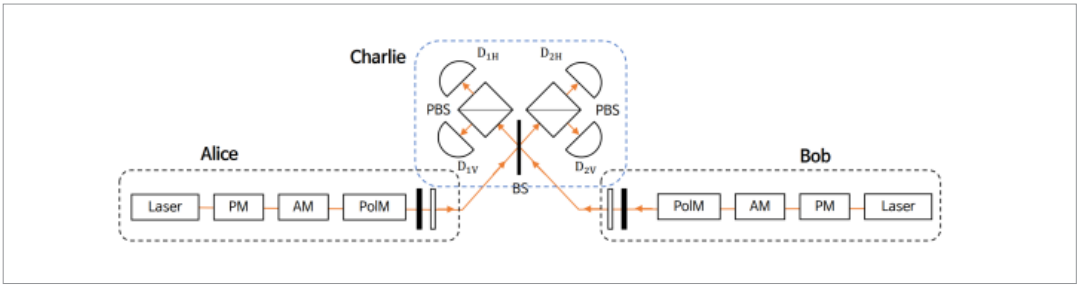
㉠ Measurement-Device-Independent QKD

기존 QKD 방법의 보안성이 이론적으로 잘 증명되어 있다고 하더라도, 실제 시스템을 구성하는 다양한 소자들이 부채널(Side-Chanel)을 갖고 있기 때문에 이에 대한 다양한 공격(Side-Channel Attack)에 노출될 수밖에 없다. 따라서 부채널을 이용한 QKD 시스템 해킹에 대한 연구가 많이 이루어졌고, 장치의 불완전한 요소에 관계 없이 안전하게 동작하는 QKD (Device-Independent QKD, DI-QKD)가 제안되었다. 이는 얽힘 광자의 측정 결과를 토대로 벨 부등식(Bell's Inequality)의 위배(Violation) 여부를 시험해야 하는데, 현재 기술로 구현하기에 한계가 있기 때문에 그 대안으로 측정 장치에 무관한 QKD(Measurement-Device-Independent QKD) 프로토콜이 제안되었다. 기존 QKD 시스템은 여러 가지 양자 해킹 공격 중 검출기에 대한 부채널 공격에 가장 취약한데, Eve가 중간에 채널을 제어하여 강한 광 펄스 같은 임의의 신호를 전송하면 Bob은 이를 수용할 수밖에 없고 필터를 사용하더라도 완벽하지 제거되지 않기 때문에 검출기에 대한 공격을 완전히 차단하기 어렵다. MDI-QKD는 신뢰할 수 있는 사용자인 Alice와 Bob이 각자 양자상태를 완벽하게 준비하여 양자채널을 통해 중앙의 수신자(릴레이)에게 전송한다는 상황을 가정한다. 중앙의 릴레이에는 검출기들이 존재하는데, 여기에는 어떤 가정도 하지 않으므로 실제로 도청자의 통제 하에 있을 수도 있다. 이 방법을 이용하면 검출기나 측정 장비의 신뢰도에 대해 더 이상 걱정하지 않아도 되므로 기존 QKD 프로토콜보다 높은 보안성을 가지면서, 효율이 낮은 검출기와 광손실이 많은 채널에서도 구현 가능하므로 현재까지 발표된 DI-QKD 프로토콜보다는 실용적이라고 할 수 있다.

[그림 II-1-33] 은 MDI-QKD 프로토콜의 실험 구성 개요도이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존 QKD 프로토콜과 같이 Alice가 양자상태를 생성하여 Bob에게 전송하는 것이 아니라, Alice와 Bob이 독립적으로 양자상태를 인코딩하여 제3자인 Charlie에게 동시에 전송하고, Charlie는 벨 상태 측정(Bell State Measurement, BSM)을 수행하여 측정이 성공한 시점과 그 결과를 기록하고 Alice와 Bob에게 공표한다. 벨 상태 측정은 Alice와 Bob이 보낸 비트가 같은지 다른지 비교(Parity Check)하기 위해 필요하며, Charlie는 이 과정에서 둘의 정확한 비트값을 알 수 없다. 후처리를 제외한 프로토콜의 전체 과정은 다음과 같다.

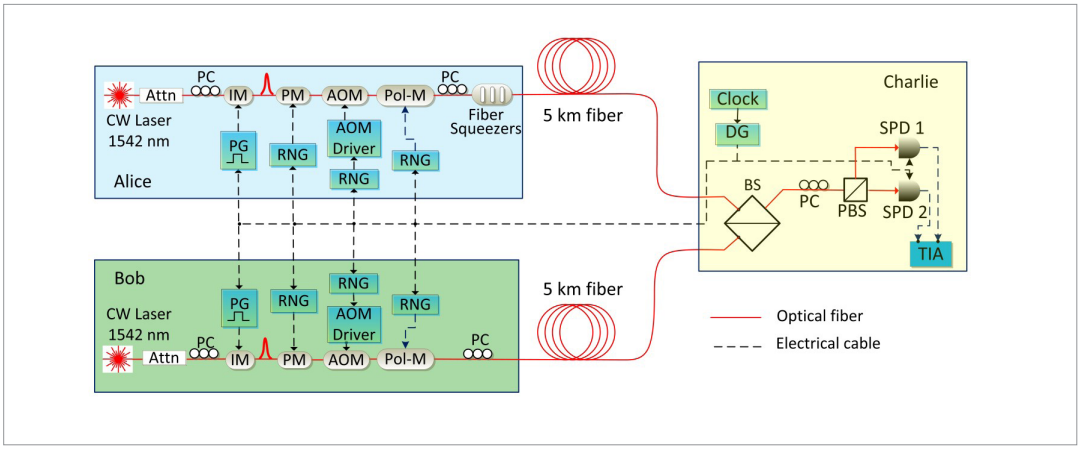
1. Alice와 Bob이 위상 랜덤화된 약한 결맞음 펄스 신호를 디코이 신호와 함께 4개의 편광 기반 BB84 상태 중 하나로 준비하고 Charlie에게 전송한다.
2. Charlie가 Alice와 Bob으로부터 동시에 도착한 광자에 대해 BSM을 수행한다. D_{1H}&D_{2V} 혹은 D_{1V}&D_{2H}에서 광자가 동시에 검출될 경우는 벨 상태 중 $|\psi^{(-)}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle - |VH\rangle)$상태로 투영되어 Hong-Ou-Mandel (HOM) 간섭에 의해 peak가 나타나고, D_{1H}&D_{1V} 또는 D_{2H}&D_{2V}에서 광자가 동시에 검출될 경우는 $|\psi^{(+)}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle + |VV\rangle)$로 투영되어 HOM dip이 나타난다. 이들 외에 다른 형태의 검출은 실패한 경우로 간주한다.
3. Charlie가 BSM 결과를 인증된 고전 채널을 통해 발표한다.
4. Alice와 Bob이 3. 의 결과를 토대로 BSM이 성공한 시점의 비트열만 남기고 나머지는 버린다.
5. BB84의 sifting 프로토콜처럼 Alice와 Bob이 서로의 인코딩 기저를 공개하고 서로 같은 기저를 사용한 시점의 비트열만 남긴 다음, Charlie가 측정한 BSM 결과(패리티)에 따라 둘 중 한 명이 자신의 비트들을 플립하여 Bob의 키와 같도록 맞춰준다.

그림 II-1-33 MDI-QKD의 실험 개요도



MDI-QKD 프로토콜 구현의 핵심은 HOM 간섭 측정과 BSM의 분석이라고 할 수 있다. 실제 시스템에서 구현하기 위해서는 독립적인 광원으로부터 서로 구별할 수 없는(Indistinguishable) 동일한 광자들을 생성해야 하므로 이들을 구별할 수 있는 모든 요소(파형, 스펙트럼, 방출 시간 차이 등)들을 제거하고, 간섭계의 편광 등이 잘 유지되어야 한다. 또한 BSM의 성공률을 높이기 위해서는 PBS 같은 편광 의존 광소자들의 소광률이 높아야 하고 검출기들의 암계수가 낮아야 한다. [그림 II-1-34] 는 2014년에 Z. Tang 등이 디코이 상태를 포함한 광 펄스의 랜덤한 편광 변조를 이용하여 MDI-QKD 실험을 구현한 것이다.

그림 II-1-34 MDI-QKD 실험 구성도



※ Tang, Zhiyuan et al. (2014)

㉡ Twin-Field QKD

2018년도에 도시바 유럽 연구소의 M. Lucamarini 등이 제안한 방법으로, 현 시점에서 중계기 없이 가장 먼 거리에서(〉500 km) 양자 키 분배가 가능한 프로토콜로 알려져 있다. Twin이라는 용어는 두 광 필드(Field)의 위상이 간섭하기 위해 충분히 비슷해져야 한다는 점에서 유래했다.[129] 정확히 말하자면, Alice와 Bob이 각자 진폭을 랜덤하게 변조하여(decoy state 포함) 광 펄스를 생성하고 다음과 같이 위상을 인가하여 Charlie에게 전송한다.

$$\psi_i = (\alpha_i + \beta_i + \delta_i) \oplus 2\pi, i = A, B$$

여기서 $\alpha_i \in \{0, \pi\}$는 비트 정보 인코딩을 위한 값이고 $\beta_i \in 0, \pi/2\}$는 기저를 결정하는 값이며, δ_i는 전체 위상 범위 $[0, 2\pi)$를 M개의 동일한 간격의 조각($\Delta_k = 2\pi k/M,\ k = 0, 1, \cdots, M-1$)으로 나눈 것 중 하나($k$)를 랜덤하게 선택한 것이다.

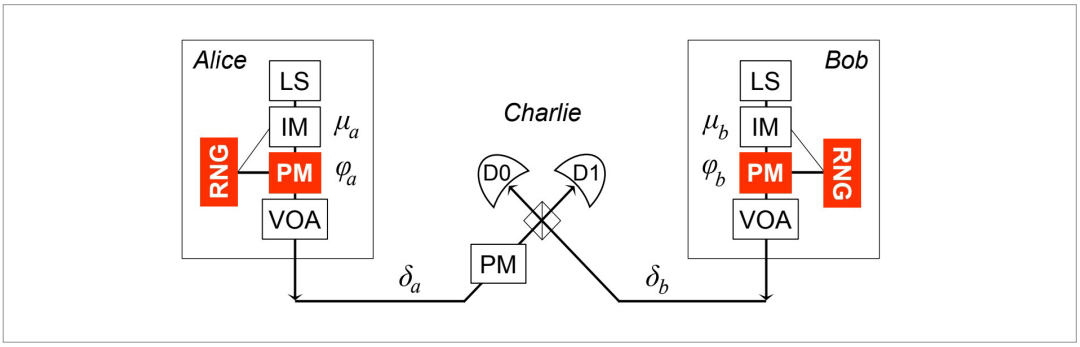
선택한 위상들이 충분히 가까운지 보장하기 위해 인증된 공개 채널을 통해 각자 선택한 기저와 위상 슬라이스를 공개하여 서로 같은 기저와 위상 슬라이스를 도입한 경우($\beta_A = \beta_B, \delta_A = \delta_B$)만 남긴다. 이때는 Alice와 Bob이 선택한 비트에 따라 Charlie의 시스템에서 펄스가 보강 혹은 상쇄 간섭을 하게 된다. Charile가 이 간섭 측정 결과를 공개하고 나면 Alice와 Bob은 상대방의 비트 정보를 알 수 있게 되므로 추후 특정 비트들을 플립(Flip)하는 과정을 통해 대칭키를 생성할 수 있다. Charlie는 자신의 검출 결과로부터 Alice와 Bob이 보낸 비트가 같은지(00 또는 11) 혹은 다른지(01 또는 10)를 판단할

129) S. Pirandola et al. (2020)

수 있지만 정확한 비트 정보는 알 수 없다. Alice와 Bob이 정보를 인코딩하여 전송하고 제3자가 측정을 한다는 점에서 측정 기기 무관 QKD와 구조가 유사한데, 이 구조 덕분에 측정부 도청 공격에 대한 보안성이 확보된다.

기존의 QKD 프로토콜에서 키 생성률이 전송채널의 투과율(Transmission(η), $\eta \ll 1$)에 선형 비례하는 데 반해 Twin-Field(TF) QKD에서는 투과율의 제곱근($\eta^{1/2}$)에 비례하므로 장거리를 전송하는 데 유리하고, 디코이 상태와 위상 랜덤화를 추가적으로 활용하면 전송거리를 더 확장할 수 있다. MDI-QKD도 디코이 상태 프로토콜을 적용하여 전송거리를 확장할 수 있지만, 사용자 두 명이 광자를 하나씩 Charlie에게 보내어 두 광자 간의 간섭, 즉 HOM 간섭을 관측해야 한다. 즉, 두 검출기의 동시 계수(Coincidence Count) 측정이 필요하다. 반면에 TF QKD는 단일광자가 확률적으로 존재하는 두 광필드를 전송하여 단일광자 간섭을 측정한다. 단일광자 간섭의 경우 둘 중 하나의 검출기에서만 신호가 발생하므로 키 생성률이 단일 검출계수(Single Count)에 의존하는데, 덕분에 키 생성률이 전송채널의 투과율에 대한 영향을 상대적으로 적게 받아 같은 조건에서 MDI-QKD보다 더 높은 키 생성률을 가질 수 있다.

그림 II-1-35 TF-QKD 실험 개요도



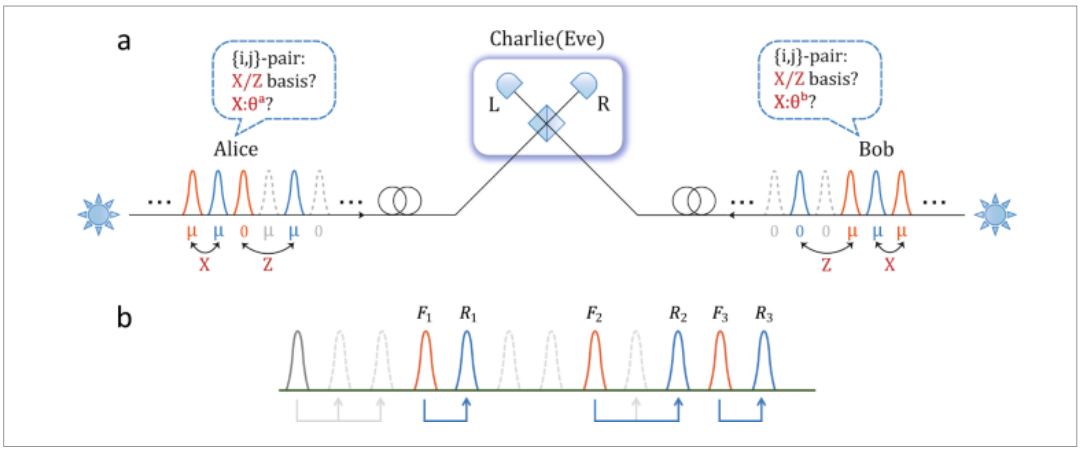
※ Lucamarini, M. et al. (2018)

ⓒ Mode-pairing QKD

TF-QKD 구현에서 가장 어려운 점은 두 개의 독립 광원으로부터 나온 빛이 Charlie 쪽에서 단일광자 간섭(혹은 1차 간섭)을 해야만 키를 생성해 낼 수 있다는 점이다. 즉, 장거리 키 생성을 위해 Alice와 Bob 쪽의 광원에 위상이 굉장히 잘 맞춰져 있어야 하고 Charlie에 전송되는 동안에도 이 위상 결맞음이 계속 유지되어야 하는 것이다. 그래서 TF-QKD를 통한 장거리 키분배를 위해서는 초반 위상 맞춤을 위한 여분의 광원과 전송되는 양자 상태들의 상대적 위상차를 보정하기 위한 계속된 위상 잠금(Locking) 및 보정이 필요하다. 하지만 이러한 위상 잠금/보정 기술의 구현은 QKD 구현을 너무 어렵게 하는 측면이 있고, 또한 이러한 어려움은 QKD 구현 비용을 대폭 증가시키게 된다.

최근 TF-QKD의 장점인 장거리와 높은 키 생성률을 유지하면서 위상 잠금이 필요치 않은 QKD가 제안되었으며, 이 프로토콜은 원 제안자들이 이름 붙인 것을 따라 Mode-paring(MP) QKD 프로토콜이라고 불린다.[130)]

그림 II-1-36 Mode-pairing QKD 개념도



※ Pei Zeng et al. (2022)

decoy를 생각하지 않은 상황에서 이 프로토콜을 간단하게 살펴보면, Alice와 Bob은 세기가 μ인 신호와 진공 상태인 0 중 하나를 무작위로 생성해서 Charlie에게 보내고 Charlie는 자신의 두 개의 측정기 중 하나의 측정기에만 측정된 신호가 무엇인지 Alice와 Bob에게 알린다. 다만 이때 세기 μ인 레이저에는 임의의 위상 값을 인코딩한다. 적당한 길이의 데이터가 쌓이면 Alice와 Bob은 Charlie의 측정기 중 하나만 측정된 신호들에 대하여, 순차적으로 두 개씩 쌍으로 묶는 모드 결합(Pairing)을 통하여 축 선택을 한다. 이는 두 개의 서로 다른 시간에 찍힌 신호에 대하여 앞 혹은 뒤의 신호가 진공 상태를 포함한다면 Z축이 되고, 앞과 뒤의 신호가 모두 세기 μ이면 X축이 되는 것이다. Z축에서 (0, μ)이면 0이 인코딩된 것이고, (μ, 0)이면 1이 인코딩된 것이다. 또한 X축에서 앞 신호와 뒤 신호의 위상을 각각 ϕ_i, ϕ_j 라고 했을 때, 두 위상의 차에 대한 관계식 $x = \lfloor (\phi_j - \phi_i)/\pi \rfloor \bmod 2$에 의해 0, 1의 인코딩 값을 정한다. 모드 결합을 통한 축 및 인코딩 값이 결정되면 Alice와 Bob은 축에 대한 정보를 공개채널을 통해 공개하고, 같은 축인 경우의 키만 남기게 된다.

이 MP-QKD의 가장 독특한 점은 양자 상태의 축과 인코딩하려는 양자 상태가 처음 보낼 때 정해지지 않고 나중에 정해진다는 점이다 (물론 진공 상태를 보낼 때는 Z축 중 하나의 양자 상태를 보낸다는 가정이 있지만, 이것이 Charlie의 하나의 측정기에 앞에서 찍히게 될지 뒤에서 찍히게 될지 알 수 없으므로 양자 상태 자체가 정해지는 것은 아니다. MP-QKD는 TF-QKD의 장점을 가지고 있지만, 위상 잠

130) Zeng P. et al. (2022)

금/보정 기술이 많이 필요치 않아 구현하는데 더 쉬운 장점도 있다. 이론적으로 점근적 영역에서 MP-QKD는 일반적인 MDI-QKD보다 키 생성율이 1,000배에서 100,000배까지도 가능하다고 알려져 있다.

(2) 연구 동향

BB84 프로토콜을 이용한 QKD 시스템은 지금까지도 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 요즘에는 칩(Chip) 기반 송수신부 모듈을 집적 광학 기술을 이용해 제작한 연구 결과들이 많이 발표되고 있다.[131] 도파로 뿐 아니라 레이저 다이오드, 변조기, 검출기까지 한 칩에 집적 가능하기 때문에 기존 광섬유 기반 유선 QKD 시스템보다 부피가 작고 안정적이며, 저전력으로 구동 가능하다는 장점이 있다.[132] 또, 이득 스위칭(Gain Switching)과 주입 잠금(Injection Locking)과 같은 기존의 광통신 기술을 결합하면 기존의 고속 진폭/위상 변조기 없이도 반도체 레이저를 직접 변조하여 안정적인(Chirp이 없는) 광 펄스를 만들고 다중 레벨 위상 인코딩을 구현하는 것이 가능하다. 이 점 때문에 BB84 뿐 아니라 COW, DPS 프로토콜의 송신부로도 활용할 수 있다.[133]

특히 Plug&Play BB84 QKD 시스템은 One-Way 방식보다 상대적으로 구현이 간단하기 때문에 국내에서 유선 QKD 시스템을 연구하는 학계(KIST, ETRI, KISTI, 고려대 등) 및 산업체(SK텔레콤, KT, 우리넷, FISYS, 코위버 등) 대부분이 장비를 자체 개발하고 시험까지 진행하였다. 특히 KIST와 KT는 공동연구를 통해 QKD 시스템에 시간, 파장, 편광 다중화 기술을 도입하여 1×64 네트워크로 확장한 실험 결과를 발표하고 실제 설치된 망(Fiber)을 통해 1×4 네트워크를 일주일 넘게 운용한 결과를 발표하기도 했다.[134]

DPR 프로토콜의 경우 국내에서는 ETRI 양자광학 연구실에서 광 집적 기술을 이용한 칩 기반 유선 QKD를 DPS 프로토콜로 구현한 바 있고, KISTI와 고려대학교 허준 교수 연구실에서도 광섬유 소자를 이용한 DPS-QKD 시스템 개발 연구를 진행하고 있다.

MDI-QKD 실험은 2013년 세 개의 그룹(캐나다, 중국, 브라질)에서 처음 구현된 이래로 발전을 거듭해 2016년에는 중국의 Jian-Wei Pan 그룹에서 초저손실 광섬유를 통한 전송거리 404km 달성에 성공하였다.[135] 초전도 나노와이어 기반 단일광자검출기(Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)가 상용화되면서 통신파장 광자의 검출 효율이 약 90% 까지 향상되고(기존 APD의 효율: 약 20%), 이 덕분에 MDI-QKD 뿐 아니라 다른 프로토콜을 사용한 유선 QKD 실험

131) Kwek, LC. et al. (2021)
132) Sibson, P. et all. (2017)
133) Paraïso, T. K. et al. (2019)
134) Byung Kwon Park et al. (2020)
135) Yin, H.-L. et al. (2016)

도 200km 이상의 장거리 전송 결과들이 많이 보고되고 있다. 대부분의 QKD 시스템은 사용자 간 같은 기준 프레임(Reference Frame)을 공유하는 것이 필수적인데, 환경 변화에 의해 기준 프레임이 시간에 따라 조금씩 변하므로 이를 능동적으로 정렬해주는 과정이 필요하다.[136] 기준 프레임 틀어짐(Misalignment)의 발생 원인은 편광 기반 프로토콜을 사용하는 위성 기반 무선 QKD의 경우 편광 축 변화이고, 위상 기반 프로토콜의 경우에는 간섭계의 길이 변화에 의한 위상 드리프트이다. 기준 프레임 재정렬 과정은 전체 시스템을 느리고 복잡하게 만드는 요인이므로, 기준 프레임 교정 없이 구현 가능한 Reference-Frame-Independent(RFI) QKD 프로토콜에 대한 연구도 2010년 영국의 Jeremy L. O' Brien 그룹에서 처음 제안된 이후로 유, 무선 QKD 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 이 RFI 프로토콜을 MDI-QKD에 적용하면 전체 시스템의 복잡도를 줄이면서 키 발생률도 높일 수 있는데,[137] 이를 RFI-MDI-QKD라 한다.

기존 MDI-QKD는 기저 Z($\{|0\rangle,|1\rangle\}$), X($\{|+\rangle,|-\rangle\}$) 두 개를 활용하는데 비해 RFI-MDI-QKD는 Y 기저($\{|+i\rangle,|-i\rangle\}$)를 추가로 활용한다. 시프팅 과정에서 Alice와 Bob이 같은 기저를 사용한 경우만 남긴다는 과정은 기존 MDI 프로토콜과 같지만, 여기서는 추가적으로 서로 다른 기저를 사용한 경우에 대한 오류율(Error Rate) $e_{ij}(i,j=X,Y,Z)$도 이용하여 도청자 Eve의 정보량 I_E를 다음과 같이 계산한다.

$$I_E(e_{ZZ},c)=(1-e_{zz})H_2[(1+u)/2]+e_{zz}H_2[(1+v)/2],$$

여기서 H_2는 Shannon의 바이너리(Binary) 엔트로피 함수이며, 사용한 매개변수 c,v,u는 다음과 같이 정의된다.

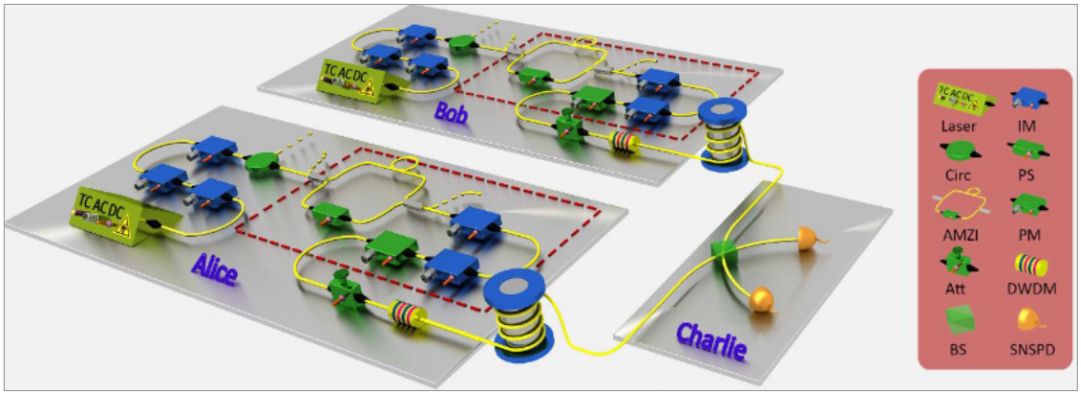
$$c=(1-2e_{XX})^2+(1-2e_{YY})^2+(1-2e_{XY})^2+(1-2e_{YX})^2,$$
$$v=\sqrt{c/2-(1-e_{zz})^2u^2}\,/e_{zz},\ u=\min\left\{\sqrt{c/2}\,/(1-e_{zz}),1\right\}$$

이 때 e_{zz}, c는 Alice와 Bob의 기준 프레임 변화에도 꽤 안정적인 값을 유지하므로, 이들의 함수인 I_E와 비밀키 생성률도 마찬가지로 기준 프레임 변화의 영향을 거의 받지 않게 되어 RFI-MDI QKD에서 능동 편광/위상 과정을 생략할 수 있는 것이다.

국내 연구진도 MDI-QKD 요소기술 및 시스템 구현 결과를 꾸준히 발표하고 있다. KIST 양자정보연구단은 2018년 Plug&Play 형태의 편광 다중화 기반 실용적인 MDI-QKD 시스템 구현 결과를 발표했고,[138] 2020년에는 더 적은 개수(3개)의 양자상태를 활용한 RFI-MDI-QKD를 제안하고 개념 증명 실험 결과를 발표하였다.[139]

136) Yin, ZQ. et al. (2014)
137) Hongwei Liu et al. (2018)
138) Park, C. H. et al. (2018)
139) Donghwa Lee et al. (2020)

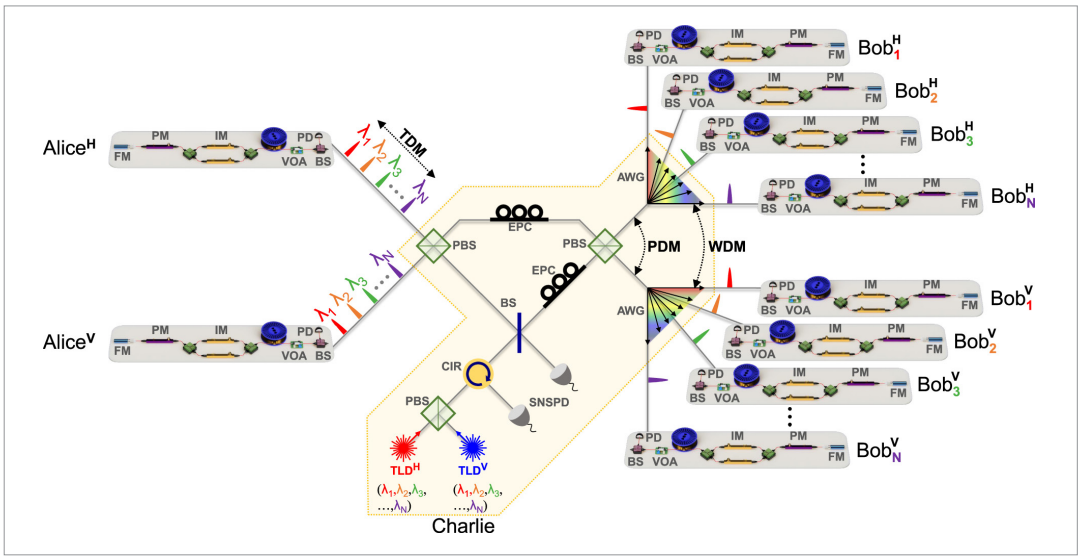
그림 II-1-37 광섬유 기반 MDI-QKD 시스템



※ Yin, H.-L. et al. (2016)

TF-QKD의 경우 멀리 떨어진 사용자들이 독립적인 채널을 통해 전송한 광자의 간섭 가시도를 장시간 동안 높은 수준으로 유지하는 것이 기술적으로 난이도가 높기 때문에 그동안은 중국과학기술대학(USTC) 그룹에서만 구현되었다. 그런데 최근 KIST에서 다음 그림과 같이 기존 프로토콜을 Plug&Play 형태로 변환하여 필요한 광원과 능동 소자들의 수를 줄임으로써 구현 난이도를 낮추고, 이전에 BB84 QKD 시스템을 통해 구현했던 다중화 기술을 적용하여 2×N 네트워크로 확장한 결과를 발표하였다.[140]

그림 II-1-38 2×N Plug&Play TF-QKD 네트워크 실험 개요도



※ Park, C. H. et al. (2022)

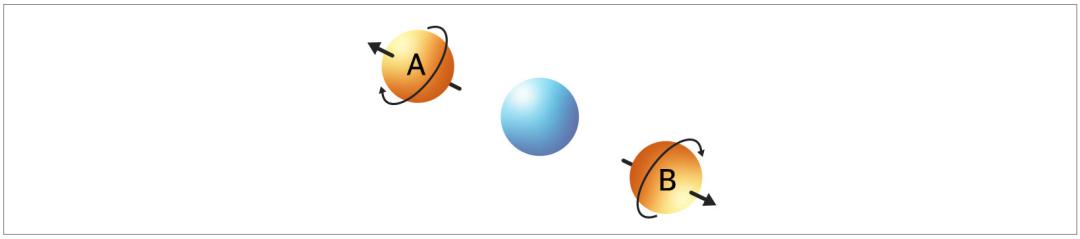
140) Park, C. H. et al. (2022)

나. 얽힘 기반 양자 키 분배

(1) 기술 동향

얽힘 기반 양자 키 분배는 얽힘쌍을 먼저 두 사용자 Alice와 Bob이 나누어 가진 후 측정을 하는 방식으로 광원을 전달하는 과정의 구현 안전성 관련 위협을 피할 수 있다.

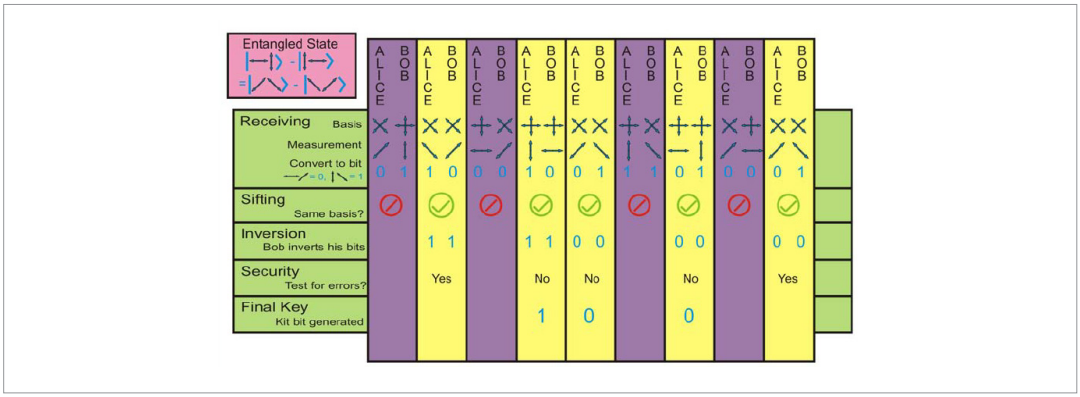
그림 II-1-39 양자 얽힘



※ 삼성디스플레이 뉴스룸

1991년에 Artur Ekert에 의하여 처음 제안 되었다.[141] 두 사용자가 얽힘쌍을 나누어 가진 뒤, 한쪽은 2개의 서로 다른 각도를, 다른 쪽은 3개의 다른 각도로 편광을 측정한 결과를 공개하여 키를 만드는 방식이다. 널리 사용되는 BB84 프로토콜도 얽힘기반 키분배로 구성할 수 있으며, 동일한 안전성을 제공할 수 있다는 것이 증명되었다. 이 프로토콜을 BBM92라고 한다.[142]

그림 II-1-40 BBM92 프로토콜



※ Chris Erven Thesis

141) A. K. Ekert (1991)

142) C. H. Bennett et al. (1992)

얽힘을 먼저 나누는 방식은 제3자가 수행할 수도 있는데, 나누어주는 사용자는 어떠한 정보도 알 수 없기 때문에 광원에 대한 구현 공격에도 안전한 프로토콜을 구성할 수 있다. 또한 측정 결과를 사용하여 특정한 부등식의 위배를 확인하는 것으로 측정기기에 대한 도청에도 안전한 키를 생성할 수도 있는데 이러한 방식을 기기무관(Device-Independent, DI) 양자 키 분배 프로토콜이라고 한다.[143)]

이 방식의 실용화에서 가장 중요한 부분은 높은 충실도의 얽힘쌍을 원하는 시간에 만들 수 있느냐와 높은 측정효율을 갖는 측정기의 사용으로 볼 수 있다. 충실도는 두 쌍이 얽혀있는 정도로 이해할 수 있고, 원하는 시간대에 생성하는 문제는 측정기의 활용하고 연결되어 있으며, 높은 측정효율은 특정한 부등식 위배 확인에 대한 데이터를 추출할 때, 생성되는 데이터에 대한 결함을 확인하는 것과 관련이 있다. 또한 측정효율을 정확히 추정하는 기술도 필요할 수 있다.

얽힘을 활용한 QKD도 안전한 키 생성 거리의 문제가 있는데, 거리를 늘리기 위해서는 추가적인 양자 메모리와, 얽힘쌍 간의 측정을 통한 얽힘 교환도 필요하다. 이 기술은 기본적으로 양자중계기의 역할이므로 이에 대한 것은 양자중계기 부분에서 다루도록 하겠다.

(2) 연구 동향

얽힘기반 양자 키 분배는 얽힘쌍을 만드는 것이 주요 이슈이므로, 이 과정에 연구들이 집중되어 있다. 얽힘쌍을 만드는 것은 양자컴퓨팅, 양자센서에서도 중요한 핵심기술이기도 하다.

국내에서는 양자통신을 위한 양자중계기 개발의 일환으로 얽힘쌍 만드는 연구과 양자센서를 위한 얽힘쌍 만드는 연구들이 진행되고 있고, 이는 양자중계기 부분에 기술되어 있다.

국내의 얽힘 기반 양자 키 분배 프로토콜 구현 연구는 초기 실험 단계로 최근 실험적으로 원리증명 연구 결과가 보고되었다.[144)] 이 연구에서 타임-빈(Time-Bin) 얽힘을 생성해서 측정을 통해 두 광자 얽힘을 확인하였고, 두 광자 가시성(Visibility) 측정을 통해 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식의 위배를 확인하였다. 현재 직접적인 DI-QKD에 대한 국내 연구 내용은 없으나 관련 연구로 한국표준과학연구원(KRISS)이 2016년부터 양자칸델라 실현을 위한 광자계수 검출기 검출효율 측정기술 연구를 시작하여 파장 250nm ~ 1,000nm 에서 시연한 바 있으며,[145)] 현재 1,000nm 이상 광통신 파장 대역에서 활용되는 단일광자 검출기에 대한 성능 평가 기술도 개발하고 있다. 또한 국가보안기술연구소(NSR)와 함께 기기무관 양자 키 분배의 요소기술인 높은 충실도의 양자 상태 생성 및 광통신 영역 높은 측정율 측정기술 확보 및 높은 정확도의 검출기 검출효율 측정기술과 기기무관 양자 키 분배의 정보이론적 안전성 분석 기술에 대한 연구를 수행 중에 있다.

143) A. Acin et al. (2007)
144) J.-H. Kim et al. (2022)
145) In-Ho Bae et al. (2019)

(3) 적용 분야

얽힘기반 양자 키 분배는 BB84 프로토콜이 적용하는 대상에 적용될 수 있으며, 기기무관(DI) 양자 키 분배에도 적용될 수 있다. 얽힘기반 양자 키 분배는 얽힘이 두 사용자의 양자채널로 이용되는 경우에는 언제든지 적용이 가능하다. 하지만 얽힌 양자 상태의 생성 및 고도의 측정기술이 요구되는 경우도 있을 수 있어 보안이 특히나 강하게 요구되는 국방, 국가 공공망 등에 적용될 것으로 보인다.

다. 양자 키 분배 네트워크

(1) 기술 동향

① 표준화 기술 동향

국내 양자암호통신 표준화는 한국정보통신기술협회(TTA)에서 주도하고 있으며, ETSI ISG-QKD, ITU-T SG13 양자 키 분배 네트워크 준용표준을 도입하고 네트워크 구조/인터페이스, 보안인증 규격을 고유표준으로 별도 제정 중에 있다.

국내 표준의 주요 방향은 효율적인 양자키 제공 및 전달, QKD 장치로의 직접 제어 방지 및 보안 방안, 개방화된 인터페이스, 멀티 벤더 상호운용성(Multi-Vendor Interoperability), 장애 검출 및 회복, QoS 및 과금 정책 제어 관리, P2P & MP2MP 등 다양한 토폴로지 및 장거리 네트워크 고려 등이다.

② 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN)

SDN은 중앙집중형 방식의 SDN 컨트롤러에서 전체 네트워크의 유연하고 프로그래밍 가능한 구성을 통하여 효율적인 네트워크 제어 및 관리를 수행한다. 또한 SDN은 이기종 장비, 시스템, 네트워크를 연계하여 통합하는 것을 단순화할 수 있는 방안을 제공한다.

SK텔레콤, KT, KISTI는 양자암호 네트워크를 중앙에서 통합·제어할 수 있는 소프트웨어 정의 기반 자동화 솔루션(Quantum-Software Defined Network, Q-SDN)을 개발했다. Q-SDN을 통하여 양자키가 부족한 구간에 양자키 경로를 실시간 재설정하거나 해킹이 발생했을 때 빠르게 원인을 파악해 키 삭제 혹은 해킹 구간 우회 제어 등 보안 조치를 할 수 있다.[146] 또한 KT와 SK텔레콤은 세계 최초로 국가 통합 연구시험망인 코렌(KOREN) 망에서 서로 다른 통신사 장비 간 Q-SDN 연동 실증을 추진하였다.[147]

146) 최호 (2021)
147) 신희강 (2022)

③ 멀티 벤더 상호운용성(Multi-Vendor Interoperability)

SK텔레콤과 KT는 이종 QKD 간의 원활한 서비스 연동과 제어를 위해서 Q-SDN 및 오케스트레이션 인터페이스 규격과 구현을 통해서 양자키 기반의 인터넷 서비스가 가능하도록 기술 개발을 추진하였다. IDQ와 도시바가 제안한 이기종 QKD 간 양자키 관리 시스템(QKMS)을 이용한 연동방안이 ETSI GS QKD 020(Draft)으로 표준화가 진행되고 있으며, 디지털 뉴딜사업에서 IDQ와 KT 간에 연동을 성공적으로 수행한 바 있다.[148)]

④ 양자키 서비스(Quantum Key Service)

SK텔레콤은 2016년 2월 Wifi Backhaul에 상용 양자암호통신망을 적용하고 성수국사~분당국사 구간에 외부 온도환경과 진동에 대한 안정화 검증을 추진한 바 있다.

KT는 양자가 전달되는 채널을 이중화된 구조로 만들어 장애가 발생하거나 해킹 시도가 인지되는 즉시 기존 회선 대신 백업 회선에서 새로운 양자키를 만들어 공급하는, 서비스 중단 없는 양자암호 기술을 개발하였다. 이는 양자암호통신 네트워크 제어 및 관리(ITU-T Y.3804) 표준을 기술로 구현한 사례이다.[149)]

KT는 양자 키 분배 네트워크가 제공하는 양자키를 기반으로 한 서비스 품질을 측정하기 위하여 ITU-T Y.3807 QKDN QoS parameters를 제안하였고 국제 표준으로 채택되었다. 해당 표준에서는 양자암호 서비스 관점에서의 처리율, 응답 지연, 지연 변이, 오류율, 손실율, 가용도 등을 제시하였다. 또한 서울-부산 구간 490km의 양자암호통신망을 구축하고 품질평가를 추진 중에 있다.[150)]

KISTI는 안정적인 양자암호통신망 운영을 위하여 QKMS 이중화 구조를 채택하였다. 이는 DRDB를 이용하여 예비 노드와 자동 동기화하고 장애 발생 시 자동으로 주 노드에서 예비 노드로 설정 변경을 수행한다. 또한 양자암호통신망에서 양자키 보유량이 일정 수준 이상으로 상시 유지되도록 하여 QKD 기반의 양자암호통신 서비스에서 양자키의 부족으로 인해 발생할 수 있는 장애를 방지한다.[151)]

⑤ 비용 최적화(Cost Optimization)

SK텔레콤은 IDQ와 함께 QKD 분야에서 최대 120km까지 전송할 수 있는 기술과 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 기술을 개발해 시범 인프라에 적용할 계획이다. 기존 양자암호시스템은 양자신호를 별도의 파이버로 보내어 구축비용이 증가하고 기존신호와 양자신호를 MUX하여 보낼 경우 간섭으로 구축이 불가능하다. 양자신호 파장을 변경하여 간섭을 줄이고, 하나의 파이버로 전송하여 구축비용을 줄일 수 있다.

148) 정예린 (2021)
149) 최호 (2020)
150) 조성흠 (2022)
151) 김영준 (2022)

⑥ 인증(Certification)

국가정보원은 양자통신암호화장비(QENC), 양자키관리장비(QKMS), 양자키분배장비(QKD) 세 종류에 대한 보안요구사항을 마련했다. 2022년에는 TTA와 ETRI에서 제품군에 대한 검증을 시범 시행하였고, 2023년 4월부터 KRISS의 양자성 시험을 포함하여 국가 인증 제도(보안적합성 검증, 보안기능 시험) 테두리 내에서 안전성 인증 제도가 본격 시행 중이다.[152)]

QENC에 대해서는 공급기 요청과 수신·비밀키생성·하이브리드 키 조합 여부, QKMS에 대해서는 비밀키 수신·키 가공 및 동기화, QKD에 대해서는 KRISS의 양자특성시험성적과 이를 기반으로 ETRI와 TTA에서 난수생성기능, 양자상태 생성 등을 검증받는 것이 요구사항으로 제시되었다.

(2) 적용 분야

① 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 적용 사례

양자암호통신 인프라 시범구축 사업은 양자암호통신과 양자난수발생기, 양자 내성 암호 등 양자 관련 기술을 민간·공공 영역에서 실증하고 시장 활성화를 위한 응용서비스 발굴을 위해 작년 2020년부터 2021년까지 총 290억 원이 투자된 대규모 사업이다. 시범구축 사업에서는 거점들을 QKD로 연결한 후, QKD로 생성한 암호키(양자키)를 다양한 서비스에 적용하는 방법과 기존 난수발생기를 양자난수발생기로 대체하여 적용하는 방법들이 주로 적용되었다.

2020년에는 군·관 협력용 비화통신서비스(해군3함대, 전남도청), 실손 보험처리를 위한 환자의료정보 전달 서비스(연세의료원 등) 등 16개 분야에 적용하여 실증 사례를 확보하고 기존 서비스와 연계한 응용서비스를 발굴했다. 2021년에는 공공기관 행정·시설보안(대전시청, 대전상수도사업본부, 정수사업소), 의료기관 간 원격협진(순천향대병원 서울·부천) 등 15개의 수요기관에 19개의 서비스를 개발 및 실험하였다.

152) 정예린 (2022)

표 II-1-4 2020년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (4개구간)	KT	전남도청(해군3함대사령부)	비화통신
		강원도청(춘천시청)	폐쇄회로텔레비전(CCTV) 데이터 저장
	SKB	광주광역시청 (CCTV센터, 교통정보센터)	폐쇄회로텔레비전(CCTV) 비밀번호(패스워드) 관리
			차량 정보 관리
의료분야 (6개구간)	SKB	세브란스병원(신촌·강남·용인)	블록체인 실손보험청구
			의료 빅데이터 전송
			사고예방 알림 시스템
	KT	성모병원(서울·은평)	인공지능음성인식 진료기록 기록 시스템
			의료기록 데이터 저장
	LGU+	을지대병원(노원·대전)	의료 데이터 전송
산업분야 (6개구간)	SKB	한화시스템(본사·데이터센터)	스마트 오피스 시스템
		우리은행(콜센터·전산센터)	비대면 생체정보(안면인식) 측정
		CJ ICD 센터	가상사설망(VPN) 서비스
	KT	현대중공업	산업기밀 데이터 전송
			증강현실(AR) 원격시설 점검
	LGU+	LG이노텍(평택·부산)	산업기밀 데이터 관리

※ 과학기술정보통신부 (2021)

표 II-1-5 2021년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목

분야	수행 기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (7개구간)	SKB	대전상수도사업본부 (송촌사업소, 대전광역시)	인공지능 실시간 얼굴인식 통제
			범용직렬버스(USB) 보안토큰
		광주보건환경연구원(북구보건소)	양자(Quantum)-스마트폰
		한국수력원자력발전소(새울-고리)	-
	KT	강원도청(2군단사령부)	양자(Quantum)-액화수소드론
		제주도청(교통안전체험관)	양자(Quantum)-자율주행차
	LGU+	충남도청(공무원교육원)	데이터베이스(DB) 암호화 및 IC카드
민간분야 (10개구간)	SKB	대구계명대병원(성서-중구)	자율주행 로봇(지정맥인증)
			사물인터넷(IoT) 스마트 빌딩 관리 시스템
		ADT 캡스(보라매, 장안, 삼성)	무인센서 보안시스템
			보안 출입ID카드
			USB 보안토큰
		고려대병원(안암-K-Bio)	클라우드 병원시스템
		평화홀딩스	수소차 설계도 PDF 암호화
	KT	순천향대병원(서울-부천)	양자(Quantum)-원격의료협진
		현대로보틱스	양자(Quantum)-사물인터넷(IoT) 로봇관제
		블록체인컴퍼니	양자(Quantum)-비트코인거래
	LGU+	빅히트엔터테인먼트	유심(USIM)
		GS EPS	안면인식 출입보안

※ 과학기술정보통신부 (2021)

2. 무선 양자 키 분배

가. 고정형 양자 키 분배

(1) 기술 동향

무선 양자 키 분배는 전용 광네트워크 라인이 필요한 유선 키분배와 달리 대기 중으로 광자를 보내고 받는 기술이다. 미리 설치된 광네트워크 라인이 필요하지 않아, 광네트워크 라인 설치가 어려운 환경에도 적용될 수 있으며, 거리 제한이 있는 유선 양자 키 분배와 달리 위성과 연결하면 광범위한 영역으로 키분배가 가능하다. 무선 양자 키 분배는 송신부와 수신부를 고정시키고 운용하는 고정형과 어느 한쪽 또는 모든 쪽이 움직이는 이동형으로 나눌 수 있다.

세부적인 프로토콜은 유선과 크게 다르지 않다. 무선 양자 키 분배의 조건은 송신부와 수신부가 서로 보이는 위치(Line-of-Sight)에 있어야 한다는 것이다.

무선 양자 키 분배는 유선과 달리 광자의 변형은 적지만, 대기에 의한 산란, 흡수 및 날씨의 영향을 받는다. 유선은 1,550nm 파장대를 주로 이용하지만, 무선에서는 대기 중에서의 전파 특성 및 측정기의 양자효율을 고려하여 850nm 주변의 파장대를 이용한 실험이 많이 이루어졌다. 그런데, 최근에는 유선과 연결성 등을 고려하여 1,550nm 파장대로도 많은 실험이 진행되고 있다.

무선 양자 키 분배의 큰 특징은 수신부에 있다고 할 수 있다. 단일 광자 수준의 광자를 받기 위해서는 망원경이 필요한데, 거리를 늘리기 위해서는 고성능 망원경이 요구된다. 이런 이유로 천문대 등에서 지상 무선 양자 키 분배 실험이 이루어졌다.

(2) 연구 동향

현재의 기존 통신기술은 대용량 데이터 전송에 유리한 유선 연결을 기반으로 하고, 유선통신의 끝단에서는 무선통신을 통해 개별 장비의 자유로운 연결을 지원하는 방향으로 발전하고 있다. 양자 키 분배 기술 역시 국내에서는 주로 유선 양자 키 분배 중심으로 연구개발이 진행되고 있다. 기존에 깔려있는 광네트워크를 이용할 수 있어, 통신사업자들이 사업에 적용하기 유리하기 때문이다. 양자 키 분배 연구가 초기 유선 중심으로 진행되었다고 해도, 서비스의 확장에 유리한 무선 양자 키 분배 기술은 매우 중요한 연구분야라 할 수 있다.

국내에서는 2007년 포항공대에서 무선 양자 키 분배의 구현을 처음 발표했다.[153] 2018년 ETRI가 연구원 내에서 100m 무선 양자암호통신 실험을 성공했다고 발표했다.[154] 2022년 초에 KT가 서울 한

153) Y.-S. Kim et al. (2008)
154) Heasin Ko et al. (2018)

강에서 고정형 무선 양자암호통신 1km 실험에 성공한 것에 이어 2022년 11월에는 제주국제대학교에 무선 양자암호통신망 시범인프라를 구축하여 본격적인 무선 QKD의 기술 연구 및 구현 검증에 박차를 가하고 있다.

한편, 국내외 무선 양자 키 분배 기술개발 프로젝트는 기본적인 고정형 대상에서, 드론 등을 이용한 이동형 무선 양자 키 분배 기술개발 방향으로 확대되고 있다. 특히, ETRI는 미래 유망기술 개발의 일환으로, 무선 양자암호통신 시스템 및 이를 위한 양자통신용 광학 부품의 소형화 연구개발 과제를 통해 무선 양자 키 분배 핵심기술 개발을 수행하고 있다.[155)]

(3) 적용 분야

고정형 무선 양자 키 분배는 적용처가 넓지는 않다. 송신부와 수신부가 서로 보이는 위치에 있어야 하며, 산란 효과 등에 의해 대기중에서의 전파특성이 100km를 넘기기 어려운 면은 제약사항이라 볼 수 있다. 유선과 무선 이동통신 등과 결합을 고려하면, 이동형이 활용성이 더 높다고 할 수 있다. 따라서, 고정형 무선 양자 키 분배는 이동형, 위성으로 가기 위한 전단계 연구라고 볼 수 있다.

나. 드론, 위성 활용 무선 양자 키 분배

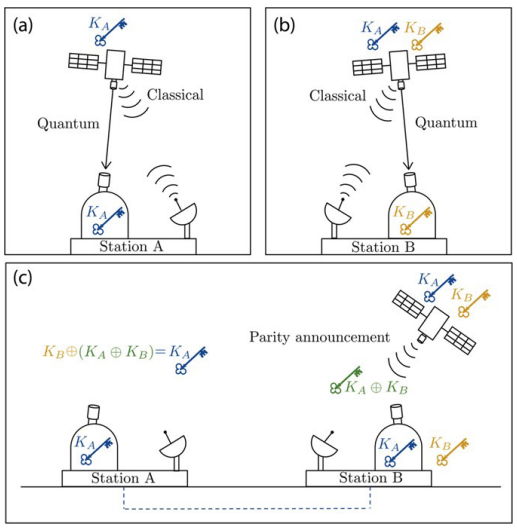
(1) 기술 동향

드론, 위성을 이용한 무선 양자 키 분배는 유선 양자 키 분배의 거리 제한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 연구되고 있다. 위성을 신뢰 노드로 이용하여 중계하는 방식을 사용할 수 있는데 이 경우의 가장 큰 걸림돌은 광원의 트래킹과 수신부 망원경의 크기 제한이다.

드론, 위성과의 양자암호통신 구성은 송수신 모델에 따라 다양할 수 있다. BB84 프로토콜 기반으로 하면, 위성/드론과 지상 모두 송수신이 가능할 수 있다. 일반적으로는 위성/드론이 가벼운 광원을 가지고 있고, 지상국에서 수신하는 형태이나, 위성/드론간의 양자암호통신도 고려한다면, 송수신 모두 위성/드론에서 가능하도록 구현해야 한다. 양자 얽힘쌍을 이용하는 BBM92, E91 프로토콜을 적용하면, 위성/드론에서 얽힘 광자쌍을 생성해서 전송만 하면 되기 때문에 드론/위성에는 망원경이 필요하지 않다. 이런 방식들에서 또 하나의 중요한 것은 위성/드론에 탑재체의 크기/무게 문제를 해결하기 위한 경량화 연구이다.

155) Chun Ju Youn et al. (2018)

그림 II-1-41 위성 QKD



※ Robert Bedington et al. (2017)

(2) 연구 동향

국내의 무선 양자 키 분배 기술개발 프로젝트는 기본적인 고정형 대상에서, 드론 등을 이용한 이동형 무선 양자 키 분배 기술개발 방향으로 확대되고 있다. 특히, ETRI는 미래 유망기술 개발의 일환으로, 무선 양자암호통신 시스템 및 이를 위한 양자통신용 광학 부품의 소형화 연구개발 과제를 통해 무선 양자 키 분배 핵심기술 개발을 수행하고 있다.[156]

2022년부터 ETRI와 한림대 공동으로 소형 무인기(드론, 기구, 비행체 등)를 이용해 무선으로 양자얽힘을 분배하는 양자중계 플랫폼 개발이 진행되고 있다.

강원 미래과학포럼을 통해 양자정보통신에 대한 관심을 보이던 강원도가 강원 무선양자통신 정보보안 연구단을 중심으로 ETRI, ADD 등과 협력하여 추진하는 주요 임무 중 하나가 바로 무선 양자통신 기술의 실증연구이다.[157) 158]

이 연구의 주요 내용은 소형 무인기(드론, 기구, 비행체 등) 기반 무선 양자중계기 플랫폼 기술 개발과 지상국용 무선 양자송수신 플랫폼 기술 개발로 구성되어 있다. 양자얽힘 광원 모듈, 고정밀 빔트래킹 기술, 노이즈 저감기술 등을 ETRI가 추진하며, 한림대는 무선 양자 키 분배 모듈을 탑재할 액화수소드론의 연구개발을 진행하고 있다.

KT에서는 한화시스템과 협력하여 인공위성 탑재용 QKD모듈 개발을 추진 중에 있다.[159]

156) Chun Ju Youn et al. (2018)
157) 뉴시스 (2020)
158) 강원일보 (2021)
159) 데일리임팩트 (2022)

(3) 적용 분야

이동형 무선 양자 키 분배는 격오지와의 통신, 위성을 통한 글로벌 양자암호통신망 구축 등에 활용할 수 있다. 6G 무선 이동통신 등과의 결합 역시 고려할 수 있는 적용 분야이다.

3. 양자 난수 생성기

(1) 기술 동향

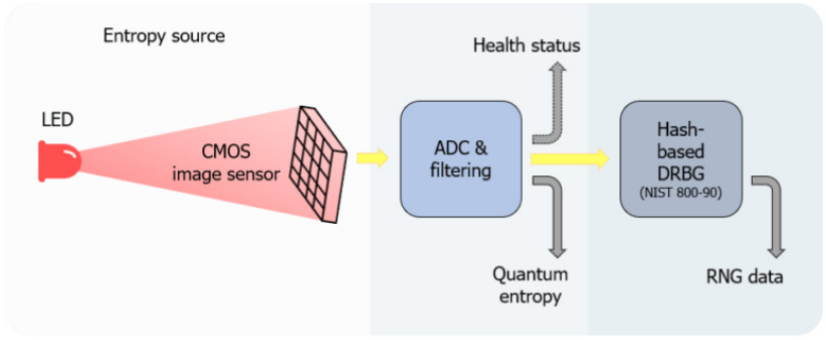
① ID Quantique - SK텔레콤

2001년 제네바 대학 과학자들에 의해 설립된 ID Quantique(IDQ)는 설립 후 최초의 상업용 양자 난수 생성기 개발에 성공하였다. 2009년에는 빔 스플리터에 기반한 방식이 아닌, 광자의 공간적 불확정성에 기반하여 양자 난수를 생성하는 방법을 고안하여 특허를 출원한 바 있다.[160] 2016년 SK텔레콤으로부터 투자받은 후 인수되었으며 스위스 제네바에 본사를 두고 영국 브리스톨, 미국 보스턴, 서울에 영업 사무소 및 엔지니어링 개발 연구소에서 기술 개발 중에 있다. 2017년 경로 분기(Path Branching) 방식의 Quantis 양자 난수 생성기 제품을 개발하였다. 해당 제품은 AIS31 표준을 만족하는 후처리 방식을 적용한 것으로 알려져 있다.[161] 현재는, 모바일 헤드셋, IoT 기기 등에 적용하기 위해 설계된 최초의 소형 양자 난수 생성기 ICQ250C와 차량에 활용 가능한 IDQ6MC1 등 다양한 제품군의 양자 난수 생성기를 개발하여 판매하고 있다.

IDQ 양자 난수 생성기의 양자 난수 생성 과정은 다음과 같다. QRNG(Quantum Random Number Generator) 내부 칩에는 광자를 측정할 수 있는 픽셀 배열이 들어 있다. 해당 픽셀 배열에 빛을 조사할 경우, 각 픽셀 당 도달 광자수는 양자역학적으로 정확히 결정되지 않으며 Poisson 분포를 따른다. 각 픽셀로부터 발생한 신호는 Analog-Digital Converter(ADC)를 통해 디지털 신호로 전환되기 때문에 이를 통과하면 픽셀 당 측정된 광자수를 알 수 있다. 결과적으로 광원의 양자 난수성은 ADC를 통과하여 디지털 비트 형태의 양자 난수로 전환된다.[162] [그림 II-1-42]의 양자 난수 생성기는 생성된 광원의 광자수 요동(Fluctuation) 현상인 이른바 “양자 샷 노이즈(Quantum Shot Noise)”에 기반한다. 광자수 요동은 조사하는 빛 세기 제곱근에 비례하므로, 빛 세기를 적절히 조절하는 기능이 필요하다. IDQ에서는 내부에 해당 기능을 구현한 QRNG를 개발한 바 있다.

160) Ribordy, G. et al. (2009)
161) Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin (2017)
162) https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

그림 II-1-42 IDQ 양자 난수 생성기 난수 생성 원리



※ https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

상용 QRNG의 성능과 안전과 관련된 다양한 인증이 존재한다. IDQ 칩은 NIST SP 800-90B의 IID 테스트 묶음(Test Suite)을 통과했다고 알려져 있다. 기존의 고전적 TRNG(True Random Number Generator)와 달리, 난수성을 높이기 위한 후처리 없이도 NIST의 non-IID 테스트 묶음을 통과한 바 있다. IDQ6MC1과 IDQ20MC1 제품을 통해 built-in 방식 후처리 기능을 구현하였으며, 현재는 NIST SP 800-90A/B/C 와 AIS 31 PTG.3 인증을 획득한 것으로 알려져 있다.[163]

그림 II-1-43 IDQ QRNG 제품과 고전적 TRNG의 성능 비교

ES	Type of TRNG	Using conditioning for the test	# of tests	Non-IID Entropy (per byte)
IDQ Quantis	QRNG	No	200	7.4612
IDQ250C2	QRNG	No	175	7.4648
IDQ6MC1	QRNG	No	52	7.4692
IDQ20MC1	QRNG	No	1000	7.4721
IDQ PCIe-12	QRNG	No	320	7.4175
Random.org	Classical TRNG	Yes	173	7.4543
ComScire	Classical TRNG	Yes	400	7.4606
Intel DRNG	Classical TRNG	Yes	1049	7.4489
RPi4-hwrng	Classical TRNG	Yes	218	7.4534
/dev/urandom	PRNG	Yes	20	7.4710

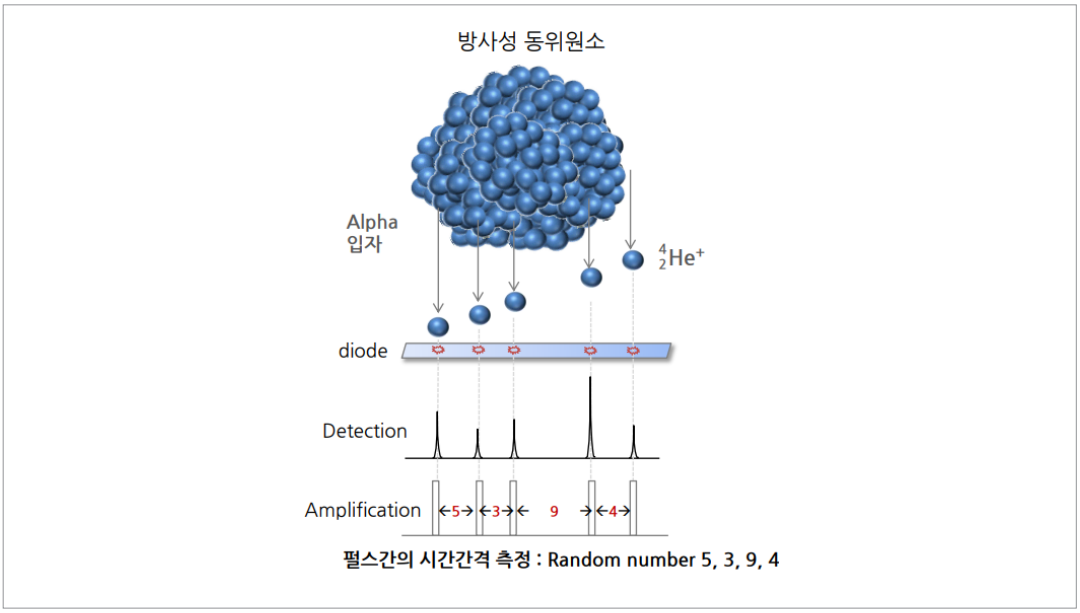
※ https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

163) https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

② EYL

EYL의 양자 난수 생성기는 방사성 동위원소에서 반감기 동안 방출하는 알파입자 생성의 난수성을 활용한다. 알파입자가 생성되면 다이오드에 충돌하여 펄스를 생성하고, 펄스 간의 시간 간격을 측정하는 방식으로 양자 난수가 생성된다. EYL은 이러한 양자 난수 생성 방식을 기반으로, IoT 기기에 활용 가능한 소형, 저가의 양자 난수 생성기를 상용화하였다. 개발한 제품이 통계 테스트 묶음 NIST SP800-22와 NIST SP 800-90B, AIS.31 등을 통과했다고 알려져 있다.

그림 II-1-44 EYL QRNG 난수생성 원리



※ https://www.etnews.com/20150807000064

(2) 연구 동향

2009년, 포항공과대학 양자광학 실험 그룹에서 양자수-경로 얽힘 상태를 활용한 양자 난수 생성 실험 결과를 보고하였다. 해당 실험은 광자수-경로 얽힘상태를 준비하고, 광자 수 측정을 통해 난수를 생성하는 방식으로 진행되었다. 실험 결과로 총 3개의 1Mbit 길이 난수가 생성되었고, 생성된 난수의 난수성은 NIST STS(Statistical Test Suite)를 통하여 테스트되었다.[164] 2021년에는 KAIST, TUD(Technical University of Denmark) 간 협력 연구를 통해, 양자와 비문맥적(Non-Contextual) 방식에 기반한 Semi-DI(Semi Device-Independent) 난수성 확인 프로토콜을 비교한 연구 결과가 발표된 바 있다.[165]

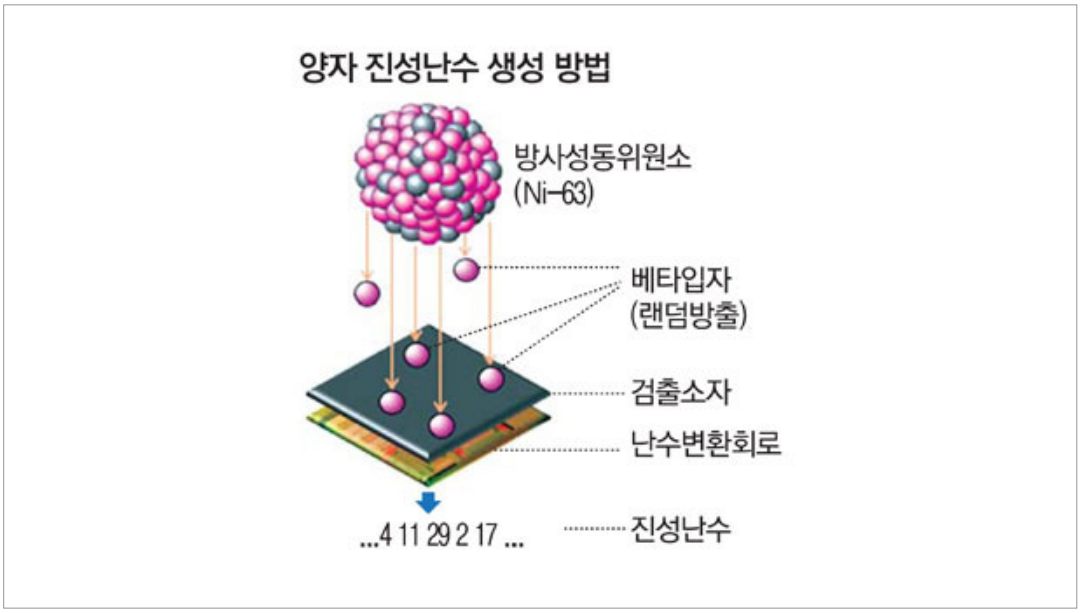
164) Osung Kwon et al. (2009)

165) Carles Roch I Carceller et al. (2021)

2021년, 한국원자력연구원 김종범 박사와 한국전자통신연구원(ETRI) 박경환 박사 공동 연구팀은 베타선 신호에 기반한 양자난수 발생기 핵심 기술을 개발했다.

개발된 양자난수 발생기는 방사성 동위원소 니켈-63에서 나오는 베타선 신호의 간격을 이용해 난수를 생성한다. 단일 광자를 이용한 신호 추출과 달리 온도나 전원 상태 등 외부 요인의 영향을 받지 않는다는 장점을 갖고 있으며, 특히 베타선은 에너지가 적어 끊임없이 사용할 수 있기 때문에 난수를 고속으로 생성할 수 있다.

그림 II-1-45 베타선을 이용한 양자난수생성기



※ 매일경제 (2022)

연구팀은 베타 선원 박막 제조기술과 잡음을 줄인 시모스(CMOS·상보성 금속 산화막 반도체) 기술을 적용, 양자난수 발생기 회로를 집적시켜 칩에 넣을 수 있는 수준으로 소형화하는 데 성공했다. 세계에서 가장 작은 수준의 1.5㎜ 크기 칩으로 구현했다.

(3) 적용 분야

현재 QRNG가 적용될 것이라고 예상되는 분야는 다음과 같다. 가장 우선적으로 암호화 알고리즘 및 프로토콜에 적용 가능할 것이다. 다양한 고전 암호, 양자 암호 분야에서 난수가 활용되고 있으며, QRNG가 제공하는 난수의 높은 안전성은 암호 프로토콜의 안전성을 높일 것이라고 기대되고 있다.

예컨대, 현재까지 가장 많이 활용되고 있는 양자 키 분배 프로토콜인 BB84 프로토콜의 수행 과정의 기저 선택 시 난수의 활용이 필수적이다. 또한 차세대 양자 키 분배 프로토콜 중 하나인 DIQKD 수행 시 Bell test 실험이 필수적이며, 해당 실험 수행 시 측정선택을 위한 난수 생성의 필요성이 알려져 있다.

이 밖에도 과학적 모델링, 시뮬레이션에 양자 난수 생성기가 활용될 수 있다. 잘 알려진 Monte-Carlo 시뮬레이션 등 시뮬레이션 구현 시 무작위 표본추출 과정이 필요하다. 이때 추출의 무작위성을 높여 시뮬레이션 성능을 높이는 응용이 가능할 것이다. 양자 난수 생성기의 보다 일상적 응용 분야로서 자동차 보안, IoT 통신보안, 금융거래 보안에 대한 적용을 고려할 수 있다.

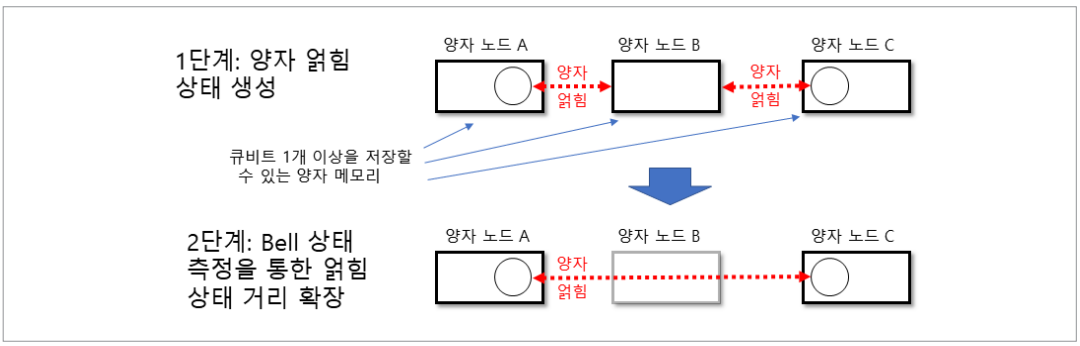
4. 양자중계기

가. 양자 얽힘 생성, 분배 네트워크 기술

(1) 기술 동향

양자전송은 거리의 제약이 있어서 장거리 전송에는 일반적인 광통신에서와 같이 중계기가 필요하다. 보통의 광통신에서 중계기는 약해진 신호를 증폭시키는 역할을 하지만 양자 상태는 복제 불가능성의 원리에 의해 증폭될 수 없다. 그래서 흔히 말하는 양자중계기의 역할은 일반적인 통신에서 말하는 중계기와 다르게 멀리 떨어진 두 (혹은 그 이상) 사용자가 충실도가 높은 양자 얽힌 상태를 공유하게 하는 것이다.

그림 II-1-46 양자중계기 동작 방식



위의 그림은 양자중계기의 대략적인 동작 방식을 묘사한다. 멀리 떨어진 양자 노드 A와 양자 노드 D사이에 얽힘을 분배하는 것이 목적이다. 노드 A와 C 사이에서 얽힘을 만들어 분배한다면 먼거리를 이동하는 동안 양자 상태는 채널의 잡음 및 손실 등에 의해 원래 상태와의 충실도(유사도)가 현저히 떨어질 것이다. 그러나 중간에 양자 노드 B가 있어서 두 쌍의 양자 얽힘을 만들어 각각 하나의 양자 상태를 A와 C에 보내고, 남은 각각의 양자 상태들에 대해 노드 B에서 Bell 측정을 하면 양자교환 원리에 의해

노드 A와 C사이에 얽힘이 생성된다. 양자 상태는 짧은 거리만을 이동하기 때문에 잡음 등에 의해 충실도 손상도 적다. 그러나 이것이 성립되기 위해서는 양자 상태가 각각 A와 C에 도달해야 한다. 즉, 한쪽에 도달하지 않으면 쓸 수 없다. 그렇기 때문에 양자 상태를 저장하는 양자 메모리가 노드 A와 C에 있어야 하고, 만일 노드의 숫자가 많아진다면 양자 노드 B에도 역시 양자 메모리가 있어야 한다.

그렇지만 양자상태 저장은 난이도가 높아 양자메모리 연구가 활발히 이루어지고 있음에도 아직 실용적으로 사용하기에는 부족한 상황이다. 메모리를 사용하지 않고 양자 얽힘을 장거리로 늘릴 수 있는 방법은 한 사용자가 양자 얽힘을 생성하여 다른 두 사용자에게 분배한 후, 손실이 없는 딜레이 라인(흔히 사냑(Sagnac) 간섭계 등을 활용)을 활용하여 메모리 역할을 하게 하는 것이다. 그러면 자신이 소유하고 있는 양자들에 대한 Bell 측정을 수행하여 유효한 측정결과를 얻으면, 다른 두 사용자끼리 양자 얽힘을 공유하게 되는 효과를 가지게 된다. 물론 이때 상대 노드에 양자 상태가 도달하지 않을 수도 있으니 이때도 각각 딜레이 라인을 활용하여 시간을 늦추는 효과를 사용해야 한다. 이러한 양자 얽힘의 장거리 생성 및 분배 기술을 확보하기 위해서는 높은 충실도의 양자 상태 생성, 3노드 이상의 양자 상태 분배, 측정, 손실이 적은 딜레이 라인 확보 등의 기술들이 필요하다.

(2) 연구 동향

국내에서는 ETRI가 주관하는 양자인터넷 구현을 위한 유선 양자중계기 개발 사업을 2022년부터 KT, SKT, 우리넷, PPI, 켐옵틱스, 옥스퍼드대(영국), ICTQT(폴란드)와 공동으로 진행하고 있다. 이 과제에서는 다중 노드 간 양자 얽힘 분배 시스템 개발하였고, 유선 채널을 통한 50km 이상 두 노드 간 양자 얽힘 분배 및 20km 이상 다중 노드 간 양자얽힘 분배를 구현한 바 있다. 이 외에도 50km 이상 장거리 양자원격전송 시스템, 30km 이상 실환경을 포함하는 장거리 얽힘분배 시스템 개발을 진행하고 있다. 과제의 최종 목표는 실환경을 포함한 양자 얽힘을 100km 이상 장거리로 분배할 수 있는 시스템의 개발이다.

(3) 적용 분야

양자중계기는 양자 네트워크를 이용한 장거리 양자얽힘의 분배 기술에 활용될 수 있다. 양자중계기의 구현에 필요한 실환경 망에서 양자얽힘의 전송 특성 분석, 양자 데이터의 장거리 원격전송, 광통신 파장에서 동작하는 양자메모리 기술과 파장변환 기술이 충분히 성숙되기 전 단계에서 양자얽힘 네트워크의 프로토타입 성능 구현이 가능한 상황에 도달하기 위한 핵심기술로 활용될 예정이다.

나. 메모리 기술

(1) 기술 동향

장거리 얽힘 분배를 위한 양자중계기를 만들기 위해서는 양자얽힘을 저장하고 다시 정보를 빼낼 수 있는 양자메모리가 필요하다. 양자얽힘을 분배하길 원하는 노드의 거리가 멀수록 충실도가 높은 양자얽힘의 분배를 위해서는 중간에 양자 노드의 수가 많아야 한다. 이때 각 노드에서 양자얽힘이 만들어지는 시간이 상이할 수 있어서, 시간에 맞는 Bell 측정을 위해서 양자 상태를 저장하고, 다시 복원할 수 있어야 한다. 양자메모리는 그 자체로 굉장히 안정적으로 양자 상태를 유지할 수 있어야 하므로 주로 안정 유지시간이 긴 원자, 이온 덫, 고체 등의 물리시스템을 이용하여 구현된다. 하지만 이러한 물리시스템에 양자 상태의 저장 및 복원하는 양자메모리 기술은 구현하기 어렵기 때문에 국내의 양자메모리 기술은 상당히 초보적인 단계라고 볼 수 있다.

(2) 연구 동향

정보통신기획평가원(IITP)에서 2022년부터 기획한 양자 인터넷시대를 위한 양자메모리 연구개발에 대한 사업을 시작하였다. 고려되는 물리시스템은 단일이온이나 단일중성원자, 원자앙상블, 고체 소재(색중심, 양자점, 희토류 도핑 이온 등) 또는 초전도 소재들이다. 이들 물리시스템은 각각의 장, 단점이 존재하지만 광자에 담긴 양자 상태의 정보를 안정적으로 저장, 복원할 수 있다는 공통점이 있다.

부산대에서는 원자 증기 셀을 이용한 원자앙상블에서 고품질 양자얽힘 광원 개발(2016) 및 시간-주파수 양자얽힘과 편광 얽힘 상태 구현하고(2018), 원자앙상블 기반 양자메모리를 구현(2020)하였다. 포항공대에서는 냉각된 원자앙상블에서 광자쌍 광원을 개발하고(2014), 냉각된 원자매질에서의 양자메모리를 구현(2018) 하였다. GIST와 KIST는 공동 연구를 통해 반도체 점결함을 이용한 고신뢰도(97%) 스핀-광자 전환 구현(2019)에 성공하였다.

최근 UNIST와 국제 공동연구팀은 나노결정 양방향 광스위치의 원리를 밝히고 현상을 발견하였다(2023). 이는 ANP(Avalanche Nano-particle)를 이용한 광결정에서 빛을 스위칭하는 방식으로 3D 광양자메모리 구현을 위한 핵심기술이 될 수 있다.

(3) 적용 분야

양자네트워크 구조에서 장거리 양자통신 및 얽힘 기반 양자 키 분배를 할 때 사용될 수 있고, 양자컴퓨터에도 활용될 수 있다.

5. 양자보안기술

가. 양자 인증/서명 기술

(1) 기술 동향

최근 개발이 활발한 양자 키 분배는 다양한 암호기능 중, 두 사용자가 암호키를 나누어가지는 기능을 제공하는 기술이다. 계산적 복잡도를 기반으로 하는 안전성의 현대암호와 달리 정보이론적 안전성을 가진다는 장점을 가진다.

암호시스템에서 암호키를 나누는 것은 하나의 구성요소이다. 암호시스템이 안전하기 위해서는 두 사용자를 식별할 수 있는 인증기술, 사용자 간 주고 받는 데이터의 변조를 막고 데이터 생성자를 나타낼 수 있는 서명기술도 필요하다. 인증 및 서명은 현대 정보보안에서 사용자들을 연결하는 네트워크 암호 인프라를 구성하는 역할을 한다. 초창기에는 비밀키 방식의 인증, 서명을 양자 프로토콜로 변환하는 방식이 연구되었으나, 점차 단일광자 혹은 얽힘광자와 같은 양자매개체의 특성을 활용하는 방식으로 연구가 진행되고 있으며, 특히 기기무관성 개념이 양자 키 분배에 적용되면서, 인증, 서명 등의 연구 역시 기기무관 특성을 반영하는 방향으로 확장되고 있다.

양자 키 분배 장치의 정보이론적 안전성이 확보되려면, 키분배 프로토콜뿐만 아니라, 사용자 간의 양자 인증, 양자 서명이 동반되어야 하나, 현재 수준이 논문, 실험실 수준이라서 양자 키 분배 장치에 구현하기에는 아직 어려움이 있다. 현재 개발되는 양자 키 분배 장치들은 인증 및 네트워크 구성을 위하여 현대암호를 도입하는 경우들도 있다. 현대암호 중에서 인프라를 구성하는 것은 공개키암호이다. 기존 공개키암호는 양자컴퓨터로 인한 공격에 약하지만, 현재 개발되는 공개키암호는 양자컴퓨터를 이용한 공격에도 (계산복잡도 기반) 안전성을 제공할 수 있어, 이를 양자 키 분배 장치들의 네트워크 구성에 적용하는 시도도 이루어지고 있다.

양자 키 분배 네트워크를 넘어 양자통신 네트워크로 발전될 경우, 제대로 된 보안기능을 갖추기 위해서는 통신수단으로 양자가 활용될 것이기 때문에, 정보이론적 안전성 제공의 특성이 아니더라도 네트워크 특성상 양자를 이용하여 인증 및 전자서명을 제공하는 것이 필요하다.

(2) 연구 동향

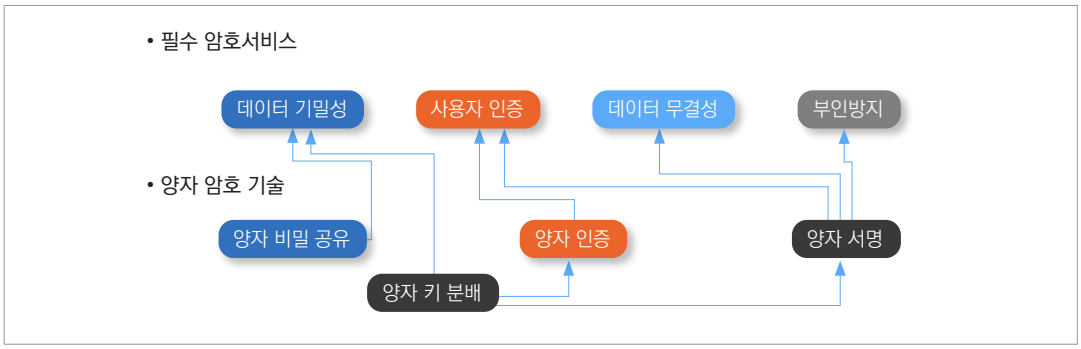
양자 인증 및 서명에 대한 국내 연구는 2000년 초반부터 일부 국내 대학 연구실(고려대, 국민대 등)에서 소규모로 진행되어 왔는데, 대부분의 연구 결과가 실용성을 고려하지 않은 이론적 수준이라고 할 수 있다. 최근 10년간 국가 주도의 양자 인증 및 서명에 대한 연구·투자는 이루어지지 않고 있었으며, 주로 소규모의 투자가 대학 연구실을 중심으로 진행되었다. 양자 키 분배에 대한 투자는 최근에야 활발해졌다.

연구소에서는 KIST가 단일광자 및 양자얽힘을 이용하는 양자 인증 프로토콜 기술을 보유하고, 양자 메시지 인증에 대한 시험을 수행한 바 있다.[166) 167)] 국내 연구진의 학문적 성과는 국내 논문 포함 논문 10건 이상, 국내특허 12건으로 연구 투자 대비 준수한 연구력을 보유하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 실질적 네트워크 상황을 고려하지 않은 이상적 설계로 인해 양자통신기술의 발전을 고려하여도 실제 적용이 불가능한 프로토콜들이다.

NSR이 KRISS와 창의형 융합연구과제(NST, 2016 ~ 2021년)를 통해 양자직접통신의 실망 구현시험을 수행하였고, 이때, 양자 개체인증을 구현한 바 있다. 2017년, 2020년 NSR 연구진에 의해 기존 기술 대비 구현성을 높인 양자 인증 프로토콜과 양자네트워크에서 양자 디지털 서명의 가능성을 증명한 학문적 성과를 거두기도 하였다. 또한 양자인증, 양자서명 프로토콜 및 구현기술에 대한 특허를 보유하고 있다.[168) 169)]

2022년에 접어들어 양자인터넷에 대한 연구개발이 5년 500억 규모로 시작됨에 따라, 양자인터넷 보안을 위한 양자 인증/서명 기술개발 추진의 필요성도 높아졌다. 이에 따라, "양자사이버보안 솔루션 개발을 위한 양자 원천기술 및 암호 응용기술 개발" 과제를 2022년 6월에 착수하였다. 해당 과제는 NSR을 중심으로 양자인터넷에 도입할 수 있는 양자얽힘을 활용한 양자암호 원천기술 프로토콜을 개발하고, KRISS를 중심으로 프로토콜의 실환경 구현을 위한 고품질 양자상태 생성장치와 고효율 측정장치, 양자큐비트 측정기술을 개발하며, KISTI와 공동으로 실망에 적용시험하는 내용으로 진행될 예정이다.

그림 II-1-47 양자 암호기술과 암호서비스의 상관관계



166) Min-Sung Kang et al. (2018)
167) Min-Sung Kang et al. (2021)
168) Chang Ho Hong et al. (2017)
169) Chang Ho Hong et al. (2020)

(3) 적용 분야

양자 인증 및 서명 기술은 우선 양자 키 분배 장치에 적용하여, 양자 키 분배 장치를 이용한 네트워크 구성에 활용될 수 있을 것이다. 미국 NSA에서도 기능이 암호키분배로 제한된다는 것을 양자 키 분배장치의 국가기관 도입의 제약사항 중 하나로 들었는데, 이러한 걸림돌을 해소하여 양자 키 분배 장치가 본격적으로 활용될 수 있는 기반을 제공할 수 있다. 또한, 현재 기초연구가 진행 중인 양자인터넷의 핵심 보안프로토콜로 활용할 수 있다. 6G 등의 무선 이동통신 등과의 결합시 양자채널에 대한 보안을 담당할 수 있다.

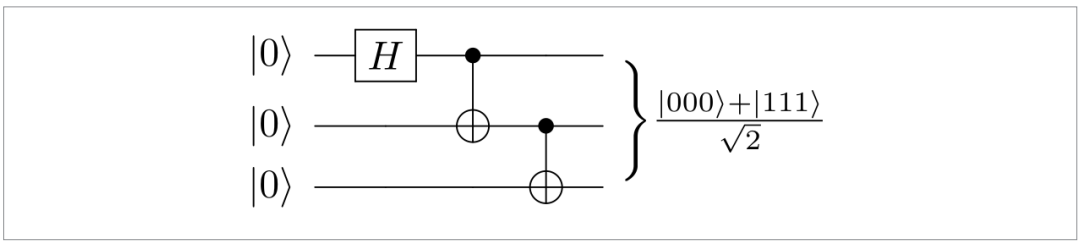
나. 비밀분산

(1) 기술 동향

비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 일정 수 이상의 사용자가 합의하는 경우 암호키를 복원할 수 있게 하는 기법이다.

가장 기본은 1979년에 독립적으로 발표된 Shamir[170]와 Blakley[171]의 기법이다. 이 방식은 정보이론적 안전성을 제공하는 방식으로, 어느 한 사용자가 정보를 독점하지 못하게 하는 용도로 사용하거나, 최근에는 다중 사용자가 암호키 전부를 모르는 상태에서 연산을 수행한 다음 일정 수 이상의 사용자가 합의하여, 연산의 최종 값에 대한 정보를 복원하는 용도로 사용한다. 이러한 기법들은 어떻게 암호키의 일부를 상대방에게 나누어주느냐는 측면에서 보면, 완벽한 안전성을 가진다고 할 수 없다. 양자 비밀분산은 암호키의 일부를 상대방에게 나누어주는 과정에 대한 정보이론적 안전성을 제공하기 위하여 고안된 방법으로 양자 키 분배 기법을 확장하여 안전한 통신을 제공하기 위하여 얽힘큐빗을 활용하는 방법들이 제안되고 있다. 이를 위해서는 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger) 타입의 다중 얽힘을 만들어야 하는 기술적인 어려움이 있어, 구현의 난이도가 높은 편이다.

그림 II-1-48 GHZ 양자상태



※ WIKIPEDIA

170) Adi. Shamir (1979)
171) G. R. Blakley (1979)

(2) 연구 동향

국내에서는 많은 연구가 이루어지고 있지는 않고 있으며, 이를 위한 기반 연구가 연구소와 학계에서 일부 진행되고 있다. KRISS는 2번의 SPDC 과정을 이용한 (가시광 영역) 4-광자 GHZ State를 생성하였는데 4-광자 동시계수가 약 1.5Hz, 4.5Hz일 때 각각 83%, 73%의 양자충실도를 달성하였다. KIST는 얽힘 광자를 통한 고차원 다중 노드 간 W state를 형성할 수 있는 프로토콜을 구축하였고, 3노드 다중 양자얽힘 분배를 시행하는 데 필수적인 GHZ state와 W state를 구현하였다. 이를 활용하여 3노드로 구성된 구성원 간 정보 불균형이 발생하지 않는 양자정보 통신을 구현하였다. 부산대와 NSR은 통신파장대역으로 생성된 편광얽힘 광자쌍 광원을 발표하였다. 포항공대는 광대역 양자통신 네트워크 기반 효율적인 양자얽힘쌍 분배를 위해 타임-빈(Tme-Bin) 양자얽힘과 분할 다중화 기술을 이용하여 양자네트워크를 구성하고, 60km 광섬유로 분리된 3명의 사용자에게 얽힘 양자키를 배포하는 시연을 성공하였다.

NSR과 KRISS, KISTI는 그간의 확보된 기반기술을 활용하여, 2022년부터 국가과학기술연구회 창의형 융합연구 “양자사이버보안 솔루션을 위한 양자 원천기술 및 암호 응용기술 개발”의 주요 항목 중의 하나로 실통신망에 적용가능한 양자 다중 비밀공유 원천기술 개발 확보에 나섰다. 주요 개발 항목은 다음과 같다.

- 정보 이론적 안전성을 보장하는 양자 다중 비밀공유 프로토콜의 개발
- 실통신망(손실율, 오류비율 등) 환경에서 안전성 확인 가능한 프로토콜 개발
- 파장 대역의 고통신 품질 쌍광자 양자얽힘 광원을 사용하여 3노드 이상의 다중 비밀공유 프로토콜을 위한 다중 얽힘상태 구현

(3) 적용 분야

비밀 분산기법은 비밀을 분산 저장하여, 특정 사용자가 비밀을 독점하지 못하게 하거나, 특정 사용자가 공격당하더라도 비밀을 복원하지 못하게 하는 용도로 사용된다. 양자 비밀분산 기술은 현대 암호의 비밀분산 기술이 계산적 복잡도에 안전성을 기반하는 반면 정보이론적 안전성을 보장하는 장점을 가지고 있으며, 양자를 이용하므로 양자 인터넷 시대에 적합한 비밀분산 기법이라고 할 수 있다.

6. 양자암호통신 시험 검증

(1) 기술 동향

양자 키 분배 기술 개발은 2010년대 들어 산업체를 중심으로 활발하게 진행됨에 따라, 이를 활용하기 위한 시험검증 기술 개발 및 시험망 운영이 2015년부터 진행되었다.

양자 키 분배 도입을 위한 제도는 아직 전 세계적으로 마련되지 않은 상태였다. 그러다 2020년에 시작된 과기정통부의 디지털 뉴딜 사업을 계기로, 사업에 참여한 국내 통신업체 개발 양자 키 분배 및 운용 장치를 대상으로 한 제도 마련을 위한 시범검증이 진행되고 있다. 국내에서는 양자암호통신장치 시험검증 대상을 양자 키 분배 장치, 양자 키 분배로 생성된 암호키 관리 장치, 양자 키 분배 장치와 양자내성암호로 생성된 암호키를 암호화 장치에 활용하는 방법을 대상으로 하고 있다.

세 가지 대상 중 암호키 관리 장치, 암호화 장치는 KCMVP 검증을 획득한 암호모듈 적용을 기반으로 하고 있다. 양자 키 분배 장치의 경우에는 양자 키 분배 특성을 반영하고, 시스템적인 측면은 네트워크 장치에 대한 시험검증 기준을 기반으로 개발되고 있다.

(2) 연구 동향

양자 키 분배 장치의 상용화를 위한 양자 키 분배 네트워크 및 규격, 보안요구사항 등에 대한 표준화가 진행되었으나, 양자 키 분배 장치의 암호 안전성 및 시스템 보안성 검증 방법에 대한 연구는 미비하다. QKD를 구성하는 광학 기기들의 다른 성능(평균 광자수, Decoy 상태의 개수, 측정 효율 등) 및 서로 다른 구현방식 등(One-Way, Two-Way 등)에 대해 통일된 방식의 시험/평가기술 개발도 미흡하다. 국가망에 도입되는 상용 QKD 장치에 대한 안전성 평가를 위해서는, QKD 장치를 구성하는 다양한 요소기능의 성능 및 구현방식 등에 적합한 안전성 검증기술과 CMVP 수준의 검증체계가 필요하다. NSR에서는 양자 키 분배 시험을 위한 양자 키 분배 규격 및 보안 요구사항을 개발하여 2018, 2019년에 국내 표준화를 진행하였다.

- TTAK.KO-12.0329-1 양자 키 분배 – 일반
- TTAK.KO-12.0329-2 양자 키 분배 – BB84프로토콜
- TTAK.KO-12.0356 양자 키 분배 보안 요구사항

2020년부터는 디지털 뉴딜사업의 양자암호통신에 참여한 SK텔레콤, KT 장비를 대상으로 시범검증을 수행하면서, NSR, ETRI, TTA가 양자암호통신장비 제품군에 대한 국가용 보안요구사항을 도출하는 작업을 진행하였다. 2022년 6월에 국가정보원에서는 시범검증 결과를 기반으로 양자키관리장비, 양자 키 분배장비, 양자통신암호화장비 3종에 대한 국가용 보안요구사항(안)을 발표하였다.

양자키관리 장비 보안요구사항에는 다음과 같은 항목들이 포함되어 있다.

- 키 관리 기능: 양자 키 분배 장치로부터 받은 암호키의 관리
- 키 공급 기능: 양자통신암호화장비에 키 공급
- 장비 관리 기능: 장비 내의 기능적 구성요소에 대한 제어 및 관리 등

양자 키 분배 장비 보안요구사항에는 다음과 같은 항목들이 포함되어 있다.

- 양자 비밀키 관리: 양자 키 분배 장치를 이용한 비밀키 생성 및 저장 등
- 광학계 및 후처리: 난수생성기능, 광학계 기능, 후처리 기능 등
- 식별 및 인증: 양자 키 분배 장치에 접근하는 관리자에 대한 식별 및 인증 기능
- 보안관리: 인가된 관리자에게 안전하게 보안 관리를 수행할 수 있는 기능 제공
- 전송 데이터 보호: 양자 키 분배장치 네트워크의 통신상대 간의 전송되는 데이터 보호
- 저장 데이터 보호: 양자 키 분배장치에 저장되는 데이터 보호

양자통신암호화장비 보안요구사항은 암호화장비에서 양자 키 분배 장치 또는 양자내성암호로 생성된 암호키를 기존 암호화장비에 활용할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 이러한 방법은 계속적으로 개선될 필요가 있는데, NSR에서는 지속적으로 양자 키 분배 안전성 시험/평가 기술을 다음과 같은 목적으로 진행하고 있다.

- 양자 키 분배 장치의 광학 모듈 작동방식에 대한 분석을 통한 불완전한 광학계 성능 파악
- 불완전 광학 모듈에 대한 양자 해킹 방법 연구를 통해 취약점에 대한 양자 해킹 대응방법 개발
- 양자 키 분배 장치 광학계를 개발하여 실제 양자 키 분배 장치 동작방식의 특징을 이용한 양자 해킹 가능성 확인 및 양자 키 분배 안전성/신뢰성 실험
- 양자 키 분배 시스템의 암호 안전성 보장 방법론 개발은 ①양자 키 분배 시스템의 암호 안전성 시험방법론 개발과 ②시험방법론의 안전성/보안성 확인 및 ③절차의 타당성 검증으로 구성
- 양자 키 분배 시스템 안전성 분석기술 적용을 위한 안전성 시험도구 설계를 통해 안전성 시험/평가 기술 적용된 양자 키 분배 시험도구 개발
- 양자 키 분배 시험도구 시나리오 개발 및 광학계 적용 시험 수행

(3) 적용 분야

양자암호통신장비 제품군에 대한 시험검증 기준은 우선적으로 국가공공기관에 도입되는 양자암호통신장비 제품의 시험검증에 활용될 예정이다. 양자 키 분배 시스템 안전성 분석기술은 시험검증 기준의 성숙도를 높이는데 활용될 수 있을 것이며, ISO/IEC에서 진행되는 표준의 향후 개정에도 기여할 수 있을 것이다. 광학계에 대한 시험검증 기술은 광학적 요소들의 구현에 있어서, 어떤 문제점들이 있을 것이며, 어떤 것들을 시험해야 하는지를 도출하고 있다. 이러한 요소들은 향후 양자 인터넷에서 보안기능을 구현할 때, 이의 시험검증에도 활용될 수 있을 것이다.

7. 양자네트워크

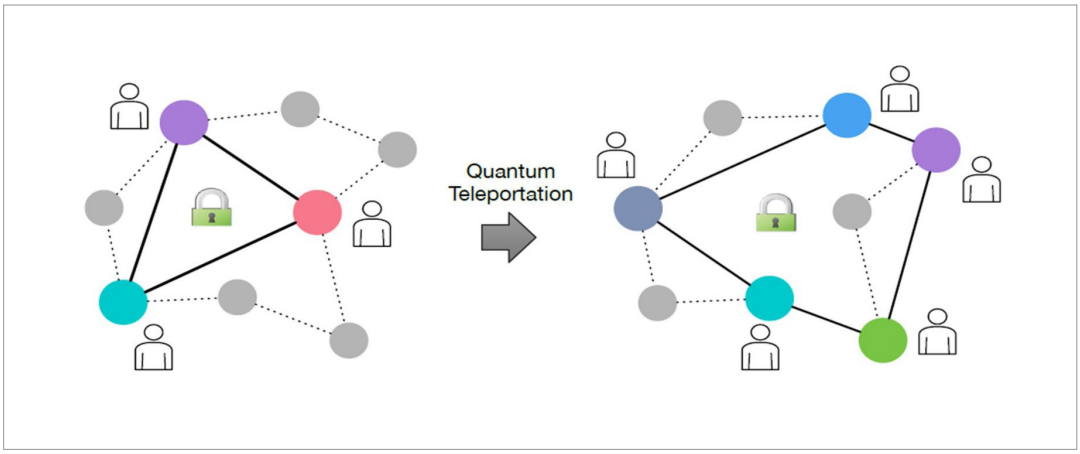
(1) 기술 동향

양자네트워크는 양자 프로세서(Quantum Processor) 간에 양자 상태를 교환할 수 있게 하는 전송 매체라 할 수 있다. 양자네트워크는 앞선 절들에서 자세히 소개한 양자 암호키 분배와 같은 양자정보 프로토콜을 포함하는 분야이며, 양자 컴퓨터의 발전에 따라 더욱 더 중요해지고 있는 연구 분야이다. 양자네트워크를 통해 여러 양자 프로세서를 연결하여 더 계산 능력이 좋은 양자컴퓨팅 클러스터(Quantum Computing Cluster)를 만들 수 있기 때문이다. 2절 해외 양자통신 R&D 동향에서 상술한 대로 미국, 유럽 등은 양자네트워크를 발전시켜 궁극적으로 양자인터넷 수준까지 발전시키는 것을 목표로 하고 있다. 국내의 경우 넓은 의미에서의 양자통신보다는 양자암호통신이라는 이름으로 양자 암호키 분배 기술에 집중하여 많은 투자 및 연구가 이루어졌다. 이는 2016년에 진행된 양자정보통신 중장기 기술개발 사업의 사업 분야 기술 분류체계 대분류가 양자암호통신, 양자소자계측 및 부품, 양자 컴퓨터로 이루어진 것에서도 확인할 수 있다. 이후 양자 암호키 분배 기술이 다양한 상용 제품이 출시될 정도로 성숙되었기 때문에 양자정보기술의 분류를 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 개정하면서 양자네트워크 분야에 대한 연구개발 또한 다양하게 수행되기 시작했다.

(2) 연구 동향

정부출연연구기관의 경우 한국과학기술연구원이 양자네트워크 핵심요소기술 개발(2011~2016) 수행을 통해 저잡음 고속동작이 가능한 APD 기반의 단일광자 검출기를 개발하였다. 한국표준과학연구원(KRISS), 고등과학원, 서울대학교 공동연구팀은 양자정보 원격전송기술을 개발(2020)하였다. 해당 연구팀은 다자간 양자원격전송의 이론과 보안성을 실험적으로 증명하였고, 네 개의 광자가 얽힌 양자네트워크를 통해, 두 명의 발신자가 공유하는 양자정보를 다른 두 명의 수신자가 가진 광자들로 원격전송을 성공하였다.

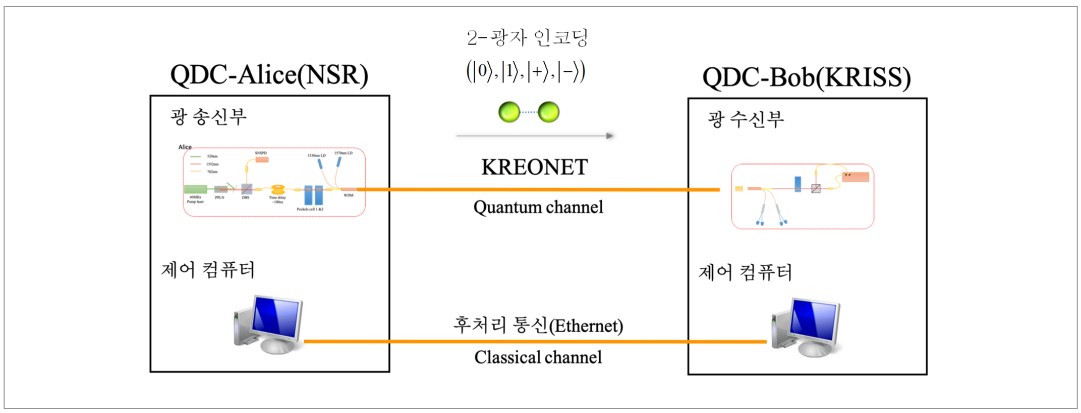
그림 II-1-49 비밀공유 양자원격전송 개념도



※ https://www.kriss.re.kr/

한국표준과학연구원과 국가보안기술연구소(NSR)는 공동연구를 통해 양자직접통신 기술을 개발 및 구현(2021)을 하였다. 송신부는 KRISS, 수신부는 NSR에 설치하여 과학기술연구망(한국과학기술정보연구원 제공)을 통해 약 20km 구간에서 양자직접통신 기술을 구현하였다. 이와 함께, 원자를 이용한 양자정보처리 기술, 초전도 단일광자 검출기 제작 기술, 실제 통신망에서 인터넷과 연동된 양자통신 구현 기술 등을 확보하였다.

그림 II-1-50 양자직접통신 구성도



※ https://www.kriss.re.kr/

또한, 한국표준과학연구원은 얽힘 기반 다자간 복합 양자네트워크 핵심원천기술 개발 사업(2022~2027) 수행을 통해 실용적이며 효율적인 양자네트워킹을 위한 장비를 개발하고 다광자 양자얽힘 기반 양자네트워크를 시연하는 것을 목표로 하고 있다.

대학교에서도 양자네트워크에 대한 다양한 연구가 수행하기 시작했다. 부산대학교의 경우 장거리 양자네트워크 구현을 위해 필요한 독립적인 광자 간의 양자 간섭에 대해 연구를 수행(2014~2017)하였다. 이를 통해 상관관계를 가지는 광자쌍의 일반화된 양자 간섭 등의 결과를 보였다. 한국과학기술원은 양자얽힘 기반의 네트워크 프로토콜에 대한 연구(2021~2026)와 양자 네트워크를 위한 분배된 대규모 양자얽힘 상태 개발(2022~2025)를 수행 중이다. 서울대학교는 양자네트워크의 채널용량 국제공동연구단 구성을 통해 양자인터넷의 양자채널용량 연구(2022~2025)를 수행 중이며, 또한 이온트랩 기반 양자메모리의 개발 및 이를 이용한 양자네트워크 핵심 기술 개발(2022~2026) 또한 수행 중이다.

(3) 적용 분야

앞서 서술한 대로 양자네트워크는 양자인터넷을 목표로 연구개발 되고 있기 때문에 궁극적으로 대규모 양자 컴퓨터와 결합된 양자네트워크는 수많은 분야에 적용될 수 있을 것으로 예상된다. 단순하게는 강력한 성능의 분산 양자컴퓨팅, 효율적이고 안전한 통신, 분산 양자 센서 측정 등의 적용분야가 있으며, 원자 시계 네트워크를 통해 전세계 수준의 시간 및 주파수 정밀 계측 등이 가능할 것으로 예상된다.

제4절 시사점

그동안 국내·외를 불문하고 양자통신에 대한 대규모 투자가 상당한 성과와 연결되었다. 국내에서는 2014년 양자정보통신 중장기 추진전략을 시작으로 2023년에는 글로벌 양자경제 중심국가로 자리매김하기 위한 양자기술 연구개발 투자전략이 수립되면서 국가적인 지원 아래 양자통신에 대한 투자가 이루어지고 있다.

이러한 여러 정책적 지원 아래 산업생태계 활성화를 위한 방안 중 하나로 유선 양자암호통신에 대한 시험검증제도가 세계 최초로 2023년부터 시행되었다. 여기에는 SK텔레콤의 IDQ Korea와 KT로부터 양자 키 분배 기술이전을 받은 우리넷, 코위버 등의 산업체가 양자암호통신 인프라 시범사업에 참여하여 레퍼런스를 제공하면서 산학연의 공동 협조 아래 검증정책이 구성된 모범적 사례이다. 국내 유선 양자통신에 대한 주요 성과와 비교해 무선 양자통신은 해외 기술 수준과의 격차가 뚜렷하게 벌어져 있다. 특히 중국은 2016년 제 13차 중국 5개년 계획에서 양자기술을 국가 중대프로젝트로 규정하여 무려 19조원의 투자가 이루어졌다. 그 결과 세계 최초의 양자 전용 인공위성인 묵자호 발사에 성공하고 이를 통해 지상국과 1,200 km 거리의 무선 양자 키 분배를 시연해 보이는 것을 시작으로 최근에는 국가비상망에 무선 양자암호통신을 활용하고 있다. 한편, 이같이 위성과 광역 유선 네트워크를 활용하여 양자통신 네트워크 영역을 넓히는 실험 외에 기존의 양자통신 네트워크를 얽힘 분배에 기반한 네트워크로 기능적으로 발전시키기 위한 노력도 양자기술 선도국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

향후 양자통신의 발전 방향이 양자컴퓨터를 통합하는 양자인터넷인 만큼 장거리 양자통신의 기반인 양자중계기와 무선 양자통신 기술에 대한 연구, 양자 키 분배/얽힘분배 네트워크 연구 및 이외에도 양자 인증 및 서명과 양자비밀공유 등 인터넷의 보안 서비스, 양자인터넷 구축을 위한 네트워크 구축에도 적극적 연구와 투자가 요구된다.

제2장
국내외 양자센싱 R&D 동향

제1절 개요

양자센서는 특정 물리량의 측정을 위해 양자 결맞음, 양자 간섭, 양자 얽힘과 같은 현상을 이용하여 매우 민감도 높은 센싱이 가능하도록 구현된 양자시스템 형태의 센서를 의미한다. 이를 측정 물리량으로 구분 시 대표적으로 양자관성센서, 양자시간·주파수센서, 양자 전기장·자기장 센서, 양자광학센서 등으로 나눌 수 있다.[172)]

이러한 양자센서 기반의 응용분야들은 원자 시계, 양자 자이로, 양자 중력계, 양자 이미징 센서 등으로 알려져 있으며, 본 기술들을 이용하여 뇌 스캐너, 지하 구조물 측정, 헬스케어, 반도체, 국방 등에 활용될 기술을 구현하기 위한 노력이 이루어지고 있다.

양자관성센서의 경우 물리량에 따라서 중력, 가속도, 회전 등의 측정을 위해 원자, 물질파, 광역학계 등의 양자 현상을 이용하고 있으며, 국방 분야, 자동차 자율주행 등에 활용 가능한 관성항법 및 지문항법용 양자관성센서 연구가 활발히 진행 중이다. 최근 중력 및 항법 기술의 수요로 현장 이동형 및 탑재형 양자 중력계 연구가 활발히 진행 중이며, 또한, 양자중력계의 활용도를 높이기 위한 소형화 연구도 진행중이다. 양자중력센서의 경우 지하 싱크홀 및 지하수 수위 등 지층의 변화를 탐지하여 재난 대비, 지하 마그마 이동 감지 등을 통한 화산 및 지진 조기 탐지 등에 활용 가능하며, 탑재 가능하도록 개발하면 자원 탐사, 해양 및 지질 조사, 중력지도 작성 및 중력 항법 등을 위한 센서가 될 것으로 바라보고 있다. 양자관성센서 기반의 고정밀의 관성항법 및 지문항법을 하게 되면 GPS 등과 같은 항법위성이 불가한 환경이나 지역에서 항법이 가능하므로, 기존 관성센서의 성능을 뛰어넘는 양자관성센서 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

양자시간·주파수센서의 경우 높은 정확도 및 안정도의 시간 및 주파수를 발생, 동기 및 측정에 결맞음, 간섭 등의 양자현상을 이용하고 있으며, 첨단산업, 국방분야, 방송·통신 등의 기술 발전에 따라 더 정확하고 안정적인 기준 시각 및 주파수원을 필요로 하고 있어, 고정밀 또는 초소형의 양자시간·주파수센서 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 마이크로파 전이를 이용하는 양자시계(마이크로파 원자시계)의 정확도 및 안정도를 뛰어넘는 광주파수 전이 기반의 양자시계(광시계) 연구가 되고 있으며, 최근에는 원자의 핵전이를 이용하는 핵시계 개발을 시도하고 있다. 시간은 모든 물리량 중에 가장 정확한 측정이 가능하고, 다른 물리량 측정이 소급되어 사용된다. 정확한 시간 측정은 기초과학 및 측정과학의 발전에 기본이 되는 기술이다. 시계는 통신·방송 뿐 아니라 대부분의 측정 장비에 내장되어 사용되므로 그 활용도를 높이기 위한 초소형 원자시계도 활발히 연구되고 있다. 또한, 위성항법이 시간 및

172) IITP (2020)

주파수를 기반으로 하고 있으므로, 위성에 탑재하기 위한 위성탑재형 양자시계, 지상국의 시각 및 주파수원을 위한 초정밀 양자시계 등에 관한 연구도 진행되고 있다. 특히, 양자관성센서 기반의 관성 및 지문 항법에는 고정밀 시계가 필수적이며, 사용되고 있는 시계의 정확도 및 안정도가 항법의 정확도를 결정하는 가장 기본적인 것이므로 항법용 고정밀 원자시계, 항법장비 및 측정장비에 내장하기 위한 초소형 원자시계, 초소형 광주파수합성기 등에 관한 연구가 활발히 진행하고 있다.

양자전기장 센서는 비교적 근래에 주목받고 있는 양자센서이다. 전기장의 측정 감도를 고전 기술 이상으로 극복함과 동시에, DC부터 THz 대역까지 광대역 주파수에서 전기장의 측정이 가능한 기술로 알려져 있다. 최근 리드버그 원자를 구현할 수 있는 요소 기술들이 개발되면서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 특히 국방 분야와 통신 분야에서 유망한 기술로 알려져 있다. 주로 미국과 유럽이 선도하여 연구를 진행해 왔으나, 최근에는 중국에서 많은 연구 결과가 도출되는 특징이 있다. 미국의 경우 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)와 콜로라도 대학이 통신 분야의 연구를 주도하고 있으며, 관련회사가 창업되어 상업화가 진행 중이다. 또한 광대역 주파수에 해당하는 전기장을 안테나 크기와 무관하게 단일 센서로 측정할 수 있어, DARPA와 미 육군 연구소에서는 국방관련 기술로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. NASA의 경우 지구관측을 위해 위성에 탑재하는 연구를 시작하였다. 유럽의 경우 산업에 활용될 전기장 이미징 기술 연구를 진행하고 있다.

양자자기장 센서의 경우 원자, 점결함 스핀 큐비트의 Zeeman 효과를 이용해 자기장을 정밀하게 측정함으로써, 고전적인 자기장 측정 방법의 한계를 극복하는 기술로 알려져 있다. DC에서 AC까지 넓은 주파수 영역의 자기장을 측정하고, 측정 대상도 단일 스핀, 자성 물질, 전류 소자, 바이오 활성, 지구자기장 왜곡 등 다양하므로 기초물리, 생명 분야에서부터 공학, 산업, 의료, 국방에 이르기까지 활용 분야가 넓다. 대표적인 플랫폼으로는 원자증기 기반의 원자자력계와 다이아몬드 NV(Nitrogen-Vacancy) 센터로 대표되는 고체 점결함 기반 자력계가 있다.

양자광학센서는 얽힘 상태 등의 양자광원을 이용해 고전적인 측정의 한계를 돌파하는 기술이다. 최근 양자조명, 양자라이다, 양자레이다, 양자이미징, 양자가스센싱 등의 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 고전 광원 기반 이미징은 근본적으로 분해능(Rayleigh) 한계, 감도(Shot-Noise) 한계 이상의 계측이 불가능한데, 양자광원의 양자이득을 이용해 분해능 한계를 극복하거나, 샷노이즈 이하의 고감도 측정이 가능하다. 그뿐만 아니라 양자광원을 이용해 피사체와 상호작용 없이 측정이 가능한 고스트 이미징(Ghost Imaging) 등의 양자광학센서 기술이 존재한다. 양자광학센서는 기본적으로 양자광원기술이 선행돼야 하며, 양자광원의 상관관계 특성, 얽힘 특성 등을 이용해 배경 잡음 환경 또는 약한 조명에서 측정하는 연구들에 응용되고 있다. 이 때문에 낮은 광량을 요구하는 바이오 분야에 적용할 수 있으며, 양자레이더와 같이 탐지 회피를 시도하는 스텔스 비행기에 대응하는 기술로도 주목받고 있다.

양자 계측(Quantum Metrology)은 얽힌 상태(Entangled State)나 진공 압축 상태(Squeezed Vacuum State)를 이용하여 고전적 방식으로 도달할 수 있는 측정 한계를 뛰어넘는 기술로, 양자 변수 추정(Quantum Parameter Estimation)과 양자 가설 시험(Quantum Hypothesis Testing)으로 나누어 생각할 수 있다. 양자 변수 추정에서는 변수 측정 정밀도를 최소화하는 것이 목표인데, 고전 상태(혹은 표준 양자 상태)를 이용하는 경우 도달할 수 있는 측정 정밀도 한계가 입력 평균 광자 수 N의 제곱근에 반비례하지만, 얽힌 상태나 진공 압축 상태를 이용하면 측정 정밀도 한계가 N에 반비례하게 된다. 즉, 더 적은 양의 입력 평균 광자수로도 고전 측정 정밀도의 한계에 도달할 수 있으며, 같은 양의 입력 평균 광자수를 고려할 경우에는 고전 측정 한계보다 N의 제곱근만큼 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 양자 가설 시험에서는 물체 탐지 오류율을 최소화하는 것이 목표인데, 얽힌 상태를 이용하면 표준 양자 상태(Standard Quantum State)로 도달할 수 있는 물체 탐지 오류율을 지수(Exponent)의 4배까지 향상시킬 수 있게 된다. 현재, 양자 변수 추정은 다중 변수(Multi-Parameter)의 측정 정밀도에 대한 연구가 광학 및 원자 시스템에서 이루어지고 있고, 양자 가설 시험은 물체 탐지 오류율을 최소화하는 것뿐만 아니라 반사율이 다른 2개의 물체를 구분하는 연구가 광학 및 극저온 시스템에서 이루어지고 있다.

근대에 들어 눈부신 과학기술의 발전으로 이미 수많은 센서가 발명됐고 일상생활부터 첨단과학 분야까지 널리 사용되고 있다. 그러나 국방, 우주, 반도체, 바이오, 원자력, 기후 변화, 자율주행, 전기차, 로봇 등 첨단과학 기술의 발전과 함께 새로운 센서의 개발도 끊임없이 요구되고 있다. 최근 우리는 코로나로 인한 전 세계적 팬데믹 현상을 통해 사회가 요구하는 새로운 센서의 개발 필요성과 이와 연관된 산업의 발전을 볼 수 있었다. 다가온 양자혁명 2.0 시대를 맞이해 미래를 대비하고 새로운 수요에 대응하려면, 우리도 양자센서기술에 대한 집중 투자와 개발을 서둘러야 할 것이다.

제2절 해외 양자센싱 R&D 동향

1. 양자관성센서

가. 양자중력센서

(1) 기술 동향

중력센서는 중력가속도를 측정하는 장치로 중력가속도의 시간 및 공간적 중력변화를 측정하여 중력항법, 자원탐사, 지층변화, 화산 및 지진 탐지 등에 활용이 가능하다. 기존의 고전중력계는 50년 이상의 연구가 진행된 기술이지만 이미 고전 기술의 한계로 더 이상 발전하지 못하고 있다. 최근, 극저온 원자간섭계 기반의 양자현상을 이용하여 기존 중력 센싱 기술의 한계를 뛰어넘는 양자 중력센싱 기술에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 양자중력계연구는 해외의 경우 미국, 유럽을 중심으로 많이 진행되고 있으며, 최근 중국에서도 이 분야에 집중적인 투자와 지원을 하고 있다. 한국에서도 2019년부터 본격적인 양자중력계 개발 연구가 수행되고 있다.

또한 최근에는 양자중력계와 더불어 양자중력구배센서에 대한 연구도 활발히 시작되고 있다. 양자중력구배센서는 2개의 거의 동일한 양자중력계를 수직 방향으로 일정한 거리에 설치하고 두 중력계에서 측정된 중력값의 차이를 이용하여 중력기울기를 측정하는 장치이다. 이 경우, 두 중력계의 차이값을 이용하므로 진동, 레이저 등에 의한 공통의 잡음이 상쇄되어 주위 잡음에 둔감한 센서 구성이 가능하며, 공간적인 중력변화를 보다 높은 감도로 측정하는 것이 가능하다. 양자중력계와 양자중력구배계는 사용 용도에 따라 각각 단독으로 또는 같이 하이브리드 형태로 사용될 수 있다. 양자중력구배계 연구는 미국, 프랑스, 영국 등에서 최근 시작하여 연구 결과들을 발표하고 있으며, 한국에서는 2023년부터 이에 대한 기초적인 연구가 시작되었다.

(2) 연구 동향

양자중력센서는 저온 원자 물리의 태동 시점부터 20년 이상 오랜 역사를 가지고 개발되고 있으며, 최근에 들어와 매우 활발하게 연구되고 있다. 다음의 표는 양자중력센싱 기술의 연구 현황을 보여준다.

표 II-2-1 원자간섭계 기반의 양자 중력 및 관성 센싱 기술 개발 현황

Country	Institution	Expertise (atomic species)
France	SYRTE, Paris	gravimeter, gyroscope, gradiometer, trapped AI, GW detection, atom chips (Rb, Cs)
France	LKB, Paris	h/m, LMT, Bloch (Rb)
France	ONERA, Palaiseau	gravimeter, gradiometer, WEP test, field applications (Rb)
France	LP2N, Bordeaux	WEP test, GW (Rb, K, Sr)
France	LCAR, Toulouse Univ.	test of atom neutrality, topological phases, atom chips (Rb)
France	Muquans, Bordeaux	gravimeter, gradiometer (Rb)
France	iXBlue, Bordeaux	inertial sensors (Rb)
Germany	Hannover Univ.	gravimeter, gradiometer, WEP test, GW detection, LMT, atom chips (Rb, K, Yb)
Germany	Hannover Univ.	gravimeter, EP (Rb)
Italy	LENS, Florence	gradiometer, trapped AI, WEP test (Rb, Sr, Cd)
Italy	AtomSensors	gravimeter, gradiometer (Rb)
Israel	Weizman Institute of Science, Rehovot	gravimeter, inertial navigation (Rb)
Israel	Weizman Institute of Science, Rehovot	inertial navigation unit (Rb)
UK	Univ. Birmingham	gradiometer, field applications (Rb)
UK	Imperial College, London	accelerometer, search for dark energy (Rb)
UK	Teledyne e2v	gravimeter (Rb)
UK	M2 lasers	accelerometer (Rb)
Canada	York University	echo interferometry (Rb)
Mexico	Univ. San Lui Potosi	gravimeter (Rb)
USA	Stanford Univ	WEP test, GW detection, LMT, BEC, 10-meter fountain (Rb, Sr)
USA	UC Berkeley	tests of fundamental physics, h/m, LMT, gravimeter (Cs, Li)
USA	JPL, Pasadena	applications in geodesy, gradiometry (Rb)
USA	Sandia National Lab., Albuquerque	high sampling rates, multi-axis, vapor cell (Cs, Rb)
USA	Draper Lab, Cambridge	LMT (Cs)
USA	Univ. Washington	LMT, BEC (Yb)
USA	AO Sense Inc.	gravimeter, inertial sensors (Rb)
USA	NIST, Boulder	miniature AI for inertial sensing (Rb)
USA	Northwestern Univ.	GW detection, LMT
USA	Goddard (NASA)	gradiometer
Australia	ANU, Canberra	gravimeter, gradiometer (Rb)
China	WIPM, Wuhan	gravimeter, gyroscope, EP, GW (Rb, Sr, Cs) 10-meter fountain
China	Zhejiang Univ. and Zhejiang Univ. of Technology, Hangzhou	gravimeter, gradiometry (Rb)
China	Zhejiang Univ., Hangzhou	gravimeter (Rb)
China	HUST, Wuhan	gravimeter, gyroscope, EP (Rb)
China	NIM, Beijing	gravimeter (Rb)
China	CIMM, Beijing	gravimeter (Rb)

Country	Institution	Expertise (atomic species)
China	USTC, Hefei	gravimeter (Rb)
China	NUDT, Changsha	gravimeter (Rb)
China	Tsinghua University, Beijing	cold atom beam gyroscope (Rb)
Korea	KRISS, Daejon	gravimeter (Rb)
India	IISER Pune	AI with BEC (Rb)
New Zealand	Univ. Otago	gravimeter (Rb)
Singapore	CQT	gravimeter (Rb)
Singapore	Atomionics	inertial sensors

※ R. Geiger et al. (2020)

양자중력계 연구는 다양한 분야에서 활용하기 위한 센서 개발 연구로, 고전 중력센서의 한계를 극복한 고정밀 절대양자중력계를 개발하는 연구에도 많은 관심이 집중되고 있으며, 다음 표는 양자중력 센싱 기술 현황을 비교한 것이다.

그림 II-2-1 양자 중력 센싱 기술 현황 비교표

항목 (단위)	고전 중력계	프랑스 (SYRTE)	독일 (홈볼트)	미국 (Stanford)	중국 (NIM)	중국 (CNS)	한국 (KRISS)	목표치
정확도 (nm/s²)	20	50 wavefront	△30 wavefront	30 No wave	△50 wavefront	N/A	<50 wavefront	10
감도 (nm/(s² Hz^1/2))	150	57 vibration	96 vibration	80 vibration	440 vibration	42 detection	56 vibration	50
정밀도	>10 nm/s² @1day	2 nm/s² @1000s	0.5 nm/s² @1day	N/A	2 nm/s² @30000s	3 nm/s² @200s	0.7 nm/s² @1day	0.5 nm/s² @1day
간섭시간 T (ms)	-	80	260	160	70	300	80	> 150
반복률 (Hz)	> 0.1	3	0.7	0.8	1	1	2	2
방식	프리즘 자유낙하	자유낙하	원자분수	원자분수	자유낙하	원자분수	자유낙하	원자분수

(△: 불확도 평가가 엄밀하지 않아 추가적인 불확도 평가가 필요한 경우를 나타냄)

1) 미국

① 미국 국립표준기술연구소(NIST), 미국항공우주국(NASA), 방위고등연구계획국(DARPA), 제트추진연구소(JPL), Sandia National Lab., 스탠포드 대학교, 버클리 대학교, 워싱턴 대학교, 메릴랜드 대학교 등에서는 원자간섭계에 기반해 중력 및 관성을 측정하는 연구를 수행하고 있다.

② 스탠포드 대학에서는 2001년에 감도 면에서 고전 절대중력계(FG5)보다 우수한, 레이저 냉각된 세슘 원자간섭계 결과를 발표했고,[173] 국방위협감소국(DTRA)와 해군(Navy)의 지원을 받아 두

173) Peters et al. (2001)

동위원소 87Rb, 85Rb 원자를 동시에 냉각시켜 10m 높이에서 떨어뜨릴 수 있는 양자중력계를 개발하고 있다. 이를 통해 일반상대성 및 양자역학 이론을 검증하기 위한 연구를 수행 중인 것으로 알려져 있다.[174]

③ 버클리대에서는 JPL, 미국 국립과학재단(NSF) 등의 지원을 통해 물리 이론 검증 및 물리상수 측정을 위한 원자간섭계를 개발했으며, 초미세구조 상수를 측정했다.[175]

④ NASA는 Planetary Science Division에서 진행 중인 우주와 지구 탐사를 위한 PIDDP(Planetary Instrument Definition and Development Program)의 지원을 받아 탑재형 원자중력계를 개발하고 있다.

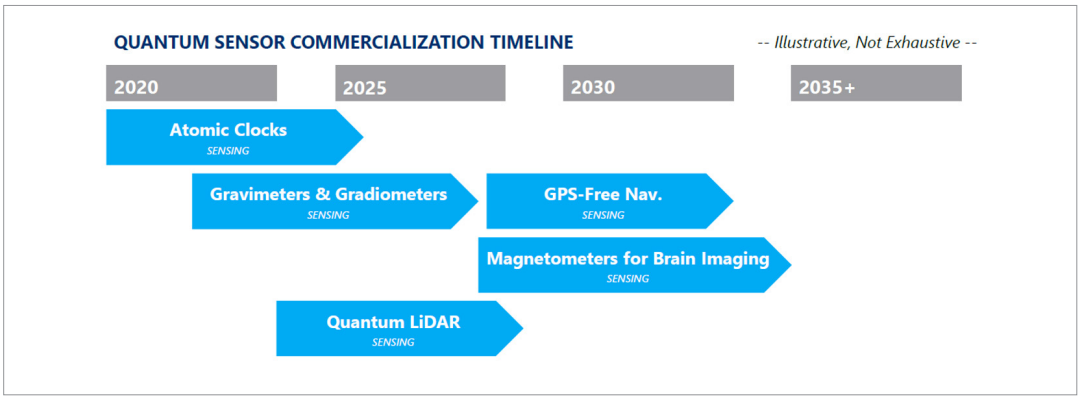
⑤ JPL, Sandia National Lab, NIST, NASA 등 국가연구소에서는 항법과 지구물리 측정을 위해 현장 적용이 가능한 양자관성센서를 개발하고 있다.

⑥ UC Berkeley 대학에서는 이동이 가능한 원자간섭계 기반의 양자중력계를 개발하여 실험실에서 조수(tidal)에 의한 중력변화, 원거리 지진 감지, 현장에서 이동하면서 위치 및 고도에 따른 중력변화를 측정하여 양자중력계의 실제적인 활용 가능성을 시범적으로 보여주었다.[176]

⑦ 양자중력계 기술은 관성항법, 잠수함 운행 등 국방 분야에서 미래 전략기술로서 활용도가 높아, 국가 핵심 프로젝트로서 기술개발을 추진하고 있다.

- GPS 없는 Position, Navigation & Timing을 위한 프로젝트 5개 중 두 개가 원자간섭계 관련 프로젝트 추진
- (AOSense, ColdQuanta 社) DARPA, Air Force, Army, Navy, NASA, NSF, DTRA 등 지원을 통해 정밀 항법, 중력 측정 등에 활용을 위한 양자중력계 센서 개발

그림 II-2-2 미국 양자센서 로드맵



※ OIDA (2020)

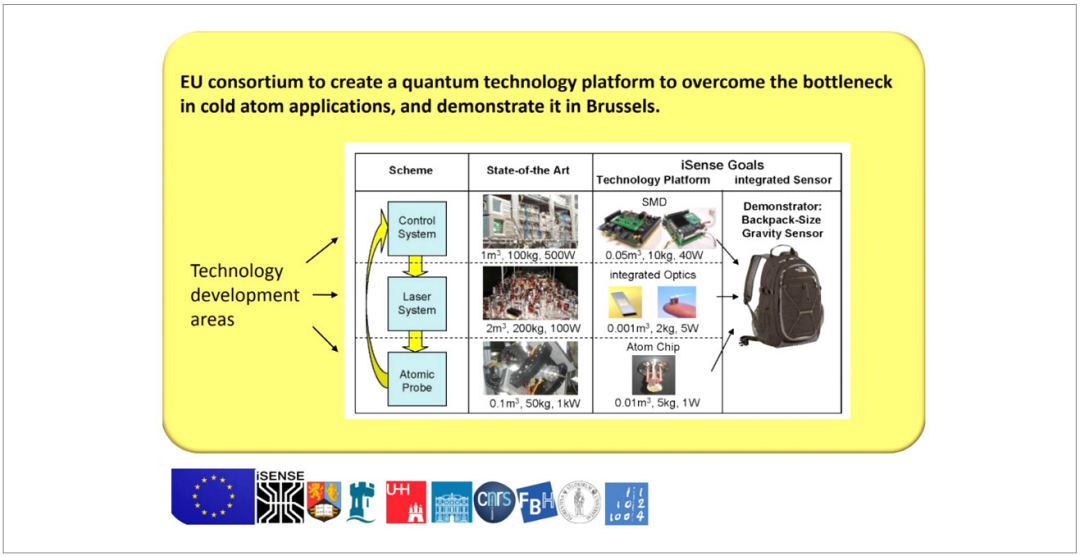
174) https://purl.stanford.edu/kd753jv6128
175) Yu et al. (2019)
176) Ibid.

2) 유럽

① 2차 양자혁명을 주도하기 위해 Quantum Flagship 프로그램을 진행 중이며, 양자센서의 주제 안에 원자간섭계가 포함돼 있다.[177)]

② (iSense(Integrated Quantum Sensors) 프로젝트) 저온 원자 센서의 차세대 소형화 기술 연구 컨소시엄을 구성, 백팩(Backpack) 크기의 중력센서 개발 비전을 제시하였다.

그림 II-2-3 차세대 소형화 기술 연구 및 백팩 크기의 양자 중력센서개발 비전



③ 실제 응용 분야에 적용하기 위한, 칩 크기의 차세대 양자센서 개발을 목표로 하는 IQS(Joint Lab Integrated Quantum Sensors) 프로젝트를 수행 중이다.

④ 유럽 31개국의 39개 연구 기금 조직으로 구성된 QuantERA 프로그램 내에서, 광학격자에 갇힌 극저온원자에 기반한 원자간섭계 측정으로 기존 중력 및 관성센서의 한계를 극복하기 위한 TAIOL(Trapped Atom Interferometers in Optical Lattices) 프로젝트가 수행 중이다.[178)]

177) https://qt.eu/

178) https://quantera.eu/taiol/

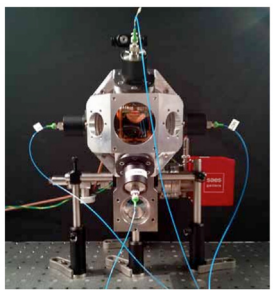
3) 영국

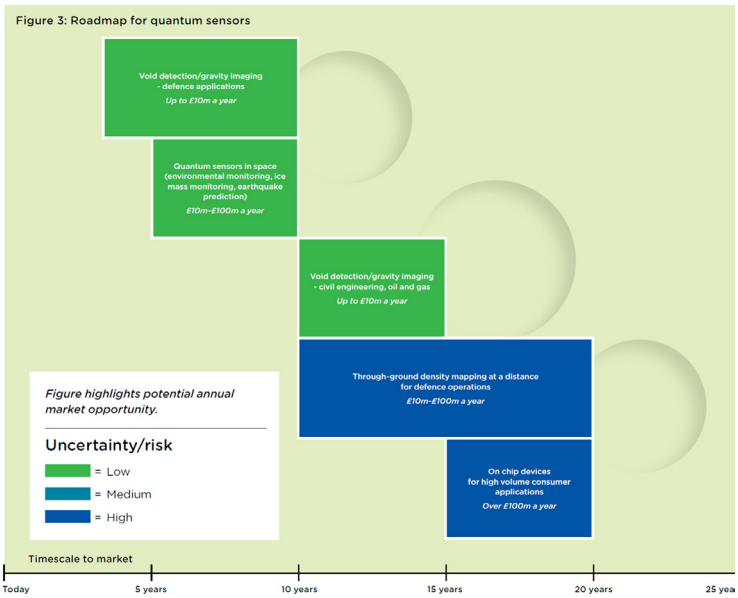
① 양자기술 상업화를 목표로 산업계, 학계 및 정부가 참여하는 1억 파운드 규모의 NQTP (National Quantum Technologies Programme)가 진행 중이다. 그중 버밍엄 대학을 UK Quantum Technology Sensors and Timing Hub로 지정하고 영국 기업이 상용화할 수 있는 다양한 양자 센서 및 측정 기술을 개발 중인 것으로 확인된다.[179)]

② NTQP에서 발간한 'A Roadmap For Quantum Technologies In The UK' 문서에 따르면 양자기술을 활용해 산업을 선점하고 국방을 지원하기 위한 로드맵이 작성돼 있으며, 여기에는 양자관성센서도 포함된 것으로 알려져 있다.[180)]

③ 버밍엄 대학에서는 원자간섭계 기반 양자 중력구배센서를 활용해 지하의 구조물, 지하수층 등에 대한 중력구배 변화를 측정하였으며, 실제 도심에서 중력구배 측정 데이터로부터 지하 공동을 탐지하고, 지하공동의 위치 및 크기를 산출할 수 있음을 보여주었다.[181)]

그림 II-2-4 (왼쪽) 버밍엄 대학에서 개발 중인 양자중력센서, (오른쪽) 양자센서 로드맵





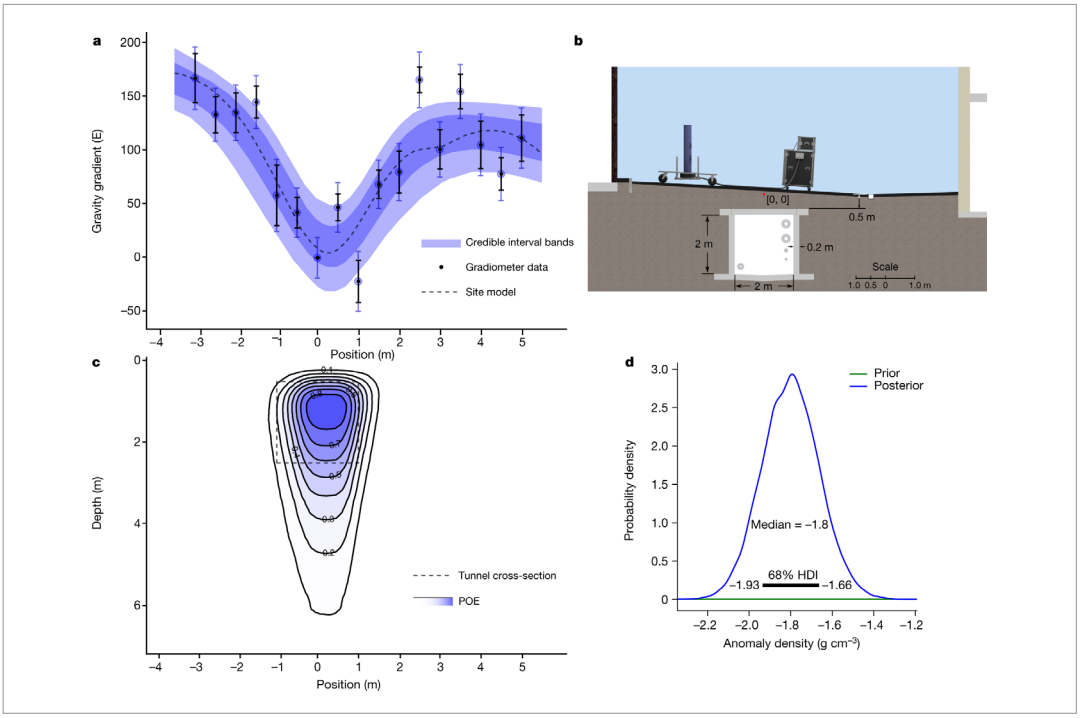
※ Innovate UK & EPSRC (2015)

179) https://uknqt.ukri.org/

180) https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf

181) Ben Stray et al. Nature 602, 590 (2022)

그림 II-2-5 양자중력구배계를 이용한 지하공동 탐지 및 위치 측정



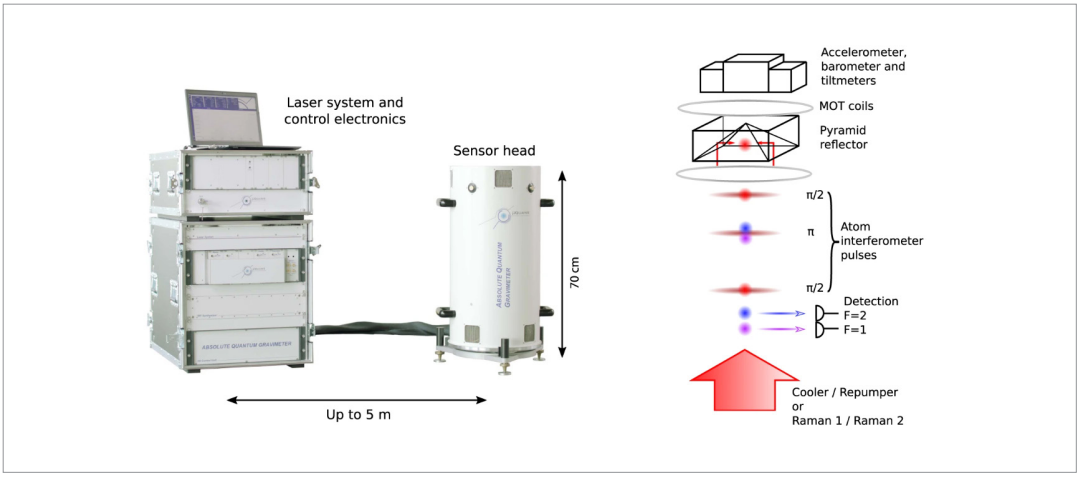
* 터널의 치수와 위치를 나타냄

※ Ben Stray et al. (2022)

4) 프랑스

① SYRTE는 고전중력계(FG5) 보다 성능이 뛰어난 양자중력계를 개발하고, Muquans를 설립해 세계 최초로 상업용 양자중력계를 개발했다.[182]

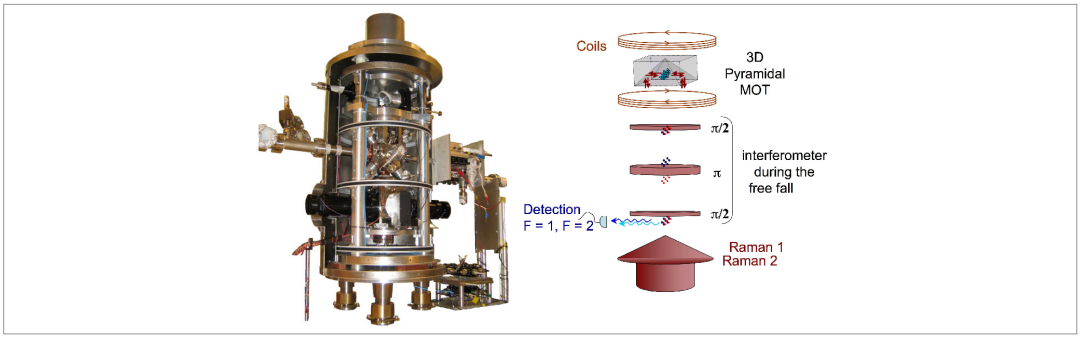
그림 II-2-6 SYRTE의 양자중력계



* (왼쪽) 휴대가능 양자중력계, (오른쪽) 측정원리

182) Ménoret et al. (2018), https://www.muquans.com/

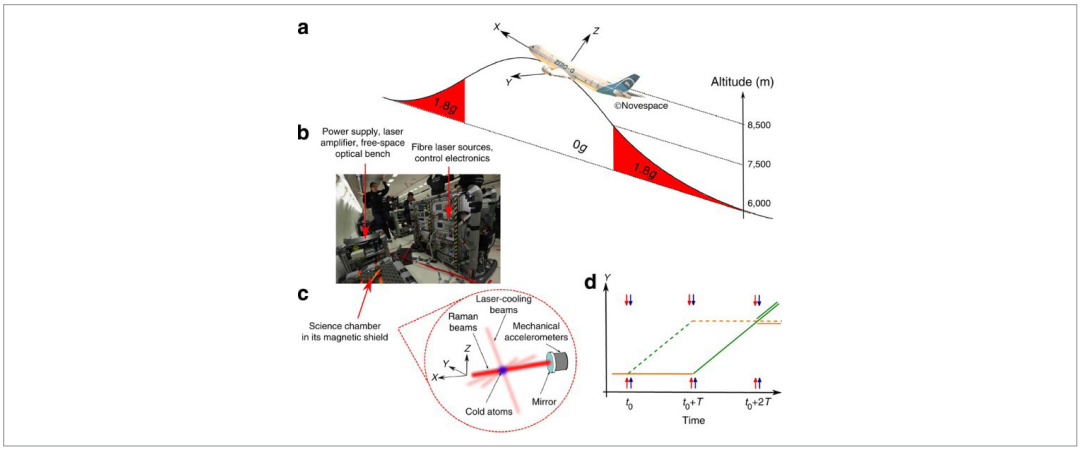
그림 II-2-7 Muquans사의 상용 양자중력계



* (왼쪽) 휴대가능 양자중력계, (오른쪽) 측정원리

② 프랑스 표준기관인 SYRTE, 프랑스항공우주연구원(ONERA)에서는 양자중력계를 항공기에 탑재하여 시험을 하였으며, 마이크로 중력(0g) 및 일반 중력(1g)의 비행 상태에서 중력 측정 연구를 수행하였다.

그림 II-2-8 항공기에 탑재한 양자중력계 실험

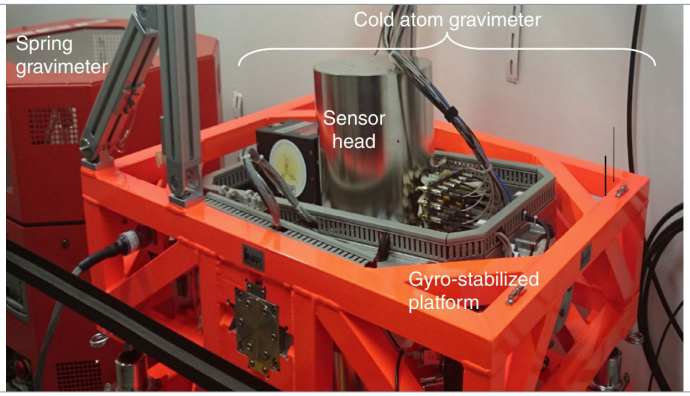


※ R. Geiger et al. (2011)

③ 프랑스항공우주연구원(ONERA)과 수산해양연구소(Shom)는 측지학, 지구물리학, 광물 및 탄화수소 탐사, 항해 등에 활용할 수 있는 양자중력센서를 개발하고, 배처럼 요동이 심한 환경에서 중력값을 10^{-5} m/s^2 정확도 수준으로 측정하여 대서양 연안의 중력지도를 작성하고,[183] 항공기에 탑재해 아이스랜드 상공에서 중력을 측정하여 중력지도를 작성하였다.

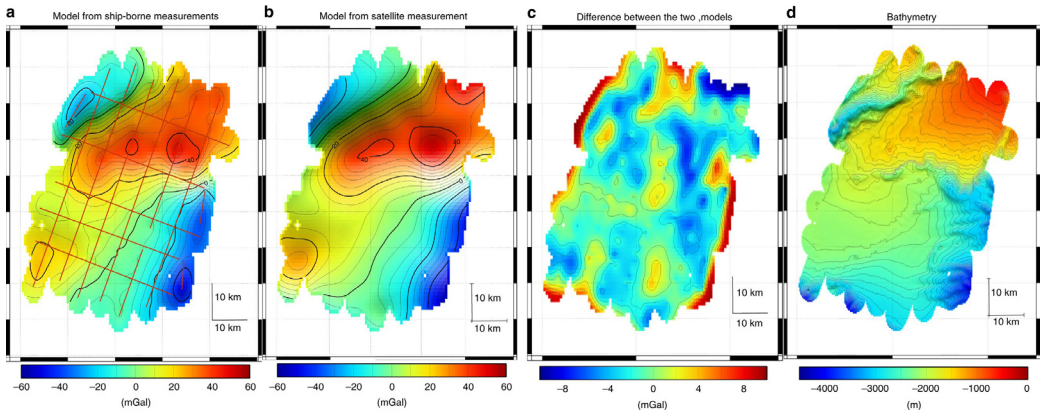
183) Bidel et al. (2018)

그림 II-2-9 선박에 설치된 저온 원자중력계



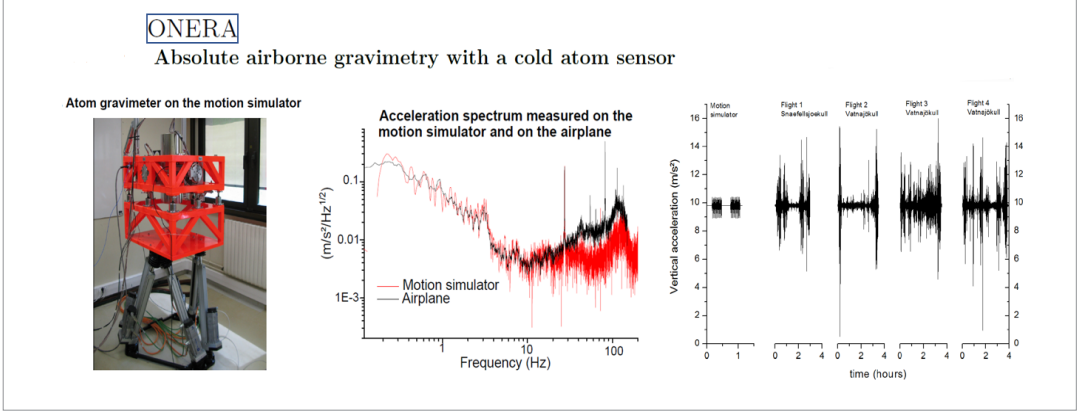
※ Nature Communications 9, 627 (2018)

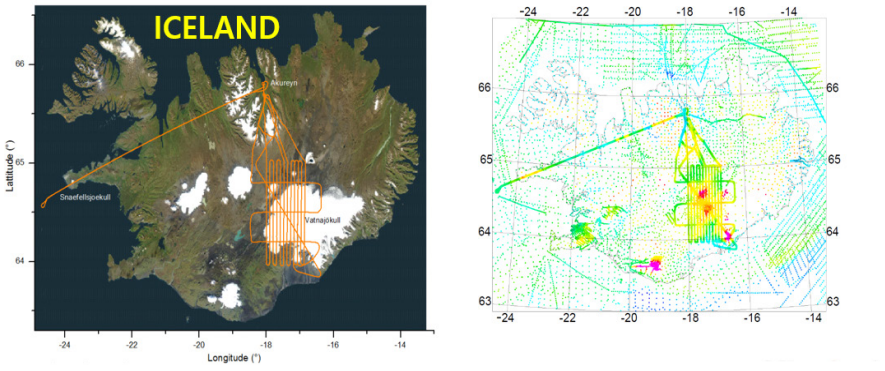
그림 II-2-10 원자중력계로 측정하여 작성된 중력지도



※ Nature Communications 9, 627 (2018)

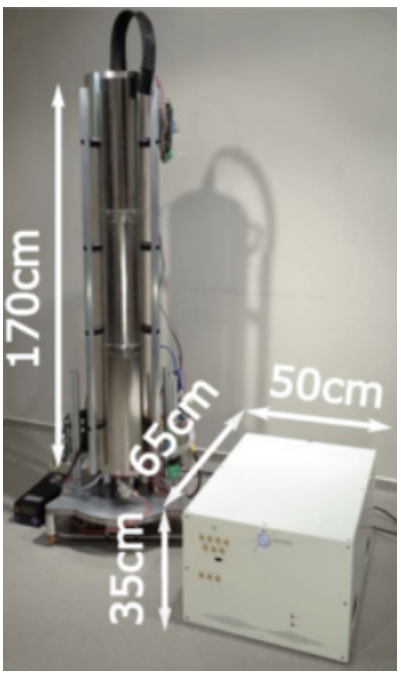
그림 II-2-11 항공 탑재용 원자중력계의 사진과 중력지도

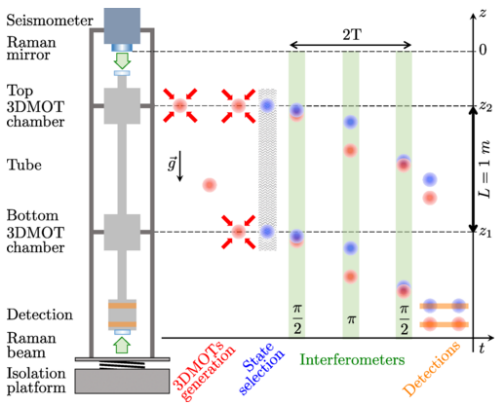




④ 프랑스 SYRTE에서는 2022년 양자투영잡음한계의 감도를 가지는 소형 양자중력구배계를 개발하고, iXblue 사와 협력으로 상용화를 추진하고 있다.

그림 II-2-12 (왼쪽) 양자중력구배계 사진, (오른쪽) 양자중력구배계 개념도





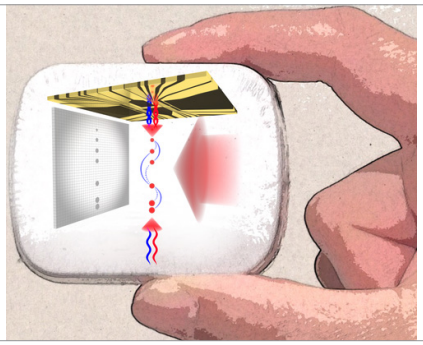
Sensor Head
175 cm H 55 cm W 66 kg

PHYSICAL REVIEW A **105**, 022801 (2022)

5) 독일

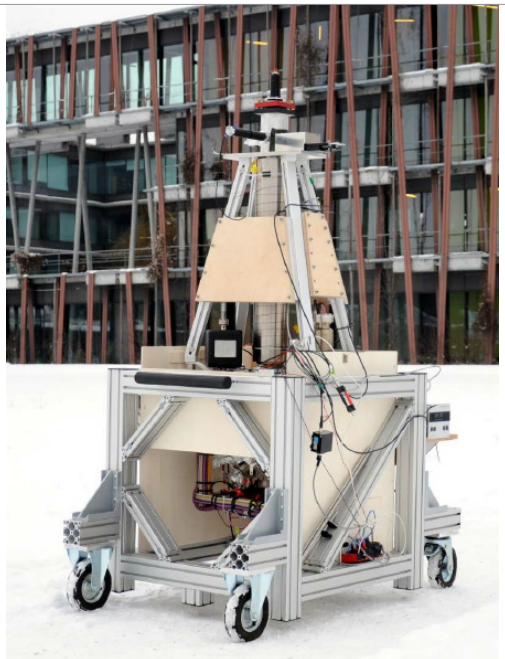
① 하노버 대학에서는 10m 길이의 원자간섭계를 개발하고 측정 결과를 보고했고,[184] 양자중력계를 원자칩 기반으로 개발하려는 'Atom-Chip Fountain Gravimeter' 연구를 수행한 바 있다.[185]

그림 II-2-13 하노버 대학에서 연구한 원자칩 기반 중력계 상상도



② 훔볼트대(베를린)에서는 이동형 양자중력계 개발 연구를 수행했다.[186] 정확도 및 안정도 평가를 수행하여 그 결과를 발표하였으며, 현재 프랑스 SYRTE, 한국 KRISS 등의 양자중력계와 함께 최고의 성능을 보여주고 있다.

그림 II-2-14 훔볼트대에서 개발한 이동형 양자중력계



※ Applied Physics B 113, 49 (2013)

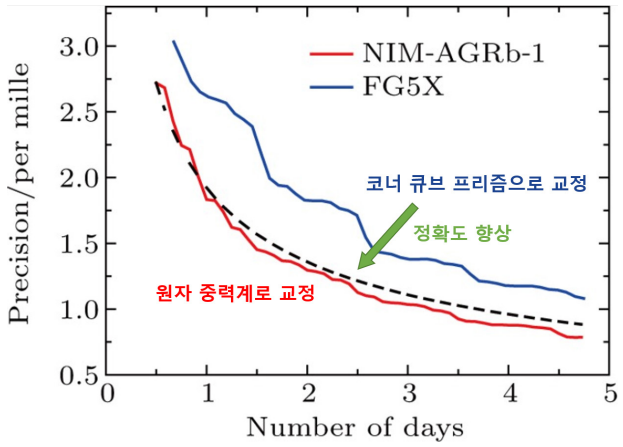
184) Schilling et al. (2020)
185) Abend et al. (2016)
186) Hauth et al. (2013), Freier et al. (2016)

6) 중국

① NIM(National Institute of Metrology), CNS(Chinese Academy of Sciences), 화중과기대학교, 지량대학교 등에서 양자중력계 연구를 수행 중이다.

② 중국 표준기관인 NIM은 양자중력계를 개발했으며, 이를 이용하여 상대중력계를 교정하였을 때 정확도가 향상되는 것을 보여주었다.

그림 II-2-15 NIM에서 개발한 양자중력계를 이용한 상대중력계 교정



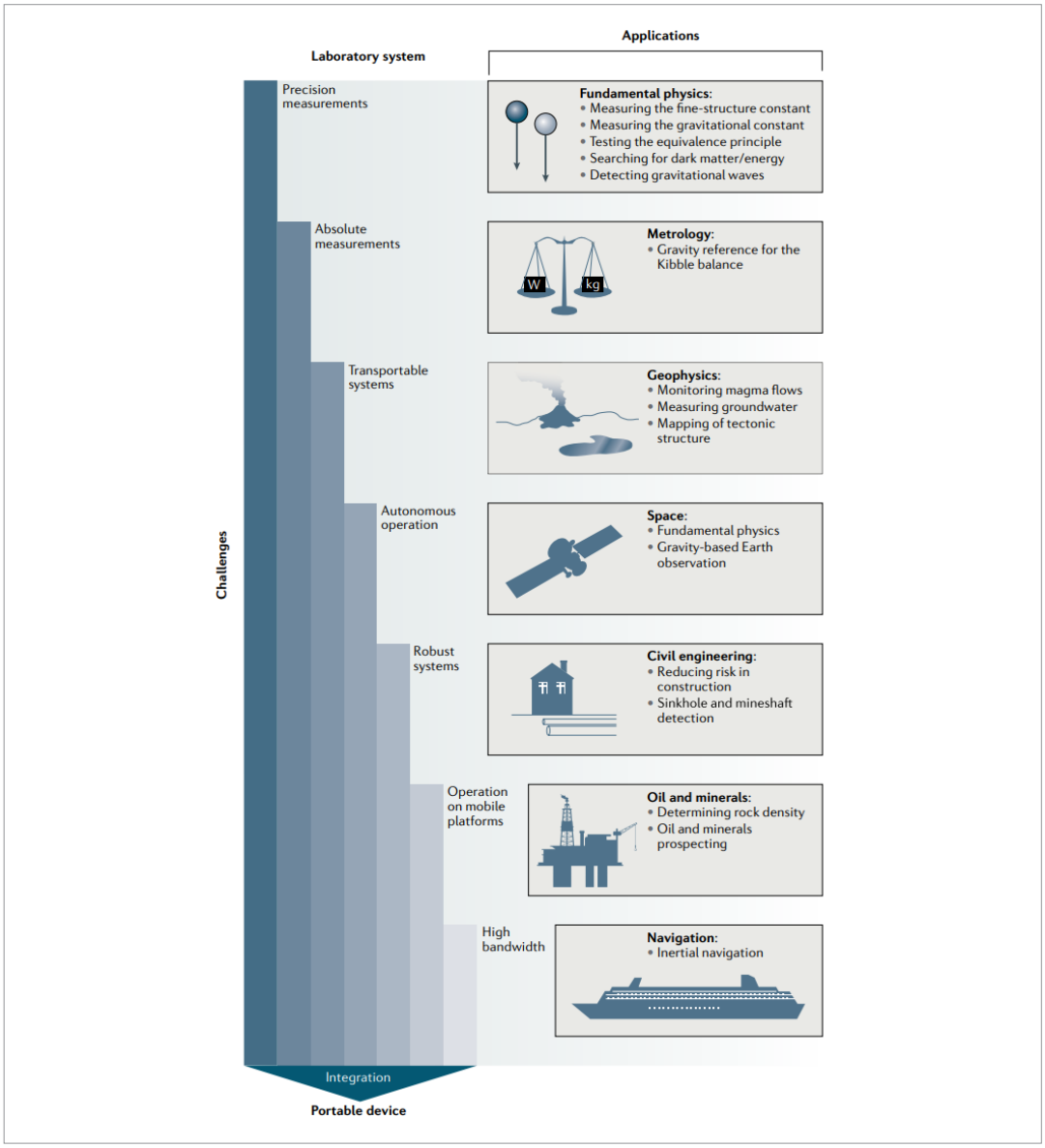
③ 2021년 8월 중국과학원 정밀측정연구원은 0.9E (1E = $10^{-9}/s^2$)의 분해능을 가진 저온원자 중력구배 측정기(Atom-gradiometer) 프로토타입을 개발하였다.

(3) 적용 분야

양자중력계의 활용을 위해 확보되어야 할 기술들과 응용 분야는 다음과 같다.[187]

187) Bongs et al. (2019)

그림 II-2-16 휴대용 양자센서 개발 로드맵



※ Nature Reviews Physics 1, 731 (2019)

① 정밀측정 분야에 양자중력 센싱 활용

- 높은 정확도와 정밀도의 중력측정을 통해 미세 구조 상수 측정, 중력상수 측정, 등가원리 검증, 중력파 검출 등 기초과학 및 정밀측정 과학분야에서 활용

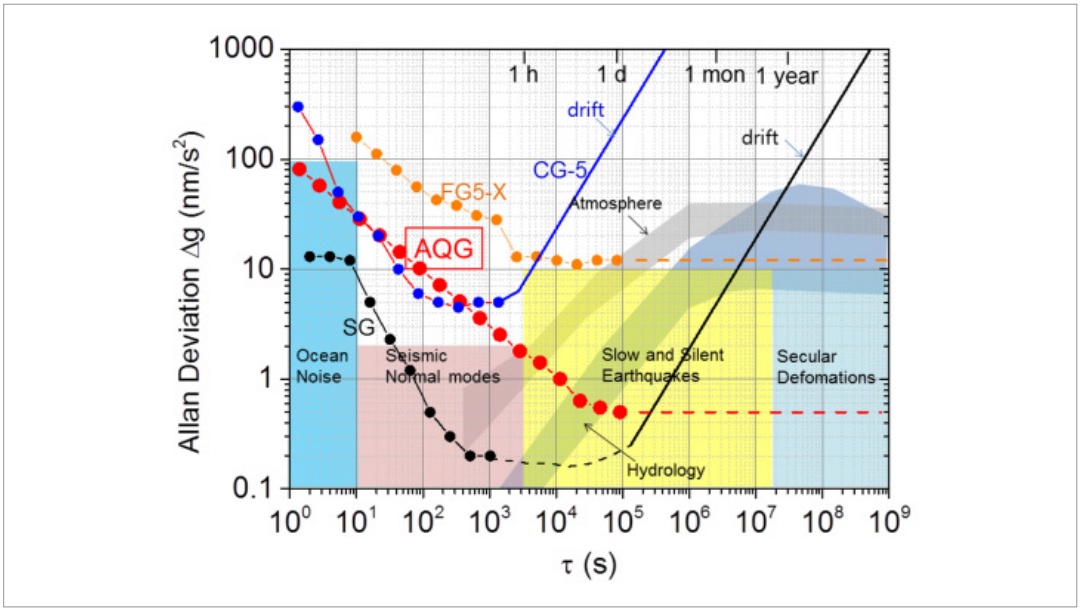
② 측정과학 분야에 양자중력 센싱 활용

- 차세대 중력표준기로 사용하여 국가 중력기준점 측정 및 중력측정 소급성 제공
- 지구 지오이드 측정에 활용될 수 있으며, 중력-시간의 시공간 연구에 활용
- 와트발란스에 중력값을 제공하여 질량 측정 정확도 향상에 기여

③ 현장으로 이동 가능한 양자중력계 개발로 국가 안전망에 활용

- 중력분포 및 변화 측정을 통한 지하 구조, 지층변화 등을 측정하여 대형시설의 안전이나 건설 분야 안전에 활용
- 지하 마그마 이동 감지 등을 통한 화산활동 조기 감지에 활용
- 지하수 분포, 싱크홀 등을 탐지하여 대형 사고 대비에 활용
- 중력변화, 지진, 대기수분, 느리고 조용히 진행되는 지진활동, 그리고 아주 느리게 진행되는 지구 변형 등의 감지를 위해서는 고정밀 양자 절대 중력 센싱 기술이 필요함

그림 II-2-17 기존 고전 중력계와 양자중력센서 감도 및 정밀도 비교



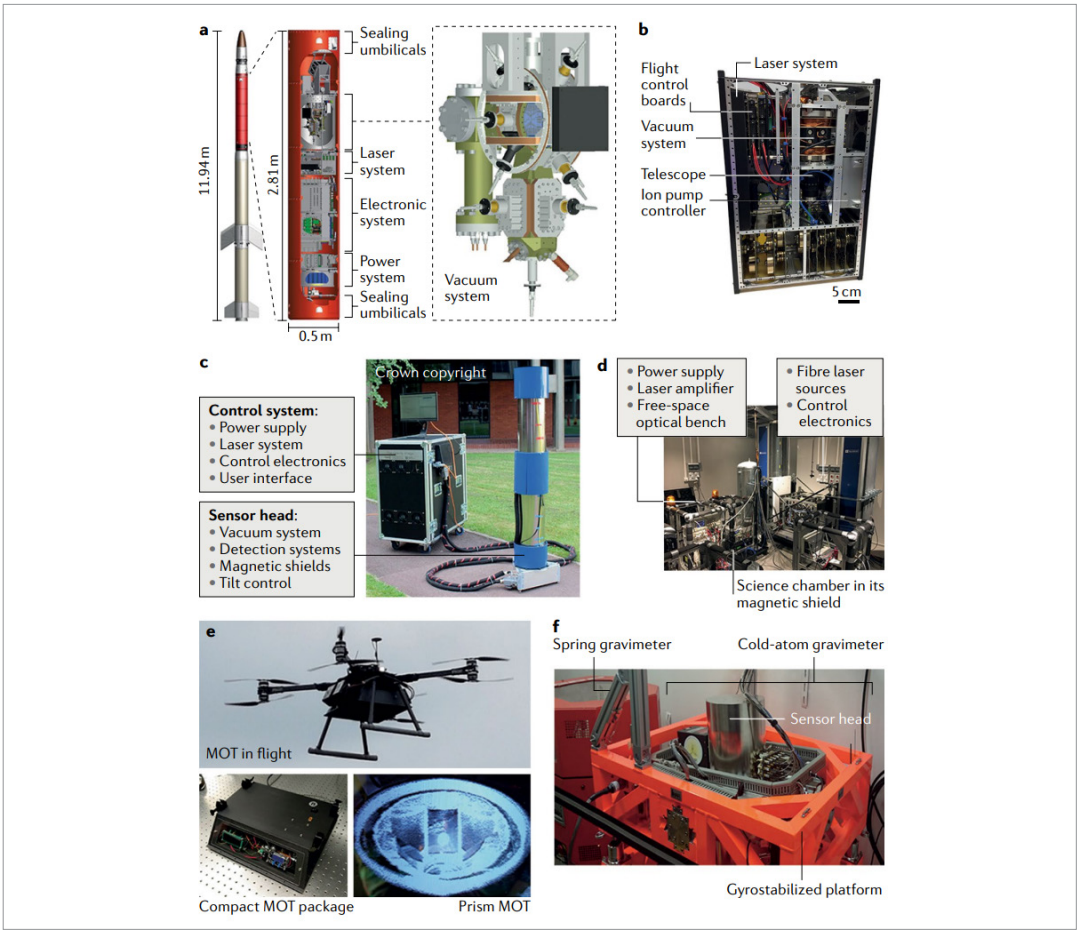
④ 선박, 비행기, 위성 등 운송 수단에 탑재하여 자원탐사에 활용

- 고감도, 고신뢰도, 재현 가능한 중력 측정으로 지구 내부 분포 측정을 통한 자원탐사에 활용
- 우주 및 행성 관측, 도심 지하 구조물 및 수층 파악, 원유, 가스 및 광물 자원 탐사, 항법, 기후변화, 수자원 관리, 국방 등 광범위한 분야에 활용

⑤ 항공기, 잠수함 등 이동이 가능한 운송 수단에 탑재시켜 국방 분야에 활용

- 전시나 위성 사용이 불가한 환경에서 중력 항법에 활용
- 지하 군사 군사시설, 땅굴 등 탐지에 활용

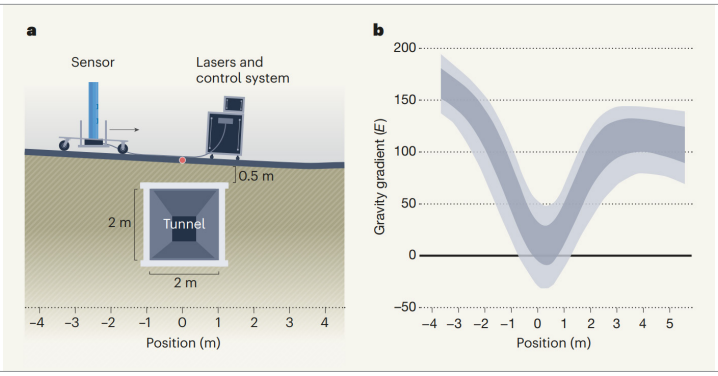
그림 II-2-18 휴대용 원자간섭계의 활용 예시



※ Nature Reviews Physics 1, 731 (2019)

⑥ 버밍엄 대학의 발표에 따르면 양자중력센서를 활용 시, 지표 아래 밀도의 불균일성 측정이 고감도로 신속하게 가능하며 싱크홀, 광산, 터널, 도심 공동구 등의 지하 구조물에 의한 중력 구배 변화 감지도 가능할 것으로 기대한다고 밝혔다.

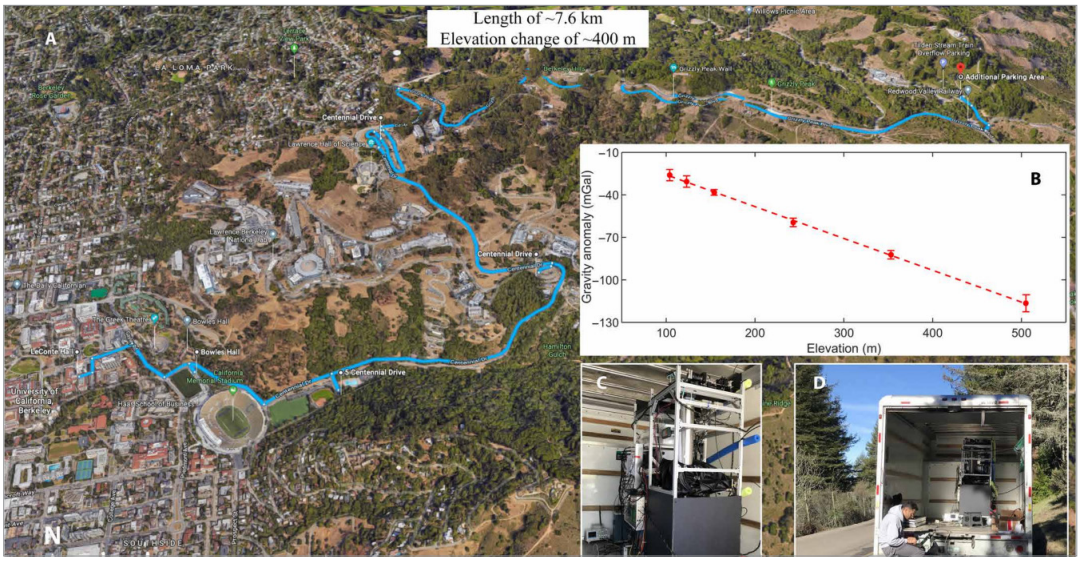
그림 II-2-19 도심의 지하구조물 탐지[188)]



※ Nature (2022)

⑦ 버클리대는 차량에 양자중력센서를 탑재해 버클리힐즈에서 고도에 따른 중력변화를 이동하면서 측정하여 양자중력계의 활용 가능성을 보여주는 연구를 수행했다.[189)]

그림 II-2-20 버클리대에서 수행한 버클리힐즈의 중력 측정 연구

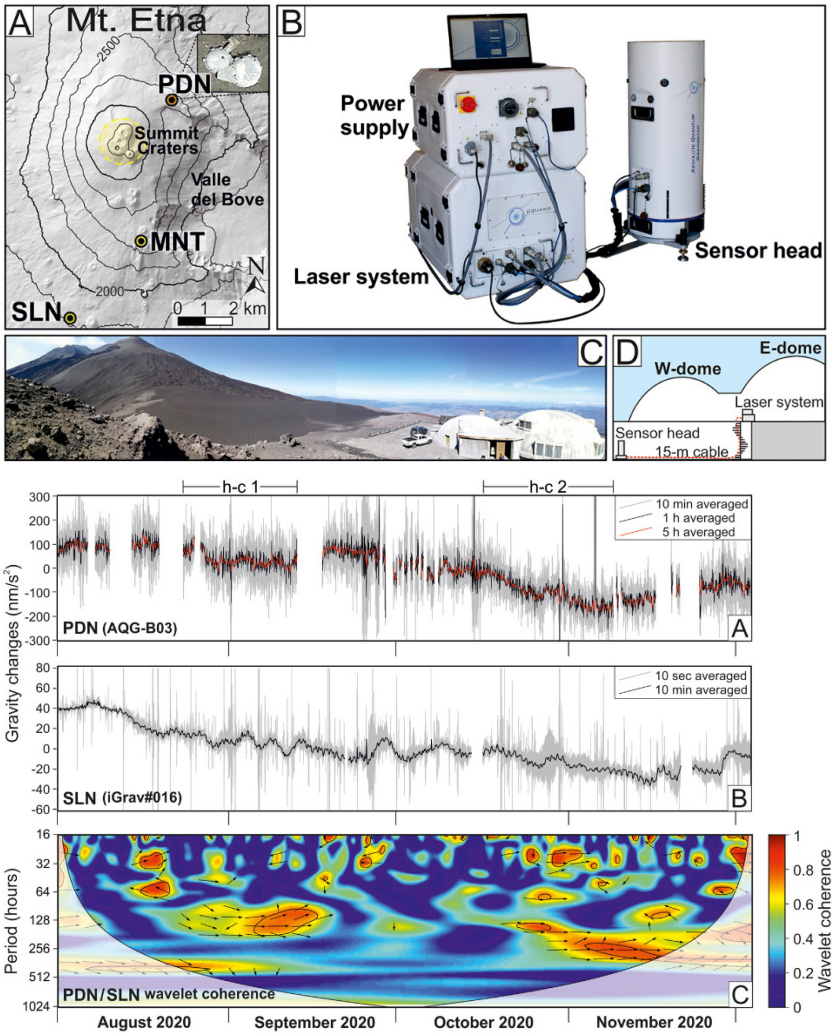


※ Science Advances5, eaax0800 (2019)

⑧ 프랑스는 에트나 화산 주변에 3대의 양자중력계를 설치하고 시간적인 중력변화를 관측하여 화산활동을 감지하는 연구를 진행 중이다.[190)]

188) Nature (2022)
189) Wu et al. (2019)
190) Antoni-Micollier et al. (2022)

그림 II-2-21 에트나 화산 정상 분화구 지역에 배치한 양자중력계 사진과 시간에 따른 중력 변화 측정 결과



※ Geophysical Research Letters 49(13) (2002)

나. 양자 가속도 및 회전센서

(1) 기술 동향

양자 가속도 및 회전센서는 가속도 및 회전을 측정하기 위한 센서이다. 양자 가속도센서는 원자간섭계 기반의 양자가속도센서와 광역학계 기반의 양자가속도센서가 있다. 양자 회전센서는 양자 자이로라고도 불리며 '원자간섭계 기반의 자이로', 'NV 센터 기반의 자이로', '원자스핀 자이로' 등이 있다. 기존 고전 센서의 한계를 극복한 양자 가속도 및 회전센서 연구 결과들이 발표되고 있으나, 아직 초기 단계로써 활용까지는 다소 시간이 필요할 것으로 예측된다.

특히, 원자간섭계 기반의 양자 가속도와 회전센서는 한 개의 시스템에 동시 구현이 가능하여, 한 개

의 시스템에 구성된 양자 가속도 및 회전센서를 양자나침반(Quantum compass)라고도 부르기도 한다. 2018년 영국 Imperial College London과 M Squared 사에서 처음으로 “Qunamtum Compass” 용어를 사용하였다.

(2) 연구 동향

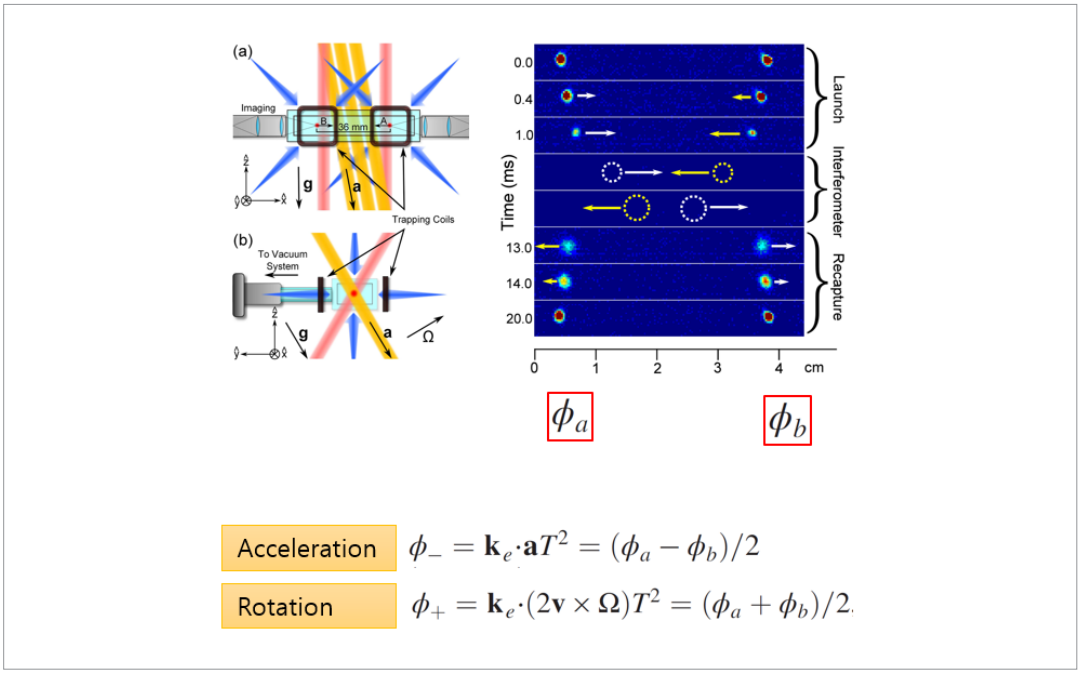
1) 미국

① DARPA에서는 PINS(Precision Inertial Navigation Systems), HiDRA(High Dynamic Range Atom Sensors), ANS(Adaptable Navigation Systems), Micro-PNT, QuASAR(Quantum-Assisted Sensing And Readout), PULSE(The Program in Ultrafast Laser Science and Engineering), STOIC(Spatial, Temporal and Orientation Information in Contested Environments) 등의 프로젝트를 통해 항법용 양자센서를 개발 중이다.[191)]

② 미국 표준기관인 NIST에서는 가속도와 회전을 동시에 측정할 수 있는 point-source 원자간섭계 연구를 수행하였다.

③ Sandia National Lab.에서는 가속도와 회전을 동시에 측정하는 높은 밴드폭을 가진 원자간섭계를 개발하였다.

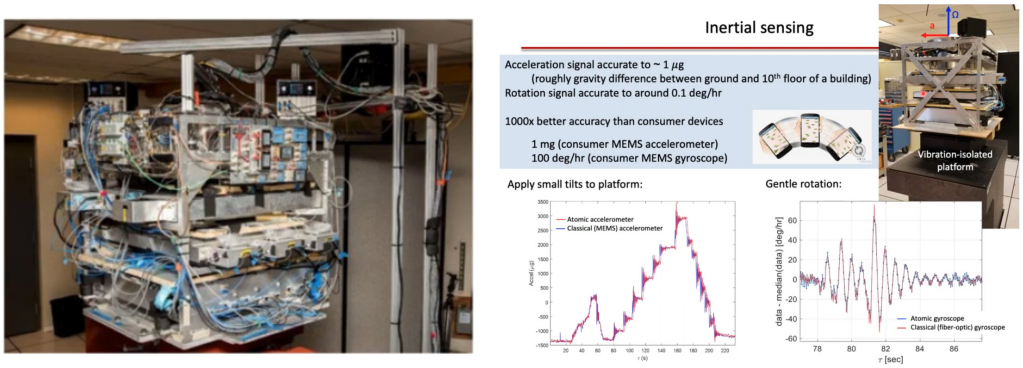
그림 II-2-22 Sandia 국립연구소의 Dual-axis, high data-rate atom interferometer



191) https://www.darpa.mil/news-events/2014-07-24

④ Draper Lab.에서는 저온 원자간섭계기반의 양자가속도와 자이로를 개발하고 시뮬레이터에 탑재하여 가속도와 회전을 동시에 측정하는 양자센서를 시연하였다.

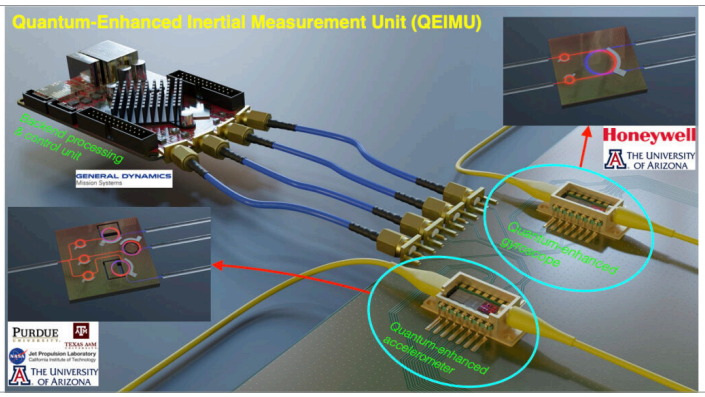
그림 II-2-23 Cold-Atom accelerometer-gyroscope



⑤ 미국국립과학재단(National Science Foundation)의 지원으로 관성계의 정밀도 향상을 위한 양자기술 적용 및 광역학계 기반 관성 측정소자 개발을 위한 양자-강화 광역학 가속도계(Quantum-Enhanced Opto-mechanical Accelerometers) 연구가 2020년부터 2023년까지 수행 중이다.[192]

⑥ 애리조나 대학에서는 Convergence Accelerator 프로젝트의 2단계를 통해 최첨단 관성센서의 성능을 훨씬 능가하는 항법용 양자강화 관성측정장치(QEIMU)를 개발하려는 목표를 갖고 있다. 이를 통해 항공우주 항법, 자율주행차, 우주 탐사와 같은 다양한 영역에서 활용할 계획이다.

그림 II-2-24 Phase II 프로토타입 개략도

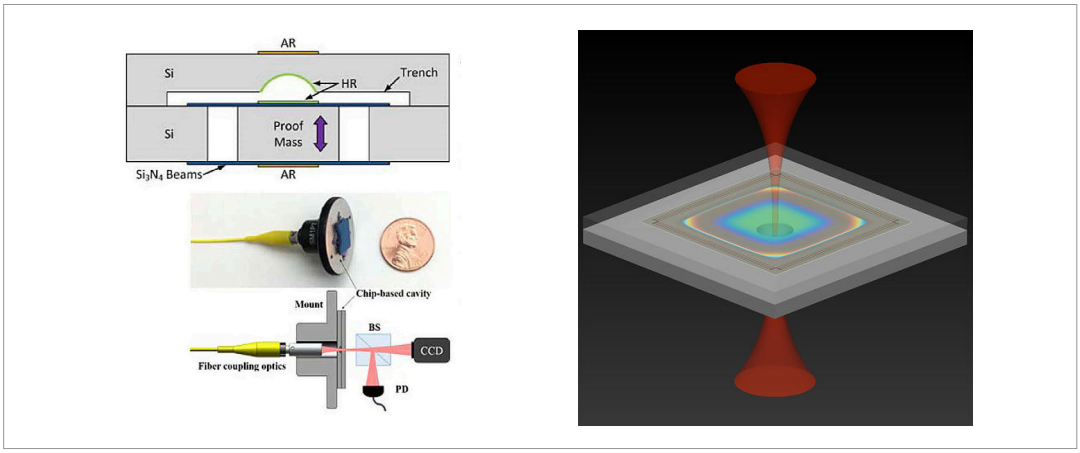


※ https://quantumlab.engin.umich.edu/

192) https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1945832

⑦ DARPA에서는 GPS가 불가능한 환경에서 위치, 탐색 및 타이밍(PNT)을 가능하게 하는 관성센서 기술을 개발하기 위해 PRIGM(Precise Robust Inertial Guidance for Munions) 프로그램을 시작했다. PRIGM은 MEMS(Micro-Electromechanical Systems) 플랫폼을 기반으로 하는 항법 등급 특성 장치(Navigation-Grade Inertial Measurement Unit, NGIMU)의 개발과 첨단 관성 마이크로센서(AIMS) 기술의 연구라는 두 가지 기초 연구로 구성돼 있다.

그림 II-2-25 (왼쪽) 가속도계의 개략도 및 광섬유가 결합된 캐비티 프로토타입 (오른쪽) 광기계 가속도계의 그림[193) 194)]



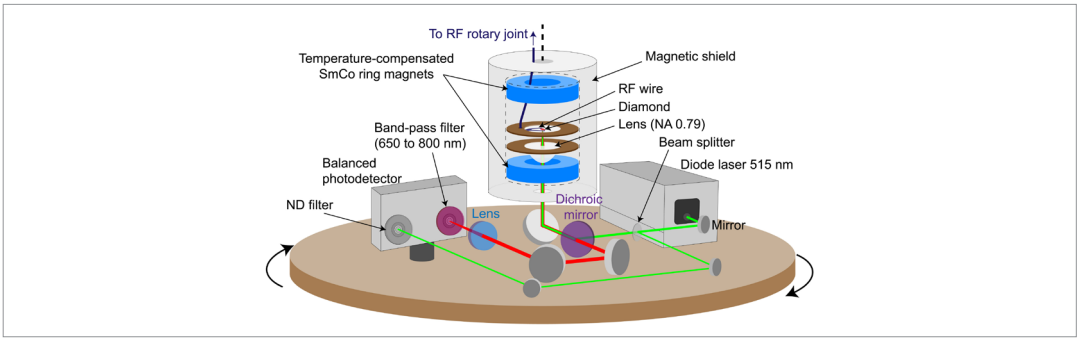
⑧ 예일대-컬럼비아대 팀은 DARPA에서 ORCHID(Optical Radiation Cooling and Heating In Integrated Devices) 프로그램을 지원받아, 2010년부터 2015년까지 실리콘 플랫폼 기반 회로 통합형 칩 규모의 광역학계 개발 연구를 수행했다.

⑨ 버클리 대학은 National Science Foundation, National Institute of General Medical Sciences, U.S. Army Research Laboratory 등의 지원을 받아 다이아몬드의 NV 색-중심 물리계를 기반으로 하는 회전센서를 시연한 바 있다.

193) https://www.nist.gov/noac/technology/mass-force-and-acceleration/optomechanical-accelerometers

194) https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/better-way-measure-acceleration

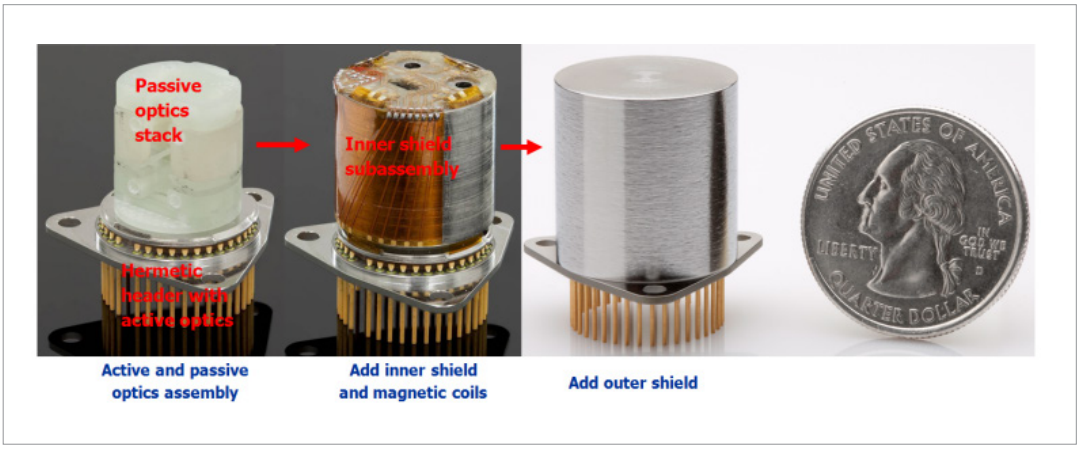
그림 II-2-26 Demonstration of Diamond Nuclear Spin Gyroscope[195]



※ Jarmola et al. (2021)

⑩ Northrop Grumann은 DARPA의 지원을 받아 원자스핀 자이로(Atom Spin Gyroscope) 시제품을 개발했다. 제논가스가 들어있는 원자증기셀을 기반으로 부피가 100cc 이하인 항법급 초소형 자이로를 개발했으며, 현재 시험평가 중인 것으로 알려져 있다.[196]

그림 II-2-27 Northrop Grumann에서 개발한 항법급 원자스핀 자이로



※ Lasen et al. (2014)

⑪ NIST, 위스콘신 대학의 T.G Walker 그룹 등에서 원자스핀을 이용한 자이로 개발 연구를 수행하였다.[197]

195) Jarmola et al. (2021)
196) Larsen et al. (2012)
197) Sorensen et al. (2020)

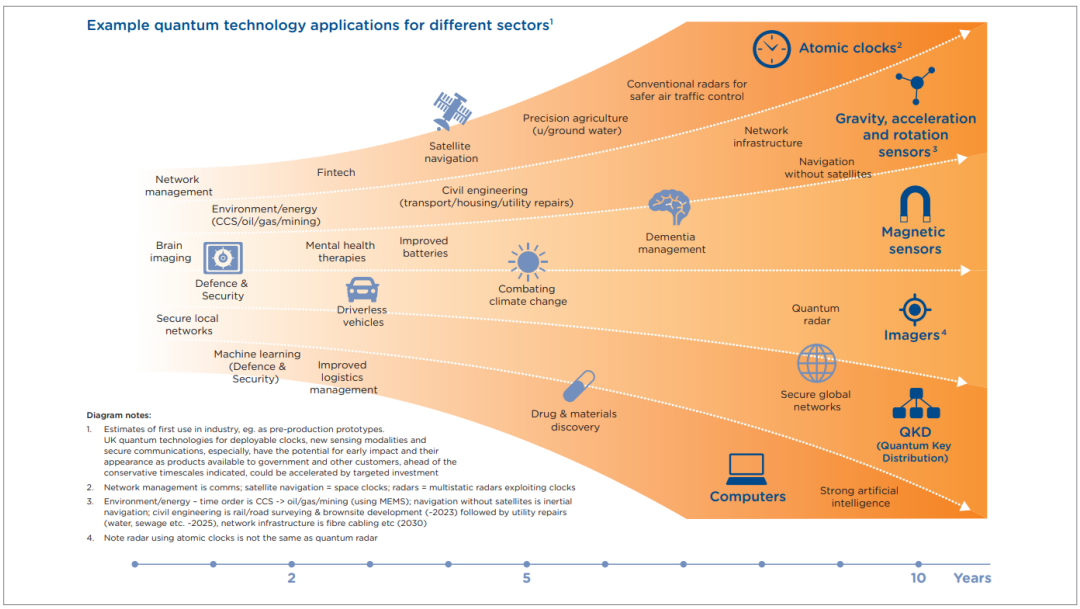
2) 유럽

유럽연합은 2020년부터 macQsimal(Miniature Atomic vapor-Cells Quantum devices for SensIng and Metrology AppLications) 프로젝트를 추진하고 있다. Miniature Atomic Gyroscopes 프로젝트가 포함돼 있으며, 원자증기셀 안에 들어있는 원자스핀의 세차운동을 이용한 자이로스코프 개발 계획을 세웠다.

3) 영국

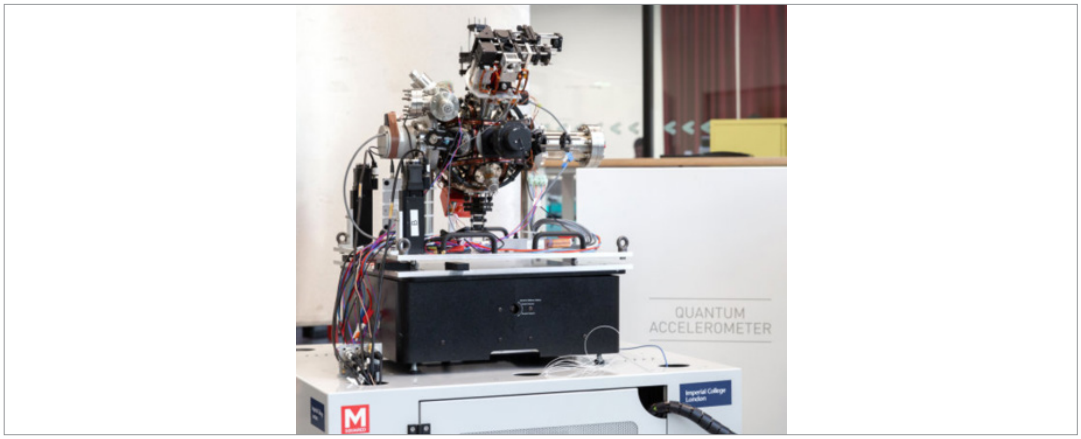
① 영국 국가양자기술프로그램(NQTP)은 2020년 양자기술 스타트업·투자촉진·인력개발 등이 포함된 양자 산업 개발 전략으로 양자중력계, 양자 가속도 및 회전센서 개발 등을 포함하고 있다.

그림 II-2-28 영국 국가양자기술프로그램의 양자센서 로드맵



② 초저온 원자간섭계기반의 항법용 양자가속도계가 Imperial College London과 M Squared 연구팀에 의해 시연됐다. 또한 영국 국립 양자기술 프로그램(UK National Quantum Technologies Program)은 기술적 진보를 보여주는 행사인 National Quantum Technologies Showcase에서 이동이 가능한 독립형 양자가속도계를 최초로 시연했다.

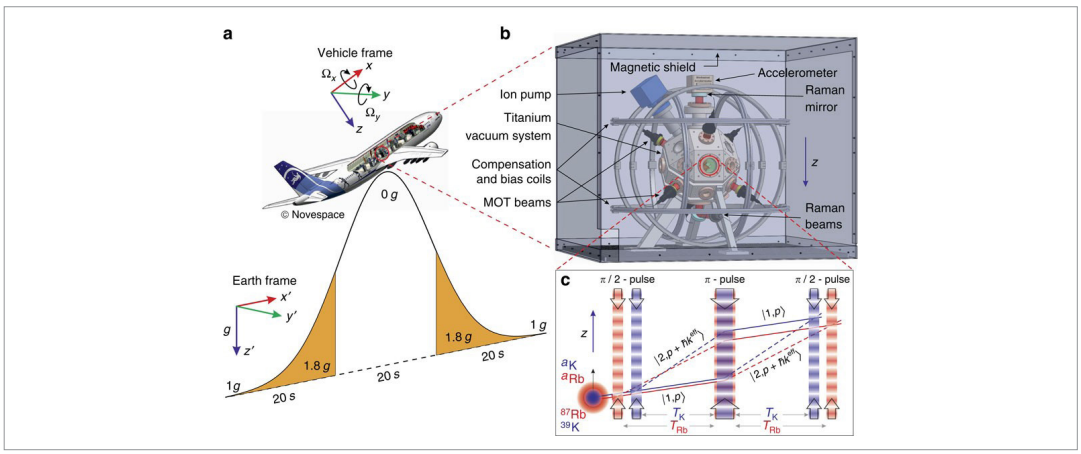
그림 II-2-29 Imperial College London과 M Squared가 개발한 항법용 양자가속도계[198)]



4) 프랑스

① 프랑스에서는 이종의 두 원자를 냉각시켜 ^{87}Rb–^{39}K 간섭계를 실현하고, 자유낙하 상태에서의 감도 측정을 위해 포물선으로 움직이는 비행기에서 원자간섭계 연구를 수행하고 있다. 이 결과를 관성항법에 적용하고, 미래 우주 임무를 위한 위성 연구 등으로 확장될 수 있다고 발표했다.

그림 II-2-30 프랑스에서 수행 중인 원자간섭계 연구



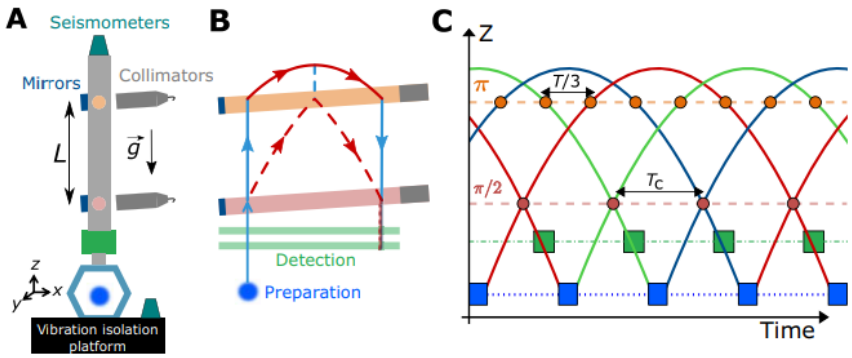
* (a) 포물선 비행 중인 비행체,
(b) 항공기 탑재 냉각 원자가속도계 시스템,
(c) 동시 이종 간섭계

※ AVS Quantum Sci. 4, 014401 (2022)

198) www.i-micronews.com/quantum-compass-could-allow-navigation-without-relying-on-satellites/

② SYRTE 에서는 원자간섭계 기반 양자 자이로가 0.0001 deg/h (감도 10^{-5} deg/$h^{1/2}$) 이하의 바이어스 안정도를 달성할 수 있음을 보여주었으며, 이는 고전 자이로인 Ring laser gyro의 민감도를 뛰어넘는 결과이다.

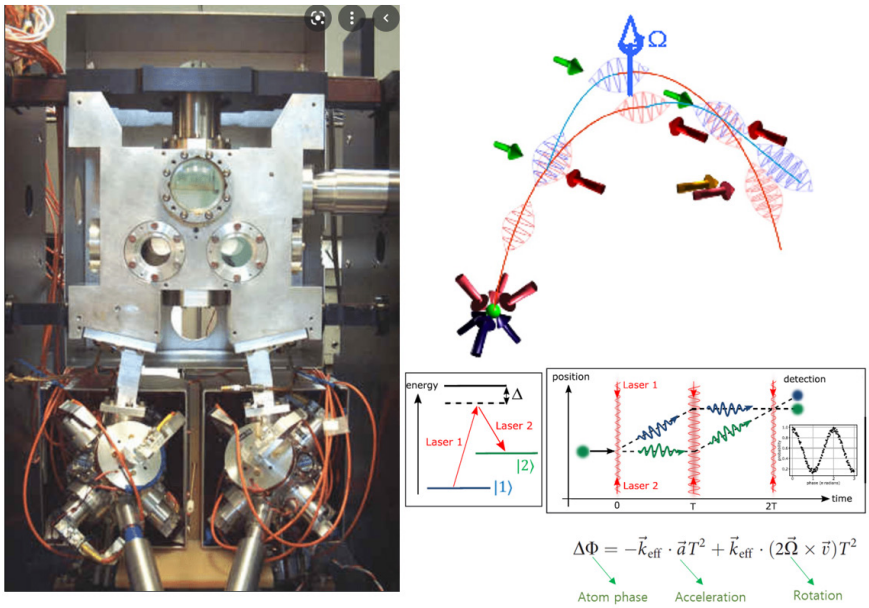
그림 II-2-31 자이로스코프의 실험 원리



※ Science Advances 4(12), eaau7948 (2018)

③ SYRTE에서는 원자간섭계 기반의 양자 가속도계 및 회전속도계를 원자분수 방식으로 개개발하고 있다.

그림 II-2-32 프랑스에 SYRTE에서 개발중인 원간섭계 기반 양자 가속도계/회전속도계



(3) 적용 분야

① 고정밀 관성항법에 활용 가능하다. 특히, 위성항법이 불가한 우주, 수중, 도심 및 계곡 등의 환경에서 항법의 유지가 가능하게 된다.

② 국방 분야의 무-위성 항법시스템에 활용 가능하며, 재밍으로 인하여 위성항법이 불가한 전시 및 잠수함 운항에 적용하여 항법유지 시간을 늘릴 수 있다.

③ 소형 관성센서는 자동차, 드론 등의 자율주행, 드론 등에 적용하여 항법 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다.

2. 양자시간·주파수센서

(1) 기술 동향

양자시간·주파수센서는 시간 및 주파수의 발생, 측정, 동기화 등을 구현하는 원자시계, 칩-스케일 원자시계, 광주파수 합성기 등을 말한다. 양자시간·주파수센서는 초고정밀 원자시계, 고정밀 소형 원자시계, 위성 탑재형 원자시계, 초소형 칩-스케일 원자시계, 광주파수 합성기 등으로 분류될 수 있다. 초고정밀 원자시계는 정확도(불확도)가 10^{-14}~10^{-18}인 원자시계이며, 주로 레이저 냉각된 중성원자나 이온 포획된 이온의 마이크파 전이, 광주파수 전이를 이용한다. 최근에는 제안된 핵전이를 이용하는 원자시계(핵시계)를 개발하려는 연구도 시도되고 있다. 초고정밀 원자시계는 초의 정의 실현, 세계 표준시 및 원자시 생성, 기본 물리상수 측정 등의 정밀 측정과학 및 기초 과학 분야에 활용되며 우주, 통신, 방송 등의 산업체에서 사용 중인 원자시계들을 교정하는 데 활용하고 있다. 또한, 항법위성의 시간·주파수 동기를 위한 위성지상국의 기준기로 사용된다. 고정밀 원자시계는 방송·통신, 항법 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 또한 위성 탑재가 가능하도록 개발하여 항법위성시스템에서 사용되는데, 이를 위한 위성탑재형 소형 원자시계 개발 연구가 수행되고 있다. 초소형이면서 고정밀인 초소형 칩-스케일 원자시계 개발 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 기존의 소형 고정밀 원자시계, 고정밀 수정발진기를 대체할 것으로 기대되고 있다.

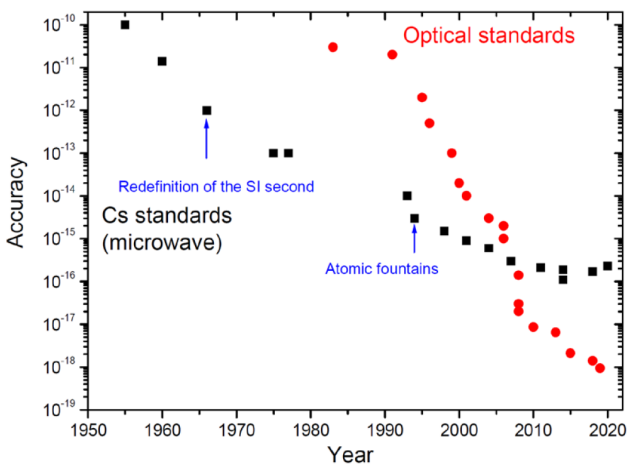
그림 II-2-33 원자시계 분류



(2) 연구 동향

현재의 초고정밀 원자시계는 아직은 이론 또는 기초 연구단계이므로, 원자분수시계와 광시계(광격자시계, 이온시계)로 대표될 수 있으며 정확도(불확도)의 발전은 아래 그림과 같이 2000년대부터 광시계가 원자분수시계의 성능을 뛰어넘고 있다. 하지만, 아직 초의 정의는 세슘 원자의 마이크로파 전이로부터 정의되므로 원자분수시계의 연구도 활발히 진행되고 있다. 광시계의 성능이 원자시계를 뛰어넘고 있고, 광시계 연구가 활발해짐에 따라 머지않은 미래에 시간의 단위인 초의 정의가 광주파수 전이에 기반한 새로운 초의 정의로 변경될 것으로 예측되고 있다.

그림 II-2-34 초고정밀 원자시계의 정확도 비교



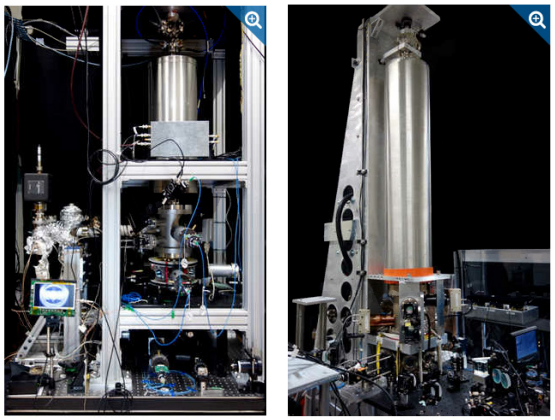
※ Patrizia Tavella (2021)

미국 NIST, 영국 NPL, 독일 PTB, 프랑스 SYRTE, 중국 NIM, 일본 NMIJ와 NICT, 그리고 한국 KRISS 등에서 정확도가 10^{-17} ~ 10^{-18} 수준의 광시계 개발 결과들을 발표하고 있다.

1) 미국

① 미국 표준기관인 NIST에서는 정확도 10^{-16} 수준의 NIST-F1, NIST-F2, NIST-F3 를 개발하였으며, 최근 NIST-F4 원자분수시계를 개발하여 정확도 평가 연구를 수행하고 있다.

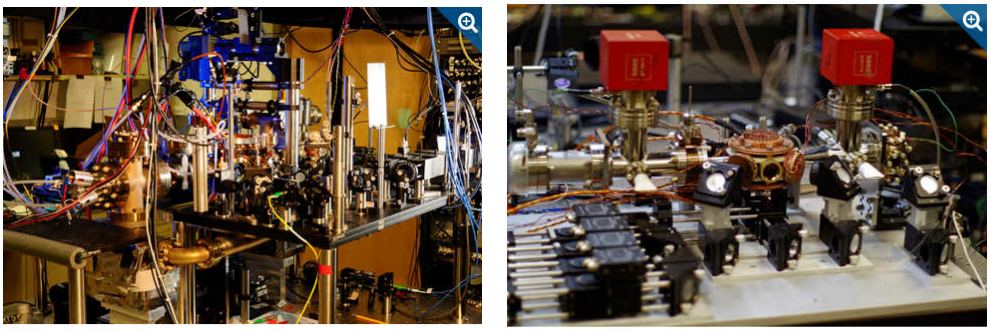
그림 II-2-35 NIST에서 개발한 원자분수시계 사진



NIST-F3 NIST-F4

② NIST에서는 10^{-18} 수준의 정확도를 가진 Yb 광격자시계(광시계)를 개발하고 있으며 항법, 통신, 원격센싱, 이미징 등의 다양한 분야에 응용하기 위한 이동형 광시계 개발도 함께 진행중이다.

그림 II-2-36 NIST에서 Yb 광격자시계와 이동형 광격자 시계 사진



NIST Yb optical lattice clock

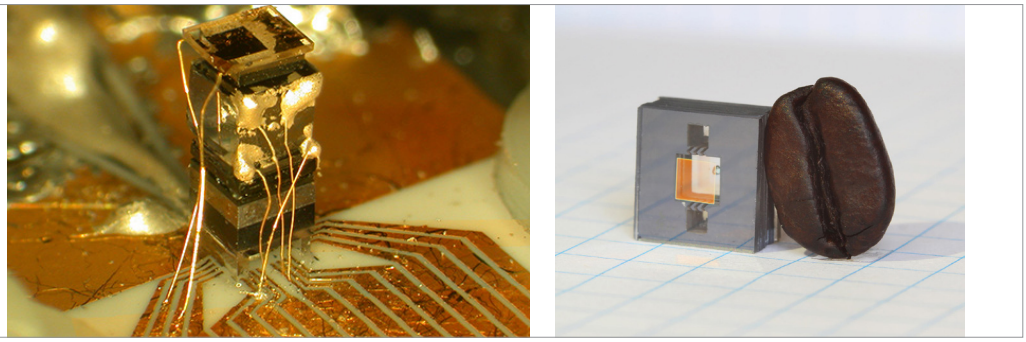
Atom chamber for the NIST portable optical lattice clock.

③ NIST에서는 정확도가 10^{-18} 수준인 Al^{+} 이온시계를 개발하고, 이를 이용하여 상대론적인 시간 지연과 중력에 따른 시간지연을 실험적으로 측정하였다.

④ DARPA에서 진행 중인 QuASAR(Quantum-Assisted Sensing and Readout) 프로젝트를 통해 양자시간센서 원천기술을 개발 중이다.[199)]

⑤ NIST는 2001년에서 2009년까지 DARPA로부터 CSAC(Chip-Scale Atomic Clock) 프로그램을 지원받아 기존 원자시계의 1/100 크기지만, 전력 소비는 1/50로 감소한 CSAC 기술을 개발했다.[200)] NIST는 원자시계 소형화 개발에 대한 성공담을 NIST-on-a-Chip 홈페이지에 게재했으며, 차세대 소형 원자시계의 핵심으로 MEMS 기반 증기셀을 소개하고 있다.[201)]

그림 II-2-37 NIST에서 개발한 CSAC 기술



⑥ 기존의 DARPA CSAC 연구를 기반으로 핵심 성능을 1,000배 향상한 배터리 구동형 CSAC를 개발하는 것을 목표로, 2016년부터 ACES(Atomic Clock with Enhanced Stability) 프로그램이 시작됐다. 또한 DARPA의 A-PhI(Atomic-Photonic Integration) 프로그램은, QuASAR 프로그램의 지원으로 개발된 원자시계 및 광학 자이로스코프를 축소하기 위해 광자집적회로를 개발하고 있다.[202)]

⑦ NIST를 중심으로 광주파수빗(Optical Frequency Comb) 시스템의 소형화를 위한 컨소시엄을 구성하여 연구를 진행하고 있다. 미국 NIST의 NIST-on-a-Chip[203)] 프로그램의 일환으로 광주파수빗 및 관련된 원자분광 시스템의 칩스케일 소형화 연구를 위한 거대 학제 간 연구그룹

199) www.darpa.mil/program/quantum-assisted-sensing-and-readout

200) www.darpa.mil/about-us/timeline/chip-scale-atomic-clock

201) www.nist.gov/noac/success-story-chip-scale-atomic-clock

202) www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf

203) https://www.nist.gov/pml/productsservices/nist-chip-portal (미국의 표준과학연구기관인 NIST가 수행하는 연구 프로그램으로서 주요 연구 목표는 본질적으로 정확한 양자 기반의 측정(intrisically accurate quantum-based measrements)을 수행할 수 있는 다양한 센서를 칩스케일로 제작하는 것임. 현재 전자기장(electromagnetic field), 질량 및 힘(mass and force), 미세유체(microfluidics), 양자 광학(quantum optics) 등 다양한 분야에서 연구가 진행 중임)

(NIST, Caltech, EPFL, HRL, Aurrion Inc., UC Santa Barbara, Yale 대학 등)이 형성되었으며, Silica와 Silicon Nitride 마이크로 공진기를 주요 부품으로 하여 반도체 레이저, f-2f 간섭계 등을 집적하는 광주파수 합성칩의 초기 연구 결과와 칩스케일의 광도파로와 결합된 Rb 증기셀 연구 결과를 발표하였다.

그림 II-2-38 NIST-on-a-Chip 프로그램을 통해 기초 기술이 구현된 광주파수 합성칩 개념도

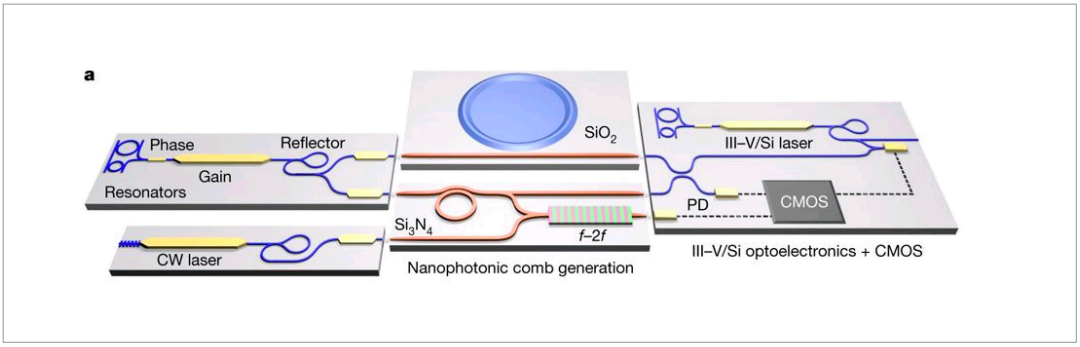
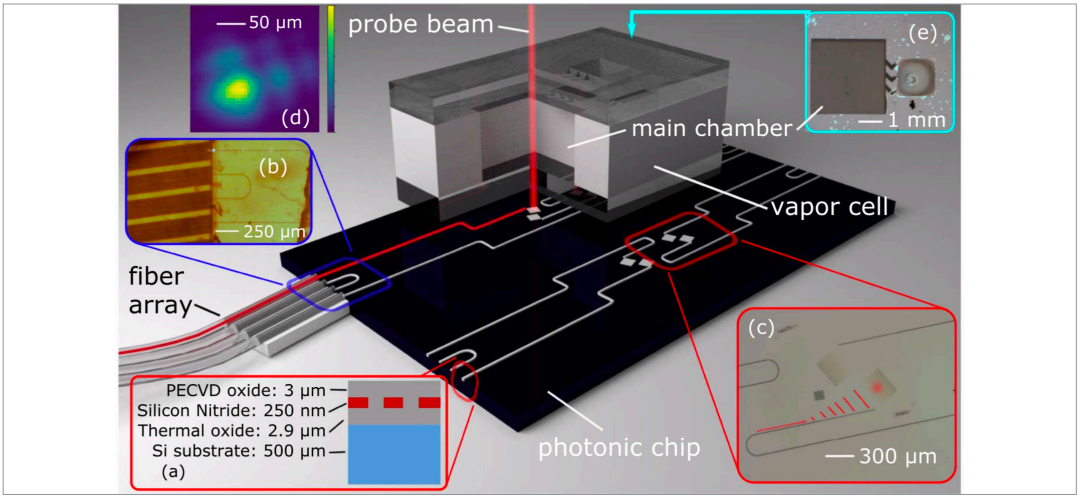


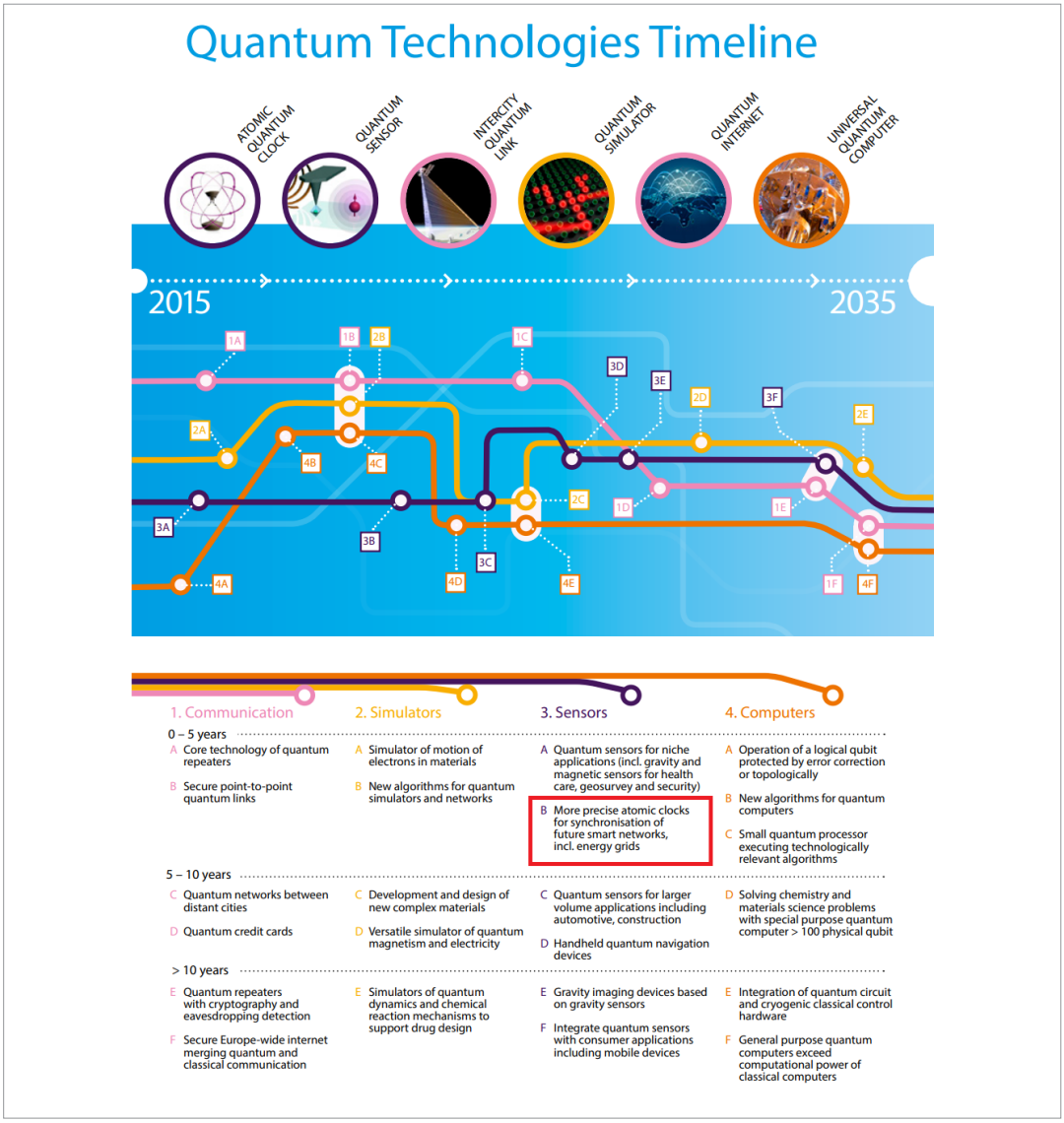
그림 II-2-39 NIST에서 개발된 광도파로와 결합된 Rb 증기셀 연구



2) 유럽

① 유럽은 2차 양자혁명을 주도하기 위해 전략적인 투자로 경쟁력 있는 산업을 창출하겠다는 선언문인 'Quantum Manifesto'를 발간하며, 양자시간센서를 포함해 다양한 양자기술을 개발하기 위한 시간표를 제시했다. 단기목표는 에너지 및 통신과 같은 미래 스마트 네트워크에 사용할 수 있는 정밀한 양자시간센서를 개발하는 것이고, 장기적으로는 휴대 전화에 적용할 수 있게끔 On-Chip 형태로 만들어 다수의 사용자에게 양자센서를 제공하는 것이 목표이다.[204]

그림 II-2-40 유럽에서 발간된 Quantum Manifesto의 양자기술 개발을 위한 타임라인



※ De Touzalin et al. (2016)

204) https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf

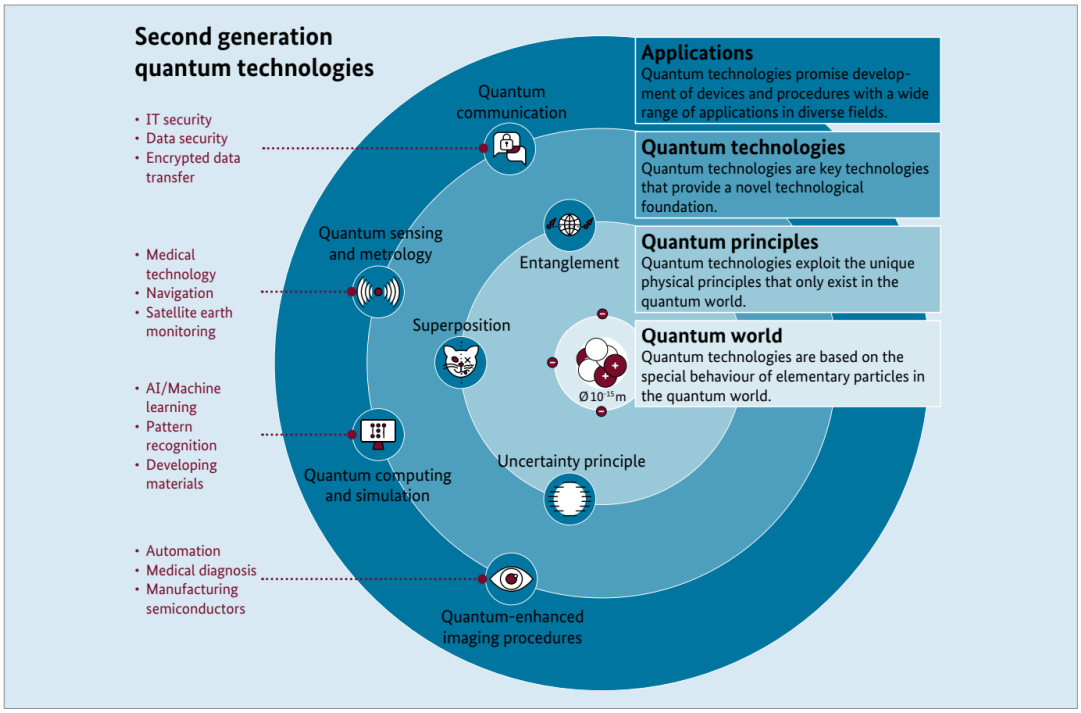
② 실험실에서 쓰이는 원자시계를 통신(예: 네트워크 동기화, 트래픽 대역폭, GPS free 내비게이션), 지질학(예: 지하 탐사, 지하수 또는 빙상 모니터링), 천문학(예: 저주파 중력파 탐지, 전파망원경 동기화) 등의 분야에 활용할 수 있도록 작은 형태의 원자시계로 만들기 위해 Quantum Flagship iqClock 컨소시엄을 설립했다.

③ macQsimal은 EU의 자금 지원을 받아 자기장, 시각, 회전, 전자기 방사선, 가스 다섯 가지 핵심 분야에 적용할 수 있는 양자센서를 개발하고, 소형화 및 통합화하기 위한 Horizon 2020 연구 프로젝트를 시작했다.

④ 영국은 양자과학을 기반으로 새로운 제품과 기술을 개발하기 위해 산업계로부터 2억 500만 파운드의 투자를 지원받고 UK Quantum Technologies Challenge 과제를 시작했다. 여기에 포함된 주제인 'Compact Optics for High Performance Portable Atomic Timing and Quantum Sensors'를 구현하기 위해 통신, 금융 거래, 내비게이션 시스템뿐만 아니라 통신 프로토콜, 자율 운송 네트워크 및 기후 변화 모니터링에도 적용이 가능한 지구 관측용 소형 원자시계를 연구하고 있다.[205)]

⑤ 독일은 Quantum Technologies-from Basic Research to Market 프로그램을 통해서 주요 양자기술에 대한 로드맵을 발표했다.

그림 II-2-41 독일에서 발표한 양자기술 로드맵



※ Federal Ministry of Education and Research(BMBF) (2018)

205) www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/09/UKRI-280921-UKQuantumTechnologiesChallengeTheDirectory.pdf

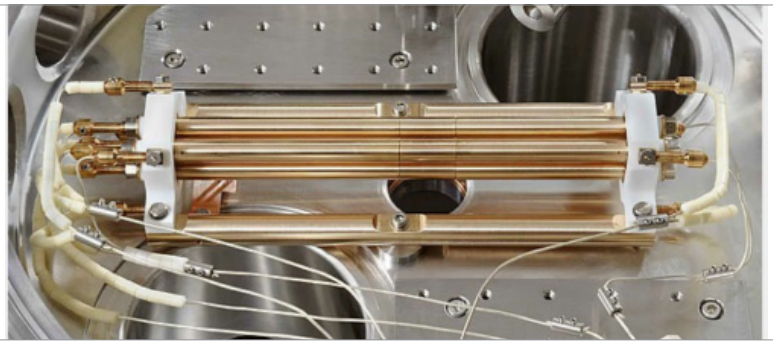
⑥ 프랑스 표준기관인 SYRTE는 정확도가 10^{-16} 수준인 원자분수시계를 개발하여 운영중이며, ESA(European Space Agency)의 ACES/PHARAO 프로젝터를 통해 우주형 냉각원자시계인 PHARAO를 개발하고 있다.

⑦ 프랑스 SYRTE는 3개의 광격자시계 (Sr, Hg)를 개발하고 있으며, 10^{-18} 수준의 정확도를 보여주고 있다. 또한, 이동형 Yb 광격자 시계를 개발하여 유럽의 광시계 국제 네트워크 구성을 추진하고 있다.

⑧ 독일 PTB는 Sr 광격자 시계, Yb^{+} 이온시계, Al^{+} Quantum Logic 광시계 등을 개발하고 있다. 또한, single 이온이 아닌 Yb^{+} 이온과 In^{+} 이온 앙상블의 Multi-Ion 시계 개발연구도 시도하고 있다.

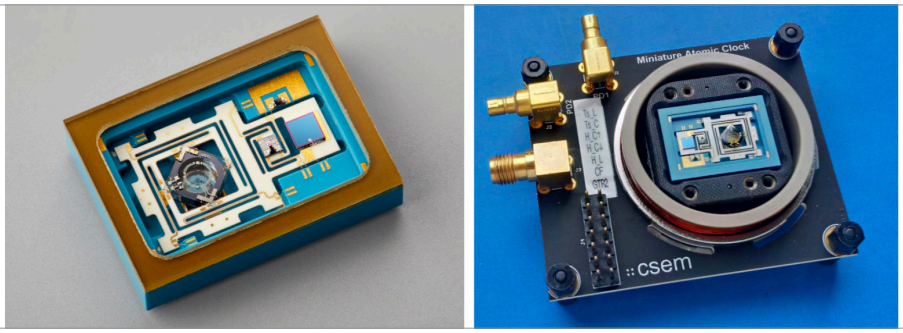
⑧ 유럽에서는 Thorium Nuclear Clock 프로젝터를 통해 핵시계 개발 연구를 시도하고 있다. 선폭이 10^{-19} 수준인 Th-229 핵전이를 이용하여 외부 환경에 둔감하고 보다 정확한 시계 개발이 가능할 것으로 보고 있다. 이 프로젝터에는 오스트리아 빈 대학, 독일 PTB, 미국 델라웨어 대학 등이 참여하고 있다.

그림 II-2-42 독일 PTB의 Th-229 이온 트랩장치



⑨ 프랑스의 FEMTO-ST Institute, 스위스의 CSEM에서는 수직형 조립이 아닌 판상형 웨이퍼 레벨 패키지 기술을 적용한 Chip-Scale 초소형 원자시계를 개발하고 있다.

그림 II-2-43 스위스의 CSEM에서 개발한 판상형 웨이퍼 레벨 패키지 기반의 칩스케일 원자시계



(3) 적용 분야

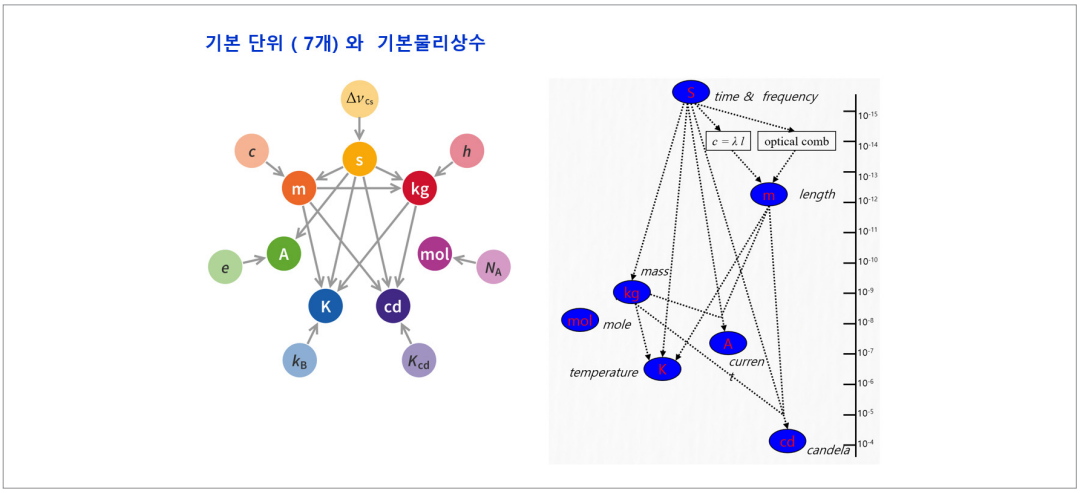
양자시간센서는 방송·통신, 항법, 위성, 국방분야 항법/유도, 지질학, 천문학, 자율주행 등 다양한 분야에 활용할 수 있는 기술이다.

그림 II-2-44 양자 시간·주파수 센서 활용 분야



모든 물리량은 7개의 기본단위 또는 기본단위가 복합된 복합단위로 측정이 이루어진다. 예를 들어 속력은 단위시간당 이동한 거리로 정의되며, 시간의 단위와 길이의 단위로 측정이 이루어진다.양자 시간주파수센서는 시간 측정 및 동기화를 하는 센서로 그 정확도가 10^{-16}~10^{-18} 수준으로 가장 높은 정확도를 갖춰 기본 물리상수 측정 등의 기초과학 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 또한, 다른 물리량은 시간과 기본물리상수와의 관계로 정의되므로 시간주파수 센서의 정확도는 다른 물리량 측정 정확도에도 영향을 미친다.

그림 II-2-45 기본 단위와 기본물리상수 연관도 및 정확도 수준



3. 양자 전기장·자기장 센서

가. 양자전기장 센서

(1) 기술 동향

양자전기장 센서 기술은 주로 미국 및 유럽연합에서 관련 연구를 수행하고 있으며, 국내와 비교해 압도적으로 앞선 기술 수준을 보여주고 있다. 해당 기술은 주로 큰 쌍극자 값을 가진 리드버그 원자를 이용해서 많은 연구가 수행됐으며, 전자기파의 전기장 측정 시 감도를 높일 수 있는 장점으로 주목받았다. 또한 고분해 분광에 의한 전자기 유도 투과 신호의 분리 주파수로 측정하기 때문에 매우 정밀한 측정이 가능하다는 장점도 있다.

양자전기장 센서 관련 기술은 2000년대 초반부터 현재까지 미국 표준기관인 NIST와 콜로라도 대학이 주도하고 있다. 주로 100GHz 근방의 통신주파수에서 수행되고 있지만 최근 들어 THz 및 저주파(GHz부터 DC) 대역에서 수행된 관련 연구 결과들도 보고되기 시작했다. 또한 절대 전기장 측정, 위상 측정, 6G 전파 환경 측정 및 방향탐지 등 통신 관련분야에서 주목받고 있다. DARPA에서는 2021년부터 QA(Quantum Apertures) 프로그램을 추진해 양자조리개에 기반한 양자수신 안테나 기술을 개발하기 위한 프로젝트를 시작했다. 유럽의 경우 2020년부터 시작된 'macQsimal' 프로젝트에 2개 연구소, 3개의 산업체, 7개국 8개의 대학이 참여해 원자 기반 자력계, 원자시계, 원자 자이로스코프, 원자 기반 GHz/THz 센서 및 이미저(양자전기장 센서), 리드버그 원자 기반 가스센서 등을 개발하는 연구를 시작했다. 그중 양자전기장 센서는 전기장 측정 이미징 기술과 관련된 연구가 포함됐고, 주로 Rb과 Cs 원자를 포함한 알칼리 계열 원자에서 연구를 수행하고 있다.

(2) 연구 동향

1) 미국

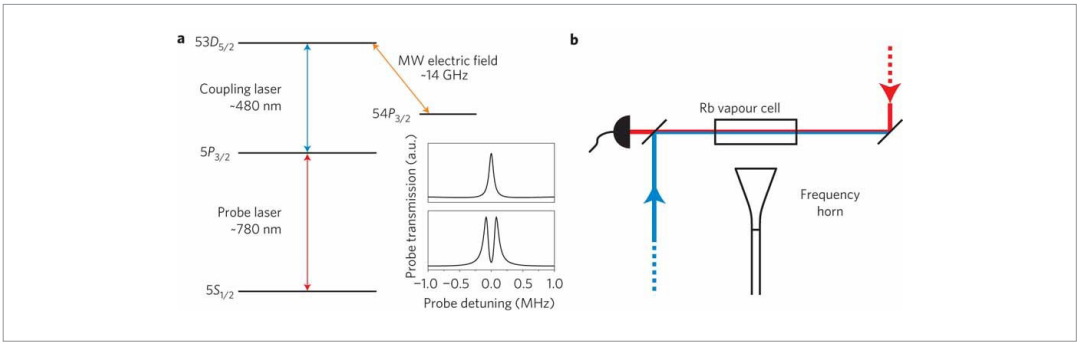
① 오클라호마 대학의 James P. Shaffer 교수 연구그룹에서 리드버드 원자 기반 전자기 유도 투과 현상을 이용해 Microwave Electrometry를 개발하기 위한 연구를 수행하고, 그 결과를 2012년 Nature Physics에 발표했다.[206)]

② 2013년도에는 Atom-Based Vector Microwave Electrometry에 대한 연구 결과를 발표했다.[207)]

206) Sedlacek et al. (2012)

207) Sedlacek et al. (2013)

그림 II-2-46 레벨 다이어그램 및 실험 개략도



* (a) 실험에 사용된 4 준위 에너지 다이어그램
(b) Microwave Electrometry 실험 장치도

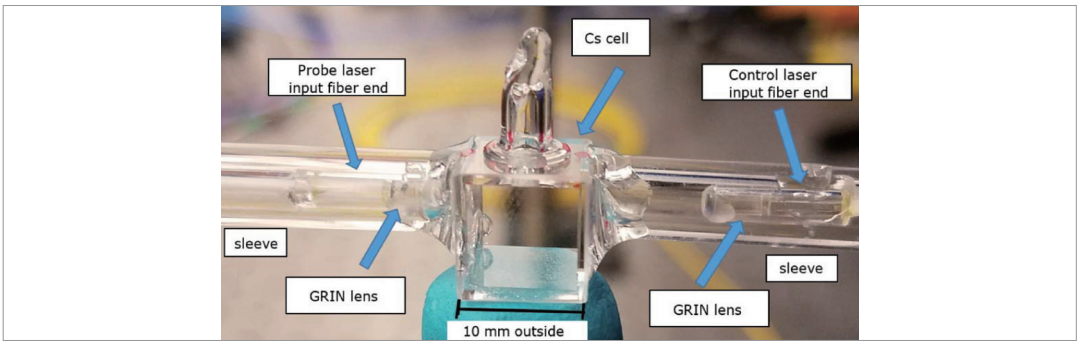
※ Nature Pysics 8, 819 (2012)

③ 2014년 NIST와 콜로라도 대학은 공동으로 'Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable, Self-Calibrated Measurements'라는 연구 결과를 발표하며, 양자전기장 센서를 이용한 소급성 있는 전기장 측정 가능성을 제시했다.[208)]

④ 2016년 오클라호마 대학은 불확도에 큰 영향을 미치는, 유리 재질 원자셀에서 발생하는 전자파 반사에 의한 간섭 효과를 최소화하기 위한 연구 결과를 발표했다.[209)]

⑤ 2018년에는 NIST와 콜로라도대 공동으로 광섬유 결합형 소형 원자증기셀에 기반한 양자전기장 센서를 개발하고, 이를 이용해 차폐된 장소에서 전자파의 전기장을 측정하는 연구를 수행했다.[210)]

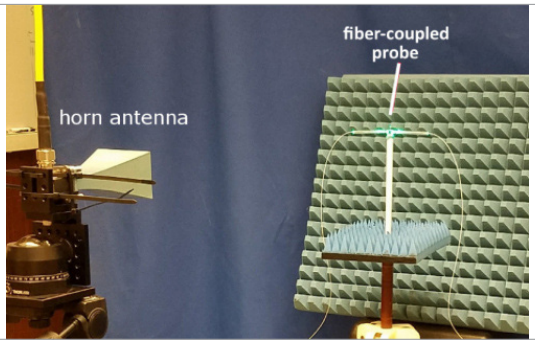
그림 II-2-47 GRIN 렌즈, 광섬유 페룰, Cs 원자증기셀 및 슬리브를 이용한 광섬유 결합형 원자증기셀



※ Applied Optics 57(22) (2022)

208) Holloway et al. (2014)
209) Kumar et al. (2016)
210) Simons et al. (2018)

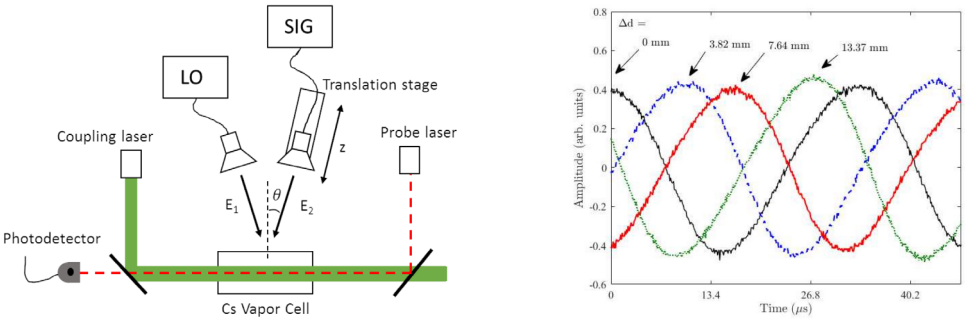
그림 II-2-48 광섬유 연결형 원자증기셀을 이용한 전기장 측정 실험 사진



※ Applied Optics 57(22) (2018)

⑥ 2019년 NIST와 콜로라도대 공동연구팀은 양자전기장 센서와 믹서를 결합해 20GHz의 RF를 kHz 정도의 중간 주파수로 하향 변환시키고, RF의 위상을 측정하는 연구를 수행했다.[211)]

그림 II-2-49 (왼쪽) 양자전기장 센서와 믹서를 이용한 위상 측정 장치도 (오른쪽) 광검출기 감지 신호



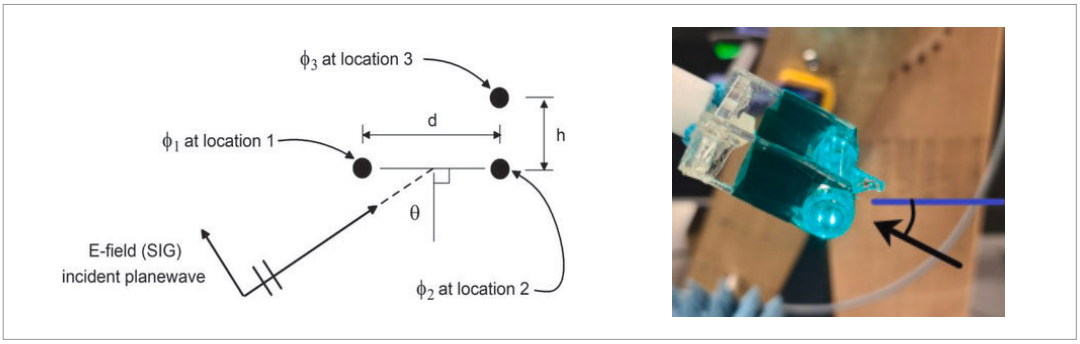
※ Applied Physics Letters 114, 114101 (2019)

⑦ 2021년 NIST와 콜로라도 대학 공동연구팀에서 양자전기장 센서에 기반한 방향탐지 기술을 발표했고, 다음 주제로 전파 환경 측정에 관한 연구를 선정하고 연구를 진행 중이다.[212)]

211) Simons et al. (2019)

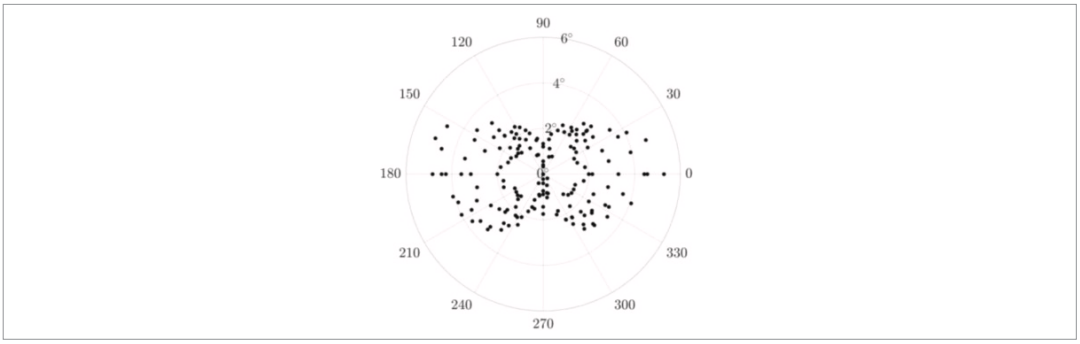
212) Appl & Phys (2021), Measurement (2021)

그림 II-2-50 (왼쪽) 양자전기장 센서 기반 방향탐지 기술 개념도 (오른쪽) 실제 방향탐지 실험 사진



※ Measurment: Sensors 18, 100273 (2021)

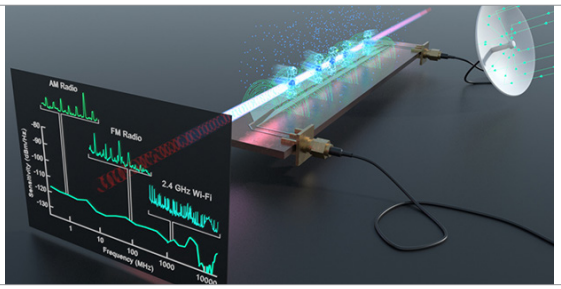
그림 II-2-51 전자파 방향탐지 측정 결과



※ Measurment: Sensors 18, 100273 (2021)

⑧ DARPA에서는 2021년부터 QA(Quantum Apertures) 프로그램을 추진해 양자수신기 기술로 사용할 목적으로, 양자기술 기반 RF 센서(전기장 센서)의 성능 향상 연구에 착수했다.

그림 II-2-52 DARPA에서 연구 중인 고감도 광대역 무선 주파수 양자수신기의 QA 프로그램 개념도[213)]

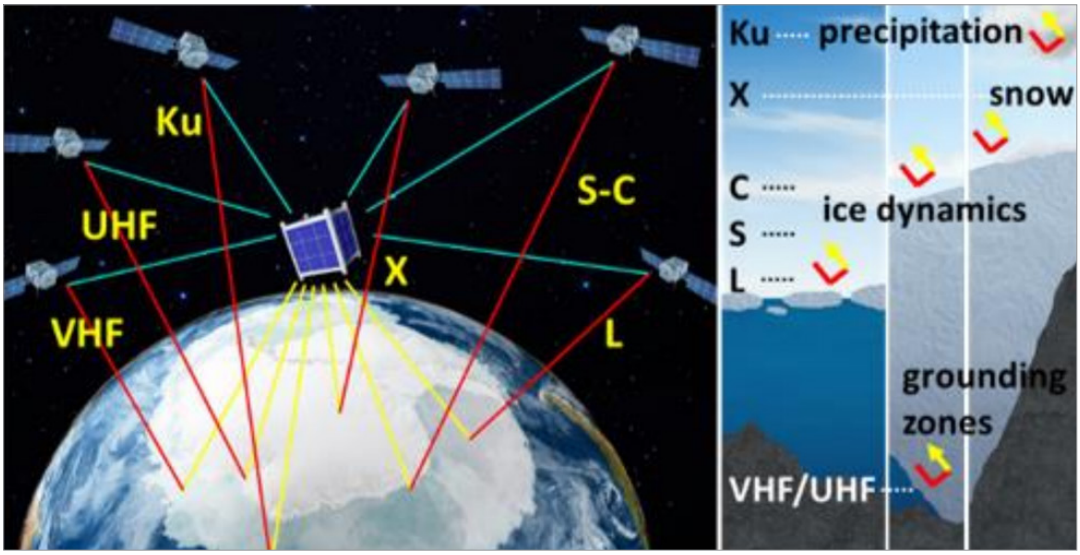


※ www.darpa.mill (2021)

213) www.darpa.mil/news-events/2021-08-04

⑨ 2022년부터 NASA는 VHF부터 Ku밴드까지 측정이 가능한 양자전기장 센서를 개발하고 위성에 탑재시켜 적설량, 빙상 역학, 강수량 등을 관측하기 위한 'Cryospheric Rydberg Radar' 프로젝트 연구를 시작했다.[214]

그림 II-2-53 적설량, 빙상 역학, 강수량 등 지구 수자원 관측을 위한 위성탑재 리드버그 레이더 개념도



※ www.nasa.gov (2022)

⑩ NIST 자료에 따르면, 양자전기장 센서의 핵심 소자인 원자증기셀이 기존 안테나보다 전파의 반사가 적어 자체적인 스텔스 효과가 있는 양자수신기로써 가능성이 있다고 발표했다.[215]

2) 유럽

① 유럽은 양자전기장 센서 기반의 비파괴 대역 전기장 이미징 기술과 관련된 연구를 진행해오고 있으며, 특히 2020년부터 시작된 macQsimal 프로젝트에 연구소 2개, 산업체 3개, 7개국 8개의 대학이 참여해 관련 연구를 활발히 진행 중이다.

② 2007년 C. J. Adams 교수 연구그룹이 리드버그 원자의 전자기 유도 투과 현상을 관측해 전기장 측정 연구 결과를 보고하면서, 리드버그 원자에서의 결맞음 분광 연구가 주목받았다.[216]

③ Durham 대학에서 리드버그 원자의 전자기 유도 투과 신호에 레이저 주파수 안정화 기술을 적용해, 두 대의 독립적인 레이저 간 상대 선폭을 100μs 동안 약 280kHz로 축소하는 응용연구가

214) www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2022/Cryospheric_Rydberg_Radar/
215) Artusio-Glimpse et al. (2022)
216) Mohapatra et al. (2007)

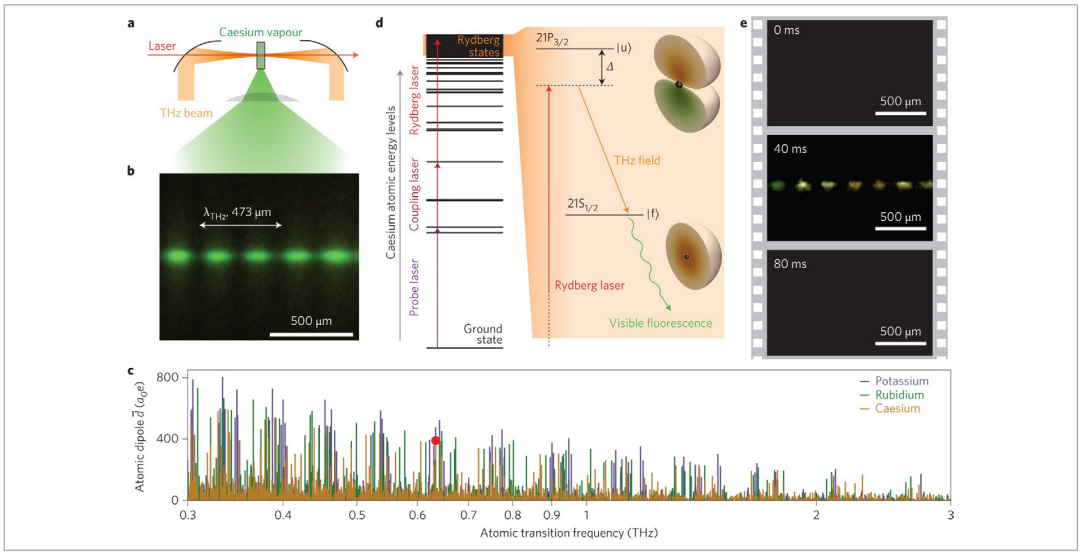
수행됐다.[217]

④ 영국 리즈대와 독일 막스플랑크 연구소 공동연구팀은 Rb 원자를 3단계 여기광을 이용해 리드버그 원자 상태로 만들고, 각각의 주파수를 절대적으로 측정하는 연구를 수행했다.[218]

⑤ 독일의 T. Pfau 연구그룹은 루비듐 원자의 리드버그 상태에서 ns펄스를 이용해 Rabi Oscillation을 관측하고, 양자소자로의 가능성에 관한 연구 결과를 발표했다.[219]

⑥ Durham 대학에서 리드버그 원자 기반 양자전기장 센서를 이용해 THz 이미지를 측정했다.[220]

그림 II-2-54 원자광학 형광을 사용한 실시간 근거리 테라헤르츠 이미징

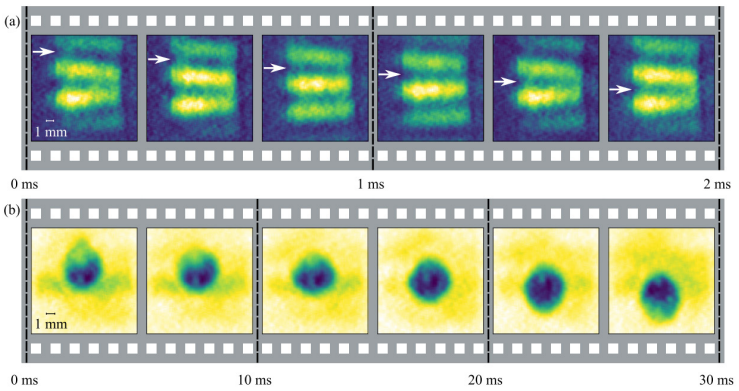


※ Nature Photonics 11, 40 (2017)

⑦ Durham 대학에서 리드버그 원자에 THz 근방의 비파괴 대역 전자기파를 입사 시 발생하는 원자증기셀의 형광으로부터, 기존 THz 이미지 센서의 50Hz 수준을 훨씬 뛰어넘는 kHz 수준의 영상 이미지를 획득했다. 이론적으로 1MHz 수준까지 도달할 수 있을 것으로 예상한다.[221]

217) Abel et al. (2009)
218) Johnson et al. (2010)
219) Huber et al. (2011)
220) Wade et al. (2017)
221) Downes et al. (2020)

그림 II-2-55 초고속 THz 비디오[222]



* (a) 700rpm으로 회전하는 광학 초퍼휠의 THz 비디오 프레임
(b) 자유낙하 하는 물방울 영상 포착

※ Physical Review X 10, 011027 (2020)

3) 기타

① 2020년부터 일본표준연구소(NMIJ)는 기존 RF전력센서 기술을 바탕으로 리드버그 기반 전기장 센서 기술을 개발 중이다.

② 대만은 Chin-Chun Tsai 그룹이 Cs 원자의 리드버그 상태에서 EIT와 Raman 흡수와의 관계에 관한 결과를 발표했다.[223]

③ 독일의 T. Pfau 그룹에서 리드버그 원자 기반 양자전기장 센서 분광 기술을 2012년과 2016년에 보고했고, 중국의 Yanpeng Zhang 그룹은 2013년 Autler-Townes 분리에 관해 보고한 바 있다.

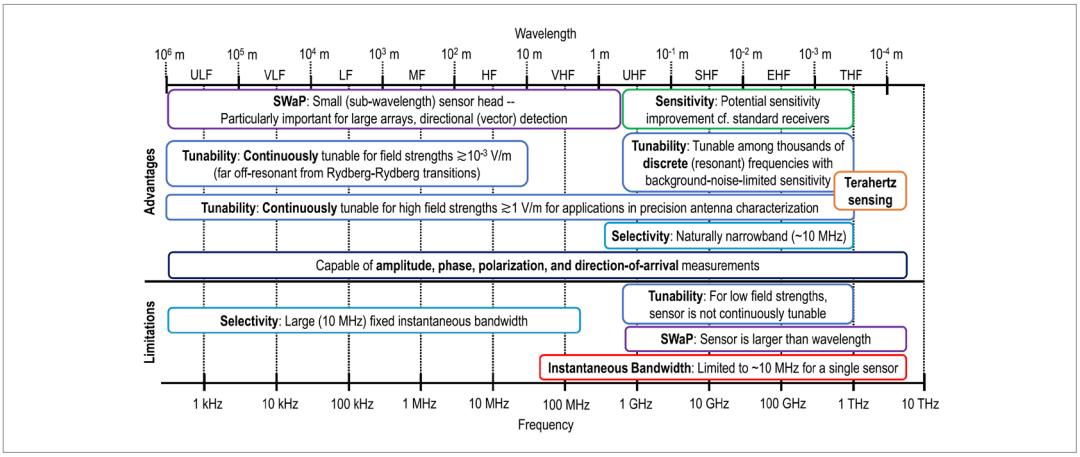
④ 중국 NIM에서는 변조된 신호 측정을 위한 양자전기장 센서를 제시했다.[224]

(3) 적용 분야

① MITRE는 2021년 출판한 리포트에서, DC부터 THz까지 광대역 측정이 가능한 양자전기장 센서의 구현이 가능하다고 발표했다.[225]

222) https://physics.aps.org/articles/v13/15
223) Chang et al. (2010)
224) Song et al. (2019)
225) Fancher et al. (2021)

그림 II-2-56 기존 수신기와 비교한 양자전기장 센서의 장점 및 한계



※ IEEE Transactions on Quantum Engineering 2 (2021)

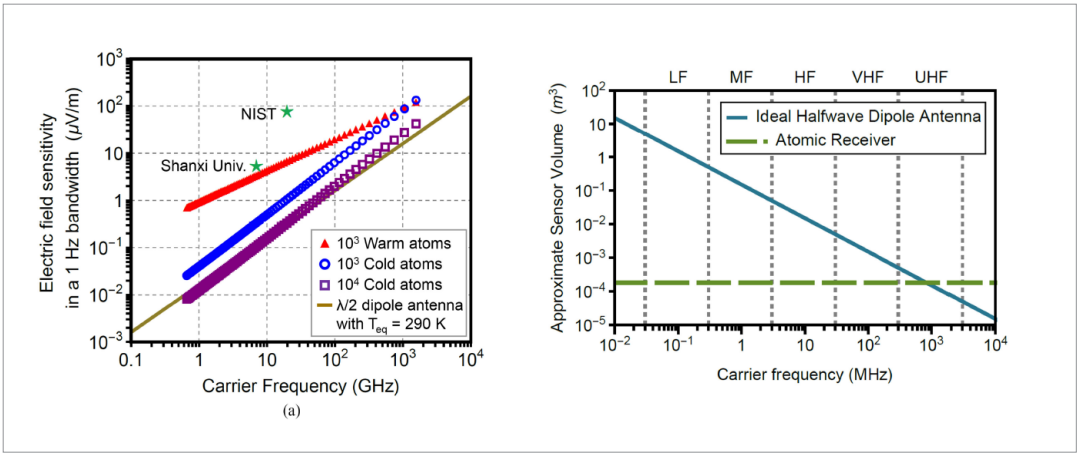
② 0.1THz 이상 고주파 대역에서 고감도 전기장 측정이 가능하며, 위상 측정 기술 개발 시 테라헤르츠 통신을 위한 전파특성 측정기준을 제공함으로써, 향후 6G 이동통신용 센서와 장비 분석 등에 활용할 수 있다.

③ 수분흡수 대역의 THz 측정이 가능해 산업 안전 검사, 비파괴 검사, 구조물 안전 검사 등 기존 THz 측정 분야에서 고전 센서의 한계로 기술 개발에 제약이 있었던 문제들을 해결할 수 있다.

④ 유럽은 macQsimal 프로젝트를 통해 양자전기장 센서 기반 THz 영상 측정 기술을 개발 중이다.

⑤ 수신부를 소형화해 단일 센서로 측정할 수 있다는 장점이 있어, 저주파 대역의 안테나를 대체함으로써 위성통신 및 민수/방산용 안테나 기술에 크게 이바지할 수 있다.

그림 II-2-57 주파수에 따른 양자전기장 센서 측정 감도와 수신부 크기 비교

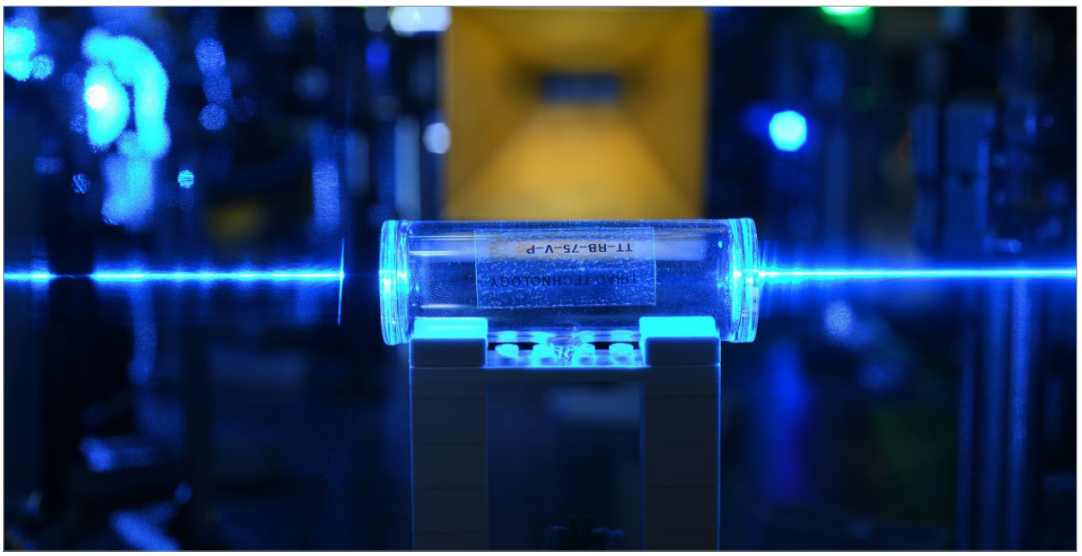


※ IEEE Transactions on Quantum Engineering 2 (2021)

⑥ 남북한 관계뿐만 아니라 러시아/우크라이나 전쟁으로 고조된 전 세계적인 갈등 상황 속에서 국방 분야의 고성능 RF 장비 수요가 증가하게 되면, 양자전기장 센서 시장이 급성장할 수 있다.

⑦ 미국은 국방 및 위성 분야에 사용할 양자전기장 센서를 개발하기 위해 2021년부터 관련 프로젝트의 가동을 시작했다.

그림 II-2-58 미국 양자센서 개발 사례[226]

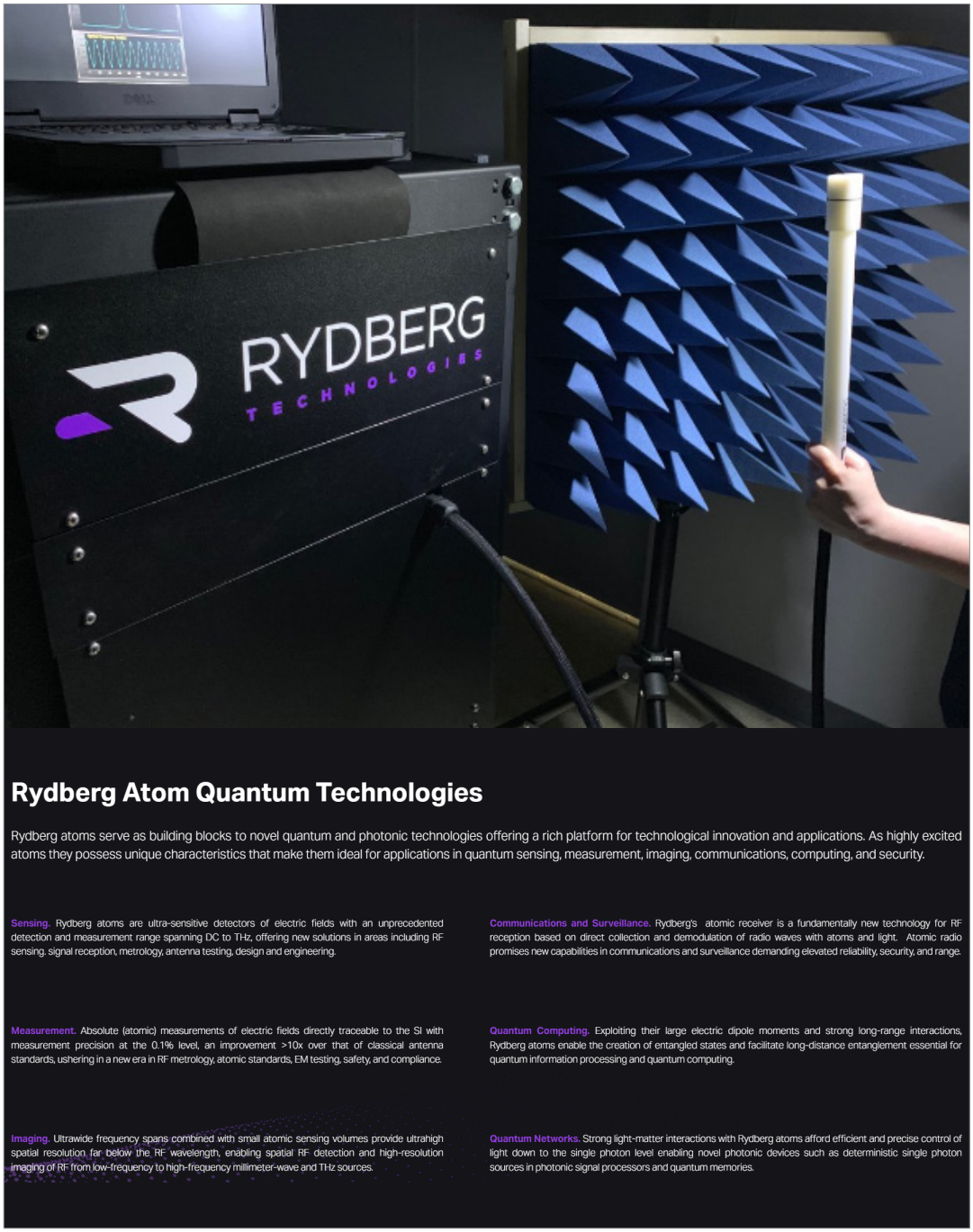


※ www.army.mil (2020)

⑧ 미국에서는 양자전기장 센서 기술의 상업화를 위해 Rydberg Technologies가 창업했으며, 리드버그 원자 기반 RF 프로브(Probe) 및 광섬유 결합 Rb 원자증기셀 등의 관련 부품을 이미 판매 중이다.

226) www.army.mil/article/233809/army_scientists_create_innovative_quantum_sensor

그림 II-2-59 미국 Rydberg Technologies사 홈페이지 공개 내용



※ https://www.rydbergtechnologies.com/

나. 양자자기장 센서

(1) 기술 동향

그동안 자기장을 정밀 측정하기 위해선 Flux Gate, MEMS 등의 고전 자력계를 활용해야만 했다. 하지만 최근 들어 원자증기셀, 고체 점결함 등의 양자자기장 센서에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 실제 구현 시 상온에서 구동되며, 소형으로 제작할 수 있다는 장점으로 인해 국방, 산업, 의료 등 다양한 분야에서 활용하고자 하는 움직임이 늘고 있다. 양자자기장 센서는 지구자기장 왜곡 측정, 표적 자기장 정밀 측정 등의 국방 분야에서부터 Wearable 뇌자도 이미징시스템, 3차원 MRI 등 바이오, 의료 산업 분야에 이르기까지 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대를 모으고 있다. 해외에서는 미국, 유럽, 중국을 중심으로 기초 연구를 넘어 산업화를 위한 시도들이 진행 중이다. 특히 대기업보다는 대학 연구팀에서 파생된 중소기업과 스타트업을 중심으로 다양한 산업화 연구가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

1) 미국

① 하버드, MIT, 프린스턴, UCSB, IBM, NIST 등 다양한 대학과 연구소에서 원자자력계, 다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자자기장 센싱 및 이미징 연구를 수행 중이다.

② 프린스턴 대학은 고압의 버퍼가스 원자증기셀을 이용해 sub-fT 수준의 고감도 원자자기장 양자센싱 기술을 최초로 구현했다. 이를 통해 SQUID센서를 넘어서는 초고감도 자기장 측정 기술을 확보함으로써 뇌자도 측정, 내비게이션 수준의 원자자이로, 폭발물 및 금속 탐지 등의 다양한 연구를 진행하고 있다.

③ NIST는 MEMS 기반 원자증기셀을 이용한 Chip-Scale Atomic Devices로 원자자력계 개발 및 생체자기 측정, 금속 탐지 등 다양한 연구를 진행 중이며, Wearable 뇌자도 시스템 개발의 세계적인 선도 그룹이다.

④ MIT는 다이아몬드 NV 센터를 이용해 다양한 자기장 센싱, 뇌자도가 가능한 소형 NV 자력계 연구를 수행 중이다.

⑤ 하버드 대학은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 30nm 수준의 MRI 공간분해능이 가능하다는 연구 결과를 발표했다. 또한 기존 수십 kHz 자기공명(NMR) 분해능을 1Hz 이하로 개선하는 기술과 NMR 신호를 수백 배 이상 증대시킬 수 있는 초분극 기술을 개발했다.

⑥ IBM은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 12nm 수준의 공간분해능을 갖는 2차원 MRI 영상 기술을 선보였다.

⑦ Twinleaf는 소형 상용 원자자력계를 개발해 판매 중이다.

⑧ Quspin은 NIST에서 파생된 기업으로, 소형 원자자력계 모듈을 생산 및 판매 중이며 Wearable 뇌자도 시스템 개발에 활용하는 연구를 수행하고 있다.

⑨ Fieldline은 Twinleaf와 Quspin의 경쟁 기업으로 소형 원자자력계 모듈을 생산 및 판매 중이고, MEG 시스템도 판매하고 있다.

⑩ Quantum Diamond Technology는 다이아몬드 NV 센터 기반의 자력계를 이용해 고속으로 바이오 샘플을 검출하는 바이오마커 기술을 개발해 시제품을 선보였다.

⑪ Lockheed Martin은 다이아몬드 NV 센터 자력계를 이용해 GPS-Free 항법용 자기장 시스템을 개발하고 있다.

그림 II-2-60 미국 기업들이 판매 중인 소형 상용 원자자력계

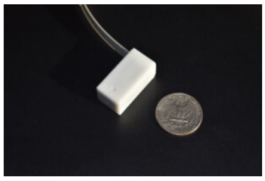
미국 Twinleaf 사 자기센서



미국 QuSpin 사 자기센서



미국 Fieldline 사 자기센서



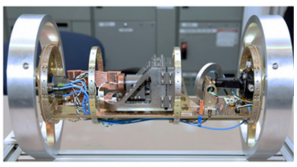
※ quspin.com, twinleaf.com, fieldlineinc.com

그림 II-2-61 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 양자자기장 센서

미국 QDTI사의 바이오마커 탐지 장치

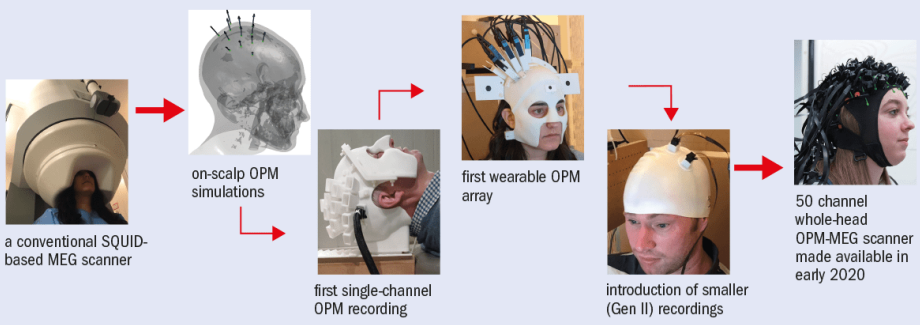


미국 Lockheed Martin 사의 GPS-free 자기장 항법 시스템



※ qdti.com, lockheedmartin.com

그림 II-2-62 소형 양자자력계를 이용한 Wearable 뇌자도 이미징 시스템 개발 발전상



※ physicsworld.com (2021)

2) 유럽

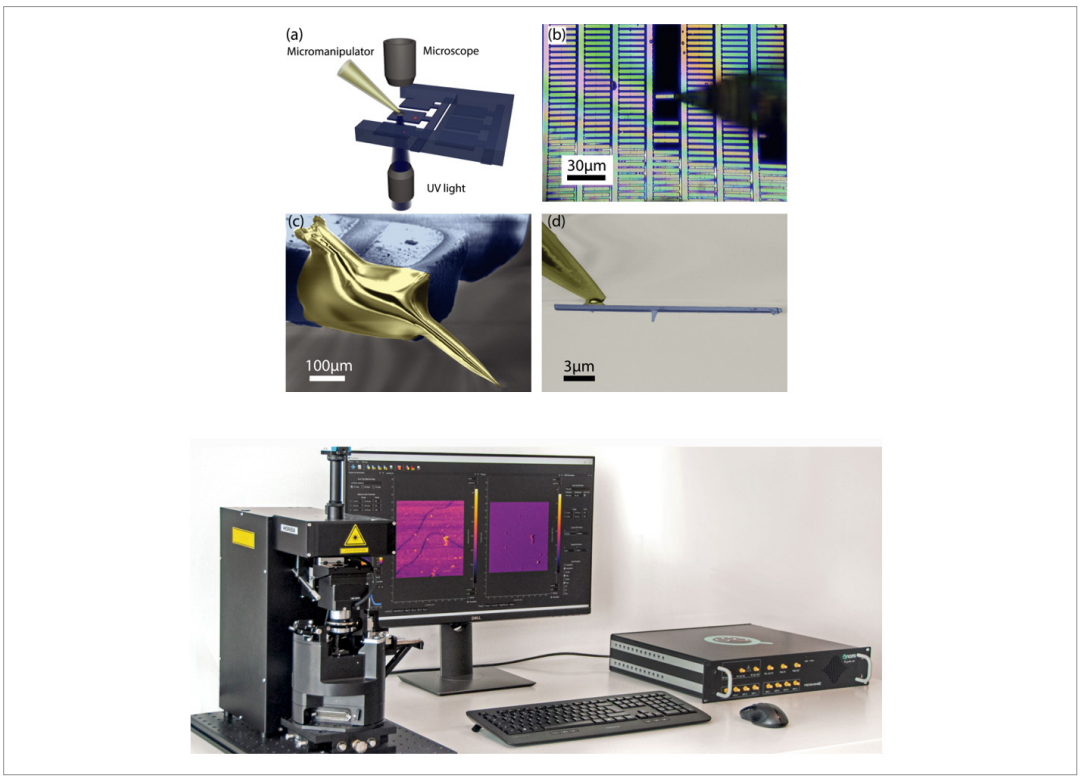
① 영국 Colledge London 대학은 원자증기셀 기반의 자력계를 이용해 능동적 잠수함, 지뢰, 불발탄 탐지 관련 연구를 수행하고 있다.

② 독일 Stuttgart 대학은 단일/앙상블 NV 센터를 이용해 다양한 자기장 센싱 및 이미징 연구를 진행 중이며, 다중 큐비트를 이용한 양자얽힘 및 양자메모리 연구를 수행하고 있는 양자자기장 센싱 분야의 세계적인 그룹이다. 또한 다이아몬드 NV 센터를 이용해 바이오 세포를 수백 nm 수준의 분해능으로 MRI 영상화하는 데 성공했다.

③ 영국 Element Six는 고순도 다이아몬드 생성 및 고감도 NV 센터를 제작해 전 세계에 공급하고 있다.

④ 스위스 Qnami와 Qzabre는 다이아몬드 기반 스캐너 프로브를 제작 및 판매 중이며, 상온에서 구동하는 나노 자기장 이미징 스캐너도 제작해 판매하고 있다.

그림 II-2-63 스위스 Qnami, Qzabre에서 제작 및 판매 중인 다이아몬드 스캐닝 프로브와 나노 자기장 이미징 스캐너



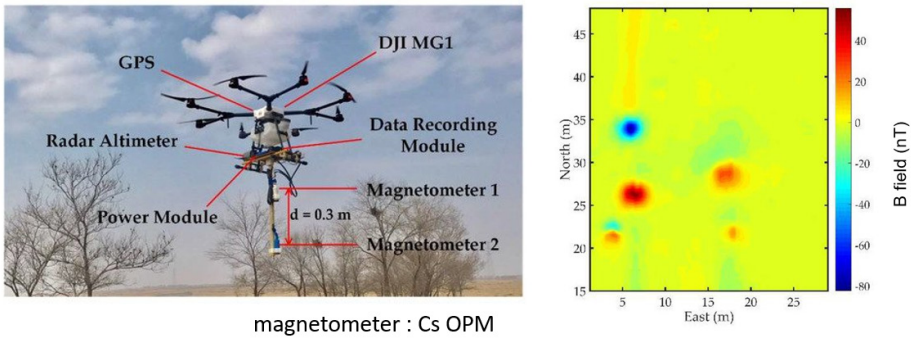
※ qnami.ch

3) 중국

① CAS Key Lab은 다이아몬드 NV 센터를 이용한 민감도 개선, 면역 검정 현미경 등 NV 센터의 자기장 센싱 활용 방법을 연구 중이며, 다양한 양자자기장 센싱 및 이미징 연구를 수행하고 있다. 또한 원자증기셀 기반의 자력계를 이용해 원거리 자기장 탐지, 무인 드론 기반 지뢰 탐지 등을 연구하고 있다.

② CiQTEK은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 상온에서 구동하는 나노 자기장 이미징 스캐너를 제작 및 판매 중이다.

그림 II-2-64 원자자력계를 이용한 무인 드론 기반 지뢰 탐지 연구



※ Remote Sensing 12(3), 452 (2020)

그림 II-2-65 중국 CIQTEK의 다이아몬드 NV 센터 기반 나노 자기장 이미징 스캐너



※ ciqtek.com

(3) 적용 분야

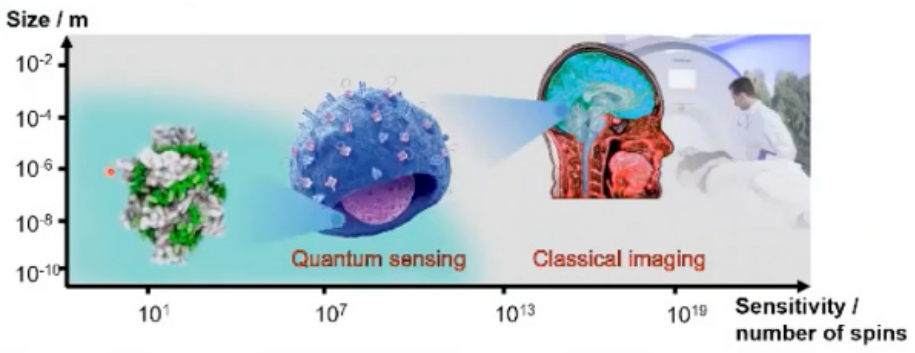
① 원자증기셀 및 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 상온 자력계를 개발해 Wearable 뇌자도 이미징 시스템을 제작하고 이를 의료와 산업 분야에 활용할 수 있다.

② 기존 MRI로 영상화(100um 수준)가 불가능한 세포·분자의 직접적인 이미징으로 단백질 구조를 영상화할 수 있고, 신약 개발이 가능한 나노/마이크로미터 MRI 연구에 활용할 수 있다.

③ 지구자기장의 왜곡을 측정하고, 표적 자기장 정밀 측정을 통해 국방 분야에 활용할 수 있다.

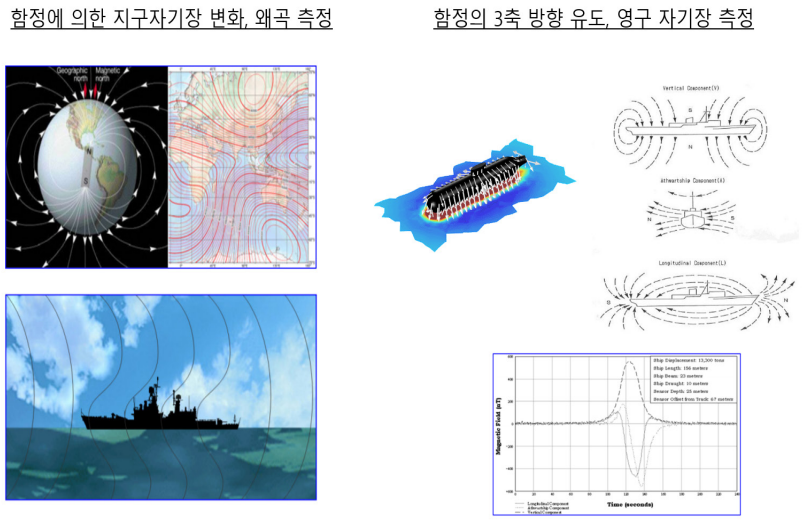
④ 초정밀, 고분해능 자기장 이미징을 통한 세포 이미징, 바이러스 조기 진단, 바이오마커 탐지 등 다양한 바이오 및 의료 분야에 활용할 수 있다. 또한 반도체와 배터리의 결함 분석 및 소재 특성 파악을 통해 첨단 산업 분야에도 활용할 수 있다.

그림 II-2-66 나노/마이크로미터 양자 MRI 개념도



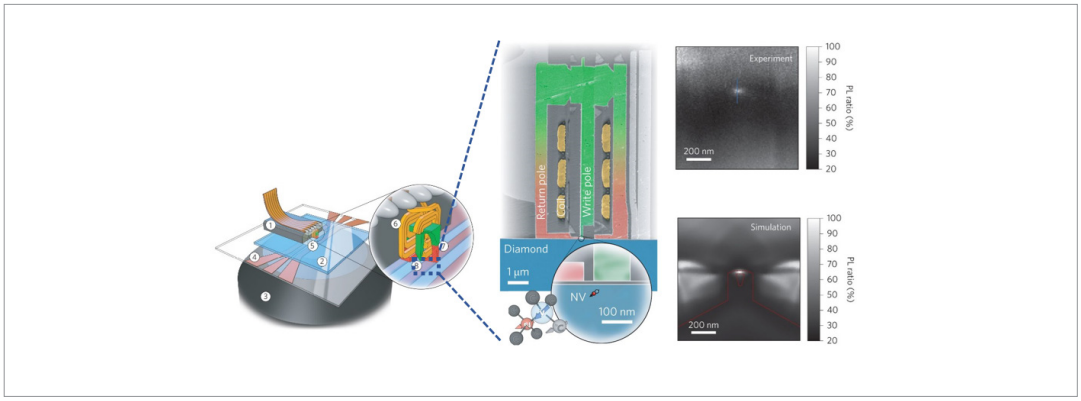
※ Chemical Communications 58, p.8165 (2022)

그림 II-2-67 양자자력계의 국방 분야 활용 예시



※ 한국정보통신학회 18(12), p.3069-3078 (2014), 한국정보통신학회 17(5), p.1253-1258 (2013)

그림 II-2-68 고분해능 양자자기장 이미징을 통해 반도체와 배터리의 결함 분석 및 첨단 산업 활용 예시



※ Nature Nanotechnology 12, p.67 (2017)

4. 양자광학센서

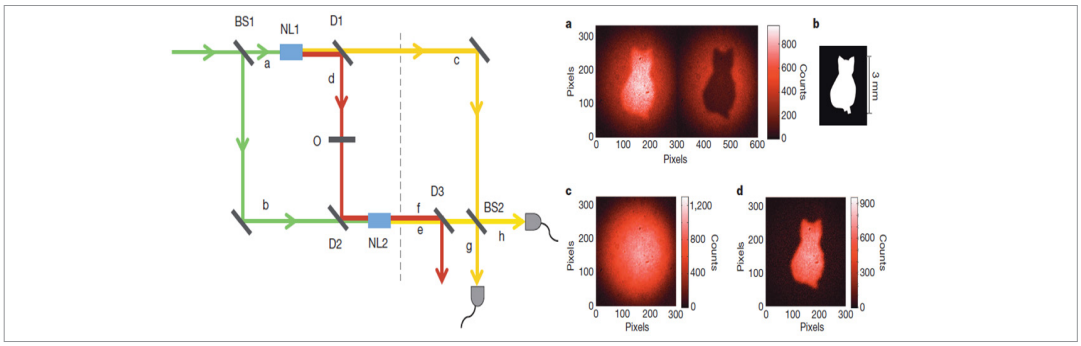
(1) 기술 동향

양자광학센서는 광학적 측정 감도의 한계를 돌파하기 위해 빛의 양자적 성질, 즉 광자의 양자상태 조작 등을 이용한 차세대 기술로써 주목받고 있다. 해당 연구를 기반으로 양자이미지, 양자현미경, 양자 고스트 이미지, 양자OCT 등의 기술로도 응용 연구가 활발히 진행 중이다.

(2) 연구 동향

① 오스트리아 비엔나 대학에서 'Quantum imaging with undetected photons'라는 제목으로 피사체를 투과하지 않은 광자를 이용한 양자이미징 기술을 발표해 많은 관심을 받고 있다.[227)]

그림 II-2-69 양자 고스트 이미징 기술[228)]



※ Nature 512, 409 (2014)

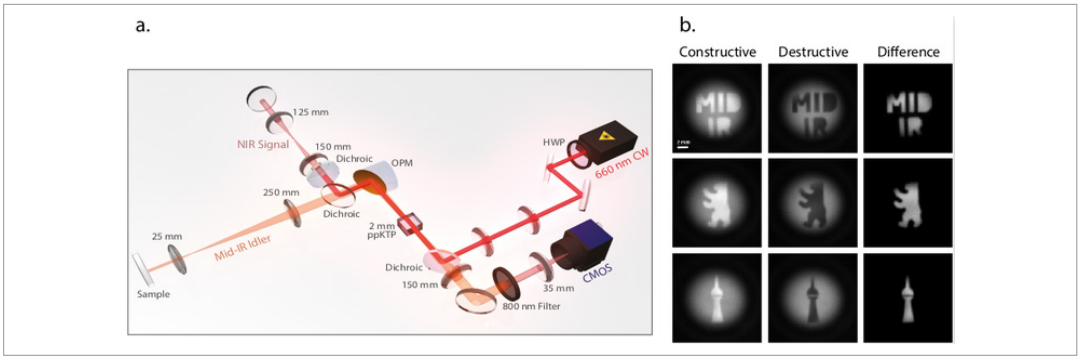
227) www.nature.com/articles/nature13586

228) Nature (2014)

② 오스트리아 과학기술 연구소는 얽힌 마이크로파를 사용해 세계 최초의 양자레이더 시스템을 개발 중이라고 발표했다. 양자얽힘 원리에 따라 생성된 광자쌍을 이용한 양자조명이라는 프로세스에 의해 거리와 상관없이 정보 획득이 가능하다고 알려져 있다.[229)]

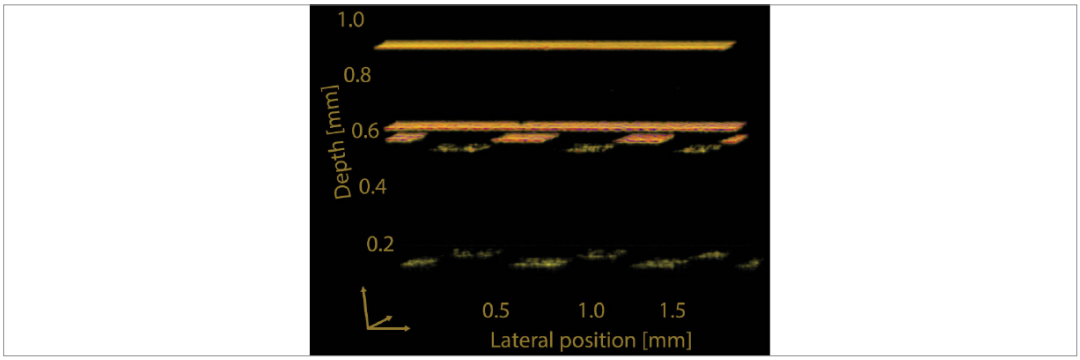
③ 독일의 훔볼트 대학은 양자비선형 간섭계 기반 중적외선 영역에서의 이미징에 대한 연구를 수행 중이다.[230)] 독일 프라운호퍼 연구소 또한 유도 양자 간섭을 이용한 미탐지 광자로 측정이 가능한 양자 이미징 기술을 개발하였으며, 고속 (video-rate) 양자 이미징 기술 및 홀로그래피 이미징 기술 등 양자 이미징 기술 현실화를 이루는 데 있어 큰 힘이 되고 있다. [Optica 7, 1729 (2020), Lasers & Photonics Reviews 15, 2000327 (2021)] 특히 훔볼트 대학에서 주로 개발하고 있는 중적외선 영역에서 미탐지 광자를 높은 효율로 측정 가능한 양자 이미징 기술은 생체 물질 분석이나 가스 분자 분석에 양자 이미징 기술의 활용 가능성을 시사하고 있다. 또한 독일 프라운호퍼 연구소에서 양자 이미징 뿐만 아니라 미탐지 광자 센싱 기술을 통해 중적외선 대역의 가스 분자 흡수를 정보를, 높은 감도로 측정 가능한 양자 센서 기술을 개발하여 가스 검출에 양자 센서 적용 가능성을 보였다. [APL Photonics 8, 051301 (2023)]

그림 II-2-70 (a) 양자비선형 간섭계 실험 장치도, (b) 근적외선광과 중적외선광의 간섭 이미지



※ physik.hu-berlin.de

그림 II-2-71 양자 OCT 기술 개발 통한 깊이 정보 토모그래피 이미징

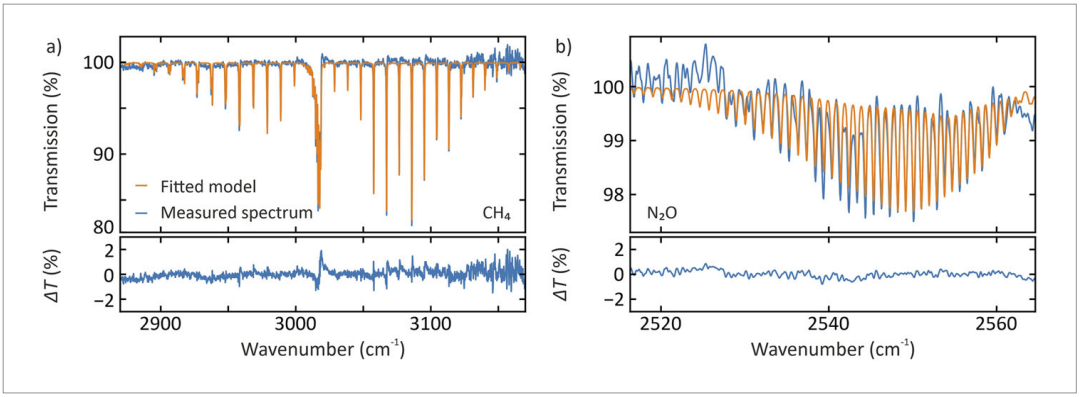


※ Optica 7, 1729 (2020)

229) www.militaryaerospace.com/sensors/article/14039298/quantum-radar-stealth-detailed-image

230) www.physik.hu-berlin.de/en/niqo/research/quantum-imaging

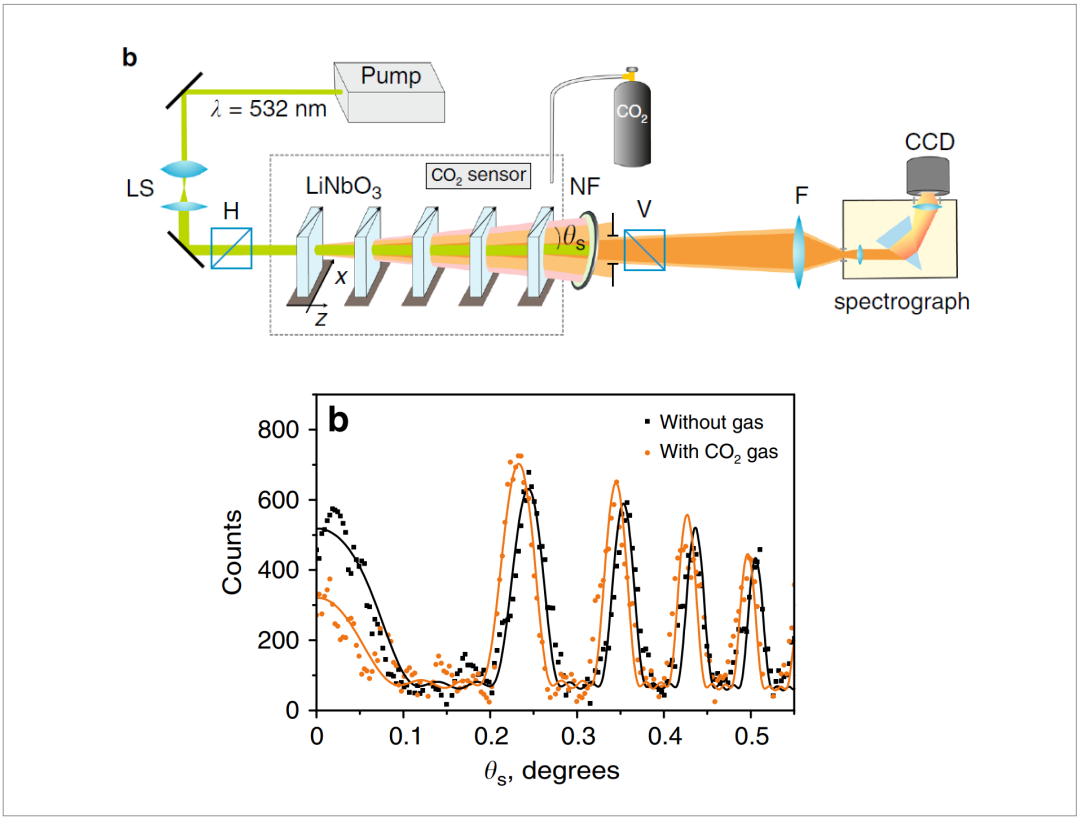
그림 II-2-72 양자 분광 센서 기술 통한 메탄 가스(CH_4) 이산화질소(N_2O) 가스 고감도 검출



※ APL Photonics 8, 051301 (2023)

④ 싱가포르 과학기술청(A*STAR: Agency for Science, Technology and Research)에서는 간섭기반의 양자 센서를 개발하여 양자 분광 기술을 개발하였고, 여러 개의 SPDC 양자 광원을 배치함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있었다. 이를 통해 이산화탄소(CO_2) 분자를 고감도로 검출 가능한 양자 센서 적용 가능성을 보였다.

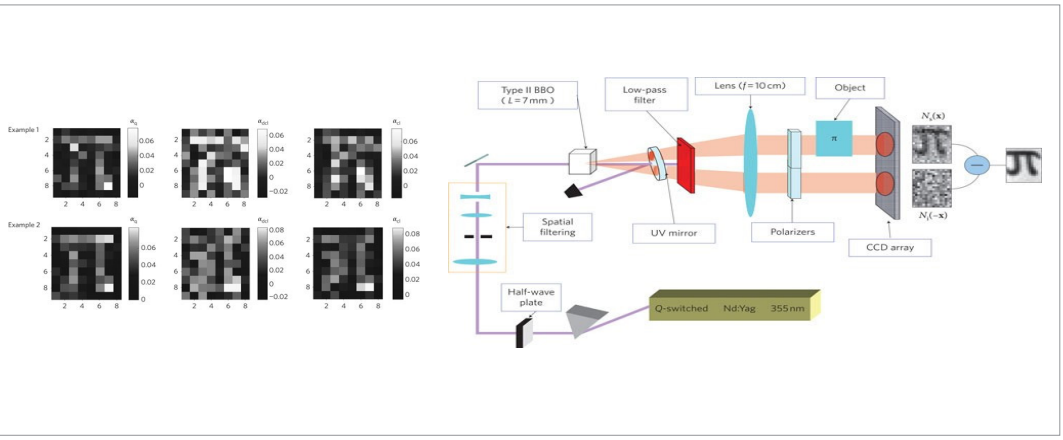
그림 II-2-73 (위) 결정 초격자를 갖는 비선형 간섭계, (아래) 가스감지실험 간섭무늬 분석 결과



※ Light: Science & Applications 9, 82 (2020)

⑤ 이탈리아 INRIM에서 파라메트릭 하향 변환 광원 사이의 양자 상관관계를 활용해 약한 흡수 물체의 서브샷(Sub-Shot) 노이즈 이미징을 실현하는 연구 결과를 2010년에 발표했다. 기존 이미징 방법보다 더 큰 신호 대 잡음비를 달성할 수 있어, 낮은 광자 플럭스 조건의 응용 분야에 이바지할 것으로 예상한다.[231]

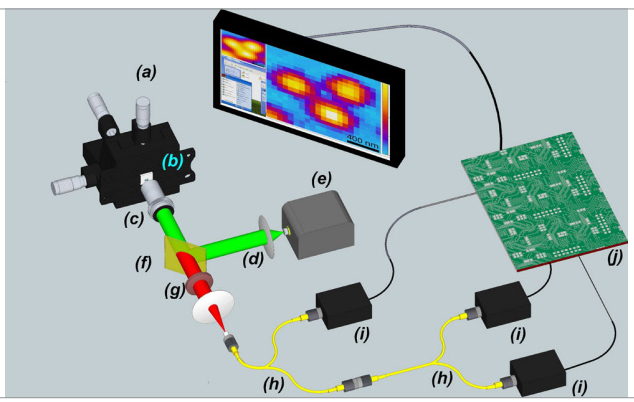
그림 II-2-74 (왼쪽) 실험적 이미지, (오른쪽) 실험 장치도



※ Nature Photonics 4, 227 (2010)

⑥ 이탈리아 토리노 대학은 단일 방출체를 피사체로 하는 이미징 시 단일 광자의 상관관계 특성을 이용해 측정시스템을 개발했으며, 이를 통해 2차 상관관계 기반의 이미징을 할 경우, 반치폭이 72% 감소해 분해능이 1.39배 증가할 수 있음을 보여줬다.

그림 II-2-75 단일 방출체 기반 양자이미징 기술[232]

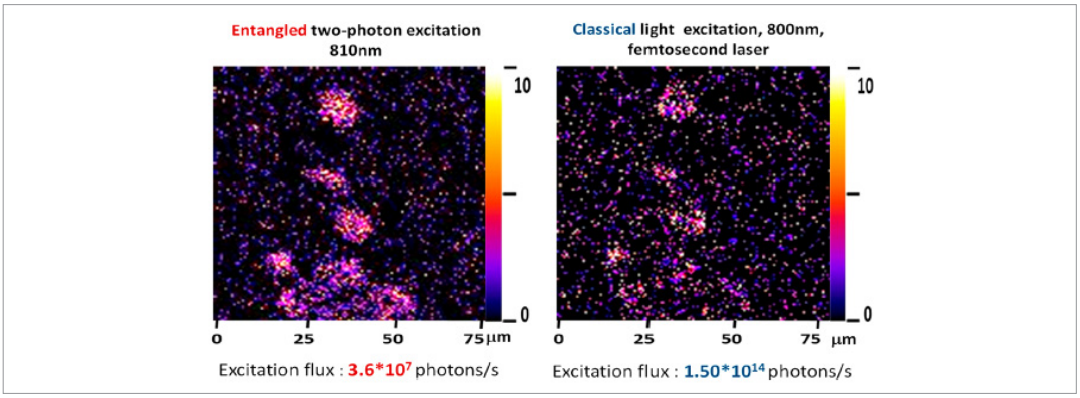


※ Phys & Rev (2014)

231) Nature Photonics (2010)
232) Phys & Rev (2014)

⑦ 미국 미시간 대학에서는 얽힘 광자쌍을 이용한 얽힘 이광자 흡수 기술을 개발하고 있다. 특히 생체 시료의 경우 흡수 혹은 발광 현상을 이용한 이미징을 하게 될 경우, 높은 광량 노출로 인해서 세포의 변형이나 파괴의 위험이 존재한다. 해당 연구 그룹에서는 얽힘 이광자 흡수 이미징 기술을 개발하여 고전 광원대비 백만배 이상 적은 광량에서 측정이 가능한 양자 이미징 기술을 개발하였다. 실제로 양자 흡수 이미징 시스템을 이용하여 암세포를 이미징 함으로써 생체 시료의 응용 가능성을 시사했다. [J. Phys. Chem. Lett. 13, 2772 (2022)]

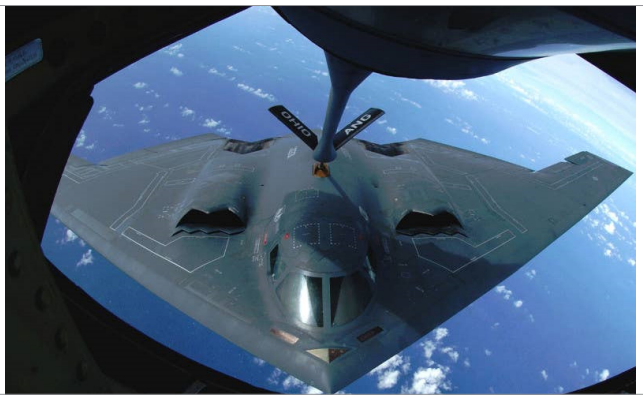
그림 II-2-76 얽힘 이광자 흡수 양자 이미징 기술 개발 통한 암세포 이미징



※ J. Phys. Chem. Lett. 13, 2772 (2022)

⑧ 중국은 우주에서 스텔스 비행기를 탐지할 수 있는 스파이 위성을 만들기 위해 노력하고 있다. 2017년 11월 26일 사우스차이나 모닝포스트에 따르면, 중국과학원 양자광학 핵심연구소 연구국이 위성에서 작동할 고스트 이미징(Ghost Imaging) 센서를 연구하고 있다고 보고했으며, 우주에서 2025년까지 테스트한 후 2030년경에 운영 준비가 될 것으로 기대한다고 발표했다.

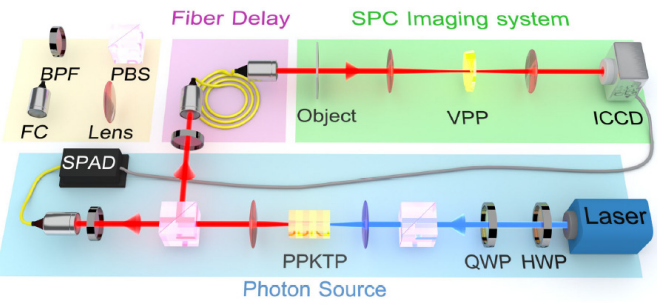
그림 II-2-77 스텔스 비행기 탐지 스파이 위성 관련 중국 사례[233)]



233) www.thedrive.com/the-war-zone/16488/china-says-its-building-a-ghost-imaging-satellite-to-detect-stealth-jets

⑨ 중국 University of Science and Technology of China 연구그룹은 양자광자쌍 기반 Heralding 이미징 기술을 통해 고전적 광원 대비 53.5% 향상된 이미징 기술을 구현했다.

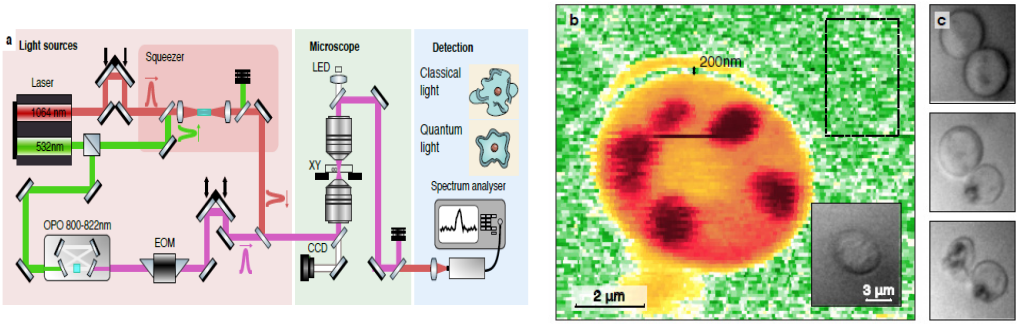
그림 II-2-78 양자 상관관계 기반 이미징 기술[234)]



※ Optics express (2020)

⑩ 호주 퀸즈랜드 대학은 양자압축광을 이용해 샷노이즈 이하의 양자이미징을 구현했다. 양자현미경 이미징 기술을 통해 35% 향상된 신호 대 잡음비를 구현했고, 특히 집속된 높은 광량에 의해 파괴되는 생체 시료 관측에 있어 양자현미경 기술의 중요성을 시사했다.

그림 II-2-79 양자현미경을 통한 생체 시료 센싱 기술[235)]

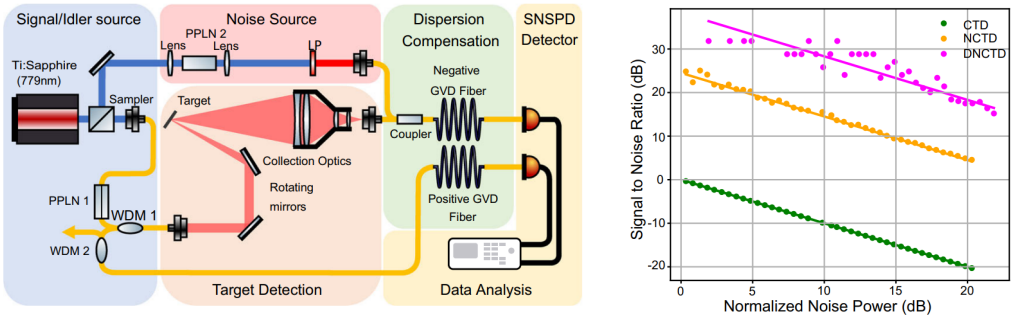


※ Nature (2021)

234) Optics express (2020)
235) Nature (2021)

⑪ 미국의 Air Force Research Laboratory(AFRL)는 광원의 얽힘을 이용해 양자 라이다 기술을 발표했다.[236] 그리고 캐나다 토론토 대학은 시간-주파수 얽힘을 이용한 새로운 양자 라이다 기술 프로토콜을 개발하여 43 dB 더 향상된 신호대잡음비 결과를 보임으로써, 양자 라이다 기술에 감도를 더욱 향상시킬 수 있음을 발표하였다. [Nature Communications 13, 5633 (2022)]

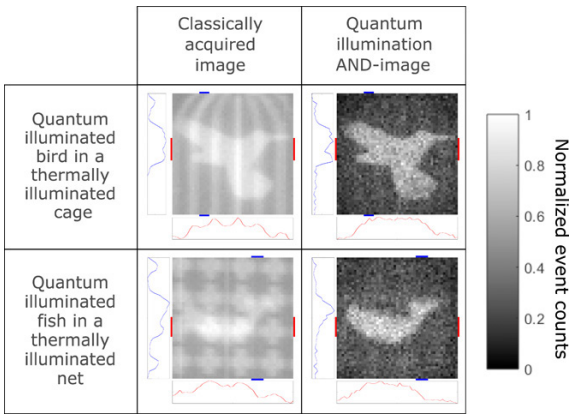
그림 II-2-80 양자 라이다 신호대잡음비 향상 기술



※ Nature Communications 13, 5633 (2022)

⑫ 영국 글래스고 대학은 배경 조명 및 센서 노이즈로 인해 발생하는 이미지 대비도 저하를 광자쌍 간의 공간적 상관관계를 이용해 극복하는 양자조명 프로토콜을 제시하며, 양자조명을 사용하는 필드 이미징 시스템을 보고했다. 낮은 광자 플럭스 및 양자 LIDAR에서의 이미징과 같이 배경광 및 노이즈 억제가 중요한 양자이미징에 적용할 수 있다고 밝혔다.[237]

그림 II-2-81 양자조명 대상 물체 이미지

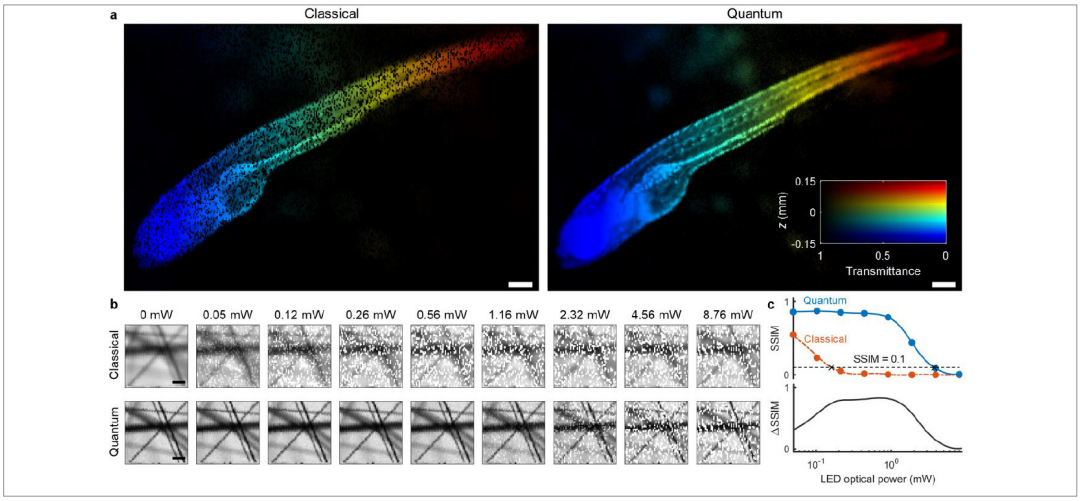


※ Science Advances 6(6) (2020)

236) Air Force Research Laboratory (2009)
237) T Gregory et al. (2020)

⑬ 미국 캘리포니아 공대(Caltech) 칼텍 이미징 연구그룹에서 위치 공간적, 편광 얽힘 양자 광자쌍을 이용한 이미징 기술을 개발하였고, 이를 통해 고전적 이미징 대비 25배 이상 미광 (stray light)을 억제 시킬 수 있음을 발표하였다. 실제 생체 시편인 제브라피시를 이용한 양자 이미징을 통해 감도 향상이 가능함을 보임으로써 양자 이미징의 생체 시료 활용 가능성을 시사하였다.

그림 II-2-82 제브라피시 생체 시료의 양자 이미징



※ arXiv:2303.05643, (2023)

(3) 적용 분야

양자광학센서는 고전적 기술로 구현한 이미지의 해상도를 높여주는 기술이며, 큰 잠재력을 보여주고 있다. 양자라이다와 양자레이더는 원격 물체 탐지 성능을 획기적으로 늘려줌으로써 국방 분야에 유용하게 쓰일 수 있고, 양자가스센싱 기술은 고감도 가스검출이 가능해 산업 안전 분야에 적용할 수 있다. 또한 양자이미징 및 양자현미경 기술은 생체 시료의 고감도, 고분해능 측정이 가능해 의료 분야 및 제약 분야에서의 다양한 활용이 기대된다.

5. 양자계측

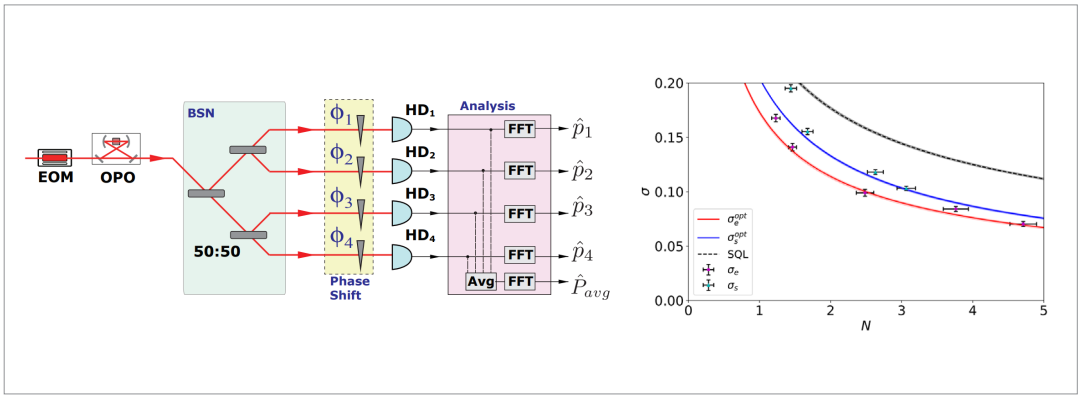
(1) 기술 동향

양자 계측에서, 양자 변수 추정은 위상(phase) 변수의 측정 정밀도에 초점을 두고 광학시스템에서 다루므로 광자 손실에 의한 영향을 많이 받고, 양자 가설 시험은 물체 반사율(reflectance)이 0에 아주 가까울 때 물체 탐지 오류율을 줄이는 것에 초점을 두고 원거리 물체 탐지를 목표하기에 광자 손실뿐만 아니라 주변 잡음에 의한 영향을 많이 받는다. 손실이나 잡음이 있는 조건에서도 얽힘이나 진공 압축 상태를 이용해 고전 한계를 뛰어넘어 양자 이득을 얻기 위한 실험들이 이루어지고 있다. 이와 관련하여, 분산 양자 센싱(Distributed quantum sensing), 다중 변수 양자 센싱(Multi-parameter quantum sensing), 양자 조명(Quantum illumination), 양자 리딩(Quantum reading) 등의 기초 연구가 진행 중이다.

(2) 연구 동향

① 2020년 덴마크 기술 대학에서 'Distributed quantum sensing in a continuous variable entangled network' 라는 제목으로 4-모드 얽힌 압축 상태(four-mode entangled squeezed state)와 호모다인 측정(homodyne detection)을 이용하여 4개의 다른 위상의 평균값의 측정 정밀도 실험을 하였다. 그 결과, 4-모드 압축 상태가 얽힘의 유무와 상관없이 양자표준한계(Standard Quantum Limit)보다 뛰어난 평균 위상 정밀도를 보였다. 이 방법은 분자 추적(molecular tracking)에서부터 원자시계를 이용한 양자 네트워크까지 적용 가능할 것으로 예상된다.[238]

그림 II-2-83 4-모드 얽힌 압축 상태를 이용한 분산 양자 센싱 실험

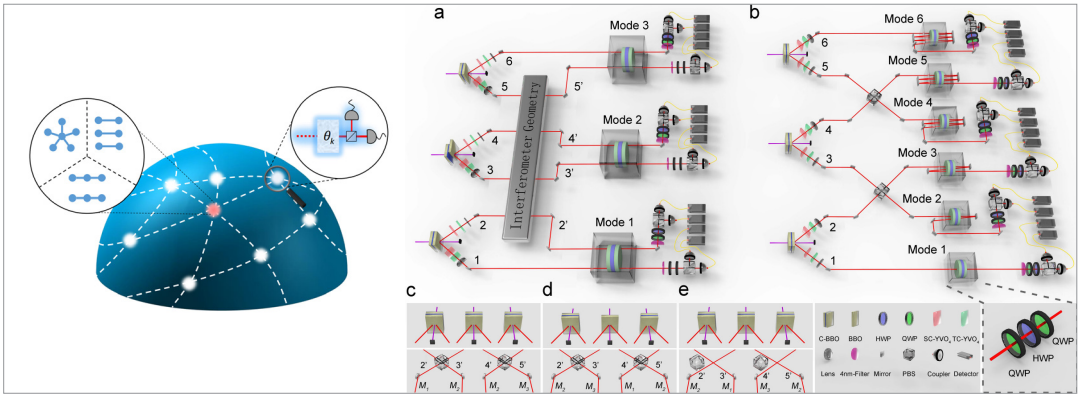


※ Nature Physics 16, 281 (2020)

238) Nature Physics 16, 281 (2020)

② 2021년 중국 과학기술대학에서 'Distributed quantum phase estimation with entangled photons'라는 제목으로 6개의 얽힌 광자 상태(6-photon entangled state)를 이용하여 6개의 다른 위상의 평균값의 측정 정밀도 실험뿐만 아니라 각각 위상의 측정 정밀도 실험을 하였고, 고전 상태의 한계 해당하는 shot-noise limit을 월등히 뛰어넘었다.[239)]

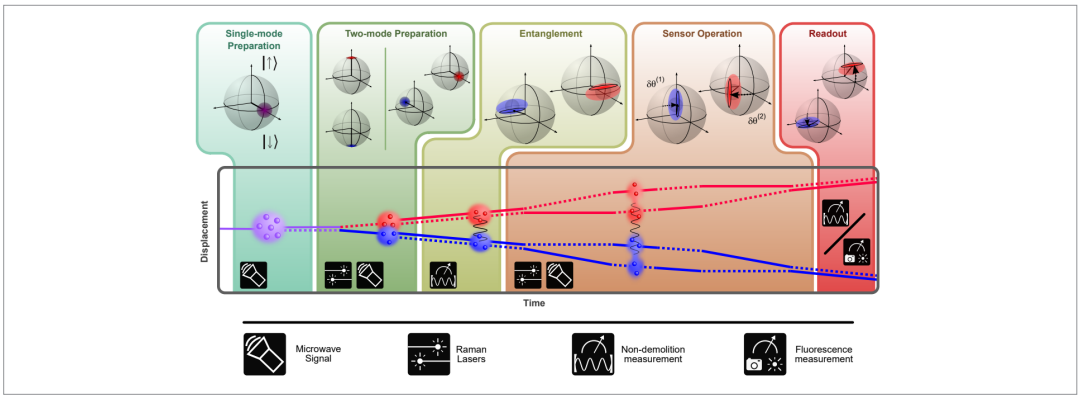
그림 II-2-84 6개의 얽힌 광자를 이용한 분산 위상 추정 실험



※ Nature Photonics 15, 137 (2021)

③ 2022년 미국 스탠퍼드 대학에서 'Distributed quantum sensing with mode-entangled spin-squeezed atomic states'라는 제목으로 4-모드 얽힌 스핀 압축 원자 상태를 이용하여, 4개의 다른 z방향 각 운동량 평균값의 측정 정밀도 실험을 한 결과, 얽힘이 없는 원자 상태와 비교하였을 때보다 훨씬 뛰어난 운동량 평균값의 측정 정밀도를 보였다. 이 방법은 양자 통신뿐만 아니라 중력 기울기 센서(gravity gradient sensor), 중력파 측정, 암흑 물질 탐지에도 유용할 것으로 기대된다.[240)]

그림 II-2-85 얽힌 스핀 압축 원자 상태를 이용한 센싱의 원자 센싱 절차

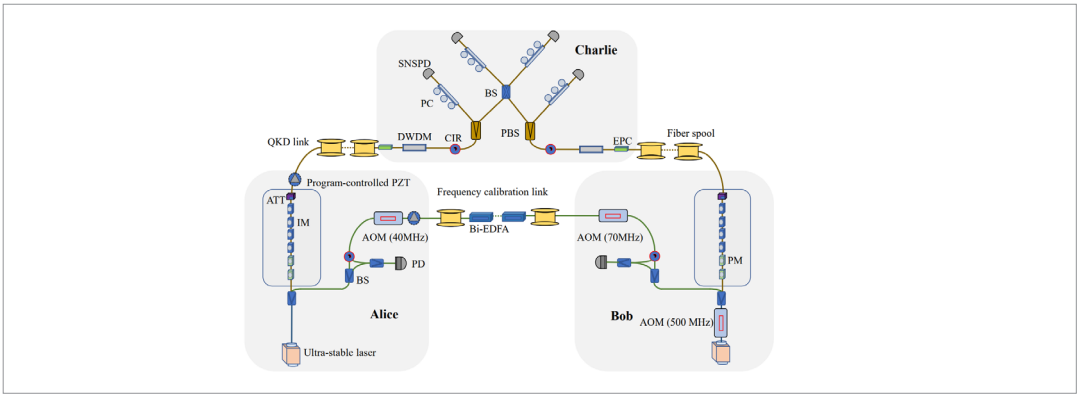


※ Nature 612, 661 (2022)

239) Nature Photonics 15, 137 (2021)
240) Nature 612, 661 (2022)

④ 2022년 중국 과학기술대학에서 'Quantum Key Distribution over 658km Fiber with Distributed Vibration Sensing'이라는 제목의 양자키를 분배하는 네트워크는 지진이나 다른 지진파 진동(예를 들어, 지하 폭발, 광산 내부 터널 붕괴, 산사태 등)의 센서 역할도 할 수 있다는 것을 보였다.[241]

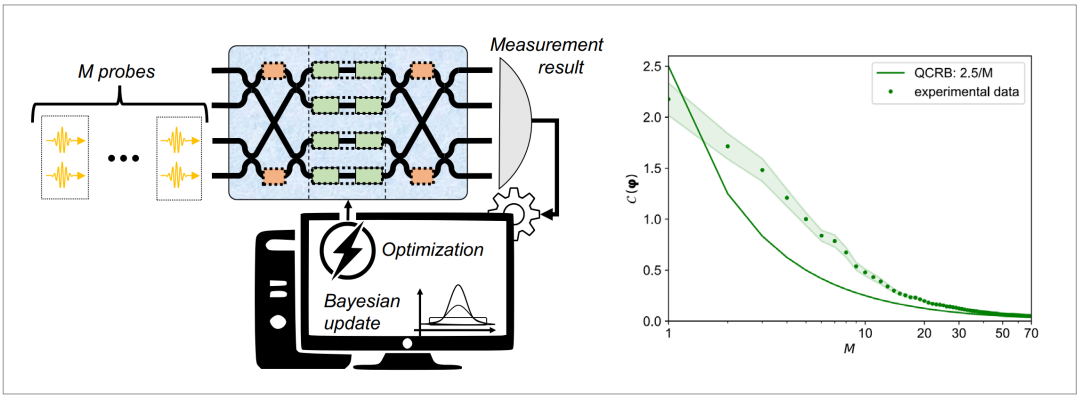
그림 II-2-86 양자 암호 네트워크를 이용한 지진파 센싱



※ Physical Review Letters 128, 180502 (2022)

⑤ 2023년 이탈리아 로마 스피엔자 대학에서 'Experimental multiparameter quantum metrology in adaptive regime'이라는 제목으로 2-photon 4-mode 얽힘 상태를 이용하여 3개의 다른 위상 변수의 정밀도를 측정하는 실험을 하였다. 적응 제어(adaptive control) 방식을 고려한 결과, 측정 데이터 양이 늘어남에 따라 측정 정밀도가 좋아지는 것을 관찰할 수 있었다.[242]

그림 II-2-87 적응 제어 방식을 이용한 다중 위상 정밀도 실험



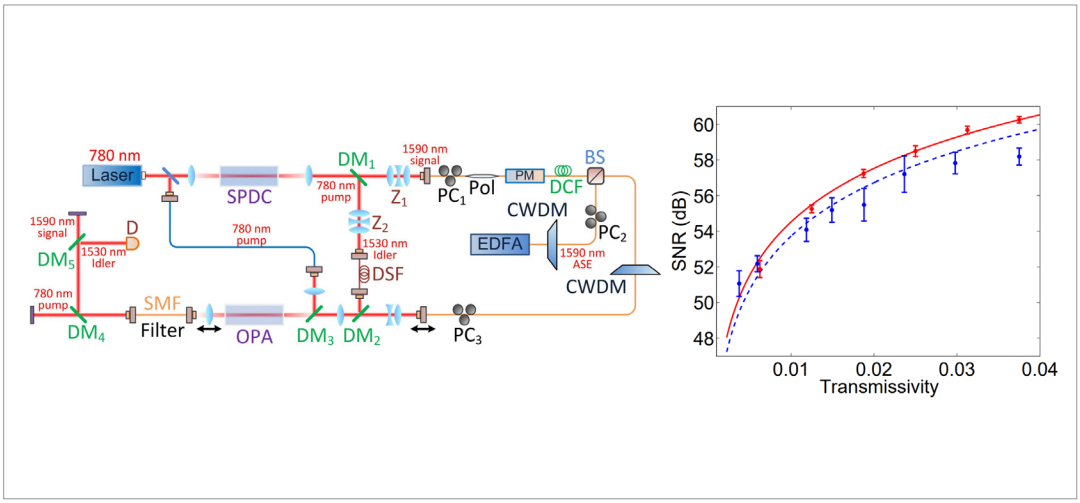
※ Physical Review Research 5, 013138 (2023)

241) Physical Review Letters 128, 180502 (2022); Physics 15, 63 (2022)

242) Physical Review Research 5, 013138 (2023)

⑥ 2015년 미국 메사추세츠 공과대학에서 'Entanglement-Enhanced Sensing in a Lossy and Noisy Environment'라는 제목으로 이중 모드 진공 압축 상태를 사용하는 것이, 결맞음 상태를 사용하는 것보다 물체 탐지 오류율이 낮으며 양자 이득이 20%나 발생하는 것을, 신호 대 잡음비로 관찰하였다. 광학 매개 증폭기(Optical Parametric Amplifier)를 이용한 측정 방법을 고려한 것으로, 이론상으로 물체 탐지 오류율이 지수(exponent)의 2배나 낮게 나타나며, 이는 3dB만큼 신호 대 잡음비가 향상된다는 것을 말해준다. 이는 양자 조명 실험 중에 최초로 양자 이득을 관찰한 실험이다.[243)]

그림 II-2-88 광학 매개 증폭기를 이용한 양자 조명 실험



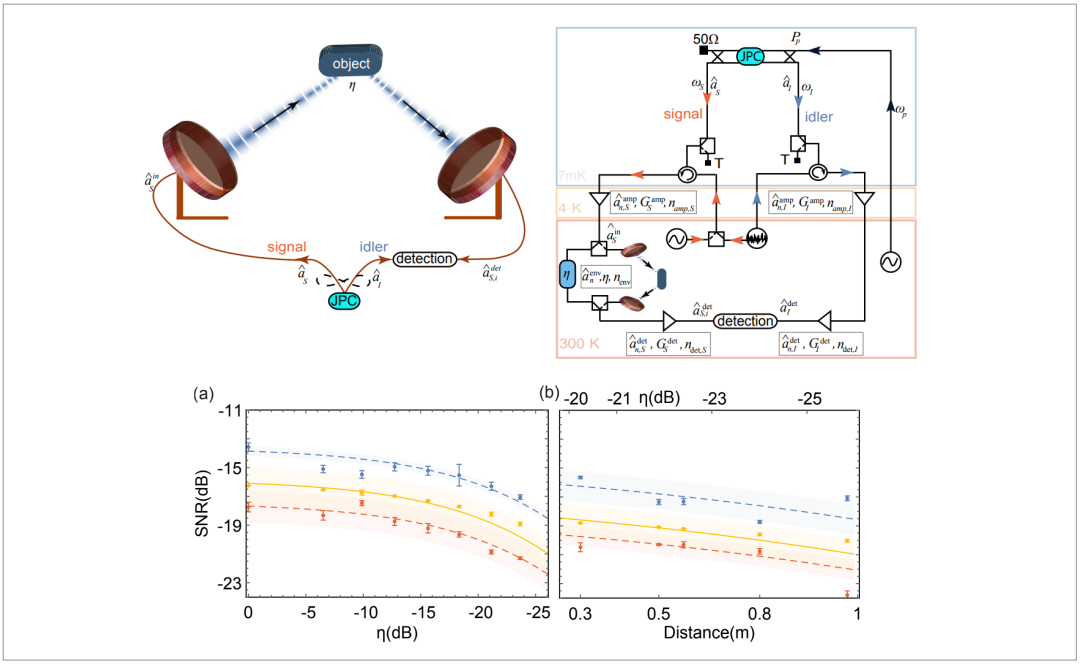
※ Physical Review Letters 114, 110506 (2015)

⑦ 2020년 오스트리아 과학기술연구원에서 'Microwave quantum illumination using a digital receiver'라는 제목으로 극저온(7mK)에서 Josephson Ring Modulator라는 초전도 소자로 이중 모드 진공 압축 상태를 생성한 후 상온에서 1미터 거리에 있는 물체를 탐지하는 실험을 하였다. 그 결과, 이중 모드 진공 압축 상태가 결맞음 상태(표준 양자 상태)와 고전 상관관계 열상태(고전 레이다 신호와 유사한 소스)보다 물체 탐지 성능(신호 대 잡음비)이 우수하다는 것을 보였다. 각각의 출력 모드에 헤테로다인 측정(Heterodyne detection)을 한 후, 후처리(postprocessing) 과정을 통하여 digital phase conjugate 수신기 방법을 고려하였다. 이 방법은 고전 한계를 뛰어넘는 양자 이득은 관찰할 수 없었지만, 마이크로파 얽힘 상태를 이용하여 상온에서 물체 탐지 실험을 한 유일한 경우다.[244)]

243) Physical Review Letters 114, 110506 (2015)

244) Science Advances 6, eabb0451 (2020)

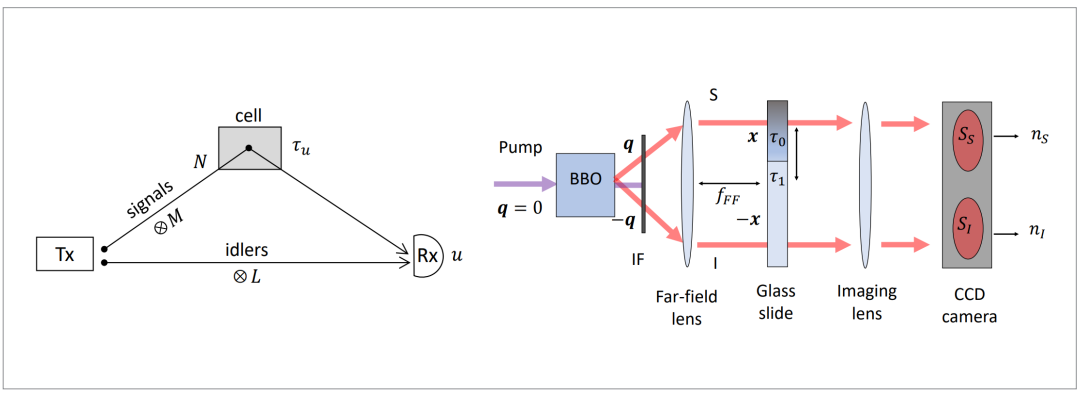
그림 II-2-89 디지털 수신기를 이용한 마이크로파 양자 조명



※ Science Advances 6, eabb0451 (2020)

⑧ 2021년 이탈리아 국립 계측 연구원(INRIM)에서 'Experimental quantum reading with photon counting'이라는 제목으로 이중 모드 진공 압축 상태가 결맞음 상태보다 광학적 메모리로부터 정보를 읽어내는데, 더 우수하다는 것을 보였다. 참고로, 0과 1의 정보를 투과율이 1과 0.996인 유리 슬라이드로 구현하였고 CCD 카메라로 광자 수를 측정하였다. 얽힘과 아주 간단한 광학 시스템으로 구현했다는 것이 특징이며, 이분법으로 물체를 구별하는 다른 모델들에도 적용 가능할 것으로 기대된다.[245)]

그림 II-2-90 광자 수 측정을 이용한 양자 리딩(Quantum reading) 실험

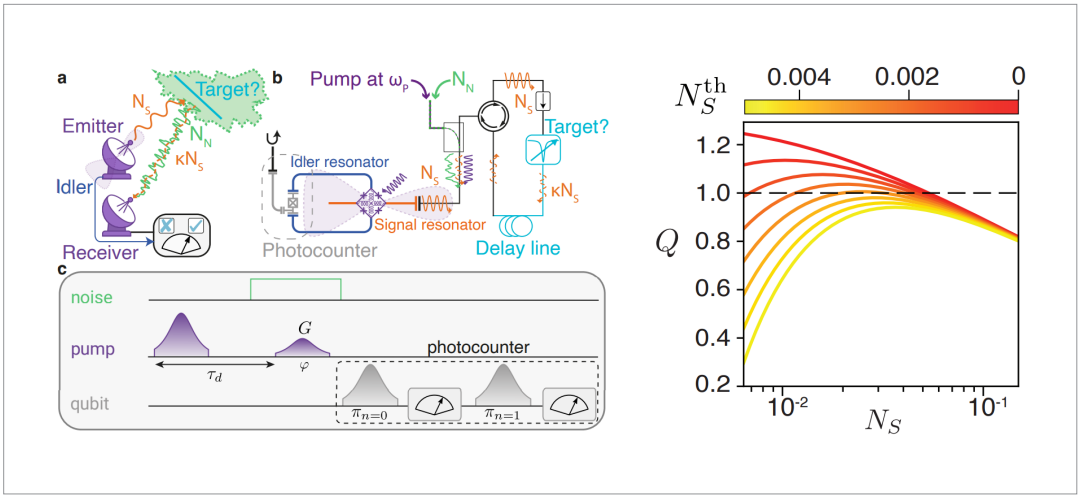


※ Science Advances 7, eabc7796 (2021)

245) Science Advances 7, eabc7796 (2021)

⑨ 2023년 프랑스 리옹 CNRS에서 'Quantum advantage in microwave quantum radar'라는 제목으로, 극저온(15mK)에서 Josephson Ring Modulator라는 초전도 소자로 이중 모드 진공 압축 상태를 생성한 후 이중 모드 진공 압축 상태를 사용하는 것이, 결맞음 상태를 사용하는 것보다 물체 탐지 오류율이 낮으며 양자 이득이 20%나 발생하는 것을 신호 대 잡음비의 비율로 관찰하였다. 광학 매개 증폭기(Optical Parametric Amplifier)를 이용한 측정 방법을 극저온에서 고려한 것으로, transmon qubit을 이용해 광자 수를 0, 1, 2까지만 측정하였음에도 불구하고 양자 이득을 보았다. 2020년 오스트리아 그룹과 달리 모든 실험을 극저온에서 수행하였다는 것이 특징이다.[246)]

그림 II-2-91 극저온에서 광학 매개 증폭기 방법을 이용한 양자 조명 실험



※ https://doi.org/10.1038/s41567-023-02113-4

(3) 적용 분야

양자 계측은 아직 기초적인 연구가 진행 중이며 다중 변수 양자 센싱, 분산 양자 센싱과 양자 조명으로 나누어 생각할 수 있다. 다중 변수 양자 센싱과 분산 양자 센싱은 양자 네트워크, 중력 기울기 센서, 중력파 측정, 암흑 물질 탐지, 질병 탐지 등에 유용할 것으로 예상된다. 양자 조명은 고정된 거리에서 물체의 유무를 확인하는 이론으로, 양자 레이다의 가장 간단한 모델이다. 이는 잡음이 심한 환경에서 물체를 구별하는 문제뿐만 아니라 양자 채널 및 상태 구별에도 적용하여 볼 수 있다. 양자 조명의 변형으로 물체의 정보 0과 1을 읽어내는 양자 리딩에 관해서도 연구가 진행되고 있다. 물체의 거리, 속도, 사이즈까지 고려된 연구가 이루어진다면, 근거리 센싱뿐만 아니라 원거리 센싱, 더 나아가 양자 레이다까지 적용 가능할 것으로 기대된다.

246) https://doi.org/10.1038/s41567-023-02113-4

제3절 국내 양자센싱 R&D 동향

1. 양자관성센서

가. 양자중력센서

(1) 기술 동향

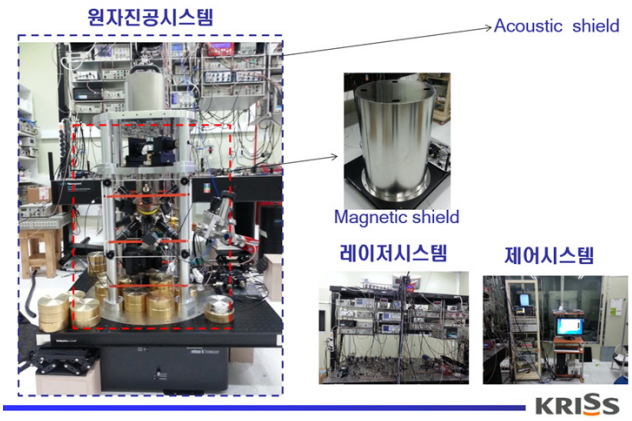
국내에서는 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)을 중심으로 세계 최고 수준의 원자간섭계 기반 양자중력센서 연구가 수행되고 있다. KRISS, KIST, 나노종합기술원, 전남대 등의 연구팀은 세계 최고 수준의 고감도 양자중력센서를 개발하는 연구수행 중이며, 여러 분야에서의 활용도를 높이기 위해 양자중력센서 소형화 연구도 함께 진행하고 있다. 중력지도 작성 및 중력 항법, 자원 탐사 등을 위한 '탑재형 양자중력센서' 개발, 화산 및 지진 감지를 목적으로 야외 현장에 적용할 수 있는 '현장용 양자중력센서' 개발을 위해 집중적인 투자와 독려가 필요한 실정이다. 한편 최근에는 원자간섭계 기반의 양자중력구배 센서 연구도 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 양자중력구배 센서를 중력센서와 같이 사용할 경우, 중력지도 및 중력 항법, 지하 구조물 및 자원 탐사 등의 정확도를 높일 수 있기 때문이다. 또한 도심 지하 구조물의 위치 및 변형, 지하수 변화 및 이로 인한 싱크홀 발생 등의 감지에 활용도가 높아, 국내에서도 양자중력구배 센서 개발 연구의 필요성이 날로 커지고 있다.

(2) 연구 동향

① 2009년부터 2014년까지 KRISS, 국방과학연구소(Agency for Defense Development, ADD), 명지대, 교원대, 고려대 등에서는 양자관성센서를 위한 원자간섭계 기초 연구 및 관련 연구를 수행했다.

② KRISS는 2011년부터 원자간섭계 기반 양자중력센서의 개발 연구를 시작했다. 또한 2019년부터 2022년까지 지원된 '양자센서 핵심 원천기술 개발 사업'을 통해, 이동이 가능한 양자중력센서 구현을 위한 핵심기술과 소형화를 위한 기초 원천기술 연구를 수행하고 있다. 이를 통해 KRISS가 개발 중인 양자중력센서는 세계 최고 수준의 성능을 보여주고 있다.

그림 II-2-92 KRISS에서 개발 중인 양자중력센서



※ kriss.re.kr

그림 II-2-93 KRISS의 양자중력센서 성능 비교표

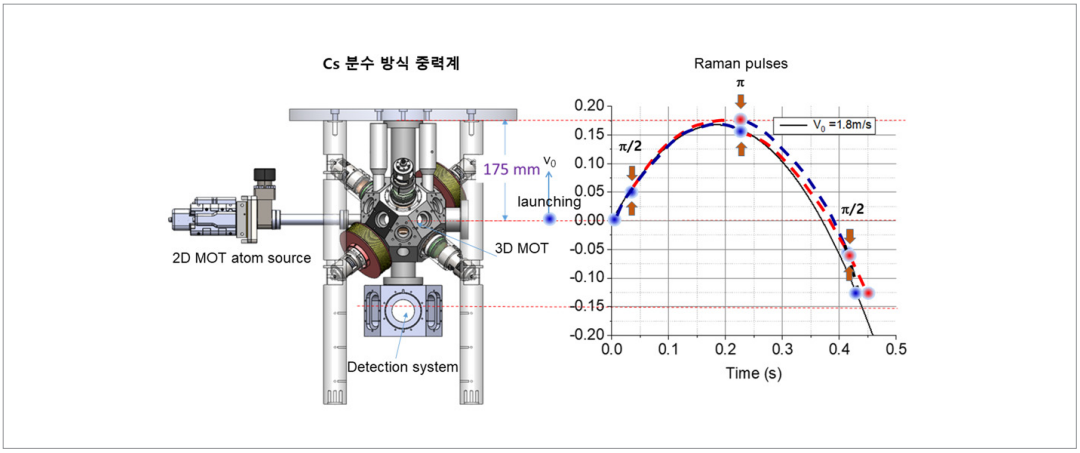
항목 (단위)	고전 중력계	프랑스 (SYRTE)	독일 (홈볼트)	미국 (Stanford)	중국 (NIM)	중국 (CNS)	한국 (KRISS)
정확도 (nm/s^2)	20	50 wavefront	△30 wavefront	30 No wave	△50 wavefront	N/A	<50 wavefront
감도 ($nm/(s^2\ Hz^{1/2})$)	150	57 vibration	96 vibration	80 vibration	440 vibration	42 detection	56 vibration
정밀도	>10 nm/s^2 @1day	2 nm/s^2 @1000s	0.5 nm/s^2 @1day	N/A	2 nm/s^2 @30000s	3 nm/s^2 @200s	0.7 nm/s^2 @1day
간섭시간 T (ms)	-	80	260	160	70	300	80
반복률 (Hz)	> 0.1	3	0.7	0.8	1	1	2
방식	프리즘 자유낙하	자유낙하	원자분수	원자분수	자유낙하	원자분수	자유낙하

(△: 불확도 평가가 엄밀하지 않아 추가적인 불확도 평가가 필요한 경우를 나타냄)

※ kriss.re.kr

③ 세계 최초로 sub-μGal의 정확도를 가진 고정밀 양자중력 센싱 기술 개발을 위해 원자분수 방식의 세슘 원자 양자중력계 개발 연구를 KRISS와 KIST 공동으로 진행하고 있다.

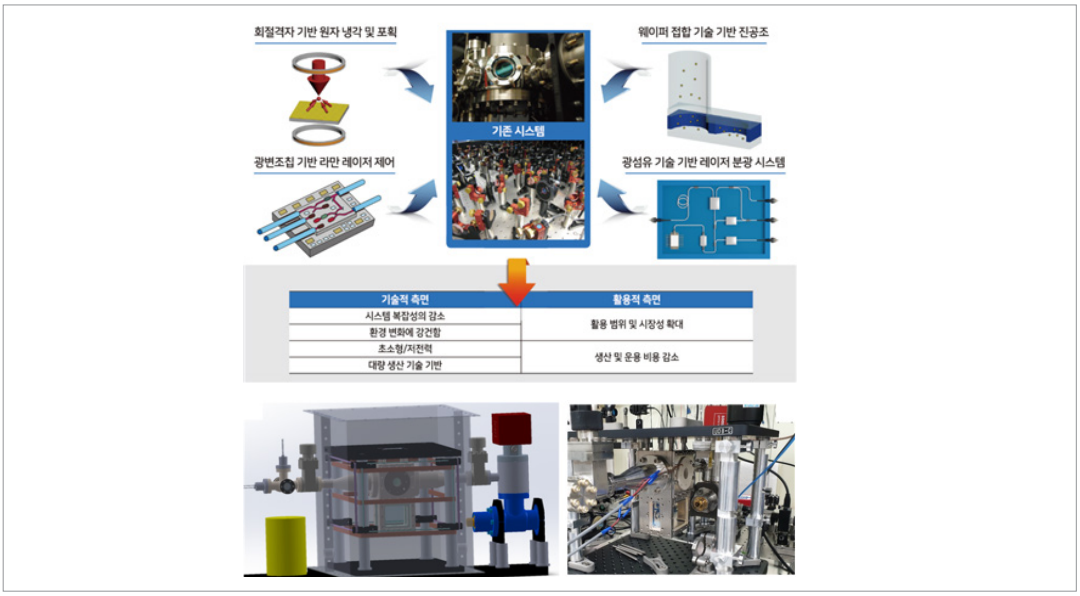
그림 II-2-94 KRISS의 개발중인 원자분수방식의 양자중력센서



※ kriss.re.kr

④ 양자중력센서의 소형화를 위한 핵심기술 개발 연구를 KRISS, 나노종합기술원, KIST, 전남대에서 공동으로 수행하였다. KRISS와 나노종합기술원은 레이저 냉각시스템의 소형화를 위해 자기-광 포획(grating Magnetic-Optical Trap, gMOT) 연구를 수행했다. 나노종합기술원에서 MEMS 공정을 이용해 grating을 제작하고, KRISS에서 grating 평가 및 gMOT 연구를 수행하는 방식이었다. 또한 두 기관은 진공조 소형화를 위해 웨이퍼 접합 기술 기반의 진공조 개발 연구를 함께 수행하고 있다. 한편 KIST와 KRISS는 원자간섭계에 필수적인 라만레이저 시스템의 소형화를 위해 단일측파대 광변조칩 기반의 라만레이저 연구를 공동으로 수행하고 있으며, 전체 레이저시스템 소형화를 위한 광섬유 기반 레이저 분광시스템 개발 연구는 전남대와 KRISS가 함께 수행하고 있다.

그림 II-2-95 양자중력센서 소형화 핵심기술 개념도 및 사진

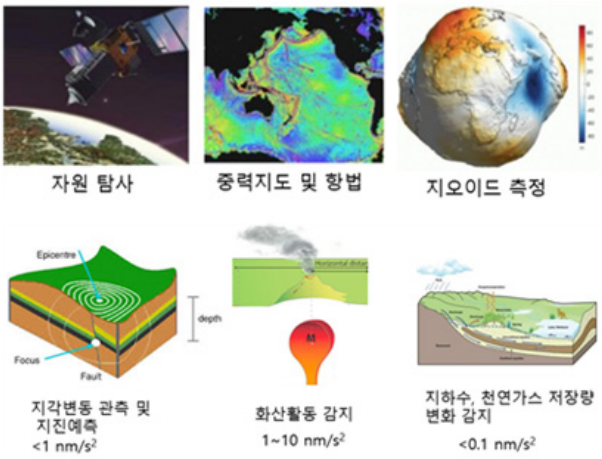


⑤ KRISS에서는 2023년부터 저온 원자간섭계 기반의 양자 중력구배 센서 개발 연구에 착수하였다.

(3) 적용 분야

양자중력센서는 우주·국방 분야에서 양자중력항법에 적용이 가능하며, 도심 내 지하 구조물 및 수층 파악과 같은 안전 분야, 화산 및 지진 등의 사전 감지를 통한 자연재해 대비, 위성이나 항공기 또는 선박 등의 운송 수단에 탑재해 자원탐사 등의 광범위한 분야에 활용할 수 있다.

그림 II-2-96 양자중력센서 적용 분야



※ wikipedia.org, asu.cas.cz 등 집필진 작성

① 국가 안전망을 위한 고감도 양자 중력 센싱에 활용

- 중력분포 및 변화 측정을 통한 지하 구조, 지층변화 등을 감지
- 지진파 감지를 통한, 지진 진원지, 지진 발생시점 등 정밀 측정
- 지하수 분포, 변화 등의 지구 내부 중력 구조 측정을 통한 지질 안전 측정

② 중력분포 측정을 통한 자원 탐사에 활용

- 고감도, 고신뢰도, 재현 가능한 중력 측정으로 지구 내부 분포 측정을 통한 자원 탐사

③ 無-위성 항법용 중력 센서

- GPS 사용이 불가한 해저지역의 중력지도 작성
- 양자 중력 센싱 기술을 이용한 중력항법(내비게이션)

그림 II-2-97 초정밀 無-위성 항법 시스템 개념도



※ wikipedia.org, asu.cas.cz 등 집필진 작성

④ 국가 중력 표준기로 활용

- 국가 중력 표준기로 사용하여 국가 중력기준점 측정 및 소급성 제공
- 지구 지오이드 측정에 활용
- 중력상수 측정, 미세구조상수 측정, 중력파 검증 등의 기초과학 및 정밀 측정과학에 활용

나. 양자 가속도센서

(1) 기술 동향

관성항법에 필요한 양자 가속도센서는 원자간섭계 기반의 고정밀 가속도센서와 비교적 정밀도가 높으면서도 소형인 광역학계 기반의 양자 가속도센서로 크게 나눌 수 있다. 원자간섭계를 기반으로 중력, 가속도, 회전속도 등을 측정할 수 있는데, 측정하고자 하는 물리량에 따라 원자간섭계의 구성 및 동작을 다르게 조절한다. 원자간섭계를 적절히 구성해 동작하면 가속도와 회전속도를 동시에 측정할 수 있으며, 이렇게 두 물리량을 동시에 측정할 수 있도록 개발된 양자센서를 양자나침반(Quantum Compass)이라고 부른다. 원자간섭계 기반의 고정밀 가속도센서는 레이저 냉각된 원자를 이용하기 때문에 비교적 크기가 크다. 따라서 위성, 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재해 관성항법용으로 사용하는 것이 주목적이다. 반면 소형의 광역학계 기반 양자 가속도센서는 자동차 같은 비교적 작은 운송 수단에 탑재하거나 휴대해서 사용하기 위한 목적으로 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 원자간섭계 기반의 양자가속도계 연구는 아직 국내에서 시도된 바가 없으며, 원자간섭계 등의 관련 기술은 KRISS의 양자중력계 개발을 통해 관련 기술들을 확보하고 있다. (양자중력계는 중력가속도를 측정하는 장치로 양자가속도계의 한 종류라고 할 수 있다.)

② 양자 가속도센서 개발을 위한 양자기여 광역학계의 설계 및 제작 기술 연구는 시작 단계이며, KRISS 등의 출연연과 고려대, 서울대, 건국대 등의 대학이 기초기술 확보를 위해 연구하고 있다.

(3) 적용 분야

양자 가속도센서를 사용함으로써 외부 신호에 대한 의존도를 줄이고 우주, 수중, 사이버 공격, 대기반사 등의 외부 영향으로 인해 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있다. 향후 항공우주항법, 자율주행, 행성 탐사, 의료 등의 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 보인다.

다. 양자회전센서

(1) 기술 동향

관성항법에 필요한 양자회전센서는 원자간섭계 기반의 고정밀 회전센서(자이로)와 비교적 정밀도가 높으면서도 소형인 양자회전센서로 크게 나눌 수 있다. 앞서 양자 가속도센서 항목에서 기술했듯이, 원자간섭계를 기반으로 가속도와 회전을 동시에 측정할 수 있게 만들면 양자나침반이 된다. 원자간섭계 기반의 고정밀 양자회전센서는 레이저 냉각된 원자를 이용하기 때문에 비교적 크기가 크다. 따라서 위성, 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재해 관성항법용으로 사용하는 것이 주목적이다. 반면 소형의 양자회전센서 중 하나인 원자스핀 자이로(Atomic Spin Gyroscope)는 자동차 같은 비교적 작은 운송 수단에 탑재하거나 휴대해서 사용하기 위한 목적으로 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 2010년대 초기에 ADD, 고려대, KRISS에서 원자간섭계 기반의 자이로(Gyro, Gyroscope) 개발을 위한 연구가 수행됐으며, 2014년에는 자이로를 구현해 회전속도 측정을 시도했다. 그러나 그 이후부터 현재까지 원자간섭계 기반의 양자회전센서에 대한 후속 연구는 진행되지 않고 있다.

② 2014년부터 ADD를 중심으로 KRISS, 부산대 등에서 원자스핀 자이로 연구를 수행하고 있으며, 바이어스 안정도가 0.2 deg/h인 자이로 시작품을 개발했다. ADD는 자이로의 핵심부품인 제논이 들어간 원자증기셀을 직접 제작하고 있으며,[247] 산업체 등에 기술이전 하고 있다.

247) Lee et al. (2021), Yim et al. (2022)

(3) 적용 분야

양자회전센서를 사용함으로써 외부 신호에 대한 의존도를 줄이고 우주, 수중, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향으로 인해 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있다. 향후 항공우주항법, 자율주행, 행성 탐사, 의료 등의 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

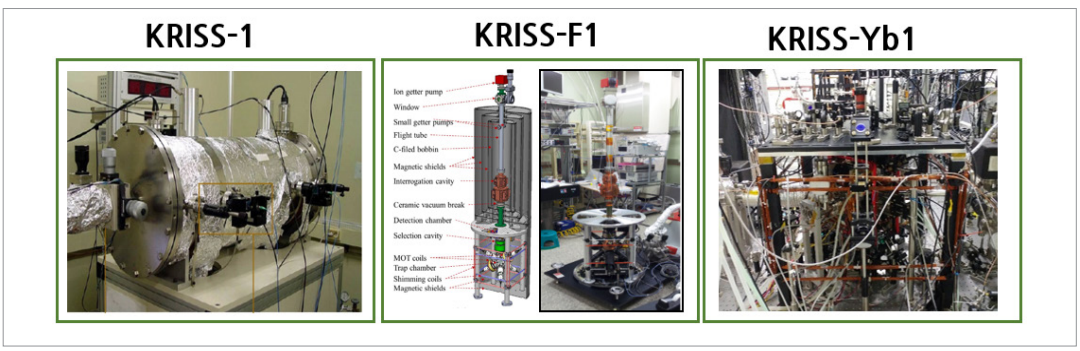
2. 양자시간·주파수센서

가. 초고정밀 원자시계

(1) 기술 동향

국내에서는 주로 KRISS를 중심으로 대학 및 산업체와 협력하여 초고정밀 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며, 시간의 단위인 초의 정의 실현, 국가 시간 표준, 기본 물리상수측정 등의 기초 연구 목적으로 연구되고 있다. 최근 한국형 항법위성시스템(KPS) 사업이 착수됨에 따라 위성지상국 시간 및 주파수 유지 및 동기용으로 개발되고 있다. 우주용, 항법시스템 등에서 높은 안정도와 정확도를 가진 시계가 요구됨에 따라 이동이 가능한 이동형 광시계 연구도 시작되었다.

그림 II-2-98 KRISS에서 개발한 원자시계



* (왼쪽) KRISS의 광펌핑원자시계 KRISS-1
(가운데) 원자분수시계 KRISS-F1
(오른쪽) 광시계 KRISS-Yb1〉

※ KRISS

(2) 연구 동향

① KRISS는 30년 이상 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며 광펌핑원자시계, 원자분수시계, 광시계 등을 개발하고 있다.

② 광펌핑원자시계는 1980년대부터 기초 연구를 시작해 2009년 성능평가(불확도 평가)까지 완료했고, 2009년 BIPM(국제도량형국)에 1차 주파수표준기(KRISS-1으로 명명)로 보고했다. 보고

된 KRISS-1의 정확도는 1×10^{-14}였으며 주파수안정도 1×10^{-15} @ 1d를 기록했다.

③ 원자분수시계는 레이저 냉각된 원자를 이용하며, 원자의 레이저 냉각 기술은 1990년대부터 KRISS를 중심으로 서울대, 고려대, 부산대, 전남대 등에서 연구하고 있다. 현재 KRISS의 원자분수시계인 KRISS-F1의 정확도는 약 2×10^{-16} 수준이다. 한편 2022년부터는 한국형 항법위성시스템(KPS)을 위한 원자분수시계 개발 연구에 착수하였다.

④ 광시계 연구는 2000년대 초반부터 KRISS를 중심으로 전국의 대학들이 협력해 진행되고 있다. 2021년 KRISS는 정확도 2×10^{-17} 수준의 이터븀 광시계인 KRISS-Yb1을 개발하고 BIPM에 초의 2차 표현 주파수표준기로 보고했다. 광시계 연구는 정확도 10^{-18} 달성을 목표로 계속 진행 중이며, 2022년에는 관성항법 등에 적용할 수 있는 이동형 광시계에 대한 기초 연구가 시작됐다.

(3) 적용 분야

초고정밀 원자시계는 국가 시간 표준, 우주 측지, 지오이드 측정 등의 기초 과학연구에 적용할 수 있다. 또한 우주, 방송, 통신 등의 산업체에서 사용 중인 원자시계들을 교정하기 위해 활용되기도 하며, 한국형 항법위성시스템(KPS)의 지상국 시각시스템 운영에도 적용된다. 한편 이동형 초고정밀 원자시계는 초정밀 관성항법에 필수적인 시각 및 주파수 공급원으로 사용될 수 있다. 이를 활용해 에너지 및 통신과 같은 미래 스마트 네트워크부터 기후 변화 모니터링과 휴대 전화에 이르기까지, 다수의 사용자에게 양자센서 서비스를 제공할 것으로 전망된다.

나. 초소형 원자시계

(1) 기술 동향

양자시간센서 중 크기나 소모 전력이 매우 작아서 다양하게 활용될 수 있는 원자시계를 초소형 원자시계로 분류한다. 초소형 원자시계에는 MMES 기술을 이용한 원자증기셀 및 물리부 제작 기술과 고집적 회로 기술 등이 적용된다. KRISS, 나노종합기술원, ㈜넵코어스 등에서 연구 및 개발됐으며, 최근 KAIST와 KRISS는 초소형 이광자 원자시계와 결합한 On-Chip 기반의 광주파수 합성기를 개발하기 위해 활발한 연구를 진행 중이다.

(2) 연구 동향

① 2014년부터 2020년까지 민군겸용기술개발 과제로 KRISS, 나노종합기술원, ㈜넵코어스 공동으로 초소형 Chip-Scale 원자시계에 대한 개발 연구를 수행했다.

그림 II-2-99 개발된 초소형 Chip-Scale 원자시계

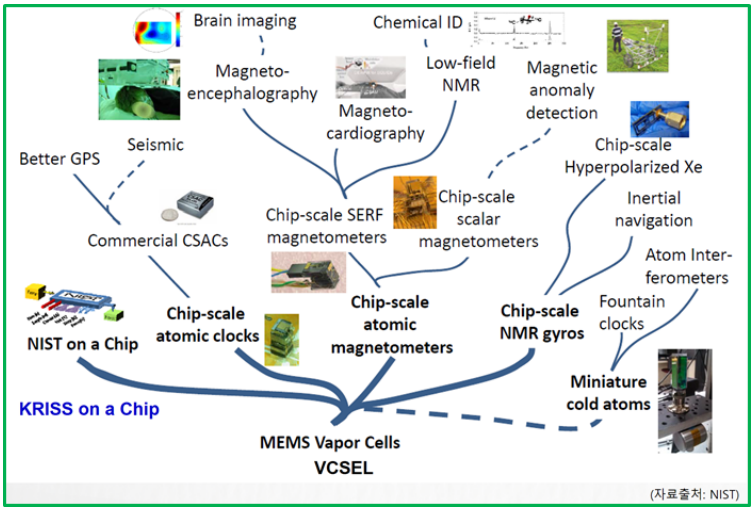


크기 25 cm^3, 소모전력 370 mW

※ KRISS, 나노종합기술원, (주)넵코어스

② MEMS 기술을 이용한 초소형 원자증기셀 기술과 VCSEL 기술을 적용했다. 이 기술들은 초소형 자기장, 전기장 등 여러 센서에 적용할 수 있으며, 국내에서 처음 연구해 핵심기술을 확보했다. 이러한 기술들은 국내의 초소형 자기장 센서, 초소형 광파수 합성 기술 연구 등에 활용되고 있다.

그림 II-2-100 Chip-Scale 원자시계 기술의 파급 분야



※ NIST

③ 2019년부터 KAIST와 KRISS의 공동연구팀은 과학기술정보통신부의 과제로서, 고신뢰성 양자센서를 위한 이광자 원자시계와 초소형 광주파수 합성기를 개발 및 연구하고 있다.

(3) 적용 분야

방송, 통신, 자동차, 항법 등 거의 모든 첨단 장비에는 기본적으로 기준 시각 및 주파수 공급원이 내장돼 있으며, 지금까지는 주로 수정발진기나 소형의 고정밀 원자시계가 사용돼왔다. 그러나 크기와 소모 전력을 크게 줄인 초소형 원자시계의 성능이 고정밀 원자시계에 근접함으로써, 최근 수정발진기와 소형 원자시계를 조금씩 대체해 나가고 있다. 한편 산업용 장비, 계측 장비 등에는 여러 가지 센서들이 사용되고 있는데, 이러한 센서들은 주기적으로 교정을 받아야 한다. 이런 경우 이광자 원자시계 기반의 광주파수 합성기 센서를 이용한다면, 자체 교정이 가능할 뿐만 아니라 측정 신뢰도를 높일 수 있다는 큰 장점이 있다.

다. 소형 고정밀 원자시계(위성탑재형 원자시계)

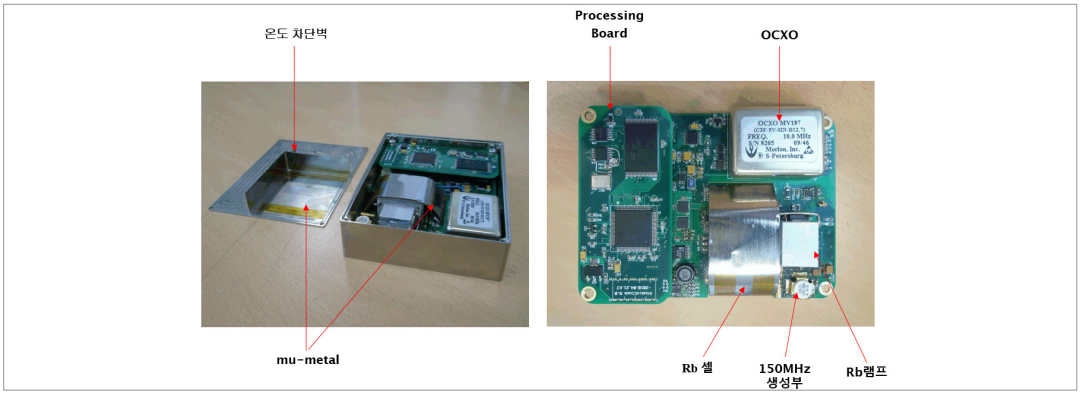
(1) 기술 동향

양자시간센서 중 정밀 장비에 내장하거나 단독 이동이 가능한 크기로 정확도가 10^{-11}~10^{-12} 수준인 원자시계를 소형 원자시계로 분류한다. 소형 원자시계는 1~9cm 크기의 원자증기셀을 이용하며, 광원으로는 원자램프나 다이오드 레이저가 사용된다. KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 소형 고정밀 원자시계 개발 연구를 수행했으며, 최근 KRISS는 ADD 및 산업체와 협력하여 한국형 항법위성시스템(KPS)의 위성탑재용 고정밀 원자시계 개발 연구를 함께 수행 중이다.

(2) 연구 동향

① 2006년부터 2010년까지 민군겸용기술개발 과제로 KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 소형 고정밀 원자시계 개발 연구를 수행했다.

그림 II-2-101 KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 개발한 소형 고정밀 원자시계



※ KRISS, (주)넵코어스

② KRISS는 2010년대부터 위성탑재형 원자시계 개발을 위한 기초 및 응용 연구를 수행 중이다.

③ 2022년부터 KPS 위성탑재형 원자시계 개발을 위해 KRISS를 중심으로 ADD, 산업체 등이 협력해 연구를 수행하고 있다. 원자증기셀 제작은 ADD에서, 전자회로 제작은 산업체에서 담당하고 있다.

④ KRISS는 차세대 위성탑재용 원자시계 개발을 위한 기초 연구를 수행하고 있다.

(3) 적용 분야

방송, 통신, 항법 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 항법 위성시스템의 위성탑재용으로 활용되고 있다. 우주 산업이 활성화됨에 따라, 우주 분야에서도 고정밀 원자시계에 대한 필요성 및 수요가 증가할 것으로 보인다.

라. 초소형 광주파수합성기

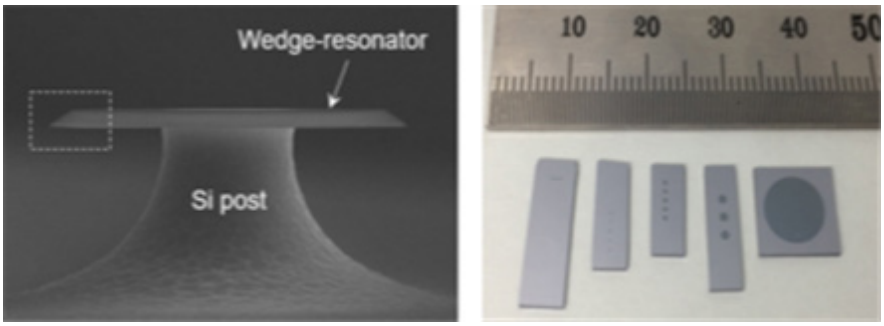
(1) 기술 동향

원자기반 시간/주파수 센서를 이용하여 다양한 물리량들을 측정 및 교정하는 미래형 양자센서는 어디에서나 최고의 정확도와 안정도 구현이 가능하다. 향후 널리 보급될 양자센서의 자체 보정을 위한 소형 표준 광주파수 발생장치 개발의 필요성이 대두되고 있는데, 이를 위해서는 단순히 표준장치의 소형화를 넘어서 양자 센서가 요구하는 정확도와 정밀도를 충족시킬 수 있을 만한 성능을 지닌 초소형 광주파수합성기가 필요하기에, 이에 대한 개발 연구도 수행하고 있다. 양자 기술 기반의 고정확도(high-accuracy) 원자 주파수 표준, 고정밀도(high-precision) 광주파수 안정화 기술 및 초소형(miniaturized) 나노포토닉스 기반 광주파수빗을 결합한 고신뢰도(highly-reliable) 양자센서 광주파수 합성기를 개발하는 한편, 양자 이득(quantum enhancement)을 위해 광-원자 상호작용을 극대화하는 온칩 융합플랫폼(on-chip hybrid platform) 요소 기술 개발 연구를 수행하고 있다.

(2) 연구 동향

① 한국과학기술원(KAIST)과 KRISS는 초소형 광주파수합성기 개발을 위한 연구를 지속하여 수행하고 있으며, 이 과정에서 성능지표인 Q값(quality factor)이 5×10^{8} 인 온-칩 광공진기를 개발하였고. 제작된 실리카(SiO_2) 공진기를 바탕으로 솔리톤 광빗 생성에 성공하였다.

그림 II-2-102 칩 상에서 제작된 원반형 실리카 광공진기



② KRISS와 KAIST는 광주파수기준기를 위해 칩-스케일 증기셀에서 이광자 전이를 이용한 광주파수 안정화를 통해 5×10^{-11}의 안정도를 얻었다.

(3) 적용 분야

초소형 광주파수합성기는 현장적용 양자센서의 정확도 보정을 위한 초소형 표준신호 생성장치, 재사용되는 고성능 일반 센서 교정하기 위한 기준기 등으로 활용이 가능하다. 중력, 주파수, 자기장, 전기장과 같은 물리량 측정 시 고전 센서의 한계 극복, 새롭게 정의된 SI 단위의 범용적 보급, 고성능 일반 센서들에 기반한 차세대 분산형 센싱 네트워크 시스템 구축, GPS 등의 위성항법이나 무-위성 항법시스템과 같은 초소형 고정확도 시간표준이 필요한 분야 등에 직접 적용이 가능할 것이다.

3. 양자 전기장·자기장 센서

가. 양자전기장 센서

(1) 기술 동향

양자전기장 센서의 경우 주로 리드버그 원자 기반의 측정 기술이 개발되고 있으나, 아직 국내에서는 관련된 연구 결과가 거의 없다. 그러나 최근 들어 양자전기장 센서의 중요성이 점점 높아지면서 한국물리학회가 Rydberg Focus 세션을 만들고, 한국센서학회도 양자센서 분과를 만드는 등 관련분야에 많은 관심이 쏟아지고 있다.

(2) 연구 동향

① KRISS와 부산대는 2015년부터 2017년까지 리드버그 원자에 기반한 전자기유도투과 현상을 관측했으며, 마이크로파 대역 및 밀리미터파 대역 RF 전기장의 크기 측정 연구를 수행했다.

② 5G 및 6G를 활용한 초연결 시대를 대비하기 위해 단일 시스템으로 1GHz부터 1THz까지 전기장이 가능한 양자전기장 센서 기반 전자기파 측정연구가 KRISS, ETRI, 부산대 공동연구팀에 의해 2021년부터 진행되고 있다.

③ 2016년 부산대학교는 리드버그 원자 분광시스템에서 전자기유도투과 현상 및 Autler-Townes Splitting 주파수를 측정한 결과를 보고한 바 있다.[248)]

(3) 적용 분야

자율주행, IoT, 인공지능 등의 기술을 바탕으로 하는 초연결 시대를 대비하기 위한 고주파 대역의 전기장 측정 기술이며, 관련 시장의 개화 시 급격히 증가하는 무선 통신 시장을 선점할 수 있을 것으로 예상된다. 단일 센서로 광대역의 측정이 가능하고 DC부터 GHz 이하 저주파 대역까지 측정할 수 있어 기존의 대형 안테나 시장을 대체하기 위한 소형화 기술로도 주목받고 있다.

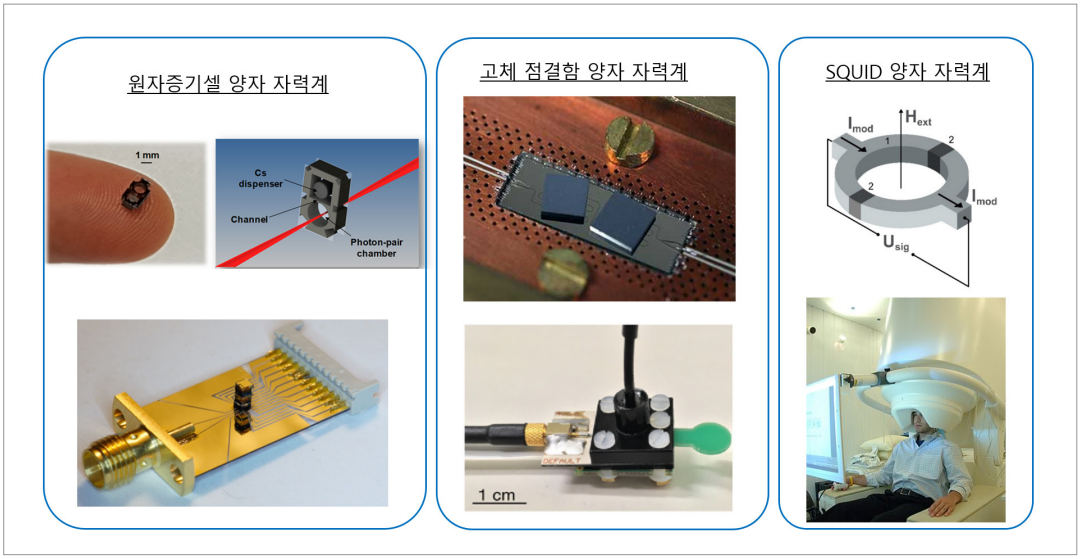
나. 양자자기장 센서

(1) 기술 동향

양자자기장 센서는 서울대, 부산대, GIST, UNIST, 고려대, 한양대 등의 대학교와 KIST, KRISS, ADD 등의 정부출연연구기관을 중심으로 원자자력계, 고체 점결함 자력계, SQUID 등이 활발히 연구되고 있다. 원자증기셀 기반 자력계의 경우 부산대, KRISS, ADD 등이 대표적인 연구기관으로 국방, 산업 분야 등에 자기장 센서를 활용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. pT/√Hz 이하의 높은 민감도를 보여주고 있고, 최근 칩스케일 원자증기셀 제작에 관한 연구도 수행하고 있다. 다이아몬드 NV 센터 기반 자력계의 경우 고려대, 서울대, KRISS, KIST 등이 대표적인 연구기관이며, 단일 NV 센터와 앙상블 NV 센터를 이용해 DC 및 AC 자기장을 정밀 측정하는 연구가 진행 중이다. 단일 NV 센터로는 수십 nT/√Hz 수준, 앙상블 NV 센터로는 수십 pT/√Hz 정도의 민감도를 보여 세계 최고 수준에 근접해 있으며, 최근 소형 자력계 개발 연구도 활발히 진행하고 있다. SQUID의 경우 오랜 연구를 바탕으로 뇌자도/심자도 측정 기술을 기업에 이전할 정도로 높은 수준의 기술력을 보유하고 있으며, SQUID를 활용해 나노미터, 마이크로미터에서 자기장을 이미징하기 위한 연구가 진행 중이다.

248) Kwak et al. (2016)

그림 II-2-103 양자자기장 센서의 대표적인 예



※ TU Wien, J.Kitching NIST, Felix M et al.(2021), MeSH

(2) 연구 동향

① 원자증기 기반 양자자기장 센서의 경우 국내에서는 KRISS, ADD 등의 정부출연연구기관과 서울대, 고려대, 부산대 등의 대학을 중심으로 10~15년 이상 연구가 진행돼왔다. 다이아몬드 NV 센터 고체 점결함 기반의 양자자기장 센서의 경우 국내에서는 KRISS, KIST 등의 연구기관과 고려대, 서울대, GIST, UNIST 등의 대학을 중심으로 5년가량 연구가 진행되고 있다.

② 원자증기셀을 기반으로 다양한 방식의 원자자력계 개발과 이를 이용한 생체자기 측정, 자기장 통신 등의 연구가 부산대, KRISS, ADD, ETRI를 중심으로 진행되고 있다.

③ 국내 기술 수준은 NV 민감도를 기준으로 봤을 때 많은 발전을 이뤘지만, 다이아몬드 성장, Decoherence, Micro-Fabrication 등의 다양한 연구가 진행되지 못하는 한계를 갖고 있다.

④ 부산대는 민감도 200 $fT/Hz^{0.5}$ 수준의 원자자력계 기술을 확보하고, ETRI와 함께 원자자력계를 이용한 자기장 통신 연구를 진행하고 있다.

⑤ 부산대, KRISS, ADD 등에서는 초자, MEMS 기반의 소형 원자증기셀 제작을 진행 중이며, 이를 통해 산업화가 가능한 소형 자력계를 개발하고자 연구하고 있다.

⑥ KRISS는 2x2x1.5mm3 수준의 칩스케일 원자증기셀 제작 기술을 확보했고, 이때 민감도는 300 $pT/Hz^{0.5}$ 수준이다.

⑦ 고려대는 단일 NV 센터와 앙상블 NV 센터를 이용해 나노미터에서 마이크로미터까지 자기장 이미징 연구를 수행하고 있다. 단일 NV 센터 기반 수십 $nT/\sqrt{Hz}$ 수준의 자기장 민감도를 보여줬고, 최근에는 다중 스핀 큐비트를 활용한 민감도 극대화 연구를 진행하고 있다. 한편 앙상블 NV 센터를 이용해 cm 크기의 소형 자력계를 개발했고, LG전자와의 협업을 통해 이를 산업 및 의료

분야에 활용할 수 있는 연구를 진행하고 있다.

⑧ KRISS는 다이아몬드 NV 센터를 이용해 DC-자기장 민감도를 60 pT/√Hz 또는 30 nT/√Hz·㎛^{2}으로 보여줌으로써 세계 최고 수준의 기술력에 근접했음을 알 수 있다.

⑨ GIST, UNIST는 다이아몬드 NV 센터뿐만 아니라 SiC 내 점결함을 이용한 양자자기장 센싱 연구를 수행하고 있다.

⑩ 한국산업기술대학교는 다이아몬드 소재의 국내 개발을 위한 연구를 진행 중이다.

⑪ 원자력연구소는 고체 점결함 생성을 위한 다양한 이온 주입 연구를 진행하고 있다.

⑫ KRISS의 SQUID 기반 뇌자도/심자도 측정시스템을 해외(호주 Compumedics) 및 국내업체(AMCG) 등에 기술이전 해줄 정도로 매우 높은 수준의 기술력을 보유하고 있다.

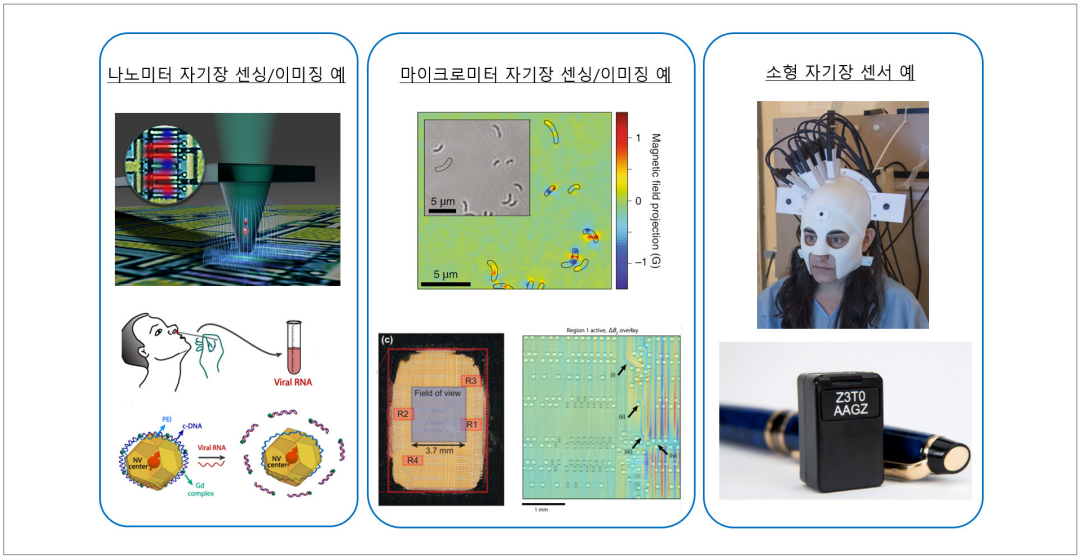
⑬ KIST-고려대-KRISS는 다이아몬드 기반 양자자기이미징 원천기술 개발 연구를 공동으로 수행하고 있다.

⑭ KRISS 연구팀은 동작중인 리튬이온 배터리 외부에 발생된 자기장으로부터 내부 리튬이온 전류 분포를 이미징하는 연구를 수행중이다.

(3) 적용 분야

정밀 자력계를 이용해 표적에 의한 지구자기장 왜곡이나 표적에서 발생하는 미세 자기장을 측정함으로써, 국방탐지 분야에서부터 산업 안전 분야에 이르기까지 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 또한 소형 상온 자기장 센서 어레이를 제작해 헬멧 형태의 Wearable 뇌자도 이미징 디바이스로 만들면 뇌 진단 같은 의료 분야에서부터 가상현실 등의 BCI(Brian Computer Interface)를 활용한 다양한 산업 분야에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 고민감도, 고분해능 자기장 이미징이 가능한 고체 점결함 기반의 자력계를 활용해 나노미터, 마이크로미터 영역에서 발생하는 미세 자기장 신호를 이미징할 수 있다. 이를 통해 극소량의 샘플만으로도 바이러스, RNA를 측정해 질병 및 감염의 조기 진단을 가능하게 하고, 단백질의 3차원 구조분석 및 나노/마이크로미터 수준의 NMR 측정과 MRI 이미징을 가능하게 하는 등 다양한 바이오 및 의료 분야의 기초 연구에 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 그뿐만 아니라 고분해능 자기장 이미징은 첨단 산업의 결함 분석 및 소재/물성 특성 파악에 활용할 수 있다. 예를 들어 반도체나 배터리의 미세 영역에서 발생하는 결함을 정밀 진단해 공정 수율을 높이는 등 첨단 산업에서의 활용도 기대하고 있다.

그림 II-2-104 양자자기장 센서 활용 예시



※ Fraunhofer IAF, Sage et al. (2013), quspin.com

4. 양자광학센서

(1) 기술 동향

양자광학센서는 양자광원의 양자이득 특성을 이용한 센싱 기술이며 양자이미징, 양자현미경, 양자분광학, 양자가스센싱, 양자라이다 등 다양한 분야에서 활발한 연구가 이뤄지고 있다. 기존의 광학센서는 고전 광원을 이용하기 때문에 분해능 한계, 감도(Shot-Noise) 한계가 근본적으로 존재하는 반면, 양자광학센서는 고전 계측 기술의 한계를 뛰어넘는 고분해능, 고감도 계측을 가능케 한다. 양자광학센서는 양자광원을 이용하기 때문에 고품질의 양자광원 생성 및 제어 등 양자광원 기술 파트와 양자이미징, 양자현미경 등 센싱 시스템 기술 파트로 나눌 수 있다. 양자광원 기술의 경우 자발매개하향변환, 자발사광자혼합 등 비선형 기반 양자광자쌍 기술은 KRISS, ADD, ETRI, 포항공대, 부산대 등이 광원 생성 기술을 갖고 있으며, 이를 활용한 양자광학 연구를 활발히 진행 중이다. 원자증기셀 기반의 양자광원 기술은 부산대, KRISS가 대표적인 연구기관이며, 단일 방출체 기반의 양자광원 기술은 UNIST, ETRI, KIST, KAIST에서 반도체 양자점, 점결함을 이용한 확정적 양자광원 생성, 광섬유 결합을 통한 고효율 광원을 확보하기 위해 활발히 연구하고 있다. 국내 연구기관에서 다양한 플랫폼으로 양자광원의 기술 개발이 이뤄지고 있는 것에 반해, 양자광학센싱 시스템 기술은 상대적으로 뒤처지는 상황이다. 최근에는 비선형 기반 양자광원 기술을 이용해 고전적 감도 한계 이상의 특성을 가지는 양자현미경, 양자 고스트 이미징 기술 등의 시도가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① 부산대는 원자앙상블에서 생성된 고품질 양자얽힘 광원 개발에 성공해, 독보적인 플랫폼을 확보했다. 고품질 양자광원을 이용한 양자얽힘 교환 실험에 성공함으로써 장거리 양자통신의 가능성을 보여줬으며, 원자앙상블에 기반한 양자광원으로 유도 결맞음 연구를 수행하고 최초로 구현한 바 있다. 이 결과는 향후 양자이미징, 분광 기술 개발에 활용될 것으로 기대되고 있다.

② ETRI는 단일 방출체 기반의 양자광원 기술, 비선형 기반 양자광자쌍 기술 등을 확보하고 있다. 최근 정부 연구과제를 통해 양자이미징 및 양자현미경 연구를 수행 중이며, 비선형 기반 양자광원 모듈 연구와 함께, 고전 광학 감도(Shot-Noise) 한계를 뛰어넘는 계측이 가능한 양자이미징 연구를 수행하고 있다. 생체 조직 측정 등 실제로 활용이 가능한 양자현미경 개발 연구를 수행 중이다.

③ UNIST, KIST, ETRI, KAIST 공동연구 그룹은 반도체 양자점을 이용한 단일 방출체 기반 양자광원 연구를 수행하고 있다. 최근 정부 주관 연구과제를 통해 가시광 파장뿐만 아니라 통신대역 적외선 파장 대역에서 고효율의 확정적 양자광원 생성 연구를 수행하고 있으며, 다양한 양자기술에 활용이 가능하도록 소자 모듈화를 위한 연구를 수행하고 있다.

④ 양자광원의 하나인 압축광을 활용해 고전 광학의 한계를 뛰어넘는 고감도 중력파 검출이 가능함이 알려져 있다. KAIST와 한국천문연구원에서 양자광원을 이용해 중력파를 검출하기 위한 기초 연구를 수행 중이다.

⑤ ADD는 양자 원격 탐지 관련 양자레이더 개발 및 얽힌 광자의 송수신에 관한 연구를 수행하고 있다. 원격 물체 탐지를 위해 광학 레이더를 위한 양자조명 연구, 광원 파장 변환 연구, 고스트 이미징 연구 등을 수행 중이다.

⑥ KRISS는 유도 간섭 현상을 이용한 양자 이미징 연구, 광학 단층 이미징 기술 등 양자 광학 센싱 기초 연구를 수행 중이다.

⑦ KIST-KAIST 공동연구팀은 반도체 기반 저밀도 양자점을 공정을 통해 위치 선택하는 기술을 개발하여, 반도체 기반 단광자 광원의 생산 수율을 높이는 기술을 발표하였다.

(3) 적용 분야

양자광학센서는 양자이미징, 양자현미경, 양자분광학, 양자가스센싱, 양자라이다 등 다양한 분야에서 활용할 수 있다. 고감도, 고분해능 측정이 가능한 양자현미경 기술은 생체 시료 측정 등 의료 및 제약 분야에 적용할 수 있으며, 반도체 결함 검사 등 산업 분야에도 적용할 수 있다. 양자가스센싱 기술은 고감도 가스 누출 탐지가 가능해 산업 안전 분야에 적용할 수 있다. 원격 물체 탐지 특성 향상이 가능한 양자 고스트 이미징, 양자라이다 기술은 국방 분야에 적용이 기대된다. 한편 양자광학센서를 구현하기 위한 양자광원을 확보하기 위해서는 관련 검출기 기술이 필요한데, 검출기 기술은 극미량의 광자를 측정하기 위한 시장으로 응용될 수 있다. 현재 양자광학센서 기술은 실험실 수준에서 구현된 초기 연구 단계에 있으며, 최근 해당 기술들이 빠르게 성숙함에 따라 의료, 산업, 안전, 국방 분야 등에서 다양하게 적용될 것으로 전망된다.

5. 양자계측

(1) 기술 동향

양자계측의 경우, 국내에서는 주로 광학 시스템을 이용한 다중 변수 양자 센싱(Multiparameter quantum sensing), 분산 양자 센싱(Distributed quantum sensing) 실험 연구와 양자 조명(Quantum illumination) 이론 연구가 이루어지고 있다. 다중 변수 양자 센싱 및 분산 양자 센싱은 한국과학기술연구원(KIST)에서 실험이 활발히 이루어지고 있고, 양자 조명은 국방과학연구소(ADD)에서 이론 및 실험 연구가 진행되고 있다. 그리고 표준과학연구원과 경북대학교에서 이론 연구가, 한양대학교와 중앙대학교에서 실험 연구가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① 한국과학기술연구원(KIST)에서는 광섬유 기반의 광학 실험 장치를 이용하여, 2 광자 다중 모드 상태를 생성해 다중 변수 양자 센싱,[249] 분산 양자 센싱에 관한 실험 연구가 이루어지고 있으며, 광학적 손실 및 기타 잡음에 대한 연구도 진행 중이다.

② 국방과학연구소에서는 양자 조명 이론 연구가 이루어지고 있다. 특히, 양자 조명의 측정 방법에 대해서 활발히 이루어지고 있고, 양자 채널의 영향까지 고려한 연구도 이루어졌다.[250] 실험과 관련하여서는 현재 진행 중이다.

③ 표준과학연구원(KRISS)에서는 다중 변수 추정 이론 연구가 이루어지고 있다.

④ 경북대학교에서는 손실률(loss rate) 센싱 및 양자 조명에 대한 이론 연구가 진행 중이다.

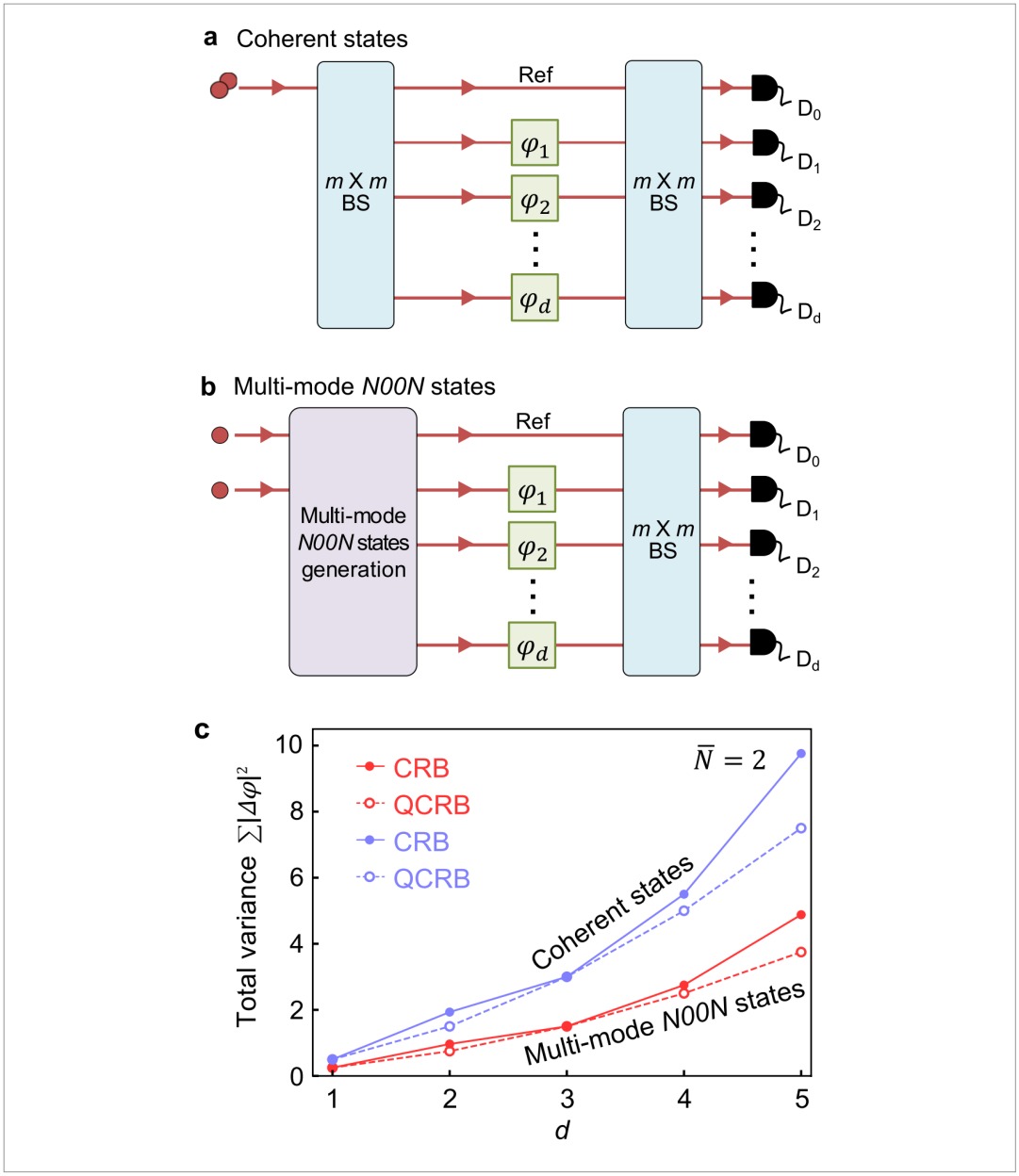
⑤ 한양대학교에서는 손실률 및 흡수율 관련 센싱 실험 연구가 진행 중이다.

⑥ 중앙대학교에서도 양자 센싱 실험에 대한 연구가 막 시작되었다.

249) Nature Communications 12, 5211 (2021)

250) Physical Review Research 5, 033010 (2023)

그림 II-2-105 N00N상태를 이용한 다중 위상 센싱



※ Nature Communications 12, 5211 (2021)

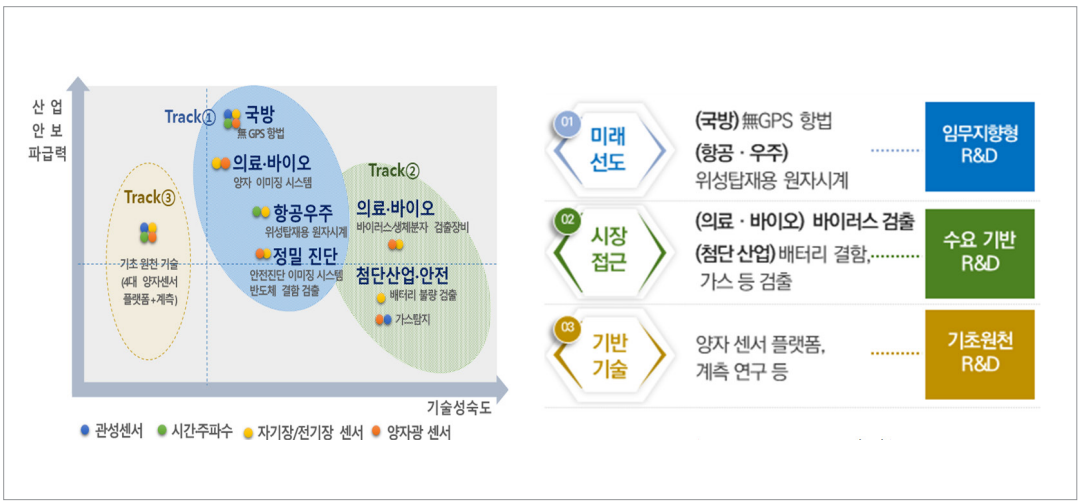
(3) 적용 분야

다중 변수 양자 센싱 및 분산 양자 센싱에서 손실률까지 고려한 연구가 이루어진다면 고감도 측정을 요구하는 양자 네트워크의 안정성 측정, 다 물체(Many-body) 시스템 특성 분석, 온도 및 열 탐지, 살아있는 세포의 점도 측정 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 양자 조명은 물체의 거리, 속도, 사이즈까지 고려된 연구가 이루어진다면 양자 라이다, 양자 레이다, 항법 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

제4절 시사점

최근 양자기술을 선도국 수준으로 도약시키기 위해 국가적으로 국가 전략기술 및 양자기술 산업 경쟁력 확보를 위한 지원 방안을 모색하고 있으며, 국가적인 양자센서에 대한 정의 및 분류 작업을 하는 동시에, 국가적인 양자기술 로드맵을 마련하였다. 이전에도 양자기술에 대한 로드맵이 작성된 적이 있지만, 당시와는 달리 국가 전략기술 확보 및 첨단 양자산업의 경쟁력 확보 차원에서 광범위하고도 체계적으로 이뤄지고 있다.

그림 II-2-106 국내 양자센서 기술현황 및 국가 지원 방식(안)

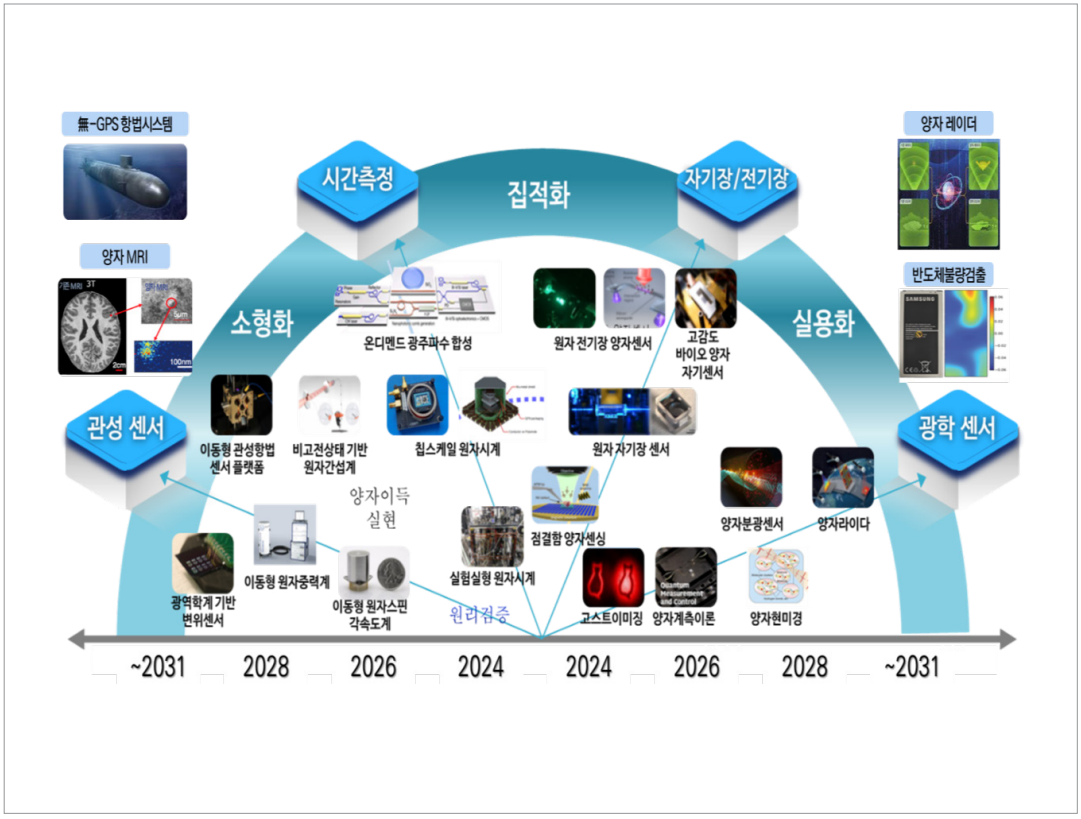


* (왼쪽) 양자센서 세부기술별 현황
(오른쪽) 유형별 지원방식(안)

전 세계적으로 無-위성 항법시스템 개발 등 국방·안보와 국민 안전을 위한 양자센서 개발이 진행되고 있으며, 광자·원자·점결함 등 양자상태를 활용하여 고전적인 측정 한계를 극복하고 소형화, 집적화를 통한 실용화 단계로 진입하고 있다. 특히, 주요국들은 국방·첨단·공공분야로 양자센서 이용을 확대하고 있으며, 양자센서 기술 연구를 통해 기존 센서의 한계를 극복할 수 있는 양자 MRI 개발 등 첨단 신산업 창출에 노력 중이다.

국가적으로 고전센서의 기술 한계를 극복하고, 다양한 양자센서 플랫폼 원천기술 연구를 통하여 양자기술의 기초원천기술을 확보하는 것이 중요하다. 또한 소형화·집적화 및 이후 실용화 연구 등의 핵심 응용기술 연구를 통하여 국방, 바이오·의료 산업, 반도체 산업 등에 활용하는 한편, 양자기술 기반의 신산업을 창출할 수 있도록 체계적이고 지속적인 연구 지원이 절실해 보인다.

그림 II-2-107 국내 양자센서 발전 전망도



양자센서 R&D 동향 관련 몇 가지 시사점을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 세계 각국은 양자센서 기술을 국가 전략기술로 보호하고 세계 시장에서의 독점력 확보를 위해 노력하고 있다. 이러한 국제 환경을 고려할 때 양자센서 기술 확보는 국가의 미래를 좌우하는 매우 중요한 요소이므로, 국가 차원에서 체계적으로 양자센서 기술 연구를 지원해야 한다. 둘째, 세계 주요국에서 진행하고 있는 양자센서 관련 R&D와 비교하면, 국내 양자센서 관련 연구비 규모나 연구 분야가 매우 부족한 상황임을 알 수 있다. 국가의 장기적인 안목으로 양자센서 기술을 위한 체계적인 연구지원, 인력 양성 등의 시스템 구축이 필요하다. 셋째, 양자센서 기술은 기존 한계를 극복하기 위한 새로운 기초 연구와 더불어 고난도의 축적된 양자기술이 요구된다. 이러한 축적된 양자기술들은 단기간에 획득할 수 없으며 오랜 기간의 연구와 경험이 필요하다. 이를 위해서는 단발성의 양자센서 과제 지원이 아닌 장기적인 일련의 다단계 양자센서 사업이 요구된다. 넷째, 양자산업화에 필요한 다양한 부품 공급망 및 양자지원기술에 대한 기업들의 요구사항을 고려할 때, 반도체 기술, 레이저 기술, 소재 기술, 전자측정 기술 등 다양한 기존 기술의 고도화가 필요하다. 마지막으로 양자센서 산업 활성화를 위해서는 산·학·연 간의 공동연구, 기술 및 정보 교류, 인력 교류 등이 활발해질 수 있도록 적절한 환경 조성이 필요하다. 또한 중국, 프랑스 등 양자기술 선진국에서 대학과 기업뿐만 아니라 정부출연연구소에서 개발된 양자 시스템 및 소

재·부품을 스핀오프(Spin-off) 기업을 통해 신속하게 산업화하고 시장을 선점하는 사례를 벤치마킹할 필요도 있다. 양자기술과 같이 높은 수준의 기술이 필요한 분야의 경우 대규모 시장이 형성되지 않은 상황에서 출연연이 즉시 시장으로 진입한다면 산업체로 연결되는 시간을 줄일 수 있을 것이다. 이러한 점들을 장기적으로 기획해 제대로 실행한다면 의료 제약, 산업 안전, 국방 분야 등에 다양하게 적용돼 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 전망된다.

제3장
국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향

제1절 개요

기존 컴퓨터 시스템에서 통용되던 무어의 법칙(Moore's law)은 한계에 도달했고, 양자컴퓨팅은 그 한계를 넘어서는 새로운 컴퓨팅 방식을 우리에게 제시하고 있다. 양자컴퓨팅은 양자이론의 법칙을 따르는 미시세계의 물리시스템을 활용해 실제 구현할 수 있으며, 양자원리를 바탕으로 계산을 수행함으로써 기존 컴퓨팅에서 불가능하다고 여겨졌던 연산을 수행할 수 있다. 대표적인 예로 현재 컴퓨팅에서 어렵다고 여겨지는 소인수분해 문제를 양자컴퓨팅은 손쉽게 해결한다. 이러한 양자컴퓨팅 능력을 잘 활용한다면 국방, 금융, 의료, 인공지능 등 다양한 첨단산업에서 엄청난 경제·사회적 효과를 기대할 수 있다. 따라서 세계 주요 국가들은 정부 주도의 R&D 투자를 통해 발 빠르게 대응 중이며, 민간 부문 투자와 산·학·연의 연구개발도 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 본 백서는 이러한 양자컴퓨팅 R&D 현황에 대한 이해를 돕기 위해 양자컴퓨팅을 구현하는 하드웨어 기술을 중심으로 국내외 R&D 동향을 살펴보고자 한다.

양자컴퓨팅은 큐비트(Qubit)의 물리적 근원에 따라 다양한 플랫폼 영역에서 구현되며, 양자컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어는 양자중첩상태를 유지하는 결맞음 시간(Coherence Time) 내에 연산 가능 횟수를 증대시키는 방향으로 발전하고 있다. 또한 양자컴퓨팅의 역사는 수십 년간 지속된 이론적 검증과 실험적 증명을 거쳐 명확한 목표를 가진 실용화 및 범용화 단계에 이르렀고, 이를 구체화한 '확장형 양자컴퓨터'를 개발하려는 노력이 전 세계적으로 진행 중이다. 현재 개발 중인 양자컴퓨팅은 플랫폼에 따라 각각의 특성이 명확하며, 다음과 같이 크게 여섯 종류로 구분할 수 있다.

첫째, 초전도 큐비트 기반의 양자컴퓨팅 플랫폼이다. 초전도는 전자빔 및 포토리소그래피, 식각 공정 등과 같은 기존에 확립된 반도체 공정을 이용해 제작할 수 있어, 확장성이 높아 현재 가장 주목받는 양자컴퓨팅 플랫폼이다. 다른 플랫폼이 이온, 원자 등의 에너지 준위가 정해진 순수한 양자상태를 이용하는 것과 달리, 초전도 큐비트는 양자상태의 에너지 준위를 '설계'할 수 있어 원하는 작동 주파수 대역을 정의 가능한 장점이 있다. 초전도 큐비트는 회로의 구성 요소 및 배열에 따라 전하(Charge) 큐비트, 위상(Phase) 큐비트, 플럭스(Flux) 큐비트, 트랜스몬(Transmon) 큐비트, 플럭소니움(Fluxonium) 큐비트 등 다양하게 구분되며, 각각의 장단점이 명확하므로 개발에 참여한 기업들도 저마다 다른 플랫폼을 채택해 양자컴퓨터를 구축하고 있다.

두 번째로 소개할 양자컴퓨팅 플랫폼은 반도체 양자점이다. 전계효과 트랜지스터와 흡사한 반도체 소자의 게이트 구조로 에너지 우물을 형성하고, 그곳에 갇힌 전자나 홀 같은 입자의 스핀 상태를 큐비트 에너지 준위로 사용하는 방법이다. 스핀 자유도와 전하 자유도의 혼합 정도에 따라 단일전자 스핀

큐비트(큐비트당 1개 양자점), 싱글렛-트리플렛 큐비트(큐비트당 2개 양자점), 교환 상호작용 큐비트(큐비트당 3개 양자점) 등으로 구분할 수 있다. 높은 게이트 충실도를 시연하기까지 다른 플랫폼에 비해 오랜 기간이 소요됐지만, 최근 스핀 잡음을 최소화한 동위원소 정제형 실리콘 기판의 개발과 함께 급격히 발전하고 있는 플랫폼이다. 실리콘 내부 스핀의 높은 결맞음 시간뿐 아니라 높은 충실도의 단발 측정이 가능하고, 큐비트 계의 양자제어를 위한 파라미터를 게이트 전압으로 쉽게 조절할 수 있는 특징을 가진다. 특히 모든 플랫폼 중 현대 반도체 산업의 상보성 금속산화물 반도체(Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 공정과 가장 높은 호환성을 보여, 향후 대규모 집적형 양자프로세서 제작 과정에서 70년 이상 발전해온 실리콘 산업공정을 그대로 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한, 실리콘과 같은 4족 원소로서 게르마늄(Ge)은 전자가 아닌 양공(hole)의 스핀을 이용하는 p-type 반도체 양자컴퓨팅 소재로 새롭게 부각되고 있다. 이는 같은 핵스핀 밀도에 의해 양공 스핀이 잡음이 적으며, 인위적인 마이크로 자석 공정 없이도 전기적으로 스핀을 조절할 수 있는 스핀-궤도 상호작용이 적정하기 때문이다.

셋째, 이온 트랩 기술이다. 이온 트랩은 레이저 쿨링 및 전자기적인 포텐셜을 이용해 초고진공하에서 개별 이온들을 포획하는 방법으로, 포획된 이온들의 잘 정의된 양자상태를 큐비트로 규정하고, 외부에서 레이저나 라디오파로 큐비트를 조작해 양자계산을 구현하는 기술이다. 포획된 개별 이온들은 외부 환경과 잘 분리되어 있으므로 긴 양자결맞음 시간을 가지며 초기화, 측정, 양자게이트 각각에 대한 높은 신뢰도를 보여주는 장점이 있다. 또한 포획된 이온 간에 공유하는 양자운동을 활용해, 임의의 두 큐비트 간 고신뢰도 양자얽힘도 가능하므로 상호 연결성이 높으며, 이는 이온 트랩 기반의 양자컴퓨터가 가지는 중요한 장점이다.

넷째, 양자광학에 기반한 컴퓨팅이다. 양자광학은 빛을 구성하는 근본적 단위인 광자를 이용해 광학 현상을 설명하는 이론이며, 광자는 한자리에 고정된 다른 물리계와 달리 멀리 보낼 수 있어 흔히 플라잉(Flying) 큐비트라고 부른다. 이러한 특성은 양자통신이나 양자네트워크에 적합해, 이를 이용한 양자컴퓨터/양자 시뮬레이터의 확장성 제고에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 또한 광자시스템 자체를 양자컴퓨터나 양자 시뮬레이터에 이용할 수 있는데, 이 경우 주변환경과의 상호작용으로 인한 결잃음(Decoherence)에 강인한 특성이 큰 장점이 된다. 이러한 양자광학 기반의 양자컴퓨터를 구성하기 위해선 양자광원의 생성, 제어, 검출이 필요하다. 이와 관련된 기술은 지난 수십 년간 크게 발전했으며, 최근에는 기존 슈퍼컴퓨터로 불가능했던 연산을 양자광학 기반 양자 시뮬레이터를 이용해 가능케 한, 이른바 '양자이득 실험'을 성공하기에 이르렀다. 이처럼 급격하게 발전하는 집적광학 기술을 양자컴퓨터/양자 시뮬레이터에 적용하기 위한 연구가 널리 진행되고 있으며, 이는 양자컴퓨터의 실용성을 크게 높일 것으로 기대한다.

다섯째, 다이아몬드 Nitrogen Vacancy(NV) 센터이다. 긴 결맞음 시간과 잘 정의된 광학 특성으로 인해 양자정보 기술 분야에서 주목받는 소재로 떠올랐다. 다이아몬드 NV 센터를 이용한 컴퓨팅 개발은 소재, 공정, 전자기 신호 처리 및 제어, 광학 회로설계 및 구성과 같이 다양한 분야의 기술들이 접목돼 있다. 먼저 다이아몬드 소재를 양자현상 관찰에 적합한 수준으로 성장시키고, 성장한 다이아몬드 기판의 원하는 위치에 NV 센터를 형성할 수 있어야 한다. NV 센터의 전자스핀과 주변 핵스핀들을 연산에 활용하기 위해 스핀들의 상태를 읽고, 제어하고, 작업에 필요한 시간을 충분히 확보할 수 있도록 결맞음 시간을 확장하는 기술이 필요하다. 덧붙여, 활용 가능한 큐비트의 개수를 늘리고 서로 연결이 가능하게끔 만들어 시스템의 확장성을 늘릴 필요가 있다.

마지막으로 리드버그(Rydberg) 기반의 양자컴퓨팅을 들 수 있다. 중성원자의 리드버그 원자 상태(마이크로미터 크기의 원자 상태)를 이용해 기존 컴퓨터로는 불가능한 고난도 계산을 수행할 것으로 기대된다. 중성원자를 수 마이크로미터 간격으로 이동 배치해 임의의 큐비트 연결 구조로 만드는 기술이 개발되면서 빠른 발전을 보여주고 있다. 양자단열형(또는 양자회로형과 결합한 혼합형) 양자컴퓨팅 방식으로 NP(비결정적 다항)-완전 문제를 계산하는 개념증명 실험이 완료됐고, 상업적 활용을 위한 개발 연구가 본격적으로 이뤄지고 있다.

본 장에서는 앞서 살펴본 양자컴퓨팅의 6개 플랫폼에 대한 R&D 동향을, 해외 및 국내로 각각 구분해 차례대로 서술하고자 한다. 내용 중 해외 R&D 동향을 종합적으로 이해하기 위해 플랫폼의 기술적 측면, 연구개발 현황, 실제 적용 가능한 산업 분야도 아울러 살펴볼 것이며, 국내 R&D 동향도 마찬가지로 기술 동향, 연구개발 및 적용 분야에 대한 분석을 제공하고자 한다.

제2절 해외 양자컴퓨팅 R&D 동향

1. 초전도 양자컴퓨팅

가. 초전도 큐비트

현재 초전도 양자컴퓨터를 개발하는 기업에서 채택한 큐비트 타입은 트랜스몬 큐비트(Transmon Qubit)로, 조셉슨 접합(Josephson Junction)의 에너지 E_J가 축전 에너지 E_C에 비해 50배 이상 크도록 설계돼 전하 잡음에 대한 민감도를 최소화한 큐비트 디자인이다.[251] 작은 축전 에너지를 만들기 위해서는 큰 축전 용량이 있어야 하는데, 이에 따라 축전기의 크기는 조셉슨 접합 전극보다 수십-수백 배가 큰 면적을 차지한다. 트랜스몬 큐비트에서 재미있는 점은 연구그룹마다 다른 축전기 형상을 사용한다는 것이다.

트랜스몬 큐비트의 전하 잡음 민감도를 줄이면 줄일수록 에너지 레벨의 비조화성(anharmonicity)이 줄어들게 된다. 따라서 양자게이트를 구현하기 위해 사용하는 마이크로파 펄스의 시간 폭이 좁아질수록 0과 1 정보에 해당되는 에너지 레벨 외에 다른 에너지 레벨로 전이될 가능성이 높아진다. 즉, 트랜스몬 큐비트의 낮은 비조화성은 고속의 초전도 양자게이트를 구현하는 데 큰 걸림돌로 지목된다. 또한 트랜스몬 큐비트의 고유진동수는 주로 5GHz의 값을 가지는데 이 진동수를 낮출 수 있다면 마이크로파의 에너지가 기판에 의해 손실되는 양을 줄일 수 있다. 이 두 가지의 한계를 극복할 수 있는 큐비트 타입으로 플럭소니움 큐비트(Fluxonium Qubit)가 최근 가장 큰 주목을 받고 있다. 수 GHz의 비조화성을 가지고 있어 짧은 시간에 게이트 작용을 구현할 수 있으며 100MHz 수준의 낮은 고유진동수와 근본적인 전하 잡음, 플럭스 잡음에 대한 내성으로 높은 결맞음 시간을 가진다.[252] 이러한 특성 덕분에 많은 연구그룹에서 고성능의 플럭소니움 큐비트 프로세서 제작을 위해 애쓰고 있다.

(1) 기술 동향

Google에서 사용하는 큐비트는 존 마티니(John Martinis) 교수가 UC Santa Barbara(UCSB)에 재직하던 시기에 개발된 X-mon이며,[253] 십자가 축전기 형태로 인해 2차원 사각 격자배열로 확장이 쉬워 현재 Google의 시카모어(Sycamore) 양자프로세서에 쓰이고 있다.[254] 이 X-mon은 조셉슨 접합 두 개를 이용해 Superconducting Quantum Interference Device(SQUID)라고 불리는 초전도양자간섭소자를 십자가 형태의 축전기에 연결하는데, 외부에서 수십~수백 ns의 전류 펄스를 인가함으로써,

251) Koch (2007)
252) Long B. Nguyen et al. (2022)
253) Barends (2013), Chen (2014)
254) Arute (2019)

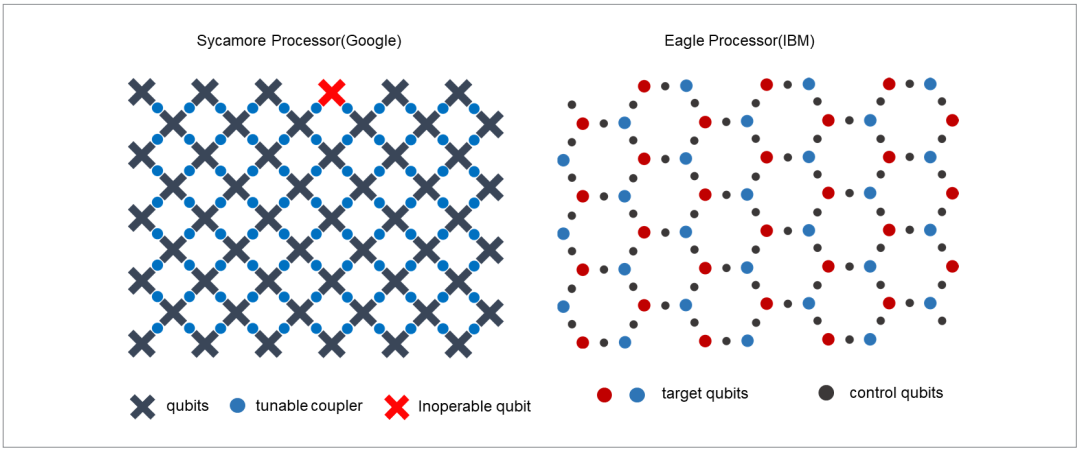
회로에 자기 플럭스를 국소적으로 변화시켜 큐비트의 작동 주파수를 조절할 수 있는 특징이 있다. 이를 이용하면 이중 큐비트 게이트 구현 시, 인접한 큐비트 중 연산을 원하는 큐비트 두 개만 같은 주파수에 위치시켜 결합을 형성하고 양자연산을 실행하게 해주며, 이 경우 양자프로세서 회로의 레이아웃이 격자 구조로 간단해진다는 장점이 있지만, 각 큐비트 주파수의 국소적 제어를 구현해야 하므로 마이크로파 입력 단자의 수가 많이 필요하다는 단점도 있다. 2023년 구글에서 보고한 양자 오류정정 논문에서 사용한 양자프로세서는 72개의 큐비트로 구성되어 있으며 로드맵에 따르면 앞으로 큐비트 수 확장에 보다 집중할 계획을 가지고 있다.[255)]

이와 달리 현재 IBM의 양자프로세서는, 전기적으로 플로팅 된 두 개의 전극이 축전기를 형성하고 둘 사이에 하나의 조셉슨 접합이 위치하는 큐비트 형태를 채택했다.[256)] 이 큐비트는 SQUID의 부재로 인해, 내외부 자기장 잡음에 민감하지 않다는 장점과 모든 큐비트의 주파수를 똑같게 만들 수 없다는 단점을 동시에 지녔다. 이러한 주파수가 다른 큐비트 간 양자게이트를 구현하는 방식을 Cross Resonance(CR) 게이트라고 부른다.[257)] 이 CR 게이트를 효율적으로 적용하기 위해서는 양자프로세서 내 큐비트 레이아웃 설계가 매우 중요한데, 이를 고려해 IBM은 Heavy Hexagonal Lattice 구조를 채택하고 있다. 이러한 CR 게이트 방식은 큐비트 주파수 조절이 필요 없고, 여러 큐비트의 주파수 조합을 이용해 이중 큐비트 양자게이트를 구현하기 때문에 적은 마이크로파 채널 수로 다수의 큐비트를 제어할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다. 즉 Google의 Sycamore와 같은 마이크로파 채널 수로 Sycamore보다 더 많은 큐비트를 제어할 수 있어 규모 확장성이 좋다. 다만 큐비트 주파수와 공진기의 주파수를 적절히 분포시켜 원하지 않는 큐비트 간 상호작용을 최소화하는 것이 중요하다. 이것은 제작공정에서 발생하는 오차로 인해 실제 작동 주파수와 설계주파수가 다른 탓에 나타나는 현상인데, 최근 IBM은 이 차이를 상쇄하기 위해서 레이저 어닐링(Laser Annealing)을 이용해 조셉슨 접합의 성질을 변화시켜, 제작된 큐비트의 주파수를 설계주파수와 같아지도록 만드는 기술을 개발했다.[258)]

큐비트 간의 상호작용을 매개하는 커플러의 경우 전하 잡음 등의 노이즈를 줄이기 위해 고정주파수로 만들어 왔으나 게이트 작용과 휴지(idle) 상황에 맞게 상호작용 크기를 조절하기 위해 SQUID를 활용한 튜너블 커플러로 바꾸고자 하는 움직임이 보인다.[259)] IBM은 2022년 433-큐비트 양자프로세서 (Osprey)를 공개하였으며 2023년 말 1121-큐비트 양자프로세서 (Condor)를 공개할 예정이다.[260)]

255) Google Quantum AI (2023)
256) Kandala (2017)
257) Chow (2011)
258) Hertzberg (2021)
259) Stehlik (2021)
260) J. Stehlik et al. (2021)

그림 II-3-1 (왼쪽) Google의 Sycamore 프로세서 (오른쪽) IBM의 Eagle 프로세서 큐비트 레이아웃



(2) 연구 동향

① 트랜스몬 큐비트 성능 향상을 위한 공정 개발 연구

초전도 양자컴퓨팅의 상용화를 위해선 지속적인 성능 향상이 필요하다. 이를 위한 가장 기본적인 방법은 초전도 큐비트 자체의 성능을 향상하는 것이며, 크게 두 가지 방향으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 현시점 초전도 양자컴퓨팅의 대표적 큐비트 플랫폼인 트랜스몬 큐비트 자체의 성능 향상이고, 두 번째는 트랜스몬 큐비트를 넘어선 신개념 큐비트의 개발이다.

초전도 큐비트의 대표적인 성능지표는 결맞음 시간(Coherence Time)이며, 이는 큐비트의 양자상태가 잘 정의된 위상을 유지할 수 있는 시간을 뜻한다. 그렇기에 큐비트의 성능이 좋다는 것은 곧 결맞음 시간이 길다는 것을 의미한다. 결맞음 시간은 큐비트가 들뜬 상태에서 기저 상태로 돌아오는 완화시간(Relaxation Time)을 나타내는 T_1, 결맞음 시간과 큐비트의 결맞음 깨짐 정보를 가진 T_2 두 가지로 구분된다. 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간은 양자프로세서에 쓰이는 기판의 마이크로파 손실 특성, 초전도 물질의 결정 구조 및 결함 특성, 조셉슨 접합 산화막의 화학적 조성 및 접합의 표면 성질 등과 밀접한 연관이 있다. 이러한 특성들은 시스템의 이준위계(Two Level Systems, TLS) 및 초전도 물질의 준입자(Quasiparticles) 등의 거동과 관련이 있다.

단일, 이중 큐비트 및 양자게이트 관련 기초연구 결과들이 보고된 후, 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간 향상을 위한 물질 기반 연구가 활발히 진행되기 시작했다. 질화티타늄(Titanium Nitride, TiN)은 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간을 획기적으로 늘려준 대표적인 물질이다. 질화티타늄은 반응 스퍼터링(Reactive Sputtering) 공정을 이용해 티타늄을 질소와 반응시켜 증착할 수 있게 만들었다. 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST) 및 IBM 연구진은 질화

티타늄을 기반으로 마이크로파 공진기를 제작해 100만 이상의 공진기 품위값(Quality Factor)을 구현했고,[261] 공진기 및 큐비트의 축전기 모두 질화티타늄으로 제작된 소자를 이용해 60 μs에 가까운 T_1과 T_2 결맞음 시간을 보고했다.[262] 질화티타늄으로 만든 소자는 알루미늄 소자와 비교했을 때, 메탈-공기층 접합에서 일어나는 유전손실(Dielectric Loss)이 10배 이상 낮다고 보고된 바 있다.[263]

초전도 양자프로세서 제작에 사용되는 대표적인 초전도 물질은 니오븀(Niobium, Nb)으로, 알루미늄과 비교해 높은 임계온도와 임계자기장 값을 갖고 있다. 또한 불소 기반 가스(SF_6, C_4F_8 등)를 이용해 쉽게 건식각 공정이 가능하다는 장점도 있다. 최근 니오븀 양자프로세서의 성능 향상을 위해 니오븀-공기 접합, 니오븀-기판 접합, 니오븀-알루미늄 접합과 같은 소자 내 물질들이 형성하는 접합 면의 표면 특성을 분석하고, 표면에 존재하는 결함을 최소화하기 위한 연구들이 활발하게 진행 중이다. 2019년 Rigetti는 초전도 양자프로세서 제작공정에서 위에 언급된 다양한 공정을 테스트하고 최적화를 수행한 결과, 평판 회로 구조에서 최대 110μs의 T_1 결맞음 시간을 기록했다고 보고한 바 있다.[264] 초전도 큐비트의 결맞음 시간에 향상을 준 공정은 실리콘 기판을 헥사메틸디실라잔(Hexamethyldisilazane, HMDS)에 노출하는 것(니오븀-기판 접합 성질 향상), 경사진(Tapered) 니오븀-실리콘 에칭 형상(니오븀-공기, 기판-공기 접합 성질 향상), 조셉슨 접합 알루미늄과 니오븀 축전기 전극 간 공통접합 면의 크기 조절(니오븀-알루미늄 접합) 등이 있다. 최근에는 니오븀-공기 접합 면에 존재하는 니오븀 산화막을 다양한 표면 분석 기법을 이용해 조사하고, 표면 특성과 큐비트, 공진기 성능을 분석하는 기초 연구도 학계에서 활발히 진행 중이다.[265]

한편, 초전도 양자컴퓨팅 분야에서 최근에 주목받기 시작한 대표적인 물질로 탄탈륨(Tantalum, Ta)을 들 수 있다. 2021년 프린스턴대학교가 발표한 연구에서는 탄탈륨을 이용해 최대 300 μs, 평균 230 μs의 T_1 결맞음 시간을 기록했다고 보고된 바 있다.[266] 이는 니오븀 기반 트랜스몬 큐비트와 비교해 최대 10배에 달하는 큰 값이며, 최근 북경양자정보과학원이 제작한 탄탈륨 기반 트랜스몬 큐비트에서 500 μs T_1 결맞음 시간이 측정됨으로서 더 큰 신뢰를 얻고 있다.[267] 2023년에 프린스턴대학교에서는 후속 연구를 진행하여 탄탈륨 물질의 온도, 마이크로파 광자수, 디바이스 모양에 따른 에너지 손실도를 체계적으로 분석하였으며 [Crowley (2023)], 예일대학교에서는 사파이어 기판 위에 탄탈륨 기반 초전도 큐비트를 제작하여 1.4 ms T_1 결맞음 시간, 2.7 ms T_2 결맞음 시간이라는 세계 최고 기록을 달성하였다.[268]

261) Vissers (2010)
262) Chang (2013)
263) Melville (2020)
264) Nersisyan (2019)
265) Premkumar (2021), Altoe (2022)
266) Place (2021)
267) Wang (2022)
268) Kevin D. Crowley et al. (2023), Suhas Ganjam et al. (2023)

② 신개념 큐비트 연구개발

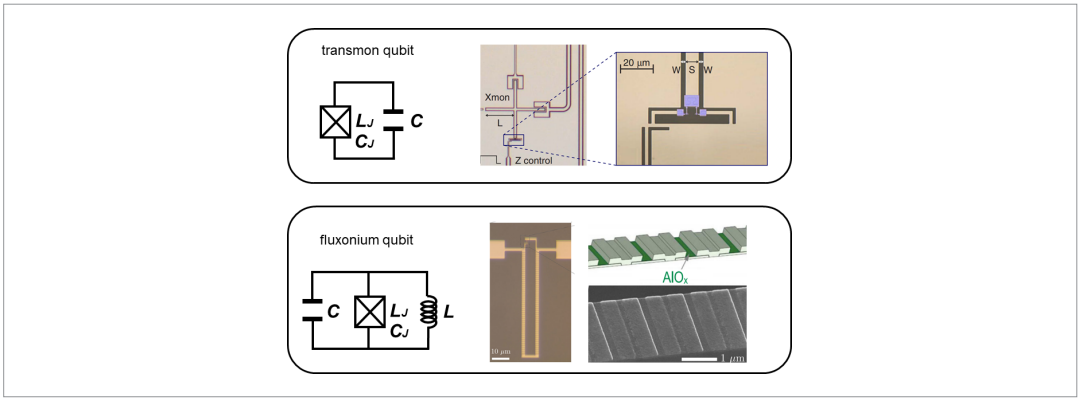
초전도 큐비트는 회로의 구성에 따라 물리적 특성이 달라지며 저마다의 장단점을 갖고 있다. 현재 초전도 양자컴퓨팅에서 대표적으로 사용되는 트랜스몬은 초전도 큐비트의 시초인 전하 큐비트(Charge Qubit)[269]에서 파생된 형태로, 회로 내 축전 용량이 큰 축전기 사이에 큐비트를 배치해 전하 잡음을 최소화한 형태이다.[270] 전하 큐비트에 대응되는 형태로 플럭스 큐비트(Flux Qubit)가 있는데, 이 플럭스 큐비트는 회로 내에서 시계 방향과 반시계 방향으로 흐르는 전류 상태를 각각 비트로 사용하는 형태이다.[271] 이 플럭스 큐비트는 높은 비선형성과 결맞음 시간을 갖지만, 소자 제작공정의 재현성이 낮아 트랜스몬에 비해 많은 관심을 받지 못했다. 최근 연구에서는 이 플럭스 큐비트를 축전 용량이 큰 축전기 사이에 배치해 비선형성을 줄이고 소자 재현성을 높인 CSFQ(Capacitively Shunted Flux Qubit)를 구현해 50~100 μs의 결맞음 시간을 보고했다.[272] 플럭스 큐비트를 이용해 양자컴퓨팅을 구현하는 기업으로는 양자어닐링 기법을 활용하는 캐나다의 D-Wave가 대표적이다.

최근 많은 관심을 받는 큐비트 형태는 플럭소니움(Fluxonium)[273] 큐비트로, 현재 트랜스몬 큐비트의 가장 큰 단점인 비선형성을 향상하는 동시에 100 μs 가량의 높은 T_1 결맞음 시간을 달성했다.[274] 플럭소니움 큐비트는 작은 면적의 조셉슨 접합 한 개가 다수의 큰 면적을 가진 조셉슨 접합 배열과 병렬로 만들어진 형태이다. 트랜스몬 큐비트가 큰 축전기와 작은 조셉슨 접합의 조합이라면, 플럭소니움 큐비트는 큰 인덕터와 작은 조셉슨 접합의 조합이라고 볼 수 있다. 이 큰 인덕터를 조셉슨 접합의 배열로 구현해야 하기에 플럭소니움 큐비트는 설계와 제작이 까다롭고, 높은 인덕턴스로 인해 1GHz 정도의 낮은 작동 주파수를 갖고 있지만, 높은 결맞음 시간과 플럭스 잡음의 감소 효과 덕분에 차세대 초전도 양자컴퓨팅 플랫폼으로 주목받고 있다. 최근 연구 결과에서는 3차원 마이크로파 공진기 구조에서 최대 400 μs의 T_2 결맞음 시간이 보고된 바 있다.[275] 2차원 양자회로 구조에서 헤비 플럭소니움(Heavy-Fluxonium) 큐비트를 이용한 단일 큐비트 측정제어 연구 결과도 최근 보고됐는데, 14MHz의 전이 주파수를 갖는 이 큐비트에서 300 μs의 T_1, T_2 결맞음 시간, 97%의 초기화 충실도, 그리고 무작위 벤치마킹 기법을 통해 99.8%의 단일 큐비트 충실도를 기록했다.[276] 축전기로 결합한 이중 플럭소니움 큐비트 소자(72.3, 136.3 MHz의 전이 주파수)에서 이중 큐비트 양자게이트 중 하나인 Controlled-Z(CZ) 게이트의 구현 연구 결과를 매릴랜드 대학 소속 연구그룹에서 발표하며, 99.2%의 CZ 게이트 충실도를 보고함으로써 플럭소니움 기반 양자프로세서 상용화에 한 걸음 더 다가섰다.[277] 해외 기업 중에서는 중

269) Nakamura (1999), Wallraff (2004)
270) Koch (2007)
271) Chiorescu (2003)
272) Yan (2016)
273) Manucharyan (2009)
274) Kou (2018)
275) Nguyen (2019)
276) Zhang (2021)
277) Ficheux (2021)

국 Alibaba와 미국 Atlantic Quantum이 플럭소니움 큐비트 기반 양자컴퓨터를 개발하기 시작했고, 최근 Alibaba에서 1GHz 정도의 작동 주파수를 가진 플럭소니움 큐비트로 80 μs의 T_1 결맞음 시간, 30 μs의 T_2 결맞음 시간, 99.97%의 단일 큐비트 충실도, 99.72%의 이중 큐비트 충실도를 보고한 바 있다.[278] 플럭소니움 큐비트 외에도 트랜스몬 큐비트를 넘어서기 위한 다양한 큐비트 타입이 제안 및 구현되고 있는데 대표적으로 높은 비조화성(anharmonicity)를 가지면서도 전하 잡음과 플럭스 잡음에 강한 유니몬 큐비트(unimon qubit),[279] 0과 1상태의 전이 확률을 낮춰 결맞음 시간을 높이는 0-π 큐비트,[280] 실험적으로 구현된 적은 없지만 0-π 큐비트의 발전된 형태인 뫼비우스 큐비트[281] 등이 있다.

그림 II-3-2 (위) 트랜스몬 큐비트 회로도 및 이미지 (아래) 플럭소니움 큐비트 회로도 및 이미지



※ Barends (2013), Nguyen (2019)

나. 초전도 양자게이트

(1) 기술 동향

양자게이트는 양자회로를 구성하는 최소한의 연산 단위이다. 만능 논리게이트인 NAND 게이트를 조합해 임의의 논리연산을 구현하는 것처럼, 만능 양자게이트를 조합해 임의의 양자논리연산을 구현할 수 있다. 초전도 양자컴퓨터에서는 만능 양자게이트 세트로 Sqrt-X, PHASE, CNOT, CPHASE, iSWAP 게이트 등을 사용한다.

단일 큐비트 게이트인 Sqrt-X와 PHASE 게이트는 큐비트 주파수 마이크로파의 진폭과 위상 등을 교정해 구동되며, 두 게이트를 조합하면 임의의 단일 큐비트 게이트를 구현할 수 있다. 단일 큐비트 게

278) Bao (2022)
279) Hyyppä (2022)
280) Gyenis (2021)
281) Weiss (2019)

이트는 대부분의 양자프로세서에서 구현 시, 99.9% 이상의 신뢰도를 보여준다.

2-큐비트 게이트는 큐비트의 주파수 조정 가능 여부에 따라 구현 방식이 다르다. IBM으로 대표되는 고정 주파수 큐비트는 교차 공진(Cross-Resonance) 효과를 기반으로 한 CNOT 게이트와[282] AC Stark-Shift 효과를 기반으로 한 CPHASE 게이트를 주로 사용한다.[283] 이러한 방식으로 구현한 2-큐비트 게이트 신뢰도는 최근 99.81%까지 보고됐다.[284] 한편 Google로 대표되는 주파수 변환 큐비트는 하나의 큐비트 에너지 레벨을 다른 큐비트의 에너지 레벨과 일치시키는 방식으로 iSWAP과 CPHASE 게이트를 구현한다.[285] 큐비트 주파수 변환이 가능한 양자프로세서는 일반적으로 큐비트 간 상호작용의 세기 또한 조작할 수 있도록 제작되며, 2-큐비트 게이트에 적용 시 상호작용의 세기를 일시적으로 강하게 설정함으로써 짧은 시간 내에 구동할 수 있다. 최근 30ns 길이의 iSWAP 게이트를 99.87% 신뢰도, 60ns 길이의 CZ 게이트를 99.76% 신뢰도로 구현한 실험 결과가 보고됐다.[286] 이 외에도 파라메트릭 게이트,[287] 비인접 큐비트 간의 게이트[288] 등 다양한 종류의 양자게이트가 활발히 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 고성능 양자게이트

초전도 양자게이트의 신뢰도는 큐비트의 결잃음, 원치 않는 상호작용 등에 의해서 제한된다. 만약 큐비트 간의 상호작용 세기를 늘리면 2-큐비트 게이트의 구동 시간을 줄일 수 있어, 큐비트 결잃음의 정도를 감소시킬 수 있다. 하지만 상호작용 세기의 증가는 원치 않는 상호작용의 세기 또한 증가시키므로 양자게이트 성능 향상에 항상 도움이 되진 않는다. 최근에는 이러한 트레이드-오프 관계를 넘어선 고성능 양자게이트를 구현하기 위한 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 그중 가장 큰 주목을 받은 연구 결과는 초전도 큐비트 간의 상호작용을 여러 경로로 구현하는 다경로 커플링(Multi-path Coupling) 기법이다. 이 방법을 적용하면 큐비트 간 상호작용의 세기는 강하게 유지한 채 원치 않는 상호작용만 세기를 줄일 수 있어, 최근 2-큐비트 초전도 양자게이트의 신뢰도가 99.8% 이상으로 향상된 결과를 보여준 바 있다.[289]

또한 트랜스몬 큐비트보다 결맞음 시간이 긴 플럭소니움 큐비트를 위한 2-큐비트 게이트를 구현하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 수치해석 시뮬레이션에 따르면 현실적인 수준의 기술로도 플럭소니움 큐비트는 99.99% 이상의 신뢰도를 가질 수 있을 것으로 예측하고 있다.[290] 최근 발표된 실험 결과에

282) Chow (2011)
283) Mitchell (2021)
284) Wei (2022)
285) Arute (2019)
286) Sung (2021)
287) Reagor (2018)
288) Yariv (2022)
289) Wei (2022), Sung (2021)
290) Nesterov (2021), Nesterov (2022), Konstantin N. Nesterov et al. (2022).

따르면 튜너블 커플러를 사용한 파라메트릭 게이트 방법으로 183 ns의 구동시간을 가진 CZ 게이트를 99.23%, 60 ns의 구동시간을 가진 fSim 게이트를 99.55%의 신뢰도로 구현하였고,[291] 교차 공진(cross resonance) 상호작용을 사용하여 70 ns의 CNOT 게이트를 99.5%의 신뢰도로 구현하였다.[292] 이는 플럭소니움 큐비트에서의 초창기 결과임을 고려할 때 보다 최고 수준의 결맞음을 갖는 플럭소니움 큐비트를 사용함으로써 보다 높은 게이트 신뢰도를 달성할 수 있을 것으로 보인다.

② 다중큐비트 양자게이트

단일 큐비트 게이트와 2-큐비트 게이트의 조합만으로도 임의의 양자연산을 구현할 수 있지만, 만약 Toffoli, Fredkin 게이트로 대표되는 다중 큐비트 양자게이트를 활용할 수 있다면 양자회로의 깊이를 상당히 줄일 수 있다. 양자연산을 올바르게 수행할 수 있는 시간이 큐비트의 결맞음 시간으로 제한되는 만큼, 양자회로의 깊이를 줄임으로써 복잡한 양자알고리듬을 구현할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 까닭에 다중 큐비트 양자게이트를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 최근 큐비트의 고에너지 레벨을 활용해 87.1% 신뢰도의 3-큐비트 CCPHASE 게이트가 구현됐고,[293] 2-큐비트 게이트의 상호작용을 3개 큐비트에 동시 적용하는 방법을 사용해 98.3% 신뢰도의 3-큐비트 iToffoli 게이트가 구현됐다.[294] 또한, 고에너지 레벨을 활용해 3-큐비트 이상의 n-큐비트 Toffoli 게이트로 확장할 수 있는 방법이 제안되어 4, 6, 8 큐비트 Toffoli 게이트가 각각 89.1%, 53.2%, 39.1%의 신뢰도로 구현되었다.[295] 하지만 고에너지 레벨일수록 결맞음 시간이 짧아 고에너지 레벨을 활용한 다중큐비트 양자게이트 구현 방법이 크게 주목을 받지는 못하였다. 그러나 최근 일반적으로 결맞음 시간이 더 긴 고정주파수 양자프로세서에서 고에너지 레벨 상호작용을 활용할 수 있는 방법이 제안되었으며 96%라는 높은 신뢰도의 3-큐비트 Toffoli 게이트를 구현하였다.[296] 이를 통해 고에너지 레벨을 활용한 다중큐비트 양자게이트를 구현하는 방식이 다시 주목받을 수 있을 것으로 기대한다.

③ 고차원 양자게이트

초전도 큐비트는 초전도 회로의 에너지가 기저 상태에 있을 때 0을, 첫 번째 들뜬 상태에 있을 때는 1을 표현한다. 만약 초전도 회로의 더 높은 에너지 레벨을 양자정보를 표현하기 위해 사용한다면 하나의 초전도 회로로 더 많은 정보를 담아낼 수 있다. 최근 들어 3개의 에너지 레벨로 양자정보를 표현하는 큐트리트(Qutrit)를 위한 양자게이트가 활발히 연구되고 있다. 단일 큐트리트 게이트의 경우, 단일 큐비트 게이트와 유사하게 에너지 레벨 간의 전이 주파수로 마이크로파를 구동하면 쉽게 구현할 수 있다. 하지만 2-큐트리트 게이트는 복잡한 시스템 때문에 다양한 게이트를 구현하지 못했는데, 구현된 한

291) Moskalenko (2022), Ilya N. Moskalenko et al. (2022)
292) Dogan (2023), Ebru Dogan et al. (2023)
293) Hill (2021)
294) Kim (2022)
295) Chu (2023), Ji Chu et al. (2023)
296) Nguyen (2023)

가지 예로는 비-공진 주파수로 초전도 회로를 구동해 97.3%의 신뢰도를 보여준 큐트리트 CZ 게이트가 있다.[297] 2021년에는 큐비트 게이트의 신뢰도를 검증하는 무작위 벤치마킹(Randomized Benchmarking) 기술을 확장해 큐트리트 게이트의 신뢰도를 검증하는 기술도 개발됐다.[298] 더 나아가 2023년에는 트랜스몬의 4개의 에너지 레벨로 정보를 인코딩하는 큐쿼트(Ququart)에 대하여 실험적으로 양자게이트를 구현하고 성능을 벤치마킹하였으며, 그 응용으로 2-큐비트 글로버(Grover) 서치 알고리듬과 VQE 화학 시뮬레이션을 하나의 큐쿼트로 구현하였다.[299] 뿐만 아니라 큐비트 기반의 양자 알고리듬을 큐트리트 알고리듬으로 효율적으로 전환하는 방법에 대한 연구가 수행되었다.

다. 초전도 양자컴퓨터의 응용 기술

(1) 기술 동향

현재 공개된 초전도 양자프로세서 중 IBM Eagle이 127큐비트로 가장 많은 큐비트 수를 가지고 있다.[300] 고전 컴퓨터의 비트 수와 비교했을 때 상당히 초라한 숫자로 볼 수 있지만, 이렇게 적은 수의 큐비트만으로도 슈퍼컴퓨터의 연산 능력을 넘어설 수 있음을 증명하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 미국의 Google은 53-큐비트 Sycamore 양자프로세서를,[301] 중국의 USTC는 66-큐비트 Zuchongzhi 양자프로세서를[302] 활용해 "Ramdom Quantum Cirucit Sampling"이라는 특정 문제에 대해 슈퍼컴퓨터보다 더 빠른 연산이 가능함을 시연했다. 이와 동시에 양자컴퓨터가 아직은 고전 컴퓨터를 뛰어넘지 못했다는 것을 보이기 위한 고전 알고리듬도 지속 발전했고, "Ramdom Quantum Cirucit Sampling" 문제에 대해 Sycamore 양자프로세서의 연산속도를 따라잡을 수 있는 고전 알고리듬이 최근 공개된 바 있다.[303]

한편, 가까운 시일 내에 양자컴퓨터가 유용하게 응용될 수 있을지도 중요한 화두이다. 가장 주목받고 있는 양자컴퓨터의 응용 중 하나인 쇼어의 소인수분해 알고리듬을 큰 규모로 시연하기 위해서는 오류정정 기술이 필요하며 상당히 많은 수의 큐비트가 필요하다.[304] 따라서 현재는 온전히 양자컴퓨터만을 사용하는 연산 대신 고전 컴퓨터와 함께 상호보완적으로 연산하는 방식이 주로 연구되고 있다. 대표적인 응용 사례로 함수의 연산은 양자컴퓨터로 수행하고, 파라미터 최적화는 고전 컴퓨터가 수행하며

297) Goss (2022)
298) Morvan (2021)
299) Liu (2023), Cao (2023)
300) Chow (2021)
301) Arute (2019)
302) Wu (2021)
303) Pan (2022)
304) Gouzien 2021

분자의 기저 에너지를 계산할 수 있는 Variational Quantum Eigensolver(VQE),[305] Quantum Approximate Optimization Algorithm(QAOA)[306] 등이 있다. 이 외에 여러 양자프로세서를 동시에 활용함으로써 보다 큰 규모의 양자컴퓨팅을 수행하는 방법도 제안됐다.[307] 또 다른 접근 방법으로는 오류완화를 통하여 오류가 많은 양자컴퓨터의 연산 결과를 신뢰할 수 있게 보정하여 양자 컴퓨터의 유용성을 보이고자 하는 노력이 시도되고 있다. 대표적으로 2023년 IBM에서는 오류완화 기술을 적용하여 127-큐비트 규모의 2D transverse-field Ising 모델 시뮬레이션을 성공적으로 수행하였다.[308] 그 결과 64-코어 고전 컴퓨터로 30시간이 걸리는 문제를 양자컴퓨터를 사용하면 9.5시간만에 계산할 수 있는 양자연산의 이득을 보였다고 주장하였으나, 이는 몇주 뒤 여러 연구자에 의해 IBM의 양자컴퓨터보다도 훨씬 빠르게 계산할 수 있는 고전 컴퓨터 알고리듬이 있다는 것이 확인되어 아직까지는 유용한 문제에 대한 양자이득을 보이지는 못하였다.[309]

(2) 연구 동향

① Variational Quantum Eigensolver(VQE) 성능 개선

현재 가장 주목받는 양자컴퓨터의 응용 중 하나는 양자화학 계산이다. Variational Quantum Eigensolver(VQE) 알고리듬을 활용하면 분자가 가장 안정화된 기저 상태의 분자구조와 기저 에너지를 구할 수 있다. VQE는 분자 상태 변수에 따른 에너지를 계산하는 양자컴퓨팅 단계와 분자 에너지를 최소화하는 변수를 찾는 고전 컴퓨팅 단계로 구성된다. 분자의 크기가 커질수록 분자 상태 변수가 증가하고, 고전 컴퓨터를 이용한 변수 최적화는 점점 어려워진다. 이러한 문제를 Barren Plateaus라고 하는데 VQE의 성능을 제한하는 가장 큰 문제로 지목되고 있다.[310] 최근에는 이 문제를 해결하기 위해 분자가 가진 대칭성을 활용해서 분자 상태 변수의 수를 줄이는 방법,[311] 이전의 연산 결과를 기반으로 양자회로를 적응형으로 수정하는 방법,[312] 변수 공간의 추가적인 정보를 얻어 Barren Plateaus를 완화하는 방법[313] 등 다양한 방법들이 연구되고 있다.

② 다체 양자시스템 시뮬레이션

고전 컴퓨터로 양자시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 시스템 규모에 따라 기하급수적인 용량의 메모리가 필요하다. 예를 들어 32-큐비트로 표현되는 양자상태를 고전 비트로 표현하기 위해서는 10기가바이트 정도의 메모리가 필요하며, 시간에 따른 양자상태의 변화를 시뮬레이션하기 위해서는 무려 3

305) Kandala (2017)
306) Harrigan (2021)
307) Eddins (2022)
308) Kim (2023)
309) Begušić (2023), Kechedzhi (2023)
310) Wang (2021)
311) Kandala (2017)
312) Grimsley (2019)
313) Sack (2022)

엑사바이트라는 엄청난 메모리가 요구된다.[314] 이렇듯 다체 양자시스템의 동역학은 고전 컴퓨터로 시뮬레이션이 거의 불가능한 문제이다. 최근 수십 개 큐비트 규모의 양자프로세서를 활용한 다체 양자시스템의 상변화, 타임 크리스탈의 상변화 등이 연구되기 시작했다. 매시간 양자작용을 게이트로 분해하는 디지털 양자 시뮬레이션 방법,[315] 또는 시뮬레이션 대상 양자작용을 초전도 프로세서 내에 직접 구현해 시간에 따른 양자상태의 변화를 관측하는 아날로그 양자 시뮬레이션 방법[316]을 활용한다. 디지털 양자 시뮬레이터는 범용성이 뛰어나고, 아날로그 양자 시뮬레이터는 확장성이 뛰어나다는 특장점이 있다.

③ 양자오류완화 기술

오류정정이 불가능한 양자컴퓨터는 많은 연산을 수행할수록 많은 오류가 누적되므로 연산의 결과를 신뢰하기 어려워진다. 하지만 이 문제를 해결할 수 있는 안정적인 양자오류정정 기술이 언제쯤 구현될지는 아직 불확실하다. 따라서 현재의 불완전한 양자컴퓨터에서 발생하는 오류를 완화해 연산 결과의 신뢰성을 높이는 방향으로 활발한 연구가 진행 중이다. 대표적인 방법으로는 회로의 깊이가 깊어질수록 오류가 누적되는 점에 착안한 Zero-noise Extrapolation Method가 있다. 똑같은 연산을 수행하는 양자회로의 깊이를 바꿔가며 연산 결과를 얻고, 깊이에 따른 연산 결과를 바탕으로 오류가 없었을 때의 연산 결과를 역추적하는 방법이다. 이 방법을 적용하면 오류가 많은 양자프로세서를 사용하더라도 높은 수준의 정확도로 H_2와 LiH 분자의 에너지를 계산할 수 있음을 실험적으로 시연했다.[317] 또 다른 방법으로는 양자게이트를 파울리 게이트로 감싸서 오류의 종류를 후처리하기 쉬운 결잃음 오류로 바꾸는 Randomized Compiling이 있다. 결잃음 오류는 양자게이트가 적용될 때마다 산술적으로 누적되기 때문에, 양자게이트의 오류를 사전에 측정함으로써 연산에서 발생하는 오류를 높은 정확도로 추정할 수 있다. 최근에는 이 방법을 적용해 큐비트 수 26, 회로 깊이 60, CNOT 게이트 1,080개가 사용된 양자 시뮬레이션을 성공적으로 수행한 연구 결과가 발표됐다.[318]

라. 양자오류정정 기술

(1) 기술 동향

현재의 상용 컴퓨터는 오류 발생률이 매우 낮아져 별다른 오류정정 없이도 안정적인 연산이 가능하다. 하지만 양자컴퓨터는 큐비트의 결맞음 시간이 유한해 필연적으로 오류가 발생하기에 안정적인 오류정정 기술이 필요하다. 지금까지 다양한 양자오류정정 코드가 개발됐지만, 초전도 양자컴퓨팅에서는 2차원 격자 모양으로 물리 큐비트를 배치하는 표면 코드(Surface Code)가 최적의 양자오류정정 코드

314) Guo (2021a)
315) Mi (2022), Frey (2022), Alexis (2022)
316) Guo (2021a), Guo (2021b), Zhang (2022)
317) Kandala (2019)
318) Kim (2021)

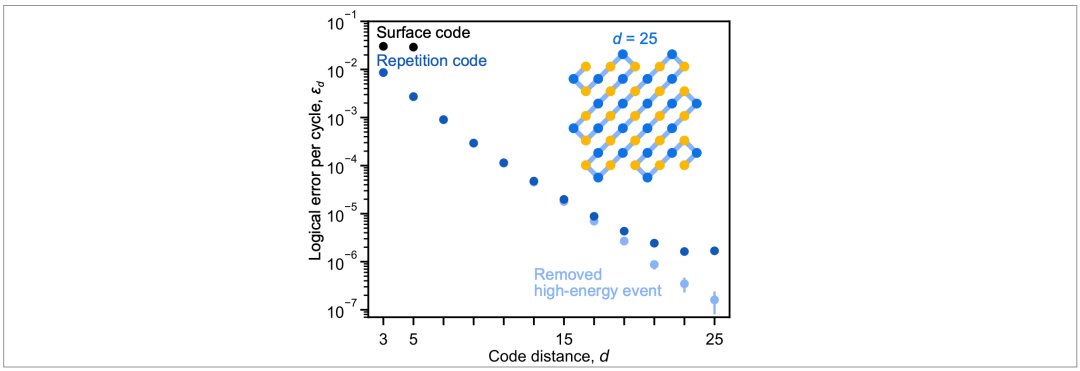
로 평가받고 있다.[319] 양자오류정정 코드로 구현한 논리 큐비트의 오류 발생률은 코드를 구성하는 물리 큐비트의 오류 발생률이 낮을수록, 물리 큐비트의 수가 많을수록 낮아진다. 현재의 물리 큐비트 오류 발생률을 고려했을 때 1개의 안정적인 논리 큐비트를 구현하는 데 1,000~10,000개 정도의 물리 큐비트가 필요할 것으로 예측된다. 따라서 이른 시일 내에 오류정정이 가능한 논리 큐비트를 구현하기 위해서는, 양자프로세서 내의 물리 큐비트 수를 늘리는 것과 동시에 양자게이트 및 상태 측정의 신뢰도를 높이는 연구가 필요하다. 이 외에도 양자게이트의 성능이 향상됨에 따라 양자오류정정 코드에서 다루기 힘든 다른 종류의 오류들도 주목을 끌고 있는데 대표적으로 양자 상태 측정에서의 오류, 상관관계를 가진 오류, 0과 1 이외의 양자 상태로의 누출(leakage) 등이 있다. 또한 양자오류정정 과정에서 오류의 종류와 위치 정보를 얻는 과정을 신드롬(syndrome) 측정이라고 하는데, 그 정보로부터 실제 오류가 발생한 위치를 빠르고 정확하게 찾아내는 디코더(decoder) 개발 연구 역시 활발히 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① 양자오류정정 기술 시연

현재의 초전도 양자프로세서 큐비트 수, 양자게이트 신뢰도, 상태 측정 신뢰도, 고속 피드백 기술 등은 안정적인 양자오류정정 기술을 구현하는 데 부족한 점이 많다. 따라서 현재로서는 작은 규모의 오류정정 코드를 실험적으로 구현해 오류정정을 시연하고, 그것이 실제로 오류 발생률을 낮출 수 있음을 보이고자 한다. 최근 알려진 중요한 연구성과 중 하나로서 7개의 물리 큐비트로 구성된 거리-2 표면 코드의 상태 초기화, 단일 큐비트 게이트, 상태 측정이 성공적으로 시연됐다.[320] 또한 오류정정 코드의 크기가 커짐에 따라 오류 발생률을 감소시킬 수 있음을 실험적으로 시연했다.[321] 구현이 상대적으로 쉬운 반복 코드(Repetition Code) 크기를 3부터 25까지 늘려가면서 오류 발생률이 기하급수적으로 감소하는 것을 확인했고, 거리-5 표면 코드를 사용하면 거리-3 표면 코드를 사용한 것에 비해 오류 발생률을 낮출 수 있음을 최초로 시연했다.

그림 II-3-3 오류정정 코드 크기에 따른 논리 큐비트의 오류 발생률 감소



※ Google Quantum AI (2022)

319) Fowler (2012)
320) Andersen (2020), Marques (2022)
321) Google Quantum AI (2022)

② 효율적인 양자오류정정을 위한 새로운 큐비트

마이크로파 공진기 내 광자의 양자상태로 양자정보를 표현하는 보조닉 큐비트(Bosonic Qubit)는 트랜스몬 같은 인공원자 방식의 초전도 큐비트에 비해 긴 결맞음 시간을 가진다. 결맞음 시간이 길수록 오류 발생률이 낮기에 보조닉 큐비트를 활용하면 적은 물리 큐비트 수로도 안정적인 오류정정 코드 구현이 가능할 것으로 기대된다. 그뿐만 아니라 보조닉 큐비트는 오류정정 코드 구현에 도움이 되는 특별한 성질들을 가지고 있다. 예를 들어 보조닉 큐비트는 일반적으로 비트플립(Bit Flip) 오류에 비해 페이즈플립(Phase Flip) 오류의 발생률이 상당히 낮다. 비트플립 오류정정에 특화된 코드[322]를 사용하면 더 적은 수의 물리 큐비트로도 낮은 오류 발생률의 논리 큐비트를 구현할 수 있기에, 이러한 치우침 오류 큐비트(Biased-Noise Qubit)를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로는 Kerr-Cat 큐비트가 최근 실험에서 구현됐다.[323] 보조닉 큐비트의 또 다른 특별한 성질은 오류 대부분이 광자 손실에서 기인한다는 것이다. 광자 손실 환경을 조절해서 광자의 손실률만큼 에너지를 공급해주면, 보조닉 큐비트에 발생하는 오류를 자동으로 정정할 수 있으며 오류 발생률 자체도 상당히 줄일 수 있다. 최근 이를 실험으로 구현해 130 μs의 결맞음 시간이 자동 오류정정을 통해서 288 μs로 늘어남을 확인했다.[324]

마. 초전도 양자컴퓨터 규모 확장을 위한 요소기술

(1) 기술 동향

초전도 양자컴퓨팅의 실용화를 앞당기기 위한 가장 근본적인 방법은 양자프로세서 내에 존재하는 큐비트 수를 증가시키는 것이다. 큐비트 수의 증가는 힐버트 공간(Hilbert Space)의 확대를 의미하고, 이는 곧 양자컴퓨터 정보 처리 용량의 증가를 뜻한다. 하지만 물리적 장애물이 많은 탓에 규모 확장이 쉽지 않고, 이를 극복하는 것이 앞으로의 과제로 남아있다. 규모 확장을 위한 기술을 알아보기 위한 예시로 Google의 Sycamore 프로세서를 살펴보도록 하겠다.[325]

Sycamore 프로세서는 54개의 트랜스몬 큐비트가 2차원 사각격자 형태로 배열돼 있고, 인접한 큐비트 간의 상호작용을 매개하는 88개의 커플러(Coupler)가 존재한다. Google이 SQUID를 이용해 플럭스 조절이 가능한 트랜스몬 큐비트(또는 X-mom)를 채택하고 있는 점을 고려했을 때, 이 양자프로세서를 제어하기 위한 마이크로파 동축케이블의 수는 54×2+88=196개이다. 여기서 54는 큐비트의 수, 2는 각 큐비트당 XY 제어 및 Z 제어(플럭스 조절) 채널 수를 뜻하고, 88은 커플러의 조절을 위한 채널

322) Ataides (2021)
323) Grimm (2020)
324) Gertler (2021)
325) Arute (2019)

수를 뜻한다. 큐비트의 측정을 위해선 이 제어 채널 외에도 더 많은 채널이 더 필요하다. Sycamore 프로세서는 큐비트 측정을 위해 각각 9개의 리드 아웃 신호 입출력 채널(총 18개)과 저잡음 양자증폭기 IMPA(Impedance Matched Lumped Element Josephson Parametric Amplifier)를 구동하기 위해 18개의 채널을 추가로 사용했다. 리드 아웃 입출력 채널 한 쌍이 6개의 큐비트 측정에 쓰이므로, 총 54개의 큐비트 측정에 9쌍이 사용됐다. 이 채널을 모두 더하면, Sycamore의 구동을 위해 총 196+36=232개의 마이크로파 동축케이블이 극저온 냉동기에 존재한다는 것을 예측할 수 있다. 이렇게 많은 수의 채널이 존재하면 케이블을 통해 상온으로부터 전달되는 열을 제어하기 위해 냉각성능이 좋은 극저온 냉동기가 필요하며, 많은 동축케이블 및 RF 부품들이 차지하는 부피로 인해 극저온 냉동기 내 넓은 공간확보가 필요하다. 또한 큐비트 수에 비례해 양자프로세서 측정제어에 사용되는 마이크로파 계측장비들의 수가 늘어나, 많은 공간을 차지하게 되는 문제점도 발생한다. 그러므로 양자컴퓨터의 규모 확장을 위해서는 양자프로세서 주변 요소기술의 발전이 필수라고 할 수 있다.

(2) 연구 동향

① 초전도 양자컴퓨팅을 위한 극저온 냉각 기술

초전도 양자컴퓨터의 구동을 위해서는 20 mK 정도의 극저온 환경을 만들어 주는 냉각기가 필수적이다. 초전도 큐비트의 기초 연구가 진행되던 시기에는 극저온 환경 구축을 위해 액체헬륨과 헬륨-3, 헬륨-4를 동시에 이용하는 냉각기를 사용했다. 이러한 냉각기는 액체헬륨의 소모가 많아 며칠 주기로 공급이 필요한 탓에 유지보수비용이 높고 실용적이지 않았다. 2010년대에 들어서며 Bluefors, Oxford 등의 해외 기업에서 액체헬륨을 사용하지 않는 냉각기의 개발이 본격적으로 시작됐고, 현재 다수의 그룹이 이러한 무냉매 냉각기를 이용해 초전도 양자기술을 연구 중이다. 현재 대학과 연구소 수준에서 가장 많이 사용되는 Bluefors의 LD-400 또는 Oxford의 ProteoxMX 냉각기는 초전도 양자프로세서가 놓이는 극저온 판(plate)의 공간이 약 300mm 정도 지름을 갖고 있으며, 20 mK 온도에서 15 μW, 100 mK 온도에서 450 μW의 냉각파워를 갖는다. 위에 언급된 냉각기들은 약 30~50개 안팎의 SMA 마이크로파 동축케이블을 배치할 수 있다. 더 상위 모델인 Bluefors의 XLD-1000 또는 Oxford의 ProteoxLX 냉각기는 약 500mm 이상의 지름을 갖는 극저온 판과 20 mK 온도에서 30 μW, 100 mK 온도에서 1000 μW 정도의 냉각파워를 갖고 있다. 본 냉각기들은 약 150개 이상의 SMA 동축케이블 설치가 가능해 멀티 큐비트 양자프로세서의 구동이 가능하다. 최근 Bluefors에서는 고밀도 마이크로파 동축케이블 제품을 출시해 냉각기 한 대에 최대 약 1,000개의 동축케이블 설치가 가능해졌다. 이러한 극저온 냉각기 제조 기업들은 최근 규모를 더 확장하고, 관련 기업들과 협력해 초전도 양자컴퓨팅을 위한 극저온 기술들을 적극적으로 연구개발 중이다.

② 초전도 양자프로세서의 측정제어를 위한 하드웨어 기술

초전도 큐비트 및 공진기를 포함한 양자프로세서는 5~6GHz 정도의 마이크로파 주파수 대역에서 작동하는 것이 일반적이다. 이 주파수 대역은 현재 무선 통신에서 쓰이는 주파수 대역과 비슷해, 몇 큐

비트만 존재하는 기존 양자프로세서의 초전도 큐비트 측정제어는 Keysight, Rohde & Schwarz, Tektronix 등의 유명 계측장비 기업에서 개발한 RF신호 생성기(RF Signal Generator), 네트워크분석기(Network Analyzer), 임의 파형 생성기(Arbitrary Waveform Generator), 디지타이저(Digitizer)와 같은 계측장비들과 Markimicrowave, Pasternack 등의 기업에서 개발한 IQ 변조기(IQ Mixer), 주파수 필터 등과 같은 RF 수동소자를 이용해 구현됐다. 하지만 이러한 장비들은 높은 범용성으로 인해 각각의 가격이 지나치게 높을 뿐만 아니라, 채널당 장비가 차지하는 공간이 커 규모 확장에 적절하지 않다.

최근 초전도 양자컴퓨터를 개발하는 기업의 수가 늘어남에 따라 양자컴퓨터의 구동을 위한 계측장비 기업의 수도 증가했다. 그러나 기존 계측장비 기업들은 통신, 반도체, 국방 등 다양한 응용 분야를 위한 범용적인 장비 개발에 집중해 양자컴퓨터 측정제어를 위한 하드웨어 개발은 미진했다. 현재 양자컴퓨팅용 계측장비의 개발은 해외 스타트업 기업에서 적극적으로 이뤄지고 있는데, 스위스 ETH Zurich에서 창업한 Zurich Instruments와 이스라엘 Weizmann 연구소에서 창업한 Quantum Machines가 대표적인 예이다. Zurich Instruments는 ETH Zurich 물리과 소속의 초전도 양자컴퓨팅 분야 세계 최고 연구그룹인 Andrea Wallraff 교수 연구그룹과 긴밀한 협력을 통해, 디지털 전자회로 기반의 양자컴퓨팅 측정제어 하드웨어를 개발 중이다. 개발 초기에 HDAWG 임의 파형 발생기 및 UHFQA 양자분석기를 출시하며 양자컴퓨팅 전용 계측장비 개발에 신호탄을 쐈지만, 당시의 초기 모델은 별도의 GHz 주파수 대역 신호 발생기 및 IQ 변조기가 필요해 초전도 양자컴퓨팅을 위한 전용 장비로 부르기에는 무리가 있었다. 그 후 이러한 점들을 보완한 8.5 GHz의 주파수 대역폭을 가진 SHFSG 신호 발생기와 SHFQA 양자분석기 등 새로운 계측장비들이 출시됐다. 이 두 장비는 더블 슈퍼헤테로다인(Double Super Heterodyne) 기술을 이용해 초전도 큐비트 제어를 위한 마이크로파 펄스를 생성하고 분석하는 것을 가능하게 해준다. 그리고 최근에는 두 가지 성능을 한 장비에 구현한 SHFQC 통합 큐비트 측정제어 장치가 출시됐고, 이를 이용해 최대 6개의 초전도 큐비트에 대한 신호 발생과 분석이 하나의 장비로 가능해졌다.

2018년 창립한 이스라엘의 Quantum Machines는 초전도 양자컴퓨팅 전용 계측장비 시장에서 빠른 속도로 점유율을 높이는 중이다. 이 회사는 Quantum Orchestration Platform으로 불리는 통합 측정제어 하드웨어 솔루션을 제공하며, 독립된 계측장비로 OPX plus와 Octave 두 개의 모델을 출시했다. OPX plus는 임의 파형 생성기와 디지타이저가 혼합된 형태로 별도의 마이크로파 신호 생성기와 IQ 변조기를 이용해 큐비트의 측정제어를 가능하게 해준다. 이는 Zurich Instruments의 초기 모델인 HDAWG와 UHFQA의 기능을 합친 형태로 판단된다. 별도의 신호 생성기가 필요하다는 점이 OPX plus의 약점이었으나, 최근 Octave라는 2~18GHz 대역폭의 신호 생성 기능과 IQ 변조기를 통합한 장비를 출시함으로써 자체 제품으로 초전도 큐비트의 측정제어를 구현했다. 특히 Quantum Machines는 적극적인 마케팅을 통해 전 세계 많은 연구그룹에 장비를 공급했고, 사용자들과 적극적

으로 소통하며 새로운 계측장비를 개발 중이다. 이러한 양자컴퓨팅 전용 계측장비 기업의 등장은 초전도 양자컴퓨팅의 규모 확장을 더욱 가속할 것으로 예상된다.

③ 양자프로세서의 규모 확장을 위한 패키징 기술

Google의 Sycamore와 IBM의 Eagle은 양자프로세스 큐비트의 레이아웃이 2차원 배열로 이루어진 것을 볼 수 있다. 큐비트 한 개를 측정제어 하기 위해서는 2~3개의 마이크로파 채널이 큐비트 주위에 존재해야 하는데, 이러한 2차원 큐비트 구조에서는 같은 칩 평면에 존재하는 마이크로파 채널로 중심부의 큐비트에 접근하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 큐비트 및 기반 회로요소를 서로 다른 기판에 배치한 3차원 패키징 기술이 사용됐다.

Google의 Sycamore는 초전도 큐비트가 존재하는 칩과 공진기 및 마이크로파 채널이 존재하는 칩을 전기적으로 연결하는 플립칩 접합 공정을 이용해 프로세서를 제작했다.[326] 플립칩 접합에는 인듐 접합(Indium Bump Boding) 기술이 이용되는데 인듐은 큐비트 제작공정과 호환되며, 극저온에서 초전도 현상을 보이기 때문에 현재 양자프로세서의 3차원 집적공정에서 필수적으로 쓰이는 물질이다. 또한 인듐은 각 칩에 있는 알루미늄 전극과 접합되며, 이 과정에서 알루미늄과 인듐이 합금을 형성해 전기적인 성질에 영향을 준다. Google은 이 문제를 해결하기 위해 알루미늄 접합 부분에 질화티타늄(TiN)을 증착시키는 방법으로 인듐과의 합금 형성을 방지했다.

IBM의 Eagle은 프로세서를 구성하는 층을 더 세분화하고 총 4개의 칩을 접합해 제작됐다. 첫 번째는 큐비트가 존재하는 층, 두 번째는 초전도 마이크로파 공진기가 존재하는 층, 세 번째는 마이크로파 채널 층, 네 번째는 인터포저(Interposer) 층이다. 각 층간 전기적 연결은 Through-Silicon-Via(TSV)라는 기술을 사용해 구현했다. TSV 기술은 수백 마이크론 두께의 실리콘을 Bosch 공정 또는 Deep Reactive Ion Etching(DRIE)이라는 식각공정을 이용해서 관통한 후, 이 관통된 부분에 금속을 채워 넣어 칩의 윗면과 아랫면을 전기적으로 연결한 기술이다. 이 기술의 핵심은 깊은 관통 면에 초전도 물질을 균일하게 증착시키는 것인데, 이를 위해 고품질 질화티타늄 막을 화학적 증착 과정에 이용한다.[327]

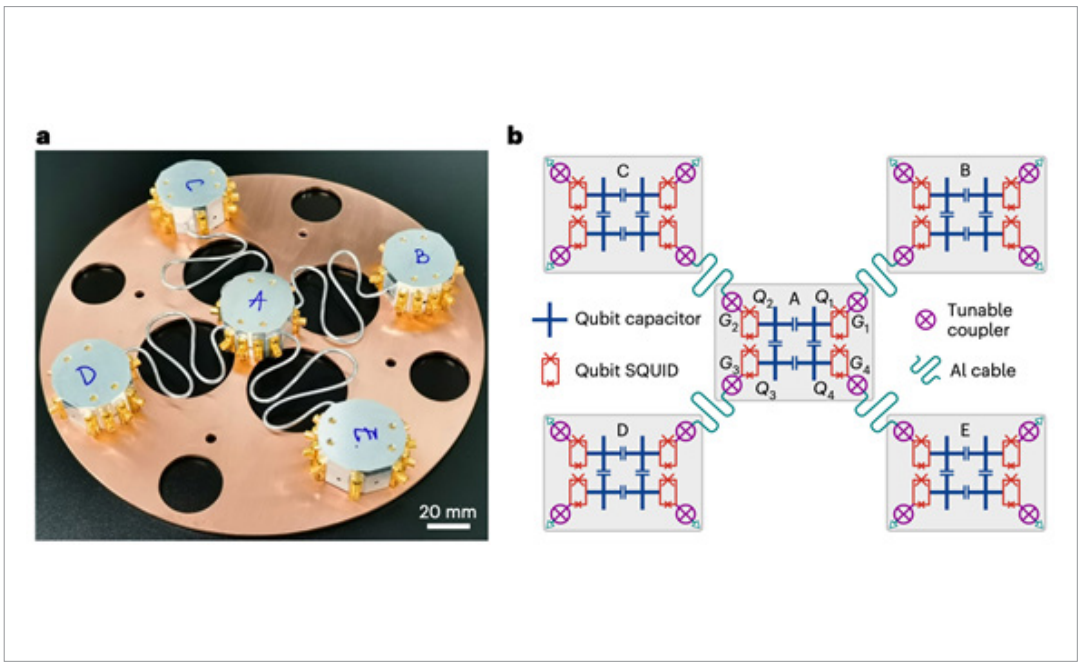
④ 양자프로세서 모듈 연결 기술

IBM에 초전도 양자프로세서 로드맵에 따르면 2023년 1121-큐비트 양자프로세서인 Condor를 마지막으로 양자프로세서 칩을 연결하는 방식으로 큐비트 수를 늘려갈 계획을 가지고 있다.[328] 이와 같이 현재의 프로세서 디자인과 공정기술로는 특정 크기 이상의 칩을 제작할 수 없어 큐비트 수를 확장하기

326) Arute (2019), Foxen (2017)
327) Yost (2020)
328) IBM blog (2023)

위해서는 여러 칩을 연결하는 모듈러 구조가 유일한 대안이다. 초전도 큐비트가 가진 양자정보를 마이크로파 광자로 바꾸는 기술은 ETH, 시카고대학 등 여러 그룹에서 개발이 되었으며 마이크로파 광자로 프로세서 모듈간의 양자 얽힘을 만드는 실험도 얽힘 상태 신뢰도 측면에서 많은 진전이 있어 왔다.[329] 2023년에는 아래 그림에서 보이는 것처럼 중국 남방과학기술대학에서 5개의 4-큐비트 양자프로세서를 연결하고 모듈간의 양자상태 전송 및 벨 얽힘 상태 분배를 99%의 신뢰도로 성공하였다.[330] 더 나아가 여러 칩에 걸쳐 12 큐비트 GHZ 얽힘 상태를 55.8%의 신뢰도로 생성하여 모듈 간 연결의 활용 가능성을 시연하였다. 심지어 공간적으로 30미터 떨어진 두 10mK 희석식 냉동기에 각각 양자프로세서 모듈을 설치하고 이 둘 사이에 양자얽힘을 성공적으로 만들어 내어 양자프로세서 모듈 연결의 확장성을 성공적으로 시연하였다.[331] 이에 따라 현재 기술로 만들 수 있는 양자프로세서를 모듈화하고 이를 연결하는 양자네트워크를 만드는 방식으로써 초전도 양자컴퓨팅 시스템의 확장성이 가속화될 수 있을 것으로 기대한다.

그림 II-3-4 알루미늄 동축케이블로 연결된 양자프로세서 모듈



※ Niu (2023)

329) Kurpiers (2018), Zhong (2021)
330) Niu (2023)
331) Storz (2023)

2. 반도체 양자점 양자컴퓨팅

가. 스핀 큐비트 호스트 양자소재 성장 기술

(1) 기술 동향

스핀 큐비트용 반도체 양자소재로 각광받는 소재는 크게 동위원소 정제형 실리콘을 기반으로 한 Si-MOS 구조, Si/SiGe 구조, 게르마늄 이종접합구조가 있다. 스핀 큐비트용 양자소재의 성장은 해외 연구그룹이 선도하고 있으며, 대표적인 재료 성장 기술은 일본 Keio 대학의 Kohei Itoh 교수 그룹이 보유하고 있다. 이 그룹은 ^{28}Si 고체 원료를 기상 화학 증착용 Silane으로 가공해, Chemical Vapor Deposition(CVD) 방법으로 ^{28}Si/SiGe와 ^{28}Si-MOS 형태의 반도체 기판을 성장시키는 기술을 확보하고 있다.

해당 소재는 호주 University of New South Wales 소속 Center for Quantum Computing and Communication Technology의 반도체 스핀 큐비트 그룹으로 공급돼, ^{28}Si-MOS, ^{28}Si-P donor 큐비트 연구에 사용되고 있다. 또한 서울대 반도체 스핀 큐비트 연구그룹과 소재 교환 협력을 체결해, 동위원소 정제형 스핀 큐비트 연구가 진행되고 있다.

미국은 동위원소 정제형 반도체 웨이퍼 소재 원천기술을 확보하기 위해 대규모 투자를 이어가고 있다. 미국의 국립표준과학연구소(National Insitute of Srandards and Technology)는 자연적 동위원소 순도의 Si 중 질량분석 기법을 통해 ^{28}Si를 선별 후, MBE 성장법으로 진공 챔버 내에서 분자선 소스로 사용하는 성장 장비를 개발했다. 한편 HRL 연구소는 CVD 방법으로 ^{28}Si/SiGe를 성장하는 기술을 보유하고 있다. 또한 Intel은 최근 Linde로부터 ^{28}Si 원료를 공급받아 12인치 ^{28}Si/SiGe 웨이퍼를 성장하는 기술을 확립했다. 해당 재료는 네덜란드 TuDelft와 Intel의 합작연구소인 QuTech에 공급돼 산업체 파운드리 호환형 스핀 큐비트를 연구하고 있다. TuDelft 내에는 4인치 ^{28}Si/SiGe 기판 성장을 연구하는 그룹이 존재한다.

그림 II-3-5 확장형 실리콘 큐비트를 위한 Intel – QuTech 투자 협약



※ https://qutech.nl/2015/09/03/qutechentersintocollaborationwithintel/

고이동도 Ge/SiGe 이종접합 구조 성장은 네덜란드 TuDelft의 Giordano Scapucci 그룹이 선도하고 있다. 본 소재를 사용하여 TuDelft의 M. Veldhorst 교수 그룹은 4큐비트 얽힘상태 생성을 시연한 바 있다. 또한, Scapucci 박사 그룹의 재료는 미국, 일본, 대한민국의 스핀 큐비트 소자 연구팀으로 공급되는 등 국제협력의 주 재료로 이용되고 있다. 이 중 대한민국 그룹에 공급되는 재료는 동위원소 정제형 ^{28}Si/SiGe – 4인치 웨이퍼이며 2022년까지는 특별한 제약 사항없이 재료공급이 가능하였다. 그러나 2023년부터는 유럽연합의 양자관련 소재, 부품, 장비, 시스템의 수출규제 강화로 해외공급 심사가 까다로워지는 실정이다. 반도체 양자점 스핀 큐비트 기반 양자컴퓨팅 연구는 원천소재의 영향이 지대한 분야이기 때문에 이 분야의 국내 발전을 위해서는 국내 독자적인 스핀큐비트용 고품질 소재성장 연구가 시급하다.

또한, 실리콘과 같은 4족 원소로서 게르마늄 (Ge)은 전자가 아닌 양공 (hole) 의 스핀을 이용하는 p-type 반도체 양자컴퓨팅 소재로 새롭게 부각되고 있다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, Valence 밴드에 존재하는 공공의 파동함수는 p-orbital 의 성격을 가져 원자핵의 위치에서 발견될 확률이 0에 가깝다. 이는 원자핵의 파동함수와 공고의 파동합수의 겹칩이 작은 것을 의미하여 같은 핵스핀 밀도에 대해서도 초미세 상호작용 (hyperfine-interaction) 공공 스핀이 잡음이 적다. 따라서 동위원소 정제 없이도 마이크로 초 이상의 우수한 결맞음시간을 확보할 수 있다. 둘째, 실리콘은 스핀을 자기공명을 통해 제어하기 위해 자기장 구배를 생성하는 인접한 마이크로 자석을 추가로 소자 윗단에 공정하는 것이 필수적이지만 게르마늄의 공공은 적절한 스핀-궤도 상호작용이 재료특성으로 주어져 있어 마이크로 마그넷 공정없이도 전기적으로 스핀을 빠르게 제어하는 것이 가능하다. 셋째, GaAs처럼 게르마늄의 공공은 유효질량이 매우 작다. 이는 양자점의 크기를 실리콘 대비 2~3배 직경으로 제작해도 스핀 큐비트 구동에 필요한 충분한 에너지 스플리팅을 확보할 수 있음을 의미하여 소자 공정측면에서 정밀도의 요구도가 현저히 낮은 장점으로 부각된다. 넷째, 게르마늄 소자의 소스, 드레인 접합 형성시 페르미 준위 피닝 (pinning) 현상에 의해 이온 주입과 같은 특수한 도핑과정 없이도 대부분의 금속전극과 효율적으로 오믹접합형성이 가능하다. 이 역시 공정측면에서 난이도를 크게 낮추는 요인으로 작용한다.

2022년부터 본격적으로 각광받고 있는 게르마늄 소재는 TuDelft-Qutech 그룹이며, 2023년에는 TuDelft 의 M.Veldhorst 교수 그룹이 4x4 배열의 16개 양자점의 단일 공극 튜닝을 시연한 바 있다. 2023년 현재 Ge/SiGe 소재를 성장할 수 있는 그룹은 전 세계에서 3개 그룹으로 파악되며 QuTech이외에 스위스 Basel 대학, 독일 Aachen 대학의 연구그룹이 있다.

(2) 연구 동향

동위원소 정제는 ^{28}Si 원료가 희귀하여 수급이 원활하지 않다. 또한 현재 수급 가능한 ^{28}Si도 기상증착법(Chemical Vapor Deposition)에 사용되는 SiH4 전구체(Precursor) 형태로 구할 수 없으며 고체 ^{28}Si결정, $^{28}SiO_2$결정 형태로 공급돼 2차 가공이 필요하다. 따라서 기상 증착법 외에 분자선 에피

택시 방법과 스퍼터링 방법으로 박막을 성장하는 연구가 진행 중이다. 한편 현재 ^{28}Si를 이용한 스핀 큐비트에서 수백 마이크로초 이상의 결맞음 시간이 보고됐지만, 성장 기술의 완성도에 따라 편차가 크다. 특히 Si/SiGe 구조의 경우 주변의 정제되지 않은 Ge 원자핵스핀에 의해 결맞음 시간 증가가 제약된다는 결과도 보고돼, 재료 성장 기술의 발전이 필요한 상황이다.

실리콘의 양자소자 관점에서 최대 단점은 전도 밴드가 하나 이상인 밸리의 자유도를 가진다는 것으로. 이는 4족 반도체 대부분의 공통적인 특성이다. 이러한 밸리의 존재는 큐비트의 바닥 상태와 여기 상태 사이가 밸리-스플리팅(Valley-Splitting)으로 불리는 작은 에너지 차이에 의해 결정되게 하며, 양자연산 중 오류의 확률을 증가시키는 요인으로 작용한다. 또한 밸리-스플리팅은 큐비트 단발 측정의 충실도에 직접적인 영향을 주며, 궁극적으로 큐비트가 작동 가능한 온도의 상한선을 결정한다.

따라서 웨이퍼 전 영역에 균일하고 큰 밸리-스플리팅을 가지도록 하는 소재 공학의 발전이 중요하다. 이는 균일한 반도체/산화물 경계면에 생성되는 비교적 큰 구속 에너지에 의해 최대 1meV의 밸리-스플리팅을 유도할 수 있다는 것을 보인 Si-MOS에서 발전했는데, 이러한 Si-MOS 구조에서는 큰 에너지-스플리팅으로 인해 1K 정도의 비교적 높은 온도에서 Si 큐비트를 작동할 수 있다는 장점이 있다. 반면 Si/SiGe 대비 Si-MOS의 주요 단점으로는, 큐비트가 무질서도 높은 산화물 계면에 형성돼 전자이동도가 비교적 낮고(최대 ≈ $104cm^2/Vs$), 원하지 않는 영역에 양자점이 형성될 확률이 높다는 점을 들 수 있다.

Si/SiGe 구조는 양자점 형성에 사용하는 자유전자 층을, 인장력으로 Strain이 걸린 Si 양자우물과 Si1-xGex 사이의 인터페이스에 형성한다. 따라서 이러한 구조에서는 자유전자 층이 계면의 결함에서 떨어져 있어 Si-MOS보다 우수한 이동도를 지닌다. Si/SiGe는 Si와 Ge 사이의 격자 불일치가 4.2%에 이르기 때문에, 격자 불일치를 점진적으로 없애기 위해 SiGe 합금에서 Ge 농도를 점진적으로 증가시켜 얻은 SiGe 버퍼 기판을 준비해야 한다. 그리고 이러한 SiGe 버퍼 기판을 준비하는 과정에선 버퍼 층의 Dislocation 해소가 주요 관건이다.

Si/SiGe의 주요 난제는 Si-MOS 구조보다 작은 밸리-스플리팅(50-200μeV)에 있으며, 특히 기판의 위치마다 그 값이 다른데 이는 에피택시 Si/SiGe 계면의 인터페이스가 원자단위에서 균일하지 않기 때문이다. 밸리-스플리팅이 단원자 층의 두께 불균일도에도 민감하게 바뀌는 탓에, 소재 측면의 난제로 떠올라 최근에는 이를 완화할 수 있는 양자우물의 성장법을 개발 중이다. 예를 들어 기존의 일정한 두께를 가진 Si층을 양자우물 영역으로 성장하는 방법에서 탈피해, Ge의 농도를 일정 주기로 변화시킨 Oscillating Ge Concentration 법으로 밸리-스플리팅을 안정적으로 150μeV 이상 유도할 수 있는 성장법이 보고되기도 했다.

2023년에는 이러한 4족 원소의 동위원소 순도, 양자우물 층의 구조를 발전시켜 스핀 큐비트용 소재특성을 향상시키는 연구가 활발히 진행중이다. 최신연구로서 Si 의 경우 다양한 전하노이즈의 근원중 quantum well 의 하부에 존재하는 dislocation 의 밀도를 양자우물 층의 두께 조절로 10배이상 감소시켜 기존의 ^{28}Si/SiGe 이종구조 대비 전하노이즈를 획기적으로 감소시킨 연구결과가 보고 되었다. 동시에 얇은 두께의 quantum well 에서는 기존보다 더 큰 속박 에너지를 가지는 양자점을 형성하는 것이 가능하여 기존보다 밸리 스플리팅을 크게 향상시켰다.

게르마늄의 경우 상술한 장점을 가지고 QuTech그룹의 소재를 사용해 단일 양자노드의 스핀큐비트 연구가 활발히 진행중이지만 이 소재는 반도체 – 초전도 하이브리드 소자에 적합하지 않다는 단점이 존재하였다. 이는 소재성장 중 응력에 의한 dislocation 발생을 완하하기 위한 성분 grade 방식이 기판의 하부층에 과도한 전하트랩을 유도하고 이들이 초전도 공진기 제작에 중요한 광자 흡수율을 급격히 감소시키기 때문이다. 이를 해결하기 위해 Basel 대학의 소재 성장그룹 등은 성분 grade 방식의 버퍼 층의 구조를 변형하여 초전도 소자와 호환성 있는 게르마늄 반도체 기판을 제작하고 있다.

4족 반도체가 가진 작은 스핀-궤도 상호작용, 낮은 핵스핀 밀도, 동위원소 정제가능성은 이 그룹의 실리콘, 게르마늄, 탄소에 걸쳐 공통적인 장점이다. 이 중 실리콘, 게르마늄은 CVD, MBE방식의 고순도 기판 제작이 가능하여 현재 활발히 연구되고 있으나 비교적 탄소기반 소재는 양자점 스핀 큐비트용 소재로 널리 쓰이고 있지 않다. 2022년부터는 스위스 ETH 의 연구그룹을 중심으로 2차원 소재인 그래핀(흑연을 이루는 2차원 단일층으로 탄소의 동소체 중 한 종류)을 이용해 양자점을 형성하고 스핀 상태를 단발측정하는 등의 연구결과를 보고하고 있다. 스핀 큐비트로 잠재력이 큰 소재이지만 아직까지 단일 및 이중 큐비트 게이트가 확보되지 않은 기술인 만큼 발전이 필요한 분야이다.

(3) 적용 분야

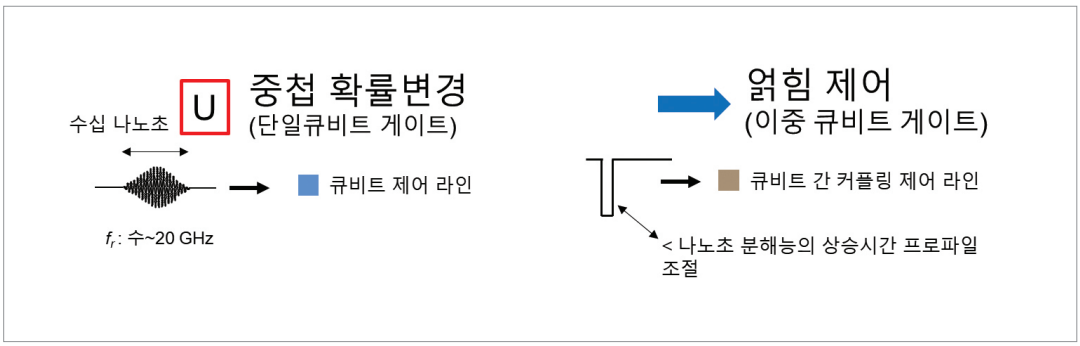
미래 첨단소재의 일차적인 응용은 스핀 큐비트 양자컴퓨팅 하드웨어로, 양자컴퓨터용 능동 소재와 직접적인 관계가 있다. 재료가 가진 최대한의 양자결맞음 시간을 확보할 수 있는 호스트 재료는, 확장형 스핀 큐비트 양자컴퓨팅을 구현하기 위한 원천기술이다. 또한 큐비트 소자 동작을 위해 필수적인 물성 요구치인 고주파 손실 최소화 및 전하 잡음 제어는, 고주파 송수신부용 단결정 기판 소재와 관련도가 높다.

나. 멀티 큐비트 제어 기술

(1) 기술 동향

다중 큐비트를 제어하는 기본적인 요소기술은 큐비트의 중첩상태를 변화시키고, 큐비트 간 상호작용을 이용해 양자조건부 게이트를 형성하는 것이다. 단일 큐비트 게이트란 각 큐비트의 중첩상태를 개별적으로 변화시키는 게이트이며, 반도체 스핀 큐비트는 통상적으로 큐비트 에너지 준위와 공명하는 주파수를 가진 외부 마이크로 펄스파를 이용해 Rabi Oscillation을 이용한다. 이중 큐비트 게이트는 제어 큐비트 상태에 조건부로 타겟 큐비트의 상태를 변화시키는 게이트로서, 반도체 스핀 큐비트는 스핀 간의 교환상호작용을 이용한다. 범용 게이트 집합은 단일 큐비트 게이트와 이중 큐비트 게이트의 조합으로 임의의 양자논리회로를 구성하는 것을 말한다(고전 컴퓨팅의 Universal NAND 게이트에 해당).

그림 II-3-6 양자게이트의 물리적 구현을 위한 제어신호 예시



큐비트 동작의 에러 요소 및 성능 검증은 크게 제어오류 및 결잃음(Decoherence)에 의한 오류로 구분되며, 제어오류는 제어 펄스의 주파수, 진폭, 위상 잡음에 의한 게이트 충실도 제한을 말한다. 또한 큐비트의 논리 상태를 벗어난 에너지 상태로의 Leakage 에러도 존재한다. 원천오류로서 큐비트의 양자정보는 제한된 결맞음 시간 내에서만 양자역학적으로 이용 가능하며, 크게 에너지 완화시간 (T_1 시간)과 위상 결맞음 시간(T_2 시간)으로 구별한다.

T_1 시간은 큐비트와 외부 환경 사이의 에너지 교환에 의한 상태 전이에 해당한다. T_1 시간은 전체 결맞음 시간에 영향을 줌과 동시에, 양자연산을 수행한 후 양자상태 측정 시 측정 신호를 에러 없이 포집할 수 있는 시간을 결정한다. 양자상태는 확률진폭의 크기와 위상(Phase)을 가지는데, T_2 시간은 큐비트 에너지에 의해 결정되는 큐비트 주파수의 외부 잡음에 의한 위상의 부정확도를 결정한다. 여기에서 T_2 시간은 잡음의 주파수 스펙트럼과 측정에 사용된 제어 펄스의 종류에 따라 다양하게 구분된다.(예: T_2^*- Ramsey 펄스를 이용한 큐비트 위상의 자유 세차운동 시간 또는 불균일 결잃음 시간, T_2,

echo-Hahn echo 펄스를 이용한 정적 잡음이 제거된 결맞음 시간 또는 균일 결잃음 시간 등) 종합적으로 양자에러보정에 요구되는 물리적 큐비트의 성능은 결맞음 시간과 양자게이트 시간의 비율에 따라 결정된다.

(2) 연구 동향

상기한 멀티 큐비트 제어법을 적용해 반도체 스핀 큐비트 제어연구를 선도하는 그룹과 대표적인 결과는 다음과 같다.

GaAs 스핀 큐비트 분야는 미국 Harvard 대학의 Amir Yacoby 교수 그룹에서 99% 이상의 단일 큐비트 논리게이트, 93% 이상의 이중 큐비트 게이트를 시연했으며, 연구그룹은 GaAs의 단점인 높은 핵스핀 밀도에 의한 양자잡음을 고속 측정과 주파수 피드백으로 실시간 보정하는 기술을 개발했다.

Si 스핀 큐비트 분야는 호주 UNSW 대학의 Andrew Dzurak 교수 그룹과 네덜란드 QuTech의 Lieven Vandersypen 교수 연구그룹이 각각 실리콘 2큐비트 양자프로세싱을 구현하고,[332] 2큐비트 그로버 알고리듬(Grover's Algorithm)과 더치-조자 알고리듬(Deutsch-Jozsa Algorithm)의 실행에 성공했다. 미국 Princeton 대학의 Jason Petta 교수 그룹은 10개 양자점 형성 및 전하 상태 제어를 시연했으며,[333] 일본 RIKEN의 Seigo Tarucha 교수 그룹은 반도체 2큐비트 간 비파괴 양자측정을 시연했다.[334]

최근에는 UNSW, QuTech, RIKEN에서 실리콘 범용 논리게이트 집합 (단일 큐비트 게이트 + 이중 큐비트 게이트)의 평균 게이트 충실도가 99%를 상회하는 수준에 이르렀음을 동시에 발표했다. 이는 게이트 충실도가 양자오류정정이 가능한 수준으로 높아졌음을 시사하며 초전도, 이온 트랩 등 선도플랫폼과 함께 반도체 스핀 큐비트 플랫폼의 높은 잠재력을 시사한다.

2022년 현재 반도체 스핀 큐비트 연구 분야의 최대 관심사는 멀티 큐비트의 확장과 노이즈에 강한 (Robust) 양자게이트 탐색, 고전 제어회로와 통합을 위한 고온 큐비트 구동 탐색 연구이다. 관련 내용은 아래에 기술한다.

2023년 연구 동향으로 첫째, 네덜란드 quTech 그룹에서는 1차원 배열의 동위원소 정제형 실리콘 6큐비트 소자를 제작하고 6큐비트 단일큐비트 시연 및 최인점 큐비트 간 99%이상의 이중큐비트 게이트 시연, 시스템 내의 선택된 3개 큐비트의 얽힘상태 시연 등을 보였다.[335] 이 연구 결과는 그동안 1-2

332) Nature (2015)
333) Nature Comm (2019)
334) Nature Nanotech (2019)
335) Nature 609, 919 (2022)

큐비트 동작시연에 머물러 있던 반도체 양자컴퓨팅 분야의 확장성 확보에 중요한 마일스톤을 해결한 결과로 인정되고 있다. 둘째, 일본 RIKEN 그룹은 quTech 그룹의 소재를 공급받아 실리콘 3큐비트에서 오류 증상 측정없는 오류 수정의 가장 기초적인 결과를 보고하였다.[336]

Ge 의 경우 quTech Menno Veldhorst 교수 그룹은 Ge/SiGe을 이용하여 2x2 의 4큐비트 얽힘 상태를 시연하였으며, Ge 4x4 소자의 16 양자점 동시 튜닝을 데모하였다.[337] 기타 최신결과로 반도체 양자점-초전도 공진기의 하이브리드 소자에서 강한 상호작용을 시연하고 이를 스핀 큐비트의 장거리 얽힘에 사용하려는 노력이 진행중이다. 또한, 반도체 스핀 큐비트는 초전도 회로와 대비하여 비교적 고온 (수K) 의 영역에서도 결맞음시간을 유지하며 동작할 수 있다. 2022, 2023년에는 유럽과 호주 연구그룹을 중심으로 이를 실험적으로 확증하는 것에 성공했다.[338]

(3) 적용 분야

멀티 큐비트 소자 공정 및 제어 기술은 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파와 저주파의 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술 인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면 국제적인 경쟁력 확보에 있어 상대적으로 수월하다. 또한 성공적인 반도체 큐비트 집적화 기술이 실현될 경우, 양자컴퓨팅 관련 알고리듬과 소프트웨어 등이 다양한 산업에 광범위하게 활용돼 4차 산업 혁명을 주도할 가능성이 커 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 수 있다.

다. 확장 가능한 통합 양자프로세서 기술

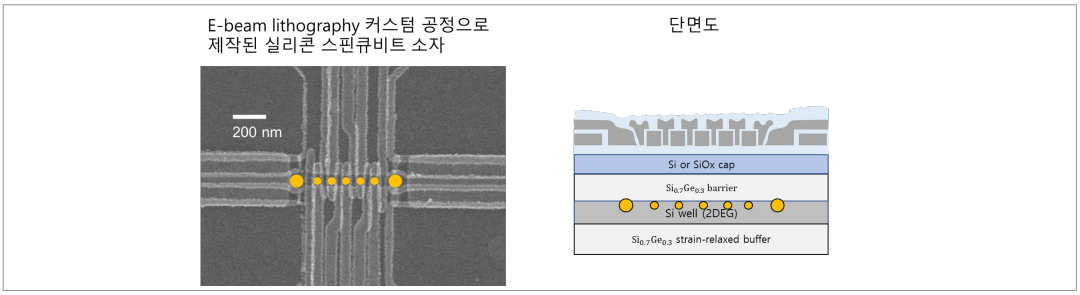
(1) 기술 동향

반도체 스핀 큐비트 양자컴퓨팅 플랫폼의 장점에도 불구하고, 현재까지 해당 분야는 고성능 E-beam Lithography를 활용해 학계와 연구소의 커스텀 공정으로 제작된 소자의 성능 검증과 소규모 큐비트 집합의 얽힘상태를 시연하는 수준에 머물러 있다. 가장 큰 이유는 스핀 큐비트 동작 검증을 위한 네 가지 기본 요소(단일 전하 양자점 형성, 상태 초기화, 양자게이트 조작, 양자상태 측정) 과정에서, 외부 제어 가능한 소자 파라미터의 가변도를 극대화하기 위해 다양한 게이트 구조를 설계하고 검증하는 과정이 필요하기 때문이다.

336) Nature 608, 682 (2022)
337) Nature Nanotechnology (2023)
338) Nature Electronics 5, 178 (2022)

이 과정에서 극단적으로 짧은 게이트 간 간격, 필요 이상의 제어라인 수, 모든 파라미터의 독립적인 조절 등이 요구되고, 커스텀 공정으로 제작한 스핀 큐비트 소자는 다음 그림과 같이 기존 파운드리 표준공정과는 다른 형태로 제작되고 있다.

그림 II-3-7 학계연구소 커스텀 공정을 이용한 반도체 스핀 큐비트 소자



※ 서울대 (2022)

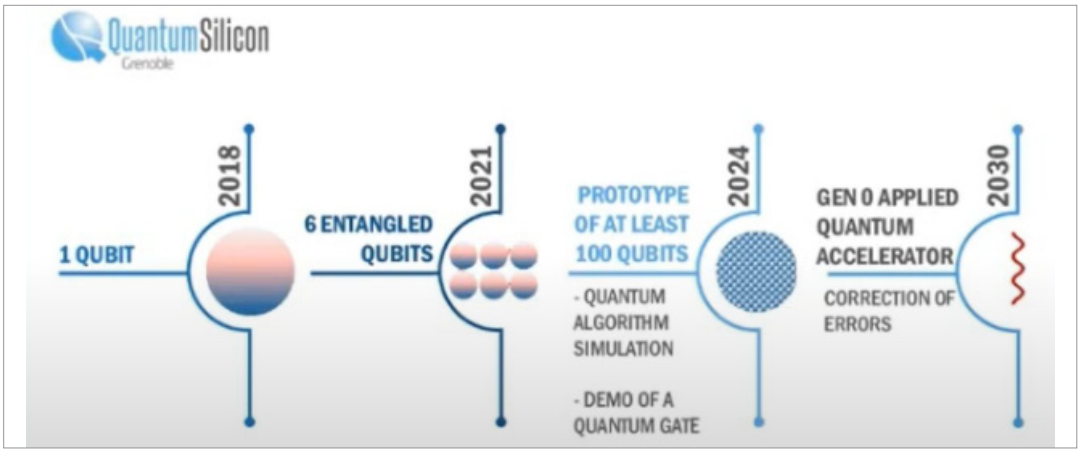
세계적으로는 소수의 학·연 연구소를 중심으로 산업에 활용되고 있는 파운드리 공정을 그대로 사용해 스핀 큐비트 제작 및 제어 기술을 개발하려는 노력이 추진되고 있다. 이는 반도체플랫폼이 가진 확장성에 대한 진정한 잠재력을 가늠하는 지표가 된다. 현재 산업체 표준공정은 이미 DUV(Deep Ultra-Violet) 공정으로도 수십 나노미터 미만의 게이트 선폭을 제작하는 것이 가능하고, 게이트 간 간격도 100나노미터 미만이 가능한 수준에 이르렀다. 더군다나 EUV(Extreme Ultra-Violet)의 경우 수 나노미터까지 제작 가능해 파운드리 공정으로 큐비트를 제작하는 가능성이 커지는 추세이다.

이와 함께 큐비트의 규모가 확장될수록 큐비트 단과 제어회로 단을 하나의 칩으로 통합한 양자시스템 온 칩 (Quantum System On Chip)을 개발하려는 연구가 추진되고 있다. 확장형 양자프로세서 구현을 위해 필수적인 양자시스템 온 칩은, 그동안 mK에서만 동작하는 큐비트 단과 필연적인 전력 소모와 발열 때문에 수K에서 동작하는 고전 제어회로를 통합하려는 노력이다. 이를 위해 반도체 스핀 큐비트를 수K에서 동작하고 결맞음 시간을 유지하려는 소재, 전자, 양자공학적 연구가 추진 중이다.

(2) 연구 동향

2022년 현재 파운드리 공정과 호환되는 방법을 사용한 단일 스핀 큐비트의 동작은 보고된 바 있으며, 관련 연구는 프랑스 LETI-CEA의 학연연구소가 주도하고 있다. CEA는 최근 유럽의 양자컴퓨팅 관련 연구 기관과 컨소시엄을 형성해 2024년경 100 스핀 큐비트, 2030년경 실용적 양자컴퓨팅 프로세서를 발표한다는 로드맵을 제시했다. 그러나 가장 최근의 결과에서도 공정 중 가장 미세한 과정은 E-beam Lithography를 혼용하는 등 표준공정의 수정을 통해 스핀 큐비트 전용 공정을 개발함으로써 이루어졌다.

그림 II-3-8 프랑스 CEA 중심의 유럽 연구소 컨소시엄의 확장형 반도체 양자프로세서 로드맵



※ https://eetimes.eu/cea-leti-details-silicon-based-quantum-computing-roadmap/

파운드리 공정 중 FDSOI(Fully Depleted Silicon On Insultor) 28nm 공정은 기술적 완성도와 스핀 큐비트용 소자 구조와의 유사성을 바탕으로 양자소자 제작에 가장 많이 쓰이는 공정이다. LETI-CEA 연구소는 2015년 최초로 CMOS 파운드리 공정과 호환되는 FDSOI 기반 Si 나노와이어 공정(자연적 동위원소 순도)을 개발해 CMOS 스핀 큐비트의 단일 큐비트 동작을 시연했다. 가장 최근에는 CMOS 스핀 큐비트 중 홀-스핀을 이용한 P-type 소자에서 자연적 동위원소 순도의 Si임에도 불구하고 빠른 전기적 제어를 통해 ^{28}Si과 비등한 논리게이트 충실도를 보였으며, 특히 반도체 스핀 큐비트가 수K에서도 결맞음 시간을 유지할 수 있다는 결과를 발표했다. 현재까지 파운드리 공정으로 제작된 스핀 큐비트에서 높은 충실도의 이중 큐비트 논리게이트가 실증된 사례는 없으나, 꾸준한 공정과 제어 측면의 연구개발을 통해 앞으로 수년 안에 구현될 전망이다.

또한 Intel-TuDelft 합작연구소인 QuTech는 2020년 4K의 극저온에서 동작하며 초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트 모두에 사용할 수 있는 고전 CMOS 제어회로를 개발했으며, 이 제어기는 논리게이트 펄스 생성과 양자상태 단발 측정을 수행할 수 있다. 아직 큐비트는 mK의 영역, 제어회로는 4K의 영역에 존재해 제어라인의 연결이 필요하다. 그렇기에 다른 연구그룹에서는 실증한 수K 온도에서 작동하는 스핀 큐비트를 제어회로와 통합해 하나의 칩에서 큐비트 구현, 제어, 측정의 전 과정을 수행하는 양자시스템 온 칩을 실험적으로 구현하기 위해 노력하고 있다.

2022-2023 연구동향으로 기존 실리콘 양공(hole) 스핀 큐비트는 양공의 높은 스핀-궤도 상호작용으로 마이크로 자석 없이 스핀을 전기적으로 제어할 수 있는 장점이 있음을 보였으나, 전자 스핀에 비해 결맞음시간 자체는 짧은 것이 단점으로 지적되었다. 프랑스 Leti-CEA 연구진은 홀 스핀 양자점의 이방성을 이용하여 특별한 외부 자기장 방향에서는 전기노이즈의 영향이 최소화되는 동시에 스핀 큐비

트 구동속도는 유지할 수 있음을 보여 전자스핀과 동일 또는 우월한 결맞음시간을 가질 수 있음을 보였다. 또한 최근에는 반도체 스핀 큐비트의 확장성을 명확히 확보하고 큐비트 레이어-제어회로가 통합된 양자 시스템 온칩 개발을 목표로 핀란드 VTT의 스핀오프 스타트업 SemiQon과 같은 반도체 양자컴퓨팅 전용 산업체 파운드리가 설립되는 등 스타트업이 생겨나는 추세이다.

3. 이온 트랩

세계적으로 이온 포획을 이용한 연구를 진행하는 그룹은 약 100여 곳이 있으며 양자컴퓨터 및 양자정보, 원자시계, 센싱, 시뮬레이션, 물리학 실험 등의 다양한 연구가 진행 중이다.[339] 양자컴퓨터 분야는 선두 그룹과 후발 그룹의 격차가 있는 상황이다. 예를 들어 2개의 양자얽힘 게이트를 구현한 그룹은 국내 서울대 연구진을 비롯해 전 세계적으로 10여 개 정도로 알려져 있다. 또한 5개 이상의 큐비트에서 개별 조작 구현에 성공했다고 발표한 그룹은 5개 이내이다. 현재 가장 앞서있는 그룹으로는 미국 IonQ(32개의 상호 연결된 큐비트 조작), Quantinuum(이온 이동을 통한 QCCD 구현), 오스트리아 Innsbruck 대학(51개 이온 개별 조작), 중국 칭화대(5개 양자얽힘 구현) 등이 있다.

이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 자연적으로 같은 에너지의 큐비트를 이용하며, 높은 신뢰도의 초기화, 측정, 게이트 조작 가능성, 긴 결맞음 시간, 확장 가능성 및 임의의 양자얽힘 쌍을 생성할 수 있다는 장점이 있으나 상대적으로 느린 계산시간, 많은 장비가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 연구 추세는 플랫폼의 장점을 극대화하는 연구, 양자컴퓨터의 성능 개발을 위한 큐비트 확장 및 개별 조작 성능을 증가시키는 연구, 단점을 보완하기 위한 장비의 소형화 및 집적화 연구 등의 방향으로 진행되고 있다.

339) https://quantumoptics.at/images/miscellaneous/IonTrappers.pdf

표 II-3-1 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 세부 사항에 대한 기록

구분	성능	연구기관	비고
결맞음 시간	50초	Oxford 대학[340]	
	10분	칭화 대학[341]	Dynamical Decoupling 사용
	1시간	칭화 대학[342]	10분의 측정 결과로 메모리 시간 예측
단일 양자게이트 신뢰도	99.9999 %	Oxford 대학[343]	마이크로파를 이용한 큐비트 조작
	99.996 %	NIST[344]	펄스 레이저를 이용한 큐비트 조작
양자얽힘 게이트 신뢰도	99.92 %	NIST[345]	MS 게이트
	99.9 %	Oxford 대학[346]	Phase 게이트
큐비트 개수	32개	IonQ[347]	완전히 상호 연결된 큐비트 개수
	51개	Innsbruck 대학[348]	개별 조작 가능한 큐비트 개수
양자부피	2^{16}	Quantinuum[349]	H2
	2^{19}	Quantinuum[350]	H1-1

가. 이온 선택 및 이온 포획 기술

양자컴퓨터를 위해 사용되는 이온은 $^{171}Yb^{+}$ 이 가장 많이 사용되고 있으며 Ca^{+}, Ba^{+} 등의 이온도 사용되고 있다. 초고진공에서 안정적으로 이온을 포획하는 기술은 안정적인 양자컴퓨터 구현을 가능하게 하며, 양자조작의 성능을 높이기 위한 시작점이다. 매크로 포획 장치는 양자컴퓨터의 큐비트 개수를 증가시키는 방향으로 사용되기는 어렵다. 상대적으로 제작이 쉽고 강한 포획 우물을 생성하며 레이저와 포획 장치의 빛 산란이 적고 안정적인 포획이 가능하다는 장점으로, 단일 또는 적은 수의 양자얽힘 게이트 구현 및 성능 개선 등의 연구가 주로 연구되고 있다. 한편 매크로 포획 장치의 한계를 극복하며 장점을 살리기 위해 구획이 구분된 블레이드 포획 장치를 이용하는 연구그룹이 늘어나고 있다. 마이크로 포획 장치는 제작공정 오차를 최소화해 가공할 수 있으며 작은 크기에 많은 이온을 포획할 수 있다는 장점이 있다. 주로 양자컴퓨터의 확장 및 개별 제어연구, 소형화 및 이온 이동(Shuttling) 연구에 사용되고 있다. 이외에도 다른 방향으로 양자컴퓨터의 확장 및 제어를 위한 포획 장치 개발이 이루어지

340) T.P. Harty et al. (2014)
341) Ye Wang et al. (2017)
342) Pengfei Wang et al. (2021)
343) T.P. Harty et al. (2014)
344) J.P. Gaebleret al. (2016)
345) J.P. Gaebleret al. (2016)
346) C.J. Ballance et al. (2016)
347) https://ionq.com/news/october-01-2020-most-powerful-quantum-computer
348) Florian Kranzl et al. (2022)
349) S. A. Moses et al. (2023)
350) https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219

고 있다. 예를 들어 2차원으로 이온 큐비트를 배열하는 포획 장치, 레이저를 통합하는 포획 장치 등이 있다.

(1) 기술 동향

① 이온 선택

양자컴퓨터를 위해 가장 많이 사용되고 있는 이온은 $^{171}Yb+$이다. 기저 초미세구조(Hyperfine Structure)는 1차 지만 효과(Zeeman Effect)에 영향을 받지 않으며, 냉각, 초기화, 측정 등에 사용하는 레이저가 잘 개발되어 있다. 또한 IonQ를 비롯한 선두 그룹이 이미 많은 연구를 해놓아 초기 세팅 및 개발 로드맵이 잘 알려져 있다는 장점이 있다. 큐비트 조작도 마이크로파나 산업적으로 많이 사용하는 355nm 펄스 레이저를 사용해 상대적으로 쉽게 구현할 수 있다. 1차 지만 효과에 영향을 받지 않는 초미세구조를 가진 이온은 자연적으로 Yb(이터븀), Cd(카드뮴), Hg(수은) 이온이 전부이며 최근 방사성 동위원소인 $^{133}Ba^{+}$ 도 같은 구조를 가졌다는 것이 알려져 캘리포니아 대학,[351] 옥스퍼드 대학[352] 등에서 사용 중이다. Innsbruck 대학에서는 $^{40}Ca^{+}$을 양자컴퓨터 연구에 사용하고 있으며 단일 레이저를 사용해 양자조작을 하고 있다.

양자연산 도중이나 양자연산을 끝낸 후에 메모리로서 정보를 보존해야 할 때에는 냉각용 레이저를 조사할 수 없어 이온의 가열이 일어나므로, 최근에는 $^{171}Yb^{+}$과 $^{138}Ba^{+}$의 이종 이온을 동시에 포획하여 $^{171}Yb^{+}$을 데이터 큐비트로 사용하고, $^{138}Ba^{+}$을 동조냉각 (sympathetic cooling)용으로 사용하여 양자연산 도중이나 이후에도 계속하여 $^{171}Yb^{+}$을 간접적으로 냉각시켜 가열로 인한 결깨짐을 방지하는 방법도 사용하고 있다.

원자의 선택은 레이저 및 장비 선정, 연구 방향과 밀접한 연관이 있으며 한 번 장비를 사들여 연구, 개발이 진행되면 변경이 거의 불가능하다. 또한 양자컴퓨터 연구가 국가의 중요 연구주제로 떠오르면서 원자의 공급 가능 여부도 중요한 요소인데, 선택적으로 동위원소만을 구하기가 쉽지 않으므로 각 국가 연구그룹의 원자 선택 및 기술 개발에도 영향을 미치고 있다. 한국의 경우 순수한 ^{171}Yb, ^{133}Ba 동위원소 구매가 거의 불가능하다.

② 이온 포획 장치

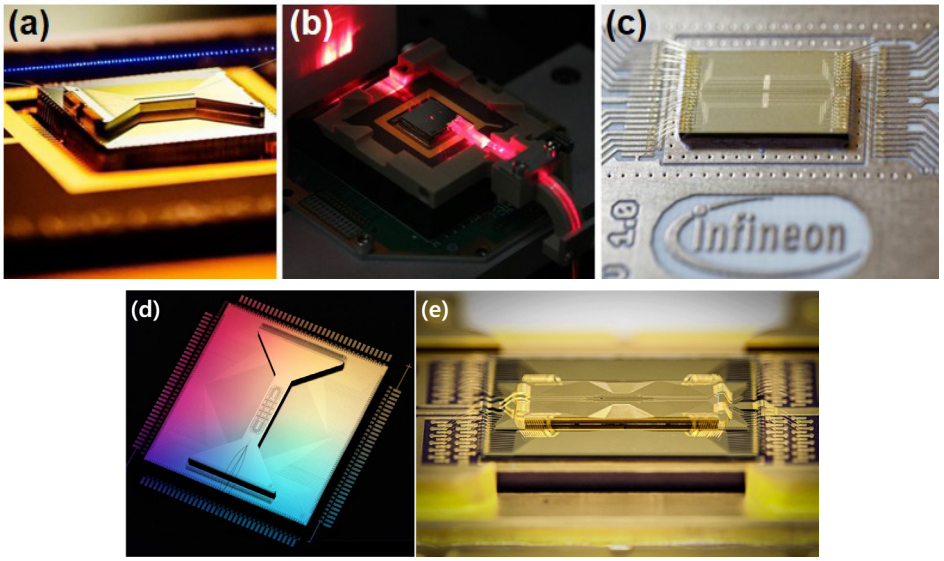
매크로 포획 장치는 대학 실험실 규모에서도 쉽게 제작할 수 있어 널리 사용되며, 일반적인 이온 포획을 이용한 다양한 연구에 쓰이고 있다. 마이크로 칩(Chip) 포획 장치는 반도체 공정 및 레이저 가공 등의 기술이 사용되며, 마이크로 포획 장치를 개발하고 제작해 포획에 성공한 곳은 5개 정도이다. 포획 장치 제작에 가장 앞서 있는 곳은 미국 Sandia와 Quantinuum으로 자국의 이온 포획 그룹에 장치를 제공하고 있다. 한편 영국, 독일, 한국 등에서는 반도체 기술 기반 마이크로 포획 장치를 제작해 사용하

351) David Hucul et al. (2017)

352) https://www.physics.ox.ac.uk/research/group/ion-trap-quantum-computing/research-areas/abaqus

고 있다. Sandia에서 개발한 마이크로 포획 장치 high opitcal access (HOA)[353] [그림 II-3-9 (a)]는 IonQ를 비롯한 미국 연구진이 주로 사용하고 있으며, 이 포획 장치를 이용해 121개의 이온 포획에 성공했고 32개의 상호 연결된 양자조작에 성공했다. IonQ와 Quantinuum의 경우 하나의 마이크로 포획 장치 안에 다수의 이온 저장 영역과 계산 영역을 분리해, 필요한 개수의 이온을 수 초 안에 계산 영역으로 보내 포획하는 기술을 보유하고 있다. 또한 최근에는 IonQ가 자체적으로 설계한 유리 기판 마이크로 포획 장치를 사용하고 있다 ([그림 II-3-9 (e)]). Quantinuum (前 Honeywell)은 Chip 포획 장치에서 $^{171}Yb^{+}$, $^{138}Ba^{+}$ 이온을 포획한 후 이동을 통해 양자얽힘 게이트를 구현했다([그림 II-3-9 (d)]).[354] [그림 II-3-9 (b)]에서 보듯이 MIT 대학에서는 Chip 포획 장치에 광섬유와 웨이브 가이드를 통합시켜 포획 우물과 레이저의 집적화를 이루었다.[355] 옥스퍼드 대학은 Infineon과 협력하여 마이크로 포획 장치를 개발 및 제작해 사용하고 있다.

그림 II-3-9 마이크로 포획 장치[356]



(a) Sandia에서 개발하여 IonQ 등 많은 이온 포획 그룹에서 사용 중인 리본 모양 포획 장치
(b) 광섬유와 웨이브 가이드를 이용해 집적화를 이룬 MIT의 마이크로 포획 장치[357] [358]
(c) 인피니온에서 개발해 영국 옥스퍼드 대학에서 사용 중인 마이크로 포획 장치[359]
(d) Quantinuum에서 개발하여 사용중인 경주로(race track) 마이크로 포획 장치[360]
(e) IonQ에서 자체 디자인한 유리기판 마이크로 포획 장치[361]

※ Physics 12(112) (2019), scitechdaily.com, Infineon

353) P. Maunz and W. Lucas (2016)
354) S. A. Moses et al. arXiv:2305.03828
355) R. J. Niffenegger et al. (2020)
356) Gabriel Popkin (2019)
357) R. J. Niffenegger et al. (2020)
358) I. Pogorelov et al. (2021)
359) https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2022/INFXX202207-098.html
360) https://www.quantinuum.com/hardware/h2
361) https://spectrum.ieee.org/ionq-new-quantum-computing-chip

(2) 연구 동향

이온 포획 기반 양자컴퓨터를 제작하기 위해 많은 개수의 이온을 안정되게 포획하고 소형화, 집적화를 달성하는 방향으로 포획 장치를 개발하는 연구가 진행되고 있다. Duke 대학은 포획시스템과 광학시스템의 소형화를 연구하고 있으며, Cryostat을 이용해 동전 크기의 진공 챔버 및 포획 장치를 구현했고 작은 테이블 크기의 광학시스템을 구현했다.[362] Innsbruck 대학, AQT는 렉 2개 크기에 모든 시스템을 집적해 이온 포획 기반 양자컴퓨터를 제작했다.[363] Oxford 대학은 광학시스템을 하나의 렉에 설치해서 연구에 사용하고 있다.

(3) 적용 분야

전통적인 이온 포획 연구는 실험실 하나를 가득 채울 정도의 공간이 필요했으나 점점 그 크기가 줄어들고 있으며, 기존보다 안정된 포획 장치들이 제작되고 있다. 안정적인 포획 기술은 성능이 뛰어난 양자컴퓨터 제작의 시작점이 되며, 안정적으로 포획된 이온의 개수가 늘어날수록 양자컴퓨터의 계산 능력이 향상된다. 또한 소형화 및 집적화 속도가 빨라짐으로써 이동할 수 있거나 보급이 가능한 형태의 양자컴퓨터 제작에 가까워지고 있다. 지금은 클라우드 서비스를 이용한 양자알고리듬의 시험 가동 수준에서 양자컴퓨터를 사용하고 있지만, 앞으로는 필요한 기업, 학교, 연구소에서 구매해 사용이 가능한 수준으로 개발이 진행되고 있다.

나. 양자게이트 및 양자알고리듬 구현

이온 큐비트를 이용한 양자게이트는 속도가 느리지만 긴 결맞음 시간으로 많은 양의 양자게이트를 사용할 수 있고, 임의의 양자얽힘을 구현할 수 있어, 다른 플랫폼에 비해 효율적인 양자알고리듬을 구현하며 높은 충실도를 달성하고 있다. 이온 포획 기반 양자컴퓨터를 이용해 쇼어 알고리듬, 양자화학 알고리듬, 물리학 모델링 등 다양한 양자알고리듬이 구현됐다.

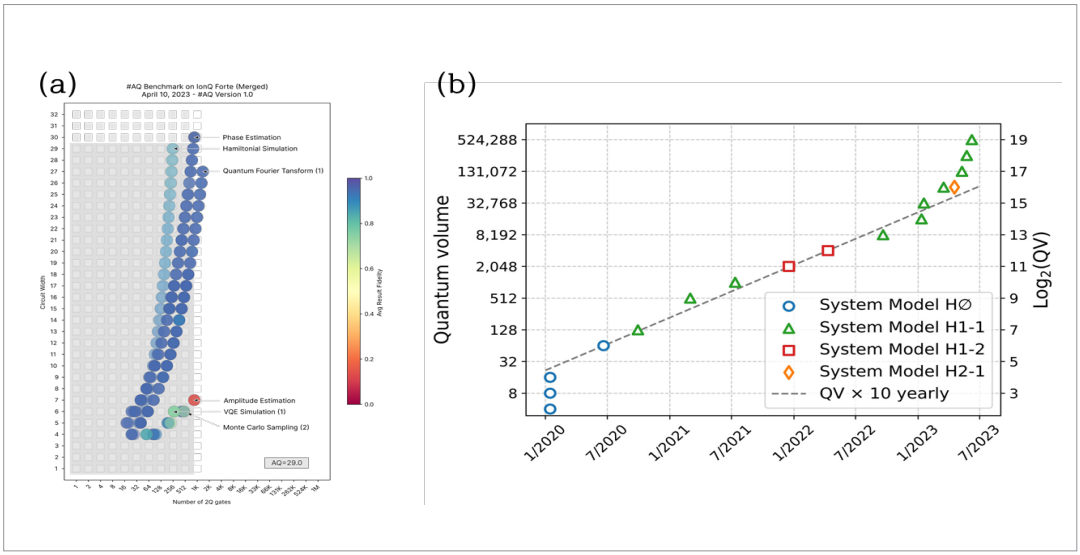
(1) 기술 동향

단일 양자게이트 충실도는 마이크로파를 이용했을 때 99.9999%(옥스퍼드 대학[364]), 펄스 레이저를 이용한 라만 전이로 99.996%(NIST[365])를 달성했다. MS 게이트를 이용한 양자얽힘 게이트는 NIST에서 99.92%의 충실도를 달성했다.[366] 양자컴퓨터의 구현을 위해 다수의 큐비트 시스템에서 임의의 양

362) Robert F. Spivey et al. (2021)
363) I. Pogorelov et al. (2021)
364) T.P. Harty et al. (2014)
365) J.P. Gaebler et al. (2016)
366) J.P. Gaebler et al. (2016)

자얽힘을 구현하는 것이 중요하며, IonQ에서는 2023년 29개의 알고리듬 큐비트를 달성했다.[367] 다수의 이온 큐비트 양자얽힘을 구현하는 것은 빠른 양자알고리듬 구현을 가능하게 하며 GHZ 상태를 구현해 이를 달성할 수 있다. IonQ에서는 4개의 이온,[368] 칭화대학 역시 4개의 이온,[369] Innsbruck 대학에서는 24개 이온이 GHZ 상태를 달성했으며,[370] 최근 Quantinuum에서 32개 GHZ상태를 달성했다고 보고한 바 있다.[371] 또한 Quantinuum은 Honeywell에서 개발한 H1-1 칩을 이용해 양자플랫폼 중 최대인 2^{19}의 양자 부피(Quantum Volume)를 달성하였다고 보고하였다.[372] 클라우드 시스템을 통한 양자알고리듬의 성능 비교가 많이 이루어지고 있으며, 임의의 큐비트 쌍을 이용하는 양자알고리듬을 수행할 때는 이온 포획 기반의 양자컴퓨터가 월등한 성능을 보여주고 있다.[373]

그림 II-3-10 (왼쪽) IonQ에서 달성한 29개 알고리듬 큐비트, (오른쪽) Quantinuum의 양자 부피 달성 경과



367) J. Chen et al. arXiv:2308.05071

368) Caroline Figgatt et al. (2019)

369) Yao Lu et al. (2019)

370) I. Pogorelov et al. (2021)

371) S. A. Moses et al. arXiv:2305.03828

372) https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219

373) I. Pogorelov et al. (2021)

(2) 연구 동향

MS 게이트는 양자알고리듬 구현에 많이 사용되는 양자얽힘 게이트이며 이온의 운동을 이용해 양자얽힘을 달성한다. 그러나 이온 큐비트의 개수가 증가하면 운동 값이 증가하므로, 게이트 펄스의 성형(Shaping)을 이용한 높은 신뢰도의 양자얽힘 게이트를 구현하는 것이 필수적이다. 그러므로 펄스의 세기, 주파수, 위상 등의 모양을 변형시켜 양자얽힘의 충실도를 높이는 연구가 활발히 진행 중이다. 펄스 변조를 통한 양자얽힘 게이트 구현에 있어 Maryland 대학과 IonQ는 세기 성형을 통해 준비된 29개의 모든 이온쌍에 대해 평균 99.6%의 양자얽힘 게이트 충실도,[374] Quantinuum 32개의 모든 이온쌍에 대해 99.8% 의 충실도를 달성했다.[375] 또한 주파수 성형(Duke 대학[376] 98.3%), 위상 성형(시드니 대학[377] 99.4%), 세기와 주파수 동시 성형(칭화 대학[378] 96.5%) 등의 연구가 진행되고 있다. 한편 IonQ, ATQ(Innsbruck 대학) 등에서는 이온 포획 양자컴퓨터를 이용한 다양한 알고리듬을 구현하고 있으며, 양자오류정정 알고리듬을 통해 충실도를 높여 완전한 양자컴퓨터를 완성하려는 연구가 진행되고 있다.

(3) 적용 분야

높은 충실도를 보여주는 양자게이트와 양자알고리듬의 구현은 실질적으로 양자컴퓨터를 활용할 수 있게 한다. 특히 이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 높은 충실도와 함께 임의의 큐비트 쌍에서 양자얽힘이 가능하다는 장점으로, 양자알고리듬 결과에서도 높은 충실도를 보여주고 있다. 쇼어 알고리듬은 소인수분해를 이용한 암호 해독, 그로브 탐색 알고리듬은 빠른 정보 검색, VQE 등의 양자화학 알고리듬은 신약 및 신물질 개발 등에 사용할 수 있다. 양자알고리듬은 최적화 탐색에 강점을 보일 것으로 예상되며, 금융 최적화 포트폴리오 구성, 항공, 교통의 효율적인 경로 탐색, 일기 예보 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

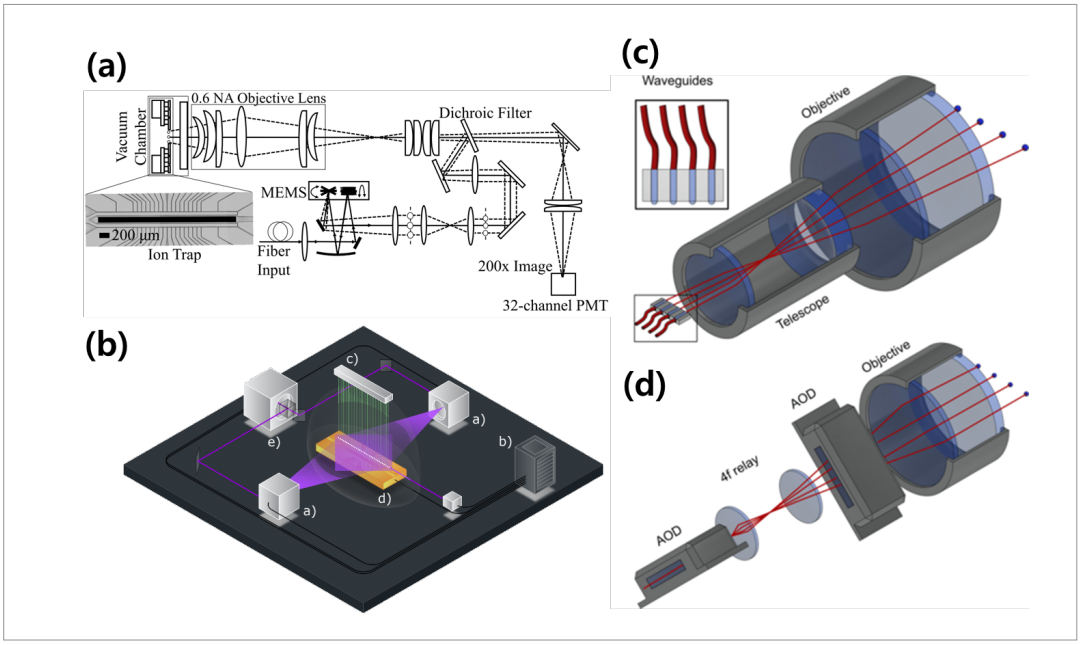
다. 큐비트 확장

양자컴퓨터의 성능 향상을 위해서는 안정적으로 포획된 큐비트의 개수를 늘리는 것과 더불어 개별 조작 및 측정 기술의 개발이 필요하다. 레이저를 이용한 개별 큐비트 조작 연구가 많이 이루어지고 있으나 일부 마이크로파를 이용한 개별 큐비트 조작 연구도 이루어지고 있다. 레이저를 이용한 개별 큐비트 조작 방법으로는 다채널 음광학 변조기(Multi-channel Aucosto-Optic Modulator, AOM), 음광학 디플렉터(Aucosto-Optic Deflector, AOD), MEMS를 이용한 기계적 거울 조작, 광섬유 배열을 이용한 방법 등이 사용되고 있다. Cryostat을 이용한 저온 시스템도 안정된 포획 환경을 제공해 시스템의

374) J. Chen et al. (2023). arXiv:2308.05071
375) S. A. Moses et al. (2023). arXiv:2305.03828
376) Pak Hong Leung et al. (2018)
377) Alistair R Milne et al. (2020)
378) Caroline Figgatt et al. (2019)

소형화를 위해 사용되며 IonQ, Duke 대학, Innsbruck 대학, Oxford 대학 등에서 마이크로 포획 장치와 함께 사용하고 있다.

그림 II-3-11 양자컴퓨터의 확장을 위한 다양한 큐비트 개별 제어 방법



(a) Duke 대학에서 개발한 MEMS 마이크로 거울을 이용한 개별 큐비트 제어 방법[379]
(b) IonQ Forte에 탑재된 4개의 AOD를 이용한 개별 큐비트 제어 방법[380]
(c, d) AQT와 Innsbruck 대학에서 개발한 광섬유 배열과 AOD를 이용한 큐비트 개별 제어 방법[381]

(1) 기술 동향

다채널 음광학 변조기를 이용한 연구는 IonQ를 비롯해 지금까지 많은 연구그룹에서 사용되고 있는 방법이다. IonQ에서는 약 70여 개 이온의 개별 조작이 가능하고, 32개의 상호 연결된 이온 큐비트를 제어할 수 있다. Innsbruck 대학은 AOD를 이용해 51개 이온의 개별 조작에 성공했다. 최근 발표한 IonQ Forte는 네 개의 AOD를 탑재하여 기존에 사용하던 전역 레이저 광선 (global laser beam) 또한 개별 조작이 가능하게 변경하였다.[382] 현재는 많은 연구 그룹이 개별 이온 제어를 위해 AOD를 주로 사용하는 추세이다. 또한 광섬유 배열에 의한 개별 이온 조작도 양자컴퓨터 소형화에 사용되고 있다.[383] Duke 대학에서는 MEMS를 이용한 마이크로 거울을 개발하여 이온의 개별 제어에 사용 하였으나[384]

379) S. Crain et al (2014).
380) J. Chen et al. (2023).
381) I. Pogorelov et al. (2021)
382) J. Chen et al. (2023). arXiv:2308.05071
383) Florian Kranzl et al. (2022)
384) Changsoon Kim et al. (2007)

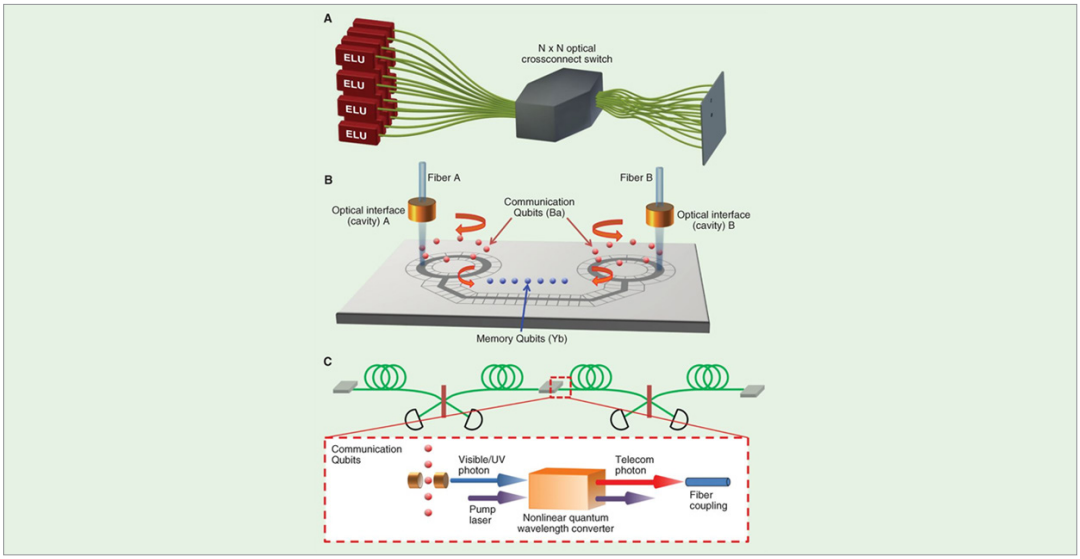
최근에는 AOD를 이용하여 개별 조작을 하고 있다. Sussex 대학에서는 자기장의 세기를 이용하는 서로 다른 지만큐비트(Zeeman Qubit) 에너지를 이용해 마이크로파로 개별 조작 및 양자얽힘을 구현했다.[385)]

(2) 연구 동향

IonQ를 비롯한 많은 그룹이 개별 조작을 위해 사용하던 다채널 음광학 변조기(Multi-channel AOM)를 이용한 개별 이온 큐비트 연구가 계속되고 있다. 빠른 스위칭이 가능하고, 상대적으로 설치가 쉽다는 장점이 있으나, 기술적으로 양자컴퓨터 확장에 어려움이 있고 조작 레이저의 간격 조절이 어려워 포획된 이온들 간의 간격들이 조작 레이저의 간격과 일치해야 한다는 단점이 있다. 이에 대한 해결책으로 최근에는 이온의 개별 조작을 위해 음광학 디플렉터(AOD)를 많이 사용하는 추세이다. Innsbruck 대학과 Duke 대학 및 IonQ가 대표적이다. AOD의 주파수 변조를 통해 레이저의 굴절을 조작해 개별 이온에 조사할 수 있도록 조작하는 방법으로, 포획된 이온의 간격 변화와 상관없이 개별 이온을 높은 충실도로 조작할 수 있다는 장점을 갖고 있다. Innsbruck 대학과 MIT에서는 광섬유 배열을 이용한 개별 이온 조작을 연구하고 있고, Sussex 대학에서는 마이크로파를 이용하는 양자컴퓨터를 연구하고 있다. 마이크로파는 높은 충실도의 양자게이트를 구현할 수 있으나 이온들 간의 간격 대비 긴 파장으로 인하여 개별 조작이 어렵다는 단점이 있었지만, 공간상으로 기울어진 자기장을 주어 개별 큐비트를 조작할 수 있게 만들었다. Quantinuum(前 Honeywell)에서는 포획 이온을 이동, 교환해 양자얽힘을 구현했다. 개별 이온을 각각 조작하는 것이 아닌, 필요한 이온만 이동시켜 양자얽힘과 양자게이트를 구현하는 연구를 진행 중이다.[386)] 오류 보정을 포함해 완전한 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 1,000개의 큐비트가 필요할 것으로 예상된다. [그림 II-3-12]에서 보듯이 하나의 포획 장치에서 1,000개의 이온을 포획해 개별 조작하는 것은 어렵다고 알려져 있으므로, 서로 다른 포획 장치의 연결을 통한 확장을 연구하고 있다.[387)] 또한 먼 거리의 양자얽힘 구현 및 양자정보 전달에 관한 연구가 진행되고 있다.

385) Charles Neill et al. (2017)
386) J. M. Pino et al. (2021)
387) Monroe, C. & Kim, J. (2013)

그림 II-3-12 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 확장 아이디어



(a) 개별 계산 유닛(ELU, Elementary Logic Unit)을 모아 하나의 양자컴퓨터를 완성한다.
(b) 광섬유를 통해 양자정보를 전달해 정보를 저장하고 통신을 수행한다.
(c) 이온 큐비트와 광자를 이용한 양자네트워크를 구현하는 아이디어[388]

※ Science 339(6124), 1164 (2013)

(3) 적용 분야

큐비트 확장연구는 완전한 양자컴퓨터의 구현을 위해 꼭 필요하다. 그리고 먼 거리 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 정보 전달 및 양자얽힘은, 광자와 광섬유를 통해 연결되므로 양자네트워크의 개발이 필수적이다. 이는 곧 양자통신에 사용할 수 있어 정보 보안 측면에서 해킹이 힘든 통신시스템을 구현할 수 있게 된다. 또한 큐비트의 확장을 통해 양자컴퓨터가 구현되면 다양한 양자알고리듬의 구현도 가능해져, 이를 통해 고전 컴퓨터로는 힘들거나 시간이 오래 걸리는 계산도 빠르게 처리돼 새로운 산업의 발생과 에너지 및 자원의 효율적인 사용이 가능할 것으로 예상된다.

그림 II-3-13 양자컴퓨터의 활용이 예상되는 분야와 그 내용



※ 집필진 작성

388) Monroe, C. & Kim, J. (2013)

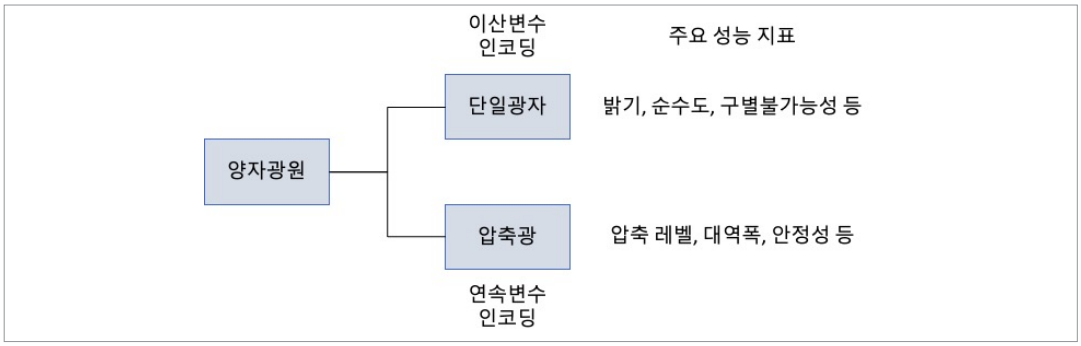
4. 양자광학 기반 양자컴퓨팅

가. 양자광 생성 기술

(1) 기술 동향

양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술은 단일광자나 압축광(Squeezed Light) 같은 양자광원에 정보를 인코딩해 연산에 활용하는 기술이다. 따라서 고효율, 고성능 양자광 생성 기술은 양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술에 꼭 필요한 핵심 기술에 해당한다. 양자광원은 크게 단일광자와 압축광으로 나눌 수 있으며, 이들은 각각 이산변수(Discrete Variable)와 연속변수(Continuous Variable)로 양자정보를 인코딩한다. 단일광자는 일정한 시간에 하나의 광자만 존재하는 광원을 나타내며, 압축광은 위상공간에서 한 방향의 불확정성이 양자잡음 한계보다 작은 상태의 광원을 말한다. 단일광자 광원의 성능은 초당 얼마나 많은 개수의 단일광자가 발생하는지를 나타내는 '밝기', 광자 개수 분포에서 단일광자의 비율을 나타내는 '순수도', 다른 단일광자와의 '구별 불가능성' 등으로 평가한다. 압축광 광원의 성능은 압축 정도를 나타내는 '압축 레벨', 압축 용량을 나타내는 '대역폭', 장시간 안정적인 압축광 생성을 나타내는 지표인 '안정성' 등으로 평가한다.

그림 II-3-14 양자광원의 분류에 따른 인코딩 방법과 주요 성능 지표



※ 집필진 작성

단일광자 광원 기술은 크게 단광자 방출체 기반의 확정적 단일광자 생성 방식과 비선형 광학 기반의 광자쌍 생성 방식으로 구분된다. 단광자 방출체 기반의 단일광자 광원은 이론상 원하는 시간에 반드시 단일광자를 방출하는 확정적 단일광자 생성이 가능하며, 나노 공진기, 나노 안테나 등 나노포토닉스 구조를 결합해 '밝은' 단일광자 광원을 만들 수 있다. 단광자 방출체로는 주로 양자점이나 점결함 색중심(Color Center)이 널리 연구되고 있다. 여러 개의 단일광자를 생성하기 위해서는 다수의 단광자 방출체를 활용하거나 하나의 단광자 방출체에서 생성된 단일광자를 시공간적으로 나누는 방법이 있다. 다중 단일광자의 구별 불가능성을 확보하기 위해서는 보통 단광자 방출체를 극저온으로 냉각해 포논

(Phonon)에 의한 잡음(Noise)을 최소화하는 방법을 사용한다. 그리고 다수의 단광자 방출체를 이용할 때는 별도의 온도, 전기장, 자기장, 물리적 변형(Strain) 등에 대한 미세조정이 필요하다.

비선형 광학의 자발방출(Spontaneous Emission)을 이용해 광자쌍을 만들어, 하나의 광자쌍 측정을 통해 반대편에 단일광자가 생성되었음을 알 수 있는, 예고된(Heralded) 단일광자 광원을 만들 수 있다. 이 방식은 실험 장치가 비교적 단순하고 상온에서 동작하며, 단일광자 간 구별 불가능성을 쉽게 충족할 수 있다는 장점이 있으나, 원리상 확정적 단일광자 생성이 불가능하다. 하지만 최근에는 광자쌍 광원을 시간 다중화 (Time-Multiplexing) 하여 확정적 단일광자를 만드는 연구가 진행되고 있다.

양자광학 기반 양자컴퓨팅을 위해서는 단일광자 간 양자얽힘을 만드는 '양자얽힘 광원'을 만드는 과정이 필요하며, 이를 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 양자얽힘 광원은 복수의 단일광자 간 양자간섭과 후선택(Post-Selection)을 이용해 생성할 수 있으며, 이를 위해서 단일광자 간 구별 불가능성이 확보돼야 한다. 우선 단일광자 간 상호작용을 이용하면 이론적으로 확정적인 양자얽힘 광원 생성이 가능하므로, 이 상호작용에 필요한 비선형성을 극대화하기 위해 원자 등 매질과 광공진기를 활용하는 연구가 진행되고 있다. 또한 단일광자를 만들 때 하나의 광자를 만드는 대신 광자쌍을 만들고, 이들 간의 양자얽힘을 생성함으로써 양자얽힘 광원을 효율적으로 만들 수 있다. 비선형 광학 기반의 광자쌍 생성 시 처음부터 양자얽힘 광자쌍을 만드는 기술은 이미 잘 정립돼 있으며, 양자점과 같은 단광자 방출체에서도 바이엑시톤(Biexiton)을 이용한 광자쌍 생성 기술이 연구되고 있다. 다만 후선택 과정에서 필연적으로 손실이 발생하므로, 이러한 양자얽힘 광원 생성 방식은 확률적인 측면에서 뚜렷한 한계가 존재한다.

압축광은 비선형 광학 과정을 통해 생성할 수 있으며, 매질로는 비선형 크리스털이나 원자시스템을 주로 이용하고 비선형성을 극대화하기 위해 종종 광공진기를 함께 이용하기도 한다. 또한 비선형 크리스탈 내 레이저의 공간 모드를 작게 만들어 비선형성을 극대화하는 도파로(Waveguide) 타입의 비선형 크리스탈 역시 널리 이용되고 있다. 현재 압축광의 압축 레벨을 높이기 위한 다양한 연구가 진행 중이며, 양자컴퓨팅 분야에서는 양자 시뮬레이터의 일종인 가우시안 보존 샘플링(Gaussian Boson Sampling)을 위한 광원으로 많이 활용한다.

(2) 연구 동향

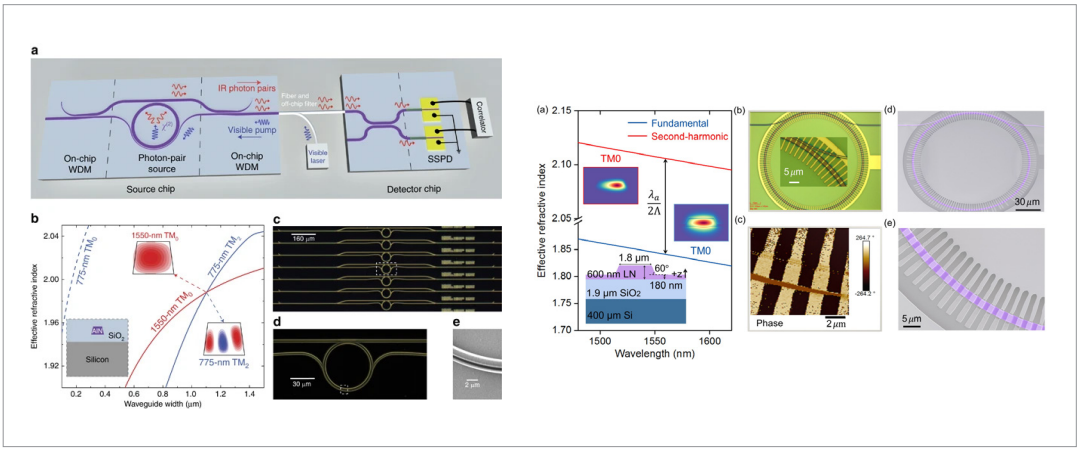
해외 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 기술은 중국, 미국, 유럽, 호주 등 기술 선진국을 중심으로 발전하고 있으며, 최근 전체 시스템 효율이 87.5%인 양자얽힘 광원이 보고됐다.[389] 미국 일리노이 주립대학은 광자쌍 광원에 시간 다중화(Time-Multiplexing)를 적용해 확정적 단일광자 광원을 만드는 연구

389) Liu (2022)

를 주도하고 있으며, 67%의 예고도(Heralding) 효율을 달성했다.[390] 시간 다중화를 이용한 확정적 단일광자 광원의 성능은 광자-양자메모리의 저장시간과 효율에 크게 좌우된다.

최근 일리노이 주립대학에서는 Harriot cell을 이용하여 단일광자 편광 큐비트의 저장시간 1.25us, 양자상태 충실도 99%, 저장효율 82%를 달성하였으며, 이 기술은 단일광자 광원의 예고도를 올리는 데 크게 기여할 전망이다.[391] 미국 예일대학교에서는 비선형 물질로 제작한 나노 공진기 기반 광자쌍 생성 연구 결과를 물질별로 보고했다.[392] [393]

그림 II-3-15 (왼쪽) AlN 비선형 물질로 나노 공진기를 제작해 광자쌍을 생성한 결과
(오른쪽) $LiNbO_3$ 비선형 물질로 제작한 나노 공진기



※ Guo (2016), Lu (2020)

양자점 단광자 방출체를 이용한 단일광자 생성 연구 역시 미국, 중국, 유럽 등을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 구별 불가능한 다수의 단일광자를 생성해 양자정보처리에 활용하는 수준이다. 특히 Sparrwo Quantum, Quandela와 같이 양자점기반 단일광자 생성소자를 상용화하는 스타트업이 설립되는 등 관련 산업 역시 성장하고 있다.[394] [395]

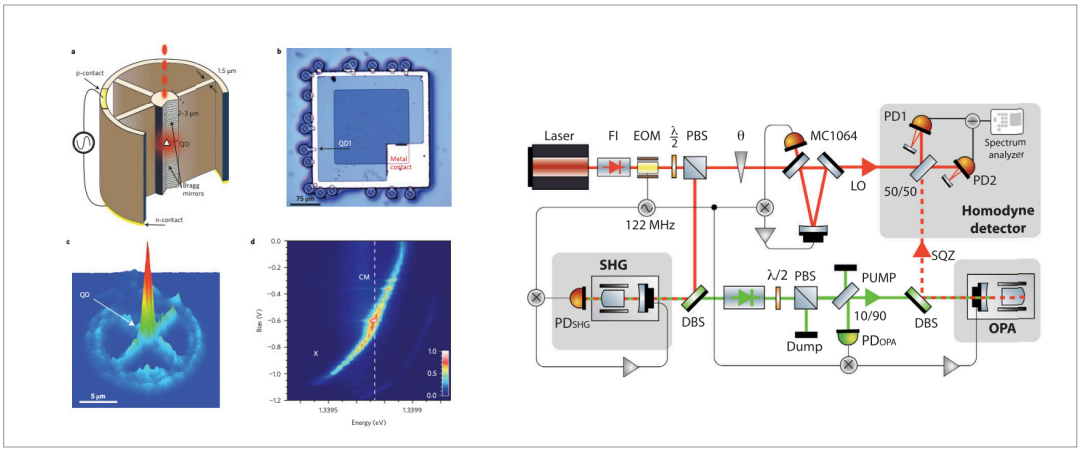
압축광 양자광원은 유럽, 호주, 일본, 중국 등에서 기술 개발을 수행하고 있으며, 특히 유럽과 호주의 연구개발 기간은 20여 년이 넘을 정도로 오래돼 많은 노하우를 보유하고 있다. 세계 최고 수준의 압

390) Kaneda (2019)
391) Arnold (2021)
392) Guo (2017)
393) J. Lu (2020)
394) Somaschi (2016)
395) Arakawa (2020)

축 레벨은 15dB 수준으로, 연속변수 기반 양자컴퓨팅에 필요한 18dB에 근접한 수준이다.[396)]

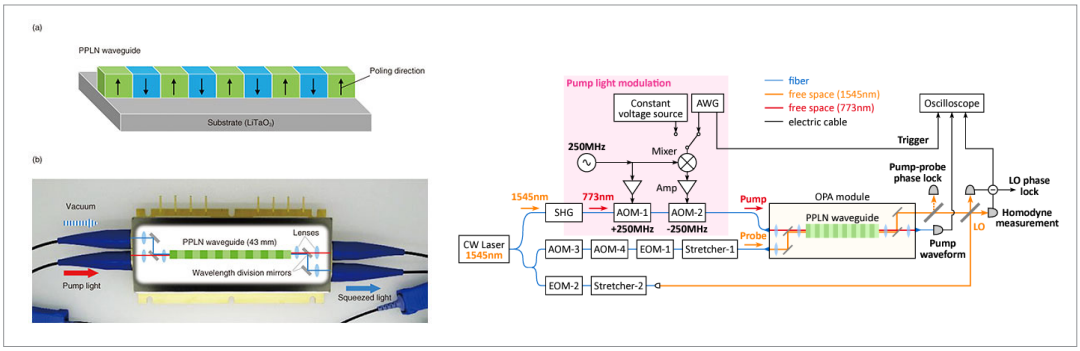
도파로(Waveguide) 타입의 비선형 크리스탈을 이용한 압축광원은 광공진기 없이 높은 압축 레벨을 달성할 수 있고, 펌프광원 변조를 통해 압축광의 성질을 빠르게 변조할 수 있어 양자시뮬레이터나 양자컴퓨터의 조작가능성을 확보하기 위해 널리 연구되고 있다. 최근 일본 NTT는 PPLN 도파로에 광섬유 피그테일된 6.3 dB 수준의 압축광원을 개발하였으며, 동경대에서는 이를 이용해 시간 다중화 압축광원을 개발하였다.[397)] 이러한 연구는 연속변수 양자광학 기반 양자컴퓨터 연구의 중요한 광원으로 활용될 전망이다.

그림 II-3-16 (왼쪽) 프랑스 CNRS 연구소에서 개발한 양자점 기반 단일광자 광원
(오른쪽) 독일 막스 플랑크 연구소에서 개발한 15dB 압축광 생성 및 측정 장치



※ Somaschi (2016), Vahlbruch (2016)

그림 II-3-17 (왼쪽) 일본 NTT에서 개발한 PPLN 도파로 기반 압축광원
(오른쪽) 이를 이용한 시간 다중화 압축광원 실험 구상도 (동경대 다케다 교수)



※ Kashiwazaki et al (2021), Tomoda et al (2023)

396) Vahlbrunch (2016)
397) Tomoda et al (2023)

(3) 적용 분야

양자광원은 양자광학 기반 정보 처리의 기본 자원으로 양자통신, 양자네트워크, 양자센서, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션에 다양하게 활용될 수 있다. 세계적으로는 양자광원 자체를 부품이나 장비로 개발해 상용화하는 사례가 생기고 있으나, 국내에서는 아직 상용화 사례가 없다. 최근 미국 광학 부품 회사인 Thorlabs와 프랑스 스타트업 회사인 Aurea에서 비선형 광학 기반 광자쌍 양자광원 장비를 상용화했으며, 덴마크 스타트업 회사인 Sparrow Quantum과 프랑스 스타트업 회사인 Quandela에서는 단일광자를 생성하는 양자점 소자를 상용화했다. 상술한 NTT의 PPLN waveguide 압축광원은 상용화를 목표로 개발되었으나 2023년 9월 현재 판매를 하고 있지는 않고 있다.

나. 양자광 측정 기술

(1) 기술 동향

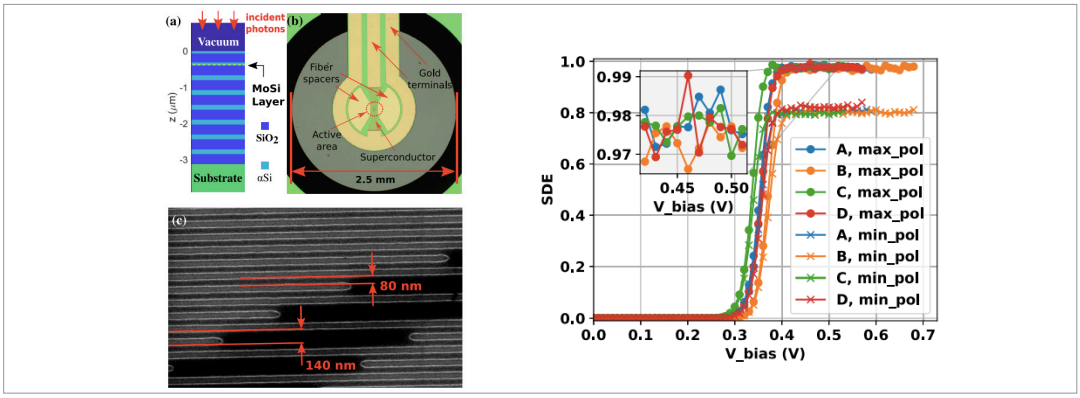
양자정보처리를 위해서는, 생성한 양자광원의 잡음을 최소화하며 효율적으로 측정하는 기술이 필수적이다. 단일광자는 보통 가이거 모드 광다이오드나 극저온에서 작동하는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 이용해 측정할 수 있지만, 이들은 단일광자의 유무만을 측정할 수 있으며 광자의 개수를 측정할 수는 없다. 광다이오드나 초전도 나노와이어 단일광자 검출기 Multiplexing을 통해 광자 개수를 검출할 수 있으나, 효율이나 비용에서 한계가 존재한다. 수십 mK 수준의 극저온에서 동작하는 Transition Edge Sensor(TES)를 이용해 수십 개 수준의 광자 개수를 측정할 수 있는 기술이 존재한다. 압축광 등 연속변수 기반 양자광원은 호모다인(Homodyne) 검출을 통해 측정할 수 있으며, 호모다인 측정 장치는 고효율 광다이오드와 아날로그/디지털 논리회로로 구성된다.

(2) 연구 동향

고효율 초전도 나노와이어 단일광자 검출기에 관한 연구가 미국 NIST 주도로 진행되고 있으며, 최근 98%의 단일광자 검출 효율을 달성한 결과를 보고했다.[398] 미국 예일대학교에서는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 나노포토닉스에 접목해 집적회로에서 91%의 효율로 단일광자를 검출한 연구 결과도 발표했고,[399] 이 결과를 독일 Karlsruhe, Munster 공대 등에서 발전시켜 연구 중이다.[400]

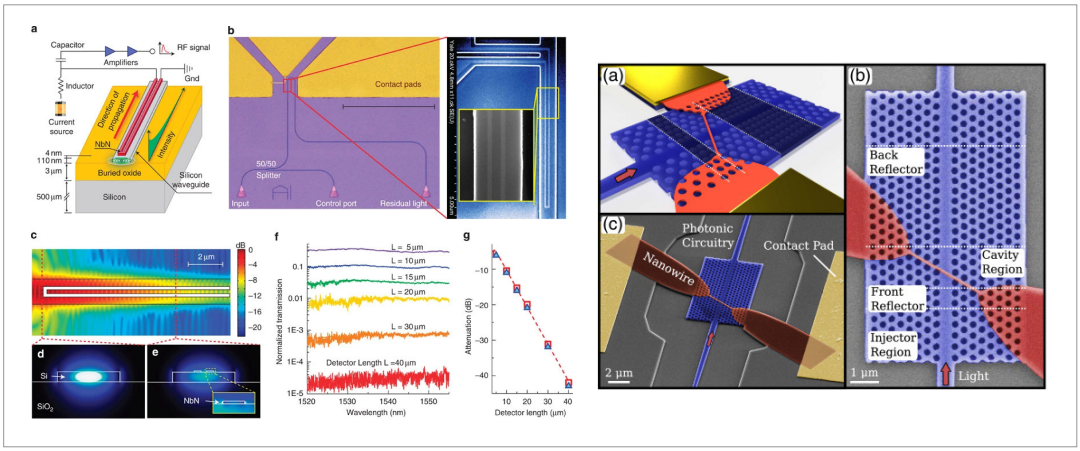
398) Reddy (2020)
399) Pernice (2012)
400) Munzberg (2018)

그림 II-3-18 미국 NIST에서 개발한 검출 효율 98%의 초전도 나노와이어 단일광자 검출기



※ Reddy (2020)

그림 II-3-19 (왼쪽) 미국 예일대학교, (오른쪽) 독일 Munster 대학교에서 개발한 나노포토닉스에 집적화한 초전도 나노와이어 단일광자 검출기

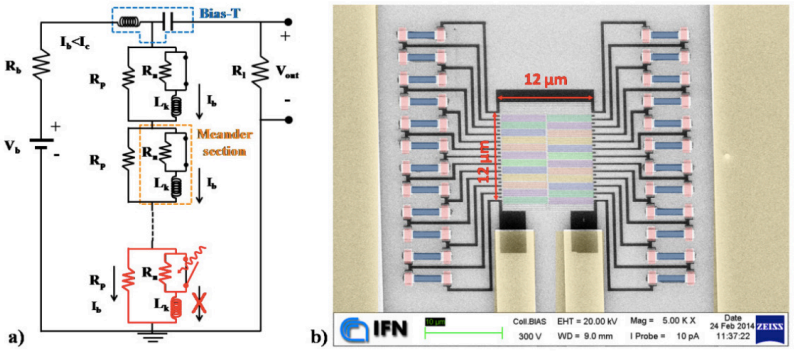


※ Pernice (2012), Munzberg (2018)

미국, 네덜란드, 러시아, 스위스 등에서 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 상용화하는 다양한 스타트업 회사가 설립되고 있다. 이들이 만드는 상용 초전도 나노와이어 단일광자 검출기의 사양은 대동소이하며, 최대 80~85% 수준의 단일광자 검출 효율을 보이는 수준이다. 초전도 나노와이어 단일광자 검출기는 광자의 개수를 검출할 수 없으나, Multiplexing을 통해 검출하려는 연구개발이 진행 중이며, 현재 최대 24개의 단일광자를 검출할 수 있다. 다만 이런 방식으로는 단일광자 검출 효율이 낮아지며, 24개의 단일광자를 검출한 경우에서도 단일광자 검출 효율이 1% 미만으로 측정된다.[401]

401) Mattioli (2016)

그림 II-3-20 이탈리아 CNR 연구소와 네덜란드 Eindhoven University of Technology에서 공동으로 개발한, 24개 단일광자를 검출할 수 있는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기



※ Mattioli (2016)

그림 II-3-21 최고 수준 초전도 단일광자 검출기의 광자 개수 검출 성능 비교

Detector Type	Dynamic Range, n	Detection Efficiency	T_O	λ range	Count Rate
TES	1 to 16	95%@1550 nm	80 mK	Optical to infra-red	10 KHz
6-Pixel SNSPD [32]	1 to 6	68%@1550 nm	7.0 K	1100 to 2000 nm	300 MHz
24-Pixel SNSPD [33]	1 to 24	0.8%@1310 nm	1.6 K	Not specified	700 MHz

※ Morais (2020)

광자 개수를 검출할 수 있는 TES에 대한 연구개발 역시 미국, 유럽, 일본 등에서 진행되고 있으며, 수십 개의 광자 개수를 구분하는 수준의 기술을 보유하고 있다.[402] 압축광 등 연속변수 양자광원을 검출하기 위한 호모다인 검출기의 경우, 이미 광다이오드 양자효율이 거의 100%에 가까워 소자보다는 전체 시스템의 광손실과 잡음을 줄이는 방향으로 연구개발이 진행 중이다. 세계 최고 기록인 15dB 압축 레벨은 이러한 호모다인 검출기의 제작 노하우가 축적된 연구 결과이다.

(3) 적용 분야

양자광원 생성과 함께 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이션 등 양자광학 기반 정보처리 전 분야에 활용되는 필수 기술로, 미세한 빛을 측정하는 기술은 양자광원과 함께 이용하지 않더라도 라이다(LiDAR), 광통신 등 기존 광학 기술의 성능을 한 단계 높여줄 것으로 기대된다.

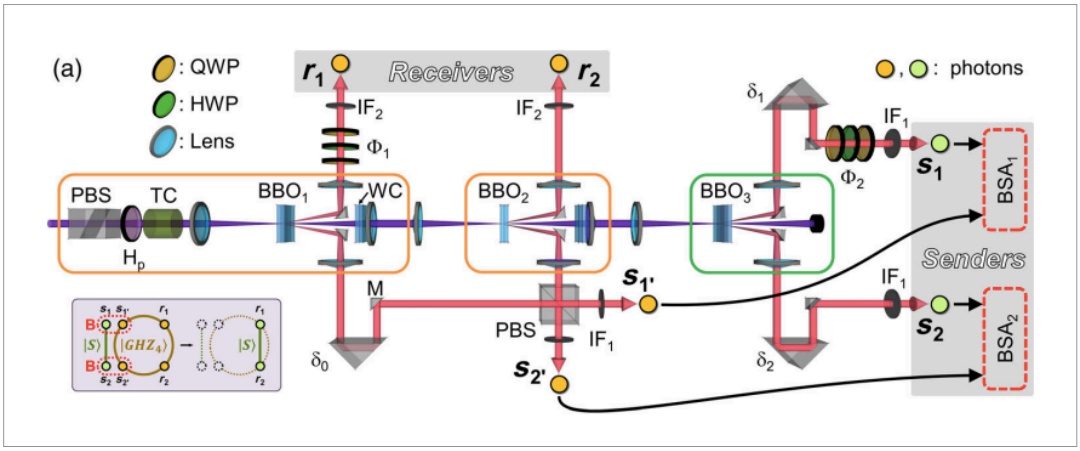
402) Morais (2020)

다. 양자연산공간 확장 기술

(1) 기술 동향

양자컴퓨팅의 성능을 향상하기 위해서는 양자광학으로 표현할 수 있는 양자연산공간을 확장하는 기술이 필수이다. 이산변수 기반 양자광학에서는 단일광자의 개수를 증가시키거나 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 이용함으로써, 표현할 수 있는 양자연산공간을 확장하는 방법이 주로 이용된다. 연속변수 기반 양자광학에서는 압축광의 모드를 확장함으로써 양자연산공간을 확장할 수 있다. 양자연산공간의 효율적인 확장을 위해서 집적광학계를 이용해 많은 광학 부품을 구현하고, 시스템 안정성을 높이는 연구가 널리 진행되고 있다.

그림 II-3-22 한국표준과학연구원의 6 광자 양자정보 실험 장치



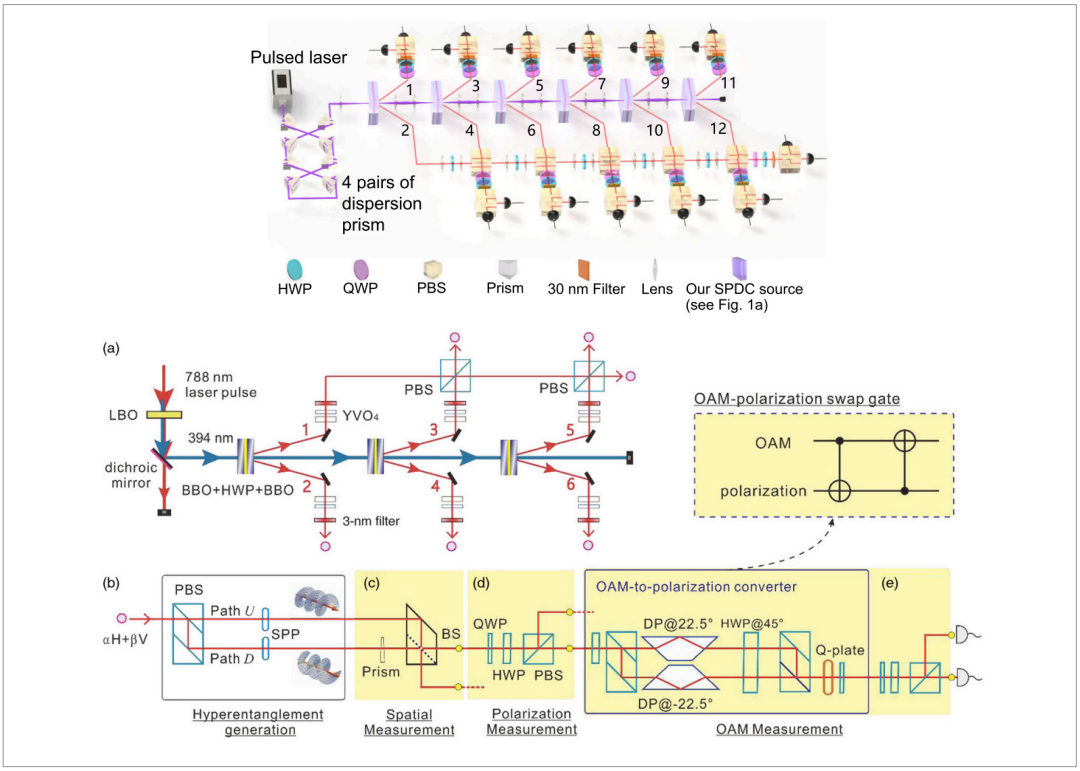
※ Lee (2020)

(2) 연구 동향

비선형 광학 기반 광자쌍을 이용해 다수의 단일광자를 생성하는 연구에서는, 중국 USTC가 12 광자 수준의 실험을 성공적으로 수행했다.[403] 다만 중국 USTC 외에는 최대 6 광자 수준의 실험에 머물러 있어, 1위와의 격차가 상당히 많이 벌어진 상황이다. 단일광자의 다양한 자유도를 이용해 양자연산공간을 확장하는 연구 역시 중국 USTC가 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있다. USTC는 2018년 하나의 단일광자에 3개의 큐비트를 인코딩한, 단일광자 6개를 생성하고 측정하는 것에 성공해 18 큐비트 양자얽힘을 구현했다.[404]

403) Zhong (2018)
404) Wang (2018)

그림 II-3-23 (위) 중국 USTC의 12 광자 양자얽힘 생성 실험 장치
(아래) 중국 USTC의 6 광자 18 큐비트 양자얽힘 생성 실험 장치



※ Zhong (2018), Wang (2018)

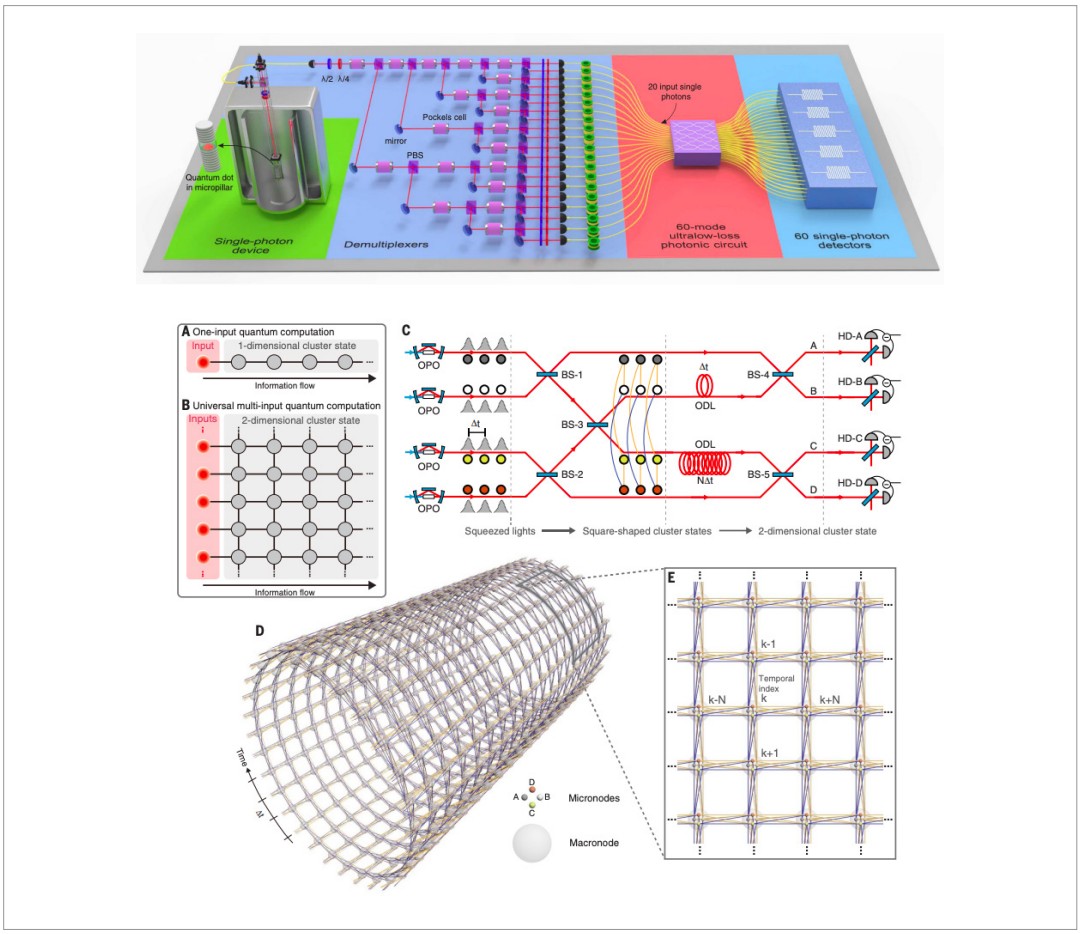
단일광자 방출체에서 구별 불가능한 다수의 단일광자를 생성하는 기술 역시 중국 USTC가 세계 최고 수준으로, 하나의 양자점에서 발생하는 단일광자를 20개 광경로로 나눠 최대 14 광자 양자 시뮬레이션 실험에 성공했다.[405] 연속변수 양자광학 기반 양자연산공간은 시간 영역 다중화(Time-Domain- Multiplexing)를 이용해 확장할 수 있으며, 측정기반 양자컴퓨터의 핵심기술로 평가받고 있다. 이러한 기술은 일본에서 선도적인 연구를 수행하고 있다.[406] 집적광학계를 이용한 양자연산공간 확장 연구는 미국, 유럽, 호주 등이 치열하게 경쟁하고 있다.[407]

(3) 적용 분야

양자연산공간 확장은 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이터의 유용성을 높이기 위해 꼭 필요한 기술이다. 특히 집적광학계 기반 양자연산공간 확장 기술은 기존 집적광학계 기반 광기술을 이용할 수 있어, 양자컴퓨터를 포함한 양자정보 이외의 분야에서도 큰 파급효과를 가져올 것으로 기대한다.

405) Wang (2019)
406) Asavanant (2019)
407) Pelucchi (2022)

그림 II-3-24 (위) 중국 USTC의 양자점 단일광자를 이용한 20 광자 인풋 14 광자 보존 샘플링 실험 장치
(아래) 일본 동경대의 Time-Domain-Multiplexing 기반 연속변수 양자연산공간 확장 실험 장치



※ Wang (2019), Asavanant (2019)

라. 양자광학 기반 양자 시뮬레이터

(1) 기술 동향

최근 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이션 기술이 발전하면서 이를 양자정보처리에 활용할 수 있음을 증명하는 연구가 널리 진행되고 있다. 이것은 주로 유용한 양자알고리듬에 대한 원리검증(Proof-Of-Principle) 실험의 구현 연구와 실험적 양자이득을 달성하기 위한 연구로 나눌 수 있다. Shor 알고리듬, 양자화학, 양자머신러닝 등을 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터에 적용하는 연구로, 아직 그 성과가 디지털 컴퓨터를 넘어서진 못했지만, 후속 연구를 통해 양자컴퓨터가 유용한 분야에 적용될 수 있음을 보여주고 있다. 현존하는 디지털 컴퓨터로 풀 수 없는 문제의 해답을 양자광학 기반 기술을 이용해 구함으로써, 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터의 우월성을 증명하는 것이 연구의 목표이다.

(2) 연구 동향

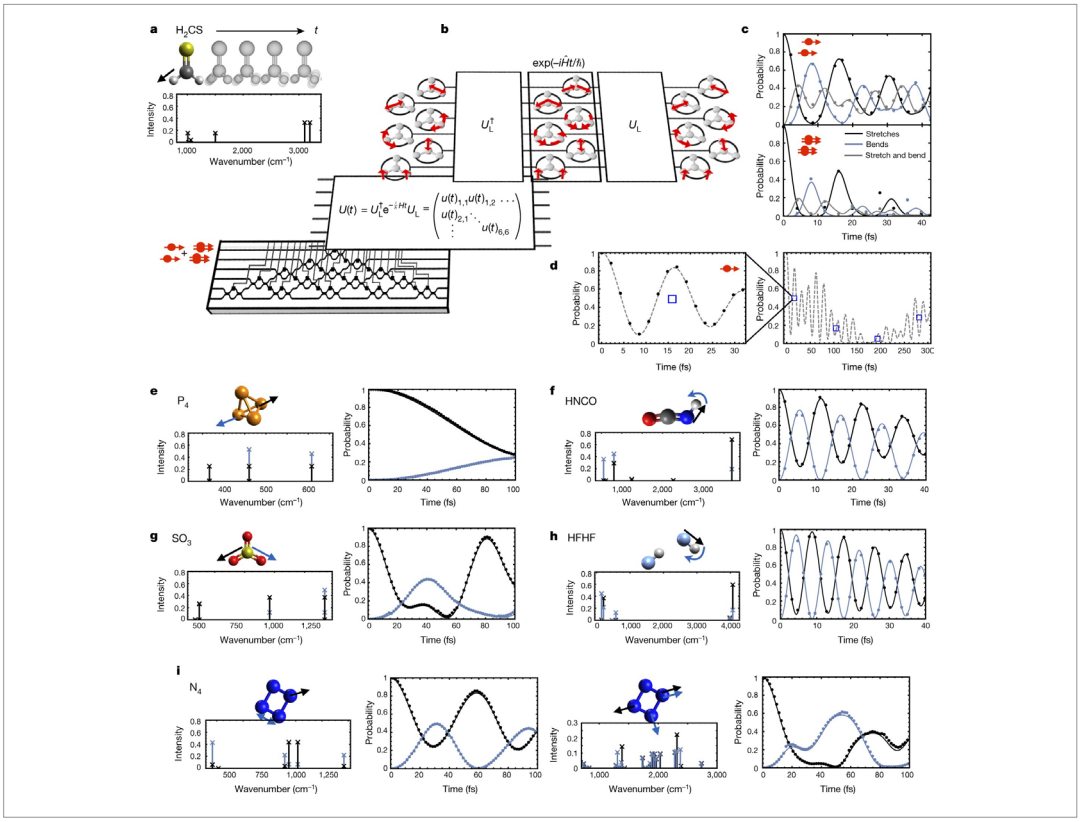
양자컴퓨터를 계산화학이나 머신러닝에 적용해 유용성을 증명하려는 연구가 진행되고 있다.[408) 409)] 중국 USTC와 캐나다의 Xanadu는 광자 기반 양자 시뮬레이터를 이용해, 현재의 디지털 컴퓨터로는 풀 수 없는 문제의 정답을 도출하는 데 성공했다.[410) 411)] 이들이 해결한 문제는 가우시안 보존 샘플링으로 다중 모드 연속변수 양자광원을 단일광자 검출기로 측정하는, 이산변수-연속변수 하이브리드 양자 시뮬레이션에 해당한다. 이 연구 결과는 초전도 양자컴퓨터 기반의 무작위 회로 샘플링 연구 결과와 함께 실험적 양자이득 증명 결과로서 중요한 의미가 있다. 하지만 현재까지 성공한 두 양자이득 실험 결과는 모두 응용 분야가 알려지지 않아, 실용적인 응용 분야를 발굴하기 위한 노력은 계속 진행 중이다.

가우시안 보존샘플링 결과는 행렬의 하프니안(Hafnian) 값에 비례하는 결과를 샘플링하는 것으로 알려져 있다. 행렬의 하프니안 값은 그래프 문제에서 다양하게 활용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 가령, 복잡한 그래프에서 모든 노드가 1:1로 대응되는 서브 그래프를 가지는 퍼펙트 매칭 (Perfect matching)을 찾는 문제나 서브 그래프 노드 개수가 주어졌을 때 가장 많은 에지(edge)를 가지는 서브 그래프를 찾는 Dense-k 서브 그래프 문제 등은 서브행렬의 하프니안 값과 높은 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성을 이용하여 가우시안 보존샘플링 결과를 이용하여 그래프 문제를 풀어 다양한 응용분야에 활용하고자 하는 연구가 널리 진행되고 있다. 가령 신약 후보물질을 발굴할 때 널리 쓰이는 Protein docking 문제를 그래프 문제로 변환하고, 퍼펙트 매칭을 가우시안 보존샘플링을 이용해 찾음으로써 가우시안 보존샘플링을 신약개발에 활용하고자 하는 제안과 기초 실험이 최근 구현되기도 하였다.[412) 413)]

프랑스의 스타트업인 Quandela는 최근 양자광학 양자컴퓨터/양자시뮬레이터 분야에서 괄목할만한 결과를 발표하고 있다. Quandela는 원래 양자점 기반 단일광자 생성 소자를 개발하며 창업한 스타트업인데 최근에는 이러한 단일광자를 이용하여 양자컴퓨터/양자시뮬레이터를 개발하는 것으로 영역을 확장하고 있다. 하나의 양자점에서 생성된 단일광자를 광스위치와 시간 다중화 기술을 이용해 동시에 6개의 단일광자를 생성하고 이를 집적 양자광학소자에 입력하여 양자상태를 제어하고, 단일광자 검출기를 이용해 검출함으로써 프로그램할 수 있는 6큐비트 양자컴퓨터를 개발하였다.[414)] Single-qubit, Two-qubit, 그리고 Three-qubit 게이트 충실도는 각각 99.6%, 93.8%, 그리고 86%를 달성하는 데 성공하였으며, 이를 이용해 6 큐비트 Variational quantum eigensolver, 6 광자 보존샘플링, 그리고 예고된 3광자 GHZ 상태 생성 실험 등을 성공적으로 구현하였다.

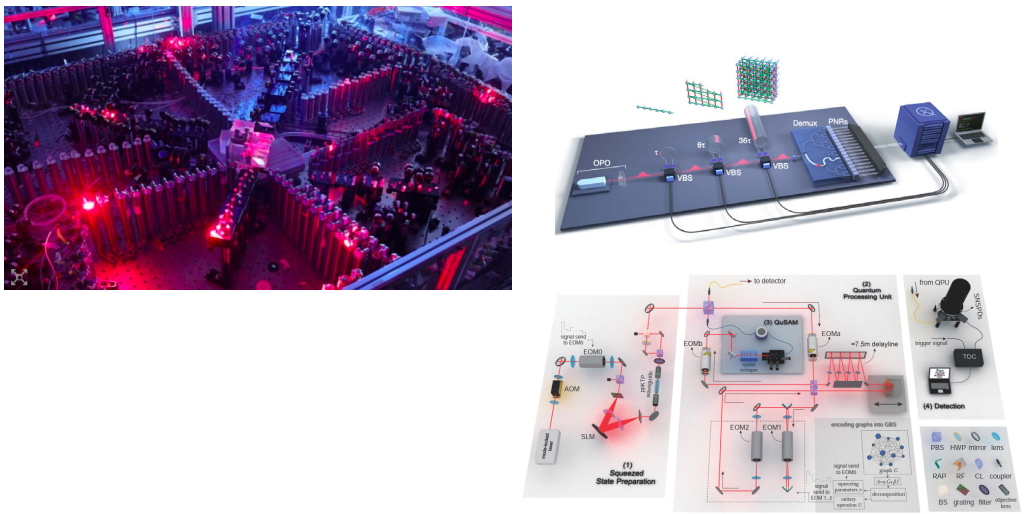
408) Sparrow (2018)
409) Veruccio (2022)
410) Zhong (2020)
411) Madsen (2022)
412) Banchi et al (2020)
413) Yu et al., arXiv:2210.14877 (2022)
414) Maring et al., arXiv:2306.00874 (2023)

그림 II-3-25 4광자를 이용해 분자의 진동스펙트럼을 시뮬레이션하는 실험 장치와 실험 결과



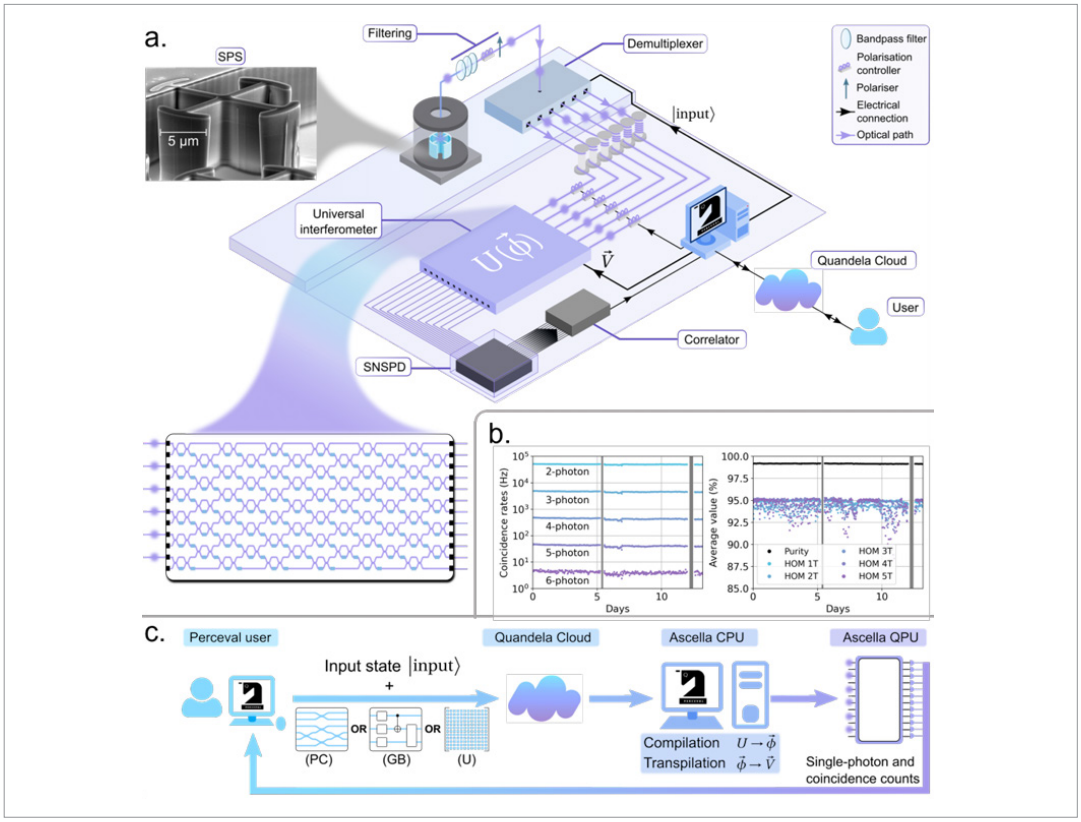
※ Sparrow (2018)

그림 II-3-26 (왼쪽) 중국 USTC의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치
(오른쪽) 캐나다 Xanadu의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치
(아래) 가우시안 보존샘플링을 이용해 Protein docking 문제를 푸는 실험 장치



※ Zhong (2020), Madsen (2022), Yu (2022)

그림 II-3-27 Quandela에서 개발한 단일광자 기반 6 큐비트 양자컴퓨터



※ Maring et al (2023)

(3) 적용 분야

계산화학, 머신러닝 등 양자컴퓨터 전 분야에 활용할 수 있어, 궁극적으로 교통 체증 해결 같은 사회적 문제에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 이를 위해선 많은 수의 논리 큐비트와 그것보다도 훨씬 더 많은 수의 물리 큐비트가 필요해, 향후 실생활에 적용하기 위해선 많은 기술 발전이 필요하다. 가우시안 보존샘플링 양자시뮬레이터의 경우 광손실을 줄이는 것이 필요하다.

5. 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨팅

가. 다이아몬드 성장 및 NV 센터 형성

(1) 기술 동향

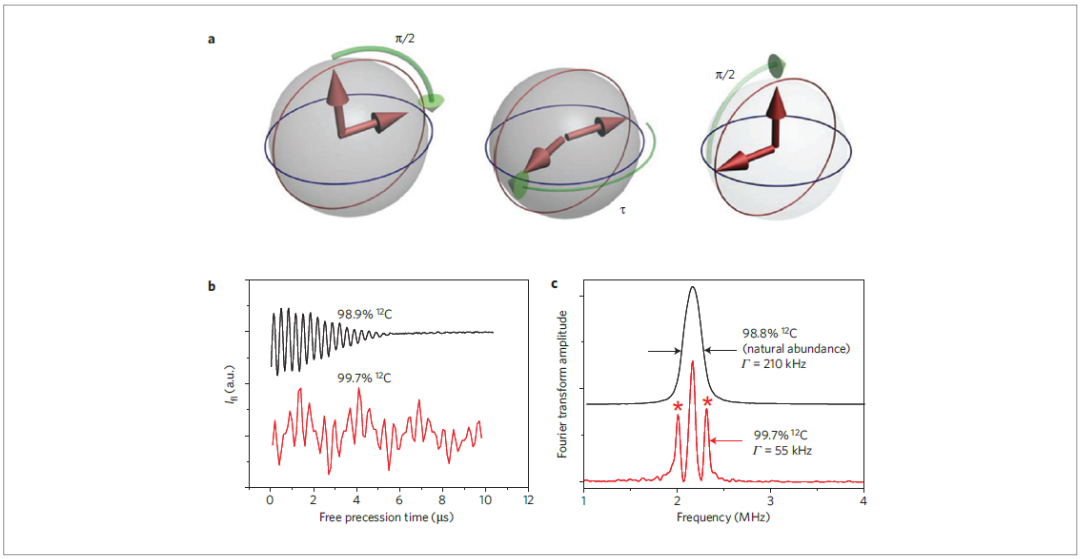
양자컴퓨터의 공정 및 생산을 위해서는 기존 반도체 공정 기술이 다이아몬드 공정에 적용될 수 있도록 발전해야 한다. 즉 다이아몬드 성장에 관한 종합적인 품질 관리가 정의되고, 이온 주입과 다이아몬드 성장 기술들이 표준화돼야 할 것이다. 다이아몬드 큐비트 생산을 위한 주요 기술로는 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD), 이온 주입, 그리고 열처리 공정이 있다. 그 밖의 다른 대부분 공정에 대해서는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 공정 기준 적용이 가능하다.

(2) 연구 동향

① 다이아몬드 성장 기술

양자역학이 공학의 영역에서 응용 기술로 발전하기 위해서는, 사용되는 재료 또한 Quantum Grade의 순도에 맞춰야 한다. 연구 결과 보고에 따르면 ^{13}C 동위원소의 양을 0.3%까지 낮추고, 다른 상자성 결함의 농도도 $10^{13}cm^{-3}$ 미만으로 낮춘 환경에서 다이아몬드 NV 센터를 성장했을 때, 결맞음 시간이 상온에서 1.8ms까지 증가하는 것을 확인했다.[415] FID(Free Induction Decay) 또한 ^{13}C의 농도가 옅어짐에 따라 스펙트럼 선폭이 55kHz까지 줄었다.

그림 II-3-28 단일 스핀들의 ^{12}C 농도에 따른 결맞음 시간 비교



※ Nat & Mater (2009)

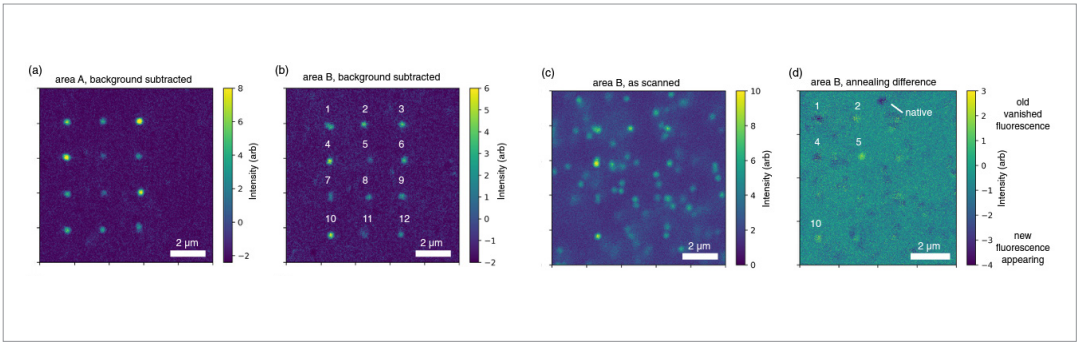
415) Nat & Mater (2009)

Element6 같은 회사들이 다이아몬드 성장에 관련된 다양한 파라미터가 제어된 제품을 개발하고 있음에도 불구하고, 여전히 실험에 영향을 줄 수 있는 수소 함량, 결함, 스트레스 등의 다른 변수들에 대한 표준화 작업이 진행되지 못했다.

② 이온 주입 기술

이온 주입 기술은 다이아몬드 내부에 첨가물(Dopant)을 주입하는 방법의 하나인데, 최근 비약적으로 발전하면서 나노미터 수준의 정확도를 가지고 원하는 위치에 이온 주입이 가능한 기술이 보고됐다.[416] Pr^{+} 이온 소스를 이용해 Yttrium-Aluminum-Garnet 기판에 Praseodymium Color Center Array 공정을 성공시켰다. 이 과정에서 공초점 현미경을 이용해 50% 수준의 활성화율과 34nm 수준의 위치 정확성을 확인했다. 다이아몬드를 성장하는 공정 중에 질소 이온을 넣고, 후에 열처리 공정을 통해 NV 센터를 형성시키는 방법이 있지만, 이 방법으로는 나노미터 수준의 정확성을 구현할 수 없다. 이온 주입 시 재료 내 전자뿐만 아니라 결정 내 원자핵과 충돌하는 이온 주입 원리 때문에, 다이아몬드 내부에서 예상된 경로를 벗어나는 것을 넘어 주변에 많은 결함을 초래할 수 있다. 이렇게 경로가 벗어나는 현상을 스트래글링(Straggling)이라고 부르는데, 나노미터 수준의 정확성을 확보하기 위해 이러한 스트래글링 현상을 제한하는 방향으로 주입 에너지를 최적화해야 한다.

그림 II-3-29 이온 주입 후 Praseodymium Color Center Array의 형광 이미지

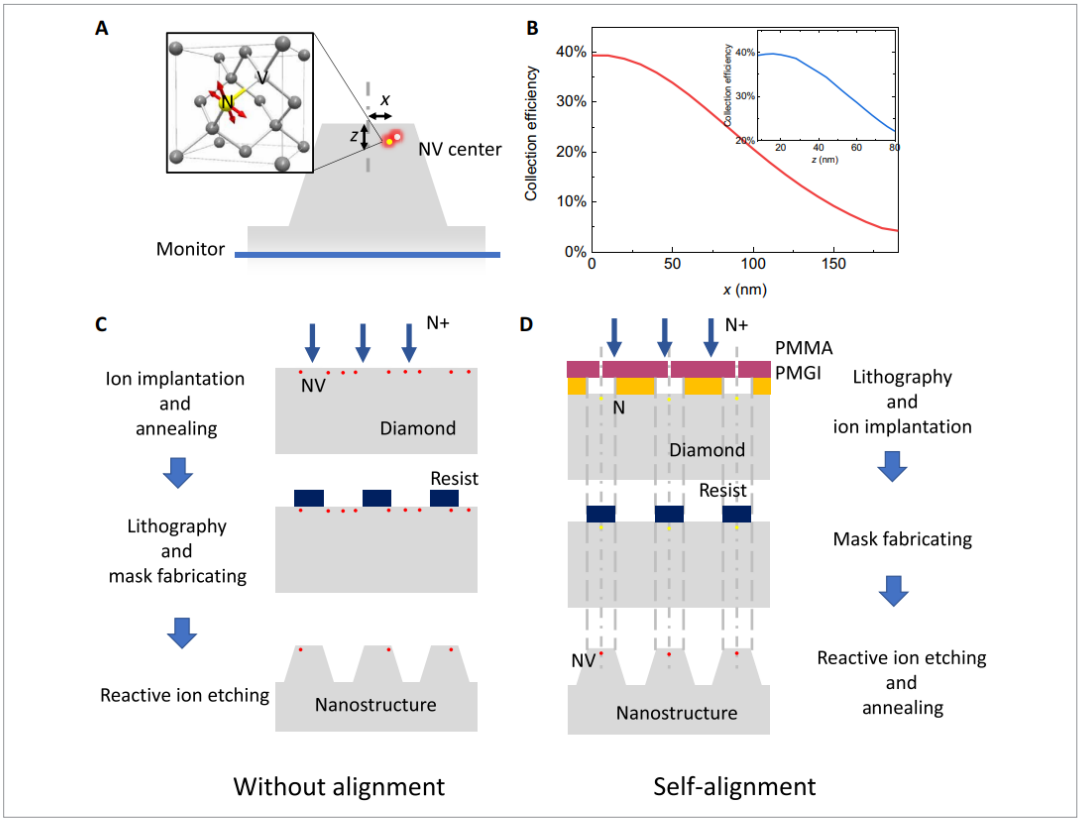


※ Phys et al. (2019)

최근 보고된 Wang (2022)의 자료에 의하면, 나노스케일 패터닝 기술을 이용해 NV 센터의 위치를 정렬시키고 이를 활용하는 것이 가능하다. 나노필라 형태의 나노구조물을 반도체 공정 기술을 이용해 공정한 뒤, NV 센터를 주입하게 된다. 이렇게 공정된 어레이형태의 NV 센터들은 거의 최적에 가까운 포톤 방출 카운트를 보여준다. 또한, 다이아몬드 결정 방향을 제어함으로써 방출 쌍극자 방향성을 제어할 수 있는데, 이를 통해 4.34 Mcps 수준의 포화 형광률 구현이 가능하다.

416) Phys et al. (2019)

그림 II-3-30 나노 패터닝 기술 활용 여부에 따른 나노필라 형태 구조물 제작의 차이점에 대한 도식



※ Wang (2022)

③ 열처리 기술

NV 센터의 경우, 주입된 질소 원자로부터 NV 센터로의 전환은 열처리 공정을 통해 이루어진다. 동 공들이 열처리 공정에 의해 주입된 질소 원자를 향해 확산하고, 주입 공정에 의해 생성된 결함들을 회복시킬 수 있다. NV 센터는 1,300도 정도에서 해리되기 시작하고, 1,000도 이하에서 NV 센터의 재방향(Re-Orientation)은 일어나지 않는다. 중성 공동(Neutral Vacancies)는 2.12 eV의 활성화 에너지를 가지고 1,000도에서 1.5nm^2/s 수준, 850도에서는 1.8nm^2/s의 확산 속도를 가지는 것으로 보고됐다.[417] 이러한 NV 센터 생성 공정은 V_2 또는 다른 복합물질을 형성시킬 수 있다. NV 센터로 변환되지 못한 질소 원자나 Divacancy는 NV 센터들의 결잃음(Decoherence) 원인이 된다.

(3) 적용 분야

다이아몬드 성장, 이온 주입, 열처리 기술은 양자현상 측정 및 제어를 할 수 있는 수준의 다이아몬드 기판을 제작할 때, 모든 공정에 적용할 수 있다.

417) Phys et al. (2017), Phys et al. (2019)

나. 다이아몬드 NV 센터 전자스핀 및 핵스핀 제어

(1) 기술 동향

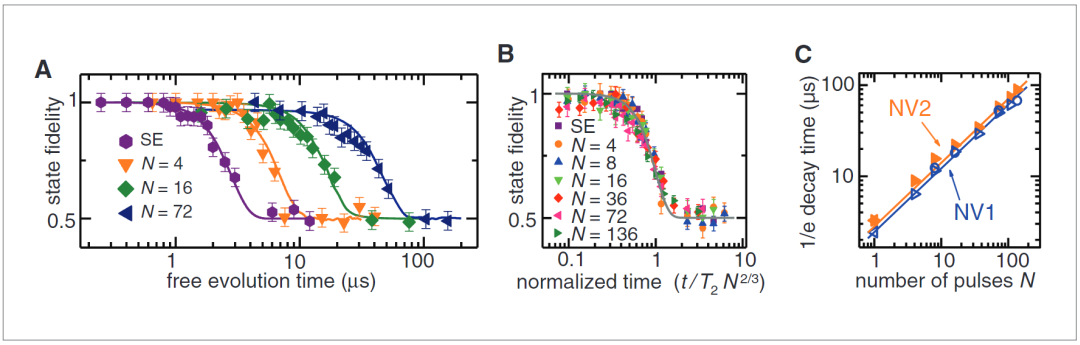
다이아몬드 NV 센터를 이용해 양자컴퓨팅 기술을 개발하는 가장 큰 이유 중 하나는 NV 센터가 안정된 양자상태를 유지하는 특성 때문이다. NV 센터에 묶여있는 전자들은 스핀 1 (S=1) 상태를 가지며, 스핀 버금준위(Sublevel)간의 중첩상태들은 상온에서도 오랫동안 결맞음 상태를 유지할 수 있다. 이것은 다이아몬드 재료의 특성상 스핀-궤도 결합(Spin-Orbit Coupling)이 작고, 자성을 갖는 원자핵이 거의 없기 때문이다. 하지만, 다이아몬드 NV 센터 전자스핀의 결맞음은 여전히 주변 전자스핀 또는 원자핵스핀들과의 자기적 상호작용 때문에 제한된다. 양자연산의 신뢰성을 높이고 연산 횟수를 획기적으로 늘리기 위해, 주변환경과의 자기적 상호작용을 최소화하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① Dynamic decoupling

스핀의 상태를 주기적으로 반전시킴으로써 주변 스핀들의 노이즈를 상쇄시키는 방법이 개발됐다.[418] 스핀 상태가 뒤집히며 주변환경과의 상호작용이 반대로 이루어지는데, 이러한 메커니즘을 매우 빠르게 적용하면 천천히 변하는 주변 노이즈들을 효과적으로 제거할 수 있다. Dynamical Decoupling 기술이라고 불리는 이 방법을 이용하면 결맞음 시간을 스핀-격자 완화(Spin-Lattice Relaxation) 시간 정도까지 늘릴 수 있다.

그림 II-3-31 Dynamical Decoupling 펄스 개수에 따른 결맞음 특성 변화 그래프



※ Science (2010)

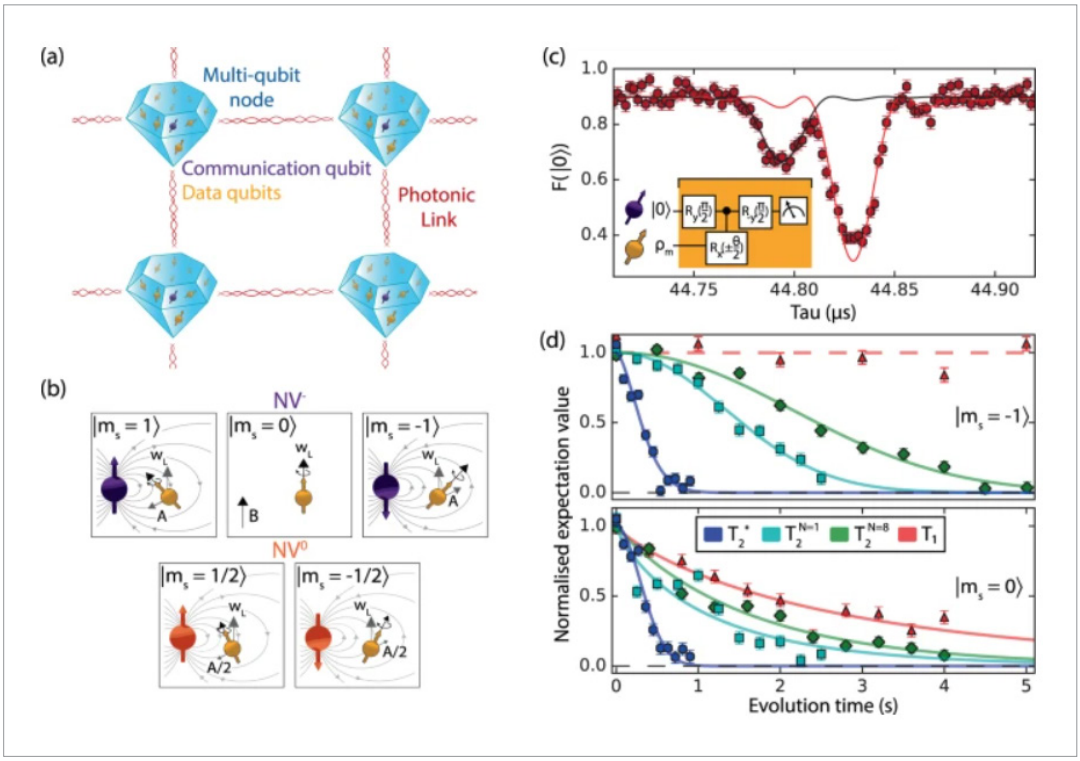
418) Science (2010)

② Quantum Memory

전자스핀 주변의 스핀들은 노이즈 소스가 되지만, 한편으로는 양자상태를 저장할 수 있는 자원으로 활용될 수 있다. 핵스핀들은 전자스핀과 비교해 훨씬 오래 양자상태를 유지할 수 있는데, 자기적 상호작용을 통해 NV 센터 전자스핀은 각각의 핵스핀 상태를 읽거나 제어할 수 있다. NV 센터 전자스핀과 근접한 ^{13}C 원자핵스핀을 사용한 실험에서 전자스핀을 이용해 핵스핀 상태를 원하는 상태로 초기화하고, Single Shot Readout 기술을 이용해 상태를 읽어냈다. Rf Decoupling 기술을 이용해 핵 큐비트 상태를 주변 전자스핀과 핵스핀들로부터 보호함으로써, 큐비트 메모리 저장 시간을 세 배 정도 늘릴 수 있었다.[419)]

최근 연구에 따르면 잘 정제된 다이아몬드 내부에 존재하는 ^{13}C의 핵스핀 양자메모리가 NV 센터의 광학적 연결에 유리하다. 보고된 메모리 시간은 최신 기술에 비해 100배 이상 향상되었다. 또한, 핵스핀 상태는 NV 센터 전자스핀의 이온화 또는 재포획에 상관 없이 유지되었다. 이러한 양자메모리 기술을 기존 얽힘 연결 및 게이트들과 연동시킴으로써 deterministic non-local two-qubit gates와 같은 핵심 네트워크 요소 기술이 가능함을 제시하였다. 이러한 기술은 복잡한 알고리듬과 오류정정을 연구할 수 있는 양자네트워크 기술 개발 가능성을 보여준다. (Bradley 2022)

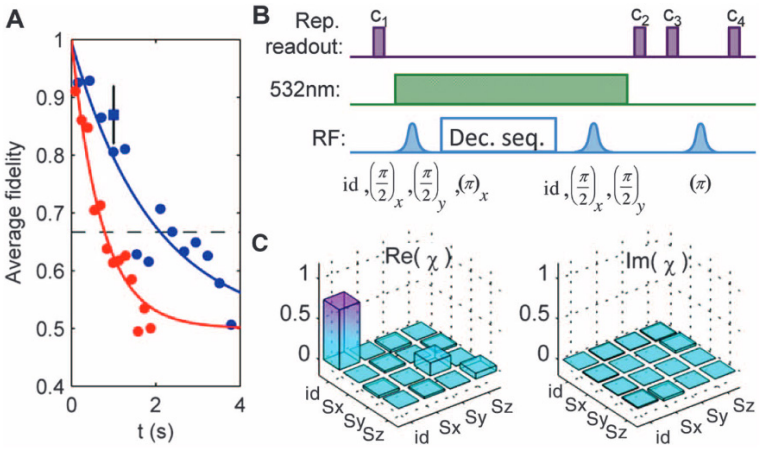
그림 II-3-32 다이아몬드 스핀을 이용한 분산형 양자정보 처리를 위한 아키텍쳐 모식도



※ Bradley (2022)

419) Science (2012)

그림 II-3-33 시간에 따른 핵스핀 메모리 신뢰성 그래프



※ Science (2012)

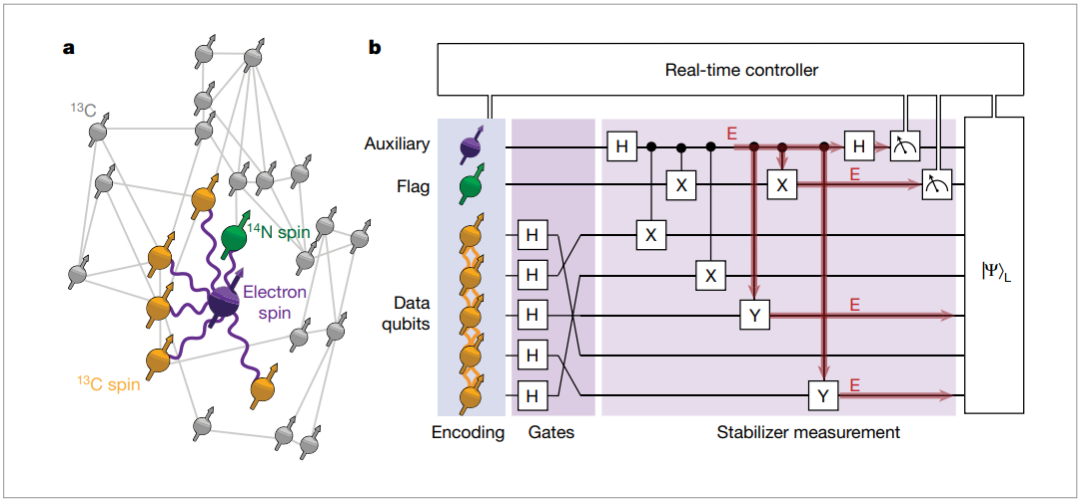
③ 양자오류정정

양자컴퓨터를 구현하기 위해서 높은 신뢰도의 Readout과 제어할 수 있는 전자스핀, 높은 결맞음 특성을 갖고 잘 보호된 큐비트로 구성된 핵스핀 등의 다양한 관련 기술들이 제안됐다. 하지만 핵스핀도 주변 환경의 영향으로 인해 연산 오류를 일으키는 결잃음 상태가 될 수 있고, 양자상태의 작은 변화들도 오류 가능성을 높일 수 있으므로 오류정정기술의 적용이 필요하다. 그러나 오류정정기술이 고체상태의 양자시스템에 적용된 사례는 많지 않은데, 이는 높은 정확도로 Non-Local 제어가 가능한 최소 세계 이상의 큐비트 구현이 어렵기 때문이다. NV 센터에 근접한 한 개의 ^{14}N 핵스핀, 두 개의 ^{13}C 핵스핀을 이용해 세 개 큐비트의 Phase-Flip 오류정정 실험이 보고된 바 있다.[420)]

최근에는 양자오류정정 코드 구현이 가능한 논리 큐비트 측정이 보고 되었다. 이 연구는 다이아몬드 양자프로세서 구동을 위해 7개의 스핀 큐비트를 사용하였다. 반복된 다중 큐비트 측정을 통해 새로운 방식의 오류내성 encoding 프로토콜을 제시하였다. 논리 큐비트의 fidelity는 요소 물리큐비트 성능에 못미치지만, 고체상태 스핀 큐비트 프로세서에서의 오류내성 양자오류 정정을 시연하였다. (Abobeih 2022)

420) Nature (2014)

그림 II-3-34 오류내성을 가진 논리 큐비트 기반 다이아몬드 양자 프로세서 모식도



※ Abobeih (2022)

(3) 적용 분야

다이아몬드 NV 센터 전자스핀 및 핵스핀 제어 기술은 큐비트를 이용한 연산 과정뿐만 아니라, 큐비트 주변 노이즈를 효과적으로 제거하거나 정보 저장 시간을 효과적으로 연장함으로써, 양자컴퓨팅 결과의 정확성과 신뢰성 확보에 크게 이바지할 수 있다.

다. 큐비트 상태 측정

(1) 기술 동향

큐비트 측정 기술은 양자컴퓨터를 개발하는 기술 중 가장 중요한 분야이다. 큐비트의 상태 변화 없이 측정하는 방법을 Single-Shot Readout이라고 부른다. 큐비트 측정은 광학적 방법 또는 전기적 방법으로 가능한데, 두 방법 모두 큐비트의 상태 변화 없이 상태 측정이 가능하다.

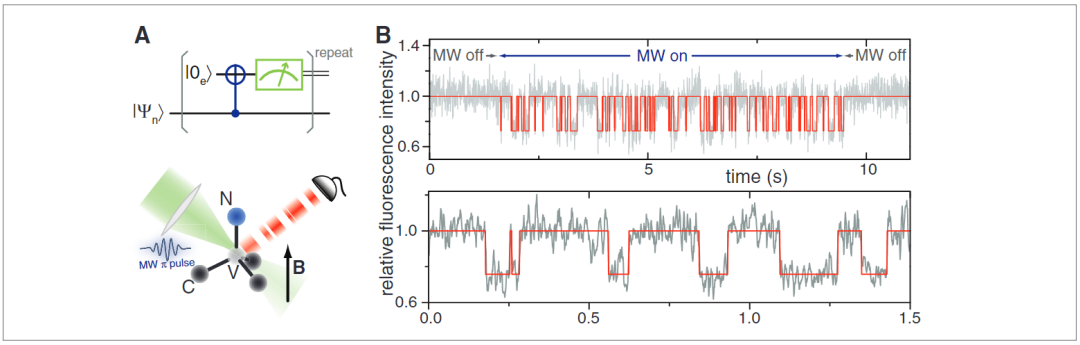
(2) 연구 동향

① Optical Spin Readout

큐비트 측정 시, 가장 바람직한 방법은 타겟 큐비트와 주변 큐비트의 상태를 변화시키지 않는 것이다. 상온에서 처음 전자스핀 상태는 $|0_e\rangle$ 상태이고, 원자핵스핀은 $|1_n\rangle$ $|0_n\rangle$ $|-1_n\rangle$ 상태들이 혼합된 상태이다. 원자핵스핀 선택적인 마이크로파 π 펄스를 이용해 전자스핀 상태를 −1 상태로 바꾸면, 이것은 원자핵스핀 상태에 의해 결정되는 CNOT 게이트 같은 역할을 하게 된다. 즉 이 측정은 원자핵스핀 상태를 전자스핀 상태에 반영시킨다. 이러한 측정은 NV 센터의 긴 결맞음 시간과 뛰어난 초미세 구조

(Hyperfine Structure) 분해능 덕분에 가능하다. 결과적으로 $|0_e\rangle$ 상태와 $|-1_e\rangle$ 상태의 형광 세기 차이 때문에 타겟 원자핵스핀 상태를 알 수 있게 된다. 이 측정은 전자스핀 상태는 변화시키지만 핵스핀 상태는 변화시키지 않기 때문에, 여러 번 측정이 가능하다.[421]

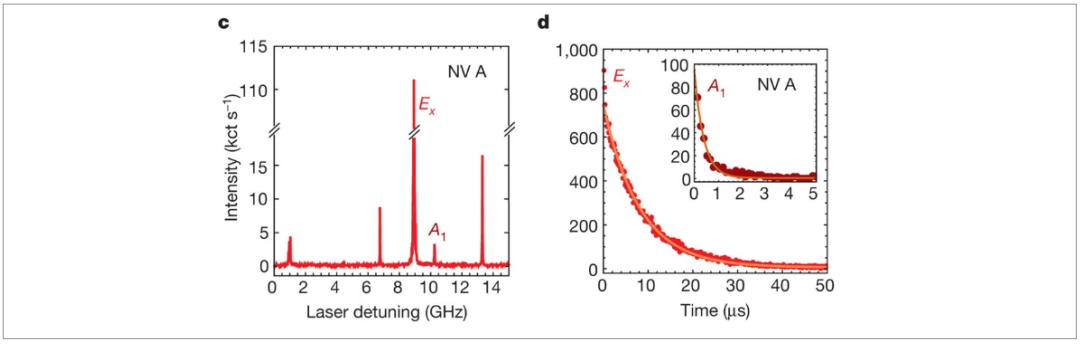
그림 II-3-35 상온 Single Shot Readout 측정 방법 및 실시간 핵스핀 상태 변화 그래프



※ Science (2010)

저온 Single Shot Readout은 상온 측정에 비해 쉽다.[422] 특정 파장의 레이저를 이용해 $m_s = 0$ 상태만 여기시킬 수 있기 때문이다. 즉 마이크로파에 의해 상태가 바뀌지 않으면 스핀 상태는 $m_s = \pm 1$로 결정될 수 있다.

그림 II-3-36 레이저 주파수에 따른 형광 스펙트럼과 시간에 따른 변화 그래프



※ Nature (2011)

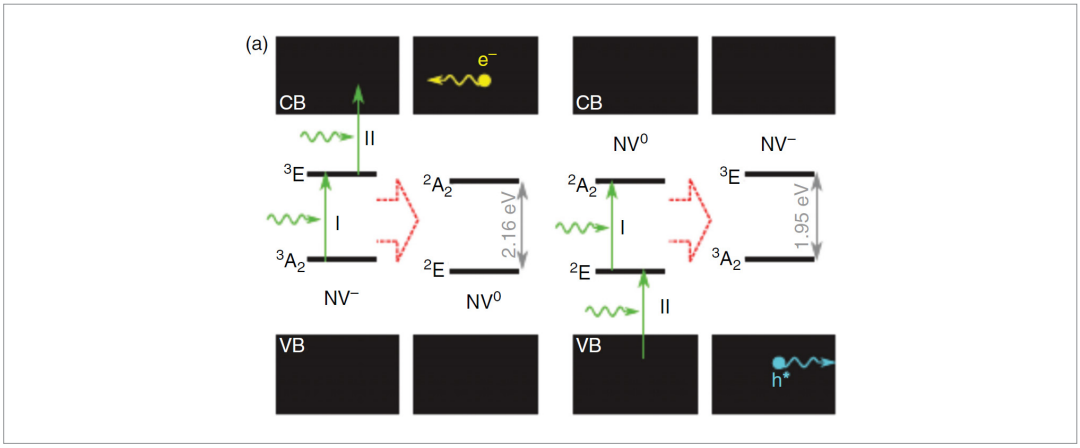
하지만, 이러한 Optical Spin Readout 방법들은 모두 레이저 파장 때문에 공간분해능이 제한된다.

421) Science (2010)
422) Nature (2011)

② Electrical spin readout

NV 센터 전자스핀 상태 측정을 위해 광전자들이 사용될 수 있다. 이 방법은 NV 센터를 이온화시키기 위해 이광자 과정(Two-Photon Process)을 사용한다.[423] 적용되는 두 번째 레이저빔의 사용은 NV^0로부터 NV^-로 회복되는 속도를 증가시킨다. 이 과정이 반복되면 발생하는 광전자의 개수는 NV 센터 전자스핀 상태에 의해 결정된다. Optical Readout과 같은 방법으로 저온과 상온에서 핵스핀을 이용해 Single Shot Readout이 가능하다. 측정 시, 전자를 끌어당기기 위한 전압 형성을 위해 원하는 NV 센터 근처에 전극을 형성시켜야 한다.

그림 II-3-37 NV-이온화와 회복 프로세스를 통한 Charge-Carrier 생성 과정 모식도



※ Science (2019)

(3) 적용 분야

큐비트 상태 측정 기술은 큐비트 간 연결 방법 결정에 영향을 끼칠 수 있다. 두 가지 방법 모두 Single Shot Readout이 가능함에 따라, 다중 큐비트의 집적화 및 장거리 큐비트 연결기술 개발에 적용될 수 있다.

423) Science (2019)

라. 다중 큐비트 연결

(1) 기술 동향

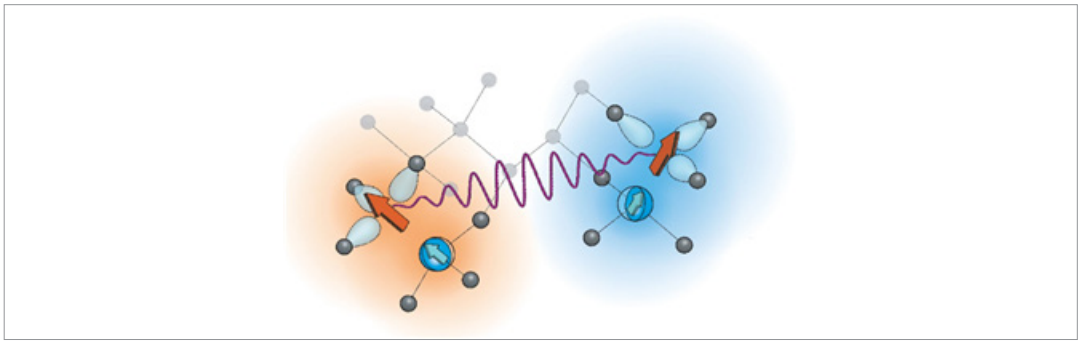
NV 센터 한 개의 전자스핀과 핵스핀들은 높은 결맞음 상태를 유지하며 제어 가능한 양자레지스터 기능을 수행할 수 있다. 하지만 현장에서 유용한 기능성을 확보하는 것에 있어, 한 개의 NV 센터 주변에 존재하는 몇 개의 큐비트를 활용하는 것은 부족하다. 이 문제를 해결하기 위해 멀리 떨어진 큐비트들을 연계시킬 수 있는, NV 센터 기반 양자레지스터들의 결맞음 네트워크 형성 방법이 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① NV-NV 간 연결

첫 번째 방법은 NV 센터들 간의 자기적 상호작용을 이용하는 것이다. 전자스핀들의 쌍극성 결합(Dipolar Coupling)을 이용해 서로 다른 NV 센터들의 핵스핀 간 상호작용을 제어하는 것이다. 그리고 이러한 메커니즘은 다중 큐비트 연산을 위해 확장 가능한 플랫폼으로 발전할 수 있다. 수년 전 한 연구팀에 의해, 두 개의 근접한 NV 센터 스핀들의 양자얽힘 현상이 구현된 바 있다.[424)]

그림 II-3-38 NV 센터 Pair 모식도



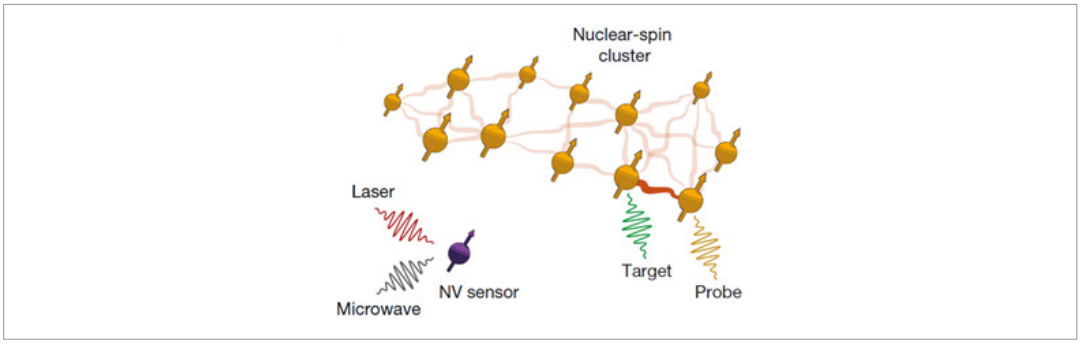
※ Nat & Phys (2013)

② NV-^{13}C 간 다중결합

저온에서 스펙트럼이 가늘어지고 결맞음 시간이 증가한다는 특성을 이용해, 27개의 원자핵스핀이 한 개의 NV 센터에 의해 측정되고 제어 가능하다는 결과가 보고됐다.[425)] ^{13}C 원자핵들은 NV 센터로부터 모두 다른 곳에 있으므로 각각의 Hyperfine Coupling은 다르다. 따라서 각각의 ^{13}C 스핀들을 제어하는 것이 가능하다. 이 방법은 소수의 NV 센터들을 이용해 더 많은 수의 ^{13}C 핵스핀 기반 큐비트 제어를 가능케 함으로써 대규모 큐비트 확장 가능성을 보여준다.

424) Nat & Phys (2013)
425) Nature (2019)

그림 II-3-39 NV 센터와 주변 ^{13}C 원자핵스핀 간 상호작용 모식도



※ Nature (2019)

③ N-NV-Photon-Photon-NV-N 결합

광학 기반 채널은 장거리 또는 고밀도 네트워크 구성에 적합한 플랫폼을 제공할 수 있다. NV 센터는 광자(Photon)를 통한 스핀 상태 이동을 위해 광자들과 직접적으로 커플링 될 수 있는데, 이런 메커니즘으로 인해 큐비트는 Flying Qubit라고 말하는 개념에 근접하게 된다. 저온에서 NV 센터의 Spin-Dependent Optical Transition을 이용해 전자스핀과 광자를 양자얽힘(Quantum entanglement) 상태로 만들 수 있다. 두 개의 다른 NV 센터 전자스핀들을 각각의 광자들과 양자얽힘상태로 만들고 빔 분할기(Beam Splitter)를 이용해 간섭시키면, 측정을 통해 NV 센터 전자스핀들의 상태를 얽힘상태에 주사시킬 수 있다.

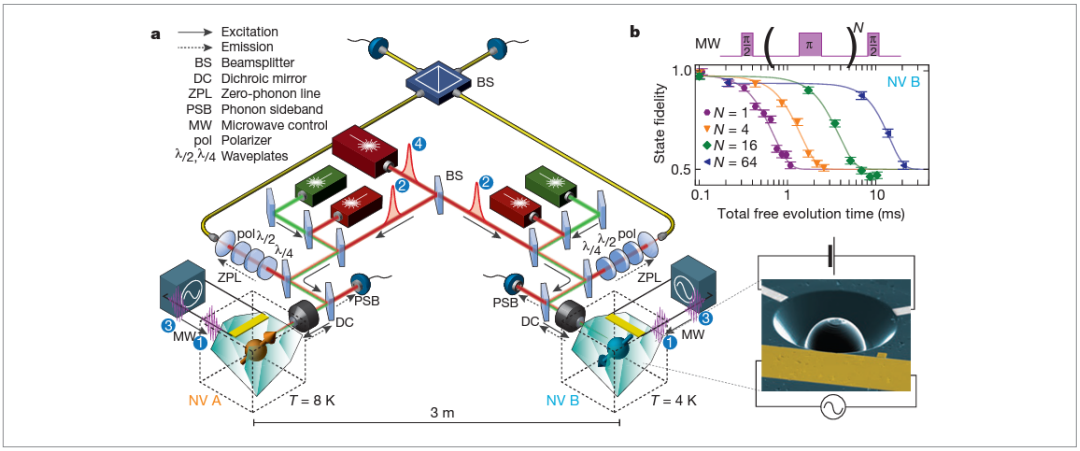
먼저 스핀-광자 양자얽힘상태는 NV 센터의 들뜬 상태(A2)가 ms=+-1 스핀 상태로 떨어질 때, 반대 원형 편광 상태를 가지게 되는 현상을 이용한다. 이 현상에 의해 아래 식으로 기술되는 양자얽힘상태가 생성되는데, 이것은 광자의 편광 특성이 마지막 스핀 상태와 고유한 상관관계를 가지기 때문이다.[426]

$$|\Psi> = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\sigma_- > |+1> + |\sigma_+ > |-1>)$$

NV 전자스핀 상태와 얻어진 광자 편광 상태 간 상관관계를 측정함으로써, 스핀-광자 간 양자얽힘 상태를 확인할 수 있다. 그리고 이후 스핀-광자 간 양자얽힘 현상과 이광자 양자간섭 현상[427]을 이용해 3m 떨어진 두 개의 NV 센터 간 양자얽힘상태를 확인하는 데 성공했다.[428]

426) Nature (2010)
427) Phys et al. (2012)
428) Nature (2013)

그림 II-3-40 두 개의 NV 센터 큐비트를 이용한 장거리 양자얽힘 생성 실험 모식도



※ Nature (2010)

(3) 적용 분야

큐비트를 이용해 의미 있는 연산을 하기 위해서는 큐비트의 개수 증가가 절대적으로 요구된다. 따라서 큐비트의 개수를 늘릴 수 있는 확장성을 확보해야 한다. 자기적 상호작용 또는 스핀-광자 간 상관관계에 기반한 다중 큐비트 연결기술은 큐비트의 수를 획기적으로 늘리는 데 효과적으로 적용될 수 있다.

6. 리드버그 양자컴퓨팅

(1) 기술 동향

해외 리드버그 양자컴퓨터 기술 동향은, 관련 벤처 기업들의 창업과 원자시계형 리드버그 시스템의 개발로 요약할 수 있다. 리드버그 양자컴퓨팅 벤처기업은 미국과 유럽을 중심으로, 학계 출신 인물들이 주도하여 설립되고 있는 추세이다.

- 미국 Quera는 Harvard 대학의 Lukin 교수 연구실이 중심이 되어 설립된 회사로, 87-루비듐(^{87}Rb)를 이용하여 양자컴퓨터의 구동 속도와 신뢰도를 높이는 기술을 개발하고 있다. Aquilla라는 리드버그 기반의 첫 상용 양자컴퓨터를 출시하였으며, 이는 Amazon을 통하여 클라우드 서비스를 제공하고 있다. 256개의 큐비트가 가능하며, Ising model기반의 아날로그 컴퓨팅 방식을 제공한다.
- 미국의 Cold Quanta는 이동형 보즈-아인슈타인 실험장치 및 원자 기반 양자센서를 개발하는 전문회사이다. Wisconsin 대학의 Saffman 교수와 협력해 광집게 트랩을 이용하는 리드버그 양

자회로형 양자컴퓨터를 개발하고 있다.

- 프랑스 Pasqal은 Ecole Polytechniqe 대학의 Browaye 교수 연구팀과 2차원 루비듐원자열을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 있다. 이를 통해 조합 최적화 등의 문제계산 서비스를 계획하고 있으며. 100여 개의 큐비트를 갖는 상용 컴퓨터를 개발하였다.
- 미국의 Atom Compting은 NIST와 연계하여 알칼리 토금속류 원자인 스트론튬 및 이터븀을 사용하는 차세대 리드버그 양자컴퓨팅 기술을 개발하고 있다. 현재 100여 개의 큐비트 양자컴퓨팅 기술을 보유하고 있다.
- 영국의 M squared사는 영국 양자기술 진흥프로그램의 일환으로, 영국의 대학과의 연합으로 Cs 기반의 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 있다. 현재 100개 수준의 큐비트를 갖춘 것으로 보고되었다. M squared사는 첨단 레이저 제조회사로, 리드버그 양자컴퓨터에 필요한 각종 레이저 원천기술을 보유하고 있어 양자컴퓨터의 개발 속도가 빠를 것으로 기대된다.
- 독일의 Planqc사는 막스플랑크 연구소가 중심이 되어 설립된 회사로, 중성원자 컴퓨터의 세계 최고 수준의 각종 원천기술을 보유하고 있다. 아직 설립 초기지만, 독일의 앞선 중성원자 기술 및 레이저 기술을 기반으로 빠르게 성장할 것으로 판단된다.
- EU 양자위원회는 European infrastructure for Rydberg Quantum Computer(EuRyQa) 프로젝트에 착수하였다(2022). 급성장하고 있는 리드버그 양자컴퓨터의 확장성 향상 및 기술 표준화, 컴퓨터 간 벤치마킹 네트워크를 확보하기 위하여 7개국 11개의 파트너로 구성되어 있으며, 클라우드 서비스를 제공할 예정이다.

현재 리드버그 양자컴퓨팅 기술은 빠른 성장세를 보이고 있다. 특히, 미국을 중심으로 벤처 기업들의 성장 및 증가가 눈에 띈다. 미국의 리드버그 양자컴퓨팅 기업인 Cold Quanta, Atom computing, 프랑스의 Pasqal 등은 2022-2023년에 걸쳐서 한화 약 4천억 원 가량의 투자금을 유치하는 등, 산업 규모의 증가 및 상업화 모색이 활발하게 이루어지고 있다.

현재 구동 중인 리드버그 양자컴퓨터는 주로 알칼리 원자인 루비듐 또는 세슘을 이용하고 있다. 그러나 양자 시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅이 수행되는 시간 동안 광집게를 단절해야 해서, 계산시간이 100마이크로초 정도로 제한되는 단점이 있다. 척력 광집게 트랩을 사용하는 방식도 고려될 수 있으나, 이 경우에도 거리 대 거리오차 비율이 커지는 단점이 따른다. 따라서 이를 해결하기 위해 차세대 리드버그 양자컴퓨터는 원자시계형 원자인 알칼리토류 또는 희토류 원자를 이용해 개발되고 있다. 대표적으로는 알칼리토류인 스트론튬과 희토류인 이터븀이 고려되는데, 광격자 원자시계에 사용되는 이 두 원자는 안정된 광대역의 원자시계 준위를 가지고 있다. 미국의 Caltech 대학교, Princeton 대학교, Colorado 대학교, 오스트리아의 Innsbruck 대학교, Atom Computing에서 개발 중이며, 한국에서는 한국표준과학연구원이 이터븀을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터를 개발할 계획이다.

(2) 연구 동향

해외의 리드버그 양자컴퓨팅 연구는 프랑스 Ecole Polytechnique 대학의 Browaye 교수와 연구팀이 창업한 Pasqal, 미국 Harvard 대학의 Lukin 교수와 연구팀이 창업한 Quera, 미국 Wisconsin 대학의 Saffman 교수와 연구팀이 관련된 Cold Quanta, 그리고 미국의 Atom Computing이 주도하고 있다. 참고로 Ecole Polytechnique 대학과 Harvard 대학은 KAIST와 거의 같은 시기인 2016년에 원자 재배치 기술을 각각 개발한 바 있다. 그 밖에 미국 Caltech 대학교, Princeton 대학교, MIT, Colorado 대학교 등에 새로운 연구그룹이 생겼으며, 독일과 오스트리아 및 일본과 중국에도 관련 연구팀이 생겼다. 아래에 학술지 논문을 중심으로 주요 연구 동향을 요약한다.

① 액체헬륨 리드버그 원자시스템 개발

현재의 200개 수준인 리드버그 원자 배열 개수를 제한하는 원자의 유효수명은 극저온 환경에서 연장될 수 있다. 광집게에 속박된 원자의 유효수명은 진공도에 의해 결정된다. 따라서 현재 리드버그 양자컴퓨터의 일반적인 진공도인 10^{-10} Torr에서 10^{-12} Torr 수준으로 진공도를 향상하면 원자의 유효수명은 100배 정도 향상될 수 있다. 프랑스 Ecole Polytechnique 대학 연구팀은 액체헬륨으로 리드버그 양자컴퓨터의 진공 챔버 자체 온도를 낮춰, 초고진공도(10^{-12} Torr)를 만들었다. 그리고 이를 이용해 광집게에 속박된 원자의 유효수명을 기존의 50초에서 6,000초로 향상했다. 따라서 광집게 내 유효수명이 6,000초인 원자 2,000개 정도를 재배치하는 리드버그 원자플랫폼을 만들 수 있을 것으로 예상된다.[429)]

② 중성원자 순차 재배치 기술

광집게로 포획한 원자는 함께 포획된 다른 원자와의 충돌로 인해 탈출하는 경우가 발생하므로, 개별 광집게가 단일 원자를 포획할 확률은 50% 정도에 불과하다. 이를 해결하기 위해 프랑스 Ecole Polytecnique 대학에서 중성원자 순차 재배치 기술을 개발했다. 우선 액정소자를 이용해 2차원 격자 모양의 광집게 2N개 만들고, 50% 확률로 포획한 약 N개의 중성원자 위치를 확인한다. 그 후 음광소자 2개를 고속으로 구동시켜, 확인된 원자를 하나씩 XY 방향으로 움직이는 방식으로, 원하는 모양의 원자열 N개를 생성한다. 이런 중성원자 순차 재배치 기술을 이용해 96%의 성공확률로 약 25개의 중성원자열을 만들어냈다. 이때 원자별 이동시간은 원자 간격 10마이크로미터당 1ms가 소요돼, 최대 배치 가능한 원자의 수는 수천 개 정도로 제한된다.[430)]

③ 반강자성 양자 시뮬레이션 연구

2차원에 생성한 100개 이상의 중성원자를 이용해 반강자성 양자 시뮬레이션을 수행했다. 레이저를 사용해 중성원자를 리드버그 원자로 만들 때, 리드버그 봉쇄 현상에 의해 인접한 중성원자는 동시에 리드버그 원자가 될 수 없고, 양자역학적 중첩상태가 된다. 이를 양자역학적 다체 해밀토니안으로는

429) Schymik et al. (2021)
430) Barredo et al. (2016)

아이징 모델로 근사할 수 있다. 따라서, 최대 147개 이상의 중성원자를 이용해, 아이징 해밀토니안의 반강자성 다체 기저에너지 스핀 상태를 계산했다. 더불어 4각 격자, 3각 격자, 벌집 격자 구조 등의 큐비트 배열 구조에 대한 반강자성 스핀 상관도를 측정했다.[431]

④ 양자상전이의 반강자성 스핀 상관도 측정

2차원 리드버그 양자 시뮬레이터를 이용해, 상자성에서 반강자성으로 바뀌는 양자상전이 근처에서 스핀 상관도를 측정했다. 해밀토니안의 변수를 조절하며 스핀 상관도의 척도변화를 측정한 결과, 양자역학적 Kibble-Zurek 기재에 의해 이론적으로 예측된 값과 일치함을 보였다.[432]

⑤ 척력 광집게 트랩

일반적인 광격자 또는 광집게 트랩은 원자의 공명주파수보다 작은 주파수의 레이저 빛을 사용해 원자가 레이저 빛의 초점에 속박되게 한다. 하지만 속박된 원자는 레이저 빛과의 상호작용 때문에 양자 시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅 과정에서 광격자 또는 광집게를 단절해야 한다. 따라서 계산시간을 제한할 수밖에 없는데, 이를 해결하기 위해 공명주파수보다 큰 주파수의 레이저 빛을 사용해 레이저 빛이 없는 위치에 원자를 속박하는 방식이 연구됐다. 하지만 이 방식도 원자 간 거리당 잡음의 비율이 커지는 문제가 있다.[433]

⑥ 이종 동위원소를 사용하는 리드버그 양자컴퓨팅

리드버그 양자컴퓨팅에 이종 동위원소의 원자를 사용하는 연구가 수행된 바 있다. 같은 동위원소의 원자를 사용하지 않고 두 가지 원자를 공간상 다르게 배치하면, 주변 원자에 영향을 주지 않고 개별 원자를 제어할 수 있다는 장점이 있다. 루비듐의 두 가지 동위원소인 Rb-85와 Rb-87을 사용하는 경우와 루비듐과 세슘을 함께 사용하는 경우 등이 연구됐다.[434]

⑦ 얽힘상태 원자의 이동 연구

양자컴퓨팅 도중에 큐비트의 위치를 변경하는 것은 많은 장점이 있다. 예를 들어 양자 시뮬레이션 또는 양자단열컴퓨팅과 같이 원자시스템 전체를 동시에 제어하는 경우, 개별 큐비트의 위치를 바꿔 큐비트 간의 연결성을 시간의 함수로 변경하는 것이 가능하다. 최근 연구에서 광집게로 얽힘상태인 원자들을 이동해 큐비트들의 연결 구조를 2차원 격자에서 원환체(Torus) 표면 연결 구조로 변화시키는 데 성공했다.[435]

431) Scholl et al. (2021)
432) Ebadi et al. (2021)
433) Dutta et al. (2022)
434) Beterov et al. (2022)
435) Bluvstein et al. (2022)

⑧ 리드버그 양자회로형 양자컴퓨팅

양자회로형 양자컴퓨팅 방식으로 계산 깊이 25 정도의 리드버그 양자컴퓨팅이 수행됐다. 앞서 설명한 척력 광집게 트랩을 이용해 양자역학적 잡음을 최소화하고, 핵스핀 원자시계 상태를 이용해 결맞음 시간을 확보했다. 큐비트 6개의 GHZ 상태를 만들고, NP-완전문제의 하나인 최대 컷(Max-Cut) 문제를 계산하는 데 성공했다.[436]

⑨ 리드버그 GHZ-얽힘상태 생성

리드버그 원자열은 리드버그 봉쇄 현상을 이용해, 다체 양자얽힘상태의 하나인 W-상태를 만드는 것이 상대적으로 쉽다. 다른 양자얽힘상태의 종류인 GHZ-상태, 또는 슈뢰딩거 고양이 상태를 만들 수 있는지가 관건이다. 최근 양자단열 방식의 양자컴퓨팅으로 최대 20개의 원자를 이용해 GHZ-상태를 생성한 바 있다.[437]

⑩ 알칼리토류 원자 리드버그 양자컴퓨팅

알칼리토류 원자는 핵스핀과 전자에너지 준위 간에 안정적인 광펌핑이 가능해 광격자 원자시계로 사용된다. 따라서 차세대 리드버그 원자플랫폼은 알칼리토류 원자를 이용해 개발되고 있다. 예를 들어 스트론튬-88 원자의 양자메모리 큐비트 상태를, 수명이 긴 삼중항 전자 에너지 준위로 펌핑할 수 있게 된 것이다. 또한 리드버그 원자의 검출 신뢰도는 광집게의 척력을 이용하는 방식에서 고속 측정이 가능한 오토-이온화(Auto-Ionization) 방식으로 변경됨으로써 크게 향상됐다. 이를 통한 얽힘상태 생성을 위한 밸상태 2Q 구동 신뢰도는 99% 이상으로 측정됐다.[438]

⑪ 희토류 원자 리드버그 양자컴퓨터

알칼리토류 원자의 기저 상태는 전자의 각운동량이 없다. 하지만 페르미온 희토류 원자의 핵스핀은 알칼리 원자와 같이 초미세 원자를 메모리 큐비트로 사용할 수 있다. 희토류 이터븀 동위원소인 Yb-171을 이용해, 10초의 긴 결맞음 시간을 가지며 자기장에 둔감한 리드버그 원자열을 생성하는 데 성공했다. 이것을 이용한 단일 큐비트 원자 게이트는 1Q 구동 신뢰도가 99.9%, 2Q 구동 신뢰도는 93%에 이르는 것으로 확인됐다.[439]

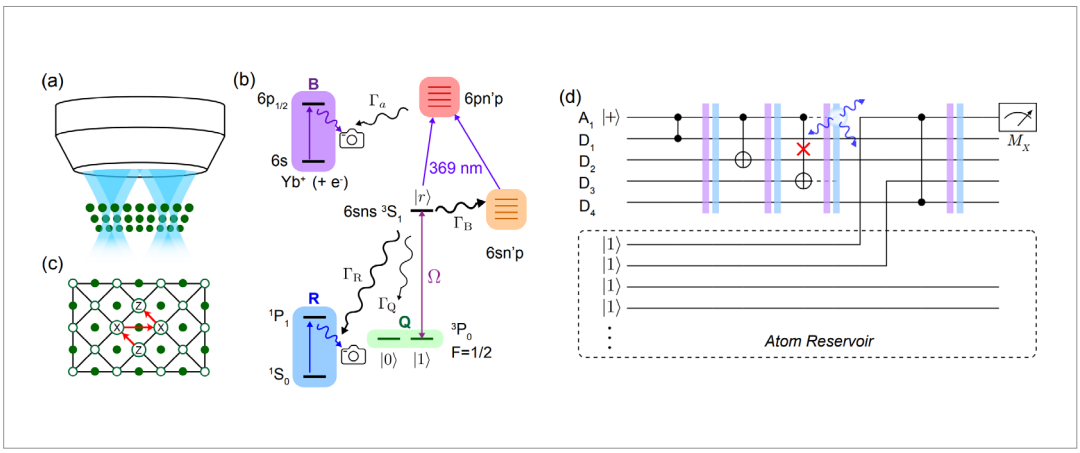
⑫ 오류 정정 양자 연산 연구

대규모의 양자연산을 위해서 필수적으로 요구되는 것은 오류정정이 가능한 논리 큐비트(logical qubit) 기술이다. 다양한 양자연산 플랫폼에서 오류정정(error correction)을 위한 방법론이 개발되

436) Graham et al. (2022)
437) Omran et al. (2019), Wang et al. (2018), Monz et al. (2011), Song et al. (2019)
438) Madjarov et al. (2020)
439) Barnes et al. (2022), Jenkins et al. (2022), Ma et al. (2022)

고 있으며, 중성원자 시스템에서도 관련 연구가 진행 중이다. 주목할 만한 연구현황은 알칼리 토금속계열 원자 171-Yb의 에너지 구조의 특성을 이용하여 큐비트 연산시 발생하는 물리시스템 오류를 지우는 방식(erasure conversion)이다.[440] 양자연산을 위한 리드버그 여기 과정에서 발생하는 오류를 큐비트 양자공간이 아닌, 오류발생 양자공간의 측정을 통하여 보상하는 방식이다. 이를 이용하여 surface code의 threshold를 4배이상 증가시킬 수 있었다.

그림 II-3-41 오류정정 큐비트 개요



* (a) 원자 배열을 이용한 양자컴퓨팅
(b) 171-Yb의 에너지 레벨, 큐비트 정보는 3P0상태에 저장되며, 큐비트의 얽힘을 위해서 리드버그 상태(r 상태)를 이용함. 이때 발생하는 물리적 에러를 보정학 위해서 각 decay channel의 측정을 통하여 에러를 지움
(c) XZZX surface code
(d) 에러 안정화를 위한 데이터 큐비트 D1,2,3,4 및 ancilla A1의 양자회로. 에러 측정을 각 게이트마다 실행되며, 에러가 발생할시, 지워진 원자는 reservoir에서 광집게를 통해서 보충됨

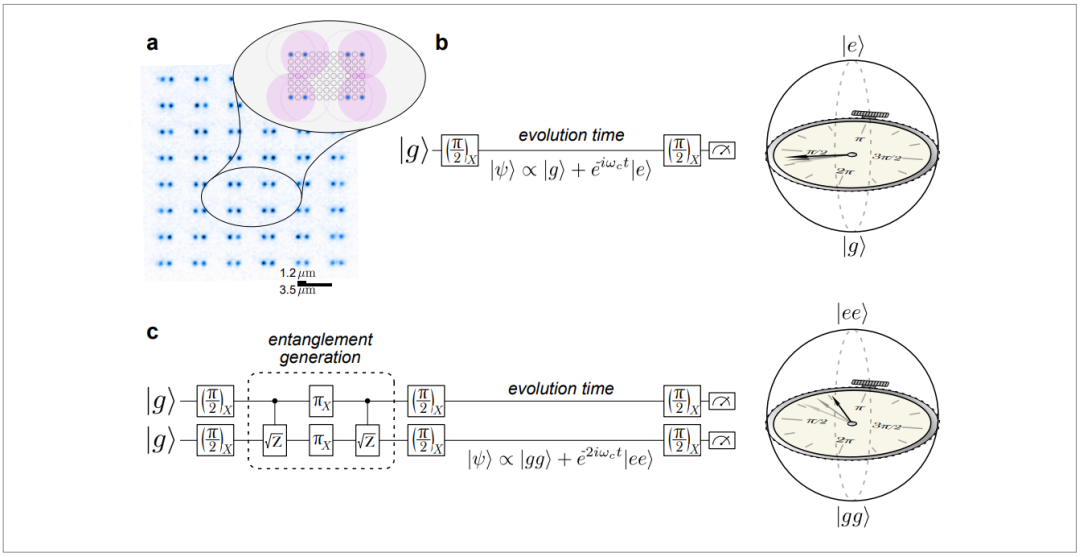
※ Nature communications 13, 4657 (2022)

⑬ 긴 결맞음 시간을 갖는 Bell 상태 구현

중성원자 기반 양자 컴퓨팅 물리 시스템은 리드버그 기반의 상호작용을 이용하여 각각의 원자큐비트 간의 양자얽힘을 제어할 수 있으며, 원하는 대로 프로그래밍이 가능한 양자 플랫폼이다. 특히, 원자시계에 사용되는 광시계 전이과정에 양자얽힘 기술이 응용된다면 이는 양자연산뿐 아니라, 양자기술 전반에 응용될 수 있는 중요한 핵심 원천기술이 될 것이다. 미국 JILA Kaufman그룹은 Sr원자의 광집게 배열을 형성하여, Sr원자의 시계전이선 기반의 큐비트의 얽힘상태를 형성하는 데 성공하였다.[441] 형성된 Bell상태의 lifetime은 4.2초라는 매우 긴 lifetime을 얻을 수 있었다. 이는 추후, 양자 연산 기술을 양자 센싱 및 메트롤로지에 적용할 수 있는 주요한 연구 결과가 될 것으로 기대되며, 다 큐비트 시스템의 양자 제어 및 연산(cluster 상태 구현 및 many-body hamiltonian 구현)에 활용될 것으로 예상된다.

440) Wu et al. (2022)
441) Schine et al. (2022)

그림 II-3-42 양자 연산 기술을 이용한 양자 메트롤로지



* (a) Bell상태를 형성하기 위하여 원자쌍으로 구현하여, 리드버그기반의 양자 얽힘 게이트를 적용함
(b) 일반적인 원자 시계의 작동방식. Ramsey 간섭을 위하여, 개별 원자 큐비트에 Pi/2 펄스를 두 번 가해줌
(c) 두 개의 원자 큐비트의 얽힘 쌍을 구현. 바닥상태와 여기상태의 Bell 상태 기반의 Ramsey 간섭을 적용하면, 높은 정밀도를 얻을 수 있음

※ Nature Physics 18, 1067 (2022)

⑭ 다체 큐비트의 난수 상태 및 벤치마킹 방식 개발

순수양자상태(pure quantum state)를 난수상태로 형성하는 것은 양자 정보 연구에 있어서 중요한 기술 요소 가운데 하나이다. 특히, 양자장치의 성능 테스트 및 양자이득의 가능성 여부를 파악할 때 요구된다. Caltech의 Endres그룹은 원자 큐비트 배열 시스템 및 시스템의 해밀토니안을 이용하여 양자상태 난수발생기술을 개발하였으며, 이를 이용하여 다체 큐비트 시스템의 벤치마킹 프로토콜을 정립하였다.[442] 25개의 원자로 이루어진 리드버그 양자시스템을 이용하여 벤치마킹을 시연하였으며 10,000번 이하의 샘플로 양자상태 fidelity estamation에 성공하였다. 연구진이 개발한 벤치마킹 방식은 일반적인 해밀토니안에 적용이 가능하며, 아날로그와 디지털 양자연산 간의 비교 등에 사용할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 난수와 연관된 다양한 양자기술적 개념들(quantum thermalization, ranmoness inquantum dynamics, non-equilibrium quantum dynamics)등에 적용될 것으로 판단된다.

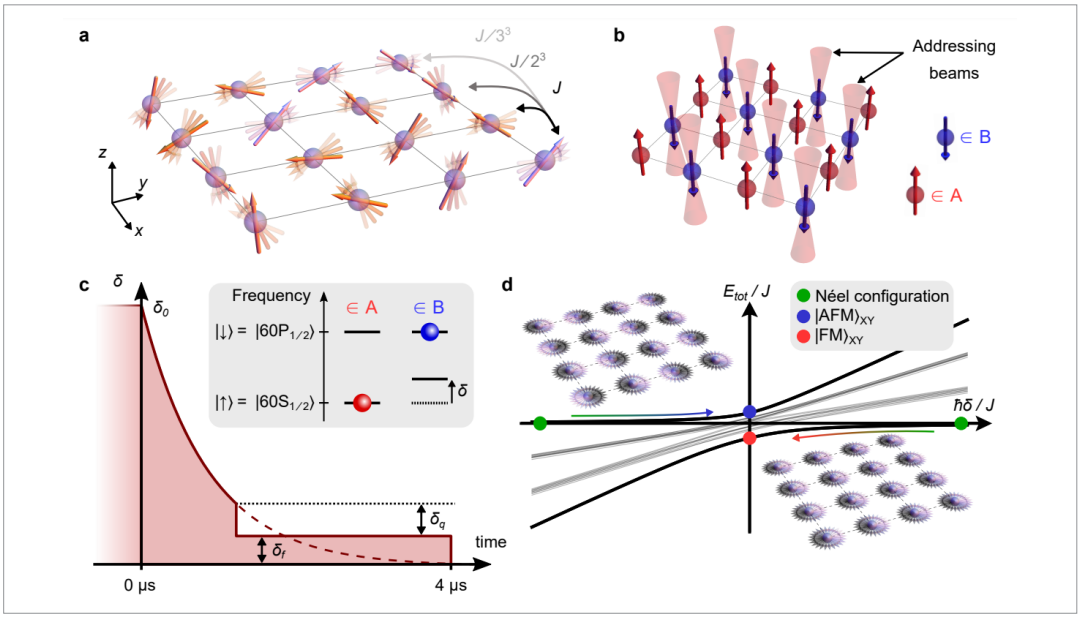
⑮ 2차원 다체 시스템 시뮬레이션

리드버그 원자 양자컴퓨팅 시스템은 일반적으로 다체 스핀 해밀토니안으로 기술할 수 있다. 따라서, 자성체와 같이 다체스핀으로 기술되는 양자 물질 연구 및 응집물질 계산연구에 사용될 수 있다. Browaeys그룹은 중성원자 양자컴퓨팅 시스템을 이용하여 2차원 XY자성 모델을 구현하였으며, 리드

442) Choi et al. (2023)

버그 상호작용에 기반한 장거리 질서(long-range order)을 활용하여 XY자성모델의 상변이 및 연속 대칭 깨짐(continuous symmetry breaking) 현상을 연구하였다. 연구팀은 XY ferromagnet과 antiferromagnet 상태를 구현하여, 각각의 양자상(quantum phase)이 장거리 상호작용에 어떠한 영향을 받는지 관측하였다. ferromagnet인 경우는 장거리 질서 변수가 유지되는 것을 관측하였으며, antiferromagnet의 경우는 장거리에서 질서 변수가 사라지는 것을 관측하였다. 추후, 다양한 기하형태의 격자를 이용하여 frustration 및 spin liquid physics의 계산이 가능할 것으로 기대된다.

그림 II-3-43 리드버그 양자 연산시스템으로 구현한 dipolar XY model



* (a) 사각 격자상의 배열된 각 원자 큐비트는 XY magnet을 구현함. 리드버그 상호작용을 이용하여 장거리 질서를 구현함
(b) 공간 분해가 가능한 레이저 빔을 이용하여 ferromagnet 및 antiferromagent 상태를 구현할 수 있음
(c) 에너지 shift를 조정하여 다체모델 해밀토니안을 변화시킬 수 있음
(d) 레이저 frequency shift δ에 따른 양자상 변화, 레이저 frequency shift를 sweep하여 상변이를 확인할 수 있음

※ Nature 616, 691 (2023)

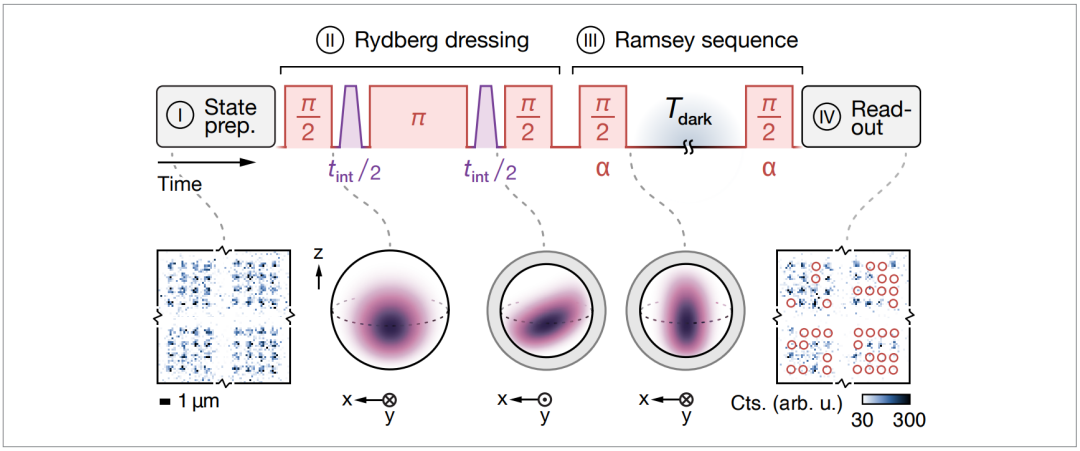
⑯ 리드버그 상호작용을 이용한 spin squeezing

리드버그 상호작용을 이용하면 원자 큐비트의 스핀은 스퀴징이 가능하며, 이는 특히 양자 측정기술 활용성이 높다. 중성원자 배열 양자시스템은 프로그래밍적으로 리드버그 상호작용 제어 및 개별 원자큐비트 제어가 가능하므로, 이를 활용하여 양자측정의 정밀도를 높이는 데 활용될 수 있다.

- A. JILA의 Kaufman그룹은 리드버그 기반 스퀴징을 원자배열 시스템으로 구현하였으며, 4dB정도의 metrological gain을 얻는 것에 성공하였다.[443] 이를 이용하여 시간측정에 활용하였으며, standard quantum limit에 비교하여 2dB의 이득을 얻는 것에 성공하였다.

443) Eckner et al. (2023)

그림 II-3-44 리드버그 상호작용을 이용한 spin squeezed state 형성

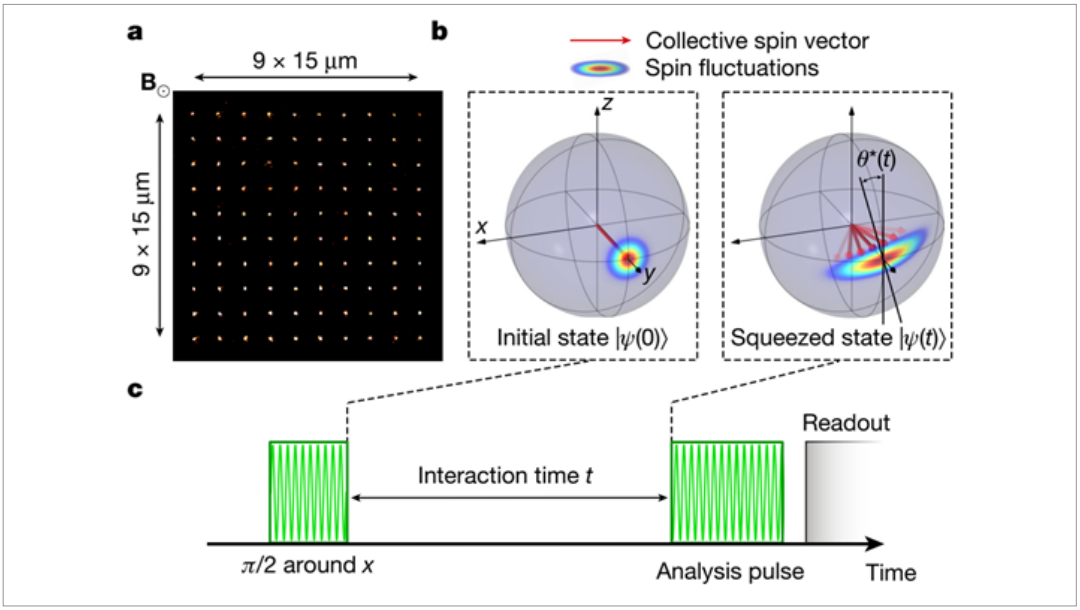


* Pi/2 펄스 이후, off resonant 리드버그 상호작용을 이용하여 spin squeezing을 구현함

※ Nature doi.org/10.1038/s41586-023-06360-6

• B. Browaeys그룹 역시 비슷한 시기에 스핀 스퀴징을 N=100 원자 큐비트 시스템 기반으로 구현하는 데 성공하였다.[444] 스핀스퀴징으로 인한 이득은 -3.5 +/- 0.3 dB(before correction), -5 +/- 0.3 dB(after correction)이다.

그림 II-3-45 리드버그 상호작용을 이용한 스핀 스퀴징



* (a) 스핀 스퀴징에 사용된 10*10 원자 큐비트 배열
(b) 스퀴징 전후의 bloch sphere, c. 마이크로 웨이브 파형 시퀀스. 두 번째 마이크로 웨이브의 위상 및 펄스폭을 제어하여 스핀 분포를 회전시켜 스퀴징 파라미터를 측정할 수 있음

444) Bornet et al. (2023)

(3) 적용 분야

리드버그 양자컴퓨터는 조합 최적화 문제에 적용될 것으로 예상된다. 현재의 디지털 컴퓨팅이 효율적으로 계산할 수 없는 조합 최적화 문제를 해결함으로써 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에 널리 활용될 것으로 예상된다.

7. 양자컴퓨팅 소프트웨어

양자컴퓨팅 소프트웨어의 첫 번째 분야는 양자 알고리듬(Quantum Algorithm)이다. 양자 알고리듬은 양자 원리를 계산 방식에 적용한다. 양자 알고리듬은 기존 컴퓨팅의 한계를 넘어 얼마나 더 효율적인 계산을 수행할 수 있을지 그 한계를 규명하는 것을 목표로 한다. 또한, 기존 컴퓨팅 기술 혹은 일반적으로 정보통신기술의 한계와 비교할 때 양자정보처리 기술이 얻게 되는 장점을 확보하고자 한다. 양자컴퓨팅 기술의 기존 기술 대비 장점을 양자 이득(Quantum Advantage)이라고 한다.

두 번째는 하드웨어와 인터페이스를 목적으로 하는 소프트웨어의 개발이다. 양자 하드웨어가 양자역학적 성질을 잃게 되어 양자 원리를 적용할 수 없게 된다면 양자 정보 처리를 완전히 수행할 수 없다. 이러한 현상을 양자 물리계에 대한 잡음(Quantum Noise)이라고 한다. 양자 잡음은 양자컴퓨팅을 수행하는 과정에서 발생하는 오류(Quantum Noise)에 해당한다. 양자 회로에서 발생하는 오류를 양자 오류 정정(Quantum Error Correction)을 통해 제어할 수 있다. 혹은, 오류를 완전히 제어하지 못하는 경우 양자 오류 완화(Qantum Eror Mtigation)을 통해 오류의 효과를 최대한 제어할 수 있다. 하드웨어 및 소프트웨어의 인터페이스에서 핵심적인 부분은 양자 하드웨어에서의 잡음 및 양자정보처리에서의 오류를 제어하는 것이다.

세 번째는 사용자와 인터페이스를 위한 소프트웨어의 개발이다. 양자컴퓨팅은 회로-기반,[445] 단열-변화[446] 및 측정-기반[447] 등 상이한 구현 방법을 통해 실현될 수 있다. 구현 방법이 하드웨어를 구성하는 물리계에 따라 결정되는 것은 아니다. 예를 들어, 초전도체 및 이온 덫 양자 하드웨어는 회로-기반 및 단열-변화 컴퓨팅에 활용되며, 측정-기반 양자컴퓨팅은 광자를 활용하여 구현될 수 있다. 또한, 구현 방법이 달라도 계산 복잡도는 동일하다. 사용자 인터페이스를 제공하는 양자 소프트웨어는 사용자로 하여금 해당 양자컴퓨팅 방식에 접근할 수 있는 편의를 제공한다.

445) Detusch (1980)
446) Farhi (2000)
447) Raussendorf (2001)

가. 양자 알고리듬

양자 알고리듬은 계산에 대해 양자 원리를 적용하고 주어진 수학 문제를 해결한다. 양자 알고리듬의 개발을 통해 양자컴퓨팅이 기존 컴퓨팅 대비 얻게 되는 궁극의 장점을 결정할 수 있다. 또한, 양자컴퓨팅의 역량에 대한 한계를 규명할 수 있다. 따라서, 양자 알고리듬의 역량을 통해 최종적으로 양자컴퓨팅 기술에 의한 파급효과를 예상하게 한다. 양자컴퓨팅 R&D 전반에서 연구 활동과 투자에 대한 동기와 목적을 부여한다.

(1) 기술 동향

세계 최초의 양자 알고리듬에 해당하는 D. Deutsch에 의한 Deutsch 알고리듬은 양자 원리에 의한 알고리듬의 계산 역량에 대한 첫 번째 결과이다.[448] Deutsch 알고리듬의 결과는 이후에 함수의 주기 탐색 문제,[449] 양자 푸리에 변환, 그리고 양자 소인수 분해 알고리듬[450]으로 발전하였다.

양자 알고리듬이 기존 컴퓨팅 기술 대비 속도 향상이 있다고 결정하는 기준은 계산 복잡도(Computational Complexity)이다. 계산 복잡도는 주어진 수학 문제를 해결하기 위한 입력값 대비 연산의 속도를 결정한다. 여기서 연산의 속도는 연산의 횟수를 의미한다. 주어진 수학 문제의 입력 비트가 숫자 n일 때 계산을 완료하기까지 필요한 연산의 횟수, 혹은 시간이, 어떤 자연수 k에 대해 n^k에 비례한다면 다항식 시간이라고 한다. 다항식 시간이 소요되는 수학 문제에 대해서는 해결 가능한 문제로 분류한다. 게이트의 물리적 시간을 고려하는 경우 물리적 시간 c를 전체 게이트 연산의 횟수에 곱하여 시간을 산정할 수 있다. 상수를 곱한다 하더라도 입력값 n에 따라 증가하는 연산의 횟수가 총 소요되는 시간에 더 중요한 변수에 해당한다.

소인수 분해 문제에 대한 정확한 계산 복잡도는 알려져 있지 않다. 양자 알고리듬과 고전 알고리듬을 계산 복잡도 측면에서 비교하기에 이상적인 예시에 해당하지 않는다. 현재까지 알려진 방법으로는 숫자 $N=2^n$에 대해 소요되는 시간은 $e^{1.9(\log N)^{1/3}(\log\log N)^{2/3}}$에 비례한다. 반면, P. Shor에 의한 양자 소인수 분해 알고리듬은 $(\log N)^2$에 비례하는 게이트 연산을 요구하여 현재 알려진 방법 대비 속도 향상을 제시한다. 소인수 분해 문제에 대해 고전적인 알고리듬과 양자 알고리듬이 모두 발전할 가능성이 여전히 남아 있다. 예를 들어, 2023년 최근 Regev에 의해 소인수 분해 문제를 $(\log N)^{3/2}$ 시간에 해결하는 양자 알고리듬을 개발하였다.[451] 소인수 분해 문제는 RSA 암호 체계의 보안성과 관련하여 암호 및 보안 분야에 큰 파급효과를 지니고 있다.

448) Deutsch (1980)
449) Simon (1997)
450) Shor (1999)
451) Regev (2023)

정렬되지 않은 데이터베이스에서 희망하는 아이템을 찾아내는 탐색 알고리듬에 대한 계산 복잡도는 다음과 같다. 고전적으로는 데이터베이스 크기 N에 대해 대략 N에 비례하는 탐색 시간이 필요하다. L. Grover는 양자 데이터베이스 알고리듬을 제안하였고 $\sqrt{N}$에 비례하는 시간에 탐색을 완료할 수 있음을 보였다.[452] 기존 알고리듬 대비 다항식만큼의 속도 향상을 보여준다. 또한, $\sqrt{N}$의 시간이 최적임이 증명되었다.[453] 현재까지 고전 및 양자 알고리듬을 정확히 비교할 수 있는 사례는 양자 데이터베이스 알고리듬이 대표적이다.

위에서 양자 알고리듬에 의한 속도 향상을 살펴보았으나, 주의할 사항은, N에서 $\sqrt{N}$으로의 속도 향상은 다항식에 비례한다는 사실이다. 다항식 만큼의 속도 향상은 계산복잡도에 영향을 미치지 않는다. 현재까지의 결과를 살펴볼 때, 기존 계산 복잡도 체계는 양자 알고리듬에서 의해 수정되지 않았으며 양자 컴퓨터에 의한 계산 복잡도 체계 수정 여부는 중요한 주제이다.

(2) 연구 동향

① 양자 소인수 분해 알고리듬

P. Shor에 의한 양자 소인수 분해 알고리듬은 $(\log N)^2$에 비례하는 게이트 연산을 요구하여 현재 알려진 방법 대비 속도 향상을 제시한다. 소인수 분해 문제에서 양자 알고리듬의 기존 알고리듬 대비 속도 향상은 양자 푸리에 변환에서 얻는 속도 향상에 기인한다. 2023년 O. Regev에 의해 소인수 분해 문제를 $(\log N)^{3/2}$ 시간에 해결하는 양자 알고리듬을 개발하여 양자 소인수분해 알고리듬의 속도가 더 향상될 수 있음을 보였다. 새로운 양자 소인수 분해 알고리듬은 계산 속도뿐 아니라 필요한 보조 큐비트의 개수를 더 줄이는 것도 가능하다는 것을 보여 양자 알고리듬 전반에서 자원의 최적화가 더욱 가능하다는 것을 보였다.

표 II-3-2 양자 소인수 분해 문제에 대한 계산 복잡도 비교: $N=2^n$

양자 소인수 분해	필요한 큐비트 개수	회로 크기
P. Shor의 알고리듬 [454]	$O(n\log n)$	$O(n^2\log n)$
O. Regev의 알고리듬 [455]	$O(n^{3/2})$	$O(n^{3/2}\log n)$
O. Regev의알고리듬에 대한 최적화 [456]	$O(n\log n)$	$O(n^{3/2}\log n)$

452) Grover (1996)
453) Zalka (1996)
454) Shor (1997)
455) Regev (2023)
456) Ragavan (2023)

② 양자 푸리에 변환 및 위상 측정 (phase estimation)

양자 푸리에 변환은 기존 푸리에 변환 대시 속도 향상을 제공한다. n비트에 대한 푸리에 변환은 $n2^n$의 게이트 연산을 요구하지만, 양자 푸리에 변환에서 게이트 연산 횟수는 n^2에 비례하여 지수함수만큼 빠른 속도 향상을 제시한다. 양자 푸리에 변환 및 위상 측정 (phase estimation) 관련한 양자 알고리듬은 소인수 분해 문제뿐 아니라 선형 연립 방정식 문제에 대해서도 제안되었고 지수함수만큼의 속도 향상을 제공한다.

양자 푸리에 변환은 화학 및 응집물질물리 분야에서 해밀토니안의 바닥 에너지 측정하는 방법에 활용될 수 있다. 또한, 진폭 측정 (amplitude estimation) 알고리듬으로 변환하여, 금융,[457] 암호, 조합 최적화 분야에 응용되고 있다.

③ 양자 진폭 증폭 및 측정 관련

L. Grover에 의해 제안된 양자 데이터베이스 탐색 알고리듬은 양자 상태의 진폭이 증가하는 과정에 해당한다:

$$\frac{1}{\sqrt{N}}(|1>+|2>+\cdots+|N>) \;\Rightarrow\; \sqrt{1-\epsilon}|m>+\frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{N-1}}(|1>+\cdots)$$

위와 같이 N개의 중첩된 상태를 특정 희망하는 상태 $|m>$으로 변환하는 과정이다. 즉, 희망하는 양자 상태 $|m>$의 진폭은 $1/\sqrt{N}$으로부터 최대한 증가한다. 이를 일반화하여 양자 진폭 증폭 (Quantum Amplitude Amplification) 과정을 정의할 수 있다. 양자 데이터베이스 탐색 알고리듬이 다항식만큼의 속도 향상을 제공했듯이, 양자 진폭 증폭 과정을 통해 다항식만큼의 속도 향상을 얻을 수 있다.

최근 양자 진폭 증폭 과정은 양자 특이값 분해(Quantum Singular Value Decomposition)의 관점에서 연구 개발이 진행되어 양자 신호 처리 (quantum signal processing) 기법으로 발전하였다. 예를 들어, 알지 못하는 임의의 양자상태에 대해서도 양자 진폭 증폭을 확정적으로 수행하는 알고리듬이 개발되었다.[458]

(3) 적용 분야

양자[459]에서 속도 향상이 입증된 경우는 양자 푸리에 변환 혹은 양자 진폭 증폭 과정을 응용하는 경우이다. 양자 푸리에 변환과 양자 진폭 증폭을 구현하는 양자 회로는 큐비트 개수에 대해 다항식만

457) Woerner and Egger (2019)
458) Martyn et al. (2021)
459) ibid. (2021)

큼 비례하는 정도의 깊이[460]를 갖게 된다. 회로의 깊이가 커지게 되면 양자 잡음은 양자 게이트를 통해 회로 전반에 전파하게 되어, 잡음의 제어를 수행하는 양자 오류 정정 기술이 반드시 필요하다. 현재 NISQ 기술은 양자 오류 정정을 구현할 수 없으므로, 실제 양자[461]의 적용 및 구현 수준은 아직 산업화에 이르지 못한다.

그럼에도 불구하고, 향후 양자컴퓨팅 하드웨어 발전에 따라 양자 알고리듬의 구현이 성숙될 때, 양자 푸리에 변환 및 양자 진폭 증폭에서 존재하는 양자 이득을 활용할 수 있는 양자 알고리듬들은 다양하게 개발되고 있다. 금융, 교통, 화학, 암호 분석 등 계산이 요구되는 대부분의 산업 분야에서 활용할 수 있는 양자 알고리듬이 개발되고 있다.

나. NISQ 기술 기반 양자 알고리듬

현재 양자 기술을 요약하는 NISQ 기술로서 양자컴퓨팅 하드웨어를 제한할 때, 양자 회로 모델 경우 양자 오류를 제어하는 오류 정정이 수반되지 않은 형태의 양자 알고리듬만이 구현 가능하다. 이러한 제약 조건에서 개발되는 즉, NISQ 기술 기반의 양자 알고리듬은 현재 기술로서 구현 가능하다는 장점이 있으며 양자 이득 확보의 여부는 중요한 주제이다. 양자 푸리에 변환 및 양자 진폭 증폭 알고리듬은 양자 오류 정정이 수반될 때 양자 이득을 확보하므로 이러한 기존의 양자 이득 확보 가능한 방법들을 NISQ 알고리듬에 적용할 수 없다. 또한, 양자컴퓨팅에서 정의되는 보편성[462] (Universality)의 성질이 NISQ 환경에서 구현될 수 없다.

(1) 기술 동향

양자 소프트웨어 관점에서 NISQ 기술에 대해 핵심이 되는 특징은 양자 잡음에 대한 제어가 불완전하다는 것이다. 양자 회로의 개별 게이트에서 발생한 잡음은 CNOT 게이트를 통해 다른 큐비트로 전파되고 결국 회로 전반에 오류들을 발생한다. 양자 상호작용을 유도하는 CNOT 게이트는 오류가 없을 경우 얽힘을 생성하고 양자 이득 확보에 기여하지만, 양자 오류가 발생하는 경우 회로 전반에 효율적으로 오류를 전파하는 역할을 수행한다.

NISQ 기술에 기반한 알고리듬은 이러한 잡음 효과를 최소화하는 것이 중요하고, 양자 오류의 전파의 효과를 낮추기 위해 사용되는 회로의 깊이를 낮추어 얕은 회로만을 활용한다. 얕은 회로를 반복

460) 회로 깊이: 큐비트가 양자 회로에서 경험하는 최대 게이트 개수

461) Martyn et al. (2021)

462) 초기 양자 상태를 양자 계산에 의해 임의의 상태로 변환 가능한 성질. 예를 들어, 회로-모델의 경우 CNOT 와 단일 큐비트 게이트를 통해 보편성을 갖는 양자 회로 구현 가능

하여 사용할 때, 회로 사이에는 큐비트 측정 및 큐비트 상태 준비가 반복되고, 측정과 상태 준비까지의 시간에는 기계학습을 포함한 기존 컴퓨팅에서의 소프트웨어 전반을 활용할 수 있다. 따라서, 얕은 회로 기반의 NISQ 알고리듬은 양자-고전 하이브리드 방식으로 작동하게 된다.

또한, 양자컴퓨팅 하드웨어에서 발생하는 오류를 최대한 제어하기 위해 양자 오류 완화 (Quantum Error Mitigation) 기법을 개발하여 적용할 수 있다. 양자 오류 완화는 양자 회로의 개별 게이트 및 측정 과정 모두에 적용될 수 있다. 최근 IBMQ 의 경우 양자 오류 완화 기능을 탑재했다.

(2) 연구 동향

얕은 회로만을 활용하여 양자 알고리듬을 구현하는 경우 양자 이득을 확보할 수 있는 수학 문제와 양자 알고리듬의 사례가 제시되었다.[463] 양자-고전 하이브리드 양자 알고리듬은 기존 컴퓨팅의 소프트웨어도 활용하며 양자 변분 해법(Variational Quantum Eigensolver) 알고리듬이 개발되었다.[464] 단열-변화 양자컴퓨팅을 얕은 회로 모델로 변환하는 양자 근사 최적화(Quantum Approximate Optimization Algorithm) 접근 방식이 제안되었다.[465] 역으로 양자 근사 최적화 알고리듬의 극한은 단열-변화 양자컴퓨팅 모델로 수렴한다. 양자-고전 하이브리드 알고리듬에서 사용하는 얕은 양자 회로의 최적화를 위해 매개 변수화된 양자 게이트(Parameterized Quantum Circuits)들이 제시되었다. 양자 변분 해법 및 양자 근사 최적화 알고리듬은 다양한 문제에 적용 가능하지만 양자 이득의 사례는 현재까지 보고되지 않았다.

(3) 적용 분야

VQE 및 QAOA의 접근은 다양한 분야의 최적화 문제에 적용 가능하다.[466] 다체계 물리학, 화학 시뮬레이션, 기계학습, 조합 최적화 문제 등의 응용 분야에서 정의된 최적화 문제에 적용 가능하다. 또한, 양자 오류 정정, 핵물리학, 얽힘 이론, 양자 센싱 등 양자 정보 처리에서 많은 양의 계산을 요구하는 경우에도 적용 가능하다.

463) S. Bravyi, D. Gosset, and R. Koenig (2018)
464) A. Peruzzo et. al. (2014)
465) E. Farhi, J. Goldstein, and S. Gutmann (2014)
466) K. Bharti et. al. (2022)

다. 하드웨어 인터페이스를 위한 양자 소프트웨어

양자컴퓨팅에서 잡음의 의미는 양자 역학적 성질을 사라지게 하는 모든 효과를 의미한다. 그 결과 양자 상태, 다이내믹스, 측정에서 오류가 발생하여 양자 원리에 의한 계산 수행이 가능하지 않게 된다. 양자컴퓨팅 하드웨어가 외부 환경과 상호작용하면 시스템-환경 간 얽힘이 발생하고 외부 환경의 간섭에 의해 시스템의 큐비트 상태의 조작이 원활하지 않게 된다. 또한, 시스템-환경 간 얽힘으로 인해 시스템은 잡음을 포함한 혼합 상태(Mixed State)가 되고, 혼합 상태의 측정 결과는 고전 컴퓨터로도 모사가 가능하여 양자컴퓨팅의 역량을 확보하는 데에 실패하게 된다.

양자컴퓨팅 하드웨어가 성숙하더라도 실제 장비는 잡음을 포함하여 양자 오류 정정의 구현이 필수적이다. 현재의 NISQ 기술은 양자 오류 정정을 구현할 수 없는 수준의 잡음 비율을 갖는 양자 하드웨어에 해당하여 양자 오류에 대한 제어가 어렵다.

(1) 기술 동향

NISQ 시대 양자컴퓨팅 소프트웨어 기술 개발은 하드웨어에서 발생하는 잡음을 다루는 기술 개발에 초점을 맞추고 있다. 양자컴퓨팅 하드웨어에서 발생하는 잡음을 최대한 제어하여 양자 알고리듬의 구현에 미치는 영향을 최소화하는 것을 목표로 한다. 혹은, 발생하는 잡음을 분석하여, 잡음 섞인 측정 결과에서 효율적으로 잡음의 효과를 최대한 제거하는 기술 개발을 목표로 한다. 이는 NISQ 알고리듬 개발 과정과 맞닿아 있다. 양자 오류 완화(Quantum Error Mitigation) 기술 개발은 양자 오류 정정 기술이 개발될 때까지 상당 기간 연구 개발이 지속될 것으로 예상된다.

(2) 연구 동향

양자컴퓨팅 하드웨어의 오류에 대한 정량화가 필요하다. 양자 개별 게이트 및 측정에서 오류 비율을 제시하는 것 외에 IBMQ는 양자 볼륨(Quantum Volume) 그리고 IONQ 알고리듬 큐비트(Algorithmic Qubit)의 정량화를 제시하였다. 이러한 정량화는 증가하는 큐비트만으로 양자컴퓨팅의 성능을 제시하게 되거나 판단하게 되는 오류를 피하는 데에 있어서 적절한 방향이다. 양자컴퓨팅 하드웨어의 목적은 양자 이득을 확보하는 양자 소프트웨어의 구현이므로, 양자 이득을 확보하는 데에 있어서 직접적인 양자컴퓨팅 하드웨어 판별 방법이 필요하다.

양자 오류 정정보다 더욱 광범위한 영역에서 양자 오류 완화 기술 개발이 진행되고 있다. 먼저 양자 오류 정정은 양자 게이트 및 회로에서 발생하는 오류를 제어하는 양자 코드 상태, 오류 검출, 오류 정정에 대한 연구이다. 양자 오류 완화는 게이트 및 회로뿐 아니라, 양자 상태를 준비하는 초기화 및 측정에서 발생하는 오류를 최대한 제어한다. 오류 완화 기법은 크게 하드웨어와의 직접적인 인터페이스를 통한 방법과 측정 결과로 얻어지는 데이터에 대해 소프트웨어를 적용하는 방법으로 나뉠 수 있다. 양자

게이트에 대한 오류 완화 기법으로는 외삽법(Extrapolation) 및 확률적 제어 (Probabilistic Cancellation) 방법들에 대한 연구가 진행되었다. 양자 측정에 대한 오류 완화 기법으로는 양자 측정 토모그래피(Quantum Detector Tomography) 기반의 연구들이 수행되었다.

(3) 적용 분야

양자컴퓨팅 하드웨어 인터페이스를 위한 소프트웨어는 양자컴퓨팅 구현 기술 전반에 적용된다. 최근 IBMQ는 클라우드 양자컴퓨팅 서비스에 양자 오류 완화 소프트웨어를 장착하여 성능을 향상하였고, 향후 기술 개발 로드맵에서 큐비트 개수 증가 및 양자 오류 완화 소프트웨어 구현을 주요한 방향으로 설정하고 있다.

라. 양자 알고리듬 클라우드 플랫폼

(1) 기술 동향

IBMQ, IONQ, D-Wave 등과 같은 NISQ 컴퓨팅 하드웨어를 소유한 기업들이 클라우드 양자컴퓨팅 서비스를 제공함에 따라, 양자 알고리듬 클라우드 플랫폼에 대한 개발이 진행되고 있다.

기업	Rigetti	IBMQ	Google	CQC
소프트웨어 플랫폼	Forest	Qiskit	Cirq	t|ket〉

(2) 적용 분야

양자 알고리듬 클라우드 플랫폼은 실제로 양자컴퓨팅을 사용하고 소프트에서 위에서 기술한 양자 알고리듬을 모두 실제 시연할 수 있다. 고전 컴퓨터로 제작한 플랫폼에서 시연하는 만큼, 플랫폼에서의 큐비트 개수가 증가하면, 어느 시점에서는 동작 결과를 얻는 데에 시간이 많이 것으로 예상한다. 그러나, 플랫폼을 통해 작성한 양자 알고리듬의 코드를 양자컴퓨팅 하드웨어에 직접 적용하면 더 빠른 시간에 계산 결과를 얻을 것이다.

제3절 국내 양자컴퓨팅 R&D 동향

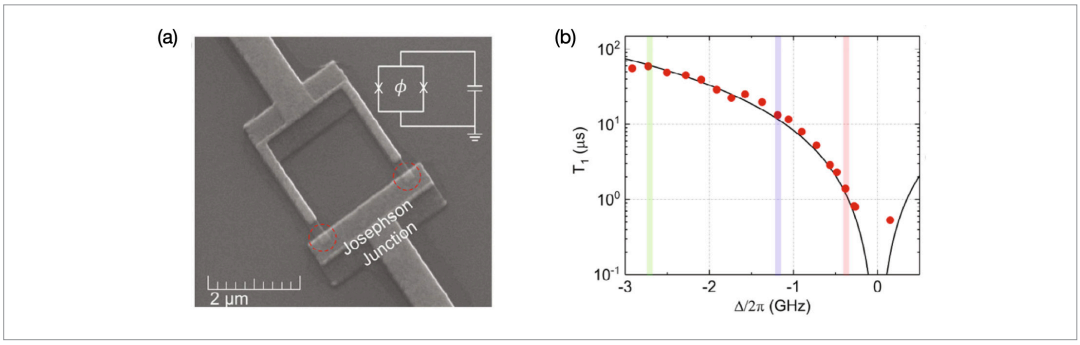
1. 초전도 양자컴퓨팅

가. 초전도 큐비트

(1) 주파수 조정 가능한 초전도 큐비트 개발

전하 잡음을 줄이기 위해 축전기 용량을 키운 초전도 큐비트를 통칭해서 트랜스몬(Transmon)이라고 한다. 상대적으로 제작이 쉽고 높은 결맞음 시간을 달성할 수 있어, 현재 전 세계에서 가장 많이 사용되는 큐비트 디자인이다. 한국표준과학연구원, 고려대, 성균관대 공동 연구진은 실리콘 기판 위에 주파수 조정 가능한 트랜스몬을 국내 최초로 개발했다.[467] 구리로 제작한 3차원 공진기를 사용해 큐비트 양자상태를 측정했고, 큐비트 주파수를 조정하며 공진기 주파수와의 차이에 따른 큐비트의 T_1 결맞음 시간을 연구했다. 그 결과 큐비트 주파수가 공진기 주파수와 멀어질수록 큐비트 결맞음 시간이 증가하는 것을 실험적으로 확인했고, 최대 84 μs의 T_1 결맞음 시간을 달성했다.

그림 II-3-46 (a) 주파수 조정 가능한 트랜스몬의 SEM 이미지
(b) 공진기 주파수와 트랜스몬 주파수 차이에 따른 T_1 결맞음 시간 변화



※ Park (2020)

467) Park (2020)

(2) 5-큐비트 양자프로세서 개발

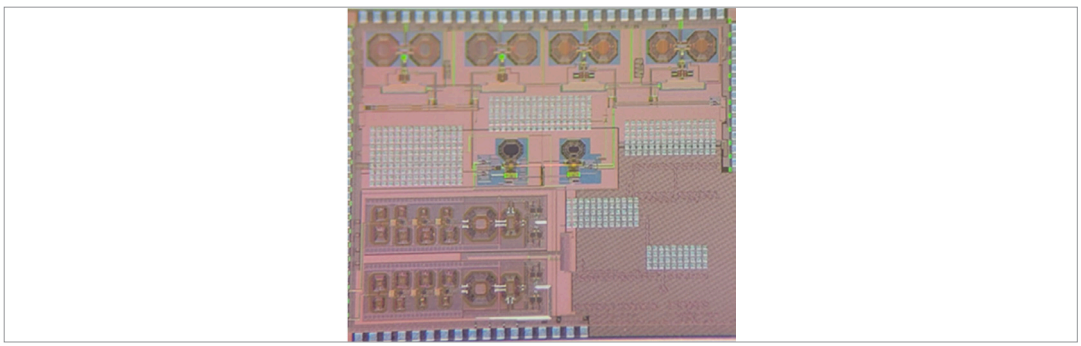
3차원 공진기의 시스템 크기가 2차원 공진기보다 큰 탓에 양자프로세서 확장성 측면에선 큰 걸림돌이 된다. 이에 한국표준과학연구원 연구진은 기존 3차원 공진기 기반의 디자인을 벗어나 2차원 기판 위에 트랜스몬 큐비트와 상태 측정 공진기를 설계해, 개별 큐비트의 제어측정이 가능한 5-큐비트 양자프로세서 소자를 개발했다.[468] 큐비트의 성능 지표인 결맞음 시간은 평균 T_1 ~ 20 μs, T_2^* ~ 10 μs으로 측정됐고, 무작위 벤치마킹 기법을 활용해 단일 큐비트 양자게이트의 신뢰도는 99.5% 이상, 2-큐비트 양자게이트의 신뢰도는 80% 이상임을 실험적으로 확인했다. 또한 강한 마이크로파 단발 측정 방법을 활용해 90% 이상의 양자상태 측정 신뢰도를 달성했다.

나. 초전도 양자컴퓨터 규모 확장을 위한 요소기술

(1) CMOS 기반 극저온 초전도 양자프로세서 제어시스템 기술 개발

초전도 양자프로세서는 열잡음에 취약하므로 희석 냉동장치(Dilution Refrigerator)를 사용해 10mK 온도 영역에서 동작한다. 큐비트 제어 및 측정은 상온에서 생성한 RF 신호를 10mK 온도에 있는 프로세서에 주사해 이뤄진다. RF 신호 전송 중에 발생하는 신호 감쇄는 냉동장치 내에 열을 발생시키는데, 냉각 출력 이상의 발열은 냉동장치 내 온도를 높여서 프로세서의 성능 저하를 유발한다. 포항공과대학교 연구팀은 이러한 문제를 해결하고자 4K 극저온에서 RF 신호를 생성하고 분석할 수 있는 CMOS 기반 양자프로세서 제어 칩을 개발했다.[469] 이 칩은 2개의 마이크로파 영역 주파수 고정루프, 4개의 직접 합성 방식의 펄스변조 채널, 2개의 광대역 수신 채널, 초전도 큐비트 얽힘 제어를 위한 4개의 DC Flux 바이어스 채널로 구성돼 있다.

그림 II-3-47 4K 극저온 양자제어 칩



※ Kang (2022)

468) 이선경 (2022)
469) Kang (2022)

2. 반도체 양자점 양자컴퓨팅

가. 스핀 큐비트 호스트 양자소재 성장 기술

(1) 기술 동향

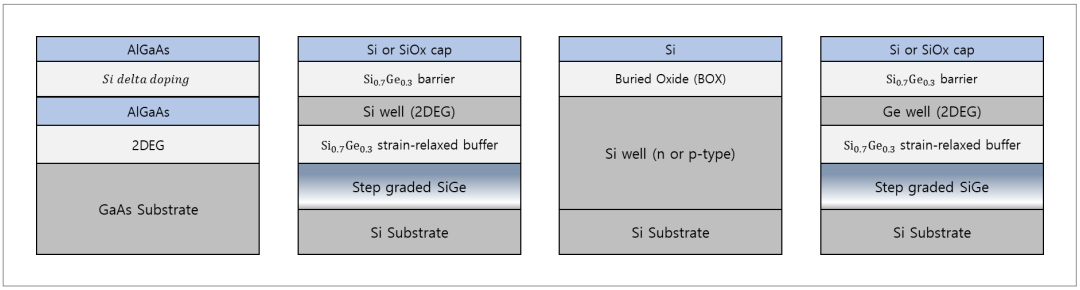
우수한 스핀 큐비트 성능을 위해 스핀 잡음(재료를 구성하는 원자핵의 스핀이 주는 양자잡음)이 최소화된 특수 양자소재가 필요하며, 주로 사용되는 재료는 III-V 족 GaAs/AlGaAs, InAs, InAb 등 고전자 이동도 Modulation Doping HEMT(High-Electron-Mobility Transistor, HEMT) 구조와 IV 족 Si 및 Ge 등이 있다. 최근에는 이를 2차원 물질, 예를 들어 그래핀과 같은 IV 족 탄소 원소로 이뤄진, 스핀 결맞음 시간이 높은 소재로 확장하기 위해 노력하고 있다.

특히 Si의 경우 자연적으로 핵스핀이 0인 ^{28}Si와 ^{30}Si가 약 95% 이상을 차지하고 큐비트에서 잡음 역할을 하는 ^{29}Si는 수 %에 불과해, 양자기술을 구현하는 잠재력이 높은 재료이다. 더군다나 동위원소 정제를 통해 ^{28}Si의 순도를 99.9% 이상으로 높인 기판을 제작할 수 있어, 스핀 큐비트 제작 시 스핀 잡음이 최소화된 재료로 사용된다. 그러나 Si의 경우 현재까지 전하 잡음이 GaAs와 같은 초고이동도 HEMT 구조에 미치지 못하며, 높은 전자 유효질량으로 양자점 형성을 위한 공정 요구 조건이 높다. 또한 Indirect Bandgap을 가져 광여기법에 의한 스핀 큐비트 조작이 불가능하며, 스핀 자유도뿐 아니라 Valley 자유도의 영향을 추가로 제어해야 하는 단점이 있다.

Ge는 실리콘처럼 핵스핀이 0인 동위원소를 정제할 수 있는 장점이 있으며, 추가로 P-type인 홀-스핀을 이용하려는 시도가 이뤄지고 있다. 밸런스 밴드에 존재하는 홀-스핀은 전자와 다른 파동함수의 공간분포로 인해 같은 핵스핀 밀도에도 스핀 잡음이 작은 장점이 있으며, Si보다 작은 유효질량을 가져 비교적 큰 선폭의 공정으로도 양자점 소자를 제작할 수 있다. 또한 전자보다 큰 스핀-궤도 상호작용(Spin-Orbit Coupling)을 가지고 있어 전기적으로 스핀 상태를 조작할 수 있다. 이는 양자상태 조작을 위해 고주파 자기장 또는 마이크로 마그넷과 같은 추가적인 구조물이 필요한 전자스핀과 대비된다. 그러나 스핀-궤도 상호작용은 동시에 큐비트의 전하 잡음에 대한 영향을 증대시키기 때문에 결맞음 시간 자체는 실리콘 전자스핀에 비해 작은 단점이 존재한다.

상기한 재료들은 동위원소 정제를 제외하면 국내에서도 기존 반도체 산업 공정을 이용해 성장할 수 있다. 실리콘의 경우 반도체 파운드리와 호환되는 Si-MOS 웨이퍼, Strained-Si/SiGe 이종 구조 HEMT 웨이퍼, Silicon-on-Insulator 웨이퍼 형태 모두 스핀 큐비트를 제작할 수 있다. 그러나 아직 국내에서 성장한 웨이퍼를 사용한 스핀 큐비트 동작의 실험적인 검증은 이뤄지지 않은 상태이다.

그림 II-3-48 스핀 큐비트용 주요 반도체 소재의 단면도



* 왼쪽에서부터 AlGaAs/GaAs, Si/SiGe, SOI, Ge/SiGe ※ 집필진 작성

^{28}Si 동위원소 정제 또는 스핀 큐비트용 Ge/SiGe HEMT 웨이퍼 성장과 관련된 국내기술은 극히 제한적으로 파악된다. 자기 영상 이미징용으로 ^{29}Si로 이뤄진 나노입자 형태의 성장 기술이 한국재료연구원 중심으로 보고됐으나, 양자컴퓨팅 소자를 위한 동위원소 정제연구가 미미하다. 현재 ^{28}Si 원재료는 Air Liquid 같은 해외 기업을 통해 수입할 수 있지만, 이를 이용한 기상 증착법 전구체인 ^{28}Si 기반 Silane 제작은 국내에서 이뤄지지 않고 있다.

(2) 연구 동향

반도체 스핀 큐비트 연구는 상기한 IV 족 원소 이외에도 GaAs와 같은 III-V 족 계열의 고이동도 기판을 사용해서도 이뤄지고 있으며, 세계적으로도 초기 스핀 큐비트 연구는 III-V 족 반도체로 수행됐다. GaAs 재료의 가장 큰 단점은 높은 핵스핀 밀도이며, 재료를 구성하는 Ga, As 원자의 특성상 자연적으로 안정한 동위원소는 둘 다 0이 아닌 핵스핀을 지니고 있어, 동위원소 정제가 원천적으로 불가능하다. 따라서 결맞음 시간은 핵스핀-전자스핀의 초미세 상호작용에 의한 큐비트 에너지 준위 교란으로 수십 ns로 제한된다. 다만 핵스핀의 영향은 시간상으로 느린 섭동에 해당해 고속 양자상태 측정 및 피드백으로 결맞음 시간을 수 마이크로초로 증대시키는 기술이 존재하며, 국내에선 서울대학교가 관련 기술을 보유하고 있다. 또한 GaAs는 매우 높은 전자 이동도와 작은 전자 유효질량을 가져 양자점을 형성하는 데 이상적인 재료이며, 다이렉트 밴드갭을 가지고 있어 Indirect Bandgap을 가지는 실리콘에 비해 향후 스핀-광자 인터페이스를 제작할 수 있는 장점이 있으므로, 여전히 양자기술을 위한 좋은 양자재료 후보로 연구되고 있다.

국내 양자소재 연구 분야에선 한국과학기술연구원 광전소자 연구단이 양자소자 및 기반 기술 인프라와 노하우를 확보하고 있다. 9대의 분자선 에피택시(Molecular Beam Epitaxy, MBE) 시스템과 III-V족 공정 Fab 및 측정실을 보유하고 있으며, III-V족 기반 반도체 양자점을 양자광원으로 개발했고, 100만 cm^2/Vs 이상 전자이동도의 초고속 AlGaAs, InGaAs HEMT를 성장하고 있다. 현재 양자컴퓨팅 스핀 큐비트를 위한 Si 재료와 동위원소 정제형 Si 기판을 성장할 수 있는 MBE 시스템을 개발 중이다.

양자소재의 특성을 평가하고 표준화하는 기술 또한 소재 개발 못지않게 중요한 연구주제이다. 스핀 큐비트는 극저온에서 동작하며 중첩상태의 결맞음을 이용하는 소자이므로 이동도, 균일도, 응력, 등 재료와 소자의 특성을 극저온에서 평가하는 것이 필수이며, 결맞음 시간 평가를 위해 실제 큐비트 소자를 개발된 재료에 제작하고 논리 회로 충실도를 평가하는 기술 역시 필수이다. 주요 양자재료의 특성은 다음과 같은 측정법을 통해 분석한다.

극저온 이동도는 홀바소자 제작과 홀효과 측정으로 검증한다. Valley-Splitting을 극저온 Shubnikov-de-Haas Osillation으로 측정하거나, 양자점소자를 재료에 제작 후 Excited Level Tunneling Spectroscopy로 측정한다. 결맞음 시간의 경우 Inhomogeneous 결맞음 시간인 T_2^*는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 Ramsey 진동 측정으로 분석하고, Homogeneous 결맞음 시간 T_2는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 스핀-에코 실험으로 측정한다. 또한 에너지 완화 시간 T_1은 큐비트 소자를 제작해 마이크로파를 이용한 NOT 게이트 인가 후 확률의 시간에 대한 완화 곡선을 측정해 분석하며, 제어 및 측정 충실도는 큐비트 소자 제작 후 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography, Quantum State Tomography 등으로 분석한다. 이와 같은 분석법은 양자컴퓨팅 플랫폼 전반(초전도, 이온 트랩, 반도체, 고체 결함 등)에 걸쳐 공통된 사항이며, 국내에서는 서울대, KIST, KAIST, 포항공대, KRISS 등이 양자소재 특성 평가기술을 보유하고 있다.

(3) 적용 분야

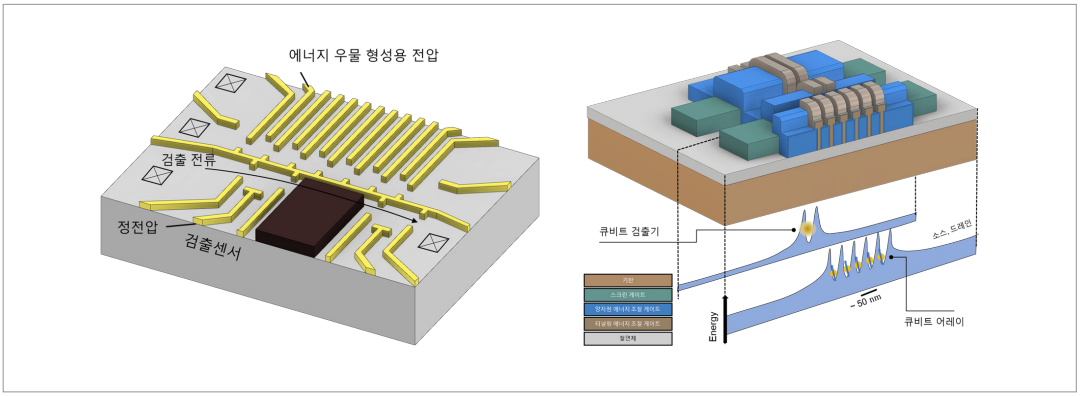
양자컴퓨팅용 양자소재 기술은 기존산업에서 요구되는 웨이퍼의 성능에 초고이동도, 동위원소 제어 등 추가 기술의 개발이 필요하다. 이러한 기술을 확보한다면 양자컴퓨팅 원천소재를 선점하는 것은 물론이고, 기존에 쓰이던 고전 전자회로의 특성을 높여줄 원재료로 이용할 수도 있다. 또한 대규모 반도체 스핀 큐비트 기반의 양자컴퓨팅 원천기술을 개발하는 것이 가능해지며, 양자컴퓨팅용 소재의 특성 평가 분야 표준화를 선점할 수 있고, 초전도 공진기 및 광집적회로 등 타 양자컴퓨팅 하드웨어 플랫폼에도 활용할 수 있다. 현재 양자컴퓨팅을 위한 국내 소재산업은 소수의 학연연구소를 중심으로 연구가 이뤄지고 있다.

나. 멀티 큐비트 제어 기술

(1) 기술 동향

스핀 큐비트는 반도체 기판을 이용하는 분야인 만큼 CMOS 공정으로 만들어진 나노 트랜지스터와 흡사하다. [그림 II-3-49]은 대표적으로 사용하는 두 가지 구동형태의 반도체 양자점 스핀 큐비트 칩의 모식도를 나타낸다.

그림 II-3-49 반도체 스핀 큐비트 소자의 모식도



* (왼쪽) Depletion-mode 구동 방식의 양자점 소자
(오른쪽) Accumulation-mode 구동 방식의 양자점 소자

※ 재료연구소, 국가나노기술정책센터 (2020)

Depletion-mode 구동 방식이란 기판에 반도체 도핑으로 미리 형성된 자유전자 층을 준비하고, 에너지 우물 형성용 게이트에는 음의 전압을 이용해 게이트 하단의 자유전자를 없애는 방향으로 입자를 구속하는 방식이다. Depletion-mode 구동을 위해서는 HEMT 기술에서 쓰이는 모듈레이션 도핑형 재료 성장 기술이 필수이며, 도핑 이후에도 우수한 이동도 성질을 보여주는 GaAs 또는 InGaAs 재료 군에서 주로 사용된다. Accumulation-mode 구동 방식이란 도핑이 없는 반도체를 사용해 양의 게이트 정전압으로 에너지 우물을 형성하는 방식을 말하며, 불순물 도핑을 통해서는 비교적 높은 이동도를 확보하기 어려운 실리콘, Ge 등 4족 반도체에서 주로 사용하는 방식이다.

Depletion-mode의 장점은 음의 전압만을 가하는 게이트 한 층만으로도 양자점을 형성할 수 있으며, 게이트 전압이 걸리지 않은 곳의 자유전자를 이용해 전류를 흘려 큐비트 센서 구조를 쉽게 형성할 수 있다. 이 자유전자 층은 기생 정전용량이 매우 작은 장점이 있어 큐비트 상태의 고속 전하 측정이 쉽다. 그러나 이 방식은 게이트 전압 간의 누화(Cross-Talk)가 크고, 100nm 이상의 지름을 가진 양자점만을 형성할 수 있다는 단점이 있다. 이와는 달리 Accumulation-mode 구조는 에너지 우물과 전하 센서의 전류를 통과시킬 수 있는 소스-드레인 모두를 게이트 전압으로 형성해야 하므로, 3층 이상의 게이트-산화막-게이트 다층구조를 제작해야 하는 높은 공정조건이 단점이다. 또한 산화막-금속 다층구조는 필연적으로 높은 기생 정전용량을 가져 고속 측정에 불리하다. 그러나 이 방식은 성공적으로 제작됐을 경우 게이트 전압 간의 누화가 작고, 50nm 미만의 지름을 가진 밀도 높은 양자점을 형성할 수 있다는 장점이 있다.

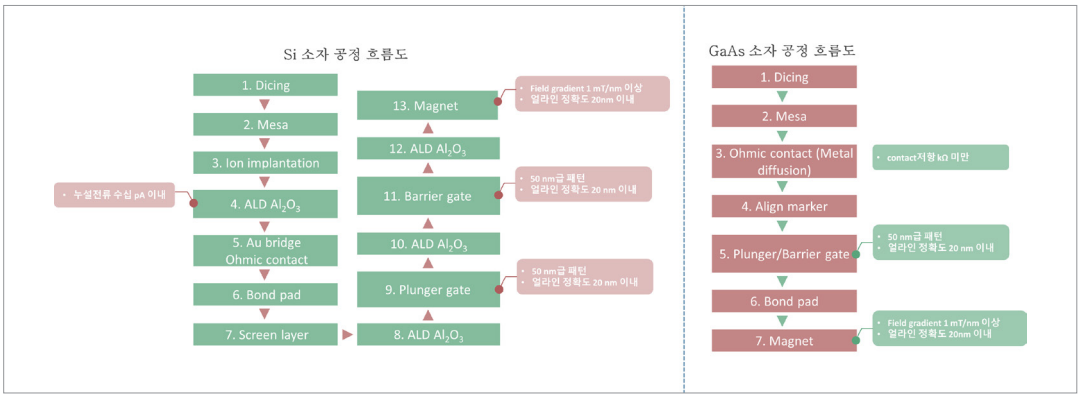
종합적으로 스핀 큐비트 소자는 정전압으로 형성된 에너지 우물과 그 안에 속박된 전자로 이뤄진 큐비트 배열, 큐비트 배열과 근거리(200nm 이내)에 위치해 큐비트 상태를 검출할 수 있는 전하 센서, 큐비트 또는 전하 센서의 소스-드레인 역할을 하는 옴 접합(Ohmic Contact) 구조로 이뤄진다. 또한

다중 큐비트 배열의 개별 큐비트 어드레싱을 위해, 자기장 구배 형성을 위한 소형 마이크로 마그넷 구조를 포함할 수 있다.

GaAs 소자는 Depletion-mode로 동작하므로 양자점 형성을 위해 30nm 선폭의 단일 게이트 레이어 제작으로 완성한다. Si 양자점 소자는 Accumulation-mode로 동작하고 Si의 비교적 큰 전자 유효질량을 고려해 평균 양자점 지름이 70nm 미만이어야 한다. 따라서 Si 게이트 디자인은 [그림 II-3-50] 같이 Screen/Plunger/Barrier 3중 오버레이 구조를 가지며 양자점 간 거리를 50nm 수준으로 유지해 수 GHz 이상의 큐비트 간 상호작용 크기(터널링 에너지)를 유도한다.

멀티큐비트 소자 공정과 관련하여, GaAs, Si 소자의 공정 주안점은 설계의 상이함과 근간 재료의 상이함을 고려하는 것이며, 다음과 같은 과정을 통해 제작한다.

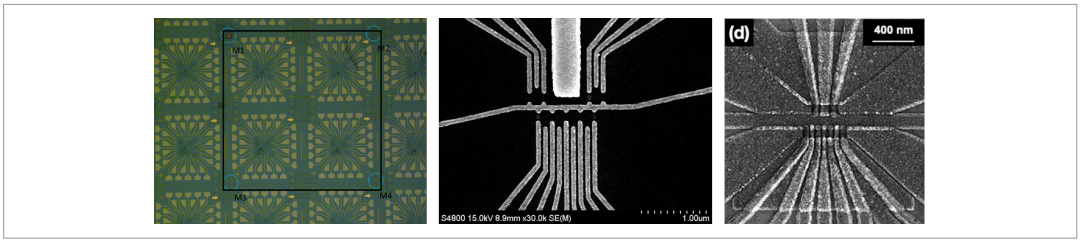
그림 II-3-50 반도체 스핀 큐비트 소장 공정 흐름도



※ 집필진 작성

완성된 GaAs 및 Si 소자의 외부 전극과 내부 게이트 구조의 예시는 다음과 같다.

그림 II-3-51 (왼쪽) 양자점 소자 배열의 광학현미경 사진
(가운데) GaAs Depletion-mode형 양자점 소자 + 마이크로 마그넷 구조 전자현미경 사진
(오른쪽) 완성된 Si Accumulation-mode형 다층 게이트 소자의 전자 현미경 사진



※ 집필진 작성

스핀 큐비트 소자 공정의 주안점은 다음과 같다. 옴 접합 형성의 경우, 상기한 공정에서 GaAs, Ge, Si는 각각 도핑 층(GaAs:Ge, Ge:Al) 증착과 이온 주입을 통해 도핑 원자를 도입하고, 급속 열처리 장비를 이용해 도핑 원자를 확산해 제작한다. 이때 도핑 원자의 활성화를 위해 매우 높은 온도가 요구되는 한편, HEMT 형식의 계면 구조가 열에 의해 변형되지 않아야 하므로, 열처리 온도를 최적화하는 것이 관건이다.

그림 II-3-52 대표적인 양자소자용 재료의 thermal budget

Temperature	SiMOS	Si/SiGe	Ge/SiGe
Thermal Budget	1000 °C	750 °C	500 °C

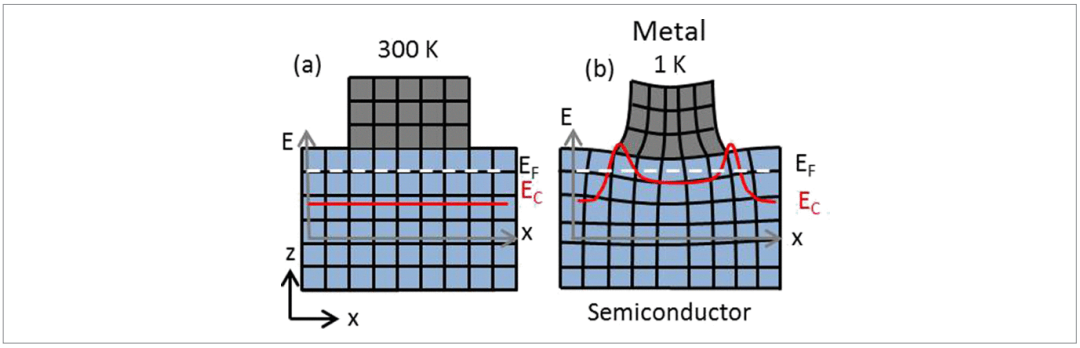
Ohmics	SiMOS	Si/SiGe	Ge/SiGe
Dopant	P^+	P^+	-
Metal	Ti:Pt	Ti:Pt	Al
Annealing	1000 °C, 30 s	700 °C, 30 s	300 °C, 1h

※ Appl et al. (2020)

특히 Accumulation-mode인 실리콘 양자소자의 경우 기생 정전용량을 최소화하기 위해 옴 접합을 양자점 어레이에 최대한 밀접하게 설계해야 하는데, 높은 공정온도로 도핑 원자가 장거리로 확산하는 것을 방지하기 위해 급속 열처리 장비 사용이 필수이다.

게이트/반도체 간 계면 스트레인 및 전하 잡음 요소 최소화와 관련하여 반도체 양자소자는 극저온에서 동작하기 때문에 반도체 표면에 쌓은 서로 다른 재료의 열팽창 계수를 고려해야 한다. 극저온에서 흔히 발생하는 열팽창 계수 차이에 따른 스트레인이 만든 에너지 우물에서, 의도하지 않은 양자점을 형성할 수 있다. 이런 우연한 양자점 형성을 피하고자 금속층은 통상적으로 두께 30nm 미만으로 증착한다. 마이크로 마그넷 등 양자점 소자의 추가적인 구조물은 그 기능상 200nm 이상으로 증착하는 것이 불가피한데, 이로 인한 소자 층의 에너지 구조 영향을 최소화하기 위해 절연막 등 완충 층을 삽입하기도 한다.

그림 II-3-53 금속/반도체 계면의 팽창계수 차이에 따른 스트레인의 모식도



※ AIP advances (2015)

또한 금속 증착 시 계면에 흔히 유도될 수 있는 전하 트랩은 극저온에서 양자점 스핀 큐비트의 에너지 완화시간을 제약할 수 있는 요소가 되며, 이중 양자점 스핀 큐비트 등 전하-스핀의 자유도가 혼합된 스핀 큐비트에서 T_2 시간에 직접 영향을 줄 수 있다. 따라서 금속 증착 직전 계면의 클리닝을 위해 클리닝-증착을 In-Situ로 수행할 수 있는 장비 사용이 필수이며, 이는 금속의 부착성을 최대화하는 데도 도움을 주므로 양자점 소자 공정의 높은 수율을 위해 요구되고 있다.

고품질 절연막 형성과 관련하여, 절연막 공정이 따로 필요하지 않은 GaAs에 비해, Accumulation-mode를 주로 사용하는 4족 반도체 양자점 소자(Si, Ge 등)는 고품질 절연막 형성이 필수이다. 흔히 사용하는 원자층 증착시스템(Atomic-Layer Deposition)으로 Al_2O_3, HfO_2 등 절연막을 증착하며, Pinning Site 등 누설전류가 발생할 수 있는 불순물을 최소화하는 과정이 필요하다. 현재 연구소급 공정 설비로 제작하는 실리콘 양자점 소자의 공정 과정 중 제어가 가장 어려운 과정이다.

고난도 단일/다층 게이트 패턴과 관련하여, 양자점 소자는 50nm 미만의 선폭과 수십 nm의 간격을 패턴하는 것이 필수적이며, 이를 위해 연구소급 공정시설에서는 E-beam Lithography 장비를 사용한다. 특히 다층의 정렬된 게이트 스택을 만들어야 하는데, 이를 위해 수십 nm 미만의 오차로 정확한 얼라인 과정이 필요하다.

반도체 스핀 큐비트의 단일 게이트 동작은 전하 잡음에 영향을 받지 않지만, 교환상호작용을 이용하는 2큐비트 게이트는 원천적으로 전하 잡음에 대해 취약하다. 전하 잡음의 영향이 최소화될 수 있는 고주파 펄스 방법, Sweet Spot 연산 등의 기술 개발이 필요하다.

게이트 구조의 계면에 형성된 스핀 불순물 및 전하 트랩 등은 에너지 완화시간에 크게 영향을 주며, 게이트/기판의 열팽창 계수 차이에 의한 응력은 양자점 퍼텐셜 구조에 영향을 주어, 원하지 않는 양자점 형성을 유도한다. 또한 IV 족 반도체를 밸리 자유도 측면에서 보자면, 대표적으로 실리콘은 밸리 Degeneracy를 가지며 Indirect 밴드갭을 가지는 반도체이다. 스핀과 밸리 자유도의 혼합에 따른 양자정보의 간섭과 결맞음 시간 감소를 억제하기 위한 노력 필요하다. 특히 계면의 불균일성에 따른 밸리 에너지 크기 제어에 대한 기술 개발이 필요하다.

멀티큐비트 제어의 경우 단일 큐비트 게이트는 마이크로파를 이용한 Rabi Oscillation으로 구현하며, 이중 큐비트 게이트는 교환상호작용을 이용한 CPHASE 게이트로 구현한다. 결맞음 시간의 경우 Inhomogeneous 결맞음 시간인 T_2^* 는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 Ramsey 진동 측정으로 분석하고, Homogeneous 결맞음 시간 T_2 는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 스핀-에코 실험으로 측정한다. 또한 에너지 완화시간 T_1은 큐비트 소자를 제작해 마이크로파를 이용한 NOT 게이트 인가 후 확률의 시간에 대한 완화곡선을 측정해 분석하며, 제어 및 측정 충실도는 큐비트

소자 제작 후 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography, Quantum State Tomography 등으로 분석한다. 이와 같은 분석법은 양자컴퓨팅 플랫폼 전반(초전도, 이온 트랩, 반도체, 고체 결함 등)에 걸쳐 공통된 사항이며 국내에서는 서울대, KIST, KAIST, 포항공대, 한국표준개발원 등에서 큐비트 측정기술을 보유하고 있다.

(2) 연구 동향

반도체 양자점 플랫폼은 전 세계적으로도 6큐비트 동작을 검증하는 단계에 있다. 따라서 스핀 큐비트의 잠재력에 비해 상대적으로 국내연구와의 격차가 작은 분야이며, 국내 멀티큐비트 소자 제작은 학계연구소를 중심으로 진행하고 있다. 2019년부터 한국연구재단에서 '반도체 양자점 프로그래머블 양자컴퓨팅 시스템' 과제를 진행 중이며, GaAs와 Si 소재를 기반으로 2024년까지 5큐비트급 단일 및 이중 큐비트 게이트 충실도를 99% 이상으로 확보하기 위해 노력하고 있다. 또한 이 과제에서는 극저온 스핀 큐비트 제어에 필요한 극저온 냉동기, 극저온 고주파 증폭기 등의 개발을 병행하고 있다.

2022년 현재 GaAs 스핀 큐비트의 경우 4큐비트의 개별 동작과 큐비트 간 CPHASE형 이중 큐비트 게이트 시연에 성공했으며, 네덜란드 QuTech로부터 ^{28}Si 재료를 공급받아 5큐비트 소자를 확보했다. 국내 연구진은 단일 큐비트 게이트 Randomized Benchmarking, 이중 큐비트 게이트 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography 등 멀티큐비트 제어의 충실도 평가기술을 보유하고 있으며, 향후 2차원 배열의 스핀 큐비트 소자와 양자점 소자 자동튜닝기술을 확보하기 위해 노력하고 있다. 2023년에는 서울대를 중심으로 확보한 실리콘 5큐비트 소자의 5큐비트 어드레싱을 국내기술로 성공하였으며 인접 스핀간 이중큐비트 게이트를 초기시연하였다. 또한 대한민국 연구팀-스위스 EPFL 연구팀의 반도체-초전도 하이브리드 회로를 이용한 스핀 큐비트의 장거리 얽힘 연구도 진행중이다.

(3) 적용 분야

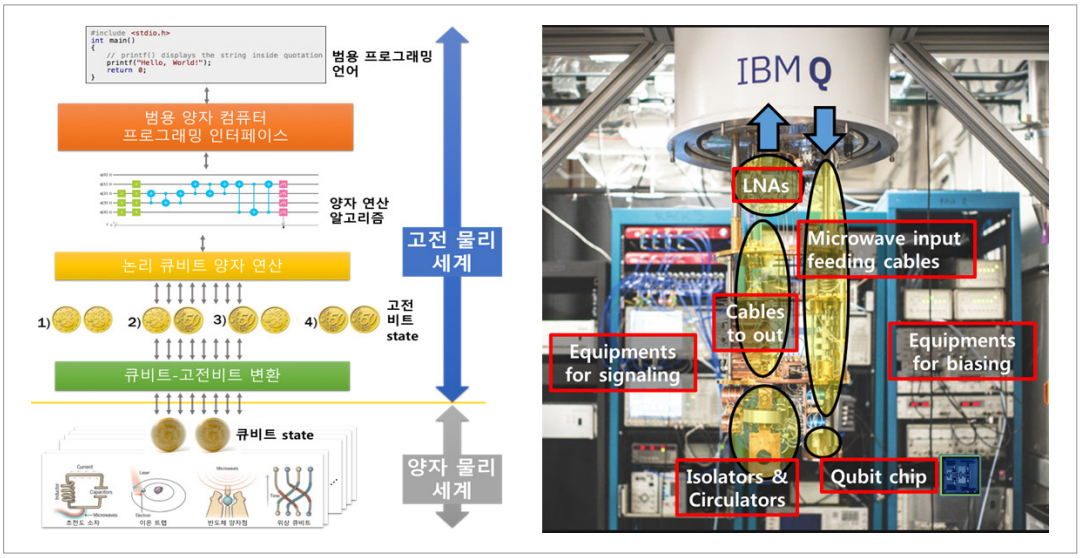
멀티큐비트 소자 공정 및 제어 기술은 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파 저주파 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술 인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면 국제적인 경쟁력을 확보하는 것이 상대적으로 쉽다. 또한 반도체 큐비트 집적화 기술이 성공적으로 실현될 경우, 양자컴퓨팅 알고리듬과 관련 소프트웨어 개발산업이 다양한 산업에 광범위하게 활용될 수 있어, 4차 산업 혁명을 주도하며 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 것으로 기대된다.

다. 확장 가능한 통합 양자프로세서 기술

(1) 기술 동향

양자알고리듬과 큐비트만으로는 범용 양자컴퓨터를 구현할 수 없다. 소인수분해와 같은 거시세계의 문제를 양자세계의 법칙으로 풀기 위해서는, 두 세계 사이를 넘나들며 정보를 교환해줄 시스템 설계 기술이 꼭 필요하다. 양자컴퓨터에서 큐비트는 중첩(Superposition), 얽힘(Entanglement), 결맞음(Coherence) 등의 양자특성을 갖는 상태로 존재하는 반면, 사용자는 고전적인 비트 상태로 문제를 정의하고 해답을 기대하기 때문이다. [그림 II-3-54]는 확장형 양자컴퓨터를 위한 인터페이스 신호 체계도를 나타낸다.

그림 II-3-54 양자컴퓨터 계층별 인터페이스와 IBM의 양자컴퓨터

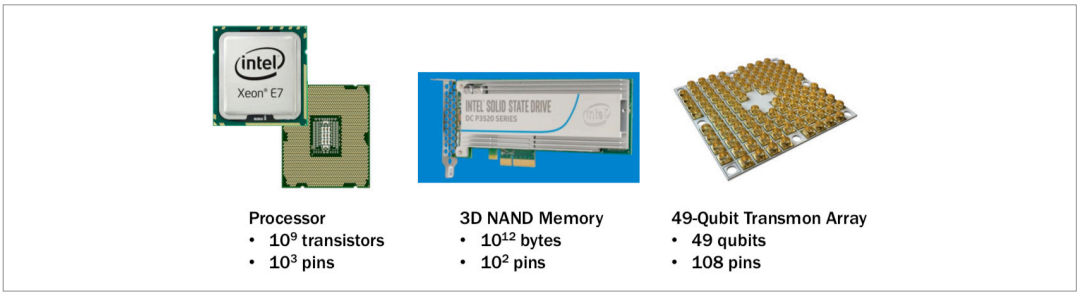


※ IBM. 집필진 작성

하드웨어적으로는 확장형 큐비트와 고전 비트 사이의 변환 기술이 중요하다. 양자컴퓨터에서는 양자에너지 상태를 큐비트로 치환해 표현하는데, 즉 큐비트의 읽기·쓰기는 양자에너지 상태를 측정/제어하는 것과 같고, 이 양자에너지 측정/제어는 물리 법칙에 따라 등가의 에너지를 가지는 전자기파로 가능하다. 따라서 큐비트 상태를 고전 비트 정보로 변환하는 과정에는 전자파 회로 혹은 RF 회로 기술이 기본으로 쓰인다. 하지만 외부 자극에 극도로 민감한 양자에너지 상태를 왜곡하지 않기 위해서는 RF 회로의 주파수, 진폭, 위상, 시간을 모두 수 ppm 이하 수준의 정확도로 제어해야 한다. 4~8GHz에 해당하는 양자에너지 상태를 가지는 트랜스몬 큐비트의 경우, 양자상태를 읽어내기 위한 LNA가 1~3K 이하의 잡음온도(Noise Temperature)를 유지해야 하고, 스핀 큐비트의 상태를 읽어내는 경우는 100pA 미만의 미세한 전류 차이를 최대한 빨리 구분해야 한다.

한편 물리 큐비트는 그 이론 방식에 따라 큐비트당 1~4개 이상의 물리적인 I/O 채널이 필요하다. 차세대 슈퍼컴퓨터로서 수천~수만의 큐비트급 양자컴퓨터를 가정하면, 수십만 개의 핀을 통한 물리적 I/O 채널이 필요한 것이므로 사실상 구현이 불가능하다. 특히 각각의 고전 비트 I/O는 초고성능·초저잡음 RF 회로를 통해 읽기/쓰기를 수행해야 함을 고려하면, 시스템의 규모와 함께 신뢰성도 담보하기가 어렵다. 따라서 큐비트 수의 증가에 유연하게 대응할 수 있는 확장형 큐비트-고전 비트 변환 아날로그/RF 회로 아키텍처가 필요하다.

그림 II-3-55 기존 마이크로 프로세서와 양자프로세서의 소자 수와 외부 I/O핀 수 비교



※ Intel

또한 양자컴퓨터는 다양한 알고리듬을 다룰 수 있게끔 범용성을 고려해, 최대한 다양한 문제를 쉬운 프로그램 변경으로 풀 수 있는 형태로 설계돼야 한다. 이렇듯 양자컴퓨터가 범용 컴퓨터로서 동작하기 위해 요구되는 기능의 단계는 다음과 같다. 우선 사용자가 High-Level 언어로 프로그램을 작성하면, 컴파일러를 통해 하드웨어가 인식할 수 있는 어셈블리 언어로 변환한다. 이렇게 변환된 어셈블리어의 Instruction은 논리 큐비트를 구동해 양자연산을 수행할 수 있게 된다. 연산 과정에서 논리 큐비트는 주어진 매핑을 통해 물리 큐비트를 구동하는데, 이때 아날로그 회로를 통해 큐비트 칩을 구동한다. 결국 사용자가 양자컴퓨터를 운용하기 위해서는 양자컴퓨터에 특화된 컴파일러와 논리 큐비트 Instruction 세트, 그리고 양자연산기를 구동하는 프로세서 아키텍처의 설계가 필요하다. 효율적 연산을 위한 코어 스케줄 관리, 메모리 시스템 관리, 큐비트 오류정정 등에서 기존 컴퓨터의 아키텍처와는 다른 형태로 고려돼야 하며, 하위 레벨의 큐비트와 아날로그 회로설계 층 연구도 병행해야 한다.

(2) 연구 동향

국내에서 확장형 양자프로세서 및 계층 간 신호 인터페이스의 하드웨어, 소프트웨어 연구는 극 초기 단계에 있다. 2019년 개시된 한국연구재단의 선도연구센터 지원사업 중 '확장형 양자컴퓨터 기술융합플랫폼 센터' 과제가 진행 중이다. 국내 멀티큐비트 소자 제작은 학계연구소를 중심으로 진행 중이며, 2019년 개시된 한국연구재단의 양자컴퓨팅 원천기술개발 사업 중 '반도체 양자점 프로그래머블 양자컴퓨팅 시스템' 과제가 진행 중이다.

2022년 현재 IBM의 Horse Ridge II 극저온 CMOS 양자제어 및 신호 분석기와 성능을 견줄 수 있는 극저온 CMOS 회로를 개발했으며, 국내 초전도 큐비트 연구그룹과 연계해 단일 큐비트 동작을 시연했다. 또한 제어회로의 동작 주파수를 18GHz급으로 향상해 초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트를 한꺼번에 제어할 수 있는 회로를 개발하고 있다.

(3) 적용 분야

확장 가능한 통합 양자프로세서 기술은 원천소재 기술, 멀티큐비트 제어 기술과 함께 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파 저주파 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술 인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면, 국제적인 경쟁력을 확보하는 것이 상대적으로 쉽다. 또한 반도체 큐비트 집적화 기술이 성공적으로 실현될 경우, 양자컴퓨팅 알고리듬과 관련 소프트웨어 개발산업이 다양한 산업에 광범위하게 활용될 수 있어, 4차 산업 혁명을 주도하며 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 것으로 기대된다.

3. 이온 트랩

이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 초고진공 챔버 내에 설치한 이온트랩 장치로 이온들을 포획해 이온의 양자상태를 큐비트로 정의하고, 레이저나 라디오파로 큐비트의 양자상태를 조작해 양자계산을 구현한다. 이론적으로 단일 양자게이트와 양자얽힘 게이트를 구현하게 되면 임의의 모든 양자알고리듬을 구현할 수 있으므로, 해당 양자게이트를 구현하는 것이 주요 기술 개발의 목표이다. 이온 큐비트는 외부 환경과 독립적으로 단절돼 있어 높은 양자게이트 신뢰도, 긴 결맞음 시간, 낮은 초기화 및 측정 오차 등의 장점이 있다. 또한 임의의 두 큐비트 사이의 양자얽힘이 가능한 큐비트들 간의 완전 연결성은 이온 포획 기반 양자컴퓨터만이 가지는 중요한 장점이다. 실용적인 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 다량의 이온 큐비트를 포획하는 기술, 개별 이온의 양자상태 측정, 높은 신뢰도의 양자게이트 구현 및 양자큐비트의 확장이 필수적이다. 국내에서는 서울대, 이화여대, 성균관대, 포항공대가 이온 포획 기반 양자컴퓨터 구현을 목표로 연구 중이다.

가. 이온 선택 및 이온 포획 기술

이온 큐비트 기반의 양자컴퓨터는 초고진공에서 안정적으로 이온을 포획하는 것으로부터 시작된다. 다량의 이온을 안정적으로 포획하는 기술은 양자컴퓨팅을 위한 충분한 수의 큐비트들을 확보하는 기술과 동일하다.

(1) 기술 동향

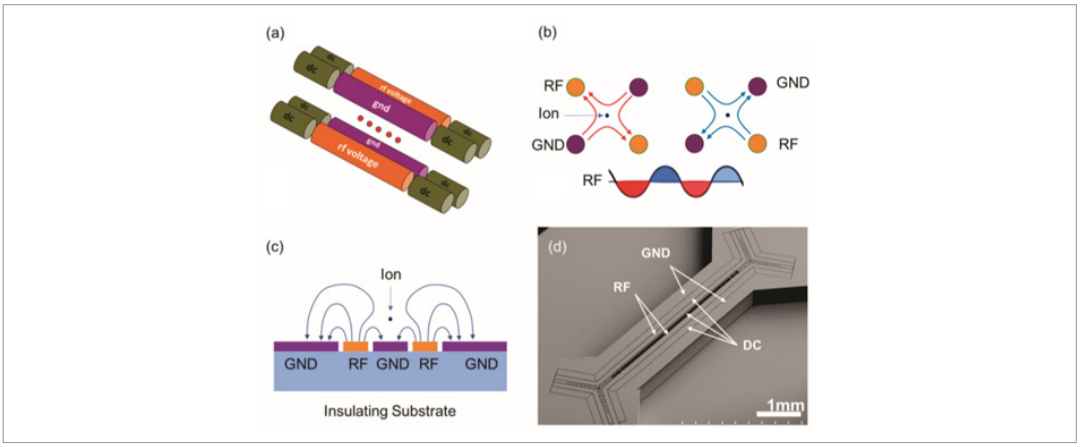
1950년대 Wolfgang Paul에 의해 라디오파를 이용한 이온 포획 방법이 고안됐다. 이 공로로 Wolfgang Paul은 1989년 노벨 물리학상을 받았다. 일반적으로 포획 우물을 발생시키는 장치의 크기에 따라 매크로(Macro-) 포획 장치와 마이크로(Micro-) 포획 장치로 구분한다. 국내에서 이온 포획을 이용한 연구는 서울대, 이화여대, 포항공대, 성균관대가 진행하고 있으며, 포획 장치를 독립적으로 제작해 실험에 활용하고 있다.

(2) 연구 동향

① 매크로 포획 장치

라디오파와 직류 전기장을 조합해 이온을 포획하며, 초창기에는 Penning 포획 장치, 링 포획 장치가 사용됐으나 양자컴퓨터 연구에는 다수의 이온을 포획하여 제어하기 쉬운 4-rods 포획 장치, 블레이드(Blade) 포획 장치가 2000년대 초반에 개발돼 주로 사용되고 있다. [그림 II-3-56]의 (a), (b)와 같이 2개의 고주파 전극, 2개의 고주파 접지 및 직류 전압을 가하는 전극으로 구성돼 있다. 이 장치에 포획된 이온은 쿨롱 반발력에 의해 선형으로 배열된다.

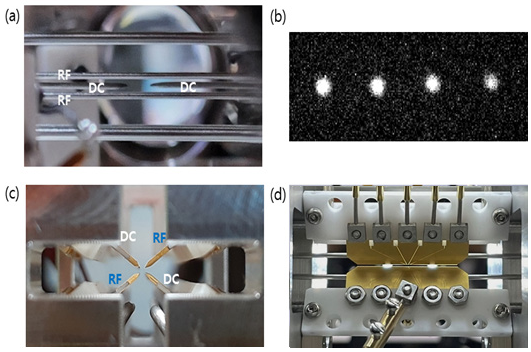
그림 II-3-56 (a), (b) Paul 포획 장치의 예시 (c), (d) 다중 전극들을 가지며 표면 위에서 포획하는 장치



※ Quantum Computing (2019)

해당 장치는 포획 구조물과 레이저빔의 광산란이 적기 때문에 높은 신뢰도의 양자게이트 구현 및 측정이 가능하다. 그러나 조화 우물에 포획된 이온의 개수가 증가하면 서로 간의 간격 및 포획 세기가 변하게 되므로, 개별 조작 및 양자게이트 구현에 어려움이 생긴다. 이러한 매크로 포획 장치의 어려움을 극복하기 위해 구획이 구분된(Segmented) 블레이드 포획 장치 등이 개발돼 사용되고 있다. 국내에서는 4-rods 포획 장치(이화여대, 성균관대), 블레이드 포획 장치(서울대), 구획이 구분된 블레이드 포획 장치(이화여대, 성균관대, 포항공대)가 개발 및 사용되고 있다.

그림 II-3-57 국내에서 사용 중인 매크로 포획 장치들

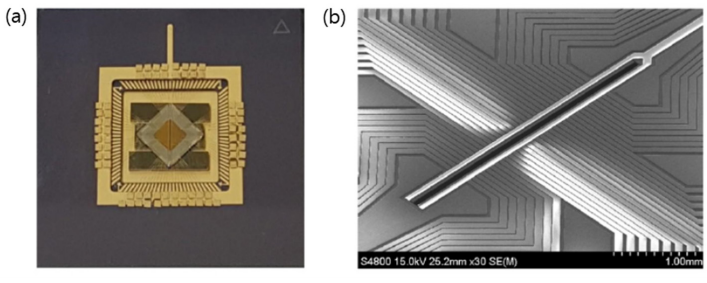


* (a) 조립된 4-rod 포획 장치의 측면 사진(이화여대)
(b) 4-rod 포획 장치로 포획된 Yb174 이온들
(c, d) 조립된 블레이드 포획 장치 사진 (c:이화여대, d:포항공대)

② 마이크로 포획 장치

반도체 기술 및 공정을 활용해 작은 크기의 포획 장치를 제작할 수 있다. 포토리소그래피 같은 정밀 가공을 통해 공정 오차를 줄일 수 있으며 같은 성능의 이온트랩 칩을 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 또한 다중 전극의 설치가 가능하고 확장성 및 이온의 간격 조절, 이온 큐비트의 이동이 쉽다는 장점이 있다. 마이크로 포획 장치는 매크로 포획 장치와 비교하여 상대적으로 전극과 포획된 이온의 거리가 가깝기 때문에 포획된 이온의 가열률(heating rate)이 더 높은 단점이 있다. 또한 전극과 이온이 가까운 만큼 이온에 조사하는 레이저가 포획 장치 구조물에 산란되는 문제가 발생하기도 하는데, 레이저와 금속 코팅이 되지 않은 실리콘 혹은 다른 물질과의 산란이 발생하면, 전하를 만들어 포획 우물을 변형시킬 수 있으며, 위쪽으로 약한 포획 우물이 형성돼 상대적으로 낮은 포획 안정성을 가지고 있다. 국내에서는 서울대가 독자적으로 칩 기반의 포획 장치를 개발해 사용하고 있으며 포항공대도 다층구조의 마이크로 포획 장치를 개발하고 있다.

그림 II-3-58 (a) 서울대에서 개발한 반도체 칩 기반의 이온 포획 장치 사진
(b) 다중 전극을 가지는 칩 포획 장치의 확대 사진



(3) 적용 분야

현재 매크로 포획 장치는 포획된 이온의 기본적인 양자조작 및 고신뢰도 양자게이트 구현에 중점을 두고 있으며, 칩 기반 포획 장치는 다수의 이온 큐비트 포획 및 안정화 등 시스템의 확장성에 중점을 두고 연구가 진행되고 있다. 국내의 포획 장치는 상업화보다는 시스템 개발 및 최적화에 초점을 맞추고 있다. 마이크로 포획장치는 이온의 가열률을 비교해 보았을 때 해외와 경쟁력 있는 안정적인 포획 장치 제작기술을 보유하고 있으나,[470] 현재까지 개발된 칩은 전력을 공급하기 위한 와이어본딩의 와이어가 레이저 경로를 방해할 정도로 높이 솟아 있어 해당 문제를 해결하기 위한 와이어본딩 방법과 광산란을 최소화하면서 레이저 경로를 최대한 많이 확보할 수 있는 디자인에 대해 연구중이다.

나. 양자게이트 및 양자알고리듬 구현

양자컴퓨팅 알고리듬은 단일 양자게이트와 양자얽힘 게이트의 조합으로 구현할 수 있다. 단일 양자게이트는 하나의 이온 큐비트 내부 에너지 상태를 단일 레이저, 마이크로파, 펄스 레이저를 이용한 라만 전이 등을 사용해 조작 및 구현할 수 있다. 2개의 이온 큐비트를 이용하는 양자얽힘 게이트는 MS(Mølmer–Sørensen) 게이트, CZ(Cirac and Zoller) 게이트, Geometric Phase 게이트 등이 주로 사용되며, 이외에도 높은 신뢰도의 양자얽힘 게이트를 구현하기 위해 다양한 기술이 사용되고 있다.

(1) 기술 동향

국내 양자컴퓨터 연구는 원자량이 171인 이테르븀 동위원소의 초미세준위(Hyperfine)를 이용하고 있다. 공명주파수는 약 12.63GHz로 마이크로파와 펄스 레이저를 이용한 라만 전이를 이용해 이온 큐비트를 조작할 수 있다. 국내 연구진에 의해 발표된 펄스 레이저를 이용한 단일 양자게이트 신뢰도는 99.6 ± 0.2%를 기록한 바 있다. 서울대의 경우 마이크로파와 355nm의 펄스 레이저를 이용한 라만 전이로 단일 양자게이트 구현에 성공했으며, 펄스 레이저를 이용한 두 개의 이온 큐비트에 대한 MS 게이트로 양자얽힘을 구현하는 것도 성공했다.

(2) 연구 동향

단일 양자게이트의 신뢰도는 자기장, 진공도, 전자기적 가열과 같은 외부 잡음 제거, 조작 레이저의 안정적인 주파수 유지, 세기 고정 등과 밀접한 관련이 있다. 이를 위해 실험실 환경 유지, 레이저 안정화와 같은 기술적인 연구가 이뤄지고 있다. 양자얽힘의 경우, 두 개의 큐비트에 두 가지 주파수의 레이저를 동시에 조사하는 MS 게이트가 구현됐다. 높은 신뢰도의 MS 게이트를 구현하고, 향후 다수의 이온 중 임의의 두 개 큐비트의 양자얽힘 게이트 구현을 위해 레이저 펄스 모양 조작(Pulse Shaping)과 같

470) C. Jung et al. (2021)

은 기술적인 연구가 진행되고 있다. MS 게이트를 제외한 CZ 게이트와 Geometric Phase 게이트의 경우 개별 큐비트 조작이 필요하나, 국내에는 아직 개별 조작 기술이 없다. 따라서 게이트 조작 및 양자컴퓨터의 확장을 위해 개별 조작 연구, 이온 이동 등의 연구를 진행할 예정이다.

(3) 적용 분야

양자게이트 구현은 양자컴퓨팅을 위한 필수적인 부분으로, 높은 신뢰도의 양자게이트가 완성되면 양자알고리듬을 구현할 수 있다. 아직 국내 기술은 두 개 큐비트의 양자얽힘 구현에 막 성공한 수준이며, 의미 있는 양자알고리듬 구현보다는 이를 이용한 양자 시뮬레이션이나 간단한 물리 연구에 적용할 수 있다.

다. 큐비트 확장

양자컴퓨터의 성능을 나타내는 지표로 양자볼륨(Quantum Volume)을 사용하며, 구현 가능한 양자게이트 개수, 게이트 신뢰도 및 큐비트의 개수가 그 주요 지표이다. 양자컴퓨터의 성능을 높이는 방향 중 하나는 큐비트의 개수를 증가시키는 것이며, 단순히 포획된 이온의 개수만 증가시키는 것이 아닌 개별 이온의 조작, 측정 및 그 안에서 높은 신뢰도의 양자게이트를 구현하는 것이 필요하다.

(1) 기술 동향

국내에서는 큐비트 확장 기술을 개발할 단계에 이른 곳이 아직 없다. 과거 SK텔레콤이 떨어진 두 포획 장치의 이온에서 발생한 광자를 이용해 Hong-Ou-Mandel 간섭을 측정한 바 있다.

(2) 연구 동향

국내 각 연구그룹에서는 독자적인 아이디어를 가지고 양자컴퓨터의 확장을 연구하고 있다. 서울대와 성균관대의 경우, 하나의 포획 장치에서 다채널 음광학 변조기를 이용한 개별 조작 및 멀리 떨어진 다른 포획 장치 간의 양자얽힘을 목표로 연구가 진행 중이며, 이화여대는 이온 셔틀링을 통한 양자얽힘 및 확장을 연구하고 있다. 포항공대의 경우 광학적 공진기를 이용한 큐비트 조작 연구를 목표로 연구가 진행 중이다.

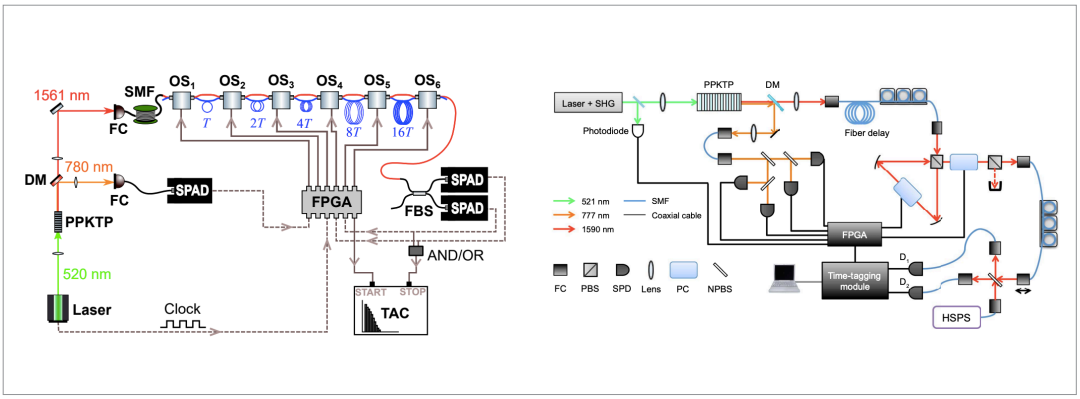
4. 양자광학 기반 양자컴퓨팅

가. 양자광 생성 기술

(1) 연구 동향

국내 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 기술은 국제적인 경쟁력을 갖춘 것으로 평가받고 있으며, 이를 다양한 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센서 원천기술 및 응용 기술 개발에 적용하고 있다. KIST, KRISS 등 출연연과 포항공대, 부산대 등 대학에서 수행하고 있는 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 및 양자정보 응용 연구는 20여 년의 역사를 가지고 있으며, 밝기나 순수도, 구별 불가능성 등 주요 성능 지표 역시 세계 최고 수준을 달성하고 있다. 가령 KIST는 최근 예고도(Heralding) 효율 61%의 단일광자 생성에 성공했는데, 이는 80% 수준인 단일광자 검출기의 측정효율을 고려하면 95% 이상의 예고 효율을 달성한 것이다.[471] 이는 세계적인 수준에 근접한 수치로, 단일광자 확장성 제고에 큰 역할을 해줄 것으로 기대된다. KRISS는 통신 파장 대역 단일광자에 광섬유 기반 시간 다중화(Time-Multiplexing) 기술을 접목해 확정적 단일광자를 생성하는 데 성공했다. 확정적 단일광자 생성 확률은 10%로 같은 방식의 세계 최고 수준인 67%에는 미치지 못하지만, 광섬유를 이용해 실험 장치가 간단하고 통신 파장 대역의 단일광자에 적용할 수 있다는 장점이 있다.[472] 집적광학계 기반 광자쌍 생성 연구 역시 KIST, ETRI, 포항공대 등에서 활발히 진행 중이다.

그림 II-3-59 (왼쪽) KRISS와 (오른쪽) 미국 일리노이 주립대학에서 개발한 시간 다중화 (Time-Multiplexing) 기반의 확정적 단일광자 생성 실험 장치



※ Lee (2019), Kaneda (2019)

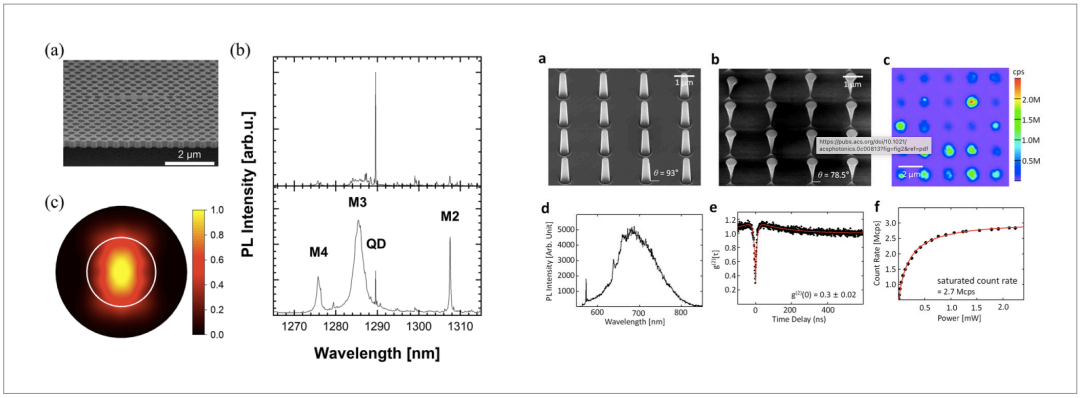
471) Lee (2021)

472) Lee (2019)

국내 단광자 방출체 기반 단일광자 광원 연구는 해외에 비해 다소 낮은 수준의 기술을 가지고 있으나, 최근 신진 연구그룹이 많이 등장하면서 의미 있는 연구 결과를 도출하고 있다. 양자점 기반 단일광자 광원은 UNIST와 고려대 등에서 원천기술을 개발하고 있으며, 온도 미세조정을 이용한 구별불가능 단일광자 생성, 초미세 공진기를 이용한 매우 밝은 단일광자 생성 등의 연구를 수행하고 있다.[473] KIST와 KRISS 등 출연연은 다이아몬드 색중심 점결함 기반 단일광자 광원 연구를 수행하고 있으며, 특히 나노포토닉스를 이용한 단일광자 포획효율 증가에 관한 연구 등에서 두각을 드러내고 있다.[474]

국내 압축광 생성 연구 역사는 매우 짧으며, 선진국과 비교해 걸음마 수준이라고 할 수 있다. 국내에서는 KAIST가 압축광을 양자정보에 응용하기 위한 연구를 2010년대 후반부터 수행하고 있으며, 최근 모드 어긋남에 강인한 압축광 생성 기법을 제안했다.[475] 또한 다양한 주파수간 EPR 양자얽힘을 가지는 다중모드 two-mode 압축광을 생성하여 3차원 양자얽힘 상태를 생성하는 데 성공하였다.[476]

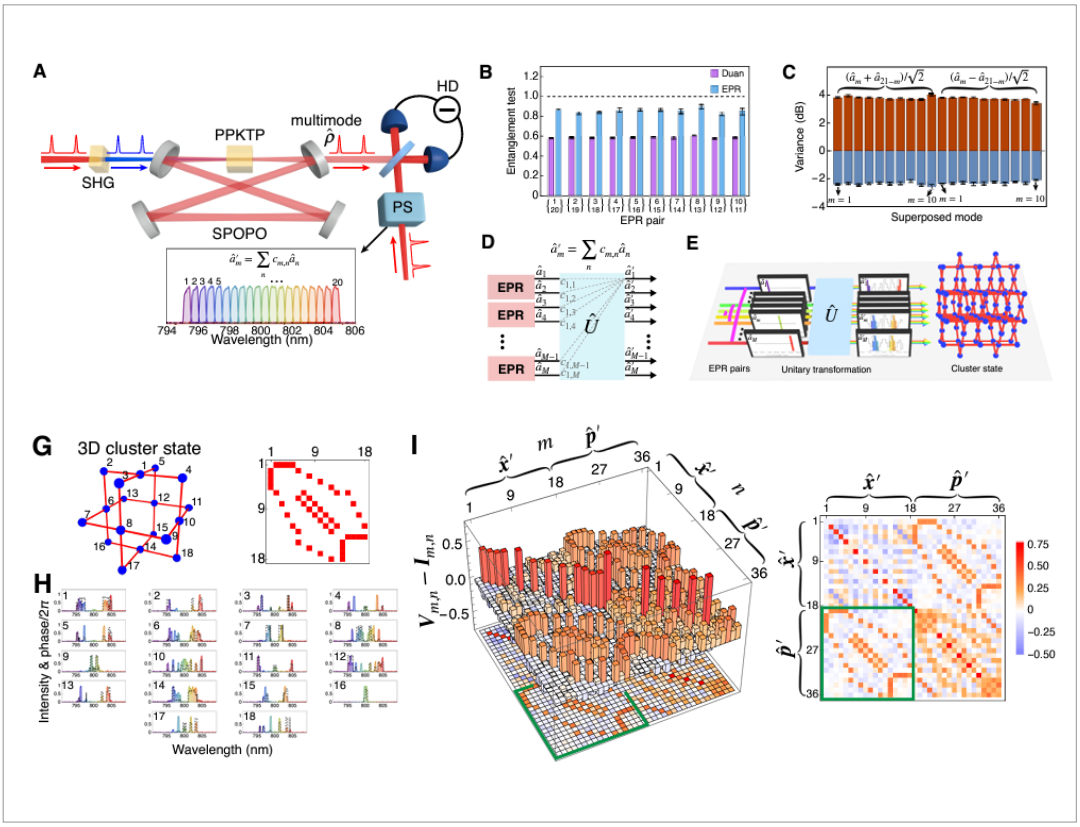
그림 II-3-60 (왼쪽) 고려대에서 개발한 양자점 기반 단광자 광원
(오른쪽) KIST에서 개발한 다이아몬드 점결함 기반 단광자 광원



※ Kim (2021), Jeon & Lee (2020)

473) Kim (2021)
474) Jeon & Lee (2020)
475) Roh et al. (2021)
476) Roh et al. (2023)

그림 II-3-61 (위) KAIST에서 개발한 압축광 기반 클러스터 상태 생성 장치
(아래) 3차원 클러스터 양자상태 생성 실험 결과



※ Roh et al. (2023)

나. 양자광 측정 기술

(1) 연구 동향

국내 양자광 측정 연구는 양자광원 생성과 함께 양자정보처리 연구의 일부로 함께 연구되고 있다. 하지만 초전도 나노와이어 단일광자 검출기나 TES 등 양자광학 기반 양자컴퓨터 연구에 활용할 수 있는 최첨단 양자광원 측정장치에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근 국내 광부품 회사인 '㈜우리로'는 InGaAs 광다이오드 기반 단일광자 검출 부품의 상용화에 성공했다. 다만 InGaAs 광다이오드의 경우 검출 효율이 10~20% 수준으로 양자컴퓨터나 양자 시뮬레이터에 활용하기 어려우며, 양자 키 분배 시스템 등에 활용하고 있다.[477]

477) http://wooriro.com/bbs/board.php?bo_table=product04

그림 II-3-62 ㈜우리로에서 상용화에 성공한 InGaAs APD 기반 단일광자 검출 소자



※ http://wooriro.com/

다. 양자연산공간 확장 기술

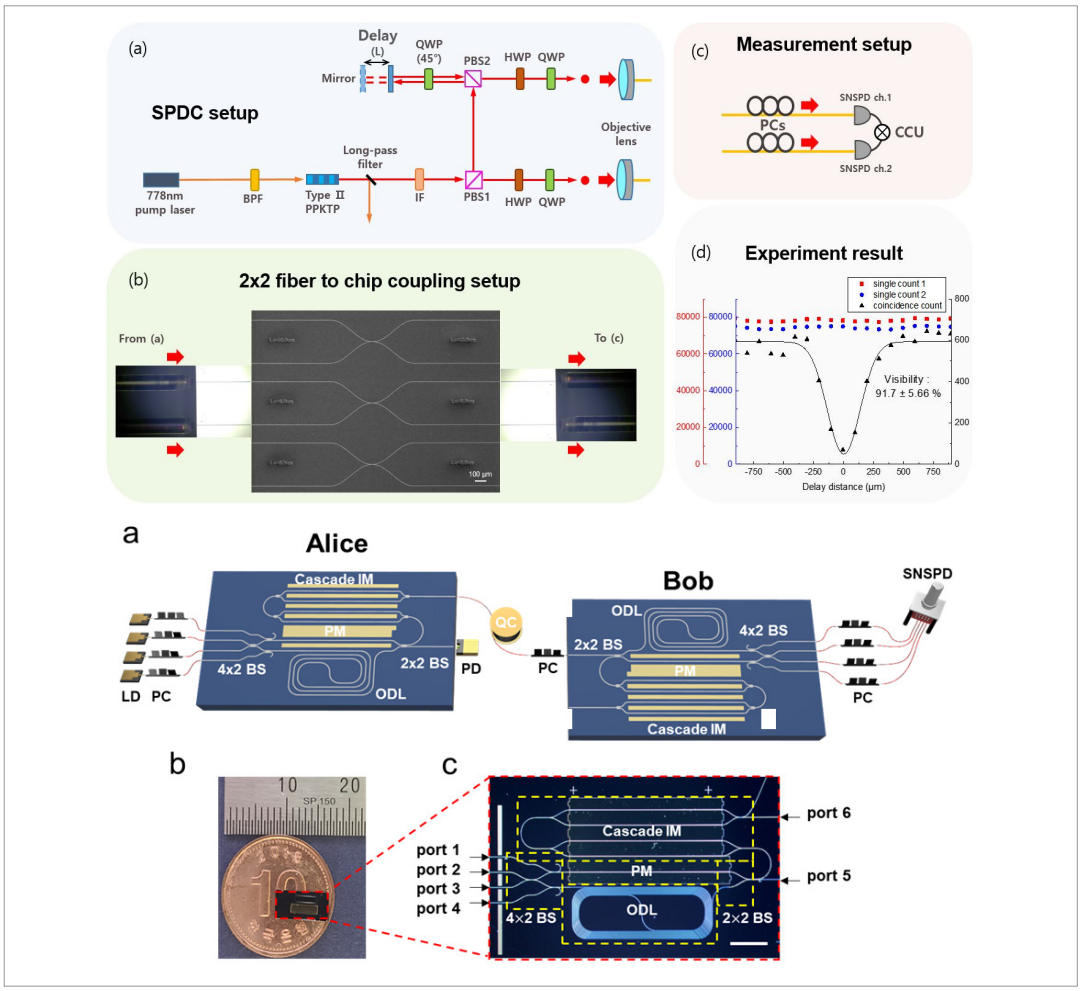
(1) 연구 동향

비선형 광학 기반 광자쌍을 이용해 다수의 단일광자를 생성하여 양자연산공간을 늘리기 위한 연구에 있어, 국내에서는 4~6 광자 수준의 양자정보 실험을 수행하는 수준이다.[478) 479)] 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 이용하거나, 높은 차원의 양자상태를 이용해 양자연산공간을 확장하는 연구 역시 널리 진행되고 있으며, 국내에서는 하나의 광자를 이용해 4차원 양자상태를 생성하고 측정하는 수준에 이르렀다.[480)]

단광자 방출체 기반 단일광자에 관한 활발한 연구에도 불구하고, 국내에서는 다수의 구별 불가능한 단일광자를 생성하는 연구가 아직 부족해, 양자컴퓨팅을 포함한 양자정보처리에 직접 활용하기에는 어려운 실정이다. 국내 압축광 기반 양자정보 연구의 경우, 압축광 실험 연구가 아직은 초기 단계이지만 최근 3차원 클러스터 상태 생성에 성공하는 등 주목할만한 연구결과를 내놓고 있다. 양자광학 시스템을 집적화하는 연구는 KIST, 한국전자통신연구원, 포항공대, KAIST 등을 중심으로 진행하고 있으며, 기본적인 양자간섭 현상을 집적광학계에서 측정하는 수준이다.[481)] 최근 기존 집적광학계 연구자들의 양자정보 연구 응용에 관한 관심이 커지면서, 관련 분야도 급속히 발전하고 있다. 특히 기존 Si 또는 SiN 등의 물질은 물론 $LiNbO_3$와 같은 새로운 물질을 이용한 집적양자광학 소자 연구개발도 활발히 진행되고 있다. $LiNbO_3$ 는 광손실이 적고 위상 변조 속도가 빠를 뿐 아니라 비선형성이 높아 집적 양자광원을 만드는 데에도 이점을 가지고 있다. 최근 KIST에서는 24개의 광소자 컴포넌트가 집적화된 양자키분배 소자를 만들고 실환경에서 양자키분배 실험을 구현하였다.

478) Lee et al. (2020)
479) Lee et al. (2022)
480) Yoo et al. (2018)
481) Jang et al. (2022)

그림 II-3-63 (위) KIST에서 구현한 집적광학계 기반 양자간섭 실험
(아래) KIST에서 개발한 $LiNbO_3$ 기반 양자키분배 집적광소자



※ Jang (2022)

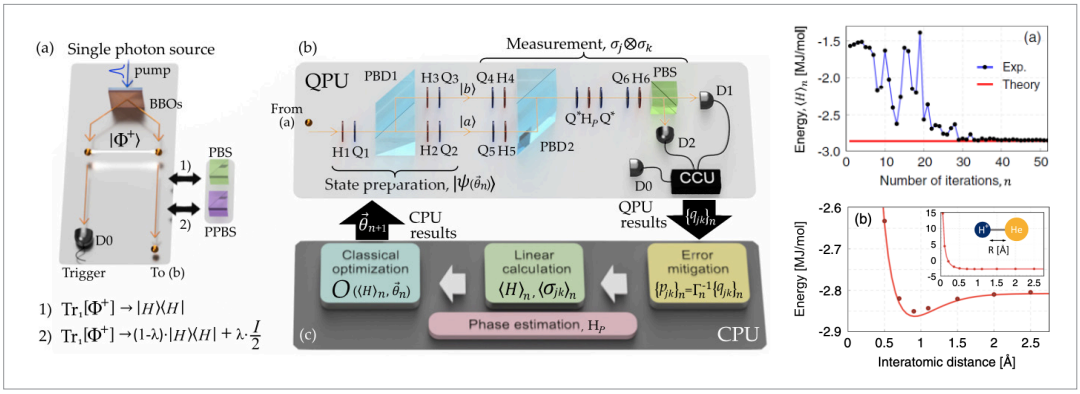
라. 양자광학 기반 양자 시뮬레이터

(1) 연구 동향

국내에서 양자광학 기술을 이용해 양자 시뮬레이터 또는 양자컴퓨터를 직접 구현하는 실험 연구는 사례를 찾아보기 어려우나, 최근 광자 기반 양자컴퓨터를 이용해 간단한 이원자 분자의 바닥상태 에너지를 계산하는 것에 성공했다.[482] 또한 후속연구로 양자얽힘 측정을 이용한 효율적인 양자광학 양자시뮬레이터 구현과 단일광자의 Orbital Angular Momentum (OAM) 모드를 이용한 다차원 양자상태 양자시뮬레이터 개발 등을 진행하고 있다.

482) Lee (2022)

그림 II-3-64 KIST에서 구현한 양자광학 양자 시뮬레이터와 이원자 분자의 바닥에너지 계산 결과



※ Lee (2022)

5. 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨팅

가. 다이아몬드 성장 및 NV 센터 형성

(1) 기술 동향

다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 구현을 위해서는 초고순도의 단결정 다이아몬드가 필요한데, 국내의 다이아몬드 성장 기술은 대부분 공업용 다이아몬드에 한정돼 있다. 따라서 현재 양자컴퓨터 연구에 사용되는 다이아몬드는 전량 수입에 의존하고 있지만, 국내에서도 다이아몬드 성장에 관한 연구가 진행되고 있고, 최근에는 고순도의 단결정을 성장하는 데 성공했다. 차세대 반도체 재료로써 Wide Bandgap 반도체에 관한 연구가 활발히 진행되면서, 반도체 소재 중 가장 밴드갭이 넓은(5.47eV) 다이아몬드에 관한 관심도 증가하고 있지만, 대면적 성장이 힘들고 가공이 어렵다는 한계에 부딪히고 있다. 한편 다이아몬드에 NV 센터를 형성하기 위해서는 질소 이온을 주입해야 한다. 최근 한국원자력연구원에서는 초 저선량 이온 주입 장치를 도입하여 서비스 중이다. ^{14}N, ^{15}N 이온을 1E8 ions/cm^2이상의 조사량으로 주입 가능 하다.

(2) 연구 동향

① 다이아몬드 성장 기술

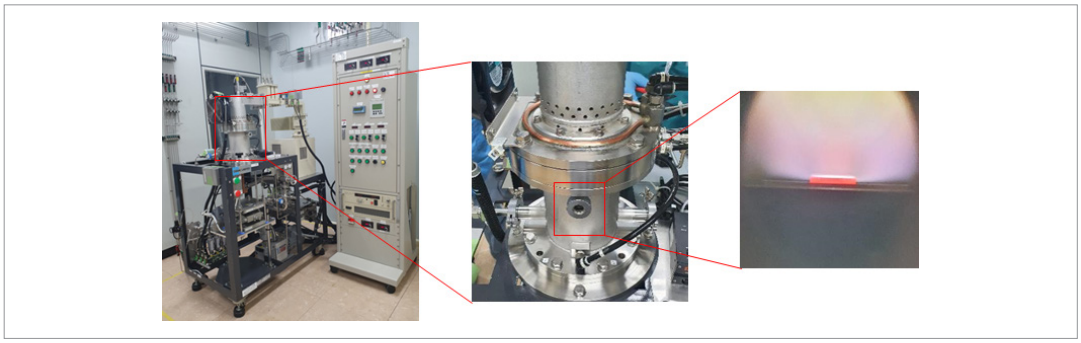
한국공학대학교 연구팀은 국내에서 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)을 이용해 단결정 다이아몬드를 성장하는 연구를 수행 중이다.[483] 최근 질소 함유량이 10ppb 이하의 고순도 다이아몬드를 성장하는 데 성공하였다. 최근에는 Delta-Doping이라는 방법을 이용하여 원하는 깊이

483) Diam et al. (2021)

에 NV센터를 생성하는 기술을 개발 중이다. 또한 진공도를 10^{-8}Torr까지 낮출 수 있는 CVD 장비를 구축하여 가동 중이며, 국내 양자 연구를 진행 중인 그룹들과의 협업을 통하여 단결정 다이아몬드의 품질을 높이고 있다.

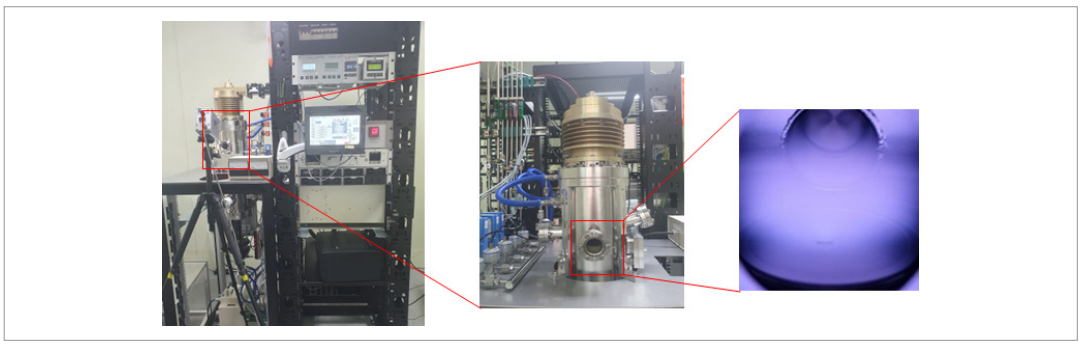
최근에는 RFHIC라는 국내 기업에서 다이아몬드 단결정 성장에 선두 기업인 Element Six와의 기술 교류를 통해서 웨이퍼 단위의 단결정 다이아몬드 성장 기술을 확보하였다.

그림 II-3-65 한국공학대학교가 보유한 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비



※ 한국공학대학교

그림 II-3-66 구축 중인 초고진공 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비



※ 한국공학대학교

② 이온 주입 및 열처리 기술

다이아몬드에 질소 이온을 주입하는 방법은 크게 이온을 주입하는 시점으로 나눌 수 있다. 다이아몬드를 성장할 때 기체 조성비를 조절해 질소 농도를 높임으로써 특정한 깊이에만 질소를 주입하거나, 다이아몬드 성장 후 이온가속기를 이용해 주입할 수도 있다. 각각의 방법은 다음과 같은 장단점이 존재한다.

표 II-3-3 이온 주입 시점에 따른 장단점

이온 주입 시점	장점	단점
다이아몬드 성장 중	1. 주변에 생성되는 결함을 최소화할 수 있다.	1. 이온이 생성되는 위치를 제어할 수 없다. 2. 불순물 농도 제어가 어렵다.
다이아몬드 성장 후	1. 이온 주입 마스크를 사용해 원하는 영역에 이온을 주입할 수 있다. 2. 농도 제어가 쉽다. 3. 다양한 이온을 주입할 수 있다.	1. 이온주입 과정에서 다이아몬드에 결함이 생긴다. 2. 추가 공정이 필요하다.

※ 집필진 작성

다이아몬드 성장 중 이온을 주입하는 대표적인 기술은 Delta-Doping이다. 이 기술을 이용하면 2nm 정도로 얕은 깊이에 이온층을 생성할 수 있고, NV 센터 주변의 결함을 최소화해 NV 센터의 양자품질을 극대화할 수 있다. 최근 한국공학대학교에서 이 기술을 개발하고 있다.

다이아몬드 성장 후에는 강한 에너지로 이온을 가속해 다이아몬드 표면을 통해 주입한다. 이온 주입 마스크를 사용해 원하는 곳에 주입할 수 있지만, 이온이 주입되는 과정에서 수많은 결함을 만들게 되어 NV 센터의 양자품질을 저해하는 요인이 된다. 결함을 줄이고 주입된 이온을 NV 센터로 변환하기 위해서 열처리 기술이 사용된다. 예를 들어 질소 이온을 NV 센터로 변환하기 위해서는 600도 이상의 고온에서 열처리를 진행해야 한다. 다이아몬드는 고온에서 산소와 반응을 잘하기 때문에, 열처리는 10^{-7} Torr 이하의 진공이나 질소나 아르곤 등의 불활성 기체를 채워둔 환경에서 열처리를 진행해야 한다.

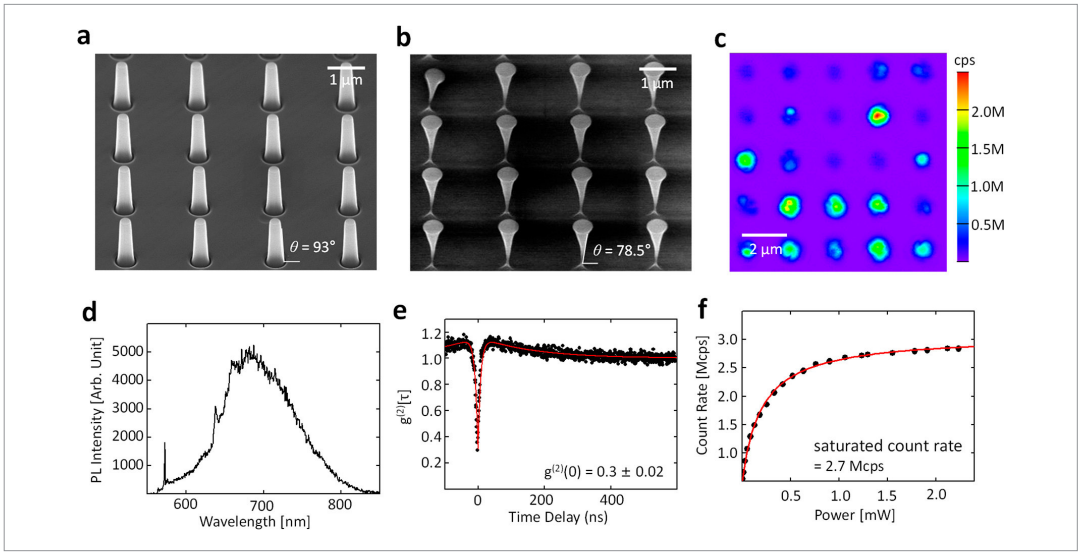
열처리 후에는 다이아몬드 표면 결함이 증가하는데 표면에서 SP3 결합이 SP2 결합으로 전환되기 때문이다. 이러한 결함들로 인해서 NV 센터의 양자상태 제어가 어려워지므로, 고온의 혼합산으로 표면의 결함을 제거해줘야 한다. 고온의 혼합산을 이용하는 작업은 여러 환경 규제 때문에 국내에서 팹서비스를 이용하기 어려워 개인 연구실을 이용할 수밖에 없다.

③ 다이아몬드 반도체 공정 기술

다이아몬드의 NV 센터를 효율적으로 제어하기 위해서는 다이아몬드 나노구조물을 이용해야 한다. 다이아몬드도 반도체의 일종이기 때문에 CMOS 공정을 적용할 수 있다. 하지만 다이아몬드는 수 mm의 조각으로 판매되기 때문에 팹서비스를 일괄적으로 받기 어렵다. 따라서 개별 연구소 팹을 이용하거나, 국내 팹서비스 중 일정 교육 이수 후 장비 직접 사용 서비스를 이용해 다이아몬드 나노구조물 제작을 할 수 있다. 한편 아직 다이아몬드 반도체 공정조건이 확립되지 않았기 때문에 다이아몬드에 적용할 수 있는 반도체 공정조건을 찾아야 하는 어려움이 있다. 최근 KIST 양자정보연구단에서는 뒤집힌 콘 형태의 다이아몬드 나노구조물을 구현하는 것에 성공했고, 이를 통해 NV 센터에서 방출되는 광자의 포집률을 일반적인 기둥 구조보다 2배 증가시켰다.[484]

484) ACS Photonics (2020)

그림 II-3-67 KIST에서 개발한 다이아몬드 나노구조물을 이용한 NV 센터 광자 포집효율 증대 구조물



※ Jeon & Lee (2020)

(3) 적용 분야

다이아몬드의 성장, NV 센터의 생성 그리고 나노구조물의 제작기술은 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 연구에 있어서 반드시 보유해야 할 기술들이다. 지금은 대부분 해외 기술에 의존하고 있지만, 국내에서도 다이아몬드에 관련된 연구그룹이 증가하는 추세이다. 다이아몬드는 양자적 특성뿐만 아니라, 열적, 기계적으로도 연구 가치가 높은 재료이다. 양자분야로의 응용뿐만 아니라 광학, 센서 등의 분야에도 적용 가능하며, 위에 언급한 기술들 역시 다이아몬드가 사용되는 모든 분야에 응용할 수 있다.

나. 다이아몬드 NV 센터 전자스핀 제어

(1) 기술 동향

다이아몬드 NV 센터 전자스핀의 양자상태는 광학적으로 초기화할 수 있고, 마이크로파를 통해서 제어할 수 있다. 다이아몬드 NV 센터를 탐색하기 위해서는 고분해능의 공초점 현미경이 필요하고, 양자상태를 제어하기 위해서는 1~4GHz 대역의 마이크로파 생성 장치가 필요하다. 현재는 연구실 수준에서 여러 부품과 장비를 조합해서 구현한 실험을 이용해 연구를 진행하고 있다. NV 센터는 상온, 대기압에서 동작하기 때문에 진공 챔버와 냉동기가 필요 없어 측정시스템의 크기를 줄일 수 있다. 최근 KIST 양자정보연구단에서는 이동할 수 있는 5큐비트 양자컴퓨터를 공개했다. NV 센터와 '다' 항에서 설명하고 있는 ^{13}C 핵스핀을 이용하여 다 큐비트 시스템을 구현하였다. 현재 KIST에서는 구현한 NV 센터 양자컴퓨팅 시스템을 이용한 양자 알고리듬 개발을 진행 중이다.

그림 II-3-68 2023년 퀀텀코리아에서 공개한 5큐비트 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터



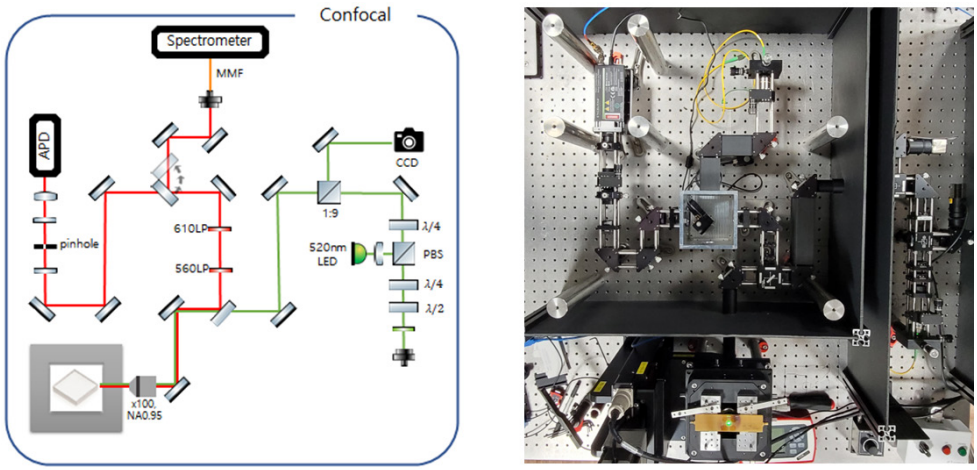
※ KIST 양자정보연구단

(2) 연구 동향

① 고분해능 공초점 현미경

다이아몬드의 NV 센터를 탐색하기 위해서는 고분해능의 공초점 현미경이 필요하다. KIST 양자정보연구단에서는 광축은 고정하고 다이아몬드의 위치만 조절할 수 있도록 현미경 시스템을 구성하고 있다. 해당 시스템에서는 다이아몬드의 위치를 서브 nm 범위로 조절할 수 있는 Piezo Stage와 다이아몬드 내부의 NV 센터에서 방출되는 빛을 최대한 포집하기 위해 높은 개구수의 대물렌즈를 사용한다. 532nm 파장의 레이저로 NV 센터의 전자를 여기하고, 이때 방출되는 637~800nm 대역의 빛을 단일 광자 검출기를 통해서 검출한다.

그림 II-3-69 공초점 현미경 시스템 모식도와 실물 사진

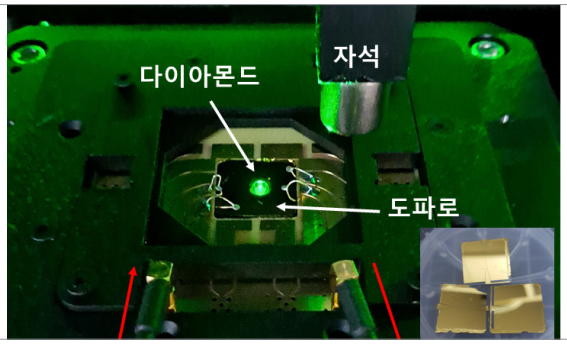


※ KIST 양자정보연구단

② 마이크로파 생성 및 제어 장비

다이아몬드 NV 센터의 양자상태를 제어하기 위해서는 전자스핀의 |0〉 상태와 |1〉의 공진 주파수에 맞는 마이크로파를 인가해야 한다. 주변 자기장에 따라 공진 주파수는 1~4GHz 정도의 대역에 위치한다. 전자스핀의 상태를 임의의 상태로 바꾸기 위해서는 마이크로파의 위상을 조절할 수 있어야 하므로, 벡터 신호 발생기를 사용하거나 임의의 파형을 생성할 수 있는 AWG(Arbitrary Waveform Generator)를 사용하기도 한다. 한편 마이크로파를 NV 센터에 효율적으로 전달하기 위한 도파로가 필요하며, 인가 주파수에서의 임피던스를 고려해 설계해야 한다.

그림 II-3-70 초점 현미경의 다이아몬드 샘플과 자기장 및 마이크로웨이브 인가 방법

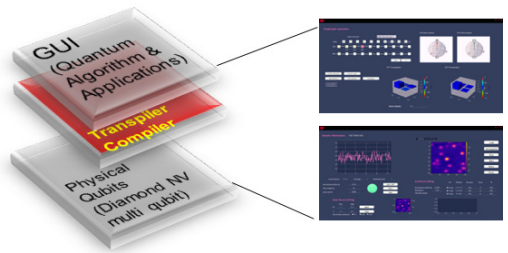


※ KIST 양자정보연구단

③ 양자컴퓨터 제어 프로그램

다이아몬드 NV 센터를 탐지하고 양자상태를 제어하기 위해 다양한 장비들이 사용된다. 이러한 장비들이 유기적으로 연동되기 위해서는 중앙에서 장비들을 제어할 수 있는 컨트롤러와 프로그램이 필요하다. 그뿐만 아니라 사용자가 NV 센터 제어를 쉽게 할 수 있도록 특정 양자게이트에 대한 신호를 변환하고, 장비들이 그 신호에 맞게 마이크로파 신호를 발생시킬 수도 있어야 한다. 양자의 원리를 이해하고 있는 사용자가 NV 센터를 이용해 중첩과 얽힘을 실험적으로 확인할 수 있는 환경이 구축돼야 한다.

그림 II-3-71 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 제어 프로그램



※ KIST 양자정보연구단

(3) 적용 분야

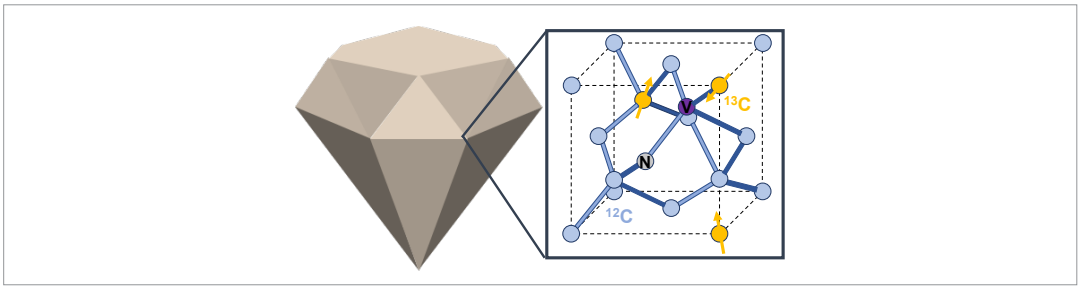
다이아몬드 NV 센터 전자스핀 제어 및 상태 측정을 하기 위한 시스템은, 양자컴퓨터뿐만이 아니라 NV 센터를 이용하는 센싱, 중계기 그리고 메모리와 같은 응용에서도 그대로 적용할 수 있고, 고체 점결함 연구에도 활용할 수 있다. 최근 KIST에서는 측정시스템의 크기를 최소화해 탁자 위에 올려두고 사용할 수 있을 정도로 작게 만드는 시도를 하고 있다. 궁극적으로는 모든 광학계를 광집적 소자로 대체해 칩만한 크기의 다이아몬드 기반의 양자컴퓨터를 구현할 수 있을 것이다.

다. 다이아몬드 핵스핀 제어

(1) 기술 동향

다이아몬드 내에는 NV 센터의 전자스핀(Electron Spin) 이외에 탄소동위원소인 ^{13}C의 핵스핀(Nuclear Spin)이 존재한다. 전자스핀과 핵스핀의 상호작용(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)은 일반적으로는 전자스핀의 양자상태를 파괴하는 잡음 신호로 여겨진다. 하지만 반대로 생각해보면 전자스핀과 핵스핀이 상호작용한다는 것은, 전자스핀을 통해서 핵스핀의 양자상태에 접근할 수 있다는 것을 의미한다. ^{13}C의 경우 자연적으로 다이아몬드 전 영역에 1.1%의 비율로 존재한다. 핵스핀은 주변 환경으로부터 영향을 거의 받지 않아 비교적 오랜 시간 동안 결맞음 양자상태를 유지할 수 있는 장점이 있는 만큼, 주변과의 상호작용이 어려워 ^{13}C 핵스핀을 단독으로 활용하기는 어렵다. 고려대학교 연구팀은 ^{13}C 핵스핀과 전자스핀의 초미세 결합(Hyperfine Coupling)을 이용해, NV 센터 주변에 존재하는 5개 이상의 ^{13}C 핵스핀을 동시에 제어하는 5큐비트급 양자레지스터를 개발했다고 발표했다.

그림 II-3-72 다이아몬드 NV 센터 부근 질소 및 탄소동위체를 포함한 격자 모형

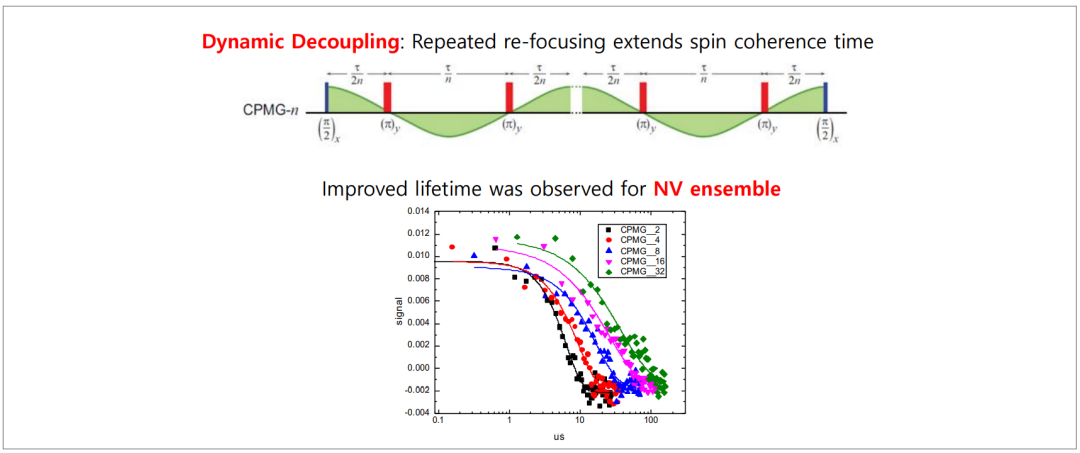


(2) 연구 동향

① 다이나믹 디커플링

전자스핀에서 발생하는 비균일한 위상 손실 효과는 Spin Echo 원리에 기반해, 스핀 방향을 반전시킴으로써 상쇄시킬 수 있다. 이러한 스핀 반전 효과를 주기적으로 반복하는 시퀀스를 활용해, 원하지 않는 주변 환경의 결합을 끊어주는 방법을 다이나믹 디커플링(Dynamic Decoupling)이라고 하며, NMR 분야에서 지속적으로 연구 및 활용되고 있다. 또한 다이나믹 디커플링 기술은 점결함 전자스핀에 존재하는 위상 손실을 없애, 중첩 시간을 증가시키는 효과도 있다.

그림 II-3-73 다이나믹 디커플링 시퀀스와 반복 주기에 따른 중첩 시간 증가 확인 그래프

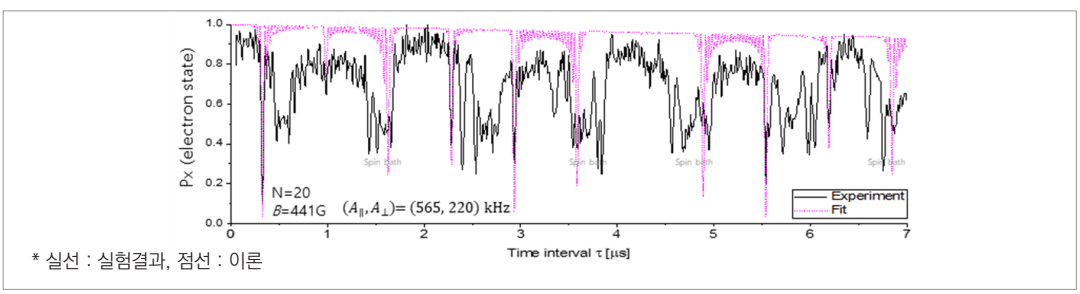


※ KIST 양자정보연구단

② 핵스핀의 탐색

다이나믹 디커플링 시퀀스에서 스핀 상태의 반전 주기가 전자스핀과 인근 핵스핀의 초미세 결합 강도와 공명(Resonance)을 일으킬 경우, 디커플링 효과가 아니라 오히려 강력한 상호작용을 유발하게 된다. 아래 그림은 반전 주기 Tau에 대한 전자스핀의 상태 변화를 나타낸 실험 결과이며, 특정 Tau에서 전자스핀의 공진 현상이 관찰된다.

그림 II-3-74 다이나믹 디커플링 결과



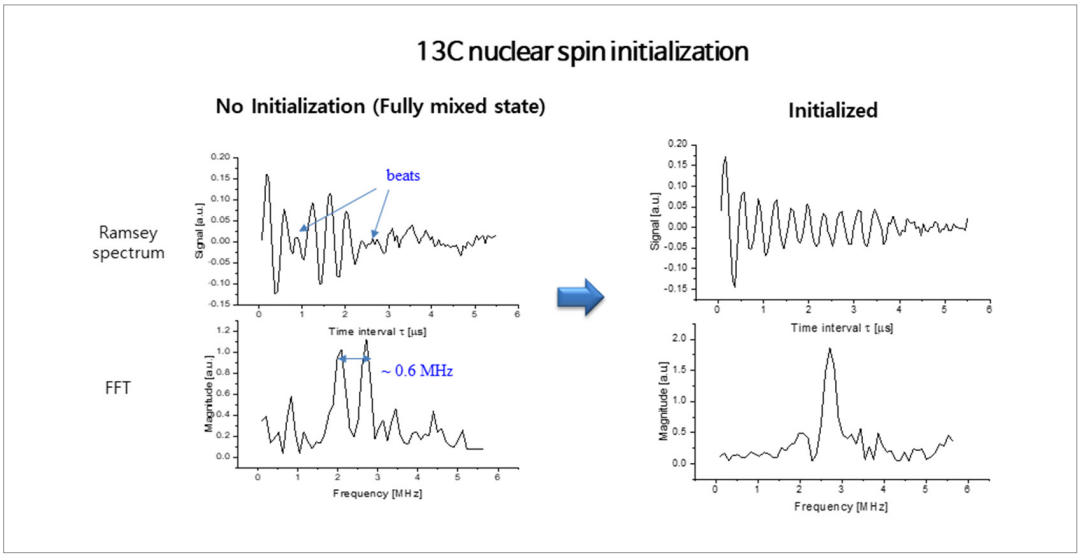
* 실선 : 실험결과, 점선 : 이론

※ KIST 양자정보연구단

③ 핵스핀의 초기화

핵스핀은 NV 센터의 전자스핀처럼 직접적으로 상태를 확인하거나 제어할 수 없다. 다만 주변의 NV 센터를 이용해 간접적으로 상태를 제어할 수 있다. 다이나믹 디커플링을 이용한 전자스핀의 반전 주기가 핵스핀의 결합 세기와 일치할 때, 특정 각도만큼 핵스핀을 회전시킬 수 있다. 이러한 원리를 이용하면 전자스핀의 반전 횟수를 조절해 핵스핀을 원하는 상태로 제어할 수 있다. 핵스핀의 상태를 읽는 것도 전자스핀을 통해서 이루어지는데, SWAP 게이트를 적용해 핵스핀의 상태를 전자스핀에 전달한다. 아래 그림은 핵스핀 초기화 전후의 전자스핀의 Ramsey 신호인데, 초기화 전에는 핵스핀의 여러 상태에 의해서 Ramsey 신호에 다양한 주파수 성분이 섞여 있지만, 핵스핀 초기화 후에는 하나의 주파수 성분만 검출되는 것을 확인할 수 있다. 여러 개의 핵스핀의 제어 역시 NV 센터를 이용해 순차적으로 진행할 수 있다.

그림 II-3-75 핵스핀 초기화 전후 NV 센터의 Ramsey 신호 변화



※ KIST 양자정보연구단

(3) 적용 분야

NV 센터를 이용해 다이아몬드 내부의 핵스핀을 탐지하고 제어하는 기술은 다이아몬드 외부의 핵스핀에도 똑같이 적용할 수 있다. 이를 이용하면 다이아몬드 주변의 나노 입자에 대한 센싱 및 이미징이 가능해질 것이며, 상대적으로 외부 잡음에 강한 NV 센터를 이용해서 양자정보를 핵스핀에 저장하는 메모리로도 활용할 수 있다.

라. 다중 큐비트 연결

(1) 기술 동향

NV 센터는 자기결합(Magnetic Coupling)을 통해 주변 요소와 상호작용이 가능하며, 주로 수십 nm 이내에서 유의미한 상호작용을 가질 수 있다. 현재 국내에서는 NV 센터 위치를 정밀하게 제어해 복수의 NV 센터를 직접 결합하는 다중 큐비트를 구현하는 방식과, 점결함 주변에 존재하는 여러 개의 핵스핀을 큐비트로 활용해 다중 큐비트를 구현하는 방식으로 연구가 진행되고 있다. 또한 이러한 접근이 현실적으로 가지는 큐비트 개수 확장의 한계를 극복하기 위해, 소수의 큐비트를 가지는 단일양자노드에서 광자를 거쳐 연결한 분산형 양자컴퓨터 구현 기술도 연구되고 있다.

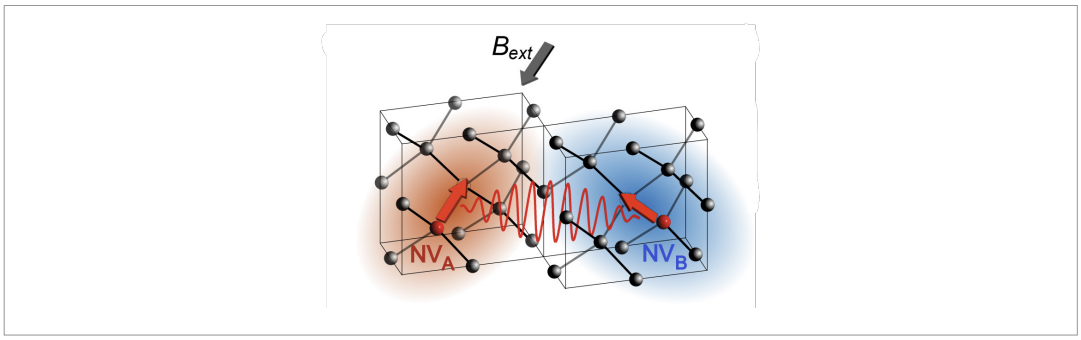
(2) 연구 동향

① 전자스핀-전자스핀

다수의 NV 센터를 수 nm에서 최대 30nm 이내의 간격으로 배치해 다중 큐비트를 구현하는 방법이다. 질소를 다수 포함한 분자를 이온 주입하는 방법으로 두 개 이상의 NV 센터가 근접한 다중 NV 센터 시스템을 구현할 수 있다. 국내에서는 미세 마스크 패턴을 이용해 10nm 이내로 정밀하게 NV 센터의 위치를 제어해 생성시킬 수 있는 기술을 개발한 바 있다.[485]

이 밖에도 복수의 NV 센터를 활용한 다중 큐비트 시스템에서의 마이크로파 등을 활용한 큐비트 제어 기술 연구가 국내에서 진행되고 있으며, 순수 국내 기술로 NV 센터-NV 센터 형식의 2큐비트 시스템에서 양자얽힘 및 양자연산을 구현해냈다. 또한 NV 센터들이 빛의 파장보다 훨씬 가깝게 있어서 빛에 대한 공간적 크로스톡(Crosstalk)이 발생하는 어려움이 있는데, 상온에서 이러한 한계를 극복하는 연구도 진행되고 있다.[486]

그림 II-3-76 근접한 두 개의 NV 센터 간의 결합 모식도



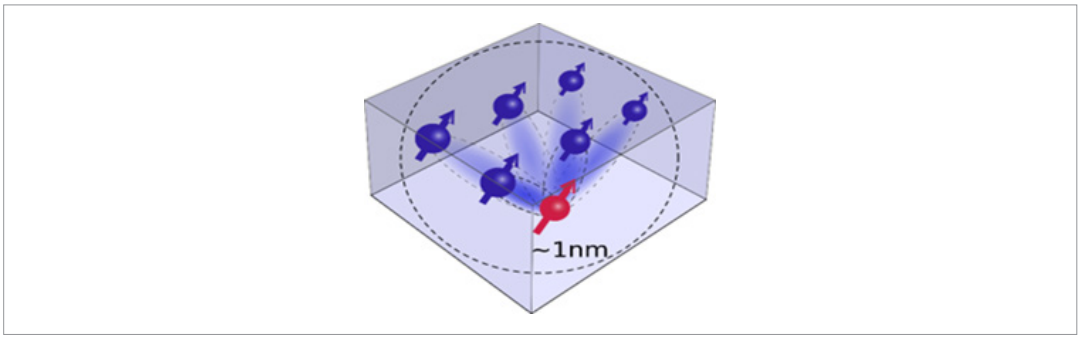
※ 집필진 작성

485) Nano Lett (2022)
486) Junghyun Lee (2022)

② 전자스핀-핵스핀

다이아몬드 내에 자연적으로 존재하는 1.1% 비율의 탄소동위체 ^{13}C를 다중 큐비트 구현에 활용하는 연구가 국내에서 진행 중이다. 이 ^{13}C의 핵스핀은 주변환경과의 상호작용이 아주 약한 것이 특징이며, 이로 인해 긴 결맞음 시간을 갖는다. 이러한 ^{13}C의 핵스핀이 NV 센터와 가깝게 위치할수록 더욱 강하게 NV 센터 전자스핀과 결합하며, 멀어질수록 느린 상호작용을 하게 된다. 전자스핀-핵스핀 결합과 공명(Resonance) 효과를 일으킬 수 있는 마이크로파 배열을 NV 센터에 인가함으로써, 핵스핀과 전자스핀의 상호작용을 일으키는 것이 가능하며, 물리적 설계를 통해 큐비트로써 활용하는 것이 가능하다. 각각의 탄소 핵스핀은 서로 다른 결합 강도를 갖기 때문에 개별적인 접근이 가능하며, 국내에서는 탄소 핵스핀 큐비트를 탐색해 다섯 개 이상의 탄소 핵스핀이 접근해 양자간섭을 할 수 있다는 것을 실험적으로 증명했다.

그림 II-3-77 NV 센터 주변의 핵스핀 모식도



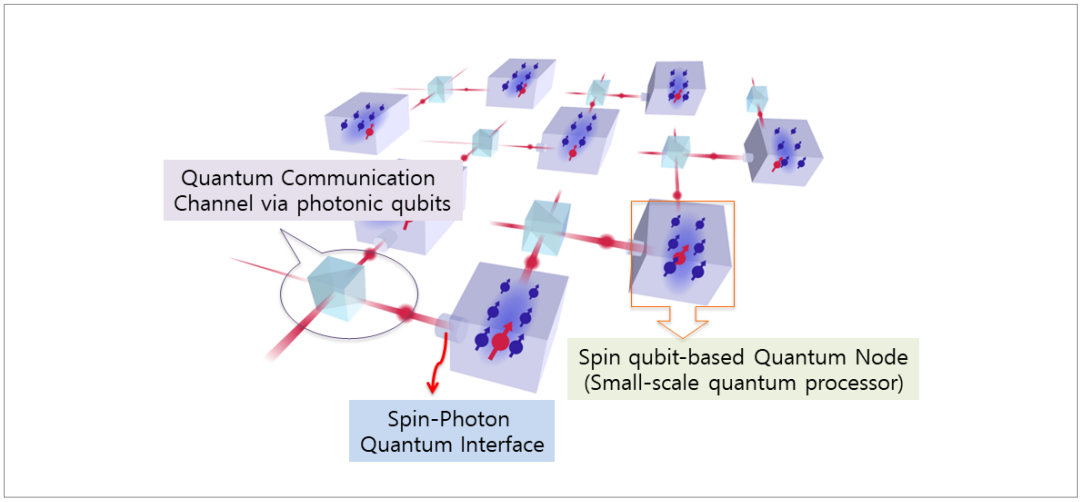
※ KIST

③ 전자스핀-광자

복수의 근접한 NV 센터를 활용한 다중 큐비트의 확장은 큐비트 개수 증가에 따라 기하급수적인 기술적 어려움이 예상된다. 또한 복수의 핵스핀을 활용한 큐비트 수 확장은 자연 다이아몬드에서는 실용적인 결합 크기를 가진 ^{13}C 핵스핀 개수의 제약이 있고 1개의 NV 센터를 통한 접근만 가능하므로, 큐비트 개수가 많아질수록 제어 효율성이 떨어지는 문제점이 있다.

NV 센터는 전자스핀-광자 간 양자얽힘을 구현할 수 있는 대표적 물리 플랫폼이다. NV 센터는 여기 후 방출되는 광자의 편광과 스핀 상태가 얽혀 있는 고유의 물리시스템을 가지고 있으며, 그 외에도 선택적 에너지 여기를 통해 광자의 유무-스핀 상태를 구현하는 방법도 있다. 광자는 멀리까지 이동이 가능하므로, 직접적으로 결합하지 않은 각각의 NV 센터 스핀과 얽혀 있는 광자를 빔스플리터를 통해 측정함으로써, NV 센터 간 원거리 얽힘 및 양자상태 전송이 가능할 것으로 예상된다. 이러한 원거리 스핀 얽힘은 위에서 언급한 전자스핀-전자스핀 시스템 혹은 복수의 핵스핀 시스템을 여러 개 연결한 분산형 양자컴퓨팅을 구현함으로써, 큐비트 수 확장의 한계를 극복하는 데 활용될 수 있다.

그림 II-3-78 광자를 이용한 큐비트 시스템의 확장



※ KIST

(3) 적용 분야

사용할 수 있는 큐비트 개수는 양자컴퓨터의 중요한 성능지표 중 하나이다. 현재 초전도 기반 큐비트의 경우 100개 정도의 큐비트를 구현할 수 있다고 알려져 있다. 그리고 최근 IBM에서는 수년 내에 수천 개의 큐비트를 구현하겠다고 발표했다. 현재 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 연구는 NV 센터를 이용해 주변 10개의 핵스핀 큐비트 제어가 가능한 수준이다. 향후 큐비트 확장을 위한 다양한 방법이 연구돼 수천 큐비트 제어가 가능한 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터의 등장을 기대하고 있다.

6. 리드버그 양자컴퓨팅

(1) 기술 동향

리드버그 양자컴퓨팅 연구는 국제적으로 한국이 선도하고 있는 분야이다. KAIST 물리학과 안재욱 교수 연구팀은 삼성미래기술 재단의 연구비 지원(10년, 총 약 80억)으로 2014년에 관련 연구를 개시해 중성원자 재배치 기술(2015년), 3차원 큐비트시스템(2016년), 원거리 리드버그 원자 게이트(2018년), 리드버그 양자선 기술(2021년)을 개발했다. 특히 중성원자 재배치기술은 리드버그 양자컴퓨팅 연구 분야의 빠른 발전을 촉발한 양대 핵심 기술 중 하나로 평가받고 있으며, 이 기술에 사용된 광집게 동시 이동기술을 다른 양자시스템(분자, 양자점 등)에도 활용 가능한지가 주목받고 있다. 3차원 큐비트시스템 기술은 기존의 양자컴퓨팅 플랫폼(초전도체와 이온 트랩 기반)에 없는 기술이고, 큐비트 개수 확장이 쉽다는 장점이 있다. 원거리 리드버그 원자 게이트는 기존의 리드버그 봉쇄 게이트와 다른 방식으로 큐비트 시스템의 크기를 확장할 수 있다. 리드버그 양자선 기술은 N큐비트 간의 임의 그래프 연결 구조를 만들 수 있어, 양자단열 컴퓨팅을 통한 NP-문제 계산을 가능하게 했다고 평가받는다.

리드버그 양자 컴퓨터 개발 초기에는 알칼리계열 원자들이 사용되어왔으나, 다양한 실험적 가능성을 탐구하기 위해 세계 학계에서는 많은 종류의 원자종이 실험적으로 탐구되고 있다. 현재 국내에서는 87-루비듐(KAIST 안재욱 교수팀), 85-루비듐 동위원소 혼합시스템(KAIST 김동규 교수팀), 171-이터븀(KRISS 초저온원자양자연구팀)이 연구되고 있다.

① 중성원자 재배치 기술

광집게가 원자 하나를 포획하는 확률은 약 50% 정도이기 때문에, N개의 원자를 동시에 포획하는 확률은 $(1/2)^N$으로 매우 낮다. 따라서 10개의 원자를, 10개의 광집게로 포획하는 경우 보통 4~6개의 원자가 포획되는 편이며, 10개가 모두 포획되는 경우는 약 0.001의 낮은 확률로 발생한다. 따라서 다준위 원자의 광반응 등을 이용해 포획확률을 높이는 연구가 진행됐으나, N=4개 이상의 원자열을 효과적으로 생성하는 데 실패했다. 대안으로 2N개의 광집게를 이용해 약 N개의 원자를 포획한 후, 원자를 포획한 광집게를 선택적으로 재배치해 N개의 원자열을 생성하는 방법이 제안됐다. 하지만 홀로그램을 이용해 N개의 광집게를 동시에 이동한 경우, 광집게 간 간섭 현상이 발생했다. 이를 바탕으로 KAIST는 2014년 광집게 간 간섭이 없는 광집게 재배치 기술을 개발해 중성원자 재배치 기술을 증명했다. 이후 2016년에는 광집게 간 간섭을 최소화한 개량 기술을 이용해 총 49개의 중성원자를 3차원 공간에 재배치하는 데 성공했다. 한편 2016년에 Harvard와 프랑스 Ecole Polytechnique는 음광소자를 이용해 약 100개의 중성원자를 배치하는 기술을 개발했다. 현재는 최대 250개의 원자를 공간에 배치해 양자시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅 연구에 사용하고 있다. 참고로 중성원자 재배치 기술은 KAIST가 개발한 홀로그램을 이용하는 방식과 Harvard와 Ecole Polytechnique가 사용하는 음광소자를 이용하는 방식이 주로 사용되고 있으며, 그 외 디지털마이크로 거울을 사용하는 방식 등이 있다.

② 3차원 큐비트시스템

광집게를 이용하는 중성원자 재배치는 3차원 구조의 큐비트 시스템을 만들 수 있다. 다른 양자컴퓨팅 플랫폼(이온 트랩과 초전도체 기반)에서 큐비트의 배치가 1차원 또는 제한된 2차원임을 비교하면, 리드버그 원자시스템의 3차원 구조는 큐비트 수의 확장과 큐비트 간 연결성에서 장점이 있다. KAIST가 최초로 선보인 2층 큐비트 3차원 구조는 이후 프랙탈 구조, 초기하학적 구조 등으로 확장돼, 기존의 사각격자, 벌집 격자, 카고메 격자 등 단순한 2차원 구조에서 수행되던 양자 시뮬레이션 연구의 영역을 확장했다.

③ 원거리 리드버그 원자 게이트

광집게를 이용하는 중성원자 플랫폼은 거리 대비 거리오차를 최소화하는 장점이 있다. 이는 거리오차를 고정하면서 중성원자 간 거리를 임의로 변경할 수 있기 때문이다. 거리 대비 거리오차를 줄이면 큐비트 간 상호작용의 잡음을 최소화할 수 있다. 이는 큐비트 간의 상호작용이 거리의 함수(리드버그 원자는 거리의 마이너스 6제곱)로 주어지기 때문이다. 리드버그 양자컴퓨팅에서는 주로 10마이크로미터 거리에서 거리오차가 수십 나노미터급이어서, 상호작용 잡음을 1/1,000 정도로 작게 만들 수 있다. 이러한 장점 덕분에 원거리 리드버그 원자 게이트는, 기존에 사용되던 리드버그 봉쇄 현상에 기반한 게이트(Rydberg Blockade Gate)와 더불어 관련 연구에 사용되고 있다.

④ 리드버그 양자선 기술

물리적으로 배치된 큐비트 간의 연결성은 근거리 큐비트 간의 직접적인 연결과 원거리 큐비트 간의 간접적인 연결로 구성된다. 따라서 직접적으로 연결되는 큐비트의 수는 2차원 큐비트 구조에서는 일정 면적 내 큐비트의 수, 3차원 구조에서는 일정 체적 내 큐비트의 수로 제한된다. 간접적으로 연결된 큐비트 쌍은 양자회로 계산이 필요하므로 결맞음 시간의 제약을 받는다. 양자단열형 양자컴퓨팅에서는 직접적으로 연결된 큐비트가 많으면 많을수록 좋다. 이에 물리적으로 원거리에 있는 큐비트 간의 직접 연결을 위해 양자선 개념이 제안됐고, KAIST가 실험적으로 구현해 리드버그 양자선으로 명명하였다.

참고로 양자단열형 양자컴퓨팅은 많이 알려진 양자회로형(또는 양자디지털형) 양자컴퓨팅 방식, 측정기반 양자컴퓨팅 방식 등과 함께 범용양자컴퓨팅이다. 흔히 양자회로형만 범용양자컴퓨팅인 줄 오해하고 있으나, 다른 두 방식도 범용양자컴퓨팅이다. 양자회로형 양자컴퓨팅을 고려하는 다른 양자플랫폼(초전도체와 이온 트랩 기반) 연구에서 양자게이트(1Q, 2Q)의 구동 신뢰도가 발전을 가늠하는 중요한 지표로 사용되듯이, 리드버그 양자컴퓨팅에서 고려되는 양자단열형 양자컴퓨팅은 큐비트 간 연결성을 얼마나 쉽게 프로그램할 수 있는지와 시스템의 결맞음 시간이 주요한 성능지표가 된다. 이러한 점에서 D-wave의 초전도체 양자단열형 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 사용해 연결성이 제한된다는 점과 초전도 기반 양자컴퓨터의 결맞음 시간이 짧다는 점에서 제약을 받는다. 양자단열형 양자컴퓨팅에서 각각의 문제는 큐비트의 연결성으로 프로그램한다. 따라서 모든 문제를 프로그램하기 위해서는 모든

큐비트의 연결 구조(수학의 그래프에 해당)를 구현할 수 있어야 한다. 위에서 설명한 양자선은 주어진 큐비트 간의 모든 직접 연결 구조를 구현하는 도구이다. 결국 리드버그 양자선은 리드버그 큐비트 시스템의 모든 직접 연결 구조를 가능하게 한다.

⑤ NP-문제 계산

NP(비결정적 다항)-문제는 해답을 풀기는 어렵지만 해답이 맞는지 틀린지를 다항 시간 내에 알아낼 수 있는 문제를 말한다. 계산 문제 중 결정문제는 계산복잡도에 따라 P(결정 다항)와 NP(비결정적 다항)로 분류되고, NP-문제들은 다항 시간 내에 효율적인 계산을 할 수 없다. 따라서 현재 개발 중이거나 향후 개발될 양자컴퓨터들은 이러한 NP-문제를 효율적으로 계산할 수 있어야 한다. 특히 모든 P와 NP-문제들에 대한 다항 시간 환원성을 갖는 NP-완전문제들이 많은 관심을 받는다. 이는 NP-완전문제 하나를 효율적으로 계산할 수 있으면, 다른 문제들도 디지털 알고리듬의 환원(Reduction)을 통해 효율적으로 계산할 수 있기 때문이다. NP-문제의 양자역학적 계산을 위해서는 큐비트 간의 초연결성이 필요한데, 리드버그 원자플랫폼은 KAIST가 개발한 리드버그 양자선과 Harvard가 개발한 큐비트 이동기술에 의해 확보됐다고 보고 있다. KAIST는 리드버그 양자선을 이용해 임의의 그래프 구조를 구현했고, 최대독립집합으로 불리는 대표적인 NP-완전문제 계산이 가능함을 20큐비트급 실험에서 증명했다.

⑥ 리드버그 양자컴퓨터의 시스템 확장

현재 리드버그 양자시스템의 양적 한계는 원자 250개 정도이다. 위에서 설명한 NP-완전문제에 대한 양자우월성(디지털컴퓨터 대비 계산성능 우위)은 원자 약 5,000개 정도에서 확보될 것으로 예상한다. KAIST를 포함해 Harvard, Ecole Polytechniqe 등에서 개발해 구동 중인 리드버그 양자컴퓨터는 알칼리 원자(주로 루비듐)를 사용하므로 시스템 확장이 쉽지 않다. 따라서 리드버그 양자컴퓨터의 결맞음 시간을 확보하기 위해 광격자시계에 쓰이는 알칼리토류 원자의 사용이 고려되고 있다. 한국의 리드버그 양자컴퓨터 시스템 확장연구는 한국표준과학연구원에서 준비하고 있다. 한국표준과학연구원은 알칼리토류 원자인 이터븀을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터 연구를 2022년 개시했다. 한국표준과학연구원은 한국의 시간 표준을 관리하는 전문 연구 기관으로서 각종 원자시계 기술에 관한 국제적인 연구경쟁력을 갖고 있으며, 특히 이터븀 광격자 원자시계 기술을 보유하고 있다. 따라서 관련 전문 인력과 인프라를 활용해 알칼리토류 원자를 이용한 차세대 리드버그 양자컴퓨터를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 연구 동향

국내의 리드버그 양자컴퓨팅 연구는 현재 KAIST 물리학과에서 주로 수행하고 있으며, 한국표준과학연구원에서 알칼리토류 원자를 이용하는 연구를 시작했다. 그동안 수행된 주요 연구를 요약하면 다음과 같다.

① 중성원자 동시 재배치 연구

레이저 빔을 동적 홀로그램을 프로그램한 액정소자로 반사해, 위치 조절이 가능한 2N개의 광집게를 만들고, 이를 이용하여 N개의 루비듐 원자를 3차원 공간상에 재배치했다. 광집게 간 간섭 현상이 없거나 최소화해 확장 가능한 개수(현재 약 50개)의 원자를 공간상 임의의 구조로 배치할 수 있다.[487)]

② 양자다체계의 열화 현상 연구

1차원 공간에 배치한 중성원자 최대 15개의 양자역학적 다체얽힘 동역학 현상을 관찰했다. 물리학에서 잘 알려진 아이징 모델로 근사해 분석한 결과, 리드버그 다체얽힘 동역학은 이후에 피보나치 그래프로 규명된 제한된 다체에너지 준위들로의 확산현상이며, 포커플랑크 고전 확산모델로 설명될 수 있음을 보여줬다.[488)]

③ 3차원 및 프랙탈 차원의 리드버그 원자 배열의 양자 시뮬레이션

3차원 및 프랙탈 구조로 배치한 리드버그 원자들의 양자다체 기저에너지 상태를 양자 시뮬레이션으로 계산했다. 해밀토니안을 조절해 반강자성 아이징 스핀의 예상 결과와 일치함을 확인했다. 특히 리드버그 원자들의 그래프 구조를 변형해 구조간 다체에너지 준위 변화를 직접 관찰할 수 있었다.[489)]

④ 약한 상호작용 조건의 리드버그 게이트 연구

리드버그 봉쇄 거리 이상에서, 리드버그 원자 게이트를, 리드버그 원자 간의 약한 상호작용을 이용해 구현했다. Ramsey 분광을 통해 관찰한 리드버그 위상 게이트는 근거리의 원자가 있는 상황에서도 적용 가능한 원거리 양자게이트임을 확인할 수 있었다.[490)]

⑤ 원자시계 준위의 베리-위상 게이트 연구(Physical Review Research 2020)

루비듐 핵스핀 준위 간의 베리-위상 게이트를 펨토초 레이저(Femtosecond Laser)를 이용해 구현했다. 기간 간격을 일정하게 준비한 레이저 펄스열을 이용해, 편광의 함수로 주어지는 루비듐 핵스핀 단일 큐비트 라비회전 게이트를 모두 구현할 수 있음을 보여줬다.[491)]

487) Lee et al. (2016), Kim et al. (2016)
488) Kim et al. (2018)
489) Song et al. (2021), Kim et al. (2020)
490) Jo et al. (2020)
491) Song et al. (2020)

⑥ 3차원 원자 이미징 기술 연구

3차원에 배열된 원자 배열에서 방사하는 빛을 준-푸리어공간에 위치한 액정소자로 프로그램해 2차원 평면 카메라로 동시에 이미징했다. 일반적인 이미징에서는 불가능한 이미징 축에 정렬된 원자열 등, 임의의 3차원 원자 배열을 이미징할 수 있게 됐다.[492]

⑦ 리드버그 양자선 및 최대독립집합 계산 연구(Nature Physics 2022)

리드버그 원자 배열에서 직접 연결이 되지 않는 원자들을, 추가로 배치한 원자들(리드버그 원자선)을 이용해 직접 연결(양자역학적으로 동등)이 되도록 했다. 이를 이용해 비평면 그래프 구현을 위해 필수적인 쿠라토프스키 그래프 등을 구현함으로써, 비평면 그래프를 포함한 모든 그래프의 구현이 원리적으로 가능함을 보여줬다. 또한 이를 이용해 NP-완전문제의 하나인 최대독립집합의 해를 양자역학적으로 계산했다.[493]

⑧ platonic graph의 최대독립집합 계산 연구

KAIST연구팀은 세가지 platonic graph (tetrahedron, cube, octahedron) 문제에 대한 최대독립집합 계산연구를 수행하였다.[494] platonic graph 형태를 만들기 위하여 양자선 기술을 하였으며, 계산과정은 리드버그 봉쇄의 양자단열연산을 이용하였다. 3차원구조에 해당하는 그래프 문제의 해결이 2차원에서 가능함을 보였다.

⑨ 광집게를 이용한 원자 큐비트 던지기 연구

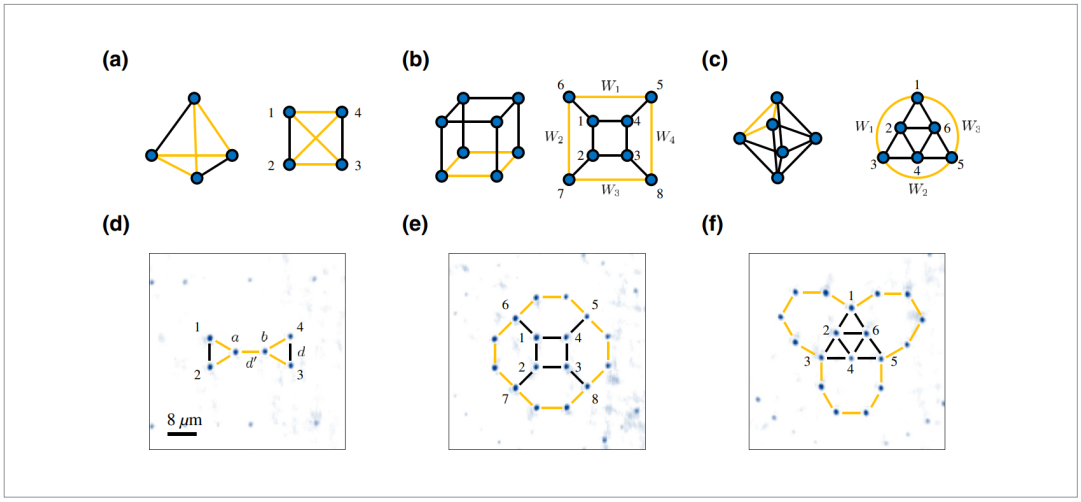
원자의 위치를 이동하기 위해서 지금까지는 원자를 포획한 광집게를 이동시키는 방식이 사용되어 왔다. 하지만 이러한 방식은 광집게가 다른 원자의 위치를 지나갈 경우, 원치않는 물리적 변화를 발생시키는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 원자를 던지고 받는 과정에서만 광집게를 사용하며, 던져진 원자는 광집게없이 자유운동상태를 유지하는 방식의 원자 위치 이동방식을 KAIST에서 개발하였다.[495] 이는 flying qubit구현에 쓰일 수 있으며, 원자의 재배열 과정에서 활용될 수 있다.

⑩ 보조 큐비트를 이용한 원자 그래프의 양자 토모그래피 연구

다체 큐비트로 이루어진 원자 그래프 및 양자시스템의 양자상태 토모그래피를 위해서는 개별 큐비트의 정밀한 제어 및 측정이 필요하다. 다체양자시스템내의 큐비트가 아닌 보조 큐비트를 이용하여, 안정적이고 효율적인 양자상태 토모그래피방식을 제시하였다. 연구팀은 리드버그 원자 배열을 이용하여 N-큐비트 W양자상태를 대상으로 토모그래피 방식을 실험으로도 구현하는 데 성공하였다.[496]

492) Sun et al. (2021)
493) Kim et al. (2022)
494) Byun et al. (2022)
495) Hwang et al. (2023)
496) Kim et al. (2023)

그림 II-3-79 리드버그 원자 배열로 구성한 platonic graph



⑪ 이터븀 원자 큐비트 연구

현재 최외각전자가 하나인 알칼리계열의 루비듐이 중성원자 양자컴퓨터 개발에 널리 사용되고 있다. 이터븀, 스트론튬과 같은 최외각전자가 두 개인 알칼리 토금속 계열 원자는 알칼리계열의 원자 에너지 구조와는 다른 에너지 레벨구조를 지니고 있어, 새로운 양자정보과학의 가능성을 제공한다. KRISS에서는 171-Yb을 이용하여 양자컴퓨터를 개발중에 있다. KRISS 연구의 몇 가지 주안점을 꼽자면 다음과 같다.

① 단광자 리드버그 여기가 가능하여, 안정적이며 빠른 큐비트 얽힘 생성이 가능

② 171-Yb은 핵스핀이 1/2로 이상적인 큐비트 구조를 지님

③ 선폭이 매우 좁은 시계전이선 기반의 큐비트 구성이 가능하여, 양자 컴퓨팅 기술을 양자 메트롤로지에 응용

(3) 적용 분야

현재의 디지털 컴퓨팅으로는 효율적인 계산을 할 수 없는, 조합 최적화 문제에 리드버그 양자컴퓨터가 적용됨으로써 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에 활용될 것으로 예상된다.

7. 양자컴퓨팅 소프트웨어

(1) 기술 동향

국내 양자컴퓨팅 소프트웨어 기술의 경우 양자정보 분야의 이론 연구자들 중심으로 양자정보의 기초 이론 연구를 확장한 양자컴퓨팅 소프트웨어 기술개발이 진행되었다. 광학 분야, 원자분자 분야, 산업응용수학, 순수 분야 등 각 학제의 세부 분야로서 양자컴퓨팅 소프트웨어에 대한 연구지원이 이루어졌다. 2018년 전후로 양자컴퓨팅 소프트웨어의 주제에 대해 독립적인 연구지원이 이루어졌고 목적 지향적인 관련 연구개발이 수행되었다. 이론 물리, 물리 화학, 재료, 금융, 신약 개발 등 복잡한 계산이 필요한 분야에서 양자컴퓨팅 소프트웨어 개발에 참여 및 기여하였다.

(2) 연구 동향

국내의 양자정보 연구자들은 양자컴퓨팅 소프트웨어 전반을 포괄한다. 양자 알고리즘 연구, 물리계 하드웨어 인터페이스 관련 이론 연구, 양자정보이론 연구들이 수행되고 있다. 관련 연구자들은 수학의 난제와 같은 매우 이론적인 주제와 물리계와의 인터페이스를 다루는 실험적인 주제를 포함하여 다양한 학제간 연구 주제들을 다루고 있다. 또한, 양자컴퓨팅 소프트웨어의 개발 및 활용은 양자 물리계를 시뮬레이션하는 연구 주제에 직접적으로 맞닿아 있다.

2018년경 양자컴퓨팅 원천 기술 개발의 국가과제를 통해 이론 연구자들에게 본격적으로 연구를 위한 지원이 이루어졌다. 이후, 양자컴퓨팅 분야 소프트웨어 원천 기술을 확보하려는 노력이 지속되고 있고, 최근 2023년 양자 이득 프로젝트가 개시되어, 현재의 양자 기술을 바탕으로 기존 정보통신기술 대비 우위를 갖는 양자 기술의 탐색에 관한 연구가 촉진되고 있다.

(3) 적용 분야

2020년 전후로 양자컴퓨팅 소프트웨어 분야에서 국내 창업이 다수 이루어져 2023년 현재 양자컴퓨팅 소프트웨어 분야에서 상당한 창업사례가 있다. 양자컴퓨팅 소프트웨어 스타트업의 경우 사용자 인터페이스를 제공하기도 하고, 항공, 금융, 바이오 등 특정 분야에 활용되는 양자 소프트웨어를 개발한다.

제4절 시사점

본 초전도 양자컴퓨팅 백서에서는 해외 및 국내 산학연에서 현재 개발되고 있는 다양한 양자컴퓨팅 기술 동향을 논의했다. 첫째, 초전도 컴퓨팅 측면에서는 미국, 일본, 유럽 등의 선진국은 20년 이상 초전도 양자컴퓨터 관련 원천기술을 꾸준히 연구해왔고, 이 축적된 기술을 바탕으로 양자컴퓨팅 산업계를 형성시키며 양자컴퓨팅 분야의 트렌드를 이끌고 있다. 후발 주자인 중국 역시 정부 주도의 적극적인 투자를 기반으로 최근 60큐비트 이상의 초전도 양자프로세서의 구현을 유수 저널에 보고함으로써 양자컴퓨팅 분야의 리더로 자리 잡았다. 현재 대한민국 역시 양자기술분야에 활발히 투자 중이나, 위에 언급된 선진국들이 달성한 기술 수준에는 10년 이상 뒤처지고 있다. 특히 초전도 양자컴퓨팅과 같은 고체 큐비트 기반 양자컴퓨팅 기술은 극저온 냉각기, 마이크로파 장비, 나노팹 인프라 등 기초 인프라 비용이 높으므로 학계에서는 쉽게 접근하기 어렵다. 따라서 현재까지는 한국표준과학연구원과 같은 정부출연연구소 중심으로 연구개발이 수행됐으나, 전문성을 가진 인력의 부족으로 인해 괄목할만한 성과를 이뤄내진 못했다. 하지만 훗날 초전도 양자컴퓨터가 가져올 광범위한 분야에서의 혁신을 고려한다면, 우리나라도 적극적인 해외 우수 인재 유치, 인력양성, 꾸준한 연구비 지원을 바탕으로 양자컴퓨팅 개발 레이스에 참여해 해외 선진국들과 어깨를 나란히 할 수 있도록 힘써야 할 것이다.

둘째, 양자정보처리를 위한 소자 제작을 위해서는 초고순도, 초고정밀도의 재료와 공정 기술이 필요하다. 하지만 고전 회로 기반의 반도체 산업에서는 이렇게까지 고성능이 필요한 경우가 제한적이기 때문에, 국내에서 자발적으로 본격적인 개발이 이뤄지기가 쉽지 않다. 그러나 긴 호흡을 가지고 반도체 양자점의 기술 개발을 준비해야 한다. 최근 일본의 對한국 수출규제에서 보듯 소재·부품 원천기술의 필요성은 몇 번을 강조해도 지나치지 않다. 따라서 양자 관련 원천·부품 기술 확보의 중요성도 절대 간과해서는 안 된다. 양자기술 소재·부품의 경우 진보된 나노기술을 대부분 포함하므로, 양자 외 타 분야에서도 활용할 수 있다는 점을 고려해 정책 및 투자 방향을 조율해야 한다. 이를 위해 최근 정책적으로 추진 중인 다양한 국내 양자정보과학 연구개발사업을 장기적으로 진행해야 한다. 이것을 토대로 양자정보 과학기술 관련 연구개발 생태계를 꾸준히 조성하고, 후속 사업으로 이어나가 양자시대를 대비해야 한다. 특히 반도체 스핀 큐비트의 잠재력은 산업체 파운드리 공정과 호환성이 높아 지금의 기술로도 대규모의 큐비트를 제작할 수 있다는 점인데, 아직 이것을 명확히 증명한 사례는 없으며, 소수의 그룹만이 파운드리 호환 공정으로 단일 큐비트를 시연했을 뿐이다. 산업체 반도체 공정 전문가와 국내 스핀 큐비트 전문가의 활발한 연계를 통해 대규모 반도체 스핀 큐비트 표준공정을 확립할 필요가 있다.

셋째, 이온 포획 기반 양자플랫폼은 높은 게이트 신뢰도, 긴 결맞음 시간, 확장 가능성과 함께 임의의 양자얽힘이 가능하다는 독특한 장점을 갖고 있어 양자컴퓨터 개발 가능성이 크다. 현재 30개 정도

의 완전한 양자컴퓨터 구현을 달성했으며 다양한 국가의 대학, 기업, 연구소에서 개발을 진행하고 있다. 아쉽게도 국내 연구그룹을 포함한 다른 그룹들과 선두 그룹의 격차는 상당히 벌어져 있다. 그러나 국내 이온 포획 연구진의 시작 시기와 경험을 생각하면 그 격차를 줄이는 것이 불가능은 아니다. 우선 앞서 있는 그룹의 연구 규모, 투자 인력 등을 살펴볼 필요가 있다. IonQ, Innsbruck 대학 등 앞선 그룹의 경우 많은 박사급 인력 및 전문 인력이 연구에 몰두하고 있으며, 연구비 지원도 많이 받고 있다. 국내 연구진이 세계적인 선두 그룹으로 올라서기 위해서는 비슷한 규모의 연구 자원을 투입할 필요가 있다. 또한 관련 부품, 소재, 장비의 개발 및 발전뿐만 아니라 국내로의 수입도 원활하게 진행될 필요가 있다. 양자컴퓨터에 사용하는 일부 핵심 소재, 장비의 경우 국내에선 구매조차 거의 불가능하기 때문이다. 자체 개발에는 많은 시간이 걸리고 기업의 이윤도 생각하지 않을 수 없기에 모든 것을 국내 개발에 의존하기보단, 단기간에는 수입이 원활히 이뤄질 수 있도록 관련 기관의 협조가 필요하며 국내 기술을 확보하는 것은 장기적으로 볼 필요가 있다.

넷째, 양자광학 기반 양자컴퓨터는 물질 큐비트를 이용한 양자컴퓨터와는 다른 방식으로 동작하므로, 양자컴퓨터 구현에 새로운 돌파구를 열어줄 것으로 기대한다. 전 세계적으로 다양한 물리계에서 양자컴퓨터를 구현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으나 아직 시작 단계에 불과하며, 수많은 기술적 난관에 봉착해있다. 따라서 이러한 기술적 난관을 해결하기 위해 노력하는 한편, 이온 트랩, 양자광학, 고체점 결합, 양자점 등 다른 물리계에서 새로운 돌파구를 찾기 위한 연구를 꾸준히 해오고 있다. 특히 최근 양자이득 실험에 성공하면서 그 가능성을 보여주기도 했다. 우리나라는 세계적인 수준의 우수한 양자광학 인력과 기술을 구축하고 있으며, 기존의 숙련된 광기술을 이용할 수 있어, 적절한 지원만 뒷받침된다면 세계적인 경쟁력을 갖출 것으로 예상된다.

다섯째, 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨팅 관련 연구에서 해외 연구그룹과 국내 연구그룹의 기술격차는 5년 이상일 것으로 추측된다. 현재 대부분의 국내 연구들은 해외 연구성과를 배우고 재연하는 수준인데, 그 격차가 좀처럼 좁혀지지 않고 있다. 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 기술을 개발하기 위해서는 초고순도 다이아몬드 성장을 위한 재료공학 기술, NV 센터 생성 및 나노구조물 제작을 위한 반도체공학 기술, 광학적 특성 제어를 위한 광학 기술, 스핀 상태 제어를 위한 전자공학 기술, 그리고 양자상태의 이론적 분석을 위한 물리학까지 다양한 분야의 전문가가 필요하다. 따라서 관련 분야에서의 인력양성 지원과 다양한 분야의 사람들이 어우러져 일할 수 있는 연구 환경이 조성돼야 한다. NV 센터 기반 양자컴퓨터 연구에는 초고순도 다이아몬드 재료, 정밀 스테이지, 고품질 레이저, 단일광자 검출기, 광학계 부품, 마이크로파 생성기, RF 신호처리 부품 등의 다양한 소재, 부품, 장비들이 필요한데 대부분 수입품에 의존하는 실정이다. 특히 최근 반도체 대란과 더불어 다이아몬드 소재, 측정장비, 전자부품 수급이 어려워지면서 세계적으로 다이아몬드 연구 또한 어려움을 겪고 있다. 따라서 양자컴퓨터 연구 관련 소재, 부품, 장비들의 국산화를 위한 지속적인 연구와 지원이 필요하다. 한편 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 기술은 양자메모리, 양자센서, 양자중계기 등 주변 양자기술들과 공

유 가능한 핵심 기술들이 많다. NV 센터 기반의 양자컴퓨터 기술 발전이 주변의 다양한 양자기술 개발로 이어지고, 그러한 결과들이 양자기술 분야의 시장을 깨우고 새로운 산업을 일으키는 기회로 이어지길 기대해 본다.

여섯째, 리드버그 원자 기반의 양자컴퓨팅 부문에서는, 아직은 소형 큐비트급이지만 계산의 복잡도가 높은 비결정다항 등의 조합 최적화 문제를 해결하는 능력을 보여줌으로써 국내 기술 수준도 실험적 단계를 지나 개발 경쟁 단계에 접어들었다고 볼 수 있다. 중성원자의 재배치 기술, 3차원 리드버그 원자의 에너지 준위 시뮬레이션, 이미징 기술, 독립집합 계산 연구 등 다양한 후속 연구도 진행되고 있다. 리드버그 원자 기반의 양자컴퓨팅이 본격적으로 구현되면 물류, 생산관리, 네트워크 디자인 등 많은 분야에서 큰 경제적인 가치를 얻을 것으로 예상된다. 특히 학술적인 성장뿐 아니라, 산업적인 성장이 눈에 띈다. 2022, 2023년에 걸쳐 리드버그 원자 양자컴퓨터 회사인 ColdQuanta, Atom Computing, Pasqal 등의 회사는 각 100만 달러 내외의 펀드레이징 성과를 올렸다. M squared lasers사는 영국의 양자기술 프로그램을 통해서 지원받기 시작하였으며, 독일 및 EU역시 리드버그 원자 컴퓨터 사업 및 벤치마킹 네트워킹을 구축하기 시작하였다. 또한, 중성원자 최초의 상용서비스를 QuEra사가 Amazon을 통하여 클라우드기반으로 시작하였다. 256 큐비트 Rb 원자 기반의 아날로그 컴퓨팅 방식이며, Ising 타입의 해밀토니안을 지원하고, Maximum Independen Set(MIS) 문제 및 Ising 형태의 다체 양자 물리문제 해결이 주된 타겟이다.

양자컴퓨팅 기술 개발의 최종 목표는 양자 소프트웨어를 하드웨어에서 구현하는 것이다. 양자 소프트웨어의 역량이 기존 컴퓨팅 기술 대비 우월하다는 양자 이득이 특정 문제들의 해결에서 존재한다는 사실이 밝혀져 있으며, 양자 이득을 더욱 다양한 문제에서 확보하려는 노력이 진행되고 있다. 이러한 양자 이득을 실제 구현했을 때 과학기술 및 사회적 파급효과는 매우 상당할 것으로 기대된다. 양자 소프트웨어를 구현하기 위해 양자컴퓨팅 하드웨어가 구축되어야 하고, 그 과정에서 하드웨어와의 인터페이스를 위한 소프트웨어 개발이 또한 요구된다. 지난 약 10여 년간 양자컴퓨팅 산업화에서 핵심적인 역할을 수행했던 기업들은 매년 큐비트 개수 증가를 경쟁적으로 발표하여 초기 하드웨어 개발을 주도했다. 2018년 NISQ 기술이란 단어를 통해 당시의 양자 기술을 재정의하고 양자컴퓨팅 하드웨어 및 인프라 구축을 본격적으로 시작할 수 있는 기회를 열었다. NISQ와 같은 초기 양자 기술이 양자 이득을 확보할 수 있을지 확인하는 연구개발 과제는 지난 수년간 가장 중요한 주제였다. 그 사이에 해당 기업들의 기술 개발 로드맵은 2023년 전후로 양자 오류 완화와 같은 소프트웨어를 탑재하고 양자컴퓨팅의 소프트웨어 구현 성능 향상으로 방향을 설정한다.

향후 양자컴퓨팅 기술 개발의 목표는 NISQ 기술에 대한 출구 전략이다. 큐비트 개수를 더 늘려서 규모를 확장할 수 있어야 한다. 또한 NISQ에서 “N”에 해당하는 양자 잡음을 제어할 수 있는 방법을 구체적으로 찾아야 한다. 양자 오류에 대한 제어를 향상하여 양자 소프트웨어 구현의 완성도를 더 높이

고 기존 컴퓨팅 기술이 감당할 수 없는 계산 역량을 양자컴퓨팅이 수행하여 양자 이득이 실제적으로 확보되는 것이 중요하다. 큐비트 개수를 늘리는 규모의 확장과 오류를 더 정확히 제어하는 역량의 향상 모두가 함께 진행되어 NISQ 시대를 벗어나 더 완성도 높은 양자컴퓨팅 기술로 향해야 한다. 양자 소프트웨어 기술은 하드웨어 발전에 동행하여 양자컴퓨팅의 성능 향상을 위한 목표를 공유해야 한다.

참고문헌

• 국내문헌

1	과학기술정보통신부(2021), "양자산업 생태계 활성화를 위한 양자암호통신 시범사업 본격 착수".
2	김영준(2022.07.12), "KISTI, 드림시큐리티에 양자암호통신망 표준 기반 양자 키 관리 기술 이전".
3	변윤재(2022.07.12), “KT-한화시스템, 무선 양자암호 상용화 나선다”.
4	선한결(2022.05.17), “KT, 1㎞ 거리 무선 양자암호 통신 성공…"UAM에도 활용“”.
5	신희강(2022.07.01), "SKT, ‘양자 12년’ 양자암호통신 선도기업 자리매김".
6	심영석(2021.03.03), “표준연·국보연 공동연구 ‘양자직접통신’ 구현 성공”.
7	오현주(2022.06.10), “국정원 '양자암호 장비' 보안기준 발표…"프로토콜 정확성·안전 중요"”.
8	이동화, 조영욱, 임향택, 정호중, 한상욱, 김용수(2021), “고효율 1550nm 양자광원 개발,” 한국광학회 동계학술대회.
9	이선경, 최가현, 최지수, 최지만, 송운, 이용호, 박관열, 정연욱(2022), “5-큐비트급 초전도 양자컴퓨팅 시스템 구축”, 한국표준과학연구원 제5회 양자정보학술대회 Tue-QA-19.
10	장경일(2020.10.27), “'양자정보기술에서 성장동력 찾는다'…강원 미래과학포럼 내일 개최”.
11	정보통신기획평가원(2020), “ICT R&D 기술로드맵 2025”.
12	정예린(2021.05.10), "양자암호 100㎞까지 전송…SKT·KT 장비 호환".
13	정예린·최호(2022.06.12), “‘양자암호통신장비' 공공시장 진입 길 열렸다”.
14	조성흠(2022.03.28), "KT, 서울-부산 구간 양자암호통신 구축…국내 최장 490㎞".
15	최기영(2021.01.28), “道 ‘퀀텀밸리’ 조성 KT 참여 가시화”.
16	최아름(2022.6.10.), “2026년까지 세계 세 번째로 50큐비트 양자컴퓨터 구축.” 정보통신신문.
17	최호(2020.11.16), "KT, 서비스 중단 없는 양자암호 기술 개발".
18	최호(2021.07.22.), "KT, 양자암호 네트워크 통합·자동 관리 솔루션 개발".
19	한국과학기술기획평가원(2019), “범용 양자컴퓨터”.
20	한국표준과학연구원(2018), 양자컴퓨팅 중장기 추진전략 기획연구”.
21	S. Lee et. al JKPS (2021).

• 해외문헌

1	A. Acin et al.(2007), Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks, Phys. Rev. Lett. 98: 230501.
2	A. Artusio-Glimpse et al., (2022) Modern RF Measurements With Hot Atoms: A Technology Review of Rydberg Atom-Based Radio Frequency Field Sensors, IEEE Microwave Magazine, 23, 44-56.

3	A. Grimm, N. E. Frattini, S. Puri, S. O. Mundhada, S. Touzard, M. Mirrahimi, S. M. Girvin, S. Shankar, and M. H. Devoret(2020), Stabilization and operation of a Kerr-cat qubit, Nature 584:205-209
4	A. Jenkins, J. W. Lis, A. Senoo, W. F. McGrew, and A. M. Kaufman(2022), Ytterbium Nuclear-Spin Qubits in an Optical Tweezer Array, Phys. Rev. X 12, 021027.
5	A. K. Ekert(1991), Quantum Cryptography based on Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. 67: 661.
6	A. K. Mohapatra et al., (2007) Coherent Optical Detection of Highly Excited Rydberg States Using Electromagnetically Induced Transparency, PHYSICAL REVIEW LETTERS 98, 113003.
7	A. Kou, W.C. Smith, U. Vool, I.M. Pop, K.M. Sliwa, M. Hatridge, L. Frunzio, and M.H. Devoret(2018), Simultaneous monitoring of fluxonium qubits in a waveguide. Physical Review Applied 9:064022.
8	A. Melville, G. Calusine, W. Woods, K. Serniak, E. Golden, B. M. Niedzielski, D. K. Kim, A. Sevi, J. L. Yoder, E. A. Dauler, and W. D. Oliver(2020), Comparison of dielectric loss in titanium nitride and aluminum superconducting resonators. Applied Physics Letters, 117: 124004.
9	A. Morvan, V. V. Ramasesh, M. S. Blok, J.M. Kreikebaum, K. O'Brien, L. Chen, B. K. Mitchell, R. K. Naik, D. I. Santiago, and I. Siddiqi(2021), Qutrit randomized benchmarking, Physical Review Letters 126:210504.
10	A. Muller, J. Breguet and N. Gisin(1993), Experimental Demonstration of Quantum Cryptography Using Polarized Photons in Optical Fibre over More than 1km, Europhysics Letters, 23(6): 383-388.
11	A. Omran, H. Levine, M. D. Lukin et al.(2019), Generation and manipulation of Schrodinger cat states in Rydberg atom arrays, Science 365(6453), 570-574.
12	A. Rubenok, J. A. Slater, P. Chan, I. Lucio-Martinez, and W. Tittel(2013), Real-world two-photon interference and proof-of-principle quantum key distribution immune to detector attacks, Physics Review Letters, 111: 130501.
13	A. Sipahigil et al.(2012), Quantum interference of single photons from remote nitrogen-vacancy centers in diamond, Phys. Rev. Lett. 108, 143601.
14	A. Tosato et al.(2021), A high-mobility hole bilayer in a germanium double quantum well, ArXiv: 2201.06862.
15	A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.- S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin and R. J. Schoelkopf(2004), Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics. Nature, 431: 162-167.
16	A.M.J. Zwerver et al.(2022), Qubits made by advanced semiconductor manufacturing, Nature Electronics 5, 184-190.
17	A.Peters, K.Y Chung, and S.Chu(2001), High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia, Vol.38(25).
18	Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow and Jay M. Gambetta(2017), Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. Nature, 549: 242-246.
19	Abhinav Kandala, Kristan temme, Antonio D. Co·rcoles, Antonio Mezzacapo, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta(2019), Error mitigation extends the computational reach of a noisy quantum processor, Nature 567: 491-495.
20	Abobeih, M.H., Wang, Y., Randall, J. et al.(2022), Fault-tolerant operation of a logical qubit in a diamond quantum processor, Nature 606, 884-889.
21	Adi Shamir(1979), How to share a secret, Communications of the ACM, 22(11): 612-613.
22	Aguado, A., Lopez, V., Lopez, D., Peev, M., Poppe, A., Pastor, A., & Martin, V.(2019), The engineering of software-defined quantum key distribution networks.IEEE Communications Magazine, 57(7), 20-26.

23	Air Force Research Laboratory Technical Report ADA502521 AFRL-RI-RS-TR-2009-180 (2009).
24	Alejandro Aguado et al.(2020), Quantum cryptography networks in support of path verification in service function chains, Journal of Optical Communications and Networking, 12(4), B9.
25	Alex B. Grilo, Or Sattath, Quoc-Huy Vu(2023), Encryption with Quantum Public Keys, Cryptology ePrint Archive, vol. 345, pp. 1-16.
26	Alexander D. Hill, Mark J. Hodson, Nicolas Didier, and Matthew J. Reagor(2021), Realization of arbitrary doubly-controlled quantum phase gates, arXiv:2108.01652v1.
27	Alexander P. M. Place, Lila V. H. Rodgers, Pranav Mundada, Basil M. Smitham, Mattias Fitzpatrick, Zhaoqi Leng, Anjali Premkumar, Jacob Bryon, Andrei Vrajitoarea, Sara Sussman, Guangming Cheng, Trisha Madhavan, Harshvardhan K. Babla, Xuan Hoang Le, Youqi Gang, Berthold Jäck, András Gyenis, Nan Yao, Robert J. Cava, Nathalie P. de Leon and Andrew A. Houck(2021), New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds. Nature Communications, 12: 1779.
28	Ali-Khan, I., C. J. Broadbent, and J. C. Howell(2007), Large-Alphabet Quantum Key Distribution Using Energy-Time Entangled Bipartite States, Physical Review Letters, 98: 060503.
29	Alistair R Milne, Claire L Edmunds, Cornelius Hempel, Federico Roy, Sandeep Mavadia, Michael J Biercuk(2020), Phase-modulated entangling gates robust to static and time-varying errors, Physical Review Applied, 13(2), 024022.
30	Alleaume, R., Roueff, F., Diamanti, E., & Lutkenhaus, N.(2009), Topological optimization of quantum key distribution networks. New Journal of Physics, 11(7), 075002.
31	Amy K. Robinson et al., (2021) Determining the angle-of-arrival of a radio-frequency source with a Rydberg atom-based sensor, Appl. Phys. Lett. 118, 114001., Matthew T. Simons et al., (2021) Rydberg atom-based sensors for radio-frequency electric field metrology, sensing, and communications, Measurement: Sensors 18, 100273.
32	András Gyenis et al.(2021), Experimental Realization of a Protected Superconducting Circuit Derived from the 0-π Qubit, PRX Quantum 2, 010339.
33	Andrew Byun, Minhyuk Kim, and Jaewook Ahn(2022), Finding the Maximum Independent Sets of Platonic Graphs Using Rydberg Atoms, PRX Quantum 3, 030305.
34	Andrew Conrad, Samantha Isaac, Roderick Cochran, Daniel Sanchez-Rosales, Brian Wilens, Akash Gutha, Tahereh Rezaei, Daniel J. Gauthier, Paul Kwiat(2021), Drone-based quantum key distribution, Free-Space Laser Communications XXXIII: 116780.
35	Andrew Eddins, Mario Motta, Tanvi P. Gujarati, Sergey Bravyi, Antonio Mezzacapo, Charles Hadfield, and Sarah Sheldon(2022), Doubling the size of quantum simulators by entanglement forging, PRX Quantum 3: 010309.
36	ANDREY JARMOLA, SEAN LOURETTE et al.(2021), Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope, Science Advances 7(43).
37	Ani Nersisyan,Stefano Poletto,Nasser Alidoust,Riccardo Manenti,Russ Renzas, Cat-Vu Bui, Kim Vu, Tyler Whyland, Yuvraj Mohan, Eyob A. Sete, Sam Stanwyck, Andrew Bestwick, and Matthew Reagory(2019), Manufacturing low dissipation superconducting quantum processors. 2019 IEEE International Electron Devices Meeting(IEDM).
38	Anjali Premkumar, Conan Weiland, Sooyeon Hwang, Berthold Jäck, Alexander P. M. Place, Iradwikanari Waluyo, Adrian Hunt, Valentina Bisogni, Jonathan Pelliciari, Andi Barbour, Mike S. Miller, Paola Russo, Fernando Camino, Kim Kisslinger, Xiao Tong, Mark S. Hybertsen, Andrew A. Houck and Ignace Jarrige(2021), Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits. Communication Materials, 2: 72.
39	Armin Tavakoli et al.(2021), Mutually unbiased bases and symmetric informationally complete measurements in Bell experiments Science Advances 7, 7.

40	Aron Vanselow, Paul Kaufmann, Ivan Zorin, Bettina Heise, Helen M. Chrzanowski, and Sven Ramelow(2020), Frequency-domain optical coherence tomography with undetected mid-infrared photons, Optica 7, 1729-1736.
41	Austin G. Fowler, Matteo Mariantoni, John M. Martinis, and Andrew N. Cleland(2012), Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation, Physical Review A 86:032324.
42	B. Foxen, J. Y. Mutus, E. Lucero, R. Graff, A. Megrant, Yu Chen, C. Quintana, B. Burkett, J. Kelly, E. Jeffrey, Yan Yang, Anthony Yu, K. Arya, R. Barends, Zijun Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, T. Huang, P. Klimov, M. Neeley, C. Neill, P. Roushan, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, T. C. White and John M Martinis(2017), Qubit compatible superconducting interconnects. Quantum Science and Technology, 3(1): 014005.
43	B. Huber et al., (2011) GHz Rabi Flopping to Rydberg States in Hot Atomic Vapor Cells, Physcal Reviews Letter 107, 243001.
44	Barrett, J., L. Hardy, and A. Kent(2005), No signaling and quantum key distribution, Physics Review Letters95, 010503.
45	Ben Stray, Andrew Lamb et al.(2022), Quantum sensing for gravity cartography, Nature 602, 590-594.
46	Benjamin K. Malia, Yunfan Wu, Julián Martínez-Rincón & Mark A. Kasevich(2022), Distributed quantum sensing with mode-entangled spin-squeezed atomic states, Nature, 612: 661.
47	Bennett, C.H. & Brassard, G.(1989), Experimental quantum cryptography: the dawn of a new era for quantum cryptography: the experimental prototype is working, Sigact News 20: 78-80.
48	Bharti, Kishor et. al.(2022), Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms, Rev. Mod. Phys. 94, 015004.
49	Blakey, P.S., Liu, H., Papangelakis, G. et al.(2022), Quantum and non-local effects offer over 40 dB noise resilience advantage towards quantum lidar, Nature Communications 13, 5633.
50	Boaron, A., Boso, G., Rusca, D., Vulliez, C., Autebert, C., Caloz, M., & Zbinden, H.(2018), Secure quantum key distribution over 42`1 km of optical fiber. Physical review letters,121(19), 190502.
51	Bornet, G., Emperauger, G., Chen, C. et al.(2023), Scalable spin squeezing in a dipolar Rydberg atom array, Nature 621, 728-733.
52	Borsoi, F., Hendrickx, N.W., John, V. et al.(2023), Shared control of a 16 semiconductor quantum dot crossbar array. Nat. Nanotechnol.
53	Bourennane, M., A. Karlsson, and G. Bjork(2001), Quantum key distribution using multilevel encoding, Physical Review A, 64: 012306.
54	Bradley K. Mitchell, Ravi K. Naik, Alexis Morvan, Akel Hashim, John Mark Kreikebaum, Brian Marinelli, Wim Lavrijsen, Kasra Nowrouzi, David I. Santiago, and Irfan Siddiqi(2021), Hardware-Efficient Microwave-Activated Tunable Coupling between Superconducting Qubits, Phyiscal Review Letters 127:200502.
55	Bradley, C.E., de Bone, S.W., Möller, P.F.W. et al.(2022), Robust quantum-network memory based on spin qubits in isotopically engineered diamond. npj Quantum Inf 8, 122.
56	Bravyi, Sergey, Gosset, David and Koenig, Robert(2018), Quantum advantages with shallow circuits, Science Vol. 362, Issue 6412, pp. 308-31.
57	Byung Kwon Park, Min Ki Woo, Yong-Su Kim, Young-Wook Cho, Sung Moon, and Sang-Wook Han(2020), User-independent optical path length compensation scheme with sub-nanosecond timing resolution for a 1×N quantum key distribution network system, Photonics Research, 8: 296-302.
58	C. Freier, M. Hauth1 et al.(2016), Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability, Journal of Physics: Conference Series 723(012050).

59	C. G. Wade et al., (2017) Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence, Nature Photon 11.
60	C. H. Bennett et al.(1992), Quantum Cryptography without Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. 68: 557.
61	C. L. Holloway et al., (2014) Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe: From Self-Calibrated Measurements to Sub-Wavelength Imaging, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 62(12).
62	C. Roh, G. Gwak, and Y.-S. Ra(2021), Robust squeezed light against mode mismatch using a self imaging optical parametric oscillator, Sci. Adv. 11, 18991.
63	C. Sheng, J. Hou, X. He, K. Wang, R. Guo, J. Zhuang, B. Mamat, P. Xu, . Liu, J. Wang, and M. Zhan(2022), Defect-Free Arbitrary-Geometry Assembly of Mixed-Species Atom Arrays, Phys. Rev. Lett. 128, 083202.
64	C. Song, K. Xu, H. Li, H. Fan, D. Zheng, H. Wang et al.(2019), Generation of multicomponent atomic Schrödinger cat states of up to 20 qubits, Science 365, 574.
65	C. Sparrow et al.(2018), Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics, Nature 557, 660.
66	C. T. Fancher, et. al., (2021) Microwave-field sensing via electromagnetically induced absorption of Rb irradiated by three-color infrared lasers, IEEE Transactions on Quantum Engineering 2.
67	C. J. Ballance, T. P. Harty, N. M. Linke, M. A. Sepiol, and D. M. Lucas(2016), High-fidelity quantum logic gates using trapped-ion hyperfine qubits. Physical review letters, 117(6), 060504.
68	Cao, Y., Zhao, Y., Li, J., Lin, R., Zhang, J., & Chen, J.(2021), Hybrid trusted/untrusted relay-based quantum key distribution over optical backbone networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 39(9), 2701-2718.
69	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, J., Yu, X., Ma, Z., & Zhang, J.(2019), Cost-efficient quantum key distribution (QKD) over WDM networks. Journal of Optical Communications and Networking, 11(6), 285-298.
70	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, J., Yu, X., Ma, Z., & Zhang, J.(2019), KaaS: Key as a service over quantum key distribution integrated optical networks. IEEE Communications Magazine, 57(5), 152-159.
71	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, Q., Zhang, J., Ng, S. X., & Hanzo, L.(2022), The evolution of quantum key distribution networks: On the road to the qinternet. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24(2), 839-894.
72	Carles Roch I Carceller et al.(2021), Quantum vs. noncontextual semi-device-independent randomness certification, arXiv: 2112.09678[quant-ph].
73	Caroline Figgatt, Aaron Ostrander, Norbert M Linke, Kevin A Landsman, Daiwei Zhu, Dmitri Maslov, Christopher Monroe(2019), Parallel entangling operations on a universal ion-trap quantum computer. Nature, 572(7769), 368-372.
74	Catxere A. Casscio, Lars S. Madsen, et al., (2021) Quantum-enhanced nonlinear microscopy, Nature 594(201).
75	Chang Ho Hong, Jin Gak Jang, Jino Heo, Hyung-Jin Yang(2020), Quantum digital signature in a network, Quantum Information Processing 19: 18.
76	Chang Ho Hong, Jino Heo, Jin Gak Jang, Daesung Kwon(2017), Quantum identity authentication with single photon, Quantum Information Processing 16: 236.
77	Changhyun Jung, Woojun Lee, Junho Jeong, Minjae Lee, Yunjae Park, Taehyun Kim and Dong-Il "Dan" Cho(2021), A microfabricated ion trap chip with a sloped loading slot to minimize exposing trapped ions to stray charges, Quantum Science and Technology, 6(4), 044004.
78	Changsoon Kim, Caleb Knoernschild, Bin Liu, and Jungsang Kim(2007), Design and characterization of MEMS micromirrors for ion-trap quantum computation, IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 13(2), 322-329.

79	Charles H. Bennett and Gilles Brassard(1989), The dawn of new era for quantum cryptography : the experimental prototype is working. Sigact News, 20(4): 78–80.
80	Charles Neill, Pedran Roushan, K Kechedzhi, Sergio Boixo, Sergei V Isakov, V Smelyanskiy, A Megrant, B Chiaro, A Dunsworth, K Arya, Rami Barends, B Burkett, Y Chen, Z Chen, A Fowler, B Foxen, M Giustina, R Graff, E Jeffrey, T Huang, J Kelly, P Klimov, E Lucero, J Mutus, M Neeley, C Quintana, D Sank, A Vainsencher, J Wenner, TC White, Hartmut Neven, John M Martinis(2017), Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer. Science Advances, 3(2), e1601540.
81	Chen, C., Bornet, G., Bintz, M. et al.(2023), Continuous symmetry breaking in a two-dimensional Rydberg array, Nature 616, 691–695.
82	Chenghui Yu, Weicheng Zhong, Brian Estey, Joyce Kwan, Richard H. Parker, Holger Müller(2019), Atom-interferometry measurement of the fine structure constant, Annalen der Physik 531(1800346).
83	Cheng-Zhi Peng, Tao Yang, Xiao-Hui Bao, Jun-Zhang, Xian-Min Jin, Fa-Yong Feng, Bin Yang, Jian Yang, Juan Yin, Qiang Zhang, Nan Li, Bao-Li Tian, Jian-Wei Pan(2005), Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13km: towards satellite-based global quantum communication, Phys. Rev. Lett. 94: 150501.
84	Chenlu Wang, Xuegang Li, Huikai Xu, Zhiyuan Li, Junhua Wang, Zhen Yang, Zhenyu Mi, Xuehui Liang, Tang Su, Chuhong Yang, Guangyue Wang, Wenyan Wang, Yongchao Li, Mo Chen, Chengyao Li, Kehuan Linghu, Jiaxiu Han, Yingshan Zhang, Yulong Feng, Yu Song, Teng Ma, Jingning Zhang, Ruixia Wang, Peng Zhao, Weiyang Liu, Guangming Xue, Yirong Jin and Haifeng Yu(2022), Towards practical quantum computers: transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. npj Quantum Information, 8: 3.
85	Chiorescu, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans and J.E. Mooij(2003), Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit. Science, 299(5614): 1869–1871.
86	Choi, T., Debnath, S., Manning, T. A., Figgatt, C., Gong, Z. X., Duan, L. M., & Monroe, C. (2014), Optimal quantum control of multimode couplings between trapped ion qubits for scalable entanglement. Physical review letters, 112(19), 190502.
87	Christian Kraglund Andersen, Ants Remm, Stefania Lazar, Sebastian Krinner, Nathan Lacroix, Graham J. Norris, Mihai Gabureac, Christopher Eichler, and Andreas Wallraff(2020), Repeated quantum error detection in a surface code, Nature Physics 16:875–880.
88	Chun Ju Youn; Haesin Ko; Byung-Seok Choi; Joong-Seon Choe; Kap-Joong Kim; Jong-Hoi Kim; Yongsoon Baek(2018), Optical Components and System for Free-Space Quantum Key Distribution, The 23rd OptoElectronics and Communications Conference(OECC 2018) July 02–06, 2018, Jeju, Korea.
89	Chun-Hui Zhang, Xingyu Zhou, Chun-Mei Zhang, Jian Li, Qin Wang(2021), Twin-field quantum digital signatures, Opt. Lett. 46: 3757–3760.
90	D. Barredo, S. de Léséleuc, A. Browaeys, et al.(2016), An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary two-dimensional atomic arrays, Science 354(6315) 1021–1023.
91	D. Barredo, V. Lienhard, P. Scholl, S. de L´es´eleuc, T. Boulier, A. Browaeys, and T. Lahaye(2020), Three-Dimensional Trapping of Individual Rydberg Atoms in Ponderomotive Bottle Beam Traps, Phys. Rev. Lett. 124, 023201.
92	D. Bluvstein, M. D. Lukin et al.(2022), A quantum processor based on coherent transport of entangled atom arrays, Nature 604, 451.
93	D. D. Esposti et al.(2022), Wafer-scale low-disorder 2DEG in 28Si/SiGe passivated by dichlorosilane, ArXiv: 2202.08090.
94	D. Gatto Monticone et al., (2014) Beating the Abbe Diffraction Limit in Confocal Microscopy via Nonclassical Photon Statistics, Phyical Review Letters 113.

95	D. K. Weiss, Andy C. Y. Li, D. G. Ferguson, and Jens Koch(2019), Spectrum and coherence properties of the current-mirror qubit, Phys. Rev. B 100, 224507.
96	D. Lee, J. Lee, S. Hong, H.-T. Lim, Y.-W. Cho, S.-W. Han, H. Shin, J. Rehman, and Y.-S. Kim(2022), Error-mitigated photonic variational quantum eigensolver using a single-photon ququart, Optica 9, 88.
97	D. Lee, T. Pramanik, S. Hong, Y.-W. Cho, H.-T. Lim, S. Chin, and Y.-S. Kim(2022), Entangling three identical particles via spatial overlap, Opt. Express 30, 30525.
98	D. R. W. Yost, M. E. Schwartz, J. Mallek, D. Rosenberg, C. Stull, J. L. Yoder, G. Calusine, M. Cook, R. Das, A. L. Day, E. B. Golden, D. K. Kim, A. Melville, B. M. Niedzielski, W. Woods, A. J. Kerman and W. D. Oliver(2020), Solid-state qubits integrated with superconducting through-silicon vias. npj Quantum Information, 6: 59.
99	D. Savoie et al.(2018), Interleaved atom interferometry for high-sensitivity inertial measurements, Science Advances 4(12), eaau7948.
100	D. V. Reddy, R. R. Nerem, S. W. Nam, R. P. Mirin, and V. B. Verma(2020), Superconducting nanowire single-photon detectorswith 98% system detection efficiency at 1550nm, Optica 7, 1649.
101	D. Zajac(2018), Resonantly driven CNOT gate for electro spins, Science 359, 439~442.
102	Daniel Gottesman et al.(2001), Encoding a qubit in an oscillator, Phys. Rev. A 64, 012310.
103	Daniel Gottesman(2000), Theory of quantum secret sharing, Physical Review A, 61(4): 042311.
104	Daniel Gottesman, Isaac Chuang(2001), Quantum digital signatures, Preprint arXiv:quant-ph/0105032.
105	David Hucul, Justin E. Christensen, Eric R. Hudson, and Wesley C. Campbell(2017), Spectroscopy of a synthetic trapped ion qubit. Physical review letters, 119(10), 100501.
106	Deutsch, David(1980), Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, Proceedings of the Royal Society. 400 (1818): 97-117.
107	Ding, Y., D. Bacco, K. Dalgaard, X. Cai, X. Zhou, K. Rottwitt, and L. K. Oxenløwe(2017), High-dimensional quantum key distribution based on multicore fiber using silicon photonic integrated circuits, npj Quantum Information 3(250): 1-7.
108	Dominic Mayers and Andrew Yao(1998), Quantum cryptography with imperfect apparatus, Proceedings of the 39th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, FOCS '98 (IEEE Computer Society, Washington, DC) 503-509.
109	Dong Hwan Kim, Yonggi Jo, Duk Y. Kim, Taek Jeong, Jihwan Kim, Nam Hun Park, Zaeill Kim, and Su-Yong Lee(2023), Gaussian quantum illumination via monotone metrics, Physical Review Research, 5:033010.
110	Donghwa Lee, Seongjin Hong, Young-Wook Cho, Hyang-Tag Lim, Sang-Wook Han, Hojoong Jung, Sung Moon, Kwang Jo Lee, and Yong-Su Kim(2020), Reference-frame-independent, measurement-device-independent quantum key distribution using fewer quantum states, Optics Letters, 45: 2624-2627.
111	E. Kaneda, and P. G. Kwiat(2019), High-efficiency single-photon generation via large-scale active time multiplexing, Sci. Adv. 5, eaaw8586.
112	E. Lee, S. M. Lee, and H. S. Park(2019), Relative time multiplexing of heralded telecom-band single-photon sources using switchable optical fiber delays, Opt. Express 27, 24545.
113	E. Pelucchi et al.(2022), The potential and global outlookof integrated photonics forquantum technologies, Nature Rev. Phys. 4, 194.
114	E. Togan et al.(2010), Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit," Nature 466, 730.
115	Ebru Dogan et al.(2023), Two-Fluxonium Cross-Resonance Gate, Phys. Rev. B 20, 024011.

116	Eckner, W.J., Darkwah Oppong, N., Cao, A. et al.(2023), Realizing spin squeezing with Rydberg interactions in an optical clock, Nature 621, 734–739.
117	Élie Gouzien and Nicolas Sangouard(2021), Factoring 2048-bit RSA Integers in 177 Days with 13436 Qubits and a Multimode Memory, Physical Review Letters 127: 140503.
118	Elliott, C., Colvin, A., Pearson, D., Pikalo, O., Schlafer, J., & Yeh, H.(2005), Current status of the DARPA quantum network, In Quantum Information and computation III(Vol. 5815, pp. 138–149). SPIE.
119	Eric Hyyppä et al.(2022), Unimon qubit, Nat. Commun. 13, 6895.
120	Ernest Y.-Z. Tan(2021), Prospects for device-independent quantum key distribution, arXiv 2111.11769.
121	Etcheverry, S., Cañas, G., Gómez, E. et al.(2013), Quantum key distribution session with 16-dimensional photonic states, Scientific Report, 3: 2316.
122	F. Dolde et al.(2013), Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond, Nat. Phys. 9, 139–143.
123	F. H. L. Koppens et al.(2006), Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot, Nature 442, 766.
124	F. Mattioli, Z. Zhou, A. Gaggero, R. Gaudio, R. Leoni, and A. Fiore(2016), Photon-counting and analog operation of a 24-pixel photon number resolving detector based onsuperconducting nanowires, Opt. Express 24, 9067.
125	F. Vernuccio, A. Bresci, V. Cimini, A. Giuseppi, G. Cerullo, D Polli, and C. M. Valensise(2022), Artificial Intelligence in Classical and Quantum Photonics, Laser Photon. Rev. 16, 2100399.
126	Farhi, Edward, Goldstein, Jeffery and Gutmann, Sam(2014), A quantum approximate optimization algorithm, arXiv:1411.4028.
127	Farhi, Edward, Goldstone, Jeffrey, Gutmann Jeffrey and Sipser, Michael(2000), Quantum Computation by Adiabatic Evolution, arXiv:quant-ph/0001106.
128	Fei Yan, Simon Gustavsson, Archana Kamal, Jeffrey Birenbaum, Adam P Sears, David Hover, Ted J. Gudmundsen, Danna Rosenberg, Gabriel Samach, S Weber, Jonilyn L. Yoder, Terry P. Orlando, John Clarke, Andrew J. Kerman and William D. Oliver(2016), The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility. Nature Communications, 7: 12964.
129	Feng Bao, Hao Deng, Dawei Ding, Ran Gao, Xun Gao, Cupjin Huang, Xun Jiang, Hsiang-Sheng Ku, Zhisheng Li, Xizheng Ma, Xiaotong Ni, Jin Qin, Zhijun Song, Hantao Sun, Chengchun Tang, Tenghui Wang, Feng Wu, Tian Xia, Wenlong Yu, Fang Zhang, Gengyan Zhang, Xiaohang Zhang, Jingwei Zhou, Xing Zhu, Yaoyun Shi, Jianxin Chen, Hui-Hai Zhao, and Chunqing Deng(2022), Fluxonium: an alternative qubit platform for high-fidelity operations. Physical Review Letters 129: 010502.
130	Ferdinand Kuemmeth(2020), Hendrik Bluhm Roadmap for gallium arsenide spin qubits.
131	Florian Kranzl, Manoj K. Joshi, Christine Maier, Tiff Brydges, Johannes Franke, Rainer Blatt, and Christian F. Roos(2022), Controlling long ion strings for quantum simulation and precision measurements. Physical Review A, 105(5), 052426.
132	Francesco Vedovato et al.(2021), Report on testbed replicability and performance, University of Padova.
133	Frank Arute et al.(2019), Quantum Supremacy using a programmable superconducting processor, Nature 574:505–510.
134	Frank Arute, Kunal Arya et al.(2019), Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 574: 505–510.
135	G. Balasubramanian et al.(2009), Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond, Nat. Mater. 8(5), 383–387.

136	G. Brida, M. Genovese, and I.Ruo Berchera. (2010) Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging, Nature Photonics 4.
137	G. De Lange et al.(2010), Universal dynamical decoupling of a single solid-state spin from a spin bath, Science 330, 60.
138	G. L. Roberts, M. Lucamarini, Z. L. Yuan, J. F. Dynes, L. C. Comandar, A. W. Sharpe, A. J. Shields, M. Curty, I. V. Puthoor, E. Andersson(2017), Experimental measurement-device-independent quantum digital signature, Nature Communication 8:1098.
139	G. R. Blakley(1979), Safeguarding Cryptographic Keys, 1979 International Workshop on Managing Requirements Knowledge(MARK), 48: 313-318.
140	G. Waldherr et al.(2014), Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register, Nature 506, 204.
141	Gabriel Popkin(2019), Waiting for the quantum simulation revolution. Physics, 12, 112.
142	Gabriela Barreto lemos et al., (2014) Quantum imaging with undetected photonsm, Nature 512(409).
143	Ghernaouti-Hélie, S., & Sfaxi, M. A.(2005), Guaranteerring security of financial transaction by using quantum cryptography in banking environment, In International Conference on E-Business and Telecommunication Networks(pp. 139-149), Springer, Berlin, Heidelberg.
144	Giuseppe Ortolano, Elena Losero, Stefano Pirandola, Marco Genovese, Ivano Ruo-Berchera1(2021), Experimental quantum reading with photon counting, Science Advances, 7: eabc7796.
145	Google Quantum AI and Collaborators(2022), Formation of robust bound states of interacting photons, arXiv:2206.06254.
146	Google Quantum AI(2022), Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, arXiv:2207.06431.
147	Google Quantum AI(2023), Suppressing quantum errors by scaling asurface code logical qubit, Nature 614, 676.
148	Grosshans, F., Grangier, P.(2002), Continuous Variable Quantum Cryptography Using Coherent States, Physical Review Letters, 88: 057902.
149	Grover, Lov K(1996), A fast quantum mechanical algorithm for database search, Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, 212.
150	Gumu, K., Eriksson, T.A., Takeoka, M. et al.(2021), A novel error correction protocol for continuous variable quantum key distribution, Scientific Reports, 11: 10465.
151	Gwanyeol Park, Gahyun Choi, Jisoo Choi, Jiman Choi, Soon-Gul Lee, Kwan-Woo Lee, Woon Song, and Yonuk Chong(2020), Observation of a strongly enhanced relaxation time of an in-situ tunable transmon on a silicon substrate up to the purcell limit approaching 100 μs, Journal of the Korean Physical Society 76(11): 1029-1034.
152	H. Bernien et al.(2012), Two-photon quantum interference from separate nitrogen vacancy centers in diamond, Phys. Rev. Lett. 108, 043604.
153	H. Bernien et al.(2013), Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres, Nature 497, 86.
154	H. Jo, Y. Song, M. Kim, and J. Ahn(2020), Rydberg Atom Entanglements in the Weak Coupling Regime, Physical Review Letters 124, 033603.
155	H. Kim, W. Lee, H. Lee, H. Jo, Y. Song, and J. Ahn(2016), In situ single-atom array synthesis using dynamic holographic optical tweezers, Nature Communications 7, 13317.
156	H. Kim, Y. Park, K. Kim, H.-S. Sim, and J. Ahn(2018), Detailed balance of thermalization dynamics in Rydberg atom quantum simulators, Physical Review Letters 120, 180502.

157	H. Sun, Y. Song, A. Byun, H. Jeong, and J. Ahn(2021), Imaging three-dimensional single-atom arrays all at once, Optics Express 29(3), 4082-4090.
158	H. Vahlbruch, M. Mehmet, K. Danzmann, and R. Schnabel(2016), Detection of 15 dB Squeezed States of Light and their Application for the AbsoluteCalibration of Photoelectric Quantum Efficiency, Phys. Rev. Lett. 117, 110801.
159	H. Wang et al.(2019), Boson Sampling with 20 Input Photons and a 60-Mode Interferometer in a 1014-Dimensional Hilbert Space, Phys. Rev. Lett. 123, 250503.
160	H.-K. Lo and H. F. Chau(1999), Unconditional Security Of Quantum Key Distribution Over Arbitrarily Long Distances, Science 283: 2050.
161	H.-S. Zhong et al.(2018), 12-Photon Entanglement and Scalable Scattershot Boson Sampling with Optimal Entangled-Photon Pairs from Parametric Down-Conversion, Phys. Rev. Lett. 121, 250505.
162	H.-S. Zhong et al.(2020), Quantum computational advantage using photons, Science 370, 1460.
163	Hans Dehmelt(1990), Experiments with an isolated subatomic particle at rest. Reviews of modern physics, 62(3), 525.
164	Hansub Hwang, Andrew Byun, Juyoung Park, Sylvain de Léséleuc, and Jaewook Ahn(2023), Optical tweezers throw and catch single atoms, Optica 10, 401-406.
165	Harper R. Grimsley, Sophia E. Economou, Edwin Barnes, and Nicholas J. Mayhall(2019), An adaptive variational algorithm for exact molecular simulations on a quantum computer, Nature Communications 10: 3007.
166	Heasin Ko, Kap-Joong Kim, Joong-Seon Choe, Byung-Seok Choi, Jong-Hoi Kim, Yongsoon Baek & Chun Ju Youn(2018), Experimental filtering effect on the daylight operation of a free-space quantum key distribution, Scientific Reports, 8: 15315.
167	Helin Zhang, Srivatsan Chakram, Tanay Roy, Nathan Earnest, Yao Lu, Ziwen Huang, D.K. Weiss, Jens Koch, and David I. Schuster(2021), Universal fast-flux control of a coherent, low-frequency qubit. Physical Review X, 11: 011010.
168	High-sensitivity quantum sensing with pump-enhanced spontaneous parametric down-conversion, APL Photonics 8, 051301 (2023).
169	Honggi Jeon, Nojun Park, Jiyong Yu, Yeong-Dae Kwon, Dahyun Yum & Wonho Jhe(2021), Coherent control of 171 Yb+ ion qubit states and thermometry using motional decoherence, Journal of the Korean Physical Society, 78(4), 251-258.
170	Hongwei Liu, Jipeng Wang, Haiqiang Ma, and Shihai Sun(2018), Polarization-multiplexing-based measurement-device-independent quantum key distribution without phase reference calibration, Optica, 5: 902-909.
171	Howard Barnum, Claude Crepeau, Daniel Gottesman, Adam Smith, Alain Tapp(2002), Authentication of quantum messages, 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Proceedings. IEEE, 2002, pp. 449-458.
172	Hua-Jian Ding, Jing-Jing Chen, Liang Ji, Xing-Yu Zhou, Chun-Hui Zhang, Chun-Mei Zhang, and Qin Wang(2020), 280km experimental demonstration of a quantum digital signature with one decoy state, Opt. Lett. 45: 1711-1714.
173	Huang, D., P. Huang, D. Lin, and G. Zeng(2016), Long-distance continuous-variable quantum key distribution by controlling excess noise, Scientific Reports, 6; 19201.

174	Hua-Ying Liu, Xiao-Hui Tian, Changsheng Gu, Pengfei Fan, Xin Ni, Ran Yang, Ji-Ning Zhang, Mingzhe Hu, Jian Guo, Xun Cao, Xiaopeng Hu, Gang Zhao, Yan-Qing Lu, Yan-Xiao Gong, Zhenda Xie, and Shi-Ning Zhu(2021), Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes, Phys. Rev. Lett. 126(2): 020503.
175	Hugo Zbinden(2020), Report on Testbed and Use-Case Demonstrator Deployment, University of Geneva.
176	Hugues-Salas, E., Ntavou, F., Gkounis, D., Kanellos, G. T., Nejabati, R., & Simeonidou, D.(2019), Monitoring and physical-layer attack mitigation in SDN-controlled quantum key distribution networks, Journal of Optical Communications and Networking, 11(2), A209-A218.
177	Hyeong-Soon Jang, Donghwa Lee, Hyungjun Heo, Yong-Su Kim, Hyang-Tag Lim, Seung-Woo Jeon, Sung Moon, Sangin Kim, Sang-Wook Han, Hojoong Jung(2022), Aluminum nitride waveguide beam splitters for integrated quantum photonic circuits, arXiv:2208.01377.
178	HyoMin Kwak, TaekJeong, Yoon-Seok Lee, and HanSeb Moon(2016), Microwave-induced three-photon coherence of Rydberg atomic states, Optics Communications, Vol. 380, pp. 168-173.
179	I. I. Beterov and M. Saffman(2015), Rydberg blockade, Forster resonances, and quantum state measurements with different atomic species, Phys. Rev. A 92, 042710.
180	I. L. Lawrie et al.(2020), Quantum dot arrays in silicon and germanium, Appl. Phys. Lett. 116, 080501.
181	I. Pogorelov, T. Feldker, Ch. D. Marciniak, L. Postler, G. Jacob, O. Krieglsteiner, V. Podlesnic, M. Meth, V. Negnevitsky, M. Stadler, B. Höfer, C. Wächter, K. Lakhmanskiy, R. Blatt, P. Schindler, and T. Monz(2021), Compact ion-trap quantum computing demonstrator, PRX Quantum, 2(2), 020343.
182	Ilya N. Moskalenko et al.(2022), High fidelity two-qubit gates on fluxoniums using a tunable coupler, npj Quantum Info. 8, 130.
183	In-Ho Bae et al.(2019), Detection efficiency measurement of single photon avalanche photodiodes by using a focused monochromatic beam tunable from 250nm to 1000nm, Metrologia 56: 035003.
184	Inoue, K., E. Waks, and Y. Yamamoto(2002), Differential Phase Shift Quantum Key Distribution, Physics Review Letters, 89: 037902(1-3).
185	Islam, N. T., Lim, C. C. W., Cahall, C., Kim, J. & Gauthier, D. J.(2017), Provably secure and hih-rate quantum key distribution with time-bin qudits, Science Advance, 3: e1701491.
186	J. A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. Kübler, and J. P. Shaffer(2013), Atom-Based Vector Microwave Electrometry Using Rubidium Rydberg Atoms in a Vapor Cell, PHYSICAL REVIEW LETTERS 111(063001),
187	J. Elzerman(2004), Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot, Nature 430, 431~435.
188	J. F. Clauser et al.(1969), Proposed experiment to test local hidden-variable theories, Phys. Rev. Lett. 23: 880.
189	J. F. Marques, B. M. Varbanov, M. S. Moreira, H. Ali, N. Muthusubramanian, C. Zachariadis, F. Battistel, M. Beekman, N. Haider, W. Vlothuizen, A. Bruno, B. M. Terhal, and L. DiCarlo(2022), Logical-qubit operations in an error-detecting surface code, Nature Physics 18:80-86.
190	J. Kahn(2018.11.14.), Why quantum computers will be super awesome, someday, Washington post.
191	J. Lee et al., "Dressed-state control of effective dipolar interaction between strongly-coupled solid-state spins," arXiv:2203.07610
192	J. Lu et al.(2020), Toward 1% single-photon anharmonicity with periodically poled lithium niobate microring resonators, Optica 12, 1654.
193	J. M. Pino, J. M. Dreiling, C. Figgatt, J. P. Gaebler, S. A. Moses, M. S. Allman, C. H. Baldwin, M. Foss-Feig, D. Hayes, K. Mayer, C. Ryan-Anderson & B. Neyenhuis(2021), Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture, Nature 592(7853), 209-213.

194	J. Pablo Bonilla Ataides, David K. Tuckett, Stephen D. Bartlett, Steven T. Flammia, and Benjamin J. Brown(2021), The XZZX surface code, Nature Communications 12:2172.
195	J. Preskill(2018), Quantum Computing in the NISQ era and beyond, Quantum 2, 79.
196	J. S. Bell(1964), On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, Physics, 1: 195.
197	J. Stehlik et al.(2021), Tunable Coupling Architecture for Fixed-Frequency Transmon Superconducting Qubits, Phys. Rev. Lett. 127, 080505.
198	J. Yoneda(2018), A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%, Nature Nanotechnology 13, 102~106.
199	J. Yoo, Y. Choi, Y.-W. Cho, S.-W. Han, S.-Y. Lee, S. Moon, K. Oh, Y.-S. Kim(2018), Experimental preparation and characterization of four-dimensional quantum states using polarization and time-bin modes of a single photon, Opt. Comm. 419, 30.
200	J. P. Gaebler, T. R. Tan, Y. Lin, Y. Wan, R. Bowler, A. C. Keith, S. Glancy, K. Coakley, E. Knill, D. Leibfried, and D. J. Wineland(2016), High-fidelity universal gate set for be 9+ ion qubits. Physical review letters, 117(6), 060505.
201	J.H. Kim et al.(2022), Long-range distribution of high-quality time-bin entangled photons for quantum communication, J. Korean Phys. Soc. 80: 203.
202	Jared B. Hertzberg, Eric J. Zhang, Sami Rosenblatt, Easwar Magesan, John A. Smolin, Jeng-Bang Yau, Vivekananda P. Adiga, Martin Sandberg, Markus Brink, Jerry M. Chow and Jason S. Orcutt(2021), Laser-annealing Josephson junction for yielding scaled-up superconducting quantum processors. npj Quantum Information, 7: 129.
203	Jeffrey M. Gertler, Brian Baker, Juliang Li, Shruti Shirol, Jens Koch, and Chen Wang(2021), Protecting a bosonic qubit with autonomous quantum error correction, Nature 590:243-248.
204	Jens Koch, M Yu Terri, Jay Gambetta, Andrew A Houck, David I Schuster, Johannes Majer, Alexandre Blais, Michel H Devoret, Steven M Girvin, Robert J Schoelkopf(2007), Charge-insensitive qubit design derived from the Copper pair box. Physical Review A, 76(4): 042319.
205	Jerry M. Chow, A. D. Córcoles, Jay M. Gambetta, Chad Rigetti, B. R. Johnson, John A. Smolin, J. R. Rozen, George A. Keefe, Mary B. Rothwell, Mark B. Ketchen, and M. Steffen(2011), Simple All-Microwave Entangling Gate for Fixed-Frequency Superconducting Qubits, Physical Review Letters 107:080502.
206	Ji Chu et al.(2023), Scalable algorithm simplification usingquantum AND logic, Nat. Phys. 19, 126.
207	Ji-Gang Ren et al.(2017), Ground-to-satellite quantum teleportation. Nature. 2017 Sep 7;549(7670):70-73.
208	Jingjing Niu et al.(2023), Low-loss interconnects for modular superconducting quantum processors, Nat. Electron. 6, 235.
209	Jiu-Peng Chen, Chi Zhang, Yang Liu, Cong Jiang, Dong-Feng Zhao, Wei-Jun Zhang, Fa-Xi Chen, Hao Li, Li-Xing You, Zhen Wang, Yang Chen, Xiang-Bin Wang, Qiang Zhang, and Jian-Wei Pan(2022,. Quantum Key Distribution over 658 km Fiber with Distributed Vibration Sensing, Physical Review Letters, 128: 180502.
210	Jiwon Kim et al.(2021), 29Si Isotope-Enriched Silicon Nanoparticles for an Efficient Hyperpolarized Magnetic Resonance Imaging Probe, ACS Applied Materials and Interfaces, 13 56923.
211	Joakim Argillander et al.(2022), A tunable quantum random number generator based on a fiber-optical Sagnac interferometer Journal of Optics 24 064010.
212	John Rarity et al.(1994), Quantum random-number generation and key sharing, Journal of Modern Optics 41(12), 2435-2444.
213	Jonathon A. Sedlacek, Arne Schwettmann et al.(2012), Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances, Nature Physics 8, pp.819-824.

214	Joschka Roffe(2019), Quantum error correction: an introductory guide, Contemporary Physics, 62.
215	Josephine B. Chang, Michael R. Vissers, Antonio D. Corcoles, Martin Sandberg, Jiansong Gao, David W. Abraham, Jerry M. Chow, Jay M. Gambetta, Mary Beth Rothwell, George A. Keefe, Matthias Steffen, and David P. Pappas(2013), Improved superconducting qubit coherence using titanium nitride. Applied Physics Letters, 103: 012602.
216	Juan Carlos Garcia-Escartin, Shihan Sajeed, Vadim Makarov(2020), Attacking quantum key disribution by light injection via ventilation opening, PLoS ONE 15(8).
217	Juan Yin et al.(2017), Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, Science 356, 1140-1144.
218	Juan Yin et al.(2020), Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120kilometres, Nature 582, 501-505.
219	Julian Münzberg, Andreas Vetter, Fabian Beutel, Wladick Hartmann, Simone Ferrari, Wolfram H. P. Pernice, and Carsten Rockstuhl(2018), Superconducting nanowire single-photon detector implemented in a 2D photonic crystal cavity, Optica 5, 658.
220	K. Barnes, B. J. Bloom, K. Kotru, M. McDonald et al.(2022), Assembly and coherent control of a register of nuclear spin qubits, Nat. Commun. 13, 2779.
221	K. Groot-Berning et al.(2019), Deterministic single-ion implantation of rare-earth ions for nanometer-resolution color-center generation, Phys. Rev. Lett. 123(10), 106802.
222	K. Itoh et al.(2014), Isotope engineering of silicon and diamond for quantum computing and sensing applications, MRS Communications 4, 143-157.
223	K. Kechedzhi et al.(2023), Effective quantum volume, fidelity and computational cost of noisy quantum processing experiments, arXiv.2306.15970.
224	K. Singh, S. Anand, A. Pocklington, J. T. Kemp, and H. Bernien(2022), Dual-Element, Two-Dimensional Atom Array with Continuous-Mode Operation, Phys. Rev. X 12, 011040.
225	K. Takeda et al.(2021), Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon, Nature Nanotechnology 16, 965.
226	K. Wright, K. M. Beck, S. Debnath, J. M. Amini, Y. Nam, N. Grzesiak, J.-S. Chen, N. C. Pisenti, M. Chmielewski, C. Collins, K. M. Hudek, J. Mizrahi, J. D. Wong-Campos, S. Allen, J. Apisdorf, P. Solomon, M. Williams, A. M. Ducore, A. Blinov, S. M. Kreikemeier, V. Chaplin, M. Keesan, C. Monroe & J. Kim(2019), Benchmarking an 11-qubit quantum computer, Nature communications, 10(1), 1-6.
227	K. X. Wei, E. Magesan, I. Lauer, S. Srinivasan, D. F. Bogorin, S. Carnevale, G. A. Keefe, Y. Kim, D. Klaus, W. Landers, N. Sundaresan, C. Wang, E. J. Zhang, M. Steffen, O. E. Dial, D. C. McKay, and A. Kandala(2022). Hamiltonian Engineering with Multicolor Drives for Fast Entangling Gates and Quantum Crosstalk Cancellation, Physical Review Letters 129:060501.
228	K.-N. Schymik, A. Browaeys et al.(2021), Single Atoms with 6000-Second Trapping Lifetimes in Optical-Tweezer Arrays at Cryogenic Temperatures, Phys. Rev. Applied 16, 034013.
229	K.-Y. Kim, C. J. K. Richardson, E. Waks, and J.-H. Kim(2021), Temporal shaping of single photonsby engineering exciton dynamicsin a single quantum dot, APL Photonics 6, 080801.
230	Kai Bongs, Michael Holynski et al.(2019), Taking atom interferometric quantum sensors from the laboratory to real-world applications, Nature Reviews Physics 1, pp.731-739.
231	Kai Bongs, Simon Bennett & Anke Lohmann(2023). Quantum sensors will start a revolution – if we deploy them right, Nature, 617:672.

232	Kangheun Kim and Jaewook Ahn(2023), Quantum Tomography of Rydberg Atom Graphs by Configurable Ancillas, PRX Quantum 4, 020316.
233	Kejin Wei, Wei Li, Hao Tan, Yang Li, Hao Min, Wei-Jun Zhang, Hao Li, Lixing You, Zhen Wang, Xiao Jiang, Teng-Yun Chen, Sheng-Kai Liao, Cheng-Zhi Peng, Feihu Xu, and Jian-Wei Pan(2020), High-Speed Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution with Integrated Silicon Photonics, Physical Review X, 10: 031030.
234	Keseo Kang, Donggyu Minn, Seunghun Bae, Jaeho Lee, Seongun Bae, Gichang Jung, Seokhyeong Kang, Moonjoo Lee, Ho-Jin Song, and Jae-Yoon Sim(2022), A cryo-CMOS controller IC with fully integrated frequency generators for superconducting qubits, 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC), 362-364.
235	Kevin A Landsman, Yukai Wu, Pak Hong Leung, Daiwei Zhu, Norbert M Linke, Kenneth R Brown, Luming Duan, C Monroe(2019), Two-qubit entangling gates within arbitrarily long chains of trapped ions, Physical Review A, 100(2), 022332.
236	Kevin D. Crowley et al.(2023), Disentangling Losses in Tantalum Superconducting Circuits, arXiv:2301.07848.
237	Konstantin N. Nesterov et al.(2021), Proposal for Entangling Gates on Fluxonium Qubits via a Two-Photon Transition, PRX Quantum 2, 020345.
238	Konstantin N. Nesterov et al.(2022), CNOT Gates for Fluxonium Qubits via Selective Darkening of Transitions, Phys. Rev. Appl. 18, 034063.
239	Kwek, LC., Cao, L., Luo, W. et al.(2021), Chip-based quantum key distribution, AAPPS Bulletin, 31(15): 1-8.
240	L. A. Downes et al., (2020) Full-Field Terahertz Imaging at Kilohertz Frame Rates Using Atomic Vapor, PHYSICAL REVIEW X 10.
241	L. A. M. Johnson et al., (2010) Absolute frequency measurements of 85Rb n F7/2 Rydberg states using purely optical detection, New Journal of Physics 12, 063028.
242	L. A. Morais, T. Weinhold, M. P. de Almeida, J. Combes, A. Lita, T. Gerrits, S. W. Nam, A. G. White, and G. Gillett(2020), Precisely determining photon-number in real-time, arXiv: 2012.10158.
243	L. C. Camenzind, S. Geyer, A. Fuhrer, R. J. Warburton, D. M. Zumbühl, and A. V. Kuhlmann(2022), A hole spin qubit in a fin field-effect transistor above 4 kelvin, Nature Electronics, 5, 178.
244	L. K. Shalm et al.(2021), Device-independent randomness expansion with entangled photons, Nature Physics 17: 452.
245	L. Petit et al.(2022), High-fidelity two-qubit gates in silicon above one Kelvin, Nature, 601, 343-347.
246	L. Robledo et al.(2011), High-fidelity projective read-out of a solid-state spin quantum register, Nature 477, 574.
247	L. S. Madsen et al.(2022), Quantum computational advantage with aprogrammable photonic processor, Nature 606, 75.
248	Laura Antoni-Micollier, Daniele Carbone et. al.(2022), Detecting Volcano-Related Underground Mass Changes With a Quantum Gravimeter, Geophysical Research Letters 49(13).
249	Laurent de Forges de Parny, Olivier Alibart, Julien Debaud, Sacha Gressani, Alek Lagarrigue, Anthony Martin, Alexandre Metrat, Matteo Schiavon, Tess Troisi, Eleni Diamanti, Patrick Gelard, Erik Kerstel, Sebastien Tanzilli, Mathias van Den Bossche(2022), Satellite-based quantum information networks: use cases, architecture, and roadmap, ArXiv 2202. 01817.
250	Liu, J., Li, Q., Quan, J. et al.(2022), Efficient quantum homomorphic encryption scheme with flexible evaluators and its simulation, Des. Codes Cryptogr. 90, 577-591.

251	Li-Zheng Liu, Yu-Zhe Zhang, Zheng-Da Li, Rui Zhang, Xu-Fei Yin, Yue-Yang Fei, Li Li, Nai-Le Liu, Feihu Xu, Yu-Ao Chen and Jian-Wei Pan(2021), Distributed quantum phase estimation with entangled photons, Nature Photonics, 15: 137.
252	LMK Vandersypen, MA Eriksson(2019), Quantum computing with semiconductor spins, Physics Today, 72, 8, 38.
253	Lo, Hoi-Kwong, M. Curty, and B. Qi(2012), Physics Review Letters, 108: 130503(1-5).
254	Long B. Nguyen et al.(2022), Blueprint for a High-Performance Fluxonium Quantum Processor, PRX Quantum 3, 037001.
255	Long B. Nguyen et al.(2023), Programmable Heisenberg interactions between Floquet qubits, arXiv:2211.10383.
256	Long B. Nguyen, Yen-Hsiang Lin, Aaron Somoroff, Raymond Mencia, Nicholas Grabon, and Vladimir E. Manucharyan(2019), High-coherence fluxonium qubit. Physical Review X, 9: 041041.
257	Lucamarini, M., Yuan, Z. L., Dynes, J. F. and Shields, A. J.(2018), Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters, Nature557: 400-403.
258	M. D. Shulman et al.(2013), Suppressing qubit dephasing using real-time Hamiltonian estimation, Nature Communications 5, 5156.
259	M. Gilaberte Basset, A. Hochrainer, S. Töpfer, F. Riexinger, P. Bickert, J. R. Le´on-Torres, F. Steinlechner, and M. Gr¨afe(2021), Video-Rate Imaging with Undetected Photons, Laser & Photonics Reviews 15, 2000327.
260	M. Giustina et al.(2015), Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons, Phys. Rev. Lett. 115: 250401.
261	M. H. Abobeih et al.(2019), Atomic-scale imaging of a 27-nuclear-spin cluster using a quantum sensor, Nature 576(7787), 411.
262	M. Hauth, C. Freier et. al.(2013), First gravity measurements using the mobile atom interferometer GAIN, Applied Physics B, Vol.113, pp.49-55.
263	M. Kim, K. Kim, J. Hwang, E.-G. Moon, and J. Ahn(2022), Rydberg Quantum Wires for Maximum Independent Set Problems, Nature Physics 18, 755-759.
264	M. Kim, Y. Song, J. Kim, and J. Ahn(2020), Quantum Ising Hamiltonian Programming in Trio, Quartet, and Sextet Qubit Systems, PRX Quantum 1, 020323.
265	M. Larsen et. al, ISISS (2012).
266	M. R. Vissers, J. Gao, D. S. Wisbey, D. A. Hite, C. C. Tsuei, A. D. Corcoles, M. Steffen, and D. P. Pappas(2010), Low loss superconducting titanium nitride coplanar waveguide. Applied Physics Letters, 97: 232509.
267	M. Reagor et al.(2018), Demonstration of Universal Parametric Entangling Gates on a Multi-Qubit Lattice, Science Advances 4(2):eaao3603.
268	M. T. Simons et al., (2018) Fiber-coupled vapor cell for a portable Rydberg atom-based radio frequency electric field sensor, Applied Optics, 57(22).
269	M. T. Simons et al., (2019) A Rydberg atom-based mixer: Measuring the phase of a radio frequency wave, AIP Appl. Phys. Lett. 114, 114101.
270	M. Virginia P. Altoé, Archan Banerjee, Cassidy Berk, Ahmed Hajr, Adam Schwartzberg, Chengyu Song, Mohammed Alghadeer, Shaul Aloni, Michael J. Elowson, John Mark Kreikebaum, Ed K. Wong, Sinéad M. Griffin, Saleem Rao, Alexander Weber-Bargioni, Andrew M. Minor, David I. Santiago, Stefano Cabrini, Irfan Siddiqi, and D. Frank Ogletree(2022), Localization and mitigation of loss in niobium superconducting circuits. PRX Quantum 3: 020312.

271	Maeda, W., Tanaka, A., Takahashi, S., Tajima, A., & Tomita, A.(2009), Technologies for quantum key distribution networks integrated with optical communication networks, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 15(6), 1591-1601.
272	Makaki Sohma, Osamu Hirota(2022), Digest of Quantum Stream Cipher based on Holevo-Yuen Theory, Entropy 2022, 24, 667.
273	Mannalatha, V., Mishra, S. & Pathak, A.(2023), A comprehensive review of quantum random number generators: concepts, classification and the origin of randomness. Quantum Inf Process 22, 439.
274	Manuel Schilling, Étienne Wodey et. al.(2020), Gravity field modelling for the Hannover 10 m atom interferometer, Journal of Geodesy 94(122).
275	Mark Hillery, Vladimír Bužek, André Berthiaume(1998), Quantum Secret Sharing, Physical Review A. 59(3): 1829-1834.
276	Martyn, John et. al.(2011), Grand Unification of Quantum Algorithms, Phys. Rev. X 2 040203.
277	Matteo Pompili et al.(2021), Experimental demonstration of entanglement delivery using a quantum network stack, NPJ Quantum Information, 8(1), 10.
278	Matthew P. Harrigan et al.(2021), Quantum approximate optimization of non-planargraph problems on a planar superconductingprocessor, Nature Physics 17:332-336.
279	Mauro Valeri, Valeria Cimini, Simone Piacentini, Francesco Ceccarelli, Emanuele Polino, Francesco Hoch, Gabriele Bizzarri, Giacomo Corrielli, Nicolò Spagnolo, Roberto Osellame, and Fabio Sciarrino(2023), Experimental multiparameter quantum metrology in adaptive regime, Physical Review Research, 5: 013138.
280	Mehic, M., Niemiec, M., Rass, S., Ma, J., Peev, M., Aguado, A., Voznak, M.(2020), Quantum key distribution: a networking perspective. ACM Computing Surveys(CSUR), 53(5), 1-41.
281	Mengqi Wang et al.(2022), Self-aligned patterning technique for fabricating high-performance diamond sensor arrays with nanoscale precision, Sci. Adv. 8, eabn9573\.
282	Michael Schirber(2021), Quantum drones take flight, Physics 14: 7.
283	Miguel Herrero-Collantes and Juan Carlos Garcia-Escartin(2017), Quantum random number generators, Rev. Mod. Phys., 89, 1.
284	Miloslav Dusek et al.(1998), "Quantum identification system," Phys. Rev. A, vol. 60, no. 1, pp. 149–156.
285	Ming-Hui Zhang, Jia-Hui Xie, Jia-Yao Wu, Lin-Yang Yue, Chen He, Zheng-Wen Cao, Jin-Ye Peng(2022), Practical long-distance twin-field quantum digital signatures, Quant. Inf. Process. 21: 150.
286	Minki Hhan, Tomoyuki Morimae, Takashi Yamakawa(2023), From the Hardness of Detecting Superpositions to Cryptography: Quantum Public Key Encryption and Commitments, EUROCRYPT (1) 2023: 639-667.
287	Min-Sung Kang, Yeon-Ho Choi, Yong-Su Kim, Young-Wook Cho, Sang-Yun Lee, Sang-Wook Han and Sung Moon(2018), Quantum message authentication scheme based on remote state preparation, Physica Scripta, 93:11.
288	Min-Sung Kang, Yong-Su Kim, Ji-Woong Choi, Hyung-Jin Yang and Sang-Wook Han(2021), Experimental Quantum Message Authentication with Single Qubit Unitary Operation, Appl. Sci. 2021, 11, 2653.
289	Miralem Mehic et al.(2020), Quantum Key Distribution, ACM Comput. Surv., 53(5).
290	Moghaddam, E. E., Beyranvand, H., & Salehi, J. A.(2021), Resource allocation in space division multiplexed elastic optical networks secured with quantum key distribution. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 39(9), 2688-2700.
291	Monroe, C., & Kim, J.(2013), Scaling the ion trap quantum processor. Science, 339(6124), 1164-1169.

292	Myunghun Kim, Keumhyun Kim, Jungsoo Hong, Hyegoo Lee, Youngil Moon, Wonchan Lee, Sehyun Kim, Taekyun Ha, Jae-Yoon Sim, Moonjoo Lee(2022), Ion trap with gold-plated alumina: substrate and surface characterization, arXiv preprint arXiv: 2207.06878.
293	N. De Leon et al.(2021), Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware, Science 372, 6539.
294	N. J. Cerf, M. Lévy, and G. Van Assche(2001), Quantum distribution of Gaussian keys using squeezed states, Physical Review A,63, 052311.
295	N. Somaschi et al.(2016), Near-optimal single-photon sources in the solid state, Nature Photon. 10, 340.
296	National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine(2019), Quantum computing: progress and prospects.
297	Nico W. Hendrickx et al.(2021), A four-qubit germanium quantum processor, Nature 591, 580.
298	Nicola Poli, Roman Pašteka, and Pavol Zahorec(2022), Atomic changes can map subterranean structures, Nature 602, 579-580.
299	Noah Goss, Alexis Morvan, Brian Marinelli, Bradley K. Mitchell, Long B. Nguyen, Ravi K. Naik, Larry Chen, Christian Jünger, John Mark Kreikebaum, David I. Santiago, Joel J. Wallman, Irfan Siddiqi(2022), High-Fidelity Qutrit Entangling Gates for Superconducting Circuits, arXiv:2206.07216.
300	Ole Andersson, Piotr Badziag and Irina Dumitru(2018), Device-independent certification of two bits of randomness from one entangled bit and Gisin's elegant Bell inequality, Physical Review A 97, 012314.
301	Oleg Varnavski, Carolyn Gunthardt, Aasia Rehman, Gary D. Luker, and Theodore Goodson III(2021), Quantum Light-Enhanced Two-Photon Imaging of Breast Cancer Cells, The Journal of Physical Chemistry Letters 13(12), 2772-2781.
302	Osung Kwon, Young-Wook Cho, and Yoon-Ho Kim(2009), Applied Optics 48, 9.
303	P. C. Maurer et al.(2012), Room-temperature quantum bit memory exceeding one second, Science 336, 1283.
304	P. Chojecki, Quantum advantage.
305	P. Huft, Y. Song, T. M. Graham, K. Jooya, S. Deshpande, C. Fang, M. Kats, and M. Saffman(2022), Simple, passive design for large optical trap arrays for single atoms, Phys. Rev. A 105, 063111.
306	P. Kurpiers et al.(2018), Deterministic quantum state transfer and remote entanglement using microwave photons, Nature, 558, 264.
307	P. Neumann et al.(2010),Single-shot readout of a single nuclear spin, Science 329(5991), 542-544.
308	P. Scholl, A. Browaeys et al.(2021), Quantum simulation of 2D antiferromagnets with hundreds of Rydberg atoms, Nature 595 (7866), 233-238.
309	P. Siyushev et al.(2019), Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond, Science 363(6428), 728.
310	P. W. Shor and J. Preskill(2000), Simple Proof of Security of the BB84 Quantum Key Distribution Protocol, Phys. Rev. Lett. 85: 441.
311	P.D. Townsend(1994), Secure key distribution system based on quantum cryptography, Electronics Letters, 30(10): 809-811.
312	Pak Hong Leung, Kevin A Landsman, Caroline Figgatt, Norbert M Linke, Christopher Monroe, Kenneth R Brown(2018), Robust 2-qubit gates in a linear ion crystal using a frequency-modulated driving force, Physical review letters, 120(2), 020501.

313	Paraïso, T. K. et al.(2019), A modulator-free quantum key distribution transmitter chip, npj Quantum Information, 5(42): 1-6.
314	Park, C. H. et al.(2018), Practical Plug-and-Play Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution With Polarization Division Multiplexing, IEEE Access, 6: 58587–58593.
315	Park, C. H. et al.(2022), 2×N twin-field quantum key distribution network configuration based on polarization, wavelength, and time division multiplexing, NPJQuantum Information, 8, 48: 1-12.
316	Paterova, A.V., Krivitsky, L.A.(2020), Nonlinear interference in crystal superlattices, Light: Science & Applications 9, 82.
317	Patrick J. Clarke, Robert J. Collins, Vedran Dunjko, Erika Andersson, John Jeffers, Gerald S. Buller(2012), Experimental demonstration of quantum digital signatures using phase-encoded coherent states of light, Nature Communication 3: 1174.
318	Peev M., Pacher C., Alléaume R., Barreiro C., Bouda J., Boxleitner W., & Zeilinger A.(2009), The SECOQC quantum key distribution network in Vienna, New Journal of Physics, 11(7), 075001.
319	Pei Liu et al.(2023), Performing SU(d) Operations and Rudimentary Algorithms in a Superconducting Transmon Qudit for d=3 and d=4. Phys. Rev. X 13, 021028.
320	Pengfei Wang, Chun-Yang Luan, Mu Qiao, Mark Um, Junhua Zhang, Ye Wang, Xiao Yuan, Mile Gu, Jingning Zhang & Kihwan Kim(2021), Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour, Nature communications, 12(1), 1-8.
321	Peruzzo, Alberto et. al.(2014), A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, Nature Communications, Vol 5, Article number: 4213.
322	Philipp Frey and Stephan Rachel(2022), Realization of a discrete time crystal on 57 qubits of a quantum computer, Science Advances 8(9): eabm7652.
323	Philips, S.G.J., Mądzik, M.T., Amitonov, S.V. et al.(2022), Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon, Nature 609, 919–924.
324	Pirandola, S., C. Ottaviani, G. Spedalieri, C. Weedbrook, S. L. Braunstein, S. Lloyd, T. Gehring, C. S. Jacobsen, and U. L. Andersen(2015), High-rate measurement-device-independent quantum cryptography, Nature Photonics 9, 397.
325	Qi-Chao Sun, Yang-Fan Jiang, Ya-Limao, Li-Xing You, Wei Zhang, Wei-Jun Zhang, Xiao Jiang, Teng-Yun Chen, Hao Li, Yi-Dong Huang, Xian-Feng Chen, Zhen Wang, Jingyun Fan, Qiang Zhang, Jian-Wei Pani(2017), Entanglement swapping over 100km optical fiber with independent entangled photon-pair sources, Optica 4: 1214.
326	Qiujiang Guo, Chen Cheng, Hekang Li, Shibo Xu, Pengfei Zhang, Zhen Wang, Chao Song, Wuxin Liu, Wenhui Ren, Hang Dong, Rubem Mondaini, and H. Wang (2021a), Stark Many-Body Localization on a Superconducting Quantum Processor, Physical Reivew Letters 127: 240502.
327	Qiujiang Guo, Chen Cheng, Zheng-Hang Sun, Zixuan Song, Hekang Li, Zhen Wang, Wenhui Ren, Hang Dong, Dongning Zheng, Yu-Ran Zhang, Rubem Mondaini, Heng Fan, and H. Wang(2021b). Observation of energy-resolved many-bodylocalization, Nature Physics 17:234-239.
328	Quantum Flagship(2016), Quantum technologies roadmap.
329	Quentin Ficheux, Long B. Nguyen, Aaron Somoroff, Haonan Xiong, Konstantin N. Nesterov, Maxim G. Vavilov, and Vladimir E. Manucharyan(2021), Fast logic with slow qubits: microwave-activated controlled-Z gate on low-frequency fluxoniums. Physical Review X 11: 021026.
330	R. Assouly , R. Dassonneville, T. Peronnin, A. Bienfait & B. Huard(2023), Quantum Advantage in microwave quantum radar, Nature Physics, https://doi.org/10.1038/s41567-023-02113-4

331	R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, D. Sank, E. Jeffrey, Y. Chen, Y. Yin, B. Chiaro, J. Mutus, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, J. Wenner, T. C. White, A. N. Cleland, and John M. Martinis(2013), Coherent Josephson Qubit Suitable for Scalable Quantum Integrated Circuits. Physical Review Letters, 111, 080502.
332	R. Geiger, A. Landragin, S. Merlet, and F. Pereira Dos Santos,(2020), High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors, AVS Quan. Sci. 2, 024702.
333	R. J. Niffenegger, J. Stuart, C. Sorace-Agaskar, D. Kharas, S. Bramhavar, C. D. Bruzewicz, W. Loh, R. T. Maxson, R. McConnell, D. Reens, G. N. West, J. M. Sage & J. Chiaverini(2020), Integrated multi-wavelength control of an ion qubit. Nature, 586(7830), 538-542.
334	R. P. Abel et al., (2009) Laser frequency stabilization to excited state transitions using electromagnetically induced transparency in a cascade system, Applied Physics Letters 94, 071107.
335	R.-Y. Chang et al., (2010) A narrow window of Rabi frequency for competition between electromagnetically induced transparency and Raman absorption, Journal of the Optical Society of America B 27.
336	Raeesh Muhammad et al.(2021), Exploiting the Specific Isotope-Selective Adsorption of Metal-Organic Framework for Hydrogen Isotope Separation, J. Am. Chem. Soc., 143, 22, 8232.
337	Ragavan, Seyoon and Vaikuntanathan, Vinod(2023), Optimizing Space in Regev's Factoring Algorithm, cryptoeprint:2023/1501.
338	Raju Valivarthi et al.(2016), Quantum teleportation across a metropolitan fibre network, Nature Photonics, Volume 10, Issue 10, pp. 676-680.
339	Raussendorf, Robert and Briegel, Hans J.(2001), A One-Way Quantum Computer, Phys. Rev. Lett. 86, 5188.
340	Regev, Oded(2023), An efficient quantum factoring algorithm, arXiv:2308.06572.
341	Reinhold Blümel, Nikodem Grzesiak, Neal Pisenti, Kenneth Wright & Yunseong Nam(2021), Power-optimal, stabilized entangling gate between trapped-ion qubits. npj Quantum Information, 7(1), 1-8.
342	Ribordy, G., O. Guinnard, and ID Quantique(2009), Method and apparatus for generating true random numbers by way of a quantum optics process, Patent US 7519641.
343	Richard Cleve, Daniel Gottesman, Hoi-Kwong Lo(1999), How to share a quantum secret, Physical Review Lett. 83(3): 648-651.
344	Ritajit Majumdar, Sanchari Das(2021), SOK: An evaluation of quantum authentication through systematic literature review, Proceedings of the workshop on Usable Security and Privacy.
345	Robert F. Spivey, Ismail V. Inlek, Zhubing Jia, Stephen Crain, Ke Sun, Junki Kim, Geert Vrijsen, Chao Fang, Colin Fitzgerald, Steffen Kross, Tom Noel and Jungsang Kim(2021), High-Stability Cryogenic System for Quantum Computing With Compact Packaged Ion Traps, IEEE Transactions on Quantum Engineering, 3, 1-11.
346	S Moss(2019), CES: IBM announces Q System One, a quantum computer in a 9ft cube, Data center dynamics.
347	S. Abend, M. Gebbe et al.(2016), Atom-Chip Fountain Gravimeter, PHYSICAL REVIEW LETTERS 117(203003).
348	S. Barzanjeh, S. Pirandola, D. Vitali, J. M. Fink(2020), Microwave quantum illumination using a digital receiver, Science Advances, 6: eabb0451.
349	S. De Franceschi et al.(2016), SOI technology for quantum information processing, IEEE International Electron Devices Meeting.
350	S. Ebadi, M. D. Lukin et al.(2021), Quantum phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator, Nature 595, 227-232.
351	S. H. Yim, D. -Y. Lee, and M. M.Kim(2022), Experimental setup to fabricate Rb-Xe gas cells for atom spin gyroscopes. AIP Advances 12, 015025.

352	S. K. Dutta, J. R. Guest, D. Feldbaum, A. Walz-Flannigan, and G. Raithel(2000), Ponderomotive optical lattice for Rydberg atoms, Phys. Rev. Lett. 85, 5551.
353	S. Kumar, et. al., (2018) Critical points for electron-Mg atom elastic scattering, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 51, 0325203: At. Mol. (2016) Collective state synthesis in an optical cavity using Rydberg atom dipole blockade, Journal of Physics B 49, 064014.
354	S. M. Lee, S.-W. Lee, H. Jeong, and H. S. Park(2020), Quantum Teleportation of Shared Quantum Secret, Phys. Rev. Lett. 124, 060501.
355	S. Ma, Alex P. Burgers, G. Liu, J. Wilson, B. Zhang, and J. D. Thompson(2022), Universal Gate Operations on Nuclear Spin Qubits in an Optical Tweezer Array of 171Yb Atoms, Phys. Rev. X 12, 021028.
356	S. Madjarov, M. Endres et al.(2020), High-fidelity entanglement and detection of alkaline-earth Rydberg atoms, Nature Physics 16, 857-861.
357	S. Onoda et al.(2017), Diffusion of vacancies created by high-energy heavy ion strike into diamond, Phys. Status Solidi A 214(11), 1700160.
358	S. Phillips et al.(2022), Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon, arXiv: 2202.09252.
359	S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck, D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani, J. L. Pereira, M. Razavi, J. Shamsul Shaari, M. Tomamichel, V. C. Usenko, G. Vallone, P. Villoresi, and P. Wallden(2020), Advances in quantum cryptography, Advances in Optics and Photonics, 12: 1012-1236.
360	S. T. Alsid et al.(2019), Photoluminescence decomposition analysis: A technique to characterize N-V creation in diamond, Phys. Rev. Appl. 12(4), 044003.
361	S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson(2018), Quantum internet: A vision for the road ahead, Science 362, eaam9288.
362	S. Zhang, F. Robicheaux, and M. Saffman(2011), Magic-wavelength optical traps for Rydberg atoms, Phys. Rev. A 84, 043408.
363	S.-W. Jeon et al.(2020), Bright nitrogen-vacancy centers in diamond inverted nanocones, ACS Photonics 7(10), 2739-2747.
364	Samantha Isaac, Andrew Conrad, Alex Hill1, Kyle Herndon, Brian Wilens, Dalton Chaffee, Daniel Sanchez-Rosales, Roderick Cochran, Daniel Gauthier, Paul Kwiat(2020), Drone-Based Quantum Key Distribution, CLEO 2020.
365	Samson Wang, Enrico Fontana, M. Cerezo, Kunal Sharma, Akira SoneLukasz Cincio, and Patrick J. Coles(2021), Noise-induced barren plateaus in variationalquantum algorithms, Nature Communications 12:6961.
366	Sasaki, M.(2018), Quantum key distribution and its applications, IEEE Security & Privacy, 16(5), 42-48.
367	Sasaki, M., Fujiwara, M., Ishizuka, H., Klaus, W., Wakui, K., Takeoka, M., & Zeilinger, A.(2011), Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network. Optics express, 19(11), 10387-10409.
368	Schine, N., Young, A.W., Eckner, W.J. et al.(2022), Long-lived Bell states in an array of optical clock qubits, Nat. Phys. 18, 1067-1073.
369	Sebastian Philipp Neumann et al.(2022), Continuous entanglement distribution over a transnational 248 km fiber link, Nat Commun 13, 6134.
370	Seongjin Hong, Junaid ur Rehman, Yong-Su Kim, Young-Wook Cho, Seung-Woo Lee, Hojoong Jung, Sung Moon, Sang-Wook Han & Hyang-Tag Lim(2021), Quantum enhanced multiple-phase estimation with multi-mode N00N states, Nature Communications, 12: 5211.
371	Shantanu Debnath, Norbert M Linke, Caroline Figgatt, Kevin A Landsman, Kevin Wright, Christopher Monroe(2016), Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits, Nature 536(7614), 63-66.

372	Sheng-Kai Liao et al.(2017), Satellite-to-ground quantum key distribution, Nature 549, 43–47.
373	Sheng-Kai Liao et al.(2018), Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network, Phys. Rev. Lett. 120, 030501.
374	Sheng-Kai Liao, Wen-Qi Cai, Wei-Yue Liu, Liang Zhang, Yang Li, Ji-Gang Ren, Juan Yin, Qi Shen, Yuan Cao, Zheng-Ping Li, Feng-Zhi Li, Xia-Wei Chen, Li-Hua Sun, Jian-Jun Jia, Jin-Cai Wu, Xiao-Jun Jiang, Jian-Feng Wang, Yong-Mei Huang, Qiang Wang, Yi-Lin Zhou, Lei Deng, Tao Xi, Lu Ma, Tai Hu, Qiang Zhang, Yu-Ao Chen, Nai-Le Liu, Xiang-Bin Wang, Zhen-Cai Zhu, Chao-Yang Lu, Rong Shu, Cheng-Zhi Peng, Jian-Yu Wang, Jian-Wei Pan(2017), Satellite-to-ground quantum key distribution, Nature 549: 43–47.
375	Shi-Kai Liu, Yin-Hai Li, et al., (2020), Real-time quantum edge enhanced imaging, Optics express 28(24).
376	Shor, Peter W.(1997), Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer, SIAM J. Comput., 26(5):1484–1509.
377	Shuang Wang et al.(2022), Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre, Nature Photonics, Volume 16, Issue 2, p.154–161.
378	Shuxiang Cao et al.(2023), Emulating two qubits with a four-level transmon quditfor variational quantum algorithms. arXiv:2303.04796.
379	Sibson, P., Erven, C., Godfrey et all.(2017), Chip-based quantum key distribution, Nature Communications, 8, 13984.
380	Simon Gröblacher et al.(2006), Experimental quantum cryptography with qutrits, New Journal of Physics, 8(75): 1–8.
381	Simon Storz et al.(2023), Loophole-free Bell inequality violation with superconducting circuits, Nature 617, 265.
382	Simon, Daniel R.(1997), On the Power of Quantum Computation, SIAM Journal on Computing. 26 (5): 1474–1483.
383	Soren Wengerowsky, Siddarth Koduru Joshi, Fabian Steinlechner, Julien R. Zichi, Sergiy M. Dobrovolskiy, Rene van der Molen, Johannes W. N. Los, Val Zwiller, Marijn A. M. Versteegh, Alberto Mura, Davide Calonico, Massimo Inguscio, Hannes Hubel, Liu Bo, Thomas Scheidl, Anton Zeilinger, Andre Xuereb, Rupert Ursin(2019), Entanglement distribution over a 96km long submarine optical fiber, PNAS 116: 6684.
384	Stefan H. Sack, Raimel A. Medina, Alexios A. Michailidis, Richard Kueng, and Maksym Serbyn(2022), Avoiding Barren Plateaus Using Classical Shadows, PRX Quantum 3: 020365.
385	Stefano Pironio et al.(2010), Random numbers certified by Bell's theorem Nature 464, 1021–1024.
386	Stray, B., Lamb, A., Kaushik, A. et al.(2022), Quantum sensing for gravity cartography, Nature 602, 590–594
387	Stucki, D., N. Brunner, N. Gisin, V. Scarani, and H. Zbinden(2005), Fast and simple one-way quantum key distribution, Applied Physics Letters, 87: 194108(1–3).
388	Suhas Ganjam et al.(2023), Surpassing millisecond coherence times in on-chipsuperconducting quantum memories by optimizing materials,processes, and circuit design, arXiv:2308.15539.
389	Susan S. Sorensen, Daniel A. Thrasher, and Thad G. Walker(2020), A Synchronous Spin-Exchange Optically Pumped NMR-Gyroscope, Applied Sciences 10(20).
390	T. Gregory, P.-A Amoreau, E. Toninell, and M. J. Padget, (2020) Imaging through noise with quantum illumination, Science Advances 6(6).
391	T. Holz, H. Kampermann, and D. Bruss(2020), Genuine multipartite Bell inequality for device-independent key agreement, Physical Review Research 2: 023251.

392	T. Kwak et al.(2021), Diamond Schottky barrier diodes fabricated on sapphire-based freestanding heteroepitaxial diamond substrate, Diam. Relat. Mater. 114, 108335(2021).
393	T. M. Graham, Y. Song, M. Saffman et al.(2022), Multi-qubit entanglement and algorithms on a neutral-atom quantum computer, Nature 604, 457.
394	T. McJunkin et al.(2021), SiGe quantum wells with oscillating Ge concentrations for quantum dot qubits, arXiv: 2112.09765.
395	T. Monz, R. Blatt et al.(2019), 14-Qubit Entanglement: Creation and Coherence, Phys. Rev. Lett. 106, 130506.
396	T. Thorbeck(2015), Niel M. Zimmerman Formation of strain-induced quantum dots in gated semiconductor nanostructures, AIP advances 5, 087107.
397	T. van Leent et al.(2022), Entangling single atoms over 33 km telecom fibre, Nature 607, 69-73.
398	T. P. Harty, D. T. C. Allcock, C. J. Ballance, L. Guidoni, H. A. Janacek, N. M. Linke, D. N. Stacey, and D. M. Lucas(2014), High-fidelity preparation, gates, memory, and readout of a trapped-ion quantum bit. Physical review letters, 113(22), 220501.
399	T.-Y. Hwang et al.(2022), Sub-10nm precision engineering of solid-state defects via nanoscale aperature array mask, Nano Lett. 22(4) 1672-1679.
400	Takeda, K., Noiri, A., Nakajima, T. et al.(2022), Quantum error correction with silicon spin qubits. Nature 608, 682–686.
401	The national academies press(2019), Quantum computing: Progress and Prospects.
402	Tomislav Begušić and Garnet Kin-Lic Chan(2023), Fast classical simulation of evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance, arXiv:2306.16372.
403	Tregubov, P.A., Trushechkin, A.S.(2021), Quantum Stream Ciphers: Impossibility of Unconditionally Strong Algorithms. J Math Sci 252, 90–103.
404	Vaishnavi Kumar et al.(2022), Quantum true random number generation on IBM's cloud platform, Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, vol. 34, no. 8, pp. 6453–6465.
405	Valivarthi, R., Q. Zhou, C. John, F. Marsili, V. B. Verma, M. D. Shaw, S. W. Nam, D. Oblak, and W. Tittel(2017), A cost-effective measurement-device-independent quantum key distribution system for quantum networks, Quantum Science Technology, 2(4): LT01.
406	Vincent Ménoret, Pierre Vermeulen et al.(2018), Gravity measurements below 10-9 g with a transportable absolute quantum gravimeter, Scientific Reports 8(12300).
407	Vladimir E. Manucharyan, Jens Koch, Leonid I. Glazman and Michel H. Devoret(2009), Fluxonium: single Copper pair circuit free of charge offsets. Science, 326(5949): 113-116.
408	W. Asavanant et al.(2019), Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state, Science 366, 373.
409	W. Jang et al.(2021), Single-shot readout of driven hybrid qubit in GaAs double quantum dot, Nano Lett., 21, 12, 4999.
410	W. Lee, H. Kim, and J. Ahn(2016), Three-dimensional rearrangement of single atoms using actively controlled optical microtraps, Optics Express 24(9), 9816.
411	W. Pernice, C. Schuck, O. Minaeva, M. Li, G. Goltsman, A. Sergienko, H. Tang(2012), High speed travelling wave single-photon detectors with near-unity quantum efficiency, Nature Communications, 3, 1325.
412	W. Wang et al.(2023), Fully Passive Quantum Key Distribution, Physical Review Letters, 130: 220801.
413	W. Zhang et al.(2022), A device-independent quantum key distribution system for distant users, Nature 607: 687

414	W.-Z Liu et al.(2022), Toward a Photonic Demonstration of Device-Independent Quantum Key Distribution, Phys. Rev. Lett. 129: 050502.
415	Walborn, S., D. Lemelle, M. Almeida, and P. S. Ribeiro(2006), Quantum Key Distribution with Higher-Order Alphabets Using Spatially Encoded Qudits, Physical Review Letters 96: 090501.
416	Wang, C., X.-T. Song, Z.-Q. Yin, S. Wang, W. Chen, C.-M. Zhang, G.-C. Guo, and Z.-F. Han(2015), Phase Reference Free Experiment of Measurement Device Independent Quantum Key Distribution, Physical Review Letters 115: 160502.
417	Wang, H., Zhao, Y., Yu, X., Ma, Z., Wang, J., Nag, A., & Zhang, J.(2019), Protection schemes for key service in optical networks secured by quantum key distribution(QKD), Journal of Optical Communications and Networking, 11(3), 67-78.
418	Wang, N., S. Du, W. Liu, X. Wang, Y. Li, and K. Peng(2018), Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Entangled States, Physical Review Applied 10: 064028.
419	Wang, S. et al.(2022), Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre, Nature Photonics 16: 154-161.
420	Weinan Huang et al.(2020), Practical security analysis of a continuous-variable quantum random number generator with a noisy local oscillator, Phys. Rev. A 102, 012422.
421	Woerner, Stefan and Egger, Daniel J(2019), Quantum risk analysis, npj Quantum Inf 5, 15.
422	Wolfgang Paul(1990), Electromagnetic traps for charged and neutral particles. Reviews of modern physics, 62(3), 531.
423	Wolfgang Tittel, Hugo Zbinden, Nicolas Gisin(2001), Experimental demonstration of quantum secret sharing, Phys. Rev. A. 63: 042301.
424	Wu, Y., Kolkowitz, S., Puri, S. et al.(2022), Erasure conversion for fault-tolerant quantum computing in alkaline earth Rydberg atom arrays, Nat Commun 13, 4657.
425	X. Guo et al.(2017), Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip, Light: Science & Applications, 6, 16249.
426	X.-L. Wang, J.-W. Pan et al.(2018), 18-Qubit Entanglement with Six Photons' Three Degrees of Freedom, Phys. Rev. Lett. 120, 260502.
427	Xiao Mi et al.(2022), Time-crystalline eigenstate order on aquantum processor, Nature 601: 531-536.
428	XUEJIAN WU, ZACHARY PAGEL et al.(2019), Gravity surveys using a mobile atom interferometer, Science Advances 5(9).
429	Xueshi Guo, Casper R. Breum, Johannes Borregaard, Shuro Izumi, Mikkel V. Larsen , Tobias Gehring, Matthias Christandl, Jonas S. Neergaard-Nielsen and Ulrik L. Andersen(2020), Distributed quantum sensing in a continuous variable entangled network, Nature Physics, 16: 281.
430	Xueyue Zhang, Eunjong Kim, Daniel K. Mark, Soonwon Choi, and Oskar Painter(2022), A scalable superconducting quantum simulator with long-range connectivity based on a photonic bandgap metamaterial, arXiv:2206.12803v1.
431	Y. Arakawa, and M. J. Holmes(2020), Progress in quantum-dot single photon sourcesfor quantum information technologies: A broadspectrum overview, Appl. Phys. Rev. 7, 021309.
432	Y. Bidel, N. Zahzam et al.(2018), Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry, Nature Communications 9(627).
433	Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin and J. S. Tsai(1999), Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Copper-pair box. Nature, 398: 786-788.

434	Y. Pelet et al.(2022), Operational entanglement-based quantum key distribution over 50km of real-field optical fibres, arXiv. 2207. 14707.
435	Y. -S. Kim, Y. -C. Jeong, and Y. -H. Kim(2008), Implementation of Polarization-Coded Free-Space BB84 Quantum Key Distribution, Laser Physics, Vol. 18, No. 6, pp. 810.
436	Y. Song, J. Lim, and J. Ahn(2020), Berry-phase gates for fast and robust control of atomic clock states, Physical Review Research 2, 023045.
437	Y. Song, M. Kim, H. Hwang, W. Lee, and J. Ahn(2021), Quantum simulation of Cayley-tree Ising Hamiltonians with three-dimensional Rydberg atoms, Physical Review Research 3, 013286.
438	Y. Zeng, P. Xu, X. He, Y. Liu, M. Liu, J. Wang, D. J. Papoular, G. V. Shlyapnikov, and M. Zhan(2017), Entangling Two Individual Atoms of Different Isotopes via Rydberg Blockade, Phys Rev. Lett. 119, 160502.
439	Yao Lu, Shuaining Zhang, Kuan Zhang, Wentao Chen, Yangchao Shen, Jialiang Zhang, Jing-Ning Zhang, Kihwan Kim(2019), Global entangling gates on arbitrary ion qubits. Nature, 572(7769), 363-367.
440	Yariv Yanay, Jochen Braumüller, Terry P. Orlando, Simon Gustavsson, Charles Tahan, and William D. Oliver(2022), Mediated Interactions beyond the Nearest Neighbor in an Array of Superconducting Qubits, Physical Review Applied 17:034060.
441	Ye Wang, Mark Um, Junhua Zhang, Shuoming An, Ming Lyu, Jing-Ning Zhang, L.-M. Duan, Dahyun Yum & Kihwan Kim(2017), Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time, Nature Photonics, 11(10), 646-650.
442	Yide Zhang, Zhe He, Xin Tong, David C. Garrett, Rui Cao, Lihong V. Wang(2023), Quantum imaging of biological organisms through spatial and polarization entanglement, arXiv:2303.05643.
443	Yim et al.(2022), Experimental setup to fabricate Rb-Xe gas cells for atom spin gyroscopes, AIP Advances 12, 015025.
444	Yin, H.-L., Chen, T.-Y., Yu, Z.-W., Liu, H., You, L.-X., Zhou, Y.-H., ··· Pan, J.-W.(2016), Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution Over a 404 km Optical Fiber, Physical Review Letters, 117(19): 190501(1-5).
445	Yin, J. et al.(2017), Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, Science, 356(6343), 1140-1144.
446	Yin, J., Cao, Y., Li, Y. H., Liao, S. K., Zhang, L., Ren, J. G., & Pan, J. W.(2017), Satellite-based entanglement distribution over 1,200kilometers, Science, 356(6343), 1140-1144.
447	Yin, ZQ., Wang, S., Chen, W. et al.(2014), Reference-free-independent quantum key distribution immune to detector side channel attacks, Quantum Information Processing 13: 1237-1244.
448	Yong Yu et al.(2020), Entanglement of two quantum memories via fibres over dozens of kilometres. Nature 578, 240-245.
449	Yosep Kim, Alexis Morvan, Long B. Nguyen, Ravi K. Naik, Christian Jünger, Larry Chen, John Mark Kreikebaum, David I. Santiago, and Irfan Siddiqi(2022), High-fidelity three-qubit iToffoli gate for fixed-frequency superconducting qubits, Nature Physics 18: 783-788.
450	Yotam Shapira, Ravid Shaniv, Tom Manovitz, Nitzan Akerman, Roee Ozeri(2018), Robust entanglement gates for trapped-ion qubits. Physical review letters, 121(18), 180502.
451	Youngkyu Sung, Leon Ding, Jochen Braumüller, Antti Vepsäläinen, Bharath Kannan, Morten Kjaergaard, Ami Greene, Gabriel O Samach, Chris McNally, David Kim, Alexander Melville, Bethany M Niedzielski, Mollie E Schwartz, Jonilyn L Yoder, Terry P Orlando, Simon Gustavsson, William D Oliver(2021), Realization of High-Fidelity CZ and ZZ-Free iSWAP Gates with a Tunable Coupler, Physical Review X 11(2): 021058.

452	Youngseok Kim et al.(2023), Evidence for the utility of quantumcomputing before fault tolerance, Nature 618, 500.
453	Youngseok Kim, Christopher J. Wood, Theodore J. Yoder, Seth T. Merkel, Jay M. Gambetta, Kristan Temme, and Abhinav Kandala(2021), Scalable error mitigation for noisy quantum circuits produces competitive expectationvalues, arXiv:2108.09197.
454	Youpeng Zhong et al.(2021), Deterministic multi-qubit entanglement in aquantum network, Nature, 590, 571.
455	Yu Chen, C. Neill, P. Roushan, N. Leung, M. Fang, R. Barends, J. Kelly, B. Campbell, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, E. Jeffrey, A. Megrant, J. Y. Mutus, P. J. J. O'Malley, C. M. Quintana, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, T. C. White, Michael R. Geller, A. N. Cleland, and John M. Martinis(2014), Qubit Architecture with High Coherence and Fast Tunable Coupling. Physical Review Letters, 113, 220502.
456	Yu-Ao Chen et al.(2021), An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600kilometres, Nature 589, 214-219.
457	Yulin Wu et al.(2021), Strong Quantum Computational Advantage Using a Superconducting Quantum Processor, Physical Review Letters 127:180501.
458	Zalka, Christof(1999), Grover's quantum searching algorithm is optimal, Phys.Rev. A 60, 2746-2751.
459	Zeng P., Zhou H., Wu W., and Ma X.(2022), Mode-paring quantum key distribution, Nature Communications 13, 3903.
460	Zeng, P., W. Wu, and X. Ma(2019), Symmetry-protected privacy: beating the rate-distance linear bound over a noisy channel, Physical Review Applied, 13: 064013.
461	Zeuner, J., Pitsios, I., Tan, SH. et al(2021), Experimental quantum homomorphic encryption, npj Quantum Inf 7, 25.
462	Zhang, Q., Xu, F., Li, L., Liu, N. L., & Pan, J. W.(2019), Quantum information research in China. Quantum Science and Technology, 4(4), 040503.
463	Zhang, Y. et al.(2020), Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution over 202.81km of Fiber. Physical Review Letters 125: 010502.
464	Zhao, Y., Cao, Y., Wang, W., Wang, H., Yu, X., Zhang, J., Mukherjee, B.(2018), Resource allocation in optical networks secured by quantum key distribution, IEEE Communications Magazine, 56(8), 130-137.
465	Zhenfei Song et al., (2019) Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier, Opt. Express 27(6).
466	Zheshen Zhang, Sara Mouradian, Franco N. C. Wong, and Jeffrey H. Shapiro(2015), Entanglement-Enhanced Sensing in a Lossy and Noisy Environment, Physical Review Letters, 114: 110506.

• 사이트

1	http://www.wooriro.com/bbs/board.php?bo_table=product04
2	https://arxiv.org/abs/2011.13907
3	https://eetimes.eu/cea-leti-details-silicon-based-quantum-computing-roadmap/
4	https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/
5	https://ionq.com/news/october-01-2020-most-powerful-quantum-computer
6	https://medium.com/@pchojecki/quantum-advantage-b3458646bd9
7	https://news.mit.edu/2020/lighting-ion-trap-1104
8	https://physics.aps.org/articles/v13/15
9	https://purl.stanford.edu/kd753jv6128
10	https://qt.eu/
11	https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf
12	https://qt.eu/app/uploads/2018/04/QT-Roadmap-2016.pdf
13	https://quantera.eu/taiol/
14	https://quantumai.google/qecmilestone
15	https://quantumlab.engin.umich.edu/projects/
16	https://quantumoptics.at/images/miscellaneous/IonTrappers.pdf
17	https://qutech.nl/2015/09/03/qutechentersintocollaborationwithintel/
18	https://uknqt.ukri.org/
19	https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf
20	https://www.darpa.mil/news-events/2014-07-24
21	https://www.datacenterdynamics.com/news/ces-ibm-announces-q-system-one-quantum-computer-9ft-cube/
22	https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/20/2001-01.html
23	https://www.ibm.com/quantum/roadmap
24	https://www.idquantique.com/idq-celebrates-10-year-anniversary-of-the-worlds-first-real-life-quantum-cryptography-installation/
25	https://www.idquantique.com/quantum-xchange-and-id-quantique-make-ultra-secure-quantum-networks-a-reality-for-leading-us-industries/
26	https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2022/INFXX202207-098.html
27	https://www.kriss.re.kr/
28	https://www.muquans.com/
29	https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/better-way-measure-acceleration
30	https://www.nist.gov/noac/technology/mass-force-and-acceleration/optomechanical-accelerometers
31	https://www.nist.gov/pml/productsservices/nist-chip-portal
32	https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-communications-and-networks

33	https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/
34	https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1945832
35	https://www.overons.kpn/nieuws/en/kpn-to-implement-quantum-encrypted-connection-qkd
36	https://www.physics.ox.ac.uk/research/group/ion-trap-quantum-computing/research-areas/abaqus
37	https://www.rydbergtechnologies.com/
38	www.army.mil/article/233809/army_scientists_create_innovative_quantum_sensor
39	www.darpa.mil/about-us/timeline/chip-scale-atomic-clock
40	www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf
41	www.darpa.mil/news-events/2021-08-04
42	www.darpa.mil/program/quantum-assisted-sensing-and-readout
43	www.i-micronews.com/quantum-compass-could-allow-navigation-without-relying-on-satellites/
44	www.militaryaerospace.com/sensors/article/14039298/quantum-radar-stealth-detailed-image
45	www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2022/Cryospheric_Rydberg_Radar/
46	www.nature.com/articles/nature13586
47	www.nist.gov/noac/success-story-chip-scale-atomic-clock
48	www.physik.hu-berlin.de/en/niqo/research/quantum-imaging
49	www.thedrive.com/the-war-zone/16488/china-says-its-building-a-ghost-imaging-satellite-to-detect-stealth-jets
50	www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/09/UKRI-280921-UKQuantumTechnologiesChallengeTheDirectory.pdf
51	https://www.luxquanta.com/solutions
52	http://wooriro.com/

III 양자기술 소재·부품·장비 산업생태계 동향

제1장 양자통신분야 주요기술과 소부장

제2장 양자센싱분야 주요기술과 소부장

제3장 양자컴퓨팅분야 주요기술과 소부장

제1장
양자통신분야 주요기술과 소부장

제1절 개요

양자산업을 구성하는 소재, 부품, 장비, 서비스의 개념을 살펴보면 소재는 양자기술을 구현하기 위한 바탕이 되는 재료를 말하며 고순도 단결정 양자소재, 반도체 소재, 유전체 소재, 초전도 소재 등이 이에 해당한다. 부품은 독립적인 동작도 가능하고 다른 부품과 함께 장비를 이루는 요소 기술도 될 수 있는데 단일광자 검출기, 양자 난수 생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG), 광분리기 등이 이에 해당한다. 그리고 장비는 양자기술을 활용하여 서비스 제공이 가능한 장치를 말하며, 어떤 서비스를 제공하느냐에 따라 다른 장비와 함께 구성할 수 있는 가능성도 존재한다. 또한, 장비의 일부로서 양자 환경을 제공하는 장치 또한 장비의 정의에 포함할 수 있다. 마지막으로 서비스의 경우 양자기술이 적용된 장비 등을 활용해 유·무형의 생산물을 사용자에게 제공하는 것을 말하는데, 양자암호 서비스, 양자컴퓨팅 클라우드 등이 이에 해당한다.

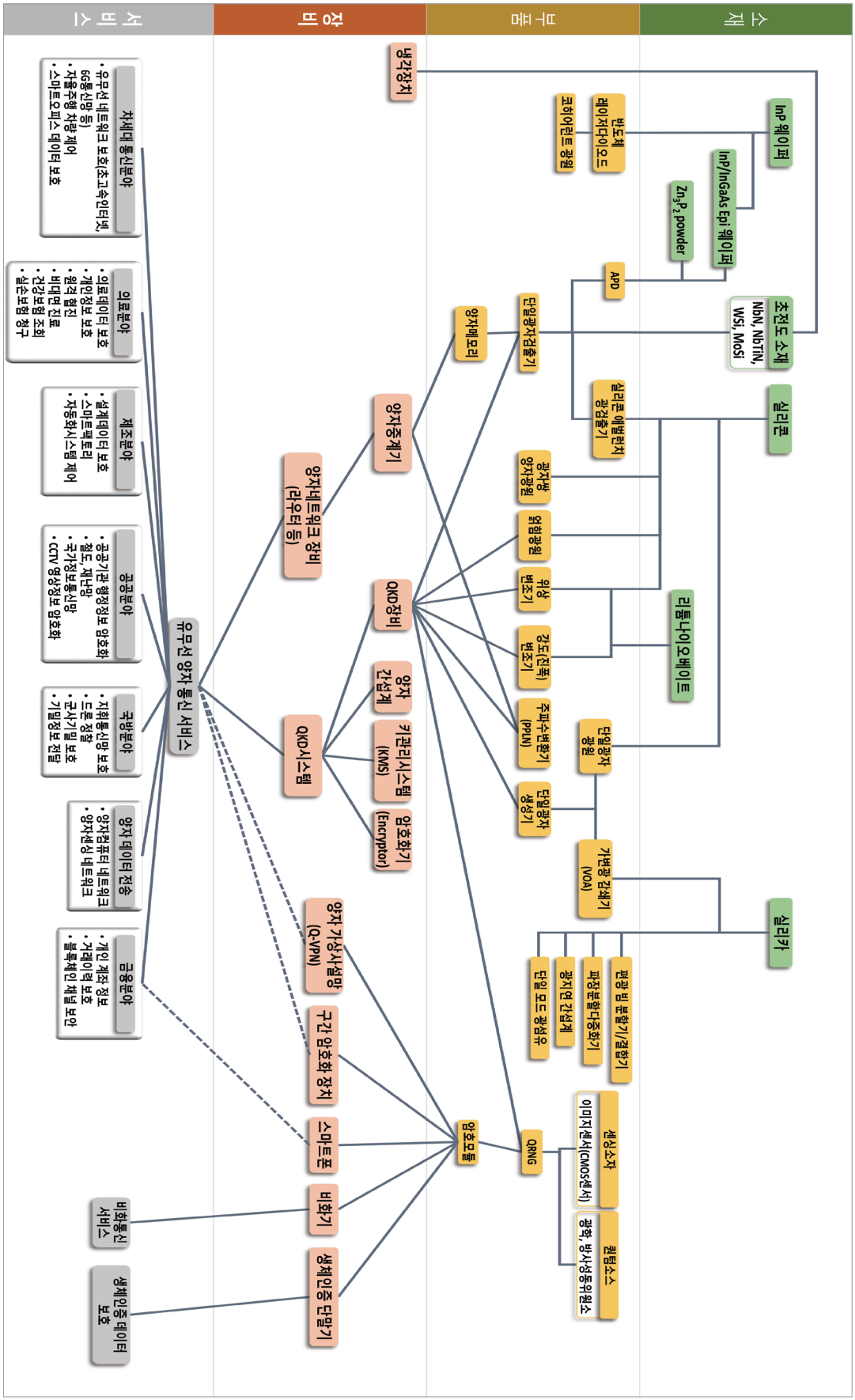
표 III-1-1 소재·부품·장비·서비스 정의

구분	소재	부품	장비	서비스
정의	양자부품 등을 만드는 데 있어 바탕이 되는 재료	독립적 동작도 가능하며 장비의 일부분을 구성	양자기술을 사용해 서비스 제공이 가능한 장치 또는 환경 유지 장치	양자기술로 유 · 무형의 생산물을 제공하는 분야
예시	고순도 단결정 양자소재, 반도체 소재, 유전체 소재, 초전도 소재 등	단일광자 검출기 QRNG Chip, 광분리기 등	고진공 챔버, 냉각장치, QKD 장치 등	양자암호 서비스, 양자컴퓨팅 클라우드 등

전 세계적으로 초기 단계인 양자산업의 현실을 고려할 때, 주요 양자기술의 확보를 통해 시장 선점에 성공할 경우 공급망 안정은 물론 해외시장 개척까지 기대할 수 있다. 그러나 시장 선점에 실패한다면 국내 양자산업은 주요 소재·부품·장비 공급을 해외 수입에 전적으로 의존해야 등 취약한 구조로 내몰릴 위험성이 높다. 더욱이 각국의 양자기술에 대한 전략적 수출규제가 예상되는 상황에서, 미래 국가경쟁력 유지를 위해 양자기술 관련 글로벌 공급망의 다원화와 함께 주요 소재·부품·장비에 대한 내재화(內在化)가 절실하게 요구된다. 이러한 차원에서 이번 편에서는 양자통신·센서·컴퓨터의 주요기술에 대해 알아보고, 양자통신·센서·컴퓨터를 이루는 주요 소재·부품·장비에 대한 현황 및 공급망 정보에 대해 알아보고자 한다.

1장에서 다룰 양자통신은 현재 시점에서 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD), 양자 내성 암호(Post Quantum Cryptography, PQC), 양자 난수를 활용한 암호 등으로 주로 분류된다. 수학적 알고리듬을 기반으로 하는 PQC의 경우 기존 통신장비 소재·부품·장비와 큰 차이점을 발견하기 어려워 본 백서에서는 언급을 생략하기로 한다.

그림 III-1-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자통신)



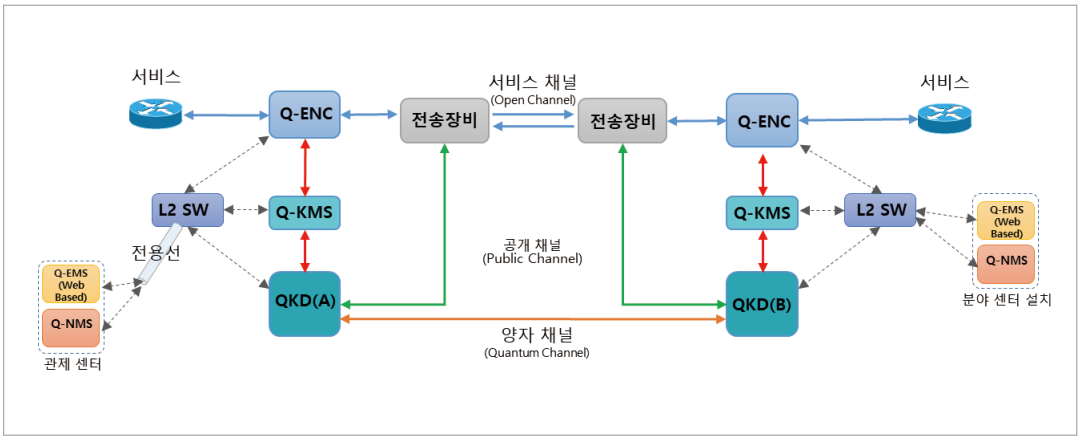
제2절 양자 키 분배(QKD)

1. 요점

현대 통신에서는 데이터 보호를 위해 송·수신자 간 상호 약속된 암호키를 통해 데이터를 암호화해 전송한다. 암호키는 크게 대칭키와 비대칭키 방식으로 나뉘는데, 비대칭키의 경우 이에 속하는 암호화키와 복호화키가 서로 다른 방식의 수학적인 원리를 이용해 구현된다. 흔히 사용하는 RSA(Rivest Shamir Adleman) 암호의 경우, 큰 수의 소인수분해가 어렵다는 수학적 계산의 어려움을 기반으로 만들어진 비대칭키 방식 알고리듬이다. 그러나 이러한 비대칭키 암호는 양자컴퓨터 발전으로 인해 그 보안성에 위협을 받고 있다. 대표적인 예가 미국 벨랩(Bell Lab)의 과학자 피터 쇼어(Peter Shor)가 고안한 '소인수분해 양자알고리듬'같은 것들이다. 물론 양자컴퓨터가 모든 암호를 해독할 수 있다고 말하기엔 아직 시기상조인 것이 사실이다. 하지만 고전 컴퓨터로 해독할 수 없던 기존 암호알고리듬을 해독하는 양자알고리듬이 속속 개발되고 있으며, 양자컴퓨터 연산능력이 발전함에 따라 그에 비례해 이러한 시도가 더욱 활발해지고 있다.

이번 절에서 다루는 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD)의 경우 대칭키 방식을 사용한다. 대칭키는 송신자와 수신자가 동일한 암호키를 가지고 데이터를 암·복호화 하는 방식인데, 수학적 알고리듬을 사용하지 않기에 양자컴퓨터 암호 해독에도 안전하다 볼 수 있다. 다만 송·수신자 간 암호키의 안전한 공유가 최대 과제라 할 수 있다. 현대 통신에서 비대칭키 방식의 암호가 많이 쓰이는 이유도 안전하게 암호키를 나눠 가지는데 어려움이 따르기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고안된 양자 키 분배는 송신자와 수신자가 암호키를 양자상태로 전송해 나눠 갖는 방식이다. 이처럼 양자상태로 전송되는 암호키의 경우, 양자상태는 복제 불가능성 원리에 의해 복제 불가능하며 도·감청을 시도하면 양자상태의 변화를 불러와 오류를 일으키므로 도청이 불가능한 안전한 통신이 이뤄질 수 있는 것이다.

그림 III-1-2 QKD를 이용한 통신망 구성도



※ 집필진 작성

양자 키 분배에서는 전송 매체에 따라서 광섬유를 이용하는 유선 양자 키 분배 기술과 대기 환경을 이용하는 무선 양자 키 분배 기술, 초장거리 대기 환경의 위성을 이용하는 위성 양자 키 분배 기술로 구분할 수 있다. 유선 양자 키 분배 기술은 광섬유의 저 손실 파장 대역인 근적외선 영역인 1,550nm 또는 1,310nm 파장 대역을 주로 사용하고 있으며, 무선 또는 위성 양자 키 분배 기술은 가시광 파장 대역인 500nm ~ 900nm에서 주로 사용하고 있다. 따라서, 양자 키 분배 기술의 소재, 부품, 장비 기술은 근적외선 영역인 1,550nm 파장 대역 뿐만 아니라 가시광 파장 대역에서의 기술 개발도 필요하다.

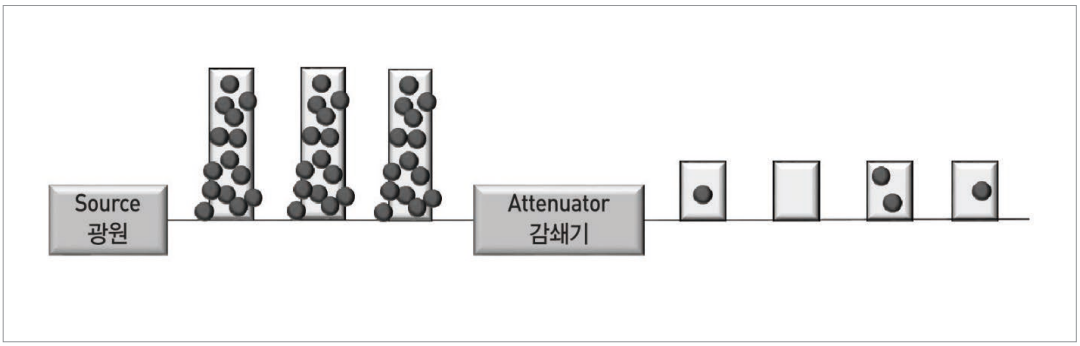
2. 구성요소

가. 단일광자 생성

QKD에서 이상적인 단일광자 생성기는 한 번에 하나의 광자를 생성해야 한다. 그러나 현 상태 기술력으로는 아직 완벽한 단일광자를 생성해 사용하는데 한계점이 존재한다. 그렇기에 일반적으로 유사 단일광자(Pseudo Single Photon) 광원을 사용하고 있다. 기술적 한계를 뛰어넘기 위해 레이저 펄스를 아주 약하게 감쇄시켜 하나의 펄스에 두 개 이상 광자가 존재할 확률이 작은 상태로 만든, 유사 단일광자를 이용하고 있는 것이다.

한편 QKD 시스템의 안전성은 단일광자 복제 불가능성에 기반을 두고 있다. 통신에서 도청자는 차단-재전송(Intercept-Resend) 과정을 통해 도청을 하는데, 양자암호통신에서는 단일광자의 복제 불가능성을 이용하기에 도청자가 중첩 상태에 있는 양자를 오류 없이 정확히 측정해 복제하는 일이 불가능하다.

그림 III-1-3 유사 단일광자 생성 개념도



※ 임용재 외 (2015)

QKD 시스템에 사용되는 유사 단일광자 상태의 통계적 특성은 포아송(Poisson) 분포를 따른다. 앞서 언급했듯 펄스 당 평균 광자 수를 줄임으로써 하나의 레이저 펄스에 두 개 이상 광자가 존재하는 경우를 줄이는 방식이다. 이로써 다광자(Multiple Photon) 상태에 의한 도청 가능성을 최소화할 수 있다.

그림 III-1-4 포아송(Poisson) 분포

$$P(x) = \frac{e^{-\mu} \cdot \mu^{x}}{x!}$$

x : 하나의 펄스에서 존재하는 광자수
μ : 펄스당 평균 광자수

※ 김용수 외 (2014)

표 III-1-2 유사 단일광자 상태에서 펄스 당 발견된 광자 수의 확률

	μ=0.01	μ=0.05	μ=0.1	μ=0.5	μ=1	μ=2	μ=5	μ=10
P(x=0)	0.990	0.951	0.905	0.607	0.368	0.135	0.007	$4.54e^{-5}$
P(x=1)	0.010	0.048	0.090	0.303	0.368	0.271	0.034	$4.54e^{-4}$
P(x=2)	$4.95e^{-5}$	0.001	0.005	0.076	0.184	0.271	0.084	0.002
P(x=3)	$1.65e^{-7}$	$1.98e^{-5}$	$1.51e^{-4}$	0.013	0.061	0.180	0.140	0.007
P(x=4)	$4.13e^{-10}$	$2.48e^{-7}$	$3.77e^{-6}$	0.002	0.015	0.090	0.175	0.019
P(x=5)	$8.25e^{-13}$	$2.48e^{-9}$	$7.54e^{-8}$	$1.58e^{-4}$	0.003	0.036	0.175	0.038

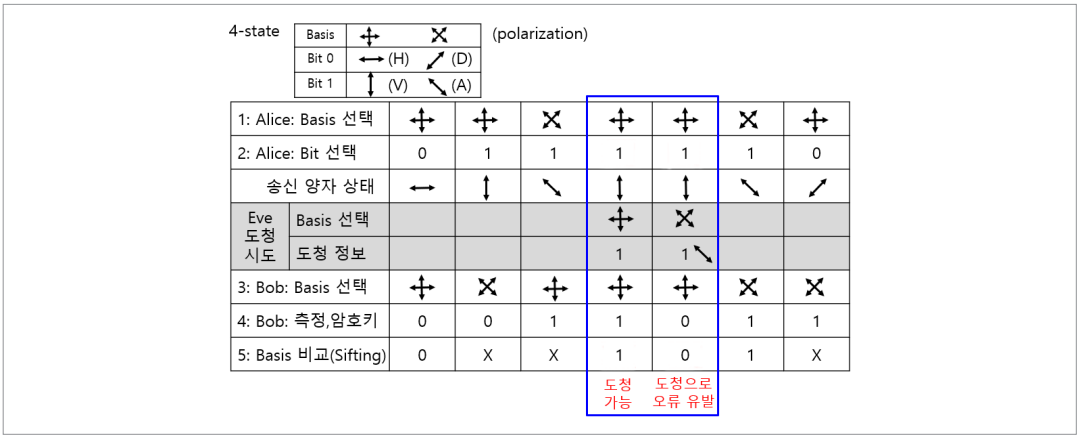
※ 김용수 외 (2014)

나. 양자 키 분배 프로토콜

QKD에서 사용하는 키 분배 프로토콜은 BB84, E91, SARG04, DPS, COW, TF, MDI, CV 등 다양한 방식이 있다. 이번 단락에서 소개하고자 하는 BB84 프로토콜은 최초로 고안된 양자키 분배 프로토콜로 1984년 Bennett와 Brassard가 처음 제안해 가장 널리 사용되고 있다. BB84 프로토콜로 명명된 정의는 다음 그림과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 기저(Basis)를 이루는 네 개 양자상태를[1] 이용한다.

1) 대표적으로 단일광자 편광상태

그림 III-1-5 BB84 프로토콜 예시

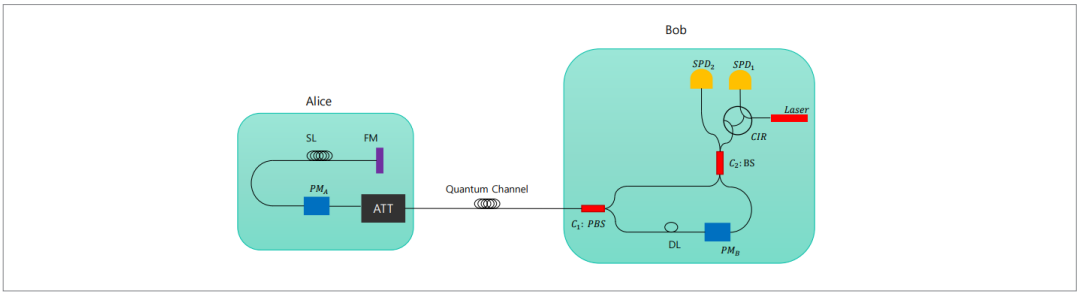


※ 윤천주 (2022)

총 5단계로 구성되어 있는데 우선 1단계에선 송신자 두 개의 기저, 즉 '✣' 혹은 '✕' 중 한 개를 무작위로 선택한다. 다음 단계에서는 선택된 기저에서 0 또는 1 중 하나를 임의로 선택하여 수신자에게 전송한다. 3단계에 들어서면 양자상태를 수신하는 측에서도 두 가지 기저 중 하나를 무작위로 선택한다. 이어 4단계로 넘어가면 선택한 기저를 사용해 수신된 양자상태를 측정함으로써 암호키 값을 결정하게 된다. 수신자 측정이 끝나고 5단계에 접어들면, 수신자는 자신들이 임의로 선택한 기저를 서로에게 공개한다. 이때 송신자가 선택한 기저와 수신자가 선택한 기저가 다른 경우 암호키를 사용하지 않게 되며, 같은 경우에는 송신자와 수신자, 양측의 양자상태가 동일함을 의미하게 된다. 따라서 후자의 경우 두 사용자가 같은 암호키(Sifted Key)를 가지게 된다.

[그림 III-1-5]를 다시 살펴보면, 만약 중간에 도청자(Eve)가 도청을 시도한다면 양자역학의 기본 원리에 의해, 두 사용자(Alice 및 Bob)가 얻은 암호키 값에 오류를 유도할 수 있다. 이때 Alice와 Bob은 생성된 키 일부를 서로에게 공개하고 오류 비율을 계산함으로써 Eve의 존재 여부를 검증할 수 있다.

그림 III-1-6 유선 2-Way 방식 위상제어를 이용한 BB84 프로토콜 장비구현 예시



※ KT 융합기술원 (2022)

BB84 프로토콜에 의한 장비구현 사례 중, 2-Way 방식은 수신자(Bob)에 광원이 있어 일단 수신자 측에서 광원의 세기를 높여 전송한 뒤 송신자(Alice) 측에서 수신자 측으로 광원이 돌아올 때 단일광자 신호 크기로 전송하는 방식이다.

이때 수신자 측에서 단일광자 검출부에 간섭하는 두 단일광자는 필히 편광이 일치해야 한다. 이후 수신된 두 개 단일광자 검출기를 Gated Geiger 모드로 동작해 간섭 신호를 선택적으로 검출하는데, 중첩된 두 개의 검출 확률은 상대적 위상차에 따라 보강 간섭 또는 상쇄 간섭하게 된다. 다음 표는 유선 2-Way 방식 위상제어를 이용해 검출된 부호화 값을 나타낸 것으로, 의문부호가 붙은 곳은 양자 간 기저정보가 일치하지 않아 정확한 데이터가 검출되지 않은 경우를 뜻한다. 이처럼 양자암호키 분배시스템의 기저교환 절차를 거쳐 유효한 데이터와 무효한 데이터를 걸러낼 수 있으며, 간섭광 위상차가 '0'이면 단일광자검출기 SPD2에서 광자가 검출되고 '1'로 간주하며, 간섭광 위상차가 'π'이면 단일광자검출기 SPD1에서 광자가 검출되고 '0'으로 간주한다.

표 III-1-3 유선 2-Way 방식 위상제어를 이용해 검출된 부호화 값 예시

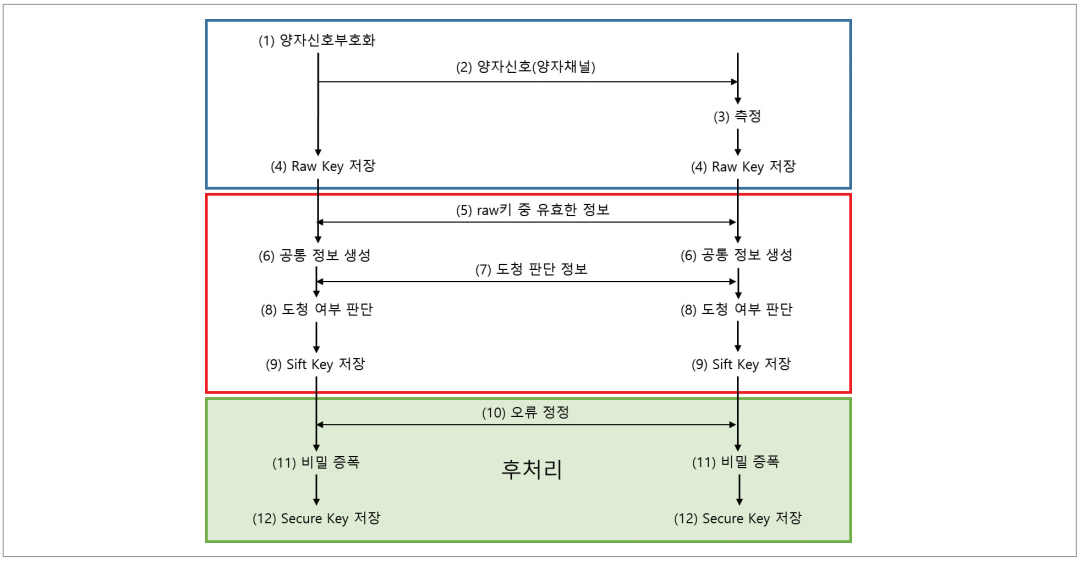
단계	내용	부호화 값							
1	Alice 비트(bit) 정보	0		1		0		1	
	Alice 기저(basis) 정보	0	1	0	1	0	1	0	1
2	Alice 위상 변조(Φ_A)	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
3	Bob기저(basis) 정보	0				1			
4	Bob 위상 변조(Φ_B)	0				$\pi/2$			
5	SPD 1 간섭광 위상차($\Phi_A-\Phi_B-\pi$)	$-\pi$	$-\pi/2$	0	$\pi/2$	$-3\pi/2$	$-\pi$	$-\pi/2$	0
	SPD 2 간섭광 위상차($\Phi_A-\Phi_B$)	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	$-\pi/2$	0	$\pi/2$	$-\pi$
6	SPD 1 검출 확률	0	?	1	?	?	0	?	1
	SPD 2 검출 확률	1	?	0	?	?	1	?	0

※ 집필진 작성

다. 후처리 기능

후처리(Post-processing) 기능은 여러 요인으로 인해 발생한 송신자와 수신자 사이 정보 불일치를 해소해 양자가 동일한 정보를 가질 수 있게 만들어 주는 과정이다. 다만 미리 오류 정정을 위해 부호화하는 것이 아니라 송신자와 수신자 간 암호키 정보 전송이 끝난 뒤, 추가적인 정보 전송을 통해 오류를 정정해 나간다. 이때 추가적인 정보 전송의 과정은 일반적인 인터넷 환경과 같은 공개채널(Public Channel)을 통해 이뤄지기에 비밀성 증폭의 과정을 추가해야 하며, 이와 같은 과정을 거쳐 누출된 정보량을 제거할 수 있다.

그림 III-1-7 후처리 흐름도



※ 김나영 외 (2018) 집필진 재구성

후처리 진입 조건은 다음과 같다. 송신자와 수신자 간 큐비트 송·수신을 통해 원시 양자키(Raw Key)를 생성한 후, 양자 간 서로 기저를 교환해 이를 통해 걸러진 키를 재차 생성한다. 이처럼 양측 기저가 동일한 상태에서 무작위 위치의 걸러진 키 정보를 교환한 후, 양자비트 오류율(Quantum Bit Error Rate, QBER)을 확인한다. 그 다음 확인에 사용된 교환 키 부분은 버리고, 송신자와 수신자 간 상호 도청정보를 교환해 도청 유무를 검증한다. 위 단계까지 이상 유무를 확인한 후 송신자 측에서 종료 메시지를 보내면, 교환에 사용된 키 데이터를 이용해 후처리 프로세스를 수행하기 시작한다.

표 III-1-4 후처리 목록 및 사용되는 알고리듬 예시

후처리 목록	알고리듬	용도
오류 정정	Cascade	송 · 수신자가 공개채널을 이용해 공유한 걸러진 키를 일치시키기 위한 비트 오류 정정 기법
오류 검증	SHA-256	오류 정정된 키의 해시값을 비교해 오류 정정이 완료되었는지 확인
비밀 증폭	Toeplitz 행렬	유출된 걸러진 키의 정보와 이로 인해 유출 가능한 비밀키 정보를 제거하기 위함

※ 집필진 작성

3. 소재

가. 인듐인(InP)

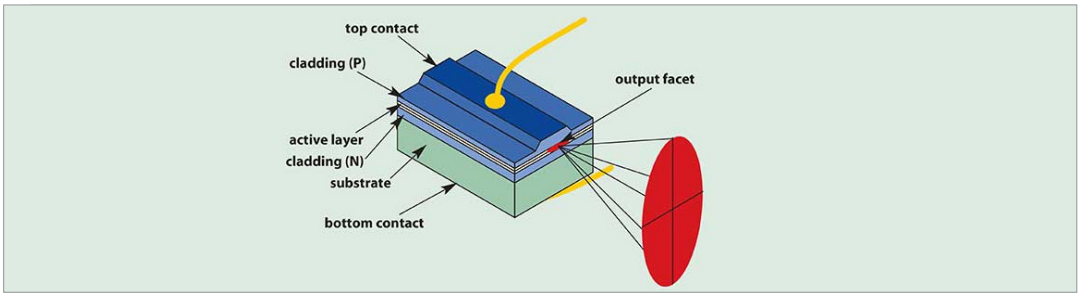
InP는 화합물 반도체로 반도체 레이저 다이오드, 광변조기, 반도체 광증폭기, 광검출기 등에 응용되고 있으며 광통신용 소자로 상용화돼 많이 사용되고 있다. InP 소재 기반 양자통신용 소자로는 반도체 레이저 다이오드를 이용한 양자 통신용 결맞음(Coherent) 광원과 아발란치 포토 다이오드(Avalanch Photo Diode, APD)를 이용한 단일광자 검출기가 있을 수 있다.

InP 기판은 얇은 원판 형태로 되어 있으며, 화합물 반도체 공정의 핵심 재료이다. 화합물 반도체 생성과정에서 기판 위에 원하는 구조의 에피층(Epitaxial Layer)을 성장시킬 때, 기판의 전위 밀도(Dislocation Density)와 도핑 농도, 격자 상수 등이 제어되지 않으면 원하는 특성을 얻을 수 없다. 또 적층 성장(Epitaxial Growth) 전 기판 표면의 연마 정도 및 세척이 매우 중요한 변수이다. 1550nm 통신 파장을 흡수하기 위한 인듐갈륨비소층(InGaAs Layer)을 성장시키기 위해 격자 상수가 일치하는 InP 기판을 주로 사용하고 있다.

반도체 레이저 다이오드의 경우 직접 천이형 밴드구조를 갖는 반도체 p-n 접합에 순방향 전류를 흘려주면, 전도대 전자와 가전자대 정공이 재결합되며 그 에너지 차이에 해당하는 파장의 빛이 발생한다. 이어 2개의 평행한 거울면에 의해 빛이 왕복 반사되는 현상과 특정 주파수 광자의 선택으로 얻을 수 있는 이득을 이용하면 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 유도 방출이 생성되면 동일한 위상과 간섭성, 그리고 파장을 가지는 광자들을 생성할 수 있는 것이다.

이밖에도 반도체 레이저 다이오드의 경우 그 직진성과 수 μm에 불과한 미세 발광 스팟크기, 단색성, 고광밀도, 간섭성 등과 같은 특성을 활용해 다양하게 응용되고 있다. 그 대표적인 예로 고속 광통신, 광디스크, 레이저 프린터, 레이저 포인터, 레이저 현미경, 거리 측정기, 미세 연기 및 먼지 경보기, 레이저 마우스 등을 꼽을 수 있다.

그림 III-1-8 반도체 레이저 다이오드 기본 구성도



※ photonics.com

화합물 반도체 부품 제작을 위해서는 기판 위에 원하는 구조를 생성시킬 수 있는 에피택셜 웨이퍼(Epitaxial Wafer)가 필요하다. 또 양자암호 통신용 APD칩 제작을 위해서는 1550nm 파장까지 흡수할 수 있는 InGaAs Layer를 InP 기판 위에 성장시켜야 하며, 이때 격자 상수가 일치되게 성장해야 결정결함생성(Defect Generation)을 최소화할 수 있다.

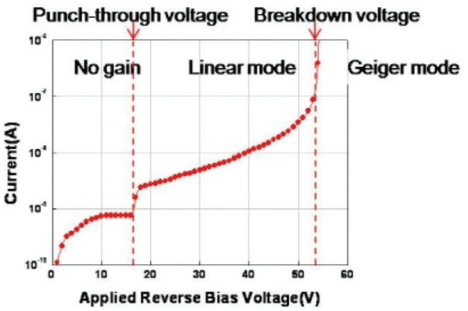
InP 기판 위에 흡수층인 InGaAs층을 성장시킨 후 그 InGaAs층 위에 전기장 제어층과 증폭층으로 사용될 InP층을 다시 성장해야 하는데, 이때 전기장 제어층의 두께 및 도핑 농도 제어가 APD Chip 특성에 많은 영향을 미치므로 정확한 제어가 필수다. 또 증폭층으로 사용될 층은 도핑 농도를 최대한 낮게 성장시켜야 하며, 원하는 두께로 제어가 가능해야 한다. InP 기판 위에 성장된 InP/InGaAs 에피웨이퍼는 n-type or Undoped Layer로 구성돼 있다. APD chip으로 동작하기 위해서는 p-n 접합을 형성시켜야 하고, p-type층의 경우엔 아연(Zn)을 확산시킴으로써 형성된다. 아연을 확산시키는 방법으로는 기상확산방법(Gas-phase Diffusion)과 고체상태확산방법(Solid-phase Diffusion), 두 가지가 주로 사용되고 있다. Sealed Ampule 방법도 있으나, 양산성이 좋지 않아 오늘날에는 거의 사용하지 않고 있다.

한편 반도체 기반 광검출기는 구조와 동작 원리에 따라 다양한 종류가 있다. 일례로 p-type 및 n-type 반도체 사이 진성 반도체(Intrinsic Semiconductor)를 둔 p-i-n 포토 다이오드(PIN-PD)가 있고, 역전압을 인가해 아발란치 항복이 일어나게 함으로써 내부에 이득을 가지도록 한 APD도 있다.

APD의 장점은 다이오드 내 내부 증폭을 가지고 있어 신호의 크기를 크게 할 수 있기에, 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 PIN형 검출기에 비해 월등히 우수하다는 점이다. 역전압을 항복전압보다 작게 인가할 경우 출력 전류 크기와 입력되는 광의 세기가 선형적으로 비례해 증가하고 역전압 크기에 비례해서도 이득 특성을 가진다는 장점도 있다. 이를 선형 모드(Linear Mode)라 하는데, 미세한 크기의 단일광자 검출을 위해서는 민감도가 매우 높아야 하며 이를 위해서 역전압을 항복전압보다 크게 인가하는 가이거 모드(Geiger Mode)를 적용할 수 있다.

다음 그림에서 보듯 선형 모드와 가이거 모드는 동작 시 각각 다음과 같은 수준의 바이어스 전압과 전류 레벨, 그리고 특징들을 가진다. 증폭층에 인가하는 전기장 세기가 크기에, 소량 광자를 흡수하더라도 아발란치 전류 항복현상이 발생해 거대 전류 펄스의 출력이 일어남으로써 단일광자 검출이 가능한 원리이다.

그림 III-1-9 APD의 두 모드(Linear and Geiger Mode)

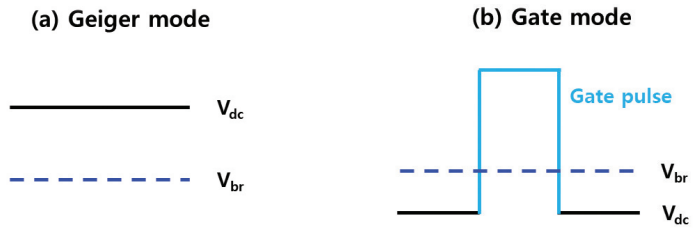


작동방식	Linear mode	Geiger mode
동작전압	광이득이 약 10인 바이어스 전압	항복전압 이상의 바이어스 전압
동작방식	일정 바이어스 전압조건에서 신호 획득	짧은 시간 동안 Geiger 모드로 동작
특성	입사 광량에 일정 이득으로 전류 생성	단일광자 레벨 입력에 디지털 출력신호 발생
이득구간	10~100	10^5~10^7
응답속도	~0.1nsec	~0.1nsec
수신감도	100photons/1nsec	1 photon/1nsec

※ 이욱재·심재식·윤천주 (2020)

보통 InGaAs/InP APD를 이용한 단일광자 검출기를 사용할 때는 검출효율을 높이기 위해 내부 이득이 무한대에 도달할 수 있는 가이거 모드를 적용한다. 그러나 가이거 모드 동작을 위해 연속적으로 항복전압보다 높은 전압을 인가할 경우, Negative Feedback이 없기 때문에 무한대의 전류가 흘러 소자가 파괴될 것이다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위해 가이거 모드 동작 방법 중 일정한 펄스 시간 이내에만 가이거 모드 동작을 하는 게이트 모드(Gate Mode)로 APD를 동작시킨다.

그림 III-1-10 가이거 모드(Geiger mode)와 게이트 모드(Gate mode)



※ 이민수 외 (2015)

다음은 대표적인 화합물 반도체 소재의 공급처이다.

표 III-1-5 대표적인 소재(InP 웨이퍼) 공급처

소재명	공급처
InP 웨이퍼	웨이퍼비즈, MTI Korea, Vital Materials, PAM-XIAMEN, Biotain crystal

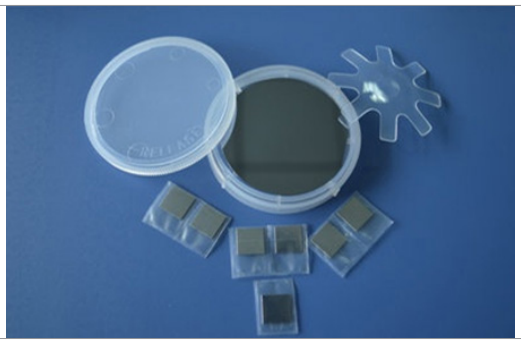
표 III-1-6 대표적인 소재(에피택셜 웨이퍼) 공급처

소재명	공급처
에피택셜 웨이퍼	IQE(영국), LandMark(대만), Intelliepi(미국), QSI(한국)

표 III-1-7 대표적인 소재(Zn_3P_2) 공급처

소재명	공급처
Zn_3P_2	㈜티파인, ㈜하나로티알, Funcmater

그림 III-1-11 InP 기판



※ aemdeposition.com

나. 실리카(SiO_2)

실리카는 규소(Si)와 산소(O)가 1:2 비율로 결합해 구성되며, 포함되는 불순물 종류와 양에 따라 굴절률 조절이 가능한 특징을 지닌다. 따라서 고굴절률의 실리카 채널(Core)을 저굴절률의 실리카(Clad)로 둘러싸 광도파로로서 동작하도록 할 수 있다. 반도체 기판 위의 실리카는 화학기상성장법(Chemical Vapor Deposition, CVD), 화염가수분해증착법(Flame Hydrolysis Deposition, FHD) 등의 방법으로 박막 형태를 형성할 수 있어, 코어와 클래드 간 굴절률 차와 코어 두께 제어를 통해 도파로의 광모드 크기를 조절할 수 있는 것이다. 과거만 해도 단일모드 광섬유와의 저손실 결합을 위해 저굴절률차 구조가 쓰였다면, 최근에는 칩 소형화 요구가 증가하며 고굴절률 차가 다방면에 적용되는 추세이다.

한편 실리카 광도파로 기술은 광통신 소자 개발에 오랫동안 활용돼 왔다. 실리콘이나 질화규소화합물(Silicon Nitride, SiNx)에 비해 상대적으로 굴절률 차가 작아 부품 소형화엔 불리하나 소자 안전성이나 낮은 손실 수준, 높은 기술 성숙도에 따른 양호한 양산성 등에서 장점을 지니고 있기 때문이다. 무선 양자통신에서는 대표적으로 편광 빔 분할기 및 빔 결합기, 가변광감쇄기, 파장분할 다중화기 등에 사용될 수 있으며 유선 양자통신 분야에선 광지연 간섭계, 단일광자 수준 광 감쇄를 위한 가변광감쇄기 등에 적용될 수 있다. 실리카 기반 양자통신용 소자를 개발하고 있는 대표적 기관으로는 국내의 한국전자통신연구원(ETRI)과 국외의 일본전신전화주식회사(NTT) 등이 있다.

표 III-1-8 대표적인 소재(SiO_2) 공급처

소재명	공급처
SiO_2	PPI, Neon Photonics, ㈜우리로

그림 III-1-12 실리카 PLC 웨이퍼



※ ppitek.com

다. 실리콘(Si)

원소 번호 14인 실리콘은 지구에서 산소 다음으로 많은 물질로, 반도체 제조과정에서 핵심적인 물질이다. 순수 실리콘은 반도체 웨이퍼로 사용되며 인(P)이나 붕소(B) 등 이온 주입을 통해 전기 전도도를 높임으로써 다양한 전자소자 및 광소자로 응용할 수 있다.

유·무선 양자암호통신에선 실리콘 기반 양자부품 기술이 많이 사용되고 있다. 이를 통해 양자암호통신용 부품들의 초소형화와 제작단가 감소를 지향하고 있다. 특히 광자쌍 양자 광원, 광변조기, 광검출기 등에서 실리콘 기반 양자부품들이 많이 활용되는데 기존의 다양한 전자소자 및 광소자와 결합해 사용할 수 있어 저비용·소형화·집적화를 현실화할 수 있는 가장 좋은 물질로 기대되고 있다.

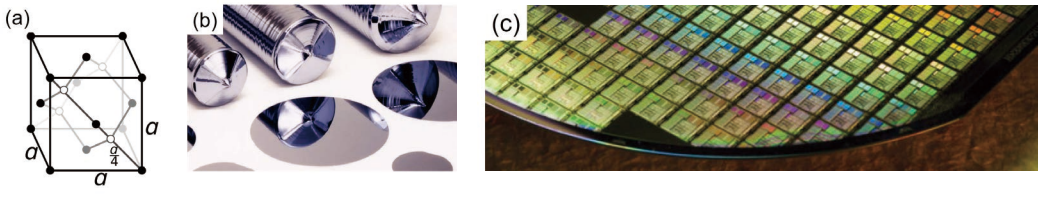
구체적으로 순수한 실리콘에 불순물인 P나 B를 주입하면 전자 및 정공의 밀도를 변화시킬 수 있다. 이를 통해 실리콘 굴절률을 변화시킬 수 있으며, 이러한 특성을 이용해 실리콘 도파로를 통과하는 광자의 위상 값을 변화시킴으로써 변조기 형태의 양자소자를 제작할 수 있는 것이다. 또 실리콘 기반 단일광자 검출기는 실리콘 아발란치 광검출기를 가이거 모드로 동작시킴으로써 제작할 수 있다. 이 경우 가시광 파장대역에서 60~70% 이상의 단일광자 검출효율을 얻을 수 있어 양자정보기술 외에 라이다, 센서 등에서도 폭넓게 활용 가능하며 몇 개 회사를 통해 이미 상용화 단계에 접어들고 있다.

국내 실리콘 기반 양자암호 부품에 관한 연구는 한국전자통신연구원(ETRI), 포항공과대학교(POSTECH) 등에서 이뤄지고 있다. 국외 연구그룹으로는 도시바 유럽(Toshiba Europe), 브리스톨대학교(University of Bristol), 토론토대학교(University of Toronto), 매사추세츠 공과대학교(MIT), 중산대학교(Sun Yat-sen University) 등이 있다.

표 III-1-9 대표적인 소재(Si) 공급처

소재명	공급처
Si	AMF, CEA-LETI Photonics, Global Foundries, IHP, imec, LioniX

그림 III-1-13 (a) 실리콘 결정 구조, (b) 실리콘 잉곳과 웨이퍼,
(c) 반도체 공정이 진행된 실리콘 기반 전자(또는 광)소자의 예



※ YOSHIFUMI, (주)라이팩, wikipedia.org

라. 리튬나이오베이트($LiNbO_3$)

리튬나이오베이트(Lithium Niobate, LN)는 아주 높은 2차 비선형성을 가진 물질로 위상 광변조기, 강도 광변조기 등 많은 상용제품에서 이미 사용되고 있다. 양자암호통신 분야에선 광변조기를 이용해 양자상태를 변조 및 제어해야 하기에 필수적으로 쓰일 수밖에 없는 소재이기도 하다.

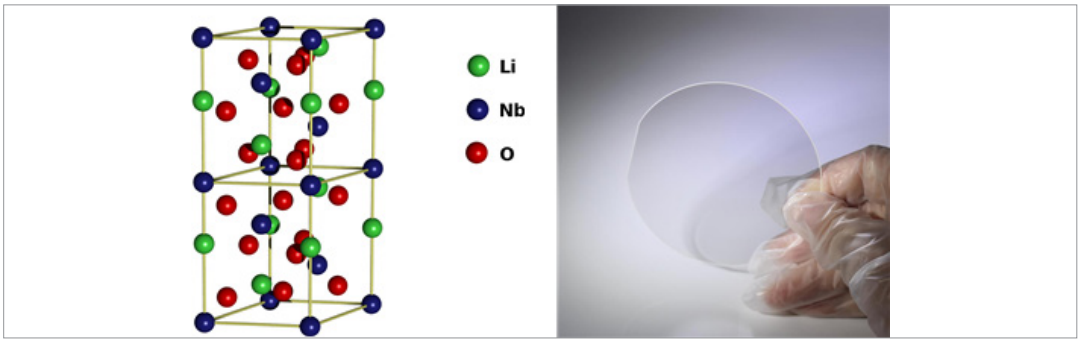
현재는 해당 소재를 상용제품을 구성하는 부품의 구성요소 정도로 활용하고 있다. 그러나 집적화된 양자통신 칩 제작을 위해서는 하나의 칩 위에 여러 부품을 집적해야 하기에, 이 소재에 대한 연구가 최근 활발히 전개되고 있다. 그 일례로 LN 박막을 이산화 실리콘(SiO_2)위에 접합해 광도파로를 제작하는 연구가 최근 하버드 및 예일 연구그룹에서 발표되고 있으며, 이러한 연구결과를 이용해 양자암호통신을 구현하려는 연구가 국내외에서 활발히 이뤄지고 있다.

LN 박막을 이용하는 부품은 기존 벌크 LN 부품과 큰 차이점이 있다. 1μm 이하 박막 두께와 2μm 이하 모드 사이즈를 구현함으로써 수십 μm의 벤딩 반지름에서도 광손실이 거의 없는 광도파로 제작이 가능하다. 이러한 장점을 이용하면 칩 위에서 양자암호 통신용 큐비트를 생성할 수 있을 뿐 아니라 초전도 나노와이어 검출기까지 집적화 시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이 정도 수준의 집적화가 가능해지면 광섬유-칩 커플링 손실이 거의 없는 양자암호 통신용 칩 제작이 현실화될 것이다.

표 III-1-10 대표적인 소재($LiNbO_3$) 공급처

소재명	공급처
$LiNbO_3$	NanoLN

그림 III-1-14 (왼쪽) $LiNbO_3$의 분자구조, (오른쪽) 웨이퍼



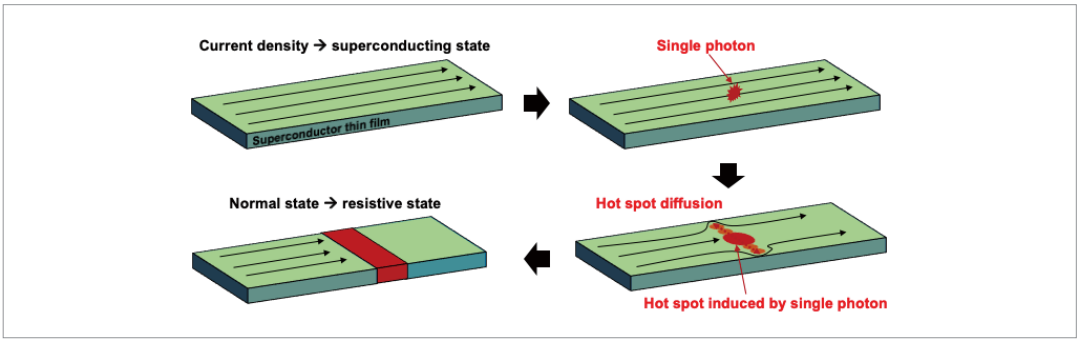
※ wikipedia.org

마. 단일광자 검출기용 초전도 소재

광자 하나를 검출할 수 있는 소재는 반도체와 초전도체로 양분된다. 이 중 초전도 소재는 낮은 암계수율, 짧은 불감시간, 낮은 시간 지터, 높은 광자 검출효율 등의 장점을 가지고 있어 정밀한 양자정보처리가 요구되는 분야에서 각광받고 있다.

해당 소재는 수 nm 두께로 증착된 초전도 박막을 100nm 이하 너비를 갖는 나노와이어 곡류(Meander) 형태로, 광섬유 코어의 단면적과 유사하게 만들어진다. 초전도 상태 나노와이어를 따라 흐르는 전류를 초전도 상태가 깨지기 전까지 흘려주고, 광자가 초전도 나노와이어로 입사돼 흡수되면 쿠퍼쌍(Cooper Pair)을 깨뜨려 핫스팟(Hotspot)을 생성한다. 생성된 핫스팟은 확산에 의해 나노와이어 너비 방향의 양단으로 이동해 저항을 발생시키는데, 이로써 초전도 전류 분포가 막히게 돼 더 이상 초전도 상태를 유지하지 못하고 저항을 갖는 일반 상태로 전이된다. 이때 생성된 저항과 인가된 전류에 의해 전압이 검출되고, 이를 통해 광자가 흡수되었음을 인지할 수 있다. 양자 통신을 포함한 모든 양자 광학 기술에 활용이 되고 있으나, 국내의 기술이 미비하여 빠른 대응이 필요하다.

그림 III-1-15 초전도 소재 이용한 단일광자 검출기 작동 원리



※ 이욱재·심재식·윤천주 (2020)

단일광자 검출기는 양자암호통신 시스템의 전송거리 및 성능을 좌우하는 핵심 부품으로, 장거리 고속 양자통신을 위해서는 저잡음·고효율 단일광자 검출기 개발이 실현되어야 한다. 따라서 초전도 소재를 이용한 단일광자 검출기 개발 노력이 세계 여러 국가에서 경쟁적으로 전개되고 있는데, 2014년 일본전신전화주식회사(NTT) 그룹은 336km 이상 광섬유에 대한 차동 위상 편이 양자 키 분배 실험을 초전도 소재의 단일광자 검출기를 이용해 진행했다. 또 최근 중국과학기술대학교(USTC) 연구그룹은 509km 이상 광섬유 전송이 가능한 트윈 필드 양자 키 분배 프로토콜 실험에서 유의미한 결과를 산출했는데, 이 과정에서도 초전도 소재의 단일광자 검출기를 활용했다.

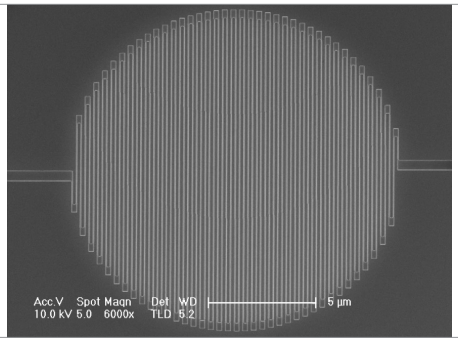
한편 많이 사용되는 초전도 소재로는 비교적 높은 임계온도를 갖는 질화 나이오븀(NbN), 니오비움티타늄 질화물(NbTiN) 등이 있으나 결정형태에 따라 특성이 크게 달라지는 단점이 있어, 비정질(Amorphous) 물질인 규화 텅스텐(WSi)이나 규화 몰리브덴(MoSi) 같은 물질도 많이 이용되고 있다.

초전도 박막 증착의 경우 현재 실험실 단위나 기업 단위로 활발히 연구를 전개하고 있다. 특히 단일광자 검출기에 응용하는 형태의 연구 및 개발은 해외업체인 Single Quantum, Quantum Opus, Scontel, IDQ, Photon Spot 등에 의해 상용제품이 출시되고 있는 수준에 도달해 있다. 국내의 경우 성균관대 정연욱 교수 연구팀과 공주대 이욱재 교수 연구팀에서 연구를 진행 중에 있다.

표 III-1-11 대표적인 소재(초전도 소재) 공급처

소재명	공급처
초전도 소재	Photon Spot, Single Quantum, Scontel, Quantum Opus

그림 III-1-16 Meander 구조의 초전도 소재



※ 집필진 작성

4. 부품

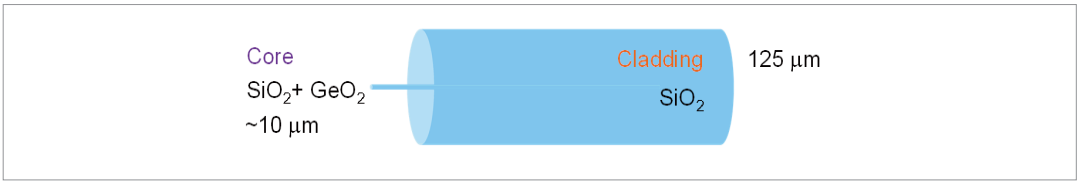
가. 단일 모드 광섬유

단일 모드 광섬유(Single Mode Fiber, SMF)는 양자 키 분배(QKD)에서 양자 키를 전달하는 채널과 암호화된 데이터가 전송되는 채널에 사용되는 매체이다. 주로 광통신에서 레이저 다이오드나 LED 등 광원으로부터 방출되는 광자를 전달하는 경로로 활용된다. 기존 유선 매질인 꼬임 구리선이나 동축 케이블에 비해 전송 손실이 획기적으로 개선된 부품이다. 더구나 매질의 이득에 대역폭을 곱한 상수가 커, 넓은 대역폭의 신호 전송에 적합하다. 따라서 주로 유선 통신망 구현에 활용되고 있다.

단일 모드 광섬유는 일반적으로 원통형 도파로 형태를 띠며, 전달되는 경로인 코어(Core)와 코어를 보호하기 위한 클래딩(Cladding)으로 구성돼 있다. 코어와 클래딩 간 굴절률 차이에 따른 전반사 원리를 활용해 주로 코어 부분을 통해 빛을 전달한다.

통신용 광섬유의 경우 일반적으로는 실리카로 제작된다. 그런데 이 역시 코어와 클래딩 사이 굴절률 차이에 따른 전반사 현상을 이용하기에, 굴절률 상승을 위해 이산화저마늄(GeO_2)을 추가해 제작하기도 한다. 한편 SMF 클래딩 직경은 125μm로 규격화돼 있으며, 코어 직경은 단일 모드 전송 목적으로는 8~10μm 정도로 제작한다.

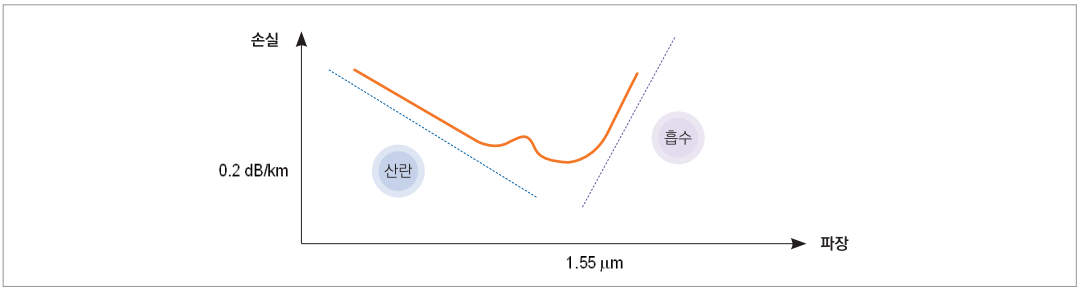
그림 III-1-17 SMF 클래딩 규격



※ 집필진 작성

실리카로 제작된 SMF는 1.55μm에서 0.2dB/km의 최저 손실을 갖는 특성을 지니는데, 단파장에서는 산란(Scattering)에 의한 손실이 주를 이루고, 장파장에서는 흡수(Absorption)에 의한 손실이 주로 발생한다.

그림 III-1-18 실리카 기반 SMF의 파장에 따른 손실 특성



※ 집필진 작성

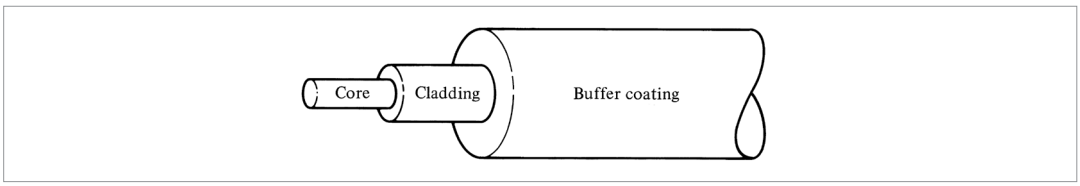
한편 단일 모드 광섬유 제작을 위해서는 코어와 클래딩이 될 모재(Preform)를 만들어야 하며, 제작된 모재로부터 규격화된 코어와 클래딩을 구현하기 위해 드로잉 타워(Drawing Tower)가 필요하다.

특히 모재는 보통 길이 60~70cm, 직경 20~25mm인 실리카 유리봉으로, 이러한 모재를 구현하는 방법에는 수정 화학기상성장법(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD), 기상축증착법(Vapor-phase Axial Deposition, VAD), 외부 기상축증착법(Outside Vapor-Phase Oxidation, OVPO), 플라즈마 화학기상성장법(Plasma-Activated Chemical Vapor Deposition, PCVD) 등이 있다.

표 III-1-12 대표적인 부품(단일 모드 광섬유) 공급처

부품명	공급처
단일 모드 광섬유	LS 전선, 대한광통신

그림 III-1-19 SMF의 구조



※ Gerd Keiser (2000)

나. 레이저 다이오드

레이저 다이오드(Laser Diode, LD)는 반도체 p-n 접합에 순방향으로 전류를 흘려 광자를 발생시키는 소자로 주로 광통신에서 광원으로 많이 사용된다. LD를 구성하는 p-n 접합 과정에서는 전자와 정공이 재결합하며 광자를 방출하는 자발적 방출이 일어나는데, 이런 자발적 방출만으로는 충분한 광세기를 얻을 수 없다. 이에 LD에서는 광자들의 유도 방출에 의해 간섭성이 있는 광자만 증폭시켜 출력함으로써 출력 광의 세기를 증대시킨다.

레이저 다이오드는 기본적으로 p-n 접합과 광 공진기로 구성된다. 이러한 구조를 가진 LD를 패브리-페로 LD(FP-LD)라고 하며, 이는 레이저 출력 시 여러 개의 종 모드를 가지는 특성을 지닌다. 광통신 시스템에 활용되는 LD의 경우, 종 모드가 하나가 되도록 함으로써 장거리 전송이 가능하게 만든다. 이를 위해 분포 피드백(Distributed FeedBack, DFB) 또는 분포 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector, DBR)를 p-n 접합에 추가적으로 구현하며, 이와 같은 과정을 거쳐 LD 출력 광에 하나의 종 모드만 발진되도록 한다.

활용 분야는 매우 다양한데 단일 종 모드 LD 중, 특히 분포 귀환형 레이저 다이오드(Distributed Feed Back type - Laser Diode, DFB-LD)는 여러 광통신 시스템에 폭넓게 쓰인다. 구체적으로 레이저 스펙트로스코피(Spectroscopy), 거리 측정, 광증폭기용 다이오드 펌핑, 피부 치료 (Dermatological Therapies) 및 수술, 레이저 가공 등에 적용되고 있다. 또한 LD 출력 시 발산되는 파장(동작 파장)은 p-n 접합을 구현한 물질의 밴드갭 에너지에 의해 결정되는데, 다음 표에 정리한 바와 같은 화합물 반도체 물질들이 용도에 따라 사용되고 있다.

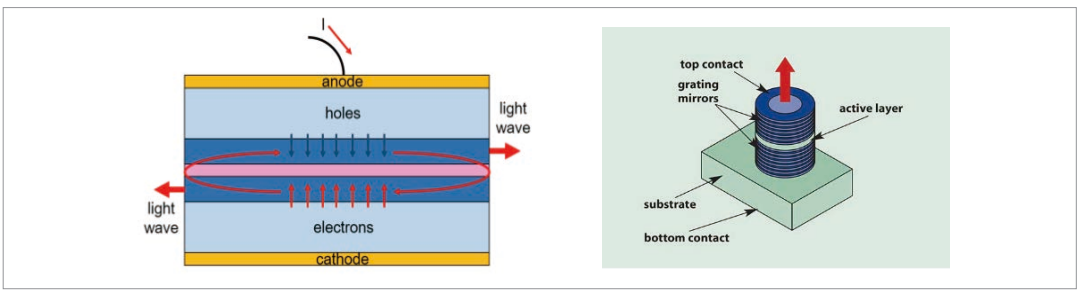
표 III-1-13 LD 물질들의 출력 파장에 따른 용도

LD 물질 (능동영역/기판)	출력 (동작) 파장	용도
InGaN / GaN, SiC	380, 405, 450, 470nm	데이터 저장
AlGaInP / GaAs	635, 650, 670nm	레이저 포인터, DVD 플레이어
AlGaAs / GaAs	720~850nm	CD 플레이어, 레이저 프린터, 고체 레이저 펌핑
InGaAs / GaAs	900~1100nm	EDFA 등 광 증폭기 펌핑, 고출력 VCSEL
AlGaAsP / InP	1.2~2.0μm	광통신, 센서, 스펙트로스코피
AlGaAsSb / GaASb	1.8~3.4μm	국방, 센서, 스펙트로스코피

유선 양자 키 분배 기술에서는 1,550nm 또는 1,310 nm 파장 대역을 사용하므로 InP 계열의 레이저 다이오드 광원이 사용되며, 무선 양자 키 분배 기술에서는 가시광 파장 대역을 주로 사용하므로 GaAs 계열의 레이저 다이오드 광원이 주로 사용된다.

한편 LD는 레이저 출력이 반도체 단면에서 발산하는지, 표면에서 발산하는지에 따라 다른 특성을 가진다. [그림 III-1-20(왼쪽)]과 같이 과 같이 p-n 접합 내에서 빛이 수평으로 왕복하다가 광 공진기를 이루는 단면을 통해 발산해 출력되는 것을 'Edge Emitting Laser'라고 하며, [그림 III-1-20(오른쪽)]과 같이 표면을 통해 빛이 방출되는 것을 'Surface Emitting Laser'라고 한다. 단면 발산 레이저는 높은 출력 파워를 가지는 대신 표면 발산 레이저는 산출량·안정도·가격·시험 측면에서 우수성을 지닌다.

그림 III-1-20 레이저 출력 방향에 따른 분류

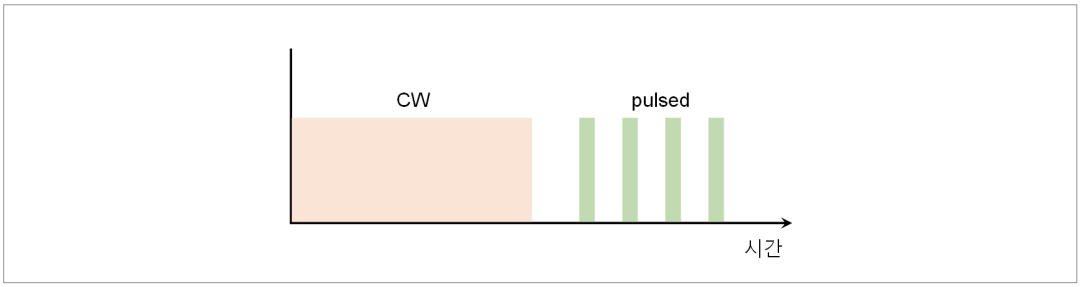


* (왼쪽) 단면(Edge) 발산 LD
(오른쪽) 표면(Surface) 발산 LD

※ findlight.net

또한 LD 동작 모드는 시간에 따라 일정한 출력 광을 내는 '연속 발진 모드'와 주기적으로 펄스 형태의 출력을 내는 '펄스 발진 모드'로 구분된다. 다음 그림은 두 모드의 시간에 따른 출력 파워를 나타낸 것으로, 대부분의 LD는 연속 발진 모드로 동작시키나 용도에 따라 펄스 모드를 취하기도 한다.

그림 III-1-21 연속 발진 모드와 펄스 발진 모드의 시간에 따른 출력 파워



※ 집필진 작성

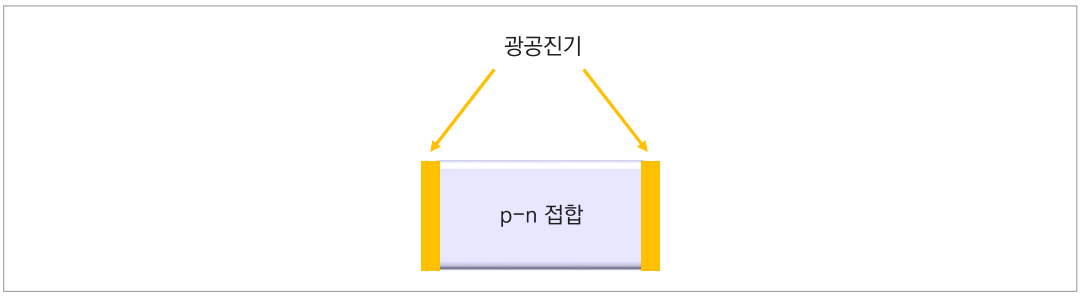
레이저에서 펄스를 생성하기 위해서는 이득 스위칭(Gain Switching)을 활용한다. 펌프 전류를 스위칭해 광 이득을 변조해 펄스를 구현하는 것이다. 최근에 들어서는 작은 LD를 이용해 모드 잠금 과정을 거쳐, 피코초(10^{-12} s)나 펨토초(10^{-15} s) 펄스를 구현하기도 한다.

LD의 주요 성능 지표로는 광 출력 파워, 동작 파장, 선폭, 대역폭, 상대강도 잡음 등이 있다. 양자키 분배 시스템에서 주로 사용되는 DFB-LD의 경우 단일파장의 안전성, 높은 출력, 1MHz 미만의 좁은 선폭, 매우 낮은 상대강도 잡음 등의 장점을 지니고 있다.

표 III-1-14 대표적인 부품(레이저 다이오드) 공급처

부품명	공급처
레이저 다이오드	Qphotonics, OPTILAB, FITEL

그림 III-1-22 LD의 구조



※ 집필진 작성

다. 아발란치 포토 다이오드

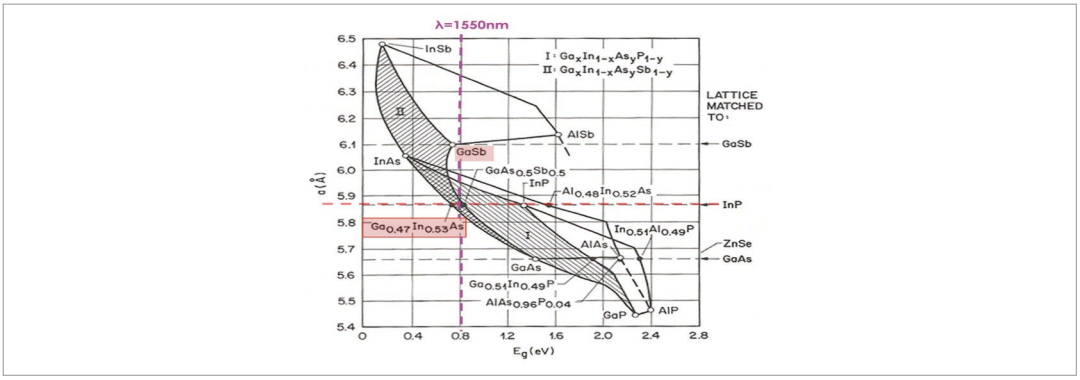
아발란치 포토 다이오드(Avalanche Photo Diode, APD)는 빛을 전기적 에너지로 변환시켜주는 수광소자다. 양자 키 분배 시스템은 일반적인 포토 다이오드로는 수신이 불가능한 낮은 레벨의 광 신호를 사용하기에, 내부에 광전류 증폭기구를 지닌 APD를 사용해야 한다. 또 양자통신에서는 단일광자 수준의 미약한 신호를 초고감도로 수신하기 위해 APD를 항복 전압(Breakdown Voltage) 이상에서 동작시킬 수 있는, 가이거 모드(Geiger Mode) 동작이 필요하다.

양자암호통신은 광섬유 및 자유공간을 통해 구현되는데 장거리 전송을 위해 1550nm 파장이 주로 사용된다. III-V족 반도체계에서는 1550nm 파장대 광자를 흡수해 전류로 변환할 수 있는 물질로, 인듐인(InP)에 격자 정합되는 인듐갈륨비소(InGaAs)/인듐인(InP)과 갈륨 안티몬화물(GaSb)이 있다. 이 중 GaSb는 밴드갭이 큰 갈륨 안티모니(AlGaSb) 물질계가 있어[2] 좋은 재료가 될 수 있으나 결정 성장 시 결함이 많아, 단일광자 검출기로 사용하기에는 아직 부적합한 상황이다.

II-VI족 반도체계에는 수은 카드뮴 텔루르화물(HgCdTe) 물질계가 있는데, CdTe(Eg=1.5eV) 기판과 격자정합이 되며 0~1.5eV까지 밴드갭 변화가 가능해 SAM 구조의 APD 제작이 가능하다. 그러나 II-VI족 특성상 결정 결함이 많이 발생해 단일광자 검출소자로 응용하기엔 역시 부적합하다.

이 외엔 저마늄(Ge)을 들 수 있는데, Ge는 밴드갭이 0.67eV로 작은 탓에 암전류가 매우 커, 다크 카운트 잡음의 증가가 예상된다. 또 간접천이형 반도체이므로 1550nm 파장대역에서 광전 변환효율이 좋지 않아, 이 역시 단일광자 검출소자 재료로는 부적합하다. 따라서 결함 빈도를 대폭 줄일 수 있는 결정 성장기술이 개발되지 않는 한, 양자암호 통신용 단일광자 검출소자 재료로는 InGaAs/InP가 계속 사용될 것으로 예상되고 있다.

그림 III-1-23 III-V족 화합물 반도체 격자 상수 vs 밴드갭 에너지



※ Chevalier (1998)

2) 알루미늄 안티몬화물(AlSb)의 경우 Eg=1.67eV

1550nm 파장의 광자를 흡수해 광전 변환을 해야 하기에, InGaAs처럼 밴드갭이 작은 반도체를 흡수층으로 사용해야 한다. 다만 밴드갭이 작은 반도체는 아발란치 증폭을 위해 높은 전기장을 인가할 때 터널링에 의한 암전류가 크게 증가하기에, 아발란치 증폭만은 터널링을 막기 위해 밴드갭이 큰 반도체에서 이뤄져야 한다.

InGaAs는 밴드갭이 큰 InP와 격자 정합을 이룬다. 따라서 단일광자 검출소자 재료로 매우 적합하다. 이와 같이 밴드갭이 작은 InGaAs에서 광자를 흡수하고 밴드갭이 큰 InP에서 증폭을 이루는 구조를 'SAM(Separated Absorption and Multiplication)' 구조라 한다.

InGaAs/InP SAM-APD에서 증폭층으로 사용되는 InP는, 정공의 충돌 이온화 계수(β)가 전자의 충돌 이온화 계수(α)보다 크기 때문에 정공을 주입하는 구조를 갖는다. 다시 말해 InGaAs 흡수층에서 광자 흡수에 의해 발생한 캐리어 중 정공이 InP 증폭층으로 주입되는 것이다.

이때 흡수층과 증폭층 사이 밴드갭 불연속(Bandgap Discontinuity, ΔE=0.6eV)에 의해 포텐셜 장벽이 발생하는데, 캐리어가 포텐셜 장벽에 포획되었다가 열적 방출에 의해 천천히 증폭층으로 주입되는 현상을 방지하기 위해 인듐갈륨비소 인화물(InGaAsP)로 구성된 그레이딩층(Grading Layer)이 제안되었다. 이를 'SAGM(Separated Absorption, Grading, and Multiplication) 구조'라 한다.

단일광자 검출소자에 응용하기 위해서는 단일광자가 입사하는 영역에서 수백만 배의 증폭이 발생해야 한다. 그러나 모서리 항복(Edge Breakdown)과 같이 소자 가장자리 등에서 더 큰 증폭이 일어날 경우, 암전류에 의한 잡음이 크게 증가할 수 있어 모서리 항복을 막기 위한 가드링 구조가 있어야 한다.

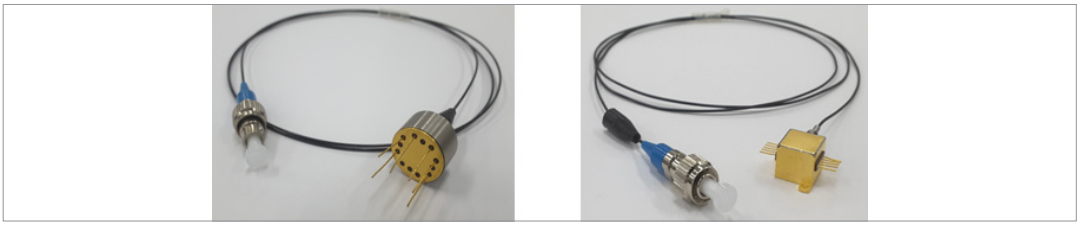
일반적인 광통신에 사용되는 전통적인 InGaAs/InP APD는 증폭층이 InGaAs층의 전기장을 낮추기 위한 전기장 조절층(Field Control Layer) 역할까지 해야 하므로 n-type으로 도핑되어 있다. 이에 InP p-n 접합 계면에서의 전기장이 높아 터널링에 의한 전류 기여가 많을 수밖에 없고, 따라서 암계수에 의한 잡음이 크게 증가해 단일광자 검출소자 구조로는 적절하지 않다.

이에 반해 Hi-Lo 구조는 증폭층에 도핑을 하지 않아 전통적인 구조에 비해 최대 전기장 크기를 월등히 낮게 형성할 수 있는 장점이 있다. 때문에 터널링에 의한 암전류가 거의 없고 결정 결함이 적어 InP 증폭층 형성이 가능하다. 간단히 말해 Hi-Lo 구조에는 별도 전기장 조절층이 있어, 증폭층에서의 높은 전기장 형성이 가능할 뿐 아니라 흡수층에서는 균일하고 낮게 조절할 수 있는 것이다. 이러한 구조를 'SAGCM(Separated Absorption, Grading, Charge and Multiplication)'이라 한다.

표 III-1-15 대표적인 부품(아발란치 포토 다이오드) 공급처

부품명	공급처
아발란치 포토 다이오드	㈜우리로, IDQ

그림 III-1-24 III-V족 화합물 반도체 기반 단일광자 검출소자



※ wooriro.com

유선 양자 키 분배 기술에서는 광섬유의 저 손실 구간인 1,550nm 파장 대역을 사용하므로 InGaAs/InP APD 기반 단일 광자 검출기를 사용하지만, 무선 양자 키 분배 기술에서는 가시광 파장 대역을 주로 사용하고 있다. 가시광 파장 대역에서는 InGaAs/InP APD 기반 단일광자 검출기가 광자를 흡수할 수 없으므로, 가시광 파장 대역에서 60~ 70% 이상의 고효율로 광자를 흡수할 수 있는 실리콘(Si) APD 기반 단일광자 검출기를 사용하고 있다.

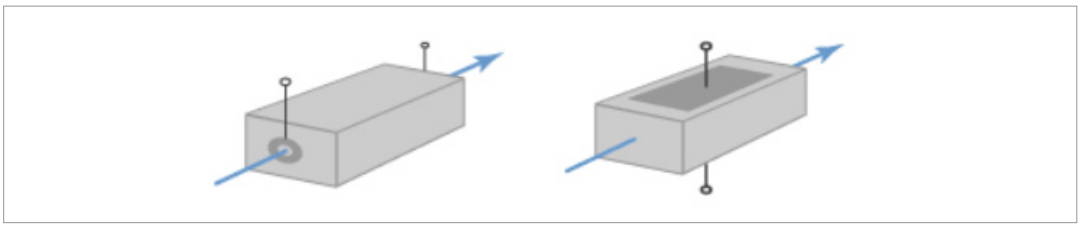
라. 위상변조기

위상변조기(Phase Modulator)는 레이저 출력 광의 위상을 조절하기 위한 광변조기이다. 포켈 셀(Pockels cell)을 기반으로 하는 전기 광학 변조기나 액정 크리스탈 변조기가 주로 사용된다. 일반적으로 전기 광학 변조기가 보다 폭넓게 사용되는데, 이는 해당 변조기가 액정 크리스탈 방식에 비해 위상변조 대역폭이 월등히 넓기 때문이다.

레이저 출력 광의 위상을 변조시키기 위해서는 주로 두 가지 방법이 이용된다. 매질 굴절률(Refractive Index)을 변경하는 방법과 광 전달 경로의 길이를 변경하는 방법이 있는데, 굴절률 변화 방식이 상대적으로 더 많이 활용된다.

한편 위상변조기 구현에 널리 활용되는 포켈 셀은, 레이저 출력 광이 전달될 수 있는 전기 광학 크리스탈로 구성된 소자다. 전압이나 전기장을 가하면 크리스탈 내 위상 지연효과가 발생함으로 위상변조기를 구현하는데 적합하다. 포켈 셀은 빛의 진행 방향과 전압 혹은 전기장이 가해지는 방향이 동일한 종형 소자([그림 Ⅲ-1-25(왼쪽)])와 방향이 서로 직교하는 횡형 소자([그림 Ⅲ-1-25(오른쪽)])로 구분된다.

그림 Ⅲ-1-25 빛 진행 방향과 전압이 가해지는 방향에 따른 포켈 셀 분류



※ rp-photonics.com

포켈 셀로 이용되는 비선형 크리스탈 물질에는 인산이중수소칼륨(Potassium Di-deuterium Phosphate, KD*P=DKDP), 인산티타닐칼륨(Potassium Titanyl Phosphate, KTP), 붕산바륨(β-Barium Borate, BBO), 리튬 나이오베이트(Lithium Niobate, $LiNbO_3$), 리튬 탄탈레이트(Lithium Tantalate, $LiTaO_3$), 인산이수소암모늄(Ammonium Dihydrogen Phosphate, $NH_4H_2PO_4$/ADP) 등이 있다. 또 중 파장의 대역 활용을 위해서는 텔루르화카드뮴(Cadmium Telluride, CdTe)이 활용된다.

이 중 $LiNbO_3$가 광통신 시스템에 가장 널리 이용되는 물질이다. 나아가 리튬나이오베이트는 광학 분야에서 가장 널리 사용되는 물질 중 하나로 전기 광학, 비선형, 음향 광학 특성이 뛰어나고 비교적 큰 굴절률을 가지며, 넓은 파장대역에서 활용이 가능한 특징이 있다.

특히 리튬나이오베이트(LN) 전기 광학 변조기는 광통신 시스템 구현에 널리 이용되고 있다. 우선 주기적으로 분극 반전되는 리튬나이오베이트(PPLN)는 파장 변환과 광자쌍 생성 등에 사용되고 있다. 또한 위상변조기는 광통신 시스템에서 전송 신호의 위상편이변조(Phase-Shift Keying) 등에 활용되며, 광계측 분야에선 주파수 콤(Combs)을 생성하는데 사용되기도 한다. 나아가 레이저 공진기 내에서 위상변조기를 사용함으로써 파장 튜닝이나 능동 모드 잠금 등의 효과를 얻기도 한다.

무엇보다 위상변조기는 서로 다른 구조를 가진 비대칭 광간섭계에서 신호 위상변조를 통해 간섭현상을 일으킨다. 양자분배키 시스템에서는 단일광자의 편광 또는 위상을 제어하는 방식으로, 단일광자에 암호 키 정보를 실어 수신자에게 전송하고 수신자는 편광제어 또는 위상변조를 거쳐 암호 키 정보를 추출한다. 이 제품의 성능을 나타내는 중요한 특성으로는 구동 전압, 변조 대역폭, 동작 파장대역, 소자 조리개값 등이 있다.

표 III-1-16 대표적인 부품(위상변조기) 공급처

부품명	공급처
위상변조기	iXblue, EOSpace, PSI, JenOptik

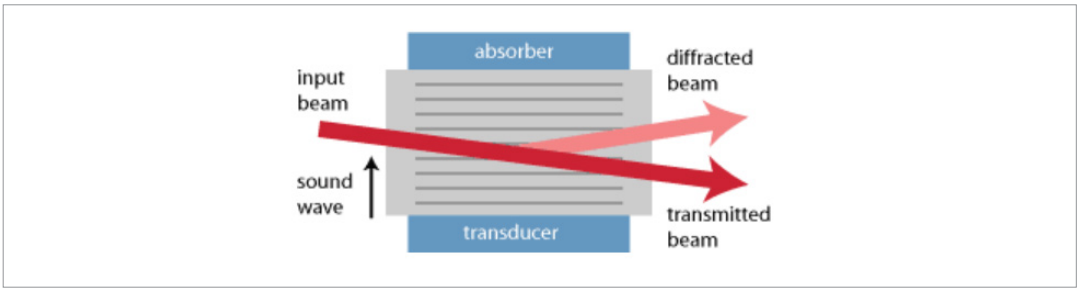
마. 강도변조기

강도변조기(Intensity Modulator)는 레이저 출력 광의 진폭 혹은 강도를 변조하는 광변조기이다. 다양한 방식으로 구현이 가능하나, 일반적으로 전압을 가해 제어하는 형태가 대부분이다. 광통신시스템, 레이저 프린터, 레이저 물질 가공, 광파워 안정화 등 다양한 목적으로 널리 활용되고 있다.

구체적으로 강도변조기는 음향 광학 변조, 전기 광학 변조, 액정 크리스탈 변조, 전계흡수 변조 등을 기반으로 구현된다. 각 구현방식에 따라 다양한 특징을 보이므로 용도에 맞는 변조기 선택이 필요하며, 제품 선택 시 고려해야 할 주요 성능지표로는 변조기 입력 광의 전달방식, 변조 대역폭, 소광비 및 동적 범위, 편광 의존도, 구동 전압, 최대 허용 광 입력파워 등이 있다.

각 변조기의 특성을 살펴보면 우선 음향 광학(Acousto-optic) 변조기는, 아래 그림과 같이 회절된(Diffracted) 레이저 빔과 회절되지 않고 통과되는 빔을 변조한다. 레이저 프린터, 레이저 능동 모드 잠금 등의 분야에 사용되며, 음향신호를 가하지 않으면 모든 빛이 통과하나 음향신호를 가하면 회절돼 통과되는 빔의 파워가 감소하는 특징이 있다.

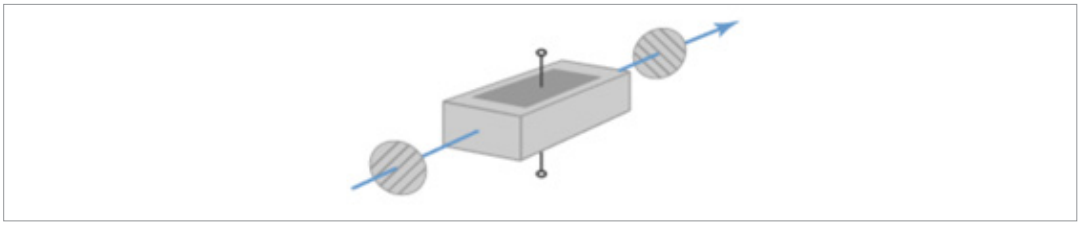
그림 III-1-26 음향 광학 변조기의 빛 투과 특성



※ www.rp-photonics.com

전기 광학(Electro-optic) 변조기는 위상변조기로 동작하는 포켈 셀(Pockels cell)을 활용한다. 위상 변조된 광에 편광기(Polarizer)를 추가해 진폭 변조를 구현하는 방식이다. 아래 그림은 포켈 셀을 두 개 편광기 사이에 두어 진폭 변조를 구현하는 과정을 보여준다.

그림 III-1-27 전기 광학 변조기의 진폭변조 방식



※ www.rp-photonics.com

편광기 대신 광도파로 소자로 간섭계를 구현함으로써 진폭 변조를 만들어내는 마하 젠더(Mach-Zehnder, MZ) 변조기도 광통신 시스템에서 폭넓게 사용 중이다. 또 액정 크리스탈 변조기는, 액정 크리스탈 물질에 전압을 가해 빛의 편광을 변조하고 편광기를 추가해 진폭 변조를 구현하는 방식이다. 해당 변조기는 조리개는 크나 구동 전압은 낮은 특성을 지니고 있어 변조할 수 있는 대역폭이 매우 제한적인 단점이 있다. 이 경우 레이저 빔의 다른 부분은 독립적으로 변조해 공간 광변조기(Spatial Light Modulator)로도 활용하고 있다.

다음으로 전계흡수(Electro-Absorption) 변조기는 프란츠-켈디쉬 효과(Franz-Keldysh Effect)에 기반을 두고 동작하는 반도체 소자이다. 프란츠-켈디쉬 효과는 전기장이 인가되는 경우 반도체에 의한 흡수량이 변화하는 효과를 말한다. 따라서 전계흡수 변조기는 반도체에 의한 흡수량 변화를 통해 진폭을 변조할 수 있다. 그러나 해당 변조기는 일반 전기-광학 변조기에 비해 입력 광파워 측면에서 한계점을 지니고 있다.

한편 양자 키 분배 시스템에서 사용되는 결맞음 광원을 단일광자로 감쇄시켜 구현하는 BB84 양자 키 분배 시스템은 명확한 한계를 노출하고 있다. 한 개 이상의 광자가 존재하는 펄스에서, 같은 양자상태의 광자를 빼내어 도청하는 공격 방법인 광자분리(Photon Number Splitting, PNS) 공격에 대한 완전 검출이 불가능한 것이다.

이러한 PNS 공격을 효과적으로 검출할 수 있게 하고 보안성이 보장되도록 최대 전송 거리를 늘리기 위해 미끼-펄스(Decoy-Pulse) 방식이 사용된다. 강도변조기 세기를 변경해 양자상태의 신호를 보낼 때, 키 생성에 사용되는 신호 중간에 무작위로 평균 광자 수와 다른 광자 수를 갖는 미끼 상태의 신호를 보냄으로써 도청 유무를 판별할 수 있는 것이다.

표 III-1-17 대표적인 부품(강도변조기) 공급처

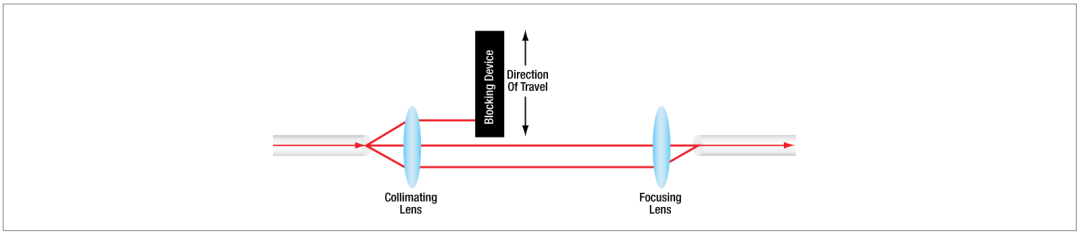
부품명	공급처
강도변조기	iXblue, EOSpace, JenOptik, Thorlabs

바. 가변광감쇄기

광감쇄기(Optical Attenuator)는 광원이나 광모듈의 출력 광파워를 감소시키는 소자이다. 이중에서 사람이 조정하거나 전기신호를 가함으로써 감소되는 광파워의 값을 변경할 수 있는 소자를 가변광감쇄기(Variable Optical Attenuator, VOA)라 한다.

VOA는 광통신 시스템에서 광신호 파워 레벨을 조정하거나, 광신호 파워 레벨을 변화시키면서 비트 오류율(Bit-Error Rate, BER) 측정 등 성능 시험을 수행하는데 활용된다. 이외에도 다양한 적용 분야에서 광출력 파워를 변경하는데 폭넓게 활용되고 있다. VOA를 구성하는 일반적인 방식은 다음 그림과 같으며, 광신호 경로에 블로킹 소자를 활용함으로써 광신호 파워 레벨을 변경할 수 있다.[3)]

그림 III-1-28 가변광감쇄기의 광출력 파워 변경 방식



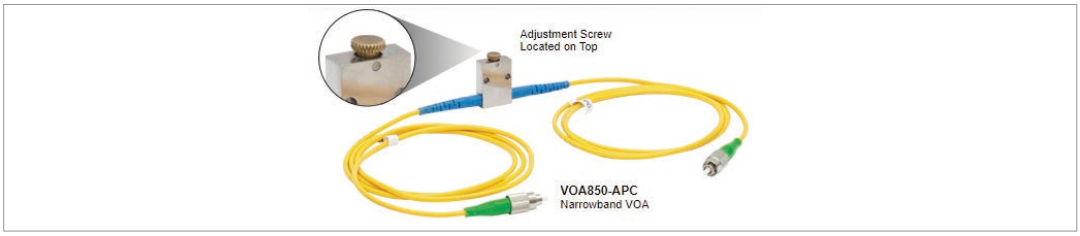
※ www.thorlabs.com

VOA 구현에는 광섬유(Fiber-optic) 감쇄기가 폭넓게 사용된다. 이러한 종류의 감쇄기는 FC, LC 등의 광 커넥터가 연결돼 있어 광 패치코드 등에 쉽게 연결할 수 있는 장점이 있다. 해당 감쇄기를 구현하는 원리는 다양한데, 예를 들면 두 개의 광섬유 단면 사이 공기 간극(Air Gap)을 두거나, 비정열 스플라이싱(Misaligned Splicing)을 이용하거나, 광섬유 구부림(Bending) 손실을 이용하는 방식 등이 활용되고 있다.

3) www.rp-photonics.com

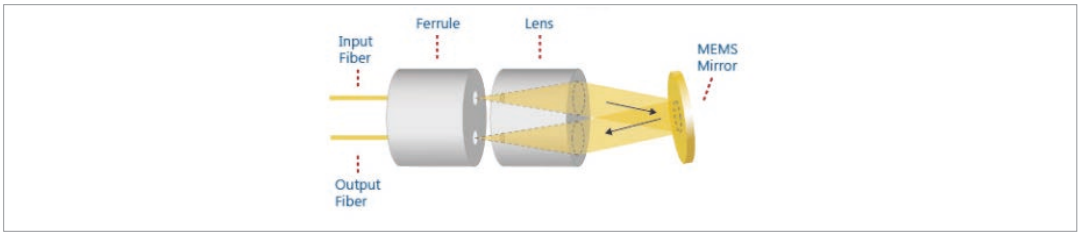
다른 방식으로는 하나의 광섬유에서 나오는 빔을 평행화(Collimating)하는 렌즈와 다른 광섬유에 다시 입력하기 위한 렌즈를 각각 사용하고, 렌즈 사이에는 움직이는 블레이드(Moving Blade), 가변적인 중성 농도 필터 등과 같은 블로킹 소자를 활용하는 방식도 있다. 또한 블로킹 소자를 구현하는 방식에는 광섬유를 사용하는 방식, 액정 크리스탈 변조기를 사용하는 방식, 미세 전자기계 시스템(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS) 형태 거울을 활용하는 방식 등 다양한 방법들이 존재한다.

그림 III-1-29 광섬유 기반 VOA



※ www.thorlabs.com

그림 III-1-30 MEMS 기반 VOA



※ www.diconfiberoptics.com

한편 VOA 성능을 나타내는 지표로는 감쇄 조정 범위, 정확도, 재연 가능성, 편광 의존도, 감쇄 조정속도, 동작 파장범위, 최대 허용 입력광 파워 등이 있다.

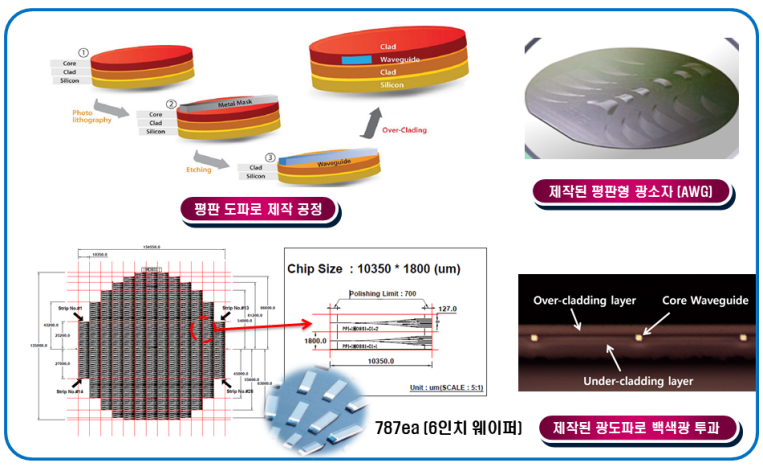
표 III-1-18 대표적인 부품(가변광감쇄기) 공급처

부품명	공급처
가변광감쇄기	AC Photonics, Lumentum, Keysight, OZ Optics

사. 양자 간섭계

양자 간섭계 구현에는 실리카 기반 유리조성 재료로 구성된 소재가 요구된다. 수신기용 평판형 광도파로 기반 간섭계는 질화실리콘(SiN)/이산화실리콘(SiO_2) 도파로 공정과 이산화실리콘(SiO_2) 도파로 공정을 이용하는 게 보편적이다. 아래 그림은 광반도체 공정을 이용해 제작된 광도파로 소자의 예시 및 단면 광도파 투과광 구조를 나타낸다.

그림 III-1-31 광반도체 공정으로 제작된 광도파로 소자 예시

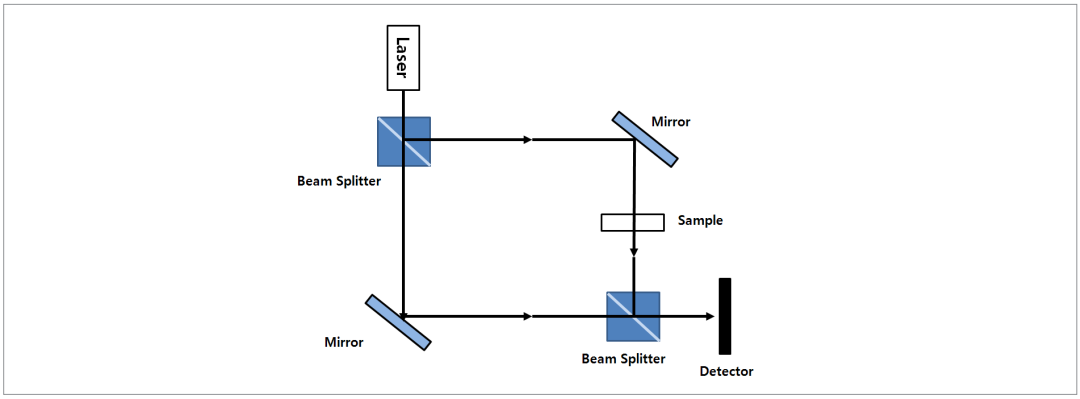


※ PPI Inc.

전형적인 위상변조 기반 양자 키 분배 시스템은 광섬유로 만든 비대칭 마하 젠더 간섭계를 이용한다. 그러나 이것은 광섬유의 환경 민감성과 온도 의존성으로 인해 불안정하다. 또 광섬유를 사용하는 시분할 간섭계는 실험실에선 그 구성이 용이하나, 송신부와 수신부의 간섭계 광지연을 정밀히 조정해 효과적인 간섭 패턴을 얻는 것은 쉽지 않은 편이다.

양자 키 분배 시스템 설계에 따라 광지연 길이를 맞추고 간섭 패턴의 충분한 선명도(Visibility)를 얻으려면, 두 간섭계 길이가 약 0.2mm(1ps) 이내 오차를 보이는 제품이 요구된다.

그림 III-1-32 마하 젠더 간섭계 구조

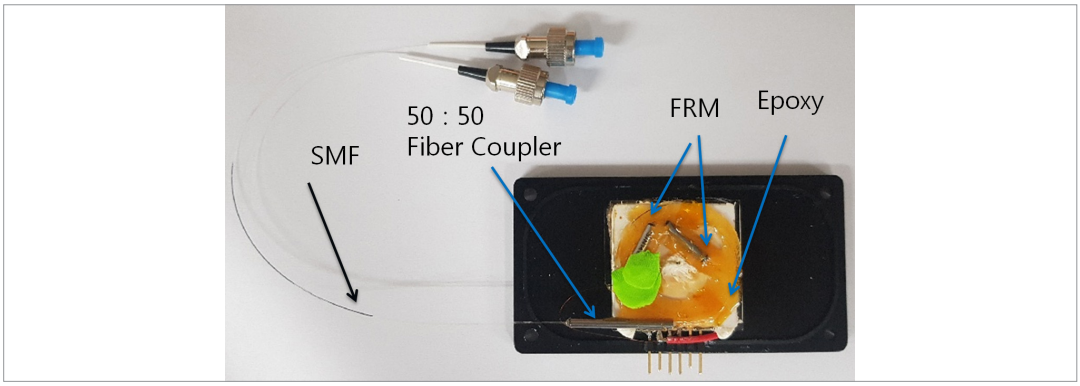


※ 곽승찬 (2020)

이처럼 광섬유를 융착시킴으로써 간섭계 길이를 정확하게 맞추는 일은 매우 비효율적인 작업이다. 따라서 광섬유 간섭계를 여러 개 제작한 다음, 광지연 길이의 차가 오차 범위 내에 들어오는 광섬유 쌍을 선별해 쓰고 있다. 더해 수십 cm 길이 광섬유를 작은 공간에 패키징하는 작업은 어려울 뿐만 아니라 많은 시간 소요를 필요로 한다. 이에 광섬유 기반 간섭계를 양산하는 공정은 현재까진 뚜렷한 한계를 보이고 있다.

광섬유를 융착해 제작한 마이켈슨 간섭계의 구조는 이러하다. 2개의 입력단 중 한쪽의 싱글 모드 파이버를 통해 입력된 광은 50:50 광파이버 커플러를 투과해 분기되고, 20cm 광지연 길이를 갖는 파이버를 지나 패러데이 회전 거울(Faraday Rotator Mirror, FRM)에 반사된 후 다시 입력단의 나머지 포트에서 광이 출력된다. 아래 그림에서 보듯 20cm 길이를 맞추고 패키징하는 과정에서, 움직이지 않도록 열전냉각기(Thermo Electric Cooler, TEC) 위에 에폭시를 두고 광섬유를 고정하는 복잡한 공정을 거쳐야 한다.

그림 III-1-33 광섬유 구조를 이용한 마이켈슨 간섭계



※ PPI Inc.

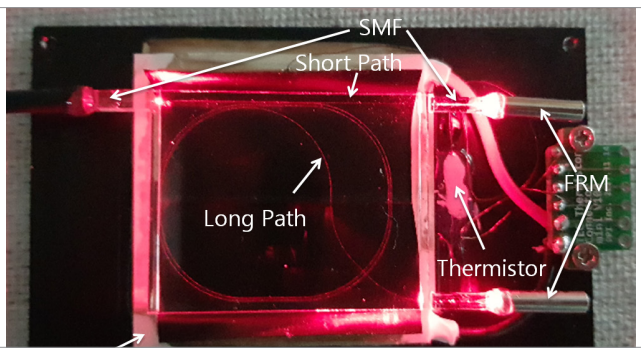
이러한 광섬유 간섭계의 불안정함과 제작 어려움을 개선하기 위해 평판 도파로 기술을 이용할 수 있다. 평판 도파로는 포토리소그래피(Photolithography) 반도체 공정을 이용해 제작되기에 설계에 따라 광지연 길이를 정확하게 구현할 수 있는 장점이 있다.

평판 도파로 기반의 비대칭 마하 젠더 간섭계를 사용한 연구에 따르면, 97km 광섬유 전송에서 2.8% QBER(Quantum Bit Error Rate)의 수치를 기록한 바 있다. 다만 전력선통신(Power Line Communication, PLC) 기술은 마하 젠더 간섭계의 안전성을 향상시키나, 복굴절을 비롯해 편광 민감도, 실리카 도파의 열광학 효과 등의 측면에서 새로운 문제를 불러왔다. 따라서 간섭계의 편광 효과를 제거하기 위해 패러데이 마이켈슨(Faraday-Michelson) 시스템을 채택했으며, 이를 통해 125km 전송에서 6%의 QBER 수치를 기록한 바 있다. 만약 양자 키 분배용 패러데이 마이켈슨 간섭계를 PLC 기술을 이용해 구현할 수 있다면, 편광 의존성도 해결하고 더불어 기계적인 안전성과 제작 편리성까지 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

한편 마이켈슨 간섭계에서는 1550nm 파장에서 단일모드 광섬유와의 결합 손실을 최소화하기 위해 도파관 구조를 선택한다. 이때 클래드층과 코어층의 상대 굴절률차는 0.57%로 설정하고, 6㎛×6㎛의 정사각형 구조로 설계한다. 또 입력단과 출력단의 경우, 역시 광섬유 결합 손실을 개선하기 위해 Up-Taper 구조를 적용하며 9.5㎛(폭)×6㎛(높이)의 크기로 설계한다.

평판형 간섭계의 제작을 위해서는 50:50의 전력분배 비율을 갖는 광학소자를 설계하고 제작하는 것이 필요하다. 일반적으로 벌크 광학계의 경우 광분파기(Beam Splitter)를 써서 구현하는데, 평판형 광도파로 구조에서는 1×2 Y 분배기 구조나 2×2 멀티모드 인터피어런스 구조(Multi-Mode Interference, MMI)를 사용해 광을 50:50으로 분리하게 된다. 아래 그림은 마이켈슨 간섭계에서 50:50으로 출력을 배분하는 2×2 멀티모드 인터피어런스 소자의 특성을 보여주고 있다. 양자암호통신에서 사용하는 1550nm 파장에서 MMI 소자의 폭이 13㎛일 때, 소자의 최적 길이는 313㎛이고 50%의 분배비를 나타낸다.

그림 III-1-34 FRM이 부착되어 제작된 마이켈슨 간섭계



※ 곽승찬·문형명 외 (2018)

마이켈슨 간섭계 내의 FRM에는 단일 모드 광섬유가 연결되어 있다. 이를 PLC 도파관과 결합하기 위해 사각 유리 페룰에 섬유를 삽입한 채 결합부를 제작한다. 고분해능 반사 측정기를 사용해 제작한 FRM의 연마된 섬유 면에서 거울까지의 길이는 30μm 이내이며, PLC 단면 도파관에 접착된다.

파장 무의존성 커플러(Wavelength Independent Coupler, WINC) 소자와 패러데이 회전 거울(Faraday Rotator Mirror, FRM)은, 광 반사 손실을 줄이기 위해 각을 8도로 연마한다. 이로써 광접속된 마이켈슨 간섭계는 열전냉각기(TEC) 및 서미스터(Thermistor)가 있는 하우징 케이스에 장착된다.

아. 양자 난수 생성기

양자 키 분배 장치가 암호키를 생성하는 과정에서 양자 난수 생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG)가 사용된다. 기존 난수 생성기는 난수표 기반의 의사난수를 생성하기에 예측 가능성이 있었다. 그러나 이 장치를 통해 패턴과 주기가 없는 완전 난수를 생성함으로써 암호키 안전성을 확보할 수 있게 되었다. 다음 절에서 QRNG를 활용한 암호장비에 대해 자세히 다루기에, 여기에서는 양자 키 분배 내에 설치되는 QRNG의 용도에 대해서만 설명하기로 한다.

이 장치는 보통 로우(Raw) 키 생성과 후처리 과정에 사용된다. 이 중 로우 키 생성 시에는 송신자 및 수신자의 기저 선택, 송신자에서의 키 선택, 송신자에서의 시그널·디코이(Decoy)·진공(Vacuum) 등 상태 선택에 사용된다. 또 후처리 오류 정정 시 캐스케이드(Cascade) 프로토콜 상의 셔플링을 위해서도 사용되며, 후처리 비밀 증폭 시에는 토플리츠 행렬 구성에 필요한 난수 생성을 위해서도 활용된다.

5. 장비

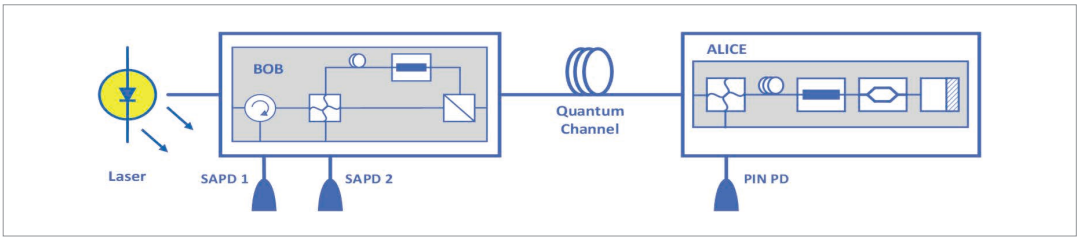
가. 양자 키 분배 장치

양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD)를 수행하는 장비는 광전송 장비, 키 관리시스템(Key Management System, KMS)과 함께 양자 성질을 활용해 안전하게 대칭 암호키를 생성하고 분배하는 기술을 포함하고 있다.

QKD 장치는 광자를 물리적으로 전달하는 '양자채널(Q-Channel)'과 제어정보를 전달하기 위한 '공개채널(P-Channel)'로 구성된다. 장치 간(Alice-Bob 사이) 공개채널을 통해 정보를 주고받은 다음

비밀키(Secure Key)를 생성하고 공유하며, 생성된 비밀키는 KMS로 전달한다. 아래 그림은 “양자암호통신 시범 인프라 구축사업”에서 KT가 적용한 2-Way 방식 Decoyed BB84 프로토콜을 사용하는 QKD 장치의 예이다.

그림 III-1-35 QKD 장치 구성 (2-Way 방식 예)



※ 집필진 작성

이 장치는 KMS 서버를 그 내부에 탑재해 암호키를 관리 및 분배하는 기능을 제공하는데, 최대 70km 이상(0.2dB/km 기준)을 전송할 수 있다. 이때 서버와의 키 요청 인터페이스 처리를 위한 프로토콜은 유럽 전기통신표준 ‘ETSI QKD 014’ 기준을 따르고, 서버와의 일반 관리 인터페이스 처리를 위한 프로토콜은 ‘ETSI QKD 015’를 따른다.

표 III-1-19 대표적인 장비(QKD) 공급처

장비명	공급처
QKD	코위버, 우리넷, 에프아이시스, IDQ, 도시바

그림 III-1-36 주요 QKD 장비 예

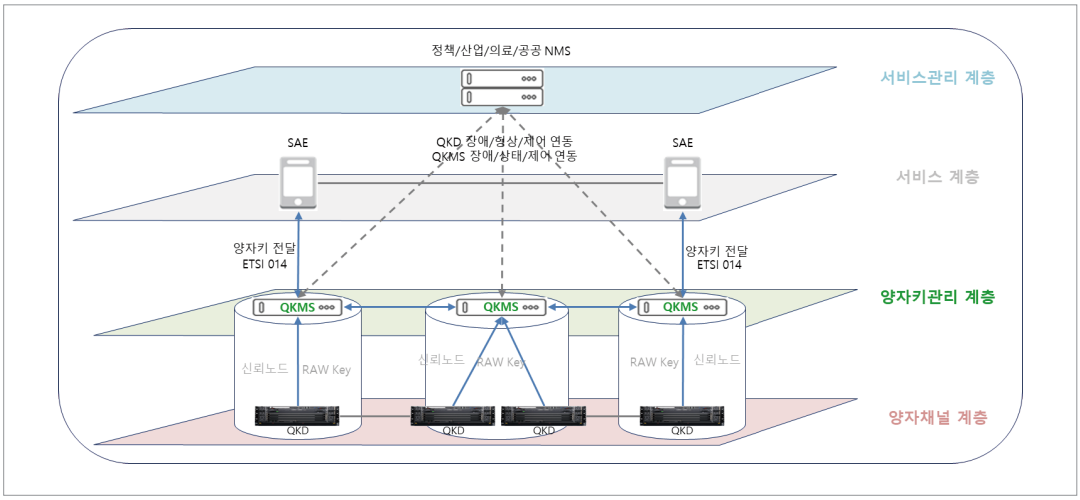


※ IDQ, 우리넷, 코위버

나. 키 관리시스템

양자암호통신 네트워크는 QKD에서 생성한 키를 양자암호키 관리시스템(Quantum Key Management System, QKMS)을 통해 전달함으로써 서비스 어플리케이션 간 암호통신이 이루어 질 수 있도록 한다. 따라서 QKD와 QKMS의 장애 및 형상 정보 등을 망관리시스템(Network Management System, NMS)과 연동시켜 네트워크를 통합 관리할 수 있다.

그림 III-1-37 양자암호통신 네트워크 구성도



※ 다임즈

KMS는 QKD에서 생성한 원시 양자키(Raw Key)를 수신 받아 길이 별로[4] 양자암호키를 생성 및 관리하고, 암호통신을 수행하고자 하는 서비스 어플리케이션에 안전하게 전달하는 시스템이다. 이때 키 요청 인터페이스 처리를 위해서는 국제표준인 'ETSI QKD 014' 프로토콜을 따르고, QKD 관리를 위한 인터페이스로는 국제표준 'ETSI QKD 015' 프로토콜을 제공한다.

이밖에도 KMS는 다양한 기능을 탑재하고 있는데, 우선 양자암호키 무중단 공급기능을 제공한다. 또 거리 제약의 극복을 위한 원거리 양자암호키 전달기능을 갖추고 있으며, 양자암호키 수신 및 생성에 관한 모니터링 기능도 탑재하고 있다. 또한 다른 기종의 양자 키 분배 장치와의 연동을 위해 별도의 인터페이스를 제공하며 키 생성 비율, 키 요청 이력, 키 라우팅 설정, 장애관리 등을 손쉽게 산출 및 수행할 수 있는 기능도 갖추고 있다.

4) 64/128/256

표 III-1-20 대표적인 장비(KMS) 공급처

장비명	공급처
KMS	다임즈, 드림시큐리티

다. 양자통신 장비 제어 및 전원 공급 장치

양자통신 장비의 제어와 전원 공급 장치는 양자통신 시스템 및 네트워크 구축 시 고려되어야 하는 중요한 요소 중 하나이며, 다른 통신 장비 제어와 전원 공급 장치보다 더 정밀하고 안정적인 요건이 고려되어야 한다.

양자통신 장비 제어 장치를 통해 큐비트 생성 및 수신 제어, 양자 신호 전송 제어, 데이터 암호화 및 복호화 제어, 원격 제어 등을 수행할 수 있다. 먼저, 큐비트 생성 및 수신 제어는 큐비트 생성을 준비하고 감지하는 과정을 포함하며, 유선 양자통신의 경우에는 온도 제어 및 간섭계 장치 제어를 포함한다. 양자 신호 전송 제어는 큐비트를 생성하고 수신하는 과정에서 양자 신호 전송을 관리하는 것을 말한다. 양자상태를 보존하며 정보를 안전하게 전송하기 위한 프로토콜을 따름으로써 양자통신의 보안성을 유지할 수 있다. 양자통신 장비는 큐비트를 사용하여 암호화 및 복호화 프로세스를 수행하므로 데이터 암호화 및 복호화 시 제어를 필요로 한다. 양자통신 장비는 원격에서 제어될 수 있는데, 이는 양자통신 네트워크의 관리 및 운영을 편리하게 만들며, 원격 장치 간의 통신이 필요한 경우에 사용된다.

양자통신 장비의 안정성을 위해 전원 공급 장치는 안정적으로 전력을 제공해야 한다. 전압과 전류의 안정성은 양자상태를 유지하고 양자 신호 결과를 신뢰성 있게 만드는 데 중요하다. 일부 양자통신 장비는 낮은 온도에서 작동해야 하며, 전원 공급 장치는 이러한 장비를 냉각하는 역할을 수행할 수 있다. 또한, 환경적 요소로부터 장비를 보호하는 기능도 가질 수 있다. 양자통신 전력 공급 장치는 에너지를 효율적으로 사용하여 전력 소비를 최소화해야 한다. 효율적인 전력 공급은 양자통신 장비의 성능을 향상시키고 운영 비용을 절감할 수 있다.

양자통신 장비 제어 및 전원 공급 장치는 양자통신 시스템의 보안성, 성능, 안정성 및 효율성을 결정하는 중요한 요소이다. 이러한 장치는 양자통신 연구 및 응용 분야에서 핵심 역할을 수행하며, 원격 제어 기능 및 안정적인 동작이 보장되어야 양자통신 장비가 실환경에서 널리 사용될 수 있을 것이다. 이러한 기능을 수행하기 위해 기존의 통신 장비 제어와 전원 공급 장치기술이 사용될 수 있으며, 더 정밀하고 안정적인 요건을 적용하기 위해 기존 기술보다 발전된 기술을 개발할 필요가 있다.

제3절 양자 난수 생성기(QRNG) 기반 제품

1. 요점

양자 난수 생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG)란, 양자역학적 성질을 이용해 패턴 분석이 불가능한 무작위 숫자를 생성하는 장치이다. 현재의 암호체계는 수학적 알고리듬으로 생성되는 유사 난수 생성기(Pseudo Random Number Generator, PRNG) 또는 물리적 노이즈 소스를 응용한 진성 난수 생성기(True Random Number Generator, TRNG)를 활용하고 있다.

그러나 이러한 방법들은 시드 노출의 위험성이 있는데다 알고리듬 역추적이 가능하고 물리적으로 노이즈 소스를 측정하기 어려운 문제점들을 안고 있다. 이와 달리 QRNG로는 양자역학 특성을 이용해 예측할 수 없는 난수를 생성할 수 있다. 따라서 다가올 미래 양자컴퓨터 시대의 새로운 암호체계 대안으로 각광받고 있다.

정보 중요성이 어느 때보다 강조되고 있는 시대를 맞고 있다. 민감한 정보들을 수집하고 또 전송하는 사례가 급속히 늘어나며 보안 중요성이 거의 모든 분야에서 강조되고 있다. 이로 인해 2026년에 이르면 글로벌 QRNG 시장은 약 8조 원 규모까지 성장할 것으로 예측되고 있다.

앞서 소개한 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD) 분야의 경우, 시스템 구축을 위해 다소 높은 장비 비용과 암호화 키 전송을 위한 별도 채널(광선로)을 필요로 한다. 또 장비 설치를 위한 별도 공간까지 확보해야 한다. 장비의 소형화·저가격화가 이뤄지기까지 이러한 문제가 계속될 수밖에 없는 사정을 고려하면, 아직 이 기술의 상용화 시기를 점치기엔 불확실한 요소가 다수 존재하는 것이 사실이다.

이렇게 볼 때 QKD 만큼 도청이 원천적으로 불가능한 통신기술은 아니나, 상대적으로 적은 비용으로 암호 보안성 및 신뢰성을 높일 수 있는 양자 난수 생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG)는 현실적 대안으로 각광받고 있다. 이에 해당 기술을 활용한 상용제품들이 활발히 출시되고 있다.

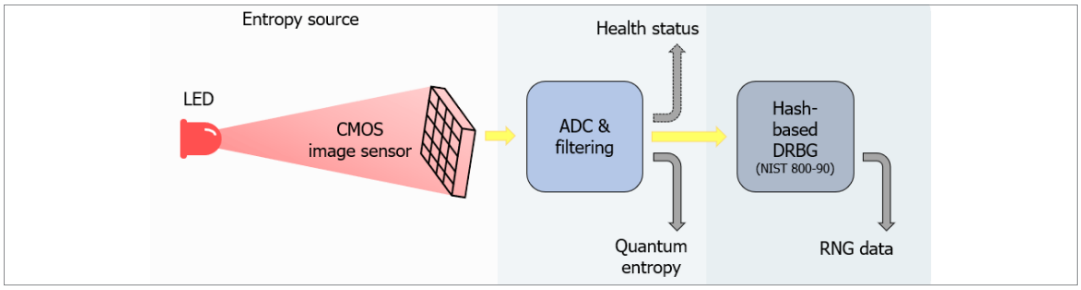
2. 기술 구현 방법

QRNG는 자연현상의 무작위성에서 난수를 추출해 생성하는 기술이다. 국내에서 활발히 연구가 진행 중인 QRNG는, 크게 광자 무작위성을 이용하는 방식과 방사성 동위원소의 자연붕괴 현상을 이용한 방식을 들 수 있다.

가. 광자 무작위성 이용 방식

광자 무작위성을 이용한 QRNG의 대표적 성과로, SKT 자회사 IDQ에서 개발한 QRNG가 있다. IDQ QRNG의 구성요소는 크게 LED, Glass, CIS(CMOS Image Sensor)로 구분된다. LED에서 방출된 광자가 Glass를 통과해 CIS에 무작위로 분포되면, CIS는 광자를 감지해 전기신호로 변환하는 과정을 거쳐 난수를 생성하게 된다.

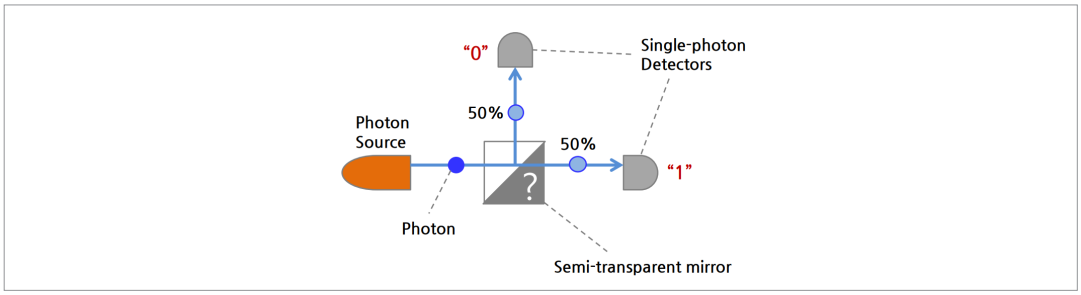
그림 III-1-38 IDQ의 QRNG 개념도



※ idquantique.com

투과율이 50%인 거울을 이용해 구성할 수도 있다. 광자 소스를 통해 쏘아진 광자가 반투명 거울(Semi-Transparent Mirror)을 만나 무작위로 반사되거나 통과될 때, 통과여부를 통해 난수를 생성하는 것이다. 이때 이상적인 반투명 거울은 투과될 확률과 반사될 확률이 50:50을 이뤄야 한다.

그림 III-1-39 반투명 거울을 이용한 QRNG 개념도



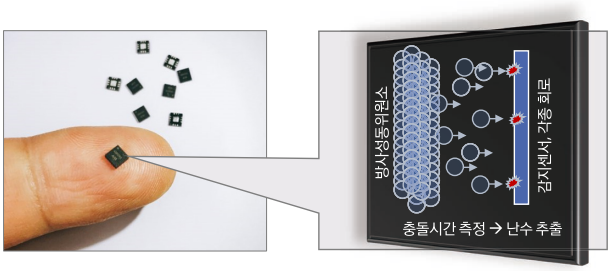
※ 백정현 (2015)

나. 방사성 동위원소의 자연붕괴 이용 방식

방사성 동위원소를 이용한 QRNG는 국내 기업인 이와이엘이 기술을 보유하고 있다. 동위원소는 원자번호는 같으나 질량이 다른 원소를 말하는데, 그 중 방사성 동위원소는 양자터널링 현상에 의해 반감기 동안 자연붕괴 과정을 거친다. 이때 무작위한 시간에 발생하는 방출 입자를 센서로 감지하는 방식을 활용해, 방사성 동위원소를 이용한 QRNG를 구현할 수 있다.

이렇게 구현된 QRNG는 난수를 만들어 내기 위한 최적의 조건을 바탕으로, 가장 양호한 품질의 랜덤성을 보인다. 그러나 장치 크기가 크고 방사능 노출 위험성을 지니고 있어 개발과정에 제약이 따르기도 한다. 그러나 이와이엘은 이러한 한계를 극복하고 방사성 붕괴에 의한 엔트로피를 안전하게 수집할 수 있는 마이크로 칩 개발에 성공했고, 해당 기술을 이용해 QRNG 개발과 상용화를 현실화시켰다.

그림 III-1-40 이와이엘의 방사성 동위원소를 이용한 QRNG 개념도



※ EYL

표 III-1-21 국내외 주요기관별 QRNG 구현방식

기관명	구현방식
EYL(대한민국)	방사성 동위원소 붕괴
IDQ(스위스)	광자의 무작위성 분포
Terra Quantum(스위스)	저광도 광원 광자 검출 시간차 측정
Quantum CTek(중국)	레이저 광자 방출 위상 노이즈
중국과학기술대학(중국)	진공상태 무작위성 추출

※ 집필진 작성

3. 부품

가. 양자 난수 생성기

양자 난수 생성기 개발 시에는 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제시하는 난수 생성을 위한 권장사항을 따라야 한다. 이는 암호화모듈 검증 프로그램(Cryptographic Module Verification. Program, CMVP)의 프레임워크 안에서 수행된다.

암호화 장비는 CMVP를 만족시키지 않으면 제품 판매가 어렵기에, 암호화에 사용되는 QRNG 역시 이러한 기준을 따르는 것이 당연하다. 다음 표는 주요 권장사항에 대한 설명과 국내외 QRNG를 생산하는 주요 기업 현황이다.

표 III-1-22 QRNG 개발 시의 권장사항

권장사항	내용
NIST 800-90A	Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators
NIST 800-90B	Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation
NIST 800-90C	Recommendation for Random Bit Generator (RBG) Constructions
NIST 800-22	A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications

※ NIST

표 III-1-23 대표적인 부품(QRNG) 공급처

부품명	공급처
QRNG	㈜이와이엘, IDQ(스위스), Quintessence Labs(호주), Quside, QuantumCTek(중국)

나. 암호모듈

QRNG는 무작위 난수를 생성하는 반면 암호모듈은 IC, USB, Chip 형태로 만들어져 데이터를 암호화한다. 이와이엘은 자사 QRNG를 활용해 암호모듈을 만들어 제공하고 있다. 또 케이씨에스의 경우 IDQ QRNG를 사용해 암호모듈을 제작하고 있다.

표 III-1-24 대표적인 부품(암호모듈) 공급처

부품명	공급처
암호모듈	이와이엘(주), ㈜케이씨에스

4. 장비

가. 양자 가상사설망(Quantum Virtual Private Network, Q-VPN)

가상사설망(Virtual Private Network, VPN)이란 기존 인터넷 등 공중망을 활용해 가상의 사설망을 구현하는 서비스이다. 멀리 떨어진 원격지의 사용자를 내부 네트워크에 안전하게 접근 가능하도록 한다. 코로나19 팬데믹 이후 재택근무자가 급증하며 회사 업무망을 인터넷을 통해 접근하기 위해 많이 사용하고 있다. 이러한 기능 구현을 위해 VPN은 전송되는 데이터를 암호화하게 되는데, 여기에서 말하는 양자 가상사설망(Qunatum-Virtual Private Network, Q-VPN)은 양자 난수 생성기를 사용해 암호화 신뢰도를 높인 장비이다.

표 III-1-25 대표적인 장비(Q-VPN) 공급처

장비명	공급처
Q-VPN	안랩, XN시스템즈

나. 스마트폰

스마트폰에 양자 난수 생성기를 탑재해 보안성을 강화한 사례가 있다. 삼성전자와 SKT가 합작해 출시한 갤럭시 A 퀀텀 시리즈가 그것이다. 2020년 SKT 자회사인 IDQ는 세계 최초로 QRNG를 탑재한 '갤럭시 A 퀀텀'을 출시했고, 2021년과 2022년에는 '갤럭시 퀀텀2'와 '갤럭시 퀀텀3'를 각각 시장에 내놓았다. 초기에는 SKT의 특정 서비스에 한해 QRNG 난수를 활용했다. 그러나 새로운 모델 출시와 함께 모바일 증명서 지갑 암호화, SK Pay 생채인증 암호화 등 다양한 분야로 QRNG 적용 범위를 넓혀 나갔다. 특히 SC제일은행, DGB대구은행, 하나은행, 카카오뱅크, SK페이, 네이버페이, 쿠팡페이 등의 주요 금융서비스 분야로 적용 영역을 확장해 가고 있다.

표 III-1-26 대표적인 장비(스마트폰) 공급처

장비명	공급처
스마트폰	삼성전자

다. 비화 단말기

비화기는 데이터를 암호화해 해독이 불가능하게 만드는 장치이다. 국방 분야를 비롯한 경찰, 국가 시설 등 보안성이 강조되는 다양한 곳에 활용되고 있다. 국내 기업인 이와이엘에서는 자사 QRNG를 이용한 비화단말기 'Quantum Shieldz'를 출시해 선보이기도 했다.

그림 III-1-41 이와이엘의 비화단말기



※ EYL

라. 구간 암호화 장치

구간 암호화 제품은 암호화가 필요한 통신 디바이스에 적용되고 있다. 기존 장비의 교체 없이도 전송 정보를 QRNG를 이용해 종단간 암호화할 수 있는 소형 모듈이다. 국내 기업인 이와이엘이 국방 분야에 사용되는 드론 시스템이나 CCTV 등에 장착해 납품하고 있다.

그림 III-1-42 이와이엘의 구간 암호화 장치



※ EYL

마. 생체인증 솔루션

생체인증이란 인체 고유 형질을 이용해 사람을 인식하는 방식을 의미한다. 대표적 예로 지문, 홍채, 얼굴, 정맥 등을 활용해 생체인증을 하고 있다. 국내 기업 옥타코는 지문인식 솔루션을 개발해 수요처에 공급하고 있다. IDQ와 협력해 QRNG를 적용한 지문인식 솔루션을 출시했으며 FIDO 2, FIDO U2F, Windows Hello 등의 인증을 거쳐 그 신뢰성을 대외 공인받기도 했다.

표 III-1-27 대표적인 생체인증 솔루션 공급처

제품명	공급처
생체인증 솔루션	옥타코

그림 III-1-43 옥타코의 지문인식 카드 'EzQuant'



※ 옥타코

제4절 시사점

본 장에서는 양자통신 분야 주요기술과 소부장 기술에 대해서 살펴보았다. 양자 키 분배 기술 구성 요소로서 결맞음 광원을 이용한 단일광자 생성, BB84 양자 키 분배 프로토콜, 후처리 프로토콜 등이 있다. 양자 키 분배 소재 기술로는 InP, 실리카, 실리콘, 리튬나이오베이트, 단일광자 검출기용 초전도 소재 기술에 대해서 논의하였다. InP 기술은 1550nm 파장 대역에서 광원으로 사용되고 있으며 실리카, 실리콘 기술은 양자 간섭계나 편광빔분할기, 빔분할기, 파장분할다중화기 등에 사용되고 있다. 리튬나이오베이트 소재는 광자쌍 광원, 전기 광학 효과를 이용한 양자 변조기, 파장 변환 기술 등에 사용될 수 있으며 초전도 소재 기술은 90% 이상의 고효율로 광자를 검출할 수 있어 단일광자 검출기에 사용되고 있다.

양자통신 부품 기술로는 유선 양자통신의 채널로써 사용되는 단일 모드 광섬유, 광원으로 사용되는 레이저 다이오드, 단일광자를 검출할 수 있는 가이거 모드 애벌런치 포토다이오드 기반 단일광자 검출기, 광자의 위상과 세기를 변조할 수 있는 위상 변조기와 강도 변조기에 대해서 논의하였다. 또한, 광자의 세기를 조절할 수 있는 가변 광감쇄기, 유선 양자 신호의 간섭계를 소형화하여 구성할 수 있는 칩 기반의 양자 간섭계 기술, 무작위적으로 예측 불가능한 난수를 생성할 수 있는 양자 난수 생성기 기술에 관해서 설명하였다.

양자통신 장비 기술로는 양자 키 분배에서 양자 신호가 전송되는 양자 채널, 수신된 양자 신호를 기반으로 오류를 수정하고 비밀키를 생성하기 위한 공개 채널로 구성된 양자 키 분배 장치, 그리고 생성된 양자 암호 키를 관리하거나 운영하고 서비스를 제공하는 양자 키 관리시스템에 대해서 알아보았다.

무작위적으로 예측 불가능한 난수를 생성할 수 있는 양자 난수 생성기 제품 기술은 상용성과 활용성을 고려하여 독립된 절로 구성하였으며 기술 구현 방법에 따라 분류해보았고, 양자 가상 사설망, 스마트폰, 비화단말기, 생체 인증 솔류선 등 다양한 서비스에 사용될 수 있음을 나타내었다.

양자통신 기술에서 소부장 기술은 양자컴퓨팅, 양자센싱에서처럼 매우 중요하다고 할 수 있다. 양자통신을 구성하는 핵심 부품의 성능은 양자통신 시스템이나 네트워크 성능을 좌우할 수 있으므로 핵심 부품의 성능을 개선시키는 일은 국제적으로 우수한 양자통신 기술 확보에 크게 기여할 수 있다. 이미 국내에서 우수한 성능을 확보한 가이거모드 애벌런치 포토 다이오드 기반 단일광자 검출 광모듈 부품 기술의 경우, 향후 지속적인 연구를 기반으로 단일광자 검출 효율, 검출 속도, 잡음 감소 개선 기술 등을 통해 단일광자 검출기 모듈 및 장비 차원에서도 세계적인 기술 확보가 가능할 수 있다.

또한, 현재 전 세계적으로 많이 연구하고 있는 양자 키 분배 송신부 및 수신부 집적화 모듈 기술은 기술 개발의 난도가 높지만, 양자통신 산업 활성화 측면에서 반드시 확보되어야 할 기술로 간주할 수 있다. 이러한 집적화 모듈 기술이 확보되면 고가의 비용을 차지하는 양자통신 기술이 저가화되고 소형화되어, 더욱 다양하게 사용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

양자통신 소재·부품·장비 기술을 전망하는 측면에서 볼 때, 세계적으로 양자 정보 기술은 산업화 관점에서 초기 단계에 있다고 할 수 있지만 양자통신 기술 가운데서도 특히 양자 키 분배 기술은 다른 양자 기술에 비해서 산업화에 많이 앞서 있다고 볼 수 있다. 이러한 양자통신의 주요 소부장 기술 확보를 통해 국제적으로 선도 가능한 양자통신 기술 개발이 가능할 뿐 아니라 국내 공급망 안정은 물론 해외시장 개척 및 시장 점유율도 높일 수 있을 것으로 기대한다. 도청이 불가능한 양자통신 기술은 각 국의 전략적 수출규제 품목으로 지정되어 해외로부터 기술 도입이 어려울 것으로 예상된다. 이에 따라 국내 양자통신 공급망 다원화와 글로벌 선도 기술 확보를 위해서는 양자통신 소재·부품·장비 기술의 국내 내재화는 필수적이라 할 수 있다.

양자통신 기술은 유선 양자 네트워크뿐 아니라 무선, 위성 양자통신 기술로 발전할 것이며 양자컴퓨팅, 양자센싱을 통합하는 양자 네트워크인 양자 인터넷 기술로 발전할 것이다. 따라서, 장거리 유선 양자통신, 무선 양자통신, 양자 위성, 얽힘 양자 네트워크, 양자 메모리, 양자 중계기 등에서 다양한 양자통신 소재·부품·장비 기술에 대한 투자가 요구된다.

제2장
양자센싱분야 주요기술과 소부장

제1절 개요

고전 센서로는 측정할 수 없었던 신호를 측정할 수 있고 높은 정밀도를 갖는 고감도 센서와 정밀 측정에 의한 각종 데이터의 중요성이 증가하고 있다. 특히 강조되고 있는 분야가 국방, 바이오, 의료, 자율주행, 반도체 등의 부문이다. 양자센서 기술을 통해 탐지 회피를 시도하는 스텔스기에 대응하는 국방 분야에서부터 첨단 MRI와 같은 낮은 광량을 요구하는 의료 분야에 이르기까지 산업도메인별로 다양하게 활용가능한 첨단 서비스를 제공함으로써 국민 생명 및 안전과 직결된 분야인 만큼 매우 높은 수준의 센서 정밀도가 요구되고 있다. 그런 측면에서 기존 센서로는 도달하지 못하는 수준의 높은 분해능 및 정밀도, 높은 감도, 그리고 측정 속도가 빠른 양자센서가 미래 핵심산업으로 각광받고 있다.

양자센서는 측정하고자 하는 물리량에 따라 양자관성센서, 양자 시간·주파수 센서, 양자 전기장센서, 양자 자기장센서, 양자광학센서 등으로 구분된다.

이 중 양자관성센서는 중력센서, 가속도센서, 회전센서로 구성된다. 양자중력센서는 극저온 원자를 이용한 양자간섭현상을 이용하고, 가속도계는 원자간섭계 기반의 센서, 광역학계 기반의 센서등이 있고, 회전센서는 원자간섭계 기반의 센서, 원자스핀 기반의 센서, NV 센터 기반의 센서 등이 있다. 양자 시간·주파수 센서의 경우, 원자의 결맞음 현상이나 양자간섭현상을 이용해 시간 및 주파수를 생성하거나 측정한다.

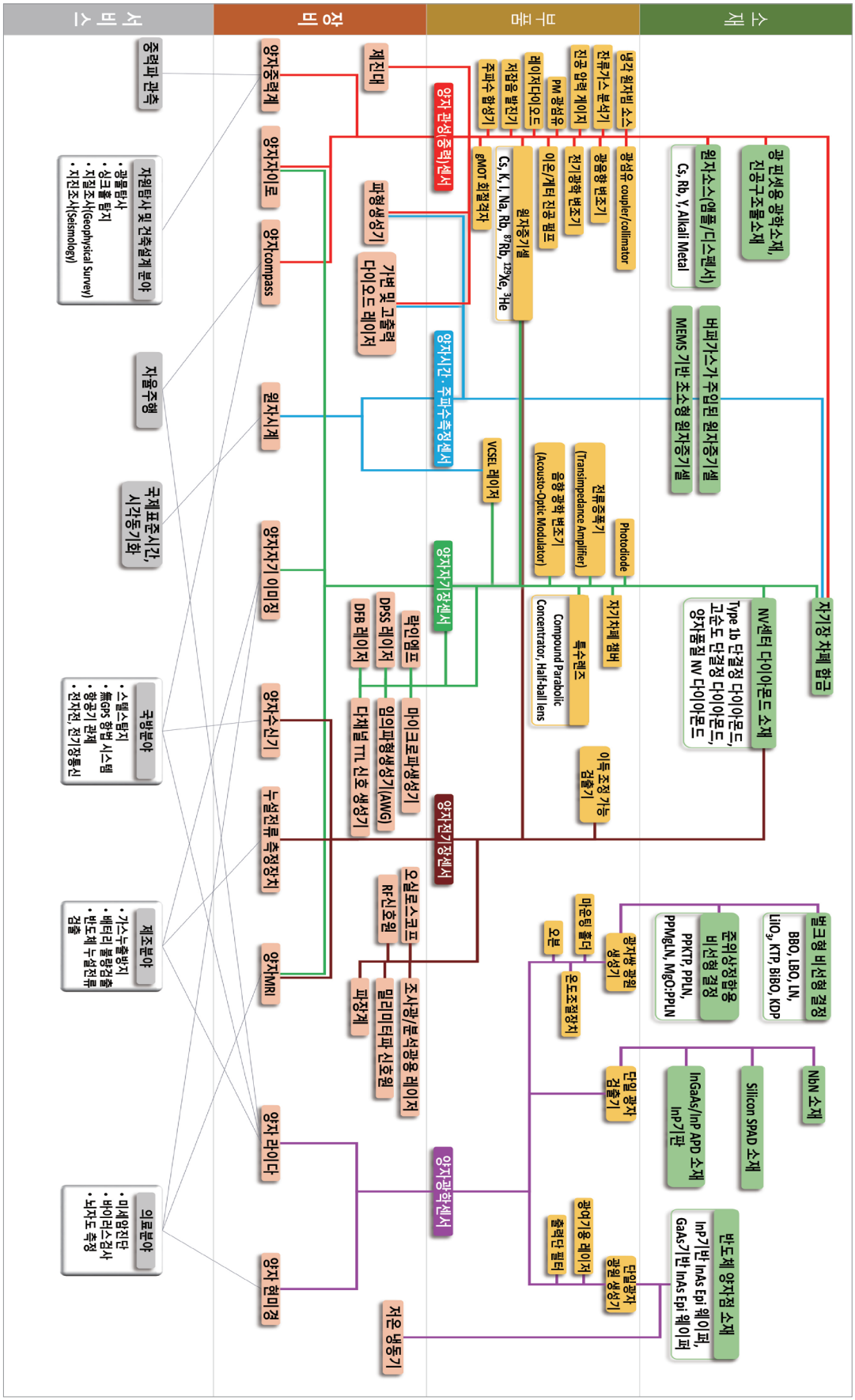
원자를 기반으로 하는 양자센서 기술에 사용되는 주요 소부장으로는 원자소스, 레이저 다이오드, 원자증기셀, 냉각 원자빔 소스, 음향 광학 및 전기 광학 변조기, 파형 생성기 등이 있다. 양자 전기장센서는 원자를 리드버그 상태로 만들어 전기장을 측정하는데 주요 소부장으로는 원자증기셀, 조사광용 및 분석광용 레이저, 파장계 등이 있다. 또 양자 자기장센서의 경우 원자증기를 이용한 센서, 자기장센서와 고체의 점 결합을 이용한 센서 등이 있다. 그 구현 방식에 따라 원자증기셀, 고순도 단결정 다이아몬드 등의 소재를 사용하며 포토다이오드, 음향 광학 변조기, 임의파형 생성기 등을 주요 소부장으로 볼 수 있다.

끝으로 양자광학센서는 비선형 결정, 반도체 양자 점소재, 비선형 양자광원, 단일광자 광원 등의 주요 소부장이 있다. 아래 그림과 같이 양자센서는 큐비트, 양자결맞음, 양자얽힘 등 다양한 특성을 이용해 측정작업을 수행하기에 다양한 소부장으로 구성되어 있다.

기본적으로 센서 영역은 측정하고자 하는 물리량의 종류가 다양하다. 따라서 그림과 같이 다양한 종류의 센서로 구분될 수밖에 없다. 결과값으로 제시되는 물리량은 서로 다르나 유사한 원리로 동작하기에, 일부 센서의 경우 동일한 소부장을 사용하기도 한다.

이번 장에서는 산업 생태계 변화를 불러올 양자현미경, 양자라이다, 양자중력계, 원자시계 등 양자센서 기반 장비 구현을 위한 소재·부품·장비에 대해 알아보고자 한다.

그림 III-2-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자센싱)



제2절 양자중력센서

1. 요점

양자중력센서는 중력 가속도를 측정하는 장치이다. 시간과 공간의 중력 변화를 측정함으로써 중력 항법, 자원 탐사, 지층 변화, 지진 탐지 등의 분야에 활용할 수 있는 장치다. 해당 분야의 기술은 50년 이상 연구돼 왔으나, 최근 양자현상을 이용해 기존 중력계의 한계를 뛰어넘을 수 있는 '양자중력계' 및 '초전도 중력계'에 대한 연구가 급부상하고 있다. 특히 양자중력계는 기존 절대중력계의 한계를 극복할 수 있는 '절대 양자중력계(Absolute Quantum Gravimeter, AQG)' 개발로 연결될 것으로 기대되고 있다. 또한 지하구조물 탐색, 지하수 변화 측정, 싱크홀 탐지 등에 이점을 가지고 있는 양자중력구배계 연구도 최근 활발히 진행되고 있다.

원자의 양자간섭현상을 이용해 중력 가속도를 측정한다는 면에서, 레이저를 이용한 간섭계 구현 원리와 유사하다. 그러나 레이저 대신 원자의 파동성질을 이용해 원자 물질파 간섭계를 구성하다는 측면에서는 차이를 보인다. 원자 물질파는 빛보다 높은 주파수를 가지며 중력에 대해 훨씬 민감하게 반응하는 특성을 가지고 있다. 이에 양자중력계는 이론적으로 기존 절대중력계에 비해 10^5배 이상 정확도를 높일 수 있다.

현재 원자 중첩상태, 원자-광자 결맞은 상호작용 등 양자역학적 현상을 적극 이용해 민감도를 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 핵심기술로는 원자 레이저 냉각기술, 원자상태 선택 및 속도 선택 기술, 레이저 기술, 고진공 기술, 원자상태 검출기술 등을 꼽을 수 있다. 본 절에서는 원자간섭계 기반 양자중력센서에 필요한 주요 소재·부품·장비를 알아보고자 한다.

2. 구성요소

양자중력센서는 크게 물리부, 레이저시스템, 그리고 제어시스템으로 나뉠 수 있다. 우선 물리부에서는 원자의 레이저 냉각 및 포획, 원자간섭계 구현, 그리고 측정 등이 이루어진다. 이를 위해 진공챔버, 자기장 차폐, 진동 차폐 등을 구현할 수 있는 기술들이 필요하다.

레이저시스템에서는 물리부에 필요한 레이저를 공급한다. 해당 시스템은 세부적으로 냉각용 레이저, 원자간섭계 구현을 위한 라만레이저, 형광 측정을 위한 검출레이저로 구성된다. 제어시스템은 전체

동작을 순차적으로 제어할 뿐 아니라 레이저 세기 및 주파수, RF 및 마이크로파의 세기 및 주파수 등을 조절한다. 또 측정된 신호를 분석해 다음 주기 중력센서 동작에 필요한 조건들을 변경하기도 한다.

이제 양자중력센서 구현을 위한 기술들의 세부 구성요소를 살펴보면 원자 레이저 냉각을 위해서는 첫 번째로 고진공시스템이 필요하다. 이러한 시스템 구현을 위해 6방향 냉각용 레이저, 2방향 라만레이저를 보내기 위한 시창, 원자구름 모니터링을 위한 시창, 원자간섭계 이후 측정을 위한 검출레이저 및 형광신호 측정용 시창 등이 구비되어야 한다. 이때 진공챔버는 초고진공 상태를 구현하기 위해 진공 압력이 10^{-10}Torr 이하를 유지해야 한다. 진공챔버 구성 후 초기에는 로터리 펌프 및 터보 펌프를 이용해 펌핑을 실시한다. 그러다 초고진공 상태에 이르게 되면, 이온 게터 펌프, 승화 및 비기화 게터펌프 같은 소형이면서도 진동이 없는 펌프를 활용해 초고진공 상태를 유지한다.

또 원자 냉각을 위해서는 진공챔버 내에 원자를 공급해야 한다. 이 과정에는 주로 알칼리 원자 앰풀(Ampoule)이나 디스펜서(Dispenser) 등을 이용한다. 앰풀 온도나 디스펜서 전류를 조절해 진공챔버 내에서 원자의 증기압과 양을 적절히 조정하게 된다.

원자의 레이저 냉각을 위해 두 번째로 필요한 것이 한 지점에서 서로 수직으로 교차하는 6방향 레이저 빔이다. 이때 냉각용 레이저는 주 냉각용 레이저와 원자 및 냉각용 레이저의 상호작용 유지를 위한 리펌핑 레이저로 구성된다. 레이저 주파수의 일정한 유지를 위해서는 원자분광셀을 이용해 분광장치를 구성하고, 이와 같은 과정을 거쳐 레이저 주파수를 원자전이선 수준에서 안정화시킨다. 이러한 분광장치 구현을 위해서는 원자분광셀, 전기광 변조기(또는 광음향 변조기), 광검출기(Photodiode), RF 주파수 발생기, RF 증폭기 등이 사용된다.

또 수십 ~ 수백 ms 동안 광자기 포획(Magneto-Optical Trap) 과정을 거쳐 원자를 냉각한 후 원자를 보다 낮은 온도로 추가 냉각하기 위해, 레이저 세기 및 주파수를 조절하게 된다. 따라서 레이저시스템에는 레이저 세기 및 주파수 조절을 위한 광학부품(광·음향 변조기 등)이 설치되어 있다.

한편 제어시스템에서는 광학부품에 공급되는 RF의 주파수 및 세기를 시간에 맞춰 조절하게 되는데, 이를 위해 주파수 발진기, 주파수 합성기 및 증폭기 등의 부품이 사용된다. 이때 CCD 카메라 등을 활용해 냉각된 원자구름의 모양과 위치 등을 관측하고, 필요시에는 자기장 세기 등을 조절할 수 있다.

이때 원자구름 온도가 원하는 온도에 도달하면 모든 레이저를 차단함으로써 원자구름이 중력에 의해 낙하하도록 유도한다. 다만 원자분수 방식을 적용할 경우에는 원자구름과 수직방향으로 주파수 차이가 있는 두 레이저를 위 아래로 보냄으로써 원자구름이 위쪽으로 발사되게 만들고, 발사 직후 모든 레이저를 차단한다. 이 경우 원자는 위쪽으로 올라가다 중력에 의해 자연스럽게 낙하하게 되며 레이저

빔 차단을 위해서는 광·음향 변조기, 역학 차단기(Mechanical Shutter) 등을 이용한다.

원자간섭계는 중력 하에 이동하는 원자에 라만레이저를 $\pi/2$ - π - $\pi/2$ 의 3 개의 펄스 형태로 연속적으로 보내 원자간섭계를 구성한다. $\pi/2$ 펄스는 두 바닥상태 간의 라만 전이 확률이 1/2 이므로 이 펄스에 의해 원자구름이 2 개로 나뉜다. 즉, $\pi/2$ 펄스는 광학의 빔분할기와 같은 역할을 원자구름에 작용한다. π는 광학의 반사경과 같은 역할로 원자구름의 방향을 바꾸는 역할을 한다. 이때 라만레이저를 구성하는 두 레이저는 원자의 두 바닥상태 준위 차에 해당하는 주파수 차이를 가지며, 전기광 변조기나 위상잠금을 이용해 생성된다. 또 이 레이저는 펄스 형태로 원자에 보내지기에, 펄스 형태를 구현하기 위한 광·음향 변조기나 펄스 발생기가 이용된다. 이후 검출레이저를 조사하고 원자에서 나오는 형광 광검출기를 이용해 원자 상태를 측정하게 된다.

원자는 주변 자기장에 의해 그 에너지 준위가 영향을 받으므로 자기장 차폐가 필요하며, 투자율(Permeability)이 큰 합금을 이용해 필요한 형태로 제작하여 자기차폐를 한다. 양자중력계는 진동에 의해 영향을 받기 때문에 바닥으로부터 전달되는 진동의 차단을 위해 제진대를 사용한다. 이와 같은 원자간섭계 기반 양자중력계에서 필요로 하는 소부장은 다음과 같이 분류할 수 있다.

표 III-2-1 양자중력계 구현을 위한 주요 소부장

양자중력계 구성요소	각 필요 소부장
원자 소스	루비듐(Rb), 세슘(Cs), 이트븀(Yb), 스트론튬 (Sr) 등
자기차폐 합금	자기장 차폐를 위한 금속 합금
광학 부품 및 장비	원자 냉각 및 조작을 위한 레이저나 광학 부품 및 장비
진공 부품 및 장비	원자 냉각 및 조작을 위한 진공 부품 및 장비
RF 부품 및 장비	RF 또는 마이크로파를 발생 및 합성에 필요한 부품과 장비 (수 MHz ~ 10GHz)

※ 집필진 작성

3. 소재

가. 원자 소스

양자센서에 필요한 원자들은 앰풀(Ampoule) 또는 디스펜서(Dispenser) 형태로 제작돼 판매되고 있다. 앰풀은 순수 알칼리 원자(순도 99% 이상)를 진공 유리관에 밀봉 형태로 넣어둔 것이다. 진공챔버 한부분의 구리관에 넣어 두었다가 고진공 상태에서 깨뜨려 사용한다. 알칼리 원자는 액체 금속 형태이기에 진공 중에서 증발하게 된다. 구리관에 히터 또는 냉각기를 붙여 온도를 조절해 줌으로써 증발되는

알칼리 원자의 양을 조절할 수 있다.

디스펜서는 순수 알칼리 원자와 게터 물질이 합쳐져 있는 상태로, 다양한 형태와 크기로 제작돼 판매되고 있다. 디스펜서를 진공챔버에 넣고 전극을 연결해 전류를 가하면, 가열되면서 알칼리 원자를 방출한다. 흘려주는 전류 세기를 조절함으로써 공급되는 알칼리 원자의 양을 조절할 수 있다. 염소(Cl), 브로민(Br) 등과 같은 원소와 화합물로 만들어진 알칼리 금속도 판매되고 있다.

표 III-2-2 대표적인 소재(원자 소스) 공급처

소재명	공급처
원자소스	Alfa Aesar, Buyisotope, SAES Getters

그림 III-2-2 (왼쪽) 세슘 앰풀, (오른쪽) 알칼리 메탈 디스펜서



※ smart-elements.com, saesgetters.com

나. 자기차폐 합금

자기장을 차폐하기 위한 금속 합금으로 시트(Sheet)를 비롯한 다양한 형태로 제작돼 판매되고 있다. 중력계에선 주로 원통 형태로 주문 제작되는데 원통 모양 및 크기, 원하는 차폐율을 미리 알려주면 적절한 특성의 합금을 선택해 최종 차폐율을 만족하도록 제조해 준다.

'Mu-metal'이라 불리기도 하는데 니켈, 철, 구리, 크롬, 몰리브덴 등의 합금 형태로 자기 투자율 (μ, mu)이 큰 물질이다. 이때 니켈 비율이나 다른 물질의 조정을 통해, 원하는 특성을 가진 합금을 만들 수 있다.

표 III-2-3 대표적인 소재(자기차폐 합금) 공급처

소재명	공급처
자기차폐 합금	Amuneal, Mushield, Magnetic shield Co., Holland Shielding Systems BV

그림 III-2-3 (왼쪽) 시트 형태 자기 차폐 합금, (오른쪽) 다양한 형태의 자기차폐 합금



※ amuneal.com, mushield.com

4. 부품

가. 광학부품

광학부품은 원자의 레이저 냉각, 원자 조작, 라만레이저, 신호 검출 등을 가능하게 하는 레이저시스템 구성에 필요한 부품이다.

① 레이저 다이오드

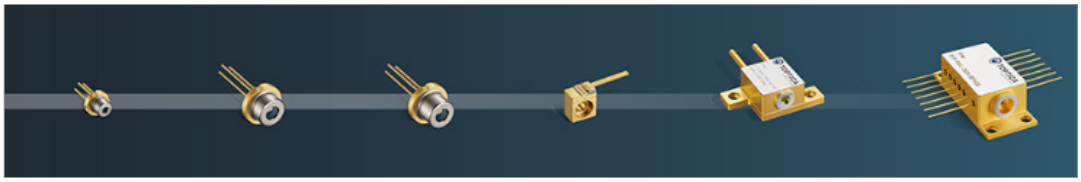
매우 다양한 종류의 광학부품 중 핵심부품인 레이저 다이오드(Laser Diode)는 GaAs기반 반도체를 사용해 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 또는 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)로 제작되며, 레이저시스템에서 광원으로 사용된다. 원자전이선에 따라 780nm, 795nm, 852nm, 895nm, 1064nm 등 다양한 파장과 출력 특성을 가진 제품이 출시되고 있어 필요에 따라 선택 구매가 가능하다. 그 중 선폭 1MHz~5MHz, 출력 수십 mW~수백 mW 사이 분포 귀환형(Distributed Feed Back, DFB) 레이저와 분산 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector, DBR) 레이저가 주로 사용되고 있다. 레이저 선폭을 줄이기 위해 외부공진기가 부착된 레이저시스템(External-cavity Diode Laser)을 사용하기도 하는데, 최근, mini ECDL, mini TA 와 같은 칩 형태의 크기가 소형이면서 안정적으로 동작하는 제품이 새롭게 출시되었다. TA(Tapered Amplifier)는 레이저 출력을 증폭하는 증폭기이

다. 국내에 레이저 다이오드 성장 및 공정 설비가 존재하고 일부 기술은 산업화되었으며, 출연연 및 기업에서 원천 기술을 보유 중이므로 적은 투자로 양자 소부장 산업화를 기대할 만하다.

표 III-2-4 대표적인 부품(레이저 다이오드) 공급처

부품명	공급처
레이저 다이오드	TOPTICA Photonics, Photodigm

그림 III-2-4 레이저 다이오드



※ www.toptica-eagleyard.com

② 원자증기셀

양자중력계에서 원자셀은 레이저 주파수를 원자의 전이선에 안정화하기 위한 기준셀(Reference Cell)로 사용된다. 주로 루비듐 및 세슘 분광셀이 사용되는데 루비듐의 경우, 루비듐87 또는 루비듐85 동위원소만 포함된 셀과 동위원소 분리가 안 된 자연상태의 루비듐(루비듐85:루비듐87 비율이 약 72:28 임) 셀이 있다. 목적에 따라 증기셀의 유리 재질과 크기, 길이 등을 선택해 구매하거나 주문 제작을 하고 있다. 특히 레이저가 지나는 면에 의한 간섭효과를 없애기 위해 쐐기(Wedge) 형태 셀을 사용하기도 한다.

분광셀은 알칼리 원자만 포함하는 셀과 아르곤(Ar), 네온(Ne), 질소(N_2) 등 버퍼가스가 함께 밀봉된 분광셀이 있다. 주파수안정화를 위한 기준셀로는 주로 순수한 알칼리 원자만을 포함하고 있는 분광셀을 이용한다. 순수한 분광셀에 알카리 원자외의 다른 원하지 않는 기체가 포함되어 있는 경우 포화흡수 분광선이 관측되지 않거나 관측된 포화흡수 분광선 선폭이 세슘 또는 루비듐의 자연 선폭(약 5MHz ~ 6MHz) 보다 커지게 되어 주파수안정화에 적절하지 않게 된다. 필요에 따라 분광셀에서 레이저가 지난 표면에 무반사 증착을 하거나 아르곤(Ar), 네온(Ne), 질소(N_2) 등 버퍼가스를 수십 Torr~수백 Torr의 일정한 압력으로 주입한 원자증기셀을 주문 제작하기도 한다. 이러한 분광셀은 양자시간주파수센서에 주로 사용되는데, 다음 장에서 이에 관한 내용이 기술되어 있다.

최근 국내에서도 출연연의 원자증기셀 제작기술이 기업에 기술이전이 진행되고 있어, 머지않은 미래에 국내 기업에서 원자증기셀을 제작하여 공급할 수 있을 것으로 보인다.

표 III-2-5 대표적인 부품(원자증기셀) 공급처

부품명	공급처
원자증기셀	Thorlabs, Precision Glassblowing

③ 냉각 원자빔 소스

냉각 원자빔 소스(Cold Atom Beam Source)는 양자관성센서, 양자시계 등에서 원자를 레이저 냉각할 때 사용한다. 2D 냉각된 저속 원자빔의 경우 레이저 냉각 시에 여러 장점이 있어 최근 사용이 증가하고 있다. 일반적인 원자 앰풀이나 디스펜서를 이용하는 것보다 더 많은 원자를, 보다 짧은 시간 안에 레이저 냉각 및 포획할 수 있기 때문이다. 2D 원자빔을 만들기 위해서는 챔버 및 광학부품으로 시스템을 구성해야 하나, 최근 콤팩트하게 만들어진 제품이 공급되고 있다.

표 III-2-6 대표적인 부품(냉각 원자빔 소스) 공급처

부품명	공급처
냉각 원자빔 소스	ColdQuanta

④ 광학 변조기

광학 변조기는 레이저 주파수 및 세기 조절을 위해 사용되는 광학부품이다. 그 중 음향 광학변조기(Acousto-Optic Modulator)로는 입력된 RF 주파수 및 세기에 따라 변조된 출력을 얻을 수 있다. RF 주파수만큼 이동된 레이저 주파수를 얻거나, 레이저의 세기 또는 레이저 출력의 on/off 등을 위해 사용된다. 전기 광학 변조기(Electro-Optic Modulator)는 레이저의 주파수를 변조하는 데 사용하는데, 변조기에 입력된 RF 주파수 및 세기에 따라, 생성되는 곁 모드(Side Mode) 레이저 출력의 주파수 및 세기가 달라진다.

이러한 음향 광학 변조기와 전기 광학 변조기는 각 제조사마다 매우 다양한 모델을 제공하고 있어, 목적에 따라 적절한 부품을 선택해 사용할 수 있다.

표 III-2-7 대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
음향 광학 변조기	G&H, Opto-Electronic, brimrose

표 III-2-8 대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
전기 광학 변조기	Thorlabs, Agiltron, MIMO SHANGHAI INSTRUMENT INC.

⑤ 편광 보존 광섬유 및 광섬유 커플러·콜리메이터

편광 보존(Polarization Maintaining, PM) 광섬유는 레이저 편광을 유지하며 레이저를 전송하는데 사용된다. 중력계에서는 자유공간(Free Space)에서 만들어진 레이저시스템의 레이저빔을 중력계 물리부까지 전송하는데 이용할 수 있다. 자유공간의 레이저 빔을 광섬유 커플러(Coupler)를 이용해 광섬유에 입력하고, 물리부에 있는 광섬유 출력단에서 광섬유 콜리메이터(Collimator)를 이용해 자유공간으로 레이저 빔을 보내는 것이다. 이때 광섬유 커플러 및 콜리메이터는 각각 레이저 빔을 광섬유에 입사시키거나, 광섬유 출력광을 평행광으로 만드는 부품이다.

이러한 PM 광섬유, 광섬유 커플러 및 콜리메이터 등은 각 제조사마다 워낙 다양한 모델을 제공하고 있다. 여기에서는 여러 모델 중 하나를 선택해 그 특성을 표기하는 방식으로 각 부품을 소개하기로 한다.

표 III-2-9 대표적인 부품(PM 광섬유) 공급처

부품명	공급처
PM 광섬유	Thorlabs, Newport, Schäfter + Kirchhoff GmbH, OZ optics

표 III-2-10 대표적인 부품(광섬유 커플러 및 콜리메이터) 공급처

부품명	공급처
광섬유 커플러 및 콜리메이터	Schäfter + Kirchhoff GmbH, OZ optics, Thorlabs

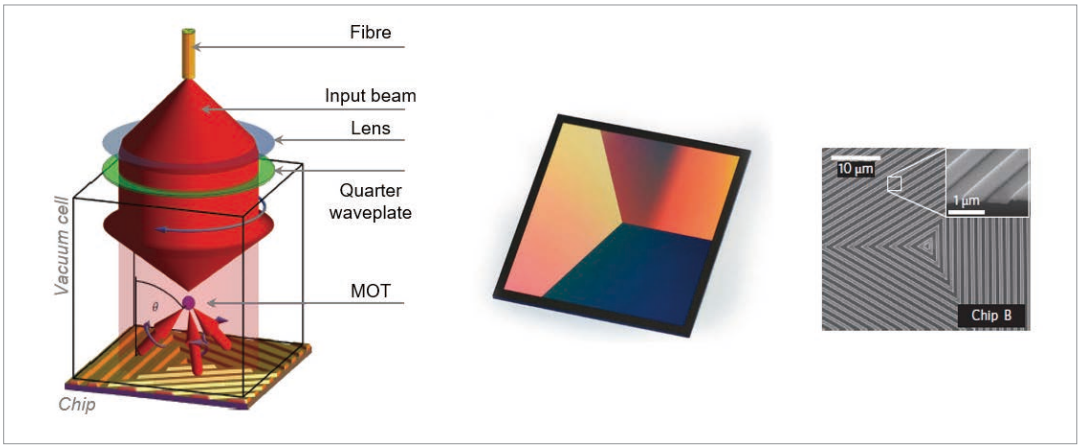
⑥ gMOT 회절격자

원자의 레이저 냉각은 기본적으로 6방향의 레이저 빔이 필요하지만, 최근 특정한 패턴을 가진 회절격자(grating)을 제작하여 1개의 레이저 빔으로 레이저냉각하는 gMOT(grating Magneto-Optical Trap)에 많은 관심이 집중되고 있다. gMOT 회절격자는 아직 각 연구그룹이 자체적으로 제작하여 사용하는 경우가 많으며, 한국에서도 KRISS와 나노종합기술원이 공동으로 gMOT용 회절격자를 설계 및 제작하였다.

표 III-2-11 대표적인 부품(gMOT용 회절격자) 공급처

부품명	공급처
gMOT용 회절격자	Kelvin Nanotechnology, CPI

그림 III-2-5 gMOT 개념도와 사진



* (왼쪽) gMOT 개념도
(가운데) 회절격자 칩 사진
(오른쪽) SEM 이미지

※ J. P. McGilligan et al. (2015), C. C. Nshii et al. (2013)

나. 진공부품

진공부품은 원자의 레이저 냉각, 원자 조작, 신호 검출 등을 수행하는 물리부의 진공시스템을 구성하는데 필요한 부품을 뜻한다. 다양한 진공 부품 중 기술적으로 제작이 어려운 진공부품 중심으로 살펴보기로 한다.

① 잔류가스 분석기

잔류가스분석기(Residual Gas Analyzer)는 진공 내부의 잔류가스 및 누출 등을 분석하는 장치이다. 이 부품은 각 제조사마다 다양한 모델을 제공하고 있어 상황과 특성을 고려해 적절한 부품을 선택해 사용하면 된다.

표 III-2-12 대표적인 부품(잔류가스 분석기) 공급처

부품명	공급처
잔류가스 분석기	Stanford Research Systems, MKS Instruments, Leybold

② 진공 압력 게이지 및 이온 게터 진공펌프

진공 압력 게이지(Vacuum Pressure Gauge)는 진공시스템의 내부 압력, 즉 진공도를 측정하는 부품이다. 또 진공시스템 내부를 고진공 상태로 유지시켜 주는 이온 게터 진공펌프가 있다. 열거한 부품들은 각 제조사마다 다양한 모델을 제공하고 있어 상황과 특성을 고려해 적절한 부품을 선택해 사용하면 된다. Ti 승화펌프 및 비증발성 게터(Non Evaporable Getter, NEG) 펌프 등을 이온 게터 펌프와 부가적으로 결합하여 사용하기도 한다. Agilent, Gamma 등 고진공 펌프 제작사는 Ti 승화펌프 및 NEG 펌프도 역시 판매를 하고 있으므로 제작사와 상의하면 된다. 이온 게이지, 이온 게터 펌프 및 이온 게터 펌프 제어기에 대해서는 국산화가 완료되어 국내 기업이 시장에 진입한 상태이다.

표 III-2-13 대표적인 부품(진공 압력 게이지) 공급처

부품명	공급처
진공 압력 게이지	아토벡, KVC, MKS Instruments, Arun Microelectronics Ltd., Stanford Research Systems

표 III-2-14 대표적인 부품(이온 게터 진공펌프) 공급처

부품명	공급처
이온 게터 진공펌프	Alpha-EVS, SAES Getters, Agilent

다. RF 부품

RF 부품은 레이저시스템의 레이저 주파수 제어와 원자전이 등을 위한 RF 발생 및 합성에 사용된다. 다양한 RF 부품 중 기술적으로 제작이 어려운 RF 부품을 중심으로 정리하면 다음과 같다.

① 저잡음 발진기

저잡음 발진기(Low Noise Oscillator)는 레이저 주파수 제어, 원자전이 등에 필요한 저잡음 기준 주파수를 발생시키는 장치이다.

표 III-2-15 대표적인 부품(저잡음 발진기) 공급처

부품명	공급처
저잡음 발진기	NEL Frequency Control, Nexyn Corporation

② 주파수 합성기

주파수 합성기(Frequency Synthesizer)는 주파수 제어 및 원자전이 등에 필요한 주파수를 합성하는 부품이다.

표 III-2-16 대표적인 부품(주파수 합성기) 공급처

부품명	공급처
주파수 합성기	Valon, Mog Labs, National Instruments, Novatech

5. 장비

가. 가변 및 고출력 다이오드 레이저

이 장비는 고출력인 동시에 가변 파장이 가능한 다이오드 레이저시스템이다. 원자의 레이저 냉각, 신호 검출 등에 주로 사용된다. 각 제조사마다 다양한 모델을 출시하고 있어 파장, 출력, 선폭 등을 고려해 필요한 모델을 선택할 수 있다.

표 III-2-17 대표적인 장비(가변 및 고출력 다이오드 레이저) 공급처

장비명	공급처
가변 및 고출력 다이오드 레이저	TOPTICA Photonics, Newport

나. 파형 생성기

파형 생성기(Waveform Generator)는 양자관성센서 및 시간센서에서 시스템 제어 등에 필요한 파형을 생성하는 장치이다. 레이저시스템 구현이나 장치의 동작 제어 등에 사용된다. 파형, 주파수, 분해능 등에 따라 다양한 모델이 존재한다.

표 III-2-18 대표적인 장비(파형 생성기) 공급처

장비명	공급처
파형 생성기	Keysight, Rigol, Stanford Research Systems

다. 제진대

제진대(Vibration Isolation Platform)는 양자중력센서에서 바닥으로부터 전달되는 진동을 차단하기 위해 사용하는 장치이다. 각 제조사마다 다양한 모델을 출시하고 있어, 하중 및 차단 주파수 등을 고려해 필요한 모델을 선택할 수 있다.

표 III-2-19 대표적인 장비(제진대) 공급처

장비명	공급처
제진대	minus K, Thorlabs

제3절 양자 시간·주파수 측정센서

1. 요점

양자 시간·주파수 측정센서는 일정한 주파수를 발생시키거나 측정하는 센서이다. 주파수와 주기는 서로 역수관계이기에 시간·주파수 측정센서는 시간을 측정하는 센서로 활용될 수 있다. 이에 '시간 측정센서' 또는 '주파수 측정센서'로 부르기도 하나, 두 가지 가능성을 합쳐 보통 시간·주파수 측정센서로 명명한다. 초기에는 수정발진기를 이용해 구현하였으나, 점차적으로 원자 주파수 발진기, 즉 원자시계를 대체되어왔다. 최근에는 초고정밀 광시계 연구, 초소형 원자시계 연구, 온칩-광주파수합성기 개발 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 원자의 전자전이가 아닌 핵전이를 이용한 핵시계(Nuclear Clock)에 대한 이론적인 제시와 더불어 이에 대한 실험도 시작되고 있다.

원자시계는 원자의 에너지 준위간 전이를 활용해 일정한 주파수를 발생시키는 장치이다. 마이크로파 영역의 전이를 이용하는 '마이크로파 원자시계'와 광주파수 영역의 전이를 이용하는 '광시계'로, 최근 제안된 핵전이를 이용하는 '핵시계'로 분류될 수 있다.

원자시계를 구현하는 방법과 크기, 용도 등을 고려해서도 그 종류를 구분할 수 있다. 대표적으로 용도에 따라 표준기급 또는 초고정밀도 실현을 목표로 하는 '레이저 냉각 원자를 이용한 원자시계', 현 산업분야에서의 다양한 활용을 위해 구현되는 '원자분광셀을 이용한 원자시계', 미세 전자기계 시스템(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS) 기술을 활용한 '초소형 원자시계'로 나눌 수 있다.

이 중 냉각원자 기반 원자시계는 원자를 수 μK 이하로 레이저 냉각한 후 마이크로파 또는 광주파수 전이를 유도해 일정한 주파수를 얻는다. 이 과정에는 원자 레이저 냉각기술, 원자 조작기술, 레이저 기술, 고진공기술, 원자상태 검출기술 등이 활용된다.

원자분광셀 기반 원자시계는 원자분광셀을 마이크로파 공진기 내부에 두고 전이를 발생시키거나 결맞음 밀도 포획(Coherent Population Trapping, CPT) 현상을 이용한다. 이때 필요한 기술로는 마이크로파 공진기 기술, 레이저기술, 원자셀 제작기술 등이 있다.

MEMS 기반 초소형 원자시계는 원자분광셀 기반 원자시계와 같은 기술을 이용한다. 다만 MEMS 기술을 활용해 원자분광셀을 초소형으로 만들고 필요한 회로에 고집적회로 기술을 적용함으로써 원자시계의 크기 및 소모 전력을 획기적으로 낮출 수 있다. 이번 절에서는 양자 시간·주파수 측정센서인 원자시계 개발에 필요한 주요 소재·부품·장비를 기술한다.

2. 구성요소

가. 냉각원자 기반 원자시계

냉각원자 기반 원자시계는 크게 물리부, 레이저시스템, 그리고 제어시스템으로 구성된다.

우선 물리부에서는 원자의 레이저 냉각 및 포획, 원자 조작, 신호 측정 등이 이뤄진다. 이를 위해 진공챔버, 자기장 차폐, 진동 차폐 등의 기술이 필요하다. 또 레이저시스템은 물리부에 필요한 레이저를 공급하는데 이러한 레이저의 종류로는 냉각용 레이저, 원자상태 준비를 위한 레이저, 형광 측정을 위한 검출레이저 등이 있다. 제어시스템에서는 전체 동작을 순차적으로 제어할 뿐 아니라 레이저 세기 및 주파수, RF 세기 및 주파수 등을 조절한다. 더해 측정된 신호를 분석함으로써 다음 주기 측정에 필요한 조건들을 변경하기도 한다.

이밖에 냉각원자 기반 원자시계 구현을 위한 기술들의 세부 구성요소는 양자중력센서의 그것과 대동소이하다. 따라서 자세한 내용은 제2절의 구성요소 부분을 참고하면 된다.

나. 원자분광셀 기반 원자시계

원자분광셀 기반 원자시계 역시 물리부, 레이저시스템, 제어시스템으로 나눌 수 있다.

물리부를 통해서는 원자분광셀에서 마이크로파 또는 광주파수 전이를 발생시키고, 공정 신호측정 등을 수행한다. 이를 위해 원자분광셀 제작기술, 마이크로파 기술, 레이저기술, 자기장 차폐 등의 기술이 필요하다.

레이저시스템은 원자의 상태 준비를 위한 레이저, 형광 또는 흡수 측정을 위한 검출레이저로 구성된다. 또 제어시스템은 전체 동작의 순차적 제어, 레이저 세기 및 주파수, 또는 RF 세기 및 주파수 등을 조절하는데 필요한 부분이다.

한편 측정 신호 분석 이후 원자는 주변 자기장에 의해 에너지 준위에 의한 영향을 받는데, 이러한 영향을 차단하기 위해 자기장 차폐가 필요하다. 이때 성공적인 자기장 차폐를 위해 투자율이 큰 합금을 적절한 형태로 제작해 사용하고는 한다. 원자분광셀 기반 원자시계 구현에 필요한 소부장은 다음과 같이 분류할 수 있다.

표 III-2-20 원자분광셀 기반 원자시계 구현에 필요한 소부장

원자분광셀 기반 원자시계 구성요소	각 필요 소부장
원자 소스	• 루비듐(Rb), 세슘(Cs), 이트븀(Yb), 스트론튬 (Sr) 등 • 필요 시 아르곤(Ar), 네온(Ne), 질소(N_2) 등 버퍼가스가 일정한 압력 (수십 Torr ~ 수백 Torr)으로 주입된 분광셀
자기차폐 합금	자기장 차폐를 위한 금속 합금
광학 부품 및 장비	원자 냉각 및 조작을 위한 레이저나 광학 부품 및 장비
진공 부품 및 장비	원자 냉각 및 조작을 위한 진공 부품 및 장비
RF 부품 및 장비	RF 또는 마이크로파를 발생 및 합성에 필요한 부품과 장비

다. MEMS 기반 초소형 원자시계

MEMS 기반 초소형 원자시계 역시 물리부, 레이저시스템, 제어시스템으로 나눌 수 있는데 원자분광셀 기반 원자시계와 거의 같은 기술들이 사용된다. 다만 MEMS 기술을 이용해 원자분광셀을 초소형으로 만들고 제어시스템에 고집적 전자회로 기술을 적용함으로써 고성능이면서 초소형, 저전력인 원자시계를 개발하여 다양한 분야에 적용하려고 하고 있다.

3. 소재

양자 시간·주파수 측정센서에 필요한 소재는 '제2절 양자 중력센서' 구현에 필요한 그것과 대동소이하다. 따라서 제2절의 내용으로 갈음한다.

다만, 원자증기셀의 경우 원자증기셀 기반 원자시계와 MEMS 기반 초소형 원자시계에 사용되는 원자증기셀은 중력계에 사용되는 원자셀과는 차이가 있어, 이에 대해 추가적으로 아래에 기술한다.

가. 버퍼가스가 주입된 원자증기셀

원자증기셀 기반 원자시계중에는 원자의 결맞음 현상을 이용하는 CPT 원자시계가 있다. 증기셀 내부에 있는 원자는 기체상태로 수백 m/s의 속력으로 움직이고 있어 증기셀 벽면과 계속 충돌하게 된다. 이렇게 벽면와 충돌을 하게 되면 원자의 결맞음이 깨어지기 때문에, 이를 방지할 필요가 있다. 벽면과 충돌하여도 결맞음을 유지할 수 있도록 증기셀 내부벽면에 파라핀 증착을 하거나, 일정 압력의 버퍼가스를 주입하여 원자의 벽면과의 충돌을 막는 2가지 방법을 사용된다. 최근에는 파라핀 증착보다는 버

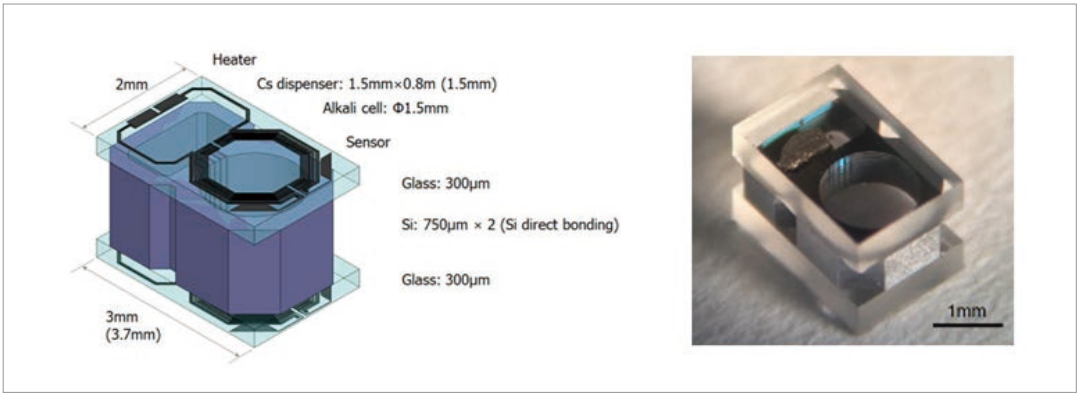
퍼가스를 주로 사용하는데, 이 경우 버퍼가스의 압력에 따라 원자의 전이선 주파수가 바뀌고 선폭도 넓어지게 된다. 증기셀의 온도에 따라 버퍼가스의 압력이 바뀐다. 이에 따라서 원자의 주파수도 바뀌어 되어 안정도에 나쁜 영향을 미치게 된다. 온도에 따른 원자의 전이선 주파수 이동을 둔화시키기 위해 2가지 이상의 버퍼가스를 적절한 압력으로 주입된 셀을 사용하기도 한다. 셀의 제조사는 '제2절 양자 중력 센서'와 동일하므로 제2절을 참조하면 된다.

나. MEMS 기반 초소형 원자증기셀

원자증기셀은 주로 크기가 1cm ~ 수십cm 이며, chip-scale 초소형 원자시계에서는 수 mm 크기의 셀을 사용되며, 이는 MEMS 공정을 이용하여 제작할 수 있다. 제작 방법은 논문 등을 통해 여러 가지 알려져 있으나, 아직 상용 제품으로 공급되지 않고 있다.

국내에서는 KRISS와 나노종합기술원이 공동연구를 통해 국내 최초로 MEMS 증기셀 공정을 개발하고 제작하였다.

그림 III-2-6 제작된 MEMS 증기셀 구조와 사진



4. 부품

양자 시간·주파수 측정센서에 필요한 부품은 '제2절 양자 중력센서' 구현에 필요한 그것과 대동소이하다. 따라서 제2절의 내용으로 갈음한다. 다만 MEMS 기반 초소형 원자시계의 경우, 수직 캐비티 표면 광방출 레이저(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)가 사용되므로 이 부품의 세부에 대해서는 본절에 기술했다.

가. VCSEL(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)

VCSEL은 초소형 원자시계나 자기장 센서에 사용되는 광원이다. 795nm, 895nm 등 원자전이선에 따라 다양한 파장의 레이저가 있으며, 가공되지 않은 다이(Die) 형태나 패키징 형태로 판매되고 있다.

구현을 위해 결맞음 밀도 포획(CPT) 현상을 이용하는데, 레이저 전류를 변조해 CPT에 필요한 두 주파수의 레이저를 생성한다. 따라서 VCSEL 싱글 모드 단일 주파수로 전류 변조해, 수 GHz (루비듐의 경우 약 3.4GHz, 세슘의 경우 약 4.9GHz) 주파수로 직접 변조가 가능해야 한다. 각 제조사마다 다양한 모델을 제공하고 있으며 출력과 변조 주파수, 동작 온도 등을 특성을 고려해 적절한 모델을 선택할 수 있다. 여기에는 대표적인 한 모델을 선택해 그 특성을 소개했다. 국내에 KIST가 VCSEL 설계/성장/제작 원천기술을 보유하고 있어, 국산화 도전이 가능하다.

표 III-2-21 대표적인 부품(VCSEL) 공급처

부품명	공급처
VCSEL	VIXAR, Thorlabs, Oclaro

5. 장비

양자 시간·주파수 측정센서에 필요한 장비는 '제2절 양자 중력센서' 구현에 필요한 것과 대동소이하다. 따라서 제2절의 내용으로 갈음한다.

제4절 양자 전기장센서

1. 요점

양자 전기장센서(Quantum Electric-Field Sensor)는 양자원리를 이용해 고전적 전기장센서 및 수신기 기술의 한계를 돌파할 수 있는 센서다. 리드버그 원자센서(Rydberg Atom Sensor), 혹은 양자 RF센서(Quantum RF Sensor)라 부르기도 한다.

가장 큰 장점은 양자원리에 따른 절대 정확도를 보이기에, 교정이 필요하지 않다는 점이다. 더욱이 작은 물리적 크기, 우수한 선택도, 초광대역 특성, 우수한 민감도 등의 장점도 가지고 있어 다양한 응용분야 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 양자 전기장센서의 경우 센서로서뿐만 아니라 전자파 수신기(Receiver)로도 활용이 가능하므로 신개념 통신 시스템으로의 활용 또한 기대된다. 센서 및 통신 분야에 적용 시 외부 센서로 사용되는 원자증기셀(Atom Vaper Cell)은 유리와 같은 유전체이며, 증기셀 연결을 위해서 순수 유전체인 광케이블(Optical Cable)을 사용한다. 센서의 헤드부 및 연결케이블이 금속이 없는 유전체이므로, 외부 전자파에 의한 유도전류가 발생되지 않으므로 외부 전자파 간섭에 강한 내성을 보유한다. 또한 초광대역 주파수 동작 특성을 보이기에 광대역 주파수 감시 등에도 적용 가능하므로 그 활용 분야가 매우 넓다.

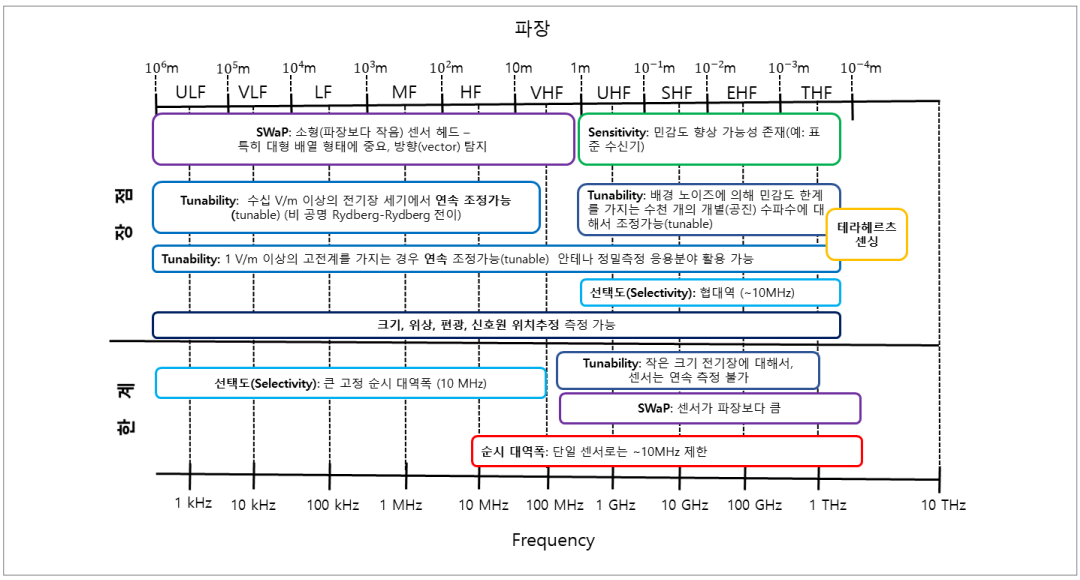
최근에는 헤테로다인 기술을 적용해 민감도를 크게 향상시킬 수 있거나 방향탐지가 가능한 기술 등 여러 기술이 제안되었다. 이에 따라 새로운 활용 가능성이 탐색 되는 상황이다. 그러나 현재까지는 실용화에 있어 여러 제약이 따르기에 이러한 한계 극복을 위한 다방면의 연구가 필요한 실정이다.

전통적 전자파 수신기는 수신 안테나와 전자적인 프론트-엔드로 구성된다. 안테나로 전자기장에서 전달된 에너지를 흡수한 후, 전자파 모드를 자유공간 모드에서 도파관 또는 동축선로 내의 유도된 파동(Guided Wave) 모드로 변환한다. 이어 변환된 모드의 전자파는 전류를 발생시키고 사용자가 아날로그 또는 디지털 영역에서 처리하기 전에, 전자적 프론트-엔드에서 증폭, 필터, 정류 등의 과정을 거친다.

반면 양자 전기장센서에서는 입사된 전기장의 흡수가 발생하지 않는다. 결맞음 과정을 통해 입사된 전기장이 리드버그 원자의 내부상태를 변화시키기 때문이다. 변화된 상태는 광학적 크기나 위상변조 효과를 통해 나타나며, 이 효과의 수준은 스펙트럼 분석을 통해 알 수 있다.

이처럼 근본적인 원리 측면에서 차이가 있기에 전통적 수신기의 성능 지표들을 양자 전기장센터에 그대로 적용할 수는 없다. 그러나 민감도, 선택도, 동작 영역, 채널 용량 등의 지표들은 양측의 비교에 활용할 수 있다. 다음 그림에서 양자 전기장센서가 기존의 전기장 센서에 비해 가지는 장점과 한계점을 파장에 따라서 비교하였다.

그림 III-2-7 기존 전기장센서와 양자 전기장센서 비교

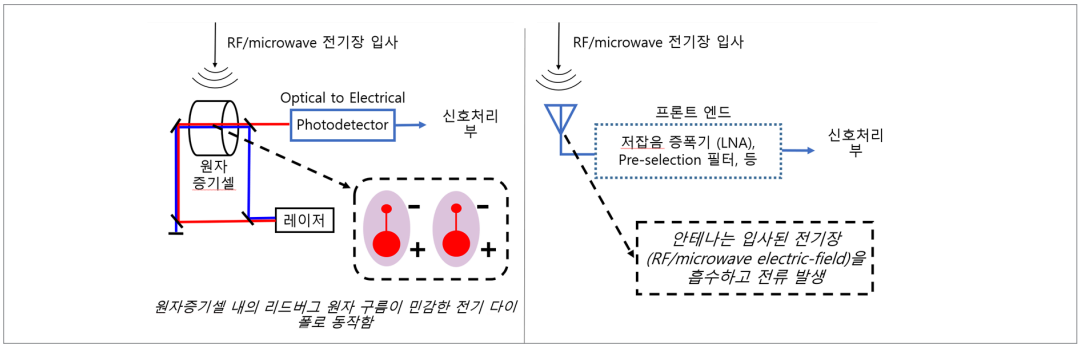


※ Fancher et al. (2021) 집필진 재구성

2. 구성요소

양자 전기장센서는 전통적 전자파 수신기와 근본적으로 다른 동작원리를 가진다. 다음 그림에는 두 센서 구현방식의 일반적인 구성을 나타냈다.

그림 III-2-8 (왼쪽) 양자 전기장센서, (오른쪽) 전통적 전자파 수신기의 일반적 구성



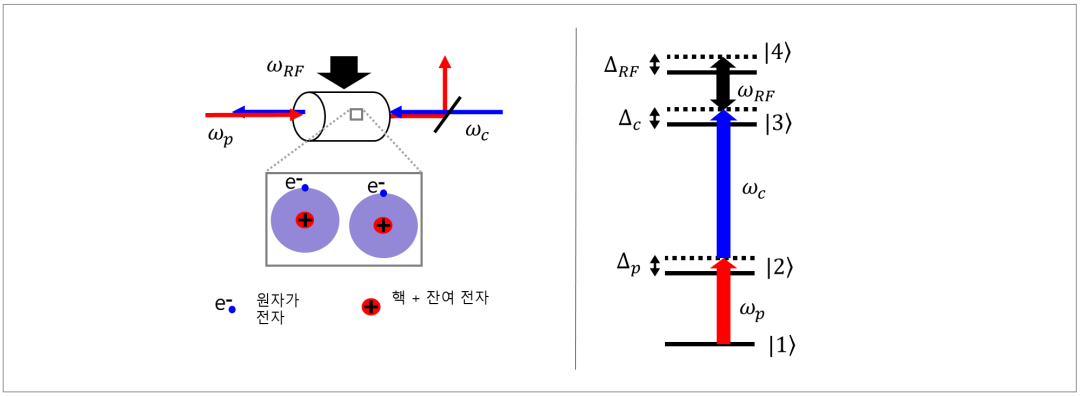
※ Fancher et al. (2021)

그림을 통해 알 수 있듯이 양자 전기장 센서부는 전자파 수신기의 안테나부와 유사하며, 수광소자(Photodetector)는 프론트 엔드부와 비슷하다.

양자 전기장센서에서 레이저는 원자를 주양자수 n[5]이 높은 에너지 상태를 가지는 리드버그 상태로 들뜨게 한다. 이로써 매우 민감한 전기 쌍극자들로 동작하도록 한다. 또 입사 전자기파는 리드버그 원자의 내부 에너지 상태에 영향을 주기에, 원자증기셀 내부를 통과하는 레이저를 변조한다. 이러한 변조 효과는 수광소자에서 발생되는 전류에 주파수 변화를 일으켜 전류가 계측기를 통과할 때 그 값을 읽으면 입사된 전기장의 특성을 파악할 수 있다.

이는 리드버그 원자와 입사된 전기장 사이 결맞음 과정이므로 입사된 전기장의 어떤 흡수도 발생하지 않는다. 반면 전통적 수신기의 안테나는 입사된 전기장이 자유전자를 구동시킴으로써 전류가 발생하게 된다.

그림 III-2-9 (왼쪽) 원자를 리드버그 상태로 들뜨게 하는 과정
(오른쪽) 루비듐과 세슘을 리드버그 상태로 들뜨게 하는 과정



※ Fancher et al. (2021)

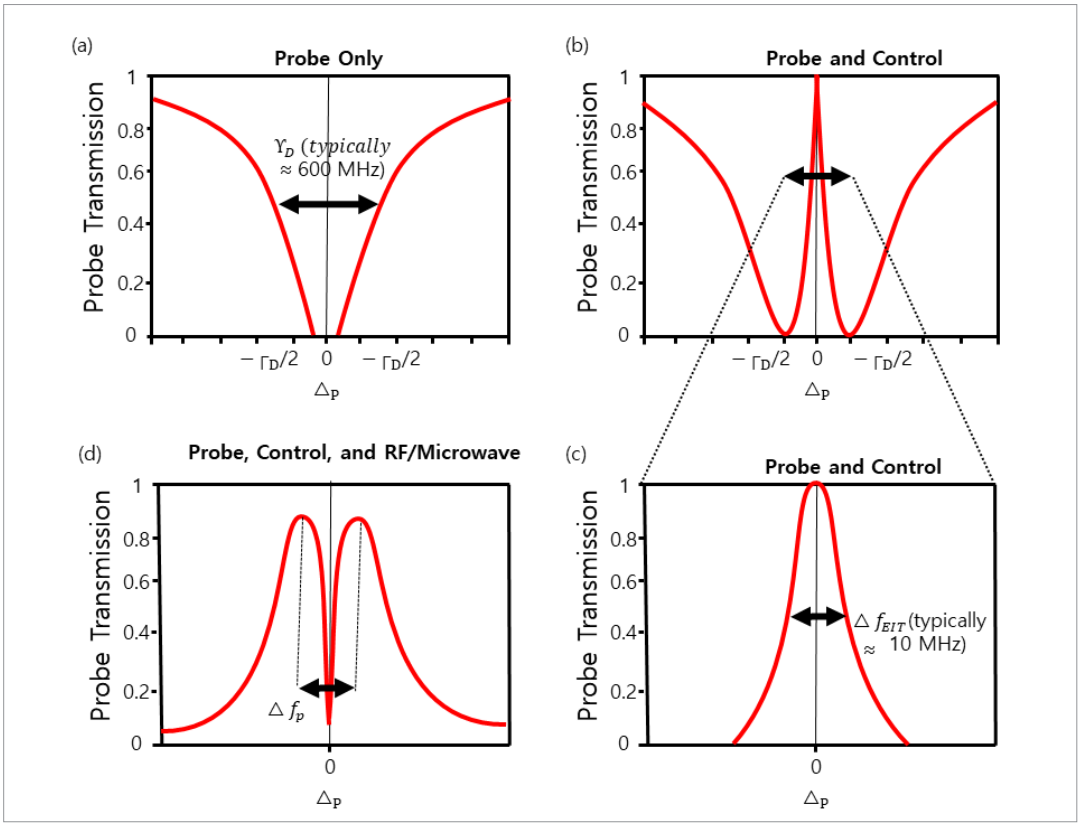
위의 그림에서는 양자 전기장센서가 원자를 리드버그 상태로 들뜨게 하는 구동 원리를 나타냈다. 먼저 서로 반대로 진행하는 레이저가 루비듐과 세슘 등의 원자증기로 채워진 유리셀을 통과하며, 이 빛들이 원자상태를 변화시킨다. 그림과 같이 이광자(Two Photon) 들뜸을 이용하는 경우도 있고, 세 개 레이저를 이용한 삼광자(Three Photon) 들뜸을 유도하는 경우도 있다.

5) 일반적으로 '0≤n≤100' 사이

일단 원자가 리드버그 상태(¦3⟩)가 되면 근방에 있는 전이상태(¦4⟩)에 공명하거나 공명하는 전자파에 매우 민감한 상태가 된다. 반드시 공명하는 주파수의 전자파가 아니더라도, 입사된 전자파가 두 리드버그-리드버그 전이로부터 멀리 떨어진 공명 주파수더라도, 에너지 레벨(¦3⟩)은 이동하게 된다. 이때 검출 빔의 스펙트럼 분석을 통해 입사된 전자파의 성질을 측정할 수 있다.

한편 리드버그 원자를 사용해 전기장 측정을 하는 경우, 두 가지 물리적 현상을 이용한다. 그 첫째는 전자기 유도 투과(Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 현상이고, 둘째는 AC 스타크(AC Stark) 효과이다. 두 현상 모두 일정한 특성을 가진 전자기장이 입사됐을 때 일어나는데, 아래 그림은 이상적인 상황에서 투과된 조사광에 의한 투과 스펙트럼을 나타낸다.

그림 III-2-10 이상적인 상황에서 투과된 조사광에 의한 투과 스펙트럼



※ Fancher et al. (2021)

(a)는 광학적으로 두꺼운 원자증기를 조사광이 투과할 때 스펙트럼의 모습을 나타낸다. 이 상태에서 제어광을 추가적으로 쬐어 주면 원자 일부가 리드버그 상태로 들뜨게 되며, 이로 인해 조사광 스펙트럼의 좁은 윈도우 영역에서 높은 투과율을 보이는 전자기 유도 투과(EIT) 현상이 관측된다. 이어 리드버그 상태와 공명하는 전자파를 인가하면 오틀러-타운스(Autler-Towns) 분리현상이 일어나며 EIT 투과 윈도우가 분리돼 (d)와 같은 모양을 나타낸다. 이를 AC 스타크 변화의 한 종류로 볼 수 있다.

특정 원자전이선에서 공명 주파수나 그에 가까운 전자파를 입사하는 경우, 오틀러-타운스 효과는 그 공명 특성으로 인해 가장 민감도 좋은 양자 전기장센서의 작동을 일으킨다. 이러한 공명 주파수들은 UHF에서 THF에 이르는 매우 넓은 영역에 수천 개가 분포한다.

비공명(Off-Resonant) 스타크 효과는, UHF 주파수 대역 이하 반송파 주파수 영역에서 전기장 측정 용도로 활용된다. 비공명 효과를 이용하는 경우 공명 주파수 기법에 비해 민감도가 많이 떨어지는 것이 사실이다. 그러나 강한 전기장 하에서 거의 DC 근방 주파수까지 연속적으로 변화시키면서도, 측정이 가능하다는 연구들이 속속 보고되고 있다.

한편 오틀러-타운스 효과에 의해 분리된 주파수 간격 Δf_p가 조사광 스펙트럼에서 관찰되는데, 이 주파수 벌어짐 간격은 인가된 전기장 크기에 비례한다.

$$\Delta f_p = \begin{cases} \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\frac{\Omega_{RF}}{2\pi} & \Delta_p\text{가 스캔되는경우} \\ \frac{\Omega_{RF}}{2\pi} & \Delta_c\text{가 스캔되는경우} \end{cases}$$

여기서 제어광과 조사광의 파장비 λ_c/λ_p는, 두 레이저 사이 도플러 부정합(Mismatch)을 나타내며 Ω_{RF}는 아래 수식으로 주어지는 라비(Rabi) 주파수를 의미한다.

$$\Omega_{RF} = \frac{\vec{\mu}_{RF} \cdot \vec{E}_{RF}}{\hbar}$$

또 위의 수식에서 $\vec{\mu}_{RF}$는 전이의 전기쌍극자 모멘텀을 나타내며, $\vec{E}_{RF}$는 원자에 인가된 전기장의 세기이고, ħ은 플랑크상수를 2π로 나눈 값이다. 이 벌어짐 간격 주파수 Δf_p를 어느 분해능까지 측정할 수 있는지가, 최소 측정가능 전기장 세기 $E_{\min}$의 한계를 정의한다.

3. 부품

가. 원자증기셀

원자증기셀(Vaper Cell)은 유리나 파이렉스로 만든 원통형 또는 육면체 구조를 띠며, 루비듐이나 세슘과 같은 알칼리 원자를 증기화해 삽입한 부품이다. 원자증기의 순도가 99% 이상이어야 하며, 필요에 따라 부품 내부에 파라핀 코팅을 할 수 있다. 증기셀 내부 진공도는 10^{-8} Torr 이하여야 하며, 실린더형의 경우 크기는 보통 12.7mm에서 25.4mm 사이, 길이는 20mm에서 50mm 사이로 만들어진다.

현재 MEMS 기술을 이용한 초소형화 제품 개발이 꾸준히 이뤄지고 있다. 이러한 증기셀의 경우, 그 크기가 1mm 정도로 제작되고 있다. 다만 레이저가 원자증기를 통과하는 길이가 작아져 성능이 열화되는 문제가 발견되고 있어, 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되어야 하는 상황이다.

표 III-2-22 대표적인 부품(원자증기셀) 공급처

부품명	공급처
원자증기셀	Precision Glassblowing

그림 III-2-11 실린더형 원자증기셀



※ precisionglassblowing.com

나. 이득 조정가능 검출기

이득 조정가능 검출기(Gain Switchable Detector)는 주로 조사광의 주파수 변화에 따른 전력 크기를 측정하기 위해 사용된다. 파장범위 350nm~1100nm에서 검출 가능한 실리콘(Si) 검출기로서 내부 로터리 스위치를 조정해 단계별로 이득을 조정할 수 있다. 출력 임피던스는 50이며 보통은 5V까지 출력이 가능하다.

표 III-2-23 대표적인 부품(이득 조정가능 검출기) 공급처

부품명	공급처
이득 조정가능 검출기	Thorlabs

4. 장비

가. 조사광 및 분석광용 레이저

조사광 및 분석광용 레이저는 원자증기셀을 통과해 원자증기 상태를 변화시키기 위한 레이저이다. 조사광 레이저로 이용되는 780nm 대역 레이저의 경우 출력이 작아 다양한 선택지가 있다. 다만 제어광 생성을 위한 480nm 대역 레이저는 수급에 어려움이 따르고 있다. 향후 부품 고집적화 달성을 위해 480nm 대역 레이저에 대한 연구가 필요한 상황이다.

표 III-2-24 대표적인 장비(조사광 및 분석광용 레이저) 공급처

장비명	공급처
조사광 및 분석광용 레이저	TOPTICA Photonics

그림 III-2-12 조사광 및 분석광용 레이저



※ toptica.com

나. 오실로스코프

오실로스코프는 조사광 및 분석광 레이저 스캔 시 검출기 흡수율 특성을 검토할 때, 파형을 관찰하기 위한 장비이다. 범용장비이기 때문에 다양한 업체를 통해 공급이 가능하다.

표 III-2-25 대표적인 장비(오실로스코프) 공급처

장비명	공급처
오실로스코프	Keysight, Tektonix

다. 파장계

파장계는 양자 전기장센서에 외부 전기장을 인가하기 위한 장비이다. 이 역시 범용장비로 부분적으로 국산화되어 있다.

표 III-2-26 대표적인 장비(파장계) 공급처

장비명	공급처
파장계	HighFinesse

라. RF 신호원

RF신호원은 양자 전기장센서에 외부 전기장을 인가하기 위한 장비로 다양한 업체를 통해 공급이 가능하다.

표 III-2-27 대표적인 장비(RF 신호원) 공급처

장비명	공급처
RF 신호원	Keysight, Rohde & Schwarz

마. 밀리미터파 신호원

밀리미터파 신호원은 양자 전기장센서에 외부 전기장을 인가하기 위한 장비로, RF 신호원으로부터 받은 신호를 체배(Multiply)해 밀리미터파를 발생시킨다. 가장 성능이 우수한 제품을 내놓고 있는 업체가 과점시장을 형성하고 있다.

표 III-2-28 대표적인 장비(밀리미터파 신호원) 공급처

장비명	공급처
밀리미터파 신호원	VDI, OML

제5절 양자 자기장센서

1. 요점

양자 자기장센서는 양자 큐비트 플랫폼을 기반으로 양자 얽힘 및 중첩 상태를 이용해 미세한 자기장을 측정하는 기술이다. 이 센서는 고전적 물리현상에 기반을 둔 센서에 비해 그간 달성 불가능했던 감도 또는 공간 해상도를 제공할 수 있다.

플랫폼을 불문하고 양자 자기장센서 기술을 통해 달성하고자 하는 공통 목표는, 미세 자기장을 정밀하게 측정하고 그 공간적 분포를 이미징해 궁극적으로 자기장 발생원에 대한 정보를 온전히 얻는 것이다. 물리적으로는 전류와 자화(스핀)만이 자기장 발생원(자기원)이 될 수 있다. 통상 인체에서 발생하는 생체 자기장은 가장 미약한 세기를 갖는 것으로 분류되며, 이의 측정을 위해서는 10~100fT 수준의 감도가 필요하다.

생체 자기측정에는 뇌신경 전류에서 발생하는 '뇌자도'와 심장에서 발생하는 생체 자기장을 측정하는 '심자도'가 포함된다. 이처럼 인체 내부에 존재하는 자기원의 위치를 밀리터리 수준 정확도로 국지화하기 위해서는 100개 이상 다채널 측정시스템 구축이 필요하다. 생체가 아닌 반도체, 배터리 등 전자소자의 경우 동작 시에 대략 1nT~10μT 수준 자기장이 발생한다. 지구 자기장이 평균 50μT 정도 세기를 나타내는 점을 감안할 때, 여기 언급된 자기장들은 그에 비해 매우 약한 자기장임을 알 수 있다.

한편 초전도, 고체 점결합 스핀, 원자증기가 양자 자기장센서의 대표적 플랫폼이다. 측정 감도 및 공간 해상도 측면에서 각 플랫폼이 갖는 장단점이 명확하고, 기술 성숙 정도 역시 매우 다르다.

우선 초전도 양자간섭소자(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)의 경우 생체 자기측정 분야를 개척했으며, 오랜 연구개발 기간을 거쳐 현재는 상용화 수준에 도달해 있다. 그러나 본 절에서는 기술 성숙도가 높은 SQUID 센서는 제외하고, 원자증기 및 고체 점결합 스핀 플랫폼 기반의 양자 자기장센서 기술을 주로 다루고자 한다.

이 중 원자증기 자기장센서(Optically Pumped Magnetometer, OPM)는 칼륨(K), 세슘(Cs), 루비듐(Rb) 등 알칼리 기체를 가두고 있는 원자증기셀이 물리적 센싱부 역할을 하고, 자기장 하에서 광펌핑된 원자 스핀상태의 변화를 이용해 자기장을 측정하는 기술이다. 다양한 구동 방식이 있으나 스핀교환 이완이 없는(Spin-Exchange Relaxation Free, SERF) 방식의 OPM이 가장 높은 감도를 갖는데,

여기서 SERF는 자기장 세기가 0에 가까운 환경에서 증기셀 내부 원자간 충돌을 활성화할 때 원자 스핀의 결맞음 시간이 오히려 증가하게 되는 현상을 말한다.

OPM 센서는 액체 헬륨을 필요로 하지 않아 시스템 유지비용과 편의성 측면에서 장점을 갖고 있어 뇌자도 및 심자도 기술에 활용됨으로써 의료산업 발전에 기여할 것으로 기대된다. 또 공간적으로 멀리 떨어져 있는 금속 및 자성 물체에서 발생한 자기장 측정에도 OPM의 고감도 특성이 활용될 수 있다. 이 경우 지하 금속자원 탐사, 원거리 금속물체 탐지 등 안전·국방 분야에 적용 가능한 기술로 발전할 수 있다.

고체 점결합 플랫폼은 OPM 센서와 대비되는 특징을 지니며 응용분야도 서로 다르다. 이 플랫폼의 경쟁력은 절대 감도에 있지 않고 단위 부피당 감도에 있는데, 고전 센서로는 달성 불가능한 단위 부피당 감도를 활용하면 고해상도 자기 이미징 기술의 구현이 가능하다. 또 고체라는 특성을 이용해 다양한 형태의 디바이스 제작도 할 수 있다. 이처럼 필요한 분해능과 감도에 따라 그 형상과 크기, 그리고 점결합 농도를 조절할 수 있어 나노미터부터 마이크로 스케일 자기 이미징까지 다양한 응용분야를 발굴할 수 있다.

현재로선 고체 점결합 플랫폼에서 다이아몬드 NV(Nitrogen Vacancy)가 가장 유망한 센서로 인식된다. 상온에서도 광학적으로 NV 스핀상태의 초기화 및 측정이 가능하며, 결맞음이 수십 μs 동안 유지되기 때문이다. 또 NV 스핀 외에 주변 ^{13}C, ^{15}N 핵스핀까지 양자 메모리나 얽힘 큐비트 형태로 자기장 센싱에 활용될 수 있다.

고체 점결함 자기장 센서의 주목받는 응용분야로 나노소자 또는 2차원 소재 이미징을 들 수 있다. 이 경우 10nm 수준 해상도가 필요하기에 센서의 물리적 크기가 중요한데, 다이아몬드 NV 센서의 경쟁력이 가장 높게 평가받고 있다. 단일 스핀이 물리적으로 구현 가능한 가장 작은 센서에 속하기 때문이다. 이때 팁 형태 다이아몬드 끝에 존재하는 단일 NV 스핀을 센서로 만드는 것을 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope, SPM) 기술이라 하는데, 이를 통해 고해상도 자기 이미징이 가능하다. 따라서 2차원 반데르발스 물질의 자성 분석과 같은 첨단연구에 활용되고 있다. 여기에서 한 발 더 나아가 100mK 이하 극저온 환경에서 동작하는 NV SPM 시스템이 개발될 경우, 2차원 양자응집 상태의 고분해능 이미징을 얻을 수 있는 도구로 주목받을 것이다.

마이크로미터 스케일의 자기 이미징에도 다이아몬드 NV 센서가 이용되는데, 일반 현미경과 유사한 형태로 인해 광시야(Wide-Field) NV 현미경이라고 부르기도 한다. 이때 다이아몬드 표면 아래 10nm~10μm 정도 깊이까지 고농도의 NV 스핀이 존재하는 영역을 만드는데, 일종의 자기 이미징용 필름이라 할 수 있다. 이 경우 고농도라는 장점을 활용한 고속 이미징이 가능하기에, 바이오마커와 결합된 나노입자의 고속 검출과 같은 바이오 분야에 적용될 수 있다.

그 외 다이아몬드 표면 가공을 거쳐 다양한 구조물을 만들 수 있다. 이렇게 제작된 구조물들은 표면적 향상, 형광 포집효율 향상, 나노 공진기 등에 널리 활용된다. 또 수십 나노미터 크기를 갖는 나노 다이아몬드 역시 나노 스케일 센서이며, 이는 생체 분자 또는 바이러스의 검출, 생체 또는 세포의 온도 및 PH 센싱 등 여러 바이오 분야에 활용되고 있다.

위에서 기술한 저주파 자기장뿐 아니라 무선주파수(Radio Frequency, RF), 마이크로웨이브(Microwave, MW) 같은 고주파 자기장 측정이 가능하다는 것도 양자 자기장센서의 장점이다.

OPM 센서의 경우 RF 자력계라고도 하는데, SERF 방식과 다르게 원하는 주파수에서 원자 스핀이 공명할 수 있도록 외부 자기장을 가해줘야 한다. 이는 대역폭이 좁다는 한계는 있으나 10~100fT 수준의 높은 감도를 갖는다. 고체 점결함 스핀의 경우, 스핀 조작을 위한 펄스열이 필요하고 1~100pT 수준 감도만이 가능하나, 넓은 대역폭으로 인해 시간에 따라 변화하는 RF 자기장의 실시간 측정이 가능하다는 장점이 있다. 한편 NV 스핀을 이용한 AC 및 RF 자기장 측정기술은 나노 스케일 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 구현에 사용되고 있다. 이 기술은 반도체 등의 표면·경계면 화학 분석에 활용 가능하며, 향후 나노미터 분해능을 추구하는 나노 MRI 분야까지 확장될 것으로 기대된다.

이와 같은 양자 자기장센서 기술은 현재 높은 기술 성숙 정도를 보이며 상용화 수준에 도달해 있다. 다수 핵심기술이 상용화에 성공했으며, 시스템 수준에서도 스타트업 규모 기업들이 시장에 완제품들을 선보이고 있다.

2. 구성요소

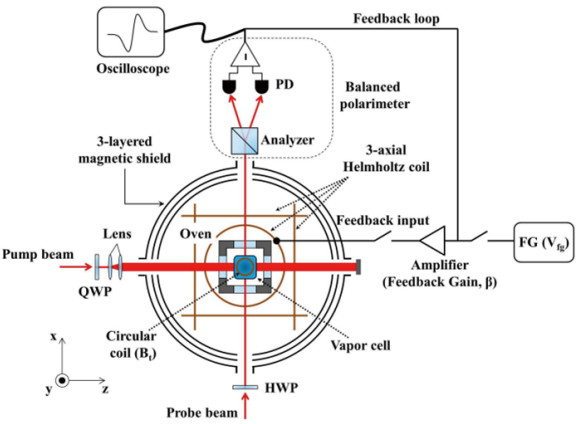
가. SERF OPM 센서 기술

SERF 방식 OPM 센서를 구현하기 위해서는 우선 고밀도 원자증기셀이 필요하다. 칼륨(K), 세슘(Cs), 루비듐(Rb) 등 알칼리 기체를 사용할 수 있는데, 칼륨의 감도가 가장 좋지만 180℃ 이상 고온이 필요하고, 세슘은 100℃에서도 동작이 가능하나 감도가 가장 낮은 단점이 있다. 따라서 루비듐 증기셀이 가장 많이 사용되고 있다.

연구용으로는 유리 세공(Glass Blowing) 방법으로 만든 파이렉스(Pyrex) 재질 셀이 사용되는데, 여기에 Rb 메탈과 20Torr 질소(N_2) 버퍼가스를 가둔다. 그리고 적외선(Infrared Ray, IR) 레이저 또는

전류로 Rb 메탈에 열을 가해주면, 고압의 Rb 증기가 셀 내부에 생성된다.[6] 광펌핑을 통한 Rb 스핀상태의 초기화를 위해서는 D1 전이($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$)에 해당하는 795nm 레이저가 필요한데, 보통 파장 가변이 가능하고 선폭이 1MHz 이하인 분포 귀환형(Distributed Feed-Back, DFB) 레이저가 사용된다.

그림 III-2-13 SERF-OPM 시스템 구성



원자증기셀 크기가 센티미터 수준으로 클 경우 높은 출력이 필요하기에 테이퍼드(Tapered, TA) 증폭기를 이용해 1W 수준으로 출력을 높인다. 이어 4분의 1 파장판(Quarter Wave Plate, QWP)을 사용해 원편광으로 만든 펌프 레이저를 Rb 증기셀로 인가하면, Rb 스핀이 바닥상태로 초기화된다. 그 후 선편광된 프로브 레이저 빔으로 Rb 원자 스핀이 자기장에서 회전한 각도를 측정하게 된다. 이때 프로브 레이저 빔의 출력은 펌프 레이저의 대략 10분의 1 수준이며, 초기화된 Rb 스핀과의 간섭을 피하기 위해 선폭 밖으로 디튠(Detune)된 주파수를 사용한다.

프로브 빔과 펌프의 파장 주파수는 파장 미터(Wavelength Meter)로 계속 모니터링해야 한다. 프로브 빔의 편광은 Rb 스핀이 외부 자기장에 의해 발생할 때 같이 회전하는데, 이 정도를 편광 빔 스플리터(Polarizing Beam Splitter, PBS)와 밸런스드 포토다이오드(Balanced Photodiode)로 정밀하게 측정할 수 있다.

또 SERF OPM 센서 구동을 위해서는 잔류 자기장이 1nT 이하여야 하는데, 지구 자기장을 포함한 외부 환경 자기장은 다층 뮤메탈 구조 챔버를 이용해 차폐하면 된다. 그럼에도 자기차폐 챔버 내부에 수십 nT 수준 잔류 자기장이 남을 수 있는데, 이 잔류 자기장은 원자증기셀 주변에 3축 코일을 설치하고 정밀 전원공급기를 이용해 상쇄해야 한다.

6) 상용제품에서는 대량 생산을 위해 MEMS 공정으로 제작된 셀이 사용되는 추세이다.

그리고 SERF 동작을 위해서는 원자증기셀 온도를 상온 이상으로 올려 주어야 하는데, 직류 전류를 이용한 방법은 원자셀에 자기장을 발생시켜 SERF 동작을 방해한다. 따라서 OPM 동작에 영향을 주지 않는 100kHz 수준 고주파 전류를 이용해 원자셀을 가열해야 한다. 이때 비자성·비금속 단열 소재를 사용해 가열한 증기셀 온도를 안정적으로 유지할 필요가 있다.

한편 OPM 센서의 가장 큰 단점은 주파수 대역폭이 협소하다는 것이다. 100Hz 수준에 불과해 빠른 변화를 보이는 외부 자기장이 있을 경우 위상왜곡이 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하는 방법이 네거티브 피드백(Negative FeedBack, NFB) 기술인데, NFB를 위해서는 OPM 최종 검출부 신호를 증폭해 반대 방향으로 원자증기셀에 다시 인가해 주는 외부 코일과 증폭기가 추가로 필요하다.

나. 다이아몬드 NV 센서 기술 – DC·저주파 자기장 센싱

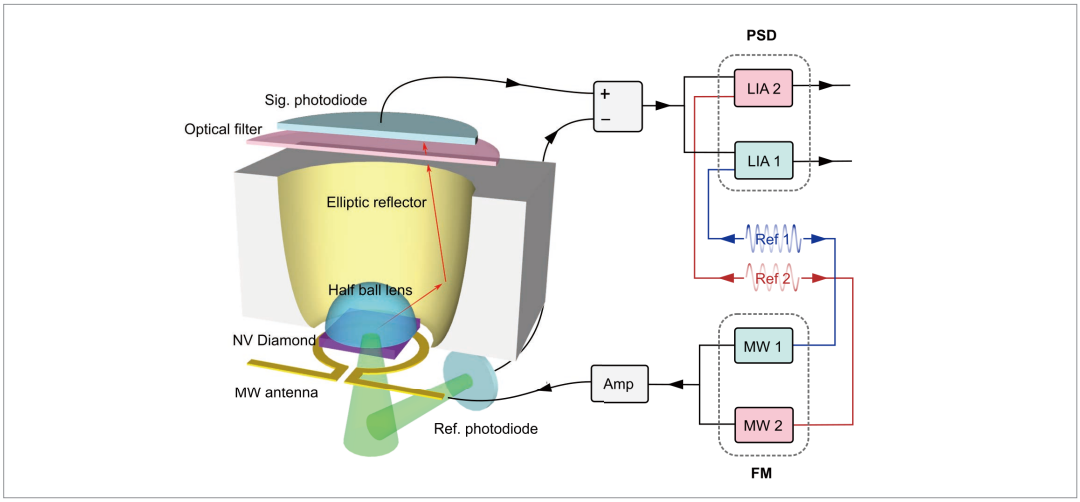
고감도 다이아몬드 NV 센서의 실현을 위해 수 ppm 수준의 NV 센터 농도를 가지는 단결정 다이아몬드가 사용된다. 따라서 10ppm 수준 질소가 함유되어 있는 다이아몬드(Type 1b)가 필요한데, 고압고온(High Pressure High Temperature, HPHT) 공정이나 화학기상성장법(Chemical Vapor Deposition, CVD)으로 만들 수 있다.

질소 농도가 높은 다이아몬드에 고에너지(1MeV) 전자를 주입하면 탄소 원자가 원래 위치에서 벗어나며 틈새가 벌어져 공극(Vacancy)이 만들어진다. 이를 800℃ 이상 고온으로 열처리하면 도핑된 질소와 빈자리가 만나 NV가 생성된다. 상용 다이아몬드 업체에서 HPHT로 성장시킨 Type 1b 다이아몬드는 비교적 쉽게 구매할 수 있으나, CVD로 만든 질소 다이아몬드는 소수 업체에서만[7] 구매가 가능하다. 그마저도 ^{13}C 핵스핀 농도까지 동위원소 방법으로 낮춘 NV 다이아몬드는 상용으로 판매되지 않고 있다.

통상적인 다이아몬드의 크기는 3mm×3mm×0.5mm이다. 샷(Shot) 노이즈 한계로 인해 감도는 부피 제곱근에 반비례하기에 측정 부피를 증가시키는 것이 이론적으로는 유리하다. 그러나 실제 다이아몬드의 불균일성, 펌프 레이저 출력의 한계 등으로 인해 보통 $0.1\times0.1\times 0.1mm^3 \simeq 10^6 \mu m^3$ 정도 부피만이 센싱에 사용된다.

7) ElementSix

그림 III-2-14 다이아몬드 NV 센서 구성



한편 NV 스핀상태의 초기화를 위해서는 532nm 파장의 레이저를 조사한다. 이 펌프 레이저 빔을 렌즈로 집속해 다이아몬드 표면에서 10~100μm 정도 지름이 되도록 한다. 이때 532nm 레이저의 출력은 0.1~1W 정도가 적절하다. 펌프 빔을 받은 NV 다이아몬드는 대략 700nm 파장영역의 붉은 빛을 형광으로 발산하게 된다. 또 자기장 측정 감도 향상을 위해서는 NV 형광의 효율적인 포집이 중요한데, 그 이유는 샷 노이즈 한계가 최종 포토다이오드 전류 세기의 제곱근에 반비례하기 때문이다. 효율적인 포집을 위해 보통 반사체(Reflector), 광도체(Light Pipe), 파라볼라 집신장치(Parabolic Concentrator) 등을 사용해 다이아몬드에서 발산되는 형광을 포토다이오드로 집속하는 방식을 취하곤 한다. 또 펌프 빔을 차단하기 위해 532nm를 제거할 수 있는 광학필터를 포토다이오드 전단부에 설치한다. 이렇게 하면 최종적으로 포토다이오드에서 1~10mA 수준의 광전류를 얻을 수 있다.

광전류의 샷 노이즈 외에도 여러 외부 노이즈원들이 존재한다. 가장 직접적인 영향을 주는 것은 펌프 레이저빔의 노이즈라 볼 수 있다. 펌프 레이저의 빔 세기 및 형광 세기는 선형적 관계에 있는데, 레이저 출력 노이즈가 다이아몬드 NV 센서 노이즈에 직접적인 영향을 주는 것이다.

이러한 레이저 노이즈의 제거를 위해 밸런스드 포토다이오드를 이용한 차동(Differential) 검출법이 사용된다. 신호 포토다이오드에는 형광 신호를, 기준 포토다이오드에는 형광과 같은 세기의 분리된 레이저 빔을 가한다. 이때 밸런스드 포토다이오드가 공통의 노이즈 성분을 제거하기에 공통으로 포함된 레이저 빔 노이즈가 제거되고, 이런 과정을 거쳐 대략 100배 정도의 감도 향상효과를 얻을 수 있다. 밸런스드 포토다이오드는 두 개 포토다이오드의 쌍으로 구성할 수 있고, 출력단에 전류증폭기(Trans-Impedance Amplifier, TIA)를 사용해 신호를 증폭할 수 있다.

위에서 살펴본 것처럼 NV 스핀의 공명 주파수는 외부 자기장에 따라 변한다. 이때 변화 상수는 전자스핀의 자기회전비율(Gyromagnetic Ratio) 'γ'로 결정된다. 물론 외부 자기장이 없는 상태에서도 NV 스핀은 영자기장 분리 상수에 해당하는 ~2.87 GHz에서 공명을 보인다.

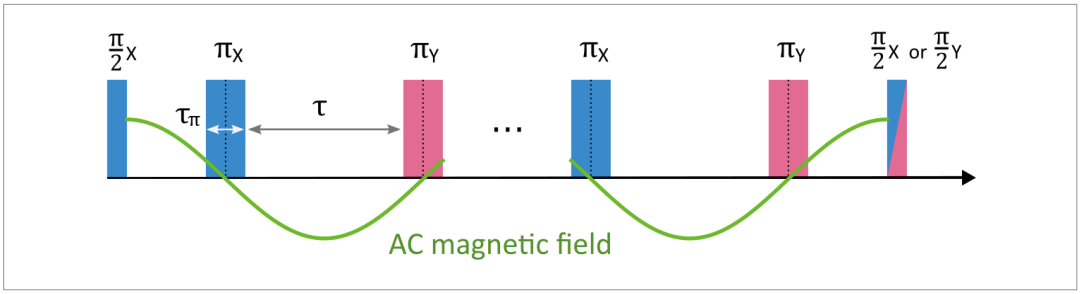
한편 NV 스핀의 전자 공명 스펙트럼은 마이크로웨이브와 형광을 이용해 측정할 수 있는데, 이를 광학 검출 자기공명(Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR) 스펙트럼이라 한다. ODMR 스펙트럼에서 피크 위치 변화를 정확하게 검출하기 위해 마이크로웨이브 주파수 변조 및 복조를 이용하는 락인(Lock-in) 또는 위상민감감지(Phase Sensitive Detection, PSD) 방법을 사용한다. 여기에는 주파수 변조(Frequency Modulation, FM) 기법이 사용되는데, 1~100KHz 대역 신호가 기준 주파수가 된다.

NV 스핀의 공명 주파수를 만들어내는 데에는 FM 기능을 지원하는 마이크로웨이브 생성기를 사용한다. 이 장치에 기준 주파수와 동일한 주파수 성분이 NV 스핀 형광에서 나타나면, 이를 락인앰프(Lock-in Amplifier, LIA)로 검출한다. 이때 LIA의 레퍼런스로 FM 기준 주파수 신호가 사용돼야 한다. 이처럼 주파수 변조과정을 거쳐 LIA로 얻게 되는 ODMR 스펙트럼은 미분 형태를 갖는다. 따라서 ODMR 피크는 LIA의 부호 변환점(Zero-Crossing) 위치에 해당되는데, 이 위치로 마이크로웨이브 주파수를 조정하면 LIA 출력신호가 외부 저주파 자기장의 변화에 준하는 출력신호를 얻을 수 있다. 이때 신호 크기는 부호 변환점 위치의 기울기에 비례한다.

다. 다이아몬드 NV 센서 기술 – AC·RF 자기장 센싱

10pT 수준 고감도와 100kHz 수준 대역폭으로 RF 자기장 측정이 가능하다는 점은 다이아몬드 NV 센서가 가지는 큰 장점이다. RF 자기장 측정을 위해서는 DC 자기장 측정에서 사용되는 연속파 형태 레이저와 마이크로파를 사용할 수 없다. 따라서 펌프 레이저를 펄스로 이용하고, 이 펄스가 인가되는 초기 0.5~1μs 사이 NV 스핀상태의 측정이 이뤄진다. 이후 NV 스핀상태의 초기화가 진행되는데, 펌프 레이저 펄스가 인가되지 않는 시간 동안 NV 스핀 공명 주파수의 마이크로파 펄스로 NV 스핀을 제어한다. 이 제어 펄스로는 동적 짝풀림(Dynamical Decoupling, DD) 펄스열이 사용되고, 스핀 방향을 완전히 뒤집는 180도 펄스 사이 간격이 측정하고자 하는 주파수(f_0) 주기의 절반이 되도록 한다. 이때 N개 180도 펄스가 사용될 경우, 이론적으로 $\frac{f_0}{2N}$의 대역폭이 가능하다.

그림 III-2-15 DD 펄스열을 이용한 AC 자기장 센싱 기술



시간에 따라 크기 또는 위상이 변하는 RF 자기장의 실시간 측정을 위해서는, 마이크로웨이브 펄스열과 레이저 펄스 조합을 연속으로 반복하는 방법을 사용할 수 있다. 또 핵자기 공명 분광법(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)을 활용해 검출하고자 하는 외부 자기장 시작 시점과 동기화시켜 평균값을 얻을 수 있는 경우, 'Coherently Averaged Synchronized Readout(CASR)'로 부르기도 한다.

한편 레이저 펄스를 만들기 위해서는 음향 광학 변조기(Acousto-Optic Modulator, AOM)를 사용해 레이저 세기를 변조한다. 수 W 수준의 고출력 레이저용으로는 쿼츠(Quartz) 재질 AOM을 사용하고, 10mW 수준 출력 레이저용으로는 텔루륨 디옥사이드(TeO_2) 재질 AOM을 사용할 수 있다.

또 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator, AWG)를 사용해 원하는 주파수와 위상, 그리고 크기를 갖는 마이크로웨이브(Micro Wave, MW) 펄스를 생성할 수 있다. 그러나 중저가 AWG의 경우, 1~2GHz 수준 샘플링 속도를 가지기에 NV 스핀의 공명 주파수를 직접 만들어 낼 수 없다.[8] 0.4GHz 주파수의 MW 펄스를 AWG로 생성해 MW mixer를 통해 2.4 GHz 신호와 합성해야, 원하는 2.8GHz를 얻을 수 있다. 이 과정에서 이미지 주파수 2.0GHz 성분은 MW 필터로 제거해야 한다. 10~100W 출력 증폭기를 거치면 5~10MHz 라비 주파수를 갖는 MW 펄스가 NV 스핀에 인가될 수 있다.

8) 예를 들어 2.8 GHz

3. 소재

가. Type 1b 단결정 다이아몬드

질소가 50~100ppm 정도 포함된 Type 1b 단결정 다이아몬드는, ppm 수준 NV 센터 농도를 갖는 다이아몬드 NV 센서를 만들기 위해 사용된다. 이러한 다이아몬드는 고압고온(High Pressure High Temperature, HPHT) 공정이나 화학기상성장법(Chemical Vapor Deposition, CVD)으로 만들 수 있다. 다이아몬드에 고에너지(1MeV) 전자를 주입하면 탄소 원자가 원래 위치에서 벗어나며 틈새가 벌어져 공극(Vacancy)이 만들어진다. 이를 800℃ 이상 고온으로 열처리하면 도핑된 질소와 빈자리가 만나 NV가 생성된다.

그림 III-2-16 Type 1b 단결정 다이아몬드

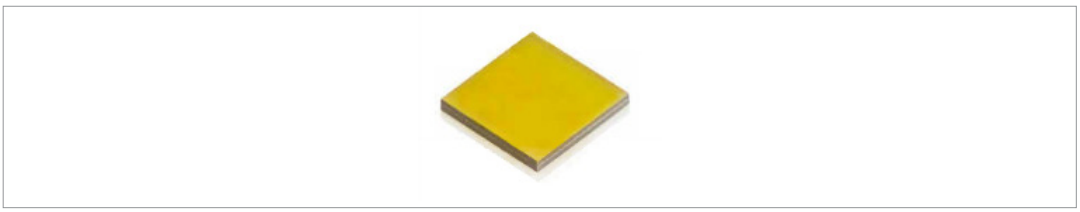


표 III-2-29 대표적인 소재(Type 1b 단결정 다이아몬드) 공급처

소재명	공급처
Type 1b 단결정 다이아몬드	ElementSix

나. 고순도 단결정 다이아몬드

다이아몬드 표면 아래 10~100nm 영역에 NV층을 갖는 다이아몬드 센서를 제작하기 위해, 전자품질 다이아몬드 단결정이 사용된다. 질소 농도 5ppb 이하, 보론 농도 1ppb 이하로 억제된 고순도 단결정 다이아몬드가 이에 해당한다.

해당 소재의 구현을 위해 10^{10}~ 10^{12} N/cm^2 밀도를 지닌 저에너지(10 ~ 100 keV) 이온을 주입해 질소를 도핑한다. 이온 주입과정에서 질소 주변에 틈새(Interstitial) 또는 빈자리가 함께 만들어지기에 전자빔 조사 없이 바로 고온 열처리를 하면, 표면 가까운 'Shallow'영역에 NV 센터가 있는 자기 현미경용 센서를 만들 수 있다.

그림 III-2-17 Electronic-grade 단결정 다이아몬드



표 III-2-30 대표적인 소재(고순도 단결정 다이아몬드) 공급처

소재명	공급처
고순도 단결정 다이아몬드	ElementSix

다. 양자 품질 NV 다이아몬드

양자 품질(Quantum-grade) NV 다이아몬드는 NV 센터가 일정 농도 이상 도핑돼 있으며 그 외 다른 불순물 농도는 극도로 억제된 고순도 다이아몬드를 가리킨다. DC·저주파 자기장센서뿐 아니라 양자발생기(Maser), 자이로스코프(Gyroscope) 등의 분야에 활용되고 있다. NV 센터 농도에 따라 아래 두 가지 제품을 선택할 수 있다.

그림 III-2-18 Electronic-grade 단결정 다이아몬드



표 III-2-31 대표적인 소재(양자 품질 NV 다이아몬드) 공급처

소재명	공급처
양자 품질 NV 다이아몬드	ElementSix

4. 부품

가. 원자증기셀

양자 자기장센서의 핵심 부품인 원자증기셀은 전통적인 유리 세공(Glass Blowing) 공정과 대량생산용 미세 전자기계 시스템(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS) 공정, 두 가지 방법으로 제조된다. 원자증기셀은 칼륨(K), 세슘(Cs), 루비듐(Rb) 등 알칼리 금속 증기와 버퍼가스(N_2, He)를 가두고 있다. 유리 세공 셀의 재질은 파이렉스(Pyrex), 실리카토 붕산염(Borosilicate), 알루미노 규산염(Aluminosilicate), 쿼츠(Quartz) 등이 사용된다.

MEMS 셀은 덮개 부분이 유리로 되어 있으며, 붕규산 유리(Borosilicate) 또는 알루미노 규산염(Aluminosilicate) 재질 유리가 사용된다. 소형화된 OPM 센서의 구현을 위해서는 3×3×3mm^3정도 부피의 셀이 필요하나, 연구 목적에는 더 큰 셀을 사용할 수 있다. 유리 수명과 스핀교환 이완이 없는(Spin-Exchange Relaxation Free, SERF) 효과의 유지를 위해 파라핀, 옥타데실트라이클로로실레인(Octadecyltrichlorosilane, OST), 산화 알루미늄(Al_2O_3)으로 유리 내부 표면을 코팅한다. 외부 표면은 레이저 반사효과 감소를 위해 저반사 코팅이 되어야 한다. MEMS 공정과정에서 셀 내부에 원자증기와 버퍼가스를 가두기 위해 아지드화 루비듐(RbN_3)과 같은 아지드 화합물이 사용된다. RbN_3의 경우 적외선 레이저로 가열하거나 자외선 레이저를 쬐면, Rb와 질소 가스로 분해되는 특성이 이용된다.

그림 III-2-19 MEMS 증기셀 제품

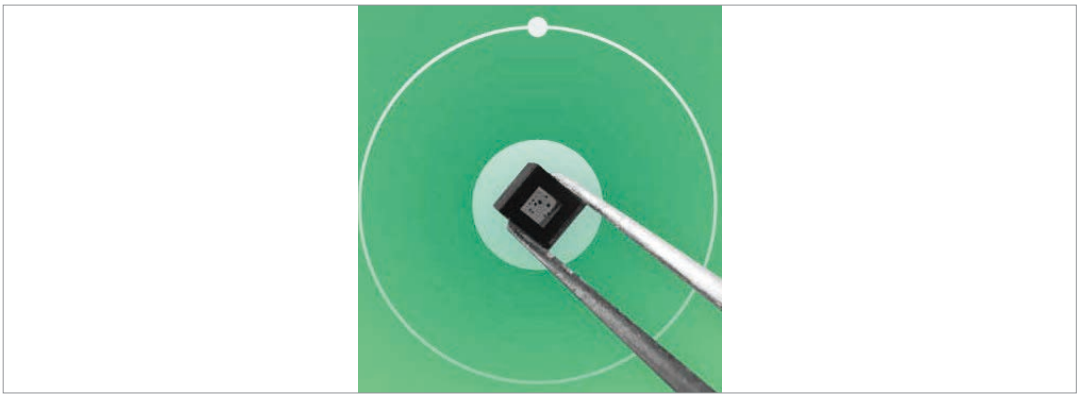


표 III-2-32 대표적인 부품(원자증기셀) 공급처

부품명	공급처
원자증기셀	Vapor Cell Technologies, Precision Glassblowing, Twinleaf

나. 자기차폐 챔버

SERF OPM 센서 구현을 위해서는 1nT 이하 자기장 환경이 조성돼야 하기에, 외부 자기장을 차단하는 자기차폐 챔버가 필요하다. 지구 자기장이 50μT 정도이므로 내부 자기장을 10nT 이하로 만들기 위해서는 10^6 이상의 차폐 효율이 요구된다.

따라서 자기차폐 챔버는 2~4겹의 뮤메탈 층으로 되어 있고, 효과적인 차폐를 위해 원통 형태로 제작된다. 또 1nT 이하 잔류 자기장을 위해 3축 코일을 사용해 상쇄시켜야 한다. 원통형 가운데 원자증기 셀을 위치시키고 외벽에서는 가공된 홀을 통해 펌프·프로브 레이저를 인가할 수 있다.

원통의 뚜껑 부분은 개폐가 가능한 형태인데, 완전히 열 경우 외부 자기장에 내부 뮤메탈 층이 노출되기 때문에 자화(Magnetization)를 막을 수 없다. 뮤메탈의 자화는 자기차폐 성능을 떨어뜨리고, 내부 잔류 자기장을 증가시킨다. 따라서 정기적인 탈자화(Degaussing)를 통해 자기차폐 챔버 성능을 안정적으로 유지해야 한다.

그림 III-2-20 자기차폐 챔버



표 III-2-33 대표적인 부품(자기차폐 챔버) 공급처

부품명	공급처
자기차폐 챔버	Twinleaf

다. 포토다이오드

가시광선 영역에서의 광신호 검출을 위해 실리콘 포토다이오드를 사용한다. 샷 노이즈 수준 감도를 얻기 위해서는 양자효율이 높고 암전류 세기와 등가 잡음 전력(Noise Equivalent Power, NEP) 값이 낮은 포토다이오드를 사용해야 한다. 이러한 포토다이오드는 보통 'QE=70~80 %, Responsivity=0.5A/W' 정도의 값을 가진다. 그러나 암전류와 NEP는 종류에 따라 많은 편차를 보인다. 하마마츠(Hamamatsu) 포토다이오드가 범용으로 많이 사용되며, 다양한 크기의 제품을 구매할 수 있다.

포토다이오드 면적이 넓으면 수광량은 많아지나, 암전류가 증가하고, 전기용량이 커져 반응이 느려진다. 따라서 연속파 및 펄스 방법에 따라 다른 포토다이오드를 사용해야 한다. 동일한 포토다이오드 두 개를 직열로 연결하되 첫 번째는 + bias 전압, 두 번째는 - bias 전압을 인가하면 밸런스드(Balanced) 포토다이오드를 구성할 수 있다.

표 III-2-34 대표적인 부품(포토다이오드) 공급처

부품명	공급처
포토다이오드	Hamamatsu, Thorlabs

라. 전류증폭기

포토다이오드에 저항을 연결하면, 생성된 광전류를 전압 신호로 변환할 수 있다. 따라서 저항값이 커질수록 이득(Gain)도 증가하나, 포토다이오드의 대역폭이 감소한다는 단점도 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 로드 저항 대신 전류증폭기(Trans-Impedance Amplifier, TIA)를 사용한다. 연산증폭기(Operational Amplifier, OP-Amp)를 사용하는 TIA는 이득 및 대역폭을 독립적으로 조절할 수 있어, 용도에 맞춰 설정할 수 있다.

표 III-2-35 대표적인 부품(전류증폭기) 공급처

부품명	공급처
전류증폭기	FEMTO

마. 음향 광학 변조기

음향 광학 변조기(Acousto-Optic Modulator, AOM)는 레이저 빔의 세기 변조를 위해 사용되는데, 일반적으로 고출력 레이저용 쿼츠(Quartz) 재질과 저출력 레이저용의 텔루륨 디옥사이드(TeO_2) 재질로 구분된다. 쿼츠 AOM은 수 W 출력 레이저에도 문제없이 사용할 수 있고, 음속(Sound Velocity)이 텔루륨 디옥사이드 재질의 두 배 정도로 헹굼 시간(Rinsing Time)이 짧다는 장점이 있다. 그러나 쿼츠 특성상 구동을 위해 110MHz 정도의 낮은 주파수 RF를, 수 W 정도 출력으로 인가해 주어야 한다. 따라서 브래그 각(Bragg Angle)이 작고 발열 문제가 생길 수 있다.

TeO_2 AOM은 상대적으로 낮은 0.5W 수준 RF로 구동 가능하며, 주파수도 200MHz까지 높일 수 있다. 따라서 브래그 각의 값이 커져 On/Off 상태 빔 세기 비율인 소광비(Extinction Ratio) 특성이 좋다는 장점이 있다.

표 III-2-36 대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
음향 광학 변조기	G&H

바. 특수렌즈

다이아몬드에서 발생된 NV 형광이 포토다이오드에 수광되는 효율을 높이기 위해 특수렌즈를 사용할 수 있다. 이를 통해 형광이 외부로 손실되는 것을 최대한 억제하고, 굴절률 차이를 줄여 다이아몬드 표면 전반사 조건을 최대한 완화할 수 있다.

대표적인 두 제품이 CPC형 집열기(Compound Parabolic Concentrator, CPC)와 반구 렌즈(Half-Ball Lens, HBL)이다.

그림 III-2-21 High index 반구 렌즈

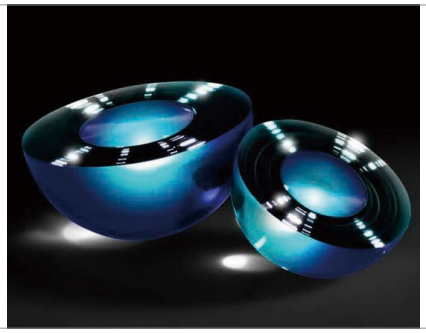


표 III-2-37 대표적인 부품(특수렌즈) 공급처

부품명	공급처
특수렌즈	Edmund

5. 장비

가. 다이오드 펌핑 고체 레이저

다이오드 펌핑 고체(Diode-Pumped Solid State, DPSS) 레이저는 널리 사용되는 레이저 형태로, 다이아몬드 NV 센서 용도로는 1064nm의 주파수 더블링 결과를 얻을 수 있는 532nm 파장이 보통 사용된다.

상온에서 동작하는 다이아몬드 NV 센서용으로는 대략 0.5% 이하 전력 안정도와 0.1% 수준 실효 출력(Root Mean Square, RMS) 노이즈를 보이는 제품을 사용한다. 최대 2~4W 정도 출력의 제품이 적당하다. 공랭식과 수랭식 타입이 있는데, 수랭식은 칠러를 보조로 사용해야 한다는 번거로움이 있으나 안정적인 레이저 출력을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

그림 III-2-22 DPSS 532 nm 레이저



표 III-2-38 대표적인 장비(DPSS 레이저) 공급처

장비명	공급처
DPSS 레이저	Novanta(LaserQuantum)

나. 분포 귀환형 레이저

분포 귀환형(Distributed Feedback, DFB)으로 구동되는 레이저는 단일 모드 구동이 가능하고 선폭이 100kHz 수준으로 우수하다. 또 파장 가변이 되는 특성을 지니며 칼륨(K), 루비듐(Rb), 세슘(Cs) 등 원자의 D1, D2 전이에 대응하는 다양한 파장대 제품이 있어 원자증기 연구에 많이 활용되고 있다. 그러나 출력이 100mW 수준으로 낮아 보통 테이퍼드(Tapered) 증폭기와 조합해 사용한다.

표 III-2-39 대표적인 장비(DFB 레이저) 공급처

장비명	공급처
DFB 레이저	TOPTICA Photonics

다. 마이크로파 생성기

마이크로파 생성기는 다이아몬드 NV 스핀의 공명 주파수(~2.87 GHz)에 해당하는 마이크로웨이브 주파수를 발생시키기 위해 사용한다. 1~4GHz 대역이 적당하나 100mT 이상 높은 자기장을 인가할 경우, 더 높거나 낮은 주파수가 필요하다. 마이크로파 생성기의 출력은 최대 10dBm(10mW) 정도면 충분하다. 부족한 출력은 외부 증폭기를 통해 보충할 수 있다.

DC·저주파 자기장 센싱을 위해서는 외부입력을 통한 주파수 변조(External Frequency Modulation) 기능이 필요하며, 외부 장치들과의 동기화를 위해 10MHz 기준 주파수를 사용할 수 있어야 한다. 해당 장비는 국내 기업의 산업화가 가능한 영역이다.

그림 III-2-23 Microwave 생성기



표 III-2-40 대표적인 장비(마이크로파 생성기) 공급처

장비명	공급처
마이크로파 생성기	Stanford Research Systems, Anapico

라. 임의파형 생성기

임의파형 생성기(Arbitrary Waveform Generator, AWG)는 원하는 주파수와 세기, 위상을 갖는 마이크로파 펄스를 생성하기 위해 사용한다. 중저가 AWG의 경우 1~2GHz 수준 샘플링 속도를 가지기에 NV 스핀의 공명 주파수를 직접 만들어 낼 수 없다. 따라서 0.4GHz 주파수의 마이크로파 펄스를 AWG로 생성한 후, 마이크로파 믹서를 통해 2.4GHz 신호와 합성해 원하는 2.8GHz를 얻는다.

높은 수직 해상도(Vertical Resolution)는 정교한 파형(Waveform) 생성에 영향을 주는데, 12~16bit 정도 스펙이면 충분하다. AWG의 메모리 크기는 한 번에 로딩할 수 있는 파형 길이를 결정하는데, NV 스핀의 T1 시간이 10ms 이하이기에, 최대 수 ms 정도 길이의 파형을 생성할 수 있는 메모리면 된다. 외부 클락을 통한 동기화가 가능해야 하기 때문에 외부입력을 위한 기준 주파수 10MHz를 사용할 수 있어야 한다.

표 III-2-41 대표적인 장비(임의파형 생성기) 공급처

장비명	공급처
임의파형 생성기	Tabor Electronics, SIGLENT

마. 락인엠프

락인엠프는 주파수 변조 또는 호모다인(Homodyne) 방식의 정밀 측정에 사용되는 장비이다. 전통적으로 'Stanford Research Systems' 제품이 많이 사용됐으나, 디지털 기술의 발전과 함께 최근에는 하이엔드 제품군이 등장하고 있다. 다이아몬드 NV 센서 동작 목적으로는 아날로그 및 디지털 방식이 모두 사용 가능하다. 100kHz 이하 기준 주파수를 사용할 수 있으면 충분하다. 락인엠프는 양자기술뿐 아니라 대부분 과학 분야의 전자 신호 측정에서 대량으로 사용되므로 국내 기업이 산업화하기에 좋은 영역이다. 아래에는 표시되지 않으나, 일본, 대만, 중국의 기업도 제품 제작 중이며, 유럽에서 스위스 기업인 취리히 인스트루먼트 등이 활발하게 산업화를 하고 있다.

표 III-2-42 대표적인 장비(락인앰프) 공급처

장비명	공급처
락인앰프	Stanford Research Systems

바. 다채널 TTL 신호 생성기

AC·RF 자기장 측정 시에는 레이저와 마이크로파를 펄스 형태로 구동해야 한다. 따라서 관련 장비 및 부품들의 동작 타이밍을 정교하게 조절할 수 있어야 한다. 이를 위해 다채널 TTL 신호 생성기가 필요하다.

TTL 펄스 생성기는 동작 클락 주파수가 시간 해상도(Time Resolution)를 결정하므로, 해당 주파수가 100MHz(10ns 분해능) 이상이어야 한다. 핵자기 공명 분광법(Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 및 전자 상자성 공명 분광법(Electron Paramagnetic Resonance, EPR) 커뮤니티에서 사용됐던 Spincore 사의 'PulseBlaster'가 실용적인 선택일 수 있다.

그림 III-2-24 High-speed Timing Generator

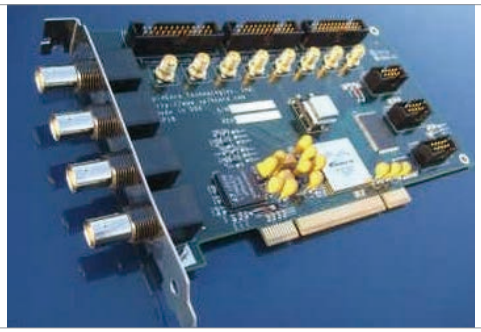


표 III-2-43 대표적인 장비(다채널 TTL 신호 생성기) 공급처

장비명	공급처
다채널 TTL 신호 생성기	Spincore

제6절 양자광학센서

1. 요점

광학센서는 피사체에 입사한 빛(광자)이 투과 또는 반사된 후 광량, 위상, 편광 등에 일어난 변화를 계측하는 센서이다. 사람이 눈으로 물체의 색깔을 관찰하거나, 그 경계를 구분하는 것, 그리고 카메라나 현미경을 이용해 물체의 형상을 기록하는 것 등은 모두 광학 계측이라 볼 수 있다. 물체에 대한 직접적 관측과 이미징뿐 아니라 광자를 이용해 간접적으로 계측하는 행위도 같은 범주에 들어가는데, 따라서 특정 파장을 흡수하는 가스에 통과된 빛을 관측함으로써 가스를 검출하는 센서 또한 광학센서에 포함된다.

이러한 광학센서 또는 이미징 기술은 빛을 이용하기 때문에 광자가 지니고 있는 고전적 한계 이상의 계측은 불가능하다. 이미징 시에 레일리 조건(Rayleigh Limit)으로 인해 파장 길이 약 1/2 이하의 분해능을 얻을 수 없고, 샷 노이즈 한계(Shot-Noise Limit)로 인해 1/√광자수 이하 감도를 얻는 것이 불가능한 것이다.

그러나 고전 광원이 아닌 양자 광원을 이용해 계측을 수행할 경우, 기존 한계를 넘어 고분해능·고감도 계측이 가능한데 이를 양자광학센서 또는 양자 이미징 기술이라 정의한다. 이는 고스트 이미징(Ghost Imaging)의 예에서 보듯, 피사체와의 상호작용 없이도 측정이 가능한, 새로운 패러다임의 계측 가능성을 연 기술이기도 하다.

이때 양자광원은 양자광학센서 기술 구현을 위한 핵심요소라 할 수 있는데, 그 생성 방식에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 그 첫째로 단일 방출체 방식은 광자 수 상태[9] 생성에 유리하며 단일광자에서부터 N 광자, 얽힘 상태 등의 생성이 가능하다. 둘째로 비선형 광자쌍 방식은 얽힘 상태,[10] 압축광 상태[11] 등의 생성과 양자 이미징 기술의 개발에 유리한 방식이다.

양자광학센서의 장점을 살펴보면, 우선 고전적 샷 노이즈 한계 이하로 잡음을 줄일 수 있어 낮은 광량이나 낮은 신호 수준에서도 기존 대비 높은 감도의 확보가 가능하다. 또 다수 얽힘 상태인 N00N 상태를 활용할 시에는 N배 향상된 분해능을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

9) 모드 안에 존재하는 광자 수를 나타내는 순수 양자상태로, N=1인 경우의 단일광자 상태

10) 편광, 진동수, 경로 등 물리량을 동시에 기술할 수 없는 상태로 광자쌍에서부터 N00N 상태 등 존재

11) 광자의 광자 수와 위상 정보 중 한쪽(예: 위상)의 정확도를 의도적으로 향상시키는 일이 가능

양자광학센서는 현미경, 이미징, 광학적 가스 검출기, 라이다 등에 응용될 수 있는데 이러한 기술력을 바탕으로 특히 의료·제조·국방 등 분야에서 폭넓게 활용될 것으로 기대되고 있다. 이 중 양자현미경, 양자라이다 등에 관한 기술은 아직 연구실험 단계를 지나고 있어 주요 기술의 상용화까지는 많은 과제가 남아있는 상황이다. 그러나 정밀 계측기술이 확보되고 그에 따라 산업의 성장이 본격화될 경우 진단 정밀도를 필요로 하는 의료 분야, 미세 공정을 요구하는 제 산업 분야, 국가 안위를 위해 스텔스 감지기능의 향상을 기대하고 있는 국방 분야, 그 외 안전 및 자율주행 분야 등에서 새로운 패러다임이 펼쳐질 것으로 예상되고 있다.

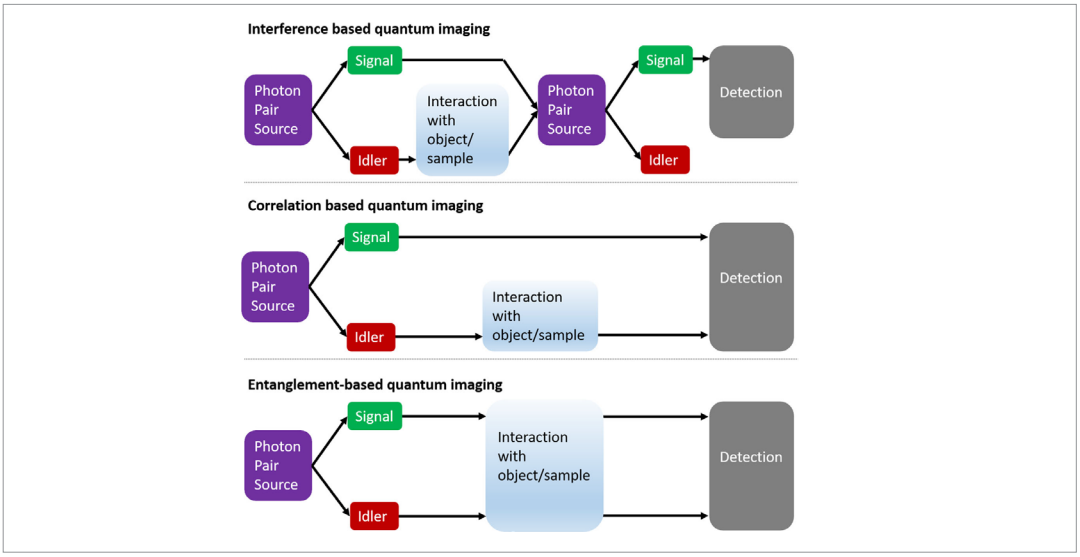
2. 구성요소

양자광학센서를 구성하는 요소 기술로는 양자광원, 광검출기, 그리고 이들을 이용해 양자 계측을 구현하는 프로토콜 등이 있다. 양자 이미징 기술은 광원의 양자 상태 및 계측 방식에 따라 다양한 방법론이 존재하는데, 이는 크게 세 가지로 구분된다.

구체적으로 양자 광자쌍의 간섭현상을 이용한 '간섭 기반 양자 이미징(Interference based Quantum Imaging)', 광자쌍의 상관관계를 이용한 '상관관계 기반 양자 이미징 (Correlation based Quantum Imaging)', 얽힘 특성을 이용한 '얽힘 기반 양자 이미징 (Entanglement based Quantum Imaging)'이 있는 것이다.

각각 방법은 모두 양자 광자쌍을 이용한 이미징 방법으로 서브-샷-노이즈(Sub-Shot-Noise) 이미징, 고스트 이미징, 양자 간섭 현미경 등의 구현이 가능하다. 또 양자광학센서의 구현에 이르기 위해서는 양자광원 생성이 매우 핵심적인 과정인데, 단일 방출체 방식에 비해 비선형 광자쌍 방식이 양자 이미징 구현이 용이해 상대적으로 더 많이 활용되고 있다.

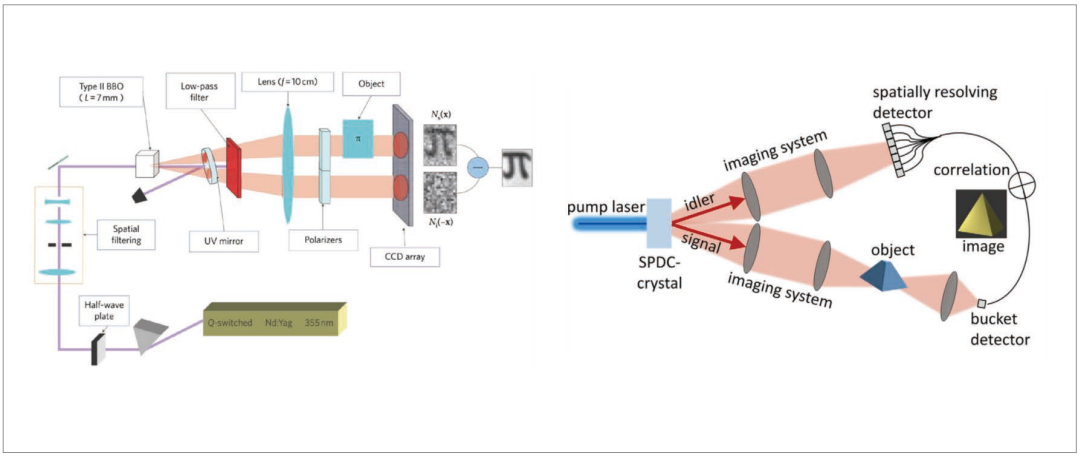
그림 III-2-25 양자광학 이미징 기술의 분류 및 구성요소



※ Marta Gilaberte Basset et al. (2019)

양자광원 중 하나인 광자쌍 광원은 광자 생성 시간, 에너지, 편광 또는 위치 등에 있어 상관관계를 갖는다. 이러한 특성을 이용해 하나의 광자는 피사체를 지난 후 측정하고, 나머지 한 개 광자는 노이즈 정보를 측정함으로써 서브-샷-노이즈 양자 이미징 구현이 가능하다. 또 피사체를 지나는 하나의 광자는 단일 검출기로 측정하고, 피사체를 지나지 않는 다른 광자는 어레이 검출기로 측정함으로써 고스트 이미징을 구현하는 것도 가능하다.

그림 III-2-26 (왼쪽) 서브-샷-노이즈 양자 이미징, (오른쪽) 양자 고스트 이미징 원리 모식도



※ G. Brida et al. (2010)

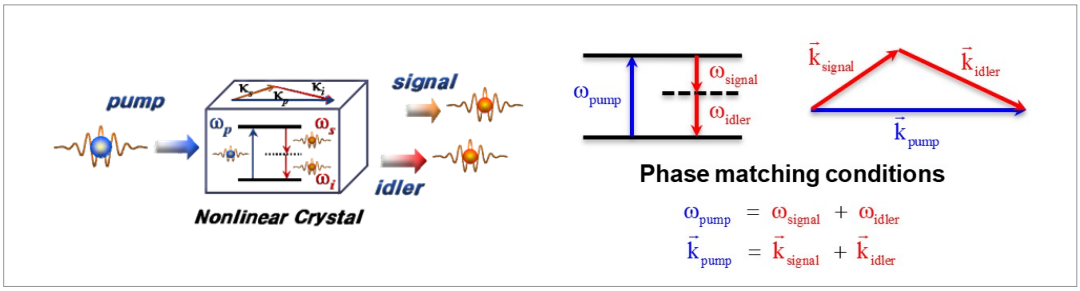
[그림 III-2-26]에서 보듯 양자광학센서의 핵심이라 할 수 있는 양자광원 소자(부품)는 크게 광자쌍 광원 생성기, 단일광자 생성기, 홀더와 온도 조절장치 등의 부가 부품들로 구성되어 있다. 이 중 광자쌍 광원 생성기를 위한 소재는 비선형 현상에 기반을 둔 '자발적 매개 하향변환(Spontanenous Parametric Down Conversion)' 현상을 이용해 제작되는데 이를 위해 벌크형 비선형 결정, 준위상정합용 비선형 결정 등이 필요하다. 또 단일광자 생성기는 단일 방출체 방식을 취하는데 이의 구현을 위한 대표적인 소재로는 반도체 양자점 소재를 꼽을 수 있다. 양자광학센서를 대표하는 기술로는 양자현미경, 양자라이다 기술 등을 꼽을 수 있는데 앞서 서술한 바와 같이 양자 이미징 기술을 활용한 감도 향상 특성을 갖추고 있다. 그러나 아직 실험·연구 단계에 머물러 있어 상용화된 장비가 출시되지는 않았다.

가. 비선형 기반 광자쌍 광원

비선형 광학 크리스탈은 레이저 빛과 상호작용해 파장을 변환시키는 용도로 널리 활용된다. 특히 양자광학 및 양자기술 분야에서는 양자역학적 특성을 갖는 단일광자와 얽힘광자를 생성하기 위해 활용되고 있다.

대표적인 실현 방법으로는 2차 비선형 특성을 이용한 자발적 매개 하향변환(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 방식이 꼽히고 있는데 이러한 과정을 거쳐 동시에 발생되는 두 개 광자인, 광자쌍(Photon Pair)을 생성할 수 있다. 이는 대표적 비선형 광학현상 중 하나인 2차 조화파 발생(Second Harmonic Generation, SHG) 과정에서의 시간 반전 과정에 해당한다.

그림 III-2-27 자발적 매개 하향변환 및 위상정합 조건



※ 김태수·김헌호 (2007)

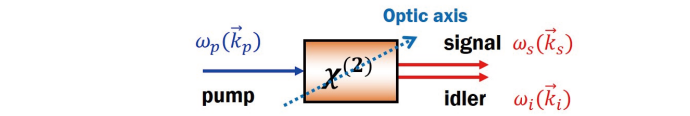
자발적 매개 하향변환 과정은 비선형 크리스탈에 입사되는 하나의 단일광자가 에너지가 낮은 한 쌍의 광자들로 자발적으로 변환되는 과정이다. 이 과정에서 크리스탈에 입사되는 레이저광(펌프광)과 생성되는 두 광자들 사이, 에너지 및 운동량 보존을 의미하는 위상정합 조건(Phase-Matching Condition)이

만족돼야 한다. 위상정합 조건은 크게 두 가지로 구분되는데, 크리스탈 내부 빛의 편광방향에 따라 굴절률이 달라지는 복굴절(Birefringence) 현상을 이용한 '복굴절 위상정합(Birefringence Phase Matching, BPM)' 방법과 크리스탈 분극방향을 주기적으로 반전시켜 변환 효율을 높이는 '준위상정합(Quasi Phase Matching)' 방법이 있다.

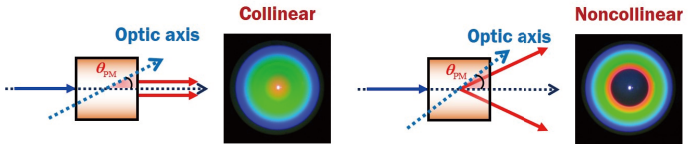
이 중 BPM은 크리스탈 광축과 크리스탈에 입사하는 펌프광 각도에 따른 굴절률 변화를 통해 위상정합 조건을 맞추는 방법이다. 또 준위상정합은 분극 반전이 반복되는 주기에 해당하는 길이와 파장, 그리고 온도에 따른 굴절률 변화를 통해 위상정합 조건을 맞추는 방법이다. 특히 준위상정합은 상호작용 길이를 향상시킬 수 있고 도파로(Waveguide) 형태 제작이 가능해, 복굴절 위상정합에 비해 높은 변환 효율을 보여주고 있다.

이러한 위상정합 조건은 비선형 크리스탈 파장에 따른 굴절률을 이용한 셀마이어(Sellmeier) 방정식을 통해 구할 수 있다. 그 형태는 펌프광 편광과 변환된 광 편광이 동일한 type-0, 펌프광 편광과 변환된 광 편광이 서로 수직인 type-I, 그리고 변환된 두 광의 편광이 서로 수직인 type-II로 구분된다. 이는 아래 그림에서와 같이 도식화될 수 있는데, 이 정리에서 'e'는 Extra-Ordinary Ray, 'o'는 Ordinary Ray를 나타내고, 아래 첨자는 각각 펌프(p), 시그널(s), 아이들러(i)를 나타낸다.

그림 III-2-28 비선형 크리스탈 종류에 따른 자발적 매개 하향변환의 구분

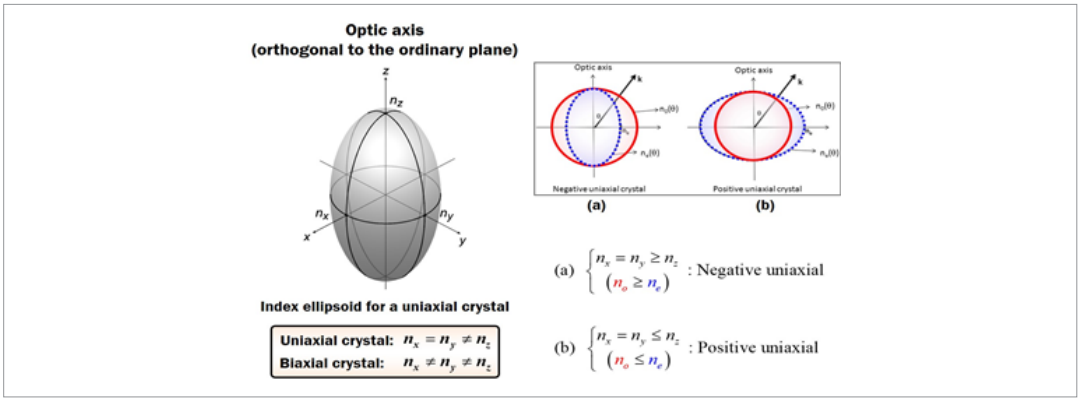


	Positive ($n_o \le n_e$)	Negative ($n_o \ge n_e$)
Type-0	$o_p \rightarrow o_s + o_i$	$e_p \rightarrow e_s + e_i$
Type-I	$o_p \rightarrow e_s + e_i$	$e_p \rightarrow o_s + o_i$
Type-II	$o_p \rightarrow o_s + e_i$	$e_p \rightarrow e_s + o_i$
Degenerate	$\omega_s = \omega_i = \omega_p/2$	
Nondegenerate	$\omega_s + \omega_i = \omega_p,\ \omega_s \neq \omega_i$	
Collinear	$\vec{k}_s = \vec{k}_i = \vec{k}_p$	
Noncollinear	$\vec{k}_{s,i} \neq \vec{k}_p$	



※ 집필진 작성

그림 III-2-29 비선형 크리스탈의 종류에 따른 굴절률 타원체(Index ellipsoid) 표현



※ P. K. Gupta & R. Khare (2015) 집필진 재구성

벌크형 크리스탈을 이용한 자발적 매개 하향변환을 위해 복굴절 위상정합은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{n_p(\phi)}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s}\cos\theta_s + \frac{n_i}{\lambda_i}\cos\theta_i, \; n_e(\phi,\lambda) = \left\{\left[\frac{\sin\phi}{n_e(\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{\cos\phi}{n_o(\lambda)}\right]^2\right\}^{-\frac{1}{2}}$$

여기서 n은 파장변환에 수반되는 펌프(p)·시그널(s)·아이들러(i) 광들의 굴절률을 나타낸다. 또 ϕ는 비선형 크리스탈에 입사하는 펌프광과 크리스탈 광축이 이루는 위상정합 각도를 나타낸다. θ는 크리스탈 내부 펌프광 진행방향에 대해 시그널 또는 아이들러 광 진행방향이 이루는 각도를 나타낸다. 준위상정합의 경우, 비선형 크리스탈의 분극 반전 주기(Λ_g)와 크리스탈 온도에 따른 굴절률을 고려해 위상정합 조건이 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{n_p(\lambda_p, T)}{\lambda_p} = \frac{n_s(\lambda_s, T)}{\lambda_s} + \frac{n_i(\lambda_i, T)}{\lambda_i} + \frac{1}{\Lambda_g}$$

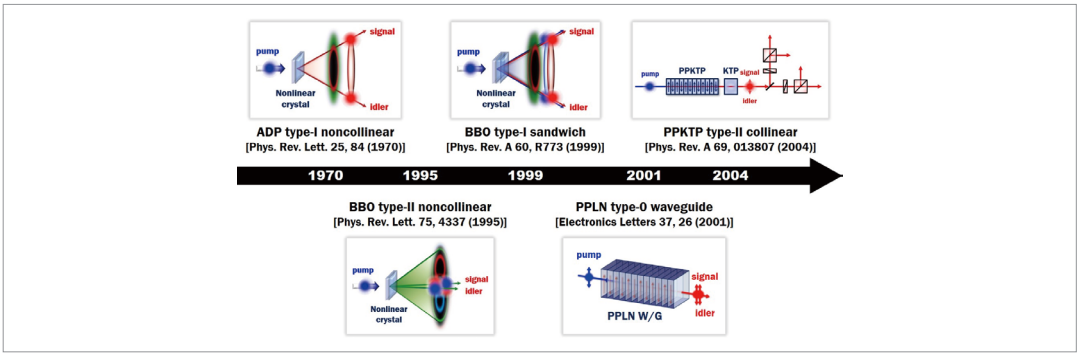
자발적 매개 하향변환 과정을 통해 생성된 광자들의 변환 효율은 비선형 크리스탈의 종류 및 위상정합의 형태에 따라 약 10^{-6} 에서 10^{-13} 정도에 이른다. 이렇게 생성된 광자들은 그 생성시간과 에너지, 편광, 운동량 등 다양한 물리적 특성이 고전적으로는 잘 설명되지 않는 강한 상관관계를 갖고 있다. 따라서 양자역학의 근본 특성들을 검증하는 광원으로 활용되고 있고, 양자역학 특성을 활용한 기술들에 핵심적인 광원으로 적용되고 있다.

비선형 크리스탈 기반의 광자쌍 광원 생성 방법을 시간순으로 구분하며, 최초의 SPDC기반 광자쌍 생성과 정량적인 특성 분석에 관한 실험 결과는 1970년 미국 NASA의 Electronics Research Center에서 발표하였다. 이 보고에서는 제1형의 복굴절 위상정합을 만족하는 APD(ammonium dihydrogen phosphate) 크리스탈에서 325nm → 633nm + 668nm의 광자쌍을 생성하였다.

비선형 기반 광자쌍 광원의 획기적인 보고는 1995년 오스트리아 인스브루크 대학과 미국 메릴랜드 발티모어 대학이 공동으로 발표한 제2형의 복굴절 위상정합을 만족하는 BBO(beta-barium borate) 크리스탈에서 351nm → 702nm + 702nm의 광자쌍을 생성한 것이다. 특히 이 실험에서는 편광-얽힘 상태를 생성하여 벨부등식 위배 실험을 진행한 것이 특이점으로, 그 이후 양자정보 기술의 다양한 실험에서 강력한 양자광원으로 활용되었다는 것도 주목할만한 특징이다. 비선형 크리스탈 기반의 기존 광원에 비해서 현저한 밝기를 갖는 편광-얽힘 광자쌍 광원은 1999년 미국 로스알라모스 연구소와 로랜스 버클리 연구소의 연구진이 발표한 제1형 BBO 결정 2개를 광축이 서로 직교하도록 회전시킨 후 샌드위치 구조로 결합한 것이다.

준위상정합을 이용하는 광자쌍 광원은 2001년 프랑스 니스 소피아 앙티폴리스 대학교와 스위스 제네바 대학교의 연구진이 공동으로 발표한 제0형의 준위상정합 PPLN(periodically poled lithium niobate) 도파로에서 657nm → 1314nm + 1314nm의 광자쌍을 생성한 것으로, 광섬유 기반 통신파장 대역의 효율적인 양자광원을 생성한 것이 특징이다. 제2형의 준위상정합을 이용한 광자쌍 광원은 2004년 미국 MIT의 연구진에 의해 발표된 것으로 PPKTP(periodically-poled potassium titanyl phosphate) 결정에서 397nm → 795nm + 795nm의 광자쌍을 생성한 것으로, 50%의 선택적 측정을 통해서 편광-얽힘 상태를 구현한 것이 특징이다.

그림 III-2-30 비선형 크리스탈 기반 광자쌍 광원 생성 방법의 구분



※ 물리학과 첨단기술, 5 (2010) 및 집필진 작성

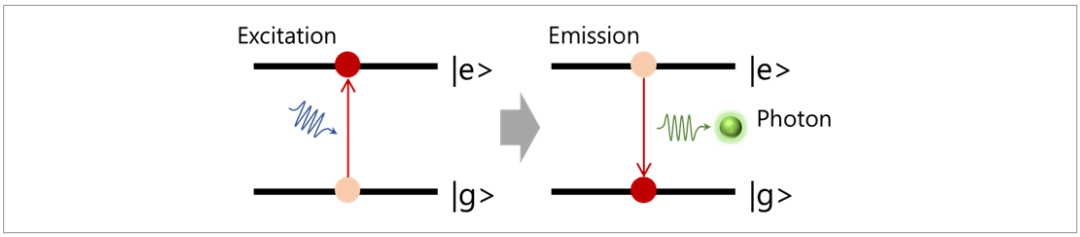
한편 자발적 매개 하향변환에 활용되는 비선형 크리스탈의 경우, 이미 30여 년 전부터 그 소재 및 부품이 세계 곳곳에서 제작 및 판매되고 있다. 그러나 좋은 성능과 안정성을 담보할 수 있는 소재 및 소자 공급업체는 그 수가 많지 않은 편이다. 다만 양자기술의 급격한 발전과 함께 다양한 형태의 광원 개발이 진행 중이며, 집적화된 광원 생성기술에 대한 연구도 현재 활발히 진행되고 있다.

나. 단일 방출체 기반 단일광자 광원

단일 방출체는 단일광자 생성확률 100%, 다수광자 생성확률 0%인 이상적이며 확정적인(Deterministic) 광원을 의미한다. 원자·이온 트랩(Atom·Ion Trap), 고체 기반 결함·색 중심(Defect·Color Center), 이차원 물질(2-Dimensional Material), 반도체 양자점(Quantum Dot, QD) 등이 있다. 단일 방출체 기반 광원은 비선형 기반 광자쌍 광원에 비해 양자광학 센서용 방법론에서 많이 다뤄지지 않고 있으나, 이상적인 단일광자 광원 생성에 유리한 장점을 가지고 있다.

대표적인 예로 반도체 양자점을 들 수 있는데, 이는 밴드갭 에너지가 서로 다른 물질로 이뤄진 3차원 고립 구조체를 의미한다. 에너지 측면에서 속박되어 있는 반도체 양자점은 불연속적 에너지 준위를 형성하는 특성으로 인해 '인공 원자'라고도 부르는데, 에너지 준위 이상으로 에너지를 여기하면 전자-정공 쌍인 엑시톤(Exciton)이 발생하게 된다. 이들이 재결합하며 광자 하나를 발생하는데, 이를 통해 단일광자를 생성할 수 있다.

그림 III-2-31 단일 방출체 광원 생성원리



※ 고영호 외 (2019)

이러한 반도체 양자점 광원은 물질과 크기에 의해 결정되는데 갈륨비소(GaAs), 인듐인(InP), 질화갈륨(GaN) 등 비교적 발광 효율이 높은 III-V족 화합물 반도체 기반 양자점이 대표적인 예이다.

반도체 양자점은 호스트 물질 위에 밴드갭 에너지가 더 작은 물질을 고온 성장시켜 생성한다. 서로 다른 격자 상수를 이용한 자발 형성 방법을 주로 활용하기에, 반도체 기판 위에 고르게 생기지 않고 무작위로 형성되는 경향이 있다. 이처럼 단일 방출체 위치를 특정하기 어려운데다 높은 굴절률을 갖는 반도체 물질 속에 광자가 갇혀 있기에, 벌크 기판을 그대로 활용하기는 어렵다. 광 추출 효율을 높이기 위한 광학구조나 광 공진기를 결합시킴으로써 활용성을 높여 사용해야 한다.

또 전자-정공 쌍을 의미하는 바이엑시톤(Biexciton)을 형성하고, 바이엑시톤-엑시톤 캐스케이드(Cascade) 과정을 거쳐 얽힘 광자쌍 생성이 가능하다. 반도체 특성상 다양한 구조 및 집적의 실현에[12] 유리해 현재 활발히 연구가 진행되고 있다.

3. 소재

가. 벌크형 비선형 결정

비선형 크리스탈은 입사하는 레이저광과의 상호작용을 통해 파장변환 소자로 활용될 수 있는 매개물질이다. 대표적인 실현방법으로 2차 조화파 발생(Second Harmonic Generation, SHG)과 자발적 매개 하향변환(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC)이 있다.

비선형 파장변환이 효율적으로 발생하기 위해서는 입사하는 레이저광과 파장 변환된 광 사이 에너지 보존법칙이 성립해야 하고, 동시에 주파수 벡터의 보존이 이뤄져야 한다. 벌크형 비선형 크리스탈은 크리스탈 내부에서 빛의 편광방향에 따라 굴절률이 달라지는 복굴절 (Birefringence) 현상을 이용 복굴절 위상정합(Birefringence Phase Matching, BPM) 방법을 통해 만들어진다.

주요 응용기술은 SHG를 포함한 고차 조화파 발생, 합주파수 발생(Sum-Frequency Generation, SFG), 차주파수 발생(Difference-Frequency Generation, DFG), 광 매개 증폭 (Optical Parametric Amplification, OPA), 광 매개 진동자(Optical Parametric Oscillator, OPO), 자발적 매개 하향변환(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 등이 있다. 양자센서 분야에서는 양자광원으로 사용되어, 상관된 광자 및 얽힘 광자를 생성하는데 필요한 비선형 매질로 활용된다.

표 III-2-44 대표적인 비선형 크리스탈 종류 및 복굴절 특성

약어	명칭	화학식	복굴절 특성
BBO	Beta-Barium Borate	β-BaB_2O_4	Negative uniaxial
LBO	Lithium Triborate	LiB_3O_5	Negative biaxial
LN	Lithium Niobate	$LiNbO_3$	Negative uniaxial
KTP	Potassium Titanyl Phosphate	$KTiOPO_4$	Positive biaxial
BiBO	Bismuth Triborate	BiB_3O_6	Negative biaxial
KDP	Potassium Dihydrogen Phosphate	KH_2PO_4	Negative uniaxial

※ 집필진 작성

12) 광섬유에 결합된 플러그앤플레이 형태 소자 등

SPDC 기술 구현에 활용되는 비선형 크리스탈은 여러 조건을 충족시켜야 한다. 대표적으로 위상정합 조건을 통해 파장변환이 가능한 파장범위, 레이저 광 및 파장 변화된 광의 투과 파장범위, 유효 비선형 계수, 레이저 광에 의한 손상 문턱 등이 요구되는 것이다. 이 중 파장변환 효율을 결정하는 유효 비선형 계수가 사양을 결정하는 가장 중요한 특성이며, 이는 파장변환에 수반되는 광의 파장 및 위상정합 형태에 의해 결정된다.

이 분야에선 비선형 결정을 성장시키는 제조업체와 표면 연마, 광축에 따른 커팅 및 코팅 등 여러 가공을 거쳐 부품을 공급하는 업체가 구분되어 있다. 크리스탈 성장부터 가공에 더해 판매까지 한 번에 진행하는 업체도 더러 있다. 한편 비선형 결정의 경우 소재, 부품, 장비가 명확히 구분되지 않으나 사용자 편의를 위해 제작된 크리스탈의 마운팅을 포함해 제공하는 경우도 있다. 제품의 성능지표는 그 종류에 따라 다르나 공급처에 따른 차이가 큰 편은 아니다. 그러나 다양한 공급처 중 'Raicol Crystals Ltd.'의 경우, 주기적 분극반전 포타슘 티타닐 포스페이트(Periodically-poled Potassium Titanyl Phosphate, PPKTP) 제품군으로 글로벌 수준에서 독보적인 기술력을 인정받고 있다.

표 III-2-45 대표적인 소재(벌크형 비선형 결정) 공급처

소재명	공급처
벌크형 비선형 결정	CASTECH, Newlight Photonics Inc., Raicol Crystals Ltd.

나. 준위상정합용 비선형 결정

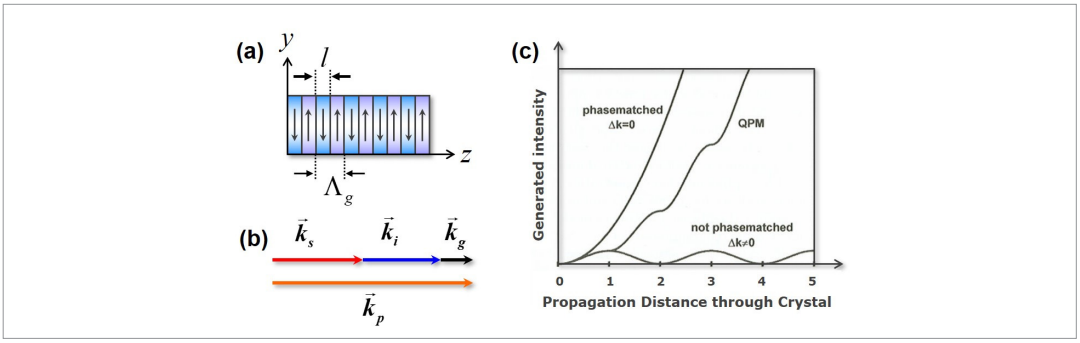
준위상정합은 비선형 매질의 도메인(비선형 계수의 부호가 동일한 영역)을 주기적으로 분극 반전 시킬 때, 구조에서 비선형 계수의 부호를 주기적으로 바꾸어 줌으로써 위상정합 조건을 효율적으로 만족시키는 방법이다.

이 방법은 비선형 매질이라면 광학적으로 투명한 모든 파장영역에서 이용 가능하다. 또 복굴절 위상정합을 이용하는 경우에 비해 상대적으로 높은 비선형 계수를 이용할 수 있다는 장점이 있다. 매질 길이를 더 길게 할 수 있다는 특성도 있어 파장변환 효율을 높일 수 있는 효과적인 방법이기도 하다.

강유전성 물질의 도메인을 주기적으로 반전시켜 배열하면 비선형 계수의 부호를 주기적으로 변화시킬 수 있고, 위상정합을 위해 z축을 따라 도메인 길이 l을 결맞음 길이로 삼으면 분극 반전된 도메인에서 비선형 계수의 부호가 바뀌어 π의 위상차가 발생하게 된다.

따라서 분극 반전된 구조의 매질 내에서 상호작용하는 광의 파장에 따라 격자주기(Grating Period) Λ_g 및 매질의 비선형 굴절률을 조절하면, 출력광이 효율적으로 생성되는 준위상정합을 얻을 수 있다. 준위상정합은 벌크 형태와 도파로 형태로 제작해 SHG 및 SPDC 기술 구현을 위한 높은 효율의 파장변환 소자로 활용하고 있다. 대표적인 비선형 물질로는 주기적 분극반전 포타슘 티타닐 포스페이트(Periodically-poled Potassium Titanyl Phosphate, PPKTP)와 주기적 분극반전 리튬니오베이트(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)가 있다.

그림 III-2-32 (a) 준위상정합을 위한 비선형 크리스탈의 분극반전 영역 및 격자주기
(b) 준위상정합 조건 (c) 위상정합 형태에 따라 파장변환된 광의 생성 효율



※ 김헌오 외 (2011) 집필진 재구성

SPDC 기술 구현에 활용되는 준위상정합 크리스탈 역시 위상정합 조건을 통해 파장변환이 가능한 파장범위, 레이저 광 및 파장 변화된 광의 투과 파장범위, 유효 비선형 계수, 레이저 광에 의한 손상 문턱 등이 요구된다.

제품 성능지표는 종류에 따라 다르나 공급처에 따른 의존성은 거의 없다. 그러나 Raicol Crystals의 PPKTP 제품군은 전세계적으로 독보적인 기술력을 인정받고 있고, HC Photonics의 PPLN 칩 제품군은 글로벌 무대에서 기술적 우위를 선점하고 있다. 또 Covesion의 경우 초기에는 Thorlabs 마켓을 통해 PPLN chip을 공급했으나, 현재는 자체 유통망을 통해 제품을 공급하고 있다.

표 III-2-46 대표적인 소재(준위상정합용 비선형 결정) 공급처

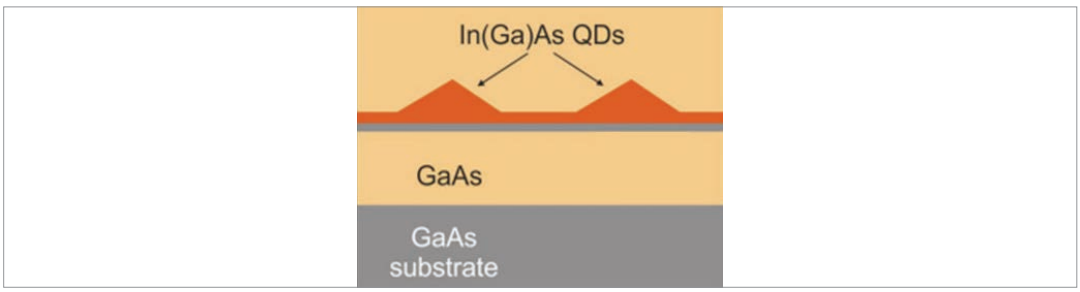
소재명	공급처
준위상정합용 비선형 결정	Raicol Crystals Ltd., HC Photonics Corp., Covesion Ltd.

다. 반도체 양자점 소재

반도체 양자점은 밴드갭 에너지가 서로 다른 물질로 이뤄진 3차원 고립 구조체이다. 밴드갭 에너지가 작은 물질이 엑시톤 보어 반경 이하 크기로 형성되고, 그 주변을 밴드갭 에너지가 큰 물질이 둘러싸고 있는 구조를 가리킨다.

일반적으로 갈륨비소(GaAs), 인듐인(InP) 등 화합물 반도체를 호스트 물질로 하고, 그 내부에 인듐비소(InAs)를 수십 나노미터 이하 크기로 형성시킨 구조가 많이 사용된다. 이는 구형, 반구형, 혹은 피라미드 형태를 띠게 된다. 양자광원으로 사용하기 위한 반도체 양자점 소재는, InAs 양자점이 GaAs나 InP 등의 에피층 내부에 포함되어 있는 에피 웨이퍼를 의미한다.

그림 III-2-33 반도체 양자점 단면 모식도



※ 집필진 작성

양자점이 포함된 에피 웨이퍼를 이용해 광원 소자를 제작하기 위해서는 에피 내부 두께를 성장시켜야 한다. 따라서 그 내부에서의 선택적 식각(Etching)을 위해 희생층을 포함시켜 제작하기도 한다. 이러한 양자점 에피는 광학구조로 제작해 소자화하는데, 보통 마이크로 필라(Micro Pillar), 나노 빔(Nano Beam), 광자 크리스탈(Photonic Crystal), 불스아이(Bullseye) 등의 광학구조 형태를 띤다. 광학구조로 제작된 반도체 양자점을 광학적 여기 과정을 거쳐 단일광자로 생성하게 되며, 밴드갭 에너지보다 큰 에너지의 레이저와 함께 사용한다. 이때 반도체 양자점 크기에 따라 양자광원의 생성파장이 결정되기에, 그 크기가 매우 중요하다. GaAs 기반 InAs 양자점의 경우 일반적으로 880nm에서 950nm 대역에 이르는 파장에서 특성이 좋고, 1300nm 파장까지도 확보가 가능하다. 또 1300nm 이상 파장의 단일광자 광원은 InP 기반 InAs 양자점에서 확보가 가능하다.

양자점의 밀도 역시 굉장히 중요한 사양이다. 밀도가 너무 높으면 단일 방출체를 얻을 수 없어 단일광자 광원 소자 제작 자체가 불가능하다. 또 밀도가 너무 낮으면 단일 방출체를 제작할 수 있는 빈도수가 적게 되기에, 이 역시도 현실적으로 제작이 가능하지 않다. 따라서 $10^{7}cm^{-2}$에서 $10^{9}cm^{-2}$ 사이 밀도

가 적절한 것으로 받아들여지고 있다. 다만 밀도가 높은 양자점 에피 소재의 경우, 단일광자 목적이 아닌 레이저 다이오드 소자의 제작 목적으로 활용될 수 있다.

단일광자 광원이 실제로 생성 가능한지를 나타내는 사양이 단광자 순도(Single Photon Purity) 또는 다광자 생성 확률(Multi Photon Probability) 특성인데, 0에 가까울수록 이상적인 단일광자 생성이 가능하고 1에 가까울수록 고전 광원의 특징을 보이게 된다. 이에 0.1 이하(10% 이하)의 특성은 필수적으로 확보해야 한다.

이처럼 반도체 양자점 소재 수준에서는 파장, 밀도, 순수도를 확인해야 한다. 또 소자 제작 후에는 방출된 단일광자의 최종 효율을 나타내는 밝기(Brightness), 단일광자의 동일함을 나타내는 구별 불가능성(Indistinguishability) 등의 특성을 확인해야 한다.

현재 기준으로 단일광자 광원용 반도체 양자점 소재나 소자를 상용화해 판매하는 업체는, 프랑스 Quandela와 덴마크 Sparrow quantum이 있다. 이 중 Quandela는 프랑스 'CNSR Laboratoire de Photonique et de Nanostructures'의 연구 결과를 바탕으로 시작된 기업으로, 현재는 양자점 에피 자체는 판매하지 않고 공정 후 광섬유가 결합된 소자 형태 제품을 판매하고 있다. 또 Sparrow quantum은 코펜하겐대학교에서 시작된 기업으로, 이 역시 단일광자 소자를 공급하는 대신 에피는 판매하지 않고 있다.

단일광자용 저밀도 반도체 양자점 에피의 경우 이처럼 상용제품 형태의 구입이 어려운 상황이다. 따라서 세계 곳곳에 산재해 있는 몇몇 연구그룹의 제작 및 공급에 의존할 수밖에 없는데, 영국 Toshiba Research Europe, 독일 Universität Würzburg, 오스트리아 Johannes Kepler University Linz, 일본 동경대, 중국 University of Science and Technology of China, 미국 메릴랜드 대학 등이 에피 기술을 보유하고 있는 대표적인 기관들이다.

국내로 눈을 돌리면 한국과학기술연구원(KIST), 한국전자통신연구원(ETRI)에서 양자점 성장이 가능한 상황이다. 이 중 한국과학기술연구원은 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 방식으로 학술적 연구가치가 높은 좋은 품질의 반도체 양자점을 제작하고 있고, 제작기술 수준을 세계적으로 인정받으며 해외 주요 양자점 반도체 제작 그룹과 어깨를 나란히 하고 있다. 해당 연구진은 액적 에피택시(Droplet Epitaxy)라는 차세대 저밀도 양자점 성장기술을 보유한 국내외 소수의 연그그룹이기도 하다.

한국전자통신연구원의 경우 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 방식을 취함으로써 소형화되고 비교적 가격이 저렴해, 산업적 활용가치가 높은 반도체 양자점을 제작할 수 있다.

4. 부품

가. 상용 비선형 기반 양자광원

상용 비선형 기반 양자광원의 경우 출력광원의 타입이 무엇보다 중요하다. 구체적으로 Type 0 SPDC 인지, 아니면 Type I 또는 Type II 인지를 꼭 확인해야 한다. 다음으로 레이저 파장을 확인해야 하는데 대부분 제품이 810nm 및 1550nm 파장에 분포되어 있다. 또 레이저가 포함되어 있지 않은 제품도 있어 확인이 필요하고, 반면 입력 레이저 세기는 대체로 명기되어 있어 해당 세기에 따른 광원 특성이 보장되는 경우가 많다.

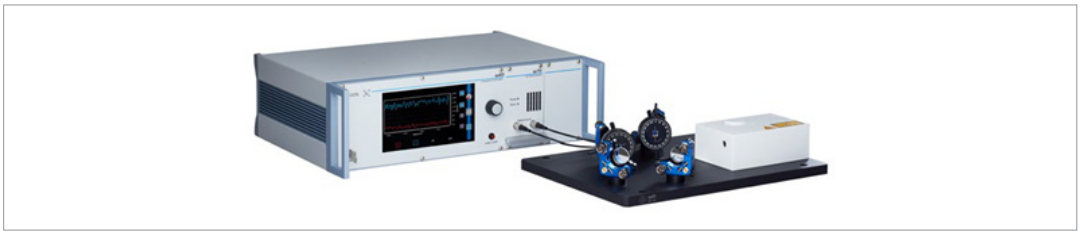
적절한 상용제품을 선택하기 위해서는 광원 효율을 나타내는 광자쌍 생성률 혹은 광자 세기(Photon Intensity)를 특정 레이저 입력파워 기준과 꼼꼼히 비교해야 하며, 결합효율을 통해 광자쌍이 효율적으로 방출되는지를 나타내는 'Heralding Ratio'도 체크해야 한다. 그 외에도 광원 순수도를 나타내는 '$g^{(2)}$', 상관관계 특성을 보여주는 'Coincidence to Accidental Ratio', 'Visibility' 등 양자적 특성을 나타내는 지표들을 필수적으로 확인해야 한다. 이때 입력광원 세기에 따라 이러한 지표들이 다르게 측정되므로 동일한 세기 조건에 두고 비교를 진행해야 한다.

최근 양자정보통신 분야에 전 세계적 관심이 집중되며 상관된 광자 및 얽힘상태 광자의 중요성이 강조되고 있다. 이에 부분적으로 얽힘상태를 보이는 광자쌍 발생장치의 상용화 제품들이 속속 등장하고 있는데, 그 중 비선형 기반 양자광원의 상용화가 가장 활발한 곳이 바로 유럽지역이다.

표 III-2-47 대표적인 부품(상용 비선형 기반 양자광원) 공급처

부품명	공급처
상용 비선형 기반 양자광원	QuTools, QuantumCTek, IDQ, AUREA Technology, Thorlabs, OZ Optics, Qubitekk, S-fifteen instruments

그림 III-2-34 독일 QuTools의 Entanglement Demonstrator



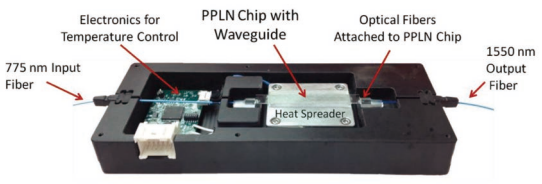
※ QuTools

그림 III-2-35 중국 QuantumCTek의 편광 얽힘 광자쌍 발생기



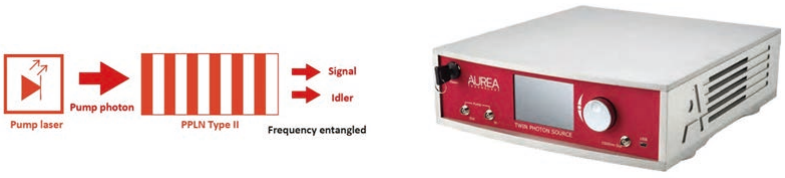
※ QuantumCTek

그림 III-2-36 스위스 IDQ의 id350 PPNL 광자쌍 광원



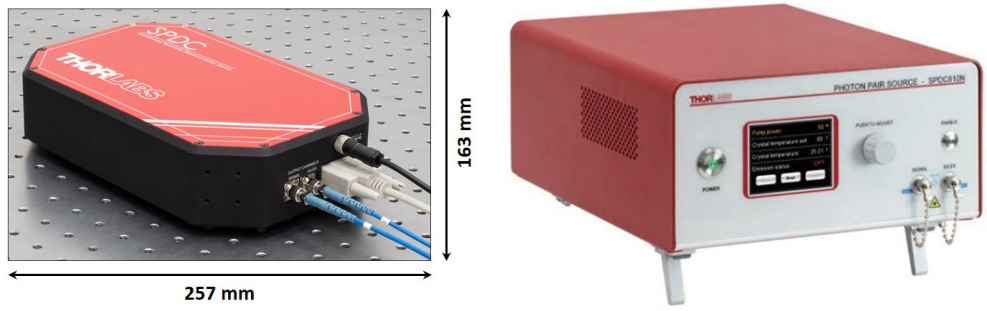
※ IDQ

그림 III-2-37 프랑스 AUREA의 얽힘 광자 광원



※ AUREA

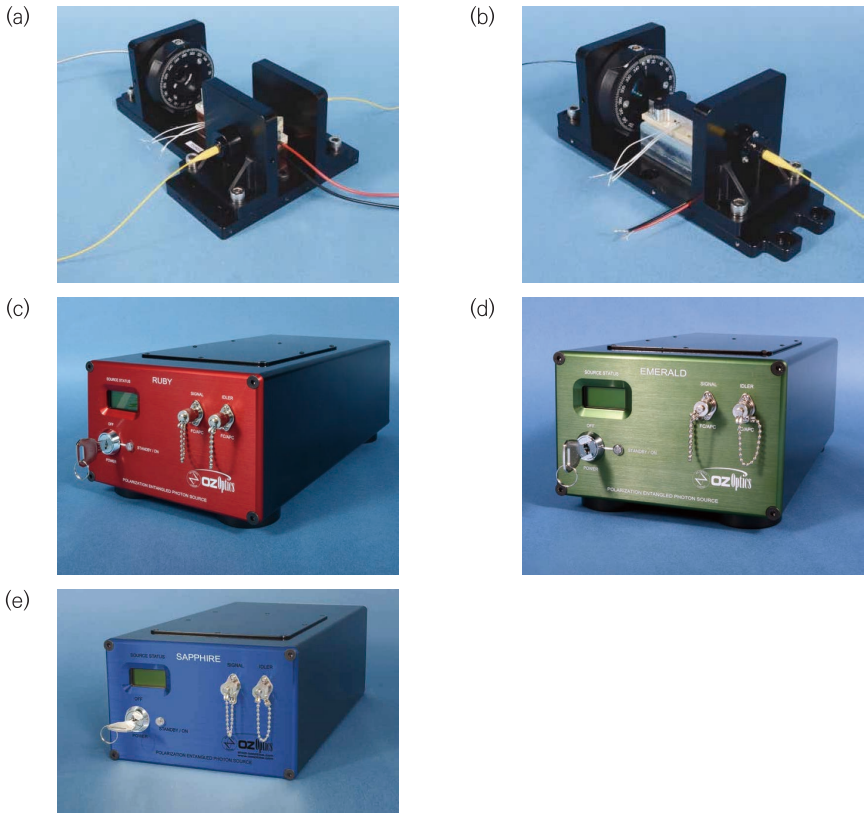
그림 III-2-38 글로벌 마켓 Thorlabs에서 판매되고 있는 광자쌍 광원



* (왼쪽) SPDC810, (오른쪽) SPDC810N

※ ThorLabs

그림 III-2-39 OZ Optics에서 판매되고 있는 다양한 양자광원



* (a), (b) 편광 얽힘 광자 광원(Gershwin, Guaraldi)
(c), (d) 벤치탑 형태 편광 얽힘 광자 광원(Ruby, Emerald)
(e)는 벤치탑 형태 결맞은 광자쌍 광원(Sapphire)

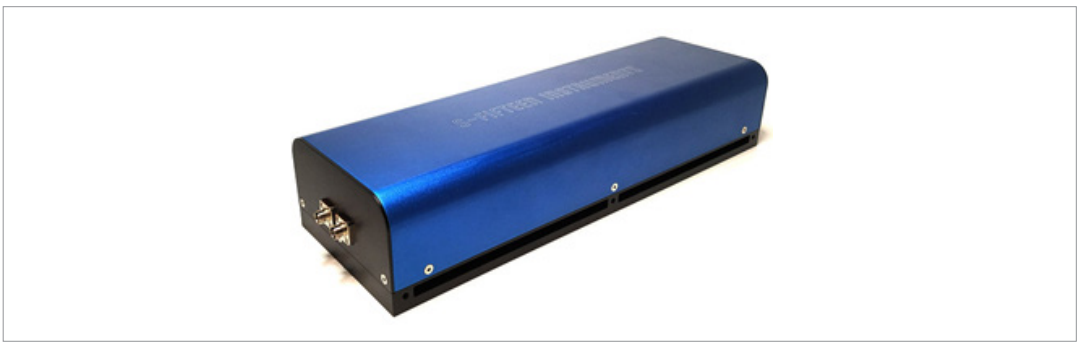
※ OZ Optics

그림 III-2-40 미국 Qubitekk의 얽힘광자 광원 모듈 QBTK001



※ Qubitekk

그림 III-2-41 싱가포르 S-fifteen Instruments의 얽힘광자 광원 모듈 EPPS-O



※ S-fifteen instruments

나. 상용 단일광자 광원

단일광자 광원 소자는 원하는 타이밍에 다수광자가 아닌 단일광자를 방출하는, 모듈 형태의 부품을 의미한다. 단일 방출체인 반도체 양자점 소재를 이용해 마이크로 필러나 광도파로 구조 등 광학구조 형태로 제작한 후, 광섬유와 결합해 최종적으로 광섬유 끝단에서 단일광자를 생성하는 것이다.

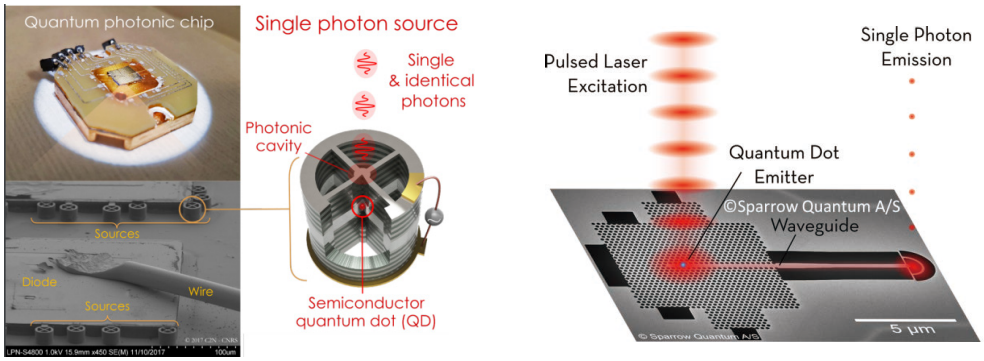
아직 기술이 안정단계에 진입하지 못해 소재 공급처가 많지는 않다. 세계를 통틀어 상용화된 부품을 생산하는 업체가 프랑스 Quandela, 덴마크 Sparrow quantum, 단 두 곳에 불과하고 그마저도 엄청난 고가로 판매되고 있는 실정이다. 반도체 양자점 특성상 10K 이하로 냉각해야 하기에 별도 냉동기를 필요로 하며, 위에 언급된 업체들에서는 자체 냉동기나 타사 냉동기를 포함해 제품을 판매하고 있다.

이처럼 반도체 양자점 기반 단일광자 광원 소자는 저온 냉동기가 필요하고 그 밖에도 동작을 위해 광여기용 레이저, 출력단 필터 등이 요구된다. 따라서 부품의 포함범위를 필수적으로 체크해야 한다. 확인해야 할 또 다른 사양으로는 순수도를 꼽을 수 있는데, 해당 사양이 단일광자 광원의 파장을 비롯한 양자적 특성을 나타내기 때문이다. 순수도는 0일수록 이상적인 단일광자 광원을 의미하며, 상용제품이라면 0.1 이하(10%)는 기본이라 할 수 있다. 또 광원 소자의 효율은 곧 최종 출력단에서의 밝기를 의미하기에, 밝기 및 생성률 확인도 중요한 사항이다. 끝으로 단일광자를 이용해 양자간섭을 하거나 다수광자 확장 등을 수행하기 위해서는 비구별성 특성이 중요한 기준이 되므로 이에 대해서도 꼭 확인해야 한다. 특히 이러한 특성들은 측정환경에 따라 영향을 받을 수 있기 때문에, 이를 고려한 세밀한 확인절차가 필요하다.

표 III-2-48 대표적인 부품(상용 단일광자 광원) 공급처

부품명	공급처
상용 단일광자 광원	Quandela, Sparrow Quantum

그림 III-2-42 (왼쪽) Quandela, (오른쪽) Sparrow Quantum의 단일광자 광원



※ optoecomponents.com, qd-uki.co.uk

그림 III-2-43 Quandela Stand-alone 단일광자 광원 시스템 Prometheus



다. 비선형 결정 광원용 부가 부품

비선형 크리스탈을 이용한 자발적 매개 하향변환 과정을 거쳐 양자광원을 생성할 때, 필요한 추가적인 부품으로는 마운팅 홀더, 크리스탈 온도 조절 및 유지에 필요한 오븐 온도 조절 장치 등이 있다. 이러한 부품들은 환경에 맞게 자체적으로 구비할 수도 있고, 크리스탈 공급업체에서 맞춤 제작으로 공급받을 수도 있다.

이 중 비선형 크리스탈의 마운팅 홀더는 그 크기 및 형태에 따라 다양한 사양을 선택할 수 있다. 그러나 대부분 1인치 원형 광학 마운팅 부품과 호환되는 형태로 제작돼 공급되고 있다. 또 오븐 및 온도 조절 장치의 경우에는 크리스탈 온도를 실온으로부터 200℃ 까지, 0.1℃ 정도 범위에서 안정적으로 조절할 수 있도록 해준다.

표 III-2-49 대표적인 부품(비선형 결정 광원용 부가 부품) 공급처

부품명	공급처
비선형 결정 광원용 부가 부품	Raicol Crystals Ltd., HC Photonics Corp., Covesion Ltd.

5. 기타

가. 양자현미경 기술

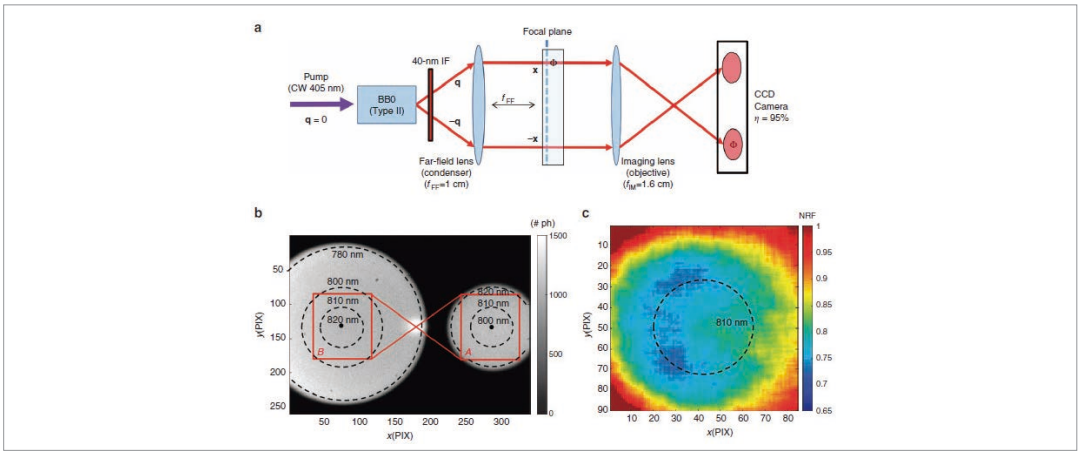
양자 이미징 기술은 양자광원 등을 이용해 양자이득을 얻는 이미징 기술이다. 또 양자현미경은 관찰하고자 하는 작은 영역을 자세하게 관찰하는 목적의 이미징을 말하는데, 측정 영역과 상관없이 포괄적인 의미에서 양자 이미징 개념에 포함된다.

이는 측정방식에 따라 간섭 기반 양자 이미징, 상관관계 기반 양자 이미징, 얽힘 기반 양자 이미징으로 분류할 수 있다. 또 측정을 통한 이득 특성에 따라서는 서브-레일리 이미징, 서브-샷-노이즈 이미징, 고스트 이미징으로 분류할 수 있다. 이러한 양자현미경은 아직 연구단계에 머물러 있으며, 상용제품은 존재하지 않는 상황이다.

한편 양자현미경을 활용해 기존 현미경 이미징 대비 분해능을 높이기 위해서는 서브-레일리 이미징을 적용할 수 있고, 신호대잡음비 감도의 향상을 위해서는 서브-샷-노이즈 이미징 기술을 사용할 수 있다.

이 중 고전적 광학의 분해능 한계를 뛰어 넘을 수 있는 서브-레일리 이미징은 N00N 상태와 같은 다수 얽힘 양자광원을 필요로 하는데, 기술적으로 광원을 생성하고 측정하는데 어려움이 있어 연구가 더 필요한 상황이다. 반면 서브-샷-노이즈 이미징 기술은 감도 한계 이상의 측정 위주로 검증이 많이 되어 있어, 실현 가능성이 높은 상황이다. 실제로 이탈리아 INRIM(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) 연구소는 비선형 결정 기반 양자광원을 이용한, 광시야 기반 양자현미경 기술을 보유하고 있다. 이처럼 비선형 기반 양자광원을 이용해 상관관계 기반 양자현미경을 구현함으로써 샷 노이즈 한계 이하로 30% 감도 향상이 가능한 수준을 보이고 있다.

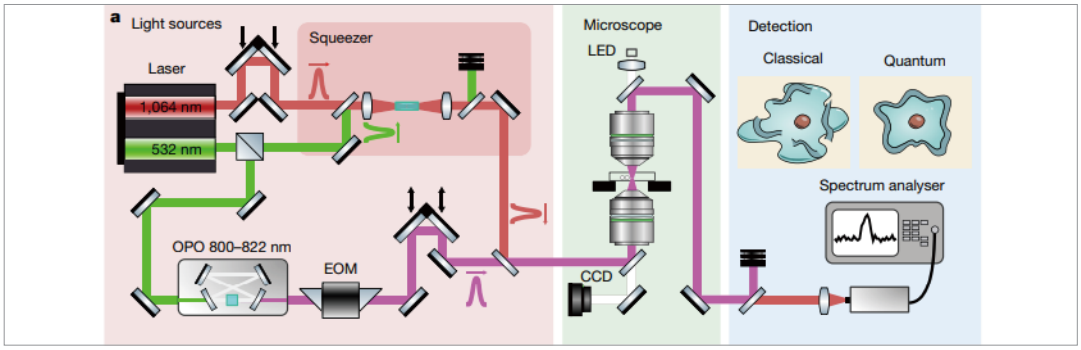
그림 III-2-44 양자 광자쌍 이용한 광시야 기반 서브-샷-노이즈 양자현미경 기술



※ Nigam Samantaray et al. (2017)

초분해능 현미경의 경우 측정하고자 하는 시편에 조사되는 광량이 태양 에너지 밀도의 1억 배 이상에 달해 생물학적 조직이나 세포 측정 시에 손상이나 변형 가능성이 존재한다. 따라서 낮은 광량에서도 현미경 감도를 확보하는 일이 중요한데 호주 퀸즈랜드대학 연구 그룹에서 양자광원을 이용해 콘포컬 이미징 방식의 양자현미경을 구현했다. 이 경우 양자현미경을 통해 35% 신호대잡음비 향상이 가능해 세포에 대한 광량 노출을 최소화시킬 수 있다.

그림 III-2-45 압축광 이용한 콘포컬 기반 서브-샷-노이즈 양자현미경 기술

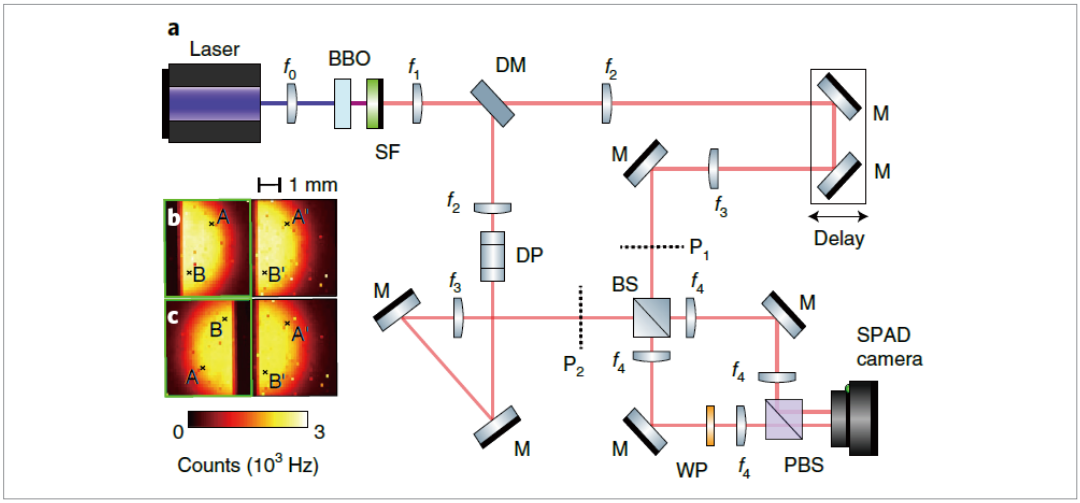


※ Catxere A. Casacio et al. (2021)

스코틀랜드 글래스고대학 연구팀에서도 양자광원을 이용한 양자현미경을 구현했다. 홍-우-만델(Hong-Ou-Mandel, HOM) 간섭계를 이용해 깊이 방향 이미징을 낮은 광량에서도 가능하게 하는 양자현미경을 구현한 것이다. 미국 캘리포니아 공대(Caltech) 이미징 연구 그룹에서는 얽힘광자쌍 광원을 이용하여 양자 현미경을 구현하였는데, 신호대 잡음비 향상 뿐만 아니라 분해능을 2배 향상시킨 결과를 보였으며, 특히 생체 세포에서 이미징 향상을 구현하였다. 이와 같은 양자 현미경 시스템 구현을 위해서는 광자쌍 heralding 효율과 함께 생성효율이 높은 양자 광원 소자를 필요로 한다.

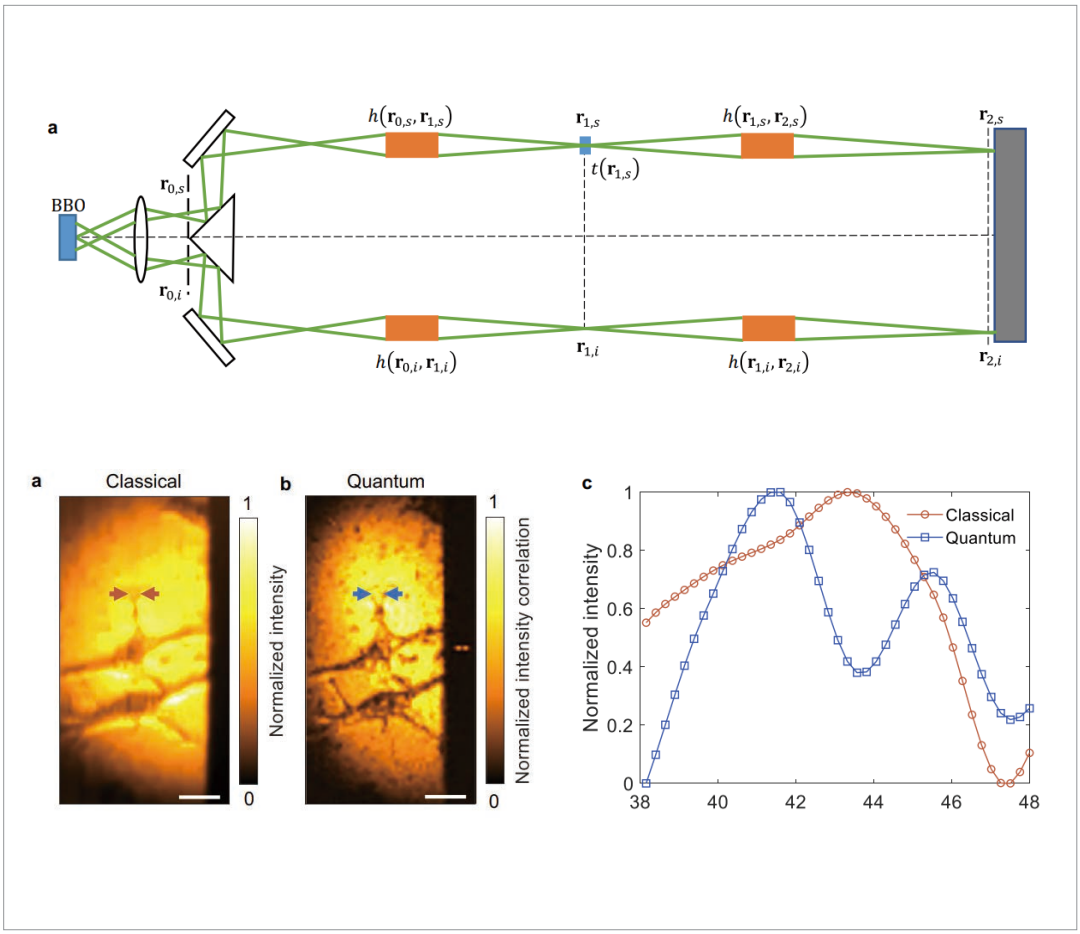
독일 프라운호퍼 연구소에서는 미광자 측정이 가능한 양자 이미징 시스템을 고속(vedio-rate) 이미징 구동이 가능한 시스템으로 개발하였으며, 이밖에도 고스트 이미징 기술, 서로 다른 파장의 광자쌍 상관관계를 이용해 중적외선 대역에서 높은 효율을 실현한 양자 이미징 기술 등이 알려져 있다. 그러나 현 단계의 양자현미경 기술 수준은 실험실 안에서만 가능한 정도이기에 아직 갈 길이 먼 상황이다. 상용제품 단계로 나아가기 위해 양자광원 및 양자현미경의 소형 모듈화 기술 개발과 발전이 필요하고 안정성, 성능 대비 저가화 등의 중요 이슈도 여전히 남아있다.

그림 III-2-46 HOM 간섭 이용한 신호대잡음비 향상 양자현미경



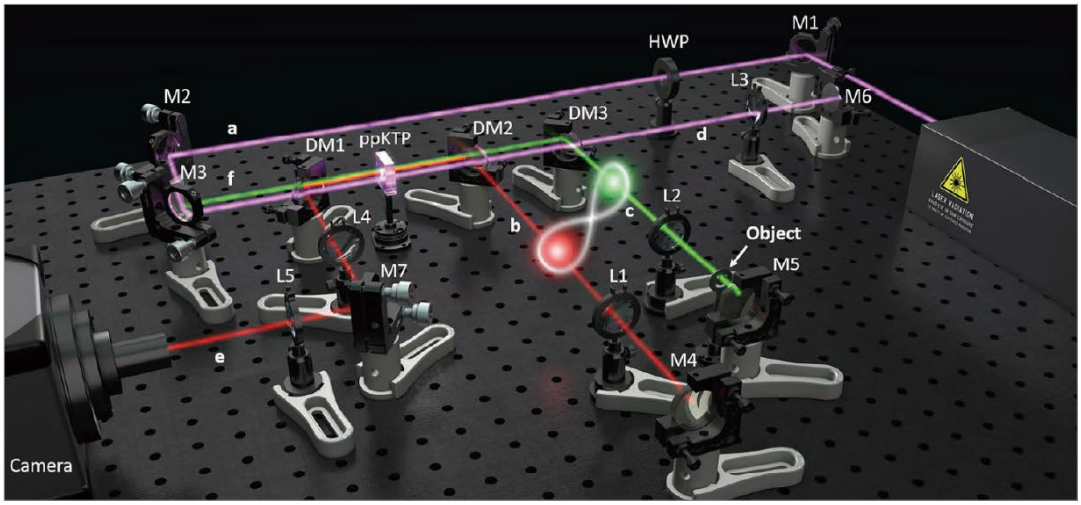
※ Nature Photonics 16, 384 (2022)

그림 III-2-47 생체 시료 이미징 신호대잡음비 및 분해능 향상 양자현미경



※ Nature Communications 14, 2441 (2023)

그림 III-2-48 고속(video-rate) 미관측 광자 양자 이미징 시스템



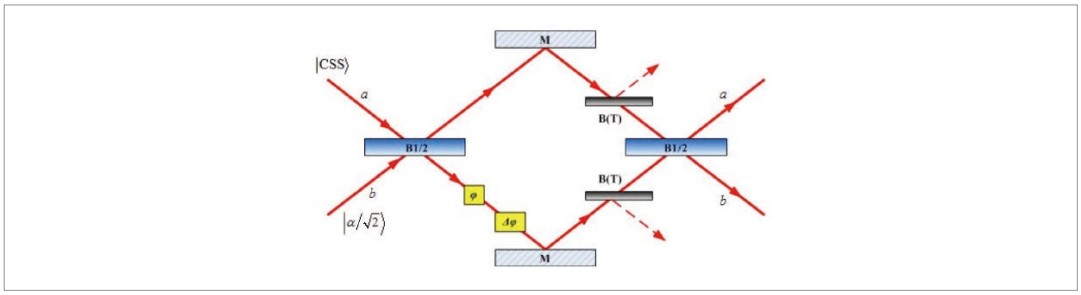
※ Lasers & Photonics Reviews 15, 2000327 (2021)

나. 양자 라이다 기술

기존 라이다(Light Detection and Ranging, LiDAR) 기술은 레이저 등 고전 광원을 이용해 주변 사물의 형태나 거리 등을 이미징하는 기술이다. 양자 이미징 기술을 적용한 양자 라이다 기술을 통해 높은 수준의 감도 향상을 기대할 수 있다. 또 양자광원의 얽힘 간섭을 이용한 라이다 기술을 통해 신호대잡음비를 향상시킬 수 있는 방법도 알려져 있다.

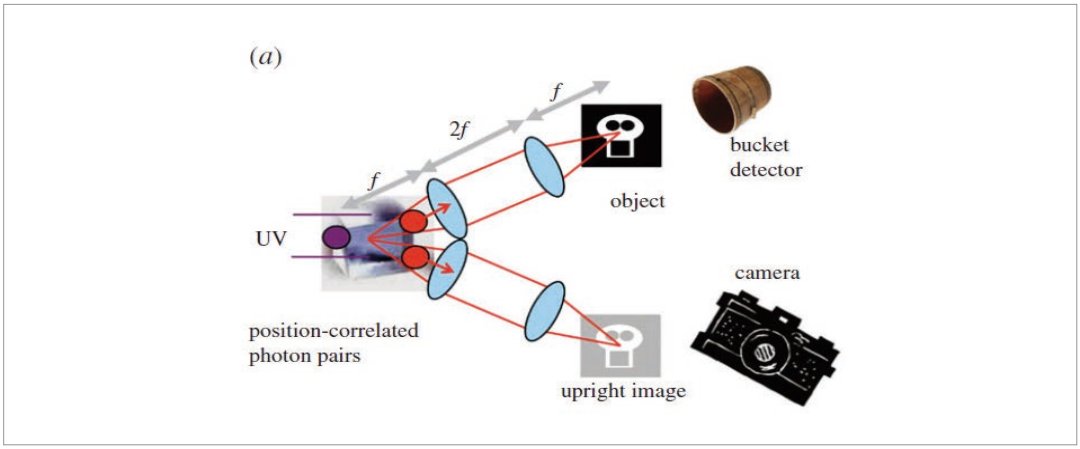
나아가 이 기술의 폭넓은 응용 가능성이 기대되고 있다. 물체와 상호작용하지 않는 광자로 이미징이 가능한 '고스트 이미징' 기법을 적용해 검출 효율을 높이거나 저가 검출기 또는 단일 검출기로 이미징하는 것이 가능하고, 자율주행이나 항법용 이미징 분야, 군사 및 국방 분야 등에도 응용이 가능할 것으로 기대되고 있다. 그러나 현 단계의 이 기술은 아직 실험실에서 구현한 수준에 머물러 있고 상용제품 단계로 나아가기 위해 많은 이슈들이 남아있는 상태이다.

그림 III-2-49 얽힘 간섭 기반 양자 라이다 통한 신호대잡음비 향상 기술



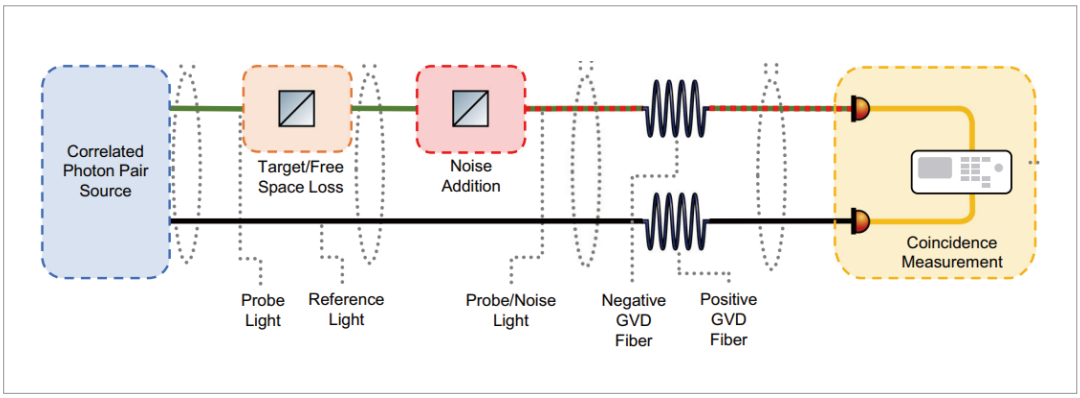
※ Qiang Wang et al. (2016)

그림 III-2-50 양자 고스트 이미징 기술



※ Miles J. Padgett & Robert W. Boyd (2016)

그림 III-2-51 광자 상관관계 기반 양자 라이다 잡음 제거 기술



※ Nature Communications 13, 5633 (2022)

제7절 시사점

양자센싱 분야의 주요기술과 소부장을 양자 관성센서, 시간·주파수 센서, 자기장 센서, 전기장 센서, 그리고 광학 센서 별로 정리하였다. 양자센서는 특성상 다양한 물리량을 측정하므로 필요로 하는 소부장 또한 다양하다고 할 수 있다. 그리고 양자센서는 기존 센서로 도달하지 못하는 수준의 높은 분해능 및 정밀도, 감도, 그리고 빠른 측정 속도가 가능할 것으로 예측되고 있으며, 이에 필요한 소부장도 그만큼 더 높은 성능이 요구되고 있다. 또한, 양자센서는 원자, 고체 점결함, 광 등의 플랫폼을 기반으로 결맞음, 간섭, 얽힘, 압착 등의 양자 현상을 이용하므로 필요한 소부장은 기존 센서에 사용되고 있는 소부장과 차별되며 대부분 새로운 기술이 적용되거나 높은 성능을 가지도록 제작되는 것이 요구된다.

양자센서에 필수적인 다양하고 고성능의 소부장은 거의 대부분 해외에 의존하고 있다. 해외 주요국에서는 기술패권 경쟁을 위해 기술을 보호하고 전략적으로 수술을 규제하고 있다. 이러한 필요성과 상황을 고려할 때 필수적인 소부장에 대한 해외 공급망 다원화와 더불어 주요 소부장의 기술 확보 및 국산화가 절실한 것으로 보인다. 하지만, 양자센서의 소부장이 매우 다양하고, 각 소부장에 대한 국내 수요가 많지 않아 국내 시장이 형성되기 어려고, 이런 이유로 국내 기업이 소부장 기술 개발 및 시장 참여 또한 쉽지 않은 상황이다. 미래의 양자기술 및 양자센서 분야에서 국가 경쟁력 확보를 위해서는 필수적인 소부장 기술 개발이 활발히 이루어질 수 있도록 국가적으로 체계적인 지원이 필요해 보인다.

양자 관성센서는 극저온 원자 기반의 양자간섭계를 이용하거나, 광역학계, 원자스핀, NV 센터 등을 기반의 양자 현상을 이용하여 중력, 가속도, 회전 등을 측정하는 센서이다. 사용되는 주요 소부장으로는 원자소스, 레이저 다이오드, 원자증기셀, 냉각 원자빔 소스, 음향 광학 및 전기 광학 변조기, 파형 생성기 등이 있으며, 대부분 해외에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

양자 관성센서는 자동차 자율 주행 등과 같은 미래 산업에서 중요하게 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 국방 분야에서 잠수함, 항공기 등의 항법, 우주 분야에서 위성 항법 등에 필수적인 센서로 분류된다. 이러한 이유로 양자 관성센서 기술은 국가전략기술로 분류되어 있으며, 따라서 관련되는 중요 소부장 또한 기술보호 대상이 되고 있다. 이와 같은 상황을 고려하여 국가전략기술 확보 차원에서 관성센서에 필수적인 소부장 기술 확보 및 공급망을 확보하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있을 것이다.

앞서 살펴본 바와 같이 시간·주파수 센서는 거의 모든 산업 분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 첨단산업, 방송, 통신, 위성, 항법 등에서는 필수적인 센서이다. 다양한 양자센서의 발전과 더불어 모든 측정의 기본이 되는 시간·주파수 센서의 중요성이 증대되고 있으며, 이에 필요한 소부장 역시 그 중요성이 가중되고 있다.

특히, 기초과학 및 정밀과학을 위한 초정밀 원자시계, 한국형 위성 항법 시스템(KPS) 등과 같은 항법에 필수적인 지상국 및 위성탑재용 원자시계, 그리고 다양한 분야에서 활용도가 높은 초소형 원자시계 및 초소형 광 주파수합성기 등은 미래 산업의 국가경쟁력 확보를 위해 필수적인 시간·주파수센서라고 할 수 있으며, 따라서 이에 필수적인 주요 소부장에 대한 기술 개발 및 국산화가 절실하다고 할 수 있을 것이다.

양자 전기장센서는 기존의 기술과는 완전히 차별화되는 혁신적인 센서로서 리드버그 원자의 특성을 이용한다. 레이저들로 리드버그 원자를 원하는 양자상태로 만들고, 원자를 전기장 내에 둔다. 분광학적 특성 이용하면 절대 전기장의 크기를 측정할 수 있다.

양자 전기장센서는 기존의 센서와 비교할 때 크기, 무게, 민감도 등에서 우위를 가질 뿐만이 아니라 전기장의 크기 위상, 편광 또한 측정 가능하다. 이러한 장점들을 활용하면 다양한 응용분야에 사용이 가능할 것으로 예상된다. 가장 먼저 관심을 받았던 분야는 측정학에서의 활용 가능성이다. 기존의 전기장센서는 전기장의 절대값을 측정하기 위해서는 추가적인 교정이 필요하다. 그러나 양자 전기장센서가 측정한 전기장은 양자적 원리에 의해서 절대적인 정확도를 가지므로 측정표준을 연구하는 기관들은 관련 연구를 진행하고 있다. 물론 센서의 외피를 이루는 유전체 등에 의해 발생하는 오차 요인들에 대해서는 정밀한 분석이 필요하다.

이 양자 전기장센서는 단순한 센서로 뿐만이 아니라 수신기로써 활용이 가능하므로 그 가능성에 대한 연구 또한 활발하다. 동작 주파수가 MHz ~ THz에 이르는 매우 넓은 영역에서 동작이 가능하므로 기존의 수신기가 가지는 대역폭 한계 또한 극복할 수 있다. 또한 기존 수신기의 경우 안테나의 크기가 파장 단위의 크기를 가져야 하므로 저주파 대역에서는 수 미터 이상의 매우 큰 크기를 가진다. 이에 비해서 양자 전기장 센서는 수 센티미터의 크기로도 저주파 대역에서 동작할 수 있다.

새로운 분야에서의 혁신적인 활용 가능성에도 불구하고 양자 전기장센서를 산업에서 활용하기 위해서는 해결해야 하는 난제들이 산적해 있다. 최근에는 기존의 모호한 가능성 탐색연구보다는 실제로 활용도가 높을 것으로 예상되는 연구에 집중적인 예산을 투입하고 있다. 즉 현재까지 알려진 포괄적이고 추상적인 응용분야가 아닌, 목적지향적이며 현실에서 강한 경쟁력을 가지는 연구분야를 선택하여 그 활용 가능성을 확인하는 연구가 필요하다.

이와 같은 목적지향적인 연구를 위해서는 크기 및 비용을 줄이는 것이 중요하다. 센서의 헤드부의 경우 현재의 센티미터급 증기셀 구조에서 MEMS공정 등을 통한 제작으로 소형화가 가능하다. 현재 레이저를 포함한 광학계는 광학테이블 상에 존재하는 크기를 가지고 있다. 이 시스템을 칩크기로 축소하면 저가 센서의 공급이 가능하므로 센서의 활용범위를 비약적으로 넓힐 수 있다. 이미 이를 위한 온칩(On-Chip)화 연구를 일부 그룹에서 수행하고 있다.

여러 종류의 양자센서 중에서 양자자기장센서와 관련된 시장의 규모가 가장 크게 전망된다. 그 이유는 양자자기장센서를 사용하는 생체자기 측정 기술이 뇌자도, 심자도와 같은 의료 진단 분야에 활용될 수 있기 때문이다.

SQUID 센서는 생체자기 분야를 개척하였으며, 오랜 연구개발을 거쳐 현재는 완성도 높은 생체자기 측정 시스템까지 선보이고 있다. 그러나 최근에 가격·공급 상황 변동이 심했던 액체 헬륨에 대한 높은 의존성으로 인하여, 상온에서 동작하는 원자자력계(OPM) 기술의 수요가 앞으로 더욱 증가할 것으로 예측된다. nT 수준으로 자기장이 차폐된 환경에서만 감도가 극대화되는 원자자력계의 단점을 극복하는 기술이 개발될 경우, 실용적 양자센서개발을 통한 신의료시장 창출이라는 목적은 충분히 달성될 수 있을 것이다. 원자자력계 센서에서 중심역할을 하는 증기셀은 칩스케일 원자시계에도 사용되는 핵심적인 소부장 기술이다. 따라서 MEMS 증기셀 제작 및 패키징 기술은 양자기술 관련 중장기적인 투자 또는 연구개발 계획 수립에 있어서 높은 우선순위로 고려되어야 한다.

다이아몬드 기반 양자센서는 고분해능 자기이미징이라는 비교적 경쟁력 있는 연구용 시장을 확보하고 있다. 현재 이 시장에서 자기이미징이 가능한 상용 센서 및 장비를 판매하는 일부 스타트업 규모의 업체들이 활동 중이다. 완성도 높은 연구용 장비를 위해서는 H/W뿐만 아니라 S/W 기술도 중요하다. 그러나 센서의 관점에서 다이아몬드 기반 양자센서의 핵심은 다이아몬드 소재라고 볼 수 있다. 원자와 달리 고체에서는 주변 원자들 간의 상호작용이 사라지지 않고 유지되므로, 결정성이나 순도와 같은 재료 품질의 특성이 궁극적으로 센서의 감도를 결정한다. 그런데 고순도 다이아몬드를 대량으로 공급 가능한 업체는 세계에서도 소수이며 이 업체들이 독점 수준의 시장 지위를 갖고 있다. 현재 다이아몬드 양자센서 관련 업체들도 이 제품들을 기반으로 2차 가공된 제품을 판매하고 있다. 고순도 다이아몬드는 양자센서 외에 양자컴퓨팅, 양자메모리, 양자중계기 등 다양한 양자 분야에 활용 가능한 미래 핵심 소재이다. 비단 양자기술만이 아니라 고전력 반도체 같은 분야에서 현재 실리콘 기반의 반도체 산업 기술은 소재의 한계점을 명확히 갖고 있다. 따라서 향후 산업 변동과정에서 예측하지 못한 수준으로 고순도 다이아몬드의 수요가 폭발적으로 증가할 수 있다. 이러한 경우를 대비하여 고순도 다이아몬드 소재 기술의 국내 경쟁력 확보를 준비하여야 한다. 장시간의 기술 축적이 요구되는 소재 분야의 특성을 고려할 때, 일본 재료연구소(NIMS)처럼 국가 차원의 기술 축적 목적의 연구진과 연구시설의 육성을 우선으로 고려할 필요가 있다.

양자 광학센서는 양자광원을 이용한 광학 기반의 센싱 시스템으로 광자를 직접적으로 측정 하는 양자현미경, 양자라이다 등에서부터 간접적으로 광자를 이용하여 물리량을 측정하는 분자센싱, 양자분광 등으로 활용된다. 양자 광학센서 시스템에 필요한 주요 소부장으로는 양자광원 생성에 필요로 하는 비선형 소재 및 반도체 소자, 레이저 소스, 그리고 측정에 필요한 광학 부품 및 검출기, 제어 장비 등이 있으며, 대부분 해외에서 수입하여 사용하고 있는 상황이다.

생체 시료 분석을 필요로 하는 의료, 제약 분야 등을 예시로 보면 광학적인 이미징을 많이 사용하는데, 고전 광원을 이용하기 때문에 감도나 분해능에 근본적인 한계가 존재한다. 양자 이미징 기술의 구현을 통해 광학적 손상에 민감한 생체 시료를 낮은 광량 환경에서 검출하거나 고전 광학적 분해능 이하의 미세 분석 등이 가능하다. 또한 국방 목적의 라이다 및 레이더등 등에 높은 민감도의 센싱이 가능하기 때문에 국가적인 경쟁력 확보를 준비해야 한다. 양자 광학센서는 각각의 부품 하드웨어뿐만 아니라 시스템 구현 알고리즘 및 소프트웨어가 필수적이기 때문에 시스템 구성에 대한 IP 확보가 매우 중요하다. 현재 양자 광학센서의 상용화 시스템이 나오지 않은 상황으로 양자 광학센서용 소부장에 대한 국내 수요 규모가 아직은 크지 않아서, 핵심이 되는 소부장 위주로 전략적인 육성이 필요할 것이다. 핵심 소부장 측면에서 비선형 소재 및 소자를 이용한 양자 광원, 반도체 기반 양자 광원은 등은 광학 기술을 이용하는 타 양자센서 기술에서도 활용 가능하며, 광기반 양자 통신 및 양자 컴퓨터에서 공유 가능하다. 장기적으로 보았을 때 핵심 소재 및 소자의 국산화는 넓은 분야에 활용되어 부가가치가 높을 것이다.

비선형 결정 소재 개발과 비선형 광학 기술을 기반으로 하는 양자광원 특히 'SPDC 기반 광자쌍 광원'의 생성, 제어 및 측정 기술들은 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅을 포함하는 양자정보기술 전분야에 걸쳐서 중요한 단일 광자 및 얽힘 광자 광원으로 활용되고 있다. 1930년대 중반 양자역학의 학문적인 틀이 갖추어진 초창기 양자역학의 불확정성 원리에 대한 불편함, 소위 EPR(Einstein, Podolsky, and Rosen) 역설로부터 시작된 양자역학의 기묘한 '상관관계' 특성에 관한 근본적인 연구와 이를 활용하는 양자정보기술 개발은 지난 30여년 동안 급격한 발전에 발전을 거듭해왔다.

이러한 연구개발의 중심에는 효율적이고 안정적으로 동작하는 광자쌍 광원이 있었고, 특히 이러한 광자쌍을 이용한 얽힘 상태 광원 생성이 핵심적인 역할을 해왔다. 현재 비선형 기반 광자쌍 광원은 실험실 수준의 연구로부터 인공위성을 이용한 양자통신의 구현에 이르기까지 광범위한 범위에서 활용되고 있다.

비선형 소재 및 부품 등은 비선형 광학의 발전과 더불어 1900년대 후반부터 연구개발이 진행되었지만, 양자정보기술의 실용화 및 관련 소재, 부품 및 장비의 상용화를 위해서 현재도 비선형 소재 및 부품의 개발과 좀 더 효율적인 광원 생성을 위한 연구들이 전세계 연구자들에 의해서 지속적으로 이루어지고 있다. 비선형 기반 광자쌍 광원의 개발은 향후 양자정보기술의 고도화를 위해서 핵심적인 역할을 하는 중요한 기술이므로, 새로운 소재의 개발과 부품화 및 상용화 장비 개발에 이르기까지 연구개발이 끊임없이 이루어져 한다.

제3장
양자컴퓨팅분야 주요기술과 소부장

제1절 개요

양자컴퓨터는 '꿈의 컴퓨터'로 불리고 있다. 세계 최고 슈퍼컴퓨터를 사용해도 1만 년이 걸리는 계산을 수분 만에 계산하기 때문이다. 기존 컴퓨터의 가장 작은 연산단위인 '비트(bit)'하나는 '0' 또는 '1' 중 정보 하나만을 가질 수 있다. 반면 양자컴퓨터의 정보처리 단위인 '큐비트'는 0의 결과를 제시하는 양자상태와 1의 결과를 제시하는 양자상태의 중첩상태에 존재할 수 있다. 중첩된 상태에 존재하는 큐비트를 측정할 경우 '0' 혹은 '1'의 비트를 확률적으로 얻을 수 있고, n개의 큐비트를 측정할 때 그 모든 가능성을 기술하려면 2의 n제곱만큼의 비트가 필요하다. 따라서 큐비트를 사용해 컴퓨팅을 수행하면 비트를 사용해 계산할 때 어렵다고 여겨졌던 문제들이 쉽게 해결될 수 있으며, 소인수분해 문제가 그 대표적인 예이다.

현재는 IBM, 구글 등 글로벌 기업들이 초전도체 기반의 양자컴퓨터 개발을 선도하고 있다. 비록 완벽한 양자오류 보정을 구현하며 실용적인 계산을 수행할 수 있는 범용양자컴퓨터의 출현을 위해서는 앞으로도 10년 이상의 연구개발이 필요하지만, 가장 최근으로는 IBM 128 큐비트 양자컴퓨터를 사용한 오류완화 실험에서 분자계의 에너지 계산 등 실용성이 높은 분야에 있어서도 양자컴퓨터가 고전 슈퍼컴퓨터로 계산하는데 장시간이 요구되는 계산을 해내는 사례를 보이기도 하였다. 이렇게 큐비트의 개수를 확장하고 오류율을 낮게 양자컴퓨터를 제작하기 위해서는 하드웨어를 구성하는 소재, 부품, 장비의 역할이 중요하다. 단적인 예로, 초전도체 기반 양자컴퓨터는 절대온도 0 K까지 냉각되는 환경을 구성해야 하므로 상온에선 동작이 어려운 단점이 있다. 따라서 양자컴퓨터 구현 방식으론 초전도체뿐만 아니라 반도체 양자점(스핀 큐비트용 소재), 광기반, NV센터, 리드버그원자, 이온트랩 등 다양한 방식이 연구되고 있다.

이렇게 다양한 양자컴퓨터 구현방식 중 가장 먼저 상용화될 방식이 어떤 것인지는 아직 알 수 없다. 이에 본 장에서는 여러 구현 방식별 양자컴퓨터 소재·부품·장비에 대해 폭넓게 다루고자 한다. 아래 그림은 초전도, 광기반, NV센터 등 다양한 양자컴퓨터 구현방법과 관련된 소재·부품·장비 전반에 대한 가치사슬을 나타낸다.

양자컴퓨터 구현을 위해 공통적으로 필요한 일부 소재·부품·장비가 있는 반면, 방식에 따라 특정 소재·부품·장비가 필요한 경우도 있다. 대표적인 소재로 초전도 양자컴퓨터에는 고정항 실리콘 웨이퍼 또는 사파이어 웨이퍼가 필요하다. 반도체 양자점 스핀큐비트에는 동위원소 정제형 초고순도 반도체 웨이퍼 및 양자품질 HEMT 등이 필요하고, NV다이아몬드 양자컴퓨터엔 양자품질 단결정 다이아몬드가, 리드버그원자 컴퓨터에는 루비듐 원소 등이 필수적이다.

대표적인 부품으로는 광학부품과 RF 부품(극저온 증폭기, 방향성 결합기, 양자-limited 증폭기, 극저온 용 고집적 고주파 라인 등), 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator, AWG) 등이 필요하다. 또 장비의 경우 각종 신호 제어장치와 양자상태 유지를 위한 초저온 냉각장치 및 진공챔버, 양자회로 컨트롤러 등이 필수적이다. 이번 장에서는 양자컴퓨터 구현 방법별 주요 기술과 해당 기술의 구현을 위한 소재·부품·장비별 공급처 현황을 파악해 본다.

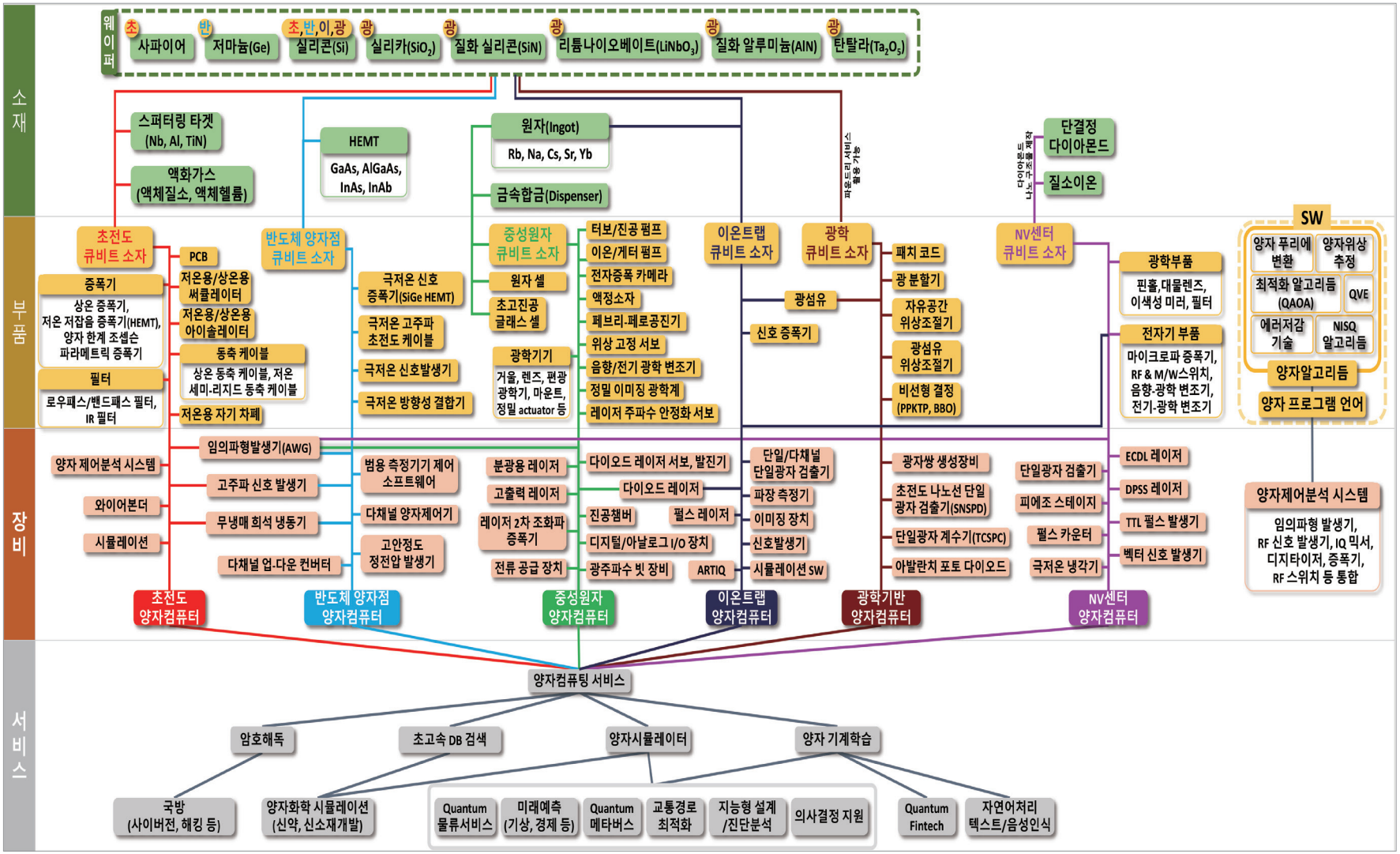


그림 III-3-1 양자산업 생태계 가치사슬 (양자컴퓨팅)

제2절 초전도 양자컴퓨팅

1. 요점

초전도 양자컴퓨터는 초전도 회로를 이용해 구현된 양자프로세서를 기반으로 작동한다. 조화 진동자 구조에서 인덕터 대신 조셉슨 접합을 추가함으로써 이에 따른 비선형성을 이용해, 에너지 레벨 간격이 동일하지 않게 만들고 가장 낮은 두 에너지 레벨만 이용해 큐비트로 활용한다. 이처럼 초전도 회로로 구성된 가상 원자는 다른 플랫폼에 비해 결맞음 시간이 비교적 짧다. 그러나 조작하기 편리하고, 빠른 게이트 동작이 가능하며, 확장성이 우수하다는 장점을 지니고 있다.

2019년 구글에서 53큐비트 양자프로세서로 양자 우월성(Quantum Supremacy)을 증명했다. 2022년에는 IBM에서 433큐비트 양자프로세서 Osprey를 공개하는 등 현재 초전도 회로를 기반으로 하는 양자컴퓨터 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. 구성요소

초전도 양자컴퓨팅 시스템은 크게 네 단위로 구분할 수 있다. 물리적 기본 구현 단위인 초전도 양자프로세서, 극저온 환경을 만들기 위한 냉동기, 양자신호 측정제어를 위한 마이크로파 시스템, 전체 장비를 구동할 뿐 아니라 큐비트 제어측정을 위해 마이크로파 펄스를 생성하는 소프트웨어로 구성되어 있다.

초전도 양자프로세서는 금속 대신 초전도 물질을 사용할 뿐 일반적인 반도체 공정 기술을 기반으로 소자를 제작한다. 다만, 여기서 사용되는 리프트오프 공정은 CMOS 호환공정이 아니므로 삼성이나 하이닉스에서 곧바로 생산할 수는 없다. 반도체 공정의 기본인 기판은 실리콘 또는 사파이어 기판을 사용하며, 회로 형성을 위해 사용하는 초전도 박막인 알루미늄 또는 니오븀을 스퍼터링 방법으로 증착한다. 그 외 금, 티타늄, 알루미늄과 같은 박막은 전자빔 증착 방법을 통해 증착하기도 한다. 이후 리소그래피와 리프트 오프 또는 에칭 공정 과정을 거쳐 초전도 회로 소자를 제작한다. 만들어진 소자를 냉동기에 넣어 열적 접촉을 만들고, 외부에서 보내주는 마이크로파 신호를 전달해주기 위해 패키징 단계를 거친다. 외부의 신호는 PCB를 통해 소자로 전달되는데, 와이어 본딩 과정을 통해 PCB와 소자 사이에 전기적 연결을 만들어 낸다. 참고로 극저온 및 초고진공에서 활용이 가능한 PCB 소재 역시 양자 컴퓨터 설계 시 고려해야 할 대상이다.

준비된 소자는 극저온 희석 냉동기에 두어 작동 가능한 환경을 조성한다. 초전도 양자컴퓨팅 작동을 위해 측정하는 수개월 동안 절대온도 0 K에 가까운 극저온 환경을 안정적으로 유지할 수 있어야 한다. 열에 의한 잡음도 큐비트 제어 및 측정에 방해가 될 수 있는 요소이기 때문이다. 냉동기에서 제일 낮은 온도를 유지하는 믹싱 챔버에 부착된 소자에, RF 신호가 전달될 수 있도록 저온용 동축 케이블을 연결한다. 이때 외부 잡음 신호와 원치 않는 주파수 신호가 들어가지 않도록 필터나 아이솔레이터와 같은 RF 부품을 사용한다. 한편 큐비트 측정에 사용되는 RF 신호는 매우 미약하기에 저온에서 저잡음 신호 증폭기(HEMT LNA) 또는 매개변수증폭기를 사용한다. 여기에 사용되는 저온 HEMT 증폭기와 스핀 큐비트용 극저온 HEMT 소재는 요구 특성이 달라 그 소재도 구분된다.

특정 주파수의 마이크로파 신호를 생성하는 고주파 신호 발생기 장비와 펄스를 생성하는 임의파형 발생기 그리고 아날로그 믹서를 이용하면, GHz 대역 주파수의 RF 펄스를 만들어 원하는 양자상태를 측정/제어 할 수 있다. 이때 수십 나노 초 단위의 펄스를 사용하기 때문에 정확한 양자상태의 생성 및 측정을 위해 펄스 사이의 타이밍이 매우 중요하다. 최근에는 멀티 큐비트 시스템으로 확장연구의 성과가 산출되며, 다양한 신호를 하나의 장비에서 다룰 수 있고 동기화에 유리한 통합 장비도 많이 사용되고 있다.

3. 소재

가. 기판 (Substrate)

기판은 얇은 원판 형태로 되어 있는 반도체 공정의 핵심 재료이다. 기판 위에 초전도 박막을 증착하고, 회로 패턴을 만들어 초전도 큐비트 소자를 형성한다. 유전 손실이나 계면 특성에 따라 초전도 큐비트 소자의 결맞음 성능을 제한할 수 있다. 따라서 유전 손실이 낮은 기판을 사용하고, 기판 표면을 깨끗하게 유지하는 것이 중요하다. RF 대역에서 유전손실을 최소화하기 위해 주로 고비저항(〉10k Ω•cm) 실리콘 또는 사파이어 기판을 사용하며, 새로운 기판 및 표면 처리 기술의 개발로 인해 결맞음 시간의 향상을 기대할 수 있게 되었다.

표 III-3-1 대표적인 소재(기판) 공급처

소재명	공급처
기판	웨이퍼 코리아, 태원과학, 웨이퍼 마켓, Cryscore

나. 스퍼터링 타겟 (Sputtering Target)

스퍼터링은 금속 박막을 증착하는 방법의 하나로, 고에너지 이온과 금속 타겟의 충돌로 인해 떨어져 나온 금속 원자가 웨이퍼에 막을 만드는 현상을 말한다. 초전도 큐비트 소자를 제작하기 위해 주로 사용하는 초전도 물질로는 니오븀(Nb)과 알루미늄(Al)이 있다. 여기에 스퍼터링, 전자빔 증착 방법 등을 적용해 박막을 형성할 수 있다.

초전도 물질의 특성에 따라 기판과 형성하는 계면 특성이 달라지고, 이는 결맞음 성능에 영향을 준다. 현재 질화물(Nitride) 계열 초전도 박막을 이용한 초전도 큐비트 소자 연구가 진행 중이며, 질화티타늄(TiN)을 사용한 경우 표면 손실이 줄어 결맞음 시간이 향상됨을 확인한 바 있다.

표 III-3-2 대표적인 소재(스퍼터링 타겟) 공급처

소재명	공급처
스퍼터링 타겟	태원과학, Stanford Advanced Materials, Lesker

다. 액화가스

대표적인 액화가스로 액체질소와 액체헬륨이 있다. 각 물질의 끓는점은 77K와 4.2K로 소자나 물질의 저온 특성을 연구하는 데 이용한다. 특히 액체헬륨은 니오븀의 임계온도(T_C = 9.2 K)보다 낮아 니오븀 자체 물성이나 초전도 회로 특성을 분석하기 위해 사용할 수 있다.

표 III-3-3 대표적인 소재(액화가스) 공급처

소재명	공급처
액화가스	그린산업가스, 에어리퀴드 코리아

라. PCB 기판

PCB(Printed Circuit Board) 기판은 초전도 큐비트 소자를 패키징할 때 많이 사용된다. PCB 기판은 외부에서 오는 RF 신호를 큐비트 소자에 전달하는 RF transmission line과 RF 커넥터(SMA, SMP 등)를 설치하는 플랫폼을 제공한다. 일반적으로 RF용 PCB를 사용하는데, 이는 GHz 주파수 영역에서 낮은 유전손실을 보장하기 때문이다(손실이 큰 문제가 되지 않는 경우 FR4를 사용하기도 한다). 특별히 저온에서도 작동하도록 디자인된 PCB가 존재하지는 않는다. 사용하는 RF transmission line의 종류에 따라 단일 레이어(Coplanar Waveguide 또는 microstrip trasmission line의 경우) 또는 멀티 레이어(Stripline transmission line의 경우) PCB가 사용된다. PCB에 사용되는 금속은 구리가 가장 일반적이지만, 최근에는 알루미늄이 도금된 PCB도 사용되고 있다. 알루미늄의 경우 1.2 K 이하에서 초전도체가 되기 때문에 구리에서 발생하는 열을 피하는 목적 또는 RF 신호 손실을 최소화하는 목적으로 사용하기도 한다. 대표적인 PCB 제조사는 미국의 Rogers Corporation이 있다.

4. 부품

가. 증폭기

(1) 저온 저잡음 증폭기 (Cryogenic Low Noise Amplifier, HEMT)

증폭기는 신호 전력을 증가시켜 미세한 신호도 감지할 수 있게 한다. 양자상태를 측정하기 위해 초전도 큐비트 소자에 인가되는 RF 신호의 파워는 10^{-15}mW 정도로 매우 약하기에 그런 작은 RF 신호를 증폭시켜주기 위해서 저잡음 증폭기 (Low noisy amplifier)를 저온 스테이지(<4K)에서 사용한다. 저잡음 증폭기 제작에는 고 전자이동성 트랜지스터(HEMT, High Electron Mobiity Transistor)가 사용되고, 저온에서도 넓은 대역폭, 높은 신호 이득 (〉30dB)과 낮은 노이즈 온도(~4K)를 갖고 있다. 증폭기 대역폭과 신호 이득을 유지하며 노이즈 온도를 낮추는 기술의 개발은, 향후 큐비트 신호 측정기술을 향상시킬 것으로 기대된다. 일반적으로 InP 기반 HEMT 소재를 사용하며, 소재 제작 및 공정 기술의 난이도가 상당하지만, 극저온냉각 상태에서 정상 동작하는 회로 설계 및 패키징 기술의 난이도 또한 높다.

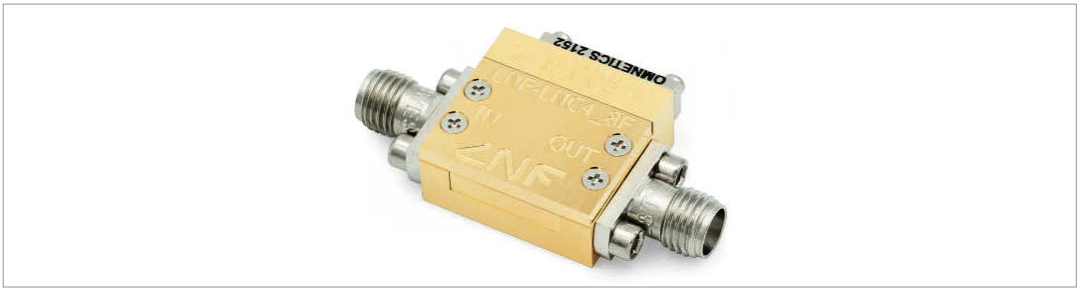
(2) 상온 RF 증폭기

극저온에서 증폭된 RF 신호는 상온에서 한 번 더 증폭시켜 수백 mV 크기의 전압으로 만들게 되는데 이때 상온 RF 증폭기가 사용된다. 일반적으로 총 60-70dB의 신호 이득을 얻기 위해 신호 이득 30dB 정도의 상온 증폭기 2개를 직렬로 연결하여 사용한다. 많은 경우 기존의 CMOS 공정을 이용 가능한 Si 소재로 동작 온도에 맞게 회로를 재구성하여 제작한다.

표 III-3-4 대표적인 부품(증폭기) 공급처

부품명	공급처
증폭기	Low Noise Factory (HEMT), Cosmic Microwave Technology, Inc. (HEMT), Mini-Circuits, Quantum Microwave, Narda-MITEQ

그림 III-3-2 Low Noise Factory사의 LNF-LNC4_8C



※ lownoisefactory.com

(3) 양자 한계 조셉슨 파라메트릭 증폭기 (Quantum-limited Josephson Parametric Amplifier)

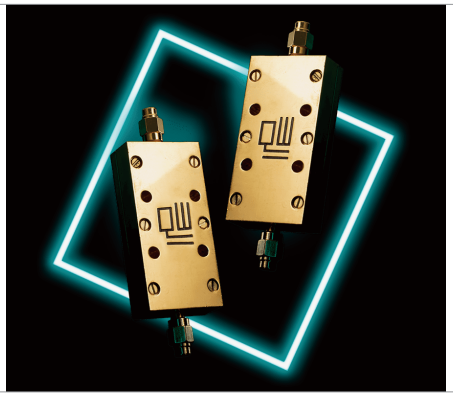
양자 한계 증폭기는 초저잡음 증폭기로 양자역학적으로 정의되는 최소한의 양자잡음만 갖고 있는 증폭기이다. 이 증폭기는 HEMT 대신에 조셉슨 정션의 비선형성을 이용하는데, RF 펌프 톤을 가하였을 때 높은 신호 이득(15-20 dB)을 가능하게 한다. 초저잡음 그리고 높은 신호 이득 특성은 초전도 큐비트의 측정에 있어서 높은 신호대비잡음비율(SNR)를 향상시켜서 단발측정시 높은 측정 신뢰도(Readout Fidelity)을 가능하게 한다.

개발 초기의 양자 한계 조셉슨 증폭기는 좁은 대역폭(<100 MHz)을 가졌으나, 최근에 개발된 IMPA (Impedance-matched Parametric Amplifier)나 TWPA(Traveling Wave Parameteric Amplifier)는 수백 MHz에서 수 GHz에 이르는 밴드폭을 제공하여 주파주 멀티플랙싱을 통한 큐비트 상태 측정에 이용되고 있다. 최근에는 IMPA나 TWPA 증폭기는 상용화되고 있어서 구입이 가능하다. 그와 동시에 대학과 연구소에서는 좀더 향상된 (넓은 대역폭, 높은 신호 이득, 적은 신호 이득 ripple, 낮은 노이즈 온도 등) 양자 한계 증폭기의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

표 III-3-5 대표적인 부품(증폭기) 공급처

부품명	공급처
증폭기	Quantware, Silent Waves, BBN

그림 III-3-3 Quantuware사의 Crescendo TWPA



※ https://www.quantware.eu/

나. 써큘레이터 (Circulator)

써큘레이터는 3개 포트로 구성돼 있으며 한 회전 방향으로만 신호가 전달되도록 디자인된 마이크로웨이브 부품이다. 포트 1로 입력된 신호는 포트 2로는 전달되지만, 포트 3으로는 전달되지 않는다. 마찬가지로 포트 2로 입력된 신호는 포트 3으로만, 포트 3으로 입력된 신호는 포트 1로만 전달된다. 3개 포트 중 하나의 포트를 50Ω으로 터미네이션시키면 아이솔레이터(Isolator)로도 사용할 수 있다.

써큘레이터는 RF 신호가 한 회전 방향성을 갖도록 한 부품으로 신호의 입력과 출력을 분리할 필요가 있을 때 사용된다. 예를 들어, 초전도 $\lambda/4$ 공진기의 경우 포트가 한 개만 있으므로 입력 신호의 반사 정도를 측정해 공진기를 평가한다. 이때 써큐레이터의 포트 2를 공진기에 연결하고 포트 1로 RF 신호를 보내면, 신호가 포트 2에서 반사되어 포트 3으로 출력된다. 이 출력 신호를 측정하여 RF 반사도(Reflection)를 알 수 있다.

써큘레이터는 상온, 저온용 두 가지 모두 상용화되어 있고, 극저온 냉동기 내에는 저온용으로 특별히 제작된 써큘레이터를 사용해야 한다. 구입 시 고려해야 할 중요한 파라이터는 신호 밴드폭과 아이솔레이션이다. 밴드폭 밖에서는 삽입 손실과 아이솔레이션 수치가 모두 나빠지게 된다. 원하는 아이솔레이션을 얻기 위해서는 여러 개의 써큘레이터를 직렬로 연결하여 사용한다.

표 III-3-6 대표적인 부품(써큘레이터) 공급처

부품명	공급처
써큘레이터	Low Noise Factory(저온용 써큘레이터), Narda-MITEQ(상온용 써큘레이터), Quinstar(저온용 써큘레이터)

다. 아이솔레이터 (Isolator)

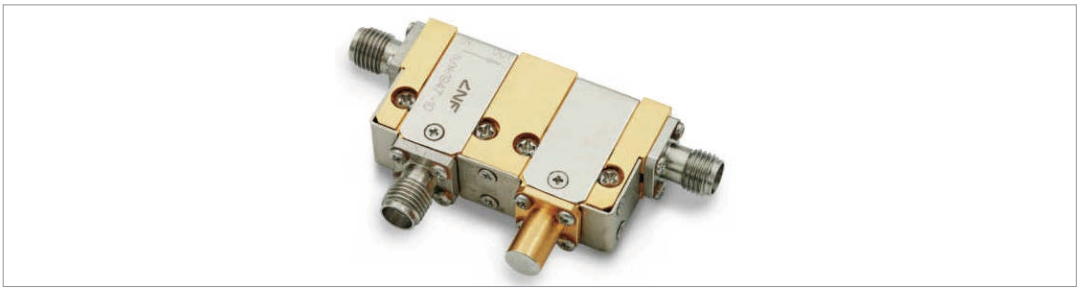
아이솔레이터는 2포트를 가진 RF 부품으로 신호가 한 방향으로 전달될 수 있도록 한다. 초전도 양자 컴퓨팅의 경우는 저온용으로 특별히 디자인된 아이솔레이터가 사용되며, 초전도 큐비트를 주변의 전자기적 잡음으로부터 보호하는 역할을 한다. 일반적으로 아이솔레이터는 초전도 큐비트와 저잡음 증폭기(HEMT) 사이에 위치하여 증폭기로부터 오는 잡음을 막아 큐비트를 보호하는 역할을 한다. 다른 예로는, 초전도 큐비트와 양자한계 증폭이 사이에 설치되어 증폭기에서 오는 잡음이나 증폭기의 펌프라이에서 오는 잡음으로부터 큐비트를 보호하는 역할도 한다.

써큐레이터와 마찬가지로 구입 시 고려해야 할 중요한 파라이터는 신호 밴드폭과 아이솔레이션이다. 원하는 아이솔레이션을 얻기 위해서는 여러 개의 아이솔레이터를 직렬로 연결하여 사용한다.

표 III-3-7 대표적인 부품(아이솔레이터) 공급처

부품명	공급처
아이솔레이터	Low Noise Factory(저온용 아이솔레이터), Narda-MITEQ(상온용 아이솔레이터), Quinstar(저온용 아이솔레이터)

그림 III-3-4 Low Noise Factory사의 Dual Junction Isolator/Circulator



※ lownoisefactory.com

라. 필터 (Filter)

(1) 로우패스/밴드패스 필터 (Low-pass Filter/Band-pass Filter)

필터는 원하는 주파수 영역을 통과시키고 나머지는 통과하지 못하게 한다. 큐비트 제어·측정 과정에서 원치 않는 주파수 영역이 입력됨으로써 양자상태 형성 또는 측정을 방해하는 현상을 막을 수 있다. 초전도 큐비트로 구성된 양자 회로는 주변의 전자기적 잡음에 매우 민감하기 때문에 큐비트의 긴 결맞음 시간을 위해서는 주변 잡음의 필터링과 차폐가 중요하다. 원하는 패스밴드(pass band)와 스탑밴드(stop band)를 구현하기 위해 복수의 필터를 보통 사용하게 된다.

큐비트를 드라이브 하는 RF 동축 케이블 라인에는 lumped-element 로 만든 로우패스 나 밴드패스 필터를 사용한다. 통과대역은 로우패스 필터의 경우 보통 DC-8 GHz이고 10GHz 이상에서 50 dB 이상의 rejection을 갖는다. 하지만 lumped-element의 특성상 수십 GHz이상에서는 parasitic capacitance/inductance 때문에, 더 이상 필터링이 잘되지 않는다. 수십 GHz 이상의 IR 대역의 잡음은 IR 필터를 통해 필터링한다.

표 III-3-8 대표적인 부품(로우패스/밴드패스 필터) 공급처

부품명	공급처
로우패스/밴드패스 필터	K&L Microwave, Quantum Microwave, Mini-Circuits

그림 III-3-5 K&L Microwave사의 Tubular Low-pass Filter



※ K&L Microwave

(2) IR 필터

IR 필터는 적외선(Infrared) 필터로써 로우패스 필터가 커버하지 못하는 주파수 영역의 잡음을 막아주는 역할을 한다. 높은 온도 스테이지에 오는 흑체복사(~4K의 적외선)로 부터 초전도 큐비트를 보호한다. 그런 흑체복사의 에너지는 초전도 물질의 갭 에너지 보다 크기 때문에, 비평형 준입자(nonequilibrium quasiparticle)를 큐비트에 생성시켜 결맞음 시간을 줄이거나 양자 게이트 에러율을 증가시키게 된다.

가장 보편적으로 사용되는 IR 필터는 매우 효과적인 마이크로웨이브 흡수제(Eccosorb CR110)를 이용해서 만들어진다. 과거에는 연구실에서 수작업으로 만들어져 성능의 편차가 존재했지만, 이제는 상용화되어 있어 좀 더 신뢰성 있게 IR 필터를 구매할 수 있다.

표 III-3-9 대표적인 부품(IR 필터) 공급처

부품명	공급처
IR 필터	Quantum Microwave, Bluefors

그림 III-3-6 Quantum Microwave사의 IF filter, QMC-CRYOIRF-002



※ quantummicrowave.com

마. 동축 케이블 (Coaxial Cable)

(1) 상온 동축 케이블

동축 케이블은 전기 신호를 전달할 수 있는 매체로 중심 도체, 절연체, 외부 도체가 같은 축으로 형성되어 있다. 큐비트 제어·측정은 마이크로파 펄스 신호를 가해주거나 감지하는 과정으로 이뤄져 있는데, 이때 마이크로파 펄스를 큐비트까지 보내기 위해 동축 케이블을 사용한다.

상온에서 10mK 저온까지 신호를 보내야 하므로 온도에 따라 물질 특성이 변하거나 신호 생성 장비에서 큐비트 사이 긴 물리적 거리로 인해 신호 손실이 있을 수 있다. 온도 영역별로 손실을 최소화하며, 신호를 전달할 수 있도록 구성하는 것이 중요하다.

표 III-3-10 대표적인 부품(동축 케이블) 공급처

부품명	공급처
동축 케이블	Mini-Circuits, Huber+Suhner, Amphenol RF, Withwave

(2) 저온 세미-리지드 동축 케이블 (Cryogenic Semi-rigid Coaxial Cable)

극저온 냉동기에서 측정을 위한 RF 신호는 동축 케이블을 통해 상온에서 저온의 큐비트 소자까지 도달하게 된다. 냉동기 내에 사용되는 저온용 동축 케이블은 서로 다른 온도 스테이지를 연결해줘야 하기 때문에 열전도가 매우 낮은 물질을 사용해야만 한다. 따라서 스테인리스 스틸, CuNi 합금, 초전도체인 NbTi 같은 저온에서 열전도도가 매우 낮은 세미-리지드 동축 케이블 (semi-rigid coaxial cable)이 사용된다. 최근에는 CuNi과 NbTi가 가장 많이 사용되는데, CuNi는 스테인리스 스틸보다 열전도도가 낮고 커넥터를 연결할 때 납땜이 쉬운 장점이 있다. NbTi는 초전도 물질이므로 열전도가 매우 낮고 동시에 전기적 손실이 거의 없기 때문에, 초전도 소자와 저잡음 증폭기 사이를 연결하여 신호의 감소를 최소화한다. 이외에도 플럭스 바이어스(flux-bias) 라인에 사용이 되어 큰 전류를 필요로 할때 (초전도가 아닌 경우) 생길 수 있는 히팅을 최소화 할 수 있다.

커넥터가 없는 CuNi와 NbTi 세미-리지드 케이블과 RF 커넥터까지 연결된 완성된 케이블 모두 상용화되어 있다. 일반적으로 RF 커넥터는 SMA, SMP, SSMP 등 다양하게 선택이 가능하다. 구매한 극저온 냉동기에 저온 동축 케이블을 추가하고자 한다면 구매한 회사에서 냉동기에 맞는 케이블을 따로 구매할 수도 있다.

표 III-3-11 대표적인 부품(동축 케이블) 공급처

부품명	공급처
동축 케이블	Coax Co., Keycom, CryoCoax, Quantum Coax

바. 저온용 자기 차폐 (Cryogenic Magnetic Shield)

초전도 큐비트는 저온용 자기 차폐를 통해 지구 자기장이나 주변의 자기장 잡음으로부터 보호하여야 한다. 그렇지 않으면 초전도체 박막에 Abrikosov vortex 가 생기고 RF loss로 인한 큐비트와 공진기의 품질 인자(Quality factor)의 감쇄를 야기할 수 있다. 큐비트를 보호하기 위해 높은 투자율(permeability)을 가진 뮤메탈(mu-metal)을 자기 차폐로 사용한다. 하지만 일반적인 뮤메탈은 저온으로 갈수록 투자율이 감소하여 자기 차폐율이 떨어지게 된다. 이에 반해 저온용 뮤메탈은 hydrogen annealing을 이용하는 등의 특수 처리를 해 저온으로 갈수록 투자율이 증가하는 성질을 갖는다. 이에 극저온에서 좋은 자기 차폐용 물질로 사용이 된다.

표 III-3-12 대표적인 부품(저온용 자기 차폐) 공급처

장비명	공급처
저온용 자기 차폐	Amuneal, muShield, 코암테크

5. 장비

가. 무냉매 희석 냉동기 (Cryogen-free Dilution Refrigerator)

무냉매 희석 냉동기는 ^{3}He와 ^{4}He의 혼합 기체를 사용해 밀리켈빈 수준 극저온을 안정적으로 유지할 수 있는 냉각장치이다. 양자컴퓨팅 시스템에 사용하기 위해서는 초전도 특성을 보이는 수 켈빈의 임계온도보다 더 낮은 온도를 필요로 하는데, 4~5GHz 대역에 형성되는 초전도 큐비트의 주파수에 대응하는 에너지에 비해 열에너지가 훨씬 작아야 한다.[13)]

13) $kT \ll hf_{01}$, k : 볼츠만 상수, T : 온도, h: 플랑크 상수, f_{01} : 큐비트 0 와 1 상태 사이의 전이 주파수 에를 들면, 6 GHz 는 0.3 K에 해당함

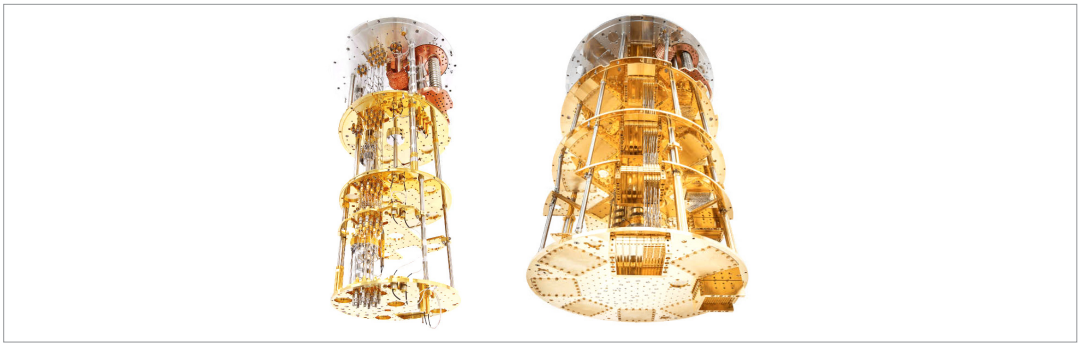
따라서 절대온도 0 K에 가까운 극저온 환경을 만들어 열에 의한 요동을 최소화해야 한다. 초전도 양자컴퓨팅을 위한 냉동기에는 많은 수의 RF 부품이 필요하므로, 충분한 냉각 성능을 가진 극저온 냉동기가 필요하고, 물리적으로도 충분한 공간을 제공하여야 한다.

큐비트 수 증가에 따라 양자컴퓨팅 시스템 규모가 커지며, 냉동기 지름이 커지고 구성하는 케이블과 RF 부품 수가 늘어남에 따라 안정적으로 극저온을 유지하는 기술이 꾸준히 요구되고 있다. 대규모 냉동기를 빠르게 냉각하고, 절대온도 0 K에 가까운 극저온 환경을 안정적으로 형성할 수 있는 냉각기술의 발전은 대규모 범용 양자컴퓨팅 시스템 구축을 위해 필수적이다.

표 III-3-13 대표적인 장비(무냉매 희석 냉동기) 공급처

장비명	공급처
무냉매 희석 냉동기	Bluefors, Oxford Instruments, Leiden Cryogenics, Maybell Quantum

그림 III-3-7 (왼쪽) BlueFors사의 LD400, (오른쪽) BlueFors사의 XLD1000s



※ bluefors.com

나. 임의파형 발생기 (Arbitrary Waveform Generator)

임의파형 발생기는 사인파, 구형파, 비정형파 등 원하는 파형을 생성하는 장비이다. 임의파형 발생기는 펄스 형성뿐만 아니라 RF 펄스의 타이밍과 펄스 시퀀스의 스케줄링도 제어하는 초전도 큐비트 측정에 있어서 중심이 되는 장비이다. 본 장비를 이용해 생성한 베이스 밴드의 펄스와 수 GHz 대역 마이크로파를 IQ 믹서를 통해 혼합해 양자상태를 제어·측정할 수 있다. 제어·측정의 정확도를 높이기 위해 마이크로파와 펄스를 혼합하는 과정에서 신호 누설을 최소화하고, 원치 않는 신호가 들어가지 않도록 정교한 펄스를 형성하는 것이 중요하다. DC 바이어스와 혼합해 주파수 조절이 가능한 큐비트나 커플러를 작동하기 위해 사용되기도 한다.

큐비트 수에 비례해 제어·측정을 위한 펄스 수도 증가한다. 하나의 장비에 펄스 생성 채널 수를 늘리면, 펄스 사이의 신호 동기화를 높여 양자연산 수행의 정확도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 공간 효율성도 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

표 III-3-14 대표적인 장비(임의파형 발생기) 공급처

장비명	공급처
임의파형 발생기	Tektronix, Zurich Instruments, Tabor Electronics

그림 III-3-8 Zurich Instruments사의 HDAWG



www.zhinst.com

다. 고주파 신호 발생기 (RF Signal Generator)

고주파 신호 발생기는 GHz 대역의 연속된(CW) RF 파형을 발생시키는 장비이다. 주 용도는 양자상태의 제어와 측정에 필요한 RF 펄스를 생성하는데 필요한 케리어 신호 또는 LO (Local Oscillator) 신호의 생성이다. 임의 파형 발생기에서 생성된 베이스밴드 펄스 신호와 LO 신호를 IQ 믹서를 통해 혼합하면, 원하는 주파수, 위상, 길이, 펄스 모양을 가진 RF 펄스를 생성할 수 있다. 따라서, 고주파 신호 발생기는 주로 LO신호용으로 사용되거나 연속된 RF 톤이 필요할 경우, 예를 들면, 양자 한계 증폭기의 펌프톤으로 사용이 된다.

과거에는 범용의 고가의 고주파 신호 발생기가 많이 사용되었으나. 최근에는 양자 컴퓨팅용 전용 양자 제어기가 출시 되면서 더 이상 고주파 신호 발생기를 따로 필요로 하는 경우가 많이 줄어들었다. 또한 LO 신호로 사용할 수 있는 저렴하지만 충분한 사양의 신호 발생기도 쉽게 시중에서 구할 수 있다.

표 III-3-15 대표적인 장비(고주파 신호 발생기) 공급처

장비명	공급처
고주파 신호 발생기	Keysight, SignalCore, Rohde & Schwarz

그림 III-3-9 Keysight사의 E8257D



※ https://www.keysight.com/

라. 양자 제어분석 시스템

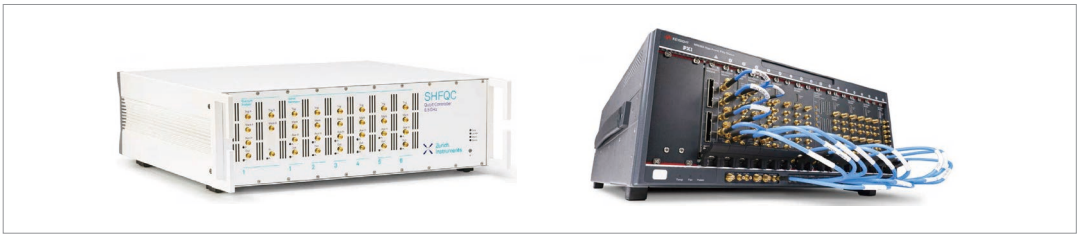
양자 제어분석 시스템은 양자컴퓨팅 연구가 활발해지며 등장한 장비다. 하나의 장비를 이용해 제어·측정을 위한 마이크로파와 펄스를 동시에 생성할 수 있다. 높은 정확도를 갖는 양자연산을 수행하기 위해서는 개별 큐비트 또는 큐비트 사이에서의 제어 및 측정 펄스 타이밍이 중요한데, 본 장비는 양자 연산을 위해 필요한 기능이 하나의 장비에 통합되어 있어 신호 동기화 성능이 높고 정밀한 양자상태 생성·측정이 가능하다. 과거에 큐비트 측정을 위해 필요했던 장치들이(임의파형 발생기, RF 신호 발생기, IQ 믹서, 디지타이저, 증폭기, RF 스위치 등) 현재는 하나의 장비로 통합되는 추세이다. 이에 측정장비들이 차지하는 공간이 줄어들고 또한 회사에서 제공되는 기본 API를 기반으로 큐티트의 측정/제어 시스템도 빠르게 적용되고 있다.

각 회사의 제품들은 하드웨어적으로 RF 펄스를 생성하는 방식이 다르다. 아날로그 IQ 믹서를 이용한 전통적인 heterodyne 방식부터, double super heterodyne 방식, direct digital synthesis 방식이 현재 사용되고 있다. 마지막의 두 방식은 믹서의 보정이 필요 없다는 장점이 있다. 현재까지는 RF 펄스 방식이 양자 게이트의 에러율을 제한하는 요소로 보이지는 않고, 사용상의 편의성이나 제공하는 API의 완성도, 그리고 장비의 스펙이 선택의 요소가 될 것으로 판단된다.

표 III-3-16 대표적인 장비(양자 제어분석 시스템) 공급처

장비명	공급처
양자 제어분석 시스템	Zurich Instruments, Quantum Machines, Keysight, Qblox

그림 III-3-10 (왼쪽) Zurich Instruments사의 SHFQC, (오른쪽) Keysight사의 Quantum Control System



※ www.zhinst.com

마. 와이어 본더 (Wire-bonder)

와이어 본딩 기술은 큐비트 소자와 PCB 사이 회로를 얇은 알루미늄이나 금 와이어로 연결할 때 사용한다. 회로의 두 부분이 고리 형태로 연결돼 있어, 인덕턴스를 생성하며 회로에 일부 영향을 줄 수 있다. 원치 않는 인덕턴스 생성을 최소화함으로써 간섭 때문에 양자 신호가 영향을 받지 않도록 유의해야 한다.

표 III-3-17 대표적인 장비(와이어 본더) 공급처

장비명	공급처
와이어 본더	Inseto, TPT Wire Bonder, F&S BONDTEC

6. 기타

가. 시뮬레이션 (Simulation)

초전도 큐비트 소자 설계과정에서 초전도 회로의 인덕턴스, 커패시턴스, 주파수 등 회로 파라미터를 계산해 시스템을 구상할 수 있다. 이를 바탕으로 큐비트-공진기 또는 큐비트-큐비트 커플링 크기, 에너지 레벨의 비조화성 등의 시스템 파라미터를 예측할 수 있다. 여러 가지 상용툴들은 초전도 회로의 인덕턴스나 커패시턴스 시뮬레이션에 사용될 수 있다. 최근에는 초전도 큐비트 회로의 디자인을 도와주는 EDA (Electronic Design Automation) 소프트웨어가 오픈소스 또는 상용소프트웨어로 사용 가능하다.

회로 레벨에서 필요한 시뮬레이션 외에도, 초전도 큐비트 자체의 파라미터의 시뮬레이션을 위한 파이썬 패키지도 여러 존재한다. 이런 패키지는 대부분 오픈 소스로 누구나 엑세스가 가능하여 초전도 큐비트를 공부하려는 대학원생의 학습에 매우 유용한 툴이 되고 있다.

표 III-3-18 대표적인 시뮬레이션 공급처

제품명	공급처
시뮬레이션	COMSOL, ANSYS, Keysight, IBM, SUNMagnetics, IQM, Sonnet Software

제3절 반도체 양자점 양자컴퓨팅

1. 요점

반도체 양자점 스핀 큐비트란 전계 효과 트랜지스터와 흡사한 반도체 소자 게이트 구조로 형성된 양자컴퓨팅 소자를 말한다. 에너지 우물에 갇힌 전자, 홀 등 입자의 스핀 상태를 에너지 준위로 사용한다. 타 플랫폼에 비해 상대적으로 높은 게이트 충실도를 시연하기 위해 오랜 시간이 소요된다. 그러나 최근 스핀 잡음이 최소화된 동위 원소 정제형 실리콘 기판이 개발되며 급격히 발전하고 있는 플랫폼이다.

이 분야는 2004년경 GaAs 로 대표되는 III-V족 화합물 반도체를 이용하여 스핀 큐비트를 구현할 수 있는 기초결과가 보고된 이후, 2013년경 실리콘(Si)으로 스핀큐비트를 구현하면서 급격히 발전하고 있다. 실리콘은 전자 스핀 큐비트의 잡음요소가 되는 스핀-궤도 상호작용이 작고, 또 다른 잡음요소인 29번 동위원소 실리콘을 정제하여 28번 실리콘으로 웨이퍼를 제작할 수 있다. 그리고 동위원소 정제형 실리콘 기판을 사용하면 수십 밀리초 이상의 우수한 결맞음 시간을 가진다. 즉, 기존 고전 컴퓨터 제작의 주 재료인 실리콘을 그대로 사용하여 양자기술을 구현할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 또한 스핀-1/2은 원천적 2준위 에너지계로서 낮은 누설 에러율을 가지며, 높은 T1 시간으로 인한 단발 측정의 용이성과 해밀토니안(Hamiltonian)의 모든 파라미터를 게이트 전압으로 용이하게 제어할 수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 반도체 스핀큐비트는 차세대 양자컴퓨팅 플랫폼으로 각광받고 있다. 국내에서 원소재인 ^{28}Si의 정제 기술을 보유하기 위해서는 국내외 정세에 대한 고려뿐만 아니라 단기적 및 장기적 방안 마련이 필요하다. 단기적으로는 수입을 통해 28번 정제된 Si 소재를 수급하고, 이를 사용하여 적어도 지름 10인치 이상의 대면적 ^{28}Si 기판을 제작할 수 있다. 장기적으로는 소재를 대량 생산하기 위해 국내 출연연에서 ^{28}Si의 정제 기술을 보유하는 것이 하나의 방안이 될 수 있다. 이외에도 질량 분별된 ^{28}Si의 ion implant를 통한 1인치 지름 규모의 소규모 연구용 ^{28}Si 박막 제조기술을 ^{28}Si의 정제 기술 보유의 우회로로 고려해 볼 수 있다.

또 모든 플랫폼 중 현대 반도체 산업의 CMOS 공정과 가장 높은 호환성을 보이며, 초전도 플랫폼이 mK 의 극저온이 필수적인 것에 반해 반도체 큐비트는 수 K의 비교적 고온에서도 양자 결맞음을 유지하는 보고가 이루어지고 있다. 이는 큐비트 칩과 양자제어회로를 통합한 양자 시스템 온 칩 구현 측면에서 장점으로 부각되는데, CMOS 양자제어회로의 발열을 감당하며 유지할 수 있는 최저온도가 ~1K 인 것을 감안하면 큐비트 층이 수K에서 동작하는 것이 필수적이기 때문이다. 이렇게 반도체 양자컴퓨팅은 대규모 집적형 양자프로세서를 70년 이상 발전시켜 온 실리콘 산업 공정을 그대로 사용할 수 있는 가능성이 있다. 그간 학계를 중심으로 커스텀 공정을 통해 제작된 소규모 큐비트계 위주로 연구가 이뤄져 왔다. 그

러나 현재는 산업체 파운드리 공정을 이용한 대규모 양자프로세스 개발의 초기단계 연구가 진행되고 있는 상황이다. 반도체 스핀큐비트 분야는 양자점을 형성할 수 있는 소재에 원천적으로 의존하며, 회로 구동에 필요한 극저온 냉동기, 부품, 고주파 장비는 초전도 큐비트 분야와 상당부분 유사한 제품군이 있다.

2. 구성요소

우수한 스핀 큐비트 성능을 위해서는 스핀 잡음[14]이 최소화된 특수 양자소재가 필요하다. 주로 사용되는 소재로는 갈륨비소(GaAs)/알루미늄갈륨비소(AlGaAs), 인듐비소((InAs), InAb와 같은 Ⅲ-Ⅴ족 원소 화합물을 적용해 전자 움직임을 향상시킨 고전자 이동성 트랜지스터(High Electron-Mobility Transistor, HEMT)와 Ⅴ족 정제 실리콘(^{28}Si) 및 저마늄(Ge)이 있다.

부품으론 반도체 소자공정을 통해 제작된 양자점 멀티 큐비트 소자가 있고 극저온 증폭기, 극저온 CMOS 제어회로기 등도 포함된다. 또 주요 장비로는 극저온 환경 조성을 위한 희석 냉동기를 비롯해 다채널 고주파 생성기, 벡터 신호 발생기, 커스텀 프로그래밍이 가능한 고속 FPGA 기반 양자제어기 등이 있다.

3. 소재

가. 갈륨비소(GaAs)/알루미늄갈륨비소(AlGaAs) 고전자 이동성 트랜지스터

매우 높은 전자 이동도와 작은 전자 유효질량을 가진 GaAs는 양자점을 형성하는데 이상적인 재료이다. 다이렉트 밴드갭을 가져 향후 스핀 광자 인터페이스를 제작할 수 있는 장점을 지니고 있어 세계적으로도 초기 스핀 큐비트 연구는 Ⅲ-Ⅴ족 반도체로 수행된 바 있으며, GaAs 기반 소재의 대량 생산 및 Fab 기반 나노 공정의 안정화가 되어, 여전히 유효한 스핀 큐비트 소재이다.

재료를 구성하는 Ga, As와 같은 원자들은 모두 자연적으로 0이 아닌 핵스핀을 지니고 있어 양자잡음을 발생시키는 단점을 지니고 있다. 그러나 핵스핀의 영향은 시간적으로 느린 섭동[15]에 해당한다. 따라서 고속 양자상태 측정 및 피드백을 통해 결맞음 시간을 수 마이크로초로 증대시키는 기술이 존재하고 있다.

14) 스핀 잡음: 재료를 구성하는 원자핵의 스핀으로 인해 발생하는 양자잡음

15) 섭동: 역학계에서 주요한 힘의 작용에 의한 운동이, 주차적인 힘의 영향으로 인해 교란돼 일어나는 운동.

스핀 큐비트를 제작하기 위한 GaAs 기판은 높은 저온 이동도를 필요로 하고, Si 모듈레이션 도핑을 가한 n-type GaAs와 게이트를 형성하는 p-type GaAs 재료로 구분된다. 현재 연구소에서 시험 제작되는 GaAs 기판은 양자점 소자를 제작하기에 충분한 품질이 보장되는 수준이다. 다만, 전자이동도 100,000cm^2/V·s 이상의 HEMT는 전략물자로 수출 통제되는 물품이어서 현재 해외 시장에서 구하기 수월하지 않다.

표 III-3-19 대표적인 소재(GaAs HEMT) 공급처

소재명	공급처
GaAs HEMT	한국과학기술연구원, Weizmann Institute, Puedue University

나. 실리콘(^{28}Si) 원재료

실리콘은 GaAs 재료에 비해 스핀-궤도 상호작용 및 초미세 상호작용이 모두 작아, 스핀 잡음이 비교적 적게 발생하는 장점을 지닌다. 또 자연적으로 핵스핀이 0인 ^{28}Si이 약 95%, 핵스핀이 2분의 1인 ^{29}Si이 5%의 비율로 존재하며, 동위원소 정제를 거쳐 ^{28}Si으로만 이뤄진 웨이퍼로 성장하는 것이 가능하다.

^{28}Si 고체 원재료는 2차 가공을 거쳐 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)에 사용되는 SiH_4 전구체(Precursor)를 제작하거나 그 자체로 분자선 에피탁시의 소스로 대면적 기판 제작 시 이용할 수 있다. 현재 상용화되어 있는 순도 99% 이상 ^{28}Si를 수입하는 것이 가능하며, 향후 초고순도 동위원소 정제형 Si 제작을 위해 동위원소 순도 향상이 요구되고 있다.

표 III-3-20 대표적인 소재(^{28}Si) 공급처

소재명	공급처
^{28}Si	Air Liquid

다. 실리콘(^{28}Si) 기반 웨이퍼

동위원소가 정제된 순수 ^{28}Si를 포함하는 반도체 기판이다. 모든 양자점 스핀 큐비트 중 스핀 잡음이 가장 작은 큐비트 제작이 가능한 재료이기도 하다. 반도체 파운드리와 호환되는 ^{28}Si-MOS 웨이퍼, Strained-^{28}Si/SiGe 이종구조 HEMT 웨이퍼, ^{28}Si SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼 형태 모두 스핀 큐비트를 제작할 수 있다.

이와 같은 기판을 상용화한 회사는 아직까지 Intel이 유일하다. 연구개발을 위한 자유로운 재료 수급은 어려운 실정이다. 해외 연구소를 통해 소량 수급이 가능할 뿐이다. 향후 대규모 실리콘 스핀 큐비트 개발을 위해 국내 생산 및 상업화가 필요한 재료이다. 소재관련 동향으로서 2022년까지는 TU Delf-QuTech 가 공급하는 실리콘 웨이퍼를 이용해 세계선도그룹의 연구가 이루어져 왔지만, 2023년부터 유럽연합의 양자관련 소재, 장비, 부품의 수출규제 강화로 인해 소재 수급일정이 지연되고 있다.

표 III-3-21 대표적인 소재(^{28}Si 기반 웨이퍼) 공급처

소재명	공급처
^{28}Si 기반 웨이퍼	HRL Laboratory, QuTech

그림 III-3-11 반도체 스핀 큐비트용 실리콘 웨이퍼 예시



라. 저마늄(Ge) 기반 웨이퍼

Ge은 실리콘처럼 핵스핀이 0인 동위원소를 정제할 수 있는 장점을 가지고 있다. 추가적으로 p-type인 홀-스핀을 이용하면 고속 스핀제어가 가능한 소자를 제작할 수 있다. 밸런스 밴드에 존재하는 홀-스핀은 전자와 상이한 파동함수 공간분포로 인해 같은 핵스핀 밀도에도 스핀 잡음이 작은 장점이 있다. Si보다 작은 유효질량을 가져 비교적 큰 선폭의 공정으로도 양자점 소자를 제작할 수 있기도 하다.

또 전자보다 스핀궤도 상호작용이 커서 전기적으로 스핀상태를 조작할 수 있는 특징이 있다. 양자상태 조작을 위해 고주파 자기장 또는 마이크로 마그넷과 같은 추가적인 구조물이 필요한 전자스핀과 대비되는 장점이다. 그러나 결맞음 시간 자체는 실리콘 전자스핀에 비해 작은 단점이 있기도 하다. 현재 Ge/SiGe의 HEMT 구조가 주로 사용되고 있으며, 해외 연구소와 국제 협력을 통해 소량 수급이 가능하지만 국내에서 상기 소재 생산을 위한 Si/Ge 혹은 ^{28}Si MBE장치를 보유하고 있지 않다.

표 III-3-22 대표적인 소재(Ge 기반 웨이퍼) 공급처

소재명	공급처
Ge 기반 웨이퍼	QuTech, Basel University

4. 부품

가. 극저온 신호 증폭기

양자 에러 보정 및 범용 양자컴퓨팅 구현에 필수적인 양자상태 단발측정을 위해 필수적인 부품이다. 노이즈가 비교적 작은 약 4K의 극저온에서 신호를 증폭하기 위해 사용되며, 주로 SiGe 기반 HEMT 트랜지스터를 기초로 제작된다.

작동 주파수는 10MHz에서 수 천 MHz에 달하며, 약 +25dB의 증폭률이 필요하다. 향후 멀티채널 극저온 증폭의 실현을 위해 채널당 소모 전력을 최소화할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

표 III-3-23 대표적인 부품(극저온 신호 증폭기) 공급처

부품명	공급처
극저온 신호 증폭기	Cosmic Microwave Technology, Low noise factory

그림 III-3-12 Cosmic Microwave Technology사의 CITLF2



※ www.cosmicmicrowavetechnology.com/citlf2

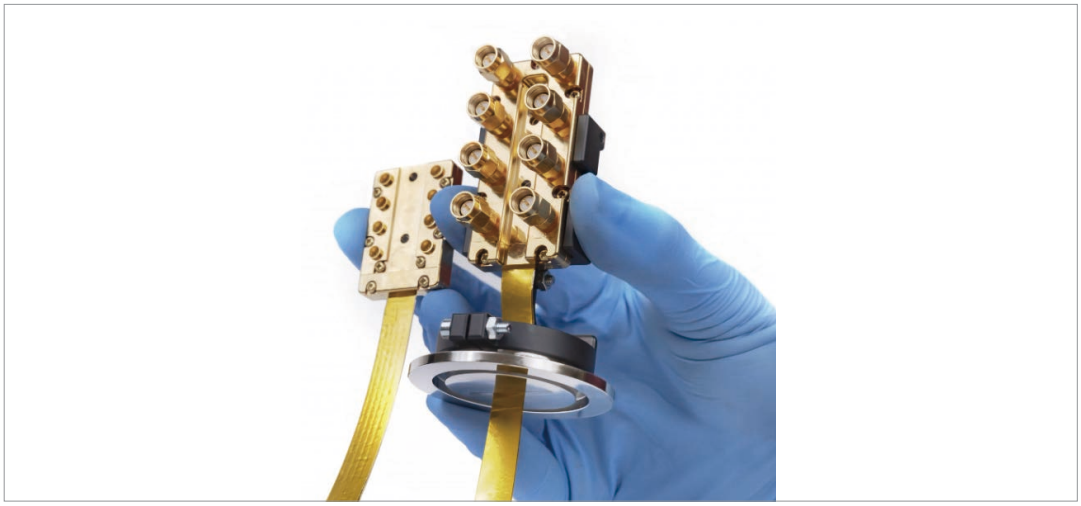
나. 극저온 고주파 초전도 케이블

다중 큐비트 제어 시에는 10GHz 이상 고주파를 전송하는 극저온 냉동기용 반강체 케이블 부품이 필요하다. 열전도도가 낮으면서도 전기전도도는 우수한 특수 케이블이 이러한 실험에 사용되고 있다. 최신 동향으로, 반도체 스핀 큐비트 분야에서는 그동안 모든 게이트 전극 라인에 10GHz 이상의 semi-rigid 케이블을 사용해 왔지만, 스핀 공명을 위한 20GHz 급 라인을 공통으로 1~2라인만을 포함하고 나머지 전극은 2GHz 미만의 낮은 주파수 대역에서 작동하는 고집적 라인을 이용하는 방법을 선호하고 있다.

표 III-3-24 대표적인 부품(극저온 고주파 초전도 케이블) 공급처

부품명	공급처
극저온 고주파 초전도 케이블	Coax Co., Delft Circuits

그림 III-3-13 Delft-circuits사의 Cri/oFlex-1 – 3



※ delft-circuits.com

다. 극저온 신호 발생기

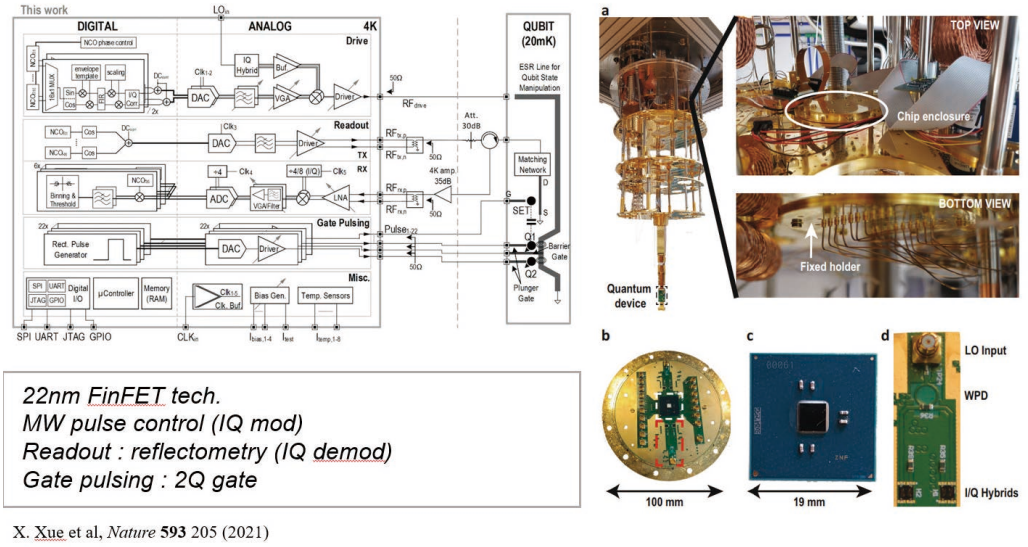
극저온 신호 발생기는 상온 계측기를 대체해 다중 큐비트 제어용 신호를 극저온에서 발생시킨다. 이로써 제어라인 수를 줄이는데 기여하는 직접회로 부품이다.

관련 기술은 아직 초기단계에 머물러 있다. Intel이 최근 반도체 큐비트 제어 및 측정을 하나의 칩으로 구현할 수 있는, 극저온 양자제어 칩(Horse Ridge)의 프로토타입을 제작했으며 현재 상용화 단계에 있다.

표 III-3-25 대표적인 부품(극저온 신호 증폭기) 공급처

부품명	공급처
극저온 신호 증폭기	Intel

그림 III-3-14 Intel사의 Horse Ridge



X. Xue et al, *Nature* **593** 205 (2021)

※ https://www.intel.com/

라. 극저온 방향성 결합기

다중 큐비트 측정용 반사신호를 입력과 출력으로 구분하고, 경로를 바꿔주는 부품이다. 반도체 스핀 큐비트의 경우 0.01~1GHz 대역 케리어 주파수를 사용하며, 이 대역의 신호를 극저온에서 감쇠 없이 결합 또는 분배하는 부품이 필수이다.

표 III-3-26 대표적인 부품(극저온 방향성 결합기) 공급처

부품명	공급처
극저온 방향성 결합기	Mini circuits, Low Noise Factory

5. 장비

가. 무냉매 극저온 희석 냉동기

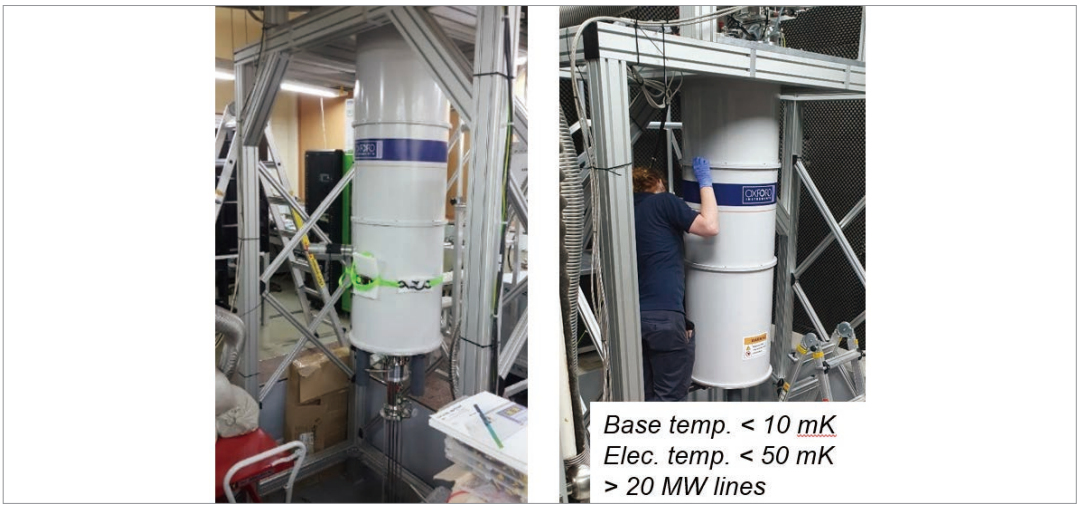
무냉매 희석 냉동기는 ^{3}He와 ^{4}He의 혼합 기체를 사용해 밀리켈빈 수준 극저온을 안정적으로 유지할 수 있는 냉각장치로서, 모든 반도체 스핀 큐비트의 극저온 양자컴퓨팅 측정을 위한 기본 플랫폼이다. 10mK급 최저온도와 약 5T의 단축 자기장 인가장치가 포함된 냉동기이다. RF 반사측정과 고주파 신호의 신속한 냉각을 위해 100mK에서 500μW의 냉각파워를 권장하고 있다. 또 다양한 극저온 부품 장착을 위해 직경 10cm × 높이 25cm 이상의 시료공간 확보를 필요로 한다.

무냉매 극저온 희석 냉동기는 초전도 큐비트 분야에서 사용하는 극저온 희석냉동기와 많은 부분 유사한 스펙을 요구한다. 차이점으로는 초전도 큐비트에 비해 통상적으로 높은 주파수 (~20GHz)를 요구하는 특수케이블을 적어도 2라인을 설치해야 하며, 스핀 큐비트 동작을 위한 외부 자기장이 필수적이다. 그동안 자기장은 초전도 전자석을 이용하였지만, 이 경우 큐비트 소자와 극저온 부품을 설치할 공간이 부족하여 이 방법으로는 큐비트 확장성이 떨어진다는 단점이 있다. 그러므로 향후 영구자석을 이용한 극저온 자기장 인가법의 발전이 요구된다.

표 III-3-27 대표적인 장비(무냉매 극저온 희석 냉동기) 공급처

장비명	공급처
무냉매 극저온 희석 냉동기	Oxford Instruments, Bluefors

그림 III-3-15 Oxford Instruments사의 Triton Dilution Refrigerator



※ Oxford Instruments

나. 고안정도 정전압 발생기

양자점을 형성하는 정전퍼텐셜을 형성하기 위한 게이트 전극 인가용 전압소스이다. 상온에서 5μVrms 미만의 전압요동을 요구한다. 이를 위해 배터리를 전원으로 하는 플로팅형 전압소스와 AC 전원을 DC 전원으로 변환하는 그라운드형 소스가 있다. 멀티 스핀 큐비트의 경우, 많은 게이트 전극에 독립적인 전압을 요구하므로 멀티채널 모듈형 전압소스가 필수적이다.

표 III-3-28 대표적인 장비(고안정도 정전압 발생기) 공급처

장비명	공급처
고안정도 정전압 발생기	Standford Research Systems, Bluefors, Basel precision instruments, Stahl-electronics

다. 고주파 신호 발생기

큐비트 논리게이트는 공명 고주파 펄스 인가를 통해 라비 진동(Rabi oscillation)을 발생시켜 형성한다. 이때 스핀 큐비트는 통상 12~18GHz의 케리어 주파수를 생성하는 고주파 발생기가 필요하다. 냉각기 내부에서 약 -30dB 이상의 감쇠를 고려해 최대 +20 dBm 이상의 파워를 생성할 수 있어야 한다.

펄스 변조는 I/Q 변조 기능이 내장되어 있는 벡터 신호 발생기를 이용할 수 있다. 그러나 채널당 단가가 높은 단점이 있어, 통상적으로 연속 신호 발생기와 외장형 I/Q 변조기를 외부에서 결합해 사용하곤 한다. 향후 수백 큐비트 이상의 멀티 큐비트 제어를 위해 채널당 단가를 낮추는 방향의 연구개발이 필요하다.

표 III-3-29 대표적인 장비(고주파 신호 발생기) 공급처

장비명	공급처
고주파 신호 발생기	Keysight, AnaPico

그림 III-3-16 AnaPico사의 APMS40G-4



※ anapico.com

라. 다채널 임의함수 발생기

고주파 신호 발생기의 연속 출력을 펄스 출력으로 변환하기 위한 베이스밴드 신호를, 다양한 파형 포락선(Envelope)으로 생성하기 위한 장비다. 고속 논리게이트 스위칭을 위해 1GSa/s의 샘플링 속도가 필수이며 멀티 큐비트 제어를 위해 다채널이 요구된다. 또 연속적인 논리게이트와 높은 회로심도(Circuit-Depth)를 구현하기 위해 파형 메모리는 최소 수백 Mbyte가 필요하다. 순차적인 펄스 시퀀싱과 피드백 제어를 위해 다이나믹 브랜칭(Dynamic Branching) 기능이 요구되기도 한다.

임의함수 발생기 출력 중 일부는 벡터 변조 없이 베이스밴드 신호 자체로 스핀 큐비트 쌍의 교환 상호작용을 이용해, 이중 큐비트 논리게이트를 구현하는 데 사용되기도 한다.

표 III-3-30 대표적인 장비(다채널 임의함수 발생기) 공급처

장비명	공급처
다채널 임의함수 발생기	Keysight, Tektronix, Zurich Instruments

그림 III-3-17 Zurich Instruments사의 HDAWG



※ zhinst.com

마. 다채널 양자제어기

다채널 양자제어기는 다양한 고주파 장비의 신호 타이밍을 동기화해 논리게이트를 구성하고 큐비트 단발측정 신호를 분석해 큐비트 상태를 0, 1로 분별하며, 측정 결과에 따라 고속 양자피드벡과 양자프로그램을 실행하는 다목적 장비이다. 양자컴퓨팅 측정시스템의 전체 신호를 관장하는 장비라 할 수 있다.

FPGA를 기반으로 사용자가 하드웨어 프로그래밍을 구성할 수 있고, 대기시간이 200ns 미만으로 고속 피드백이 가능해야 한다. 상용화된 장비를 취급하는 소수의 업체가 존재한다.

표 III-3-31 대표적인 장비(다채널 양자제어기) 공급처

장비명	공급처
다채널 양자제어기	Quantum Machines, Zurich Instruments

그림 III-3-18 Quantum Machines사의 OPX+



※ quantum-machines.co

바. 다채널 업-다운 컨버터

연속 고주파 신호와 임의파형 발생기의 베이스밴드 신호를 I/Q 입력해 큐비트 논리게이트를 위한 변조된 펄스 파형을 생성하는 장비이다. 벡터 변조(I/Q 변조)를 통해 주파수·위상·진폭의 변조가 가능하며 다중 큐비트 제어를 위해 다채널이 필수이다. 또 입력 케리어(LO oscillator) 주파수는 스핀 큐비트의 경우 통상적으로 12GHz 이상 대역을 사용하기 때문에, 본 장비는 최소 18GHz를 지원하는 것이 바람직하다.

표 III-3-32 대표적인 장비(다채널 업-다운 컨버터) 공급처

장비명	공급처
다채널 업-다운 컨버터	Quantum Machines

그림 III-3-19 Quantum Machines사의 Octave



※ quantum-machines.co

6. 기타

가. 범용 측정기기 제어 소프트웨어

양자컴퓨팅 측정 플랫폼은 상기한 다양한 측정기기 간 통신을 제어하고 실험요건에 맞는 파라미터 스윕 등을 자동으로 수행하는 범용 제어 소프트웨어가 필요하다. 상용으로 개발된 측정 소프트웨어는 다음과 같다.

표 III-3-33 대표적인 범용 측정기기 제어 소프트웨어 공급처

제품명	공급처
범용 측정기기 제어 소프트웨어	Keysight

제4절 이온트랩 양자컴퓨팅

1. 요점

이온트랩은 초고진공 환경 내에서 전기장 혹은 전기장과 자기장을 이용하여 전하를 띤 이온을 포획하는 장치를 말한다. 포획된 이온의 내부 에너지 중 안정한 두 에너지에 정보를 부호화(Encoding)하고 큐비트로서 사용하며 양자상태 제어를 위해서 레이저나 마이크로파를 이용한다.

이온트랩 양자컴퓨팅은 전기장만으로 이온을 포획하는 폴 트랩 (Paul Trap)이 주로 사용된다. 전기장만으로 이온을 포획할 때 언쇼 정리 (Earnshaw's Theroem)에 의해 정전기장만으로는 전하를 띤 입자를 안정적으로 포획할 수 없으므로, 이온을 포획할 때는 RF (Radio Frequency) 주파수로 빠르게 진동하는 전기장과 정전기장을 함께 사용하여 포획한다. 포획된 다수의 이온들에 선택적인 레이저 접근을 용이하게 하기 위해 주로 선형 이온트랩 (Linear Ion Trap)을 사용하여 이온들이 한 줄로 나열되게 포획하는데, 이를 위해 한 쌍의 RF 전극을 통해 radial 방향의 포텐셜우물을 생성한다. 반면 radial 방향에 수직한 방향으로는 포텐셜우물이 생성되지 않기 때문에 이온이 탈출할 수 있는 axial 방향으로는 DC 전극을 활용하여 포텐셜우물을 생성하여 안정적으로 포획되도록 한다.

이온트랩 양자컴퓨팅은 큐비트의 확장이 용이하고 다른 플랫폼 대비 결맞음 시간이 긴 특징이 있다. 비록 측정 데이터의 외삽을 통해 예측된 결과이지만, 단일 이온에서 결맞음 시간이 1시간 이상으로 보고된 바 있다.[16] 또한 포획된 이온들은 쿨롬힘에 의해 상호 연결성이 매우 높다. 이러한 높은 연결성으로 인해 서로 공유하는 운동 모드들을 활용한 레이저 조작으로 같은 포텐셜우물에 포획된 이온이라면 아무리 멀리 떨어져 있어도 양자 얽힘을 구현해낼 수 있다. 이러한 장점들로 인해 대표적인 양자컴퓨팅 플랫폼으로 각광받고 있으며 여러 기업과 연구진들이 경쟁적으로 이온트랩 기반 양자컴퓨터를 개발 중이다.

대표적인 선두 그룹 중 IonQ는 이미 클라우드 기반 계산 서비스를 사용자들에게 제공하여 양자 알고리듬을 수행할 수 있도록 서비스하고 있으며, application oriented benchmarking으로 #AQ=29를 달성했음을[17] 보고하여 누구나 클라우드 서비스를 이용해 29개의 큐비트로 양자 알고리듬을 수행할 수 있음을 시사했다. Quantinuum은 현 양자 플랫폼 중 가장 큰 양자 부피 2^{19}를 달성[18]하

16) Pengfei (2021)

17) Jwo-Sy Chen et al. (2023)

18) https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219

였고, 기존의 선형적이었던 H1 칩과 전혀 다른 경주로(Race Track) H2 칩 개발을 통해 완벽한 QCCD 양자컴퓨팅 장치[19]를 보고하였으며, 이를 통해 32개 큐비트의 완전연결성 및 GHZ 상태 생성 등 이미 H1에서 달성한 기록을 빠르게 넘어서고 있으며 아직 H2 칩이 개발된 지 얼마 되지 않은 시점인 만큼 앞서 언급한 기록들도 조만간 다시 갱신될 것으로 보인다. 또 다른 선두 그룹인 오스트리아의 Innsbruk 그룹과 연관이 많은 ATQ 회사는 상대적으로 앞선 두 회사보다는 뒤처져 보이지만, 기술적 노하우는 이들과 비교해 크게 뒤처지지 않으므로 언제든 이 두 회사와의 기술격차를 좁힐 수 있을 것으로 보인다.

2. (주요기술)의 구성요소

이온트랩 양자컴퓨팅을 구현하기 위해서는 크게 이온트랩 장치와 이온트랩 장치를 담고 있는 진공 챔버 부분, 이온의 쿨링 및 양자 상태를 제어하는 레이저 모듈 부분, 이온을 포획하기 위해 필요한 전기장 혹은 레이저의 주파수 변조에 필요한 신호를 공급하는 전기 장치 모듈로 구성되어 있다.

진공챔버는 이온트랩을 10^{-10} Torr 이하의 초고진공 환경 내에 설치함으로써 포획된 이온과 주변환경과의 상호작용을 최소화시켜 독립된 환경에서 양자상태를 제어할 수 있도록 한다. 양자 연산을 수행하는 동안에는 레이저를 통한 냉각을 수행할 수 없기 때문에 연산 시간이 길어지게 되면 이온 가열로 인해 양자 게이트 충실도가 감소하게 된다. 이에 대한 해결책으로 진공 챔버를 초저온 환경에 놓는 방법도 있으며 이 경우 초저온 환경을 만들기 위한 장비들도 포함되게 된다.

레이저 모듈은 중성 원자를 이온화 시키는 이온화 레이저, 이온을 안정적으로 포획하기 위해 도플러 냉각용 냉각 레이저, 낮은 확률로 원하지 않는 전이 상태로 이동한 전자를 다시 원하는 양자상태로 회복시키기 위한 repumping 레이저 등의 연속파(Continuous Wave) 레이저와 강한 레이저 빔과 짧은 상호작용을 위한 펄스 레이저 등을 포함한다. 이들 모듈에는 또한 레이저의 주파수를 변조시키거나 빠르게 켜고 끌 수 있도록 하는 광학 변조 장치들, 각종 거울과 렌즈, 편광기 등의 광학 부품들을 포함한다.

전기 장치 모듈은 FPGA 같은 실험 컨트롤러와 각종 라디오파/마이크로파 신호발생기와 증폭기, 신호 스위치 및 정전압 공급용 DAC 보드, PMT나 CCD 등의 측정용 장비 등을 포함한다. 마이크로 트랩과 구획이 나누어진 블레이드 트랩 같은 경우 이온 체인의 길이에 따른 정전기 포텐셜 우물의 shaping이나 이온을 다른 구역으로 이동시키는 셔틀링을 위해서는 많은 수의 전극을 제어할 수 있어야 하므로, 다채널 DAC 보드를 사용한다.

19) S. A. Moses et al. (2023)

3. 소재

가. 원자 소재

이온트랩용 양자컴퓨팅에서 원하는 이온을 포획하기 위해서는 순수한 원자 물질이 필요하다. 이온을 포획할 때는 진공챔버에 탑재된 원자 소재를 가열하거나 레이저 어블레이션(Laser Ablation)을 통해 중성원자가 소재에서 떨어져 나가도록 한다. 그 후, 중성원자를 이온화시킬 적절한 주파수를 갖는 레이저를 원하는 포획 위치에 조사하여 중성원자가 포획 위치에서 이온화되도록 한다.

이때 쿨링용 레이저를 함께 조사하면 중성 원자가 이온화되어 포텐셜 우물에 갇히자마자 쿨링용 레이저와의 상호 작용을 통해 이온의 운동에너지가 감소하게 되고 포텐셜 우물을 탈출하지 못하고 안정적으로 포획되게 된다. 정제하지 않은 원자 소재를 탑재하더라도 동위원소마다 상호작용하는 레이저의 주파수가 다르기 때문에 레이저의 주파수를 조정하면 특정한 동위원소만 포획할 수 있다.

표 III-3-34 대표적인 소재(원자) 공급처

소재명	공급처
원자	㈜하나로티알

나. 마이크로트랩 제작용 웨이퍼

마이크로트랩은 MEMS 기술을 바탕으로 반도체 공정 기술을 이용한다. 대부분 공정 성숙도가 높은 Si wafer를 많이 사용하나, Si의 경우 양자연산에 사용하는 레이저와 상호작용하여 전하를 띄게 되면 이온을 포획하는 포텐셜우물을 왜곡할 수 있다는 단점이 있다. 이러한 단점을 피하고자 glass wafer에 스퍼터링을 통해 전극을 형성하여 마이크로트랩을 제작하기도 한다.

표 III-3-35 대표적인 소재(마이크로트랩 제작용 웨이퍼) 공급처

소재명	공급처
마이크로트랩 제작용 웨이퍼	㈜비엠아이티, 웨이퍼코리아

4. 부품

가. 신호 증폭기

이온트랩 양자컴퓨팅에는 이온을 포획을 위한 전기장 생성용뿐만 아니라 레이저 주파수를 변조할 때 필요한 많은 수의 라디오파/마이크로파 신호 발생 장비가 필요하다. 신호발생기만으로는 필요한 신호 세기를 달성할 수 없어 대부분 신호 증폭기와 함께 사용하게 된다.

표 III-3-36 대표적인 부품(신호 증폭기) 공급처

부품명	공급처
신호 증폭기	Mini-circuits

나. 광섬유

광섬유는 포획된 이온의 위치에 맞게 레이저를 조사하거나 포획된 이온에서 방출된 광자를 포획하여 먼 거리까지 안정적으로 이동시키기 위해 사용한다.

표 III-3-37 대표적인 부품(광섬유) 공급처

부품명	공급처
광섬유	Coastal Connections, Thorlabs

다. 음향 광학 변조기

음향 광학 변조기는 석영 유리와 같은 재료에 음파를 가해 석영 유리 내에 진행하는 레이저를 변조하여 굴절시키는 장비이다. 음향 광학 변조기 내부에 트랜스듀서가 내장되어 있어 라디오파로 가해 음파를 발생시킨다. 변조기 내부를 진행하는 레이저 광선은 이 음파와 상호작용하여 여러 order로 굴절되는데, 주로 빔의 세기가 가장 센 일차(1st order) 변조 빔을 사용한다. 이온의 양자상태를 제어할 때 빠르게 레이저를 켜고 끌 수 있는 스위치 기능과 레이저 빔의 세기를 조절하기 위해 주로 사용한다.

표 III-3-38 대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
음향 광학 변조기	IntraAction, AA Group

라. 전자 광학 변조기

전자 광학 변조기는 입력 레이저를 변조하여 진폭, 주파수 및 위상 변화를 일으키는 장비이다. 주로 하나의 레이저로 이온의 다른 초미세 에너지 준위까지 함께 상호작용을 일으키기 위한 수 GHz의 주파수 변조를 얻거나, 빠르게 편광을 변화시켜 레이저 광선의 스위칭을 하기 위해 사용한다.

표 III-3-39 대표적인 부품(전자 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
전자 광학 변조기	New Focus, Eospace, QUBIG

마. 라디오파/마이크로파 스위치

라디오파/마이크로파 스위치는 이온트랩 양자컴퓨팅에서 게이트를 구현하기 위해 광학 변조기들에 가해지는 라디오파/마이크로파를 빠르게 차단하고 공급하는 데에 사용한다. 신호발생기를 통해 직접 신호를 켜고 끄게 되면 신호발생 기기와의 통신 시간으로 인해 스위칭에 수 밀리초 정도가 소요되게 된다. 이온트랩 양자컴퓨팅에 필요한 스위칭 시간은 최대 수 마이크로초이므로, 이러한 스위칭 시간을 만족하기 위해 TTL 신호를 입력으로 받아 빠른 반응속도로 스위칭을 할 수 있는 라디오파/마이크로파 스위치를 사용한다.

표 III-3-40 대표적인 부품(라디오파/마이크로파 스위치) 공급처

부품명	공급처
라디오파/마이크로파 스위치	Mini-circuits, Analog Devices, American Microwave Corporation

5. 장비

가. 다이오드 레이저

이온트랩 양자컴퓨팅에서 다이오드 레이저는 이온 포획을 위한 중성원자 이온화, 도플러 냉각을 이용한 이온의 냉각, 낮은 확률로 원하지 않은 상태로 전이된 전자를 원하는 상태로 다시 되돌리는 repumping 용으로 사용한다.

표 III-3-41 대표적인 장비(다이오드 레이저) 공급처

장비명	공급처
다이오드 레이저	Moglabs, TOPTICA Photonics

나. 펄스 레이저

이온트랩에서 펄스 레이저는 라만 전이를 이용한 도플러 냉각 한계 이상의 바닥 상태까지의 냉각, 스핀 의존적인 힘을 가해 쌍큐비트 양자얽힘 생성, 좁은 펄스 폭을 이용한 단일 광자 생성용으로 주로 사용된다.

표 III-3-42 대표적인 장비(펄스 레이저) 공급처

장비명	공급처
펄스 레이저	Coherent

다. 단일광자 검출기

포획된 이온의 양자상태 측정은 양자상태 종속적인 광자 측정을 통해 이루어진다. 검출기에 특정 개수 이상의 광자가 관측되면 해당 이온의 양자상태를 $|1\rangle$ 상태로, 그렇지 않은 경우는 $|0\rangle$ 상태로 양자상태를 결정한다. 높은 충실도를 갖는 양자상태 측정을 위해서는 단일 광자 수준의 신호를 검출할 수 있는 검출기가 필수적이다.

일반적으로 이온트랩 관련 그룹에서는 이를 위해 photonmultiplier tube (PMT)나 avalanche photodiode (APD) 등을 활용한다. 많은 수의 이온의 양자상태 측정을 위해서는 각각의 이온에서 방출되는 광자를 다채널 단일광자 검출기의 각 채널에 매핑시켜 각각의 이온의 양자상태 측정에 사용한다.

표 III-3-43 대표적인 장비(단일채널 단일광자 검출기) 공급처

장비명	공급처
단일채널 단일광자 검출기	Hamamatsu

표 III-3-44 대표적인 장비(다채널 단일광자 검출기) 공급처

장비명	공급처
다채널 단일광자 검출기	Hamamatsu

가장 흔히 사용되는 이온인 $^{171}Yb^{+}$의 양자상태 측정용 광자의 파장은 369nm로, 자외선 영역의 파장이다. 일반적으로 자외선 영역의 단일광자 검출기는 가시광선 영역대비 낮은 양자효율 (quantum efficiency)로 인해 가시광선 영역의 다른 이온들 수준의 높은 양자상태 측정 충실도를 달성하기 힘들다. 단일광자 검출기의 성능 발전이 있다면 양자상태 상태 측정 충실도를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

라. 파장 측정기

레이저를 이용하여 양자상태를 제어하는 이온트랩 양자컴퓨팅 특성상 레이저를 정확한 주파수로 제어해야할 필요가 있다. 파장 측정기를 이용하여 레이저의 주파수를 측정하고, 원하는 목표 주파수와의 차이를 이용한 PID 제어를 통해 안정한 레이저 주파수를 확보할 수 있다.

표 III-3-45 대표적인 장비(파장 측정기) 공급처

장비명	공급처
파장 측정기	Highfinesse

마. 이미징 장치 (Imaging Devices)

포획된 이온의 존재 여부 혹은 초기 셋업의 광학적 정렬을 위해서는 흔히 공간 정보를 활용할 수 있는 카메라 기반의 장비들을 주로 사용한다. 카메라 장비를 통해 다중 이온의 양자 상태를 측정에 활용할 수도 있기 때문에 일반적으로 높은 양자 효율과 낮은 다크 커런트를 갖는 장비들을 주로 사용한다.

표 III-3-46 대표적인 장비(이미징 장치) 공급처

장비명	공급처
이미징 장치	Thorlabs, Andor

바. 신호발생기 (Signal Generator)

신호발생기는 이온을 포획하기 위한 RF 전압 혹은 광학 변조 장치에 공급하는 변조 신호를 발생시키기 위해 사용된다.

표 III-3-47 대표적인 장비(신호발생기) 공급처

장비명	공급처
신호 발생기	Anapico, Stanford Research Systems, Windfreak Technologies

사. ARTIQ

ARTIQ는 Advanced Real-Time Infrastructure for Quantum physics의 약자로, 장비 내부에 AOM, AOD등의 신호를 공급하기 위한 DDS 보드, 각종 측정에 필요한 ADC(Analog-to-digital) 보드, 여러 장비 및 이온트랩 장치의 전극에 전압을 공급하기 위한 다채널 DAC(Digital-to-analog) 보드, 라디오파/마이크로파 신호 증폭기 등을 포괄하는 전기 기기 복합 장비이며, 이들을 하나의 장비로 통합하여 제어할 수 있도록 고안된 장비이다. 이온트랩 양자컴퓨팅 그룹인 NIST와의 파트너 계약으로 개발이 이루어졌으며, 이온트랩 양자컴퓨팅에 필요한 대부분의 장비들이 탑재되어 있다. 그 특수성으로 인해 다른 장비들과 따로 분류하여 서술하였다.

표 III-3-48 대표적인 장비(ARTIQ) 공급처

장비명	공급처
ARTIQ	M-Labs

6. 기타

가. 시뮬레이션 소프트웨어

Altsoft사의 COMSOL multi physics는 유한요소법(finite element method) 시뮬레이션 소프트웨어로, 이온트랩의 전기장 시뮬레이션에 주로 사용되어 이를 통해 트랩 안정도를 계산하거나 이온트랩 장치 구조 및 크기 설계, 이온을 움직이기 위한 DC 전압 세트 등을 결정하는 데에 활용된다.

Zeemax는 광학 설계 및 분석에 특화된 소프트웨어로, 단순한 기하 광학 시뮬레이션부터 가우시안 빔 시뮬레이션, 점확산함수(point spread function) 및 에어리 원반에 대한 정보를 얻을 수 있다. 광학 셋업에 필요한 렌즈 시스템, 빔 모양과 크기 등을 얻기 위해 사용한다.

Autodesk사의 Inventor는 기계 설계에 특화된 CAD(Computer Aided Design) 프로그램으로 주로 이온트랩을 탑재할 진공 챔버의 기계적 설계와 광학 모듈들의 광경로를 설정하기 위한 각종 거울 및 렌즈등의 위치 및 크기를 설계하는 데에 사용된다.

표 III-3-49 대표적인 시뮬레이션 소프트웨어 공급처

제품명	공급처
시뮬레이션 소프트웨어	ALTSOFT, Ansys, Autodesk

제5절 양자광학 기반 양자컴퓨팅

1. 요점

광학 기반 양자컴퓨팅 기술은 양자 광원을 기본 큐비트(Quantum bit, Qubit)로 사용해 정보를 인코딩하고 연산에 이용하는 기술이다. 이를 위해서는 기본적으로 양자 광원과 양자검출기, 양자상태 제어 등이 필요하나 현재의 기술 수준으로는 실용적인 문제를 해결할 수 있는 의미 있는 양자컴퓨팅 수행이 어렵다. 그러나 양자광학 분야의 빠른 발전으로 인해 특정 문제에 대해서는 슈퍼컴퓨터보다 훨씬 빠른 계산이 가능하다는 사실이 실험적으로 입증되었다.[20)]

양자컴퓨터와 양자 시뮬레이터의 계산 체계는 고전 컴퓨터의 그것과 근본적으로 다르다. 따라서 기존 컴퓨터의 기능을 이들이 모두 대체할 것으로 보이지는 않는다. 그러나 중요한 몇몇 분야에서는 기존보다 효율적이고 크게 향상된 연산이 가능할 것으로 기대되고 있으며, 보다 구체적인 응용 및 실용 분야에 대해서는 여전히 연구를 진행 중인 상태이다.

이처럼 실체가 완전히 드러나지 않은 분야임에도 양자컴퓨터와 양자시뮬레이터는 한 집단에서만 개발에 성공해도 글로벌 차원에서 힘의 균형을 무너뜨릴 수 있는 파괴적인 기술로 평가받고 있다. 이것이 많은 국가와 기업에서 다양한 방식으로 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터 개발을 위해 노력하고 있는 이유이기도 하다.

우리나라 양자광학 연구의 질적 수준은 세계적인 수준과 견줄 정도인 것으로 평가되고 있다. 우수한 연구 역량을 보유한 국내의 광학·포토닉스·광통신 인프라 및 인력은 양자광학 기반 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터 개발에 그대로 활용될 수 있다. 연구자들의 관심도 급격히 증가하는 추세이다. 이런 점을 감안할 때, 해당 분야를 국가 차원에서 전략적으로 육성하는 것은 미래를 위한 효율적인 투자가 될 전망이다.

최근 광기반 양자 컴퓨터를 개발중인 Xanadu (캐나다), PsiQuantum (미국), Quandela (유럽) 등에서는 주로 포토닉스 소자를 이용해 양자 상태를 제어하고 있고, 이 소자의 퀄리티가 양자 컴퓨터 성능에 큰 영향을 미친다. 이 장에서는 광기반 양자 컴퓨터에 필요한 기본적인 소재, 부품, 장비에 더해 양자 컴퓨팅 상용화에 필수인 포토닉스 소자를 제작 해주는 파운드리 서비스 업체까지 다룬다.

20) 초전도체 기반 연산 결과, 양자이득(Quantum advantage) 실험 결과 등을 가리킨다.

2. 구성요소

양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술에 필요한 소부장은 크게 양자광원 생성용, 양자광원 조작용, 양자광원 검출용 등으로 나뉜다.

양자광원 생성은 기본적으로 광자와 매질의 상호작용을 이용한다. 우선 확정적 단일광자 생성의 경우, 원하는 파장에 해당하는 에너지 준위차를 가진 물질을 이용하거나 현실적으로 공정 기술이 이미 개발되어 있는 물질을 많이 이용한다. 광자쌍을 비롯해 둘 이상 단일광자가 얽힌 상태를 만들기 위해서는, 비선형 물질을 많이 사용하는데 이 물질을 '양자소재'라 부를 수 있다. 광자-매질 상호작용을 이용하지 않는 경우도 있다. 양자간섭을 통해 얽힘 양자광원을 만드는 방법인데 이는 양자소재를 이용하지 않는 방법이기에 여기에서는 소개하지 않는다.

양자광원 조작은 자유공간에서 광자를 보내며 주로 수행해왔다. 여기에는 주로 소재보다 부품 및 장비가 필요하다. 빠르고 정확한 조작을 위해 고가의 부품과 장비가 요구되는 것이다. 이러한 일련의 과정을 집적광학계에서 구현하고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 양자광원은 특히 단일광자 수준의 미세한 빛을 이용하는 탓에 광손실에 민감해 집적광학계에서 양자광원을 이용한 경우, 아주 낮은 광손실을 가지는 도파로 소재가 필요한 상황이다.

또 양자광원 위상 조작을 위해서는 도파로 굴절률 조절이 필수인데, 이 경우 2차 비선형성을 이용해 전기광학(Electro-Optic) 효과가 큰 물질이 유리하다. 물질 특성상 2차 비선형성이 없는 물질은[21] 임의로 이러한 성질을 더해주거나 열을 이용해 굴절률을 조절해 준다. 그러나 이러한 방법은 광손실 및 변조 속도 측면에서 전기광학에 뒤쳐질 수밖에 없다.

단일광자 수준 미세한 빛의 검출은 가이거 모드로 동작하는 아발란치 포토 다이오드(Avalanche Photo Diode, APD)를 널리 사용해왔다. 이는 펠티어 소자를 이용한 냉각으로도 잡음을 최소화할 수 있어 시스템 구동이 간편한 장점이 있다. 그러나 Si APD와 InGaAs APD의 단일광자 측정효율이 각각 70%, 20% 수준에 불과해 양자컴퓨팅 적용에는 부족하다는 평가를 받고 있다.

최근에는 초전도 나노와이어(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD) 기술의 급속한 발전이 이뤄지고 다수의 상용화 사례가 산출되면서, 양자컴퓨팅 연구에 활용하는 경우가 많아지고 있다. 4K 수준 극저온 냉각기를 필요로 하는데다 시스템 구성이 복잡하다는 단점도 있다. 그러나 이론적으로는 100% 수준의 단일광자 검출효율 실현이 가능하고, 상용제품 경우에도 85% 수준

21) 예를 들어 실리콘, 실리카, 질화실리콘, 다이아몬드 등

을 구현하고 있어 활용범위가 급격히 넓어지고 있다. 근래에 들어 광도파로에 집적화된 SNSPD가 보고되는 등 양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술이 급속도로 발전하고 있는 상황이다.

한편 많은 양자광학 기반 양자컴퓨팅 프로토콜은 단순히 단일광자 검출만이 아니라 몇 개의 단일광자가 검출됐는지 구분하는 광자 개수 구별측정(Photon Number Resolving Detection, PNRD) 기술을 필요로 한다. 상기한 APD와 SNSPD의 경우 단일광자 존재 유무만을 측정할 수 있을 뿐 몇 개 단일광자가 검출됐는지는 알 수 없기 때문이다. 이들을 다중화해 일정 수준의 PNRD를 구현할 수는 있으나, 이러한 방식은 검출효율 저하를 수반할 수밖에 없다. 따라서 트랜지션 에지 센서(Transition Edge Sensor, TES)라는 초전도 소자를 이용해 PNRD를 구현하는 방법이 연구되고 있고, 최근 10개 이상 단일광자 개수를 구별하는데 성공하며 급격한 기술 발전을 이뤄나가고 있다.

표 III-3-50 양자광학 기반 양자컴퓨팅 주요 소부장

구분	양자광원 생성	양자광원 조작	양자광원 측정
소재	Si, SiO_2, SiN, LN, AlN, Ta_2O_5		
부품	광섬유 PPKTP	광학 부품 optics (BS, WPs 등)	APD
장비	양자광원 장비 (상용)		단일광자 검출기, TCSPC

3. 소재

가. 실리콘(Si)

실리콘은 기존 반도체 공정 기술에 최적화된 물질로, 낮은 가격과 이미 구축된 인프라로 인해 대량 생산이 용이하다는 장점이 있다. 물질 자체의 광학적 단점을 여러 기술로 극복하며 현재까지도 집적광학계에서 가장 널리 쓰이고 있다. 이 물질 자체가 가시광선에선 투과되지 않아 보통 통신파장에서만 사용된다. 또 사광자 혼합(Four Wave-mixing) 등의 비선형 현상을 이용해 얽힘 광원 생성 및 양자상태 제어에 활용된다.

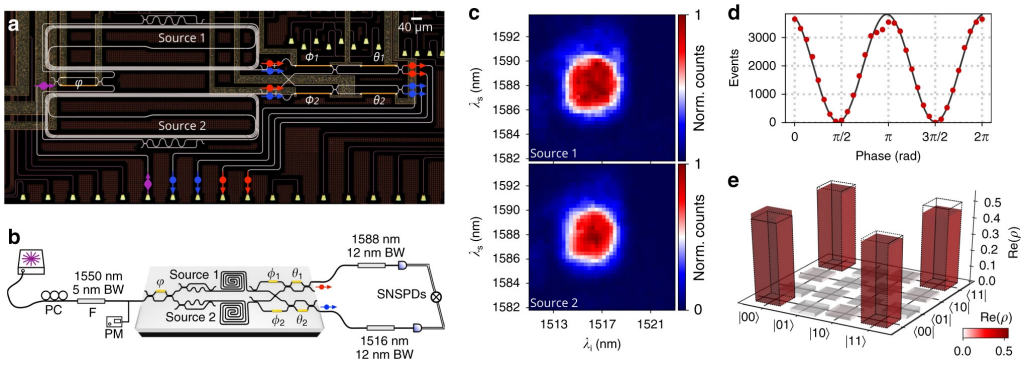
광자와 물질의 상호작용을 이용하는 것이기에, 비선형도가 중요하고 광손실이 낮아야 한다. 제조사에 따라 비선형도, 광손실이 조금씩 다를 수 있으나 기본적으로 물질 자체의 특성이기 때문에 그 차이는 대동소이한 편이다.

현재 실리콘 제조 및 공정 기술은 이미 정점에 있다. 따라서 소재 측면에서의 기술 발전 보다는 광학 응용에 쓰이기 위한 방향성 확립 및 인프라 확충이 필요한 상황이다.

표 III-3-51 대표적인 소재(Si) 공급처

소재명	공급처
Si	Silicon Valley Microelectronics, University Wafer

그림 III-3-20 온칩 실리콘 도파로를 이용한 구별 불가능한 양자광원 구현



※ Paesani et al. (2020)

나. 실리카(SiO_2)

광섬유에 쓰이는 산화 실리콘, 혹은 실리카는 광손실이 매우 낮아 양자광학에 폭넓게 쓰인다. 광섬유 형태로 빛의 방향성을 제어할 수 있고, 빛의 도파관으로써 광자와의 상호작용으로 사광자 혼합을 발생시킨다. 따라서 새로운 얽힘 광원을 생성하는데 쓰일 수 있다. 또 굴절률이 1.45로 상대적으로 낮아 집적광학계에서 다른 박막의 전반사를 통해 광도파를 도와주는 절연체(Insulator) 로도 많이 쓰인다.

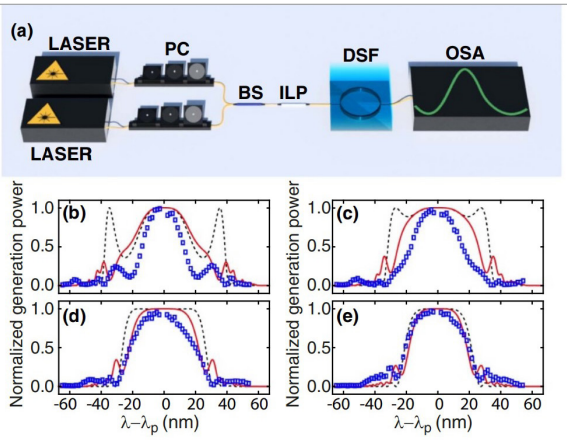
실리카는 기본적으로 넓은 파장에 걸쳐 투과율이 아주 높다. 광섬유에 사용되는 실리카의 광손실은 0.2dB/km 수준으로 매우 낮고, 실리콘 웨이퍼를 산화시켜 만든 열산화물(Thermal Oxide)도 비슷한 수준의 낮은 광손실을 보인다. 현재는 박막 광손실이 병목현상을 보여 실리카 광손실이 크게 중요하지 않으나, 장기적으로는 추가적인 실리카 개발도 고려해야 할 것이다.

실리카 공정 기술은 거의 완성 단계로 평가된다. 빠르게 실리콘을 산화시킬 수 있는 대신 성능은 조금 낮은 '습식 산화(Wet Oxidation)' 방식과 실리콘 산화 시간은 상대적으로 오래 걸리나 성능은 좋은 '건식 산화(Dry Oxidation)' 방식의 장점만을 결합한 새로운 방식이 개발 중이다. 그러나 아직은 과거의 산화 방식들이 주로 사용되고 있다.

표 III-3-52 대표적인 소재(SiO_2) 공급처

소재명	공급처
SiO_2	Rogue Valley Microdevices, Silicon Valley Microelectronics, University Wafer

그림 III-3-21 광섬유를 이용한 사광자 혼합



※ Lee et al. (2021)

다. 질화 실리콘(SiN)

질화 실리콘은 실리콘에 비해 넓은 투과 영역과 낮은 광손실을 가진다. 집적광학계 기반 양자소자 제작에 널리 쓰일 후보군 중 하나로 부상하고 있다. 넓은 투과 영역으로 인해 사용 광원을 통신 파장에 국한시키지 않는 장점이 있고, 광손실이 낮아 온칩 딜레이 라인 제작에 유리하기도 하다.

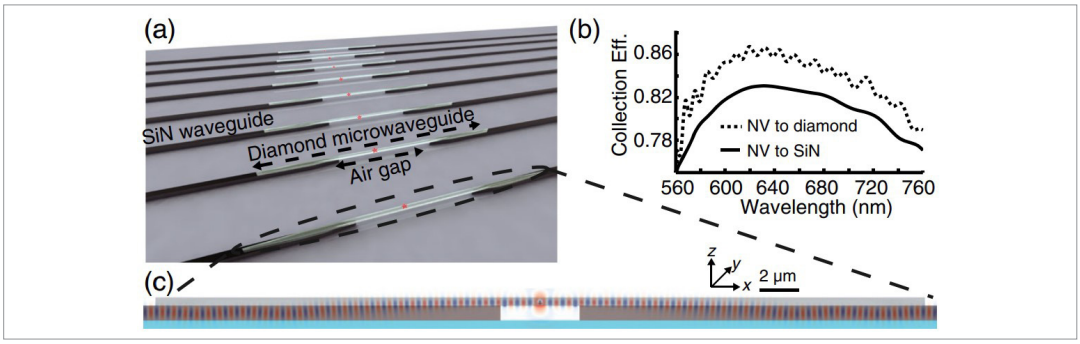
현재 보고된 광손실은 0.1dB/cm 이하로 매우 낮다. 이는 칩 위에서 딜레이 라인의 길이 제한을 거의 없애는 수준의 낮은 손실이다. 하지만 이처럼 낮은 광손실 수준은 아주 특수하게 제작된 경우에만 발현된다. 상용화된 LPCVD 질화 실리콘의 경우, 광손실 수준이 그처럼 낮지 않고 높은 스트레스(~1GPa) 값을 보인다. 따라서 추가적인 상용화 기술개발이 필요한 소재이다.

고품질 질화 실리콘을 상용제품으로는 구하기 힘든 상황이다. 특히 국내에서는 높은 스트레스 값을 나타내는 특징으로 인해 집적광학계용 고품질 질화 실리콘은 보고된 기록이 없는 상황이다. 향후 이 기술의 국산화가 실현되면 양자소재 뿐 아니라 다른 광학 연구 분야에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

표 III-3-53 대표적인 소재(SiN) 공급처

소재명	공급처
SiN	Rogue Valley Microdevices, Silicon Valley Microelectronics

그림 III-3-22 질화 실리콘에 집적화된 가시광선 양자 광원



※ Mouradian et al. (2015)

라. 리튬 나이오베이트($LiNbO_3$)

리튬 나이오베이트는 낮은 광손실을 보이면서도 동시에 높은 전기광학 효과를 보여주는 유일한 소재로 최근 집적광학계에서 큰 관심을 받고 있다. 아직 양자소자로 제작된 사례가 보고되고 있진 않다. 그러나 조만간 그 뛰어난 특성이 기반이 되어 유망한 집적광학계 소자로 부상할 것이라 기대되고 있다.

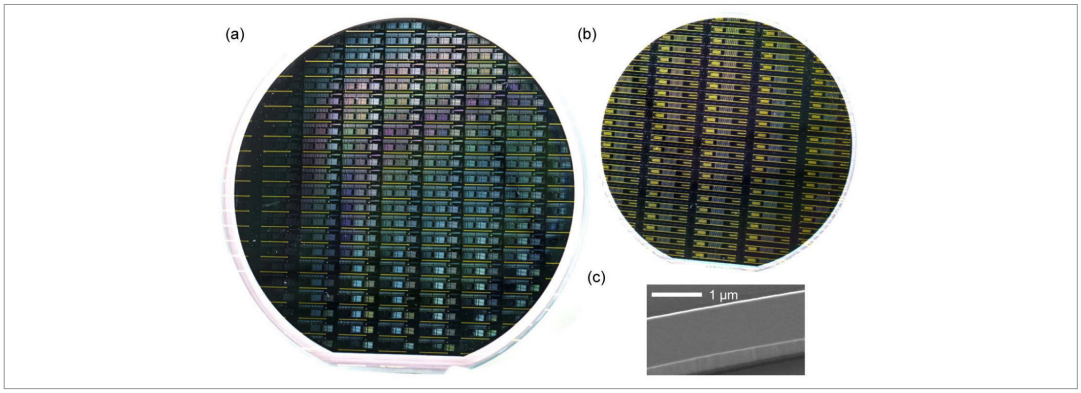
집적광학계 구현을 위해선 절연체 위에 박막이 있어야 하며, 이를 'LNOI($LiNbO_3$ on Insulator)'라고도 한다. LN은 보통 실리카 위에 증착이나 성장이 어려워 스마트 컷과 웨이퍼 본딩 후 CMP 폴리싱을 이용하기 때문에 현재는 고품질 LN을 제공할 수 있는 회사가 별로 없다. 대체로 연구 목적으로 생산과 제작이 이뤄지고 있을 뿐이다.

다만 좋은 소자가 나오고 상용화가 실현될 경우 폭발적 수요가 예상된다. 두께 균일도 향상, 대량생산 실현 등 여전히 남은 문제가 많은 상황이지만, 향후 기술적 발전과 함께 광학 기반 양자컴퓨팅 분야의 유망한 소재로 떠오를 것이라 기대되고 있다.

표 III-3-54 대표적인 소재($LiNbO_3$) 공급처

소재명	공급처
$LiNbO_3$	NanoLN

그림 III-3-23 리튬 나이오베이트 박막 기반 광소자



※ Luke et al. (2020)

마. 질화 알루미늄(AlN)

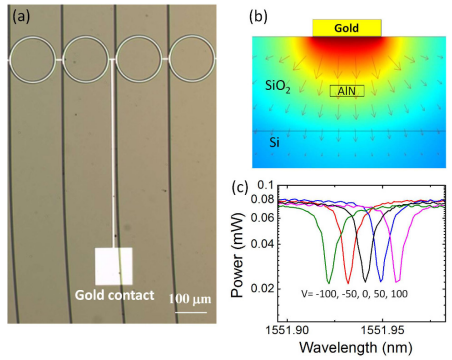
질화 알루미늄은 적당히 낮은 광손실 수준과 양호한 전기광학효과를 기대할 수 있는 소재로 양자 소자 제작에 사용할 수 있다. 리튬 나이오베이트와 달리 실리카 위에 증착이 쉽게 가능하다. 따라서 두께 균일도가 보장되고 다른 공정을 중간에 추가할 수 있어 활용범위가 넓은 편이다.

크게 '폴리 크리스탈'과 '싱글 크리스탈'로 나뉘는데, 폴리 크리스탈은 위에 설명한 대로 증착이 가능한 방법이다. 반면 싱글 크리스탈의 경우에는 리튬 나이오베이트처럼 웨이퍼 본딩 후 폴리싱 과정을 거쳐야 한다. 아직 본격적인 상용화 단계에 이르진 못했고, 여기서는 현재 상용화된 폴리 크리스탈 제품만 추가했다. 광손실을 다른 좋은 소재 수준(~0.1dB/cm)으로 낮출 수만 있다면, 발전 가능성이 매우 큰 소재이다. 현 시점에서는 미래 양자 집적광학계 후보군 정도로 평가할 수 있다.

표 III-3-55 대표적인 소재(AlN) 공급처

소재명	공급처
AlN	AMS

그림 III-3-24 질화 알루미늄 기반 전기변조 소자



※ Jung et al. (2016)

바. 탄탈라(Ta_2O_5)

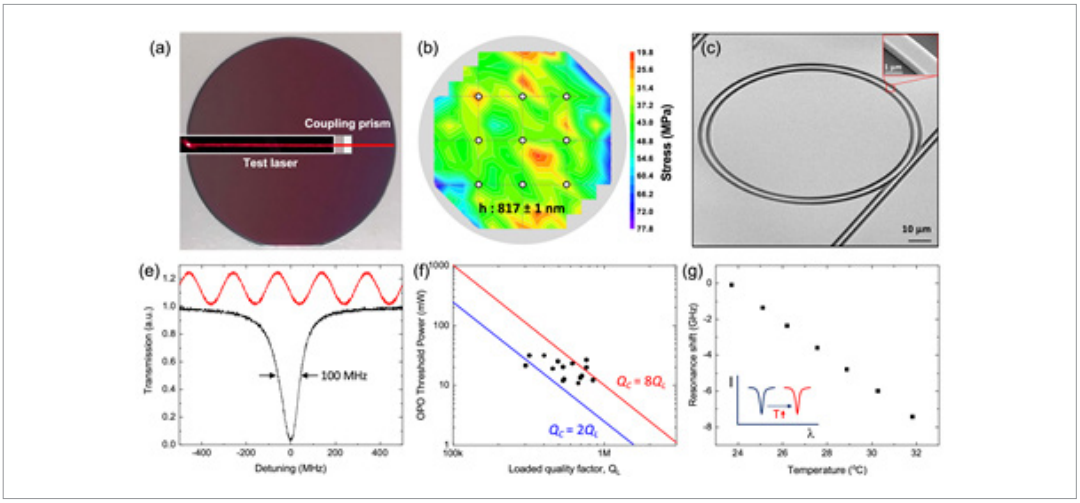
낮은 광손실, 낮은 열광학(Thermo-Optic) 효과, 낮은 형광 반응성 등의 특징으로 인해 최근 질화 실리콘을 대체할만한 소재이자, 양자 응용분야에 활용할만한 소재로 보고되었다. 실리카 위에 증착이 가능하고 스트레스 값도 매우 낮다. 또 질화 실리콘에 비해 수율이 높고 대량생산이 가능한 소재이기도 하다. 특히 집적화된 온칩 광원 제작 시에 배경 잡음을 낮추는데 응용될 수 있다.

양자 및 집적광학계에서 그동안 주목받아 온 소재는 아니다. 개발업체가 많지 않은 이유이기도 하다. 그러나 증착 기술력이 이미 존재하기에 이를 이용한 국산화 및 재생산 실현 가능성이 열려있는 상황이다.

표 III-3-56 대표적인 소재(Ta_2O_5) 공급처

소재명	공급처
Ta_2O_5	FiveNine Optics

그림 III-3-25 탄탈라 소재 기반 저손실 광소자



※ Jung et al. (2021)

4. 부품

가. 광섬유

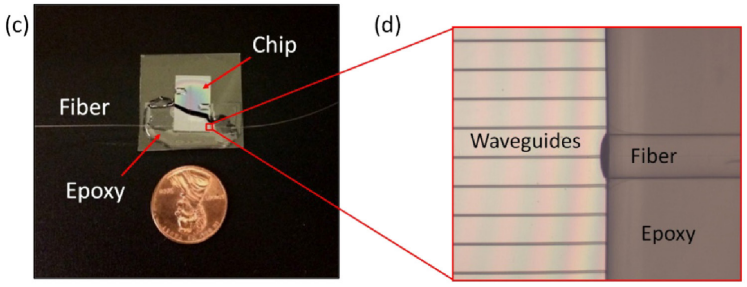
보통 코닝사에서 제조한 SMF-28을 말하는데, 이 광섬유에 커넥터를 단 패치 코드를 부품으로 분류할 수 있다. 광섬유는 그 자체로 빛을 도파하기 때문에 빛의 경로를 바꿔주는 데 주로 쓰이나 광손실이 적은 특성 탓에 광원으로 사용하기도 한다. 딜레이 라인으로 쓰여 두 개 펄스 간의 시간차를 주는데 쓰이는 것이다. 집적광학계에서는 광섬유를 이용해 빛을 넣어주어야 하는데, 집적광학계의 모드 사이즈가 다르면 광손실이 매우 커 양자실험에서 치명적인 단점으로 작용할 수 있다. 이를 해결하기 위해 광섬유 끝을 렌즈로 제작한 광섬유, 모드 사이즈를 낮춘 광섬유 등을 이용해 광섬유-칩 커플링 손실을 최소화한다. 또한 연결부에서 발생하는 추가 광손실(~0.5 dB)을 얼마나 줄이는 가도 중요하다. 실험이 어느 정도 궤도에 오르면 연결부 광손실을 줄이기 위해 광섬유끼리 아크 방전으로 접합하는 스플라이싱(Splicing)을 하기도 한다. 보통 이 경우 접합부 광손실은 0.1dB 수준으로 아주 낮다.

기본 광섬유 제조기술은 이미 정점에 달해 있다. 렌즈 광섬유, 낮은 모드 사이즈 광섬유 등 특수 광섬유 제작은 수요에 따라 추가 개발이 진행 중이다. 아직은 해외 의존도가 높아 향후 장기적인 대응 방안 수립 및 실행이 필요해 보인다.

표 III-3-57 대표적인 부품(광섬유) 공급처

부품명	공급처
광섬유	파이버피아, OZ Optics, Thorlbas

그림 III-3-26 4μm 광섬유와 광도파로 커플링 후 패키징한 소자



※ Jung et al. (2016)

나. 광학부품

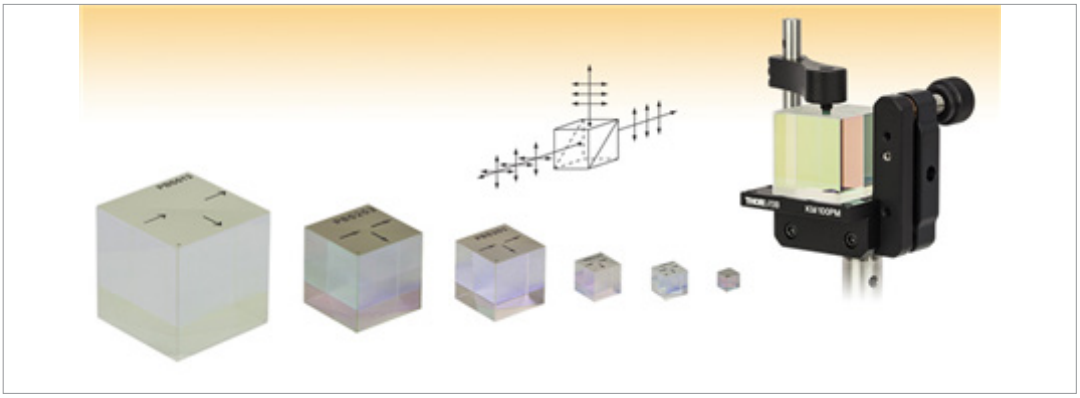
양자 큐비트 조작을 위해서는 광자 위상 및 경로 등을 조절해주는 부품들이 필요하다. 여기에는 자유공간에서 조절하는 방법, 광섬유를 이용해 조절하는 방법 등이 포함된다. 양자광원을 사용하기 때문에 여기서도 낮은 광손실 수준이 요구된다. 추가적으로 광 분할기를 사용할 경우 얼마나 정확한 비율로 배분해 주는지, 위상 조절기의 조절 가능한 속도가 어느 정도인지, 광섬유 집적소자의 경우 추가 광손실 수준이 얼마나 작은지 등이 고려된다.

광학부품의 기술 발전과 함께 광손실이 낮아질 경우, 양자측정에 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 하지만 대부분 광학 부품 역시 해외 의존도가 높아 고품질 국산제품 제작 및 홍보가 필요한 상황이다.

표 III-3-58 대표적인 부품(광학부품) 공급처

부품명	공급처
광학부품	Thorlabs, OZ optics

그림 III-3-27 대표적인 광학부품 제작 및 판매 회사인 Thorlabs에서 판매 중인 광 분할기



※ www.thoralbs.com

다. 비선형 결정

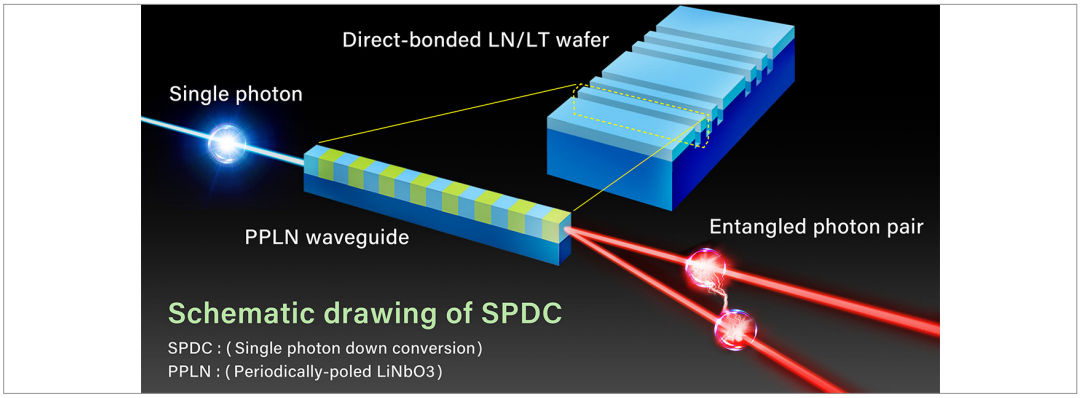
자유공간에서는 양자광원 생성을 위해 보통 비선형 결정을 사용한다. 많은 경우 2차 비선형도를 이용한 자발 매개 하향변환(Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) 방식으로 775nm 파장 근방의 광자를 1550nm 파장 근방의 두 개 얽힘 광자로 변환함으로써 양자광학 실험 및 컴퓨팅에 사용한다.

사용되는 결정은 대부분 벌크 광학계이고 원료보다는 약간의 주기분극 가공(Periodic Pulling)을 거친 부품을 사용한다. 따라서 소재가 아닌 부품 파트에 추가했다. 분극 주기 및 결정의 길이에 따라 생성 광원의 파장 및 결맞음 시간 등이 결정된다.

표 III-3-59 대표적인 부품(비선형 결정) 공급처

부품명	공급처
비선형 결정	Raicol, FOCtek Photonics

그림 III-3-28 PPLN을 이용한 SPDC 개략도



※ www.ntt-electronics.com

5. 장비

가. 광자쌍 생성장비

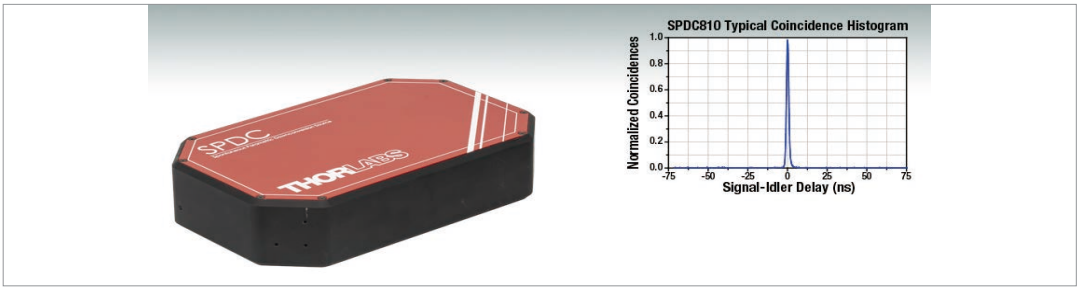
얽힘 광원은 광기반 양자컴퓨팅에 기본이 되는 필수 요소다. 많은 경우 상용 부품을 연구실에서 구매해 수동으로 최적화한 뒤 사용 중에 있다. 최근엔 이런 부품들을 패키징한 상용제품이 출시되기도 했다.

얽힘 광원에서 가장 중요한 수치 중 하나는 '2차 상관관계(Second-Order Correlation)'인데 현재 보장하는 값은 0.1 이하 혹은 0.01 이하 등으로 양호한 수준이다. 얽힘 광원 장비가 연구실에서 생성하는 양자광원 수준과 비슷하거나 더 좋아진다면, 광원 생성에 소요되는 시간을 양자측정에 더 투자함으로써 기술 향상을 도모할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 광학 기반 양자컴퓨팅 원천기술 개발에 광원 개발도 포함되기 때문에 상용제품에 기대는 것은 한계가 있을 것으로 예상된다.

표 III-3-60 대표적인 장비(광자쌍 생성장비) 공급처

장비명	공급처
광자쌍 생성장비	Thorlabs, Aurea

그림 III-3-29 Thorlabs에서 판매 중인 얽힘 광원 생성장비



※ www.thorlabs.com

나. 초전도 나노선 단일광자 검출기

초전도 나노선 단일광자 검출기(Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)는 극저온에서 초전도 나노선을 이용해 광자를 검출 하는 장비다. 양자광학 실험에 필수인 장비이나 극저온 유지 장치마저 가격이 상당하다. 대부분 장비가 그렇듯 해외 의존도가 높고 수요가 주로 연구계에만 몰려있어 선택의 폭이 넓진 않다.

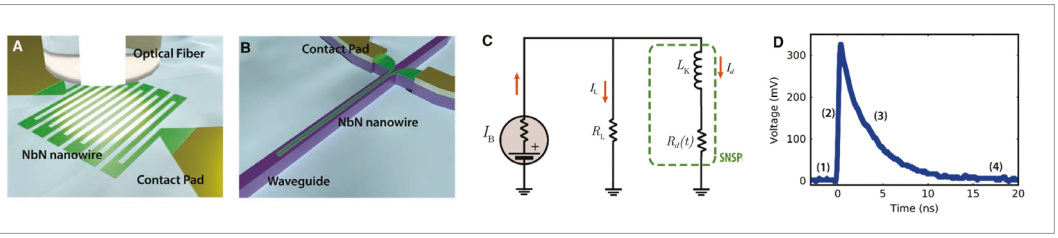
단일광자 검출효율이 가장 중요한 성능 지표중 하나로 상용품의 경우, 80%에서 95% 정도의 수치를 보여준다. 시간 지터(Timing Jitter) 및 다크 카운트 비율(Dark Count Rate) 수치는 낮을수록 좋다.

단일광자 검출기가 발전할수록 광기반 양자컴퓨팅 기술의 향상은 자명한 일이다. 특히 국산 기술의 확보가 중요한 이슈인데, 향후 집적광학계에서 검출기를 집적화시킬 때 필수적인 기술이기 때문이다.

표 III-3-61 대표적인 장비(SNSPD) 공급처

장비명	공급처
SNSPD	Single Quantum, IDQ, Scontel, Quantum Opus

그림 III-3-30 나노와이어를 이용한 단일광원 검출 개략도



※ Ferrari et al. (2018)

다. 단일광자 계수기

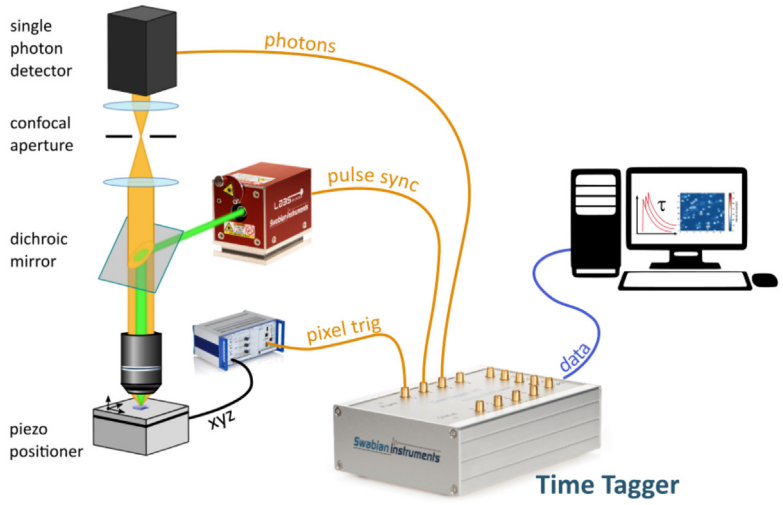
위에 언급한 SNSPD로는 광자 존재 유무만 알 수 있다. 아주 짧은 시간 내에 광자가 언제 검출되는지는 알 수 없다. 큐비트가 시간에 민감하지 않은 실험에는 크게 상관이 없다. 그러나 타임-빈(Time-Bin)을 이용한 실험이나 발생 광원의 시간차가 있는 경우, 피코초 수준의 정밀한 단일광자 검출이 필요하고 이를 위해 단일광자 계수기(Time Correlated Single Photon Counting, TCSPC)가 사용된다.

TCSPC는 SNSPD에 추가되는 보조 장비를 이용한 기술을 일컫는 명칭으로, 초전도 단일광자 검출기의 전기신호를 시간에 따라 기록해주는 장치를 말한다. 보통 'Time Tagger'로도 불린다. 시간에 따른 측정이 목적이므로 지터 및 낮은 데드 타임이 중요하다. 광기반 양자컴퓨팅 전용 장비는 아니나, 현재 주 응용분야로 각광받고 있어 TCSPC 개발방향도 이에 맞춰지고 있다. 이 장비를 이용해 시간 분석 능력이 향상되면 보다 정밀한 단일광자 측정이 가능할 전망이다.

표 III-3-62 대표적인 장비(TCSPC) 공급처

장비명	공급처
TCSPC	qutools, Swabian Instruments

그림 III-3-31 Time Tagger를 이용한 측정 예시



※ www.swabianinstruments.com

라. 아발란치 포토 다이오드

SNSPD는 초전도체를 이용한 장비로, 부착되는 극저온 유지 장치로 인해 부피도 많이 차지하고 가격이 비쌀 뿐 아니라 부피가 커 휴대가 불가능한 단점이 있다. 이에 대안으로 다이오드 가이거 모드를 이용한 아발란치 포토 다이오드(Avalanche Photo Diode, APD)가 사용되고 있다.

Si 기반 APD는 가시광선 영역을, InGaAs 기반 APD 는 IR 영역을 측정하는데 사용된다. 현재 시점의 측정 효율은 각각 70%, 20% 정도이다. 측정 효율을 보다 높인다면 양자컴퓨팅에 더욱 많이 사용될 것으로 예상된다.

표 III-3-63 대표적인 장비(APD) 공급처

장비명	공급처
APD	Excelitas, 우리로

그림 III-3-32 APD를 패키징한 모듈



※ www.excelitas.com

6. 파운드리 서비스

가. 질화 실리콘(SiN) 소자

질화 실리콘은 현재 알려진 포토닉스 소자 중 실리카 다음으로 전파 손실이 낮은 물질로 많은 양자컴퓨팅 회사에서 이용하고 있다. 실리카는 굴절률이 일반적인 포토닉스 물질보다 낮아 보통 도파로 보다는 클레딩로 많이 사용된다는 점에서 현실적으로 가장 널리 사용되는 플랫폼은 질화 실리콘이다.

2023년 기준 미국 광학회 (Optica) 회장인 Michal Lipson (Colombia 대학) 교수는 Cornell 대학에 있을 때부터 질화 실리콘 기반 포토닉 소자를 선구적으로 연구해 왔고, 관련 분야에서 독보적인 존재이다. 그 공로를 인정받아 광학회장까지 될 정도로 질화 실리콘 기반 포토닉 소자는 여러 분야에 큰 영향을 끼쳤고, 많은 파운드리 스타트업을 탄생시켰다.

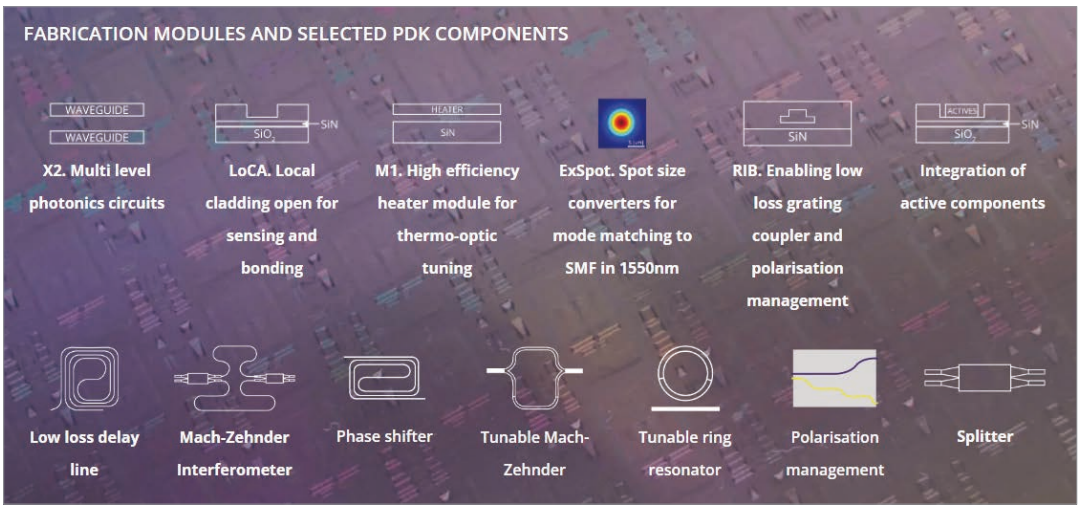
스위스 EPFL 대학의 Tobias Kippenberg 그룹도 상감 (Damascene) 기법을 이용하여 질화 실리콘의 높은 스트레스 문제를 해결하였다. 게다가 식각으로 인한 표면 거칠기를 줄여서 낮은 광손실을 가지는 소자를 제작 하였고, 이를 이용하여 최초의 질화 실리콘 파운드리 스타트업을 시작하였다.

그 후 크고 작은 많은 업체들이 각자의 방식으로 질화 실리콘 파운드리 서비스를 시작하였고 그중 대표적인 몇몇 업체를 아래 표에 정리하였다.

표 III-3-64 대표적인 질화 실리콘 파운드리 서비스 업체

서비스명	공급처
질화 실리콘 파운드리 서비스	Ligentec, Imec, Lionix

그림 III-3-33 파운드리 서비스 가능한 모듈



※ www.ligentec.com/

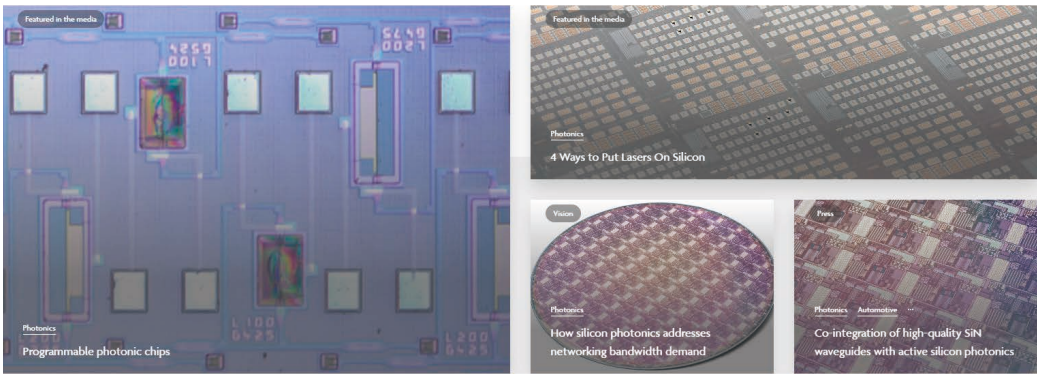
나. 실리콘(Si) 소자

실리콘은 가장 오래전부터 개발된 공정 소재로 포토닉스 소자에 도파로로도 쓰인다. 따라서 공정 대부분이 가능한 업체에서 파운드리 서비스를 제공하는데, 국내에서는 카이스트 부속 팹 나노종합기술원 (NNFC) 에서 대표적인 MPW(Multi Project Wafer) 서비스를 제공한다. 단순 도파로 제작 기준만을 놓고 보면 가격적인 측면에서 유리하나 광학적인 특성 (광손실, 투과 파장 등) 에서 다른 광소재 대비 많이 떨어진다. 특히 변조를 위해선 추가 공정이 필요하다. 이에 수율이 아주 높지 않고, 최근 질화실리콘과 가격 차이가 점차 줄어 들면서 많은 양자 컴퓨팅 업체에서 실리콘보다 질화 실리콘으로 옮겨가는 추세다.

표 III-3-65 대표적인 실리콘 파운드리 서비스 업체

서비스명	공급처
실리콘 파운드리 서비스	나노종합기술원, imec

그림 III-3-34 실리콘 파운드리 서비스 예시



※ https://www.imec-int.com/en

다. 리튬 나이오베이트($LiNbO_3$) 소자

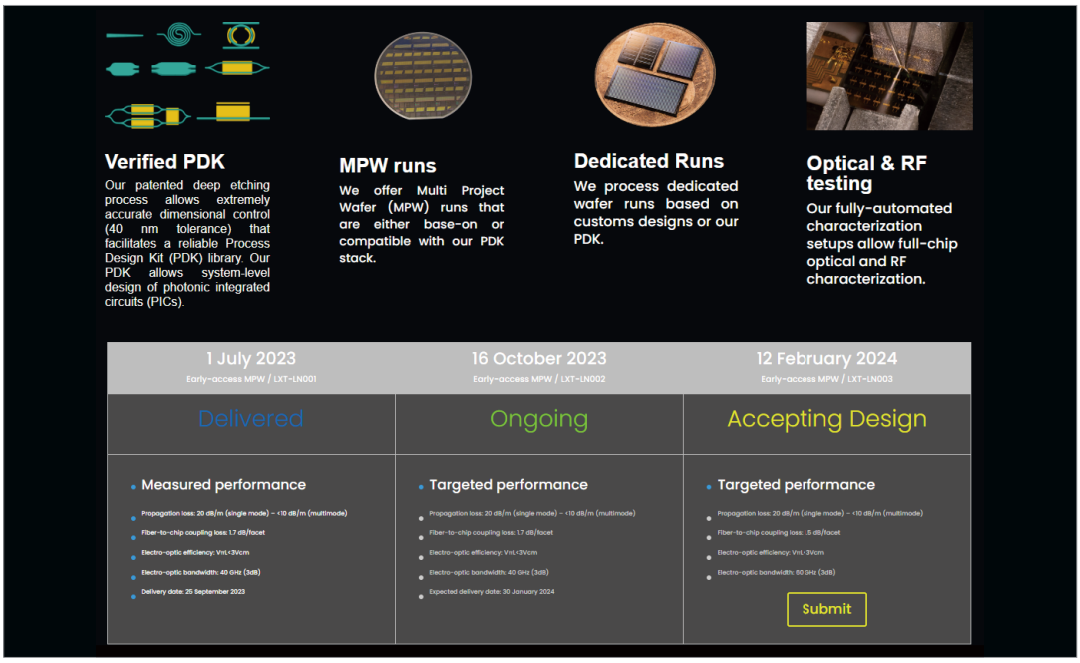
리튬 나이오베이트 소재는 광도파로 소자로서, 발표 초기부터 높은 수요에 힘입어 파운드리 서비스가 시작되었다. 2017년 최초로 관련 연구를 발표한 하버드의 Marko Loncar 교수 연구팀에서 스핀오프 한 보스턴 기반 스타트업인 Hyperlight 는 리튬 나이오베이트 광도파로 및 변조 소자 제작을 기반으로 서비스를 시작했다. 하지만 아직 소재 자체가 대량 생산이 되기 전이라 웨이퍼 가격이 상당히 높고 MPW 서비스 및 수율이 검증되지 않았다. 초창기 대부분 파운드리 스타트업이 그러하듯 생산 기간 및 품질이 보증되려면 시간이 필요하다.

포토닉스 분야 대가인 Kippenberg 그룹에서 SiN 파운드리 서비스 업체인 Ligentec 에 이어 리튬 나이오베이트 파운드리 서비스 업체가 스핀오프 되었다. 2022 년 말 처음 서비스를 시작하여 2023년 말 3번째 MPW 를 목표로 하고 있다. 이 업체 또한 초창기 서비스라 목표 성능과 실제 성능은 차이가 보이며 여러 가지 성능 지표가 미정인 상태이다.

표 III-3-66 대표적인 리튬 나이오베이트 파운드리 서비스 업체

서비스명	공급처
리튬 나이오베이트 파운드리 서비스	Hyperlight, Luxtelligence

그림 III-3-35 리튬 나이오베이트 파운드리 서비스 현황



※ https://luxtelligence.ai/

라. 탄탈라(Ta_2O_5) 소자

상대적으로 최근에 발표된 탄탈라 소자는 포토닉 소자 스타트업 열풍에 힘입어 단기간에 파운드리 서비스를 시작하였다. CU boulder – NIST에서 개발된 레서피를 바탕에 두고 콜로라도 볼더를 기반으로 시작된 Octavephotonics 는 탄탈라 소재의 특성을 바탕으로 주로 비선형 현상을 보이는 소자를 제작한다. 또한 다른 파운드리 서비스와 마찬가지로 커스텀 주문으로도 제작이 가능하다. 질화 실리콘보다 늦게 개발되어 광손실이 조금 더 크나 그 외 비선형도, 온도-광학 계수, 물질 스트레스 측면에서 뛰어나 장기적으로 볼 때 발전 가능성이 굉장히 크다. 특히 소재를 공급하는 업체 또한 볼더에 있어 협업을 통한 품질 향상이 기대된다.

표 III-3-67 대표적인 탄탈라 파운드리 서비스 업체

서비스명	공급처
탄탈라 파운드리 서비스	Octave Photonics

그림 III-3-36 탄탈라 파운드리 서비스 가능 제품군



※ https://www.octavephotonics.com

제6절 NV센터 양자컴퓨팅

1. 요점

양자컴퓨팅 기술 개발은 모순된 두 가지 물리적 특성을 동시에 구현하는 것을 목적으로 한다. 주변 환경으로부터 큐비트를 분리시켜 높은 정확도로 그 상태를 측정·제어하면서도, 그러한 많은 큐비트들이 서로 정보를 주고받으며 연결될 수 있도록 확장성을 확보하는 것이다. '다이아몬드 NV센터'는 소재 고유의 특성을 이용해 이러한 물리적 조건들을 구현하기에 적합한 소재이다. 현재 NV센터를 이용해 10개 내외 큐비트가 구현되었고 양자 소재, 측정 및 제어, 인터페이스 기술 분야의 급속한 발전과 더불어 더 큰 확장 가능성을 보여주고 있다.

다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자컴퓨터 기술 개발에는 소재, 공정, 전자기 신호처리 및 제어, 광학 회로 설계 및 구성 등과 같이 다양한 분야의 기술들이 적용된다. 다이아몬드 기판 소재는 양자현상 측정 및 제어에 적합한 수준의 순도를 가지고 있어야 한다. 또한 큐비트 시스템의 확장성을 고려하자면, 성장된 다이아몬드 기판의 원하는 위치에 NV센터를 형성시킬 수 있는 기술이 필요하다. NV센터의 전자스핀과 주변 핵스핀들을 연산에 활용하기 위해서는, 전자기 신호처리 및 제어 기술과 광학 회로 구성을 위한 다양한 광학 소재·부품 및 단일광자 검지 기술이 적용된다. NV센터 기반 양자컴퓨터 개발에 필요한 이처럼 다양한 주요 기술들과 그 기술을 구현하는데 필요한 소재, 부품, 장치들을 자세히 알아보고자 한다.

2. 구성요소

다이아몬드 NV센터 기반 양자컴퓨터의 주요 기술을 구현하기 위해서는 아래와 같은 소재, 부품, 장비들이 필요하다.

먼저 소재로는 초고순도의 단결정 다이아몬드가 필요하고, 이의 생성을 위해 반응성 가스를 진공 반응기 내에 주입해 화학반응을 유도함으로써 기판 표면에 원하는 박막을 증착시키는 기술인 화학기상성장법(Chemical Vapor Deposition, CVD)을 적용한다. 또 NV센터 생성을 위해서는 질소이온이 필요하며, NV센터에서 방출되는 광자의 포집효율을 높이기 위해 다이아몬드 나노 구조물을 사용하고 있다.

또 부품과 장비로는 NV센터의 광학 특성을 제어하고 측정하기 위해 여러 광학 부품 및 장비를 사용 중이고, NV센터의 양자상태 제어를 위해서도 다양한 전자기 부품 및 장비를 활용하고 있다. 그 외 극저온 냉각기와 장비 제어 프로그램 등 수많은 장비를 이용해 연구개발을 진행 중에 있다.

3. 소재

가. 단결정 다이아몬드

NV센터를 양자컴퓨터에 이용하기 위해서는 고순도 단결정 다이아몬드(Single Crystal Diamond)가 필요하다. 다이아몬드를 인공적으로 만들 수 있는 대표적인 방법으로 화학기상성장(Chemical Vapor Deposition, CVD) 방식과 고온고압 처리(High Pressure High Temperature, HPHT) 방식이 있다.

과거에는 다이아몬드의 생성 원리를 모방한 HPHT 방법을 이용했다. 그러나 불순물의 농도 제어가 어렵고 가격 경쟁력이 낮아 지금은 양자컴퓨팅 연구에는 거의 사용되지 않고 있다. CVD 방법은 다이아몬드 성장속도가 느리다는 단점이 있으나 고순도 다이아몬드를 넓은 면적으로 생산할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 ^{13}C 동위원소의 농도 조절이 가능하고 다이아몬드 성장 단계에서 NV센터 생성도 가능해 CVD 방법으로 성장시킨 다이아몬드가 양자 컴퓨팅 연구에 가장 널리 사용되고 있다.

NV센터를 포함한 나노 다이아몬드 또한 연구에 사용된다. 나노 다이아몬드는 다른 기능성 광소자와의 결합을 위해 사용되는 경우가 많다. 그러나 표면의 결함 때문에 양자적 특성이 좋지 않은 편이다. 양자컴퓨터에 필요한 단결정 다이아몬드는 붕소 농도 및 질소 농도가 각각 1ppb과 5ppb 미만이어야 한다.

양자 컴퓨팅 기술에 사용할 수 있는 품질의 단결정 다이아몬드를 생산할 수 있는 업체는 영국의 Element Six가 유일하다. 대부분 실험실 레벨에서 다이아몬드를 성장시켜 사용하고 있고, 이마저 일본과 미국의 몇몇 대학교 연구실들에서만 가능한 상황이다. 최근 반도체 대란과 맞물려 다이아몬드 수요가 급증하며 양자컴퓨터 연구용 다이아몬드 수급에 차질이 빚어지고 있다. 최근 한국공학대학교와 KIST 공동연구에서 양자 컴퓨팅에 사용할 수 있는 다이아몬드 성장 기술을 개발 중이다.

NV 센터는 주변 스핀 환경에 매우 민감하므로 다이아몬드 성장 품질에 영향을 많이 받는 소재이다. 따라서 다이아몬드 ^{13}C 동위원소의 농도 조절이 가능하고 특정 위치에 NV를 생성할 수 있는, 특수한 다이아몬드의 생성 기술이 필요한 상황이다.

표 III-3-68 대표적인 소재(단결정 다이아몬드) 공급처

소재명	공급처
단결정 다이아몬드	ElementSix, New Diamond Technology, 한국공학대학교

나. 질소이온

NV센터를 생성하기 위해 다이아몬드에 질소이온을 주입한다. 이온을 주입 시의 에너지와 도즈량에 의해 NV센터가 생성되는 깊이와 밀도가 결정된다. 양자컴퓨팅에 사용되는 단일 NV센터를 만들기 위해서는 ~$10^8/cm^2$ 이하 도즈량으로 이온을 주입해야 하는데 이는 일반적인 이온주입 장비의 최소 선량보다 적은 양이기에, 특별한 기술들이 필요하다. 또 질소이온에서 NV센터로 전환되는 효율을 늘리기 위해서는 다른 이온들과 동시에 주입할 수 있는 상호주입(Co-implantation) 기술도 필요하다.

다이아몬드에 주입된 질소이온은 600℃ 정도 높은 온도에서 주변의 공백 결함과 결합해 NV센터를 생성한다. 이때 열처리 후 생성되는 표면 결함을 제거할 수 있어야 한다. 아직까지 NV센터 생성을 위한 제반 서비스 일체를 제공하는 업체는 존재하지 않는다. 이온주입을 한 다이아몬드의 열처리 및 표면처리와 같은 후처리 공정은 다른 업체를 통해 하거나, 연구그룹 자체적으로 수행해야 한다. NV센터를 안정적으로 생성할 뿐 아니라 원하는 양자조건을 만족시키며 NV센터를 제공할 수 있는 업체가 필요한 상황이다. 국내에서는 한국원자력연구원에서 초저선량 이온주입 장비를 도입하여 서비스 중에 있다.

표 III-3-69 대표적인 소재(질소이온) 공급처

소재명	공급처
질소이온	II-VI, Ion Technology Center, 한국원자력연구원

다. 다이아몬드 나노 구조물

NV센터의 양자상태를 효율적으로 측정하기 위해서는 NV센터에서 방출되는 광자의 포집효율을 높여야 한다. 방출되는 광자 대부분을 굴절률 차이에 의한 표면 전반사로 인해 포집할 수 없기 때문이다. 광자 포집 효율은 나노 구조물을 도입해 높일 수 있다. 다이아몬드는 탄소로 이뤄진 반도체의 일종이기에 반도체 공정을 통해서 다이아몬드 나노 구조물을 제작할 수 있다. 나노 필러와 고체잠입렌즈(Solid Immersion Lens)가 대표적인 구조물이다.

다이아몬드는 작은 조각단위로 판매되고 있어, 웨이퍼 단위로 진행되는 일반적인 반도체 공정 서비스를 받을 수 없다. 일정 교육을 받고 반도체 장비를 직접 사용할 수 있는 팹 서비스를 신청하거나, 개별 연구실 단위에서 만들어 사용해야 한다.

다이아몬드 반도체 공정의 발전은 다이아몬드 NV센터 기반 양자컴퓨팅 연구의 여러 장애물을 해결하는 데 도움이 될 것이다. 다이아몬드 NV센터에서 방출되는 광자를 효율적으로 제어할 수 있는 광집적 소자 연구도 진행될 수 있고, 최근 발표되었던 전기적으로 NV센터의 양자상태를 제어할 수 있는 방법도 반도체 공정의 발전과 더불어 진일보할 수 있을 것이다.

표 III-3-70 대표적인 소재(다이아몬드 나노 구조물) 공급처

소재명	공급처
다이아몬드 나노 구조물	한국나노기술원, 나노종합기술원, 한국과학기술연구원 나노팹, 서울대학교 반도체공동연구소

4. 부품

가. 광학부품

NV센터의 크기는 옹스트롬 단위로 매우 작고 방출되는 광자 양도 적어 잡음에 취약한 편이다. 따라서 검출기로 들어가는 잡음을 줄이는 것이 NV센터를 이용한 양자컴퓨터의 빠르고 정확한 연산 실현을 위한 선결과제라 할 수 있다. 이 때 공초점 현미경은 대물렌즈 초점에서 벗어나는 잡음성분을 필터링해주는데 이의 구현을 위해서는 핀홀, 대물렌즈, 이색성 미러, 광학 필터, 단일 모드 광섬유 등이 필요하다.

① 핀홀

공초점 현미경의 구현을 위해서는 우선 잡음은 제거하나 NV센터 신호는 제거하지 않는 직경의 핀홀이 필요하다. 그 직경은 'D=λf/r'라는 계산식으로 산출할 수 있는데 여기에서 λ는 빛의 파장, f는 초점거리, 그리고 r은 빛의 반지름을 나타낸다.

표 III-3-71 대표적인 부품(핀홀) 공급처

부품명	공급처
핀홀	Thorlabs

② 대물렌즈

대물렌즈는 다이아몬드 표면의 굴절률 차이로 인해 큰 각도로 꺾이는 광자를 최대한 포집하기 위해 필요하다. 다이아몬드의 높은 굴절률(n=2.4)로 인해 표면에서 전반사되는 광자들을 최대한 많이 포집하는 일은 빠르고 정확한 양자컴퓨터 실현을 위해 중요한 조건이기 때문이다. 따라서 높은 개구수(Numerical Aperture)를 가진 대물렌즈가 요구될 수밖에 없다.

표 III-3-72 대표적인 부품(대물렌즈) 공급처

부품명	공급처
대물렌즈	ZEISS

③ 이색성 미러 및 광학 필터

NV센터 양자컴퓨팅의 현실화를 위해서는 NV센터 전자를 여기하는 레이저와 여기에서 방출되는 637nm 이상 파장대역의 광자 경로를 분리할 필요가 있다. 때문에 파장에 따라 반사 정도와 투과율을 다르게 만드는 이색성 미러를 사용하고 있다. 그러나 이색성 미러의 입사 레이저 일부가 단일광자 검출기로 들어가는 것을 막을 수 없는 단점이 있다. 이에 레이저 파장대역을 차단하면서도 NV센터 빛은 투과시키는 롱패스 필터도 요구된다.

한편 현재 시점에선 단일 NV센터를 측정할만한 수준의 민감도를 가진 공초점 현미경은 상업적으로 판매되지 않고 있다. 다양한 광학 부품들을 이용해 실험실에서 직접 구축해 사용하고 있는 실정이다. 더구나 국내의 경우 광학 부품을 제작하는 업체가 많지 않아 대부분의 광학 부품들을 해외 수입에 의존하고 있다. 글로벌 경향을 살펴보면 최근에는 국가 간 양자기술 경쟁의 격화로, 고품질 광학 부품은 자국 내 소비를 기본으로 하는 방향으로 정책기조가 바뀌고 있다. 따라서 고품질 광학 부품의 수급 차질을 막기 위해 우리나라도 서둘러 국산화에 박차를 가해야 하는 상황이다.

표 III-3-73 대표적인 부품(이색성 미러) 공급처

부품명	공급처
이색성 미러	Semrok

표 III-3-74 대표적인 부품(광학 필터) 공급처

부품명	공급처
광학 필터	Thorlabs

나. 전자기 부품

NV센터 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 다양한 전자기 부품이 필요하다. 대표적으로 마이크로파 증폭기와 스위치, 그리고 전기 광학 변조기와 음향 광학 변조기 등이 있다.

① 마이크로파 증폭기

NV센터 전자의 스핀은 NV센터 축에서 수직한 방향으로 진동하는 마이크로파를 인가해 제어할 수 있다. 이 마이크로파는 임의파형 발생기나 벡터 신호 생성기에서 만들어진다. 그러나 이러한 장비들에서 만들어지는 마이크로파의 세기는 NV센터 전자스핀을 제어하기 위해 충분하지 않기에 마이크로파 증폭기(RF & Microwave Amplifier)가 필요하다. 이때 NV센터 근처에 생성된 마이크로파의 도파로 허용 용량과 실험 목적에 맞는 라비 주기를 고려해 증폭기 Gain 값을 결정하게 된다.

표 III-3-75 대표적인 부품(마이크로파 증폭기) 공급처

부품명	공급처
마이크로파 증폭기	Mini-Circuits

표 III-3-76 대표적인 부품(RF & 마이크로파 스위치) 공급처

부품명	공급처
RF & 마이크로파 스위치	Mini-Circuits

② 음향 광학 변조기 및 전기 광학 변조기

레이저는 ON/OFF가 가능해야 하는데, 일반적으로 발진 이후 안정화되기까지 시간이 걸리기 마련이다. 따라서 레이저가 다이아몬드에 인가되기까지의 광 경로를 시간에 맞게 틀어줌으로써 빠르고 안정적인 ON/OFF 기능을 구현할 수 있다.

이때 광 경로를 변경하기 위해 '음향 광학 변조기(Acousto-Optic Modulator, AOM)'나 '전기 광학 변조기(Electro-Optic Modulator, EOM)'가 사용된다. 이 중 AOM은 쿼츠를 통과하는 레이저 빔을 특정 주파수의 음파로 인가해 회절을 유도하는 변조기로, 변조 효율이 매우 크다는 장점이 있다. 그러나 NV센터 실험에서는 ns 이하 응답시간이 필요하기에 이것만으로는 충분한 변조 효과를 얻을 수 없다. 따라서 전환효율은 AOM에 비해 떨어지나 응답시간이 200ps 정도로 매우 빠른 EOM을 실험에

서 함께 사용하고 있다. 한편 NV센터 연구에 사용되는 대부분의 전자기 부품들은 초전도나 이온 트랩 양자 컴퓨팅 실현을 위한 연구에도 적용 가능하다.

표 III-3-77 대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
음향 광학 변조기	G&H

표 III-3-78 대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
전기 광학 변조기	JENOPTIK

5. 장비

가. 레이저

다이아몬드 NV센터 스핀의 양자상태는, 전자가 들뜬 상태에서 기저 상태로 떨어질 때 방출되는 광자 발생확률의 측정을 통해 확인할 수 있다. 들뜬 상태와 기저 상태의 에너지 차이는 1.95eV(637nm)이기 때문에, 이보다 짧은 파장의 빛을 여기해야 전자를 들뜬 상태로 만들 수 있다. 레이저의 균일한 출력 파워는 NV센터 양자상태를 장시간동안 안정적으로 측정할 수 있게 해준다.

일반적인 NV센터 실험에서는 532nm 파장의 다이오드 조립형 고체상태(Diode Pumped Solid State, DPSS) 레이저를 사용한다. 최근 NV^0와 NV^-상태를 구분하기 위해 594nm 파장의 레이저를 추가함으로써 NV^0상태를 실시간으로 필터링해 양자측정의 충실도를 높이는 방법이 제안됐다.

저온에서 NV센터에 대한 연구를 할 때는 NV센터의 제로 광자 라인(Zero Photon Line, ZPL)에 해당하는 637nm를 공진 여기하기 위해 미세하게 파장 튜닝이 가능하고 레이저 파장 선폭이 좁은 외부 구멍 다이오드(Exteranal Cavity Diode, ECD) 레이저를 이용하기도 한다.

표 III-3-79 대표적인 장비(DPSSL) 공급처

장비명	공급처
DPSSL	Changchun New Industries Optoelectronics Technology, Novanta Photonics

표 III-3-80 대표적인 장비(ECDL) 공급처

공급처	공급처
ECDL	Newport, TOPTICA Photonics

나. 단일광자 검출기

NV센터에서 방출되는 광자의 파장대역인 600~800nm에서 단일광자를 검출할 수 있는 검출기가 필요하다. 단일광자를 검출할 수 있는 장비는 대표적으로 광전증폭관 (Photomultiplier Tubes)과 단일광자 눈사태 다이오드(Single-Photon Avalanche Diode, SPAD)를 이용한 검출기가 있다. NV센터로부터 1초 동안 포집되는 10만 개 정도의 단일광자를 효율적으로 측정할 수 있는, 단일광자 검출기를 사용하면 된다. NV센터에서 방출되는 광자는 가시광선 대역과 근적외선 대역이므로 실리콘 기반의 SPAD를 사용할 수 있다.

아발란치 다이오드를 집적화하는 기술이 발전함에 따라 SPAD를 이용한 단일광자 검출기를 양자 집적회로 등에 적용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 다이아몬드 NV센터에서 방출되는 광자를 양자 집적회로에서도 제어할 수 있을 것으로 전망되고 있다.

표 III-3-81 대표적인 장비(단일광자 검출기) 공급처

장비명	공급처
단일광자 검출기	Excelitas Technologies

다. TTL 펄스 발생기

NV센터 양자컴퓨팅에는 여러 장비가 사용된다. 따라서 장비간의 동기화가 필수적이다. TTL 펄스 발생기는 프로그래밍 타이밍에, 각각의 장비를 향해 트리거 신호를 보내는 역할을 한다. 마이크로파가 정확한 간격으로 점멸해야 하므로 서브 ns 수준의 분해능[22]이 필요하고, 여러 장비에 연결해야 하므로 일정 개수 이상의 채널을 갖춰야 한다.

상용화된 TTL 펄스 발생기에서 제어 가능한 가장 높은 주파수는 500MHz다. 따라서 펄스의 분해능은 2ns가 한계이다. NV센터의 전자스핀과 주변 핵스핀을 정밀하게 제어하기 위해서는 서브 ns의 분해능이 필요하므로 상용 제품을 사용하는 것은 추천하지 않는다.

보통은 TTL 신호 발생기와 펄스 지연 발생기를 함께 사용하거나, 뒤에서 소개할 임의파형 발생기를 사용해 TTL 신호를 생성한다. 지금보다 더 높은 분해능의 TTL 펄스 발생기가 개발된다면 NV센터 연구에 유용하게 사용될 것이다.

표 III-3-82 대표적인 장비(TTL 펄스 발생기) 공급처

장비명	공급처
TTL 펄스 발생기	SpinCore

라. 벡터 신호 발생기

NV센터의 스핀 상태를 제어하기 위해서는 1~4GHz 대역의 마이크로파가 필요하다. 벡터 신호 발생기는 마이크로파를 생성할 뿐 아니라 다양한 변조 기술을 이용해 마이크로파의 진폭·주파수·위상을 실시간으로 바꿀 수 있다.

NV센터의 스핀을 블로흐 스피어(Bloch Sphere) 상에서 원하는 상태로 이동시키기 위해서는 NV센터에 인가하는 마이크로파 위상을 적기에 변조시켜야 한다. 일반적으로 IQ 변조 기능을 제공해주기 때문에 I와 Q포트에 적절한 TTL신호를 인가해 원하는 위상의 마이크로파를 생성할 수 있다. 또 높은 양자 충실도를 보이기 위해서는 주파수가 일정하게 유지되는 것이 매우 중요하기에, 높은 주파수 안정성이 요구된다. 마이크로파를 능동적으로 제어하기 위해 프로그래밍 가능한 트리거 소스와 함께 사용해야 하는 단점이 있다. 그러나 최근 판매되는 벡터 신호 발생기의 경우 2GHz의 높은 변조 대역폭을 가지고 있다.

22) 분해능: 서로 떨어져 있는 두 물체를 서로 구별할 수 있는 능력을 의미한다. 주로 광학기기의 성능을 나타낼 때에 사용된다.

표 III-3-83 대표적인 장비(벡터 신호 발생기) 공급처

장비명	공급처
벡터 신호 발생기	Stanford Research Systems, Rohde & Schwarz

마. 임의파형 발생기

NV센터를 제어하기 위해서는 수많은 형태의 신호가 필요한데, 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator)는 말 그대로 임의 형태의 파형을 만들 수 있게 해주는 장비이다. TTL 신호뿐 아니라 사인파 그리고 위상 변조도 자유롭게 할 수 있도록 해준다.

임의파형 발생기에서 가장 중요한 지표는 샘플링 속도(Sample Rate)다. 3GHz의 사인파를 생성하기 위해서는 적어도 12GS/s 이상의 샘플 레이트가 필요하다. 이 지표가 낮으면 사인파 형태가 삼각파에 가까워지기 때문에 원하지 않는 주파수 성분이 인가될 수 있다.

한편 임의파형 발생기는 초전도 큐비트 연구에도 활용될 수 있으며, 제어하고자 하는 큐비트 숫자가 증가할수록 필요한 채널 수도 증가해야 한다. 최근에는 직접 펄스 모양을 생성할 수 있는 AWG 기능을 포함한 FPGA 보드가 판매되고 있다.

표 III-3-84 대표적인 장비(임의파형 발생기) 공급처

장비명	공급처
임의파형 발생기	Tektronix

바. 피에조 스테이지

원자 사이즈의 NV센터를 탐지하기 위해서는 대물렌즈 초점에 NV센터가 위치해야 한다. NV센터는 1옹스트롬 단위의 크기를 가지는 만큼 3축(x, y, z) 모두 옹스트롬 수준의 정밀도를 요구한다. 따라서 나노미터 수준의 정밀도를 가진 피에조 스테이지(Piezo Stage)는 고체 점 결함을 연구하는데 꼭 필요한 장비이다.

한편 이러한 스테이지는 넓은 영역의 스캔 기능을 제공함으로써 다이아몬드에서 NV센터의 위치를 특정할 수 있어야 한다. 또 다이아몬드에 마이크로파를 인가하기 위한 PCB 보드와 고정 척의 하중을 견딜 수 있어야 하고, 이동 후 위치가 고정되어야 하며, 다이아몬드 아래쪽에 설치가 가능하도록 구멍이 있어야 한다. 최근에는 저온실험이 증가함에 따라 극저온 냉동기에서도 사용 가능한 스테이지의 수요가 늘고 있다.

표 III-3-85 대표적인 장비(피에조 스테이지) 공급처

장비명	공급처
피에조 스테이지	PI

사. 펄스 카운터

펄스 카운터(Pulse Counter)는 단일광자 검출기가 광자를 검출할 때마다 발생하는 신호 숫자를 세기 위한 장치다. 단일광자 검출기가 발생시키는 모든 신호를 읽기 위해서는 단일광자 검출기의 데드타임보다 높은 분해능이 요구된다. 최근에는 FPGA의 카운터 기능을 활용하는 추세이다.

표 III-3-86 대표적인 장비(펄스 카운터) 공급처

장비명	공급처
펄스 카운터	Stanford Research Systems

6. 기타

가. 극저온 냉각기

다이아몬드 NV센터는 상온에서도 제어 가능하고 동작이 가능한 큐비트 소자이다. 하지만 더 높은 품질의 양자상태 제어를 위해서는 저온 환경이 필요하다. 특히 NV센터에서 방출되는 광자와의 얽힘을 실현하기 위해서는 4K 이하 극저온이 필요하다. 최근 발표되고 있는 많은 NV센터 관련 논문들의 실험이 극저온 환경에서 이뤄지는 이유이다.

NV센터에서 방출되는 광자의 숫자가 적기 때문에 개구수가 높은 렌즈를 포함하고 있는 극저온 냉각기(Cryostat)가 실험에 유리하다. 또 장시간 실험이 진행되기에 온도 안정성이 중요하다. 헬륨 순환 냉각기가 가격 면에선 적절하지만, 헬륨이 순환할 때 발생하는 진동이 실험에 영향을 미칠 수도 있다.

표 III-3-87 대표적인 극저온 냉각기 공급처

제품명	공급처
극저온 냉각기	Montana instruments

나. 장비 제어 프로그램

다이아몬드 NV센터 기반 양자컴퓨터 연구에 사용되는 수많은 장비들은 각각 사용되는 것이 아니라, 실험목적에 따라 유기적으로 연결되어 있어야 한다. 따라서 장비 간 제어 프로그램이 필요하다.

실험실 레벨에서는 'Labview'라는 프로그램을 많이 사용한다. 제어 프로그램이 잘 구현되어 있고, 장비 간 연결도 간단한 편이다. 그래픽 기반 프로그래밍 환경을 갖추고 있어, 처음 프로그래밍을 접하는 사용자도 직관적으로 프로그램 설계 및 구현이 가능한 장점도 있다. 그러나 실제로는 장비 제어 유저가 아니라 양자컴퓨터 사용자의 편의를 고려해야 한다. 따라서 Labview보다는 '파이썬'이나 'C++' 같은 일반 컴퓨터 프로그래밍 언어가 사용되어야 한다. 많은 양자컴퓨팅 연구그룹들이 장비 제어뿐만 아니라 양자연산에 적용된 파이썬 라이브러리를 공개하고 있어 필요한 양자컴퓨터 실험에 활용이 가능하다.

제 7 절 리드버그 양자컴퓨팅

1. 요점

리드버그 양자컴퓨터는 2-3차원 공간에 배열된 마이크로미터 크기 중성 원자[23]를 이용해 양자 시뮬레이션, 양자 단열 컴퓨팅, 양자회로 컴퓨팅 등 양자역학적 계산을 수행한다. 주요 기술로 2012년 개발된 '리드버그 쌍극자 봉쇄현상(얽힘 기술)'과 2016년 개발된 '리드버그 원자배열[24] 기술'등이 있으며, 현재 빠른 발전 속도를 보이고 있다.

이 중 리드버그 쌍극자 봉쇄현상은 두 개 원자가 일정한 거리 내에 있을 때, 한 원자가 리드버그 상태로 여기되면[25] 다른 원자가 리드버그 양자상태로 여기되지 않는 현상을 말한다. 두 원자가 강하게 상호 작용하면 두 번째 원자의 리드버그 에너지 준위가 바뀌기 때문이며, 이러한 현상은 뒤에 설명할 리드버그 원자 기반의 양자컴퓨팅에서 중요하게 활용된다. 특히 현미경 관찰과 레이저 개별 제어가 가능한 10마이크로미터 간격의 리드버그 원자배열에서, 양자얽힘에 의한 양자게이트의 구동 속도는 10의 9제곱 헤르츠에 이르는 것으로 보고됐다.

리드버그 원자배열 기술은 광집게(Optical Tweezer)로 원자를 포획해 재배치하는 것을 말한다. 이 원자 재배치 기술은 국내 KAIST가 액정소자를 이용해 최초 개발했다. 이후 미국 하버드와 프랑스 광연구소에서도 각각 1차원 및 2차원 음광소자 기반의 개량에 성공하며 일반화시킬 수 있었다.[26] 한편 리드버그 원자배열은 3차원 구조의 비고정 큐비트 시스템 형태를 띤다. 광집게를 이용해 개별 원자를 공간적으로 이동시키거나, 임의 위치로 던져서 잡는 작업도 가능하다. 이처럼 위상학적 구조 변경이 가능해짐에 따라 고정형 큐비트 시스템에서는 어려웠던 양자컴퓨팅 수행도 향후에는 실현될 수 있을 것으로 예상된다.[27]

리드버그 양자컴퓨터는 무엇보다 결맞음 시간 및 큐비트 개수의 확장이 용이하다는 장점이 있다. 기존 알칼리원자 기반 시스템의 경우 결맞음 시간이 100마이크로초 정도로 제한되는 것이 사실이다.

23) 주 양자수 n=100 정도

24) 국내에서 개발된 플랫폼 기술이다.

25) 여기되다: 원자나 분자에 있는 전자가 바닥상태에 있다가 외부 자극에 의해 일정한 에너지를 흡수해 보다 높은 에너지로 이동하는 상태

26) Jaewook Ahn · Hyosub Kim 외 Woojun Lee (2017)

27) Minhyuk Kim · Kangheun Kim · Jaeyong Hwang · Eun-Gook Moon 외 Jaewook Ahn (2022)

그러나 차세대 원자시계로 개발 중인 알칼리토 금속원자 기반의 시스템은 분 단위 결맞음 시간을 가질 것으로 예측되고 있다.

또 큐비트 수의 측면에서는, 2022년 현재 200큐비트급 양자 시뮬레이션과 양자단열 컴퓨팅이 시연되었고 2,000큐비트급 시스템이 파스칼 등의 기술벤처에서 개발 중에 있다. 이에 리드버그 양자컴퓨터의 계산능력은 슈퍼컴퓨터 수준을 훌쩍 뛰어넘어 분 단위 결맞음 시간과 8,000큐비트급 시스템을 확보할 것으로 예상되고 있다.

최근 관련 기술벤처 회사들의 창업이 이어지고 있다. 특히 아톰 컴퓨팅, 큐에라, 파스칼, 콜드 콴타 등이 기술 고도화와 상업적 활용의 실현에 박차를 가하고 있다. 이처럼 활발한 개발 노력을 통해 머지않아 어려운 조합 최적화 문제의 계산이 실현되며 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등의 분야에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 전망되고 있다.

2. 구성요소

리드버그 양자컴퓨터는 원자 냉각장치, 광집게 배열기술, 리드버그 원자 생성기술, 양자어닐링 기술, 원자상태 측정기술 등으로 구성된다.

이 중 '원자 냉각장치'는 빠르게 이동하는 원자를 진공 공간에 정지하게 만드는 장치이다. 우선 기체상태로 있는 원자의 속력을 1,000m/s에서 1mm/s 이하로 줄이고, 온도(또는 속도분포)를 300K에서 0.01mK으로 냉각한다. 이어 레이저를 이용해 이동하는 원자의 운동량을 탈취하고 자기장이 정하는 공간상에 정지하게 만드는 기술이다. 이 장치는 각종 원자를 소재로 하며 각종 광학·기계·전기 부품과 레이저 및 진공 장비 등으로 구성된다. 소재로는 루비듐, 나트륨, 세슘, 이터븀 등의 원자 재료를 취하는데, 1mg~10mg 질량을 가진 잉곳 형태의 상용제품이 주로 사용된다. 부품으로는 렌즈, 거울, 편광기, 프리즘 등 다양한 광학 부품이 특수한 파장대역에 맞게 코팅돼 사용되고 있다. 또 사용되는 주요 장비는 반도체 레이저, 터보 및 이온 진공펌프, 자기장 발생장치 등이 있다.

'광집게 배열기술'은 레이저 초점에 원자를 하나씩 포획하는 기술이다. 레이저 빔을 분리함으로써 현재 20개에서 250개의 원자를 임의의 3차원 공간에 배치할 수 있다. 이 때 일부 광집게가 원자를 포획하지 못하는 경우가 있기 때문에, 원자를 포획한 광집게들의 경우 고속으로 이동시켜 우선 원하는 원자배열을 형성하도록 한다. 다수 레이저 빔을 만들고 또 고속으로 이동시키기 위해, 액정소자(Liquid Crystal Array) 또는 음광소자(Acousto-Optical Device)가 사용된다. 또 원자 포획상태를 확인하기

위한 원자상태 측정장치와 광집게 이동경로 계산을 위한 디지털 컴퓨터가 필요하다. 그 외 레이저 빔을 원자 냉각장치로 전달하고 원자에서 발생한 빛을 측정장치로 보내기 위한 광학장치가 추가된다.[28)]

'리드버그 원자 생성기술' 측면에서는 원자 냉각장치의 저온 원자에 주로 2광자 흡수과정을 야기시키는 레이저를 사용함으로써 리드버그 원자를 만들어낸다. 이를 위해 100kHz 미만 좁은 선폭의 레이저를, 100Hz 선폭의 페브리-페로 공진기로 주파수 안정화해 사용한다.

'양자 어닐링 기술'은 양자다체계의 해밀토니안을 천천히 조절함으로써 만들기 쉬운 초기 양자다체계를 원하는 최종 양자다체계로 바꾸는 기술을 말한다. 특히 양자 어닐링 과정에서 해밀토니안이 양자상전 근처를 통과하는 경우, 다체 얽힘 상태 간 에너지 비교를 필요로 하는 양자컴퓨팅 작업이 수행될 수 있다.[29)] 또 양자어닐링 과정에 필요한 해밀토니안 조절은, 리드버그 원자생성 레이저의 출력 및 주파수를 시간의 함수로 프로그램해 사용한다. 이를 위해 GHz 대역의 주파수 파형 발생기가 사용되고 있다.

'원자상태 측정기술'은 원자가 기저상태에 있는지, 리드버그 상태에 있는지를 측정하는 기술이다. 원자의 특정 에너지 준위 차에 해당하는 레이저를 쬐어 해당 상태의 원자만 빛을 방사하게 만들고 이를 전자증폭카메라, EMCCD 등 고감도 카메라로 촬영하는 기술을 말한다.

3. 소재

가. 원자

사용 장치에 따라 99% 또는 99.9%에 이르는 고순도 루비듐, 나트륨, 세슘, 스트론튬, 이터븀 등의 원자 재료를 사용하고 있다. 이는 주로 1mg에서 10mg 질량의 잉곳 형태 상용제품인데, 진공챔버 내에서 가열해 기체상태로 바꿔 사용한다.

금속 얼로이를 이용한 dispenser도 개발되었다. 금속 얼로이를 금속boat에 담아, 전류를 금속boat에 흘릴 때 발생하는 ohmic heating을 이용하여, 원자 기체를 발생하는 방식이다. 일반적으로 전류는 4-5A 내외를 가하여 400-500K 정도로 가열한다. 이러한 금속 얼로이는 다양한 종의 원자에 활용할 수 있으며, 대부분의 알칼리(Li, Na, K, Rb, Cs) 및 알칼리토금속계열 (Ba, Sr, Yb), 3족 계열 (Mg, Al) 및 그 밖의 원자들(Er 등) 등 다양한 원자종에 활용될 수 있다.

28) Hyosub Kim · Woojun Lee · Han-gyeol Lee · Hanlae Jo · Yunheung Song 외 Jaewook Ahn (2016)

29) Yunheung Song, Minhyuk Kim, Hansub Hwang, Woojun Lee, and Jaewook Ahn, "Quantum simulation of Cayley-tree Ising Hamiltonians with three-dimensional Rydberg atoms," Physical Review Research 3, 013286 (2021/03/29)

표 III-3-88 대표적인 소재(원자) 공급처

소재명	공급처
원자	SAES, Sigma-Aldrich, AlfaVackuo

4. 부품

가. 원자 셀

레이저 주파수를 원자의 에너지 준위 차에 고정하기 위해 사용한다. 10^{-7} Torr 이하 고진공에서, 파장/2 이하 높은 편평도로 밀봉된 글래스 튜브 형태를 띤다.

표 III-3-89 대표적인 부품(원자 셀) 공급처

부품명	공급처
원자 셀	Thorlabs

Rb, Na, K 와 같은 대표적으로 사용되는 원자셀은 기성품으로 구매가 가능하나, 그 외의 원자들은 별도의 주문제작이 필요하다. He, Ne, Ar, Kr, Xe, N, I, Ti, In 등의 원자 셀이 가능하다.

표 III-3-90 대표적인 부품(원자 셀) 공급처

부품명	공급처
원자 셀	Precision Glass Cell

나. UHV 글래스 셀

원자 냉각을 위해 초고진공도(Ultrahigh Vacuum) 글래스 셀이 사용된다. 이 역시 편평도 반파장 이하, 벽면 평행도 1 arc min (= 1/60 도) 미만으로 정밀하게 가공된 글래스 튜브 형태를 띤다.

표 III-3-91 대표적인 부품(UHV 글래스 셀) 공급처

부품명	공급처
UHV 글래스 셀	ColdQuanta, preicision glass blosing, Japan Cell, Akatsuki

다. 터보 펌프

터보 펌프는 10^{-9} mbar 이하 초고진공도 생성과 유지를 위한 진공펌프로, 초당 펌핑 부피가 50~100L/s 이상에 달한다.

표 III-3-92 대표적인 부품(터보 펌프) 공급처

부품명	공급처
터보 텀프	Varian

라. 이온 펌프

이온 펌프는 10^{-9} mbar 이하 초고진공도를 장기 유지하기 위한 진공펌프로, 초당 펌핑 부피가 20~50L/s 이상을 유지해야 한다. 이온 펌프와 이온 펌프 제어기는 국산화 완료 후 산업계에서 사용 중이다.

표 III-3-93 대표적인 부품(이온 펌프) 공급처

부품명	공급처
이온 펌프	Agilent, ㈜알파이브이에스

10^{-11} Torr이하의 초고진공을 도달하기 위해서는 이온펌프 단독으로는 어렵다. 일반적으로 이온 펌프와 같이 사용하여 시너지(synergy) 효과를 내는 화학적 펌프를 많이 사용하는데, 1. Ti-sublimation pump, 2. NEG(non-evaporable getter)를 사용한다.

표 III-3-94 대표적인 부품(게터 펌프) 공급처

부품명	공급처
게터 펌프	Agilent, SAES gatter

마. 전자증폭 카메라

전자증폭 카메라는 가시광선의 빛을 QE max 95% 이상 높은 효율로 검출하는 카메라를 말한다.

표 III-3-95 대표적인 부품(전자증폭 카메라) 공급처

부품명	공급처
전자증폭 카메라	Andor, Hamamatsu

바. 액정소자

액정소자는 레이저 파면에 위상을 프로그램하기 위한 부품으로, 해당 부품을 이용해 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator, SLM)가 만들어진다.

표 III-3-96 대표적인 부품(액정소자) 공급처

부품명	공급처
액정소자	Meadowlark

사. 페브리 페로 공진기

레이저 주파수 안정화를 위해 온도, 진동 등 주변 환경에 둔감한 공진기가 사용된다.

표 III-3-97 대표적인 부품(페브리 페로 공진기) 공급처

부품명	공급처
페브리 페로 공진기	Stable laser systems

아. 위상 고정 서보

서보(Servo)란 요구하는 특정 위치로 이동할 때, 그에 대한 피드백이나 에러 정정을 통해 정확하게 제어할 수 있는 장치를 말한다. 양자컴퓨팅 실현을 위해 RF 신호를 원자시계 등 레퍼런스 신호에 고정하기 위한 서보가 사용되고 있다.

표 III-3-98 대표적인 부품(위상 고정 서보) 공급처

부품명	공급처
위상 고정 서보	TOPTICA Photonics

자. 음향 광학 변조기

음향 광학 변조기(Acousto Optic Modulator)는 레이저 주파수의 빠른 변화가 필요하거나, 레이저 위치를 빠르게 변화시켜야 하는 경우에 사용된다. 변조기에 입력된 rf 주파수에 해당하는 만큼 레이저의 주파수가 변화하며, 이때 1차 변조뿐만 아니라, 고차변조(2, 3차 이상)도 가능하다. 리드버그 기반 양자단열 컴퓨팅의 경우, 리드버그 레이저의 주파수의 빠른 변화가 필요하다. 음향광학변조기에 입력하는 rf주파수를 제어하여, 이를 실행해줄 수 있다. 또한, rf 주파수에 해당하는 만큼 레이저의 변조 각도가 변화하게 되는데, 이를 광집게에 이용하여 원자 위치 제어가 가능하다.

표 III-3-99 대표적인 부품(음향 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
음향 광학 변조기	Intraaction, AA optics, Gooch and housego

차. 전기 광학 변조기

전기광학변조기(Electro Optic Modulator)는 전기장신호(RF, MW)를 이용하여 레이저의 위상을 변조할 수 있다. 레이저 신호간의 위상차이 발생을 통한 Raman process 및 양자조작이 가능하며, 위상변조를 sine파로하여 주파수 변조(Frequency Modulation, FM)를 일으켜 주파수 side band성분 생성이 가능하다.

자유공간(Free Space) 및 광섬유(Optical Fiber) 방식으로 나눌 수 있다. 자유공간 형식의 경우 일반적으로 높은 고전압(100볼트 수준)이 필요하며, 광섬유방식은 수 볼트 수준에서도 pi위상 변조가 가능하고 약 수 GHz 대역까지 변조도 가능하다

표 III-3-100 대표적인 부품(전기 광학 변조기) 공급처

부품명	공급처
전기 광학 변조기	Thorlabs, Qubig, Jenoptik, EOspace, AdvR

카. 광학 기기

리드버그 원자 양자컴퓨터에는 다양한 기초 광학용품(거울, 렌즈, 편광 광학기) 및 광학 기계부품(광학기기 마운트, 정밀 actuator 등)이 사용된다.

표 III-3-101 대표적인 부품(광학용품) 공급처

부품명	공급처
광학용품	Thorlabs, Edmund Optics, Newport

파. 정밀 이미징 광학계

리드버그 원자 양자컴퓨터 구동에는 각각의 큐비트의 측정 제어가 필수적인 요소이다. 이를 위해서는 고분해능 이미징 광학계가 필요하며, 이는 높은 개구수(Numerical Aperture)를 요구한다. 일반적으로 원자 큐비트간의 간격이 수 μm 수준으로, μm이하의 분해능을 갖는 이미징 광학계가 사용된다. 이미징 광학계는 광학계와 원자간의 거리가 수 mm에서 수십 mm수준이 요구되어, 소위 long working distance objective lens가 주로 사용된다.

표 III-3-102 대표적인 부품(정밀 이미징 광학계) 공급처

부품명	공급처
정밀 이미징 광학계	Special Optics, Mitutoyo

타. 레이저 주파수 안정화 서보

레이저의 주파수를 안정화 하기 위해서는 레이저 주파수 에러 신호를 레이저 발생기에 되먹임(feedback)해야 한다. 이때 되먹임 안정화를 제어하여 원하는 수준의 주파수 안정도를 얻기 위해 필요한 것이 주파수 안정화 서보로, 일반적으로 PID 기반의 제어 방식을 가지고 있다.

표 III-3-103 대표적인 부품(레이저 주파수 안정화 서보) 공급처

부품명	공급처
레이저 주파수 안정화 서보	Vescent, Newport

5. 장비

가. 다이오드 레이저

다이오드 레이저는 좁은 선폭의 레이저를 발진시키는 장치로 선폭과 위상 지연, 주파수 스캔 폭 등의 조정이 가능하다.

표 III-3-104 대표적인 장비(다이오드 레이저) 공급처

장비명	공급처
다이오드 레이저	Moglabs

나. 다이오드 레이저 서보

다이오드 레이저 서보는 주파수 안정화를 위해 사용되는 장치로 전류 잡음, 온도 안정도, 주파수 스캔 범위 등을 조정할 수 있다.

표 III-3-105 대표적인 장비(다이오드 레이저 서보) 공급처

장비명	공급처
다이오드 레이저 서보	Moglabs

다. 다이오드 고출력 레이저

다이오드 고출력 레이저는 레이저 발진기를 펌핑하기 위한 장치로 파장, 출력, 출력 안정도 등을 조정할 수 있다.

표 III-3-106 대표적인 장비(다이오드 고출력 레이저) 공급처

장비명	공급처
다이오드 고출력 레이저	Coherent, Lighthouse Photonics, Precilasers

라. 분광용 레이저

분광용 레이저는 가변 파장대역의 분광용 고체를 고출력할 수 있는 장치로 파장 가변범위, 출력, 선폭 등을 조정할 수 있다.

표 III-3-107 대표적인 장비(분광용 레이저) 공급처

장비명	공급처
분광용 레이저	Avesta

마. 다이오드 레이저 발진기

리드버그 원자의 생성을 위해서는 100kHz 미만 좁은 선폭의 레이저를 발진시켜야 한다.[30] 이 장치를 통해 파장 대역, 출력, 선폭 등을 조정함으로써 실험 목적과 환경에 맞는 레이저를 이용할 수 있다.

표 III-3-108 대표적인 장비(다이오드 레이저 발진기) 공급처

장비명	공급처
다이오드 레이저 발진기	TOPTICA Photonics

30) 예를 들어, External cavity diode laser

바. 다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기

다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기(Diode Laser SHG Amplifier)를 통해 주파수 대역, 출력, 선폭 등을 조정할 수 있다.

표 III-3-109 대표적인 장비(다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기) 공급처

장비명	공급처
다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기	TOPTICA Photonics, Precilasers

사. 전류 공급 장치

자기장 제어는 원자 큐비트의 제어에 있어서 중요한 부분으로, 일반적으로 자기장 코일에 전류를 흘려 원자 큐비트에 가해지는 자기장을 제어한다. 자기광포획 및 sub doppler laser cooling 등에 자기장 제어가 중요하며, 리드버그여기, 1,2-큐비트 제어 등 대부분의 양자컴퓨터 제어 과정에 자기장 환경이 중요하다.

표 III-3-110 대표적인 장비(전류 공급 장치) 공급처

장비명	공급처
전류 공급 장치	Keysight, Caenels

아. 디지털/아날로그 I/O 장치

중성원자 양자컴퓨터에 사용되는 각종 측정/제어 장비들의 흐름을 총괄적으로 제어하여, 하나의 양자연산을 가능하게 하는 구심점 역할을 하는 장비가 필요하다. 이는 일반적으로 디지털/아날로그 신호를 생성·측정하는 시스템과 이를 구동하는 소프트웨어를 이용하여 구성한다.

표 III-3-111 대표적인 장비(디지털/아날로그 I/O 장치) 공급처

장비명	공급처
디지털/아날로그 I/O 장치	National Instrument, Ibaview SDK drivers, M-Labs, Quantum Machines

자. 광주파수 빗 장비(Optical Frequency Comb)

레이저의 주파수 안정화 및 기준계로 사용되는 광주파수 빗장비는, 광주파수 기반의 정밀 제어/측정 분야 전반에 사용된다. 양자 컴퓨터뿐만 아니라, 양자 센싱, 원자 시계에도 사용되고 있다.

표 III-3-112 대표적인 장비(광주파수 빗) 공급처

장비명	공급처
광주파수 빗	Menlo systems, TOPTICA Photonics

제8절 시사점

현재 초전도 양자컴퓨팅 개발 상황에서 가장 중요한 소부장은 몇 가지로 요약할 수 있다. 첫째로 무냉매 희석 냉장고, 둘째로 양자 제어분석 시스템, 셋째로 저온용 세미-리지드 동축 케이블, 넷째로 저잡은 증폭기(HEMT)이다. 이들 네 가지를 국산화할 수 있다면 초전도 양자 컴퓨팅 연구의 문턱이 많이 낮아질 수 있다고 생각된다. 무냉매 희석 냉동기 같은 경우는 과거 국내 대학에서 제작한 바 있으며, 최근에는 소형 장비가 개발되어 상용화에 거의 근접한 것으로 보인다. 하지만 양자컴퓨팅용으로 사용될 만큼의 냉각 능력과 물리적 공간을 갖춘 냉동기가 상용화되려면 아직 시간이 필요하다. 양자 제어분석 시스템의 경우는 초전도분야 외에도 양자점이나 NV 센터 기반의 양자컴퓨팅 연구에도 사용할 수 있기 때문에 활용성이 높다고 할 수 있다. 또한 초전도 큐비트 시스템이 확장됨에 따라 측정 장비 시스템의 확장도 필요하므로 수요가 높아지게 된다. 아쉽게도, 국내에는 양자기술 연구에 사용할만한 특화된 RF 제어분석 시스템이 없지만, 지금부터라도 개발에 착수할 필요는 충분해 보인다.

최근 발전하고 있는 반도체 양자점 기반 양자컴퓨팅 관련 소부장 산업은 확장성 높은 큐비트 제어를 중심으로 발전하고 있다. 이스라엘 Quantum-machines 사는 2023년 기준 1,000 개의 큐비트를 제어할 수 있는 opx-1000 장비를 출시하는 등 향후 고집적 큐비트를 이용한 양자에러보정 구현에 초점을 두고 있다. 이에 반해, 소부장 측면의 반도체 양자점 양자컴퓨팅 관련 국내 산업은 성공적인 사례를 찾아보기 어렵다. 연구소 및 학교에서 연구 차원의 성과를 내고 있기는 하지만 이를 스핀오프해서 스타트업을 시작한 경우는 찾아보기 드물다. 신호발생기 또는 FPGA 기반 큐비트 컨트롤러 부문의 소규모 시작품을 선보인 것이 전부이므로, 국내 양자 소부장 산업의 활성화가 시급하다.

국내 이온트랩 기반 양자컴퓨팅은 해외와 비교하여 아직 기술 격차가 큰 편이다. 두 자릿수가 넘어가는 이온들에서 임의의 두 이온의 쌍큐비트 게이트 구현은 아직 성공한 사례가 없어 양자 알고리듬 구현 역시 아직은 요원한 상황이다. 해외에서는 오랜 기간 이온트랩 기반 연구가 이루어져 노하우가 많이 축적된 만큼 이미 이온트랩 양자컴퓨팅을 상업적으로 활용하기 위해 박차를 가하는 중이다. 또한 기업 단위의 투자가 많이 이루어지고 있기 때문에 개발 속도는 계속 가속화될 것으로 보인다. 하지만, 국내의 이온트랩 관련 연구 기간이 길지 않은 것을 감안하면 전세계 선두 그룹을 제외하고는 국내 이온트랩 기술은 상위권으로 평가할 수 있다. 최근 이온트랩 관련한 국내 연구진이 많이 늘어나고 해외 교류가 많아진 점과 국가 투자금이 늘어난 점은 긍정적으로 여겨지는 부분이며 앞으로 선두 그룹과의 기술 격차는 좁혀질 것으로 예상된다.

다만 이온트랩을 활용한 산업적인 양자컴퓨터를 국내에서 만들기 위해서는 아직 재료 및 장비 수급이나 기업들의 투자 등 부족한 부분이 많은 실정이다. 그렇다고 하더라도 각종 제조 인프라와 반도체 공정 기술, 소프트웨어 기술이 발달한 나라인 만큼 국내 기업들의 투자와 참여가 이루어진다면 국내에서 개발된 이온트랩 기반 양자컴퓨터도 나올 수 있을 것이라 기대된다.

광기반 양자컴퓨팅은 현재 전세계에서 초전도체 기반 양자컴퓨팅에 버금갈 정도의 아웃풋을 내놓고 있고 스타트업도 많이 생겨나는 추세다. 국내에서도 빠른 속도로 선두 그룹을 추격하면서 동시에 공동연구를 수행하고 있다. 하지만 여기에 사용되는 소재, 부품, 장비는 현재 전량 수입에 의존하고 있는 상황이다. 초전도 단일 광자 검출기를 비롯한 몇몇 제품은 국내 대체제가 없기도 하지만, 많은 경우 국내 제품에 대한 낮은 신뢰도 및 해외 제품과의 낮은 호환성 등이 원인이다. 새로운 제품을 개발하는 것도 중요하지만 대체가 가능한 간단한 소재 및 부품부터 현 연구자들이 사용할 수 있도록 제도적 혹은 문화적으로 바꿔가는 것이 필요하다. 또한 많은 경우 국내 수요만으로는 양자 산업 생태계에 한계가 있으니 산학연이 힘을 합쳐 국내 제품에 대한 홍보 등에도 힘을 쓰는 것이 필요하다. 일례로 세계 선두 그룹에서 어떤 장비를 쓴다고 논문에 쓴 이후로 그 장비가 그 분야에서 거의 독점하다시피 하고 크게 성장한 경우가 있다. 그래서 어떤 기업은 논문에 제품 이름을 적는 조건으로 특혜를 주기도 한다. 이런 협력을 바탕으로 국내 양자 소부장 사업이 발전하도록 환경을 조성하는 것이 필요하다.

NV 센터는 양자 센싱, 통신, 컴퓨팅 등 양자 全분야에서 활용될 수 있는 양자 플랫폼이다. NV 센터 연구를 위해서는 크게 소재인 다이아몬드, 큐비트의 상태를 초기화하고 읽기 위한 광학 시스템, 큐비트의 상태를 제어하기 위한 마이크로웨이브 관련 시스템이 필요하다. 소재에 해당하는 다이아몬드는 단결정의 고품질 CVD 다이아몬드가 필요한데, 대부분 수입에 의존하고 있다. 최근 국내 연구 기관들에서 고품질 CVD 다이아몬드 성장 기술에 관한 연구를 진행하고 있지만, 아직은 해외 성장 기술과의 격차가 존재한다. 광학 시스템, 마이크로웨이브 관련 시스템에 들어가는 부품과 장비 또한 대부분 해외의 부품, 장비에 의존하고 있다. NV 센터 기반의 양자 시스템은 초전도 기반의 양자 시스템과는 다르게 극저온의 동작 환경이 필요하지 않기 때문에 사용되는 증폭기 및 마이크로웨이브 시스템이 특별하지 않아 충분히 국내 기술로 개발 가능하다고 생각된다. 특히 임의 파형 생성기는 이미 여러 국내 장비 회사에서 개발 중인 것으로 알려져 있다. 대부분의 양자 연구가 해외에서 시작되었고, 그때 연구에 사용된 부품과 장비들이 연구 시스템 안정화를 이유로 그대로 국내에 들어온 경우가 많다. 이제는 양자 연구그룹과 산업계가 해당 연구에 대해 충분한 소통을 하여 관련 부품 및 장비를 국내기술로 개발할 수 있도록 노력해야 할 것이다.

리드버그 원자 양자컴퓨터 시스템은 정밀 레이저 장비, 광학기기, RF 장비 등이 주요 구성요소이다. 레이저장비는 안정도, 정밀도, 수명 등이 중요한 요소로, 현재 몇몇 외국기업들의 독과점 형태로 산업생태계가 형성되어 있다. 오늘날 미국과 유럽의 기업들이 산업생태계를 주도하고 있으나, 중국 기업들의

약진이 두드러지고 있다. 첨단 레이저 장비는 기술적인 허들이 높고, 사용자들의 제조사에 대한 신뢰도가 중요하기 때문에, 국내 산업이 이를 돌파하기는 쉽지 않을 것으로 보인다. 현재 양자컴퓨터에 사용될 만한 첨단레이저를 제조하는 국내업체는 전무한 상태로, 수입에 전적으로 의지하고 있다. 주목할 만한 사항은 리드버그 원자 양자 컴퓨터 전용의 제어용 하드웨어가 상품화되어 산업계에 등장했다는 점이다. 대부분의 연구진들은 다목적 다기능의 제어용 하드웨어(예. NI daq 장비)를 이용하거나, 제3의 하드웨어 장비 및 FPGA를 직접 개발하여 양자컴퓨터의 구동에 사용해왔다. 이는 개발에 많은 시간이 걸리며, 다목적으로 개발된 하드웨어 시스템이라는 한계로 인해 원자기반 양자컴퓨터에 적용하는데 비효율적인 점이 지적되어 왔다. Quantum-machines사는 리드버그 원자 양자컴퓨터에 적용할 수 있는 측정/제어 하드웨어를 시장에 상품화해서 출시하였으며, 이는 리드버그 원자 양자컴퓨터 연구 효율성에 큰 진전을 가져올 것으로 기대된다.

본 장에서는 양자컴퓨팅을 구현하는 여러 플랫폼에서 사용되는 소재, 부품, 장비에 대해 알아보았다. 여기서 몇 가지 주목해야 할 사실 중 하나는, 양자컴퓨팅을 목표로 하는 플랫폼은 다르지만 필요한 소재, 부품, 장비 등은 대동소이 하다는 점이다. 기본적으로 대량 생산을 위해 웨이퍼가 필요하고 여기에 큐비트를 구현하기 위해 여러 소재들이 사용된다. 각종 소재들은 공정을 통해 최종 양자컴퓨팅 소자가 되지만, 공정에 필요한 장비 자체만으로도 너무 방대해 여기에선 다루지 않았다. 하지만 양자 소자 제작에 필요한 공정 설비의 중요성은 모두가 공감하고 있어 최근 국내에 많은 양자 전용 공정 설비가 설치되고 있다. 소재뿐만 아니라 각종 부품 및 장비들도 비슷하다. 기본적으로 큐비트를 제어하기 위해선 빛 혹은 전기를 이용하기 때문에 각종 레이저, 전기 부품들이 대부분의 부품과 장비를 차지한다. 심지어 빛을 제어하기 위해서 전기 신호를 사용하기 때문에 기본적인 정밀 전기 부품, 대표적으로 임의의 파형을 생성하는 전기 장치는 양자컴퓨팅의 필수 장비로 알려져 있다. 또한 각종 노이즈로부터 양자상태를 보호하기 위해 극저온, 고진공을 만들어 주는 장비가 대부분 사용된다.

하지만 여기에 언급된, 그리고 국내에서 사용되는 대부분의 소재, 부품, 장비는 수입에 의존한다. 여기에는 여러 가지 이유가 있다. 먼저 국내 제품의 낮은 품질이다. 국내에서도 몇 가지 기본적인 소재, 부품, 장비들을 생산하고 있으나 그 품질이 해외 제품에 많이 뒤쳐진다. 이는 양자컴퓨팅 기술 자체가 워낙 어려워 여기에 사용하는 제품들이 항상 세계 최고 품질인 이유도 있다. 그리고 세계 최고 품질의 제품을 국내에서 모두 생산하는 것은 불가능하다. 하지만 거의 모든 제품을 수입에 의존하는 것은 기술 식민지가 될 수도 있는 위험한 구조라는 것을 인지해야 한다. 또한 국내 업체는 국내 시장을 주요 시장으로 인식해 생명이 길지 않다. 간혹 국내 제품을 사용하다 10년 정도 지나서 업체가 사라져 AS를 못 받는다거나 호환이 안 되는 부품들로 낭패를 보는 경우가 있다. 이런 경험들이 쌓여 많은 연구자들이 해외 제품을 선호하고 국내 생태계가 위축되는 악순환이 이루어지는 것이다.

이를 타계하기 위해선 기초 기술력에 대한 투자를 바탕으로 많은 스타트업이 생겨나야 한다. 위에 언급한 많은 파운드리 서비스 스타트업도 학교 및 기관에서 연구한 기술력을 바탕으로 창업한 것으로 현재는 전세계를 대상으로 서비스를 제공하고 있다. 우리나라에서도 우수한 기술에 대한 투자를 확대하고 이를 바탕으로 스타트업을 장려해 지속적인 기술 발전을 이루어야 한다. 이는 비단 양자 분야에 국한되지 않는다. 대부분의 기술은 상호 연계되어 있기 때문에 관련이 없어 보이는 기술 발전도 양자컴퓨팅 기술 개발에 도움이 될 수 있다.

과거와 비교하면 현재 많은 우수한 인재들이 국내외 유수의 대학에서 공부하고 선진기술력을 배우고 국내에서 연구하고 있다. 특히 양자컴퓨팅 분야는 미국, 중국 같은 대규모 자본을 가진 나라를 제외하곤 한국도 크게 뒤지지 않는 상황이다. 핵심 기술만을 놓고 본다면 향후 몇 년 내에 누가 먼저 개발하는가에 따라 역전도 가능한 상황이다. 이런 시점에서 양자컴퓨팅 연구에 필요한 소재, 부품, 장비의 수입이 차단된다면 타격이 아주 크다. 이미 중국과 미국은 양자컴퓨팅 관련 제품의 수출을 서로 규제하기 시작했고, 우리나라도 언제 중국이나 미국에서 수출을 제재할지 모른다. 따라서, 하루빨리 핵심 소재, 부품, 장비 기술력을 키워 기술 강국의 반열에 올라야 할 것이다. 그리고 향후 십여 년간은 그 중심에 양자컴퓨팅 기술이 있을 것으로 전망한다.

참고문헌

• 국내문헌

1	고영호, 김갑중, 최병석, 한원석, 윤천주, 주정진(2019), “ 양자 정보 기술을 위한 양자 광원 연구 동향”, 전자통신동향분석 34권 5호.
2	곽승찬(2020), “50GHz 배열형 도파로 격자 및 양자 암호통신용 평판 도파로 마이켈슨 간섭계”, 전남대학교 박사학위 논문.
3	곽승찬, 문형명, 임기건, 김진봉, 조정식(2018), “양자암호통신을 위한 비대칭 평판도파로 마이켈슨 간섭계”, New Physics: Sae Mulli, 68(7): 795-800.
4	길민권(2021.9.8.), “안랩, 양자 난수 생성기(QRNG)를 난수 생성 잡음원으로 추가한 암호모듈로 ‘암호모듈검증(KCMVP)’ 획득”, 데일리시큐.
5	김나영, 홍창호, 권오성, 정연창, 지세완, 장진각, 권대성(2018), “양자 키 분배 – 제2부: BB84프로토콜”, TTA 정보통신 단체표준.
6	김용수, 최유준, 이민수, 권오성, 한상욱, 문성욱(2014), “단일광자 생성, 검출 및 양자암호통신 응용”, 광학과 기술 18(2): 19~20.
7	김윤호, 홍정기(2007), “얽힘상태 광자쌍을 이용한 양자광학 연구”, 광학과 기술 11(3-4): 21-26.
8	김윤희(2020.1.13.), “이와이엘, 미국 공군에 양자 난수 암호칩 공급”, ZDNet Korea.
9	김태수, 김헌호(2007), “광자쌍의 간섭”, 광학과 기술 11(3-4): 5-11.
10	김헌오, 김태수, 조석범, 노태곤(2010), “얽힘 상태 광자쌍의 생성 및 양자간섭”, 물리학과 첨단기술 10월호 19권 10호.
11	김헌오, 윤천주, 조석범, 김용수(2011), "주파수 상향변환 검출기를 이용한 1.5 μm 통신파장대역의 단일광자 측정", 한국광학회지 22(5), 223-229.
12	다임즈 소개자료(2021), 양자암호통신 – 양자키 관리시스템(QKMS).
13	박주연(2022.5.25.), “SK텔레콤, ‘양자생태계’ 확대 총력... QRNG칩 적용 영역 늘려 글로벌 공략 시동”, PAX경제TV.
14	백정현(2015.9), “초소형 양자난수생성기의 개발과 응용기술 소개”.
15	이건한(2022.5.25.), “[3社3色] SKT, ‘QRNG’ 연대의 양자 생태계 확산 전략”, BLOTER.
16	이민수, 김용수, 한상욱, 문성욱(2015), "양자암호시스템을 위한 단일광자검출기", 정보와 통신 Volume 32 Issue 8, 62-68.
17	이욱재·심재식·윤천주(2020), "단일광자 검출기 기술개발 동향", 전자통신동향분석 35권 4호.
18	임용재, 홍권기, 이창희, 안승현, 황일평, Wang Xun(2015), “양자암호통신 기술 소개 및 동향”, 정보통신기획평가원.
19	차명식, 유난이(2009), “준위상정합 비선형광학 소자의 연구현황”, 광학과 기술 13(2): 5-10.
20	Jaewook Ahn, Hyosub Kim, Woojun Lee(2017), Dynamic holographic single atom tweezers and tweezing method using thereof, Korea Patent 1017834040000.
21	Jongseok Lim, Han-gyeol Lee, and Jaewook Ahn(2013), "Review of cold Rydberg atoms and their applications," Journal of Korean Physical Society 63(4), 867-876.
22	KT융합기술원(2020), 양자암호통신 QKD 기술 – 유선 2-way 방식 위상 및 간섭계 구조.
23	Waranont Anukool, Jongseok Lim, Yunheung Song, and Jaewook Ahn(2018), "Quantum computing systems: a brief overview," Journal of Korean Physical Society 73(50th Anniversary Special Issue), 841.

• 해외문헌

1	A. Brimont, D. J. Thomson, P. Sanchis, J. Herrera, F.Y. Gardes, J. M. Fedeli, G. T. Reed, and J. Martí(2011), High speed silicon electro-optical modulators enhanced via slow light propagation,. Opt. Express 19(21): 20876-20885.
2	Alberto Politi, Jonathan C. F. Matthews, Mark G. Thompson, and Jeremy L. O'Brien(2009), Integrated Quantum Photonics. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 15(6): 1673-1684.
3	Ali Anwar et al.(2021), Entangled photon-pair sources based on three-wave mixing in bulk crystals, Rev. Sci. Instrum. 92, 041101.
4	Bienvenu Ndagano, Hugo Defienne et al.(2022), Quantum microscopy based on Hong-Ou-Mandel interference, Nature PhotonIcs 16, 384.
5	Blakey, P.S., Liu, H., Papangelakis, G. et al.(2022), Quantum and non-local effects offer over 40 dB noise resilience advantage towards quantum lidar, Nat Commun 13, 5633.
6	C. T. Fancher, D. R. Scherer, M. C. S. John and B. L. S. Marlow(2021), Rydberg Atom Electric Field Sensors for Communications and Sensing, IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 2, 1-13.
7	Canghyun Jung, Woojun Lee, Junho Jeong, Minjae Lee, Yunjae Park, Taehyun Kim, and Dongil "Dan" Cho(2021), A microfabricated ion trap chip with a sloped loading slot to minimize exposing trapped ions to stray charges, Quantum Science and Technology, 6, 044004.
8	Catxere A. Casacio, Lars S. Madsen et al.(2021), Quantum-enhanced nonlinear microscopy, Nature 594, 201.
9	Chao Zhang et al.(2021), Spontaneous Parametric Down-Conversion Sources for Multiphoton Experiments, Adv. Quantum Technol. 4, 2000132.
10	Cheng Wang, Mian Zhang, Brian Stern, Michal Lipson, and Marko Lončar(2018), Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators, Opt. Express 26(2): 1547-1555.
11	Chi Xiong, Wolfram H. P. Pernice, and Hong X. Tang(2012), Low-Loss, Silicon Integrated, Aluminum Nitride Photonic Circuits and Their Use for Electro-Optic Signal Processing, Nano Lett. 12(7): 3562-3568.
12	Chris Sparrow, Enrique Martín-López et al.(2018), Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics, Nature 557, 660-667.
13	Christophe Couteau(2018), Spontaneous parametric down-conversion., Contemporary Physics 59(3), 291-304.
14	David H. Meyer, Paul D. Kunz, and Kevin C. Cox(2021), Waveguide-Coupled Rydberg Spectrum Analyzer from 0 to 20GHz, Phys. Rev. Applied 15, 014053.
15	David H. Meyer, Zachary A. Castillo, Kevin C. Cox, and Paul D. Kunz(2020), Assessment of Rydberg atoms for wideband electric field sensing, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 53(3), 034001.
16	David N. Nikogosyan(2005), Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey, Springer.
17	Dongjin Lee, Kyungdeuk Park and Heedeuk Shin(2021), Comparison of photon-pair generation rate between the sideband and fundamental modes of spontaneous four-wave mixing, J. of Optics, 23(9): 09542.
18	Experimental Methods in the Physical Sciences 45(2013), Ch.11. Parametric Down-Conversion, 351-410.
19	F. Vernuccio, A. Bresci, V. Cimini, A. Giuseppi, G. Cerullo, D Polli, and C. M. Valensise(2022), Artificial Intelligence in Classical and Quantum Photonics, Laser Photon. Rev. 16(5): 2100399.
20	G. Brida, M. Genovese, and I. Ruo Berchera(2010), Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging, Nature Photonics 4, 227.
21	Gerd Keiser(2000), Optical Fiber Communication, McGrawHill 3rd Edition, p.36.

22	Gupta, P.K., Khare, R.(2015), Lasers: An Introduction. In: Gupta, P., Khare, R. (eds) Laser Physics and Technology, Springer Proceedings in Physics, vol 160.
23	Han-Sen Zhong, Hui Wang et al.(2022), Quantum computational advantage using photons, Science 370: 1460-1463.
24	Hansuek Lee, Tong Chen, Jiang Li, Ki Youl Yang, Seokmin Jeon, Oskar Painter & Kerry J. Vahala(2012), Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip, Nature Photonics 6: 369-373
25	Hao Deng, Zhijun Song et al.(2022), Titanium Nitride Film on Sapphire Substrate with Low Dielectric Loss for Superconducting Qubits, arXiv.
26	He, Z., Zhang, Y., Tong, X. et al.(2023), Quantum microscopy of cells at the Heisenberg limit, Nat Commun 14, 2441.
27	Hojoong Jung and Hong X. Tang(2016), Aluminum nitride as nonlinear optical material for on-chip frequency comb generation and frequency conversion, Nanophotonics 5(2): 263-271.
28	Hojoong Jung, Su-Peng Yu, David R. Carlson, Tara E. Drake, Travis C. Briles, and Scott B. Papp(2021), Tantala Kerr nonlinear integrated photonics, Optica 8(6): 811-817.
29	Hojoong Jung, Xiang Guo, Na Zhu, Scott B Papp, Scott A Diddams, Hong X Tang(2016), Phase-dependent interference between frequency doubled comb lines in a $x(2)$ phase-matched aluminum nitride microring, Opt. Lett. 41(16): 3747-3750.
30	Hyosub Kim, Woojun Lee, Han-gyeol Lee, Hanlae Jo, Yunheung Song, and Jaewook Ahn(2016), In situ single-atom array synthesis using dynamic holographic optical tweezers, Nature Communications 7, 13317.
31	IEEE Transactions on Antennas and Propagation(2021), A Self-Calibrated SI-Traceable Rydberg Atom-Based Radio Frequency Electric Field Probe and Measurement Instrument.
32	IEEE Transactions on Quantum Engineering(2021), Rydberg Atom Electric Field Sensors for Communications and Sensing.
33	J. P. McGilligan, P. F. Griffin, E. Riis, and A. S. Arnold(2015), Phase-space properties of magneto-optical traps utilising micro-fabricated gratings., Optics Express Vol. 23, Issue 7, 8948-8959.
34	Jing, M., Hu, Y., Ma, J. et al.(2020), Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy, Nature Physics 16: 911-915
35	Josephine B. Chang, Michael R. Vissers et al.(2013), Improved superconducting qubit coherence using titanium nitride, Applied Physics Letters 103, 012602.
36	Joshua A. Gordon, Matthew T. Simons, Abdulaziz H. Haddab, and Christopher L. Holloway, Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer, AIP Advances 9, 045030.
37	Jwo-Sy Chen et al.(2023), Benchmarking a trapped-ion quantum computer with 29 algorithmic qubits, arXiv:2308.05071.
38	Kevin C. Cox, David H. Meyer, Fredrik K. Fatemi, and Paul D. Kunz(2018), Quantum-Limited Atomic Receiver in the Electrically Small Regime, Physical Review Letters 121, 110502.
39	Kevin Luke, Prashanta Kharel, Christian Reimer, Lingyan He, Marko Loncar, and Mian Zhang(2020), Wafer-scale low-loss lithium niobate photonic integrated circuits, Opt. Express 28(17): 24452-24458.
40	Kim, Minhyuk and Kim, Kangheun and Hwang, Jaeyong and Moon, Eun-Gook and Ahn, Jaewook(2022), Rydberg quantum wires for maximum independent set problems, Nature Phys. 18(7), 755-789
41	Lars S. Madsen, Fabian Laudenbach et al.(2022), Quantum computational advantage with aprogrammable photonic processor, Nature 606: 75-81.

42	M. G. Basset, A. Hochrainer, S. Töpfer, F. Riexinger, P. Bickert, J. R. León-Torres, F. Steinlechner and M. Gräfe(2021), Video-rate imaging with undetected photons, Laser Photonics Rev. 15, 2000327.
43	Marta Gilaberte Basset, Frank Setzpfandt et al.(2019), Perspectives for Applications of Quantum Imaging, Laser Photonics Review 13(10), 1900097.
44	Martin A. Wolff, Fabian Beutel et al.(2021), Broadband waveguide-integrated superconducting single-photon detectors with high system detection efficiency, Appl. Phys. Lett. 118, 154004.
45	Matt T. Simons, Joshua A. Gordon, and Christopher L. Holloway(2018), Fiber-coupled vapor cell for a portable Rydberg atom-based radio frequency electric field sensor, Applied Optics 57(22): 6456-6460.
46	Miles J. Padgett and Robert W. Boyd(2016), An introduction to ghost imaging: quantum and classical, Philosophical Transactions of The Royal Society A 375(2099), 20160233.
47	Minhyuk Kim, Kangheun Kim, Jaeyong Hwang, Eun-Gook Moon, and Jaewook Ahn(2022), Rydberg Quantum Wires for Maximum Independent Set Problems, Nature Physics 18, 755–759.
48	Nigam Samantaray, Ivano Ruo-Berchera et al.(2017), Realization of the first sub-shot-noise wide field microscope, Light: Science & Applications 6, e17005.
49	Nshii, C., Vangeleyn, M., Cotter, J. et al.(2013), A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies, Nature Nanotech 8, 321–324.
50	P. Lukas and W. Maunz(2016), High optical access trap 2.0, Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND-2016-0796R 618951.
51	Paesani, S., Borghi, M., Signorini, S. et al.(2020), Near-ideal spontaneous photon sources in silicon quantum photonics, Nat Commun 11, 2505.
52	Pengfei Wang et al.(2021), Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour, Nature Communications, 12(1): 233.
53	Qiang Wang, Lili Hao et al.(2016), Super-resolving quantum lidar: entangled coherent-state sources with binary-outcome photon counting measurement suffice to beat the shot-noise limit, Optics Express 24(2016), 254338.
54	S. A. Moses et al.(2023), A race track trapped-ion quantum processor, Phys. Rev. X 13(4), 041052, 25.
55	S. Crain, E. Mount , E. Mount, S. Baek and J. Kim(2014), Individual addressing of trapped 171Yb+ ion qubits using a microelectromechanical systems-based beam steering system, Applied Physics Letters, 105, 181115.
56	S. Paesani, M. Borghi, S. Signorini, A. Maïnos, L. Pavesi and A. Laing(2020), Near-ideal spontaneous photon sources in silicon quantum photonics, Nat. Comm. 11: 2505.
57	Santosh Kumar, Haoquan Fan, Harald Kübler, Jiteng Sheng, and James P. Shaffer(2017), Atom-Based Sensing of Weak Radio Frequency Electric Fields Using Homodyne Readout, Scientific Reports 7: 42981.
58	Sara L. Mouradian, Tim Schröder et al.(2015), Scalable Integration of Long-Lived Quantum Memories into a Photonic Circuit, Phys. Rev. X 5: 031009.
59	Simone Ferrari, Carsten Schuck and Wolfram Pernice(2018), Waveguide-integrated superconducting nanowire single-photon detectors, Nanophotonics 7(11): 1725-1758.
60	Yuan-Yu Jau and Tony Carter(2020), Vapor-Cell-Based Atomic Electrometry for Detection Frequencies below 1kHz, Phys. Rev. Applied 13, 054034.
61	Yunheung Song, Minhyuk Kim, Hansub Hwang, Woojun Lee, and Jaewook Ahn(2021), Quantum simulation of Cayley-tree Ising Hamiltonians with three-dimensional Rydberg atoms, Physical Review Research 3, 013286.
62	Zheng Yong, Hong Chen et al.(2022), Power-efficient silicon nitride thermo-optic phase shifters for visible light, Opt. Express 30(5): 7225-7237.

63	Zijiao Yang, Mandana Jahanbozorgi, Dongin Jeong, Shuman Sun, Olivier Pfister, Hansuek Lee and Xu Yi(2021), A squeezed quantum microcomb on a chip, Nat. Comm. 12: 4781.

• 사이트

1	http://www.coweaver.co.kr/
2	http://www.daims.co.kr/
3	http://www.ppitek.com/
4	http://www.quantum-info.com/
5	http://www.wooriro.com/
6	https://atom-computing.com
7	https://bluefors.com/
8	https://coldquanta.com
9	https://covesion.com
10	https://delft-circuits.com/
11	https://e6cvd.com
12	https://english.cas.cn/newsroom/research_news/phys/202107/t20210708_273799.shtml
13	https://gandh.com
14	https://idquantique.co.kr/
15	https://ii-vi.com
16	https://iontc.co.jp
17	https://isrc.snu.ac.kr
18	https://kanc.re.kr
19	https://lownoisefactory.com
20	https://luxtelligence.ai/
21	https://nanoscience.oxinst.com/
22	https://ndtcompany.com
23	https://novantaphotonics.com
24	https://octatco.com/
25	https://optoecomponents.com/
26	https://pasqal.io
27	https://precisionglassblowing.com/
28	https://qcl.kaist.ac.kr
29	https://qd-uki.co.uk/
30	https://qm-ware.com/qrng
31	https://quantum-machines.co
32	https://quantummicrowave.com/

33	https://qubitekk.com/
34	https://qutools.com/
35	https://raicol.com
36	https://s-fifteen.com/
37	https://spectrum.ieee.org/ionq-new-quantum-computing-chip
38	https://thinksrs.com
39	https://www.aemdeposition.com/
40	https://www.airliquid.com
41	https://www.anapico.com/
42	https://www.aureatechnology.com/
43	https://www.castech.com
44	https://www.cnilaser.com
45	https://www.cosmicmicrowavetechnology.com
46	https://www.diconfiberoptics.com/
47	https://www.excelitas.com
48	https://www.eylpartners.com/
49	https://www.findlight.net/
50	https://www.hcphotonics.com
51	https://www.hrl.com
52	https://www.idquantique.com/
53	https://www.imec-int.com/
54	https://www.intel.com/
55	https://www.jenoptik.com
56	https://www.keysight,com
57	https://www.ligentec.com/
58	https://www.lipac.co.kr/
59	https://www.micro-nano.re.kr
60	https://www.minicircuits.com
61	https://www.mpgdover.com/en/company/brands/kl-microwave.html
62	https://www.mushield.com/
63	https://www.newport.com
64	https://www.nist.gov/
65	https://www.nnfc.re.kr
66	https://www.ntt-innovative-devices.com/
67	https://www.octavephotonics.com

68	https://www.ozoptics.com/
69	https://www.photonics.com
70	https://www.quandela.com/
71	https://www.quantinuum.com/hardware/h2
72	https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219
73	https://www.quantum-info.com/English/product/pfour/liangzisuijishuyuan/2019/0731/579.html
74	https://www.quantware.eu/
75	https://www.quera.com
76	https://www.rp-photonics.com/
77	https://www.saesgetters.com/
78	https://www.semrock.com
79	https://www.smart-elements.com/
80	https://www.spincore.com
81	https://www.swabianinstruments.com/
82	https://www.tek.com
83	https://www.thorlabs.com
84	https://www.toptica.com
85	https://www.wikipedia.org/
86	https://www.zeiss.com/corporate/int/home.html
87	https://zhinst.com

IV 양자기술 통계

제1장 국내외 논문 통계

제2장 국내외 특허 통계

제3장 양자기술 인력 통계

제1장
국내외 논문 통계

양자기술 관련 국내외 논문을 분석하기 위해 세 가지 자료를 기반으로 재분석을 수행했다. 2021년에 발간된 한국과학기술정보연구원(KISTI) Rnl Report 양자기술 보고서[1], 정보통신기획평가원(IITP)의 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)[2], 2023년에 발간된 한국연구재단(NRF)의 국가 전략기술 분야 글로벌 상위 논문·특허 분석[3]을 참고하였다. 각 분석 자료의 분석 기간, 방법 및 관점이 서로 다르기 때문에 연관 있는 내용은 통합하고, 연관 없는 경우 원본 데이터를 그대로 활용하였다. 각 자료에 대한 조사 기준은 다음과 같다.

① KISTI Rnl Report 양자기술 보고서

논문은 출판년도 기준 최근 5년인 2016년부터 2020년까지 전 세계 SCEI급 저널 정보를 제공하는 Web of Science 데이터와 KISTI의 COMPAS(compas.kisti.re.kr)를 활용하여 분석하였다. 분석 대상 데이터 검색 과정에서 내외부 전문가를 활용하였으며, 양자과학분야 11개 세분류별로 년도별, 국가별, 기관별로 구분해 분석을 진행하였다. 이때 세분야별 양적 수준(건수) 및 질적 수준(평균 피인용수)을 산출하는 한편, 기관별 분석을 위해 건수 기준 상위 10대 기관을 추출하고, 한국의 주요기관은 별도로 추출하였다. 또한 일등 국가 대비 한국의 양적 수준일 질적 수준을 도출하기 위해서 2차원 포지셔닝 맵으로 가시화하였다.

② 정보통신기획평가원 2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)

논문 동향 분석은 특허 동향 분석에서 활용된 키워드 및 검색식을 활용하여 논문 DB 특성에 따라서 진행하였다. 즉, 양자통신 분야의 요소기술을 기반으로 핵심 키워드를 도출했고, 이를 바탕으로 분석 논문 모집을 위한 검색식을 작성했다. 분석 대상 논문은 2010년부터 2019년까지 출간된 한국, 미국, 일본, 유럽, 중국 논문을 대상으로 했으며, 모집단 대비 유효 논문은 39.9% 선별됐다. 검색은 IITP가 보유하고 있는 Wintelips DB (www.wintelips.com)를 활용했다.

③ 한국연구재단(NRF)의 국가 전략기술분야 글로벌 상위 논문·특허 분석

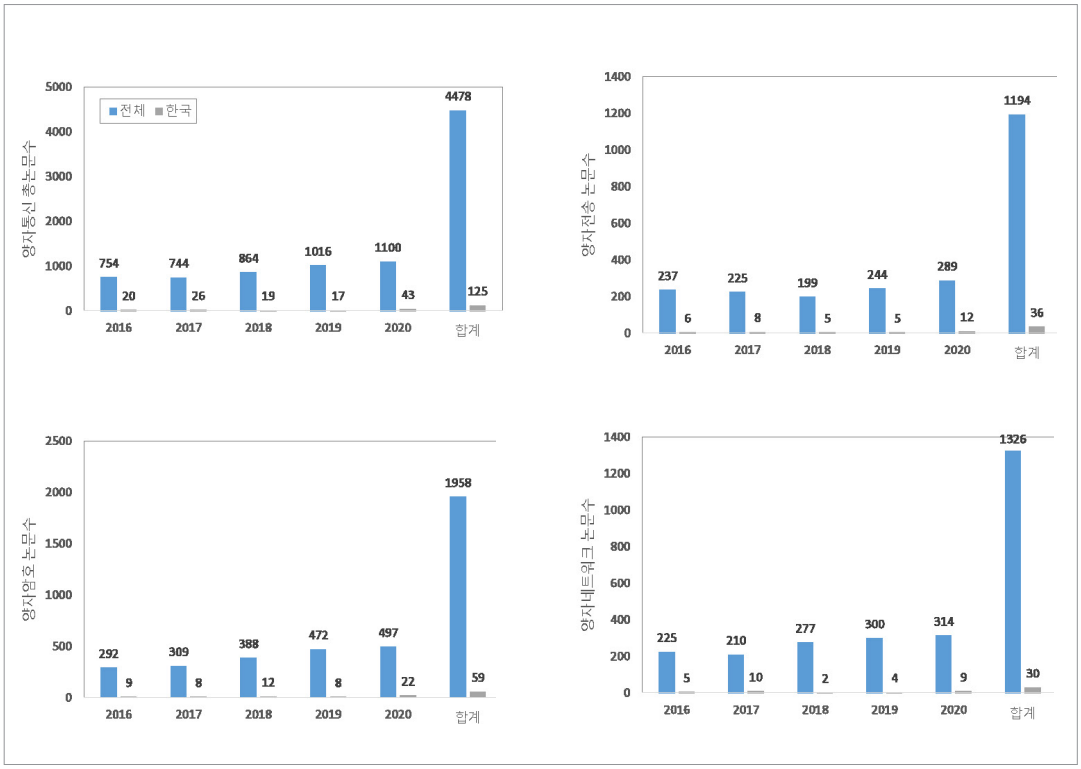
전 세계 상위 논문 현황 분석을 위해서 지난 10년간 발표된 논문 건수와 피인용 횟수를 고려하여 동향 분석을 진행하였다. 광범위한 데이터를 기반으로 종래의 키워드 분석의 취약점을 극복하고 문장 단위의 인공지능으로 분석할 수 있어 깊이 있고 정확한 매칭이 가능한 Dimensions 플랫폼을 활용하여 전 세계 논문 및 특허 데이터를 분석하고 연구 생산성(논문 수, 인용횟수, 특허 수)을 기준으로 글로벌 상위 연구기관을 도출하였다. 분석 절차는 논문 데이터 수집과 함께 논문 제목, 저자, 출판년도, 인용횟수 등의 정보 추출하여 논문 수와 인용횟수를 기반으로 데이터를 분석하여 결과를 도출하는 방식을 이용하였다. 주요 분석 결과 내 국가전략 기술별 상위 연구기관 순서는 순위와 무관하며 분석 기준에 따라 결과가 다를 수 있다.

1) KISTI (2021)
2) IITP (2021)
3) NRF (2023)

제1절 양자통신 분야

KISTI는[4] 2016~2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석하였는데, [그림 Ⅳ-1-1]에 기술한 것처럼 이 기간 동안 전체적으로는 4,478건이, 그리고 한국에서는 총 125건의 논문이 게재되었다. 분야별로는 양자암호 분야가 1,958건으로 가장 많은 논문 수를 보이고 있고 한국도 양자암호, 양자전송, 양자네트워크 분야 중에서 양자암호에서 59건의 논문을 게재하였다.

그림 Ⅳ-1-1 양자통신 연도별 논문 수 (2016~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

2016~2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가인 중국, 미국, 영국, 독일, 캐나다, 한국에 따른 기술별 게재된 논문 수와 평균 피인용 수는 〈표 Ⅳ-1-1〉에 국가별로 표시하였다. 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 게재된 논문 건수는 〈표 Ⅳ-1-2〉에 각각 나타내었다. 이때 전체 합계의 논문 건수는 세분류별 검색 건수의 단순 합계이다. 합계 논문 건수가 가장 많

4) KISTI (2021)

은 상위 5개 국가는 중국, 미국, 영국, 독일, 캐나다로 논문 총수는 3,787건으로 전체 게재 논문의 84.6% 이상으로 차지하였고, 그 가운데 중국의 논문 수가 총 2,029건으로 전체 게재 논문의 45.3%에 해당하고, 특히 양자네트워크에 관련된 논문 수가 우세하였다. 하지만 상대적으로 평균 피인용 수는 2~5위 국가들에 비해서 낮은 편이다. 다른 4개국은 전체 분야에 대해서 비교적 고르게 논문이 게재되고 있으며 평균 피인용 수도 높은 편으로 캐나다의 평균 피인용 수가 가장 높게 나타나는 것으로 보인다. 한국도 중국처럼 논문 건수의 약 50%는 양자네트워크 분야가 차지하고 있다. 하지만 동 기간에 한국의 양자통신 분야의 논문 게재 수는 캐나다의 50% 미만 수준이 지나지 않는 것으로 보이며, 상대적인 평균 피인용 수도 낮게 나타나고 있다.

표 Ⅳ-1-1 양자통신 분야 분석 지표 (2016~2020년)

	합계		양자암호		양자전송		양자네트워크	
국가	건수	평균피인용수	건수	평균피인용수	건수	평균피인용수	건수	평균피인용수
중국	2,029	9.0	502	10.1	505	10.4	1,022	7.7
미국	632	14.9	228	17.9	180	13.1	224	13.3
영국	394	18.2	137	19.4	94	17.6	163	17.5
독일	333	16.1	138	18.6	112	14.7	83	14.0
캐나다	274	19.1	91	20.1	66	21.8	117	16.9
한국	125	6.2	30	8.1	36	5.8	59	5.3

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

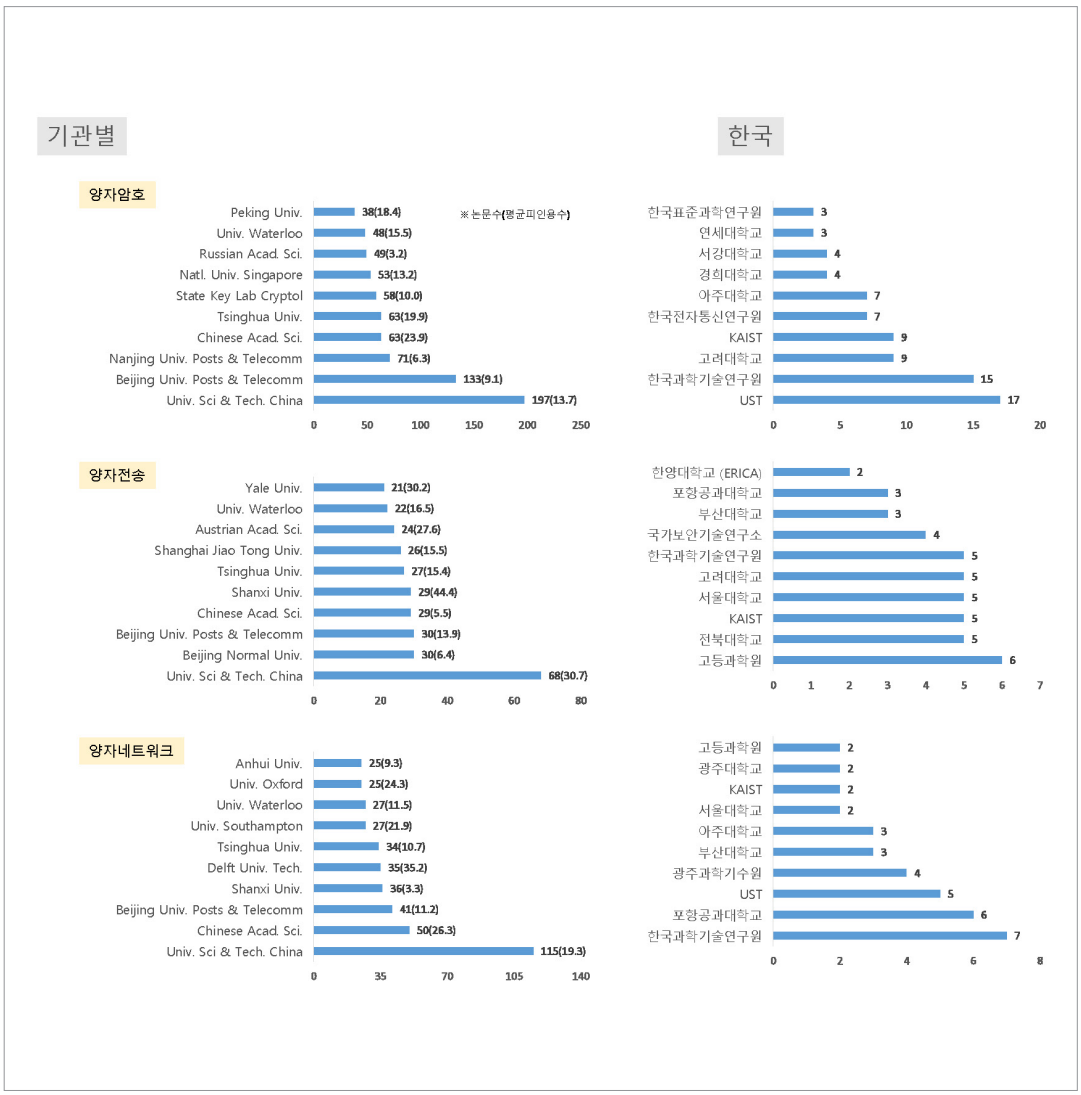
년도별 상위 5개국에 대한 게재된 논문 수를 보면 양자통신의 전 하위 분야에 대해서 1위는 중국, 2위는 미국으로 변화가 없고, 3~5위는 분야에 따라 캐나다, 일본, 인도, 독일은 순위권에 들어오는 경우가 있지만, 영국은 순위의 변동만 있고, 지속적으로 상위 5위안에 포함되어 있다. 중국은 2017년을 기점으로 양자네트워크 분야의 논문 수가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 관련한 연구 분야가 활발했음을 보여주는 것이라고 분석된다. 다른 나라들은 매년 유사한 수준의 논문을 게재하고 있는 것으로 보이며, 인도의 경우 2020년에 양자전송 분야에서 논문 수가 급격히 증가하였다. 상대적으로 한국은 같은 기간 동안 논문 수가 적은 편이며, 양자네트워크 분야만 2020년에 논문 수가 급격히 증가하고 있는 것으로 보인다.

표 Ⅳ-1-2 양자통신 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)

양자암호							양자전송							양자네트워크						
년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총
중국	66	68	115	135	118	502	중국	87	94	81	112	113	505	중국	133	142	250	268	274	1,022
미국	48	43	47	48	42	228	미국	40	21	33	42	44	180	미국	38	29	38	56	53	224
영국	31	26	27	17	37	138	독일	34	24	16	19	19	112	독일	26	28	29	36	44	163
캐나다	21	27	28	28	33	137	영국	14	19	14	23	24	94	영국	18	18	31	31	19	117
일본	20	17	17	18	19	91	인도	9	9	13	12	28	71	일본	22	21	16	28	18	105
한국	5	10	2	4	9	30	한국	6	8	5	5	12	36	한국	9	8	12	8	22	59

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-1-2 양자통신 기관별 & 한국 논문 수 (2016~2020년)

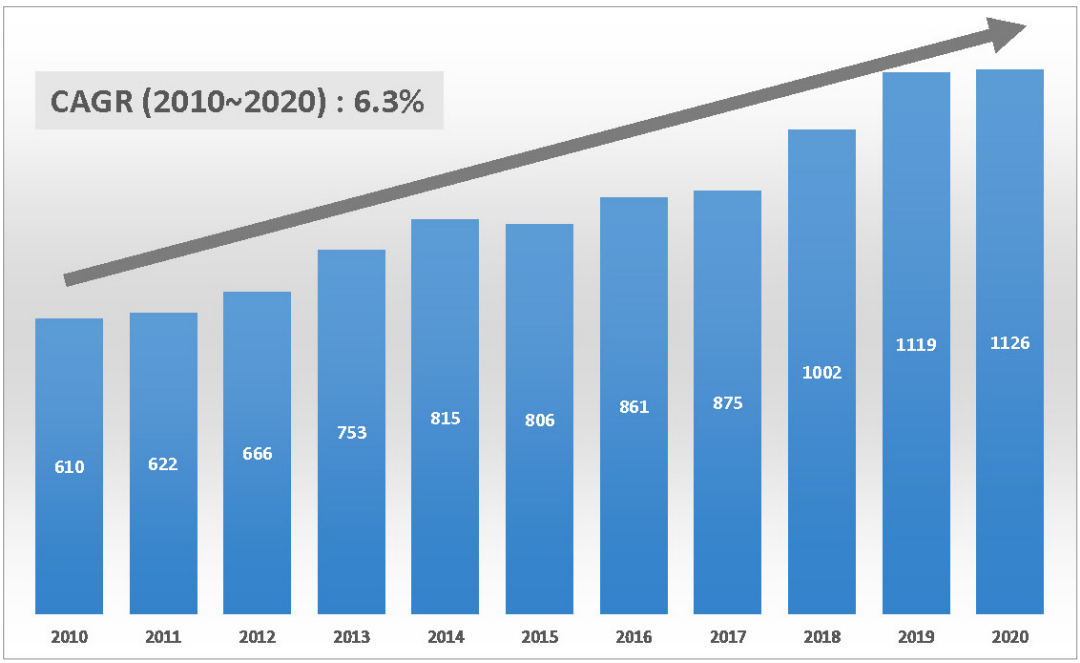


※ KISTI (2021) 집필진 재구성

기술군별 1위 국가 대비 한국의 수준을 각각 비교하면 중국 대비 양자암호는 5.98%, 양자전송은 7.13%, 양자네트워크는 5.77% 수준으로 나타난다. 논문의 평균 피인용 수를 동일한 방법으로 비교하면 캐나다 대비 양자암호는 4.03%이고 양자전송은 26.61%, 영국 대비 양자네트워크는 30.29%로 나타난다. [그림 Ⅳ-1-2]은 양자통신 분야의 각 기술군별 게재된 논문과 평균 피인용 수를 소속기관 및 한국 소속기관에 대해서 분석한 결과이다. 중국의 University of Science and Technology of China(Univ. Sci. & Tech. China)가 전 기술군에 대해 압도적으로 가장 많은 논문을 게재하였고, 평균 피인용지수도 10이상이다. 상위 4위까지도 중국 소재 대학교가 차지하고 있으며, 그 외 국가의 경우, University of Waterloo는 전 기술군에 대해 상위권에 포함되어 있다. 한국은 전 분야에 대해서 가장 많은 논문을 게재한 기관이 바뀌고 있다. 양자암호의 분야의 UST가 17건으로 가장 많은 논문을 게재하였고, 이후 KIST가 양자암호 분야에서 15건, 양자전송 분야에서 5건, 양자네트워크에서 7건으로 전 기술군에 고르게 논문이 분포되어 있다. KAIST 역시 전 기술군에서 논문을 보유하고 있는 것으로 나타나고 있다.

IITP는[5] KISTI보다 더 넓은 기간인 2010~2020년까지 양자통신 분야의 논문을 확인하였다. 이 기간 동안 총 9,255건의 논문이 게재되었으며, 연평균 증가율 6.3%로 증가하는 추세를 보이고 있다. 2010~2015년까지 4,272건이 2016~2020년까지 4,983건으로 KISTI에서 분석한 4,478건에 비해서 11% 정도 많지만, 유사한 값을 보이고 있다.

그림 Ⅳ-1-3 양자통신 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

5) IITP (2021)

양자통신 분야의 국가별 논문 게재 비중은 중국이 38.5%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 다음으로 미국 18.9%, 독일 8.2%, 영국 6.4% 등의 순으로 높게 나타나고 있다. 이는 〈표 Ⅳ-1-1〉에 분석한 결과와 유사하다. 단지 영국과 미국의 순위가 바뀐 것은 독일이 2010~2015년까지 게재된 논문 수가 2016~2020년 대비 더 많았을 것으로 유추할 수 있다. 이 기간 동안에도 한국의 논문 게재 수는 상위 10권에 진입하지 못하고 있다.

표 Ⅳ-1-3 양자통신 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)

순위	국가	비중 (%)	순위	국가	비중 (%)
1	중국	38.5	6	캐나다	5.5
2	미국	18.9	7	인도	4.2
3	독일	8.2	8	스페인	4.2
4	영국	6.4	9	이탈리아	4.1
5	일본	6.0	10	프랑스	3.9

※ IITP (2021) 집필진 재구성

주요 논문지 분석 별 게재 동향을 분석한 결과에 의하면 양자통신 분야 논문이 가장 많이 게재된 논문지는 Physical Review A로 1,126건이 게재되었으며, 표준화된 순위 보정 영향력 지수(Modified Rank Normalized Impact Factor, mrnIF)는 68.50으로, 보통으로 나타난다. 질적 수준이 가장 높은 논문지는 Nature Communications로 mrnIF 94.12로 총 87건의 양자통신 분야 논문이 게재되었다.

표 Ⅳ-1-4 양자통신 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)

No	논문지명	건수	mrnIF
1	Physical Review A	1,126	68.50
2	Physical Review B	669	76.36
3	Quantum Information Processing	523	62.47
4	International Journal Of Theoretical Physics	490	35.00
5	Physical Review Letters	477	93.75
6	Scientific Reports	256	79.41
7	New Journal Of Physics	215	86.25
8	Optics Express	186	79.79
9	Chinese Physics B	147	46.25
10	International Journal Of Quantum Information	138	13.97
11	Acta Physica Sinica	120	13.75
12	Physics Letters A	111	60.00
13	Journal Of Physics A Mathematical And Theoretical	105	72.292

No	논문지명	건수	mrnIF
14	Nature Communications	87	94.12
15	Applied Physics Letters	83	79.59
16	Optics Communications	83	50.00
17	Chinese Physics Letters	82	31.25
18	Communications In Theoretical Physics	77	43.75
19	Quantum Information Computation	76	41.782
20	Journal Of The Optical Society Of America B Optical Physics	75	55.319

※ IITP (2021) 집필진 재구성

중요 논문은 해당 분야의 화제의 논문으로 상위 0.1% 또는 해당 분야에서 인용 빈도가 높은 논문을 의미하고 〈표 Ⅳ-1-5〉의 2013년 이후와 180일 이내 건수는 이용 횟수를 의미한다. 양자통신 분야에서 가장 많이 인용된 논문은 Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi2Te4로 자기 위상 절연체에서 양자 전송 시 발생하는 양자홀 효과에 대한 연구이다. 그 외에도 네트워크 성능 향상을 위한 양자 알고리즘, 양자키 분배, 양자암호 등에 관한 연구가 이 분야의 중요 논문으로 나타났다.

표 Ⅳ-1-5 양자통신 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문

No	논문명	인용 횟수	2013년 이후	180일 이내
1	Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi2Te4	200	348	109
2	An Improved Quantum-Inspired Differential Evolution Algorithm for Deep Belief Network	141	115	80
3	Secure quantum key distribution with realistic devices	96	126	56
4	Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres	56	117	45
5	Experimental Observation of the Quantum Anomalous Hall Effect in a Magnetic Topological Insulator	1,785	1,740	135

※ IITP (2021) 집필진 재구성

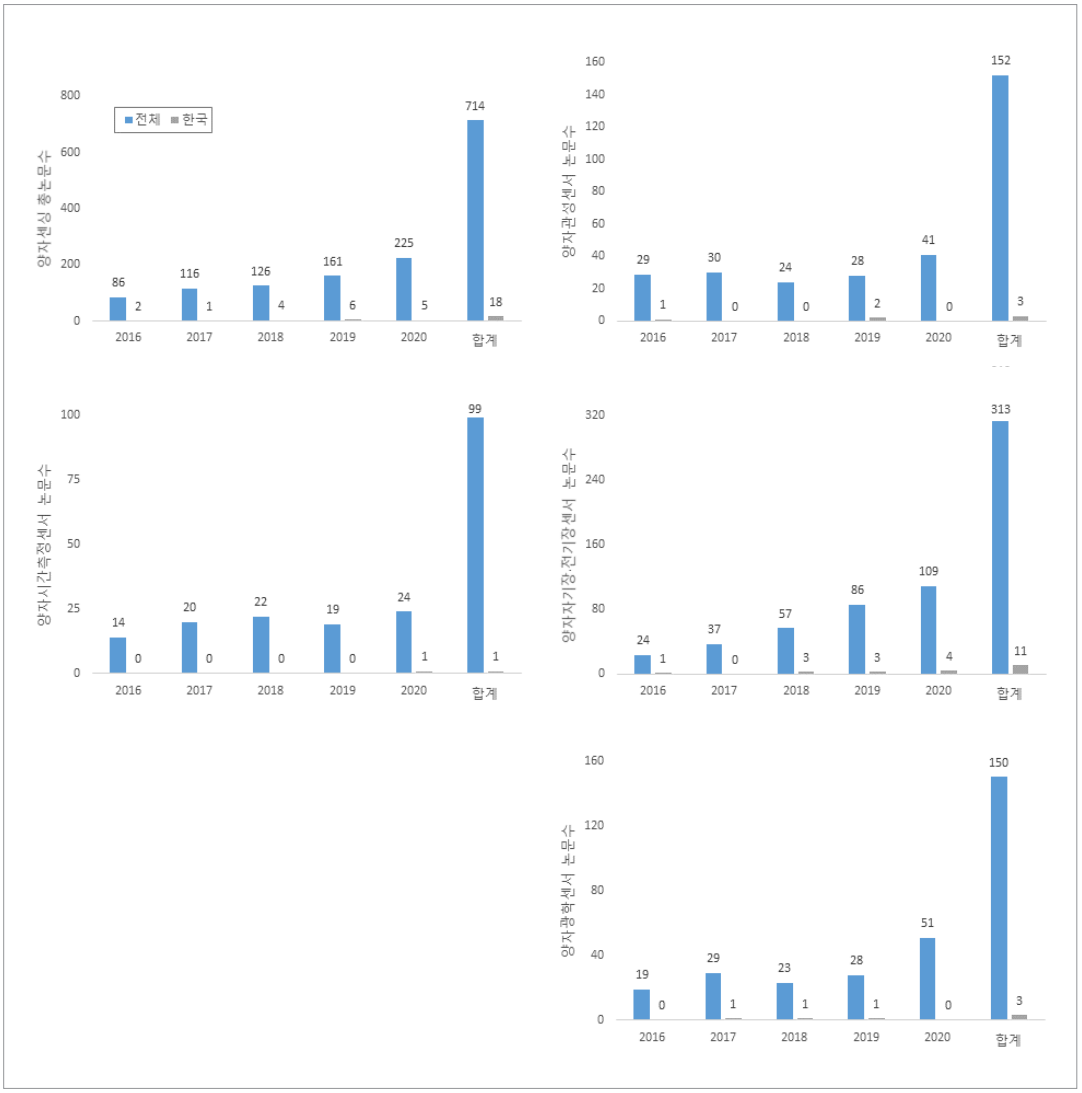
NRF는[6] 지난 2013~2022년까지 양자통신 분야의 출간된 논문을 분석하고 미국이 898건으로 가장 많은 수를 출간하였고, 다음으로 중국 656건, 영국 393건, 독일 367건, 일본 289건 순이고, 한국은 51건으로 18위라는 분석 결과를 도출하였다. 논문 게재 순위는 IITP의 분석 결과와 차이가 있지만, 상위 5위권에 포함되는 국가들은 동일하다. 기관별로 논문 수가 가장 많은 5개 기관은 중국 University of Science and Technology of China와 Beijing University Of Posts And Telecommunications CSC, 네덜란드 Delft University of Technology, 미국 MIT, 영국 University of Southampton이다. 각 논문에 대해서 인용 수가 가장 많은 대학교는 Delft University of Technology, 중국 University of Science and Technology of China, 미국 MIT, 캐나다 University of Toronto, 미국 Harvard University 순으로 나타나고 있다. 이 분석 결과는 분석 기간이 다른 KISTI의 결과와 비교하였을 때 Harvard University가 순위에 포함된 경우만 제외하고는 유사한 경향을 보이고 있다.

6) NRF (2023)

제2절 양자센싱 분야

KISTI는[7] 2016~2020년까지 양자센서(센싱) 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석하였다. [그림 Ⅳ-1-4]에 따르면 이 기간 동안 전체적으로 714건이, 한국에서는 총 18건이 논문이 게재되었다. 분야별로는 양자자기장·전기장센서 분야에서 총 313건, 한국도 11건으로 가장 많은 논문 수를 보이고 있고, 한국은 그 외 분야인 양자관성센서, 양자시간측정센서 및 양자광학센서 분야에서는 총 7건을 논문을 게재하였다.

그림 Ⅳ-1-4 양자센서 연도별 논문수 (2016~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

7) KISTI (2021)

2016~2020년까지 양자센서 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가인 미국, 중국, 독일, 영국, 프랑스, 스위스, 한국에 따른 기술별 게재된 논문 수와 평균 피인용 수는 〈표 Ⅳ-1-5〉에 각 국가별로 표시하였다. 또한 양자센서와 관련하여 연도별 상위 5개 국가에서 게재한 논문 건수는 〈표 Ⅳ-1-6〉에 각각 나타내었다. 이 때 전체 합계의 논문 건수는 세분류별 검색 건수의 단순 합계이다. 합계 논문 건수가 가장 많은 상위 6개 국가의 논문 총수는 653건으로 전체 게재 논문의 91.5%를 차지하였고, 그 중 미국의 논문 수가 총 192건으로 전체 게재 논문의 26.9%, 중국의 논문 수가 총 188건으로 전체 게재 논문의 26.3%에 해당되어 두 국가에서 게재된 논문이 전체의 53%를 차지한다. 스위스의 논문 수는 두 나라에 비해서 상대적으로 적지만, 평균 피인용 수는 352.2로 가장 높은 편이고 이는 독일의 127.7보다 약 3배 정도 크다고 할 수 있겠다. 또한 스위스는 양자광학센서 분야에서 논문을 출간하지 못했다. 한국은 양자센서 분야에서 논문 건수와 평균 피인용 수가 낮게 나타나고 있다.

표 Ⅳ-1-6 양자센서 분야 분석 지표 (2016~2020년)

	합계		양자관성센서		양자시간측정센서		양자자기/전기장센서		양자광학센서	
국가	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수
미국	192	87.1	33	16.9	38	35.3	82	23.2	39	11.7
중국	188	21.1	39	5.9	34	4.1	72	6.5	43	4.4
독일	122	127.7	17	14.2	16	85.3	80	20.1	9	8.1
영국	59	49.2	10	14.1	4	5.8	30	16.9	15	12.4
프랑스	47	42.3	23	19.8	5	9.6	14	9.0	5	3.8
스위스	27	352.2	4	84.0	4	220.2	19	48.2	-	-
한국	18	28.7	3	13.3	1	1.0	11	10.7	3	3.6

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

표 Ⅳ-1-7 양자센서 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)

양자관성센서							양자시간측정센서						
년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총
중국	11	8	5	6	9	**39**	미국	6	10	8	6	8	**38**
미국	4	5	5	7	12	**23**	중국	6	8	7	6	7	**34**
프랑스	3	2	7	6	5	**23**	독일	3	3	2	4	4	**16**
독일	2	4	2	4	5	**17**	일본	0	1	0	3	2	**6**
영국	0	3	2	2	3	**10**	프랑스	0	1	3	1	0	**5**
한국	1	0	0	2	0	**3**	한국	0	0	0	0	1	**1**

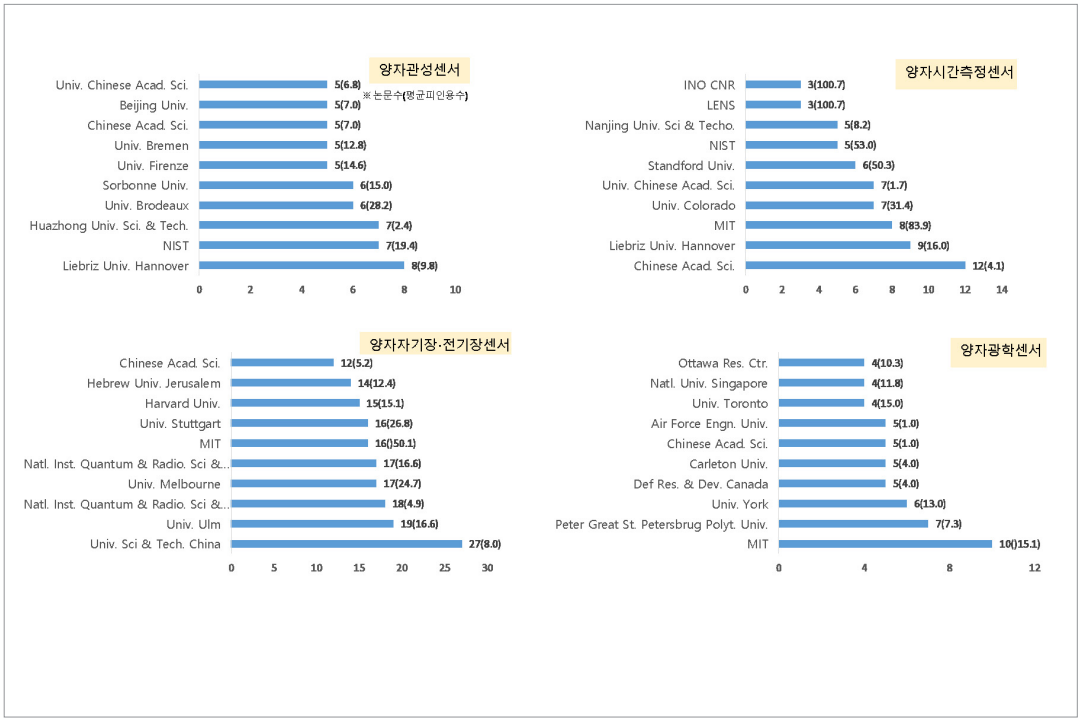
양자자기장·전기장센서							양자광학센서						
년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총
미국	5	11	12	25	29	**82**	중국	6	6	8	12	11	**43**
독일	8	8	14	27	23	**80**	미국	3	13	8	5	10	**39**
중국	4	8	18	18	24	**72**	캐나다	2	1	0	2	4	**19**
일본	2	2	14	18	17	**53**	영국	2	3	1	2	7	**15**
호주	6	4	6	12	13	**41**	러시아	1	2	2	4	2	**11**
한국	1	0	3	3	4	**11**	한국	0	1	1	1	0	**3**

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

2016~2020년까지 상위 5개국에 대한 게재한 논문 수를 보면 양자관성센서와 양자광학센서 분야에서는 중국이, 양자시간측정센서와 양자자기장·전기장센서 분야에서는 미국이 각각 1위를 차지하였다. 양자통신처럼 미국, 중국이 전 기술 분야에서 상위권을 차지하고 있으며 그 외에 독일, 프랑스, 영국, 일본, 호주, 캐나다, 러시아가 서로 다른 분야에서 상위 5위 안에 포함되어 있다. 양자자기장·전기장센서 분야의 논문은 2019년에 급격히 증가하는 경향을 보이나, 다른 분야는 매년 유사한 수준의 논문이 게재되고 있다. 이 분석 결과를 보면 한국의 경우 양자센서 분야의 논문 수가 다른 나라에 비해 매우 적고, 특히 양자시간측정센서 분야에서는 1건으로 이 분야에 대한 연구가 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

기술군별 1위 국가 대비 한국의 수준을 각각 비교하면 중국 대비 양자관성센서는 7.99%, 양자광학센서는 6.98%, 미국 대비 양자시간측정센서는 2.63%, 양자자기장·전기장센서는 13.41% 수준으로 나타난다. 논문의 평균 피인용 수를 동일한 방법으로 비교하면 스위스 대비 양자관성센서는 15.83%이고 양자시간측정센서는 0.45%, 양자자기장·전기장센서는 22.20%이고 영국 대비 양자광학센서는 29.03%로 나타난다. [그림 Ⅳ-1-5]는 양자센서 분야의 각 기술군별 게재된 논문과 평균 피인용 수를 소속기관에 대해서 분석한 결과이다.

그림 Ⅳ-1-5 양자센서 기관별 논문수 (2016~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

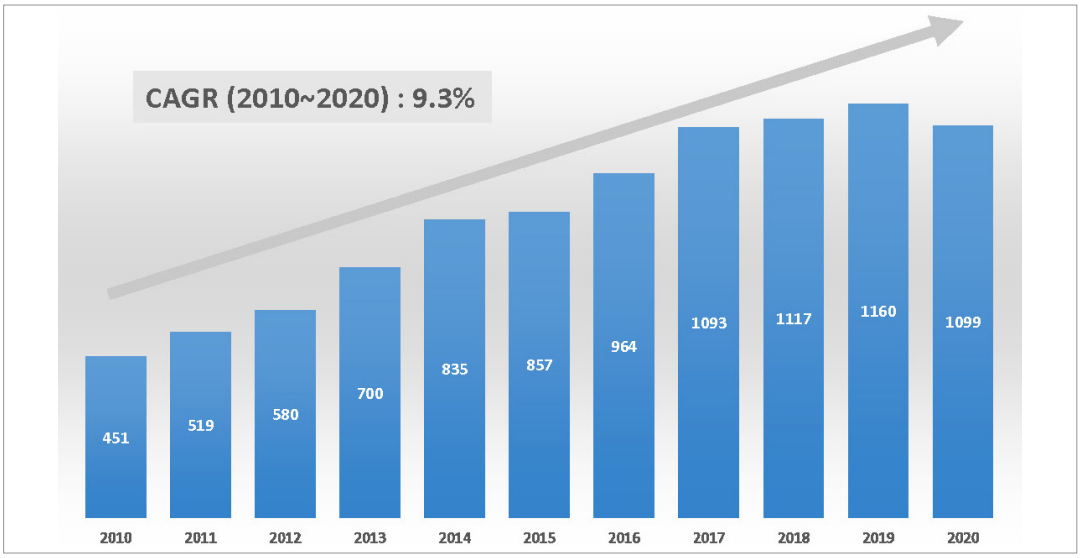
양자자기장·전기장센서 분야의 논문 수는 미국이 가장 많지만, 중국의 University of Science and Technology of China가 전 기술군에 대해 가장 많은 논문을 게재하였고, 평균 피인용지수는 8.0이다. 양자센서 분야에서는 어느 한 기관이나 국가가 다수의 논문 게재를 하는 것보다는 다양한 기관에 분포하고 있음을 알 수 있다. MIT는 양자관성센서 분야를 제외한 다른 분야에서는 상위 순위에 포함되어 있다. 한국은 각 기술분야별로 논문 수가 매우 적기 때문에 한 편 이상의 논문을 게재한 기관만 살펴보면 양자관성센서 분야에서는 한국표준과학연구원(KRISS), 서울대학교, 고려대학교, 건국대학교, 국방과학연구소(ADD)가 각 1건, 양자시간측정센서 분야에서는 나노종합기술원과 KRISS 각 1건, 양자자기장·전기장센서 분야에서는 KIST 6건, KRISS, 서울대학교, 광주과학기술원(GIST), 나노종합기술원, 이화여자대학교, 고려대학교, 부산대학교 각 1건, 양자광학센서 분야는 고려대학교와 기초과학연구원(IBS)이 각 3건을 게재하였다.

IITP는[8] KISTI보다 더 넓은 기간인 2010~2020년까지 양자센서(양자센싱·계측) 분야의 논문 게재 건수를 조사한 결과 총 9,375건의 논문이 게재되었으며, 연평균증가율 9.3%로 증가하는 경향을 보이고 있지만 점점 둔화되고 있다. 2010~2015년까지는 3,942건을, 2016~2020년까지는 4,983건으로 전 분

8) IITP (2021)

기 대비 21% 정도 증가한 것으로 보인다. 또한 2016~2020년까지 KISTI에서 분석한 714건에 비해서 약 7배 정도 많은 수를 포함하고 있는데, 이는 계측 분야까지 확장해 분석하면서 발생한 차이로 보인다.

그림 Ⅳ-1-6 양자센서 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

국가별 논문 게재 비중은 중국이 47.0%로 가장 높은 비중을 차지하였고 미국이 15.9%, 인도 6.8%, 독일 5.9% 등의 순으로 높게 나타나고 있다. 이는 〈표 Ⅳ-1-6〉에 분석한 결과와 비교하기 어렵다. KISTI의 분석과 다른 결론 중 하나는 한국의 양자센서 분야의 논문 수가 5위권 안에 포함되었다는 것과 이란이 상위 10권에 진입해 있다는 점이다.

표 Ⅳ-1-8 양자센서 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)

순위	국가	비중 (%)	순위	국가	비중 (%)
1	중국	47.0	6	일본	4.6
2	미국	15.9	7	이란	4.5
3	인도	6.8	8	영국	4.0
4	독일	5.9	9	프랑스	3.1
5	한국	5.4	10	스페인	2.8

※ IITP (2021) 집필진 재구성

주요 논문지별 게재 동향을 분석하면 양자센서 분야 논문이 가장 많이 게재된 논문지는 Physical Review A로 380건이 게재되었으며, mrnIF는 68.50으로 보통으로 나타났다. 아울러 질적 수준이 가장 높은 논문지는 Biosensors Bioelectronics로 mrnIF 95.24로 나타났다.

표 Ⅳ-1-9 양자센서 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)

No	논문지명	건수	mrnIF
1	Physical Review A	380	68.50
2	Sensors And Actuators B Chemical	342	93.44
3	Rsc Advances	220	60.23
4	Biosensors Bioelectronics	219	95.24
5	Physical Review Letters	197	93.75
6	Applied Physics Letters	187	79.59
7	Physical Review B	170	76.36
8	Analytical Chemistry	152	92.77
9	Electrochimica Acta	145	84.00
10	Acs Applied Materials Interfaces	143	87.48
11	Scientific Reports	130	79.41
12	Analytica Chimica Acta	122	89.16
13	Spectrochimica Acta Part A Molecular And Biomolecular Spectroscopy	119	80.000
14	Analyst	109	84.34
15	Optics Express	106	79.79
16	Analytical Methods	92	62.92
17	Nanoscale	92	84.92
18	Journal Of Physical Chemistry C	88	71.69
19	Chemical Communications	84	81.87
20	Journal Of Materials Chemistry A	84	93.14

※ IITP (2021) 집필진 재구성

양자센서 분야에서 가장 많이 인용된 논문은 6.54% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell로 나타났는데 이는 태양광-전기변환 효율을 나타내는 양자점 감응 태양전지에 관한 연구이다. 그 외에도 그래핀 양자점, 양자 강화 LIGO 디텍터, 태양전지 효율 향상 등에 관한 연구가 동 분야의 중요 논문으로 나타나고 있다.

표 Ⅳ-1-10 양자센서 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문

No	논문명	인용 횟수	2013년 이후	180일 이내
1	6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell	2,216	2,404	149
2	Graphene quantum dots: emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices	1,444	1,906	97
3	Mn-Doped Quantum Dot Sensitized Solar Cells: A Strategy to Boost Efficiency over 5%	791	923	26
4	Review of Carbon and Graphene Quantum Dots for Sensing	178	570	183
5	Quantum-Enhanced Advanced LIGO Detectors in the Era of Gravitational-Wave Astronomy	104	12	6

※ IITP (2021) 집필진 재구성

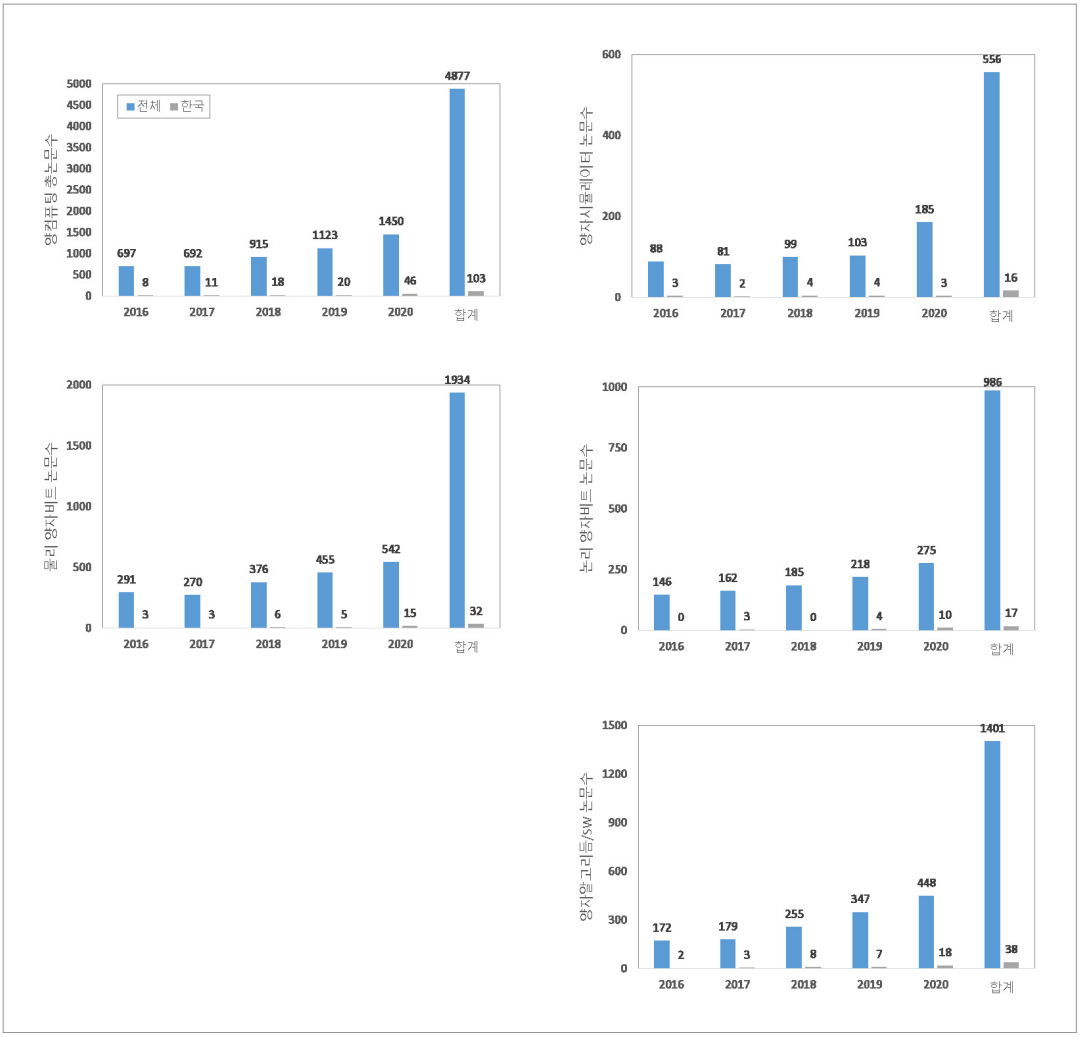
NRF가[9] 2013~2022년까지 10년간 양자센서 분야의 출간된 논문을 분석한 결과 중국 1,518건, 미국 596건, 인도 590건, 독일 227건, 한국 178건, 영국 177건 순이었다. 이는 IITP가 분석한 2010~2020년 동안과 비교하였을 때 순위는 5위까지는 동일하고, 영국이 6위로 변경되었다. 기관별로 논문 수가 가장 많은 5개 기관에는 중국 Jilin University 1위, Huazhong University of Science and Technology 2위 및 Nanjing University 5위, 독일 University Ulm 3위, 미국 MIT 4위로 나타났다. 각 논문에 대해서 인용 수가 가장 많은 대학교는 1위에 미국 MIT, 중국 Jilin University 2위, Chinese Academy of Sciences 3위와 Changchun Applied Chemistry Research Institute 5위, 스위스의 ETH Zurich가 4위로 나타났다. 이는 KISTI의 결과 순위와 직접 비교할 수 없지만 같은 기관들이 상위권 내에 포함되어 있고 일부 기관은 분석 방법에 따라 포함되는 것으로 보인다.

9) NRF (2023)

제3절 양자컴퓨팅 분야

KISTI는[10] 2016~2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석하였다. [그림 Ⅳ-1-7]에 기술한 것처럼 이 기간 동안 전체적으로는 4,877건이 그리고 한국에서는 총 103건의 논문이 게재되었다. 분야별로는 물리양자비트 분야가 1,934건으로 가장 많은 논문이 출간되었으며, 한국은 양자 알고리즘 및 SW 분야에서 38건으로 가장 많은 눈문을 게재하였고 다음으로는 물리양자비트 분야에서 32건을 출간하였다.

그림 Ⅳ-1-7 양자컴퓨터 연도별 논문수 (2016~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

10) KISTI (2021)

2016~2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가인 미국, 중국, 영국, 독일, 캐나다, 일본, 호주, 프랑스, 네덜란드, 스위스, 한국에 따른 기술별 게재된 논문 수와 평균 피인용수는 〈표 Ⅳ-1-11〉에 국가별로 표시하였다. 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 게재된 논문 건수는 〈표 Ⅳ-1-12〉에 각각 나타내었다. 이때 전체 합계의 논문 건수는 세분류별 검색 건수의 단순 합계이다. 합계 논문 건수가 가장 많은 상위 10개 국가는 중국, 미국, 영국, 독일, 캐나다로 논문 총수는 5,341건으로 전체 게재 논문 수인 4,877건 이상으로 나타나고 있다. [그림 Ⅳ-1-7]의 총수는 네 가지의 기술군에 대해서만 총합한 것으로 보인다. 즉, 분류에 포함되지 않는 양자컴퓨팅 관련 논문이 464건인 것으로 판단된다. 미국의 논문 수는 총 1,644건으로 상위 10개 국가 논문의 30.8%에 해당되며 평균 피인용 수도 20.4이고, 특히 물리양자비트에 관련된 논문이 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 중국은 22.3%로 미국 다음으로 많은 비중을 차지하고 있다. 반면에 평균 피인용 수가 가장 높은 나라는 네덜란드로 29.8로 나타나고 있는데, 특히 양자시뮬레이션에서 59.3으로 매우 높은 편으로 나타난다. 한국은 동 기간 내에 순위권 내에는 포함되지 못하였고, 평균 피인용지수도 순위권 내 국가들에 비해 낮게 나타나고 있다.

표 Ⅳ-1-11 양자컴퓨팅 분야 분석 지표 (2016~2020년)

	합계		양자 시뮬레이터		물리양자비트		논리양자비트		양자알고리즘/SW	
국가	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수
미국	1644	20.4	210	23.4	595	17.9	417	24.0	488	19.1
중국	1189	9.3	134	9.5	460	9.4	204	10.5	391	8.6
영국	487	16.4	63	15.6	169	14.3	99	20.0	156	16.6
독일	463	21.7	102	24.0	157	19.2	113	19.4	91	26.5
캐나다	358	17.0	31	15.6	130	16.7	80	15.3	117	18.8
일본	328	19.2	24	15.4	139	18.2	87	30.8	78	9.1
호주	253	17.0	0	0	118	14.5	78	18.6	57	19.9
프랑스	225	18.6	38	24.4	86	15.1	57	24.4	44	13.1
네덜란드	203	29.8	21	59.3	80	23.3	64	39.8	38	10.1
스위스	191	21.5	24	34.1	75	18.0	48	26.5	44	15.2
한국	103	7.2	16	23	32	5.3	17	3.2	38	4.0

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

표 Ⅳ-1-12 양자컴퓨팅 국가별-연도별 논문 수 (2016~2020년)

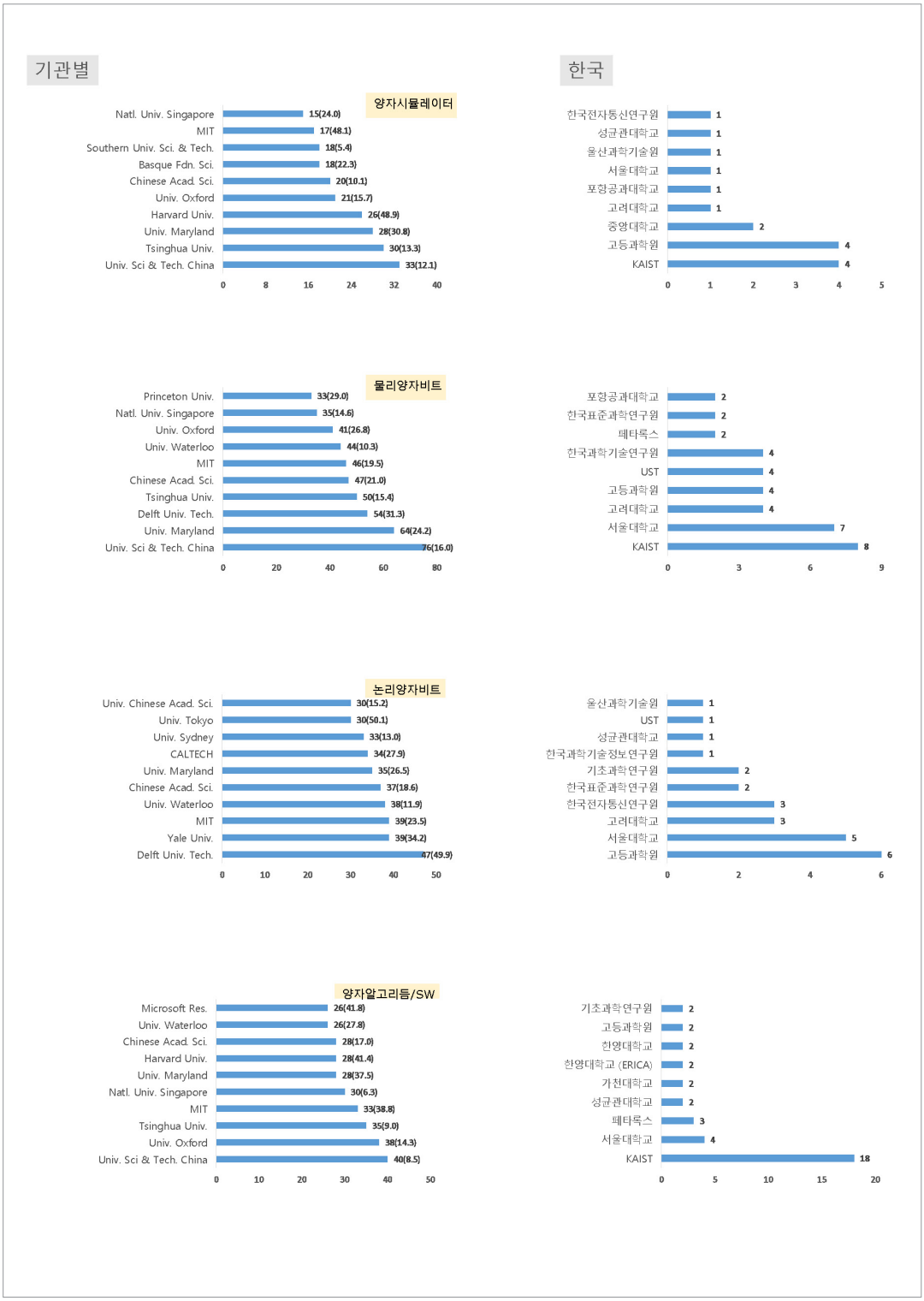
양자 시뮬레이터							물리양자비트						
년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총
미국	36	24	28	48	74	210	미국	95	82	104	153	161	595
중국	16	22	25	28	43	134	중국	68	67	93	108	124	460
독일	18	16	20	20	28	102	영국	34	25	23	45	42	169
영국	9	7	15	11	51	63	독일	25	27	28	39	38	157
스페인	7	11	8	5	15	46	일본	25	20	21	34	39	139
한국	3	2	4	4	3	16	한국	3	3	6	5	15	32
논리양자비트							양자알고리즘 및 SW						
년도	16	17	18	19	20	총	년도	16	17	18	19	20	총
미국	55	76	91	89	106	417	미국	52	46	77	105	142	422
중국	24	51	33	49	77	204	중국	43	59	72	102	115	391
독일	14	25	20	28	26	113	영국	16	22	33	42	43	156
영국	20	26	11	27	15	99	캐나다	14	12	20	41	30	117
일본	14	15	15	16	27	87	독일	15	13	13	18	32	91
한국	0	3	0	4	10	17	한국	2	3	8	7	18	38

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

년도별 상위 5개국에 대한 게재한 논문 수를 보면 양자컴퓨팅의 전 하위 분야에 대해서 1위는 미국, 2위는 중국이고, 3~5위는 분야에 따라 독일과 영국은 순위만 변동이 있고 전 하위 분야에서 순위권 내에 있으며, 스페인, 일본, 캐나다는 분야별로 5위안에 포함되기도 한다. 미국은 매년 전 기술 분야에 대해 논문 수가 꾸준히 증가하고 있으며 이는 다른 나라들에 대해서도 유사하게 나타난다. 꾸준히 논문을 게재한 한국은 같은 기간 동안 10건 이하로 게재하였으나, 2020년에 들어와 양지 시뮬레이터 분야를 제외하고 10건 이상의 논문을 출간하고 있다. 기술군별 1위 국가 대비 한국의 수준을 각각 비교하면 미국 대비 양자 시뮬레이터는 5.24%, 물리양자비트는 5.38%, 논리양자비트는 4.08%, 양자 알고리즘 및 SW는 9% 수준으로 나타난다. 논문의 평균 피인용 수를 동일한 방법으로 비교하면 네덜란드 대비 양자 시뮬레이터는 38.79%, 물리양자비트는 22.75%, 논리양자비트는 8.04%, 독일 대비 양자 알고리즘 및 SW는 39.60%로 나타난다. [그림 Ⅳ-1-8]은 양자컴퓨팅 분야의 각 기술군별 게재된 논문과 평균 피인용 수를 소속기관과 국내 소속기관에 대해서 분석한 결과이다. 중국의 University of Science and Technology of China가 전 기술군에 대해 가장 많은 논문을 게재하였고, 평균 피인용 지수도 높게 나타나고 있다. 각 기술 분야에 따라 다양한 대학교와 기관들이 논문 출간 수의 순위가 포함되는 것으로 보면, 양자컴퓨팅 분야는 상대적으로 경쟁이 심화된 분야인 것으로 보인다. 미국 MIT는 상위 10위 내에 모두 포함되어 있고, 논문 건수와 평균 피인용지수도 높게 나타나고 있다. 또한 전 기술 분야에 대해서 Harvard University가 가장 높은 평균 피인용 수인 48.9를 보인다. 한국에서 전 기술

분야에 대해 가장 많은 논문을 게재한 기관은 KAIST로 논리양자비트에서만 순위권 내에 포함되지 않는다. 전체 게재 논문 수도 30건으로 가장 많이 출간하고 있다. 그 외에도 대학교 및 출연연도 상위권 내에 포함도 되어 있으며, ㈜페타룩스가 물리양자비트 분야에서 2건의 논문을 게재했다.

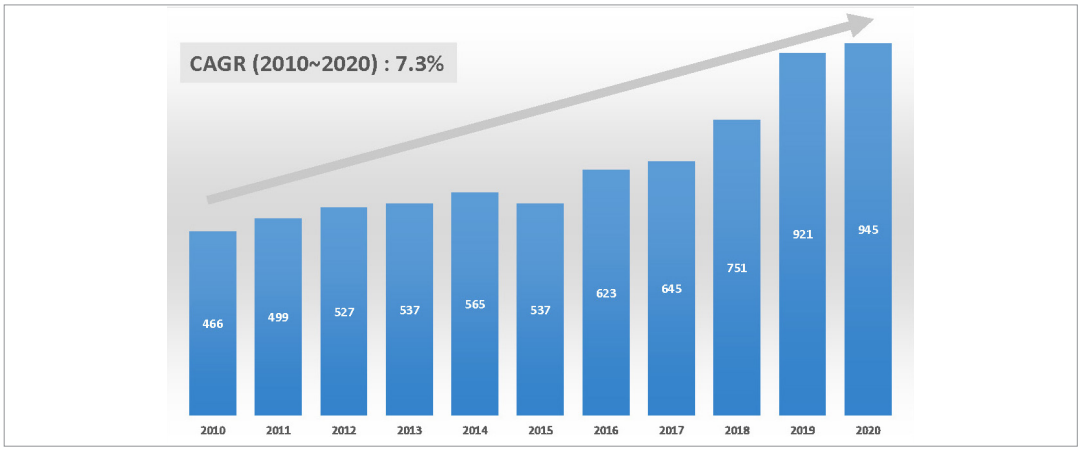
그림 Ⅳ-1-8 양자컴퓨팅 기관별 논문수 (2016~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

IITP는[11] KISTI보다 더 넓은 기간인 2010~2020년까지 양자컴퓨팅 분야의 논문을 분석하였다. 이 기간 동안 총 7,016건의 논문이 게재되었으며, 연평균증가율 7.3%로 증가하는 추세를 보이고 있다. 2010~2015년까지 3,131건이고 2016~2020년까지 3,885건으로 KISTI에서 분석한 4,877건에 비해서 20.3% 적게 나타나고 있다. 국가별 논문 게재 비중은 미국이 28.6%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며 중국 22.5%, 독일 9.4%, 일본 7.9% 등의 순으로 높게 나타나고 있다. 이는 〈표 Ⅳ-1-11〉에서 분석한 결과와 서로 유사하다. 2010~2020년까지 영국, 독일, 일본, 캐나다, 프랑스의 순위를 살펴보면 2016~2020년까지의 순위와 비교하였을 때 순서의 차이만 있고 상위에 모두 포함되어 있다. 차이는 IITP의 분석에서 인도와 이탈리아, 스페인이 포함되어 있고, KISTI의 분석에는 호주, 네덜란드, 스위스가 포함된 것이 서로 다르다. 이 기간 동안에도 한국의 논문 게재 수는 상위 10권에 진입하지 못하고 있다.

그림 Ⅳ-1-9 양자컴퓨터 연도별 논문 게재 동향 (2010~2020년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

표 Ⅳ-1-13 양자센서 국가별 논문 게재 동향 (2010~2020년)

순위	국가	비중 (%)	순위	국가	비중 (%)
1	중국	28.6	6	캐나다	5.9
2	미국	22.5	7	인도	4.6
3	독일	9.4	7	이탈리아	4.6
4	일본	7.9	9	스페인	4.3
5	영국	7.8	10	프랑스	4.2

※ IITP (2021) 집필진 재구성

11) IITP (2021)

양자컴퓨팅 분야 논문이 가장 많이 게재된 논문지는 Physical Review A로 740건이 게재되었으며, mrnIF는 68.50으로 보통이고, 질적 수준이 가장 높은 논문지는 Nature로 mrnIF 100.00으로 나타난다. 가장 많이 인용된 논문은 Quantum computers로, 이 논문은 양자컴퓨터를 구축하기 위한 다양한 접근방법과 최신 개발 현황, 향후 주요 수행과제 등에 관한 연구를 중심으로 기술돼 있다. 그 외에도 위상 양자 계산을 위한 플랫폼, 딥러닝 모델 중 하나인 DBN에 MSIQDE를 적용하는 방법, 양자 화학 등에 관한 연구가 동 분야의 중요 논문으로 나타난다.

표 Ⅳ-1-14 양자컴퓨팅 분야 논문 게재 상위 20개 논문지 (2010~2020년)

No	논문지명	건수	mrnIF
1	Physical Review A	740	68.50
2	Physical Review Letters	279	93.75
3	Quantum Information Processing	240	62.47
4	Physical Review B	220	76.36
5	Journal Of Chemical Physics	160	64.29
6	New Journal Of Physics	146	86.25
7	Scientific Reports	135	79.41
8	International Journal Of Theoretical Physics	102	35.00
9	Physical Chemistry Chemical Physics	85	70.20
10	Journal Of Chemical Theory And Computation	83	81.97
11	Quantum Information Computation	83	41.78
12	Journal Of Applied Physics	76	60.54
13	Nature	71	100.00
14	Quantum Science And Technology	68	72.12
15	Npj Quantum Information	66	91.71
16	Nature Communications	61	94.12
17	Journal Of Physical Chemistry A	52	54.08
18	Physical Review E	51	73.48
19	Physical Review X	51	95.00
20	International Journal Of Quantum Information	46	13.97

※ IITP (2021) 집필진 재구성

표 Ⅳ-1-15 양자센서 분야 인용횟수 기준 상위 5개 중요 논문

No	논문명	인용 횟수	2013년 이후	180일 이내
1	Quantum computers	1,807	981	50
2	Generic New Platform for Topological Quantum Computation Using Semiconductor Heterostructures	1,274	256	17
3	An Improved Quantum-Inspired Differential Evolution Algorithm for Deep Belief Network	144	118	82
4	Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing	125	153	51
5	Quantum computational chemistry	101	160	54

※ IITP (2021) 집필진 재구성

NRF가[12] 2013~2022년까지 양자컴퓨팅 분야의 출간된 논문을 분석한 결과를 보면, 미국 10,690건, 영국 4,979건, 중국 2,959건, 독일 2,197건, 호주 2,122건 순이며, 한국은 307건으로 25위로 나타났다. 기관별로 논문 수가 가장 많은 5개 기관에는 영국 University College London(UCL), University of Oxford와 University of Cambridge, 미국 Harvard University와 MIT로 나타났다. 각 논문에 대해서 인용 수가 가장 많은 대학교는 1위에 영국 University of Oxford, University of Cambridge 3위, UCL 5위, 미국 MIT가 2위, 스위스의 ETH Zurich가 4위로 나타났다. 이는 KISTI의 분석 결과와 상이하지만, 공통적으로 University of Oxford가 포함되어 있다.

12) NRF (2023)

제4절 시사점

KISTI의[13] 분석에 따르면 2016~2020년까지 양자기술 분야의 SCIE급 논문은 총 8,213건으로, 2016년 1,270건에서 2020년에 2,245건으로 증가하였다. 국가별로는 중국이 2,809건, 미국 1,986건, 독일 749건 순이고, 한국은 200건으로 16위를 나타냈다. 분야별 논문 수는 양자통신 4,478건, 양자센서 714건, 양자컴퓨팅 4,877건이고, 양자통신분야에서 눈문은 중국 2,029건, 미국 632건, 한국 125건으로 나타난다. 그리고 양자센서 분야에서는 미국 192건, 중국 188건, 한국 18건이며, 양자컴퓨팅에서는 미국 1,644건, 중국 1,189건, 한국 103건으로 나타난다.

기관별 순위는 1, 2위가 모두 중국으로 Chinese Academy of Sciences가 687건으로 1위, University of Science Technology of China가 486건으로 2위이고, 전체 논문 수의 14.3%를 차지한다. 기간별 논문 게재 수 상위 20위 안에 한국 기관은 전무하다.

세분야별로 살펴보면 논문 피인용 수의 경우 양자암호, 양자 시뮬레이터 분야, 양자 알고리즘 및 SW가 일등 국가와 대비하여 0.4 정도에 근사한 값을 보여 상대적으로 우수한 분야로 나타난다. 반면에 논문의 양적인 측면에서는 모든 분야가 일등 국가 대비 매우 저조하고, 특히 건수나 피인용 수가 가장 낮은 두 분야로 양자시간측정센서와 논리양자비트로 나타난다.

NRF의[14] 논문 분석에 의하면 양자통신 분야에서는 University of Science and Technology of China, Delft University of Technology, MIT, Harvard University 등이 우수한 성과를 창출하고 있으며, 양자센서 분야는 중국 대학들이 상위권을 선점하고 있고, 양자컴퓨팅 분야를 선도하고 있는 연구기관은 University of Oxford, University of Cambridge, UCL, MIT, ETH Zurich 등으로 나타난다.

한국은 양자기술에 대해 추격형 인재 양성과 연구 투자전략을 수행 중이나, 2010~2022년까지 논문 출간 수를 보면 아직 상위 10위 국가들에 비해서 매우 낮은 것으로 나타나고 있다. 양자암호, 양자 시뮬레이터와 양자 알고리즘 및 SW 분야에서는 평균 피인용지수가 0.4에 가까우나 1위 국가 대비 발표 건수는 0.09 미만으로 매우 부족하다. 또한 양자시간측정센서나 논리양자비트와 같은 분야에서는 연구가 많이 이루어지지 않는 것으로 판단된다. 향후 양자기술 분야 전반에 대해 우선 국내 전문 인력 확보와 도전적 연구 강화를 기반으로 해외 협력 기반을 구축해야 할 것이다. 논문 게재 수가 연구의 질을 대변하는 것은 아니지만, 양자기술 분야에 기술력과 연구 능력 확보 수준을 보여주는 지표로 사용될 수 있다. 연구 생산성, 효과성 및 인용 횟수를 포함하는 연구 업적 향상뿐만 아니라 연구 자금, 국제적 연구 협력, 교육 및 인프라 구축 등을 통해 양자기술 분야의 연구 능력을 향상시켜야 할 것이다.

13) KISTI (2021)

14) NRF (2023)

제2장
국내외 특허 통계

양자기술 관련 국내외 특허를 분석하기 위해 총 네 가지 자료를 기반으로 재분석을 수행했다. 분석에 사용된 자료는 2021년 발표된 한국과학기술정보연구원(KISTI) Rnl Report 양자기술 보고서,[15] 정보통신기획평가원(IITP)이 2021년에 발표한 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)를[16] 기반으로 2020년 이후 자료를 추가하기 위하여 2023년 한국지식재산연구원의 IP Stats를[17] 참고하였다. 각 분석 자료의 분석 기간, 방법 및 관점이 서로 상이하여 연관 있는 내용은 통합했고, 연관성이 없는 경우는 원본 데이터를 그대로 활용하였으며 한국지식재산연구원의 내용 중 2020년부터 추가된 자료는 별도로 추가하였다. 각 자료에 대한 조사 기준은 다음과 같다.

❶ KISTI Rnl Report 양자기술 보고서

KISTI의 특허 분석은 전 세계 특허를 제공하는 LexisNexis 데이터(gpass.kisti.re.kr 활용)에서 특허 심사국 기준으로 2014년부터 2020년까지 출원된 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, 세계지식재산권기구(World Intellectual Property Organization, WIPO)의 출원 및 등록된 특허를 대상으로 분석했다. 특허를 분석하기 위해 다음과 같은 기준으로 접근했다. 우선권 번호가 통일한 특허는 하나의 특허로 집계, 양자분야 11개 세부 분야별(양자암호, 양자전송, 양자네트워크, 양자관성센서, 양자시간 측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서, 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비트, 양자알고리듬 및 SW)로 연도별·국가별·출원인별로 분석, 세부 분야별 양적 수준(건수) 및 질적 수준(평균 패밀리 특허 수)으로 산출했다. 자국에서 출원한 특허를 기초로 해외 여러 국가에 출원한 패밀리 특허 수는, 특허에 대한 시장 관점의 질적 수준 분석에 활용하기 적합하다. 또한 출원인별 분석은 건수 기준 상위 10대 출원인을 추출하고 한국의 주요 출원인은 별도로 추출했다.

❷ 정보통신기획평가원 2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)

양자분야의 요소기술을 기반으로 핵심 키워드를 도출했고, 이를 바탕으로 분석 특허 모집을 위한 검색식을 작성했다. 분석 대상 특허는 2010년부터 2019년까지 출원된 한국, 미국, 일본, 유럽, 중국 특허를 대상으로 했으며, 모집단 대비 유효 특허는 39.9% 선별됐다. 특허 검색은 정보통신기획평가원이 보유하고 있는 Wintelips DB(www.wintelips.com)를 활용 검색했다.

❸한국지식재산연구원의 IP Stats (양자기술의 특허활동 분석)

특허 분석을 위한 데이터는 한국특허청 DB와 유럽특허청(EPO)의 Patstat Global 2022 Autumn에서 2002년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 IP5 국가인 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본에 출원한 모든 특허에 대해 출원 및 등록 기본 사항, IPC, 출원인 및 인용 정보를 추출하였다. 특허 정보는 출원 후 공개까지 18개월(1년 6개월)의 시차가 있으므로 2021년의 특허는 해당 연도의 전체 특허가 아닌 공개

15) KISTI (2021)
16) IITP (2021)
17) KIIP (2023)

된 특허에 대해서만 분석 대상에 포함된다. IP5 국가에 출원·등록된 특허의 출원·등록 현황 및 상위 출원인 현황 등을 살펴보고 미국 특허청(USPTO)에 등록된 한국 출원인의 특허를 대상으로 다양한 응용 지표를 활용하여 비교·분석하였다. 또한, 최근 5년 누적 특허 건수 상위 10위의 출원인을 추출하여 특정 기술 분야에 양적 우위에 있는 특허를 확인하고, 연계된 산업 분야별 전체 특허와 특정 기술과 연계된 특허의 5개년별 출원 증가율을 비교하였다.

제1절 개요

KISTI에[18] 의하면 〈표 Ⅳ-2-1〉에서처럼 2014~2020년까지 양자정보기술 연도별 특허출원 수는 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO는 총 2,817건으로, 2014년 128건에서 2019년 726건으로 연평균 약 41%씩 증가하고 있다. 다만 2020년은 특허출원 후 공개되기까지 보통 1.5년이 걸리고 의도적으로 공개를 지연하는 사례도 있으므로, 다른 해에 비해 상대적으로 특허출원 수가 적은 것으로 보인다.

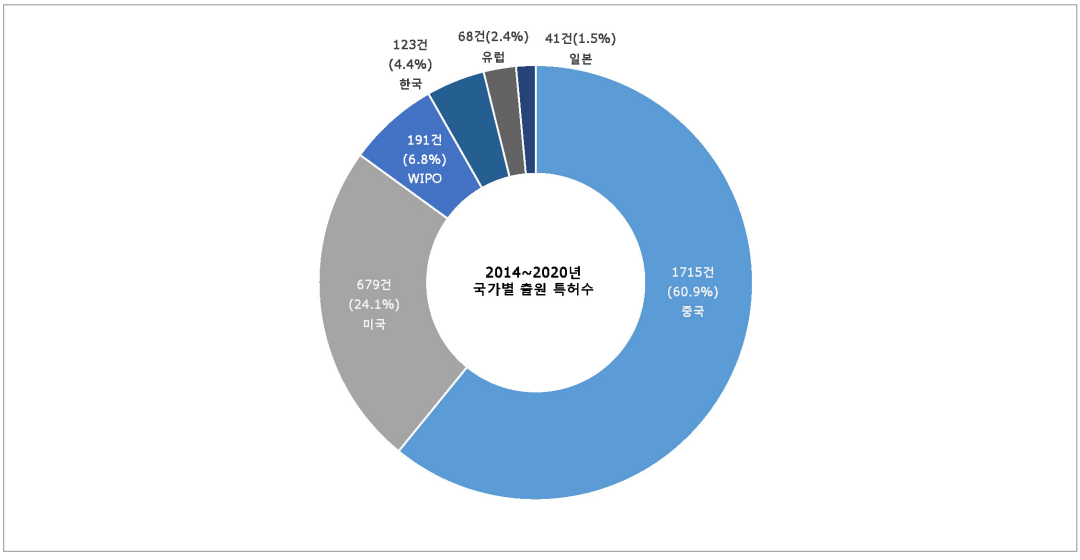
표 Ⅳ-2-1 양자기술 분야 연도별 출원 특허 수

년도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	합계
건수	128	117	256	451	674	726	405	2,817

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-1]은 2014~2020년까지 양자기술 분야 출원 특허 수를 국가별로 분석한 것으로 이에 따르면 중국 1,715건으로 전체 출원 특허 수의 60.9%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 이어 미국이 679건으로 뒤를 따르고 있다. 중국과 미국의 출원 특허 수가 전체의 85%를 차지해, 다른 4개국 출원 수의 약 4.4배 이상으로 압도적인 비중을 보여주고 있다.

그림 Ⅳ-2-1 양자기술 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

18) KISTI (2021)

KISTI의 특허 분석 결과를 보면, 중국 특허 수는 연평균 증가율이 급격하고 전체 특허의 과반이 미국과 중국으로부터 출원되고 있음을 알 수 있다. 한국이 출원한 특허의 세부 분야별 특징을 살펴보면, 양자 시간 측정센서 분야에서는 특허 수(0.44)가 많아 1등 국가 대비 양적 수준이 비교적 우수한 편이었고, 질적 수준을 의미하는 평균 패밀리 특허 수에서도 한국이 1등이었지만, 그 외 다른 분야는 대부분 취약한 것으로 나타났다. 다만 질적 수준에서는 양자알고리듬 및 SW, 양자네트워크, 양자시뮬레이터, 양자 시간 측정센서, 양자전송, 양자광학센서 분야에서 1등 국가 대비 0.5 이상의 값을 보여 상대적으로 우수한 분야로 확인됐다.[19)]

KIIP의 IP Stats에 따르면 2002년부터 2021년까지 양자기술에 대한 IP5 국가(13,018건) 및 PCT 특허출원 건수는 15,261건으로, 같은 기간 전체 출원 건수 37,847,300건 중 0.04%에 해당한다. 관련 특허를 출원한 기업은 2,125개로, 80%를 출원한 기업은 424개로 나타나고 있다. 이때 개인출원인이거나 출원인 유형을 파악하기 어려운 경우와 중복되는 경우 출원기업 수 집계에서 제외하였다.[20)] 〈표 Ⅳ-2-2〉에 의하면 2002년부터 2021년까지 양자기술에 대한 IP5 등록 건수는 총 7,022건이며, 이는 같은 기간 IP5 등록 건수 16,851,612건의 0.04%에 해당된다. 국가별로 특허 등록 비중은 미국의 양자기술 관련 특허 등록이 전체 48.3%로 가장 높은 비중을 보이고 있으며, 중국은 27.3%로 20년간 누적 출원수가 가장 많고, 일본 12.9%, 한국 6.2%, 유럽 5.4% 순으로 출원하고 있다. 유럽과 일본의 경우는 유사한 출원 건수를 보이지만, 상대적으로 일본의 등록건수가 많은 편이고, 이는 한국도 비슷한 양상을 보인다.

표 Ⅳ-2-2 IP 국가별 양자기술 특허 출원·등록 건수 (2002~2021년 누적)

	한국	미국	중국	유럽	일본	PCT
출원건수	604	4,987	5,081	1,253	1,093	2243
등록건수	435	3,389	1,916	378	904	-
출원기업수	120	849	1,067	344	212	627
주요출원기업수	34	220	254	113	48	203

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

〈표 Ⅳ-2-3〉의 국내 특허출원을 보면 외국 법인이 가장 많고, 대학이나 공공연구원의 경우 출원 건수의 85% 정도가 등록되는 것으로 나타난다. 2021년 기준 전체 특허 출원 대비 양자기술이 차지하는 국가별 등록 비중은 미국이 0.13%로 가장 높게 나타났으며, 중국 0.09%, 유럽 0.06%, 한국 0.04%, 일본 0.02% 순으로 나타난다. 미국, 중국 및 유럽은 최근 5년간 양자기술이 전체 특허 등록에서 차지하는

19) KISTI (2021)
20) KIIP (2023)

비중이 가파르게 상승하지만, 한국은 정체 상태, 일본은 다소 하락하는 경향을 보인다.[21)]

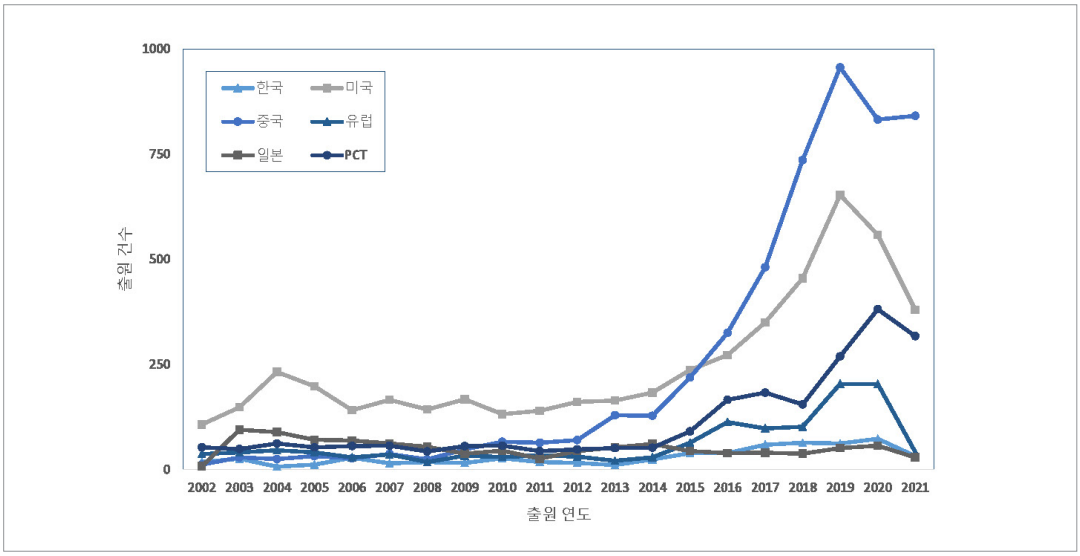
표 Ⅳ-2-3 기업 유형별 국내 특허(KIPO) 출원·등록 건수 (2002~2021년 누적)

기업유형	출원		등록	
	기업수	출원 건수 (비중)	기업수	등록 건수 (비중)
대기업	12	81 (11.1)	7	29 (8.7)
중견기업	1	2 (0.3)	0	0 (0.0)
중소기업	21	44 (6.1)	9	18 (5.4)
대학, 공공연	39	313 (43.0)	35	187 (56.0)
외국법인	73	198 (27.2)	30	74 (22.2)
기타	28	89 (12.2)	10	26 (7.8)

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-2]의 연도별 각국의 특허출원 건수를 보면 2015년 이전까지는 연간 400건 내외이지만, 2015년 이후 급격히 증가하고 2016년을 기점으로 중국에서의 출원량이 미국을 추월하는 것으로 나타나고 있다.

그림 Ⅳ-2-2 양자기술의 연도별 출원 건수 (2002~2021년)



※ KIIP (2023) 집필진 재구성

21) KIIP (2023)

2021년 기준 국가별로 전체 특허 출원 대비 양자기술이 차지하는 비중을 살펴보면 미국이 0.16%로 가장 높게 나타났으며, PCT 0.156%, 유럽 0.129%, 한국 0.065%, 중국 0.061%, 일본 0.056% 순으로 나타나고 있다. 2019년을 기점으로 최근 양자기술 관련 특허의 출원량은 다소 주춤한 반면, 양자기술이 전체 특허출원에서 차지하는 비중은 대부분의 국가에서 상승하는 추세를 보이고 있다.[22)]

표 Ⅳ-2-4 양자기술의 연도별 출원 비중 (전체 기술 대비)

	한국	미국	중국	유럽	일본	PCT
2002	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.05
2003	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	0.04
2004	0.01	0.07	0.02	0.03	0.02	0.05
2005	0.01	0.06	0.02	0.03	0.02	0.04
2006	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.04
2007	0.01	0.05	0.02	0.02	0.02	0.04
2008	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03
2009	0.01	0.05	0.02	0.02	0.01	0.04
2010	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.04
2011	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02
2012	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03
2013	0.01	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03
2014	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
2015	0.02	0.06	0.02	0.04	0.01	0.04
2016	0.02	0.07	0.03	0.07	0.01	0.07
2017	0.03	0.08	0.03	0.06	0.01	0.08
2018	0.03	0.11	0.05	0.06	0.01	0.06
2019	0.03	0.15	0.07	0.12	0.02	0.1
2020	0.04	0.16	0.05	0.16	0.02	0.14
2021	0.06	0.16	0.06	0.13	0.06	0.16

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

KISTI와 KIIP에 의하면 공통적으로 중국의 특허출원 비율이 가장 높은 것으로 나타난다. 두 분석 결과 중 동일한 기간인 2014년부터 2020년의 국가별 특허출원 비율을 비교하면, KISTI는 중국이 전체 특허출원 건수 중 60.9%를 차지하여 미국보다 2.5배 정도 많은 것으로 보았지만, KIIP는 중국은 23.3%로 미국 16.6%와 비교하였을 때 출원 건수가 1,024건 많은 것으로 보았다. 또한 KISTI는 동기간에 한국의 특허 출원 수가 유럽보다 많다고 보지만, KIIP는 유럽의 특허출원 건수가 한국보다 약 2.3배 많은 것으로 분석하고 있다. 즉 분석 기법이 서로 다르기 때문에 두 기관의 분석 결과를 정량적으로 비

22) KIIP (2023)

교하기 보다는 공통의 경향성과 각각의 분석 방향과 기준에 따라 해석하는 것이 적절할 것으로 보인다.

KISTI의 분석에 의하면 2014~2020년까지 출원 특허 수의 상위 10위 출원인의 국적은 중국이 미국의 약 2.5배 규모이며 한국에 비해서도 10배 이상인 것을 확인할 수 있다.

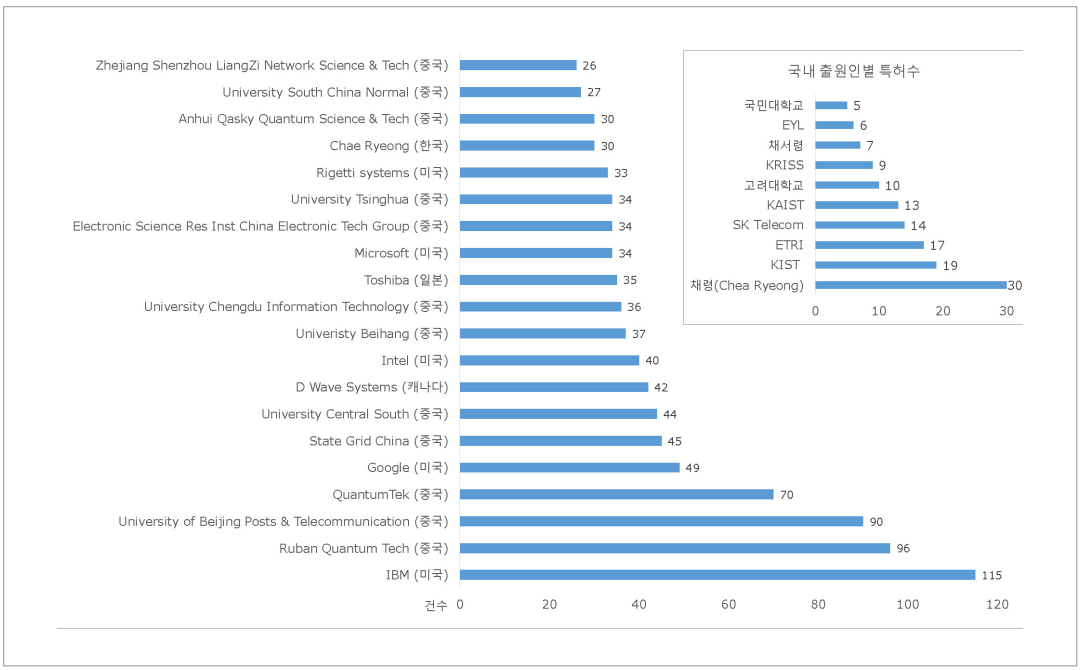
표 Ⅳ-2-5 양자기술 분야 상위 10위 출원인 국적별 출원 특허 수 (2014~2020년)

국가	중국	미국	한국	일본	캐나다	독일	영국	프랑스	스위스	호주
건수	2,042	632	184	105	66	34	32	24	16	10

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-3]은 2014~2020년까지 양보기술 출원인별 특허 수를 보여주고 있다. 국내외 상위 20위의 출원인 중 미국 IBM 115건, 중국 Ruban Quantum Tech 96건, University of Beijing Posts & Telecommunication 90건순으로 나타나며, 상위 20대 출원인에 한국의 개인으로 추정되는 채령이 30건의 특허를 출원했다. 국내 출원인 상위 10위중에는 KIST, ETRI, SK Telecom이 뒤를 이어 각각 19, 17, 14건의 출원 특허 수를 기록했다.

그림 Ⅳ-2-3 양자기술 분야 출원인별 국내외 출원 특허 수 (2014년~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

KIIP는 2017~2021년까지 IP5 국가의 양자기술 특허 상위 출원 기관 10위를 조사하였다. 〈표 Ⅳ-2-6〉은 각 나라별 상위 출원 10개 기관에 대해 출원 건수와 확인 가능한 경우 동일 기간의 등록 건수도 같이 표기하였다. 단, 등록 건수는 출원 기간에 무관하게 동 기간에 등록이 완료된 특허의 수를 표기한 것이다.

표 Ⅳ-2-6 양자기술 특허 상위 출원 기관 국가별 10위 (2017~2021년)

[건수, (등록)]

순위	한국		미국		중국		유럽		일본	
	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원
1	경희대학교	24 (25)	IBM	391 (229)	Ruban Quantum Tech	176 (64)	IBM	59	TOSHIBA	34(39)
2	KIST	20 (23)	Microsoft	102 (64)	Origin Quantum	112	Google	49 (11)	Baidu	14
3	KT	18	Intel	93 (63)	퀀텀C텍	102	Microsoft	49 (7)	Google	12
4	KAIST	16 (14)	Google	88 (46)	베이징 우전대학교	92 (61)	Northrop Grumman	29 (23)	NEC	12 (6)
5	ETRI	15 (11)	D-Wave systems	75 (59)	Baidu	89 (40)	Intel	26 (6)	NTT	10 (25)
6	삼성전자	10	IonQ	50	SGCC	85 (33)	BULL	17	후지쯔	9 (10)
7	국민대학교	10	Rigetti	45 (47)	중국과학 기술대학교	77 (25)	화웨이	17	도쿄대학교	8 (7)
8	한양대학교	10 (9)	Northrop Grumman	38 (48)	중국과학원	71 (83)	IonQ	16	히타치	8 (5)
9	고려대학교	9 (10)	Wells Fargo	38	IBM	70	화웨이 뒤셀도르프	14	리코	7
10	이와이엘	7 (7)	TOSHIBA	36 (39)	중난대학교	67 (36)	IDQuantique	12 (8)	허니웰 인터내셔널	5

※ Baidu : 베이징 바이두 네트콤 과학기술 회사, ETRI : 한국전자통신연구원, KAIST : 한국과학기술원
KIST : 한국과학기술연구원, Origin Quantum : 오리진 양자컴퓨팅 테크놀로지, SGCC :스테이트 그리드

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

2017~2021년까지 한국에 양자기술 분야 특허출원을 가장 많이 한 기관은 경희대학교로 출원 24건과 등록 25건이고, 한국과학기술연구원(KIST)은 출원 20건과 등록 23건, KT는 출원 18건, 한국과학기술원(KAIST)는 출원 16건과 등록 14건, 한국전자통신연구원(ETRI)은 출원 15건과 등록 11건을 기록하면서 다출원 및 다등록 기관으로 분석되었다. 10위권에 진입한 기업은 KT, 삼성전자 및 이와이엘 3곳으로 기업보다는 대학·공공연 중심의 특허출원이 주를 이루고 있는 것으로 보인다. 미국의 경우, IBM은 출원 391건과 등록 229건으로 양자기술 관련 특허를 가장 많이 출원 및 등록하였고, Microsoft는 출원 102건과 등록 64건, Intel은 출원 93건과 등록 63건, Google은 출원 88건과 등록

46건 및 D-Wave systems는 출원 75건과 등록 59건으로 나타난다. 특히 IBM은 이전 기간에 1위를 지키던 Intel을 대신해서 최근 5년간 양자시장을 주도하고 있는 것으로 보인다. 국내 기업 중 삼성전자는 출원 18건으로 18위를 기록한 것으로 분석된다. 미국은 출원 및 등록 기관 상위 10위가 모두 기업으로 구성되어 있어 한국과는 다른 양상을 보이고 있다. 중국의 Ruban Quantum Tech.가 출원 176건과 등록 64건으로 중국 내에서 1위를 기록하였으며, Origing Quantum 출원 112건, 퀀텀C텍 출원 102건, 베이징우전대학교 출원 92건과 등록 61건 및 베이징 바이두 네트콤 과학기술 회사(Bai여)가 출원 85건과 등록 40건으로 그 뒤를 잇고 있다. 국내 기관 중 중국 양자기술 특허 상위 10위에 포함된 기관은 없었고 상위 10위에 포함된 외국 기업으로는 IBM이 유일하게 9위를 기록하였으며 Google도 35건을 출원한 것으로 나타나고 있다. 중국의 경우 상위 10위의 출원 기관이 기업과 대학·공공연이 혼재되어 있고 이전 기간에 비해 신규로 진입한 기관이 상위권에 다수 포함되어 있는 특징을 보이고 있다. 또한 상위 10위권 내의 특허 등록 기관은 기업보다는 대학·공공연이 다수이고 외국 기관은 없는 것으로 확인된다. 동 기간이 유럽에 특허 출원을 가장 많이 한 기관은 IBM으로 총 59건이고, Google은 출원 49건과 등록 11건, Microsoft는 출원 49건과 등록 7건, Northrop Grumman은 출원 29건과 등록 23건, Intel은 출원 26건과 등록 6건을 기록하고 있다. 국내 기관 가운데 ID Quantique가 유일하게 출원 및 등록 건수에 대해 상위 10위에 포함되었다. 유럽의 양자기술 출원은 기업이 주도하고 있고, 중국과 마찬가지로 신규 진입한 기관이 상위권에 다수 포함되어 있으며, 상위 10위에 포함된 외국 기업 다수가 미국 기업으로 파악된다. 마지막으로 일본에서 가장 출원을 많이 한 기관은 Toshiba로 출원 34건과 등록 39건을 기록하였고, 다음으로 Baidu 출원 14건, Google 출원 12건, NEC가 출원 12건과 등록 6건, NTT가 출원 10건과 등록 25건을 기록하였다. 일본 특허출원 및 등록 상위 기관 가운데 국내 기관은 없는 것으로 보이며, 주로 일본의 기업 및 대학·공공연이 상위 출원 기관에 포함되어 있고 외국 기업으로는 Baidu와 Google이 상위 10위권에 진입해 있다.[23)]

KIPP는 국내 산업분류(KSIC) 가운데 양자기술이 속한 산업 분야에서 해당 산업 분야의 특허출원 동향과 양자기술 관련 특허출원 동향 분석을 수행하였다. 이를 위해 양자기술 관련 IPC 분류표와 한국특허청에서 배포한 '산업(KSIC)-특허(IPC) 연계표'를 활용하여 양자기술 IPC가 속한 산업을 분류하였다. 양자기술 관련 산업의 전체 기술 및 해당 산업 분야별 양자기술의 특허출원 동향을 분석하여, 각 산업에서 양자기술이 차지하는 비중 및 특허출원 증가율을 분석하였다. 양자통신의 통신 및 방송 장비 제조업, 양자컴퓨팅 분야의 반도체 제조업, 전자부품 제조업, 사진장비 및 기타 광학기기 제조업, 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업, 마지막으로 양자센서 분야의 의료용 기기(안경, 렌즈 포함) 제조업과 측정, 시험, 항해, 제어, 및 기타 정밀기기 제조업 등 7개 산업분야에서 양자기술 관련 특허가 출원되고 있는 것으로 확인된다.

23) KIIP (2023)

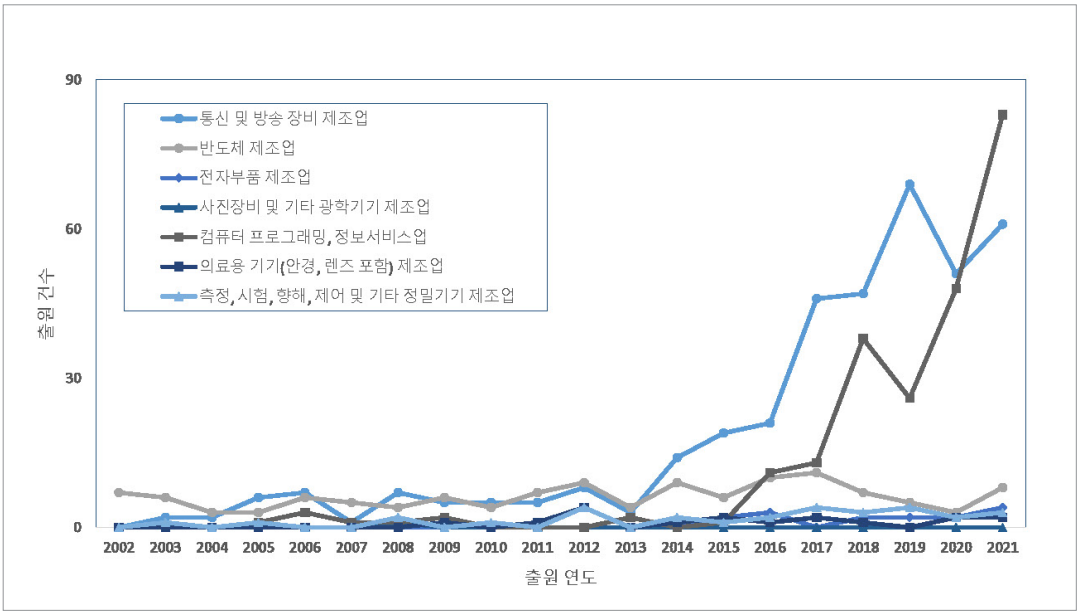
표 Ⅳ-2-7 양자기술 분류 및 관련 산업 분야별 특허 출원 및 등록 건수와 비중

양자분류	산업명	출원건수	출원비중	등록건수	등록비중
양자통신	통신 및 방송 장비 제조업	379	0.11	174	0.09
양자컴퓨팅	반도체 제조업	123	0.04	84	0.05
	전자부품 제조업	15	0.01	7	0.01
	사진장비 및 기타 광학기기 제조업	1	0	1	0
	컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업	230	0.07	60	0.05
양자센서	의료용 기기(안경, 렌즈 포함) 제조업	17	0.01	8	0.01
	측정, 시험, 항해, 제어, 및 기타 정밀기기 제조업	30	0.01	21	0.02

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

〈표 Ⅳ-2-7〉에서 기술한 것처럼, 통신 및 방송 장비 제조업에서 특허출원이 379건으로 가장 많고, 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업 230건, 반도체 제조업 123건 순으로 출원이 이루어지고 있다. 양자기술 분류별로 확인하면 양자통신 분야는 출원 379건과 등록 174건, 양자컴퓨팅 분야는 출원 369건과 등록 152건, 양자센서 분야는 출원 47건과 등록 29건으로 다른 기술 분야 대비 적은 편이다. [그림 Ⅳ-2-4]는 산업 분야별 전체 기술의 연도별 특허출원 건수를 보여주고 있는데, 이에 따르면 출원 건수는 매년 증가하는 추세이며, 특히 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업 분야의 출원은 2018년부터 급격히 증가하고 있다. 2015년 이후 통신 및 방송 장비 제조업 분야에서의 출원이 가파르게 증가하는 경향을 보이고 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업도 2015년 이후 꾸준히 증가하다가 2019년 잠시 하락하였지만, 2021년에는 가장 많은 특허를 출원하였다.

그림 Ⅳ-2-4 산업 분야별 전체 기술의 연도별 특허출원 건수 (2002~2021년)



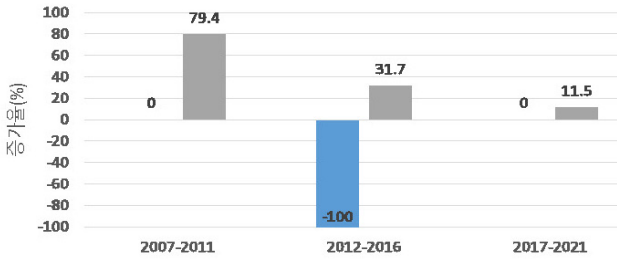
※ KIIP (2023) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-5]는 2002~2021년에 출원된 특허에 대하여 5개년별 출원 증가율을 분석한 것이다. 각 산업 분야별로 전체 기술의 출원 증가율 대비 양자기술 관련 특허의 출원 증가율이 높은 것으로 나타난다. 2017~2021년 동안 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업, 통신 및 방송 장비 제조업 분야의 전체 기술 특허출원이 이전 기간 대비 각각 53.1%, 3.0% 증가한 것과 비교하여, 해당 분야의 양자기술 관련 특허출원은 각각 1,385.7%, 321.5% 증가한 것으로 나타난다. 이는 최근 5년 동안 양자컴퓨팅 및 양자통신 관련 기술의 출원이 급격하게 증가한 것을 나타낸다고 할 수 있다. 특히, 컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업, 통신 및 방송 장비 제조업, 전자부품 제조업, 측정, 시험, 항해, 제어, 및 기타 정밀기기 제조업 분야의 양자기술은 전체 기술 대비 높은 출원 증가율을 보이고 있다. 반면에 반도체 제조업과 사진장비 및 기타 광학기기 제조업 분야의 양자기술은 전체 기술 대비 특허 출원 증가율이 일부 증가하긴 했지만, 그 수준이 매우 미비하며, 실제로 증가율이 낮아지고 있는 것으로 나타나고 있다. 이에 따라 양자컴퓨팅 분야의 특허 출원의 증가를 이끄는 요인은 컴퓨터 프로그램밍, 정보서비스업 분야인 것으로 보인다.

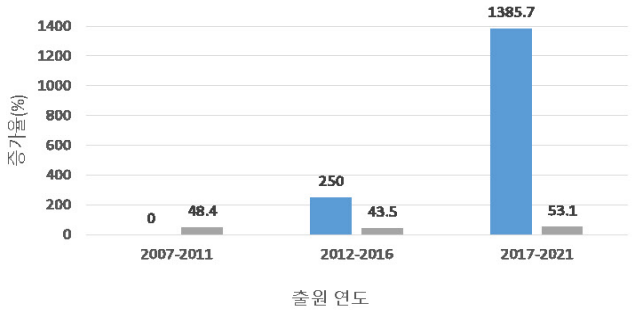
그림 Ⅳ-2-5 산업 분야별 전체 기술 및 양자기술의 이전 기간 대비 출원 증가율 (2002~2021년)



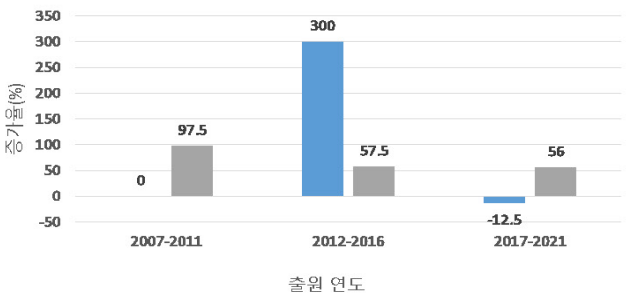
사진장비 및 기타 광학기기 제조업



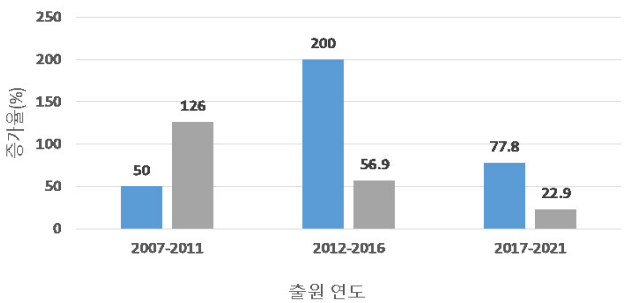
컴퓨터 프로그래밍, 정보서비스업



의료용 기기(안경, 렌즈 포함) 제조업



측정, 시험, 항해, 제어, 및
기타 정밀기기 제조업



※ KIIP (2023) 집필진 재구성

제2절 양자통신 분야

양자통신은 송신자와 수신자 사이에 단일 광자 또는 공유된 얽힘에서, 고전 통신 기술의 도움으로 광자 또는 원자의 상태와 같은 양자정보를 전달하는 기술을 의미한다. 양자통신 세부 분야로는 양자암호, 양자전송, 양자네트워크를 꼽을 수 있다.[24)]

정보통신기획평가원(IITP)의 양자통신 분야 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 8,674건이다.[25)] 다만 특허 분석을 위해 전체 기간을 2010~2014년까지 구간과 2015~2019년까지의 두 구간으로 나눴다. 특허출원까지 평균 1.5년 정도 소요되는 것을 고려하면 2020년과 2021년의 출원 특허 수는 실제와 차이가 있을 수 있으므로, 미공개 구간으로 구분해 총 출원 특허 수를 제외하고 전체 분석에서는 배제했다. IITP에서 제공한 [그림 Ⅳ-2-6]을 보면, 중국 특허의 비중이 54.0%를 차지하며 2018년까지 증가하다가 2019년부터는 감소하는 경향을 보인다. 미국 16.6%, 한국 12.7%, 유럽 4.9%의 점유율을 보이며 2019년까지 꾸준한 증가 추세지만, 점유율 11.8%의 일본은 2016년 이후로 출원 특허 수가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 양자통신 분야의 출원 특허 수는 양자정보통신 분야 전체의 약 59.5%를 차지할 정도로 많으며, 2010~2014년까지 53.5%였던 점유율이 2015~2019년에 62.1%로 약 8.6% 증가해 양자통신 분야의 특허출원이 비교적 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

그림 Ⅳ-2-6 양자통신 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율



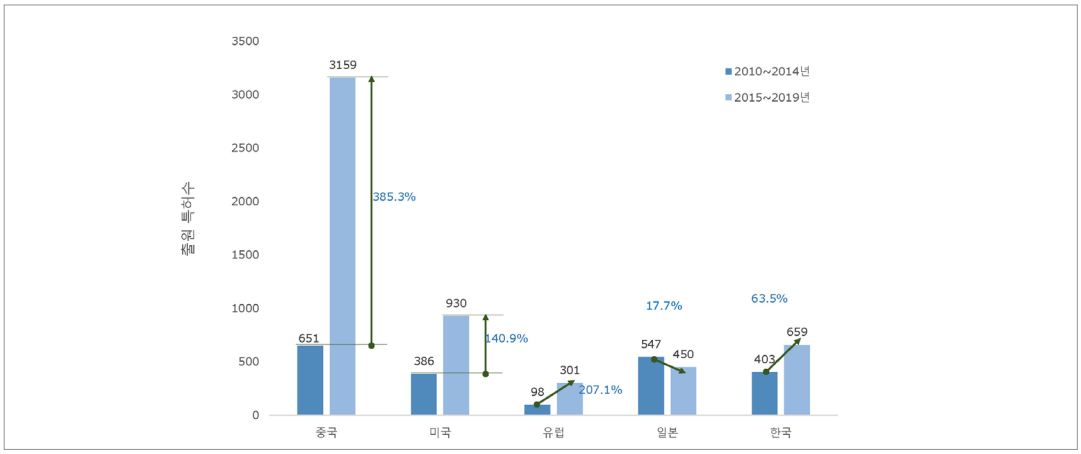
※ IITP (2021)

24) KISTI (2021)

25) IITP (2021)

[그림 Ⅳ-2-7]은 특허출원 증가율을 2010~2014년과 2015~2019년의 기간 동안 비교한 결과를 보여준다. 이에 따르면 2010~2014년 대비 2015~2019년 특허출원 수가 2,085건에서 5,499건으로 약 163.7%의 증가율을 보이며, 국가별로는 중국 특허의 증가율이 385.3%, 유럽 특허가 207.1%를 기록해 큰 폭으로 늘어난 것이 확인된다.[26] 같은 기간 미국과 한국도 각각 140.9%, 63.5%의 증가율을 보여줬는데, 반면 일본은 오히려 감소율 17.7%를 나타내고 있다. 전체 특허 수의 50.5%를 차지하는 중국은 2015~2019년까지 양자통신 분야에 상당수의 특허를 출원해 관련 분야에 연구를 집중하고 있는 것으로 보인다.

그림 Ⅳ-2-7 양자통신 분야 국가별 특허 증가율

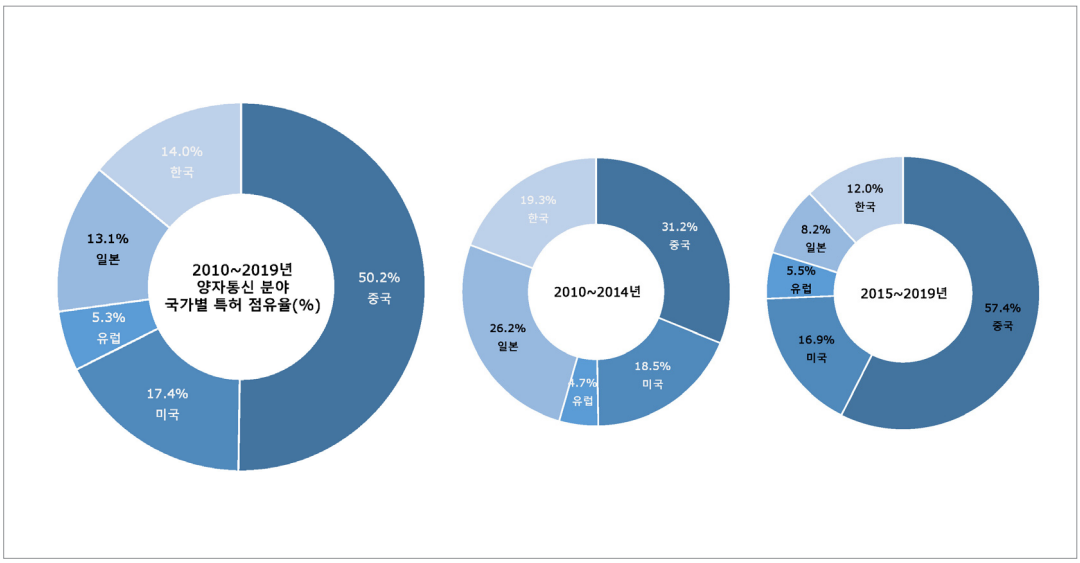


※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-8]에서처럼, 국가별 특허 점유율을 살펴보면 중국이 큰 비중을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 2010~2014년 특허출원 비중을 보면 중국 31.2%, 일본 26.2%, 한국 19.3%, 미국 18.5%, 유럽 4.7%의 점유율을 나타냈으며, 2015~2019년 특허출원 비중에선 중국이 57.4%를 차지해 최근 양자통신 분야의 특허출원을 중국이 주도하고 있는 것으로 나타났다.

26) IITP (2021)

그림 Ⅳ-2-8 양자통신 분야 국가별 특허 점유율



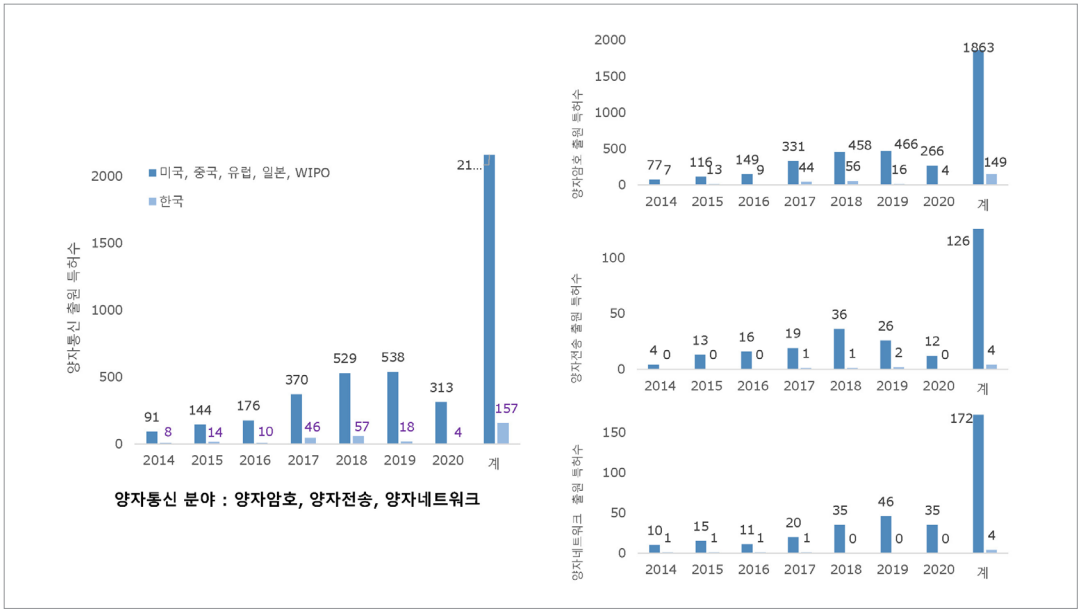
※ IITP (2021) 집필진 재구성

2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 157건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자통신 분야 관련 특허를 연도별 그리고 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[27] [그림 Ⅳ-2-9]은 2014~2020년까지 양자통신 분야에서 출원된 특허 수 총 2,318건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 2,161건과 한국 157건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자통신 분야를 양자암호, 양자전송, 양자네트워크로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 단, 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 317건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다.

분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자통신 분야에서 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국의 경우 2018년까지 증가하다가 2019년에는 전년 대비 1/3로 감소한 것을 알 수 있다. 양자통신 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 양자암호 분야가 전체 2,012건으로 93%를 차지했고, 양자네트워크 분야는 176건, 양자전송 분야는 130건을 각각 출원했다. 양자암호와 양자네트워크의 출원 특허 수는 2019년까지 증가하는 경향을 보이지만, 양자전송은 2018년 대비 27% 감소하는 것으로 나타났다. 한국은 양자암호 분야에서 꾸준히 특허를 출원하고 있으나, 2019년엔 16건으로 2018년 대비 40건 감소했으며, 양자전송과 양자네트워크 분야는 연간 1건 내외로 출원하고 있으나 미출원한 해도 확인되고, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO 대비 출원 수가 급격히 감소하고 있다.

27) KISTI (2021)

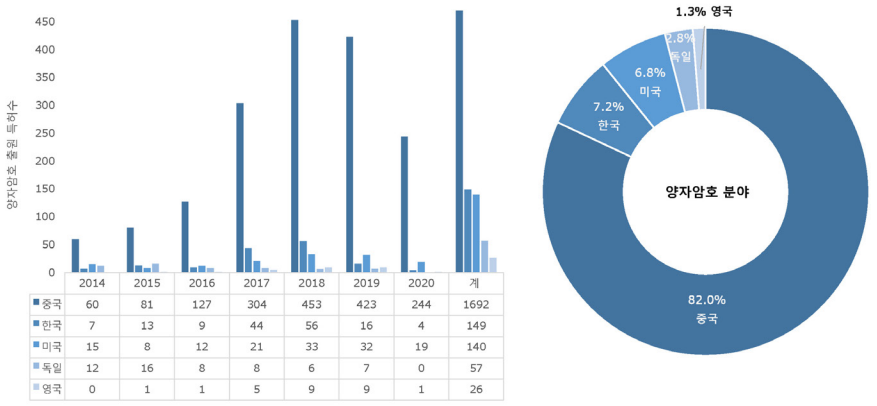
그림 Ⅳ-2-9 양자통신 분야 출원 특허 수 (2014~2020년)



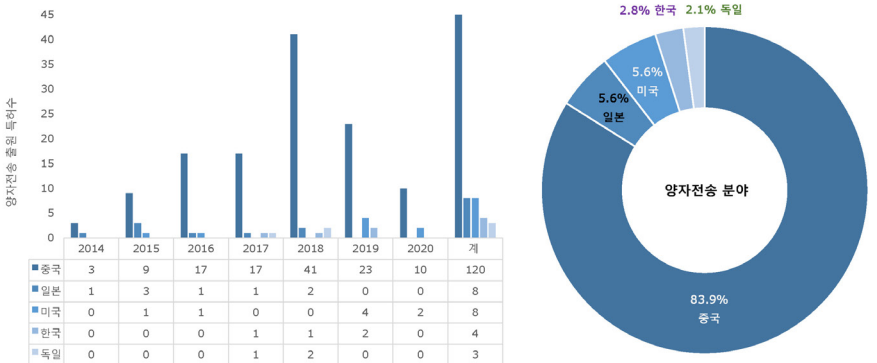
※ KISTI (2021) 집필진 재구성

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 Ⅳ-2-10]과 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자통신 전 분야에 걸쳐 중국의 특허출원 비율은 80% 이상으로, 중국 외 상위 4개국의 총출원 특허 수보다 월등히 많은 것을 알 수 있다. 한국, 미국, 중국은 2014년부터 2018년까지 출원 특허 수가 지속 증가하는 양상을 보이다가 2019년에는 전체적으로 감소 추세를 나타내고 있다. 이는 두 가지 경우로 추측 가능한데, 기술 유출 방지를 위해 특허를 미공개하는 경우와 심사를 받느라 미처 공개하지 못한 경우로 해석된다. 따라서 2019년 특허 추이를 정확히 확인하기 위해서는 2022년 기준으로 다시 분석할 필요가 있다. 이는 KIIP 자료를 이용하여 다음에서 재분석할 것이다. 한편 중국의 경우, 양자정보기술 분야에서 특허 확보를 위해 지속적인 노력을 하고 있다는 것을 분석 결과를 통해 확인 가능하며, 이는 IITP에서 분석한 것과 유사한 결과이다.

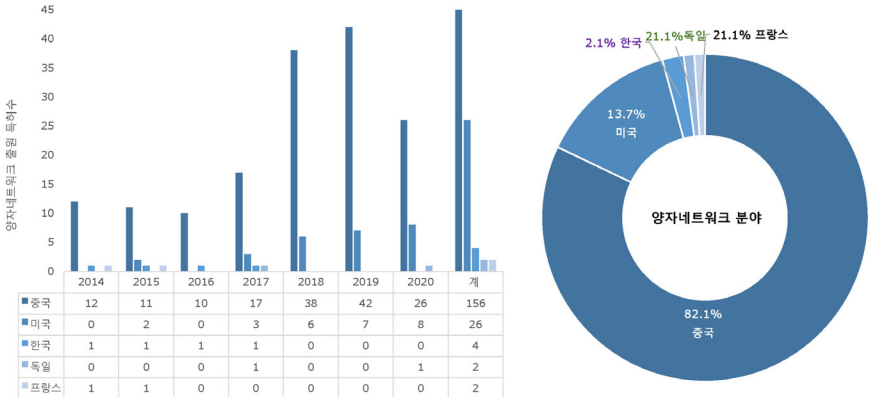
그림 Ⅳ-2-10 양자통신 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	60	81	127	304	453	423	244	1692
한국	7	13	9	44	56	16	4	149
미국	15	8	12	21	33	32	19	140
독일	12	16	8	8	6	7	0	57
영국	0	1	1	5	9	9	1	26



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	3	9	17	17	41	23	10	120
일본	1	3	1	1	2	0	0	8
미국	0	1	1	0	0	4	2	8
한국	0	0	0	1	1	2	0	4
독일	0	0	0	1	2	0	0	3

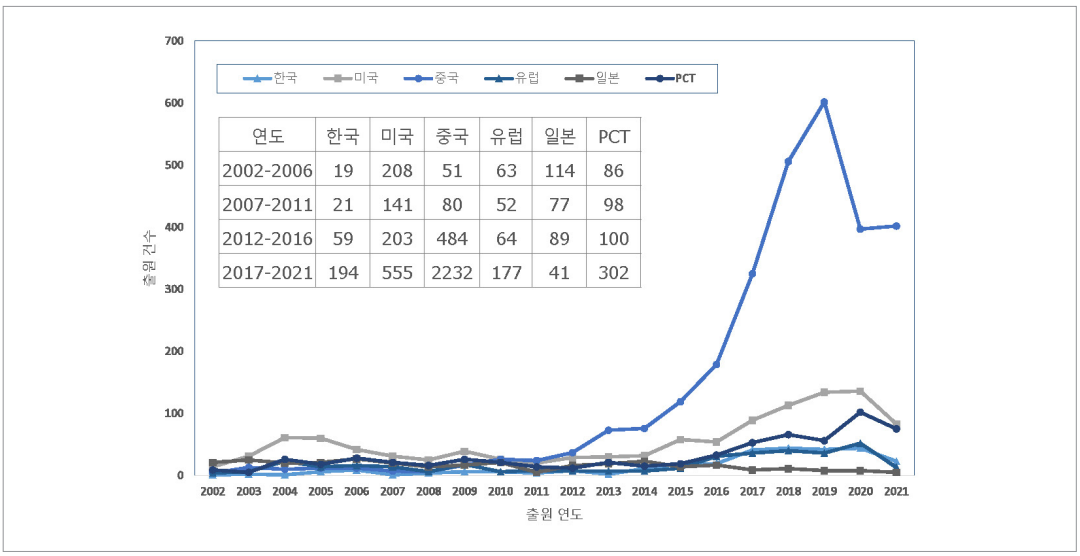


	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	12	11	10	17	38	42	26	156
미국	0	2	0	3	6	7	8	26
한국	1	1	1	1	0	0	0	4
독일	0	0	0	1	0	0	1	2
프랑스	1	1	0	0	0	0	0	2

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

KIIP에 의하면, [그림 Ⅳ-2-11]에 기술된 것처럼 2002~2021년까지 양자통신 분야의 특허 출원은 중국이 주도하고 있고, 미국, PCT, 한국, 유럽 및 일본 순으로 나타나고 있다.[28] 특히 중국은 2010년을 기점으로 미국의 출원량을 넘어섰으며, 최근 5년간 급격한 증가세를 보이고 있는데 미국에 비해 4배가 넘는 출원 건수를 기록하며 가장 많은 출원량을 보였다. 한국은 양자통신 분야의 특허출원이 꾸준한 증가 추세를 보이고 있으며, 유럽과 일본 대비 높은 출원량을 기록하고 있다. 이 결과는 IITP와 비교하였을 때 일본과 유럽의 순서에만 차이가 있고 중국이 주도하고 있음은 동일하게 나타나고 있다. 양자통신 분야의 특허 등록은 중국이 주도하고 있으며 미국, 한국, 유럽 및 일본 순인데, 한국은 최근 5년간 등록 건수의 증가가 두드러진다. 그리고 유럽은 최근 3년간 특허 등록이 증가 추세를, 반면에 일본은 감소하는 추세를 보이고 있다. 이 분석을 통해서 확인할 수 있는 것은 2019년 이후 중국의 경우 특허출원 건수가 감소하고 다른 국가들은 둔화되는 경향이 나타나는데 이는 KISTI와 KIIP의 분석에서 유사하게 나타나고 있다.

그림 Ⅳ-2-11 양자통신의 연도별 출원 건수 (2002~2021년)



연도	한국	미국	중국	유럽	일본	PCT
2002-2006	19	208	51	63	114	86
2007-2011	21	141	80	52	77	98
2012-2016	59	203	484	64	89	100
2017-2021	194	555	2232	177	41	302

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수는 〈표 Ⅳ-2-8〉를 통해서 확인할 수 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 일본으로 전 분야에 걸쳐 높게 나타나며, 중국은 양자암호, 한국과 독일은 양자네트워크, 미국은 양자전송 분야에서 각각 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다.

28) KIIP (2023)

표 Ⅳ-2-8 양자통신 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)

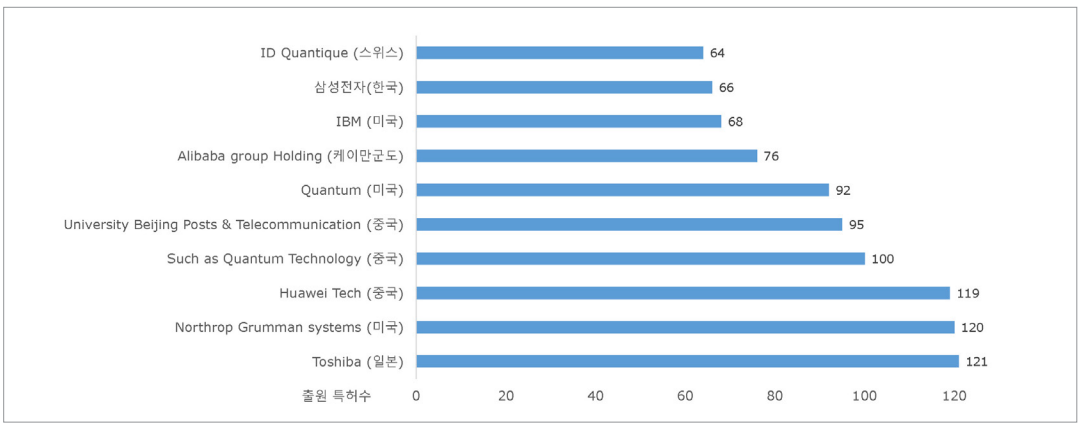
국가	합계		양자암호		양자전송		양자네트워크	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
중국	1,970	2.7	1,694	2.9	120	1.6	156	1.5
미국	157	2.1	149	2.1	4	2.5	4	1.2
한국	174	2.5	140	2.6	8	1.6	26	2.7
일본	67	3.3	57	3.1	8	4	2	5.5
독일	31	1.6	26	1.6	3	1.3	2	2

※ KISTI (2021)

양자통신 분야의 출원인별 분석은 IITP, KISTI, KIIP의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 서두에서 언급한 것처럼, 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 분석 결과도 서로 조금씩 다르게 나타난다.

[그림 Ⅳ-2-12]의 정보통신기획평가원 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인으로 일본 Toshiba(121건), 미국 Northrop Grumman systems(120건), 중국 Huawei Tech(119건)를 들 수 있으며, 한국은 삼성전자(66건)가 상위 10위권 출원인에 이름을 올렸다. Toshiba는 2010~2014년에 양자통신 디바이스, 양자통신 방법, 양자통신 시스템 등에 대해, 2015~2019년에는 양자키 분배 디바이스, 양자키 분배 시스템, 양자키 분배 방식 등에 대해 출원했다.[29] 정보통신기획평가원의 조사 결과에 의하면, Toshiba가 양자통신 분야에서 제일 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있으며, Huawei Tech와 Alibaba group Holding도 상위 10위권에서 공통으로 나타나고 있다. 한국의 경우, 삼성전자만 66건으로 9위이다.

그림 Ⅳ-2-12 양자통신 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년)

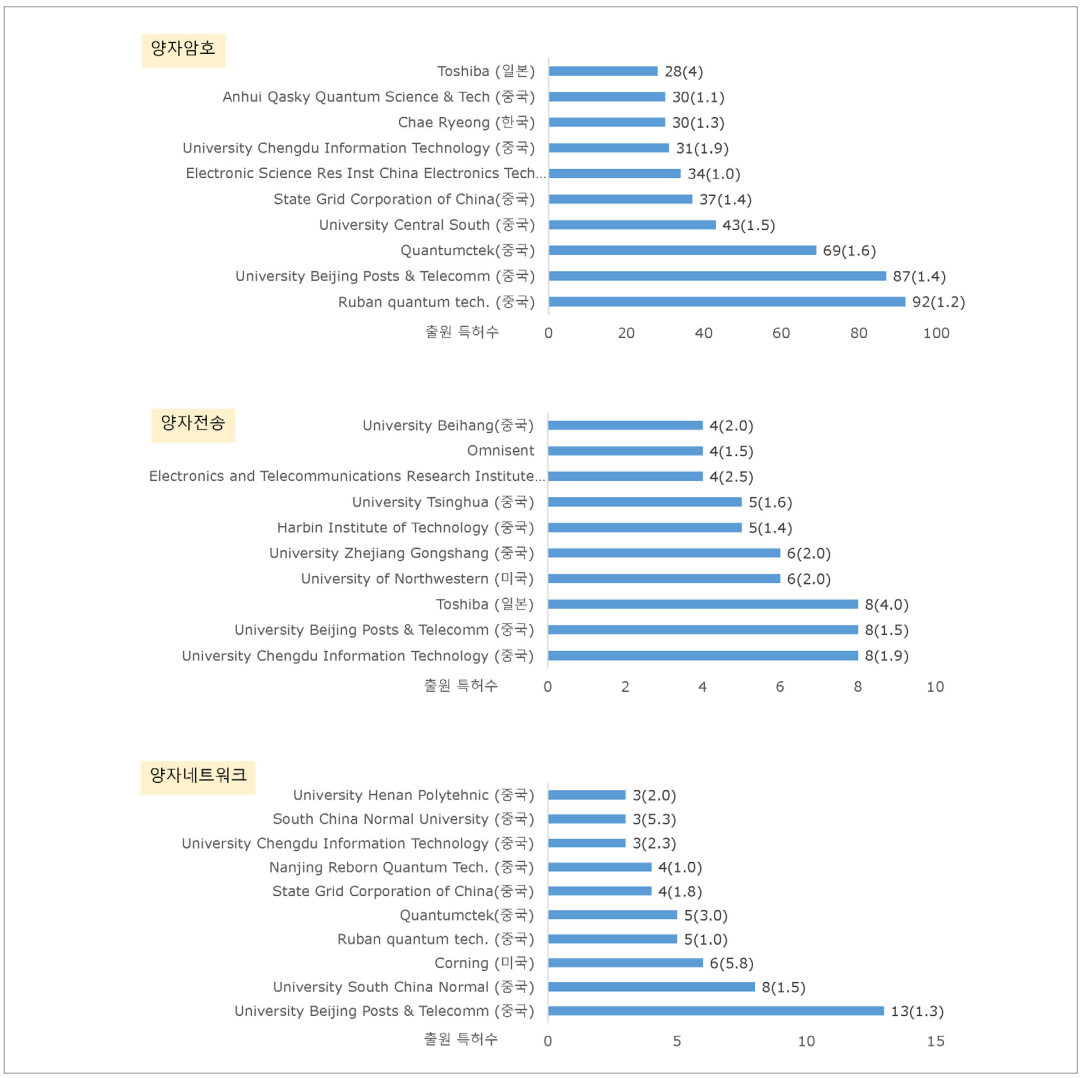


※ IITP (2021) 집필진 재구성

29) IITP (2021)

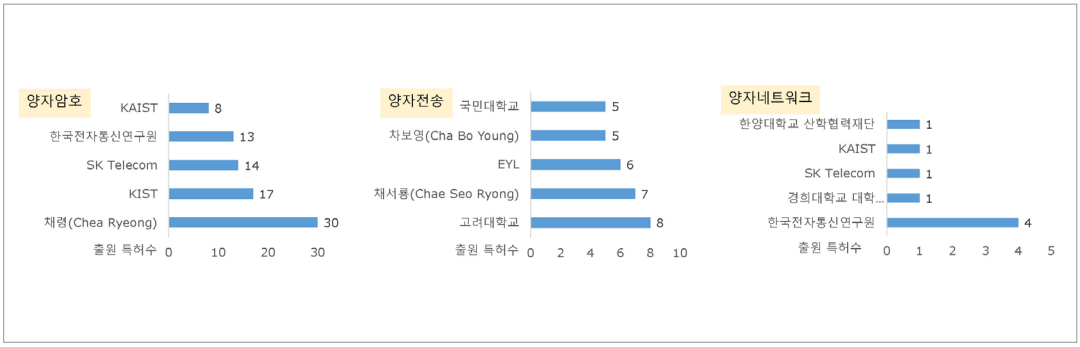
KISTI는 2014~2020년까지 양자통신 전 분야에 대한 출원인별 분석 대신, 세부 분야 출원인별 분석 결과를 제공하고 있다. [그림 Ⅳ-2-13]에서 보는 것처럼 세부 분야 출원인별 특허에 대해서 분석했고, 각 숫자는 출원 특허의 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 분석 결과에 의하면, 각 세부 분야별로 출원인의 국적이 중국인 경우가 대다수임을 알 수 있다. 이 분석 결과는 앞서 살펴본 특허청과 정보통신기획평가원의 분석 결과와 다름을 알 수 있다. Toshiba의 양자암호와 양자전송 특허 수는 상위 10위 안에 포함돼 있으나, 그 수는 2010~2019년의 기간에 비해 적고 상대적으로 중국이 차지하는 비율은 더 큰 것으로 확인된다. 한국은 개인으로 판단되는 채령(Chae Ryeong)이 양자암호 분야에서 상위 10위 안에 포함됐으며, 2022년까지도 특허출원을 지속하고 있다. 그 외에 한국전자통신연구원(ETRI)이 양자전송 분야에서 4건의 특허를 출원하고 있다. 양자전송 분야 Omnisent의 경우 출원인의 국적이 확인되지 않는다. 양자통신 분야의 국내 출원인별 세부 분야 출원 특허 수를 보면, 출원인 중 일부는 상위 10위 안에 속하는 출원 특허 수를 보유하고 있다. 또한 양자전송 분야에서 고려대학교가 다수의 특허를 출원하고 있으며, 채서룡과 차보영이라는 개인도 다수의 특허를 출원하고 있다.

그림 Ⅳ-2-13 양자통신 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-2-14 양자통신 분야 국내 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

KIIP는 2017~2021년까지 IP5 국가의 특허 상위 출원 및 등록 기관에 대해서 분석을 수행하였다. 〈표 Ⅳ-2-9〉는 양자통신 분야의 각국에 대한 상위 5위 기관의 특허출원과 등록 수에 대해서 보여주고 있다. 한국은 KT, KIST 및 경희대학교가 출원 건수 18건으로 1위를, 한국전자통신연구원(ETRI)과 국민대학교가 각 10건으로 상위 5위에 포함되었다. KIST는 20건, 경희대학교는 21건, ETRI는 9건의 특허를 동일한 시기에 등록하였다. 상위 출원 기관으로 KT를 제외하고는 상위 5위에 대학과 공공연에 해당된다. 미국의 경우, Wells Fargo가 출원 32건과 등록 15건으로 1위를, Toshiba가 출원 27건과 등록 29건, IBM이 출원 21건과 등록 16건, Intel은 출원 19건, Bank of America가 출원 17건과 등록 10건으로 상위 5위에 포함되었다. 미국은 한국과 달리 상위 5위에 기업들이 차지하고 있고, 금융업에 관련된 기업 두 곳이 포함된 것이 인상적이다. 중국은 Ruban Quantum Tech.가 출원 174건과 등록 64건으로 1위 차지하였고, 뒤를 이어 퀀텀C텍이 출원 101건, 베이징우전대학교가 출원 92건과 등록 60건, SGCC는 출원 78건과 등록 33건, 중난대학교가 출원 63건과 등록 33건으로 나타나고 있다. 양자통신 분야의 특허출원 건수는 다른 나라에 비해 월등히 많은 것으로 나타나고 있다. 유럽에서는 화웨이 및 화웨이 뒤셀도르프가 출원 14건으로 1위를 차지했고, 화웨이는 동 시간 동안 특허를 3건 등록하였다. 도이치 텔레콤은 12건, 한국의 ID Quantique가 출원 12건과 등록 8건, Intel이 출원 11건으로 상위 5위에 포함되었다. 마지막으로 일본은 Toshiba가 출원 23건과 등록 27건 1위이고, 오키 일렉트릭이 출원 3건과 등록 8건으로 2위를, Baidu, 히타치 정보통신 엔지니어링 및 도시바 인프라 시스템즈 & 솔루션이 각 2건으로 상위 5위에 나타나고 있다. 일본은 미국과 마찬가지로 기업 중심의 출원 건수가 많은 편이다. 인상적인 것은 Toshiba의 경우 동 기간 동안에 일본보다 미국에서 양자통신 관련 특허를 더 많이 출원하고 있다는 것이다. 이는 분석 기간은 다르지만 KISTI의 분석 결과와 같은 양상을 나타낸다. 향후 양자통신 시장에서 Toshiba이 행보를 지켜볼 필요가 있을 것으로 보인다.

표 Ⅳ-2-9 양자통신 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)

[건수, (등록)]

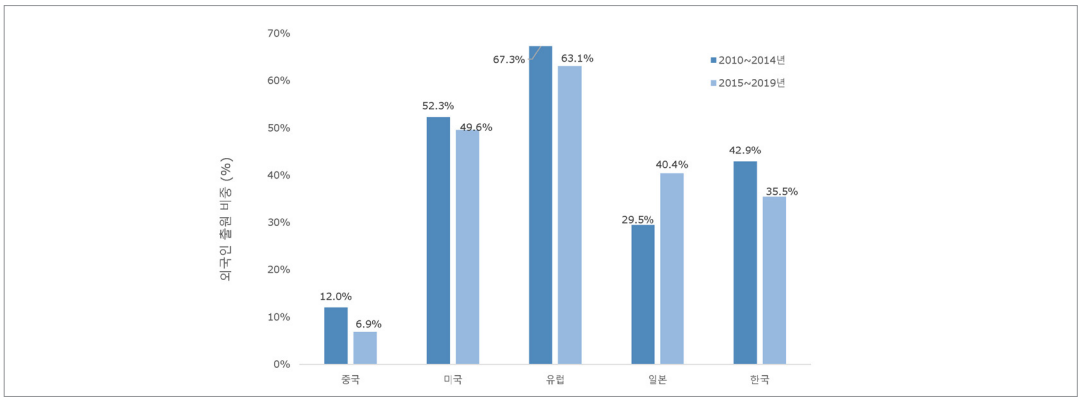
순위	한국		미국		중국		유럽		일본	
	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원
1	KT	18	Wells Fargo	32 (15)	Ruban Quantum Tech	174 (64)	화웨이	14 (3)	TOSHIBA	23 (27)
2	KIST	18 (20)	TOSHIBA	27 (29)	퀀텀C텍	101	화웨이 뒤셀도르프	14	오키 일렉트릭	3 (8)
3	경희대학교	18 (21)	IBM	21 (16)	베이징 우전대학교	92 (60)	도이치 텔레콤	12	Baidu	2
4	ETRI	10 (9)	Intel	19	SGCC	78 (33)	ID Quantique	12 (8)	Hitachi Inf.	2
5	국민대학교	10	Bank of America	14 (10)	중난대학교	63 (33)	Intel	11	TOSHIBA infra	2

※ Baidu : 베이징 바이두 네트콤 과학기술, ETRI : 한국전자통신연구원, Hitachi Inf. :히타치 정보통신 엔지니어링, KIST : 한국과학기술원, Origin Quantum : 오리진 양자컴퓨팅 테크놀로지, SGCC :스테이트 그리드, TOSHIBA infra : 도시바 인프라 시스템즈 & 솔루션

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

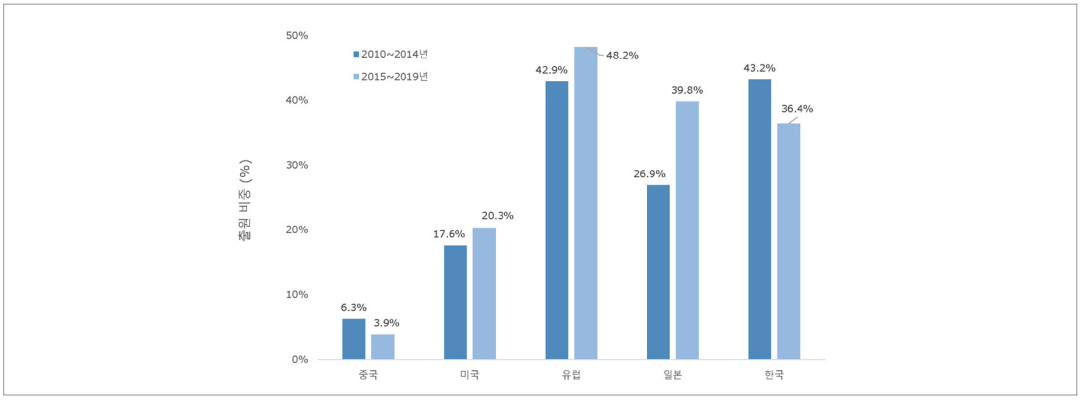
IITP는 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 Ⅳ-2-15]에 의하면 한국, 미국, 유럽, 중국은 2010~2014년에 외국인 출원 비중이 높았고, 반대로 일본은 2015~2019년에 외국인 출원 비중이 높은 것으로 나타나고 있다.

그림 Ⅳ-2-15 양자통신 분야 국가별 외국인 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-2-16 양자통신 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-16]가 표현한 것처럼, 양자통신 분야 IP5 각국에서 자국을 제외한 다른 IP4가 확보한 특허 현황을 살펴보면, 한국과 중국은 2010~2014년에 IP4의 특허 비중이 높았고, 미국, 일본, 유럽은 2015~2019년에 IP4의 특허 비중이 높은 것으로 나타났다.[30] 특히 유럽에서 IP4 특허 비중이 높아 중국, 미국, 일본, 한국이 특허를 많이 출원하고 있는 것으로 보이고, 중국에서는 IP4 특허 비중이 매우 낮아 유럽, 미국, 일본, 한국의 중국 내 특허 비중이 높지 않은 것으로 보인다. 즉, 양자통신 분야에서 높은 특허 점유율을 가진 중국의 경우, 자국 내 출원 특허 비중이 대다수를 차지하고 있음을 알 수 있다.

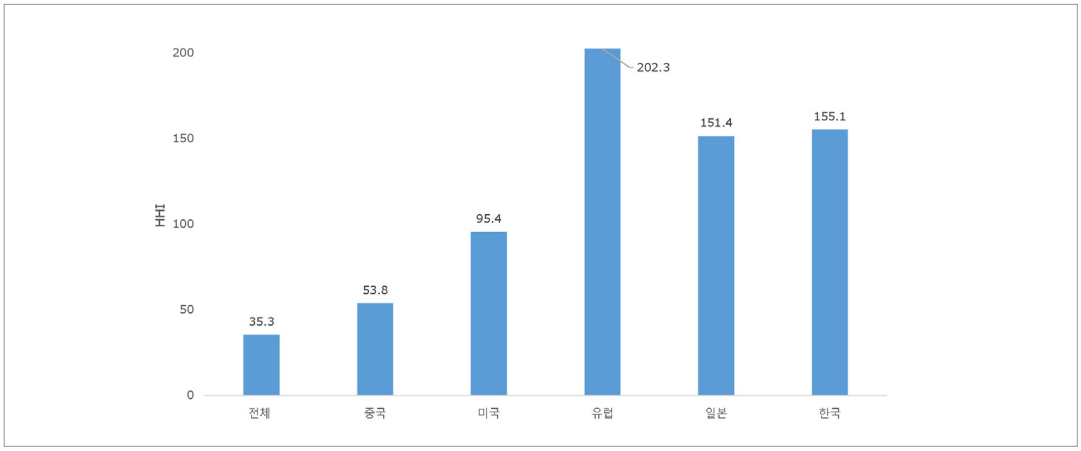
표 Ⅳ-2-10 HHI 범위에 따른 집중 수준

분석항목	HHI 범위	경쟁 강도	집중 수준 (시장진입 용이성)
완전 자유경쟁 시장	0~100	이론상에만 존재	매우 낮음(매우 높음)
집중화 정도가 거의 없는 시장	100~1,000	구매자 우위의 높은 경쟁 강도	중간~낮음(높음)
경쟁적 시장	1,000~1,800	규제당국이 목표로 하는 경쟁 강도	보통(보통)
과점적 시장	1,800~4,000	공급자 우위의 낮은 경쟁 강도	중간~높음(낮음)
독점적 시장	4,000 이상	독점적 경쟁우위 출현	매우 높음(매우 낮음)

※ IITP (2021) 집필진 재구성

30) IITP (2021)

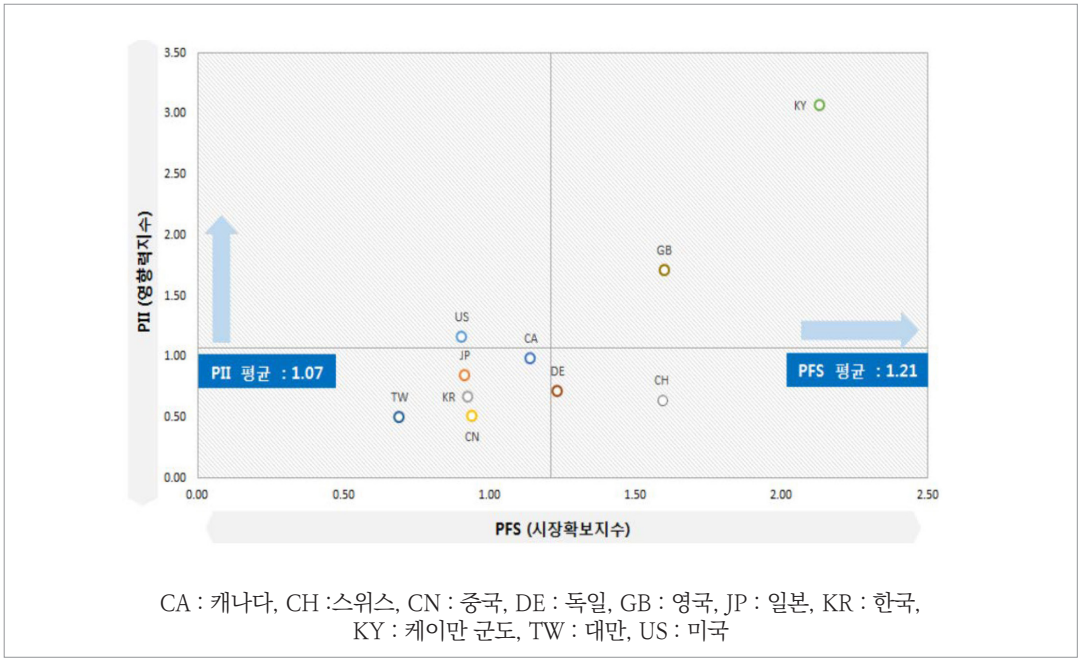
그림 Ⅳ-2-17 양자통신 분야 국가별 HHI (2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

산업에서 시장 집중 정도를 측정하는 대표적인 지수 중 하나인 HHI(Herfindahl- Hirschman Index)는 〈표 Ⅳ-2-10〉에서처럼 범위에 따라 집중 수준을 나눌 수 있다. 양자통신 분야의 HHI는 [그림 Ⅳ-2-17]에서처럼 전체가 35.3으로 집중 수준이 매우 낮은 완전 자유경쟁 시장으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국, 중국은 100 미만으로 완전 자유경쟁 시장에 해당해 시장진입 용이성이 매우 높고, 한국과 일본 그리고 유럽은 HHI가 100~1,000으로 집중화 정도가 거의 없는 시장에 해당해 시장진입 용이성이 높은 편으로 분석되고 있다.

그림 Ⅳ-2-18 양자통신 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS (2010~2019년)



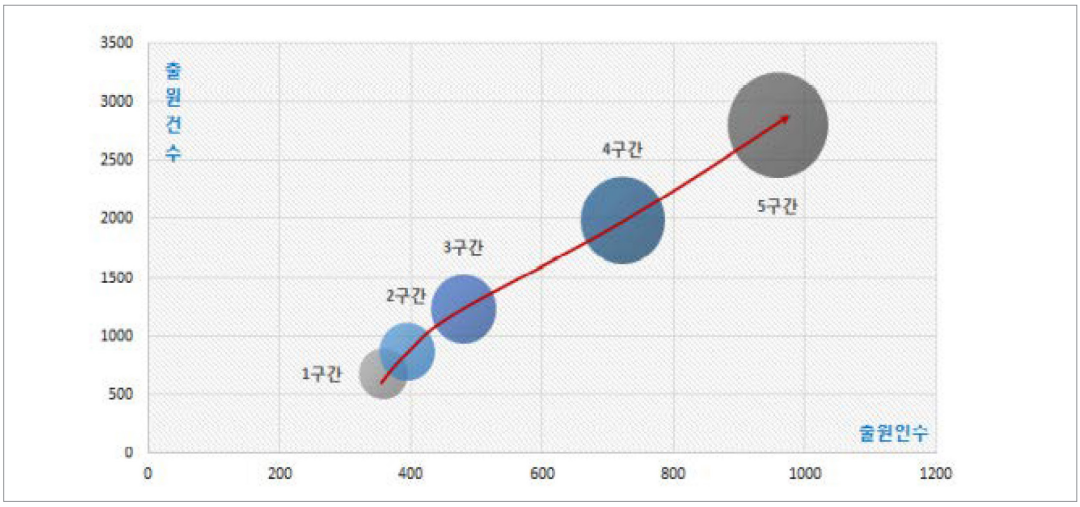
CA : 캐나다, CH :스위스, CN : 중국, DE : 독일, GB : 영국, JP : 일본, KR : 한국,
KY : 케이만 군도, TW : 대만, US : 미국

※ IITP (2021)

출원인 국적별 포트폴리오는 영향력지수(PII)와 시장확보지수(PFS)의 국적별 수치를 검토해, 국적별 기술 영향력 및 시장 확보력을 종합적으로 분석하는 방법이다. 이때 PII는 미국 등록 특허를 대상으로 분석해 특정 주체의 피인용도지수(CPP)를 전체 등록 특허의 피인용도로 나눈 값, PFS는 미국 등록 특허를 대상으로 분석해 특정 주체의 평균 패밀리 국가 수를 전체평균 패밀리 국가 수로 나눈 값으로 정의한다.[31] [그림 Ⅳ-2-18]에서 보듯이 양자통신 분야에서 특허출원인의 국적 상위 10개를 기준으로, PII가 평균 이상으로 높은 곳은 케이만군도, 영국, 미국이며, PFS가 평균 이상으로 높은 곳은 스위스와 독일이다. 종합적으로 보면, 케이만군도와 영국 국적 출원인 특허의 PII, PFS가 모두 평균보다 높은 것으로 나타나 기술 영향력 및 시장 확보력을 모두 갖췄다고 볼 수 있다. 대만, 중국, 한국, 일본, 캐나다 국적의 출원인 특허는 PII와 PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

IITP의 분석 결과에 의하면, 양자통신 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자 상태(Quantum state), 광원(Light source), 양자점(Quantum dot) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 양자키 분배(Quantum key distribution), 양자프로세스(Quantum process), 조지프슨 접합(Josephson Junction) 등의 키워드는 2014년까지 드러나지 않다가 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 양자통신 분야는 양자역학적 특성을 통신에 적용하기 위해 양자상태를 생성, 제어, 측정 및 분석하는 다양한 기술 요소가 기본이라고 볼 수 있으며, 최근에는 양자키 분배, 양자암호기술, 양자프로세스, 접합 방법 등의 기술이 좀 더 주목받고 있다.

그림 Ⅳ-2-19 양자통신 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년)



※ IITP (2021)

31) IITP (2021)

KIIP는 양자기술 특허 분석을 위해 시장확장성, 특허관심도 및 특허규모에 대해서 분석을 수행하였다.[32] 양자기술 시장확장성은 양자기술 특허들이 진입한 국가의 수를 활용하여 해당 기술의 시장 확장 가능성을 파악해 보기 위한 지표로 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\text{양자기술 시장확장성} = \frac{\text{양자기술 특허의 진입 국가수}}{\text{양자기술 특허 건수}}$$

시장확장성이 큰 값을 가지는 양자기술 분야는 타 기술 분야에 비해 상대적으로 다양한 국가에 걸쳐 기술을 보호하려는 특징이 있음을 나타낸다. 양자기술의 특허관심도는 양자기술 특허의 중요도를 보는 지표로써 해당 기술의 패밀리특허 (INPADOC 패밀리 정보를 사용) 건수가 많을수록 중요 기술로 값을 가지는 양자기술 분야는 그 중요성을 인식하고 기술보호에 대한 의지가 강한 기술로 판단하는데 이용하였다.

$$\text{양자기술 특허관심도} = \frac{\text{양자기술 특허의 패밀리특허 건수}}{\text{양자기술 특허 건수}}$$

〈표 Ⅳ-2-8〉에서 기술한 것처럼 KISTI도 패밀리특허를 이용하여 특허의 질적 수준을 판단하는데 이용하였다. 마지막으로 양자기술 특허규모는 양자기술 전체 특허에서 한국 출원인의 특허 건수가 차지하는 비율(점유율)로 한국 출원인의 특허규모가 큰 값을 가질수록 해당 분야에서 (양적)경쟁력을 가짐을 의미한다.

$$\text{양자기술 특허규모} = \frac{\text{한국 출원인에 의해 등록된 양자기술 특허 건수}}{\text{양자기술 특허 전체 건수}}$$

KIIP는 조사 대상을 미국특허청으로 한정하여 분석하였는데, 그 결과에 의하면 외국 출원인의 양자기술에 대한 특허관심도는 한국 출원인에 상당히 높고, 시장확장성에 비해서도 특허관심도 수치는 상당히 높게 나타나고 있다. 전반적으로 양자기술 특허에 대한 한국 출원인의 특허규모는 최근 5년간 정체 또는 하락하여 상대적 비중이 상당히 감소하는 것으로 나타나고 있다.

32) KIIP (2023)

표 Ⅳ-2-11 양자통신 분야 분석 지표

	시장확장성			특허관심도			특허규모		
출원인 국적	한국	외국	전체	한국	외국	전체	한국	외국	전체
2002-2006	2.40	2.55	2.51	3.40	5.68	5.52	5	189	2.65
2007-2011	2.70	2.67	2.78	6.90	6.44	6.77	10	131	7.63
2012-2016	2.29	2.86	2.79	3.00	13.54	12.28	14	181	7.73
2017-2021	2.21	2.75	2.46	2.93	13.70	10.85	14	324	4.32

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

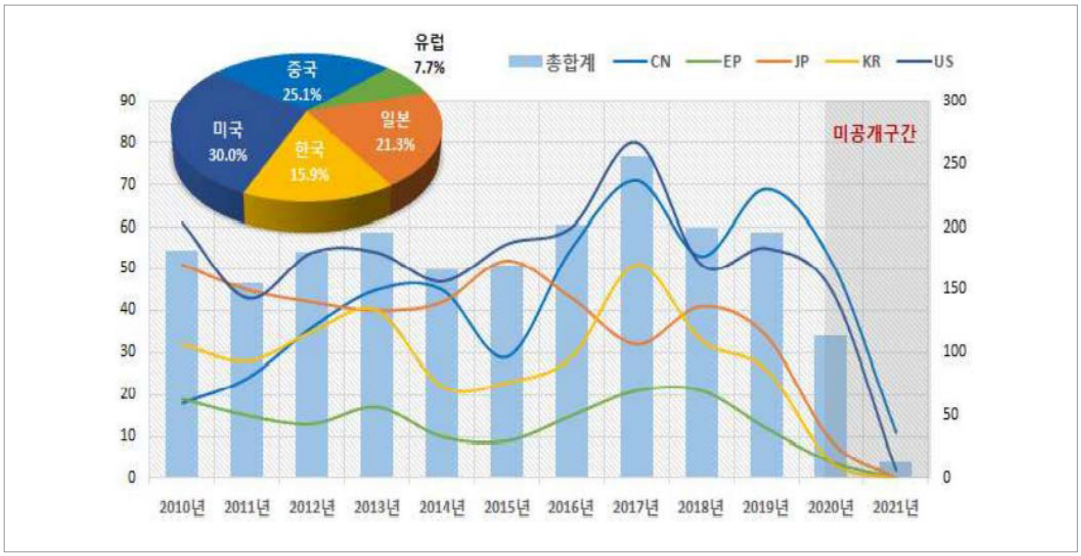
〈표 Ⅳ-2-11〉은 양자통신 분야에 대한 시장확장성, 특허관심도 및 특허규모를 보여준다. 한국 출원인의 시장확장성은 전 기간에 걸쳐 외국 출원인에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보이고 있는데, 이는 해당 분야 특허출원이 외국 출원인과 비교해 일부 국가에 한정되어 있음을 의미한다. 한국 출원인의 특허관심도는 2007~2011년을 기점으로 점차 하락하는 추세를 보인 반면, 외국 출원인의 특허관심도는 지난 20년간 지속적으로 증가하여 최근 5년 동안에는 상당한 격차를 보이고 있다. 특허 규모의 경우에도 최근 10년간 한국 출원인의 건수는 일정 수준으로 유지되었지만, 외국 출원인 건수가 급격히 증가하면서 양적 경쟁력도 낮아지는 현상이 보이고 있다. 즉 양자통신 분야에 대한 한국 출원인의 특허는 한정된 시장에 집중되어 있고, 관심도도 낮아지고 있으며, 양적으로도 많이 뒤처지고 있는 것으로 나타나고 있다.

제3절 양자센싱·계측 분야

양자센싱·계측 분야는 양자원리를 활용함으로써 고전 시스템을 사용한 센싱·계측 기술의 분해능, 민간도, 측정영역의 한계를 극복하는 기술 분야로, 양자관성센서, 시간측정 센서, 자기장·전기장 센서, 광학 센서 등을 포함하고 있다.[33]

IITP에서 실시한 양자센싱·계측 분야의 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 2,026건이다.[34] IITP에서 제공한 [그림 Ⅳ-2-20]에 의하면, 미국의 특허 비중이 30%, 중국 25.1%, 일본 21.3%, 한국 15.9%, 유럽 7.7%이며, 양자통신 분야와는 다르게 매년 증가하는 경향보다는 연간 200건 내외로 출원 특허 수가 유지되고 있다. 또한 각국의 연간 특허 추이도 유사한 경향을 나타낸다.

그림 Ⅳ-2-20 양자센싱·계측 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율



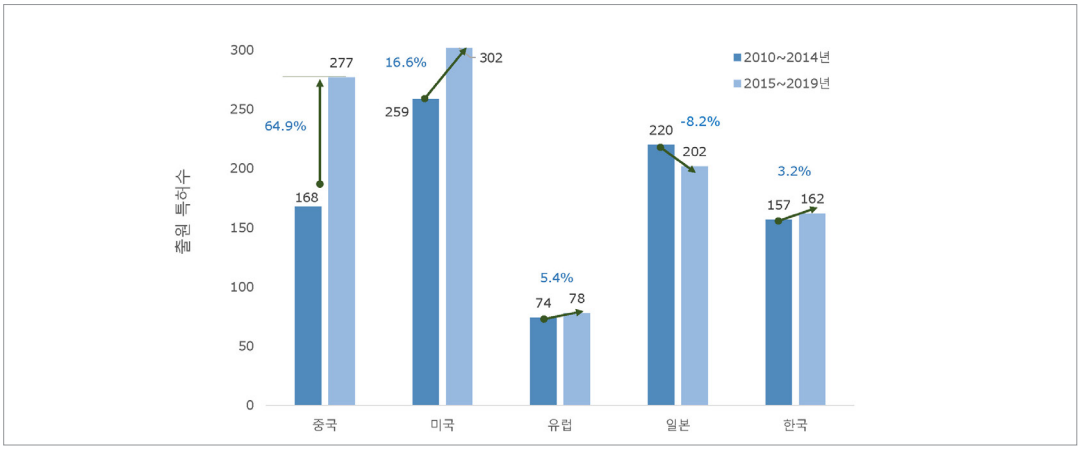
※ IITP (2021)

[그림 Ⅳ-2-21]에서 보는 것처럼 양자센싱·계측 분야의 특허 증가율을 살펴보면, 2010~1014년 대비 2015~2019년의 증가율이 16.3%이고, 중국과 미국의 특허 증가율이 각각 64.9%와 16.6%로 크게 높아진 것으로 확인된다. 한국과 유럽은 각각 3.2%와 5.4%로 미비한 증가율을 보였고, 반면 일본은

33) KISTI (2021)
34) IITP (2020)

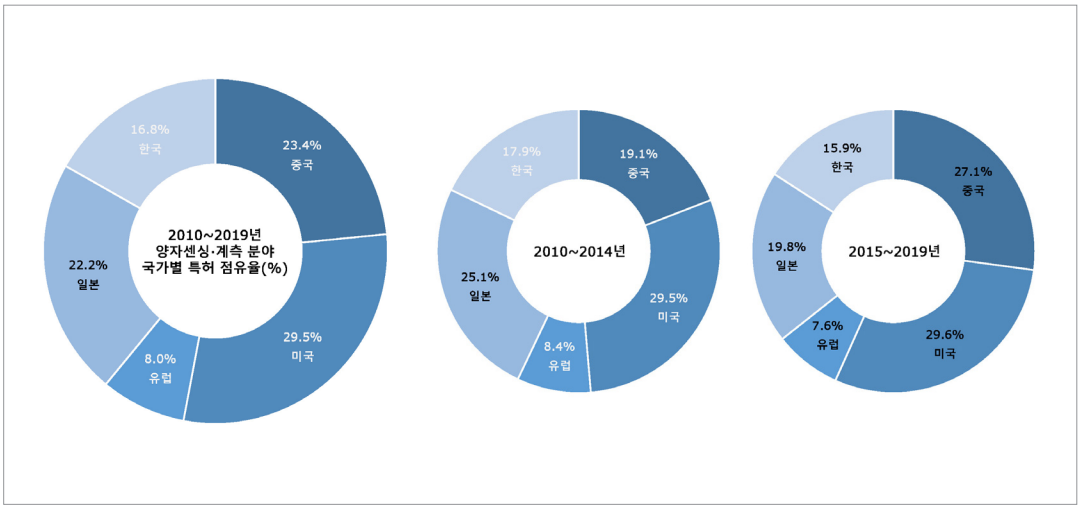
8.2% 감소한 것으로 나타났다. 양자센싱·계측 분야의 출원 특허 수는 양자정보통신 분야 전체의 약 14.9%를 차지하고 있으며, 2010~2014년 22.5%보다 2015~2019년에 11.5%로 약 11% 감소하고 있어 다른 분야에 비해 비율이 줄어들고 있는 것으로 확인된다.

그림 Ⅳ-2-21 양자센싱·계측 분야 국가별 특허 증가율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-2-22 양자센싱·계측 분야 국가별 특허 점유율



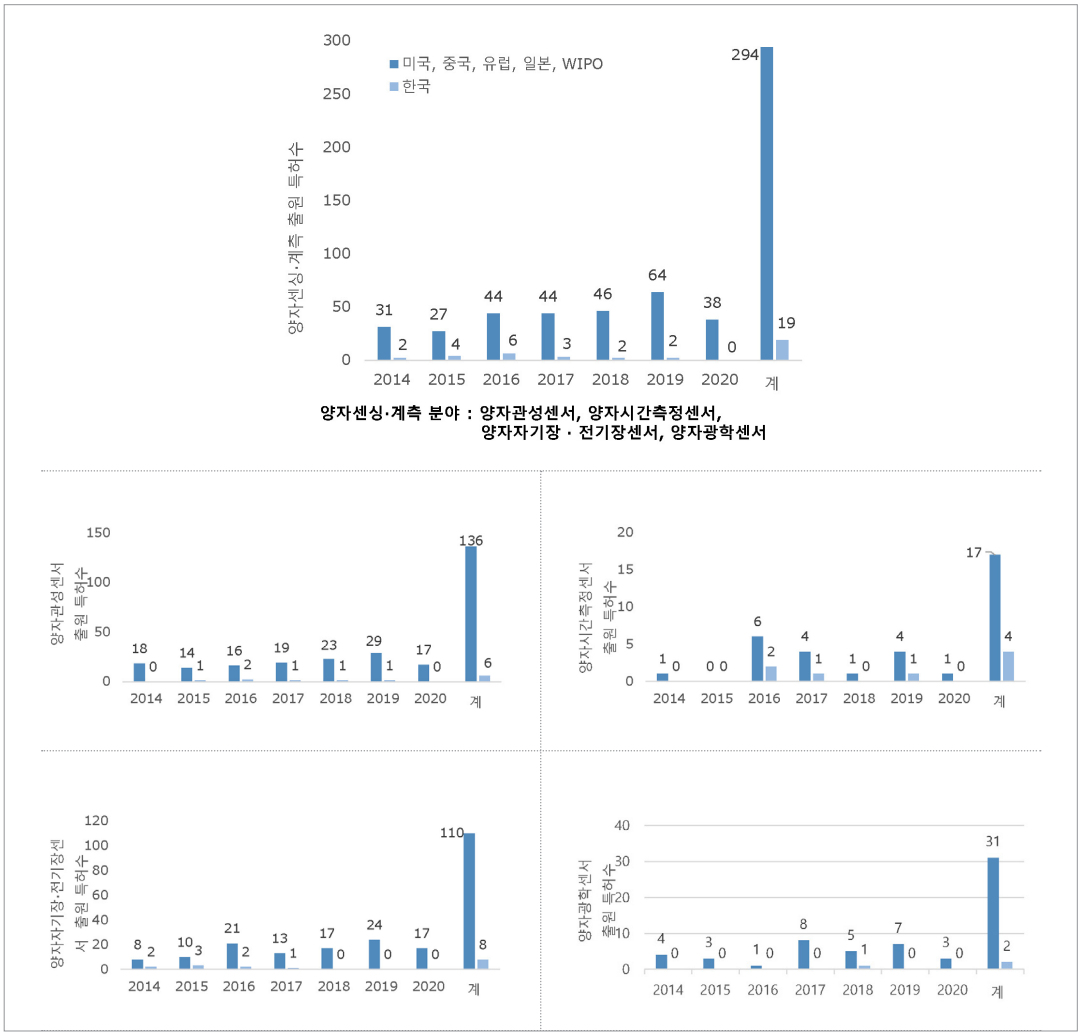
※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-22]에서처럼, 전체 특허 비중을 살펴보면, 미국, 중국, 일본, 한국이 거의 비슷한 점유율을 보이고 있지만, 일본은 2010~2014년 25.1% 대비 2015~2019년에 19.8%로 감소했고, 중국은 19.1%에서 27.1%로 증가해, 중국의 경우 최근 활발한 특허출원을 지속하고 있는 것으로 나타났다. 전

체 특허 비중을 살펴보면 미국이 29.5%로 가장 높으며, 중국 23.4%, 일본 22.2% 순이다. 2010~2014년의 특허출원 비중을 보면 미국 29.5%, 일본 25.1%, 중국 19.1%, 한국, 17.9%, 유럽 8.4%의 점유율을 나타냈고, 2015~2019년의 특허출원 비중은 미국 29.6%, 중국 27.1%, 일본 19.8%, 한국 15.9%, 유럽 7.6%로 2010~2014년과 비교했을 때, 미국은 유사한 수준을 유지하고 있으며, 중국은 약 8%의 점유율이 증가했고, 일본과 한국 그리고 유럽은 상대적으로 점유율이 감소한 것으로 확인된다.

2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 19건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자센싱·계측 분야 관련 특허를 연도별 및 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[35)]

그림 IV-2-23 양자센싱·계측 분야 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

35) KISTI (2021)

[그림 Ⅳ-2-23]은 2014~2020년까지 양자센싱·계측 분야에서 총출원된 특허 수 313건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 294건과 한국 19건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자센싱·계측 분야를 양자관성센서, 양자시간 측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 다만 양자통신 분야와 마찬가지로 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 38건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다. 분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자센싱·계측 분야에서 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국은 한 자릿수의 특허를 지속 출원하고 있으나 그 수는 매우 적은 것으로 확인된다. 양자센싱·계측 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 양자관성센서 분야가 전체 142건으로 45.4%를 차지했고, 양자 시간 측정센서 분야는 21건, 양자자기장·전기장센서 분야는 118건, 양자광학센서 분야는 33건을 각각 출원했다. 양자관성센서와 양자자기장·전기장센서 분야는 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO가 매년 유사한 수준의 특허를 출원하고 있으며 2019년에는 증가하는 경향을 보이지만, 양자 시간 측정센서와 양자광학센서 분야는 특허출원 자체가 미비하다. 한국은 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO와 비교했을 때 전체적으로 감소하거나 아예 없는 경우도 보인다.

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 Ⅳ-2-24]과 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자센싱·계측 분야 중, 양자 시간 측정센서를 제외하고 중국의 특허출원 비율이 55~88%를 차지하고 있으며, 특히 양자관성센서와 양자광학센서 분야에선 두드러진 특허출원 수를 나타냈다. 한편 한국은 미국, 중국과 함께 전 분야에 걸쳐 상위 5개국에 모두 포함됐다. 양자관성센서의 경우 중국은 지속해서 특허를 출원하는 반면, 다른 국가들은 비교적 적은 수의 특허를 출원하고 있으며, 일본은 2018년에 집중적으로 이 분야의 특허를 출원했다. 양자 시간 측정센서는 미국이 전체의 52.9%를 차지하고 있지만, 그 수는 매년 3건 이하로 저조한 편이다. 양자전기장·자기장센서의 경우, 중국과 미국은 2019년까지 증가 추세지만 한국, 일본, 독일은 특정 해에만 출원하는 경향을 보인다. 양자광학센서도 중국은 지속해서 출원 특허 수를 유지하는 반면, 한국과 미국은 특정 해에만 출원하고 있는 것으로 나타났다. KISTI의 특허출원 분석 자료를 재분석한 결과, 양자통신 분야와 마찬가지로 중국의 출원 특허 수가 상당히 많음을 알 수 있다. 전체적으로 양자센서 분야의 특허 출원수는 양자센서에 비해서 상대적으로 적은 것으로 나타나고 있다.

그림 IV-2-24 양자센싱·계측 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



양자관성센서	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	14	8	9	15	14	23	16	99
일본	0	0	0	0	12	4	0	16
미국	2	1	0	3	1	3	1	11
프랑스	0	1	1	0	6	0	0	8
한국	0	1	2	1	1	1	0	6

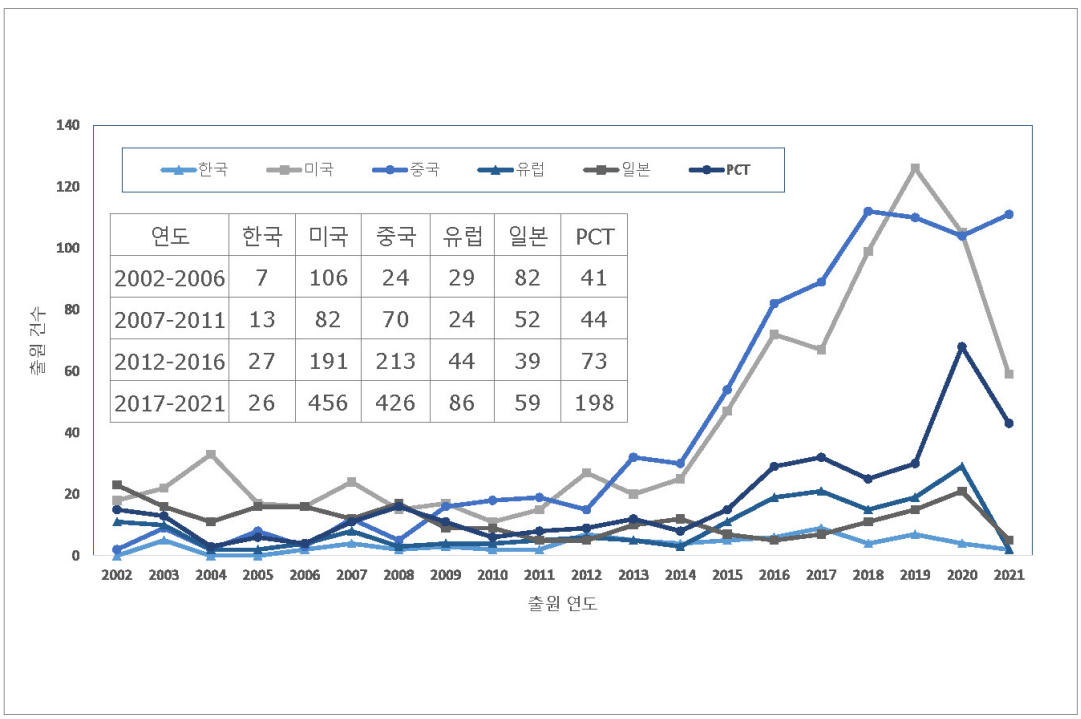
양자시간측정센서	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
미국	0	0	3	1	1	3	1	9
중국	1	0	1	2	0	0	0	4
한국	0	0	2	1	0	1	0	4

양자자기장센서	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	1	3	10	10	12	15	14	65
미국	2	3	5	2	6	17	2	38
한국	2	3	2	1	0	0	0	8
일본	0	0	1	0	3	0	0	4
독일	1	1	1	0	0	0	0	3

양자광학센서	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	계
중국	4	3	2	7	3	7	3	29
미국	0	0	0	1	1	0	0	2
한국	0	0	0	0	1	0	0	2

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

그림 IV-2-25 양자센싱의 연도별 출원 건수 (2002~2021년)



연도	한국	미국	중국	유럽	일본	PCT
2002-2006	7	106	24	29	82	41
2007-2011	13	82	70	24	52	44
2012-2016	27	191	213	44	39	73
2017-2021	26	456	426	86	59	198

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

KIIP는 2002~2022년까지 양자센서 분야의 연도별 출원 건수를 [그림 Ⅳ-2-25]와 같이 분석하였다. 양자센서(센싱) 분야는 양자통신 및 양자컴퓨팅 분야에 비해 전반적으로 낮은 출원량을 보인다.36) 특허출원을 주도하는 미국과 중국은 2010년 중반부터 유사한 수준의 출원량을 기록하며 증가세를 보였다. 2017~2019년까지 미국의 등록 건수는 가파르게 상승하였으나 2020년부터 감소하는 경향을 보이고, 동 기간 동안 중국의 특허출원 건수도 둔화되다가 2021년에는 급격히 감소하는 것으로 나타나고 있다. 한국은 매우 낮은 수준의 출원량을 기록하고 있을 뿐만 아니라 20년 동안 출원량 증가가 미미한 것으로 나타나고 있다. 등록 건수를 검토해보면, 미국과 중국을 제외한 한국, 유럽 및 일본의 등록 건수는 미미한 수준이며, 과거 20년 동안 등록량 증가가 이루어지지 않는 것으로 나타나고 있다. 인상적인 것은 전체적으로 2021년의 특허출원 건수는 2020년 대비 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 시대적인 영향으로 비추어지지만, 2022년 특허출원 건수가 집계된 이후에 판단할 수 있을 것으로 보인다.

〈표 Ⅳ-2-12〉는 특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수를 나타내고 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 미국으로 양자관성센서와 양자자기장·전기장센서 분야에서 매우 높게 나타나며, 일본은 양자관성센서에서, 한국은 양자자기장·전기장센서 분야에서 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다. 반면 중국은 전 분야에 걸쳐 상대적으로 낮은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다.

표 Ⅳ-2-12 양자센싱·계측 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)

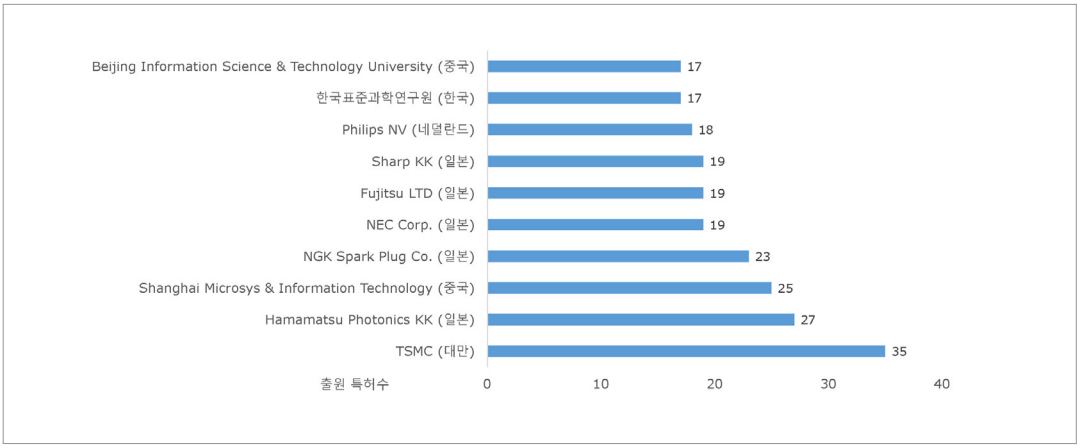
국가	합계		양자관성센서		양자 시간 측정센서		양자자기장 ·전기장센서		양자광학센서	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
중국	197	1.5	99	1.5	4	2.2.	64	1.6	29	1.3
미국	60	9.9	11	4.3	9	2.7	38	13.6	2	2
일본	20	4.5	16	4.7	0	0	4	3.2	0	0
한국	19	3.1	6	1.5	4	4.2	8	3.8	1	1

※ KISTI ((2021)

양자센싱·계측 분야의 출원인별 분석도 IITP, KISTI, KIIP의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 앞서와 마찬가지로, 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 서로 다른 분석 결과를 보여주고 있다.

36) KIIP (2023)

그림 Ⅳ-2-26 양자센싱·계측 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

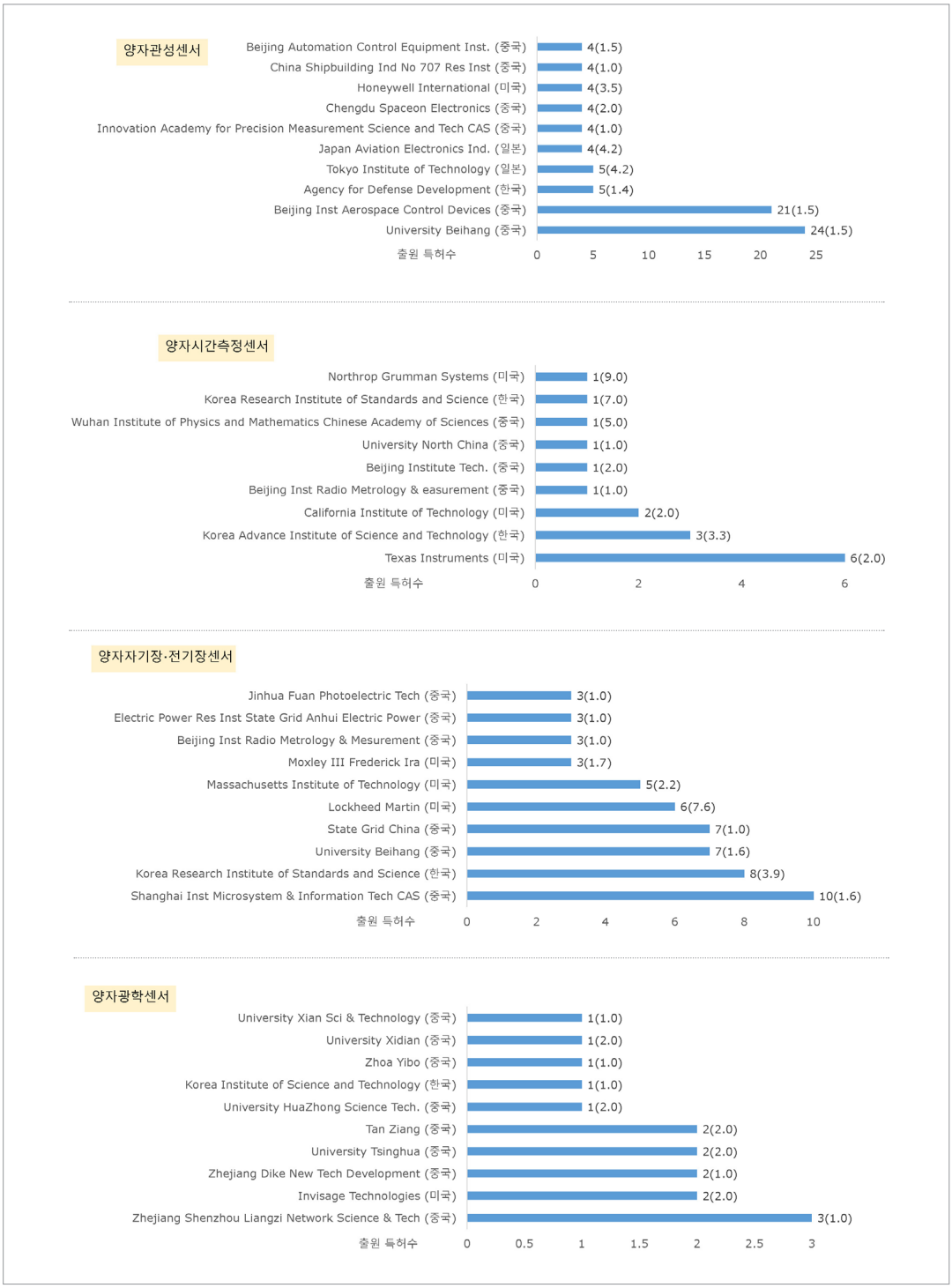
[그림 Ⅳ-2-26]의 IITP의 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인은 대만 TSMC로 35건의 가장 많은 특허를 출원했으며, 2010~2014년까지는 이미지 센서 및 영상센서 구조 등에 대해, 2015~2019년에는 높은 흡수 파장을 가진 이미지 센서에 대해 출원하고 있다.[37] 특허출원 건수 상위 10위 내 출원인을 살펴보면, 대만 1개, 중국 2개, 네덜란드 1개, 한국 1개이며 나머지는 일본 국적임을 알 수 있다. 중국 내에서 이 분야에 대해 가장 많은 특허를 출원한 출원인은 Shanghai Microsys & Information Technology로 25건의 특허를 출원하고 있다. 양자센싱·계측 분야에서 중국의 출원 수는 월등히 높은 편이지만, 출원인을 기준으로 분석하면 일본이 이 분야에서 다수의 특허를 보유하고 있음을 알 수 있다.

KISTI의 경우, 2014~2020년 양자센싱·계측 분야의 세부 분야 출원인별 분석 결과를 [그림 Ⅳ-2-33]에서 확인할 수 있다. 각 숫자는 출원 특허 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 양자관성센서 분야에서 상위 10위 내 출원인을 보면 중국 6개, 일본 2개, 한국 1개, 미국 1개이고 중국 University of Beihang이 24건으로 가장 많은 출원 특허 수를 보여주고 있다. 이러한 특징은 양자자기장·전기장센서와 양자광학센서 분야에서도 유사하게 나타난다. 특허를 가장 많이 출원한 출원인은 모두 중국 국적이고, 상위 10위 내 출원인 중에 한국과 미국의 일부 기업이 포함돼 있다. 하지만 양자 시간 측정센서 분야의 경우, 미국 Texas Instruments가 6건으로 가장 많은 출원 특허 수를 가지고 있으며, 미국은 총 3개 출원인이 9건의 특허를 출원한 것으로 나타났다. 한편 한국은 2개 출원인이 4건의 특허를, 중국은 4개 출원인이 4건의 특허를 출원했다. 특이한 출원인도 확인되는데, 양자자기장·전기장센서 분야의 Moxley III Frederick Ira와 양자광학센서 분야의 Zhoa Yibo, Tan Ziang이며 셋

37) IITP (2020)

은 개인으로 추정된다. 일본은 양자관성센서 분야에서만 특허출원을 하고 있으며, 유럽은 2014~2020년까지 상위 10위 내 출원인으로 전혀 포함되지 못했다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 특허출원을 보류하고 있거나, 현재 심사 중인 탓으로 보인다. 그 외 출원인으로는 양자관성센서 분야에서 부산대가 1건을 출원한 것으로 확인된다.

그림 Ⅳ-2-27 양자센싱·계측 분야의 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

KIIP는 2017~2021년까지 IP5 국가의 특허 상위 출원 및 등록 기관에 대해서 분석을 수행하였다. 〈표 Ⅳ-2-13〉은 양자센서 분야의 각국에 대한 상위 5위 기관의 특허 출원과 등록 수에 대해서 보여주고 있다. 한국의 경우 고려대학교는 출원 3건과 등록 2건, 한국교통대학교는 출원 3건과 등록 3건, LG화학은 출원 2건과 등록 2건, Northrop Grumman은 출원 2건과 등록 3건, KIST는 출원 1건이다. 미국의 경우 IBM이 특허 122건과 등록 90건으로 1위, Google이 출원 30건과 등록 25건으로 2위, Microsoft가 출원 23건과 등록 16건으로 3위를 기록하였으며, Equal1.Labs와 Intel이 각 출원 18건으로 5위 안에 포함되었고, Intel은 동 기간에 18건의 특허를 등록하였다. 중국은 지난대학교가 출원 34건과 등록 21건으로 1위이고, 다음으로 중국과학원이 출원 30건과 등록 51건, IBM이 출원 15건, 저장과학기술대학교는 출원 14건과 등록 12건과 푸젠의과대학이 출원 13건으로 5위 안에 포함되었다.

유럽의 경우 IBM이 출원 16건으로 1위, 예일대학교가 대학으로는 유일하게 출원 9건으로 2위, Google과 Notrhrop Grumman이 각 출원 7건과 등록 4건으로 3위를 기록하였으며, Microsoft가 출원 4건과 등록 2건으로 5위를 기록하였다. 마지막으로 일본의 양자센서 분야의 특허출원은 NEC가 11건으로 1위, 다음으로 리코가 7건, Notrhrop Grumman이 5건으로 3위, Baidu와 교토대학교가 각 4건, 3건으로 5위에 포함되었다. Notrhrop Grumman의 경우 동 기간에 등록된 특허도 5건이 확인된다. Notrhrop Grumman은 이 기간 동안에 한국, 유럽 및 일본에서 다수의 특허출원과 등록이 이루어졌다. 특히 IBM의 특허출원 건수는 다른 기관이나 기업에 비해 월등히 높은 것으로 나타난다. 이러한 경향은 IITP의 분석 결과와 다른데, 분석 기간과 방식의 차이로 인한 것으로 보인다. 특허출원 기관들을 보면 기업, 대학 및 공공연에 이르기까지 다양하게 분포되어 있고 이는 모든 나라에서 유사하다.

표 Ⅳ-2-13 양자센서 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)

[건수, (등록)]

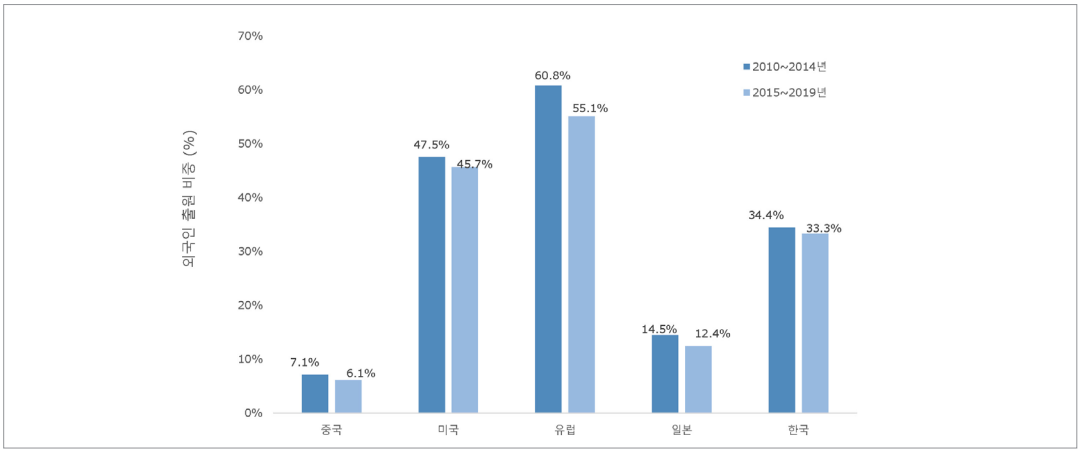
순위	한국		미국		중국		유럽		일본	
	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원
1	고려대학교	3 (2)	IBM	122 (90)	지난대학교	34 (21)	IBM	16	NEC	11
2	한국교통대학교	3 (3)	Google	30 (25)	중국과학원	30 (51)	예일대학교	9	리코	7
3	LG화학	2 (2)	Microsoft	23 (16)	IBM	15	Google	7 (4)	Northrop Grumman	5 (5)
4	Northrop Grumman	2 (3)	Equal1. Labs	18	저장과학기술대학교	14 (12)	Northrop Grumman	7 (4)	Baidu	4
5	KIST 외 11	1	Intel	18 (18)	푸젠의과대학	13	Microsoft	4 (2)	교토대학교	3

※ Baidu : 베이징 바이두 네트콤 과학기술 회사, KIST : 한국과학기술연구원

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

IITP는 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 Ⅳ-2-28]에 의하면 모든 국가가 2010~2014년 대비 2015~2019년에 외국인의 출원 비중이 낮은 것으로 나타났다. 이는 이 분야 출원 특허 수의 감소와 관련 있는 것으로 추측할 수 있다.

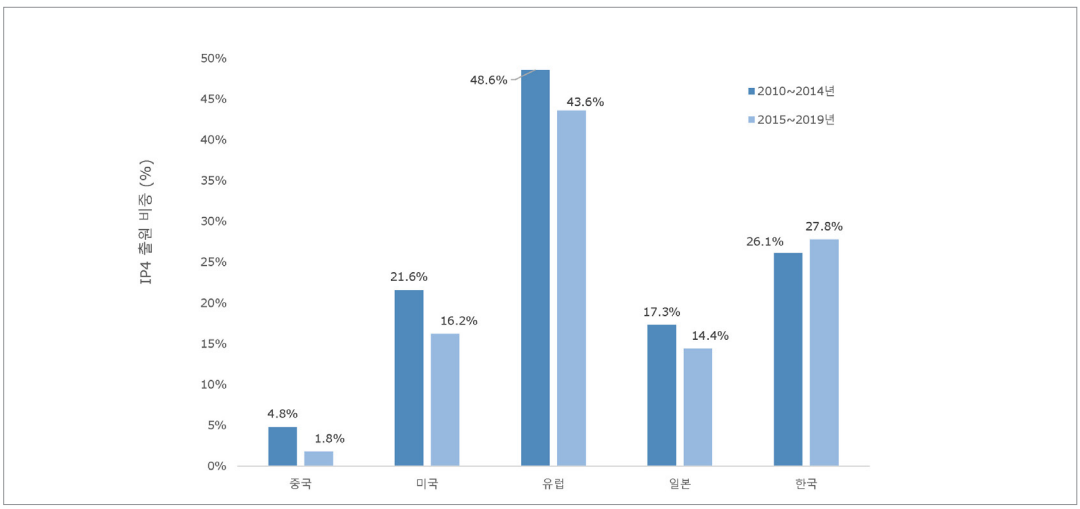
그림 Ⅳ-2-28 양자센싱·계측 분야 국가별 외국인 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-29]의 양자센싱·계측 분야 국가별 IP4 특허 확보 현황을 살펴보면, 한국을 제외한 나머지 국가는 2010~2014년에 IP4 특허 비중이 높은 것으로 나타났다. 유럽에서는 한국, 미국, 일본, 중국의 특허 비중이 50%에 육박하는 것으로 보이고, 중국에서는 한국, 미국, 일본, 유럽의 특허 비중이 낮은 것으로 나타난다. 특히 2015~2019년은 중국의 특허 비중이 증가하고 출원 특허 수가 많았음에도 불구하고 IP4 특허 비중이 낮은 것으로 보아, 주로 자국 출원인에 의한 특허출원 위주였던 것으로 판단된다.

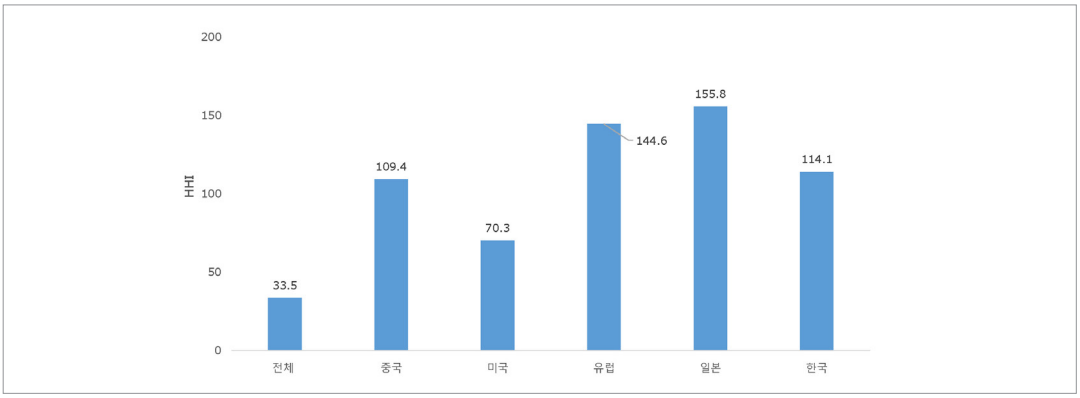
그림 Ⅳ-2-29 양자센싱·계측 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

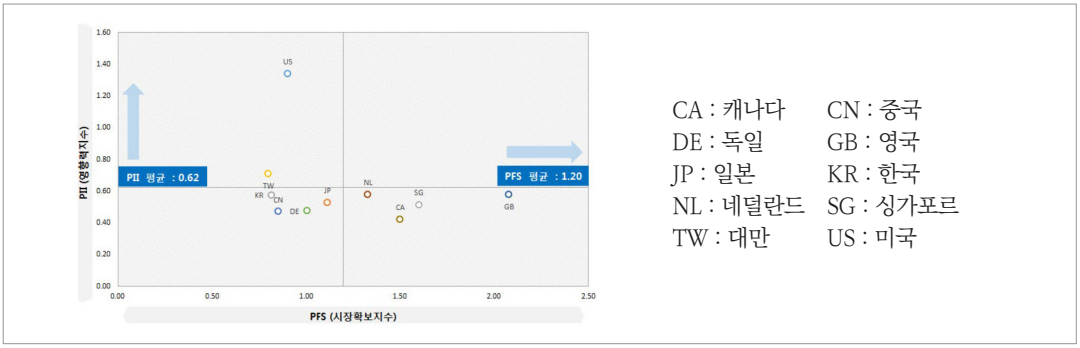
양자센싱·계측 분야의 특허 시장 집중 수준에 대해 살펴보면, [그림 Ⅳ-2-30]처럼 전체 HHI가 33.5로 완전 자유경쟁 시장으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국은 전체 특허와 비슷한 수준으로 분석돼 집중 수준이 매우 낮고, 한국, 일본, 유럽, 중국의 경우는 HHI 100 이상의 집중화 정도가 거의 없는 시장에 해당해, 집중 수준이 낮음에서 중간 수준으로 시장진입 용이성이 높은 것으로 분석된다.[38)]

그림 Ⅳ-2-30 양자센싱·계측 분야 국가별 HHI (2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-2-31 양자센싱·계측 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년)



※ IITP (2021)

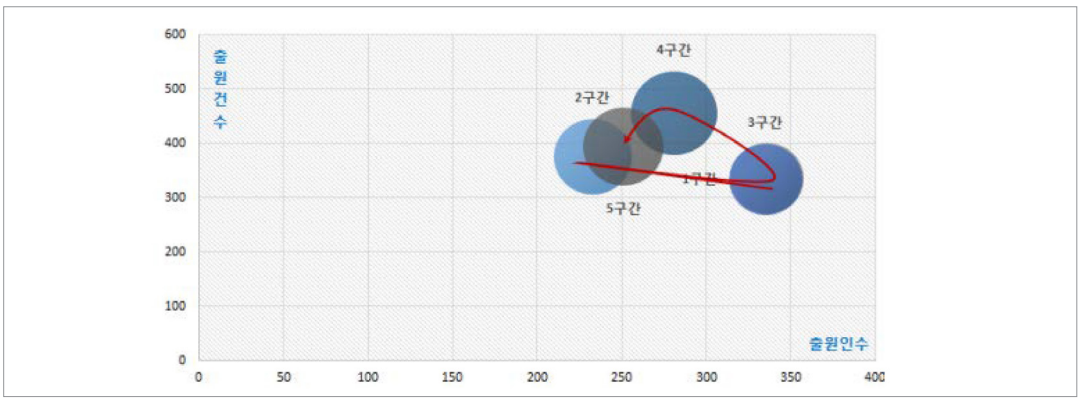
[그림 Ⅳ-2-31]에서 보듯이 양자센싱·계측 분야에서 특허출원인의 국적 상위 10개를 기준으로 PII와 PFS를 살펴보면, 미국과 대만 국적 출원인들의 특허는 PII가 평균보다 높은 것으로 분석되고, PFS 측면에서는 영국, 싱가포르, 캐나다, 네덜란드 국적 출원인들의 특허가 평균보다 높은 수준으로 분석됐다. PII, PFS가 모두 평균보다 높은 출원인 국적은 나타나지 않아 기술 영향력과 시장 확보력을 함께 갖

38) IITP (2020)

춘 국가는 없었다. 한국, 중국, 독일, 일본 국적의 출원인 특허는 PII와 PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

IITP의 분석 결과에 의하면, 양자센싱·계측 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자점(Quantum dot), 이미지 센서(Image sensor), 선택된 재료(Material selected) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 스퀴드 센서(Squid sensor), 자기 센서(Magnetic sensor), 마이크로전자 센서(Microelectronic sensor) 등의 키워드는 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 즉 양자역학적 특성을 이용해 계측하고 감지하는 것과 관련된 다양한 기술 요소가 기본이라고 볼 수 있으며, 최근에는 이미지 센서 이외에도 다양한 센서에 관한 기술들이 새롭게 주목받고 있다. 이 분야의 주요 특허로 선정된 기술들을 살펴보면, 가시광선 및 적외선에 양자점 감도를 결합한 이미지 센서, 온도센서와 의료장치, 양자효율 측정 포스 센서 등 다양한 센서 기술 관련 내용이 주류를 이루고 있다.

그림 Ⅳ-2-32 양자센싱·계측 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년)



※ IITP (2021)

[그림 Ⅳ-2-32]에서처럼 양자센싱·계측 분야의 전체 특허를 2년씩 출원 구간 기준(1구간 : 2010~2011년, 2구간 : 2012~2013년, 3구간 : 2014~ 2015년, 4구간 : 2016~ 2017년, 5구간 : 2018~2019년)으로 나눠 출원 건수 및 출원인 수를 살펴보면, 3~4구간은 출원 건수는 증가하고 출원인 수는 감소하는 성숙기에 해당하고, 4~5구간은 출원 건수와 출원인 수가 모두 감소하는 쇠퇴기의 단계에 있다. 이 분야는 연구개발 활동이 지속해서 이어지고 있어, 연간 특허출원이 200건 내외로 유지되고 있으나 특허출원인 수는 감소해 성숙기 단계로 분석됐다.

KIIP의 〈표 Ⅳ-2-14〉는 양자센서 분야에 대한 시장확장성, 특허관심도 및 특허규모를 보여준다. 양자센서 분야의 경우 2012년 이전까지 한국 출원인의 시장확장성이 외국 출원인에 비해 상대적으로 낮

은 수치를 보였지만, 2012년 이후 점차 증가하는 추세를 보이며 외국 출원인 및 전체 시장 평균을 웃도는 수치를 보이고 있다. 한국 및 외국 출원인 모두에서 2007년 이후 특허관심도가 상승하는 추세를 보이고 있으며, 외국 출원인의 상승폭이 한국 출원인에 비해 크게 나타난다. 최근 5년간 한국 출원인의 규모는 줄어든 반면, 외국 출원 건수는 급격히 증가하고 있으며, 전체 출원 건수는 꾸준히 증가하여 특허규모가 1.77%로 나타나는데, 양자센서 분야가 세부 기술 분야 가운데 특허규모가 가장 낮은 것으로 분석되고 있다.[39)]

표 Ⅳ-2-14 양자센서 분야 분석 지표

	시장확장성			특허관심도			특허규모		
출원인 국적	한국	외국	전체	한국	외국	전체	한국	외국	전체
2002-2006	3.00	3.76	3.71	3.67	8.65	8.04	3	90	3.33
2007-2011	2.00	2.81	2.73	3.00	6.58	6.70	2	75	2.67
2012-2016	3.15	2.77	2.80	4.54	7.23	6.94	13	167	7.78
2017-2021	4.00	3.17	3.25	5.00	8.46	9.89	5	283	1.77

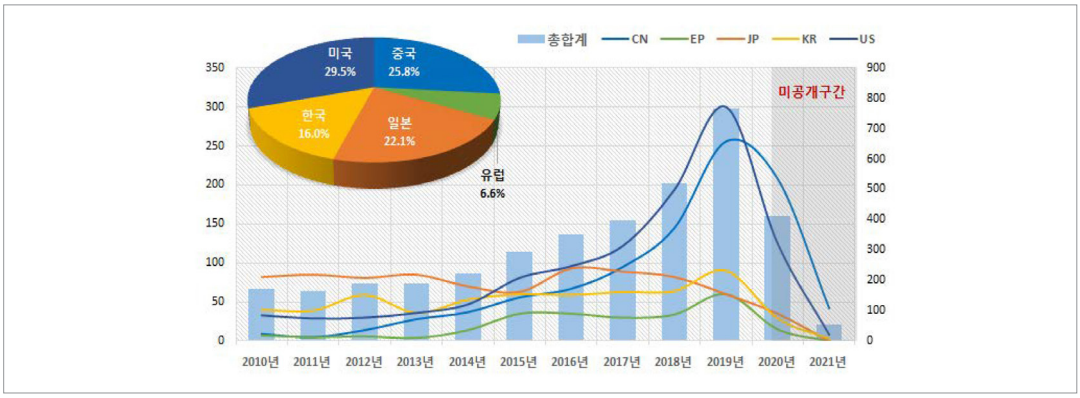
※ KIIP (2023) 집필진 재구성

39) KIIP (2023)

제4절 양자컴퓨팅 분야

양자컴퓨팅은 상호작용하는 양자비트(Quantum bit, 이하 큐비트)를 기반으로, 양자얽힘이나 중첩 같은 양자역학적 현상을 연산 방법에 적용한 컴퓨팅 기술이다. 양자컴퓨팅의 세부 분야는 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비트, 양자알고리듬 및 SW로 나눌 수 있다.[40] IITP의 양자컴퓨팅 분야 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 3,728건이다.[41] 다만 특허 분석을 위해 전체 기간을 2010~2014년까지 구간과 2015~2019년까지의 두 구간으로 나눴고, 2020년과 2021년은 미공개 구간으로 구분해 전체 분석에서는 제외했다. IITP에서 제공한 [그림 Ⅳ-2-33]을 보면 미국, 중국, 일본이 점유율 20%대로 비슷하고 한국 16%, 유럽 6.6% 순이며, 2019년까지 총출원 특허 수가 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 특히 미국과 중국은 2019년까지 유사한 증가율을 보이고, 한국과 유럽도 상대적인 증가율은 낮지만, 지속해서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 반면 일본은 2016년까지 매년 유사한 수준의 특허를 출원했지만, 이후에는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이 같은 감소세가 다른 분야에서도 비슷한 것으로 보아, 2016년 이후로 양자정보통신 분야 전반에 걸쳐 일본의 특허출원 수가 감소하는 경향임을 알 수 있다. 양자컴퓨팅 분야의 출원 특허 수는 양자정보통신 분야 전체의 약 25.6%를 차지했고, 2010~2014년의 24.0%보다 2015~2019년에 26.3%로 약 2.3%의 증가함으로써 점유율이 증가 추세를 나타냈다.

그림 Ⅳ-2-33 양자컴퓨팅 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율



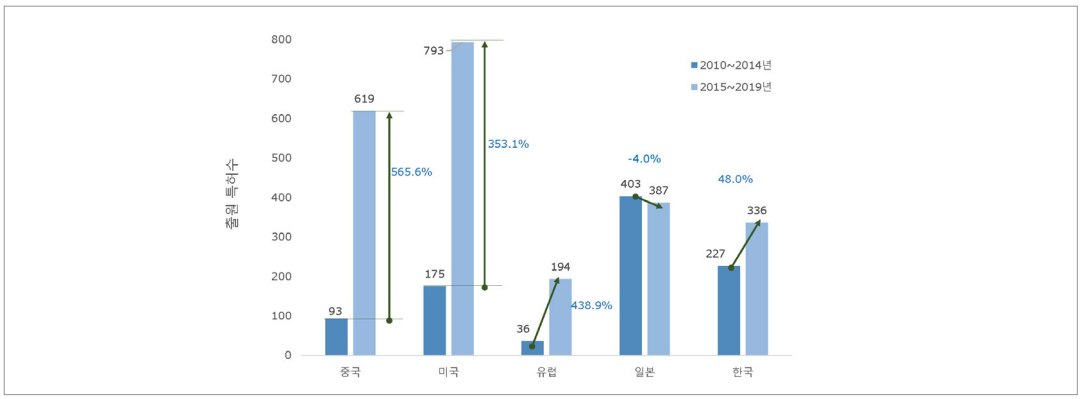
※ IITP (2021)

40) IITP (2020)

41) IITP (2020)

[그림 Ⅳ-2-34]은 IP5의 출원 증가율을 2010~2014년과 2015~2019년으로 나눠서 비교한 결과를 보여준다. 이에 따르면 2010~2014년 대비 2015~2019년 출원 특허 수가 934건에서 2,329건으로 늘어나 149.4%의 증가율을 보이며, 국가별로는 중국 565.6%, 유럽 438.9%, 미국 353.1%의 증가율을 나타내 큰 폭으로 성장한 것을 알 수 있다. 한국은 48.0%로 미국, 유럽, 중국과 비교해 상대적으로 낮은 증가율을 보여줬고, 일본은 다른 나라들과는 달리 오히려 4.0% 감소했다.

그림 Ⅳ-2-34 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 증가율



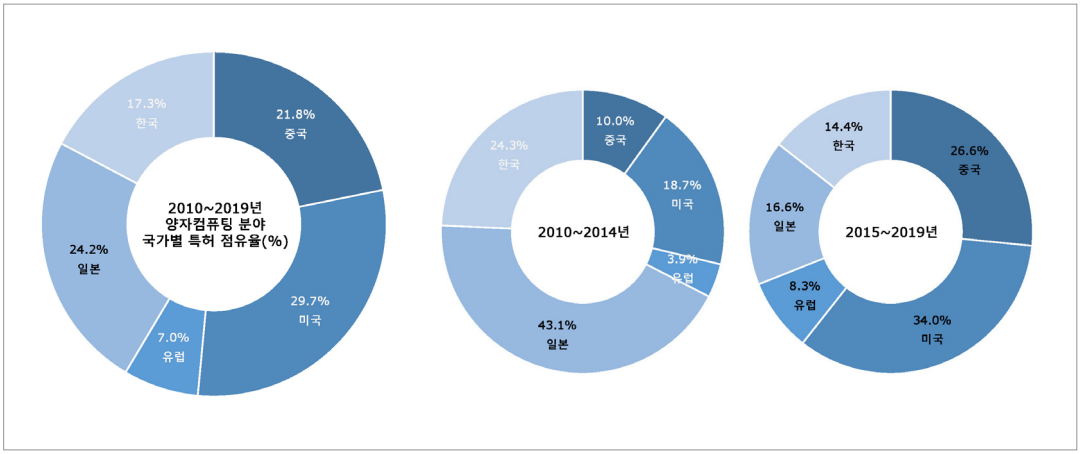
※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-35]에서처럼, 전체 특허 비중을 살펴보면 미국, 중국, 일본이 유사한 수준을 나타내고 있다. 2010~2014년의 특허출원 비중을 보면 일본 43.1%, 한국 24.3%, 미국 18.7%, 중국 10.0%, 유럽 3.9%의 점유율을 나타냈으며, 2015~2019년의 특허출원 비중은 미국 34.0%, 중국 26.6%, 일본 16.6%, 한국 14.4%, 유럽 8.3%로 나타났다. 2010~2014년 대비 2015~2019년에 미국과 중국, 유럽은 비중이 커졌으나 한국과 일본은 감소했다.

2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 17건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자컴퓨팅 분야 관련 특허를 연도별 그리고 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[42] [그림 Ⅳ-2-36]은 2014~2020년까지 양자컴퓨팅 분야에서 총 출원된 특허 수 830건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 713건과 한국 17건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자컴퓨팅 분야를 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비트, 양자알고리듬 및 SW로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 다만 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 122건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다.

42) KISTI (2021)

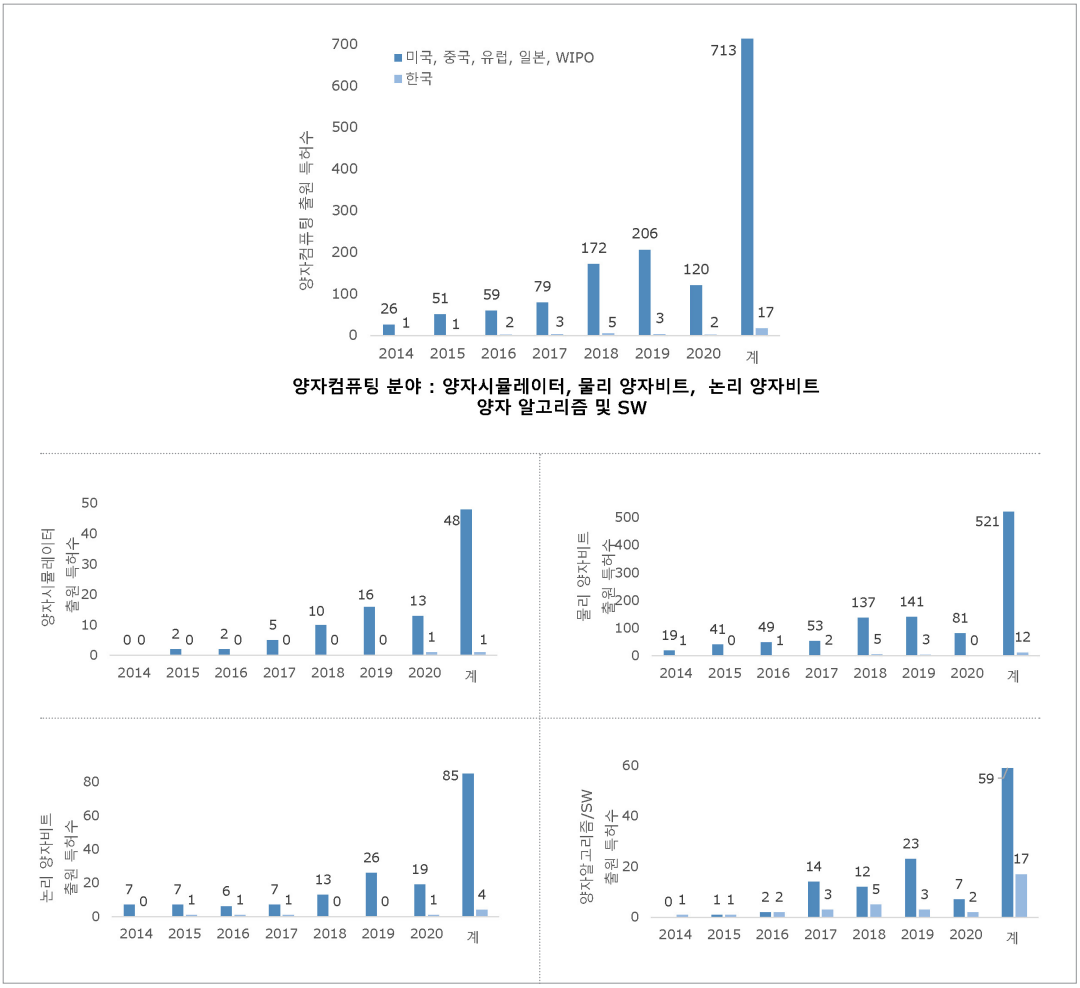
그림 Ⅳ-2-35 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 점유율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자컴퓨팅 분야 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국의 경우 매년 한 자릿수의 특허출원 수를 유지하며 조금씩 증가하는 경향을 보여주고 있다. 양자컴퓨팅 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 물리 양자비트 분야가 전체 533건으로 가장 많은 출원 특허 수를 차지했고, 논리 양자비트 분야는 89건, 양자알고리듬 및 SW 분야는 76건, 양자시뮬레이터 분야는 49건을 각각 출원했다. 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 2019년까지 전체적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 반해 한국은 2019년까지 양자시뮬레이터 분야에서 특허출원이 없다가 2020년에 1건을 출원했고, 논리 양자비트 분야는 2015~2017년과 2020년에 1건씩 출원했으나 출원이 아예 없는 기간도 확인된다. 그나마 가장 많은 출원 수를 보유한 물리 양자비트 분야에서도 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO 대비 5% 수준에 머무르고 있다. 다만 한국은 양자알고리듬 및 SW 분야에서 상대적으로 다수의 특허를 출원 중인 것으로 나타났다.

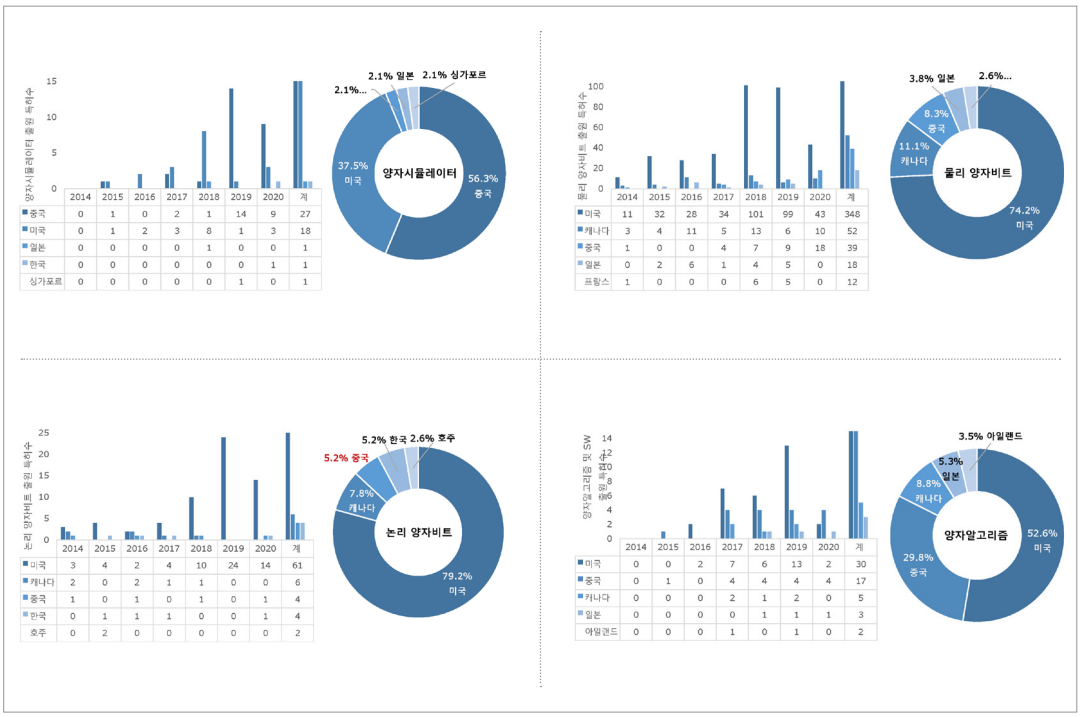
그림 Ⅳ-2-36 양자컴퓨팅 분야 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 Ⅳ-2-37]과 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자시뮬레이터를 제외한 세 분야에서 미국의 출원 특허 수가 가장 많았다. 양자통신과 양자센싱·계측 분야에서와는 달리, 캐나다가 세 분야에서 특허를 출원하고 있으며, 한국은 양자시뮬레이터와 논리 양자비트 분야에서만 상위 5개국에 포함됐다. 양자시뮬레이터 분야에서 미국과 중국은 매년 꾸준히 특허를 출원하고 있으며, 각각 2018년과 2019년에 가장 많은 수의 특허를 출원했다. 해당 분야에서는 중국이 가장 많은 특허를 출원하고 있다. 물리 양자비트, 논리 양자비트, 양자알고리듬 및 SW 분야에서는 미국이 다른 나라에 비해 압도적으로 많은 특허를 출원하고 있으며, 2018년과 2019년에 급격히 증가한 것으로 나타난다. 중국은 양자알고리듬 및 SW 분야에서 2017년 이후 매년 4건씩 꾸준히 특허를 출원하고 있다.

그림 Ⅳ-2-37 양자컴퓨팅 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

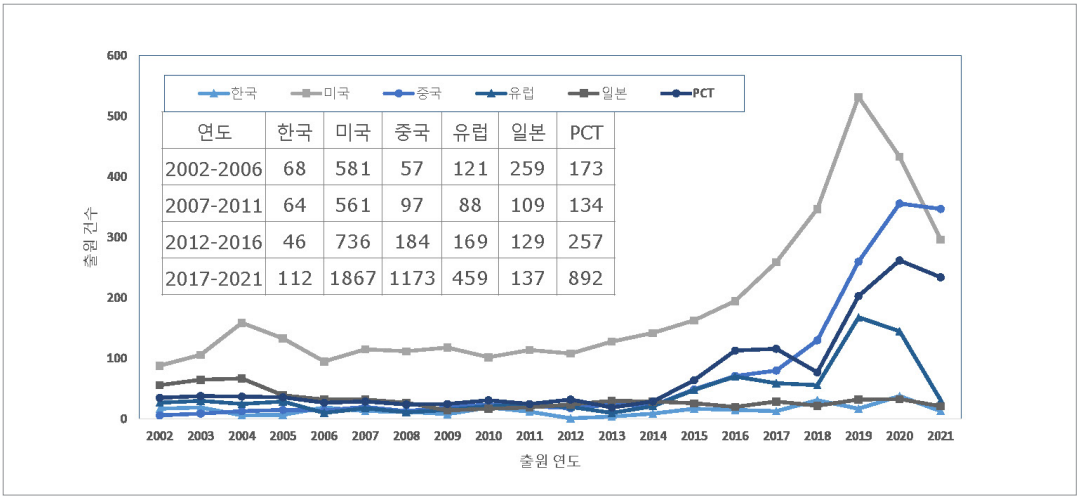
KIIP가 진행한 지난 20년간 양자컴퓨팅 분야의 출원 건수의 추이를 보면[43] 2020년까지 양자컴퓨팅 분야의 특허출원은 미국이 주도하고 있다. 중국은 2014년 이후 출원량이 증가하는 경향을 보이다가 2018년부터 급격히 증가하여 2021년에는 미국을 추월한 것을 알 수 있다. 이는 2019년까지 양자컴퓨팅 분야의 특허출원 건수를 미국이 리드하고 중국이 따라가는 경향을 보이는 KISTI의 분석 결과와 유사하다. 한국은 최근 5년 동안 양자컴퓨팅 관련 특허출원이 증가하기는 하지만, 주요국에 비해 매우 적은 출원량을 보이고 있다. 2017~2021년까지 미국은 1,867건으로 가장 많은 출원량을 기록하였고, 중국은 2012~2016년 대비 약 6배 이상 성장하며 매우 빠른 속도로 미국의 출원량을 추격하고 있다. 유럽은 비록 출원 건수가 미국과 중국에 비해 적기는 하지만, 미국처럼 2012~2016년 대비 2017~2021년의 특허 출원수가 2.7배 이상 증가하는 경향을 나타낸다. 일본은 2002~2006년까지는 미국 다음으로 많은 특허를 출원하였지만, 이후 점차 감소하여 현재까지 유사한 수준을 유지하고 있다. 특허 등록 건수에 대해서는 조금 다른 양상이 나타나고 있다. 2002년부터 2021년까지 양자컴퓨팅 분야의 특허 등록은 미국이 꾸준하게 주도하고 있으며, 중국의 등록량도 출원량처럼 급격하게 증가하였지만, 미국의 40% 수준으로 특허출원에서 보인 역전 현상이 발생하지 않았다.[44] 일본의 경우 2000년대 초반에는 미국과 유사한 수준의 특허 등 건수를 기록하였으나, 이후 등록 건수가 점차 감소하는 경향을 보이고 있

43) KIIP (2023)

44) KIIP (2023)

다. 이는 중국과 미국과 정반대의 추세를 보이는 것이다. 한국은 오랜 기간 등록 건수의 정체 상태를 보이다 최근 5년간 조금씩 상승하는 경향을 보이지만 여전히 주요국 대비 낮은 수치를 보이고 있다.

그림 Ⅳ-2-38 양자컴퓨팅의 연도별 출원 건수 (2002~2021년)



연도	한국	미국	중국	유럽	일본	PCT
2002-2006	68	581	57	121	259	173
2007-2011	64	561	97	88	109	134
2012-2016	46	736	184	169	129	257
2017-2021	112	1867	1173	459	137	892

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

KISTI가 분석한 자료에서 특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수는 〈표 Ⅳ-2-15〉을 통해서 확인할 수 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 호주로 물리 양자비트와 논리 양자비트에서 매우 높은 수치를 기록했으며, 중국을 제외한 다른 나라도 비교적 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다. 한국은 물리 양자비트와 논리 양자비트 분야에서 2.0 이상의 패밀리 특허 수를 나타냈다. 양자컴퓨팅 분야의 출원 국가들이 다른 분야에 비해 비교적 높은 패밀리 특허 수를 나타내는 것을 봤을 때, 성장기 단계에 있음을 다시 한 번 확인할 수 있다.

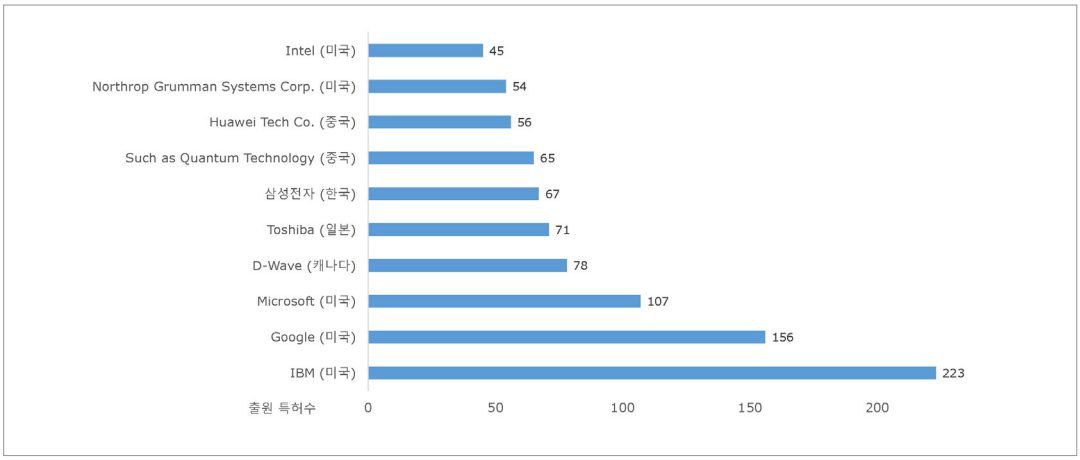
표 Ⅳ-2-15 양자컴퓨팅 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)

국가	합계		양자시뮬레이터		물리양자비트		논리양자비트		양자알고리듬 및 SW	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
미국	457	3.0	18	2.1	348	3.0	61	3.1	30	3.1
중국	87	1.2	27	1.3	39	1.1	4	1.3	17	1.3
캐나다	63	3.4	0	0	52	3.5	6	2.7	5	3.4
일본	24	3.6	1	7.0	18	3.8	2	1.5	3	2.3
한국	17	2.3	1	1.0	12	2.4	4	2.3	0	0
프랑스	13	4.8	0	0	12	4.7	1	7.0	0	0
호주	12	7.8	0	0	10	6.4	2	15.0	0	0
영국	10	3.2	0	0	9	3.2	0	0	1	3.0

※ KISTI (2021)

양자컴퓨팅 분야의 출원인별 분석은 IITP, KIST, KIIP의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 분석 결과도 서로 조금씩 다르게 나타난다. [그림 Ⅳ-2-39]의 IITP의 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인으로 IBM(223건), Google(156건), Microsoft(107건)를 들 수 있는데 모두 미국 국적의 출원인이다. 한국은 삼성전자가 67건을 출원해 상위 10위권 출원인에 이름을 올렸다. IBM은 2010~2014년에 양자연산 시스템에 대해, 2015~2019년에는 양자연산 오차 보정, 양자논리회로 최적화 방법 등에 대해 출원했다.[45] 특허출원 건수 상위 10위권의 국적을 살펴보면, 캐나다 1개, 일본 1개, 한국 1개, 중국 2개이고 나머지 5개는 모두 미국으로 확인된다. 정보통신기획평가원의 조사 결과에 의하면, IBM이 양자컴퓨팅 분야에서 제일 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있으며, Google, Micorsoft, Intel, D-Wave, Northrop Grumman Systems가 모두 상위 출원인으로 나타나고 있다.

그림 Ⅳ-2-39 양자컴퓨팅 분야 주요 출원인 및 출원 건수 (2010~2019년)

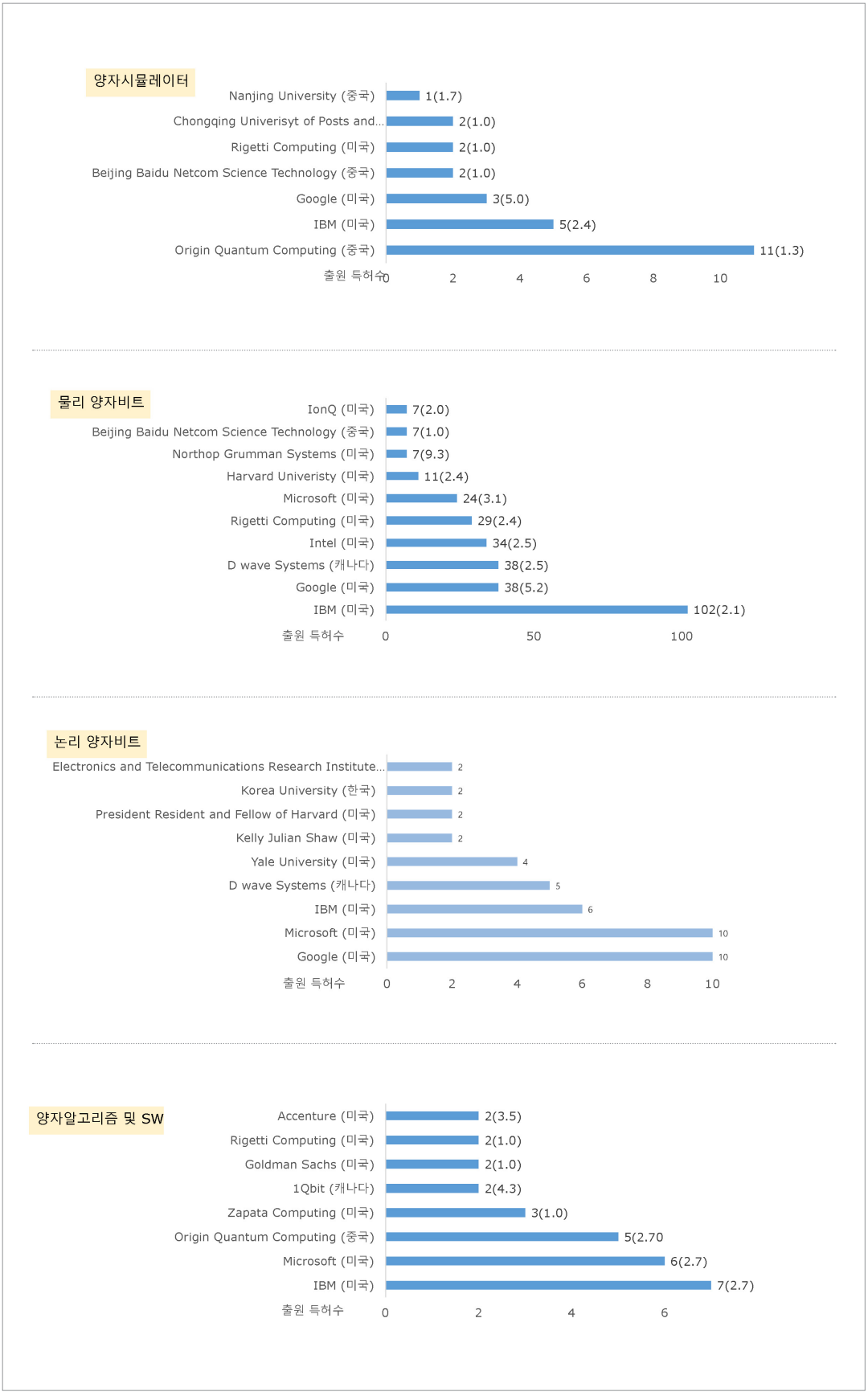


※ IITP (2021) 집필진 재구성

KISTI가 제공한 2014~2020년 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 분석 결과는 [그림 Ⅳ-2-40]에서 확인할 수 있다.[46] 각 숫자는 출원 특허 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 양자시뮬레이터 분야는 상위 7개 출원인(중국 4개, 미국 3개)이 확인되며, 중국의 Origin Quantum Computing이 11건으로 가장 많은 출원 특허 수를 보유하고 있다.

45) IITP (2020)
46) KISTI (2021)

그림 Ⅳ-2-40 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

물리 양자비트 분야는 상위 10위권 출원인 중 미국이 8개, 캐나다와 중국이 각각 1개이며, 특허 수는 IBM이 102건으로 가장 많고 Google과 D-Wave도 각각 38건을 출원했다. 논리 양자비트 분야는 미국 6개, 한국 2개, 캐나다 1개의 출원인이 확인되는데, 한국에서는 ETRI와 고려대학교가 각 2건씩 출원한 것으로 확인된다. 양자알고리듬 및 SW 분야는 미국 6개, 캐나다와 중국 각각 1개의 출원인이 명단에 이름을 올렸다. 특이한 출원인도 확인되는데, 논리 양자비트 분야의 Kelly Julian Shaw는 개인으로 추정된다. 논리 양자비트를 제외한 세부 분야별 국내 상위 출원인을 살펴보면, 양자시뮬레이터 분야에서 ETRI 1건, 물리 양자비트 분야에서 ETRI 3건, KAIST와 서울대학교가 각 2건을 출원한 것으로 확인된다. 삼성전자, KIST, The 4th, 경희대학교, 포항공과대학교는 물리 양자비트 분야에서 각각 1건씩을 출원했다.

표 Ⅳ-2-16 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 상위 출원 기관 (2017~2021년)

[건수, (등록)]

순위	한국		미국		중국		유럽		일본	
	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원	기업명	출원
1	삼성전자	9 (5)	IBM	362 (211)	Origin Quantum	104 (20)	IBM	56	TOSHIBA	14
2	KAIST	8	Microsoft	100 (62)	Baidu	88 (20)	Google	48 (10)	Baidu	11
3	경희대학교	7 (6)	Google	86	IBM	66	Microsoft	47 (6)	Google	9
4	한양대학교	6 (5)	Intel	76 (60)	중국과학기술대학교	38	Northrop Grumman	27 (22)	도쿄대학교	8 (5)
5	ETRI	6	D-Wave systems	72 (56)	Google	35	BULL	17	후지쯔	8 (8)

※ Baidu : 베이징 바이두 네트콤 과학기술, ETRI : 한국전자통신연구원, KIST : 한국과학대학교, Origin Quantum : 오리진 양자컴퓨팅 테크놀로지

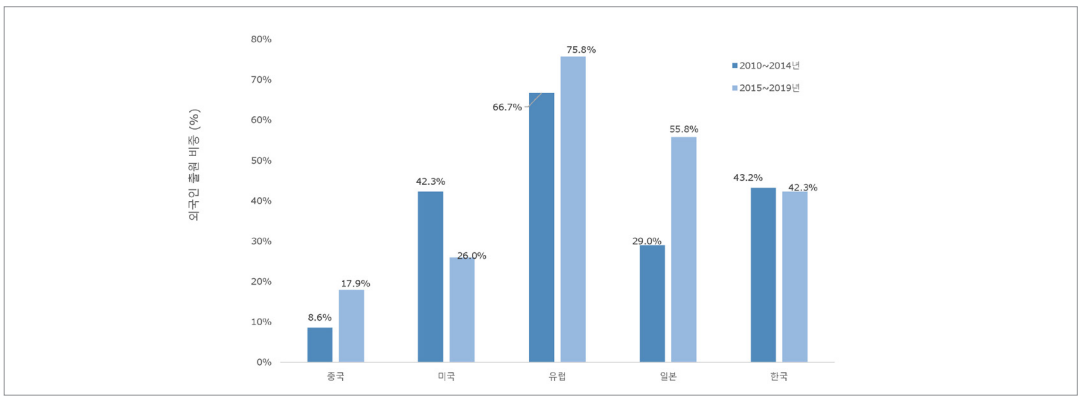
※ KIIP (2023) 집필진 재구성

KIIP의 분석 결과에 의하면 2017~2021년까지 한국은 삼성전자가 특허 9건과 등록 5건으로 1위이고, KAIST가 출원 8건으로 2위, 경희대학교가 출원 7건과 등록 6건으로 3위를 기록하였으며, 한양대학교와 ETRI 각 6건으로 5위 안에 포함되었다. 한양대학교는 동 기간 동안에 양자컴퓨팅 분야 특허 등록도 5건 보유하고 있다. 미국의 경우 IBM이 특허출원 362건과 등록 211건으로 압도적으로 1위를 기록하였고, Microsoft는 출원 100건과 등록 62건으로 2위, Google은 출원 86건으로 3위, Intel은 출원 76건과 등록 60건, D-Wave systems가 출원 72건과 등록 56건으로 5위 안에 진입하였다. 중국의 경우 특허출원 건수 1위는 Origin Quantum으로 출원 104건이고 등록 20건을 기록하였다. 다음으로 Baidu가 출원 88건과 등록 20건, IBM이 출원 66건, 중국과학기술대학교와 Google이 각각 출원 38건, 35건으로 5위 안에 포함되었다. 유럽에서는 IBM이 출원 56건으로 1위를 차지하였고, 2위는

Google로 출원 48건과 등록 10건, 3위에는 Microsoft가 출원 47건과 등록 6건, 4위에 Notrhrop Grumman이 출원 27건과 등록 22건, 마지막으로 5위에 BULL이 출원 17건을 기록하였다. 일본의 경우 Toshiba가 출원 14건으로 1위를, Baidu가 출원 11건으로 2위를, Google이 출원 9건으로 3위를, 도쿄대학교와 후지쯔가 각각 8건으로 5위 안에 포함되었다. 도쿄대학교와 후지쯔는 같은 기간에 특허 등록도 각각 5건과 8건을 기록하고 있다.[47] 양자컴퓨팅 분야에서의 각 국가별 상위 출원 기관의 경향을 보면 한국은 기업, 대학교, 공공연이 고르게 포함되어 있는 반면, 다른 국가들은 기업들이 상위 출원 기관에 포함되고 있다. IBM과 Microsoft, Google은 한국을 제외한 다른 국가에서는 상위 순위를 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 IITP의 분석과도 유사하게 나타난다. 2010~2019년과 2017~2021년 각 국가별 상위 출원 기관을 비교하면 같은 기관명을 확인할 수 있다. 흥미로운 것은 중국의 경우, 양자통신과 양자센서 분야에서는 외국 기관이 순위에 포함되지 못했는데, 양자컴퓨팅 분야에서는 IBM과 Google이 순위에 포함되는 것으로 나타나고 있다.

IITP는 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 Ⅳ-2-41]에 의하면 한국과 미국은 2010~2014년에 외국인의 출원 비중이 높고, 중국과 일본 그리고 유럽은 2015~2019년에 외국인의 출원 비중이 높은 것으로 나타났다.

그림 Ⅳ-2-41 양자컴퓨팅 분야 국가별 외국인 출원 비중



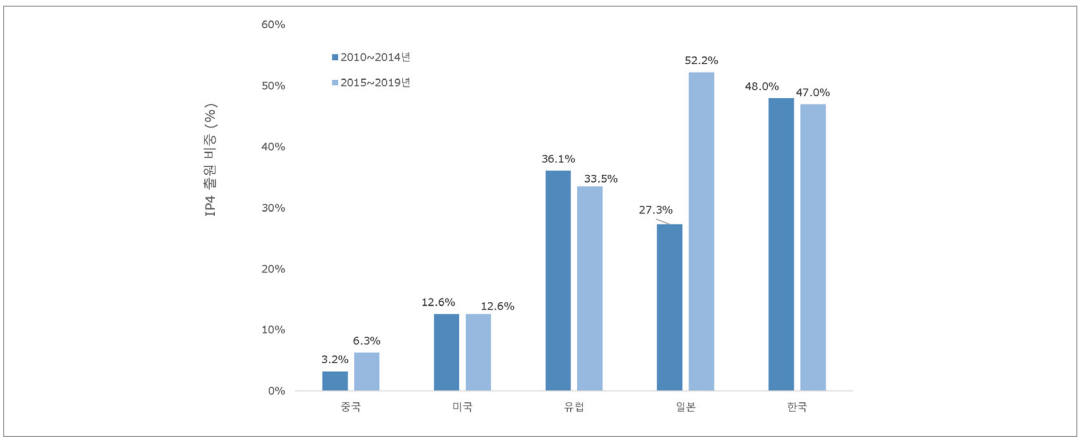
※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 Ⅳ-2-42]의 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 특허 확보 현황을 살펴보면, 2010~2014년에 한국과 유럽의 IP4 특허 비중이 높은 것으로 나타났지만 2015~2019년과 비교해 큰 차이는 없었다. 일본에서는 2015~2019년에 한국, 미국, 유럽, 중국의 특허 비중이 급격히 늘어났는데, 2010~2014년 대비 특허 점유율이 감소했음에도 불구하고 IP4 출원 비중이 증가한 것으로 보아, 자국인의 특허출원 비중이 감

47) KIIP (2023)

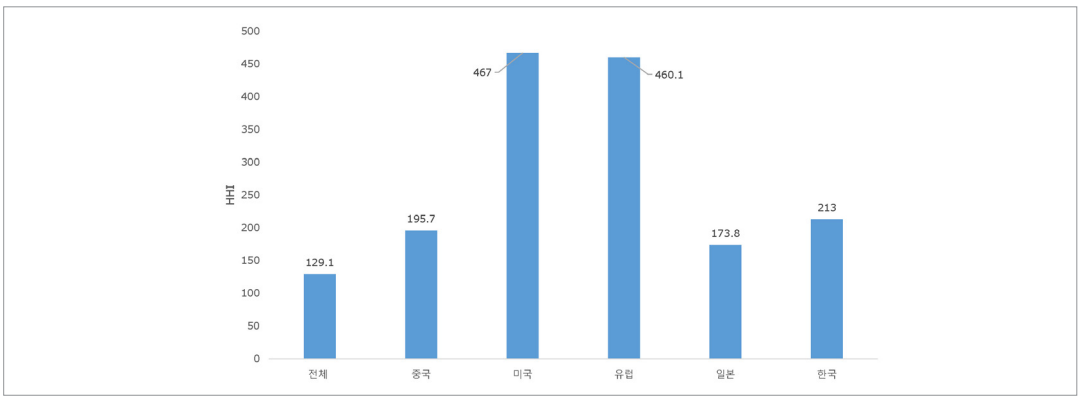
소했을 것으로 보인다. 중국은 2010~2014년 대비 2015~2019년에 IP4 출원 비중이 증가했지만, 같은 기간 특허 점유율도 2배 이상 늘어나 자국인의 특허출원 비중이 여전히 높은 것으로 분석된다.

그림 Ⅳ-2-42 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅳ-2-43 양자컴퓨팅 분야 국가별 HHI (2010~2019년)

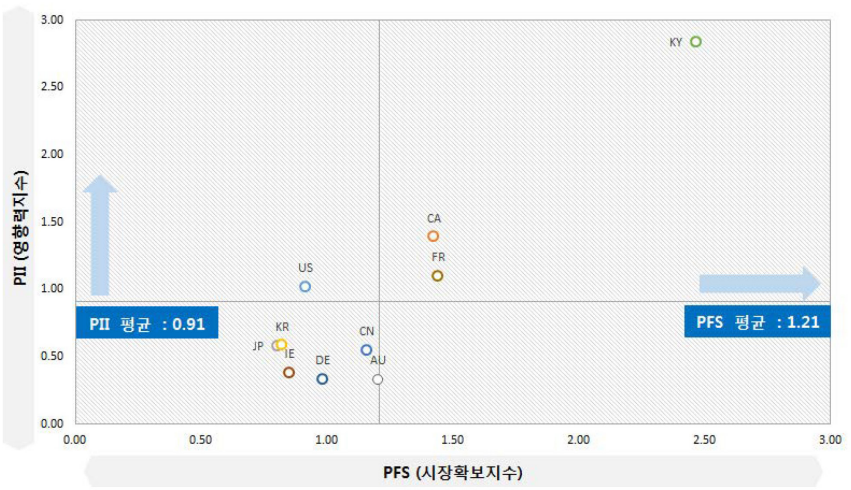


※ IITP (2021) 집필진 재구성

〈표 Ⅳ-2-10〉의 HHI 범위를 참고해 [그림 Ⅳ-2-43]의 양자컴퓨팅 분야 시장 집중 수준을 HHI로 분석하면, 129.1의 집중화 정도가 거의 없는 시장으로서 구매자 우위의 높은 경쟁 강도를 보이며, 다섯 나라 모두 같은 수준으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국이 467.0, 유럽이 460.1로 다소 높고 한국, 중국, 일본은 유사한 수준으로 볼 수 있다. [그림 Ⅳ-2-41]에서 보듯이 양자컴퓨팅 분야에서 특허 출원인의 국적 상위 10개를 기준으로 PII와 PFS를 살펴보면, 케이만군도, 캐나다, 프랑스, 미국 국적 출원인들의 특허는 PII가 평균보다 높은 것으로 분석되고, PFS 측면에서는 케이만군도, 캐나다, 프랑스

국적 출원인들의 특허가 평균보다 높은 수준으로 분석됐다. 종합적으로 보면 케이만군도, 캐나다, 프랑스 국적 출원인들의 특허가 PII, PFS 모두 평균보다 높은 것으로 나타나 기술 영향력과 시장 확보력을 둘 다 갖췄다고 볼 수 있다. 한국, 일본, 아일랜드, 독일, 중국, 호주 국적의 출원인 특허는 PII, PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

그림 Ⅳ-2-44 양자컴퓨팅 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS (2010~2019년)

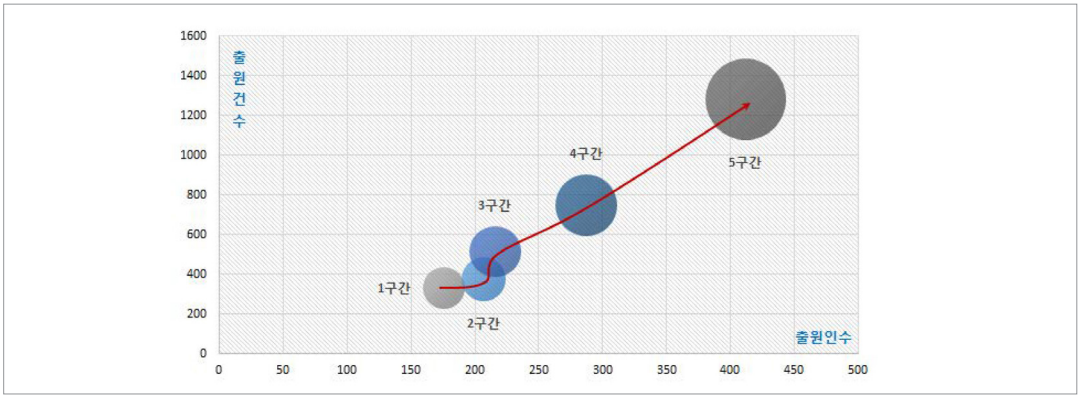


AU : 호주, CA : 캐나다, CN : 중국, DE : 독일, FR : 프랑스, IE : 아일랜드,
JP : 일본, KR : 한국, US : 미국

※ IITP (2021)

IITP의 분석 결과에 의하면, 양자컴퓨팅 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자프로세스(Quantum Processor), 양자컴퓨터(Quantum Computer), 양자상태(Quantum State) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 조지프슨 접합(Josephson Junction), 큐비트 장치(Qubit Device), 큐비트 칩(Qubit Chip) 등의 키워드는 2014년까지 드러나지 않다가 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 양자컴퓨팅 분야는 양자역학적 특성을 컴퓨터에 적용하기 위해 양자프로세서와 양자회로 등 다양한 양자기술을 기본 바탕으로 삼고 있으며, 최근에는 초전도 집적회로 제조, 양자비트를 기반으로 한 디바이스 및 칩 등의 기술이 좀 더 주목받고 있다. [그림 Ⅳ-2-45]에서처럼 양자컴퓨팅 분야의 전체 특허를 2년씩 출원 구간 기준(1구간 : 2010~2011년, 2구간 : 2012~2013년, 3구간 : 2014~2015년, 4구간 : 2016~2017년, 5구간 : 2018~2019년)으로 나눠 출원 건수 및 출원인 수를 살펴보면, 전 구간에 걸쳐 출원인 수와 출원 건수가 모두 증가하고 있어 성장기 단계에 있는 것으로 보인다. 이러한 성장기 단계의 특징으로는, 출원 특허 건수와 출원인 수의 빠른 증가 외에 해당 분야 R&D의 급격한 증가, 경쟁의 격화를 들 수 있다.

그림 Ⅳ-2-45 양자컴퓨팅 분야 기술시장 성장단계 (2010~2019년)



※ IITP (2021)

KIIP가 분석한 양자컴퓨팅 분야에 대한 시장확장성, 특허관심도 및 특허규모는 〈표 Ⅳ-2-17〉에 기술하였다. 2012년 이전에는 한국 출원인의 시장확장성이 전체평균에 비해 상대적으로 높게 나타났지만, 2012년 이후 점차 감소하는 추세를 보이고 있다. 또한 외국 출원인에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보이고 있는데 이는 해당 분야 특허출원이 외국 출원인에 비해 일부 국가에 한정되어 있음을 의미한다. 특허 관심도에 대해서도 등락이 존재하긴 하지만, 2011년 이후 한국 출원인의 경우 지속적인 감소 추세를 보인 반면, 외국 출원인의 경우 최근 5년간 다시 상승하는 추세를 보이고 있다. 최근 5년간 한국 출원인의 규모가 급격히 줄어든 반면, 전체 출원 건수는 꾸준히 증가하며 특허 규모가 2.08%에 그쳤다.[48] 양자컴퓨팅 분야가 센서 분야에 비해서 한국 출원인과 외국인 출원인의 수치가 유사하게 나타나지만, 그럼에도 불구하고 외국 출원인의 규모나 시장성이 상대적으로 적고 한정적인 것으로 판단된다.

표 Ⅳ-2-17 양자컴퓨팅 분야 분석 지표

	시장확장성			특허관심도			특허규모		
출원인 국적	한국	외국	전체	한국	외국	전체	한국	외국	전체
2002-2006	3.57	3.17	3.12	4.51	8.46	7.79	37	502	7.37
2007-2011	3.05	3.13	3.03	4.61	10.25	9.11	57	557	10.23
2012-2016	2.72	2.93	2.89	4.69	7.75	7.65	64	698	9.17
2017-2021	2.60	2.84	2.73	3.35	8.65	8.18	20	961	2.08

※ KIIP (2023) 집필진 재구성

48) KIIP (2023)

제5절 시사점

양자기술 관련 국내외 특허를 다양한 관점에서 분석하기 위해, 분석 기간과 방법에서 관점 차이가 있는 여러 자료를 수집했다. 해당 자료는 2021년 KISTI Rnl Report 양자기술보고서, 정보통신기획평가원 2020년 ICT R&D 기술로드맵 2025와 2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자), 한국지식재산연구원 IP Stats이며 이 자료들을 기반으로 재분석을 수행하고 결과를 도출했다.

KISTI 보고서에 의하면, 2014~2020년까지 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 연평균 41% 증가했고, 중국이 60.9%로 가장 높은 증가율을 보여준다. 출원인별 출원 특허 수는 미국 IBM이 115건으로 가장 많고, 중국 Ruban Quantum Tech와 University of Beijing Posts & Telecommunication이 각각 96건, 90건을 출원하면서 뒤를 따르고 있다. KIIP 보고서에서는 2002~2022년까지 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, PCT의 측허 출원 건수는 15,261건으로 중국 33.29%와 미국 32.68%로 전체 특허출원 건수의 약 66%를 차지하고 있다.

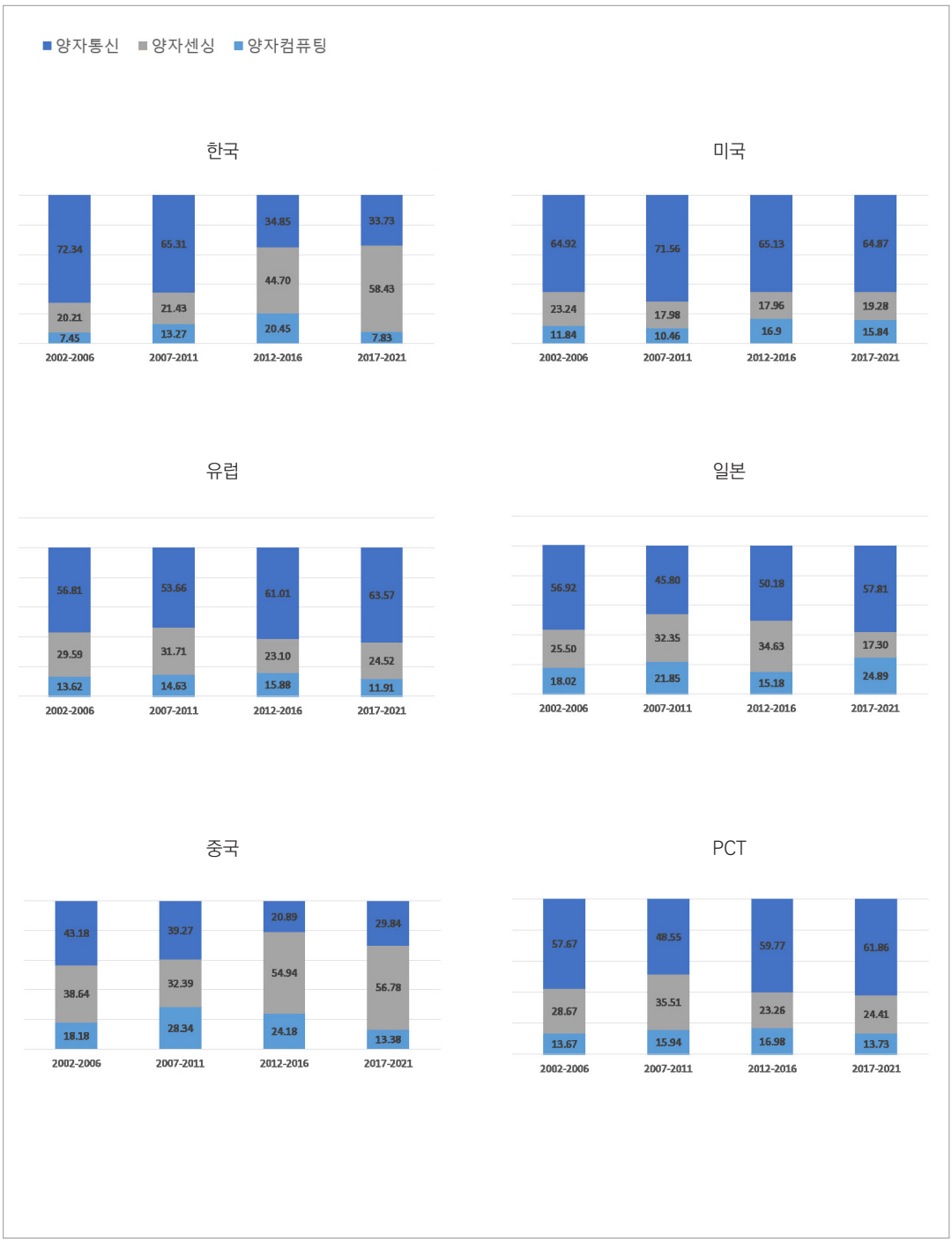
양자통신 분야는 중국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 중국이 양자통신 분야를 주도하는 것으로 분석되나 주로 자국 출원 위주로 보인다. 주요 출원인으로는 일본 Toshiba가 최상위로 나타나고 있다. 한국의 경우, IITP는 삼성전자 66건으로 최다 출원 특허 수를 보여주지만, 2014~2020년에는 개인으로 추정되는 채령이 30건을 출원해 최다 출원인으로 분석된다. 이 분야의 특허는 R&D의 급격한 증가 및 경쟁의 격화 단계인 성장기에 있는 것으로 분석된다. KIIP는 2002~2022년까지 Ruban Quantum이 가장 많은 특허출원하고 있는 것으로 나타나고 있다.

양자센싱·계측 분야 또는 양자센서 분야는 미국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 중국, 일본, 유럽, 한국은 유사한 비중을 차지하고 있으며, 중국의 경우 자국 출원 위주로 확인된다. IITP는 주요 출원인으로는 대만 TSMC가 최상위로 보고 있다. 한국의 경우, 2014~2019년에는 KAIST가 최다 출원인으로 분석된다. 이 분야의 특허는 지속적인 연구개발 활동과 일부 업체의 도태, 특허 수의 정체와 특허 출원인의 정체 또는 감소 추세인 성숙기에 있는 것으로 분석된다. KIIP는 2002~2022년에 IBM이 122건으로 가장 많은 특허를 출원한 것으로 보고 있고, 한국에서는 고려대학교가 3건으로 출원 순위 1위로 보고 있다.

양자컴퓨팅 분야는 미국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. IITP는 미국이 29% 이상으로 가장 크고 중국과 일본이 20% 이상의 비중을 차지하는 것으로 분석하고 있고 주요 출원인으로는 미국 IBM이 최상위로 나타나고 있다. 한국의 경우, 2010~2019년에 삼성이 67건, 2014~2019년에는 ETRI가 4

건으로 최다 출원인이 서로 다르게 나타난다. 이 분야의 특허는 R&D의 급격한 증가 및 경쟁의 격화 단계인 성장기에 있는 것으로 분석된다. KIIP는 2002~2022년에 KIIP와 마찬가지로 미국이 가장 많은 출원 건수를 기록하고 있고, 중국이 이를 추격하고 있는 것으로 보고 있다. 또한 IBM이 최상위임도 동일하게 나타나고 있다. 이는 2020~2021년에 IBM의 특허출원이 지속되고 있음을 암시하는 것으로 볼 수 있다. 한국은 삼성이 가장 많은 출원 건수를 기록한 것으로 보고 있지만, 그 수치는 서로 상이하다.

그림 Ⅳ-2-46 양자기술 특허의 세부 기술별 IP5 국가와 PCT 등록 비중 (2002~2021년)



※ KIIP (2023) 집필진 재구성

IP5 국가와 PCT의 양자기술의 세부 분야인 양자통신, 양자컴퓨팅 및 양자센서 분야별 특허 비중에 대한 [그림 Ⅳ-2-46]를 보면, 한국은 2000년대 초반 양자컴퓨팅 분야의 특허출원이 높은 비중을 보였지만, 이후 양자통신 분야의 출원이 늘어나면서 최근 5년의 출원 비중이 가장 높다. 미국도 초반에 양자컴퓨팅 분야의 출원 비중이 가장 높고 전 구간에 걸쳐 유사한 패턴을 보이지만, 최근에는 오히려 세부 기술별 비중의 격차가 줄어들어 양자센서와 양자컴퓨팅 분야는 근소한 차이가 있는 것으로 보인다. 중국의 경우 초기에는 양자컴퓨팅과 양자통신 분야가 유사한 경향을 보이며 구간에 따라 양자컴퓨팅과 양자센서의 비중이 높아지지만, 최근 5년간에는 다시 양자센서의 출원 비중이 높아지는 경향을 보이고 있다. 유럽과 PCT는 전 구간에 대해서 양자센서의 특허 양자컴퓨팅 분야의 출원 비중이 높게 나타나고 있으며, 최근 5년은 양자컴퓨팅 분야의 출원 비중이 더욱 증가한 것으로 보인다. 일본도 양자컴퓨팅 분야가 가장 출원 비중이 높은 상태를 유지하면서 양자센서와 양자통신 분야 분야의 특허 출원 비중이 증가했다가 최근 5년간에는 다시 양자컴퓨팅 분야가 증가하고 있다. 2002년부터 2021년까지 IP5 양자기술의 세부 기술별 출원 비중은 양자컴퓨팅(51.2%) > 양자통신(33.6%) > 양자센서(15.2%) 순으로 나타난다. 즉, 전 세계적으로 양자컴퓨팅 분야의 R&D가 급격히 증가하고 경쟁의 격화 단계인 성장기에 있는 것으로 보인다.

제3장
양자기술 인력 통계

제1절 개요

미국, EU 등 양자기술 선도국에서는 양자기술 전문인력의 중요성을 인식하고, 전략적인 인력양성정책 수립을 우선순위 과제로 여기고 있다. 우리나라에서도 올해 2023년 6월 27일에 양자과학기술·산업의 대도약(퀀텀점프)을 위한 '대한민국 양자과학기술 전략'을 발표했다. 2035년까지 3조 원 이상을 투입해 한국의 양자기술 수준을 선도국 대비 85%까지 끌어올리고, 양자융합인재(양자핵심인력 및 전자·통신·컴퓨터 공학 등 다양한 엔지니어) 양성과 2035년까지 양자핵심인력을 2,500명 수준으로 양성해 나간다는 계획이다. 지난 2021년 4월에도 '양자기술 연구개발 투자전략'을 통해 양자 전문인력 확보를 4대 전략 중 하나로 발표하기도 했다.

이처럼 국내외적으로 양자 전문인력 양성정책이 앞다투어 발표되며, 국내의 양자 전문인력 현황과 수급전망에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이에 따라 한국연구재단과 미래양자융합포럼은 국내 산·학·연 기관의 양자기술 전문인력 현황 및 향후 수급전망에 대한 조사를 진행했다.

본 조사의 목적은 ①국내 산·학·연 기관의 양자 전문인력 현황을 파악하고 ②향후 수급(수요와 공급) 규모를 전망함으로써 기술분야별(양자통신·센싱·컴퓨팅) 인력 미스매치(Mismatch)를 해소하고 지속적인 양자기술 인력양성과 양자산업 성장을 도모하기 위한 인력양성 정책방향의 기초자료로 활용하기 위함이다. 전자는 국내 양자기술 산업 생태계의 규모를 파악할 수 있다는 점에서 의의가 있으며, 후자는 미래 양자기술 전문인력 양성정책 수립뿐만 아니라 양자기술 R&D 및 산업화 정책의 규모를 설정하는 데 활용될 수 있다.

본 조사에서 산업계와 연구계는 2023년 자료를 기반으로, 학계는 2022년 자료를 기반으로 작성되었다. 조사에 따르면 국내 양자기술 전문인력 중 핵심인력(박사학위 소지자)은 403명으로 파악되며(학계의 경우 2022년 양자정보기술 백서 자료를 기준으로 함), 그 분포는 산업계 73명, 연구계 207명, 학계 123명(2022년 기준)으로 확인되었다. 전체 국내 양자기술 전문인력은 총 1,010명으로 집계되었다(학계는 2022년 기준). 향후 10년간(2024~2033) 산업계와 연구계의 양자기술 전문인력 소요인력은 총 3,245명으로 전망되었으며, 학계에서 배출되는 연간 공급인력은 총 904.2명으로 집계되었다(2022년 기준). 본 조사 결과를 통해 국내 양자기술 전문인력의 수급 차이를 확인할 수 있으며, 이를 극복하기 위한 적극적인 방안 마련이 시급한 상황이라고 하겠다.

제2절 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망 조사

1. 조사 개요

한국연구재단과 미래양자융합포럼은 올해 국내 산·학·연 양자기술 전문인력의 현황과 향후 인력 수요에 대한 조사를 실시했다. 학계에서 양성된 양자기술 전문인력이 산업계 또는 연구계로 연계된다는 관점을 기반으로, 산업계·연구계와 학계를 구분하여 별도의 데이터를 수집했다. 한국연구재단과 미래양자융합포럼은 자료 조사 가이드라인을 공동으로 작성하여 각 산·학·연 기관별 총괄 담당자에게 전달 후 조사의 취지와 자세한 설명을 통해 자료 조사를 진행했다. 현재 한국연구재단에서는 2023년도 학계의 자료를 최종 취합단계에 있으며 차기에 반영될 예정이다.

국내 산업계·연구계의 경우, 양자기술 관련 사업, 연구 또는 단체 활동에 참여 중인 각 산업계·연구계 기관에 소속된 양자기술 전문인력의 현황 및 향후 10년간(2024~2033년) 예상 소요인력을 조사했다. 산업계의 경우 전년도에는 사업부서의 양자기획 및 마케팅 인력 등이 포함되어 있었으나 올해는 양자기술 R&D 전문인력에 집중하여 조사가 이루어짐에 따라 인력이 약간 줄어든 측면이 있다.

양자기술 전문인력의 전문분야를 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅으로 분류하고, 한 가지 이상의 분야에서 전문성을 가지는 전문인력에 대해서는 중복체크를 허용했으며, 학위는 학사, 석사, 박사로 나누어 조사를 진행했다. 향후 10년간 예상 소요 인력 조사 시 산업계의 경우 향후 인력 채용 정책을 예측하기 어려운 점을 고려하여 실제 채용 여부와는 무관한 단순 향후 필요 인력에 대해 조사했다.

전년도에 비하여 올해는 양자기술 전문인력에 대해 자연인 단위의 세부적인 전문분야까지 조사가 진행되었다. 본 백서에서는 기재하지 않았지만, 자료 조사 가이드라인, 각 기관별 총괄 담당자를 통한 세부 조사 방향 공유, 전문인력의 세부 전문분야를 포함한 전문분야 조사 등을 통해 전문성을 검증 및 확보할 수 있었다.

자료 조사는 미래양자융합포럼에서는 2023년 8월 24일부터 10월 6일까지의 44일간, 각 산업계·연구계 기관의 대표 전문가를 대상으로 이메일을 통해 조사를 진행했으며, 미응답자에는 전화 조사를 추가로 실시하여 총 51개의 산업계·연구계 기관의 데이터를 수집했다. 산업계의 경우 양자기술 연구·개발의 수행 및 참여 기업, 기존 사업에의 양자기술 활용 및 적용 기업 등 국내 대·중·소 기업 42개를 대상으로 조사를 진행했으며, 연구계의 경우 국내 대표적인 양자기술 R&D 연구기관 ETRI, KRISS, KIST를 비롯하여 9개 기관을 대상으로 조사를 진행했다.

전술한 바와 같이 학계의 전문인력 현황의 경우, 2022년 양자정보기술 백서 자료를 인용했다. 해당 자료는 한국연구재단에서 2022년 8월 4일부터 2022년 8월 9일까지 6일간, 양자기술 관련 연구 및 단체 활동에 참여 중인 대학의 연구실 및 교수를 대상으로 양자기술 전문인력 조사를 진행했으며, 총 26개 대학의 43개 학부·학과 소속 양자기술 전문인력의 데이터를 수집했다. 양자기술 전문인력의 전문분야를 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 분류하고, 학위는 석·박사, 포스닥, 교수로 나누어 조사를 진행했다.

학계의 예상 연간 배출인력의 경우 올해는 별도로 조사를 진행하지 않고, 미래양자융합포럼에서 2022년 8월 3일부터 2022년 9월 2일까지 약 한 달간 전화 조사를 통해 수집한 대학 교수별 예상하는 연간 배출인력(석사 학위자, 박사 학위자) 데이터를 활용했다. 물리학과, 전기전자공학과, 수학과, 컴퓨터공학과 등 학과의 소속 교수 중 양자기술 관련 학회에 소속되어 있거나, ITRC 사업 등 양자기술 관련 인재양성 과업을 수행 중인 교수 총 93명을 대상으로 조사를 진행했으며, 이 중 양자기술 전문인력을 양성하지 않거나 은퇴한 교수, 연락을 받지 아니한 전문가 27명을 제외하고 총 66명, 응답률 71%의 조사 결과를 도출하였다.

2. 2023년 국내 양자기술 전문인력 현황

2023년 국내 산업계와 연구계를 대상으로 양자기술 전문인력 현황을 조사한 결과, 양자기술 핵심인력(박사학위 소지자)은 산업계는 73명, 연구계는 207명, 학계는 123명(2022년 기준)으로 총 403명이 확인되었다. 국내 전체 양자기술 전문인력은 산업계 226명, 연구계 273명, 학계 511명(2022년 기준)으로 총 1,010명으로 집계되었다.

표 Ⅳ-3-1 2023년 국내 양자기술 전문인력 현황 (학계, 2022년 기준)

※ □ : 핵심인력

[단위 : 명]

구 분	학사	석사	박사	총계
산업계	73	80	73	**226**
연구계	34	32	207	**273**

[단위 : 명]

구 분	석·박사	포스닥	교수	총계
학계	388	43	80	**511**

※ 학계의 경우 2022년 양자정보기술 백서 자료 인용

[단위 : 명]

구분	산업계	연구계	합계
전체인력	226	273	499
핵심인력	73	207	280
합계	299	480	779

☞ 국내 산 · 학 · 연 양자기술 전문인력 수 : 1,010명 (학계, 2022년 기준)

☞ 국내 산 · 학 · 연 양자기술 핵심인력 수 : 403명 (학계, 2022년 기준)

국내 전체 양자기술 전문인력의 소속기관의 비율은 산업계 22%(226명), 연구계 27%(273명), 학계 51%(511명)로, 학계에 양자기술 전문인력이 주로 분포되어있는 것을 확인하였다. 반면, 국내 양자기술 핵심인력의 비율은 산업계 18%(73명), 연구계 51%(207명), 학계 31%(123명)로, 양자기술 핵심인력(박사학위 소지자)은 주로 연구계에 분포되어있는 것을 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-1 기관유형별 2023년 국내 전체 양자기술 전문인력 현황 (학계, 2022년 기준)

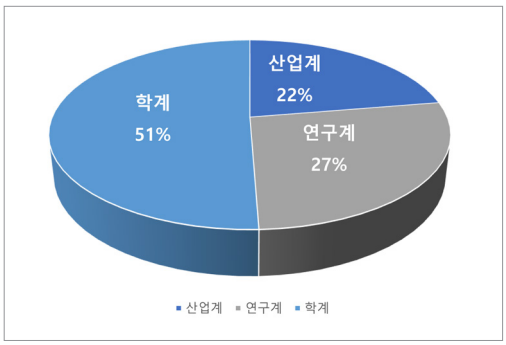
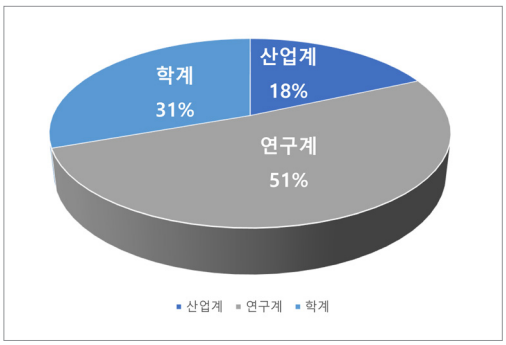


그림 Ⅳ-3-2 기관유형별 2023년 국내 전체 양자기술 핵심인력 현황 (학계, 2022년 기준)



가. 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황

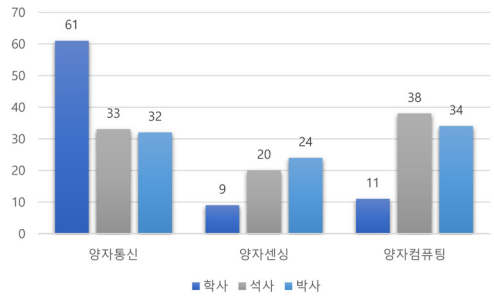
국내 양자기술 관련 대·중·소 기업 42개 전문가 대상으로 조사를 진행하였으며, 전문분야는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 중 해당되는 분야에 중복 체크하도록 하였다. 분야별 중복 허용하여 조사한 결과 올해 산업계의 양자기술 전문인력은 262명으로 집계되었다. 양자기술 분야별로 양자통신 분야에 126명, 양자센싱 분야에 53명, 양자컴퓨팅 분야에 83명이 종사하고 있으며, 산업계 전문인력의 최종학위는 학사 81명, 석사 91명, 박사 90명으로 확인되었다.

표 Ⅳ-3-2 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)

[단위 : 명]

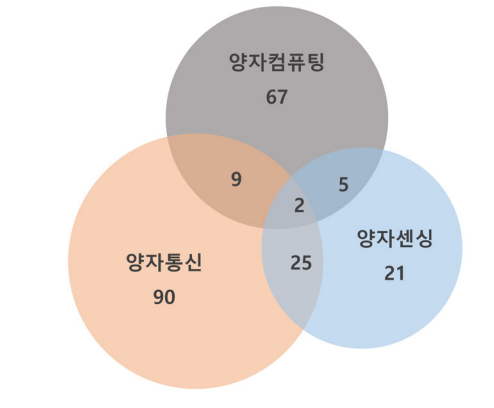
구 분	학사	석사	박사	합계
양자통신	61	33	32	126
양자센싱	9	20	24	53
양자컴퓨팅	11	38	34	83
합 계	81	91	90	262

그림 Ⅳ-3-3 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)



국내 산업계 양자기술 전문인력의 전문분야를 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅으로 나누었을 때, 양자통신 48%(126명), 양자센싱 20%(53명), 양자컴퓨팅 32%(83명)로, 양자통신 분야에 가장 많은 양자기술 전문인력이 집중되어있으며 그 다음은 양자컴퓨팅 분야로 나타났다. 산업계의 양자기술 전문인력의 학·석·박사의 비율은 학사 31%(81명), 석사 35%(91명), 박사 34%(90명)로, 특정 학위에 편중되지 않고 고르게 분포됨을 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-4 기술분야별 2023년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황



나. 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황

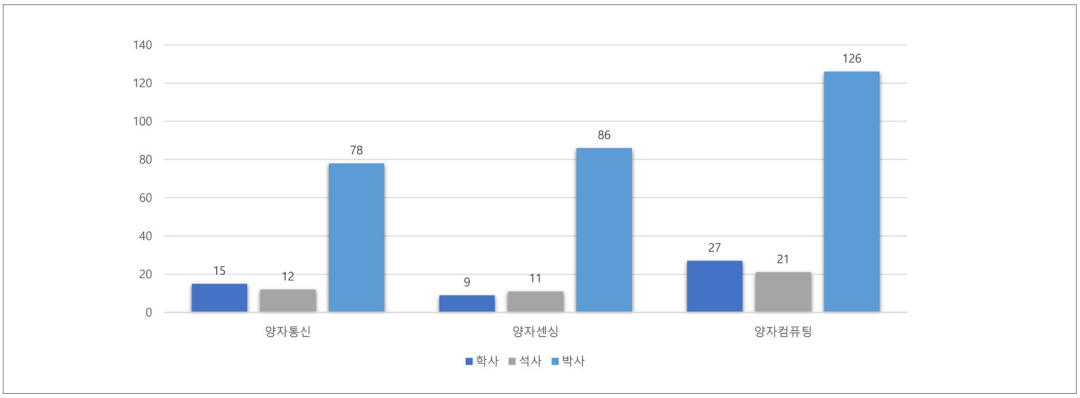
국내 양자기술 관련 연구기관 9개를 대상으로 조사를 진행한 결과, 올해 연구계 양자기술 전문인력은 385명으로 집계되었다. 양자기술 분야별로 양자통신 분야에 105명, 양자센싱 분야에 106명, 양자컴퓨팅 분야에 174명이 종사하고 있으며, 연구계 전문인력의 최종학위는 학사 51명, 석사 44명, 박사 290명으로 확인되었다.

표 IV-3-3 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)

[단위 : 명]

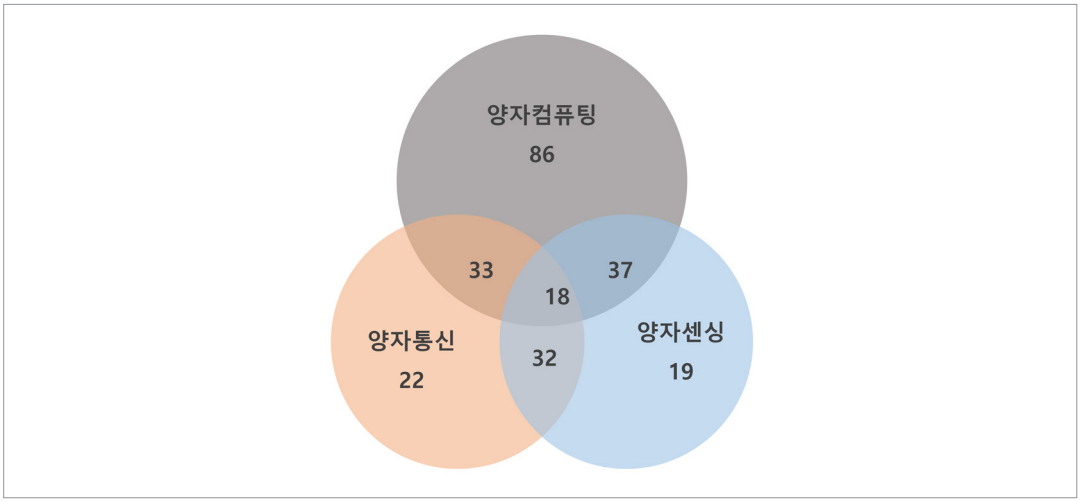
구 분	학사	석사	박사	합계
양자통신	15	12	78	105
양자센싱	9	11	86	106
양자컴퓨팅	27	21	126	174
합 계	51	44	290	385

그림 IV-3-5 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 (중복 허용)



국내 연구계 양자기술 전문인력의 전문분야는 양자통신 27%(105명), 양자센싱 28%(106명), 양자컴퓨팅 45%(174명)로, 양자컴퓨팅 전문인력이 가장 많았으며, 양자통신과 양자센싱의 전문인력 수는 비슷했다. 연구계 양자기술 전문인력의 학·석·박사의 비율은 학사 13%(51명), 석사 11%(44명), 박사 75%(290명)로, 연구기관의 특성상 박사 학위 소지자의 비율이 압도적으로 높음을 확인하였다.

그림 IV-3-6 기술분야별 2023년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황



다. 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황

국내 양자관련 연구 및 단체활동에 참여 중인 26개 대학, 43개 학부·학과의 소속 양자기술 전문인력의 현황을 조사한 결과, 2022년 학계의 양자기술 전문인력은 511명으로 집계되었다. 석·박사 과정생 388명(76%), 포스닥은 43명(8%), 교수는 80명(16%)으로 확인되었다. 석·박사 과정생의 경우 석·박사 통합과정생이 대부분으로 집계되었다.

표 IV-3-4 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준)

[단위 : 명]

구 분	석·박사	포스닥	교수	총계
학계	388	43	80	511

그림 IV-3-7 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준)

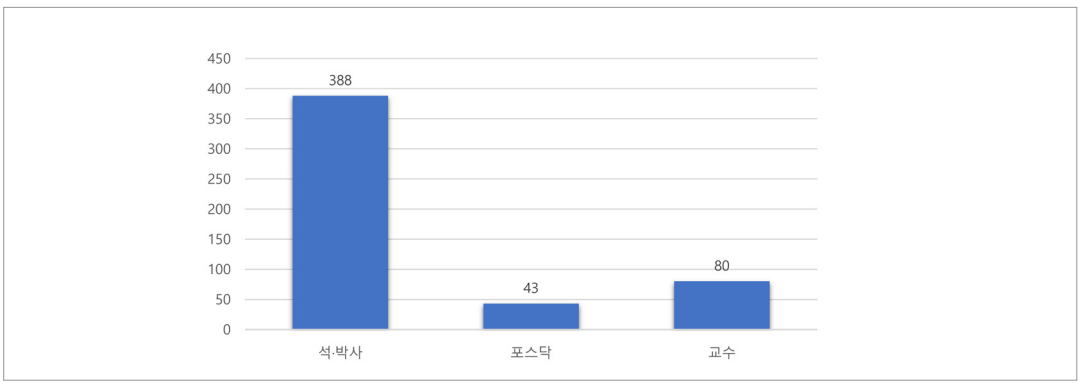
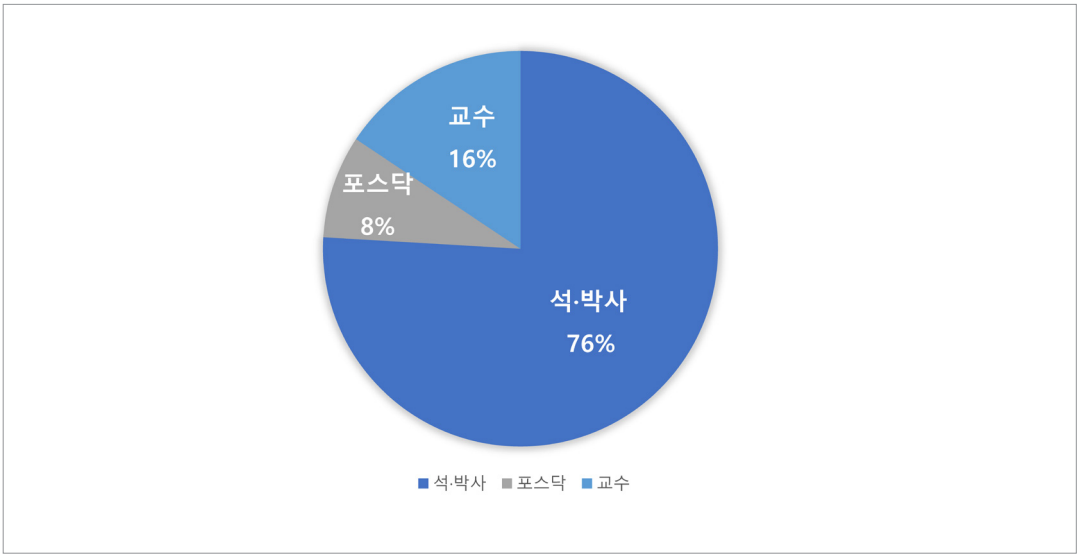


그림 Ⅳ-3-8 학위별 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 (2022년 기준)



3. 향후 10년간 국내 양자기술 전문인력 소요전망 (2024-2033)

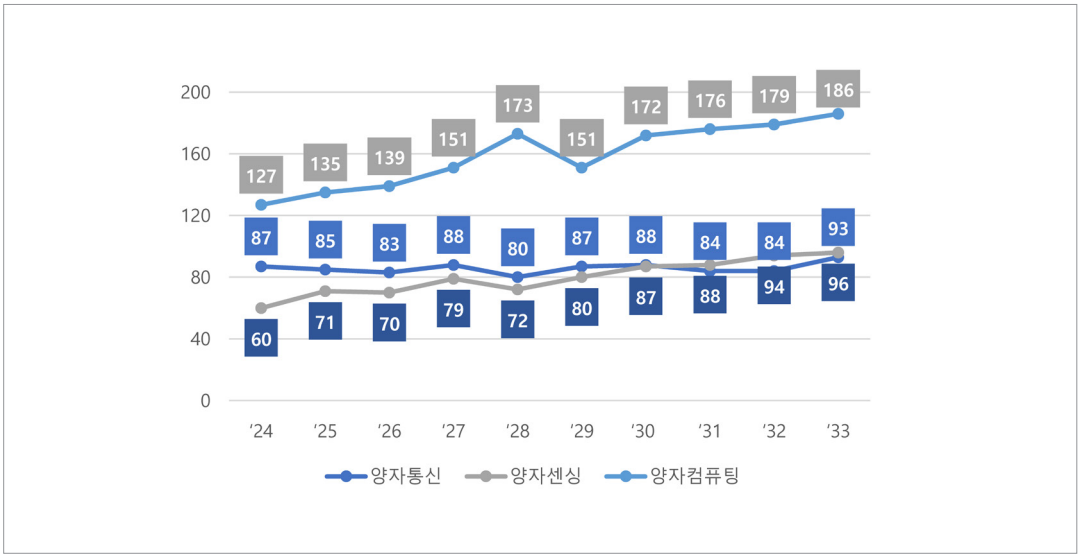
국내 양자기술 관련 산업계 42개, 연구계 9개 기관을 대상으로 향후 10년간(2024~2033년)의 양자기술 전문인력의 소요전망에 대해 조사한 결과, 총 3,245명의 양자기술 전문인력이 요구됨을 확인하였다. 10년간 양자통신 분야에 859명, 양자센싱 분야에 797명, 양자컴퓨팅 분야에 1,589명의 전문인력이 신규로 추가 소요될 것으로 전망되며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 833명, 석사 학위자 1,086명, 박사 학위자 1,326명으로 확인하였다.

표 Ⅳ-3-5 향후 10년간 국내 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033) (종합)

[단위 : 명]

구 분		'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자통신	학사	35	31	32	33	25	27	27	28	31	32	301
	석사	32	33	29	33	35	34	37	34	31	35	333
	박사	20	21	22	22	20	26	24	22	22	26	225
	소계	87	85	83	88	80	87	88	84	84	93	859
양자센싱	학사	16	17	15	19	16	19	17	18	18	17	172
	석사	18	19	22	24	21	22	26	24	26	26	228
	박사	26	35	33	36	35	39	44	46	50	53	397
	소계	60	71	70	79	72	80	87	88	94	96	797
양자컴퓨팅	학사	26	31	30	39	51	34	35	38	38	38	360
	석사	45	46	53	52	52	48	57	56	58	58	525
	박사	56	58	56	60	70	69	80	82	83	90	704
	소계	127	135	139	151	173	151	172	176	179	186	1,589
종합	학사	77	79	77	91	92	80	79	84	87	87	833
	석사	95	98	104	109	108	104	120	114	115	119	1,086
	박사	102	114	111	118	125	134	148	150	155	169	1,326
	합계	274	291	292	318	325	318	347	348	357	375	3,245

그림 Ⅳ-3-9 기술분야별 국내 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033) (종합)



가. 향후 10년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024-2033)

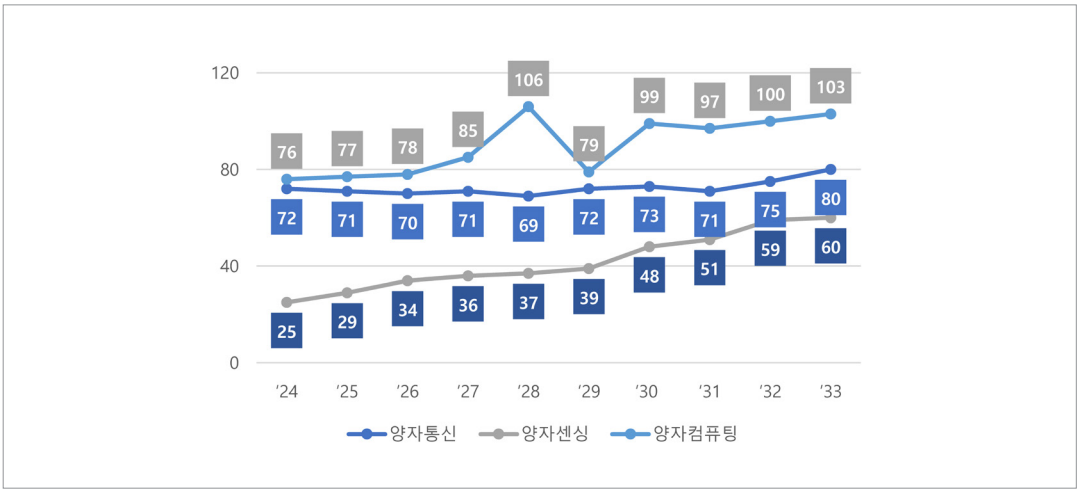
국내 양자기술 관련 대·중·소기업 42개 대상으로 조사를 진행한 결과, 향후 10년간(2024-2033) 양자기술 소요인력은 총 2,042명으로 집계되었다. 10년간 양자통신 분야에 724명, 양자센싱 분야에 418명, 양자컴퓨팅 분야 900명의 전문인력이 신규로 추가 소요될 것으로 전망되며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 589명, 석사 학위자 823명, 박사 학위자 630명으로 확인하였다.

표 Ⅳ-3-6 향후 10년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033)

[단위 : 명]

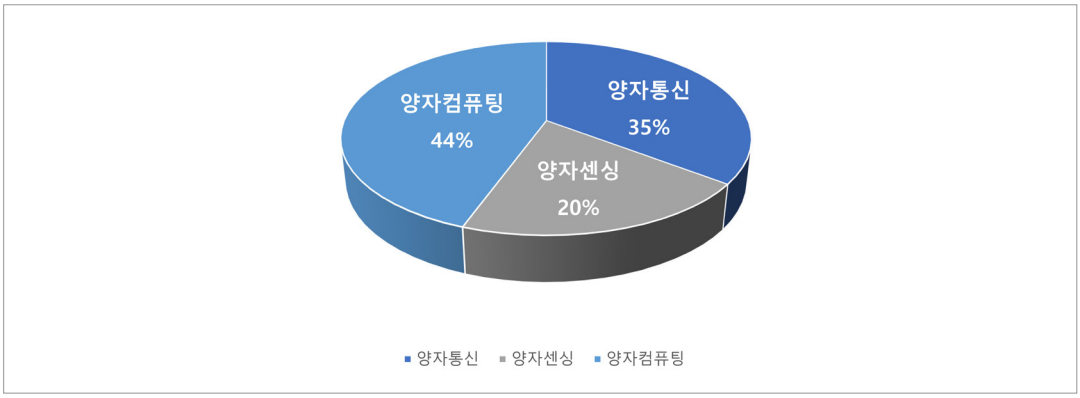
구 분		'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자통신	학사	31	26	28	28	21	22	23	23	27	28	**257**
	석사	28	30	26	28	31	31	31	31	28	30	**294**
	박사	13	15	16	15	17	19	19	17	20	22	**173**
	소계	**72**	**71**	**70**	**71**	**69**	**72**	**73**	**71**	**75**	**80**	724
양자센싱	학사	8	7	7	9	8	9	9	8	10	9	**84**
	석사	7	8	12	11	11	12	14	14	15	16	**120**
	박사	10	14	15	16	18	18	25	29	34	35	**214**
	소계	**25**	**29**	**34**	**36**	**37**	**39**	**48**	**51**	**59**	**60**	418
양자컴퓨팅	학사	16	20	18	28	40	22	24	27	26	27	**248**
	석사	36	38	42	38	42	36	43	42	46	46	**409**
	박사	24	19	18	19	24	21	32	28	28	30	**243**
	소계	**76**	**77**	**78**	**85**	**106**	**79**	**99**	**97**	**100**	**103**	900
종합	학사	55	53	53	65	69	53	56	58	63	64	**589**
	석사	71	76	80	77	84	79	88	87	89	92	**823**
	박사	47	48	49	50	59	58	76	74	82	87	**630**
	합계	**173**	**177**	**182**	**192**	**212**	**190**	**220**	**219**	**234**	**243**	2,042

그림 Ⅳ-3-10 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033)



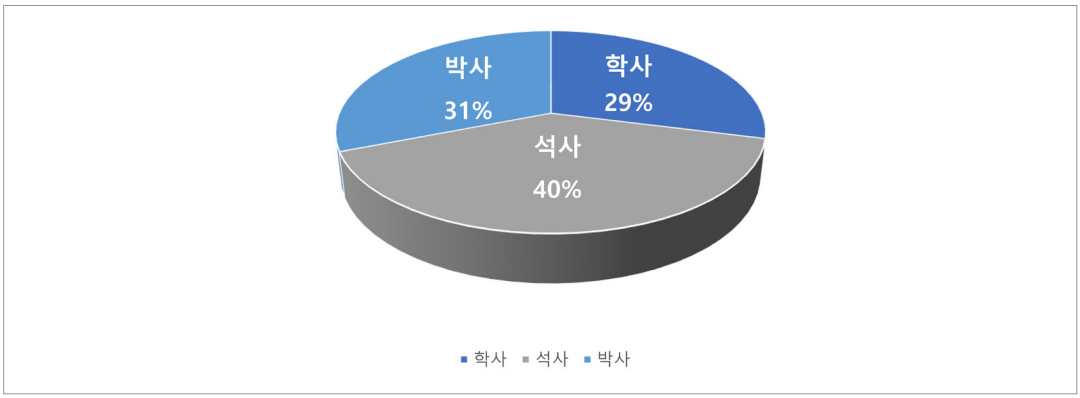
산업계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야의 비율은 양자통신 35%(724명), 양자센싱 20%(418명), 양자컴퓨팅 44%(900명)으로 집계되었으며, 양자컴퓨팅 분야가 산업계 소요인력 중 가장 크며, 양자통신 분야, 양자센싱 분야 순으로 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-11 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율



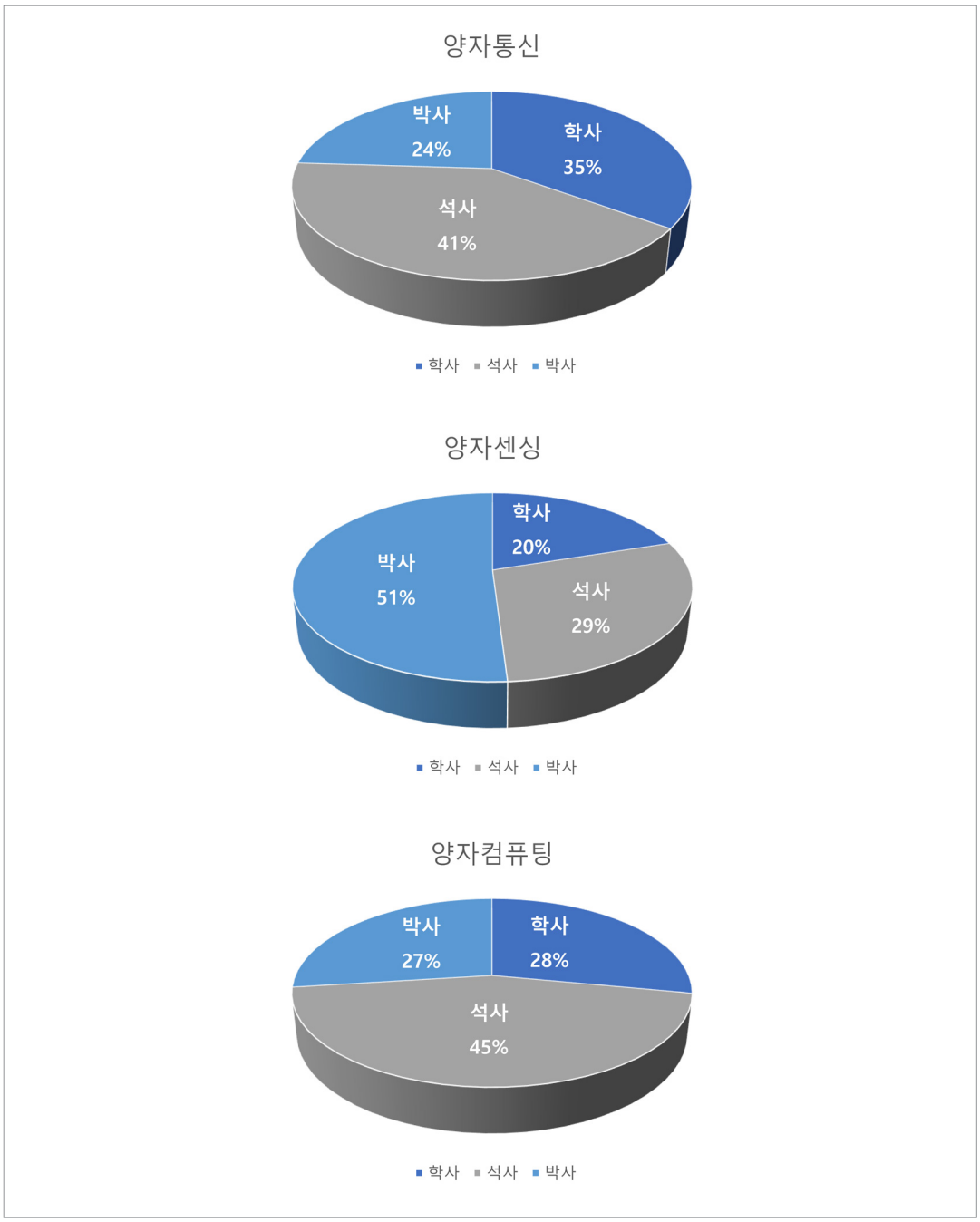
산업계의 양자기술 소요인력의 최종학위 비율은 학사 학위 29%(589명), 석사 학위 40%(823명), 박사 학위 31%(630명)로 집계되었으며, 석사 학위를 소지한 양자기술 전문인력에 대한 요구가 가장 높고, 박사 학위, 학사 학위 순으로 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-12 학위별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율



산업계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 최종학위를 전문분야(양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅)별로 살펴보면, 양자통신 분야는 학사 35%(257명), 석사 41%(294명), 박사 24%(173명)로 집계되었고, 양자센싱 분야는 학사 20%(84명), 석사 29%(120명), 박사 51%(214명)로 집계되었고, 양자컴퓨팅 분야는 학사 28%(248명), 석사 45%(409명), 박사 27%(243명)로 확인되었다. 양자센싱 분야의 경우 박사 학위 소지자에 대한 소요가 학사 또는 석사 학위 소지자에 대한 소요보다 높은 특성을 보였으며, 양자통신 분야와 양자컴퓨팅 분야의 경우에는 석사 학위 소지자에 대한 소요가 가장 높은 것으로 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-13 기술분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 학위별 비율



나. 향후 10년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024-2033)

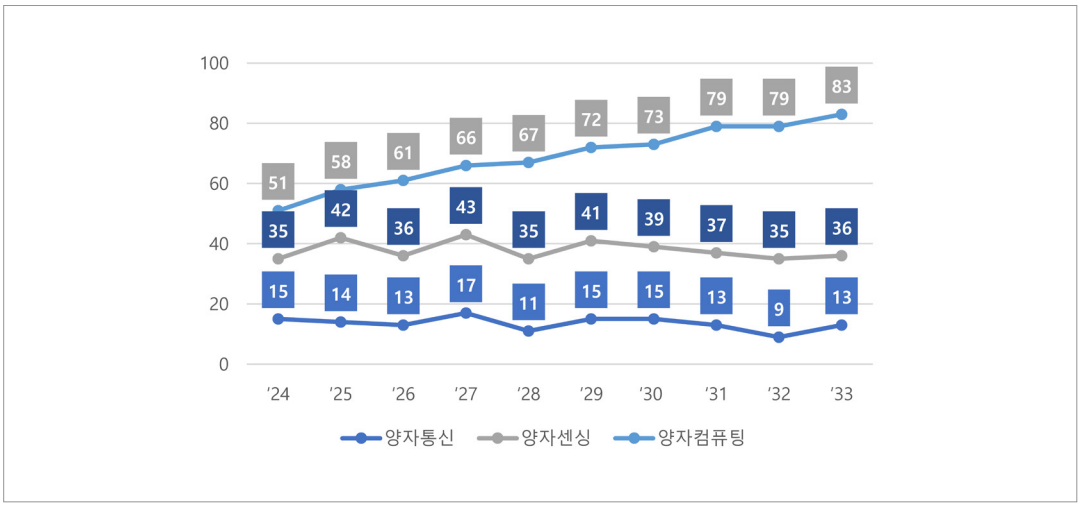
국내 양자기술 관련 연구기관 9개를 대상으로 조사를 진행한 결과, 향후 10년간(2024-2033) 연구계 양자기술 소요인력은 총 1,203명으로 집계되었다. 10년간 양자통신 분야에 135명, 양자센싱 분야에 379명, 양자컴퓨팅 분야 689명의 전문인력이 신규로 추가 소요될 것으로 전망되며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 244명, 석사 학위자 263명, 박사 학위자 696명으로 확인하였다.

표 Ⅳ-3-7 향후 10년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 신규 추가 소요전망 (2024-2033)

[단위 : 명]

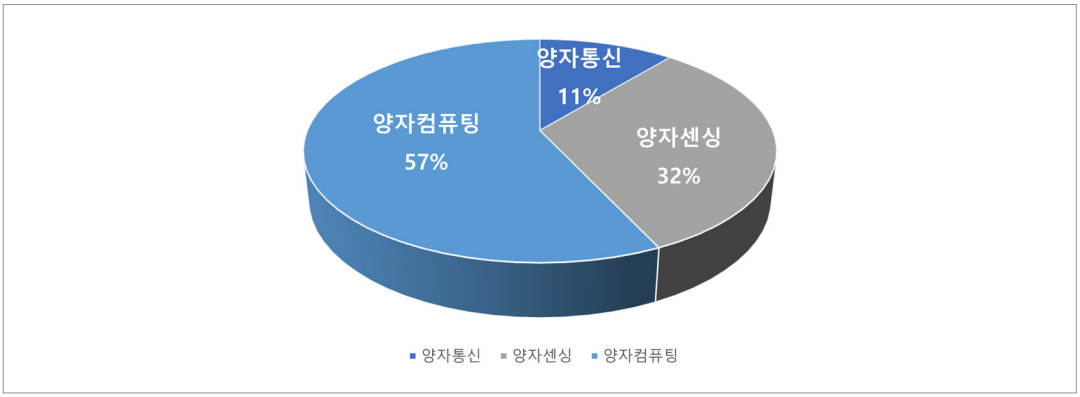
구 분		'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자통신	학사	4	5	4	5	4	5	4	5	4	4	**44**
	석사	4	3	3	5	4	3	6	3	3	5	**39**
	박사	7	6	6	7	3	7	5	5	2	4	**52**
	소계	**15**	**14**	**13**	**17**	**11**	**15**	**15**	**13**	**9**	**13**	135
양자센싱	학사	8	10	8	10	8	10	8	10	8	8	**88**
	석사	11	11	10	13	10	10	12	10	11	10	**108**
	박사	16	21	18	20	17	21	19	17	16	18	**183**
	소계	**35**	**42**	**36**	**43**	**35**	**41**	**39**	**37**	**35**	**36**	379
양자컴퓨팅	학사	10	11	12	11	11	12	11	11	12	11	**112**
	석사	9	8	11	14	10	12	14	14	12	12	**116**
	박사	32	39	38	41	46	48	48	54	55	60	**461**
	소계	**51**	**58**	**61**	**66**	**67**	**72**	**73**	**79**	**79**	**83**	689
종합	학사	22	26	24	26	23	27	23	26	24	23	**244**
	석사	24	22	24	32	24	25	32	27	26	27	**263**
	박사	55	66	62	68	66	76	72	76	73	82	**696**
	합계	**101**	**114**	**110**	**126**	**113**	**128**	**127**	**129**	**123**	**132**	1,203

그림 Ⅳ-3-14 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망 (2024~2033)



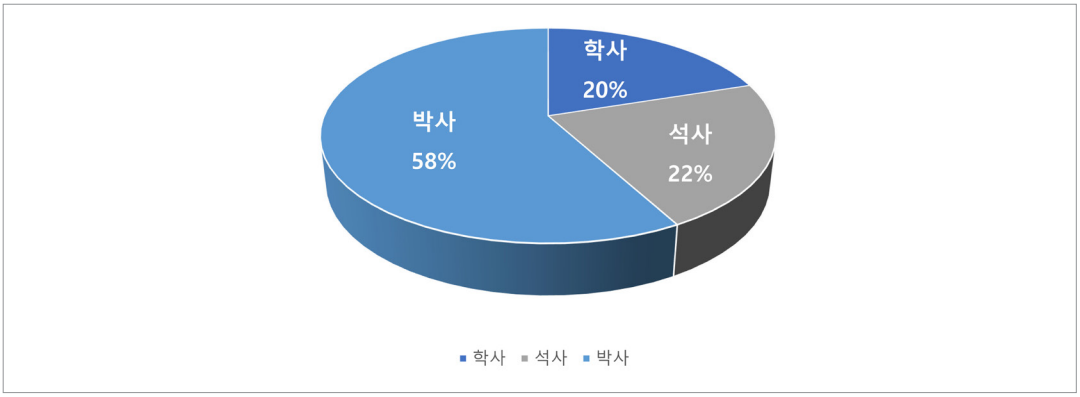
연구계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야 비율은 양자통신 11%(135명), 양자센싱 32%(379명), 양자컴퓨팅 57%(689명)로 확인하였으며, 양자컴퓨팅 분야에서 가장 큰 비율을 보였고, 양자센싱 분야, 양자통신 분야 순으로 전문인력의 소요가 있는 것을 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-15 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율



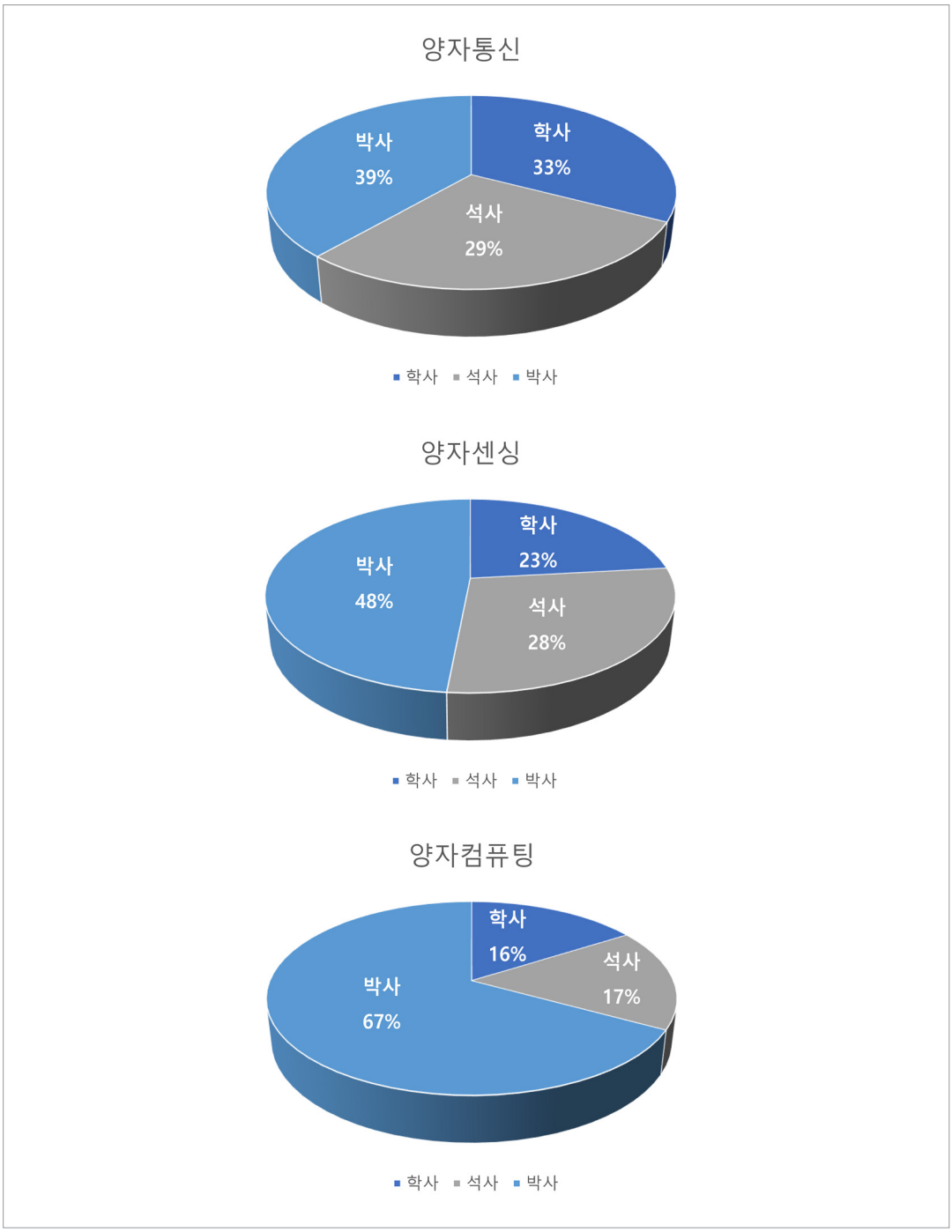
연구계의 양자기술 소요인력의 최종학위 비율은 학사 학위 20%(244명), 석사 학위 22%(263명), 박사 학위 58%(696명)로 집계되었으며, 연구기관의 특성상 박사 학위 소지자에 대한 전문인력 소요가 높은 것을 확인하였다.

그림 Ⅳ-3-16 학위별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 비율



연구계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 최종학위를 전문분야(양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨터)별로 살펴보면, 양자통신 분야는 학사 33%(44명), 석사 29%(39명), 박사 39%(52명)로 집계되었고, 양자센싱 분야는 학사 23%(88명), 석사 28%(108명), 박사 48%(183명)로 집계되었으며, 양자컴퓨팅 분야는 학사 16%(112명), 석사 17%(116명), 박사 67%(461명)로 확인되었다. 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 분야 모두 박사 학위 소지자에 대한 수요가 가장 높았고, 특히 양자컴퓨팅 분야의 경우 박사학위 소지자에 대한 수요가 압도적으로 높은 것으로 나타났다.

그림 Ⅳ-3-17 기술분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2024~2033) 학위별 비율



4. 국내 학계 양자기술 전문인력 배출현황 (2022년 기준)

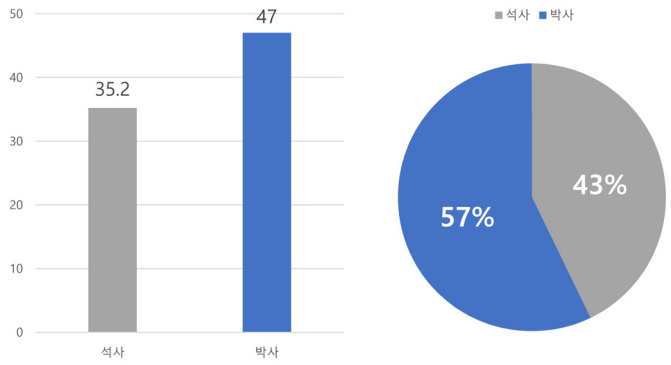
가. 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망

본 배출현황 자료는 2022년 기준으로 작성된 자료를 인용했다. 국내 양자기술 관련 학과에 소속된 대학교수 중 양자기술 관련 학회 또는 양자분야 인력양성과제에 참여하고 있는 교수 66명(총 93명 중 66명 응답, 응답률 71%)을 대상으로, 예상하는 연간 배출인력에 대하여 조사한 결과, 향후 학계에서 배출되는 양자기술 전문인력을 학위별로 구분했을 때, 석사 학위자는 연간 35.2명, 박사 학위자는 연간 47명이 배출될 것으로 전망되었다. 양자기술의 특성상 석·박사 통합과정이 다수 존재하는 것으로 조사되었으며, 박사 과정과 석·박사 통합과정을 통해 박사 학위를 수여한 자는 모두 박사 배출인력으로 파악하였다. 이에 따라 석사 학위자보다 박사 학위자의 연간 배출인력 규모가 크게 집계된 것으로 보인다.

본 조사 결과를 바탕으로 향후 11년간 누적 배출인력을 전망한 결과, 2033년까지 총 904.2명의 양자기술 전문인력이 배출될 것으로 전망된다.

그림 Ⅳ-3-18 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망 (2022년 기준)

구분	인원명
석사	35.2
박사	47
합계	82.2



※ 본 조사 결과에는 교수의 개인별 전망치가 반영됨
※ 본 조사 결과, 석박사 통합과정을 통해 박사 학위를 수여한 자가 다수 존재하는 것으로 조사됨

표 Ⅳ-3-8 향후 11년간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망(누적) (2022년 기준)

[단위: 명]

구분	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33
석사	35.2	70.4	105.6	140.8	176	211.2	246.4	281.6	316.8	352	387.2
박사	47	94	141	188	235	282	329	376	423	470	517
합계	82.2	164.4	246.6	328.8	411	493.2	575.4	657.6	739.8	822	904.2

※ 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망을 단순 누적함

나. 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망

향후 학계에서 배출되는 연간 양자기술 전문인력을 주요 학과별로 구분했을 때, 가장 많은 인력을 배출하는 학과는 물리학과로 전체의 47.32%를 차지하고, 그 뒤로 전기전자·컴퓨터공학과가 전체 중 37.1%의 비율을 보였다. 주요 학과별로 연간 배출인력의 학위를 구분했을 때, 박사 학위자의 경우 물리학과 55%, 전기전자·컴퓨터공학과 45% 순으로 인력이 배출되지만, 석사 학위자의 경우는 오히려 물리학과가 37%, 전기전자·컴퓨터공학과가 45%로 그 순위가 뒤바뀜을 알 수 있다.

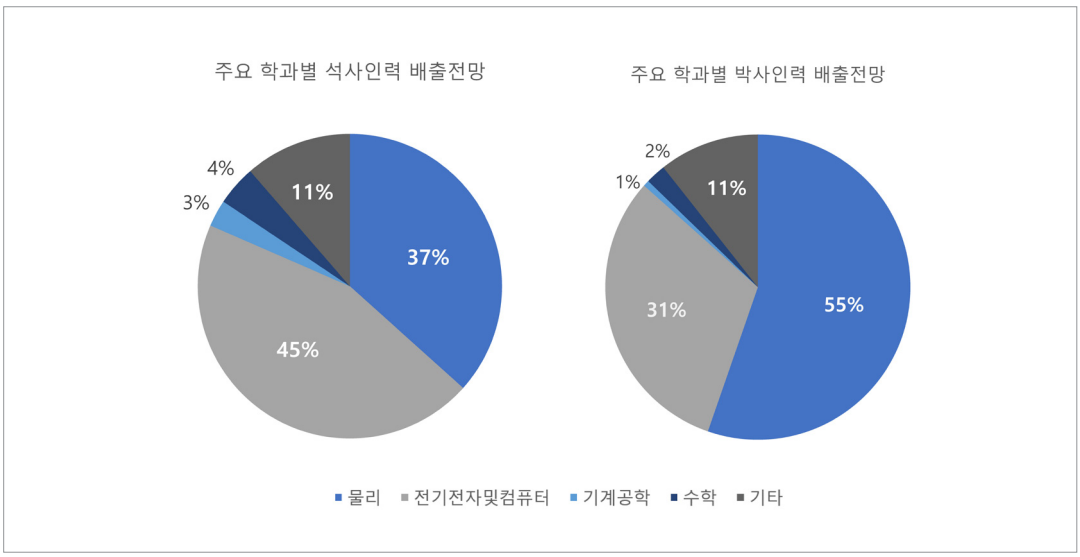
표 Ⅳ-3-9 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망 (2022년 기준)

[단위: 명]

구분	석사	박사	합계	비율
물리학	12.9	26	38.9	47.32%
수학	1.5	1	2.5	3.04%
기계공학	1	0.3	1.3	1.59%
전기전자·컴퓨터공학	15.8	14.7	30.5	37.1%
기타	4	5	9	10.95%
합계	**35.2**	**47**	**82.2**	**100%**

※ 유관 학과끼리 통합

그림 Ⅳ-3-19 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망(석·박사) (2022년 기준)



※ 유관 학과끼리 통합

제3절 시사점

이번 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망 조사를 통해서 국내 양자기술 핵심인력을 포함한 국내 양자기술 전문인력의 전문분야, 최종학위 등의 전반적인 현황을 파악하였다. 또한, 산업계와 연구계의 양자기술 전문인력에 대한 수요 조사를 진행하였으며, 학계의 연간 석사 및 박사 학위별 전문인력 배출현황에 대한 정보를 확인하였다. 이는 국내의 산업계 및 연구계, 그리고 학계에 대한 전문인력 현황 및 공급·수요를 모두 아우르는 자료로서 의의가 있다. 또한, 산업계와 연구계에서 국내 양자기술 인력의 부족을 호소하고, 학계에서는 양자기술 관련 취업의 어려움이 있는 상황에서, 국내의 양자기술 전문인력의 수급전망을 조사했다는 점 또한 가치가 있다고 볼 수 있다.

조사단계 초기에 한국연구재단과 미래양자융합포럼이 공동으로 자료조사에 대한 가이드라인을 작성하여 자료조사를 추진한 점에서 본 양자 인력조사가 전년에 비해 보다 체계적으로 진행되고 있음을 알 수 있었다. 물론 올해 자료조사에 대한 검증 부분에서 좀 더 보완이 필요한 부분도 있지만, 연도마다 양자 인력조사에 대한 체계화·고도화가 이루어진다는 점이 고무적이라 할 수 있다. 차기년도부터 조사가 이루어질 때는 이러한 부분을 염두에 두고 좀 더 진전되고 체계화된 조사를 진행할 필요가 있을 것이다.

아울러 양자기술이 바로 매출로 연계되지 않는 현재 상황에서는 학계 배출인력의 산업계 취업과 산업계의 수요가 서로 연계되지 않는 미스매치 현상이 발생할 수 있다. 이는 실제 산업계의 양자 전문인력에 대한 수요는 있으나 학계 배출인력이 바로 취업하기 어려운 상황이 존재함을 의미한다. 본 조사에서 이루어진 산업계 인력수요 조사는 인력채용 부서가 아닌 양자 사업을 담당하는 부서의 인력 수요를 파악한 것으로, 대기업의 경우 양자기술 관련 사업부서 또는 연구부서에서는 양자 전문인력을 필요로 하지만, 막상 인력채용을 총괄하는 인력부서에서는 바로 매출이 발생하지 않는 양자분야의 인력채용에 대해 어려움을 표하는 경우가 있음을 알 수 있었다.

본 양자 인력조사는 양자 전문인력 현황·수요·공급 측면에서 조사를 진행하였으나 다소 한계점이 존재한다. 첫 번째로 양자기술 등 첨단 과학기술과 관련된 산업의 경우, 축적된 자료가 많지 않아 과거의 통계자료를 확보하는 데에 어려움이 있다. 따라서 전수조사를 통해 현장 자료를 수집하여 자료의 정확성을 높이고, 수집된 통계자료를 지속적으로 축적하며, 이를 기반으로 미래 수급을 예측하는 통계분석이 진행되었으면 하는 아쉬움이 있다. 두 번째로 양자통신·센싱·컴퓨팅 등 기술분야별 인력 미스매치 현상을 해소하기 위해서는 기술분야별 인력 현황과 수급전망에 대한 조사가 이뤄져야 하나, 학계의 경우 기술분야별 인력공급 전망 대신 인력공급의 총량만 전망했다는 점에서 한계를 갖는다. 마지막으로

학계의 양자기술 전문인력 현황 및 연간 배출인력을 파악하는 데에 있어 응답률이 저조하여 기존 자료와의 연계가 곤란하다는 점에서 한계가 있다고 할 수 있다.

위와 같은 한계점을 개선하기 위해서는 두 가지 노력이 필요하다. 첫 번째로 매년 양자기술 전문인력 현황에 대한 체계적인 실태조사를 지속적으로 시행해야 한다. 올해 한국연구재단과 미래양자융합포럼이 조사단계 초기에서 설정한 인력조사 가이드라인에 대해 세분화·체계화를 지속적으로 진행하는 것이 필요하다. 이를 통해 산·학·연 기관별 양자기술 전문인력 현황, 소요인력 및 배출인력 전망에 대한 보다 정확한 자료를 축적해갈 수 있을 것이며, 이렇게 지속적으로 축적된 자료는 미래 수급 예측을 위한 과거 자료로써 의미를 갖게 될 것이다. 미래양자융합포럼에서는 매년 백서 출간을 통하여 이러한 사항을 체계적으로 추진해 나갈 예정이다. 두 번째는 첫 번째 노력을 기반으로 한 양자기술 전문인력 수급 모니터링 방안을 모색하는 것이다. 실태조사를 통해 파악된 양자기술 전문인력 현황을 바탕으로 전문가 자문단 구성·운영을 통해 수급전망 진단과 지속적 모니터링 체계를 갖추어 나가는 것이 필요할 것이다.

이를 통해 범국가적 차원으로 양자기술 전문인력 순환생태계의 미스매치 현상을 해결하고 선순환 구조를 만들어 갈 수 있을 것이다. 양자기술 전문인력 양성을 위하여 현재 정부에서도 적극적으로 추진하고 있는 양자융합대학원과정이나 융합대학과정 커리큘럼의 신설 등을 확대하고 학계-연구계-산업계로 이어지는 전문인력 선순환 사이클을 마련하여 대·중·소기업 등 적극적인 산업계 전환인력 양성 프로그램 개발을 추진할 필요가 있다. 이러한 내용이 종합적으로 국가 전체적인 양자기술 전문인력과 관련된 정책의 효과성을 높이고, 양자 분야의 산·학·연 인력 수급을 원활히 하는 유관기관의 정책 마련에 기초자료로 활용되기를 기대해 본다.

참고문헌

• 국내문헌

1	한국과학기술정보연구원(2021), "양자기술 과학·기술 산업 분석", R&I Report.
2	정보통신기획평가원(2020), "ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자".
3	정보통신기획평가원(2021), "ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체·양자)".
4	한국지식재산연구원(2023), "IP Stats" Vol.13.
5	성창모, 박주이(2023), "국가 전략기술분야 글로벌 상위 논문·특허 분석" NRF R&D Brief-2023-2.

V 양자기술 산업화 모델

제1장 산업화 모델 개요

제2장 양자통신분야 산업화 모델

제3장 양자센싱분야 산업화 모델

제4장 양자컴퓨팅분야 산업화 모델

제5장 산업화 모델 시사점

제1장
산업화 모델 개요

제1절 분야별 산업화 모델 분류

양자기술에 대한 산업계의 수요는 무궁무진하다. 이미 미국, 유럽, 중국, 일본, 한국 200여개 이상의 기업들이 양자기술 개발 및 상용화를 시작하고 있다. 양자통신 분야는 국내외 주요 통신사 간 선점 경쟁이 치열하다. 각 기업들이 테스트베드를 구축하고 상용서비스를 가속하고 있고, 양자센서 분야는 시제품 개발을 통한 초기 상용화를 서두르고 있으며, 양자컴퓨터 활용의 증가로 인해 배터리, 항공, 제약 등에서 양자컴퓨팅 클라우드 서비스가 본격화되고 있다.[1] 이 장에서는 각 산업분야별로 양자기술과 접목하여 진행되고 있는 R&D 또는 산업화 방향에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

〈표 V-1-1〉에서 기술한 것처럼 각 주요 분야에서 양자기술을 적용한 기술 개발이 진행되고 있다. 국방과 안보 분야의 경우, 양자암호통신은 해킹이나 정보탈취를 원천 차단하여 고신뢰의 통신보안을 가능케 하고, 양자센서는 장거리나 초정밀 측정으로 다양한 군사적 활용이 가능하기 때문에 중요하게 다루어지고 있다. 반도체 또는 자동차와 같은 분야에서는 정확도가 향상된 센서 개발, 공정 프로세스 최적화, 구조 설계 개선이 중심이 되고 있고, 의료나 제약 분야에서는 신약 개발과 정밀 진단을 위해서 양자컴퓨팅이나 양자센서 활용에 대한 연구가 요구되고 있다. 〈표 V-1-1〉에서 기술된 내용을 포함한 여러 분야에서 검토되고 있는 국내외 양자기술 활용 방법 등에 대해 양자 통신·센서·컴퓨팅분야 등 양자 산업 전반에 걸친 국방·안보, 의료 등 8개 산업분야, 총 106개의 산업화 모델에 대해 소개하고자 한다.

표 V-1-1 주요 분야별 산업화 모델 개요

산업분야	기술분야	산업화 모델
국방·안보	양자통신	① 인공위성 양자키 분배 네트워크 구현 서비스 ② 양자통신과 현대암호 Post-processing 알고리즘을 이용한 보안 서비스 ③ 드론용 양자암호모듈 보안 서비스 ④ 자유 공간 양자통신 서비스 ⑤ 우주 안보를 위한 양자통신위성 서비스
	양자센싱	① 자이로스코프 항법 서비스 ② 양자 자력계 수중 감시 서비스 ③ 양자 무선주파수(RF) 수신 서비스 ④ 양자 이미징 서비스 ⑤ 전체 무선주파수(RF) 통신 서비스 ⑥ 양자레이더를 이용한 장거리 표적 감시 서비스 ⑦ 양자 라이다를 이용한 실시간 3D 공간 정보 제공 서비스 ⑧ 양자항법시스템을 이용한 선박 위치 탐지 서비스 ⑨ 양자위성을 이용한 우주 소형 물체 감시 서비스

1) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

산업분야	기술분야	산업화 모델
국방·안보	양자컴퓨팅	① 방어 시나리오 생성 서비스 ② 암호체계 개발 서비스
통신	양자통신	① 소형 양자키 분배 시스템 공급 서비스 ② 양자암호통신 포함 양자인터넷 서비스 ③ 무선 양자암호통신망 서비스 ④ 고주파수 대역 광무선 통신 서비스 ⑤ 유선 양자암호통신 서비스 ⑥ 양자암호 시스템 적용 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ⑦ 무선 양자인터넷 구현 서비스 ⑧ 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스 ⑨ 양자보안 기반 IP카메라 감시 서비스
제조·반도체	양자통신	① 스마트팩토리 통신망 서비스 ② 생산라인 장치 모니터링 서비스 ③ 반도체 공정용 원격 설비 관리 서비스
	양자센싱	① 건축 자재 결함 감지 서비스 ② 배터리 불량 검출 서비스 ③ 가스 센싱 서비스
	양자컴퓨팅	① 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 서비스 ② 반도체 미세구조 설계 서비스 ③ 차량용 배터리 소재 최적화 서비스 ④ 제조 공정 모니터링 서비스 ⑤ 화학 물질 양산화 서비스
의료·제약	양자통신	① 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ② 의료 데이터 전송서비스 ③ 의료 사이버 보안 서비스
	양자센싱	① 질병 감염 여부 진단 서비스 ② 생체 자기(뇌자도, 척수 유발 자장, 심자도) 검사 서비스 ③ 양자현미경 이용 비파괴 생물학적 구조 관측 서비스 ④ MRI 진단 서비스 ⑤ 진단 지원 서비스 ⑥ 양자현미경 및 양자내시경 이용 정밀 분석 서비스 ⑦ 양자 MRI 의료진단 서비스
	양자컴퓨팅	① 양자 이미징 플랫폼 서비스 ② 암 치료 제안 서비스 ③ 신약물질탐색 서비스 ④ 단백질 구조 분석 서비스 ⑤ 맞춤 의료 서비스 ⑥ 방사선 치료 서비스 ⑦ 게놈 결과를 연결한 의료 서비스 ⑧ 에너지 모델링을 통한 주요 약물 발견 서비스 ⑨ 저분자 제약의 효율성 강화를 통한 신약 설계 서비스 ⑩ 새로운 생물학적 제재 개발 서비스 ⑪ 보험료 산정 및 위험 분석 서비스
소재	양자컴퓨팅	① 신소재 개발 서비스 ② 배터리 소재 개발 서비스 ③ 수소 연료 전지 개발 서비스저류층의 채굴량 탐사 서비스 ④ 촉매 및 계면활성제 개발 서비스 ⑤ 화학물질 개발 서비스

산업분야	기술분야	산업화 모델
금융	양자통신	① 블록체인 기반 금융 보안 서비스 ② 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스 ③ 금융데이터 분석 및 보안 서비스 ④ 금융 보안 서비스
	양자컴퓨팅	① 위험 분석 서비스 ② 투자 솔루션 계산 서비스 ③ 금융 플랫폼 서비스 ④ 고객 타켓팅 및 예측 서비스 ⑤ 리스크 프로파일링 서비스 ⑥ 거래 최적화 서비스
교통·물류·항공	양자통신	① 양자암호 적용 자율주행 배송 서비스
	양자센싱	① 항공기 시각주기유도 서비스 ② 주행 정확도 및 안전 개선 서비스 ③ 항공기 시스템 모니터링 및 유지보수 서비스 ④ 양자 라이다를 이용한 자율주행 서비스
	양자컴퓨팅	① 교통관리 서비스 ② 자동차 전자 제어 장치 암호화 서비스 ③ 항공기 디자인 최적화 서비스 ④ 비행 게이트 할당 서비스 ⑤ 항공 화물 적재 최적화 서비스 ⑥ 항공 운항 시스템 최적화 ⑦ 콘텍스트(Context) 활용 맞춤화 서비스 ⑧ 항공사 네트워크 최적화 서비스 ⑨ 교통망 경로 최적화 서비스 ⑩ 자동차 생산 공급망 및 물류 네트워크 운영 서비스 ⑪ 물류자원 최적화 서비스 ⑫ 도심항공 모빌리티 교통망 제어 서비스
기타 산업	양자통신	① 양자 광자 트윈 구현을 통한 6G와 네트워크 서비스 ② 개인 비서 서비스 ③ 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화 지원 서비스 ④ 양자 전자 선거 서비스
	양자센싱	① 양자중력센서 기반 지하통신시설물 위치 파악 서비스 ② 통신선로 단락 검출 서비스 ③ 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 서비스 ④ 뇌파 활용 치안 서비스 ⑤ 석유 및 가스 탐사 서비스 ⑥ 화산 활동 감시 서비스 ⑦ 에너지 모니터링 서비스 ⑧ 가스 센싱 및 모니터링 서비스
	양자컴퓨팅	① 인공지능 향상 서비스 ② 전력망 운영 서비스 ③ 에너지 분야 기타 서비스 ④ 지하 자원 탐색을 위한 시뮬레이션 서비스 ⑤ 날씨 예측 서비스

제2절 시기별 산업화 모델 분류

산업화 모델을 단기(5년 내외 산업화 검토 대상)와 중장기(5년 이후 산업화 검토 대상)로 구분하면 다음 〈표 V-1-2〉와 〈표 V-1-3〉으로 나타낼 수 있다. 단기 산업화 모델의 경우, 5년 내외로 가시적인 성과를 도출할 기술과 집중적으로 개발되어야 하는 분야를 중심을 기술하였다. 중장기 산업화 모델의 경우, 기술적 숙련도, 산업화 정도, 인체에 대한 무해성, 보안 확보, 제도적 보완에 의해 5년 이후 산업화를 고려할 수 있는 분야로 구별하였다. 이는 기술 개발 진행 사항에 따라 서로 변경될 수 있다.

5년 내외로 단기적으로 산업화 가능성을 검토할 수 있는 산업화 모델은 〈표 V-1-2〉처럼 38개로 고려할 수 있다. 특히 통신 분야는 B2B요금제 출시 등 근래에 가시적인 결과들이 나타나고 있기 때문에 가장 단시간 내에 양자기술이 적용된 산업 분야가 될 것이다. 또한 양자컴퓨팅 분야가 적용되는 의료, 제약, 소재 분야에서도 산업화가 예상보다 앞당겨질 가능성이 높다. 특히 신약물질탐색을 위한 양자시뮬레이터의 개발은 COVID-19이후로 더욱 가속화되고 있기 때문에 그 가능성이 높다고 하겠다. 양자센서개발이 수반되어야 하는 제조, 반도체, 유틸리티 및 건설의 경우는 선진국들이 관련 양자센서 개발을 빠르게 진행하고 있기 때문에, 빠르게 진입해야 글로벌 시장에 영향력을 발휘할 수 있어 단기 내에 사업화가 시급하다고 할 수 있다.

표 V-1-2 주요 분야별 단기 산업화 모델(단기 산업화 검토 대상)

산업분야	기술분야	산업화 모델
국방·안보	양자통신	① 양자통신과 현대암호 Post-processing 알고리즘을 이용한 보안 서비스 ② 드론용 양자암호모듈 보안 서비스
	양자센싱	① 양자 무선주파수(RF) 수신 서비스 ② 양자레이더를 이용한 장거리 표적 감시 서비스 ③ 양자 라이다를 이용한 실시간 3D 공간 정보 제공 서비스
	양자컴퓨팅	① 암호체계 개발 서비스
통신	양자통신	① 고주파수 대역 광무선 통신 서비스 ② 유선 양자암호통신 서비스 ③ 양자암호 시스템 적용 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ④ 무선 양자인터넷 구현 서비스 ⑤ 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스 ⑥ 양자보안 기반 IP카메라 감시 서비스
제조·반도체	양자통신	① 스마트팩토리 통신망 서비스
	양자센싱	① 배터리 불량 검출 서비스 ② 가스 센싱 서비스
	양자컴퓨팅	① 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 서비스 ② 차량용 배터리 소재 최적화 서비스
의료·제약	양자통신	① 의료 데이터 전송서비스

산업분야	기술분야	산업화 모델
의료·제약	양자센싱	① 생체 자기(뇌자도, 척수 유발 자장, 심자도) 검사 서비스 ② 양자현미경 이용 비파괴 생물학적 구조 관측 서비스 ③ 진단 지원 서비스 ④ 양자현미경 및 양자내시경 이용 정밀 분석 서비스
	양자컴퓨팅	① 신약물질탐색 서비스 ② 단백질 구조 분석 서비스
소재	양자컴퓨팅	①배터리 소재 개발 서비스 ② 수소 연료 전지 개발 서비스 ③ 촉매 및 계면활성제 개발 서비스
금융	양자통신	① 블록체인 기반 금융 보안 서비스 ② 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스
	양자컴퓨팅	① 투자 솔루션 계산 서비스
교통·물류·항공	양자통신	① 양자암호 적용 자율주행 배송 서비스
	양자센싱	① 양자 라이다를 이용한 자율주행 서비스
	양자컴퓨팅	① 교통망 경로 최적화 서비스
기타 산업	양자통신	① 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화 지원 서비스
	양자센싱	① 양자중력센서 기반 지하통신시설물 위치 파악 서비스 ② 통신선로 단락 검출 서비스 ③ 가스 센싱 및 모니터링 서비스
	양자컴퓨팅	① 날씨 예측 서비스

〈표 V-1-3〉의 68개 산업화 모델은 중장기적으로 집중해야 할 분야를 기술한 것이다. 다수의 분야는 단기 산업화 모델의 발전과 함께 성장가능한 분야로 특히 통신 분야의 경우는 관계성이 높을 것으로 보인다. 국방, 안보 분야의 경우는 중장기적으로 접근해야 하는 분야로, 양자센서 및 양자컴퓨팅 기술이 수반되는 경우 비약적인 발전이 가능한 분야로 복합적이고 다각적으로 검토가 필요할 것으로 보인다. 다른 분야도 마찬가지로 양자기술의 한 분야의 발전만으로는 산업화가 어렵고, 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨팅 분야의 기술 개발이 동시에 이루어지는 경우에 산업화가 가능할 것이다.

표 V-1-3 주요 분야별 중장기 산업화 모델(중장기 산업화 검토 대상)

산업분야	기술분야	산업화 모델
국방·안보	양자통신	① 인공위성 양자키 분배 네트워크 구현 서비스 ② 자유 공간 양자통신 서비스 ③ 우주 안보를 위한 양자통신위성 서비스
	양자센싱	① 자이로스코프 항법 서비스 ② 양자 자력계 수중 감시 서비스 ③ 양자 이미징 서비스 ④ 전체 무선주파수(RF) 통신 서비스 ⑤ 양자항법시스템을 이용한 선박 위치 탐지 서비스 ⑥ 양자위성을 이용한 우주 소형 물체 감시 서비스

산업분야	기술분야	산업화 모델
국방·안보	양자컴퓨팅	① 방어 시나리오 생성 서비스
통신	양자통신	① 소형 양자키 분배 시스템 공급 서비스 ② 양자암호통신 포함 양자인터넷 서비스 ③ 무선 양자암호통신망 서비스
제조·반도체	양자통신	① 생산라인 장치 모니터링 서비스 ② 반도체 공정용 원격 설비 관리 서비스
	양자센싱	① 건축 자재 결함 감지 서비스
	양자컴퓨팅	① 반도체 미세구조 설계 서비스 ② 제조 공정 모니터링 서비스 ③ 화학 물질 양산화 서비스
의료·제약	양자통신	① 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ② 의료 사이버 보안 서비스
	양자센싱	① 질병 감염 여부 진단 서비스 ② MRI 진단 서비스 ③ 양자 MRI 의료진단 서비스
	양자컴퓨팅	① 양자 이미징 플랫폼 서비스 ② 암 치료 제안 서비스 ③ 맞춤 의료 서비스 ④ 방사선 치료 서비스 ⑤ 게놈 결과를 연결한 의료 서비스 ⑥ 에너지 모델링을 통한 주요 약물 발견 서비스 ⑦ 저분자 제약의 효율성 강화를 통한 신약 설계 서비스 ⑧ 새로운 생물학적 제재 개발 서비스 ⑨ 보험료 산정 및 위험 분석 서비스
소재	양자컴퓨팅	① 저류층의 채굴량 탐사 서비스 ② 화학물질 개발 서비스 ③ 신소재 개발 서비스
금융	양자통신	① 금융데이터 분석 및 보안 서비스 ② 금융 보안 서비스
	양자컴퓨팅	① 위험 분석 서비스 ② 금융 플랫폼 서비스 ③ 고객 타켓팅 및 예측 서비스 ④ 리스크 프로파일링 서비스 ⑤ 거래 최적화 서비스

산업분야	기술분야	산업화 모델
교통·물류·항공	양자센싱	① 항공기 시각주기유도 서비스 ② 주행 정확도 및 안전 개선 서비스 ③ 항공기 시스템 모니터링 및 유지보수 서비스
	양자컴퓨팅	① 교통관리 서비스 ② 자동차 전자 제어 장치 암호화 서비스 ③ 항공기 디자인 최적화 서비스 ④ 비행 게이트 할당 서비스 ⑤ 항공 화물 적재 최적화 서비스 ⑥ 항공 운항 시스템 최적화 ⑦ 콘텍스트(Context) 활용 맞춤화 서비스 ⑧ 항공사 네트워크 최적화 서비스 ⑨ 자동차 전자 제어 장치 암호화 서비스 ⑩ 물류자원 최적화 서비스 ⑪ 도심항공 모빌리티 교통망 제어 서비스
기타 산업	양자통신	① 양자 광자 트윈 구현을 통한 6G와 네트워크 서비스 ② 개인 비서 서비스 ③ 양자 전자 선거 서비스
	양자센싱	① 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 서비스 ② 석유 및 가스 탐사 서비스 ③ 뇌파 활용 치안 서비스 ④ 화산 활동 감시 서비스 ⑤ 에너지 모니터링 서비스
	양자컴퓨팅	① 인공지능 향상 서비스 ② 전력망 운영 서비스 ③ 에너지 분야 기타 서비스 ④ 지하 자원 탐색을 위한 시뮬레이션 서비스

제2장
양자통신분야 산업화 모델

제1절 개요

양자암호, 양자전송, 양자네트워크를 포함하는 양자통신은 현재 암호기기의 메시지 암·복호화에 필수적인 비밀키 교환에 집중되고 있지만 향후 양자기기 간 양자상태 정보전송으로 확장될 것으로 보인다. 초기에는 단거리 응용 분야 적용을 위한 상용화 기술 개발을 통해 암호화가 필요한 금융, 의료, 연구, 행정, 국방망 등에 사용되어 점진적으로 시장을 확대하고, 궁극적으로는 양자중계기 기반 장거리 광섬유 및 위성 링크를 기반으로 하는 안전한 글로벌 양자통신 네트워크로 발전시키고자 하는 것이다. 또한 양자컴퓨터, 양자센서 등의 양자정보처리 노드 간 양자정보를 전송하고, 양자정보처리 자원(Resource)을 공유하고 분배하는 양자인터넷이 형성될 것으로 예상된다.[2)]

본 장에서는 양자통신 분야에서 국방, 의료, 금융 등 7개 산업영역으로부터 총 29개의 산업화 모델을 소개한다.

표 Ⅴ-2-1 양자통신 주요 분야별 산업화 모델 개요

구 분	산업화 모델
국방·안보	① 인공위성 양자키 분배 네트워크 구현 서비스 ② 양자통신과 현대암호 Post-processing 알고리즘을 이용한 보안 서비스 ③ 드론용 양자암호모듈 보안 서비스 ④ 자유 공간 양자통신 서비스 ⑤ 우주 안보를 위한 양자통신위성 서비스
통신	① 소형 양자키 분배 시스템 공급 서비스 ② 양자암호통신 포함 양자인터넷 서비스 ③ 무선 양자암호통신망 서비스 ④ 고주파수 대역 광무선 통신 서비스 ⑤ 유선 양자암호통신 서비스 ⑥ 양자암호 시스템 적용 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ⑦ 무선 양자인터넷 구현 서비스 ⑧ 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스 ⑨ 양자보안 기반 IP카메라 감시 서비스
제조·반도체	① 스마트팩토리 통신망 서비스 ② 생산라인 장치 모니터링 서비스 ③ 반도체 공정용 원격 설비 관리 서비스

2) 정보통신기획평가원 (2020)

구 분	산업화 모델
의료·제약	① 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ② 의료 데이터 전송 서비스 ③ 의료 사이버 보안 서비스
금융	① 블록체인 기반 금융 보안 서비스 ② 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스 ③ 금융데이터 분석 및 보안 서비스 등 ④ 금융 보안 서비스
교통·물류·항공	① 양자암호 적용 자율주행 배송 서비스
기타 산업	① 양자 광자 트윈 구현을 통한 6G와 네트워크 서비스 ② 개인 비서 서비스 ③ 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화 지원 서비스 ④ 양자 전자 선거 서비스

〈표 V-2-2〉에 기술한 것처럼 미국 AT&T, 중국 Huawei, 스위스 IDQ, 영국 BT, 독일 Deutsche Telekom에서 추진하는 QKD 실증을 비롯해 EU에서는 QKD 오픈테스트베드를 구성해 상용화에 나서고 있다.[3)]

표 V-2-2 글로벌 양자통신 기업 동향

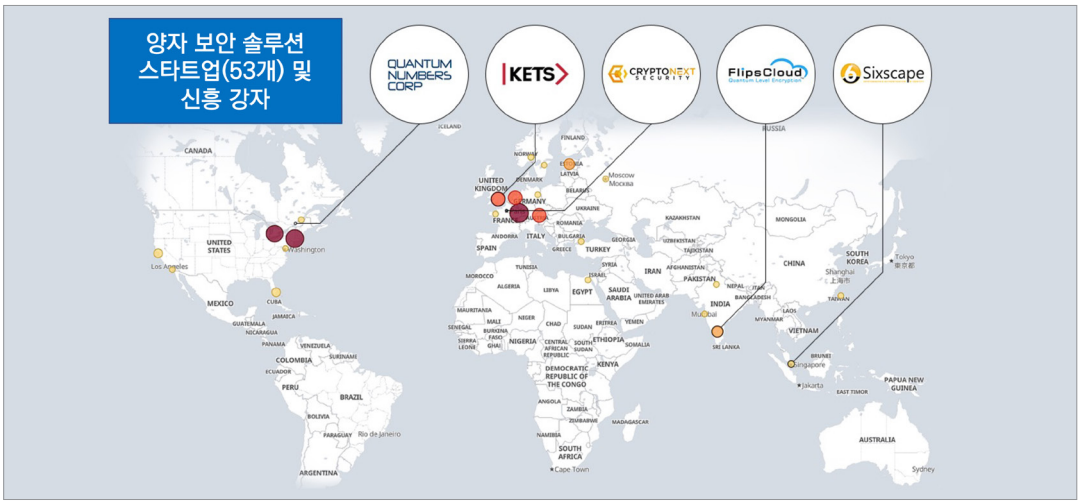
구분	주요 서비스
ID Quantique(스위스)	양자 통신 부품 및 QKD 시스템 제공, 유럽 일대 다수의 금융정보 백업 및 클라우드 망에 양자암호통신 상용 시스템 적용
AT&T(미국)	업계, 학계, 정부기관을 포함한 양자경제개발컨소시엄 합류, 2020 회계 연도에 4억 4,000만 달러 투입 예정(양자통신, 센싱, 컴퓨터 총괄)
BT(영국)	UKQN(UK Quantum Network) 프로젝트로 125km 상용등급 양자네트워크 테스트베드 구축
Huawei(중국)	2018년 안전한 통신 서비스를 위해 상용 광통신망에 양자암호를 적용하는 필드 시험 수행
Deutsch Telekom(독일)	도이치텔레콤 네트워크 시험망에 양자암호통신 시스템 적용
Toshiba(영국)	Cambridge Research Laboratory 설립, 고성능 QKD 시스템, 양자소자 연구
Quintessence Lab(호주)	기업용 안전한 부호화 모듈, 진정 양자 난수 발생기 제공, 캘리포니아 일대의 NASA 연구망(560km)에 자사 기술로 QKD 네트워크 구축
QuantumCTek(중국)	양자암호통신장비, 양자신호생성 및 검출 관련 상용제품 개발, 자국 내 판매
Quantum XCHANGE(미국)	미국 뉴욕 금융망에 양자 보호화된 네트워크 기술 제공 발표
Qutools(독일)	광자 검출기 및 양자 난수 생성기 등 상용 제품 출시 및 QKD 상용 장비 개발

※ 정보통신기획평가원 (2020)

3) 최대규 (2022)

최근 해외의 사이버 보안 솔루션을 연구하는 양자암호화 분야의 떠오르는 신흥 강자인 스타트업을 [그림 V-2-1]에 기술하였다.[4] 영국에 기반을 둔 스타트업 KETS는 안전한 통신을 가능하게 하고 민감한 데이터를 보호하기 위해 저전력 QKD 칩을 개발하였다. 이 칩은 보안 통신시스템 또는 기존 배포에 통합되어 양자보안 데이터를 제공, 악의적인 제3자는 물론 기존의 해킹 및 양자공격으로부터 네트워크를 보호하게 될 것이다. 캐나다 스타트업 Quantum Numbers는 난수를 생성하는 혁신적인 양자터널링 솔루션을 제공한다. Quantum Numbers의 QNG2 칩은 사물인터넷(IoT) 통신, M2M(Machine-to-Machine) 연결, 네트워킹 장비, 모바일 및 인터넷 트랜잭션, 클라우드 기반 애플리케이션을 보호하기 위해 하드웨어 암호화를 사용하는 다양한 회로 제품을 가능하게 한다. 다양한 인증기관 및 공급업체와 협력하여 차세대 양자안전 알고리듬을 만드는 싱가포르 회사 Sixscape는 고객이 미래의 양자공격으로부터 안전하도록 양자 암호화 산업 플랫폼 전반에 걸쳐 양자 안전 기술을 제공하기 위해 디지털 인증서, 디지털 서명 및 암호화에 사용할 암호화 애자일(Agile) 솔루션을 제공한다. 프랑스 스타트업 CryptoNext는 키 캡슐화 메커니즘을 사용하여 양자 안전 서명 및 키 교환을 제공하는 암호화 라이브러리를 개발하고 있다. 라이브러리는 보안 프로토콜 또는 보안 제품에 쉽게 통합할 수 있는 C로 작성된 양자 안전 알고리듬의 결과로 이 솔루션을 사용하면 IETF(Internet Engineering Task Force) 표준에 따라 가장 유망한 양자 안전 알고리듬을 선택할 수 있으며 양자 후 표준화 프로세스를 지원할 수 있다. 마지막으로 IoT, 클라우드 서비스 및 빅 데이터에서 적응형 방어 기술을 보호하기 위해 양자 수준 암호화 솔루션을 만드는 대만 스타트업 FlipsCloud는 사이버 공격으로부터 대부분의 네트워크를 보호하는 양자수준 암호화 서비스를 제공하고 공개키 암호화 인프라를 배포하는 등 양자컴퓨팅에 저항하는 대응물을 구축하고 있다.

그림 V-2-1 양자보안 솔루션 53개 기업



※ StartUs Insight Research Blog (2022)

4) StartUs Insight Research Blog (2022)

한국은 2020년부터 올해까지 양자암호통신 인프라 구축 사업을 진행하여 초기 레퍼런스 확보를 위해 공공·민간분야 실증을 추진했다. 그 결과를 바탕으로 2022년 4월 LG유플러스에서 양자내성암호 B2B 요금제를, 7월 KT와 SK브로드밴드에서 양자암호통신 B2B 요금제[5]를 출시하여 상용화를 위한 초기 기반을 마련하였다. 우리로, EYL 등의 중소기업은 통신사와 협업하여 핵심부품 개발 및 수출을 진행하고 있다.

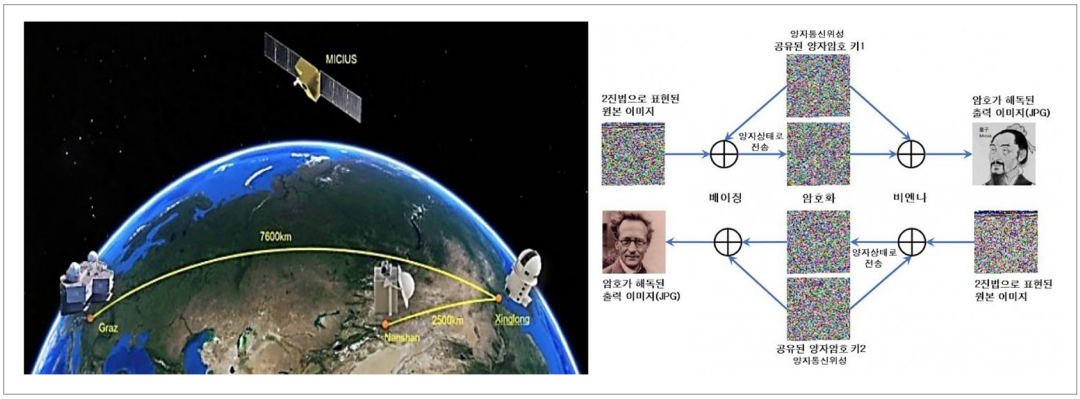
최근에는 양자암호통신 기술의 국가기관 및 공공기관 도입의 장벽이었던 보안제도를 국가정보원, 한국지능정보사회진흥원(NIA), 국가보안연구원(NSR), 한국전기통신기술협회(TTA), 한국전자통신연구원(ETRI)이 함께 마련해서 올해 시범 검증과 내년 시행을 앞두고 있다. 이에 국내 중소·벤처기업이 이 제도를 다양한 장비와 서비스에 활용하기 위해서는 보안제도에 대한 컨설팅 등 지원할 방안이 마련되어야 할 필요가 있다. 일부 유선구간 시범 서비스 기술은 확보하였지만 생산성, 기존 인프라 연동, 장거리 양자전송, 유무선 채널 등 추가 연구를 통한 시장 확대가 필요한 시점이다. 이에 산업 영역별 국내외 산업화 사례 소개를 통해 양자통신 분야의 산업 확장 가능한 분야에 대한 소개를 하고자 한다.

5) 서정윤 (2022)

1. 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스

광섬유의 문제는 약 300km 이상에서 일부 양자 정보를 전송할 수 있지만 초당 약 1비트 미만으로 얻을 수 있어 초당 메가비트 또는 기가비트 단위 양자키 분배 (Quantum Key Distribution, QKD)를 수행하려면 유선 기반 QKD의 통신 거리에 대한 한계와 기술 발전의 시간적 한계의 발생으로 인해, QKD 네트워크를 글로벌하게 연결하기 위한 인공위성 QKD 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 2018년 위성을 신뢰 연계점으로 사용하여 중국과 오스트리아 총 7,600km 거리에서 양자키 분배를 수행하기 위해 중국의 싱룽현, 난산구, 오스트리아 Graz에 지상국을 두고, 인공위성 Micious는 태양동기궤도를 따라 회전하며 지상국과 QKD를 수행하였다. 날씨에 따라 1,000km에서 3kbps, 600km에서 9kbps의 양자키를 분배하였으며, 1~2.4%의 QBER의 결과를 얻었다고 발표했다.[6)]

그림 Ⅴ-2-2 중국의 묵자(Micius)호 양자통신 및 과정



※ 동아사이언스 (2018)

영국에 기반을 둔 스타트업 Arqit는 2년 안에 위성을 발사해 전 세계에 양자네트워크 제공을 목표로 하고 있다.[7)] 최근 미국 Northrop Grumman과 영국 BT와의 협력을 발표한 Arqit은 Virgin Orbit의 LauncherOne을 통해 2023년 영국의 스페이스포트 콘월에서 두 개의 QKD 위성을 발사하는 것을 목표로 하고 있다. 표준 구성 요소를 기반으로 설계된 Arqit의 약 300kg짜리 QKD 위성은 고도 700km에서 궤도에서 지구까지 양질의 전송을 제공할 수 있다. 또한 2021년 5월 캐나다와 영국의 연

6) 동아사이언스 (2018)

7) David (2021)

구팀은 2022년 이후 양자암호화 및 과학 위성(QEYSSat)에서 테스트 할 실험적인 QKD 페이로드를 개발한다고 발표했는데, 대서양을 사이에 두고 지상 간에 양자 암호화키를 전송하는 것을 목표로 하고 있다.

한국 한화시스템은 위성 간 링크의 주요 기술인 인공위성 초정밀 지향·추적 기술과 KT의 양자암호 기술을 접목, 레이저 통신 기반의 무선 양자암호통신 기술을 공동으로 개발할 계획이다.[8] 두 회사는 초정밀 지향·추적 기술을 통해 양자통신의 원거리 송수신 성공률을 획기적으로 높여 무선 양자암호통신의 실용화를 앞당길 것으로 기대하고 있다.

한국 SK스퀘어 산하 자회사인 ID Quantique는 2023년 6월 유럽 최초 통신위성인 EAGLE-1 이니셔티브에 공식으로 합류하여 위성통신 기술과 양자키 분배(QKD) 기술을 활용, 분산된 지역에 걸쳐 암호화 키를 안전하게 전송하여 국가 양자통신 인프라를 연결하기 위해 양자난수생성기(QRNG) 기술을 기반으로 한 우주 인증 암호키 생성 시스템을 독일의 TESAT 스페이스콤에 제공할 예정이다.[9]

2. 양자통신과 현대암호 post-processing 알고리즘을 이용한 보안 서비스

완전한 보안 서비스를 제공하기 위해서는 QKD 시스템만으로는 부족하다. 기본적으로 일반적인 암호시스템은 무결성, 기밀성, 인증, 부인방지를 반드시 제공해야 하는데, QKD는 이 중에 기밀성만을 제공한다. 즉, QKD와 함께 완전한 보안 서비스를 구축하려면 이 기능을 양자적인 안전성을 바탕으로 제공할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 인증, 부인방지를 위해 은행과 같은 신뢰할 수 있는 기관을 두고 양자의 얽힘 특성을 이용한 프로토콜이 제안되었으나, 얽힘 광자쌍을 많이 준비해야 할수록 실제 구현에서 난도가 증가하며, 효율로 인한 실용성이 떨어진다. 무결성, 인증, 부인방지를 양자키를 기반한 현대암호로 수행하고, QKD로 기밀성을 제공하는 방식이 이상적으로 사용될 수 있으나, 양자컴퓨터의 발현에서도 안전하게 사용될 수 있을지는 미지수다. 양자통신과 현대암호의 Post-processing 알고리듬의 협력방안이 필요하다.[10]

8) 홍경표 (2022)
9) 홍성일 (2023)
10) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

3. 드론용 양자암호모듈 보안 서비스

2021년 7월 케이씨에스는 드론 전용 양자암호모듈 KMC 100D를 소개하였는데, 이는 실시간 영상 데이터 암·복화화, 기기인증 등 암호통신을 위한 다양한 보안 기능을 제공한다. 하드웨어 로직 기반의 암호 알고리듬이 탑재된 ASIC 암호칩을 활용하였으며, 텔레메트리 신호와 영상 신호의 암·복호화가 독립적으로 운영돼 성능을 최적화하여 실시간 수준으로 영상 암·복호화가 가능하다.[11)]

그림 Ⅴ-2-3 드론용 양자암호화 모듈(케이씨에스)



※ 박재희 (2021) 집필진 재구성

2022년 5월 KT는 독자 개발한 무선 QKD를 이용하여 국내 최장거리인 1km 구간에서 무선 양자암호를 전송하는 데 성공했고, 12월에는 제주국제대학교에 국내 처음으로 무선 양자암호통신망을 구축하였다.[12)] 이를 기반으로 지자체와 군부대 간 재난 대응 협력을 위한 Quantum-드론 서비스를 준비하고 있다.

11) 박재희 (2021)
12) 최진승 (2023)

4. 자유 공간 양자통신 서비스

오늘날 우주 영역은 그 중요성이 커지고 있고 선진국들이 사용하는 중요한 전장이 될 것으로 보인다. 위성은 항법, 지도 작성, 통신 및 감시를 위해 주로 사용되고 있으며, 종종 군사 목적으로도 이용되고 있다.[13] 예를 들어, 레이저 무기를 장착한 위성이나 카미카제 위성이 지구 궤도에 배치되는 등 위성과의 전쟁이 병행되고 있다. 항공 및 우주에서 양자통신에 대한 존재감은 점점 높아질 것이고 자유 공간 양자통신은 미래 양자인터넷의 중요한 채널이 될 것이다.[14] 단, 자유 공간 양자통신의 구현 가능성은 높지 않다. 실용화하기에 현재 성능이 충분치 않고, 양자 네트워크의 밀도가 낮고 매우 취약해 새로운 인프라와 더 많은 투자가 필요하다. 이에 향후 5년 동안 군사 또는 정부 위성 통신 서비스의 일부가 될 가능성은 적다고 할 수 있다.

하지만 양자통신은 연구 및 개발, 개념 증명 시연, 그리고 실험적이고 상업적인 응용을 위해 항공 및 우주 영역에서 주로 두각을 나타낼 것으로 예상된다. 반면 안정적인 양자메모리와 고속 양자광학이 등장하면 2030년 이후에는 공간적 존재감이 큰 양자인터넷 구축이 시작될 수도 있다. 미래에는 양자통신으로 보안이 가능한 고속 데이터 전송을 레이저 통신을 활용해 양자통신을 구현할 수 있을 것이고, 양자내성암호화(Post-Quantum Cryptography, PQC)와 같은 단순한 소프트웨어 업데이트일 수 있다. 배포 기간이 더 짧고 기존 네트워크 또는 인터넷 인프라를 사용할 수 있는 데다 오늘날 선호되는 솔루션이기 때문에 양자암호화를 위한 2차 개발로 사용될 수 있을 것이다.

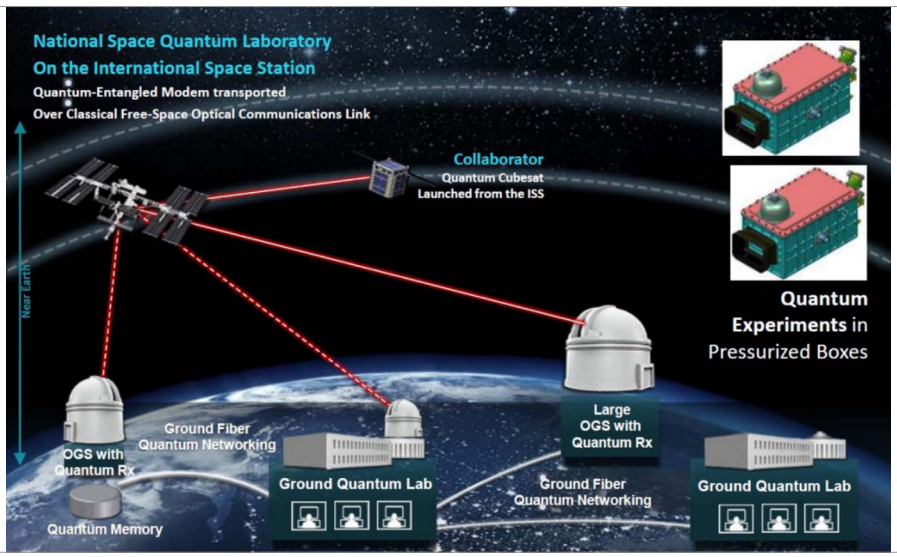
아직까지 PQC는 고전적 또는 양자암호화 분석 공격에서 완벽한 안전을 입증할 수 없지만, 곧 출시될 예정이며 가까운 미래에 양자 공격에 대한 대응능력을 갖출 것으로 보인다. 2022년 NSA 권고에 따라 미국 백악관은 기관들이 2035년까지 PQC로의 이동을 시작하도록 지시하는 각서를 발표하였고, 미국 국토보안부는 이 시기를 당겨 2030년까지 시스템 이동을 목표로 하고 있다. 이처럼 자유 공간에서의 양자통신은 보안과 직결되는 문제로 보고 있으므로, PQC를 구현할 방안과 기술을 확보해야 할 것이다.

13) Michal Krelina (2021)
14) Michal Krelina et al. (2023)

5. 우주 안보를 위한 양자통신위성 서비스

위성 기반 양자통신은 장거리 통합 양자네트워크에 필수적으로 현재의 양자통신위성은 중앙 지점이 신뢰할 수 있는 중계기 또는 스위치로 작동되어 보안을 강화하고 있지만, 문제점은 위성 제어 시스템에 대한 사이버 공격의 가능성이 있다는 것이다.13) 더 나은 보안을 위해서는 안전한 영역에서 작동하고 양자 중계기로 작동하는 Measurement Device Independent(MDI-QKD) 프로토콜을 사용하는 것이다. 미국 NASA는 양자통신 인프라를 국제 우주 정거장에 배치하고 양자정보과학연구 커뮤니티와 협력하여, 새로운 양자기술을 특성화하여 장거리에서 분산된 양자상태에 의해 가능한 새로운 양자시스템 응용 프로그램을 평가하는 데 사용할 수 있는 National Space Quantum Laboratory(NSQL)를 제공하는 프로그램을 수행하고 있다.[15] 양자 자유공간 통신 링크를 위해 빔 포인팅, 수집 및 추적과 RF 또는 lasercom 터미널 기술을 제공하는 기존 통신 채널도 필요하다. MIT-LL은 LEO-to-GEO(저궤도에서 정지궤도) 양방향 크로스링크 및 달 다운링크용 고속 통신을 시연하는 데 사용할 NASA용 차세대 lasercom 터미널 하드웨어를 NASA의 자유 공간 lasercom 패스파인더의 첫 번째 우주 양자통신 링크를 시연하는 데 사용될 것이다. 2022년 6월부터 통합 레이저 통신 릴레이 데모(Laser Communication Relay Demonstration, LCRD)의 저궤도 사용자 모뎀 및 증폭기 터미널(ILLUMA-T) 프로그램은 국제 우주정거장에서 이 차세대 레이저 통신 터미널을 호스팅하고 있다.[16] 양자모뎀과 통합된 ILLUMA-T lasercom 터미널은 고속 공간-지상 얽힘 분포를 시연하고 이중 스팬 지상-접지 링크 및 소형 위성의 양자 교차 링크 가능성을 탐색하는 데 사용하게 될 것이다.

그림 Ⅴ-2-4 얽힘 기반 양자네트워크 환경 (NASA)



※ Hamilton et al. (2019)

15) Hamilton et al. (2019)

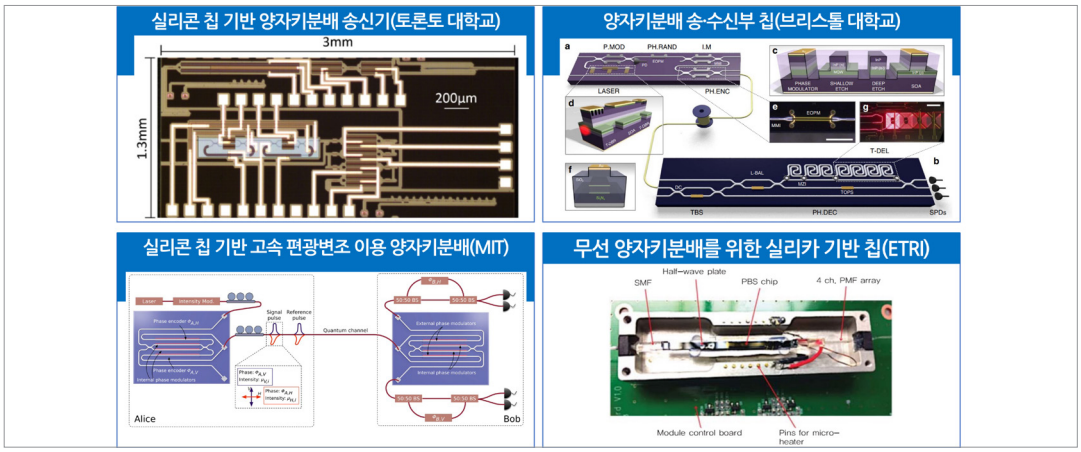
16) Katherine Schauer (2023)

제3절 통신

1. 소형 양자키 분배 시스템 공급 서비스

QKD 시스템의 상용화를 위해서는 경제적인 경쟁력이 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서는 QKD 시스템의 소형화를 위한 칩 기반의 QKD 시스템의 연구가 필요하다.[17] 광 직접 소자를 이용한 QKD 소형화 연구는 2010년대부터 활발히 이루어졌다. [그림 V-2-5]에서처럼 캐나다 토론토대학교 Lo 연구팀의 QKD를 위한 실리콘 칩은 표준 공정으로 제작되었으며 1.3mm×3mm의 크기에 펄스발생기, 강도변조기, 가변광감쇠기 및 편광변조기를 집적화하였다. 영국의 브리스톨대학교의 O'brien 연구팀은 InP 기반 QKD 송신기와 SiOxNy 기반 수신기를 공정하여 고속의 QKD를 수행하였는데, BB84를 포함하여 Coherent One Way, Differential Phase Shift 프로토콜의 QKD가 가능한 형태의 송·수신부 칩을 제안하였다. 미국 MIT의 Dirk Englund 연구팀은 실리콘 칩 기반 고속편광제어를 통해 QKD를 실제 환경에서 구동하여 도심 43km 거리에서 157kbps의 비밀키 생성 속도를 보였다고 발표했다. 이 외에도 덴마크, 중국에서 칩 기반의 QKD를 위해 연구 중이다. 한국 ETRI에서 발표한 무선 QKD를 위한 SiO_2기반 편광 인코딩 칩 모듈은 편광빔분리기, 반파장판, 빔분리기를 하나의 칩으로 집적했는데, 무선 QKD를 위한 송신부로 사용될 수 있다. 이를 이용하여 낮 환경에서 성공적으로 QKD를 수행하였다. 한국 KIST에서는 $LiNbO_3$를 이용하여 QKD 필요한 능동, 수동 소자를 구현하는 연구를 진행 중에 있다.

그림 V-2-5 국내외 상용 양자 키 분배 시스템 소형화 동향



※ 박병권·한상욱 (2022) 집필진 재구성

17) 박병권·한상욱 (2022)

한국 보안 스타트업인 EYL이 개발한 양자난수 기술 적용 초소형 암호칩이 미국 공군이 사용하는 드론 등 무인정찰기에 들어가고 있다.[18] EYL은 [그림 V-2-6]처럼 지난 2021년 5월에 양자 난수 생성기와 암호기능의 단일칩 형태로 집적한 암호칩인 양자보안칩(Quantum Crypto Chip, QCC) 자체개발에 성공했다.[19] QCC는 기존 양자난수생성기의 성능을 높여 다양한 암호 알고리듬을 처리할 수 있는 가속기술과 암호키를 안전하게 보관하는 HSM, eFlash 기술을 칩 하나에 구현해 기존 암호칩 대비 높은 보안성을 제공한다. ARM 코어텍스(Cortex)-M4 코어와 양자난수생성기로부터 발생되는 무작위 현상을 회로에 접목, 소비전력 분석 등을 통해 암호키를 외부로부터 해킹하는 부채널 방어기술도 포함하고 있다. 2023년 6월에는 국가 공공기관에서 암호모듈의 안정성과 구현 적합성을 평가하는 제도인 국정원 암호모듈 검증(Korea Cryptographic Module Validation Program, KCMVP)을 획득하여 Quantum Shieldz 브랜드로 론칭하였다.[20] KCMVP 획득을 통해 자난수? 기반 도청방지(비화기) 솔루션, 사용자 인증, 구간 암호화 등 다양한 보안 솔루션에서 암호기능을 사용하는 모든 개체에 대한 검증필 암호모듈을 적용했다. 이에 보안이 중요한 자율주행, 드론을 포함한 IoT 전 영역에 적용할 수 있는 검증된 암호모듈이 포함된 칩으로서 가격 경쟁력도 갖춰 활용처가 확대될 것으로 기대하고 되고 있다.

그림 V-2-6 EYL 개발 초소형 암호칩과 퀀텀크립토칩



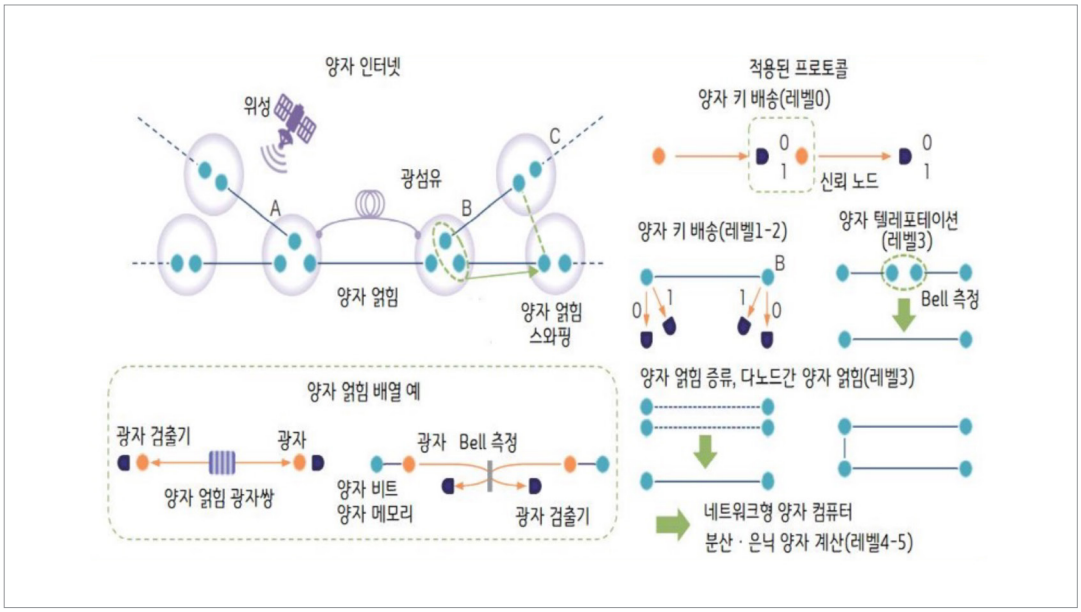
※ 전자신문 (2020), 최태우 (2021) 집필진 재구성

18) 오다인 (2020)
19) 최태우 (2021)
20) 김영명 (2023)

2. 양자암호통신 포함 양자인터넷 서비스

양자인터넷의 최종 형태는 지금처럼 컴퓨터나 센서가 인터넷에 연결되어 작동하는 대규모 네트워크형 양자컴퓨터이다.[21] [그림 V-2-7]과 같이 인터넷상의 각 노드에 배치된 양자컴퓨터 및 양자센서 등은 양자얽힘에 의해 연결되고 양자통신에 의해 배포된다. 그래서 양자컴퓨터 안에 형성된 양자네트워크를 양자인터넷이라 부르기도 한다. 이처럼 양자얽힘에 의해 연결된 양자디바이스군으로 구성된 양자인터넷은 하나로 작동하며, 양자텔레포테이션을 사용하는 다양한 양자 프로토콜을 실현할 수 있는 만능성을 가진다. 네트워크상의 임의의 결절점 사이에서 QKD를 수행하는 것도 가능하다. 양자인터넷 구상에서는 자율주행과 마찬가지로 가능한 태스크에 따라, 필요로 하는 양자인터넷상의 각 노드의 기술 레벨에 따라 레벨 0~5로 나뉜다. 레벨이 높은 노드 기술은 레벨이 낮은 노드 기술을 포함하기 때문에, 기본적으로 레벨이 높은 인터넷은 레벨이 낮은 인터넷의 기능을 포함한다. 하지만 통신 속도 등의 다른 지표에서는 반드시 그렇지만은 않다.

그림 V-2-7 양자암호통신을 포함한 양자인터넷 개념도



※ IRS Global (2022)

21) IRS Global (2022)

미국은 에너지부를 중심으로 2020년 양자인터넷 청사진 전략을 제시했는데, 향후 10년 안에 세계적인 규모의 양자인터넷의 프로토타입이 실현될 것을 염두에 두고 연구 방침을 정리하였으며, 각국의 프로젝트와도 보조를 맞추고 있다. 일본 총무성은 레벨 0을 중심으로 하는 양자보안통신 프로젝트를 보유하고 있고, 문부과학성에서는 양자컴퓨터 개발의 일부로 Moonshot형 연구개발 사업인 네트워크형 양자컴퓨터를 연구하고 있다.

한국은 2022년부터 핵심원천기술개발을 시작으로 3단계에 걸쳐 실용화기술 개발까지 진행 중에 있다. 1단계에는 ETRI의 양자인터넷 구현을 위한 유선양자중계기 개발과 경량형 무선 양자중계기 플랫폼 기술개발, 서울대학교의 이온트랩 기반 양자메모리 개발 및 이를 이용한 양자네트워크 핵심 기술개발, 연세대학교의 원자앙상블 기반 양자메모리, KRISS와 광주과학기술원(GIST)의 고체소재 기반 양자메모리 개발 등이 있다.

3. 무선 양자암호통신망 서비스

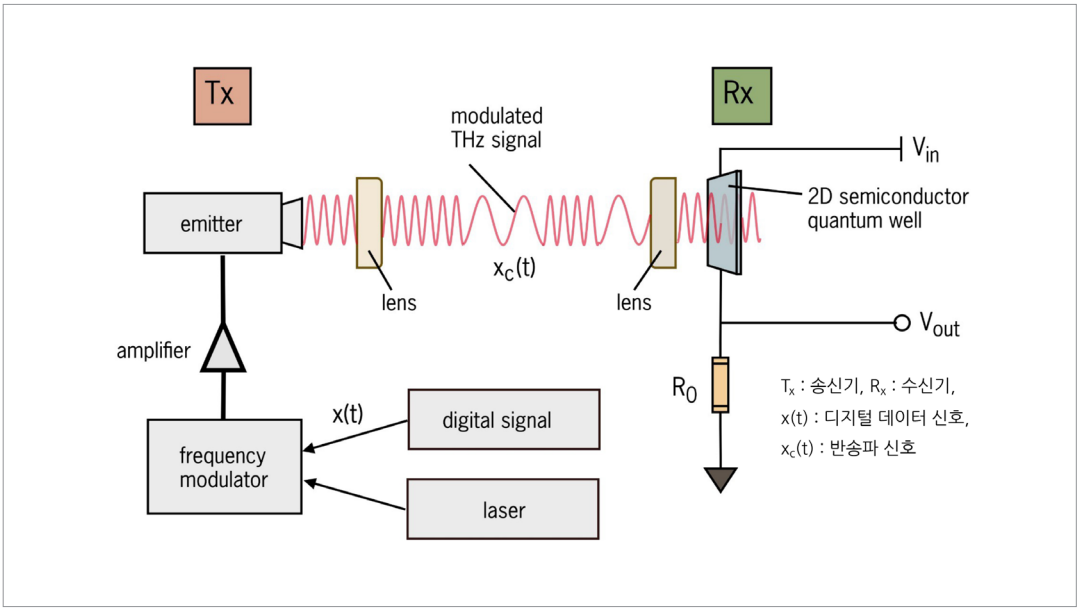
양자암호통신은 양자 채널을 구성하는 방식에 따라 유선과 무선으로 나뉜다. 유선 방식은 고정된 지점 사이에 광케이블을 연결해 암호키를 생성한다. 반면에 무선 방식은 산악이나 도서 지역같이 광케이블을 설치하기 어려운 곳이나 광케이블을 연결할 수 없는 이동체에 안전한 통신을 제공한다.[22] 2023년 KT는 제주국제대학교에 무선 양자암호통신을 활용한 문서 공유 플래폼을 상용망 환경에 처음으로 구축했다. 파일 업로드를 위해 QKD 송신장비가 복제 불가능한 암호키가 담긴 광자를 쏘고 난 후 2초 내에 약 340m 떨어진 곳에서 수신장비에서 동일한 암호키를 받는 실험에 성공함으로써, 양자암호시스템에서 생성된 암호키를 이용해 문서를 빠르고 안전하게 암·복호화 할 수 있는 서비스를 실현하였다. 2023년 8월 한국 라이트론은 한국전자통신연구원이 주관하는 양자암호통신용 국책과제 사업 가운데 '5G 프리패스페이스광학(FSO)용 스패드(무선 양자암호통신용 단일광조 포토 다이오드) 모듈 사용화 개발'연구 과제에 참여하고 있다. 이 과제는 모바일 사용자의 증가와 고속데이터 수요가 증가한 도심의 고밀도 환경에서 저비용의 양자암호통신 인프라 구축을 목적으로 하고 있다.[23]

22) 구교형 (2023)
23) 최두선 (2023)

4. 고주파수 대역 광무선 통신 서비스

빠른 데이터 공유 및 처리에 대한 요구로 무선 통신 시스템에서 더 큰 대역폭을 확보하려는 경쟁이 심화되고 있다.[24] 이는 대역폭과 데이터 속도가 1년 6개월마다 약 두 배로 증가한다는 Edholm의 법칙에 따라 설명될 수 있다. 무선 네트워크가 한계에 가까워짐에 따라 더 빠른 데이터 속도에 대한 요구로 밀리미터 파, 테라헤르츠 및 광주파수와 같은 더 높은 주파수 대역이 필요하게 되었다. 단거리 무선 시스템에서는 밀리미터 파장이 채택되고, 광무선 통신은 더 높은 대역폭을 제공하지만, 안전 규정 및 소음 문제로 인해 개발의 어려움을 겪고 있다. 테라헤르츠(THz) 통신은 일상적인 응용, 마이크로프로세서와 같은 칩 규모의 응용에서도 매우 빠른 데이터 속도를 제공할 수 있다. THz 범위 내에서 작동하는 무선통신 방법은 작은 공간에 개별 컴퓨팅 부품 수 증가로 인해 발생할 수 있는 시스템 속도 저하 및 성능 저하에 대한 해법으로 등장하였다. 전자 파동 함수의 변경으로 인해 2차원 반도체에 주기적으로 파장을 가하면 전기전도성이 향상되고 전자와 불순물 간 산란 확률이 감소하게 된다. GaAs/AlGaAs 이종 구조를 기반으로 한 수 나노미터 두께의 반도체 양자 우물을 사용하여, THz 스펙트럼에 걸쳐 디지털 변조 신호를 수신하고 디코딩하는 새로운 접근 방식으로 인해 가장 작은 규모로 주파수 변조 무선 데이터를 감지하고 분류하는 단거리 통신을 위한 양자 무선 주파수 복조기가 가능해졌다. 이로써 칩 규모의 무선 통신 기술 구현이 가능해졌다.

그림 Ⅴ-2-8 테라헤르츠(THz) 주파수 범위의 단거리 무선 통신용 칩 규모 시스템



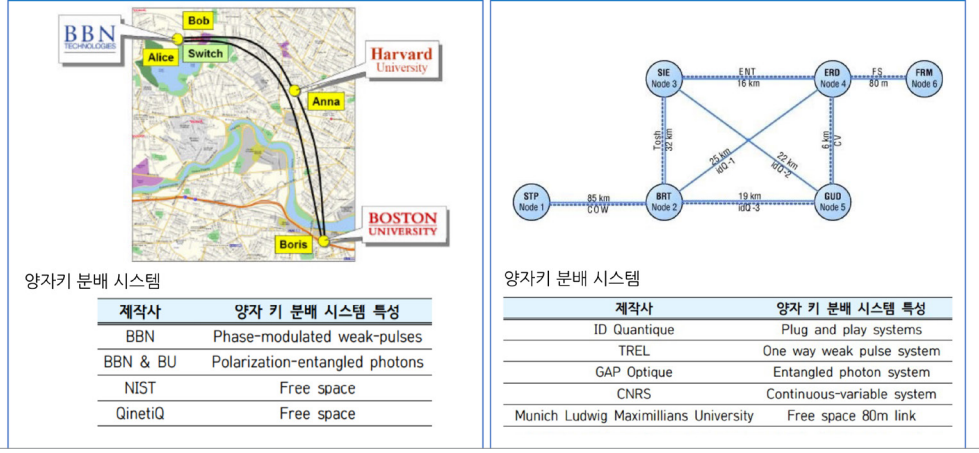
※ Kosala Herath et al. (2023)

24) Kosala Herath et al. (2023)

5. 유선 양자암호통신 서비스

양자암호 네트워크 분야에서는 양자암호시스템의 단대단을 넘어, 신뢰 연계점을 도심 중간에 배치하여 QKD를 통해 더 넓은 범위의 보안 통신망 구축을 위한 연구가 2000년대 초부터 연구되었다. 미국의 방위 고등 연구 계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 주도로 추진된 최초의 유선 기반 양자암호통신망 DARPA Quantum Network는 6개의 신뢰연계점인 하버드대학교, 보스턴대학교과 캠브릿지에 위치한 BBN Technologies에 이어 2004년에 시험 구동되었다. DARPA 양자네트워크는 총 10개의 QKD 시스템으로 구성되었으며, 서로 다른 4가지 종류의 QKD 분배 시스템이 사용되었다. 뒤이어 오스트리아에 구축된 양자암호통신 시험망인 SECOQC(Secure Communication based on Quantum Cryptography) 프로젝트는 세계 최초로 컴퓨터 네트워크를 보호하기 위한 목적으로 2004년부터 2008년까지 운영되었다. SECOQC 양자암호통신 시험망은 Vienna와 St. Poelten 사이에 6개의 노드로 구성되었으며, 각 노드는 전체 길이 200km인 총 8개의 Point-to-Point 양자 채널로 연결되었다. 8개의 신뢰연계점을 평균 20~30km로 연결하여 2008년에 컨퍼런스에서 전화, 화상통화를 시연하였다.

그림 Ⅴ-2-9 DARPA와 SECOQC 양자네트워크



양자키 분배 시스템

제작사	양자 키 분배 시스템 특성
BBN	Phase-modulated weak-pulses
BBN & BU	Polarization-entangled photons
NIST	Free space
QinetiQ	Free space

양자키 분배 시스템

제작사	양자 키 분배 시스템 특성
ID Quantique	Plug and play systems
TREL	One way weak pulse system
GAP Optique	Entangled photon system
CNRS	Continuous-variable system
Munich Ludwig Maximillians University	Free space 80m link

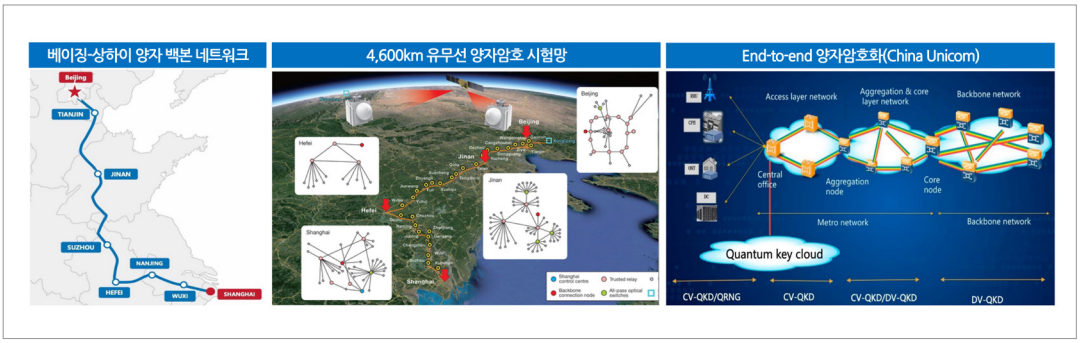
※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

스위스는 2009년부터 2011년 1월까지 ID Quantique의 QKD 장비로 프랑스에 위치한 유럽 입자물리학 연구소(CERN)와 제네바에 위치한 두 신뢰연계점을 연결하는 최초 장기적 국가 간 양자통신을 선보였다. 일본은 2010년에 총 6개의 신뢰연계점을 연결하고 각 신뢰연계점 간 다양한 양자암호 프로토콜로 QKD를 수행한 도쿄 양자암호 네트워크를 공개했는데 화상통화, 도청자감지, 신뢰연계점간 재구성을 시연하였다. 또한 국가정보통신기술연구소(NICT)를 통해서 실용적인 수준의 QKD 기술과 신

규 네트워크 응용을 개발 중이다. 2017년 7월 NICT는 통신위성인 SOCRATES를 활용한 우주-지상 간 QKD 실험에 성공하였다. SOCRATES에 실린 SOTA라는 양자암호통신 전송기에서 10Mbps 속도로 양자암호를 전송하였고, 이를 일본 코가네이에 위치한 지구국에서 수신에 성공하였다.

중국의 베이징-상하이 양자 백본의 경우, 2014년 2,000km 신뢰연계점 사이인 허페이, 우후시 도심에 각각 5개, 3개의 신뢰연계점을 배치하고 중간에 차오후시와 연결하는 총 9개의 신뢰연계점을 연결하였으며, 이후 베이징, 상하이, 허페이, 지난시의 정부, 군사, 금융, 전력 요충지에 다수의 신뢰연계점을 배치하였다. 최근에는 2016년 쏘아 올린 위성 기반 양자암호통신 구간을 포함하여 베이징과 상하이 간 2,000km 유선 구간과 싱룽와 난산을 잇는 2,600km의 무선 양자암호통신 구간으로 구성된 총 4,600km의 세계 최장 유무선 양자암호통신망을 운영 중에 있다. 중국과학기술대학에서는 2020년 2월 50km거리 광섬유 케이블로 메모리 간 양자얽힘 구현에 성공하였으며, 3월에는 509km TF-QKD로 장거리 양자암호통신 신기록을 갱신하였다.

그림 V-2-10 중국 양자 백본 네트워크 및 유무선 양자암호 시험망



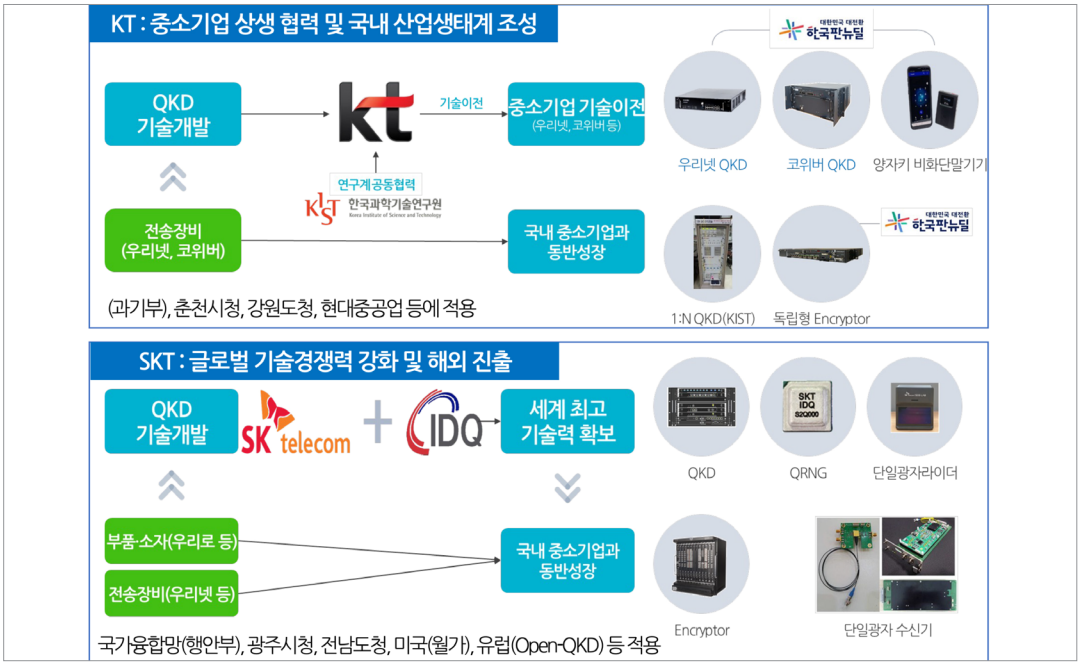
※지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022) 집필진 재구성

한국은 이동통신사의 양자암호통신 기술개발, 상용화 및 서비스 출시가 가속되고 있다. 한·미 정상회담에서도 향후 양국 간 양자암호통신 기술개발 협력 및 인력교류를 확대하기로 하였으며, 이에 과학기술정보통신부는 양자암호통신 인프라 시범구축을 추진하였다. 이러한 이유로 유선 양자암호통신은 다른 양자기술 대비 빠른 시일 내에 상용화 기반이 마련되었으며, 국내 통신사는 이를 확장하는 계획을 준비하고 있다.

KT는 공공 통신망 양자암호통신 적용과 관련하여 2020년 KIST와 공동연구를 통하여 서울 도심 반포, 강남, 서초, 양재와 우면동을 연결하는 QKD 네트워크망을 구축하였다. SK텔레콤은 2016년에는 QKD 장비를 활용하여 68km급 유선 QKD 국가시험망을 구현하였다. 2017년에는 5mm×5mm 크기의 초소형 양자난수생성 칩과 양자를 통한 장거리 통신 중계장치를 개발하였다. 2021년에는 기존

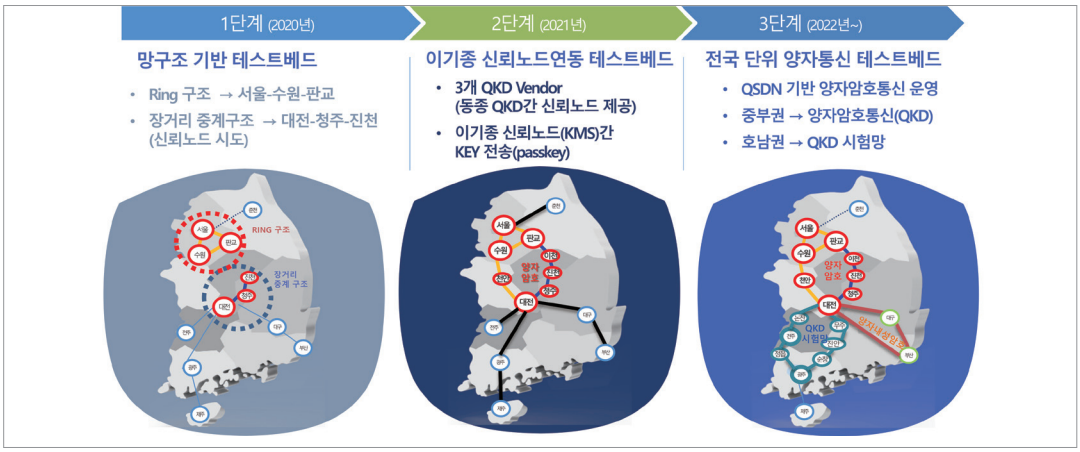
의 5G 전송망을 활용한 QKD 암호화 기술 접목을 시도하였다. 2021년 5월 발표에 의하면 앞으로 SK 텔레콤과 KT는 양자암호통신망을 혼용 구축해서 내부 양자암호 데이터를 서로 주고받을 수 있게 된다.[25] 서로 다른 이통사의 양자암호통신망을 혼용 구축하면 기술 개발 및 가격 경쟁을 유도할 수 있어 소비자 선택폭 또한 넓어질 것으로 전망되며 관리시스템도 통합되어 운영자가 다른 이통사의 양자암호통신망 장비를 한 번에 관리할 수 있게 돼 유지 보수가 쉬워질 수 있다.

그림 Ⅴ-2-11 국내 양자통신 현황(KT, SKT텔레콤)



※ NIA (2021) 집필진 재구성

그림 Ⅴ-2-12 양자암호통신 테스트베드 구축현황



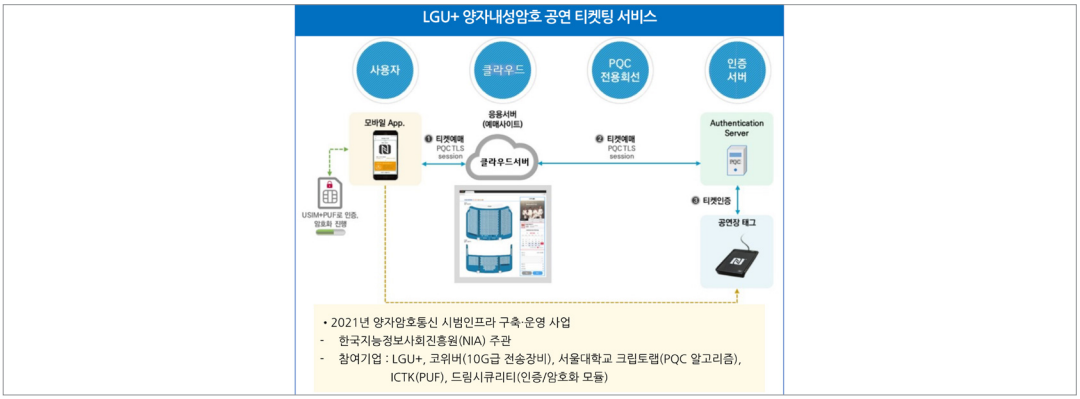
※ NIA (2022)

25) 정예린 (2021)

6. 양자암호 시스템 적용 공연· 엔터테인먼트 보안 서비스

2021년 6월 LG유플러스는 양자암호통신 인프라 구축사업을 통해 양자보안체계를 업그레이드하고, 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스에 양자보안을 확대 적용할 계획을 발표하였다.[26] 2020년 산업·의료 분야 전용회선에서 검증한 양자내성암호를 공연·엔터분야 응용서비스에도 확대 적용하는 것을 목적으로 하고 있다. 양자내성암호를 활용한 End-to-End 암호키교환 방식은 전송거리에 제약이 없고, 향후 해저케이블 구간에도 적용할 수 있다는 장점이 있으며 이미 구축한 전송망에 선로를 추가로 구성하거나 중계 노드를 만들 필요 없이 양단 구성만으로 보안을 구성할 수 있다. 이 때문에 데이터 전송의 전 계층과 국내외 고객전용망, 기간망, Access망, 모바일 코어망 등 각종 통신망, 비대면 국제회의/화상수업 등 다양한 서비스에 적용할 수 있어 확장성도 뛰어난 것으로 평가받고 있다. 더불어 2020년에 USB에 넣었던 양자난수기반 물리복제방지칩(PUF)을 유심(USIM)과 IC카드에 탑재해 개인정보 데이터베이스 관리, 공연티켓 예매/구매자 인증 강화, 안면인식 활용 산업체 출입보안 등 응용서비스에 활용한다는 것이다. PUF-USIM은 복제가 불가능한 물리적 고유키를 이용해 인증서를 내장하는 PUF 칩이 USIM 안에 들어간 보안이 강화된 유심으로 소형 디바이스, IoT기기 등에도 적용할 수 있다.

그림 V-2-13 양자암호 적용 사례(LG유플러스)



※ 천선우 (2021) 집필진 재구성

[그림 V-2-13]처럼 스마트폰을 통해 고객이 공연티켓을 예매하면 이 예매정보가 양자내성암호가 적용된 전용회선을 거쳐 LG유플러스의 인터넷데이터센터를 통해 구매정보 서버로 전달되고, 공연 전 고객이 티켓을 발권할 때는 양자보안이 적용된 PUF-USIM 인증기술을 통해 티켓 구매자임을 인증하게 돼 안전한 예매-발권이 가능해지는 것이다. 이는 티켓 구매 인증정보를 투명하게 처리해 암표거래도 방지할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

26) 천선우 (2021)

7. 무선 양자인터넷 구현 서비스

양자인터넷은 전파가 아닌 양자 신호를 사용하여 정보를 전송하는 상호 연결된 양자컴퓨터의 이론적 시스템이다. 이는 (물리적으로 지리적 공간에 걸쳐 네트워크를 연결하는 표준 통신 프로토콜과 같은) 고전적인 컴퓨팅을 통해 정보를 공유하며 상호 연결된 현재의 컴퓨터 시스템을 보완하기 위한 것이다. 양자인터넷은 고전 인터넷의 전문 분야로서, 매우 전문적인 응용을 위한 대안이 될 가능성이 높다. 광케이블을 설치하기 어려운 지역 또는 해양 및 우주 등 각종 제약사항이 발생할 수 있는 공간에 대한 암호통신의 필요성이 대두됨에 따라, 무선 양자인터넷 구현 서비스가 요구되고 있다. 2018년에 한국의 한국전자통신연구원(ETRI)에서 양자신호를 100m 떨어진 거리에 전송하는데 성공했다. 이는 햇빛이 강한 야외에서 양자신호를 전송하고 복원하는 데 성공한 세계 첫 사례로 꼽히고 있다. 이를 위해 주로 요구되는 기술에는 초소형 휴대용 양자암호통신 집적화 칩의 개발, 초정밀·경량화·장거리 무선 양자암호통신 기술의 개발, 기존 인터넷과 연계 가능한 유무선 양자인터넷 초기모델 개발 및 서비스 구현 등이 있다. 이러한 기술을 기반으로 양자통신 드론, 항공기, 위성 등에서 무선양자통신 실증과 구현 등도 필요할 것이다. KT는 2021년부터 무선 양자암호통신 기술 개발에 돌입했다. 2022년에는 한강 동작대교 1㎞ 구간에서 무선 양자신호 전송하고 제주대에서 300m 구간의 무선 양자암호통신 인프라를 시범 구축했다. 2023년에는 가평 청평호에서 구간 한계를 2㎞까지 확장시키는 데 성공했으며, 이를 내년까지 10㎞로 추가 확장시켜 정보통신 보안이 필수적인 국방 분야에도 활용될 수 있도록 하겠다는 방침을 발표했다.[27)]

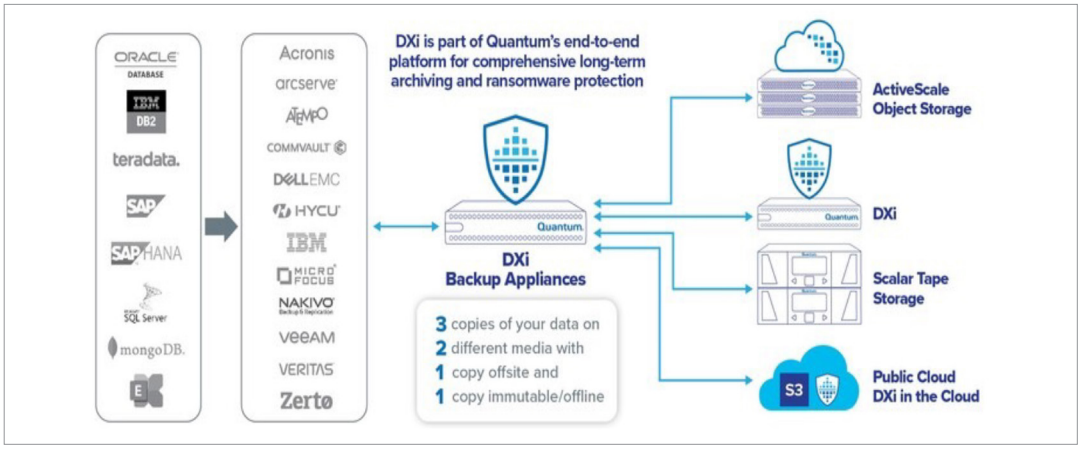
8. 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스

최근 클라우드 운용에 대한 인식이 더욱 고도화되어 공용 클라우드와 개인용 클라우드를 함께 쓰는 하이브리드 클라우드 환경 및 다양한 클라우드 서비스를 활용하는 멀티 클라우드 환경을 도입하는 기업이 늘고 있다. 인프라의 다양성을 늘릴수록 비용 효율, 위급 상황 발생 시 대처 역량 등은 향상하나 동시에 보안에 대한 우려로 공공기관이나 금융기관 등 보안 민감도가 높은 기관이나 기업은 클라우드의 장점에도 불구하고 도입을 하지 못하고 있었다. 이에 양자보안통신에 대한 관심의 증가에 맞추어 국가정보원, 한국지능정보사회진흥원(NIA), 국가보안기술연구소(NSR), 한국정보통신기술협회(TTA), 한국전자통신연구원(ETRI) 등에서 보안 제도를 마련하고 있어 복잡해지는 IT 인프라의 보안 해결책이 될 것으로 기대를 받고 있다. 2023년 9월 한국 퀀텀코리아는 고객이 온프레미스에서부터 다양한 멀티 클라우드 인프라를 원활하게 연결해 이상적인 하이브리드 클라우드 워크플로우를 구축할 수 있는 정책기반 데이터 이동 기술 등을 포함한 엔드투앤엔드 데이터 플랫폼을 발표하였다.[28)]

27) 김준혁 (2023)

28) 신동윤 (2023)

그림 Ⅴ-2-14 퀀텀코리아 엔드투엔드 데이터 플랫폼



※ 신동윤 (2023)

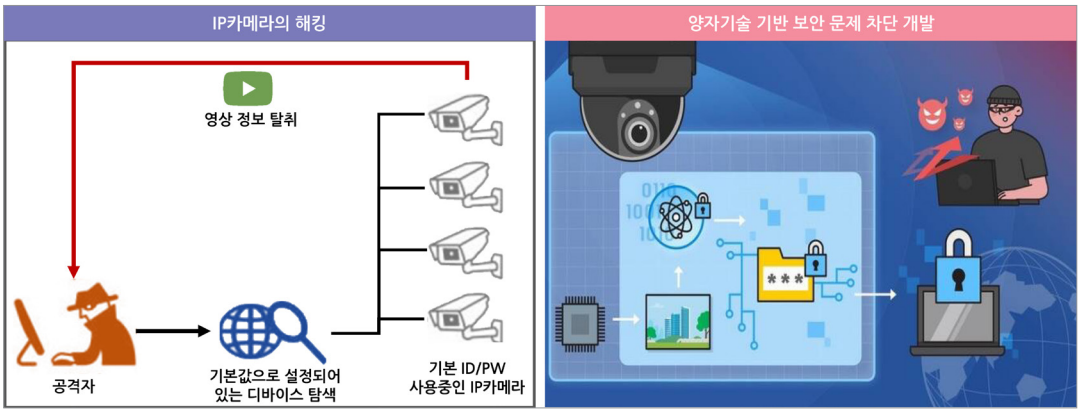
이는 고성능 백업, 데이터 보호, 재해 복구 등으로 클라우드 스토리지를 최대 70배 더 효율적으로 사용할 수 있고, 클라우드에서 빠르고 간단하게 데이터를 복제할 수 있으며 콜드 데이터 서비스(cold data services) 간에 오브젝트를 복제할 수도 있다. 이를 통해 비즈니스 위험과 비용을 줄여, 랜섬웨어에 대한 오프사이트 보호와 규제, 사내 데이터 규정 준수를 위한 백업 데이터의 장기 보존이 가능하다. 즉, 이 플랫폼은 고객이 전체 데이터 수명주기에서 비정형 데이터 요구 사항을 해결할 수 있도록 지원하는 것으로, 고객에게 선택권을 제공하고 고유한 요구와 목표에 맞게 설계된 유연한 하이브리드 클라우드 워크플로우를 운영할 수 있도록 지원한다. 이처럼 양자보안통신을 기반으로 외부 클라우드 환경도 기업의 내부망처럼 활용할 수 있게 만들면 클라우드 상의 다양한 기능을 해킹의 위험 없이 사용하여 비용 절감은 물론 디지털 트랜스포메이션을 한 단계 더 고도화할 수 있을 것으로 기대된다.

9. 양자보안 기반 IP카메라 감시 서비스

최근 중국산 IP카메라 제품을 대상으로 은닉채널에 의한 해킹 문제가 발생함에 따라, IP카메라의 이미지 생성 단계부터 암호화된 영상 전송 단계까지 전단계 보호에 대한 필요성이 대두되고 있다.[29] 이에 Photon Shot Noise 또는 Dark Shot Noise를 이용한 이미지센서 기반 양자난수 생성기술이 활발히 연구되고 있다.

IP카메라는 고품질의 이미지센서가 존재하기 때문에 추가적인 하드웨어 없이 양자난수를 생성할 수 있는 Dark Shot Noise 기반의 난수 생성 방법을 적용하기에 적합하다. 이러한 난수 생성 방법이 적용된 IP카메라는 이미지·비디오 해킹에 대한 우려를 해결할 수 있다. 양자난수생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG)가 탑재된 IP카메라 개발을 위해 한국과학기술연구원(KIST)은 보안 영상과 난수를 동시에 생성하는 CMOS 이미지센서 기반 양자난수 모듈을, 국민대학교는 KIST의 이미지센서 기반 난수로부터 엔트로피를 추출 및 양자난수기반 암호화 모듈을, 드림시큐리티는 IP카메라 적용 암호화 시스템 및 시연 시스템을, SDT는 영상 프로토콜과 Video Management System(VMS) 아키텍처를 설계한 후 양자난수발생기가 적용된 카메라를 각각 개발하고 있다. 이렇게 개발된 QRNG 탑재 IP카메라는 과학기술정보통신부 및 경찰청에서 시행한 「과학치안 공공연구성과 실용화 촉진 시범사업」에 적용될 예정이다. 산업적 영향 및 파급효과로는 해외산 IP카메라의 보안 이슈를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 해외 제조사들이 주도하는 국내 IP카메라 시장의 주도권 회복 및 해외 수출을 기대할 수 있다.

그림 Ⅴ-2-15 IP카메라 해킹 및 양자기술 기반 보안문제 차단 개발



※ 김지민 (2017), 윤현성 (2022)

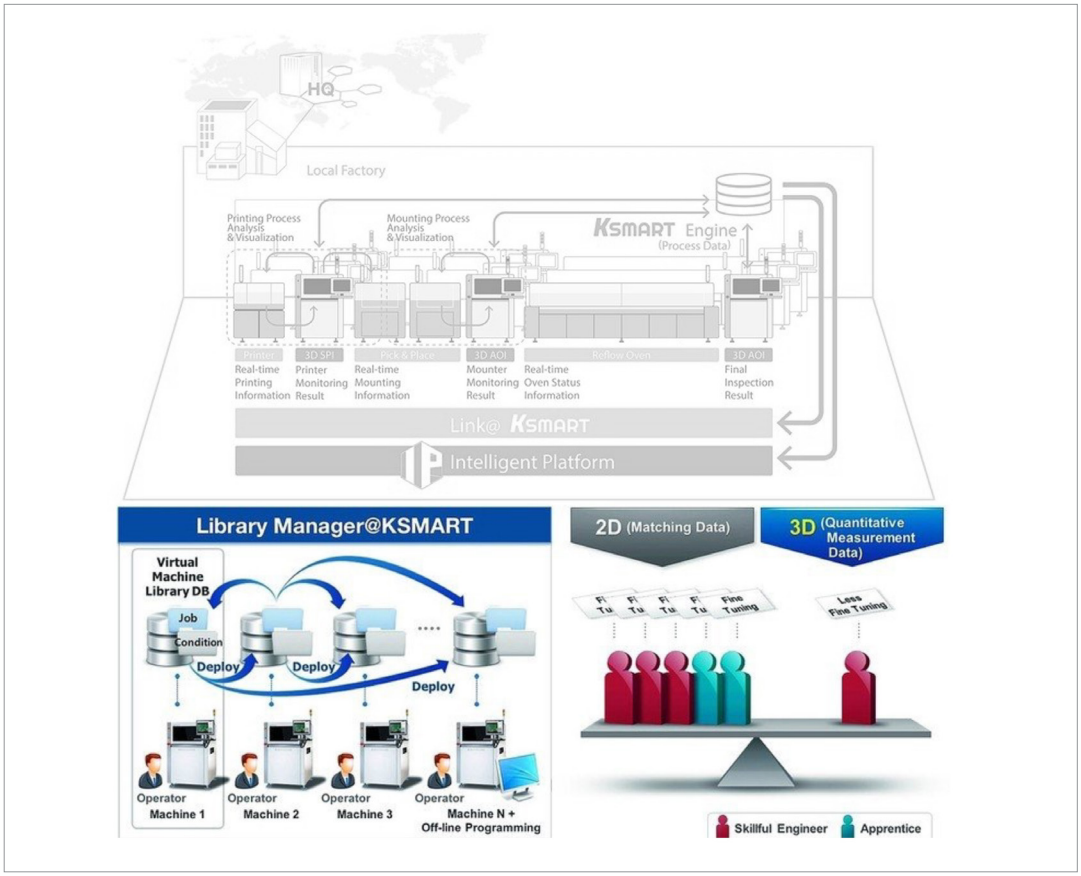
29) 김지민 (2017)

제4절 제조

1. 스마트팩토리

제조업 분야에서 효율적인 생산관리를 위해 대두되는 기술로 스마트팩토리[30]를 꼽을 수 있다. 4차 산업혁명으로 기존의 단순한 생산방식에서 벗어나 IoT, 빅데이터 등 정보통신기술과의 융합을 통해 생산과정의 최적화 및 생산성의 급격한 향상이 이루어질 것으로 전망된다. 스마트팩토리는 AI, IoT, 빅데이터 등 ICT 기술의 적용으로 데이터가 유기적으로 연결되고 이를 바탕으로 생산 공정이 스스로 제어된다. 그에 따라 제어시스템의 복잡도 증가로 발생한 취약점 대상 공격이 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 스마트팩토리 통신망에 양자암호통신을 적용하는 방안을 검토할 수 있다.

그림 Ⅴ-2-16 양자가 가져올 미래 공장



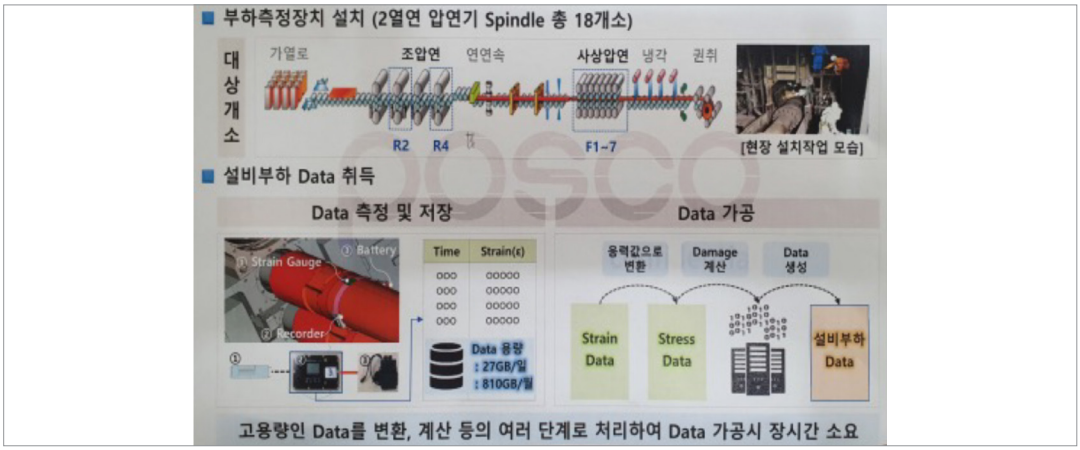
※ Koh Young (2017)

30) Koh Young (2017)

2. 생산라인 장치 모니터링 서비스

한국 포스코의 경우 철강 생산라인에 적용되는 장치의 모니터링에 대한 데이터의 처리와 암호화에 관심을 갖고 있는 것으로 확인되었다. 포스코와 같은 철강 기업의 경우 공정라인의 지속적인 모니터링에 대한 수요가 있으며, 이는 운용되는 장비의 수명과 직결되어 중요한 사안으로 생산라인의 원활한 운용을 위해 처리되는 데이터의 보안도 중요하게 다루어질 수 있다. 데이터가 전송되는 구간은 두 가지로 나뉠 수 있는데 공정라인 장비에서 수집되는 정보를 분석서버로 전송하는 구간, 분석 서버에서 계산된 데이터가 저장되는 DB서버 사이의 구간이 있다. 이 구간에 양자암호통신을 적용하여 모니터링 데이터의 보안성을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.[31)]

그림 Ⅴ-2-17 실시간 압연기 스핀들 응력 모니터링 체계(포스코)



※ 포스코 (2021)

3. 반도체 공정용 원격 설비 관리 서비스

반도체 제조는 웨이퍼 제작 및 정렬, 조립, 테스트, 패키징, 배송까지 많은 개별 단계로 구성된 복잡한 공정 흐름을 특징으로 하고, 일련의 과정 중 다수는 매우 정밀한 가공이 필요하다. 원격 설비 관리는 데이터 수집, 시스템 상태 모니터링, 장치 관리 등을 할 수 있는 동시에 진행할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 원격 현장의 디바이스에서 데이터를 효과적으로 감지, 수집 및 관리해야 하고, 감시 제어, 데이터 분석 및 시각화를 위한 추가 분석을 진행해야 할 필요가 있다. 현재는 Industry 4.0에 의해 현실 세계의 기계나 장비를 컴퓨터 가상 세계에 구현한 디지털 트윈 방식을 적용하여, 압축 공기 설비 시스템, 로봇, CVD/PVD 장비 모니터링 등 공정을 위한 전체적인 시스템을 통합 관리하기 위해 노력하고 있다.

31) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

하지만 현재 수준에서는 각 단계별로 모니터링하고 있어 이를 통합하는데 시간이 소요될 것으로 보인다. 또한 이 과정에서 중요한 데이터의 보안이 무엇보다 중요해지고 있다. 즉, 각 단계에서 수집되는 방대한 양의 데이터 보안을 강화하고 처리 속도 및 관리를 용이하게 하기 위하여 양자통신의 도입이 필요할 것으로 보인다.

제5절 의료·제약

1. 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스

의료 클라우드 서비스는 의료기관에서 의료데이터 및 환자정보 등을 클라우드에 모아 인터넷을 통해 이용 가능한 서비스이다. 현재의 외래진료, 입원진료, 원무 등 다양한 병원 업무를 표준 모듈 단위로 제공하고 다양한 규모의 병원 수요에 신속하고 경제적 대응을 위해 대용량 의료 데이터의 보호가 필요하다. 특히 1,000 병상 이상 상급종합병원의 엔터프라이즈급 병원 정보시스템의 경우 클라우드로 제공하여 마치 하나의 병원처럼 의료 빅데이터를 제공하면서 보안의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 보안이 필요한 대학병원이나 종합병원 등을 대상으로 보안성과 효율성이 높은 양자암호통신 기술을 활용한 클라우드 의료 시스템 서비스를 제공할 수 있으며, 병원과 데이터센터 사이에 양자암호통신기술을 적용하여 의료데이터를 보호할 수 있을 것이다. 아울러 의료기관과 약국 간, 협력병원 간, 감독기관/보험사간에 양자암호통신을 적용하는 것이 가능할 것이다.

그림 Ⅴ-2-18 클라우드 기반 P-HIS



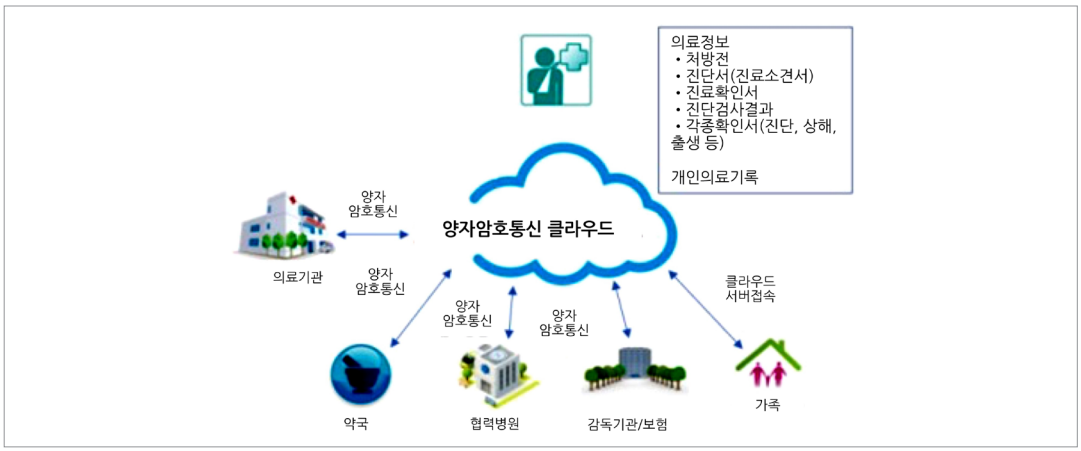
※ 최광민 (2021)

2021년 네이버는 환자별 맞춤형 정밀의료를 위한 의료 데이터 저장과 병원 운영 전반에 필요한 업무 시스템인 고려대학교 의료원 안암병원의 정밀의료병원정보시스템(Post, Precision, Personalized-Hospital Information System, 이하 P-HIS)을 클라우드로 성공적으로 전환하였다.[32] 양자암호통신 기반 클라우드 의료서비스는 대표적으로 대학병원 등 대상으로 한 클라우드와 빅데이터 활용서비스, 맞춤형 환자 정밀 의료 서비스의 제공이 있을 수 있다. 통신사가 보유한 전국의 지역별 데이터센터에 양자암호통신기술을 적용을 확대할 수 있고, 대학병원·종합병원 등으로부터 수요기관 신청을 받아 체계적인 양자암호통신 기반 클라우드 서비스를 제공할 수 있다.

2. 의료 데이터 전송 서비스

Toshiba는 2019년 토호쿠대학교와 공동으로 개인정보에 해당하는 사람의 유전자 정보를 분석한 게놈 데이터에 양자암호를 걸어 통신하는 실증실험을 전개해 기존의 광섬유에서 통신할 수 있는 기술을 확립했다. 한국 넷케이티아이(netKTi)는 양자암호인프라 구축 실증사업 참여를 준비하고 있는 것으로 조사되었다. 특히, 의료분야를 중심으로 순천향대병원과 양자암호인프라 실증사업을 계획하고 있는데, 국내·국제 원격협진 시 수술영상 전송 등을 위한 양자암호통신을 적용하려 하고 있다. 시범 인프라 사업을 통해 성모병원은 인공지능 음성인식 진료기록 시스템 및 의료 기록 데이터 저장에 대한 분야를, 순천향대병원은 양자 원격의료협진에 대한 연구를 개발하고 있다. 세브란스병원은 SK브로드밴드와 함께 블록체인 실손보험청구, 의료 빅데이터 전송 및 사고예방 알림 시스템에 대한 연구개발을 진행하고 있으며, 을지대병원은 LG유플러스와 손을 잡고 PQC 기반의 의료 데이터 전송 시스템 구축을 수행하고 있다. 이외에 분당서울대병원도 양자적용 방안에 대해 모색 중인 것으로 알려져 있다.

그림 Ⅴ-2-19 양자암호통신 클라우드 의료서비스 구성도



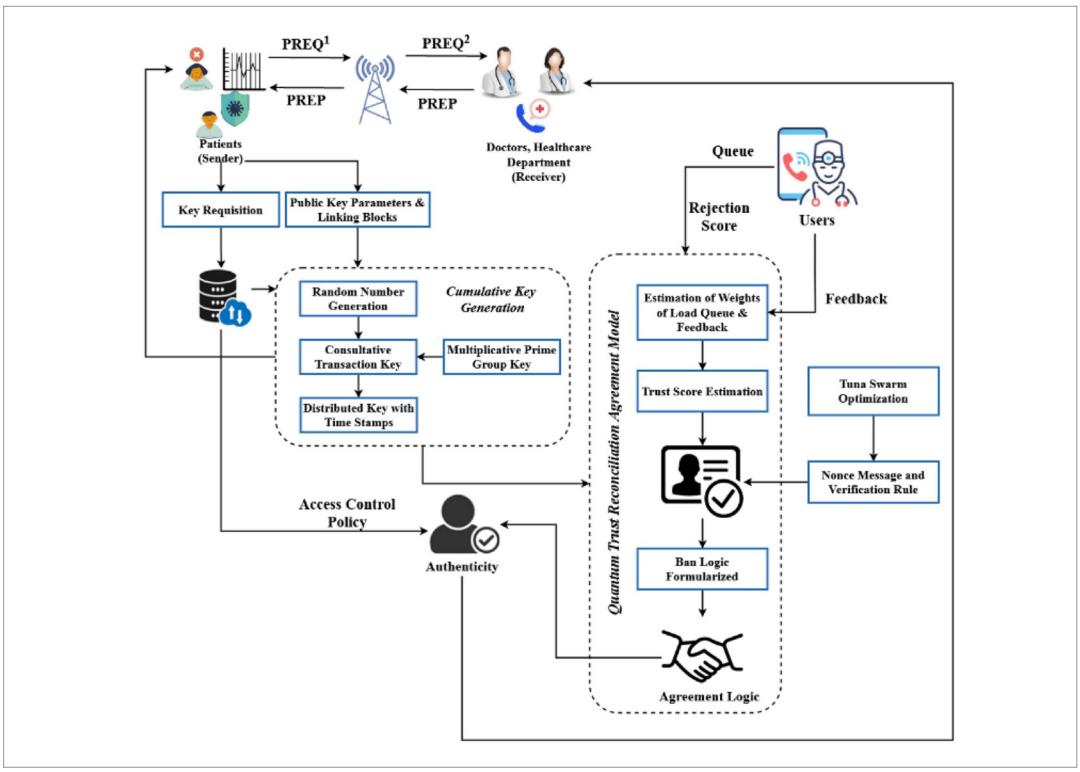
※ SGA솔루션즈 (2016) 집필진 재구성

32) 최광민 (2021)

3. 의료 사이버 보안 서비스

환자와 의료 현장 간 건강 데이터의 안전한 교환에 초점을 맞춘 의료 사이버 보안은 높은 계산 복잡성, 시간 소비 증가, 비용 복잡성 등의 문제가 있을 뿐만 아니라, 전체 보안 시스템의 효율성과 성능에 영향을 미친다.[33] 최근에 제안된 방식은 의료 시스템에서 안전한 데이터 공유가 가능하도록 Consultative Transaction Key Generation and Management라는 기술을 통해, 임의의 값을 기반으로 한 고유한 키 쌍을 생성한 다음 환자 데이터를 블록체인 방법을 사용하여, 개별 해서 값 블록에 저장하는 것이다. 또한 피드백 데이터를 기반으로 신뢰 점수를 계산하는 Quantum Trust Reconciliation Agreement Model을 통해 안정적으로 데이터를 전송할 수 있다. 이를 통해 환자와 의료 시스템 간의 안전한 의사소통을 가능하게 함으로써 해당 분야에 새로운 기여를 하고 있다.

그림 Ⅴ-2-20 의료 사이버 보안 시스템 구조 모델



※ S. Selarajan et al. (2023)

33) S. Selarajan et al. (2023)

제6절 금융

1. 블록체인 기반 금융서비스 보안 서비스

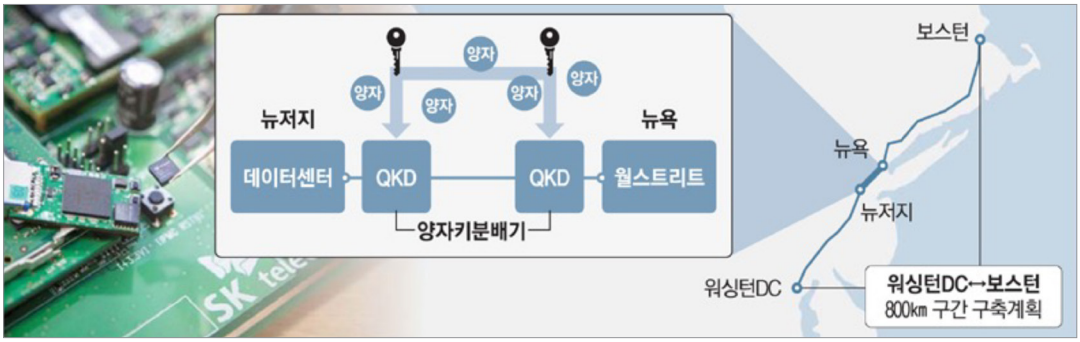
중앙화폐시스템에 대한 불신과 새로운 디지털 토큰, 중앙은행 디지털 화폐와 같은 가치저장수단에 대한 요구가 급증함에 따라, 블록체인 기술 기반의 암호화 화폐 등에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이와 관련하여 분사 ID는 분산원장기술을 기본으로 사용자 본인이 자신이 ID와 데이터를 소유 관리하는 탈중앙화된 자기주도형 디지털 신원증명 기술로 블록체인 기반 서비스를 이용하는데 있어 필수적이며, 이를 통해 각 서비스 제공기관마다 사용자의 개인정보를 보호할 수 있다. 또한 크립토앵커(Crypto-anchor), IoT 기반 비콘(Beacon) 등의 검증 도구를 활용하여 악성 및 허위 데이터 소스를 식별하고 블록체인 생태계의 신뢰성을 증대시키고 있다. 하지만, 현재의 블록체인 기반 암호화 화폐에 대한 해킹의 시도와 양자컴퓨팅 기술에 의한 현행 암호화 체계의 위협과 같은 문제점이 제기되고 있다. 또한 금융 시장에서 옵션 가격의 책정을 위한 컴퓨팅 연산의 한계점 문제가 대두되고 있다. 이에, 산업계에서 양자기술을 접목한 금융서비스의 니즈가 증대되고 있다. 관련 업계에서는 양자 금융 시스템의 도입으로 현존하는 각종 금융 부패를 종식시킬 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한 양자컴퓨터 개발 등에 따라서 가상화폐 등 블록체인 기반 금융서비스 위협에 대응할 수 있는 방안으로 블록체인 노드 간 통신채널에 대해 양자암호통신을 적용하는 방안을 검토할 수 있다. 또한 글로벌 금융업계에서는 양자 금융 시스템이 현재의 중앙제어 시스템을 글로벌 분산제어 방식으로 전환할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

2. 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스

미국 Ripple Labs은 2009년 미국에서 간편 송금을 목적으로 개발된 결제 프로토콜 비즈니스로 시작한 후 2012년 암호화폐를 발행하고 현재까지 Bank of America, Standard Chartered Bank, UBS 등 세계 유수의 은행 및 금융사들과 협약을 맺고 송금 기술을 은행 고유의 송금시스템에 적용하기 위해 노력하고 있다. 2015년에 인터레저(Interledger) 기술개발을 시작하여 현재까지 개발 중에 있으며 이는 파편화된 은행이나 카드의 기존 결제시스템을 블록체인을 기반으로 연동할 수 있는 연동 기술을 개발하였다. 미국 R3는 분산원장을 통해 은행 및 금융기관들의 업무절차 최소화·효율화 서비스를 제공하는데 분산원장기술을 기반으로 인증, 스마트 컨트랙트, 보고자동화, 은행 간 조정 최소화, 업무 효율화 등 다양한 유관기술을 연구 중이다. Toshiba는 기밀 정보를 다루는 정부와 금융기관 등으로

부터 암호통신 이용료를 받는 사업 방식으로 서비스를 제공하며 2020년부터 미국 금융기관을 대상으로 서비스에 착수하고 단계적으로 서비스 영역을 넓혀나가고 있다.[34)]

그림 Ⅴ-2-21 미국 금융망 양자통신 적용 사례



※ NIA (2021)

3. 금융데이터 분석 및 보안 서비스

얽힘광자 기반 QKD의 은행 송금을 처리하기 위해 오스트리아의 대형 은행 본사와 빈 시청 사이에 QKD 시스템을 설치하여 도시 환경에서 1.45km 유리 섬유를 통해 비밀 키를 성공적으로 배포 가능하다는 것을 입증하였다. 중국 ANT financial은 신용분석, 마케팅 분석 및 은행데이터 결합분석 등을 위해 동형암호기술을 적용하고 있다. 독일 AllianzX는 스코틀랜드왕립은행과 함께 시리즈B 펀딩 라운드에서 양자컴퓨터 스타트업 1Qbit에 4,500만 캐나다 달러를 투자하였고, SAP는 2018년 동형암호를 핵심 요소기술로 소개한 후, SAP 이노베이션 센터 네트워크 전담조직을 통해 사업적 활용 방안 모색 및 블록체인, 벤치마킹 및 마케팅 서비스에 기술 적용을 진행하고 있다. 2020년 SK텔레콤은 SK브로드밴드 및 유알정보기술과 컨소시엄을 구성하여 양자암호통신 시범인프라 사업에 참여하였으며, 해당 사업에 수요기관으로는 광주광역시청, 연세의료원, 한화시스템, 우리은행, CJ올리브네트웍스 등이 참가하였다. 예를 들면 우리은행 40km 떨어진 우리은행 전자센터와 콜센터 사이에 양자암호통신망을 구성하고 콜센터의 근무자와 방문자를 대상으로 비대면 안면인식을 통해 측정된 민감 정보를 데이터 서버로 전송하는 기술 개발을 진행하였다.

34) 박남수 (2021)

4. 금융 보안 서비스

최근 중앙화폐시스템에 대한 불신과 새로운 가치저장수단에 대한 요구가 급증함에 따라, 블록체인 기술 기반의[35] 암호화 화폐 등에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 그럼에도 불구하고, 여러 가지 보안 시스템을 적용하여 아직까지는 비교적 안전한 현재의 블록체인 기반 암호화 화폐는 해킹의 시도와 양자컴퓨팅 기술에 의한 현행 암호화 체계의 위협이 문제점으로 제기되고 있다. 또한 금융 시장에서 옵션 가격의 책정을 위한 컴퓨팅 연산의 한계점 문제가 대두되고 있다. 이에, 산업계에서 양자기술을 접목한 금융서비스의 니즈가 증대되고 있다. 블록체인에 양자기술을 적용하는 사례를 보면, 블록체인에서 쓰는 수학적 암호방식이 현재의 컴퓨터에서는 풀기 어렵지만, 양자컴퓨터는 어렵지 않게 풀 수 있다. 양자컴퓨터가 일반화되는 때가 되면 현재의 블록체인은 무력화될 수도 있다는 점을 인식할 필요도 있다. 암호 화폐는 거래내용이 전 세계의 장부에 동시에 공식적으로 기록되는 방식이지만, 양자컴퓨터는 그 순간을 이용해 공격을 가할 수 있으므로, 양자기술을 이용하여 현재의 블록체인을 보완해가는 방법도 필요할 것이다. 관련 업계에서는 양자 금융 시스템의 도입으로 현존하는 각종 금융 부패를 종식시킬 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한 글로벌 금융업계에서는 양자금융 시스템이 현재의 중앙제어 시스템을 글로벌 분산제어 방식으로 전환시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

그림 Ⅴ-2-22 블록체인과 양자컴퓨팅 비교



※ 101Bockchains (2019) 집필진 재구성

35) 101 Blockchains (2019)

1. 양자암호 적용 자율주행 배송 서비스

미국의 아마존은 2019년 1월에는 자율주행 배송로봇 스카우트를 상용화하여 워싱턴을 비롯한 캘리포니아주, 조지아주 애틀랜타, 테네시주 프랭클린 지역으로 확장 중이다. 2020년 9월에는 배송용 드론 무인기 프라임에어에 대해 미국연방항공청에서 운항허가를 받아 서비스를 추진하고 있다.

그림 Ⅴ-2-23 미국 아마존 배송 드론 및 로봇



※ 아마존 홈페이지

한국에서도 물류 효율화를 위한 배송로봇 도입에 관심이 늘고 있다. 코로나 사태로 택배 수요가 늘어나면서 20년 한 해 동안 국내 택배 이용 건은 33억7천만 건으로 2014년 대비 2배 이상 늘었다. 이러한 상황을 타개하기 위해 기획재정부에서는 미래형 운송수단 활용 물류서비스를 2021년 한걸음 모델 적용과제로 선정하여 배송로봇의 상용화에 박차를 가하고 있는 상황이다. 아울러 2021년 2월 화물배송용 드론사업자로 ㈜해양드론기술이 등록되면서 부산 남외항 부두에서 2km 이내 거리에 정박 중인 선박에 서류, 소독약 등 경량 물품을 드론으로 배송하는 서비스를 제공하였다. 이렇듯 국내 배송로봇·드론 시장이 점차 활성화될 것으로 기대된다.

한편 보안적인 측면에서 국내 배송로봇·드론시장 활성화에 대해 우려하는 의견도 있다. 드론에 탑재되는 통신시스템의 취약점 노출로 인해 드론이 탈취되어 물품 분실·도난 등의 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 배송로봇·드론이 발전하는 만큼 보안성 향상의 필요는 필수불가결로 따라오게 된다. 2021년 양자암호 시범인프라 구축사업의 양자-드론 서비스는 산업계 요구와 부합한다. 양자-드론서비스는 지상에서 드론이 충전되는 동안 양자암호키를 저장하여, 드론 운행 중 전송되는 영상 및 제

어신호 등의 데이터를 암호화하여 기밀성을 확보할 수 있다. 또한 우정경영연구소에서 택배·물류서비스에 양자암호통신을 적용하는 방안으로 [그림 V-2-24][36]처럼 물류서비스 모델을 제시하였다. 양자암호통신을 적용한다면 우체국·집중국 등에서 택배를 수령 및 드론 충전 시 QKD를 통해 양자암호키를 주입받아 무선통신망을 통해 운영관제시스템과의 양자암호통신 적용이 가능할 것이다.

그림 V-2-24 한국 물류 사각지대 운영 드론 서비스 모델



※ 정훈, 이헌규 (2015)

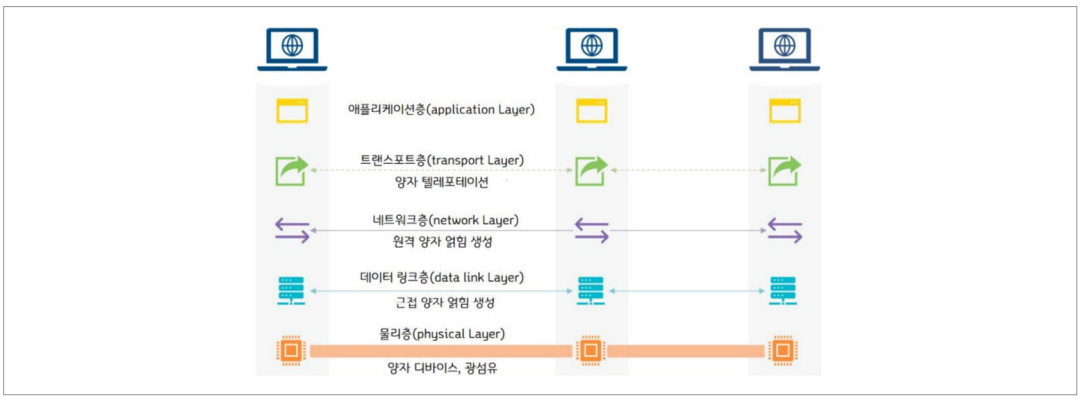
36) 정훈, 이헌규 (2015)

제8절 기타 산업

1. 양자 광자 트윈 구현을 통한 6G와 네트워크 서비스

양자 광자 트윈(Quantum Optical Twin, QOT)은 2030년까지 디지털 트윈 컴퓨팅(Digital Twin Computing, DTC) 비전의 장기적인 확장으로 보고 있다.[37] 디지털 트윈은 기계, 가전제품, 시스템, 제조 프로세스 또는 인간과 같은 사물의 특징과 특성을 디지털로 표현한 것으로, DTC는 사이버 공간에서 통신과 상호 작용을 확장하고 향상시켜 위의 전통적인 디지털 트윈 개념을 확장하는 것을 목표로 하고 있다.

그림 Ⅴ-2-25 양자인터넷의 네트워크 계층



※ IRS Global (2022)

DTC 플랫폼은 일반적으로 4개의 계층으로 구성되어 있다. 1) 디지털 트윈을 생성하는 데 필요한 물리적 세계 데이터를 수집하고 애플리케이션에서 물리적 세계에 피드백을 제공하는 사이버/물리적 상호 작용 계층, 2) 사이버/물리적 상호작용 계층으로부터 수신된 데이터를 이용하여 디지털 트윈을 생성하고 유지하는 디지털 트윈 계층, 3) 디지털 트윈 계층에 저장된 디지털 트윈을 사용하여 디지털 트윈 작업을 호출하기 위한 프레임워크를 제공하는 디지털 세계 프리젠테이션 계층, 4) 디지털 세계 프리젠테이션 계층을 사용하여 DTC 애플리케이션을 개발하기 위한 애플리케이션 계층이다. QOT 역시 QOC 기술의 점진적인 활용을 통해 [그림 V-2-25]의 양자인터넷 네트워크 계층과 디지털 트윈의 4개 계층을 활용하여 디지털 정보와 양자 정보까지 전송, 저장할 수 있도록 정교하게 만들 수 있다.

37) Ian G. (2021)

QOT는 다양한 응용 목적으로 사용할 수 있다. 살아있거나 무생물의 물리적 개체를 대표하고 양자광학 공간에서 이를 대신하여 행동하는 것이 가능하다. 또, 양자광학 기술로 구현된 AI 기능을 내장하고 QOC를 사용하여 다른 QOT와 상호작용할 수 있을 것이다. 하나의 예로 인간의 QOT는 가상 비서, 지능형 개인 비서 및 디지털 트윈 기술의 확장으로 볼 수 있을 것이다. 즉 복잡한 문제를 해결하는 데 양자 인공지능 기능을 활용하면서 사람을 추상화 및 가상화하고 양자 공간에서 사람을 대신하여 행동할 수 있는 양자 개체로 보는 것이 가능해질 것이다.

2. 개인 비서 서비스

현재 디지털 방식의 컴퓨터와 통신망을 이용해서는 영화 아이언맨의 인공지능 비서 '자비스'를 구현하는 데 한계가 있다. 아무리 어려운 암호를 만들어도 뚫릴 수 있고, 데이터 처리·전송 속도 역시 기존 방식으로는 물리적 한계가 명확하기 때문이다.[38] 이러한 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대되는 대안이 양자컴퓨터·인터넷 기술이다. 이것이 완성되면 외부 해킹이 불가능한 철저한 보안과 초고속 데이터 처리·전송을 통해 어떤 정보라도 원하는 대로 척척 제공하는 AI 비서가 현실화될 수 있다. '빌 게이츠' 마이크로소프트(MS) 공동 창업자는 생성형 인공지능(AI) 기술이 향후 AI 개인비서 개발로 이어질 것이며, AI 개인 비서를 개발하는 기업이 경쟁사보다 우위를 차지할 것이라고 내다봤다.[39] 또한 미래에 사람들을 위해 특정 작업을 수행할 수 있는 개인 디지털 비서를 만들면, 이'AI 비서'는 사람의 필요와 습관을 이해할 수 있으며, 읽을 시간이 없는 사람에게 중요한 콘텐츠를 대신 읽어주는 등 사용자 행동을 근본적으로 바꿀 수 있을 것으로 보고 있다.

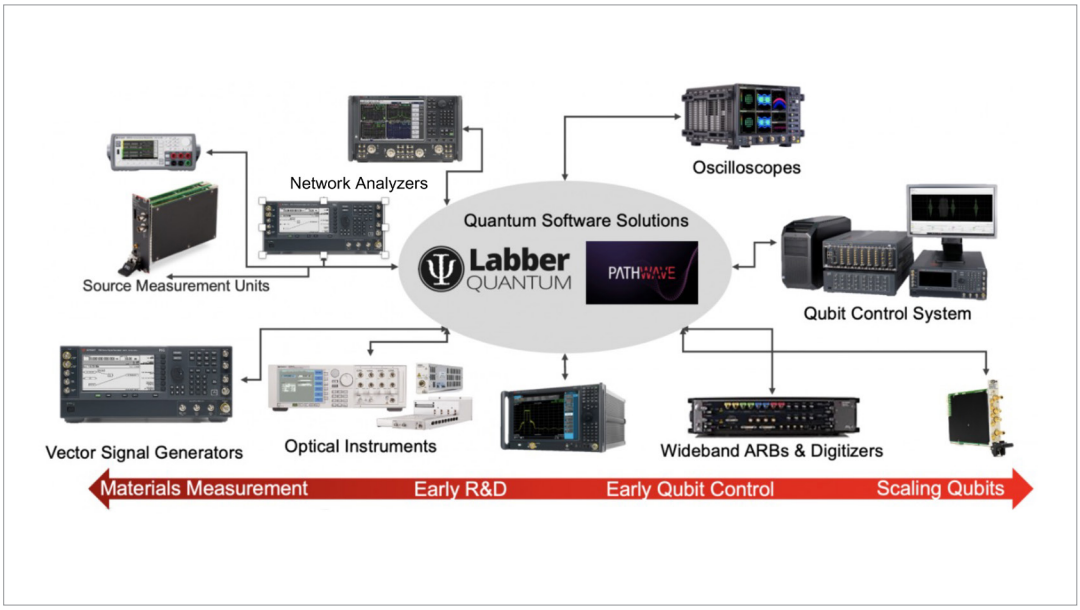
3. 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화 지원서비스

국내 다른 연구개발 현장처럼 양자기술 분야에서도 미국, 유럽, 일본 등 기술 선진국에서 수입한 장비에 대한 의존도가 높은 편이다. 대표적인 장비업체인 미국 Keysight는 초전도체와 이온 기반 양자컴퓨팅 하드웨어 시스템을 구축하는 데 필요한 초고속 큐비트 제어장비와 양자 상태 측정에 필요한 초정밀 계측장비를 전문 소프트웨어 모듈과 패키지로 구축하여 관련 전문인력이 부족한 기업도 양자컴퓨터 개발에 적극적으로 참여할 수 있게 하고 있다.[40] 특히 소프트웨어 모듈은 안정적인 양자컴퓨팅이 가

38) 김봉수 (2022)
39) 이정현 미디어연구소 (2023)
40) Charles Q. Choi (2022)

능하도록 큐비트 품질 검사 기능, 오류 보정 기능, 벤치마크 알고리즘 시험 기능, 큐비트 제어 자동화 기능 등 다양한 편의 솔루션을 제공하고 있다. 최근 국내에서도 본격적으로 양자지원기술의 장비개발이 진행되고 있다. 양자표준기술 기업인 SDT 주식회사는 NIA의 '양자지원기술 기업발굴 및 육성 사업'에 선정되어 최대 20채널, 100 피코초 수준의 시간분해능을 가진 초정밀 복수의 단일광자(Single-Photon) 입력 신호의 동시계수기(Coincidence Counting Unit, CCU), 10Gsps 속도의 큐비트 제어 장비, 1ps 분해능의 계측장비 등을 국산화 하고 있다. 계측과 제어장비 뿐만 아니라 초저온 환경 구축, 높은 수준의 안정성을 가진 레이저, 높은 전압/전류 안정성을 가진 전원공급장치 등 다양한 장비가 요구되고 있다. 국내의 기반 기술과 제조 역량을 가진 하드웨어 기업들이 양자지원기술을 빠르게 확보하는 것이 필요할 것이다.

그림 Ⅴ-2-26 양자 환경 구축을 위한 전문 계측 장비군 (Keysight)



※ L. Hesia (2021)

4. 양자 전자 선거 서비스

전자 선거 프로토콜의 8가지 요구 사항인, 완전성, 견고성, 개인 정보 보호, 합법성, 재사용 불가능성, 공정성, 검증 가능성 및 수령증 없음(Receipt-freeness)을 충족할 수 있는 양자 선거 프로토콜은 아직 미비한 상황이다.[41] 이 문제를 해결하기 위해서는 양자 디지털 서명 및 양자 공개치 암호화의 일반 구성을 기존 공개 치 암호화와 함께 사용하여 양자 선거 프로토콜의 일반 구성을 개발하는 것이 필요할 것이다. 이 양자 프로토콜은 두 참가자 간에 사전 공유키가 필요하지 않으면서 신뢰할 수 있는 제3자 또는 익명 채널이 필요하지 않아야 한다. 또, 다수의 후보자와 유권자가 참여하는 대규모 선거에 적합하며, 다수의 유권자가 동시에 투표하는 상황을 가능하게 해야 할 것이다. 아울러 관리자부터 유권자까지 접근할 수 없는 단방향채널이 존재하고 프로토콜의 세 당사자 간에 공모가 없다는 물리적 가정하에서 위의 8가지 요구 사항을 모두 충족해야 한다. 또한 PQC를 전달하는 암호화 알고리즘을 적용하여 PQC를 갖는 선거 방식으로 간략화되어야 한다. 그 방법으로는 양자 디지털 서명과 공개키 암호화를 활용하는 방안이 있을 것이다. 즉 전송된 투표는 양자상태에 있으므로 복제 금지 정리로 인해 서명 및 공개키의 개인키가 있더라도 투표의 개인정보가 손상될 가능성이 작다. 전통적인 디지털 서명과 공개키 암호화를 사용하는 기존 선거 프로토콜에서는 공격자가 개인키를 획득할 경우 투표 개인정보가 쉽게 침해될 수 있기 때문에 프라이버시를 강화해야 한다.

41) Wenhua Gao et al. (2021)

제3장
양자센싱분야 산업화 모델

제1절 개요

양자센싱은 양자관성센서, 양자시간측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서 등 다양한 센서 기술을 기반으로 여러 산업에 다양하게 적용할 수 있다. 양자센서 종류별 응용될 주요 사업군에 대해 [그림 V-3-1]에 기술한 것처럼, 산업 및 농업, 의료, 석유 가스, 유틸리티 및 건설, 국방 및 안보, 로봇 공학 등 다양하게 분포되어 있다.[42] 산업 및 농업 분야에서는 전력전송상태 모니터링, 추적자 감지, 공정제어, 가스감지, 네트워크 시간 분포 등, 의료분야에서는 신경감지, 새로운 MRI 시스템, 진단이미징 기술이 적용 가능한 것처럼 양자센서는 다양한 분야에서 양자이론을 기반으로 보다 정밀한 센싱을 통해서 원하는 정보를 제공하는 역할을 수행할 수 있는 것으로 보여진다.

그림 V-3-1 양자센싱의 주요 산업 적용 영역

	산업 및 농업	의료	석유 가스	유틸리티 및 건설	국방 및 안보	로봇 공학
중력 / 가속도			탐사 유정 조절	측량 매장된 자산	항해	
회전 감지			다운홀 조사		항해	항해
전기장	전력 전송 상태 모니터링				RF 감지	원격 감지
자기장	추적자 감지	신경 감지 새로운 MRI 시스템	측량 추적자	금속 탐자기	EOD 감지	
단일광자 감지기/ 분광기	공정 제어 가스 감지	진단 이미징	누출 감지	누출 감지	라이다 암호화	원격 감지
원자 시계	네트워크 시간 분포			측량 포지셔닝	항해 시간 분포	항해

※ Simon Jordan (2020) 집필진 재구성

이러한 아이디어를 기반으로 이미 해외 일부 국가에서는 상용화를 눈앞에 둔 기술들을 다수 보유하고 있으며 멀지 않은 미래에 적용 가능할 것으로 판단된다. 본 장에서는 양자센서 분야에서 의료, 국방, 금융 등 5개 산업영역으로부터 총 31개의 산업화 모델을 소개한다.

42) Simon Jordan (2020)

표 Ⅴ-3-1 양자센싱 주요 분야별 산업화 모델 개요

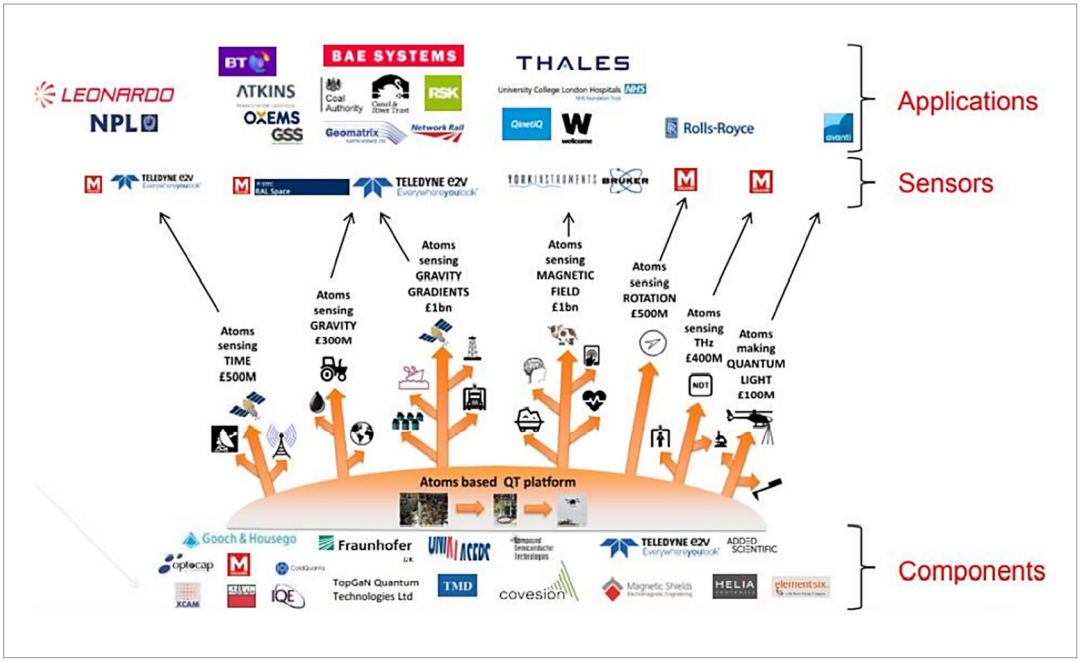
구 분	산업화 모델
국방·안보	① 자이로스코프 항법 서비스 ② 양자 자력계 수중 감시 서비스 ③ 양자 무선주파수(RF) 수신 서비스 ④ 양자 이미징 서비스 ⑤ 전체 무선주파수(RF) 통신 서비스 ⑥ 양자레이더를 이용한 장거리 표적 감시 서비스 ⑦ 양자 라이다를 이용한 실시간 3D 공간 정보 제공 서비스 ⑧ 양자항법시스템을 이용한 선박 위치 탐지 서비스 ⑨ 양자위성을 이용한 우주 소형 물체 감시 서비스
제조·반도체	① 건축 자재 결함 감지 서비스 ② 배터리 불량 검출 서비스 ③ 가스 센싱 서비스
의료·제약	① 질병 감염 여부 진단 서비스 ② 생체 자기(뇌자도, 척수 유발 자장, 심자도) 검사 서비스 ③ 양자현미경 이용 비파괴 생물학적 구조 관측 서비스 ④ MRI 진단 서비스 ⑤ 진단 지원 서비스 ⑥ 양자현미경 및 양자내시경 이용 정밀 분석 서비스 ⑦ 양자 MRI 의료진단 서비스
교통·물류·항공	① 항공기 시각주기유도 서비스 ② 주행 정확도 및 안전 개선 서비스 ③ 항공기 시스템 모니터링 및 유지보수 서비스 ④ 양자 라이다를 이용한 자율주행 서비스
기타 산업	① 양자중력센서 기반 지하통신시설물 위치 파악 서비스 ② 통신선로 단락 검출 서비스 ③ 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 서비스 ④ 석유 및 가스 탐사 서비스 ⑤ 뇌파 활용 치안 서비스 ⑥ 화산 활동 감시 서비스 ⑦ 에너지 모니터링 서비스 ⑧ 가스 센싱 및 모니터링 서비스

EU Flagship은 2018년부터 10년 동안 3,700만 달러를 투자하여 광기반 양자시계, 원자 증기셀 기반 각속도·자기장·시계, 다이아몬드 NV 중심 기반 MRI 이미징, 다이아몬드 NV 중심 기반 자기장·전기장·온도·압력센서 등의 총 4개 양자센싱 프로젝트를 지원하고 있다.[43] 각 프로젝트는 다이아몬드 NV 중심 기반 양자센서의 소재, 측정, 소자 기술(ASTERIQS), 다이몬드 NV 중심 기반 의료 이미징(MetaboliQs), 원자 광시계 응용 컨소시움(iqClock) 및 MEMS 원자 증기셀 기반 다목적 양자센서(macQsimal)를 개발하는 것이다.

43) IRS Global (2022)

영국은 퀀텀 기술 허브를 통해 2014년부터 10년 동안 총 4,000억 원 규모로 지원을 하고 있으며 중력계, 자력계, 자이로스코프, 원자시계, 양자이미징 등 총 12개의 양자센싱 프로젝트를 진행하고 있다.[44] 휴대 가능한 원자시계, 새로운 양자센싱 방식, 보안통신을 위한 양자기술은 표적 투자에 의해 산업화가 가속화될 수 있어 표시된 보수적 기간보다 먼저 상용제품으로 등장할 가능성이 있다. 양자센서의 부품을 개발하고, 이를 기반으로 센서 자체를 개발하여 응용하려는 다양한 기업들이 지속적으로 발굴되고 있다.

그림 Ⅴ-3-2 영국 양자기술 산업 생태계 관련 주요기업



※ 권택용 (2022)

일본은 다이아몬드 NV 중심 등을 이용한 고체 양자센서 개발에 박차를 가하고 있다. 소형으로 강건성이 뛰어난 초감도 고체센서를 구현하여 의료 또는 헬스 케어 분야의 자기뇌파 측정, 극한 환경이나 생명 분야에 이용을 기대하고 있다. 5년 후에 10^{-12}T, 10년 후에는 10^{-14}T의 실온 상태의 미약한 자기장 관측하고 온도나 전류 동시 계측기술 등을 확립하려고 한다. 또한 센서 고감도화를 위해 고도의 양자상태 제어기술 개발과 센서 재료 고품질화를 추진하고 있다.

한국은 2019년 1조 원 가량인 양자센서 세계 시장 규모가 10년 후인 2028년에는 약 2.5조원 규모로 성장할 것으로 예측하고 있다.[45] 양자자력계, 원자시계 등이 양자센서 시장을 주도할 것으로 예상되

44) Case Western Reserve University (2018)

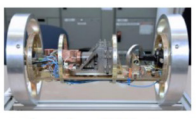
45) IRS Global (2022)

는 가운데, 양자센서는 항해·운송, 의료 등을 중심으로 산업, 의료전반에 걸쳐 수요가 증가할 것으로 예상된다. 국방과학연구소는 원자 스핀 자이로 연구를 2016년부터 수행하고 있으며, 2016년에서 2019년까지 원자 스핀 자이로의 개념 파악 및 센서 개발을 수행했다.

그림 Ⅴ-3-3 양자센서의 산업화 동향

구분	주요 내용	구분	주요 내용
Lockheed Martin(미)	양자 레이더, 양자 자기장 센서 이용 항법 시스템 개발 중	GWR (영국)	초전도 기반 중력계 상용화
Bosch (독일)	휴대용 NV 기반 양자 자기장 센서 개발	M Squared (영국)	관성(가속도) 상용화 단일파장 레이저, 초고속 안정화 레이저, 3D 용량 이미징 등 상용화
Qnami (스위스)	나노스케일 이미징 시제품 상용화	Sparrow Quantum(덴)	단일광자 광원 상용화
MuQuans (프랑스)	레이저 냉각 원자시계, 양자중력계 상용화	Microsemi (미국)	초소형 원자시계, 소형 원자시계 상용화
AOSense (미국)	양자중력계 상용화	Teledyne (미국)	초소형 원자시계 상용화
Honeywell (미국)	초소형 원자 가속도계 개발중	Oscilloquartz (스위스)	네트워크 동기화 세슘 원자시계 상용화
QDTI (미국)	다이아몬드기반 면역분석 장치	SQUTEC (독일)	내시경과 결합한 양자자기장센서 -심사도 측정


MuQuans


Lockheed Martin


QDTI

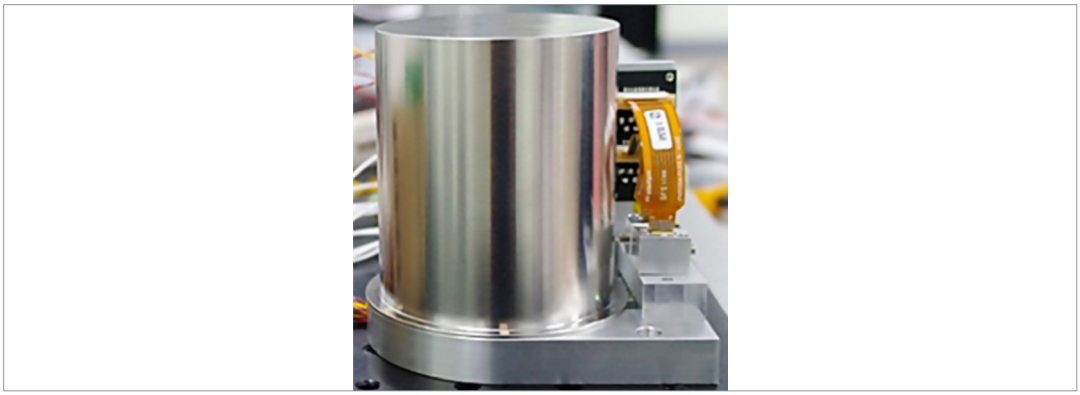

Quspin, Twinleaf

※ 권택용 (2022)

1. 자이로스코프 항법 서비스

무인비행, 유도무기, 잠수함, 우주선 등에 필수적인 관성 항행과 더불어 지구과학에서 필수적인 측지학에 쓰이는 도구인 자이로스코프는 무기체계 및 인공위성 뿐만 아니라 위성항법장치(GPS)나 스마트폰, 자율주행차, 사물인터넷 등의 위치확인 및 항법 장치 등에 보다 정밀하고 빠른 정보를 제공하며 널리 이용될 수 있다.[46) 47)] 국방 항법분야에 적용될 경우 초정밀 타격이 가능하며, 기존 광학식 기반 관성항법장치 대비 부피 및 크기를 1/3 이하로 줄일 수 있어 무기체계 소형/경량화가 가능한 획기적인 기술이다.[48)] 2021년 한국 광주과학기술원 함병승 교수 연구팀은 파동 양자광학의 결과인 결맞음 드브로이파를 사냑자이로스코프에 적용하여 기존 대빈 해상도를 최소 4배 이상 초월 가능한 퀀텀자이로스코프 이론을 발표하였다.

그림 Ⅴ-3-4 원자스핀 자이로스코프



※ 김인한 (2022)

2022년 국방과학연구소 임신혁 박사는 기계식과 광학식 한계를 극복할 수 있는 원자 스핀 자이로스코프 개발을 통해 상용화를 위한 연구에 박차를 가하고 있다.[49)] 원자의 안정적인 내부 양자 에너지에 기반한 핵스핀이 세차 운동을 이용하기 때문에 안정도가 우수하고 부피와 전력 소모를 크게 줄일 수

46) 김소연 등 (2021)
47) 김봉수 (2021)
48) 김소연 등 (2021)
49) 김인한 (2022)

있을 것으로 기대하고 있다. 양자 원자간섭계가 중력 가속도에 민감한 것처럼 운동 가속도에도 민감해 회전에 대해서도 민감하게 만들 수 있으므로 자이로스코프와 같은 관성 탐색에 필요한 센서에 혁명을 일으킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.[50] 중국 선박 집단은 3~5년 이내에 원자 간섭계 자이로스코프 및 원자 스핀 자이로스코프의 고도화를 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 중국 항천 과공 집단 제3 연구원의 제33 연구소에서는 핵자기 공명 자이로스코프를, 베이징 자동화 공제 설비 연구소에서는 자기 공명 스핀 자이로스코프를 개발하고 있다.[51]

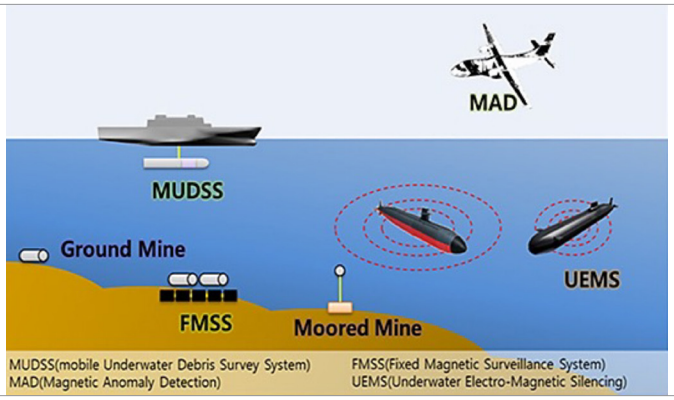
2. 양자 자력계 수중 감시 서비스

양자 자력계는 국소적인 자기 이상이나 약한 생물학적 자기신호와 같은 자기장을 감지할 수 있다. 이에 지뢰, 급조 폭발 장치, 잠수함, 위장 차량, 벽을 통과하는 회전 기계 등 국부적 자기 이상을 발생시키는 금속 물체를 감지하기 위한 양자 자기 센서가 개발 중이다.[52] 이러한 센서는 잠수함 탐지를 위한 자기변화탐지기, 항만에서 함정 등의 출입을 감시하는 항만감시체계, 지하 및 수중에 매설된 위험물을 탐지하는 불발탄 탐지 무기체계 등에 널리 활용될 가능성이 높다.[53]

양자 자력계는 핵 무인 수중 공격정과 같은 수중 무기를 탐지하는데, 활용할 수 있다. 현재 전력화된 잠수함 감시 체계는 음파 탐지가 기본인데 잠수함 기동이 갈수록 조용해져 탐지하기가 어려워지고 있는데 양자 자력계는 극도로 미세한 자기장의 변화도 측정할 수 있기 때문에 이를 보완할 수 있을 것으로 보고 있다.[54) 55)] 특히 상온에서 작동하는 SQUID 자력계의 소음 억제 기능을 향상시키면 6km 떨어진 잠수함을 탐지할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 해안을 따라 배열된 양자 자력계는 상당한 영역을 포괄할 수 있어서 잠수함의 접근 거부 영역으로 확보할 수 있을 것이다. 게다가 양자 자력계 배열은 소음이 더 잘 억제되어 작동 능력이 향상돼, 이러한 배열 방식은 안보에 적절할 것이다. 수년 동안 미국 국립해양대기청 (NOAA)은 지구의 자기 이상 현상을 매핑하고 자기 이상 현상 지도를 작성하고 있다.[56] 민감한 양자 자력계를 지구 자기 이상 지도와 결합하여 사용하는 것은 양자 비 GNSS 탐색을 실현하는 방법이 될 수 있다.

50) Simon Jordan (2020)
51) IRS Global (2022)
52) Michal Krelina (2021)
53) 김소연 외 (2021)
54) 김진원 (2023)
55) 부산대 국방피탐지감소기술 특화연구센터
56) Michal Krelina (2021)

그림 Ⅴ-3-5 자기장을 이용한 탐지 체계

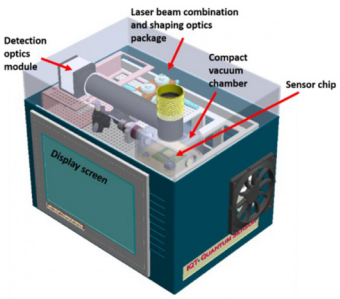


※ 부산대 국방피탐지감소기술 특화연구센터

3. 양자 무선주파수(RF) 수신 서비스

실제 사용에 가장 가까운 양자기술은 양자 무선주파수(RF) 수신기로, 더 넓은 대역, 더 낮은 SNR, 작은 크기, 개선된 도달 각도 감지, 자체 교정, 추가 잡음을 생성하는 금속 부품 제거, 더 빠른 신호 처리 및 측정을 허용하는 광학 방식의 출력과 같은 향상된 기능을 제공할 수 있다.[57)]

그림 Ⅴ-3-6 RF와 마이크로파 센서



※ University of Sussex

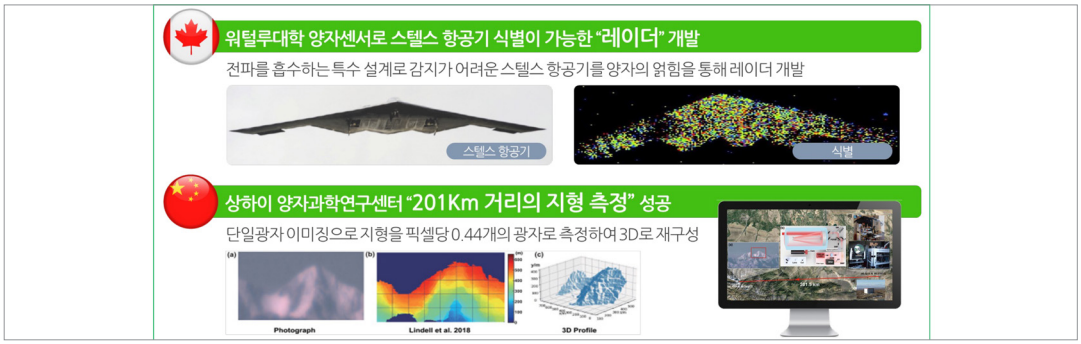
이러한 탐지에 성공하기 위해서는 약한 진동 신호에 대한 감도를 향상시키는 동적 디커플링 프로토콜이 필요한데, 이것은 몇 MHz 미만의 신호 주파수로 제한되는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하는 방법으로, 강력하게 구동되는 2레벨 시스템의 Mollow 삼중항 분할이라는 양자 광학 효과를 활용하면

57) Michal Krelina et al. (2023)

펄스 동적 디커필링 프로토콜이 구동 전이에 가까운 필드를 감지할 수 있다.[58] 양자 RF 수신기는 개선된 낮은 요격 확률/나은 참지 확률(LPI/LPD) 통신 및 수평선 위 RF 신호 수신, RF 가선 및 전파 방해에 대한 저항, RF 방향 찾기 및 테라헤리츠 주파수 이미징 등에 사용이 가능하다. 아울러 향후 양자 RF 수신기는 여러 시스템의 표준 RF 수신기가 될 수도 있다. 5G와 사물인터넷을 위한 양자 RF 수신기는 통신 확장, 적신호 탐지 개선, 기존 RF 장치 교정에도 도움을 줄 수 있을 것이다.[59]

4. 양자 이미징 서비스

그림 Ⅴ-3-7 해외 양자 이미징 센서 적용 사례



※ NIA (2021)

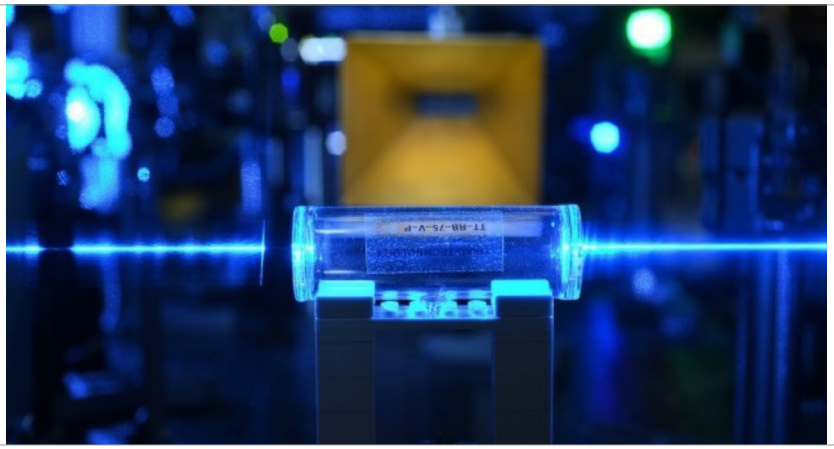
양자 이미징 시스템은 정보, 감시, 표적 획득 및 정찰 역할을 추가로 수행할 수 있다.[60] 장거리/단거리, 능동/수동 체제 및 스텔라 감지 모드 등 전천후, 주야간 전술 감지 등이 포함될 수 있다. 또한 구름. 안개, 먼지, 연기, 정글의 나뭇잎이 있는 환경이나 밤에 저조도 또는 낮은 SNR 비전 장치로 작동할 수 있다. 예를 들어 헬리콥터 조종사가 먼지, 안개, 연기가 자욱한 환경에서도 착륙 가능하도록 지원할 수 있다. 중국과학원 양자 광학 중점 실험실은 인공위성에서 사용을 염두에 둔 고스트 이미징 소자를 개발하고 있으며, 2011년에 실험에 성공한 후 2020년 프로토타입을 완성하고 2025년 우주에서의 테스트를 목표로 미국 B-2 스텔스 폭격기와 같은 보이지 않는 목표를 포착하고자 한다. 미사일, 로켓 등을 제조하는 국영 기업인 중국 항천 과학기술 집단 제9 연구원의 제 13 연구소 및 제 5 연구원의 제 508 연구소는 양자광학을 응용하는 이미징 연구를 수행하였다.[61]

58) T. Joas et al. (2017)
59) University of Sussex
60) Michal Krelina et al. (2023)
61) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

5. 전체 무선주파수(RF) 통신 서비스

기존 수신기는 단일 안테나이기에 넓은 스펙트럼 범위를 처리하는 기능이 부족하고, 증폭기 및 안테나 등으로 구성된 여러 고유 시스템을 추가하더라도 동일한 범위의 신호를 처리할 수 없다.[62] 미 육군 과학자들은 2020년 전체 무선 주파수 (RF) 스펙트럼을 포괄하는 통신 신호의 포착이 가능한 새로운 양자 센서를 개발했다. 이 센서는 특별한 유형의 초민감 원자인 Rydberg 원자에 의존하는데, 이미 육군에서 만든 양자 수신기에서 그 효과가 입증되었다. 이 기술이 스펙트럼 전반에 걸쳐 광범위한 통신 신호를 탐지하는 강력한 도구가 될 수 있다고 믿고 있으며 미군의 통신 시스템을 향상시키는 동시에 현장에서 부피가 큰 장비를 줄이는 데 도움이 될 것이다.

그림 Ⅴ-3-8 무선 주파수 통신 양자 센서 (US ARMY)



※ Lauren Saccone (2020)

6. 양자레이더를 이용한 장거리 표적 감시 서비스

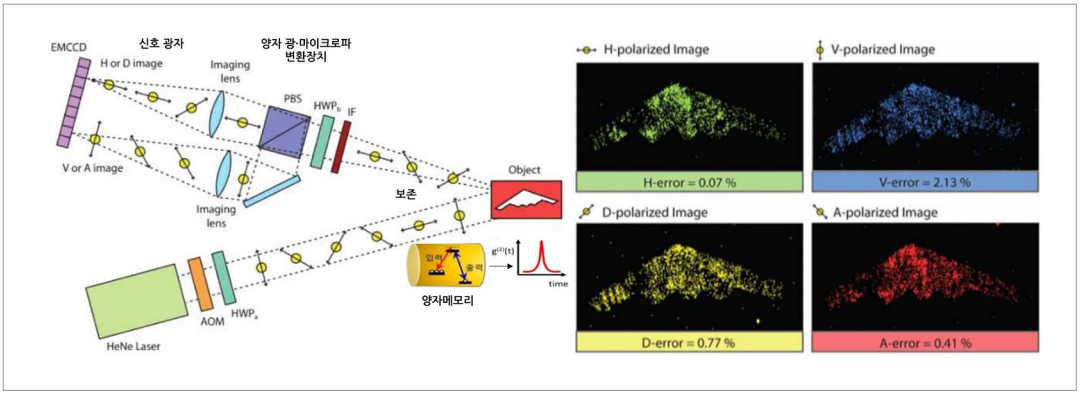
최근 미래 국방력 강화를 목적으로 양자의 입자 단위로 측정할 수 있는 양자레이더의 국방 분야 접목의 필요성이 대두되고 있다. 양자레이더를 구현하기 위해 양자정보를 생성하기 위한 양자 상태 생성, 생성된 양자정보저장, 장거리 양자 정보 송수신을 위한 광학적 광자와 마이크로 광자간의 양방향 변환 및 양자 상태 정밀 측정 기술이 필요하다. 표적에 전파를 쏘아 그 반사파를 보고 표적을 탐지하는 전통적인 레이더와 달리, 양자레이더는 섬유 커플러, 양자점 등을 사용해 얽힌 양자를 쏘아 표적을 탐지한다. 얽힌 양자가 표적에 반사되어 양자레이더로 되돌아오는데 걸리는 시간을 통해 표적의 위치, 레이더 반사 단면적, 속도, 방향, 기타 속성을 추론할 수 있다.[63]

62) Lauren Saccone (2020)

63) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

양자레이더 개발은 국가 차원에서 비밀리에 이루어지고 있어 설계기술 확보에 어려움이 많아 아직 무기체계 적용은 미약한 수준이나 세계 주요국은 양자레이더를 스텔스 표적탐지를 위한 핵심 무기체계로 인식하여 국가차원에서 비공개로 개발 중인 것으로 파악된다. 양자레이더가 신호 대 잡음비를 혁신적으로 증대할 수 있어 저피탐/스텔스 표적을 탐지하여 무력화할 수 있는 미래 신개념 기술이다. 또한, 얽힌 양자를 변조하거나 복제하려는 시도도 탐지할 수 있기 때문에 적의 기만책에 즉각적인 대응이 가능하다. 하지만, 현재의 단일광자 이미지 검출 속도가 매우 느려 양자레이더를 군사용으로 적용하기에 어려움이 크다. 이를 실용화하기 위해서는 얽힘광자쌍 생성속도가 10^{10} 개/초 이상 되어야 한다.

그림 V-3-9 양자레이더 원리 및 스텔라 탐지 모식도와 영상



※ Mehul Malik et al. (2012) 집필진 재구성

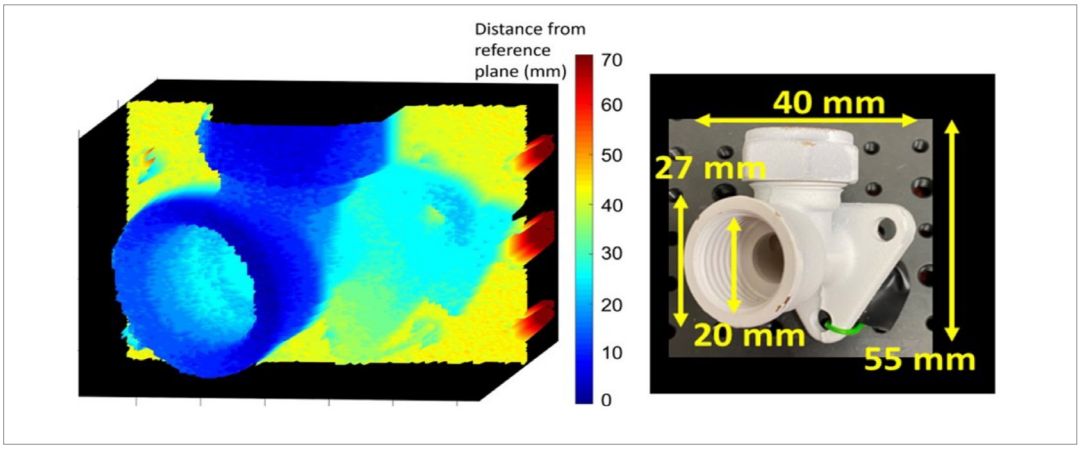
7. 양자 라이다를 이용한 실시간 3D 공간 정보 제공 서비스

양자 라이다(Lidar, Light Detection And Ranging)는 얽힘 현상이 있는 서로 반대 스핀을 가진 양자원을 가지고, 하나는 기존의 라이다 원리처럼 공간으로 쏘고 다른 하나는 가지고 있다가 공간으로 쏜 양자가 돌아오면 그것이 전에 쏜 양자인지 판단한다. 그리고 맞으면 데이터로 처리, 아니면 무시하는 방식을 통해 정확한 타겟팅과 에러 데이터를 줄여 더욱 정확한 공간 정보를 취득할 수 있다.

이러한 라이다를 개발하기 위해서는 하나의 광자라도 감지가 가능해야 한다. 빛을 이용하여 주변을 탐색하는 장치인 라이다는 3D로 공간 정보를 취득하여 높은 정밀도의 공간 정보 취득이 가능하다. 감지를 위한 센서로서의 기존의 라이다는 APD(Avalanche Photo Diode)를 활용하지만, 양자라이다는 SPAD(Single Photone Avalanche Diode)를 사용한다. 이를 활용할 경우, 광자 한 개에 해당되는 에너지에도 반응하기 때문에 양자라이다의 민감도가 획기적으로 올라갈 뿐만 아니라, 같은 파워 소스를 사용한다면 APD 적용 라이다에 비해 더 먼 거리를 감지할 수 있다. 또한 펄스 방식으로 구현되는 라이다 소스는 펄스의 길이가 짧아질수록 시간 분해능이 높아져 정확도가 올라간다. 양자라이다의 경우

펄스를 기존의 라이다보다 더욱 짧게 운용해도 감지에 문제가 없다.[64] 2023년 영국 헤리엇-와트(Heriot-Watt) 대학교의 에딘버그(Edinburgh) 대학교의 연구원들은 단일 광자 Lidar로 물탱크에 담긴 물체의 3D 이미지를 실시간으로 재구성하는 것에 성공했다. 이전 저조도 조건에서도 작동 가능한 단일 광자 감지는 매우 높은 침투력을 어형하기에 3D 이미지를 얻는데 제한적인 환경이었으나 이를 극복하였고, 수중 라이더는 수중 고고학 현장을 감시하거나 조사하고 국방 및 보안 분야에 활용 가능할 것으로 기대되고 있다.[65]

그림 Ⅴ-3-10 양자라이다를 이용한 파이프(오른쪽)의 3D 이미지와 물 속에 잠긴 파이프의 라이다로 측정한 영상(왼쪽)



※ A. Maccarone et al. (2023) Optica

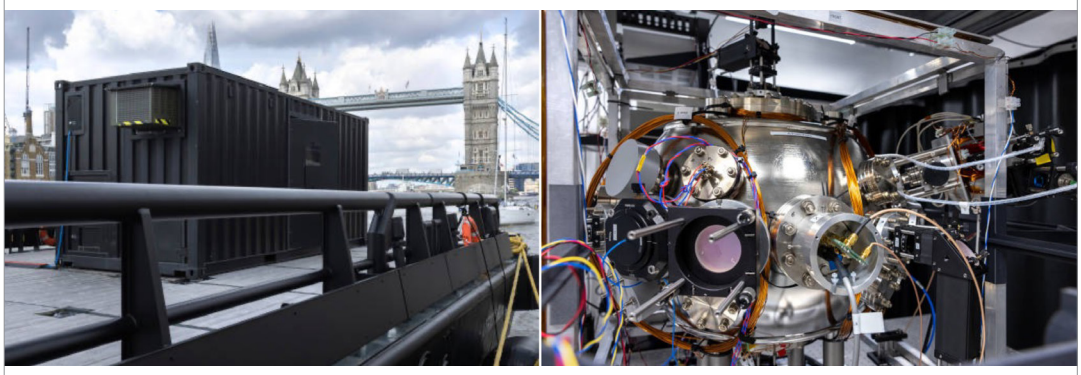
8. 양자항법시스템을 이용한 선박 위치 탐지 서비스

양자항법시스템을 탑재한 선박은 해도나 나침반보다 정확한 항행이 가능하여 지금 선박의 주류가 되는 GPS 이용 인공위성 기반 항법장치가 불필요해지게 될 것이다.[66] 실제로 인공위성은 방해나 간섭을 받을 가능성이 있다. 이에 위치를 정확하게 파악할 수 있는 기법을 탑재하는 것은 해군 군사 작전상 중요하다고 할 수 있다. 영국 해군은 지난 2023년 5월 23일에 소나, 위성 통신, GPS 등 외부 시스템에 의존하지 않고 정확하게 선박 움직임과 위치를 확인할 수 있는 양자항법 시스템 첫 실험에 성공했다고 발표했다.[67] 임페리얼 칼리지 런던(Imperial College London)에 의해 개발된 양자항법장치의 원리는 다음과 같다.

64) 전찬민 (2021)
65) A. Maccarone et al. (2023)
66) 이석원 (2023)
67) Steve Bush (2023)

10억 개의 루비듐87 원자에 레이저 빛을 조사하면 원자에서 구름이 발생하게 되고, 이를 절대 영도에 가까운 온도까지 냉각하면 원자구름은 파도를 치게 된다. 이 성질을 이용하여 중력 등 외부 힘의 영향을 고려하면서 측정하면 장치가 움직이는 속도나 방향을 계산할 수 있게 되어 위치 정보를 자세하게 파악할 수 있게 된다. 또한 시간 경과에 수반하는 원자구름이나 장치 진행 방향을 양자 가속도계로 측정하는 것으로 선박 위치 정보를 실시간으로 체크하는 게 가능하다. 또한 수중에서 GPS를 이용한 위치 정보 특정이 불가능했던 잠수함에서도 양자항법장치 도입으로 정확한 위치 정보를 특정할 가능성이 높다. 미사일, 우주선, 잠수함 등에선 양자항법시스템을 간소화한 관성항법장치라고 불리는 시스템이 이용되고 있는데, 이는 외부로부터 전파에 의한 정보를 받지 않고 탑재한 센서만으로 자신의 위치나 속도를 산출할 수 있는 장치이다. 이러한 양자항법시스템이 실현되면 관성항법장치를 이용하는 모든 것의 정밀도 향상도 기대할 수 있다.

그림 Ⅴ-3-11 양자항법장치 수송용 컨테이너(우)와 양자항법장치(좌)



※ S. Bush (2023), Electronics weekly.com

9. 양자센서 탑재 위성을 이용한 소형 물체 감시 서비스

새로운 필수 군사 능력은 다른 위성, 우주 물체, 우주 쓰레기를 탐지하고 추적하는 기술로 양자 중력계, 또는 자력계와 같은 양자감지 기술을 지구 궤도의 위성, 특히 저궤도(LEO)에 배치하여 10cm 이하의 물체를 포함한 다량의 우주 쓰레기를 감지하는 것이다. 예를 들어, 미국 우주 감시 네트워크(US Space Surveillance Network)의 일부인 Space Fence 프로젝트의 우주 감시 레이더는 최소 크기가 5cm 정도인 우주 쓰레기를 추적할 수 있는 것으로 알려져 있다. 보다 작은 크기와 대량의 우주쓰레기를 추적하기 위해서 기존 레이더 대신 광학 광자의 손실이 없기 때문에 양자레이더나 라이다가 대안으로 고려되고 있다. 시뮬레이션에 따르면 우주의 양자레이더는 Ground-based Electro-Optical

Deep Space Surveillance(GEODSS)[68]와 비교하여 우주에서 최소 10배 더 높은 탐지 감도 및 물체 추적 감도를 제공할 수 있어 위성, 우주 쓰레기, 유성체와 같은 작고 어둡고 빠른 물체를 추적하는 데 매우 유용하다.

그림 Ⅴ-3-12 전 세계 우주 감시 네트워크



※ Theresa Hitchenes (2019) 집필진 재구성

68) Theresa Hitchens (2019)

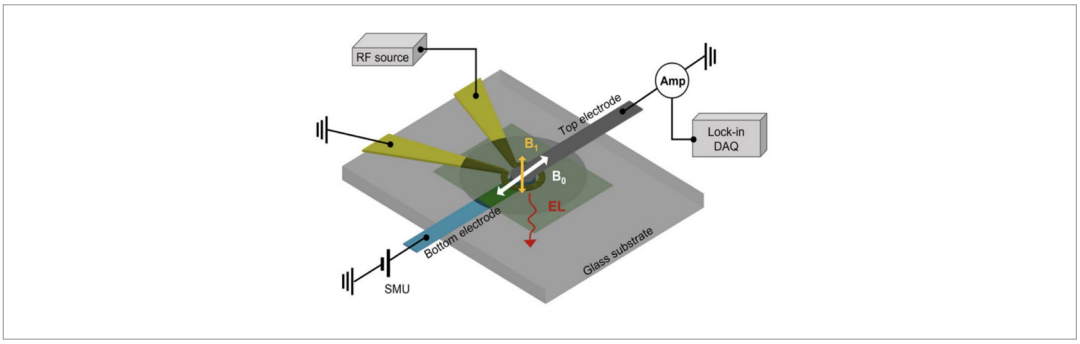
제3절 제조·반도체

1. 건축 자재 결함 감지 서비스

2023년 뉴사우스웨일스대학교(University of New South Wales) 연구진이 스마트폰을 휴대용 양자 센서로 변환하는 방법을 공개하였다.[69] 디지털 디스플레이에 널리 사용되는 반도체 재료의 일종인 유기발광다이오드(OLED)를 작은 마이크로파 전자 장치를 통합하고, 양자 감지 및 자기장을 매핑하여 이미지화하는 방법이다.

OLED에 전압을 가하면 전자와 정공이 서로 다른 층에 주입되어 붕괴할 때 가시광선을 방출하는 엑시톤(Exciton)이 형성된다. 외부 자기장에 매우 민감한 전자와 정공의 스핀은 이러한 발광 과정에서 중요한 역할을 한다. 회전 방향 스위치에 의해 유도된 신호 변화를 측정함으로써 장치가 노출되는 자기장의 강도를 확인할 수 있다. OLED 장치 전체에 작은 진동 자기장을 생성하는 마이크로파 공진기와 OLED를 통합하여 OLED 화면의 각 개별 픽셀이 작은 자기장 센서로 기능할 수 있도록 했다. 이러한 기술을 이용하게 되면, 레이저 입력 없이도 마이크로칩 규모로 작동할 수 있다. 따라서 이 이미지는 매우 고해상도로 서브마이크론 길이 척도로 세부 정보를 볼 수 있기 때문에 핸드폰으로 건축 자재의 결함을 감지하는 것이 가능하다. 앞으로 아키텍처를 최적화하여 현장 감도를 높이게 되면 건축 자재의 결함 감지 뿐만 아니라 다이아몬드나 보석의 결함 감지에도 충분히 활용될 수 있을 것이다.

그림 Ⅴ-3-13 OLED 기술 적용 양자 센서



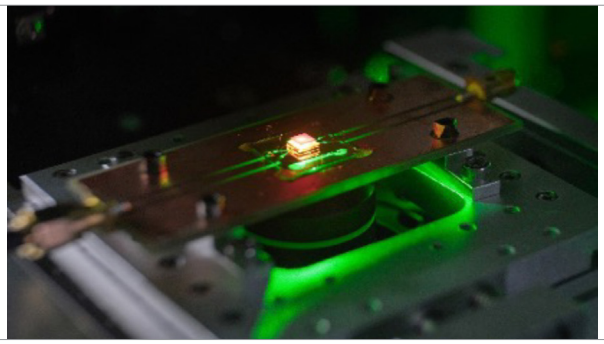
※ R. Geng et al. (2023)

69) R. Geng et al. (2023)

2. 배터리 불량검출 감지기

모바일기기, 전기차 등에 사용되는 2차전지에 대한 수요가 급증하는 동시에 2차 전지를 제조하는 공정 중 발생하는 미세한 불량으로 인한 배터리 폭발 및 화재 사고가 빈번히 발생하고 있다. 현재의 배터리 불량검출보다 높은 해상도와 민감도를 구현할 수 있는 양자센서 기반의 배터리 불량검출 감지기술은 100배 이상의 민감도 및 공간분해능 구현이 가능한 다이아몬드 및 원자 증기셀 기반 양자 자기장 센서를 활용하는 것으로 가능할 것으로 보인다. 다이아몬드의 낮은 민감도 대비 높은 분해능 및 원자 증기셀의 높은 민감도 대비 낮은 분해능 등 각기 상이한 특성을 활용할 수 있을 것이다.

그림 Ⅴ-3-14 자기장과 온도를 정밀측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서

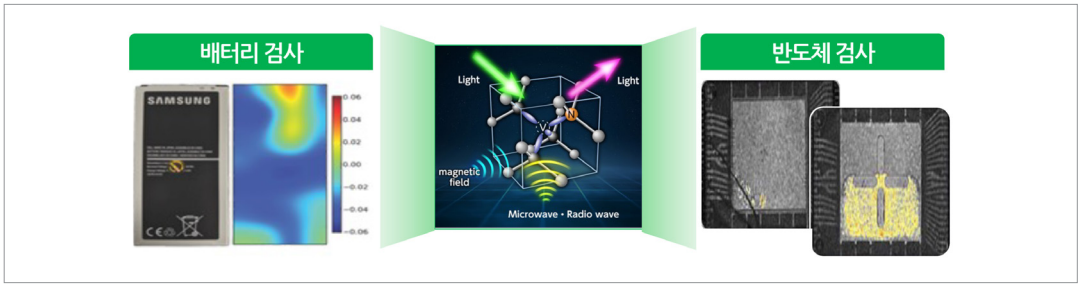


※ KRISS (2022)

한국 KRISS는 2022년 3월에 발표한 자기장과 온도를 정밀 측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서가 다중 센싱 기술을 추가로 사용하면, 하나의 센서로부터 자기장과 온도의 변화를 동시에 감지할 수 있어 자기장과 온도의 변화가 복합적으로 일어나는 대상의 정밀 진단이 필요할 경우 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 즉 반도체 소자 또는 리튬이온 전지는 전자나 이온이 이동하면 자기장과 함께 열이 발생하게 되는데 외부에서 보이지 않는 배터리 분리막의 손상이나 그로 인한 발열을 조기에 감지하여 대형 사고의 발생을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.[70] 배터리의 화학적 원리 규명으로 성능을 개선하고, 초정밀 불량검출을 통한 배터리 안전성 개선 연구가 필요하다. 국제 이차전지 시장 규모는 2020년 461억 달러에서 2030년 3,517억 달러로 성장할 것으로 보인다. 따라서 배터리 화재 및 폭발 사고를 저감할 수 있는 초정밀 배터리 불량검출 시스템의 수요 또한 대폭 증대될 것으로 기대된다. 이에, 양자기술을 접목한 초정밀 배터리 불량검출 시스템의 개발로 확대되는 차세대 이차전지 기술경쟁 시장에서 국내 기업이 우위를 점할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

70) KRISS (2022)

그림 Ⅴ-3-15 양자센싱 기술 응용(배터리/반도체 검사)



※ NIA (2021) 집필진 재구성

3. 가스 센싱 서비스

석유화학 플랜트 및 가스 시설물의 사고는 심각한 인적, 물적 피해를 유발시킨다. 최근 발생하는 가스 시설물의 대형 사고는 시설의 노후나 불량, 작업자의 조작 미숙 등 여러 가지 원인에 의해 발생하는 사고가 대다수이다. 특히 가스 수송 및 저장을 위한 가스 시설물은 항상 위험에 노출되어 있으며, 넓은 지역에 분포되어 있다. 이러한 가스 시설물의 효과적인 모니터링을 위해서는 전통적인 센싱 방법 외에 국부적, 전역적인 센싱을 위한 여러 방식을 혼합한 형식의 센싱 기술 및 산업용 통신 기술을 도입하여 사고 대응 기술과 사고 예방 기술을 함께 적용한 안전관리 중심 기술로의 전환이 필수적이다.[71] 기존 접촉연소식 가스검지기의 경우 직접 가스와 접촉하여 가스누출을 감지하기에 넓은 면적에서는 효율적이지 않다. OGI 카메라는 IR CCD 기반으로 넓은 영역의 가스누출은 감지할 수 있으나, 누출농도 및 소량의 가스누출을 감지할 수 없어, 적용 대상이 제한적이다. 국가 산업단지나 가스 생산기지 같은 원거리의 넓은 면적을 모니터링하기 위해서는 새로운 솔루션 도입이 필요하다. 양자기반 가스누출 감지기는 이러한 산업계의 요구를 충족하는 솔루션으로서 원거리의 미세가스 누출을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 영상화와 결합하여 시각적으로 가스누출의 위치를 쉽고 빠르게 알 수 있어 신속한 사고 대응을 할 수 있다. 검출기로는 기존 APD보다 감도가 좋은 단일광자 검출기와 같은 민감도가 뛰어난 검지기를 사용한다. SPAD는 브레이크 다운 전압 영역에서 작동한다. SPAD는 가이거 모드(Geiger Mode)로 동작하기 때문에 APD(Linear Mode)와 비교하여 광 민감도가 우수하다. 양자기반 가스누출 영상화 시스템은 반사형 가스 검출 시스템으로 광 송수신기가 있으며 가스가 있는 곳의 후방에 위치한 물체를 맞고 반사된 후방산란 빛을 감지하여 가스 농도를 검출하는 방식이다. 구성은 크게 가스 농도를 검출하는 양자가스 광학부와 영상화를 위한 카메라부, 시스템 운영 및 신호처리를 하는 제어부, 데이터 전송을 위한 통신부 그리고 가스누출을 모니터링할 수 있도록 하는 서버 및 UI 부분으로 이루어져 있다. 가스누출 영상화를 위해서 내부 스캐너 시스템과 외부 Pan Tilt Unit을 사용하여 광범위 영역을 정밀하게 스

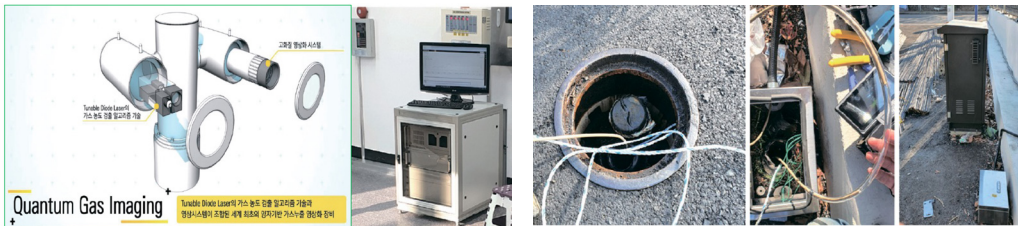
71) 가스신문 (2021)

캔하도록 설계되어 있으며 방폭지역에서 사용 가능하도록 방폭 구조로 설계되었다. 영상화를 위해서는 빠른 반응속도를 내는 것이 핵심기술인데 이를 위해 고속 가스 농도 데이터 처리가 가능한 하드웨어 구조로 개발되었다.

양자기반 가스누출 감지 시스템으로 원거리 광역 미세누출 모니터링이 가능해짐에 따라 누출 위치와 정도를 신속히 파악하게 되어 사고 발생 시 신속하고 정확하게 대응할 수 있어 대규모 인명피해를 줄이는 등의 산업단지 및 국민의 안전에 크게 기여할 것으로 예상된다. 특히 개발된 양자기반 메탄가스 누출 감지 시스템은 가스공사 생산기지와 공급기지, LNG터미널, 석유화학플랜트와 같은 대단위 면적에 위치한 배관 및 탱크(압력용기)의 가스누출 여부 및 위치를 파악할 수 있어 도시가스 사용의 안전에 크게 기여할 것이다. 또한 광 센싱을 이용한 가스누출 감지 시스템은 광섬유가 설치된 전 영역의 모니터링을 가능하게 한다. 이는 분산 온도 감지를 이용한 가스누출 감지 시스템에서 1km 배관에 광섬유를 설치할 경우 분산 온도 감지 시스템의 분해능인 0.5m 간격으로 2,000개의 가스 센서를 설치한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 이는 신속한 가스누출 대응으로 인한 2차 사고를 막을 수 있을 뿐만 아니라 유지 보수 지점을 쉽게 발견하게 하여 생산효율을 향상시킬 수 있다.

양자기술은 광음향 검출을 사용하여 고체 물질의 음파를 양자화하는 준입자인 광자 수준까지 초정밀 사운드 감지에 사용할 수 있다. 미량 가스 감지에 적용 가능한 기술인 광음향 검출은 양자 캐스케이드 레이저(QCL)와 결합하여 가스 또는 일반 화학 검출에 사용할 수 있다. QCL은 중파 및 장파장 IR 대역에서 방출하는 반도체 레이저로, -70℃보다 훨씬 낮은 냉각이 필요하나 최근 개발로 인해 약 -23℃에서 작동하는 칩 수준 구현이 가능하여 휴대용 냉각 시스템으로 개발할 수 있다.[72)]

그림 Ⅴ-3-16 양자기반 가스 누출 영상화 장비(한국 퀀텀센싱)



※ 가스신문 (2021)

72) Scott E. Crawford et al. (2021)

한국가스안전공사, 가스안전연구원, SK텔레콤, 퀀텀센싱 등 기업들이 업무협약을 통해 양자센싱을 통한 차세대 가스안전솔루션의 상용화를 추진하고 있으며, 우주로는 ADP Chip(Avalanche Photo Diode)을 이용하여 메탄 가스센서 검출 모듈을 개발하고 있다. 산업화 모델을 만족시키기 위한 주요 방안으로는 양자센서를 적용한 기존 대비 가스누출 탐지능력 향상 및 모니터링 기술의 적용, 양자 및 스캐닝 기술을 활용한 원거리 가스농도 측정 제공, 드론 탑재 솔루션으로 주택 외부 등의 배관 도시가스 누출 탐지가 있다.[73)]

그림 Ⅴ-3-17 한국 양자기반 가스센싱 기술



※ NIA (2021) 집필진 재구성

73) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

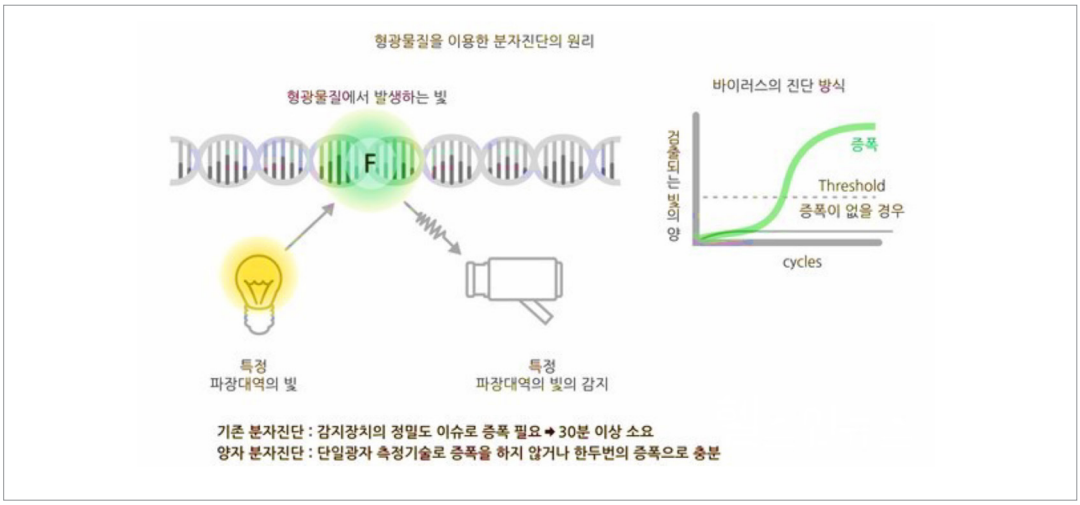
제4절 의료·제약

1. 질병 감염 여부 진단 서비스

광자를 측정하는 기술인 양자분자 진단 기술은 양자통신, 양자보안기술과 양자컴퓨터에 적용되는데, 이는 분자 진단에도 활용이 가능하다.[74] 분자 진단은 유전자를 분석하여 질병 감염 여부를 검사하는 방법으로 항원, 항체 반응을 이용하는 면역 진단에 비해 정확도가 높다. 하지만, 이 진단의 경우 소량의 유전자(DNA, RNA)로는 검사가 어려워 유전자 증폭(PCR) 과정을 거쳐야 하며, 증폭 방법에 따라 적게는 20~40분, 많게는 3~4시간 정도가 소요된다.

양자 분자 진단 기술은 600nm 파장대의 광자 하나하나를 측정하여 소량의 바이러스만 있어도 어떠한 종류의 바이러스인지 신속하게 감지할 수 있는 기술이다. 이는 필요한 광자를 발생시키고 관측하는 측정 시스템과 아주 작은 양의 빛을 측정하기 용이하도록 빛이 통과하는 광도파로와 같은 유도로를 만드는 것이다. 열영상카메라 개발로 축적된 반도체 공정 기술을 보유한 한국의 트루윈은 양자 분자 진단에 필요한 광도파로 분석 키트 개발을 위해 미국의 제네시스퀀텀과 광도파로 분석 키트 개발을 위한 제품 공동 개발 계약을 체결하였다.

그림 Ⅴ-3-18 기존 PCR 진단과 양자 분자 진단 기술 차이점



※ 하수지 (2022)

74) 하수지 (2022)

2. 생체 자기(뇌자도, 척수 유발 자장, 심자도) 검사 서비스

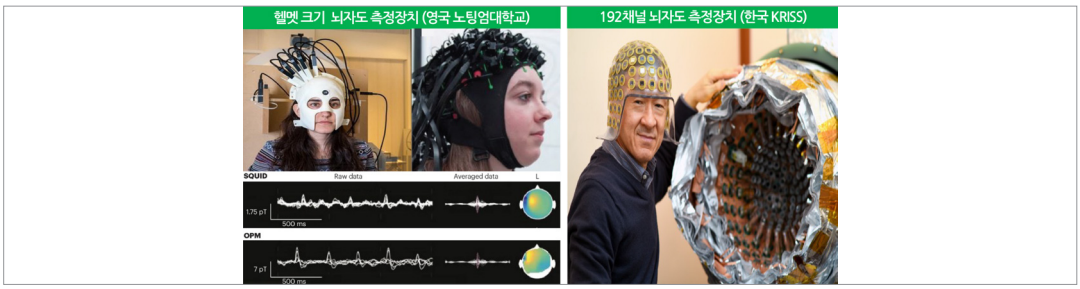
양자센서를 사용하면 뇌자도 측정장치(화학·의료 부분에서 자세히 설명될 것이다.)는 냉각 없이 필요한 감도에 도달할 수 있고 작은 패키지로 더 많은 센서를 환자의 머리에 놓을 수 있으며 환자가 훨씬 더 자유롭게 움직일 수 있다. 움직임이 자유로워진다는 것은 진단, 치료 및 응급 의료에 모두 가능하며 한 걸음 더 나아가, 언젠가 이 직접적인 두뇌 판독이 궁극적인 제로 UI, 컴퓨터의 직접적인 두뇌 제어를 가능하게 할 수 있다는 의미이다.[75)]

초전도 양자간섭 디바이스(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)는 우수한 자기장 분해능을 가진 장치로 이것을 이용하면 사람 몸에서 발생하는 미약한 자기장을 검출할 수 있다.[76)] 인간은 외부로부터 자극을 받으면 뇌에서 유발 뇌자장이라고 부르는 자기장이 발생하는데, 크기는 100fT 정도로 자기잡음의 크기 1nT 정도와 비교해서 매우 작지만 SQUID로 측정 가능한 수준이다. 박막 적층기술을 이용하여 자속이 입력되면 주기적으로 전압을 발생시키고, 이 주기함수의 기울기가 클수록 감도도 높아진다. 이 감도를 환산해 보면, 니오븀계의 초전도 소자를 이용한 것이 가장 우수한 자장 분해능을 나타내고, 자기잡음(Magnetic Interference)을 낮추기 위해서 가산평균기법을 이용하거나, 내부에 설치된 코일의 접속방식을 바꾸어서 해결한다. SQUID가 여러 개 배열된 모양으로 액체 헬륨 속에 설치된 뇌자계는 피험자의 머리를 둘러싸서 뇌자장의 분포를 측정하고 뇌 속의 전류 크기, 위치, 방향 등을 계산하여, 활동하고 있는 부위와 전류의 크기를 추정하는 원리를 적용한다.[77)] 뇌자장을 측정할 때 자극을 주는 부위를 바꾸면 반응하는 대뇌 피질의 활동 부위가 변하는 것을 이용해서 뇌의 감각기능이나 운동기능이 어느 위치에 국한되어 있는지를 뇌자계로 확인할 수 있다. 이 현상을 이용하면 뇌에 대한 외과적 수술 전에 집점 부위를 정확히 파악할 수 있다. 또 자장에서 나오는 알파파는 눈을 뜨고 감을 때 머리 표면에서의 공간 분포가 다르기 때문에, 이 현상은 뇌전증, 자폐증, 조현병, 알츠하이머 환자를 조기 진단할 때 응용할 수 있다. 뇌 내의 신경 활동은 뇌파검사(EEG)에 의해 감지되는 전기적 활동뿐만 아니라 상응하는 자기장을 생성한다. EEG의 주된 한계는 전기장이 두개골에 의해 약화되고 퍼지지만 자기장은 영향을 덜 받는다는 것이다. 이 작은 자기장을 측정하면 뇌 활동을 관찰할 수 있지만 이전 세대의 센서는 액체 헬륨으로 센서를 냉각해야 하므로 센서가 환자에게 얼마나 가까이 다가갈 수 있는지 제한된다. 양자센서를 사용하면 냉각 없이 필요한 감도에 도달할 수 있고 작은 패키지로 더 많은 센서를 환자의 머리에 놓을 수 있고 환자가 훨씬 더 자유롭게 움직일 수 있다. 척수유발 자장측정장치(MSG)는 척수의 신경축삭(Nerve Axon)에서 나온 신호가 만든 수십 fT 이하의 미약한 자장을 경부에서 검출하여 척수의 기능을 조사하는 장치로, 손발의 마비나 저림 증상의 원인인 척수의 압박장해 부위를 비침습적으로 확인할 수 있다. 뇌나 심장에 비해서 목은 관측범위가 좁기 때문에 벡터

75) Simon Jordan (2020)
76) 허원도 (2012)
77) 황응준 (2021)

SQUID 시차형 자속계를 채용하여 장해가 발생한 위치를 파악하고, 외과적 수술의 지침이 되는 정보를 얻을 수 있다. 뇌자계(MEG)나 MSG는 매우 효과적인 의료기기이지만, 장치의 가격과 운전비용이 높다. 이를 줄이기 위해서는 뇌자계의 경우 소프트웨어나 하드웨어에 의해서 잡음을 감소시킬 방안이, MSG는 증발한 헬륨을 회수해서 재활용하는 방법이 검토되어야 한다.

그림 V-3-19 뇌자도 측정장치



※ 황응준 (2021)

일본 Uehara 연구진은 이 장치를 이용한 MEG 및 MSG를 개발하여 의료분야에 응용했다.[78] 2018년 영국 노팅엄대학교와 유니버시티칼리지런던의 연구진은 MEG를 상온에서 작동하는 원자자력계 센서를 적용하여 냉각장치를 없앰으로써 헬멧 크기로 줄여 편리한 측정이 가능하도록 했다.[79] 이 센서를 설치하는 헬멧은 3D 프린터로 제작하여 무게가 905g 수준이므로 자기장 측정하는 동안 움직일 수도 있고, 어린아이들에게도 착용 가능할 것으로 보여 소아기 뇌 발달 연구에 유용할 수 있다. 캐나다 워털루대학교 양자컴퓨터연구소에서 양자 프로세서로 다이아몬드 겸함을 사용하는 새로운 MRI 기술을 개발 중으로 이는 원자 하나의 크기보다 수천배 정밀함을 가지는 것을 목표로 하고 있다.

한국 KRISS의 이용호 박사는 SQUID 센서를 이용하여 심자도 및 뇌자도 측정시스템 개발을 시작하여, 2002년 40채널 장치를 개발하여 심장과 뇌 일부를 측정하는데 성공하였다. 2004년에는 세브란스 병원에 심자도 장치를 설치해 기초 임상연구를 시작하였으며, 2010년 독일 메디컬 스타트업에 심자도 측정장치 기술이전에 성공하였다.[80] 뿐만 아니라 2016년에는 뇌전도 발생 부위를 정확하게 추적하고 뇌기능과 정신질환 진단에 효과적으로 사용할 수 있는 뇌자도 측정장치를 호주의 의료장비 글로벌 기업에 기술 이전하는 것에 성공하였다. 또한 심장질환 진단을 위해 초전도양자간섭계를 이용하면 심자도 시스템 개발도 가능할 것으로 보인다. 심자도 신호는 약 1pT 또는 그 이하의 미세신호이므로, 뇌자도 측정처럼, SQUID 기반으로 하는 자력계를 이용한다면 가능할 것으로 보인다. 2022년에 유한양행은 휴

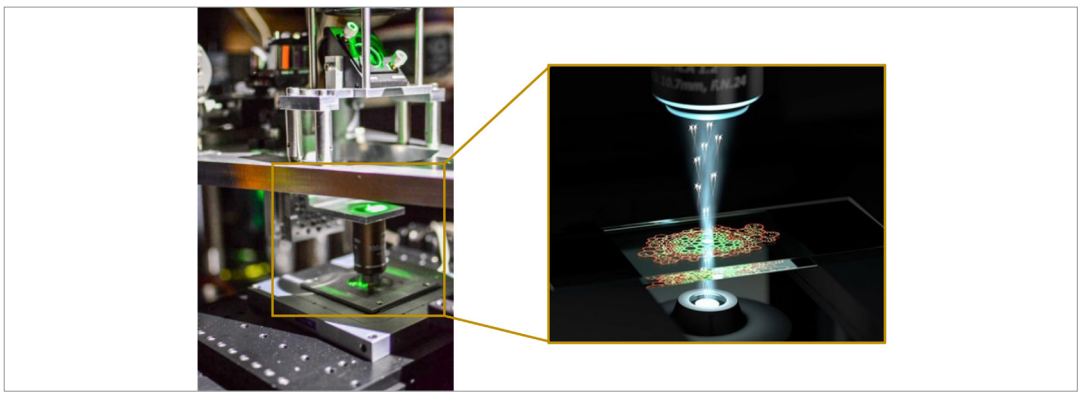
78) 지혁민 (2022)
79) 고광본 (2018)
80) 황응준 (2021)

이노와 함께 환자가 AI 웨어러블 심전도장치를 휴대하고 다니다가 심장의 불편함이나 증상을 느낄 때 심전도를 간편하게 측정하면 고대안암병원 심장내과와 흉부외과 교수들이 원격으로 진단하는 모니터링 사업을 추진하고 있다.[81] 휴이노는 최대 14일까지 측정한 심전도 데이터를 AI 기술로 분석해 의료진의 진단을 보조하는 의료기기인 메모패치(MEMO PatchTM)를 2021년부터 유한양행을 통해 판매하고 있다.

3. 양자현미경 이용 비파괴 생물학적 구조 관측 서비스

2021년 호주 퀸즈랜드대학교의 Catxere Casacio는 최초의 얽힘기반 센서인 양자현미경을 개발했다.[82] Casacio는 광학 노이즈를 방지하기 위해 양자물리적 트릭인 양자얽힘을 사용하여 두 번째 레이저 빔의 광자가 더 독립적이고 변동하지 않으나 양자물리적으로 서로 결합되는 방식을 활용하였다. 이러한 얽힘은 Stoke's field에서 잡음의 진폭을 억제하거나 압착할 수 있기 때문이다. 이 기술을 사용하면 신호는 변경되지 않고 더 약한 노이즈로 인해 레이저 강도를 높이지 않고도 더 선명하게 나타난다. 그러므로 관찰 간격 동안 평균적으로 1개 미만의 광자가 샘플 구조에 의해 산란되는 경우라 할지라도 라만 신호를 감지할 수 있어, 상대적으로 가벼운 레이저 강도로도 높은 해상도와 대비를 얻을 수 있게 되었다. 이 양자현미경의 양자얽힘은 세포를 파괴하지 않고 35% 향상된 선명도를 제공하며, 그에 따라 지금까지 볼 수 없었던 미세한 생물학적 구조를 확인할 수 있다.

그림 Ⅴ-3-20 양자현미경(호주 퀸즈랜드대학교)



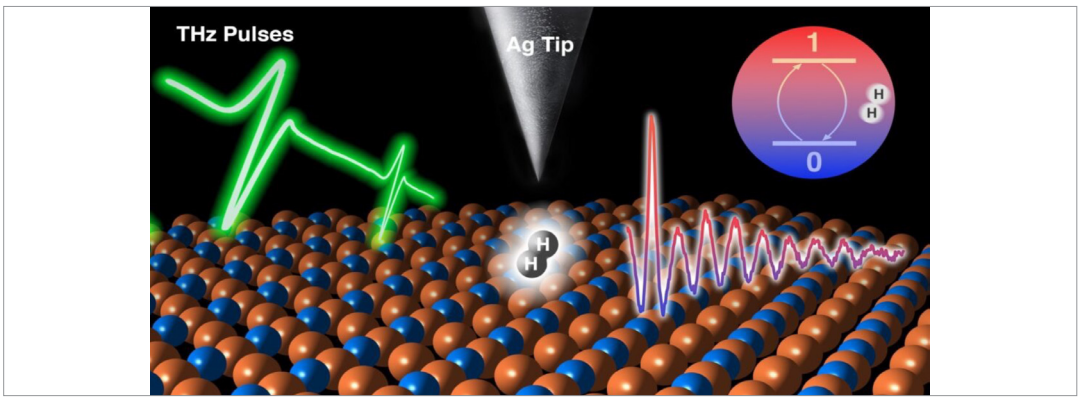
※ 문광주 (2021) 집필진 재구성

81) 황응준 (2021)
82) 전승현 (2022)

미국 캘리포니아대학교(Irvine) 물리학자들은 2022년 4월 THz 레이저가 장착된 주사 터널링 현미경(STM)에서 양자센서로 수소 분자를 사용하는 것을 시연하였는데, STM의 은 팁과 작은 질화구리 섬이 배열된 평평한 구리 표면으로 구성된 샘플 사이에 두 개의 결합된 수소 원자를 배치하는 방법을 사용하였다.[83] 매우 민감한 프로브를 만들어 0.1Å까지의 변화를 볼 수 있어 이 분해능에서 샘플의 전하 분포가 어떻게 변하는지 볼 수 있다. STM 팁과 샘플 사이의 공간은 약 6Å로 거의 상상할 수 없을 정도로 작다. Ho의 팀이 조립한 STM은 이 공간에 흐르는 미세한 전류를 감지하고 수소 분자와 샘플 요소의 존재를 증명하는 분광 판독값을 생성하는 장비로, 단일 분자를 통한 THz 유도 정류 전류를 기반으로 하는 화학적으로 민감한 분광법의 첫 번째 시연이라고 말했다. Ho에 따르면 수소의 양자 일관성을 기반으로 하는 이러한 세부 수준에서 물질을 특성화하는 능력은 촉매 과학 및 공학에 큰 도움이 될 수 있다. 이 기술은 2차원 물질의 분석에도 적용될 수 있다.

한국 ETRI는 바이러스 단위를 관찰할 수 있는 고해상도의 양자현미경에 관한 연구를 시작하였으며 해당 기술 확보를 위해 지속적 연구개발 필요성에 대해 언급하기도 하였다. 이에 의료 분야에서 셀 단위의 국소적인 부위를 관찰하는 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있고 바이러스 단위 반응의 현미경 영상 촬영 기술 구현을 기대할 수 있다. 이외에도 보령제약은 양자현미경을 개발하는 데 관심을 가지고 있다.

그림 Ⅴ-3-21 수소 분자의 양자센서 전환 시연(미국 캘리포니아대학교)



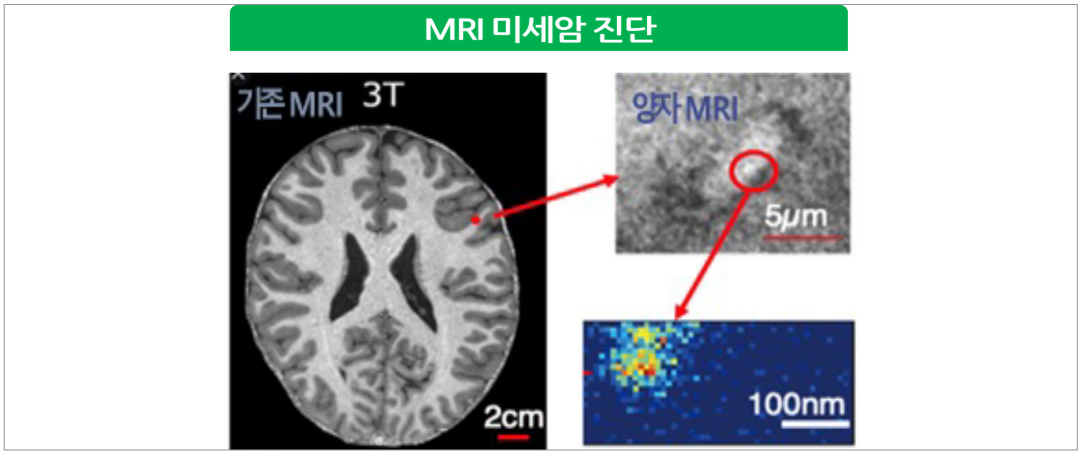
※ David (2022)

83) David (2022)

4. MRI 진단 서비스

자기 공명 영상(MRI)은 자기장에서 수소 핵의 서명을 사용하는 방식으로, 환자의 신체에 있는 물이 전파로 펄스될 때 재방사되는 작은 자기장은 신체의 다른 지방, 혈액, 근육 조직 사이의 대조 정보를 제공하게 된다.

그림 Ⅴ-3-22 양자 MRI를 통한 미세암 진단



※ 과학기술정보통신부 (2021)

이 시스템은 와이어 코일과 전자증폭기를 사용하여 전통적인 방식으로 자기장을 감지한다. 양자센서는 이 영역을 직접 감지하여 감도, 휴대성 및 비용을 개선할 수 있을 것이다. 또한 핵자기공명, MRI의 기본 물리학은 화학 분석 또는 폭발 탐지와 같은 산업 응용 분야까지도 적용가능하다. 새로운 센서는 이러한 감지기를 더 단순하고 민감하게 만들어 새로운 응용 분야도 개척 가능할 것이다.[84] 한국 순천향대병원은 정밀 MRI와 양자내시경을 활용하는 방안을 고려하고 있다.

한국 IBS는 세상에서 가장 작은 MRI 측정에 성공하였다.[85] 전자와 양성자 속에 있는 자석과 같은 스핀의 밀도를 측정하는 MRI는 스캔하기 위해서는 수십억 개의 스핀이 필요하지만, 이 기술은 표면 위 원자 한 개에 대한 자기공명영상 측정이 가능함을 증명한 것이다. 이를 기반으로 단일 원자 MRI를 사용해 분자 및 자성 물질과 같은 보다 복잡한 구조의 스핀 상태들을 시각화할 수 있어, 이를 활용하게 된다면 나노 스케일의 자기 구조 분석을 요하는 신물질·약물 개발에 활용 가능할 것으로 보인다.

84) 고광본 (2018)
85) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

5. 진단 지원 서비스

대장암을 조기 진단하면 생존율이 9배 증가하고 치료비가 4배 정도 낮아지는 것처럼, 질병 조기 진단은 더 나은 예후와 치료를 제공할 뿐만 아니라, 의료비용을 낮출 수 있다.[86)87)] 하지만 질병에 대한 현재의 진단 및 치료는 복잡하고 느리고 비용이 많이 들며 진단 편차가 약 15~20%이다. X선, CT 스캔, MRI를 이용한 진단과 치료에서 노이즈, 데이터 품질, 복제성 문제가 발생하게 된다.[88)] 이와 관련하여 양자 보조 진단은 의료 이미지를 분석하고 이미지의 가장자리 감지와 같은 처리 단계를 감독함으로써 이미지 보조 진단을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 현재 기술은 진단을 위해 단일 세포 방법을 사용한다. 앞으로는 단일 세포 서열 분석 데이터 및 유세포 분석에 생화학적, 물리적 특성을 기반으로 한 다양한 기술의 데이터 세트를 결합하는 고급 데이터 분석 방법이 필요하다. 이 분석 방법은 건강한 세포로부터 암세포 통합과 같은 중요한 진단에 필수적이나 예측 변수가 상당히 커지는 확장된 특이 공간이 필요하다. 양자 벡터 머신(Quantum vector machine)과 같은 양자 머신러닝 기술을 사용하면 이러한 분류가 가능하고 단일 세포 진단 방법이 가능해진다. 바이오마커의 발견과 특성화는 대사체학, 전사체학, 단백질체학, 유전체학과 같은 복잡한 오믹스 데이터 세트 연구를 할 수 있도록 도와준다. 그러나 특성 공간을 증가시키는 관계로, 기존 계산 방법으로 분석하는 것이 거의 불가능한 복잡한 패턴과 상관관계를 유발할 수 있다. 진단 과정에서 양자컴퓨팅은 반복적인 진단 및 치료의 필요성을 제거하여 진단 통찰력을 지원하는 데 도움이 될 수 있다.[89)]

그림 Ⅴ-3-23 MRI 스캔 이미지



※ Case Western Reserve University (2018)

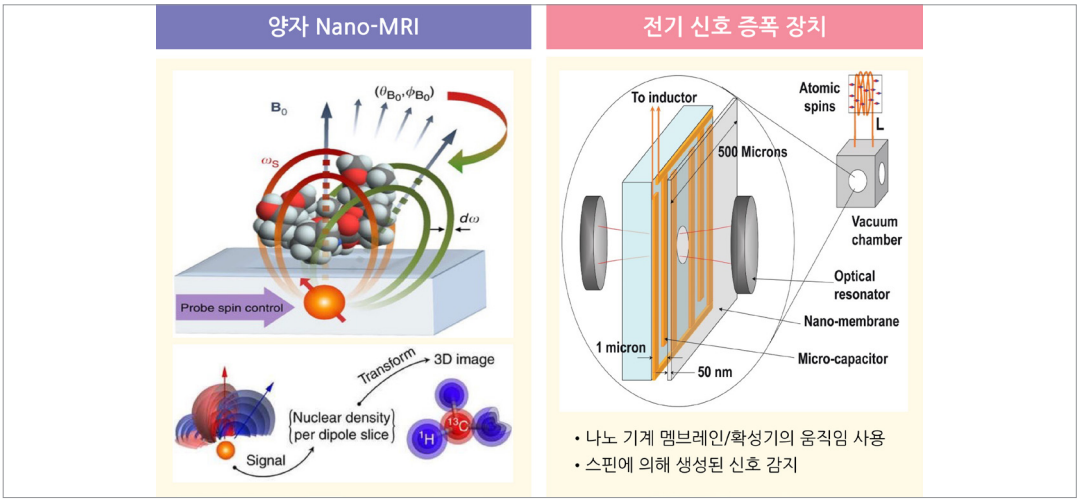
86) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
87) Raihan Ur Rasool et al. (2023)
88) Case Western Reserve University (2018)
89) QpiDHDE (2021)

6. 양자현미경 및 양자내시경 이용 의료 서비스

양자센싱 기술을 적용한 양자현미경 및 양자내시경 제작을 통해 진단 분석이 더욱 빠르고 용이해질 것으로 보인다. 현재의 광학현미경으로 가시적 관찰이 불가능한 대상을 센싱하기 위해 양자이미징 또는 자기장 센서 기반의 양자현미경 개발의 필요성이 대두되고 있다. 양자이미징 시스템은 현재의 광학현미경 대비 최소 10배 이상의 분해능이 확보될 수 있을 것으로 보기 때문에, 바이러스 단위의 반응을 동영상으로 촬영할 수 있는 해상도 수준의 구현이 가능할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 2021년 호주 퀸즈랜드 대학교 연구팀은 세계 최초로 양자얽힘 기반 센서가 적용된 양자현미경 개발을 발표하였는데, 양자얽힘 현상을 활용하면 세포의 손상없이 뛰어난 선명도를 가질 수 있음을 확인되었다. 한국은 2019년까지 KIST에서 양자센서의 고신뢰도 동작을 위한 양자광원 기술 개발에 관한 연구가 진행되고 이후 양자센서의 분해능과 효율을 높이기 위한 고효율의 단일광자광원 생성과 제어기술 및 신뢰성검증 플랫폼 개발로 추진되었다. 또한, ETRI에서는 바이러스 단위를 관찰할 수 있는 고해상도의 양자현미경에 관한 과제를 수주하여 연구를 시작하고 있다. 이러한 양자이미징 시스템은 내시경에 장착되어 있는 현미경을 대체함으로써, 셀 단위의 국소적인 부위를 관찰하는 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있고 바이러스 단위의 현미경 영상 촬영 기술 구현과 의료분야의 검사장비에 양자이미지 센서의 적용을 통해 보다 정확한 진단을 할 수 있을 것으로 기대된다.

7. 양자 MRI 의료진단 서비스

그림 Ⅴ-3-24 양자 MRI 응용 예



※ Lisa Zyga (2016), NIST (2012)

현재 최고 수준의 성능 구현이 가능한 3T급 MRI의 경우 최소 2cm 크기의 미세암을 진단할 수 있는 해상도를 가지는 반면 양자기술이 접목된 MRI는 최소 5㎛ 크기의 미세암을 진단할 수 있는 해상도의 구현이 가능함에 따라, 질병의 조기진단이 가능하고, 기존의 PCR 과정을 통한 조직검사 및 시료분석을 거치지 않고 진단검사 의학적 결과의 확인이 가능할 것으로 기대된다. 캐나다 워털루대학교 양자컴퓨터 연구소에서는 양자 프로세서로 다이아몬드 결함을 사용하는 형태의 새로운 MRI 기술을 연구개발 중이며, 한국 한국표준과학연구원(KRISS)은 2019년부터 자기장 변화에 민감하게 반응하는 양자스핀·초전도·원자 간섭효과를 이용하여 초고감도의 공간 분해능을 갖춘 자기장 센서 개발 연구를 진행중이다. 양자 MRI의 도입으로 0.05mm 이하의 미세암 발견을 실현화하고, 이로써 기존 대비 100배 이상 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있다.[90) 91)]

90) Lisa Zyga (2016)

91) NIST (2021)

제5절 교통·물류·항공

1. 항공기 시각주기유도 서비스

항공기의 경우 시각주기유도시스템 감지기술을 고도화하기 위해 양자센서를 적용하는 것을 검토하고 있다. 레이저기술을 기반으로 구현되는 현행 시각주기유도시스템의 기종 자동식별 사정거리는 100m 내외로 그 한계가 문제점으로 제기되고 있다.[92] 시각주기유도시스템은 항공기별로 상이한 좌우 편차, 정지점까지의 거리 등을 고려함으로써, 항공기가 원하는 위치에 정지하기 위한 정보를 측정 및 제공한다. 보다 정확한 정보를 얻기 위해서 악천우 등 기상변화에 최소한으로 영향을 받으며, 자동식별 사정거리가 연장된 시각주기유도시스템의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 양자센서 기반으로 항공기 시각주기유도시스템 감지기술 고도화가 필요하다. 현재 사용되는 레이저기술기반의 시각주기유도시스템은 미국 Honeywell, 벨기에 ADB- Safegate, 영국 FMT 등이 독점하고 있으며, 한국은 ㈜안세기술이 유일하게 시각주기유도시스템과 관련된 기술을 보유하고 있다. 미국 Honeywell은 전자기장을 사용하여 각 이온을 포착하므로 마이크로파 신호 및 레이저를 사용하여 조작 및 인코딩할 수 있는 기술을 이미 구축하고 있으며 중요한 하위 시스템 및 구성요소를 설계, 구축 및 통합하는데 필요한 종단 간 기능도 이미 보유하고 있다. 공식적으로 관련된 개발 방향을 언급하고 있지 않으나 보유한 기술력과 연구 방향으로부터 유추했을 때 양자라이다 기반 시각주기유도시스템을 준비하고 있을 가능성이 높다. 이 분야에 대한 기술력을 확보하게 된다면 양자통신 및 양자컴퓨터 분야와 일체형으로 개발될 가능성이 높을 뿐만 아니라, 자율주행 등과 관련된 분야로까지 확대가 가능할 것으로 기대되고 있다. 현재 시장을 장악하고 있는 글로벌 메이저 회사를 제외하고는 시장을 장악하고 있는 특정 기업이 없기 때문에 관련 기술을 빠르게 확보한다면 향후 시장 진입이 용이할 것으로 보인다.

또한 자율주행자동차에서 라이다는 드론의 눈에 해당할 수 있는 핵심기술로 양자기반의 라이다를 통해 자율주행 성능을 대폭 개선할 수 있을 것이다. 광주과학기술원(GIST) 함병승 교수팀은 자율주행에 있어 핵심 난제인 라이다의 물리학적 한계 극복을 위해 양자얽힘 빛 다발을 이용함에 따라 라이다를 퀀텀라이다로 패러다임 전환해 스캔속도, 해상도, 가시거리 등이 동시에 해결될 수 있다고 밝혔다.[93]

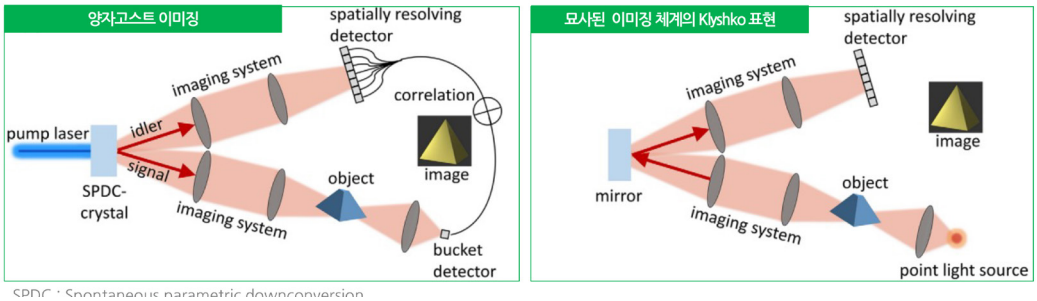
92) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

93) 김봉수 (2021)

2. 주행 정확도 및 안전 개선 서비스

자동차 센서 제조업체는 최근 주행 정확도를 개선하고 위성 항법에 대한 의존도를 줄이기 위해 양자 자이로스코프를 적용하는 방법을 검토하고 있다.[94] 주행 중 안개나 비를 통과하여 도로 상황에 대한 이미징 구현을 목표로 하는데 있어 양자 고스트 이미징 기술을 작용할 수 있을 것이다. 양자 고스트 이미징은 카메라의 시야에서 벗어난 물체를 이미징할 수 있는 기술로 광원에서 서로 다른 주파수의 두 개의 얽힌 광자가 생성되고, 광학 주파수 내에 있는 것은 고해상도 광자 계수 카메라에 의해 직접 기록된다. 3D 양자카메라, 후방 카메라, 저휘도 이미징 및 양자레이더 또는 라이다를 포괄하는 넓은 영역으로 SPAD(Single Photon Avalanche Detectors) 어레이와 같은 양자이미징 시스템은 펄스 광원과 연결된 매우 민감한 단일 광자 검출기로서 광원에서 물체까지의 범위를 측정할 수 있다.[95] 게다가 SPAD는 근적외선 스펙트럼으로 확장된 광학 스펙트럼과 함께 작동하므로 벽모서리 뒤의 숨겨진 영역처럼 시야 밖의 물체를 감지하는 데에도 사용할 수 있다.[96] 고스트 이미징 프로토콜은 분해능이 더 낮지만 양자얽힘 없이 사용가능해 매우 낮은 조명과 비와 안개와 같은 장애물이 존재하는 환경 하에서 물체를 이미징할 수 있다. 이를 적용하게 위해서 앞으로 이미지 설정이 더 작고 안정적으로, 자외선 이미징의 경우에는 추가 광자쌍 소스 개발이 필요하다. SPDC(Spontaneous Parametric Downconversion)를 사용하기 위해서는 에너지 절약에 관련된 개발이 더 필요하기 때문에 관련된 산업 분야에 대한 요구가 발생할 수 있을 것이다.

그림 Ⅴ-3-25 고스트이미징 측정 방법



※ Basset et al. (2019) 집필진 재구성

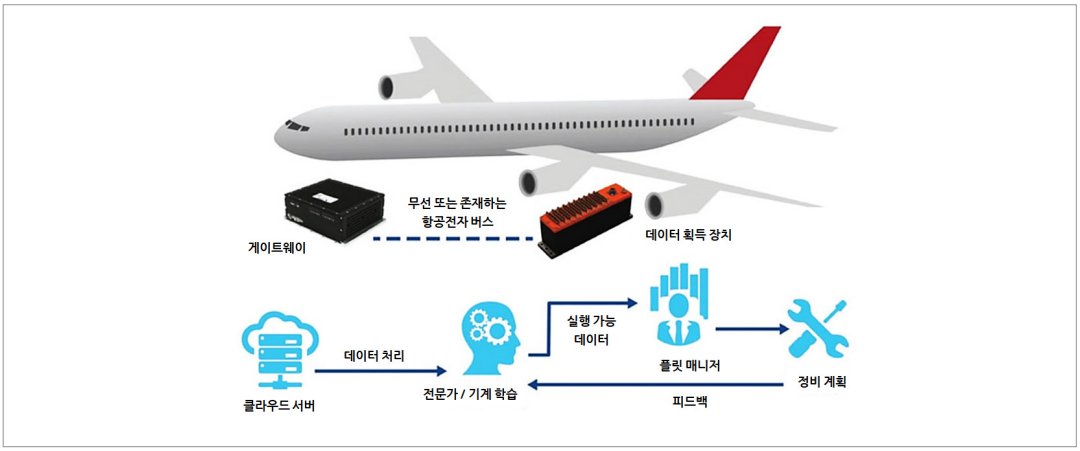
94) Simon Jordan (2020)
95) E. Scott et al. (2021)
96) Marta Gilaberte Basset et al. (2019)

3. 항공기 시스템 모니터링 및 유지보수 서비스

항공기의 시스템 문제를 해결하고 수리하는 것은 힘들고 시간이 많이 소요될 수 있다. 세분화된 데이터가 없으면 유지 관리 담당자가 시스템의 어느 부분에 결함이 있는지 식별하기 어려울 수 있으며, 문제를 찾을 때까지 시스템의 일부를 제거, 테스트 및 재설치하는 데 오랜 시간이 걸릴 수 있다.[97)]

뿐만 아니라 항공기를 예기치 않게 접지시키는 장애가 발생하면 항공사에 심각한 혼란과 비용이 발생할 수 있다. 항공기에는 엄청난 양의 데이터가 있을 수 있지만 이것이 문제를 해결하는 데 올바른 데이터라는 의미는 아니다. 일반적으로 항공기에는 다른 시스템보다 더 문제가 많은 특정 시스템이 있지만 이러한 시스템에는 장애가 임박한 시기를 나타내거나 잠재적으로 큰 시스템에서 교체해야 하는 부분을 분리하는 데 도움이 되는 충분한 계기가 없을 수 있다. 즉 오늘날 상업 운영 중인 많은 항공기는 예측 유지보수를 지원하거나 유지보수 작업을 최적화하기에 충분한 데이터를 제공하지 않는다. [그림 V-3-26]처럼 충분한 데이터를 획득 장치로부터 수집하여 클라이드 서버에 보관하여 이를 기계학습을 통해서 해석한 후, 플릿(Fleet) 매니저에게 제공하여 정비 계획을 수립하는 방식은 시간과 비용을 예전에 비해서 저감할 수 있지만, 여전히 빠른 속도로 처리가 불가능한 부분이 있다. 이것을 미연에 방지하기 위해서 주요 부위에 이미징센서 또는 자기장센서와 같은 양자센서를 설치하여 신호 변화를 빠르게 파악하거나, 양자컴퓨팅을 적용하여 기존의 장애 데이터를 활용해 장애를 발생하기 전 미리 예측을 할 수 있다면 유지보수에 대한 위험성을 미리 방지할 수 있을 것이다.

그림 V-3-26 항공 시스템 모니터링 및 유지보수



※Tech Briefs (2022) 집필진 재구성

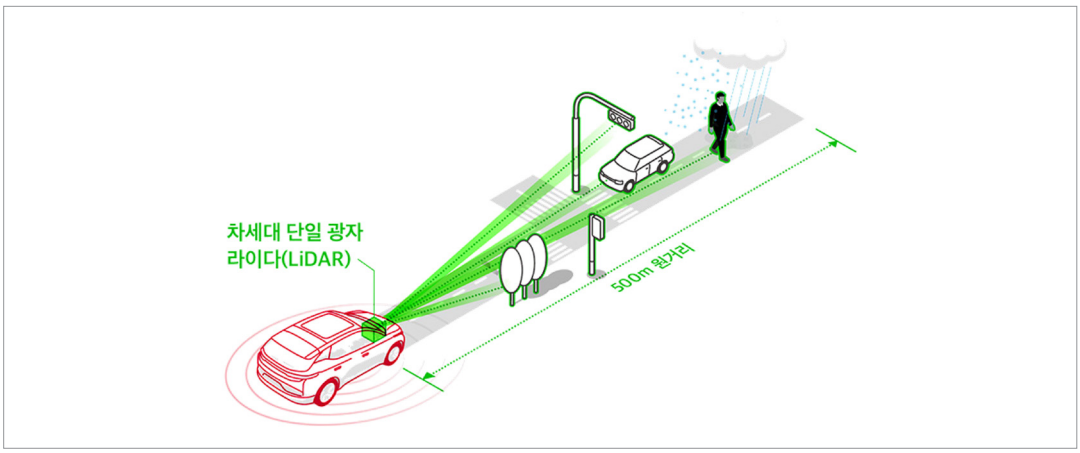
97) Tech Briefs (2022)

4. 양자 라이다를 이용한 자율주행 서비스

자율주행 자동차는 레이저 광 펄스를 사용하여 물체를 감지하고 물체가 얼마나 멀리 있는지 측정할 수 있지만, 주변 차량이 너무 밝거나 빛이 많이 반사되면 측정하지 못하는 경우가 많다. 이러한 레이저를 양자 빛 입자로 교체하면 자율주행 자동차의 충돌을 더 쉽게 막을 수 있다.[98) 99)] 이에 양자라이다는 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 솔루션으로 대두되고 있다.

광주과학기술원의 함병승 교수는 라이다의 감도와 성능을 향상시킬 수 있는 퀀텀레이저를 2021년에 개발하였다. 이 퀀텀레이저는 양자 엉킴에 기초한 비고전적 빛 다발로서, 이를 이용함에 따라 라이다를 퀀텀라이다로 패러다임 전환해 스캔속도, 해상도, 가시거리 등이 동시에 해결될 수 있다.[100)] 2023년 한국과학기술원 김상식 교수는 라이다의 성능을 더욱 향상할 수 있는 새로운 광 결합 메커니즘을 발견했다.[101)] 이는 광반도체 소자의 집적도를 100배 이상 높일 수 있도록 편광 조건에서도 집적도를 높이는 방법을 개발한 것이다. 이러한 소자의 개발이 가속화되면 더욱 작고 노이즈가 적은 양자라이다 개발이 가능해 질 뿐만 아니라, 자율주행에서의 측정 오류를 더욱 개선할 수 있을 것이다.

그림 Ⅴ-3-27 자율주행을 위한 단일 광자 라이다



※ SK 텔레콤 PR실 (2020)

98) New scientist (2023)
99) SK 텔레콤 PR실 (2020)
100) 김봉수 (2021)
101) 김봉수 (2023)

제6절 기타 산업

1. 양자중력센서 기반 지하통신시설물 위치 파악 서비스

통신시설물 재난 피해와 공사 중에 발생하는 시설물 피해 상황 파악을 위해 양자중력센서를 이용한 지하통신시설물 위치 파악 기술에 대한 연구가 필요하다. 우리나라 통신사들은 케이블 및 관로 등 정확한 지하시설물의 위치를 파악하기 위하여 양자중력센서를 이용한 지하시설물 지도 작성 기술에 대한 연구를 진행하고 있다.[102] 각종 지하시설물 공사 등에 의하여 발생하는 방송통신 시설물 피해와 재난을 예방하기 위한 일환이다. 현재 사용되고 있는 GPR 기술 등은 신호 감도가 떨어져 실질적인 지하시설물 지도를 작성하기가 어렵기 때문에 정밀한 측정이 가능한 양자중력센서를 이용하는 방안이 필요하다. 이 센서에 의하여 작성된 지도는 분포형 광케이블 음파탐지 시스템과 연동하여 가스관, 고압전기 케이블 등 지하시설물 피해예방에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

그림 Ⅴ-3-28 지하통신시설물 피해 현장



스탠포드대학교에서 처음으로 원자중력계를 제작하였다. 최근 영국 버밍엄대학교가 인솔하는 영국 국립양자테크놀로지연구 허브의 하나인 Sensors and Timing의 연구자들은 진동이나 그 외의 환경적 문제를 극복하는 미소 중력 변동을 검출하는 양자중력센서가 지하 1m 지점에 있는 터널의 존재를 매핑하는 옥외 실험에 성공하였다.[103] 이 센서는 복수의 원자를 떨어뜨렸을 때에 생기는 중력장의 끌어당김의 미묘한 변화를 측정하는 방식으로, 측정 대상 객체의 크기와 밀도에 따라 검출되는 인장강도도 커지기 때문에 지하에 묻혀 있어 보이지 않는 구조물을 매핑할 수 있다는 것이다.

102) 한국지능정보사회진흥원(2021)
103) 아더킹 (2022)

그림 Ⅴ-3-29 지하시설물 모니터링 기술



※ NIA (2021)

이 연구의 성공으로 지하의 구조물을 매핑하기 위한 상업적인 길이 열렸고 종래보다 염가로 신뢰성이 높은 지하 구조의 매핑을 기존 방법보다 10배나 빠르게 제공하는 것이 가능하게 된다고 보여지고 있다. 또한 철도나 건물, 도로 등의 건설 프로젝트에 있어서의 비용 삭감과 기간 단축, 화산 분화를 비롯한 자연 현상의 예측 정밀도 향상, 지하에 숨어있는 천연자원이나 인공적인 구조물의 발견, 귀중한 유물에 손상을 주지 않는 고고학적인 조사가 가능할 것으로 기대되고 있다.

2. 통신선로 단락 검출 서비스

통신시설관련 재난 상황에 대응하기 위하여 통신선로 단락이 발생하였을 경우에 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) 방식에 양자센서 적용으로 통신 시설의 단락과 결함을 정밀하게 찾아 낼 수 있는 방법을 고려할 수 있다.[104] 광섬유케이블은 강력한 레이저 및 정확한 센서 적용이 가능하며, 광섬유 특성 기반에서 양자센서 적용을 통해 통신선로 단락을 검출할 수 있을 것이다. 단일광자검출기는 최고의 감도와 우수한 타이밍 정확도(〈100ps)를 결합하여 손실에 대한 높은 내성과 높은 공간분해능(1cm)을 제공할 수 있다. OTDR 시스템을 사용자가 원하는 측정에 맞게 조정하고 적절한 검출기를 선택하면 상용 OTDR로 얻을 수 있는 것보다 훨씬 더 높은 성능을 얻을 수 있을 것이다. OTDR은 광섬유 케이블의 무결성을 테스트하는 데 유용하며, 광섬유로 반사되는 빛의 시간과 강도를 측정하여 접속 손실을 확인하고 길이를 측정하며 결함을 찾을 수 있게 된다. 또한 스플 라이스 및 벤드를 찾는 문제 해결 장치로 사용되어 광 손실을 식별하게 된다. 케이블은 데이터 전송을 방해할 수 있으므로 광케이블에서 특히 중요한 요소이다. OTDR 방식에 양자센서를 적용하여 정밀한 무결성 측정과 광 손실을 감지하고 문제가 있는 부분을 정확히 찾아 낼 수 있는 연구를 추진하는 것이 필요할 것이다.[105]

104) 한국지능정보사회진흥원(2021)
105) 한국지능정보사회진흥원(2021)

3. 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 서비스

양자관성 탐색은 가속, 회전 및 시간의 세 가지 감지 유형으로 구성된다. 저온 원자 간섭계는 매우 낮은 온도에서 냉각된 원자가 파동과 같은 거동을 나타내며 질량과 상호작용하는 모든 힘에 민감한 간섭 패턴에 변화를 관찰할 수 있는데, 이러한 원리를 이용하면 중력 측정에 있어 양자기반의 경우 고전적인 경우보다 몇 자릿수 더 높은 정밀도에 도달할 가능성이 있다.[106] 원자 간섭계를 이용해 중력을 정확하게 측정하게 되면, 센티미터 수준의 해상도로 지구 표면과 지구 내부의 해저지형 혹은 광물탐사에도 사용될 수 있다. 지구 내부의 광물의 밀도에 따라 중력에 변화가 생기기 때문에 원자를 통해 중력을 정확하게 측정하는 것으로 지구 내부의 물질 상태를 알 수 있는 것이다. 지하 암석 및 토양 조건을 이해하면 석유 및 가스 탐사, 채광, 건설 및 매립지 관리에 많은 이점이 있다. 또한 많은 고고학적 유적이나 고대 수로처럼 위치가 불확실하거나 불명인 매장 자산은 전통적인 방법으로 조사하기 어려울 수 있다.[107] 양자 중력계의 놀라운 감도 덕분에 훨씬 더 작은 물체라도 아주 깊은 매장 깊이에서도 감지할 수 있다. 좋은 해상도를 얻으려면 센서가 지면에 가까워야하지만 감도는 광물 탐사 또는 브라운필드의 신속한 제거와 같은 완전히 새로운 적용을 가져올 수 있다. 예를 들어, 영국 국립 양자 테크놀로지 연구 허브의 하나인 Sensors and Timing의 연구자들은 미소 중력 변동을 검출하는 양자중력센서가 지하 1m 지점에 있는 터널의 존재를 매핑하는 옥외 실험을 성공하였다.[108] 미국 AO Sense는 지구의 중력장 변화를 측정하는 특수 가속계로 기존 실험실 규모의 냉각, 컨트롤러, 센서를 통합하여 휴대용을 제작하여, 화산 및 지진활동을 탐자하고, 광물 및 석유 등 자원 탐사가 가능해지고 있다. 아직까지 필요한 보조 하드웨어는 여전히 크고 복잡하지만 센서 헤드 자체는 기존 장치에 비해 비교적 견고하지만, 이처럼 향후 개발을 주도하는 응용 분야가 증가함에 따라 비용과 크기가 줄어들 것이다.

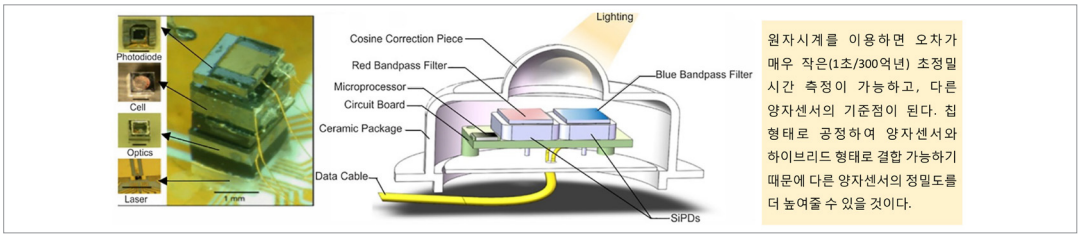
4. 석유 및 가스탐사

열악한 환경에서의 석유 및 가스 탐사는 세슘이나 루비듐과 같은 요소에서 잘 정의된 원자 전이의 주파수를 사용하여 시간을 측정하는 매우 정확한 원자시계의 이점을 이용할 수 있다.[109] 칩 스케일 원자시계(CSAC)는 16cm^3만큼 작은 부피, 120mW 미만 전력 소비를 가지고 통합할 수 있을 만큼 충분히 작게 만들 수 있어 석유 탐사의 다양한 응용 분야에 사용될 수 있다. 미국 Microsemi는 해저 지진계로 알려진 기술을 사용하여 수중 오일 탐사를 위한 CSAC를 개발했다. 수중 매핑은 해저에 센서를

106) E. Scott et al. (2021)
107) Simon Jordan (2020)
108) 아더킹(2022)
109) E. Scott et al. (2021

배치하여 이루어진다. 그런 다음 선박에서 다양한 각도로 음파가 전송되고 파도로 인한 지진은 지진 응답을 타임 스탬프하는 센서에 의해 감지된다. 매우 정확한 시간 측정을 통해 해저에서 회수된 센서에서 수중 지역의 3D지도를 얻을 수 있다. 결과적으로 CSAC는 석유 및 가스 탐사를 위한 흥미로운 상용 양자센서로 부상하고 있다. [그림 V-3-30]에서 보는 것처럼 미국 NIST에서 개발된 원자시계는 인공조명 시스템에서 광합성 활성 방사선(PAR)을 감지하도록 설계된 시스템으로 관심 있는 파장 범위를 분리하는 필터를 사용하고 PAR은 실리콘 포토다이오드를 사용하여 모니터링 된다.

그림 V-3-30 칩 스케일 원자시계(미국 NIST)

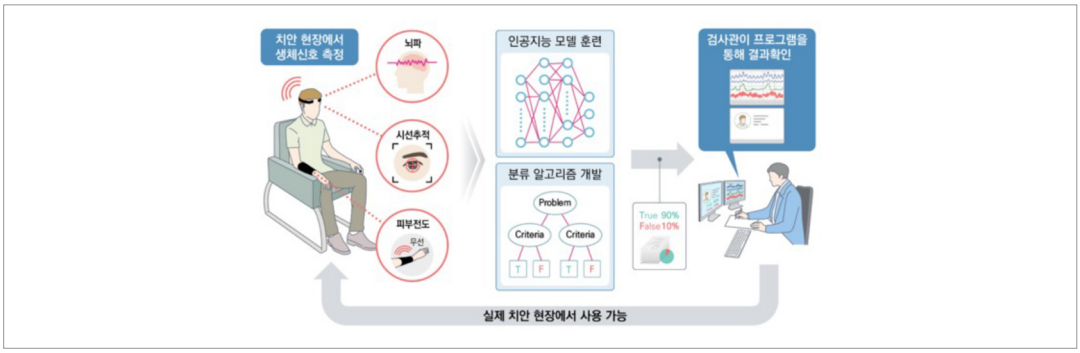


※ Scott E. Crawford et al. (2021) 집필진 재구성

5. 뇌파 활용 치안 서비스

2022년 7월 경찰청과 과기정통부의 과학치안실용화사업에 KAIST 정재승 교수의 뇌파활용 진술 진위여부 판별 검사기법 및 첨단 융·복합 장비 개발이 선정되었다. 이는 뇌파를 활용하여 정보 노출 상황에서 다양한 자극 활용이 가능한 검사 기법 및 허위 진술을 판별하기 위해서 다양한 뇌파 지표 발굴과 분석 기법 개발을 통한 수사지원 강화 및 허위진술 판별 통합 첨단 검사 장비를 개발하고 이를 법심리 감정 결과의 신뢰성 제고에 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.[110)]

그림 V-3-31 뇌자도 측정장치(KAIST)



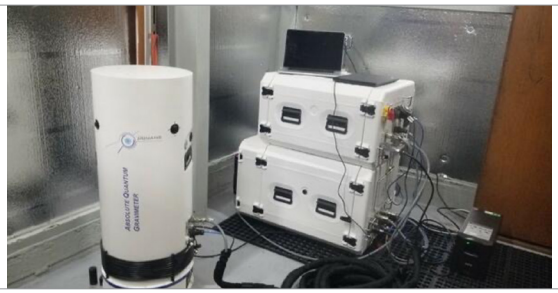
※ 지혁민 (2022)

110) 지혁민 (2022)

6. 화산 활동 감시 서비스

모든 물체는 질량이 있기 때문에 중력장이 있다. 즉 지구의 중력은 질량이 더 많은 지역에서 약간 더 강하고, 질량이 적은 지역에서는 약간 약한데, 중력계는 이런 중력 인력을 측정한다.[111] 화산 연구에서 중력계는 마그마 움직임으로 인한 중력의 미묘한 변화를 감지하는 데 사용된다. 화산 활동이 활발한 지역에서 중력을 측정할 때 더 강한 중력을 측정하면, 지표면 아래에 더 많은 마그마가 있음을 나타낸다. 중력계는 상대형과 절대형의 두 가지 주요 유형이 있는데 상대 중력계가 가장 일반적이다. 상대 중력계는 민감한 수직 스프링에 부착된 추가 있어 중력이 스프링을 늘리는 정도로 국부 중력 측정값에 비례하는데 다양한 위치 사이의 중력 차이를 측정한다. 하지만 이 계측기는 장시간 동안 측정에 노이즈를 추가하는 드리프트로 인해 정확도가 점차 감소한다. 절대 중력계는 중력 가속도를 직접 측정한다. 가장 일반적인 유형인 자유낙하 절대 중력계는 레이저를 사용하여 진공에서 작은 반사 프리즘(테스트 질량)의 자유낙하 가속도를 측정한다. 상대 중력계와 달리 절대 중력계는 시간이 지나도 정확도가 떨어지거나 떨어지지 않지만 크기가 크고 기계 부품이 섬세하며 충분한 전원 공급 장치가 필요하다. 이에 화산과 같은 혹독한 현장 조건에서 사용하도록 설계되지 않는다. 현장에서 휴대할 수 있는 장비는 장기간 연속 측정이 불가능하거나 화산 모니터링에 필요한 작은 변화를 감지할 만큼 민감하지 않다. 자유 낙하 절대 중력계와 유사하게 하와이 화산 연구소(Hawaiian Volcano Observatory, HVO)의 절대 양자 중력계(Absolute Quantum Gravimeter, AQG)는 진공 상태에서 작은 테스트 질량의 가속도를 측정한다.

그림 Ⅴ-3-32 절대 양자 중력계 (하와이 지진 연구소)



※ 하와이 지진 연구소 (2022)

AQG는 작은 프리즘 대신 레이저 냉각 루비듐 원자구름을 떨어뜨려, 기존 자유 낙하 절대 중력계의 한계를 극복한 것이 특징이다. 또한, 정확하고 장기간 연속 측정이 가능할 뿐만 아니라 크기가 작아 활화산 현장에 배치할 수 있으며 드리프트 없이 지속적으로 작동할 수 있다. 이 장비는 현재 Kīlauea 정상에

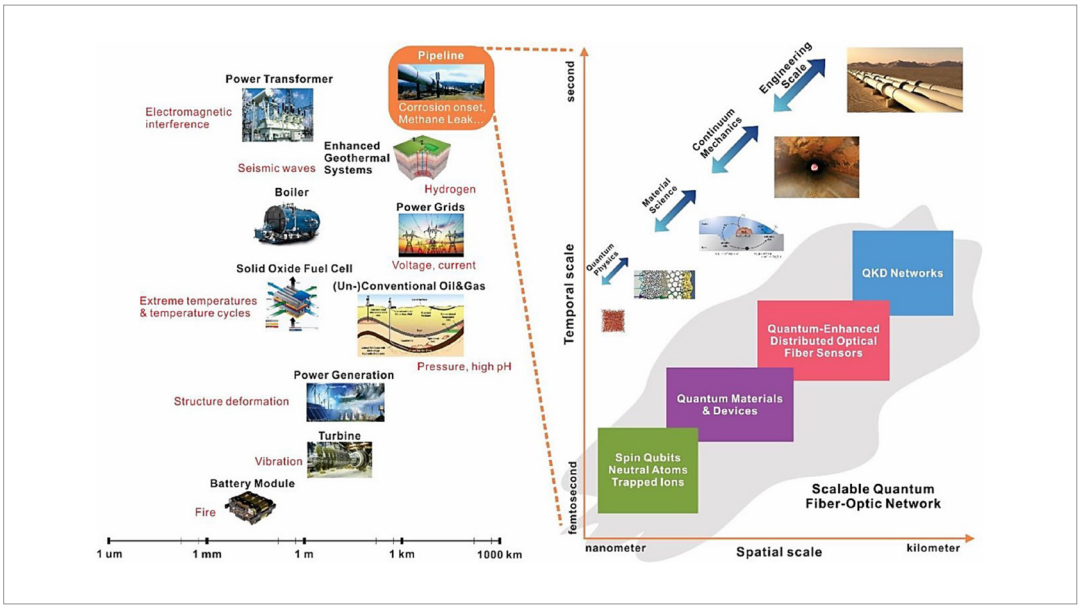
111) Hawaiian Volcano Observatory (2022)

설치되기 전에 설정, 테스트 및 교정을 거치고 있다. 동일한 모델의 AQG가 폭발이 잦은 이탈리아의 에트나 산 북쪽 측면에 설치되었는데, 높은 진동 소음 수준에도 불구하고 수개월 동안 고품질 데이터를 성공적으로 기록하면서 이탈리아의 화산 위험 보고 및 위기관리 계획을 개선하는 데 큰 도움을 주고 있다.

7. 에너지 모니터링 서비스

다양한 에너지 관련 응용 분야에 양자 센서를 배치할 수 있는 기회가 점점 늘고 있다. 특히 재생 에너지, 원자력 에너지 및 핵폐기물 관리, 화학 에너지, 지열 에너지, 전기 공급 및 신뢰성, 차량 전기화 및 에너지 효율성 향상에 대한 분야에 적용할 가능성이 높아지고 있다.[112] 특히 에너지 인프라 모니터링, 전기 전달 전송, 배전 및 저장 중 전력 손실 확인, 에너지 사용량 모니터링을 통한 건물 에너지 효율 최적화, 원자 간섭계 양자 센서를 이용한 원자력 발전소에서의 동위 원소 검출을 통한 안전 관리 등에 이용이 기대된다. 향후 몇 년 동안 바이오 연료, 풍력, 태양 에너지와 같은 대체 에너지원이 증가할 것으로 예상되는 반면, 화석 연료는 앞으로 수십 년 동안 전 세계 에너지의 주요 자원이 될 것으로 보인다. 하지만 화석 연료 기반 전기 발전기는 현재 약 30%의 효율만을 나타내기 때문에 화석 에너지로 발전 효율을 높이고 안정적인 자원 회수, 추출, 운송 및 활용을 허용하는 것은 온실가스 배출을 억제할 수 있는 중요한 분야이다.

그림 Ⅴ-3-33 양자센서의 에너지 응용 분야



※ Scott E. Crawford et al. (2021)

112) E. Scott et al. (2021)

일반적으로 화석 에너지 응용 분야는 석탄 채굴 및 회수, CO_2 활용 및 석탄 선광, 탄소 포집 및 격리, 상류 석유 및 가스, 중류 석유 및 가스, 하류 석유 및 가스, 발전, 전력 송배전 등으로 구분된다. 앞에서 언급한 것처럼 양자 센서는 석유 및 가스 생산의 다운스트림, 미드스트림, 업스트림 단계에서 더 높은 신뢰도로 석유 및 가스 흐름을 원격으로 모니터링하는 데 사용할 수 있다. 파이프라인과 시추공의 가스 흐름을 모니터링하기 위해 설계된 기존 분산 감지 시스템의 감도는 양자 정보를 편광으로 인코딩하는 얽힌 광자를 사용하여 더욱 향상될 수 있을 것이다. 또한 양자 센서를 통해 지하 표면을 스캔하여 석유를 감지할 수 있다. 그리고 천연가스 인프라 모니터링을 통해 낮은 수준의 메탄을 감지하면 중요한 온실가스인 메탄 배출의 정량화를 개선할 수 있다. 낮은 수준의 CO_2를 감지하면 탄소 격리 응용 분야에서 더 나은 모니터링, 검증 및 회계가 가능해지며 수질 및 유정 무결성에 대한 영향을 조기에 식별할 수 있을 것이다. 〈표 V-3-2〉에 양자 센서가 각 화석 에너지 영역에 대해 해결할 수 있는 감지 요구 사항을 요약하였다.

표 V-3-2 화학 에너지 분야 양자 센싱의 잠재적 응용

화학 에너지 분야	센싱 응용
CO_2 활용 및 석탄 이용	CO_2 배출 및 누출에 대한 신속하고 민감한 감지, 석탄 및 석탄 활용 부산물에서 고부가 가치 금속 감지
업스트림(upstream) 석유 및 가스	오일/가스 침전물 탐지용 양자 중력계
미드스트림(midstream) 석유 및 가스	운송 및 보관 중 파이프라이 무결성 모니터링
다운스트림(downstream) 석유 및 가스	소비 중 CO_2 배출 모니터링
탄소 포집 및 저장	CO_2 배출 및 누출에 대한 신속하고 민감한 감지
석탄 채굴 및 회수	석탄의 핵심 금속 원소 및 석탄 활용 부산물, 석탄 탐사용 중력계, 탄광 안전 감지
발전	전자기장 모니터링 센서, 전기 송배전 변압기 온도 모니터링, 핵물리 및 에너지 국가 핵안보 모니터링, 초전도 양자 간섭 장치(SQUID)

※ Scott E. Crawford et al. (2021)

8. 가스 센싱 및 모니터링 서비스

그림 Ⅴ-3-34 가스 모니터링 시스템



※ Optics (2023)

원거리에서 화학 공장이나 가스 전송관 등으로부터 가스를 검지하는 것은 매우 중요하다. 영국 QLM Technology에서 개발한 양자 가스 라이다는 양자 광자 감지 기술, 통신 조정 가능 레이저 및 라이다를 결합하여 최대 200m 떨어진 화학 공장 장비 및 메탄 방출에 대한 상세한 360도 이미지를 매우 뛰어난 정확도로 측정할 수 있다.[113] 생성된 가스 라이다 이미지는 분석 및 저장되며 중요한 배출 사건 및 관련 분석 정보는 클라우드를 통해 보고된다. 특히 이 시스템은 연속 모니터링이 가능하다. 배출원을 감지하고 유량을 정확하게 정량화하여 3D로 찾아내므로 가장 중요한 배출원의 우선순위를 지정하고 해결할 수 있다.

한국 퀀텀센싱은 중적외선 광원 기반 원거리 양자 광 가스센서스템개발을 통해 양자 광 센싱기술을 활용하여 1km 이상의 원거리에서 메탄, 암모니아 탐지가 가능한 3D 라이다 기반 고감도 가스센서 시스템 개발에 참여하고 있다.[114] 이 시스템은 1회 검지로 최소 4천 포인트 이상 검지가 가능하고 고도화를 통해 메탄과 암모니아 이외에도 다양한 가스를 검지하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 양자기술 기반의 원거리 가스영상화시스템을 LNG 추진선박에 적용할 계획이다. 이를 통해 동시 작업 중 벙커링 작업 영역 인근의 LNG 누출 및 안전관리 구역 내 이상 작업 현상을 실시간으로 모니터링하여, LNG 벙커링 동시 작업 실시간 사고인지 등에 대응하려고 한다.

113) Optics (2023)
114) 박귀철 (2023)

제4장
양자컴퓨팅 분야 산업화 모델

제1절 개요

양자컴퓨터는 빠른 시일 내에 기존 컴퓨터가 담당하던 일기예보와 기후변화, 암호해독, 자율주행, 신약후보물질 발굴, 도시교통 최적화, 우주탐사, 인공지능, 사이버 보안, 전자재료 발견, 재무 모델링, 태양광 포집 등 아주 복잡한 계산이 필요한 많은 부분을 대체할 수 있을 것이다.[115] 양자컴퓨팅은 빠르게 발전하는 분야로 아직은 고전적인 컴퓨터 프로그램의 하위 분야로 적용되지만, 향후 산업적으로 미치는 영향은 막대할 것으로 보인다. 실제로 2010년 이후 양자컴퓨팅에 관련된 연구를 하는 기업과 벤처가 폭발적으로 증가하고 있다.[116] MarketsandMarkets의 2021년 2월 조사에 따르면, 상위 5개 업체의 세계 양자컴퓨팅 시장의 점유율은 2019년 기준 50~55%로 캐나다 D-Wave Systems 15~20%, 미국 IBM 20~25%, Microsoft 10~12%, Amazon 8~10% 및 Rigetti Computing 6~8%를 차지하고 있다. 특히 IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장의 선두 주자로, 저명한 브랜드, 광범위한 제품 및 강력한 유통망을 보유하고 있다. Microsoft와 Amazon은 주로 제품 출시를 통해 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 강화해왔으며, 이들 업체의 매출은 경쟁사 매출보다 더 빨리 증가하고 있다. 향후 3~5년 내에 IBM과 D-Wave Systems은 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 확고히 할 것으로 예상되며, Amazon은 주로 아시아태평양 지역에서 사업 성장으로 인해 시장 내 점유율이 증가할 것으로 예상되고 있다.[117] 본 장에서는 양자컴퓨터 분야에서 의료, 국방, 금융 등 7개 산업영역으로부터 총 46개 의 산업화 모델을 소개한다.

115) 이혁성 (2019)

116) Nicole (2022)

117) 삼정 KPMG 경제연구원 (2017)

표 Ⅴ-4-1 양자컴퓨팅 주요 분야별 산업화 모델 개요

구 분	산업화 모델
국방·안보	① 방어 시나리오 생성 서비스 ② 암호체계 개발 서비스
제조·반도체	① 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 서비스 ② 반도체 미세구조 설계 서비스 ③ 차량용 배터리 소재 최적화 서비스 ④ 제조 공정 모니터링 서비스 ⑤ 화학 물질 양산화 서비스
의료·제약	① 양자 이미징 플랫폼 서비스 ② 암 치료 제안 서비스 ③ 신약물질탐색 서비스 ④ 단백질 구조 분석 서비스 ⑤ 맞춤 의료 서비스 ⑥ 방사선 치료 서비스 ⑦ 게놈 결과를 연결한 의료 서비스 ⑧ 에너지 모델링을 통한 주요 약물 발견 서비스 ⑨ 저분자 제약의 효율성 강화를 통한 신약 설계 서비스 ⑩ 새로운 생물학적 제재 개발 서비스 ⑪ 보험료 산정 및 위험 분석 서비스
소재	① 신소재 개발 서비스 ② 배터리 소재 개발 서비스 ③ 수소 연료 전지 개발 서비스 ④ 촉매 및 계면활성제 개발 서비스 ⑤ 화학물질 개발 서비스
금융	① 위험 분석 서비스 ② 투자 솔루션 계산 서비스 ③ 금융 플랫폼 서비스 ④ 고객 타켓팅 및 예측 서비스 ⑤ 리스크 프로파일링 서비스 ⑥ 거래 최적화 서비스
교통·물류·항공	① 교통관리 서비스 ② 자동차 전자 제어 장치 암호화 서비스 ③ 항공기 디자인 서비스 ④ 비행 게이트 할당 서비스 ⑤ 항공 화물 적재 최적화 서비스 ⑥ 항공 운항 시스템 최적화 ⑦ 콘텍스트(Context) 활용 맞춤화 서비스 ⑧ 항공사 네트워크 최적화 서비스 ⑨ 교통망 경로 최적화 서비스 ⑩ 자동차 생산 공급망 및 물류 네트워크 운영 서비스 ⑪ 물류자원 최적화 서비스 ⑫ 도심항공 모빌리티 교통망 제어 서비스
기타	① 인공지능 향상 서비스 ② 전력망 운영 서비스 ③ 에너지 분야 기타 서비스 ④ 지하 자원 탐색을 위한 시뮬레이션 서비스 ⑤ 날씨 예측 서비스

[그림 V-4-1][118]과 [그림 V-4-2][119]는 2022년 기준 양자컴퓨팅 시장 지도와 2023년 8월 기준 양자컴퓨팅 시장을 분석한 자료이다. PSIQuantum과 Rigetti Computing, Zapata AI는 2022년과 마찬가지로 상위 시장 점유율을 보유하고 있는 것으로 나타나고 있다. 양자컴퓨터 주요 기업은 〈표 V-4-2〉처럼 현재 다양한 유형의 양자컴퓨터를 개발할 뿐만 아니라 상용화와 서비스를 제공하고 있다. 다음에서 양자컴퓨터 주요 기업별 동향에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

표 V-4-2 주요 양자컴퓨터 기업 동향

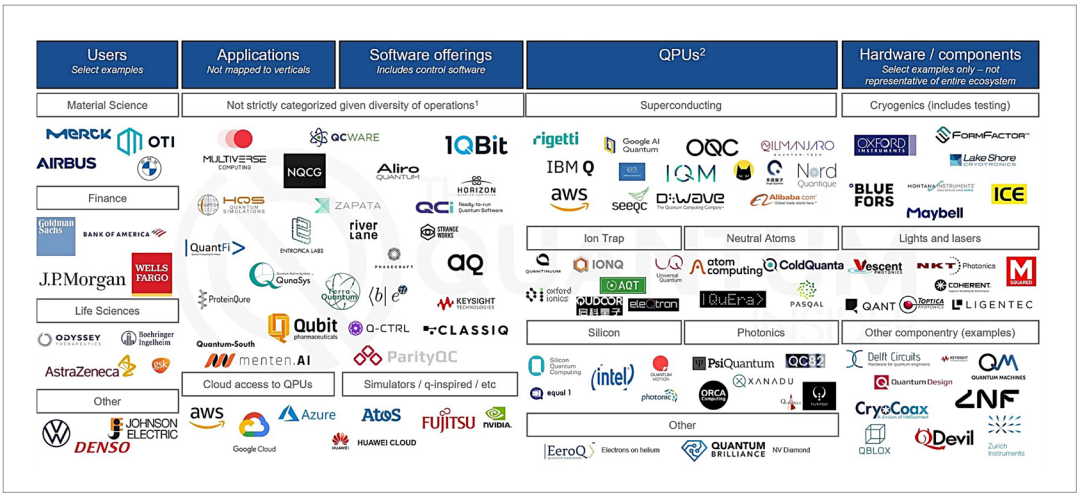
구분	주요 서비스
Amazon	• 세계 최대 클라우드 서비스 AWS(Amazon Web Service)를 통해 양자컴퓨팅 서비스 제공 및 양자 프로세서 제작업체들과의 협력 본격화 • 풀 관리 시스템 Braket 서비스 : D-wave Systems 초전도 기반 양자어닐러, IonQ 포획 이온 기반 양자컴퓨터, Riggetti Computing 초전도 기반 양자컴퓨터 유료 액세스 • 캘리포니아 공과대학교와 양자컴퓨팅센터 개설 및 아마존 양자솔루션 랩 운영 계획 발표(2021.10)
Google	• 알고리듬 개발 및 연구자들의 넓은 연구기회 제공을 위한 다양한 플랫폼 제공 및 하드웨어 개발과 클라우드 서비스 준비 병행 • NASA와 공동으로 양자인공지능연구소 설립 : 양자컴퓨터 기반의 인공지능 기술연구 • 오픈소스: 양자회로를 실기에서 실행하기 위한 벼대(Cirq), 양자화학(OpenFermion), 기계학습(TensorFlow), 양자 머신러닝(TensorFlow Quantum) 제공
IBM	• IBM-Q Hub와 같은 서비스 제공을 통해 다임러, 웰스파고, 델타항공 등에 사례 연구 및 응용 기회 제공 및 총 15개 이상의 양자컴퓨터 시스템 제공을 통한 미래 고객 발굴 • IBM Quantum Experience : 대중에게 풀 스택 양자컴퓨터 사용 권한을 제공 • 433 큐비트 프로세서 오스프리(Osprey) 공개(2022.11) • 오픈 소스 Qiskit : 애플리케이션(Aqua), 고전 컴퓨터를 사용하는 고속 시뮬레이션 실시(Aer), 노이즈의 특징 및 노이즈 후보 등을 위한 모듈(Ignis), 실기의 실행 및 실기 규약을 충족하도록 회로를 분해하는 모듈(Terra), 초전도 양자 컴퓨터의 양자 게이트를 펄스 레벨로 제어(OpenPulse), 디바이스를 설계 모듈(Qiskit Metal) • 한국 삼성, 미국 JP Morgan Chase, 독일 Daimler AG 등 글로벌 대기업과 IBM Q 네트워크 형성(2017), 4개 대륙에 연구허브기관 선정 • 상업 서비스 IBM Q 일반 공개(2016.05) : 11개 산업파트너, 13개 허브, 30개 벤처, 34개 대학 등 106개 기관이 유료 사용(2020.06 기준) • 한국의 연세대학교와 협력하여 Quantum System One 출시(2021.11) • 433큐비트 양자 프로세서 '오스프리'및 2023년 가동을 목표로 차세대 양자 컴퓨팅 방식 'IBM 퀀텀 시스템 투' 공개(2022.11)
Intel	• 극저온 웨이퍼 프로버(Prober) 공개 및 Cryo-CMOS 칩 개발(2019.01) • QuTech과 1.1K에서 동작하는 2개 스핀큐비트 게이트 발표(2021.05) • 양자 스택을 시뮬레이션하는 소프트웨어 패키지 출시(2023.02) • 최신 양자컴퓨터 칩인 터널 폴스(Tunnel Falls)를 발표(2023.06)하고 샌디아 국립연구소, 메릴랜드대 등 양자컴퓨터 연구 기관에 칩 공급
Ion-Q	• 이온 포획 기반 양자프로세서를 이용한 실제 연산 서비스를 Microsoft의 Azure와 Amazon의 AWS에 제공 • 양자컴퓨터는 Google, IBM, Microsoft Azure, Amazon AWS의 클라우드 환경에서 액세스 • Aria 출시 : 바륨 이온을 활용하여 20개 알고리듬 큐비트 달성(2022) • 이온트랩 방식으로 최대 32큐비트 성능의 '포르테'를 출시(2023.06)한 데 이어 랙 장착형 엔터프라이즈급 양자 컴퓨터인 '아이온큐 포르테 엔터프라이즈'와 '아이온큐 템포' 공개(2023.10)

118) 조성선 (2018)

119) Tracxn technologies limited (2023)

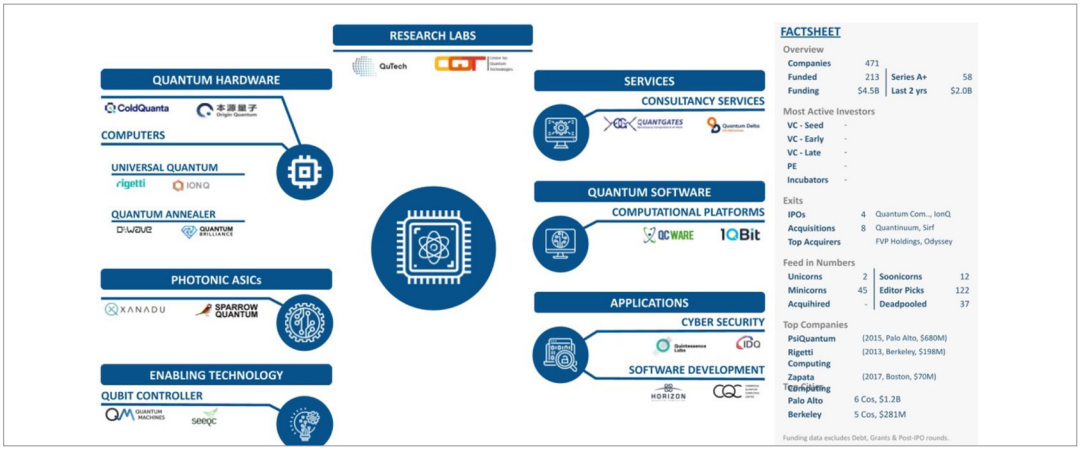
구분	주요 서비스
Microsoft	• 반도체기업 Rambus와 극저온 D램 메모리 시스템 개발(2017.04) • 화학물질 탐색 전문 양자컴퓨터 클라우드 서비스 '애저 퀀텀 엘리먼트' 출시와 함께 양자 슈퍼컴퓨터 혁신 가속화를 위한 로드맵 공개(2023.06)
PsiQuantum	• Google 및 IBM과 같이 동작하는 양자컴퓨터 구현을 위해 광자를 이용한 양자프로세서 하드웨어 및 소프트웨어 개발 진행 • 양자 칩의 초기 버전 생산을 진행 중(2021) • Mercedes-Benz와 전기자동차용 리튬 이온 배터리 설계 연구(2022.04)
Quantinuum	• Honeywell Quantum Solutions과 Cambridge Quantum 통합(2021.12.02) • 이온 포획 양자 전자결합소자 형태의 큐비트 아키텍처 연구 • 논리 큐비트를 사용하여 양자 프로세서에 결함허용 알고리즘을 구현하여 화학 분자 시뮬레이션에 성공(2023.07)
Rigetti Computing	• 양자 클라우드 서비스 QCS 발표(2018.08) • Full-stack 양자컴퓨팅 업체 지향하며 128큐비트 칩 개발
Zapata AI	• Rigetti, IBM, Honeywell, IonQ 등의 하드웨어를 지원하는 양자컴퓨팅 알고리듬 및 소프트웨어 개발 • Orquestra 도입 : 종단 간 워크플로 기반 도구 세트 • 독일 Bosch 카셰어링, 물류 등을 위한 AI 알고리듬 개발을 위해 약 1조원 투자(2019) • 시리즈 B 펀딩에서 총 6,400만 달러를 모금 양자컴퓨팅 상용화 가속(2020.11) • IonQ와 생성형 인공지능(AI) 관련 전략적 제휴(2023.08)
QuTech	• 양자얽힘을 기반으로 하는 양자네트워크에서의 Link- layer 프로토콜 개발에 성공(2019) • Intel과 함께 미국 오리건주 힐스보로 소재 인텔 D1 제조 공장에서 최초의 대규모 실리콘 큐비트를 제작하는 데 성공(2022.04)
Alibaba	• 자체 Alibaba Cloud 서비스를 통해 초전도소자 방식의 11큐비트 양자 컴퓨팅 클라우드를 출시하고 계산을 직접 실행해볼 수 있도록 서비스를 제공(2018.02) • GPU보다 10배의 향상된 성능을 제공할 수 있는 첫 번째 인공지능 칩인 한광800 발표(2019.09)
D-Wave Systems	• 500개 이상의 큐비트가 있고 20개 방향으로 큐비트 간 연결을 통해 새로운 제퍼 배치(Zephyr Topology, 큐비트가 수직 또는 수평 방향)로 구성된 6세대 양자컴퓨터 시제품을 공개(2021.06) • 프로토타입 출시(2022.06)

그림 Ⅴ-4-1 양자컴퓨팅 시장지도(2022년)



※ Alex Challans (2022)

그림 Ⅴ-4-2 양자컴퓨팅 시장지도(2023년)



※ Tracxn (2023)

2020년 초부터 2021년 말까지 약 2년 이내에 양자컴퓨팅 관련 스타트업으로 분류할 수 있는 스타트업이 69곳에서 264곳으로 약 4배에 근접하게 증가를 하였다.[120] 2023년 5월 The quantum insider에 따르면 풀 스택 솔루션, 하드웨어 제품, 소프트웨어 전문가를 제공하는 회사부터 케이블, 극저온 장치 및 자문 서비스 공급업체까지 약 1,000개의 스타트업이 존재하는 것으로 나타나고 있다.[121]

양자 스타트업 환경은 2022년과 2023년에 회사 형성의 둔화를 경험함으로써 시장이 통합되고 성숙해지는 방향으로 전환되고 있다. 이 기간 동안 스타트업은 빠르게 발전하는 이 분야에서 상업적 타당성을 확립하고 경쟁 우위를 확보하기 위해 노력하고 있으며 양자 부분에서 최초로 합병되는 회사가 출현하는 것도 목격했다. 양자 하드웨어 영역에서는 자본 유입을 통해 기술의 고도화는 물론, 상업적 생존 가능성도 더욱 커지고 있다. 하드웨어 환경이 성숙해짐에 따라 더 강력하고 확장 가능한 양자 시스템이 등장할 것이며, 다양한 산업 전반에 걸쳐 전보다 폭넓게 채택할 수 있는 기반이 마련될 것으로 기대된다.

양자 소프트웨어 부문은 양자컴퓨팅에 맞춰진 특정 알고리즘의 개발과 이러한 시스템을 뒷받침하는 인프라 소프트웨어 계층에서 모두 상당한 혁신을 이루고 있다. 이러한 이중 초점은 양자 소프트웨어가 하드웨어 발전과 보조를 맞춰 원활한 통합을 가능성을 높이고 있어, 양자컴퓨팅 분야는 앞으로도 잠재력이 높은 분야라고 할 수 있다.

120) 한국지능정보사회진흥원 (NIA, 2022)
121) James Dargan (2023)

그림 Ⅴ-4-3 양자컴퓨터 활용이 기대되는 분야



※ 집필진 작성

제2절 국방·안보

1. 방어 시나리오 생성 서비스

전투 중이거나 신속한 방어를 위해 수많은 시나리오를 가정하고, 해결 가능한 방법을 빠르게 취하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재의 컴퓨터는 이러한 부분에 크게 기여하고 있으나, 계산 속도 측면에서 다소 아쉬운 것이 사실이다. 따라서 최적의 솔루션을 신속하기 취하기 위한 양자컴퓨팅의 필요성이 점차 부각되고 있다.

2023년 Davidson Technologies와 D-Wave는 국방 프로그램인 DecisionOne을 통해 생성되는 방어 시나리오 시연을 했으며, 두 회사는 양자컴퓨팅을 이용하여 미사일 방어 시나리오를 생성할 수 있도록 하는 파트너십을 발표했다.[122] 이 시나리오는 성능 저하 없이 소수의 위협과 요격체로 설정되어 호놀룰루의 가상 해상 기반 위협에 대한 두 개의 방어 시나리오를 보여주었다. 4,000~5,000가지의 다양한 옵션 가운데 목표 할당에 대한 무기의 최적화를 위한 최적 솔루션에 신속히 도달하는 것을 목표로 하고 있다. 이처럼 올바른 행동 방향을 빨리 취할 수 있다면 적의 공격에 맞서 더 많은 전투 공간을 확보할 수 있을 것이다.

1. 암호체계 개발 서비스

양자컴퓨터 기술의 발달은 현재의 디지털 암호체계를 무력화할 수 있어 안보 측면에서 중요하다. 프랑스는 양자 기술을 활용하여 국방 부문에 혁신을 준비하고 있다. 프랑스는 국가 양자 계획의 일환으로 2025년까지 양자 기술 개발에 20억 달러를 투자할 계획이다.[123] 영국 런던의 글로벌 정보 분석업체 GlobalData의 리포트에 따르면 양자기술 부문에서 2018~2020년 사이에 특허 출원이 두 배로 증가하면서 상당한 성장을 경험하고 있다. 양자기술은 잠재적으로 인공지능(AI)과 같은 국방 분야에 혁명을 일으켜 자율 차량을 가능하게 하고 정밀 무기 시스템에 대한 표적화를 개선할 수 있다. 프랑스 연구비의 일부는 초기에 기존 컴퓨터가 양자 처리 능력에 액세스할 수 있도록 하는 플랫폼을 만드는데 투자되었는데, 양자컴퓨터가 비싸고 구축이 매우 복잡하여 방위 산업에 양자 도구에 대한 액세스를 제공하려면 원격 플랫폼이 중요하기 때문이다. 유럽의 양자컴퓨터 기업인 IQM은 프랑스의 양자 투자 확대에

122) Laura Boehringer (2023)
123) David (2022)

대한 직접적인 대응으로 2022년 파리에 사무실을 오픈한다. 이 사업 투자는 프랑스의 양자 기반을 확장하고 해당 분야에서 훈련된 인력의 양을 늘릴 수 있는 기회를 제공할 것으로 기대하고 있다.

가장 잘 알려진 양자컴퓨터 응용 프로그램 중 하나는 Shor의 알고리듬에 설명된 기하급수적 속도 향상에 의한 큰 소수의 인수분해로 큰 소수 곱셈, 이산 로그 문제 또는 타원 곡선 이산 로그 문제 기반 스키마를 기반으로 한 RSA, DH 및 ECC4와 같은 공개 키 암호화 방식을 위협할 수 있다. 고전 컴퓨터에서는 어렵지만, NISQ 양자컴퓨터의 리소스는 RSA 차단에 필요한 리소스와 아직까지 거리가 멀다. 하지만 위협은 현실적이라, 적대적 정보 또는 외국 정보가 양자암호 분석을 사용할 수 있게 될 때까지 암호화된 트래픽을 가로채서 저장할 수 있기 때문이다. 기밀 해제 시간이 강력한 양자컴퓨터 개발 예상 시간을 이미 추월했기 때문에 오늘날 위와 같은 위협은 실제로 다가올 수 있다. 양자암호 분석은 대칭 암호화 체계에 대한 무차별 대입 공격을 위한 향상된 도구도 제공할 수 있다. 예를 들어 잘 알려진 Grover의 검색 알고리듬은 무차별 대입 공격에 대해 키 보안을 절반으로 줄인다. 256비트 AES5 키는 대략 2,128개의 양자 연산에서 무차별 대입으로 해결할 수 있다. 양자컴퓨터의 막대한 리소스 요구 사항에도 불구하고 대칭 키 길이를 두 배로 늘리는 것이 방법일 수 있다. 또한 최대 초다항식 속도 향상을 제공할 수 있는 대칭 암호 시스템에 있는 구조를 기반으로 하는 대칭 키 시스템에 대한 암호 분석 공격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 알고리듬은 양자 컴퓨터에 대한 과도한 리소스 요구 사항이 있기 때문에 양자컴퓨터의 논리적 큐비트의 수의 증가가 시급하다.[124] 이에 따라 논리적 큐비트 수를 증가시킬 수 있는 기술개발이 시급하다.

124) E. Scott et al. (2021)

제3절 제조·반도체

1. 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 서비스

기계의 주요 부품, 운송 및 전자 제품과 같은 제조과정은 고품질의 제품을 생산하기 위해 여러 변수를 고려해야 하는 효율적인 프로세스와 설계가 필요하다.[125] 예를 들어, 고속으로 이동하는 항공기의 날개를 효율적으로 설계하기 위해서는 여러 드래프트를 고려하는 것이 유리하다. 이러한 설계를 위한 공기 역학, 작동 강도, 구조 역학, 충돌 및 안전, 생산 문제와 같은 복잡한 프로세스는 수치 시뮬레이션, 특히 유한 요소 방법 기반의 시뮬레이션이나 in-silico 모델 등을 통해서 얻어질 수 있다. 예를 들어, 엔지니어링 시뮬레이션은 물리적 프로토타입 및 실험실(예: 자동차 및 항공우주 영역의 풍동)의 필요성을 줄여 설계 및 테스트에 대한 시간 및 비용을 줄일 수 있다. 하지만 여전히 문제를 해결하기 위한 현재 프로세스는 비효율적이며 긴 설계 시간과 함께 상당한 계산 리소스가 필요하고 지원되는 모델의 복잡성과 품질 및 필요한 계산 시간 때문에 적용이 제한된다. 제품 설계자가 여러 변수와 다양한 가능성을 보다 빠르게 탐색할 수 있는 해결 방안으로서 제안된 양자컴퓨팅은 시간을 절약하고 더 나은 제품을 만드는 데 도움이 될 것으로 기대되고 있다. 그 사례로 독일 Bosch는 생산 계획과 관계된 전기 드라이브의 최적화에 대한 양자컴퓨터 기반 시뮬레이션 접근 방식을 조사하고 있다.

산업 4.0의 주요 목표는 생산의 맞춤화 가능성과 유연성을 높이는 것이다. Matrix 생산 방식은 필요에 따라 유연하게 결합할 수 있는 제품, 불가지론적 생산 셀의 사용을 의미하기도 하지만, 증가된 유연성은 주어진 생산 셀 레이아웃에 대한 생산 순서 선택에 대한 요구도 같이 증가시킨다.[126] 이러한 산업 4.0의 주요 목표를 달성하기 위해 양자컴퓨터 기반 생산 계획을 설계할 필요가 있을 것이다.

2. 반도체 미세구조 설계 서비스

무어의 법칙이 종말을 향해 가고 있다는 주장은 2011년 이론 물리학자 미치오 가쿠의 저서 『미래의 물리학』에서 제기되었다. 가쿠 교수는 대안적인 반도체 집적 기술이 발견되지 않는다면 무어의 법칙은 2020년 이내에 자취를 감출 것이라는 예상을 내놓았는데, 실제 2013년에 AMD가 미세화에 실패하면서 큰 주목을 받기 시작하였다. 무어의 법칙 종언은 자연스레 "차세대 컴퓨팅 기술은 무엇이 될 것인가"라는 화두와 연결 되는데, 양자 컴퓨팅은 유력한 대안 중 하나로 수년 전부터 큰 주목을 끌고 있

125) Quantum Technology and Application Consortium (2021)

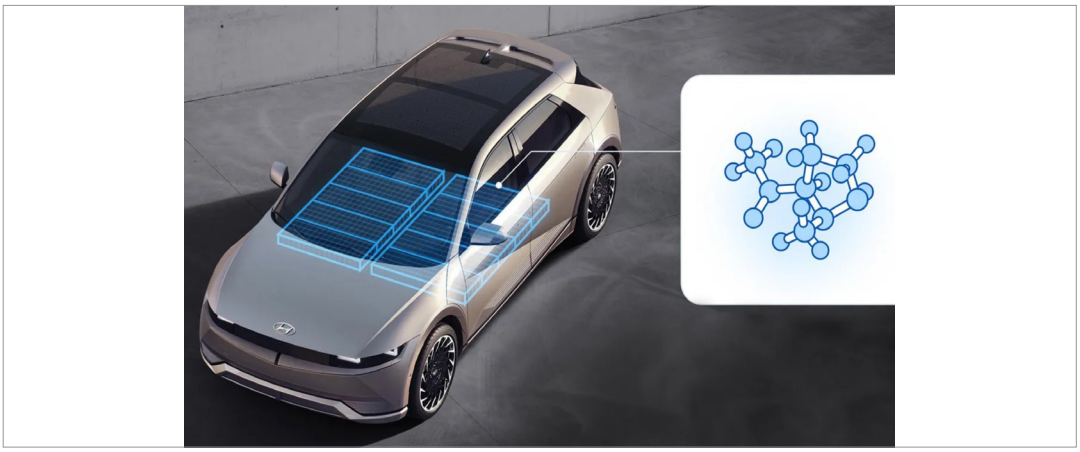
126) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)

다. DATE 18학회에서 IC 설계의 기본 패러다임이 미세화가 아니라 양자컴퓨팅 기반의 반도체 설계가 중요하다는 관점에서 R&D가 진행될 것임을 시사하였다.

3. 차량용 배터리 소재 최적화 서비스

Daimler는 미국 IBM과 함께 배터리 셀, 자율주행차량 및 새로운 재료 개발 등 응용 프로그램 문제 해결 솔루션을 제공하기 위해 다양한 방식으로 양자컴퓨팅을 사용할 계획이다. 그 일환으로 양자컴퓨터로 리튬 함유 분자를 시뮬레이션하여 오늘날 전기자동차의 리튬전지보다 용량, 지속시간, 가격 면에서 뛰어난 리튬황전지를 개발하고 있는 중이다. 독일의 Volkswagen도 양자 시뮬레이션을 통해 차량 배터리와 신소재 문제를 해결하고자 Google과 협약을 맺었고, 메르세디스벤츠와 도요타는 각각 IBM과 일본 미관협의회에 참가해 배터리 신소재를 발굴하는 연구에 돌입하였다. 한국 현대자동차는 2022년 1월 미국 아이온큐(IonQ)와 함께 리튬 화학 연구에 최적화된 새로운 변이 양자 고유해석 알고리즘을 개발했다. 리튬산화물의 구조와 에너지를 분석하고 시뮬레이션 하는 배터리 화학모델을 세우고 배터리 개발과 안정성 개선 및 비용 효율화 등에 대한 연구를 수행하고 있다.[127) 128)]

그림 Ⅴ-4-4 자동차용 배터리 개발 (현대자동차)



※ 집필진 작성

127) 김재형 (2022)

128) C. Q. Choi (2022)

4. 제조 공정 모니터링 서비스

독일 Bosch는 양자컴퓨팅 전문 기업인 Multiverse computing과 함께 글로벌 OEM을 위한 자동차 전자 부품 제조 시설에 양자 기반 최적화 알고리즘을 구현을 위하여 양자컴퓨팅 기반 디지털 트윈 기술을 도입할 계획이다. 이는 제조 공정에서 획득한 데이터를 사용하여 개별 장비의 성능을 평가하고, 품질 관리를 강화하고, 에너지 및 폐기물 관리를 포함한 전반적인 효율성을 향상시키기 위해 생산 과정을 검토하는 것이다.[129)]

그림 Ⅴ-4-5 양자기술이 도입된 전자 부품 제조 시설 사례



※B. Baker (2022)

5. 화학 물질 양산화 서비스

새로운 화학 물질을 더 저렴하고 빠르게 시장에 출시하고 다른 제품 제조에 적용하기 위해서 화학 물질 제조에 양자 진화 알고리즘을 활용하는 연구들이 빠르게 진행되고 있다.[130)] 실험실에서 소규모로 구현한 새로운 화학 물질을 상업적인 규모로 생산할 수 있도록 확장하는 것은 많은 시간과 비용이 소요될 수 있다. 분자 또는 원자 규모에서 전사적 규모에 이르기까지 어떻게 상호 작용하고 서로 영향을 미치는지에 대한 통찰력이 필요하다.

129) B. Baker (2022)

130) S. S. Mansouri (2023)

2023년 덴마크 기술 대학교 (Technical university of Denmark)와 미국 Zapata AI와 협력하여 양자 진화 알고리즘을 활용하여 검색 공간을 크게 줄여 개발한 화학 물질을 빠르게 시장에 출시하는 방법을 탐구할 예정이다. 이처럼 신규 화학 물질 개발뿐만 아니라 개발된 물질을 빠르고 안정적이며 대규모로 생산하기 위해서, 양자컴퓨팅의 빠른 처리속도를 기반으로 상품화 가능성이 낮은 시간을 빠르게 제거하고, 적절한 시기에 시장에 출시하는 것이 필요하다.

그림 Ⅴ-4-6 화학 물질 양산 프로세스

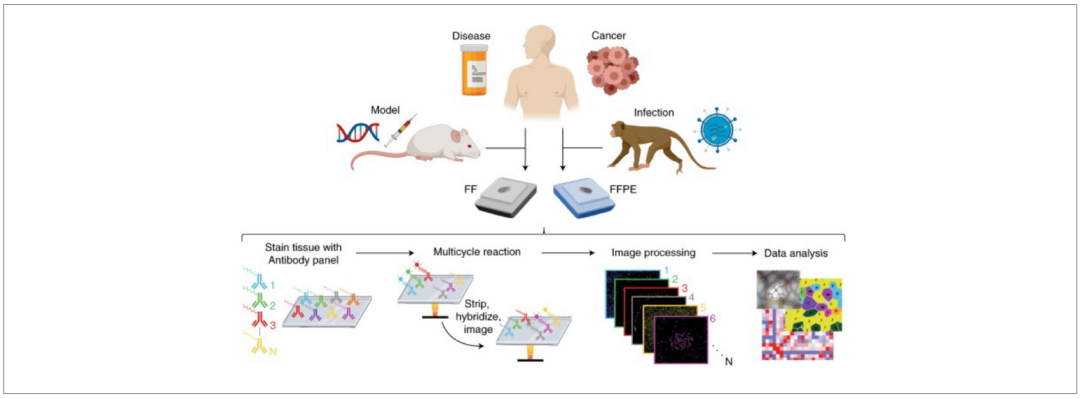


※ S. S. Mansouri (2023) 집필진 재구성

1. 양자 이미징 플랫폼 서비스

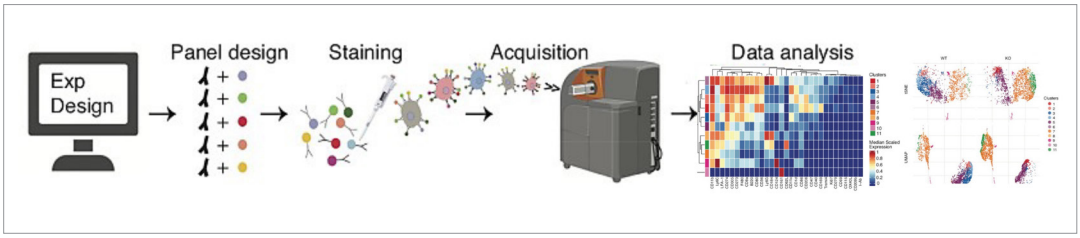
양자컴퓨팅을 이용한 다중화 이미징 기술의 발전으로 단일세포수준에서 건강하고 질병에 걸린 조직을 특성화하는 능력이 크게 향상되었다. 미국 스탠포드 의과대학교 Nolan 교수의 인덱싱에 의한 공동 검출(Co-detection by indexing, CODEX)은 DNA결합 항체 및 상보적인 형광 표지가 된 DAN 프로브의 주기적 추가 및 제거에 의존하며 지금까지 최대 60개의 마커를 동시에 시작화하는데 사용되었다. 이는 조직의 단일 세포 공간 관계에 대한 심층적인 관찰을 가능하게 하며 발달 생물학, 질병 및 치료 설계의 발견을 촉진하고 있다. 양자컴퓨팅 기술을 이용하여 CODEX는 앞으로 조혈, 암 및 백혈병, 자가면역 및 염증 반응, 면역 네트워킹 및 면역 시스템을 규명해나갈 것으로 기대하고 있다.[131)]

그림 Ⅴ-4-7 CODEX 다중 조직 영상화 이미지(미국 스탠포드 의과대학교)



※ Sarah Black et al. (2021)

그림 Ⅴ-4-8 CyTOF 실험 방법 및 데이터 클러스터



※ Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022) 집필진 재구성

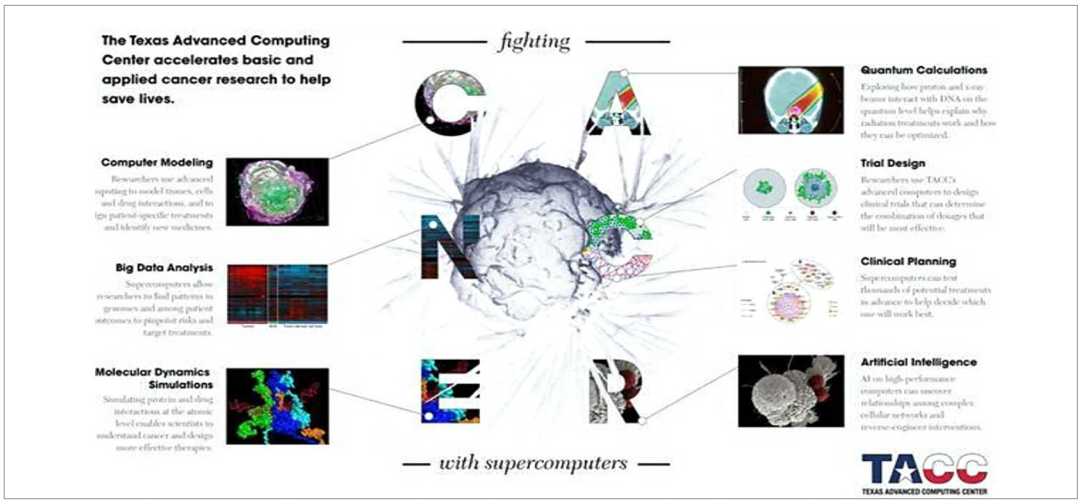
131) Sarah Black et al. (2021)

분석 가능한 단백질 수가 월등한 단일세포분석장치인 질량 분석-유동 세포 분석(CyTOF)은 형광 라벨을 금속 동위원소로 교체하여 광학 유세포 분석에 나타나는 스펙트럼 중복을 제거함으로써 질량 세포 분석을 통해 평균적으로 60개의 개별 매개변수를 동시에 분석할 수 있는 강력한 방법이다. 하지만 계측 실험 설계, 실행 및 해석에서 상당히 증가된 복잡성과 관련되기 때문에, 대량 세포 분석 데이터를 단편화, 복잡성 및 분석에 대한 문제점을 해결하기 위한 방법이 필요하다.[132] 최소한의 질량 세포 분석 전문 지식을 가진 연구자가 데이터 기반의 간소화된 프로젝트 워크플로를 개발할 수 있도록, 생성되는 대규모 고차원 데이터 세트를 해석하기 위한 머신러닝 알고리듬이 포함된 양자컴퓨팅 기술을 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 암 치료 제안 서비스

미국 텍사스대학교는 암 치료방법을 연구하는 과정에서 양자컴퓨터를 이용하는 방법에 대해 연구하고 있다. Texas Advanced Computing Center(TACC)에서 슈퍼컴퓨터인 Stampede로 양자 역학 계산 모델을 사용하여 양성자-암-치료 화학 반응에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실행을 통해 암환자의 생명이나 건강에 해를 끼치지 않는 최적의 방사선 산출량 및 그 기본 원리에 대해 연구 중이다.[133] 이는 암 발달의 복잡성을 잘 이해하고, 새롭고 효과적인 치료법을 식별하여 암에 대한 이해를 높이는 방대하고 복잡한 데이터 세트 패턴을 설명하는 데 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

그림 Ⅴ-4-9 양자컴퓨터 적용 사례 : 암치료 접근 방법 (미국 텍사스대학교)



※ 구현모 (2020)

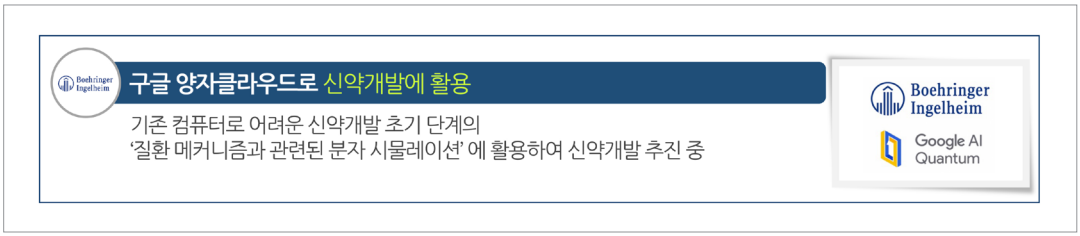
132) Akshay Iyer et al. (2022)

133) 구현모 (2020)

3. 신약 물질 탐색 서비스

양자컴퓨터 알고리듬 기반의 양자 시뮬레이션을 통해 신약을 개발하는데 소요되는 시간을 단축할 수 있는 가능성이 조명되고 있다. 2021년 1월 11일 독일 Behringer은 Google Quantum AI와 구글의 양자컴퓨터를 활용하여 분자 동역학 시뮬레이션을 통한 질병 관련 분자 메커니즘을 규명을 위해 3년간의 파트너쉽을 체결했다고 발표하였다. Google의 양자컴퓨터 및 알고리듬 리소스를 통해 in silico 상에서 고분자 및 저분자 약물, 효소, 세포, 단백질 등 끊임없이 유동적으로 움직여 고정된 상태를 파악하기 어려운 분자 간의 상호작용 모델링을 연구할 계획이다. 양자컴퓨터는 신약개발 초기 단계의 필수적인 과정인 질환 메커니즘과 관련된 분자의 시뮬레이션 같은 복잡한 문제를 해결하는 데 적합할 뿐만 아니라 현재의 기술 수준보다 더 큰 분자를 대상으로 비교 분석을 진행할 수 있는 잠재력을 갖고 있다.[134] 또한 약이 결합하는 단백질은 부드러운 물질로 수중에서 고속으로 변형되기 때문에 그 움직임을 정밀하게 계산하면 후보물질 탐색의 정밀도가 증가하게 될 것이다.[135]

그림 Ⅴ-4-10 양자컴퓨터 적용 사례(신약 개발)



※ NIA (2021)

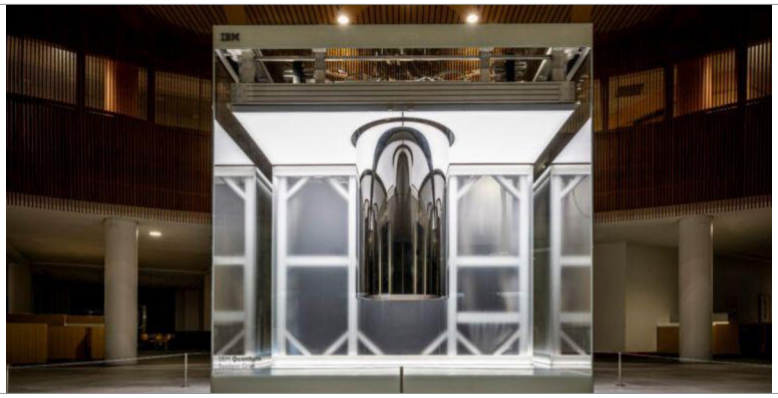
Behringer이 발표한 후 불과 17일 후 스위스 Roche는 영국 Cambridge Quantum Computing과 함께 양자화학 플랫폼 EUMEN을 활용하여 양자컴퓨팅 기반 아츠하이머 치료제 후보물질 발굴과 개발을 위해 다년간의 파트너쉽을 체결하였다고 발표하였다. EUMEN은 에너지의 흡수를 따라 원자의 이동경로를 시뮬레이션 하기 위해 설계된 알고리듬으로, 양자컴퓨팅 기반의 새로운 치료제 후보 물질에 대한 모델링이 가능하다.[136] 이처럼 양자컴퓨팅은 최근 신약 후보물질을 발굴하고 최적화할 수 있는 분자 시뮬레이션 분야에서 활용하려는 거대 제약회사들의 움직임이 늘어나고 있다. 이는 비단 해외에서만 벌어지고 있는 일은 아니다.

134) 서일 (2021)
135) 한국지능정보사회진흥원 (2021)
136) 노신영 (2021)

한국은 3~5년 후 양자시뮬레이터를 통한 신약 개발을 추진하고 있는 추세이다.[137] 2018년에 설립된 바오밥에이아이바이오(Baobab Ai BIO)는 초저온전자현미경(Cryo- EM)기반 Undruggable 단백질 구조 정밀 분석과 양자역학 및 인공지능 기반 대용량 데이터를 신속하게 분석하여 암유발 YAP-TEAD 저해제 1상을 2022년 진입을 목표로 하고 있다.[138] 이 회사의 신약개발 플랫폼인 바이오-스페이스 보이저(Bio-Space Voyager)는 Cryo-EM을 통한 정확한 단백질 구조분석, 인공지능 기반을 통한 신뢰도 높은 신약설계, 양자역학을 통한 신속한 대용량 연산 능력을 기반으로 기존과는 차별화된 신약 발굴을 위한 개발이 기대되고 있다. 한양대학교는 2019년부터 양자계산화학 및 머신러닝에 적용 가능한 NISQ 기반 양자 시뮬레이터 연구를 추진 중이다. 2020년부터 KAIST는 원자 분자 양자 시뮬레이터 개발을 위한 국제공동연구단을 운영하고 있다. 특히 2022년에는 제약업계에 인공지능의 붐이 심화되었다. 신약 개발 속도와 확률을 대폭 높일 수 있다는 기대감에 각 제약회사가 인공지능 기술 도입을 서두르는 가운데 최근에는 양자역학을 접목한 인공지능기술까지 신약 개발에 활용되고 있어 주목된다. 2022년 2월 17일 KIST 김용수 박사 연구팀은 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 사용하여 양자연산 공간을 확장함으로써 양자컴퓨터의 연산공간 크기를 수월하게 확장하는 새로운 방법을 이용하여 분자의 구조를 계산하는 데 성공하였다.[139] 이 연구가 실용화된다면 신약 개발에 적용 가능할 것으로 기대되고 있다. 2022년 2월 25일 팜캐드는 KAIST 교원창업으로 시작한 국내 1호 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업인 큐노바와 신약개발 공동 연구 협약을 채결하였다. 양사는 신약후보물질 발굴을 위해 양자컴퓨터를 활용하는 양자소프트웨어 기술 개발, 양자컴퓨터의 연산능력을 최적화해 신약후보물질 개발, 리보핵산(RNA) 염기서열(시퀀스) 최적화 등에 협력하기로 했다. 팜캐드는 표적 단백질과 저분자 신약후보물질의 물리·화학적 결합을 예측하기 위해, 원자 단위뿐 아니라 눈에 보이지 않는 전자 분포까지 계산하는 양자역학 기반의 가상(in-silico) 신약개발 플랫폼인 파뮬레이터를 개발했다. 양자계산 데이터와 이를 학습한 인공지능(AI) 기반의 데이터베이스를 확보해왔다. 팜캐드는 단백질과 약물 상호작용에 대한 계산화학 시뮬레이션 과정에, 큐노바의 양자컴퓨팅 기술을 활용할 계획이다.[140] 팜캐드는 자체 신약 개발(NOAC: 혈액항응고제) 뿐 아니라 다수의 제약·바이오기업들과 항암제, mRNA 기반 코로나19 예방 백신, 알츠하이머 치료제 등을 연구·개발하고 있다. 2023년 6월 Cleveland Clinic과 IBM은 미국에서 최초로 민간 부문 현장에 양자 컴퓨터를 배치했다. 이 컴퓨터는 의료 연구 전용으로 사용되는 세계 최초의 양자컴퓨터로서[141] 생물의학적 발견을 가속화하는 데 기여할 것으로 기대하고 있다. 이는 특정 단백질을 표적으로 하는 약물을 선별하고 최적화하기 위한 양자컴퓨팅 파이프라인 개발 및 알츠하이머병 및 기타 질병 환자들에게 도움이 될 수 있는 효과적인 약물을 찾는데 사용하게 될 것이다.

137) 한국지능정보사회진흥원 (2021)
138) BioSpectator (2021)
139) 정현 (2022)
140) 윤소영 (2022)
141) Omnia Health (2023)

그림 Ⅴ-4-11 세계 최초 의료 연구 전용 양자컴퓨터



※ Omnia Health (2023)

대웅제약은 최근 미국 XtalPi와 양자역학 기반 인공지능 신약 개발 플랫폼을 이용한 합성치사(Synthetic Lethality) 원리에 기반한 항암 타깃 신약 개발을 공동 진행하기로 하였다. XtalPi는 광범위한 분자화합물의 약학적 성질의 예측할 수 있는 독자적인 신약 개발 클라우드 컴퓨팅 플랫폼을 이용해 선정한 항암 타깃에 대해 신약후보물질을 발굴하고, 이후 대웅제약은 전임상 및 임상 개발 등 사업화를 진행할 예정으로 공동연구를 통해 산출된 결과물은 대웅제약이 소유한다. 2014년 MIT의 양자물리 전문가들이 설립한 XtalPi는 디지털 약물발견 및 개발 플랫폼을 개발해 상위 10대 제약사 중 7개사를 포함, 전 세계 70개가 넘는 제약회사에 서비스를 제공하고 있다. 최근 1년간 한국 오비메드, 미국 Google, 중국 텐센트와 HOPU, 영국 5Y, 일본 소프트뱅크 등 대기업들이 참여한 시리즈 C·D 투자에서 7억 달러가 넘는 유치를 완료했으며, 미국 Pfizer & BioNtech와도 전략적 제휴를 체결하고 신약 개발에 사용하기 위한 인공지능 기반 분자 모델링 플랫폼 개발을 진행 중이다. SK케미칼도 양자역학 기술 기반 AI 신약 개발 업체인 고려대학교 조은성 교수가 창업한 인세리브로와 협약을 맺고 신약 공동개발에 나섰다. 인세리브로는 양자역학 기반 분자 모델링 기술과 AI 플랫폼을 바탕으로 특정 질환에 대한 신약 선도·후보 물질을 도출하는 역할을 담당하고, SK케미칼은 인세리브로가 도출한 후보물질에 대한 초기 약효평가에서부터 비임상, 임상 등 후보물질의 검증 전반과 신약 개발의 인허가, 생산 등의 역할을 맡기로 했다. 양사는 새로운 신약 개발뿐 아니라 기존 인세리브로가 진행한 프로젝트의 탐색 단계 물질에 대해서도 상용화 기회를 함께 모색한다는 방침이다. 인세리브로는 분자모델링 기술을 더욱 정교하게 업그레이드한 인공지능과 분자모델링 기술 QM/MM docking과 Water Pharmacophore을 결합한 신약 개발 플랫폼 MIND를 보유하고 있으며 양자역학 기술을 적용해 후보물질의 약물 친화도와 적중률을 한층 높여주는 솔루션을 제공할 수 있는 차별성을 지닌 것으로 평가받고 있다. 보령제약은 양자역학 AI 기반 신약 개발 전문업체 퀀텀인텔리전스(QIC)와 신약 개발 공동연구를 진행 중이다. 양사는 QIC 양자역학 기반 플랫폼을 활용해 혁신적인 신약 후보물질을 도출하고 신약 파이프라인을 발굴한다는 계획이다. 비소세포성 폐암과 면역질환을 타깃으로 하는 신약 후보물질 도출에 성공한 적이

있는 QIC의 물리화학 기반 3D 양자 계산 알고리듬을 적용한 AI 신약 개발 플랫폼 기술은 실제 화합물 전자 분포를 가장 유사하게 계산해 구조를 구현해낸다는 평가를 받고 있다. 이를 통해 화합물 성질을 정확하게 예측하며 후보물질 도출 효율을 높여줄 것으로 기대하고 있다. 휴온스 역시 양자역학 기반 AI 기업 팜캐드와 손을 잡고 신약 개발 공동연구를 하고 있다. 휴온스는 팜캐드의 플랫폼 파뮬레이터를 활용해 헬스케어 전반에 걸쳐 성공 확률이 높은 신약후보물질들을 발굴한다는 계획이다. 연구 분야와 범위는 양사 협의를 통해 점진적으로 구체화해나갈 예정이다.[142)]

COVID-19 대유행에 대한 우리의 경험은 해당분야에서의 양자컴퓨팅의 필요성이 더욱 부각되었다. 양자컴퓨팅은 복잡한 유기 분자의 고급 시뮬레이션을 통해 연구원들이 신약을 개발하는 데 도움이 될 수 있다. 개발 단계에서 모든 신약은 화합물의 가장 안정적인 구성에 대해 테스트되어야 하며, 여기에는 양자컴퓨팅의 뛰어난 분자 모델링 및 시뮬레이션이 포함된다. 뿐만 아니라 파이프라인에 분자가 없는 영역에서 분자 선택은 양자컴퓨터로만 완전히 해결할 수 있는 조합 최적화 문제로, 이는 COVID-19와 같이 빠르게 출현하는 질병의 경우에 적용될 수 있다. 팬주립대학교의 연구원들은 이 분야에서 활발히 활동하고 있다. 양자 시뮬레이션은 약물 개발자가 개발에 대다수를 차지하는 시험의 많은 부분에서 시뮬레이션을 사용할 수 있는 기능을 제공하기 때문에, 신약을 개발하고 출시하는 시간을 단축하여 연구개발에 대한 투자를 절감할 수 있고, FDA 승인 프로세스의 속도를 높일 수 있을 것일 것이다.[143)]

4. 단백질 구조 분석 서비스

미국 하버드대학교는 2012년에 D-Wave systems 양자컴퓨터를 사용하여 6개 아미노산 격자 단백질 모델의 기저 상태를 발견하였는데, 이는 양자컴퓨터가 자연 과학과 관련한 최적화 문제를 해결하는데 사용된 최초의 사례이다. 미국 스탠포드대학교의 FAH(Folding at Home)는 단백질 접힘 실험, 의약품 설계 등 다양한 목적을 위해 분자동역학을 시뮬레이트하는 비영리 분산 프로젝트이다. 백질의 접힘 오류(Misfolding)와 관련한 질병으로 알려진 알츠하이머병, 헌팅턴병, 많은 종류의 암, 항생제 내성 등의 분자생물학 및 분자역학에 대한 폭넓은 학술적 연구에서 활용되고 있다. 이러한 질병을 치료하기 위해 단백질의 3차원 구조 및 작동 방식을 이해하고 분석함으로써 새로운 약물도 개발하고 하고 있다. 특히 최근에는 COVID-19에 대한 연구도 진행되고 있으며, 프로그램을 다운받는 것만으로 누구나 연구에 도움을 줄 수 있다. 프로그램을 다운받은 후 I support research fighting 탭을 클릭하면 연구를 돕고자 하는 분야를 특정해서 도울 수도 있다. 또한 일본 호시약과대학교 주도 컨소시엄에서 양자화학계산을 활용하여 질병과 관련된 단백질의 정밀한 구조를 밝히려하고 있다. 일본 이화학연구소가 개발하는 슈퍼컴퓨터인 MD-GRAPE가 단백질의 움직임을 계산하는 것과 달리 초고정밀 정지화면을 얻으려 하고 있다.

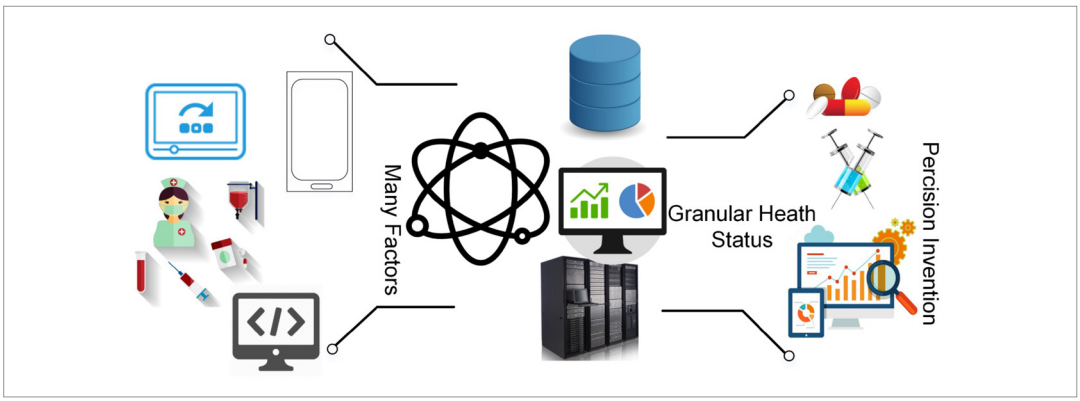
142) 이순호 (2022)

143) Quantum Technology and Application Consortium (2021)

5. 맞춤 의료 서비스

인간의 생물학적 체계가 복잡하기 때문에 표적적인 의료 치료를 넘어서는 맞춤 의료의 목적은 예방과 치료의 접근방식을 개인에 맞게 조정하는 것이다. 맞춤 의료에서는 인체 생물학의 복잡성에 더하여 표준 치료를 뛰어넘는 다양한 측면을 고려해야 한다.[144)145)] 실제로 의료행위의 성과에 대한 상대 공헌도는 10~20% 밖에 되지 않으며, 나머지 80~90%는 건강에 관한 행동, 사회 경제적 요인, 환경 요인이 차지한다. 이러한 다양한 기여 요인 간 상호 의존성과 상관관계 때문에, 최적의 치료 효과를 계산하여 산출하는 것은 매우 어려운 일로 기존의 치료는 대부분 개인차 때문에 의도한 결과를 달성하지 못하고 있다. 양자 강화 예측 의학은 지속적인 치료를 통해 의료 서비스를 최적화하고 개인화할 수 있고, 개인 맞춤 시료에 대한 환자 순응도와 참여는 양자 강화 모델링을 통해 뒷받침될 수 있다.

그림 Ⅴ-4-12 양자컴퓨팅 기반 맞춤 의료 사례



※ R. Hr Rasool et al. (2023)

[그림 Ⅴ-4-13]처럼 현재는 의료 관련 데이터를 통한 지식을 추가로 취득하여, 정확한 건강 상태를 효율적으로 특정하고, 맞춤화된 개입을 하는 방법으로 전환되고 있다. 이것을 완전하게 실현하려면 아직 시간이 걸리지만, 양자컴퓨팅을 이용함으로써 새로운 틀에 맞는 진보를 가속화 할 수 있을 것으로 보인다. 그 틀이 실현되면, 의료기관은 지속적인 치료를 하면서 최적의 맞춤화된 의료 서비스를 제공할 수 있게 될 것이다. 또한 특정한 개인에 대한 차선의 의료행위에 관한 의사 결정에서는 규칙을 준수하고 환자와의 관계를 형성하는 일을 중요한 요인으로 고려해야 하는데, 고도의 컴퓨팅 모델에 의해 이러한 영역에도 대응할 수 있을 것으로 보인다. 예를 들어, 규칙 준수 데이터를 분석함으로써 개인에게 가장 알맞은 개입 타이밍을 도출할 수 있어 최종적으로는 이러한 수준의 건강관리를 집단적으로 수행할 수 있게 될 것이다.

144) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

145) R. Ur Rasool et al. (2023)

그림 Ⅴ-4-13 맞춤 의료의 포괄적 및 정확성에 근거한 접근방식



※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

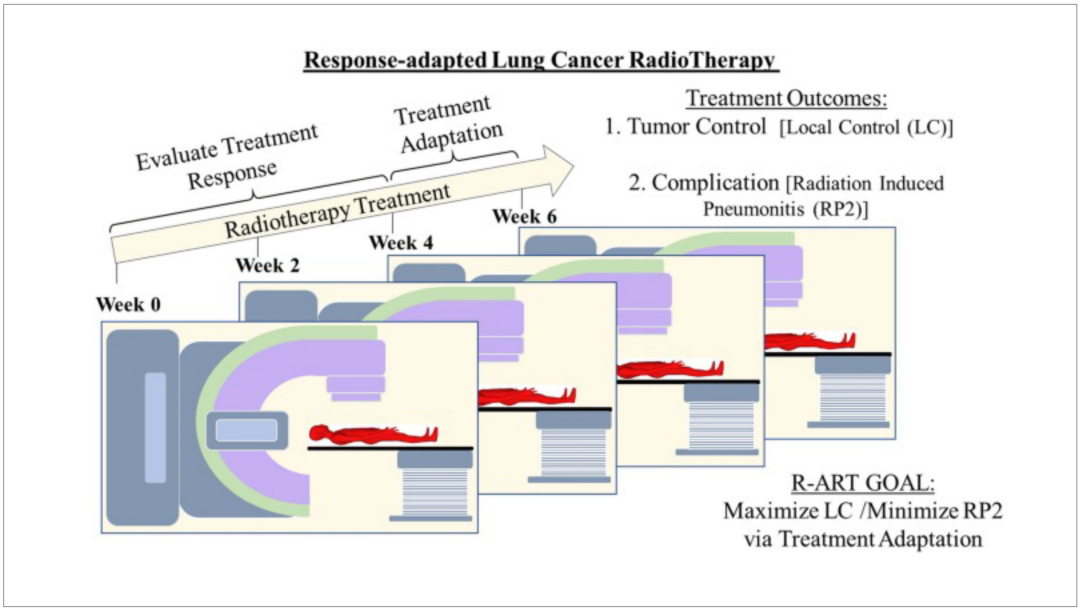
6. 방사선 치료 서비스

암 치료를 위해 사용되는 방사선 용법은 방사선 빔을 통해 암세포를 제거하여 증식을 막는 종양치료의 일종으로 임상에서 널리 활용되고 있다.[146] 그러나 이 치료는 암을 유발하는 조직에만 빔을 투사하고 그 주변의 건강한 세포에는 영향을 주지 않게 매우 정밀한 계산이 요구되는 민감한 과정을 거치게 돼 치료 효과가 크게 저하된다.[147]

방사선 촬영은 매우 정밀한 컴퓨터를 사용하여 수행되는데, 촬영 작업을 수행하기 위해서는 정밀한 최적화가 필요할 뿐만 아니라, 최적의 솔루션에 도달하기 위해 정확하고 복잡하며 다양한 시뮬레이션이 필요하다. 시뮬레이션에 양자 개념을 적용하게 되면 양자컴퓨팅을 통해 동시 시뮬레이션을 실행하고, 최적의 시간에 계획을 수립하는 것이 가능하므로 기회의 스펙트럼이 매우 넓어질 것이다. 또한 환자의 유전적 특성과 생리적 특성의 미묘한 차이로 인해 방사선 요법 치료 반응이 달라질 수 있어, 개별화된 치료 계획이 필요하게 된다.[148] 따라서 개별 환자 치료 중 용량 반응을 추정하고 최적의 용량을 권장할 수 있도록 임상 결정 지원을 위한 양자 심층 강화 학습 프레임워크가 필요할 수 있다. 의사는 방사선 치료 결과의 불확실성 속에서 결정을 내려야하기 때문에, 실제 시나리오에서 인간의 의사 결정을 나타내기 위한 비결정적 양자 상태를 이용하여 임상 의사 결정 프로세스 최적화가 필요할 것이다.

146) J. Ruan et al. (2018)
147) Raihan Ur Rasool et al. (2023)
148) D. Niraula et al. (2021)

그림 V-4-14 적응 방사선 치료 (양자 심층 강화 학습)



※ D. Niraula et al. (2021)

7. 게놈 결과를 연결한 의료 서비스

15년의 기간과 27억 달러의 투자를 통해 인간 게놈 배열을 정확하게 분석할 수 있게 되면서 게놈 배열을 분석하는 데 사용되는 비용이 줄어들게 되어 오믹스(Omics) 시대가 도래하게 되었다. 게놈의 일차 배열을 이해하는 것은 더 이상 제약되지 않고, 더 나아가 새로운 계산 도구의 장점을 활용하여 게놈 배열이 기능하는 메커니즘을 더 깊이 이해하는 연구가 수행되고 있다. 하지만 약 30억 개의 DNA 염기쌍을 가지는 인간 게놈의 규모, 개체군 안에 존재하는 다양성, 건강 결과의 다양성으로 인해 기존의 접근방식을 통한 연구에는 한계가 발생했다. 이를 해결하기 위해 게노믹스와 양자컴퓨팅을 동시에 적용할 수 있는데 그 영역은 [그림 V-4-15]와 같이 고려할 수 있다.[149] 약리 게노믹스 시험에서 유기체를 나타내는 디지털 트윈을 사용함으로써 특정한 의약품에 대한 개인의 경시적 반응을 예측하여, 환자의 증상에 맞는 치료가 가능한 정밀 의료의 발전을 촉진시킬 가능성이 있다. 예를 들어, 게놈 재배열, 염색체 위상 조정 및 게놈 재구성 분석에 사용되는 새로운 게놈 조립을 위해 양자 어닐러를 사용하면 효율성을 높일 수 있다.[150]

149) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

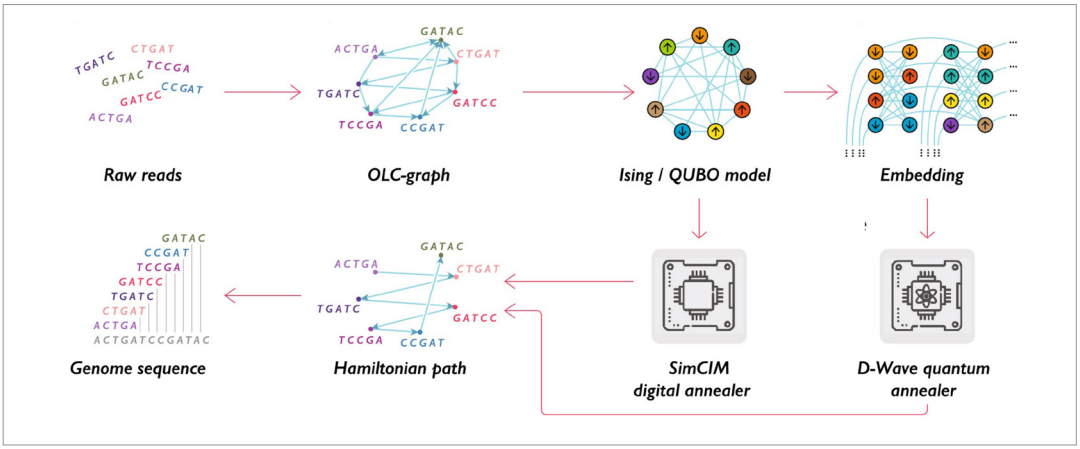
150) A. S. Boev et al. (2021)

그림 Ⅴ-4-15 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역

모티브 발견과 예측	게놈 와이드 관련 분석(GWAS)	De Novo 구조 예측
• 유전자 제어 메커니즘 해명 : DNA, RNA, 아미노산의 배열 속의 유전자 발현 활성화/억제 패턴 특정 • 양자 최적화 알고리즘 적용 : 전사 인자의 결합과 De Novo 게놈 어셈블리에 대한 이해 심화	• 특정한 형질/질병과 DNA 단일 변이와의 관련성 • 실험을 통한 검증이 필요한 유전자 후보 수 크게 간추릴 수 있음 • 전자 네트워크와 그래프 모델 발전 가능	• RNA 분자, 단백질, DNA 단백질 복합체 등의 구조 예측 정밀도 극적으로 향상

※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

그림 Ⅴ-4-16 양자 어닐링을 이용한 게놈 조립



※ A. S. Boev et al. (2021)

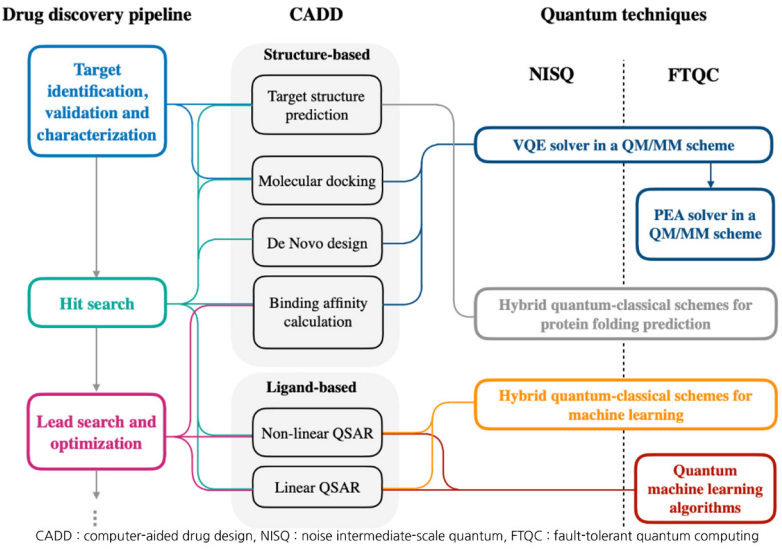
8. 에너지 모델링을 통한 주요 약물 발견 서비스

양자컴퓨팅을 통해 의료 종사자는 의학 연구에 필요한 원자수준의 분자상호작용모델링, 이전에는 불가능했던 수만 개에 이르는 단백질의 인코딩, 약물과의 상호작용의 시뮬레이션이 가능해졌다.[151] 제약회사의 핵심 활동은 질병을 치료하거나 치료하는 약물로 발전하는 소분자, 거대분자 및 기타 분자 구조를 식별하는 것이다. 페니실린, 염소수화물, LSD, 천연두 백신 등과 같은 중요한 약물은 과학적 우연을 통해서 발견되었지만, 코로나19 바이러스와 같은 현재의 과제를 해결하기 위해서는 화학 반응에서 소산되는 에너지의 정확한 모델링이 필요하다. 고전 컴퓨터는 두 개의 전자의 양자 거동을 계산하는 것조차 많은 시간이 소요되기 때문에 근사치에 크게 의존하고 있다. 때문에 모델의 정밀도와 가치가 감소하고 연구자가 모델을 설명하고 실험적으로 결과를 검증해야 하는 부담을 갖게 된다. 반면, 양자컴퓨터

151) A. S. Boev et al. (2021)

는 이미 수소화리튬과 같은 소분자의 특성을 안정적으로 모델링하고 있어 높은 정확도로 속성을 시뮬레이션할 수 있다. 뿐만 아니라 분자 해밀턴의 바닥상태 에너지를 추정하는 알고리즘과 기존 컴퓨팅 대응보다 우수한 분자 반응 속도를 계산하는 알고리즘 등 화학을 위한 여러 가지 양자 알고리즘을 개발하고 있다. 이를 통해 약물 후보의 실패율을 낮추고 시간과 비용을 저감할 수 있을 것으로 기대된다.[152)]

그림 Ⅴ-4-17 양자컴퓨터 지원 약물 설계도



※ Quantum Computing Exploration for Drug Discovery on AWS

9. 저분자 제약의 효율성 강화를 통한 신약 설계 서비스

복잡한 최적화를 필요로 하는 과정인 저분자 의약품 설계와 제약의 목표는 질병과 관련된 표적에 대한 활성을 가진 새로운 분자를 설계함과 동시에 체내의 수천 개에 달하는 다른 표적에 대한 활성을 절감하여 부작용과 위험한 독성을 피하고 환자의 결과를 개선하는 것이다. 이를 위해 일반적으로는 106~200,000개 이상의 화합물이 실험 및 연산 작업 흐름에 의해 1차로 걸러지고, 수천 개의 화합물을 생산한 다음 필요한 시험 하나가 수행된다. 선정과 분자 구조의 유사도 산출 및 분류 접근방식과 표적 기반 분자 화합물 설계에 활용되는 정교한 에너지 계산에서 장기간에 걸쳐 컴퓨팅이 이용되어 왔는데 양자컴퓨팅을 활용함으로써 평가 대상의 후보 분자 수가 증가할 것으로 기대된다. 예를 들어, 리드 화합물의 발견 및 오프타깃 스크리닝(Off target screening)에 적용되는 분류 방식을 사용하여 이러한 후보 분자를 더욱 정교하게 평가할 수 있다. 또한 리드 화합물을 발견하고 최적화할 때 오프타깃 모

152) Quantum computing exploration for dug eiscoery on AWS

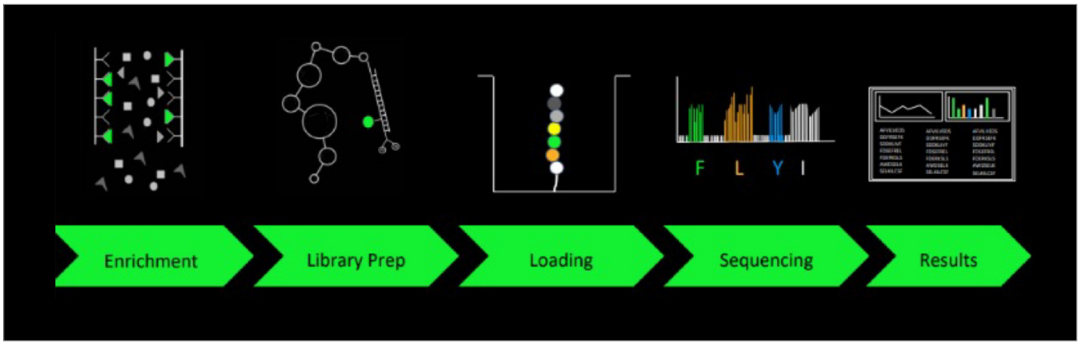
델링과 관련된 분류나 3D 단백질 구조 또는 최적의 모델을 이용할 수 있다면, 리드 화합물을 최적화할 때 실행되는 물리 기반 모델링에도 효과를 줄 것으로 기대된다. 지금까지 과학 문헌에서 보고된 약 107종류의 유기물질과 무기물질 외에 약리 활성을 가졌을 가능성이 있는 분자를 조사하는 것은 매우 중요하다. 실제로 생체에 가까운 분자량을 가진 것으로 보이는 탄소계 화합물은 총 1,060개 정도가 있다. 분자 화합물의 평가는 단백질 리간드 복합체의 분자 동력학 시뮬레이션을 통해 정교해진다. 이러한 영역에서 양자컴퓨팅은 양자역학 및 분자역학에 의한 하이브리드 접근방식과 고전 컴퓨터상에 존재하는 기본 파라미터의 도출을 위한 강력한 도구가 될 것이다. 이러한 발전은 리드 화합물의 최적화와 성장 분야인 계산 프로세스 화학 모두에 응용될 것으로 보인다.

10. 새로운 생물학적 제재 개발 서비스

레빈탈(Levinthal)의 역설에서 설명하는 것처럼 현실 세계의 단백질 모델링 케이스에서는 단백질 사슬의 길이에 따라 기하급수적으로 증가하는, 이론상 존재할 수 있는 방대한 수의 구조 단백질을 탐색해야 한다.[153] 따라서 그 구조를 고전 컴퓨터상에서 특정하는 것은 어려운 일이다. 하나의 모델에서 20개의 아미노산 사슬과 100개의 아미노산 사슬에서 존재할 수 있는 구조는 각각 1,028개와 1,047개인데, 미국 FDA의 바이오 의약품의 정의에 따르면, 단백질은 40개 이상의 아미노산으로 구성되어야 한다. 대부분의 단백질은 이미 알려진 단백질 구조와의 유사성에 근거하여 정확하게 모델링할 수 있다. 양자컴퓨팅은 이론상 존재할 수 있는 방대한 구조 중에서 가장 정확도가 높은 구조를 특정하는 등 단백질 입체 구조 예측의 수많은 계산상의 과제를 극복할 가능성이 있다. 또한 최근 격자에 있는 2개의 일반적인 구조(α헬릭스와 β시트)의 펩타이드를 양자컴퓨팅에 의해 작성할 수 있음이 증명되며, 단백질 구조와 단백질의 역장 계산을 탐색하는 데 양자 알고리즘을 활용할 수 있다는 가능성을 보여주었다. Quantum si의 경우, 유전체 분석을 위해 단백질 서열을 이용하여 질병의 원인을 알아낼 수 있는 방식을 공개하였다.[154] 한국 닥터노아의 플래폼 아크(ARK)는 새로운 조합의 복합제를 발굴하는데 특화된 것으로, 기존 문헌 정보, 유전체 정보, 구조 정보를 분석해 기존에 없던 최적의 복합제를 탐색하고 두 약물 간 부작용을 예측할 수 있다. 디어젠은 단백질의 3차원 구조 정보 없이도 신약 후보물질을 예측하는 기술을 보유하고 있는데, 아미노산 서열 데이터를 이용하여 아직 3차원의 구조가 밝혀지지 않은 단백질을 이용한 신약 개발이 가능하다.[155]

153) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
154) Quantum Si (2023)
155) 천승현 (2022)

그림 Ⅴ-4-18 단백질 서열 분석을 위한 워크플로우 (Quantum Si)



※ Qaumtum Si (2023)

11. 보험료 산정 및 위험 분석 서비스

의료보험료를 결정하기 위해서는 의료보험의 일반적인 가격 전략 구축 프로세스를 위해 여러 가지 복잡한 요소를 고려해야 한다.[156] 이러한 요소에는 집단의 건강 수준과 질병 위험, 치료의 적절성과 비용, 기업 전략과 규제에 근거한 의료 보험 위험 허용도 등이 있으며, 이들은 서로 복잡한 상호의존 관계를 갖는다. 의료보험 분야는 고전적인 데이터 사이언스 공법을 응용함으로써 발전해 왔는데, 불확실성을 더욱 절감하는 보다 입도가 조밀한 모델을 구축하는 일은 여전히 어려운 편이다. 보험위험 분석은 가격책정 최적화에 있어 양자컴퓨팅이 활용될 것으로 보이는 유력 분야 중 하나다. 집단 수준의 질병 위험에 관한 통찰을 양자 위험 모델과 조합하여, 경제적 위험을 더욱 효율적으로 계산함으로써 의료보험의 위험 모델과 가격책정 모델은 더욱 세련될 것으로 판단된다. 가격을 결정하는 데 기여하는 양자컴퓨팅의 또 한 가지 중요한 용도는 부정행위 감지이다.[157] 현재 의료 사기로 인한 피해가 미국에서만도 수천억 달러에 달한다. 고전적인 데이터 마이닝 방법도 의료 사기를 검출하고 줄이는 데 도움을 주고 있지만, 계산 효율이 더 높은 방법이 필요해지고 있다. 양자 알고리듬은 일반적인 것과는 다른 행위를 찾아내고 의료비용의 부정 청구를 배제하기 위한 고도의 분류와 패턴 검출을 실현할 수 있게 될 가능성이 있다. 부정 청구로 인한 손실을 방지하는 체제가 강화되어 비용이 절감된다면, 의료보험은 가격 전략을 더욱 최적화하여 더욱 저렴한 보험료를 제시할 수 있게 될 것이다. 가격 계산 기능의 강화는 평균 보험료를 절감할 뿐 아니라 계약자 한 사람 한 사람에게 맞는 보험료를 선택할 수 있게 한다. 의료의 복잡성은 가격 전략을 알기 쉽게 해야 한다는 과제를 통해 드러난다. 투명성을 실현하고 평균 의료비용을 절감할 것이 요구되는 각종 새로운 규제에 의해, 가격책정 모델을 최적화하는 것의 중요성이 한층 높아지고 있다.

156) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

157) Raihan Ur Rasool et al. (2023)

제5절 소재

1. 신소재 개발 서비스

양자컴퓨팅 분야에서 가장 주목받고 있는 분야는 재료·화학 분야로, 재료의 물성이나 분자의 성질·화학 반응에 대해 알려면, 그러한 재료 및 분자를 구성하는 전자의 상태를 계산해야 한다. 전자는 양자역학을 따라 움직이며, 입자 수가 증가하면 계산은 기하급수적으로 큰 계산 비용을 필요로 한다. 이러한 계산을 고전 컴퓨터에서 취급하기 위해 지금까지 다양한 근사법 등이 도입되었지만 여전히 전자 간의 양자적인 상관이 강하며 복수의 전자 궤도에 겹침 상태로 전자가 배치됨으로써 안정화되는 분자나 근저 상태뿐 아니라 여기 상태가 관여하는 현상 등 슈퍼컴퓨터를 사용해도 시뮬레이션하기 어려운 대상이 존재한다. 양자컴퓨터는 양자적인 겹침 상태를 자연스럽게 표현할 수 있기 때문에, 이러한 양자성이 강하고 고전 컴퓨터에서는 계산하기 어려운 대상이라도 시뮬레이션할 수 있을 것으로 기대된다. 촉매는 질소 소정 및 CO_2 회수, 재이용에 있어 중요한 역할을 하고 에너지 문제를 해결하는 궁극적인 방법은 광기능 재료를 사용하는 인공광합성을 실현하는 것이다. 하지만 광반응이 관여하는 광합성에는 양자 결맞춤이 기여하고 있으며, 그 메커니즘은 아직 완전하게 이해되지 않고 있다. 양자컴퓨터를 사용하는 계산 과학적 접근방식으로 인해 이러한 대상에 대한 지식을 얻음으로써, 지구적인 규모의 에너지 문제 및 카본 중립을 실현하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.[158] 다중 구성 요소 시스템의 상호 작용을 시뮬레이션하기 위한 수치적으로 정확하고 본질적으로 편향되지 않은 방법인 양자 몬테카를로(Quantum Monte Carlo)가 개발되었다. 이 방법은 고체 재료의 내부 물리학을 밝힐 수 있으며, 이는 재료 설계 효율성과 고전 컴퓨터 모델링으로 발견하거나 개념화할 수 없는 완전히 새로운 재료의 개발을 통해 비용 절감을 유도하는 데 도움이 될 것이다.[159]

2017년에는 IBM이 일반에 공개한 양자컴퓨터로 원자량이 작은 무기염류의 수소화 리튬(LiH)과 수소화 베릴륨(BeH_2)을 모델링하는 사례가 소개되었다.[160] 2020년에는 양자컴퓨터를 적용한 다양한 소재 개발이 진행되었다. 미국 시카고대학교는 IBM의 53큐비트 Hummingbird 양자 칩을 사용하여 엑시톤 응축물이라는 양자 물질의 시뮬레이션을 수행했다.[161] 이러한 응축물은 50년 전에 예측되었지만 최근에야 그 존재가 입증되었다. 엑시톤 응축물은 거의 손실 없이 에너지를 전달하는 드문 특성을 가지고 있으며 에너지 효율적인 재료에 대한 엄청난 잠재력을 가지고 있다. 같은 해에 미국 Google은 VQE를 사용하여 H12 분자, 현재까지 가장 큰 양자 화학 시뮬레이션을 수행했다. 하버드대학교는 독일

158) Aite Novarica (2021)
159) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
160) Aite Novarica (2021)
161) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)

MPQ의 알칼리 원자 양자플랫폼을 이용하여 하버드 모델 양자시뮬레이션을 수행하였고, NIST는 알칼리 토금속 원자를 이용한 양자자성 모델 양자시뮬레이션을 진행하였다. 미국과 유럽은 현재 양자 시뮬레이터 연구를 주도하고 있으며, 원자 플랫폼의 양자 다체문제 해결, 광자 플랫폼의 보존샘플링 기반 양자 화학 에너지 레벨 문제해결 등에 주력하고 있다.[162)]

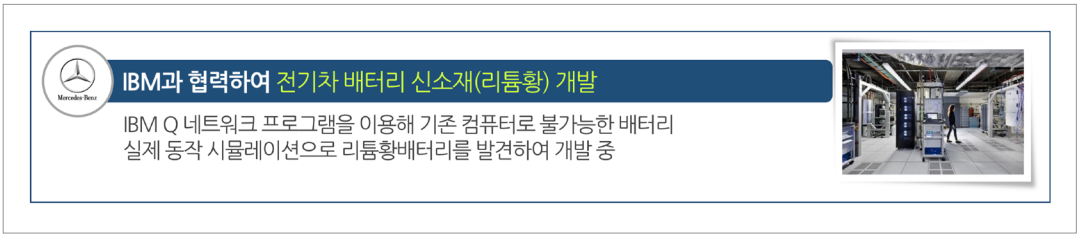
2. 배터리 소재 개발 서비스

전기차에서 가장 비싼 부품은 배터리팩으로 배터리 자체가 전기자동차의 총 생산 비용의 약 40%를 차지하고 있다.[163)] 이 비용의 대부분은 배터리를 만드는 데 사용되는 재료에서 발생하고 있다. 비용 효율성을 유지하면서 증가하는 전기자동차 수요를 충족하기 위해 대다수의 자동차 제조업체는 배터리 화학 연구에 막대한 투자를 하고 있으며, 공급 및 생산에 있어 더 저렴하고 지속가능한 배터리 재료를 찾고 있다.

에너지 밀도를 개선하면 주행거리가 늘어나고, 차량 내 배터리 배치 위치에 대한 유연성이 향상될 것이다. 또한 배터리의 충·방전 주기를 개선하면 차량의 수명이 길어지기 때문에, 운전자들이 겪고 있는 배터리 교체 비용을 줄일 수 있을 것이다. 또한 연소자동차와 가격 경쟁력을 갖기 위해서는 가격을 킬로와트당 약 100달러 미만으로 낮춰야 한다. 이에 아직 개발 단계지만 자동차 산업 내에서 양자컴퓨팅에 대해 높은 수준의 관심을 나타내고 있다.[164)] Daimler, Toyota, 현대를 포함한 다수의 자동차 제조업체가 배터리 연구의 가속기로서 양자컴퓨팅으로 눈을 돌리고 있다. 2020년 1월 독일 Daimler AG와 IBM은 양자컴퓨터를 사용하여 3개의 리튬 함유 분자의 쌍극자 모멘트를 시뮬레이션하여 오늘날 전기자동차의 리튬전지보다 용량, 지속시간, 가격 면에서 뛰어난 리튬황전지를 개발 중에 있다.[165)166)] Volkswagen도 전기차 시대를 대비하여 화학 시뮬레이션을 통한 전기차용 고성능 배터리 개발에도 양자컴퓨터를 적용 중이다.[167)] 2023년 IonQ와 2023년 포스코 홀딩스는 프랑스 파스칼, 한국 큐노바와 함께 2차전지 소재 개발을 위한 양자컴퓨터 개발에 나서기로 했다.[168)]

162) Michal Krelina (2021)
163) IonQ (2023)
164) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
165) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
166) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
167) 이혁성 (2019)
168) 김상범 (2023)

그림 Ⅴ-4-19 양자컴퓨터 적용 사례(독일 Daimler AG)



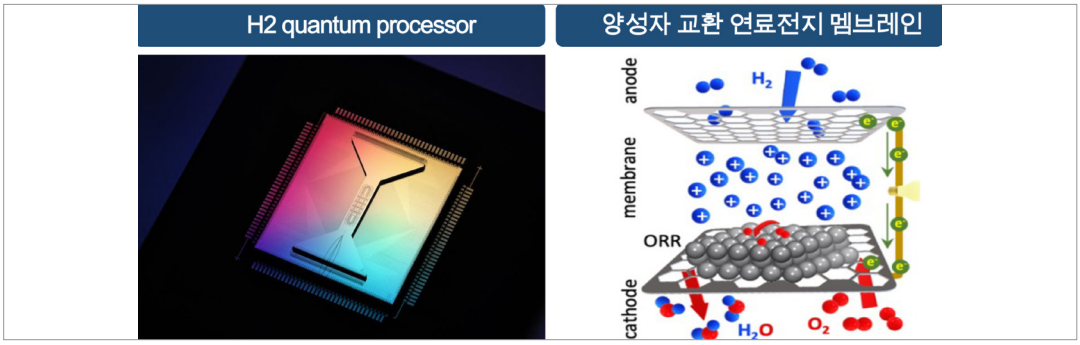
※ NIA (2021)

3. 수소 연료전지 개발 서비스

항공기 및 자동차 회사들은 저탄소 배출 차량 및 항공기를 만들기 위해 수소 연료전지로 구동되는 전기엔진을 유망한 후보로 고려하고 있다. 이에 2023년 4월 Airbus, BMW, Quantinuum은 연료전지에서 촉매의 화학 반응에 초점을 맞춘 양자 시스템의 시뮬레이션 및 양자컴퓨터를 이용하여 미래 연구 속도를 높이기 위해 하이브리드 양자-고전 워크플로우를 개발했다고 발표했다.[169] 그들은 백금이나 다른 물질을 촉매로 코팅한 양성자 교환 연료전지 멤브레인을 통해 수소를 통과시키는 산소 환원 반응(Oxygen reduction reaction, ORR)을 정확하게 모델링하는 데 성공했다. 양성자 교환 연료전지의 효율성을 최적화하기 위한 중요한 것은 촉매로 사용하기에 가장 적합한 재료를 선택하는 것이다. ORR은 연료전지에서 수소와 산소가 물과 전기로 변화하는 과정에서 일어나는 화학 반응으로, 이 과정에 대한 효율성을 제한한다.[170] 상대적으로 느리고 많은 양의 백금 촉매가 필요하기 때문에 반응과 관련된 기본 메커니즘을 잘 이해해야 한다. 연구팀은 ORR 반응을 이해함으로써 연료전지의 성능을 향상시키고 생산 비용을 절감할 수 있는 대체 재료를 식별하는데, 도움을 받을 수 있을 것으로 기대하고 있다. Quantinuum의 InQuanto 계산 화학 소프트웨어를 사용하여 백금과 백금으로 덮힌 코발트 표면을 모두 사용하는 멤브레인에 대한 ORR 반응을 모델링한 다음 H-Series 양자컴퓨터에서 시뮬레이션을 실행하여 중요한 화학 반응에 대한 이해를 높이기 위한 양자컴퓨팅의 적용 가능성을 입증하였다. Airbus는 수소가 비행 시 재생 에너지에서 생성되어 CO_2를 배출하지 않기 때문에 저탄소 항공기에 동력을 공급할 유망한 후보로 고려하고 있다. 향후 몇 년 내에 ZEROe 실증 항공기에 탑재된 수소 구동 연료전지 추진 시스템 테스트를 발표할 계획이고, 2035년까지 시장 진입을 위해 세계 최초의 수소 동력 상업용 항공기를 개발할 계획이다.

169) Military Aerospace Electronics (2023)
170) GQI (2023)

그림 Ⅴ-4-20 수소 연료 전지 개발 양자 프로세서와 개념

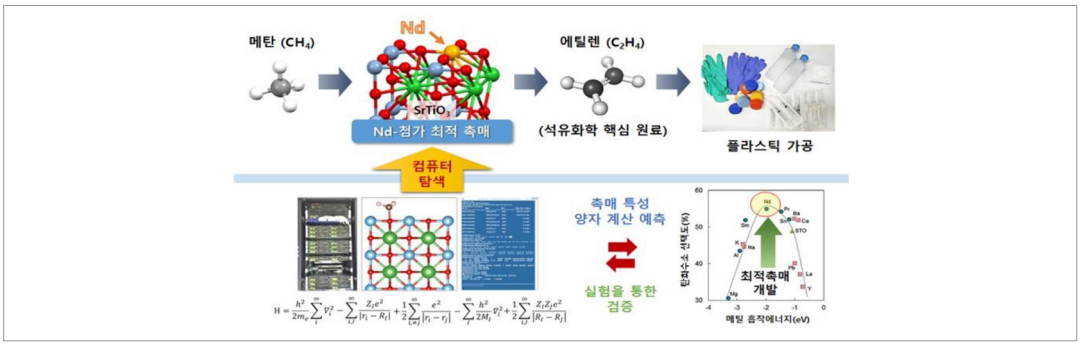


※ GQI (2023)

4. 촉매 및 계면활성제 개발 서비스

화학 및 석유 기업이 양자컴퓨터를 사용하여 새로운 화학적 기법 및 화학 물질을 발견하고 개발하는 데 필요한 시간을 단축하고자 한다. 양자화학 시뮬레이션은 고전 컴퓨터를 병용하는 방법으로써, 이미 프로토 타입이 실천되고 있다. 2017년 Nature지에 미국 IBM이 일반에 공개한 양자컴퓨터로 원자량이 작은 무기염류의 수소화리튬(LiH)과 수소화 베릴륨(BeH_2)을 모델링하는 사례가 소개되었다.[171] 2019년 한국 KIST는 [그림 V-4-21]에 기술한 것처럼 양자컴퓨팅을 통해 메탄가스에서 에틸렌을 만드는 촉매를 발견하였는데, 이는 범밀도함수 계산법으로 메탄에서 화학제품으로 전환 가능한 촉매를 개발하는 방법으로, 양자컴퓨팅을 활용해 후보 물질을 추리기 때문에 수많은 반복 실험 시행착오를 크게 줄일 수 있었다.[172] 이와 같은 하이브리드법을 응용하면 배출량 감소에 도움이 되는 새로운 촉매나 회수량을 높이는 새로운 계면활성제를 발견하는 등 화학·석유 산업의 과제를 해명할 수 있을지 모른다.

그림 Ⅴ-4-21 양자역학 계산을 활용한 촉매 설계



※ 한국연구재단 보도자료 (2019)

171) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

172) 한국연구재단 보도자료 (2019)

5. 화학물질 개발 서비스

분자 설계 작업에 적용된 양자컴퓨팅의 향상된 예측 능력은 작물 보호 화학 물질의 개발 및 새로운 분자의 특성에 대한 정확한 예측이 개발 속도를 높이는 특수 화학 산업의 많은 부문에서 중요한 응용 프로그램이 될 수 있다.[173] 새로운 고체 상태 재료의 예를 들면, 양자컴퓨팅에 의해 열린 설계 잠재력은 배터리 재료, 반도체, 자석 및 초전도체와 같은 여러 첨단 부문의 신소재 개발에 도움이 될 수 있다. 이와 유사하게 OLED 디스플레이용 발광 분자를 사용하면, 새로운 분자를 만들기 전에 추구했던 색상의 밝기와 색조를 제공할 수 있는 새로운 분자를 높은 정밀도로 모델링하는 것이 가능할 수 있다. 또한 작은 기질의 도킹 에너지에 맞게 조정된 단백질과 가장 잘 상호 작용하는 분자 표적을 식별하고 설계하는 데, 새로운 가능성이 열릴 것이다.

그림 Ⅴ-4-22 화학산업의 양자컴퓨팅 적용 단계

단계	화학 물질 설계[1]	제품 설계[2]	공급망	생산	마케팅
잠재적인 영향	Early killer application	Early killer application	성숙한 양자컴퓨팅	**잠재적인 조기 적용**	성숙한 양자컴퓨팅
사용되는 양자도구	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 최적화	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 최적화
응용 예제	• 실험실 작업 감소 및 필요한 특성을 가진 분자 및 고체 재료 설계 • 더 나은 활성 성분 제작 위해 컴퓨터 사용한 단백질 모양 정의	• 어떻게 성분이 프로세스에 영향 미치는지, 복잡한 혼합물이 작용하는지 모델링하여 효과적인 제형 발견	• 비용 저감 위한 공급망 및 물류 센터 최적화 위해 양자컴퓨팅 사용	• 新 촉매제 발견 및 더 나은 반응 이해를 통한 수율 향상 및 부산물 발생 억제 • 열/질량 수송에서 복잡한 최적화 문제를 풀기 위한 양자 알고리즘 사용	• B2B/B2C 소비자 관계를 다루는 것을 돕기 위한 양자 AI 사용

1) 새로운 분자들, 2) 공식 및 복잡한 어셈블리, 3) Artificial Intelligence

※ Florian Budde & Daniel Volz (2019) 집필진 재구성

양자컴퓨팅의 힘을 사용하면 작물 보호 화학물질, 살생물제 및 특수 화학 산업 가운데 특정 기타 부분 중요 응용 프로그램과 함께 이러한 종류의 표적 식별에 진전이 있을 수 있다. 양자컴퓨팅은 관련된 복잡한 분자 수준 프로세스에 대한 이해도를 높이고 이러한 혼합물의 최적화를 도와 화학 물질이 지원하는 전체 응용 분야에 대해 보다 효과적인 제품을 만들 수 있도록 지원함으로써 혼합물의 공식화에 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 새로운 세척 제품 공식을 개발하는 것은 오늘날 기술자의 경험, 시행착오 실험 및 이론적 모델의 삼각 측량을 기반으로 한다. 즉 세제 분자가 섬유의 와인 얼룩과 상호 작용

173) Florian Budde & Daniel Volz (2019)

하는 방식을 정확히 이해하고 이를 제거하기 위한 최상의 활성 성분 및 제형을 식별하기 위한 최적화 계산을 통해 이 프로세스를 도울 수 있다. 또한 복합재, 효과 안료 및 디스플레이용 광전자 장치와 같은 복잡한 어셈블리의 관련 영역에서 개발 작업을 도울 수 있다. 이를 위해서는 시뮬레이션, 최적화 및 인공지능을 결합하여 사용할 최상의 재료(두께, 농도 및 구조)를 식별하는 하이브리드 접근 방식이 필요하다. 일부 업체는 기존 컴퓨팅 방법을 사용하여 TV 및 스마트폰 디스플레이에 사용할 OLED 구조를 개발하고 있다. 여기에 양자컴퓨팅 기능을 활용하면 연구 프로세스를 상당히 가속화할 수 있을 것이다. 양자컴퓨팅 기반 시뮬레이션을 사용하면 반응 메커니즘을 더 잘 이해하고 개선된 촉매를 설계하며 공정 조건을 최적화할 수 있다. 양자컴퓨팅 기반 AI는 부산물 생성을 줄이고 수율을 최적화하기 위해 프로세스 조건을 미세 조정하는 데 도움이 되는 비직관적 데이터 상관관계를 찾는 데 사용할 수도 있다.[174)]

174) IRS Global (2022)

제6절 금융

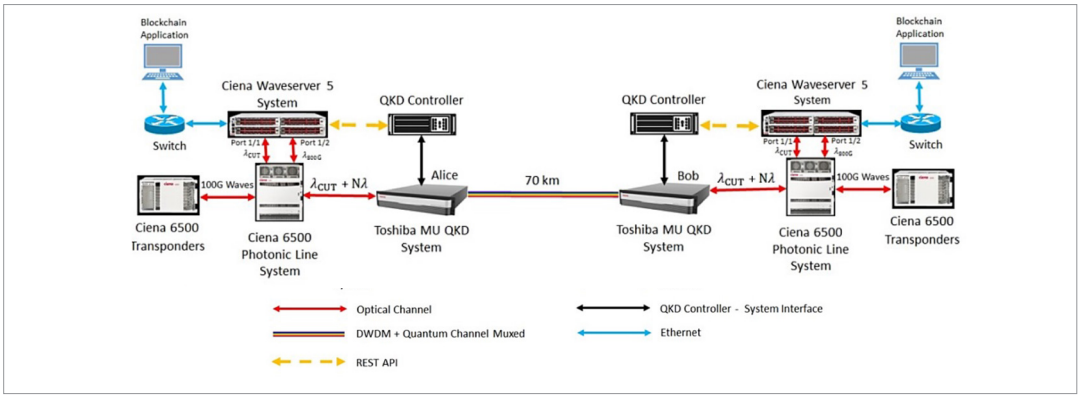
1. 위험 분석 서비스

위험 관리 분야에서 위험 분석을 수행하기 위해 해석적으로 풀 수 있는 모델은 한정적이다. 현재 선택되는 방법은 난수를 사용하여 원 자산 가격의 동태를 시뮬레이션하는데 반복되는 무작위 샘플링에 의존하는 몬테카를로 계산이 필요하며 그 결과는 재무 예측에서 위험과 가능성을 이해하는 데 도움이 된다. 하지만 대규모 포트폴리오의 경우 이는 하룻밤 사이에 수행되는 작업이며 며칠에 걸쳐 연장될 수도 있다. 그러나 양자컴퓨팅이 제공하는 2차 속도 향상은 그러한 계산을 사실상 즉각적으로 실행할 수 있기 때문에 시간과 노력을 줄여줄 수 있다. 따라서 은행 및 금융 대기업은 이 기술의 가능한 응용 프로그램의 필요성을 인식하고 있다. 또한 HSBC는 2022년 3월 양자컴퓨팅에 대한 전문성을 강화하고 관련 기술을 활용하기 위해 향후 3년간 IBM과 협력할 것을 발표하였고, City Group, BMP Parima, BBVA, 일본 유초은행 등 11개 글로벌 금융회사가 양자기술 관련 프로젝트에 참여하고 있다. BBVA는 100개 이상의 변수를 고려하는 복잡한 포트폴리오 최적화 이슈에 대해 양자컴퓨터가 갖는 장점을 테스트했다. 또 Goldman Sachs는 위험성 평가 등에 활용하는 기존 시뮬레이션의 한계를 개선한 양자 알고리듬을 개발을 위해 양자컴퓨팅을 통한 몬테카를로 시뮬레이션의 고속화를 추진 중이다.[175] JP Morgan Chase은 Toshiba와 협력해 양자컴퓨터 기반 사이버 공격을 방어하는 기술을 개발하고 있다.

2022년 2월 JP Morgan Chase, Toshiba와 Ciena의 연구팀은 광섬유 케이블을 통해 양자보호 블록체인 애플리케이션 시연에 성공하였다고 발표하였다.[176] 영국 Barclays PLC, 미국 Bank 및 Wells Fargo 등 일부 대형 은행에서 이미 연구개발팀을 꾸리고 양자컴퓨팅에 투자하여 금융의 미래를 준비하기 위해 양자기술 공급업체들과 제휴를 맺었다.[177] [178] 중장기적으로 기존 공개키 암호 방식이 양자컴퓨터에 의해 깨질 수 있음을 우려하여 정보보호 차원에서의 양자컴퓨터 개발에도 관심을 갖고 있다. 이처럼 금융 시장에서는 위험성 평가와 정보보호를 위해서 양자컴퓨터 개발과 양자알고리듬 개발에 동시 접근하고 있다. HSBC는 2022년 3월 양자컴퓨팅에 대한 전문성을 강화하고 관련 기술을 활용하기 위해 향후 3년간 IBM과 협력하기로 하면서 전문 지식과 양자컴퓨팅 시스템에 대한 접근이 가능해졌다. 또한 2023년 5월 Quantinuum과 협력하여 사이버 보안에서 양자컴퓨팅을 사용하여 예측할 수 없는 암호화키를 생성하는 방법을 시작으로 위험 및 사기 탐지 및 예방에 적용할 방침이다.[179]

175) 이혁성 (2019)
176) Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022)
177) Michal Krelina (2021)
178) Quantum Technology and Application Consortium (2021)
179) Quantinuum (2023)

그림 Ⅴ-4-23 JP Morgan Chase, Toshiba, Ciena의 블록체인 보호 사례



※ Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022)

2. 투자 솔루션 계산 서비스

대규모로 복잡하고 수학적인 모델링이 필요한 금융업계는 양자컴퓨팅의 잠재력을 완벽하게 구현할 수 있는 분야이다. 양자컴퓨팅은 복잡한 연산 작업을 몇 주 또는 몇 달이 아닌 몇 분 또는 몇 시간 만에 신속히 도출할 잠재력을 가지고 있고 합리적인 시간 내에 정확한 지식을 제공할 수 있기 때문이다.[180)]

Ally Financial은 일정 기간 동안 특정 수익률을 구성하는 수십만 개의 주식으로 구성된 전통적인 상장지수펀드(ETF)에 초점을 맞추고 있다. 이 상품에는 몇 가지 개별 종목의 성과가 떨어지더라도 나머지가 전체 결과를 끌어올려 일정 시간 동안 상당히 예측이 가능한 수익을 제공해야 한다는 전제가 있다. 하지만, ETF의 많은 요소를 관리하고 조작하기란 매우 어렵다. 이에 구성요소가 더 적은 ETF에서도 비슷한 수익률을 낼 수 있는지를 연구하기 위해 카디널리트 제약(Cardinality constraints)의 최적화 문제를 탐구하며 수익을 극대화하고 위험을 최소화하는 금융 지수 추적 포트폴리오에 대한 하이브리드 양자-고전적 접근 방식을 개발하였다. 이 팀은 양자컴퓨팅으로 50가지 개별 시나리오를 만들었다. 투자 솔루션을 제공하는 유럽 은행 그룹인 키르단 그룹(Cirdan Group)은 양자컴퓨팅 서비스 기업인 테라 퀀텀(Terra Quantum)과 협력하여 이색 파생상품(exotic derivatives)에 대한 투자 솔루션과 관련된 계산 과제를 해결하고 있다. 이는 폐쇄형 공식이 없는 수학적 함수로 표현되기 때문에 매우 까다롭고 어려워 기존의 고성능 컴퓨팅으로는 시간이 많이 소요된다. Terra Quantum이 양자컴퓨팅으로 동일한 최적화 계산을 수행한 결과, 동일한 정확도의 계산 시간을 10분에서 2분으로 크게 단축할 수 있었다. 8분은 짧은 시간처럼 보이지만, 경제적 효과는 크다. 포트폴리오의 규모나 금융기관의 베팅 규모를 고려할 때, 0.1%라도 더 나은 방식으로 계산을 할 수 있다면 그것은 상당한 이익을 의미하기 때

180) Poornima Apte (2023)

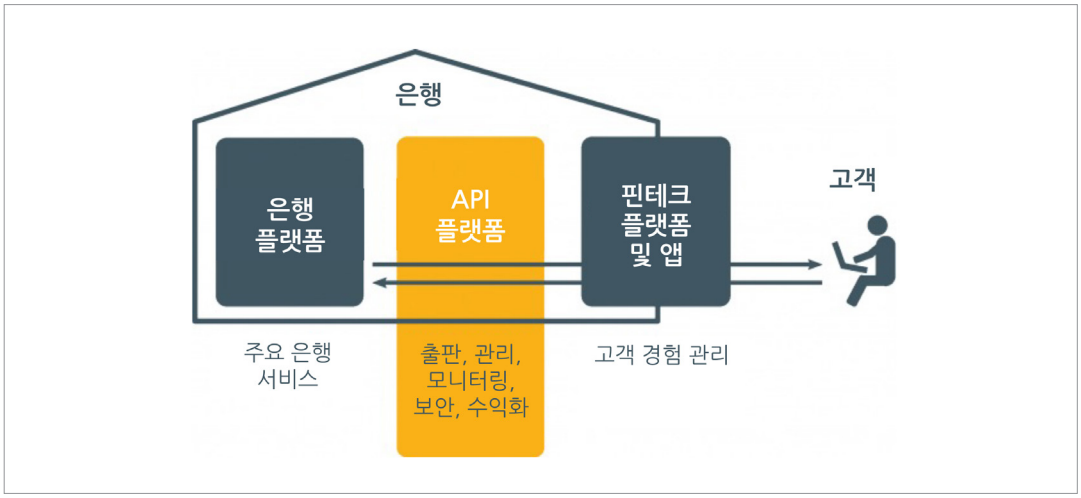
문이다. 이처럼 투자 솔루션 최적화 문제에는 양자컴퓨팅이 안성맞춤이고 머신러닝을 보다 효율적으로 만들 수 있는 잠재력도 가지고 있다.

3. 금융 플랫폼 서비스

양자 플랫폼은 은행의 서비스 네트워크를 확장하기 위한 방법으로, 이 기술을 바탕으로 파트너사, 핀테크, 스타트업은 은행의 서비스를 상품에 적용해 고객이 사용하기 쉬운 시스템을 만들 수 있게 된다.[181)]

한국의 오리엔텀은 메가존클라우드의 클라우드 서비스와 프랑스 양자 컴퓨팅 기업 파스칼의 양자 컴퓨터, 하나은행의 데이터를 활용할 수 있는 컨소시움을 구성해 실제 양자컴퓨터 하드웨어에서 서비스 할 수 있는 양자 금융 플랫폼 개발을 시작하고 있다.[182)] 또한 이스라엘 양자 기업 퀀텀머신스와 협력해 하드웨어 플랫폼과 관계없이 금융 알고리즘을 서비스 할 수 있는 미들웨어 개발 프로젝트도 진행할 예정이다. 이처럼 다양한 기능을 포함하고 있는 양자 은행 플랫폼 서비스의 제공은 고객이 쉽게 금융을 접하고 주요 서비스를 경험할 수 있는 기회를 제공하게 될 것이다.

그림 Ⅴ-4-24 양자컴퓨팅 활용 금융 플랫폼



※ Qunatum (2023) 집필진 재구성

181) Qunatum (2023)
182) 한세희 (2023)

4. 고객 타겟팅 및 예측 서비스

오늘날 금융 서비스 시장의 고객은 그들의 니즈 및 행동 변화를 빠르게 예측하는 맞춤화 상품이나 서비스를 요구한다. 중소 금융기관의 25%가 고객 체험을 경시한 상품 및 서비스 때문에 고객을 잃고 있다. 고객의 행동 패턴은 복잡하며 그와 관련된 다양한 측면을 놓치게 되면, 금융기관이 최적의 특징을 선택하여 앞서나가는 상품을 제안할 수 없다. 이것은 기존 고객의 지출 점유율 확대 및 전 세계의 17억 명의 은행 계좌를 가지지 않은 성인에 대한 접근할 수 있는 기회를 잃게 만든다. 이러한 문제는 부정행위를 찾아내는 데에도 존재한다. 몇 가지 추산에 따르면, 금융기관은 불충분한 데이터 관리 방법에 의해 최대 연간 100억 달러의 수익을 잃고 있으며, 2020년에는 부정행위로 인한 손실액의 합계가 560억 달러에 달했다. 부정 감지 시스템은 여전히 매우 정확도가 낮으며, 오검출률이 약 80%이기 때문에, 금융기관이 위험을 회피하도록 만들고 있다. 신용 점수의 타당성을 확실히 하기 위해, 고객이 신규 등록하는 데 12주가 걸리는 곳도 있다. 디지털 시대인 오늘날 은행 거래의 70%가 디지털화되어 있으며, 고객은 그렇게 오래 기다리지 못한다. 신규 고객과의 관계성을 획득하는 데 시간이 너무 많이 걸리는 금융기관은 보다 민첩한 경쟁 업체에 고객을 빼앗기게 된다. 양자컴퓨팅은 고객 타겟팅과 예약 모델에 큰 변혁을 가져다줄 가능성이 있다. 양자컴퓨터의 데이터 모델링 기능은 데이터 구조의 복잡함이라는 과제 때문에 현재는 불가능한 패턴 검출, 분류 및 예측에 있어 우위성을 드러낼 것으로 기대된다.[183)]

5. 리스크 프로파일링 서비스

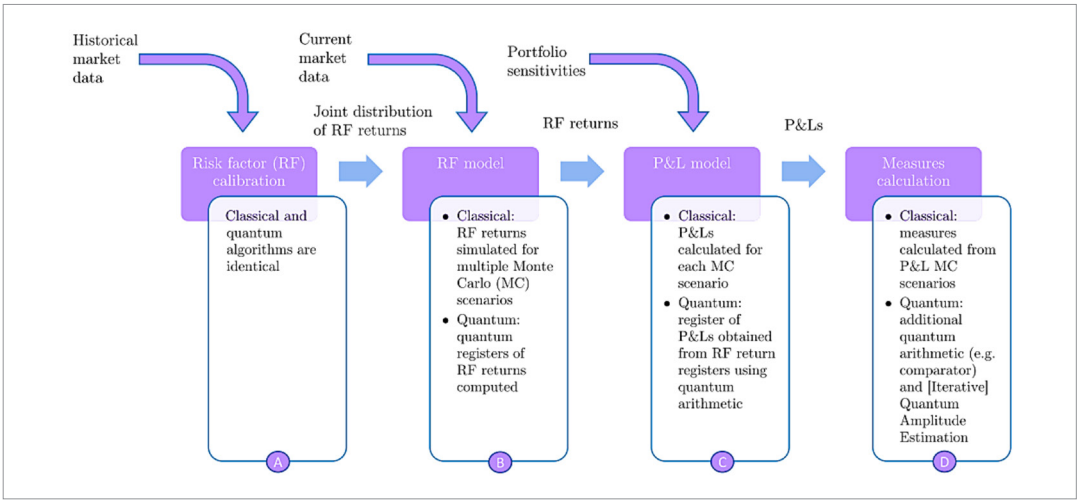
금융기관에는 균형 잡힌 리스크 테이킹(Risk taking), 효과적인 헤지 거래, 그리고 광범위한 스트레스 테스트에 의한 규제 요건에 대해 더욱 더 준거할 것이 요구된다. 유동성 관리, 파생 가격 설정, 그리고 위험 계측은 복잡하고 난해한 계산이 될 때가 있어, 거래 위험의 비용을 적절하게 관리하기 어렵다. 현재 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션은 금융 모델에서 위험 및 불확실성의 영향을 분석하는 데 많이 사용되는데, 추정 오차의 스크리닝에 대한 제약이 있다. 금융기관의 모든 위험을 시뮬레이션하려면 가외의 비용이 들어갈 가능성이 있으며, 선택지로서 수많은 포트폴리오를 포함하면 시뮬레이션을 완료하기 위해 다수의 샘플과 많은 시간이 필요하다.[184)] 향후 Basel III 및 재검토 등 규제, 지령 및 기준이 잇달아 개정될 것으로 보인다. 이로 인해 더 많은 위험 관리의 스트레스 시나리오가 필요해지게 된다. 결과적으로, 규제를 위반하는 경우의 벌금 및 시정 대응을 포함한 컴플라이언스 관련 비용이 몇 년 후면 2배 이상으로 증가할 것으로 예측된다. 금융기관은 더욱 고도의 위험 프로파일링 요구와 규제 강화에 직면해 있다. 양자컴퓨팅 기능에 대한 연구의 비약적인 발전이 이루어지면, 장시간이 필요한 실험

183) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

184) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

시나리오 시뮬레이션을 더욱 정확하고 짧은 시간 안에 실행하며, 더 많은 결과를 테스트할 수 있을 것으로 판단된다.[185)]

그림 V-4-25 기존과 양자 구현에 따른 시장 위험 계산 비교



※ S. Wilkens et al. (2023)

6. 거래 최적화 서비스

금융 시장의 트레이딩 활동은 점점 더 복잡해지고 있다. 예를 들어, 딜리버티브 평가 조정 모델인 X 값 조정에는 현재 신용가치 조정, 차변 금액 조정, 펀딩 가치 조정, 자본 가치 조정, 여유 자금 조정이 포함되어 훨씬 복잡해졌다. 투명성에 관한 규제 요건이 강화됨에 따라 거래에 더욱 엄격한 검증 프로세스가 적용되어, 상대방의 신용 노출을 딜리버티브 포트폴리오의 신용 제한 이용 상황에 반영해야 하는 위험 관리 계산에도 영향을 미치고 있다. 또한 중요한 투자 프레임과 방법도 변화했다. 복잡한 거래 환경에서, 펀드 매니저는 시장의 주가변동성 및 고객의 라이프 이벤트의 변화와 같은 현실적인 제약 조건을 포트폴리오를 최적화하는 데 적용하는 일에 있어 고전을 겪고 있다. 그들이 기대 수익을 추산할 때는 수많은 가능성을 가진 시나리오와 투자의 선택지를 시뮬레이션하고, 감응성을 검증할 수 있어야 한다. 현재로서는 시장의 움직임에 뒤처지지 않고 대처하는 최적의 재조정 전략을 찾는 데 있어, 계산 능력의 한계와 거래 비용이 큰 제약이 되고 있다. 양자기술은 이러한 오늘날의 거래 환경의 복잡성을 타개할 수 있을지도 모른다. 펀드 매니저가 양자컴퓨팅의 조합 최적화 능력을 활용하게 되면, 포트폴리오를 분산 고도화하고, 더욱 정확하게 시장 상황 및 투자가의 목표에 대응하여 포트폴리오 투자를 재조정하며, 더 큰 포트폴리오 거래 결제 프로세스의 비용 효율을 향상시킬 수 있을 것이다.[186)]

185) S. Wilkens et al. (2023)

186) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

제7절 교통·물류·항공

1. 교통관리 서비스

독일 Volkswagen과 캐나다 D-Wave Systems은 2016년, 2018년 두 차례에 걸쳐 베이징과 리스본의 교통체증을 분석하고 택시와 버스의 경로를 양자컴퓨터로 최적화하는 알고리듬 개발에 성공하였다.[187] Volkswagen은 D-Wave 2000Q를 비롯한 2종의 양자컴퓨터를 활용하여 연산능력을 직접 검증하면서 도시교통·이동경로 최적화 서비스를 준비하고 있다. 2019년 11월에는 일부 버스에 D-Wave 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 서비스를 사용하는 내비게이션 앱을 장착했다.[188] 이 서비스는 단순히 혼잡 정보를 제공하는 것이 아니라 ms 단위로 각 차량에 대한 최적의 경로를 계산한다. 이러한 서비스들은 기존 슈퍼컴퓨터로도 수행 가능한 작업이지만 양자컴퓨팅을 통해 보다 향상된 최적화를 실현시키는 것이 이들의 목표이다.[189]

그림 Ⅴ-4-26 양자컴퓨터 적용 사례(Volksagen)



※ NIA (2021)

187) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
188) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
189) 이혁성 (2019)

2. 자동차 전자 제어 장치 암호화 서비스

자동차는 다양한 방식으로 외부 세계와 연결되어 있기 때문에 양자컴퓨팅의 위험에 매우 취약할 수 있다. 이러한 경향은 자동차 대 인프라 및 자동차 대 자동차 통신과 같은 새로운 차량 기술의 사용으로 인해 앞으로 더욱 증가하게 될 것이다. 외부 통신 외에도 자동차에는 내부의 컴퓨터 구성 요소 (전자 제어 장치, Electronic control units, ECUs) 간의 다양한 인터페이스가 있으며, 이 모든 인터페이스에는 안전한 정보 전달이 필요하다.[190] 자동차는 비교적 긴 수명주기를 가지고 있어 오늘날 시장에 출시되는 새로운 차량은 약 15년 동안 주행하게 되는데, 미국의 경우 자동차의 평균 수명은 약 12년으로 계속해서 증가하고 있다.

ECU는 일반적으로 개인용 컴퓨터나 모바일 장치보다 업데이트하기 어려운데 특히 하드웨어 보안 모듈 또는 보안 하드웨어 확장이라고 하는 전용 하드웨어 구성 요소에 구현되는 암호화 기능은 더욱 그렇다. 즉 하드웨어를 변경하지 않고는 암호화 체계를 변경할 수 없다. 일부 ECU는 무선으로 원활하게 업데이트할 수 있지만, 전용 도구를 사용하여 등록된 서비스 스테이션에서만 업데이트할 수 있다. 수십 또는 수백 개의 ECU로 구성된 자동차의 안전을 보장하려면 단일 차량 내부에서 여러 다른 ECU를 업그레이드해야 한다. 이처럼 오래된 노트북 또는 스마트폰보다 긴 수명, 여러 시스템 업데이트의 복잡성 등의 조합으로 인해 양자컴퓨팅 관련 공격에 취약한 차량이 수년 동안 거리에 남아있을 가능성이 높다. 즉 공격자가 수만 대의 차량은 완벽하게 제어할 수 있고 원격으로 움직이지 못하게 할 수도 있고, 주행 중 브레이크를 밟게 만들어 버릴 수도 있다.

이를 방지하기 위해서 기존 차량과 개발 중인 차량 모두에서 아직 완벽한 해결방법은 아니지만, 자동차 환경의 암호화 체계를 PQC 체계로 대체할 필요가 있을 것이다. 양자컴퓨팅에 의한 잠재적인 공격으로부터 자동차 시스템을 보호하기 위해서는 새로운 ECU 또는 자동차 아키텍처 설계를 고려해야 할 것이다.

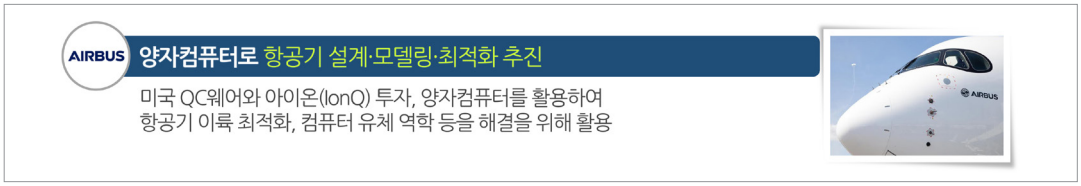
190) Itay Lidovski (2023)

3. 항공기 디자인 최적화 서비스

양자컴퓨팅은 항공기 개발의 디지털화를 크게 향상시킬 수 있다. 다중 물리학 모델링 및 시뮬레이션을 크게 개선하고 오늘날 불가능했던 시뮬레이션을 용이하게 한다. 예를 들어, 현재 엔지니어는 날개 위의 공기 흐름을 정확하게 모델링하는 데 수년이 걸린다. 양자컴퓨팅은 계산 시간을 크게 줄여 설계 효율성을 극대화하고 연료 소비를 줄일 수 있고 상업용 항공기를 운영하는 데 필요한 최적의 연료량과 속도를 평가하는 데 도움이 될 수 있으며, 잠재적으로 업계가 지속 가능성 성과를 개선하는 데 도움이 될 수 있다. 또 다른 잠재적인 응용 프로그램은 대량의 소싱 구성 요소에 대한 더 빠른 검증 및 검증과 복잡한 매개변수에 대한 구성 요소 성능 시뮬레이션이다. 양자방법론으로의 전환은 검증 및 검증 프로세스를 가속화하고 생산 효율성을 향상시킬 수 있다.[191] 네덜란드 Airbus는 유체역학 양자 시뮬레이션을 통해 항공기 디자인에 가장 비용이 많이 드는 물리적 프로토타이밍에 쓰이는 비용과 시간을 줄여줄 것으로 기대하고 있다.[192] 항공기 상승 궤적을 최적화하고 윙 박스의 구조적 안전성을 유지하면서 무게를 최적화하는 설계 과정을 시뮬레이션하기 위해 도입하고 있으며,[193] 항공기 설계나 고장 원인 분석에도 도입을 검증하고 있다. 항공기 설계를 위해 엄청난 양의 시뮬레이션을 슈퍼컴퓨터에서 실행하고 있는데, IT 예산의 3%가 이와 관련한 하드웨어에 투자되고 있어 양자컴퓨터를 통한 예산절감 효과를 기대하고 있다.[194] 미국 Boeing은 가볍고 안전하고 튼튼하며 연료를 덜 소비하기 위해 플라이 복합재로 항공기 787 Dreamliner를 제조하고 있다.[195] 그러나 이 소재를 사용하며 항공기 부품을 설계하는 것은 매우 복잡한데 각 구성 요소가 수천 개의 개별 겹으로 구성되어 있어, 강력한 구성요소를 만들기 위해서는 신중하게 배열할 필요가 있다. 대형 항공기 부품의 경우 이러한 배열에 대해 최대 100,000개의 변수가 추가될 수 있기 때문에, 기존 컴퓨터에서는 이 복잡한 문제를 한꺼번에 해결하기 어렵기 때문에 Boeing은 IBM과 손을 잡고 양자컴퓨터를 이용하여 배열에 대한 최적화를 진행하고 있다. 2023년 6월 미국 NVIDIA, 영국 Rolls-Royce와 Classiq는 복잡한 제트 엔진 설계에 중요한 공기와 가스가 엔진에 어떻게 유입되는지 이해하기 위해 세계 최대 전산유체역학 양자컴퓨팅 회로를 발표하였다.[196] 이는 그래픽 처리 장치(GPU)를 기반으로 하는 양자 기술을 구축하고 클래식 컴퓨팅과 양자컴퓨팅을 모두 사용하여 제트 엔진 성능을 모델링할 수 있는 새로운 회로로서, 프로세스를 가속화하고 보다 정교한 계산을 가능하게 할 것이다.

191) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
192) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
193) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
194) 이혁성 (2019)
195) W. Hettinga (2023)
196) M. K. Jha (2023)

그림 Ⅴ-4-27 양자컴퓨터 적용 사례(Airbus)



※ NIA (2021)

그림 Ⅴ-4-28 양자컴퓨팅 활용 (Airbus)



※ Airbus 홈페이지

4. 비행 게이트 할당 서비스

공항에서 연결 항공편을 배치할 최적의 게이트를 찾는 것처럼 광범위한 범주의 최적화 작업은 생각보다 많은 시간과 비용이 소요된다. 컴퓨터는 승객의 이동 시간을 최소화하기 위해 공항에 도착 및 연결 항공편을 할당할 가장 최적의 게이트를 찾아야 한다. 게이트 간 이동 시간, 승객 수, 항공편 유무 등은 모두 일련의 복잡한 수학 방정식의 변수가 된다. 이를 위해 IBM은 게이트 할당을 위해 양자 회로에서 작동하는 특수 알고리즘을 제작하고 테스트하고 있다.[197] 기본적으로 각 큐비트는 게이트 또는 비행기를 나타내기 때문에 이 문제를 해결하는 데 필요한 큐비트 수는 게이트 수에 항공편 수를 곱한 것으로 나타나게 된다. 양자 장치에서 작업을 수행하려면 이 모든 정보를 시스템의 총 에너지를 측정하는 양자역학 함수인 해밀토니안(Hamiltonian)으로 통합해야 하는데, 이 해밀턴은 매우 복잡하고 기하급수적으로 확장되기 때문에 기존 컴퓨터에서는 이 작업을 수행할 수 없지만, 양자회로로 변환할 수 있다. 정확도가 기존 컴퓨터 이상이 되기 위해서는 100~200개의 작동 큐비트가 필요하다. 이 뿐만 아니라, 중첩을 사용하면 문제에 더 많은 정보를 담을 수 있고, 얽힘을 사용하면 특정 비행기가 다른 비행기 및 다른 게이트와의 상관관계가 있는지와 같은, 더 많은 상관관계를 찾아낼 수 있을 것이다.[198] 인천국제공항과 같이 규모가 큰 공항의 경우에는 더 큰 수치의 작동 큐비트와 복잡한 상관관계가 필요하게 될 것이다.

197) Charlotte Hu (2023)
198) Tobias Stollenwerk et al. (2020)

그림 Ⅴ-4-29 게이트 α에서의 총 환승 시간 비용 계산



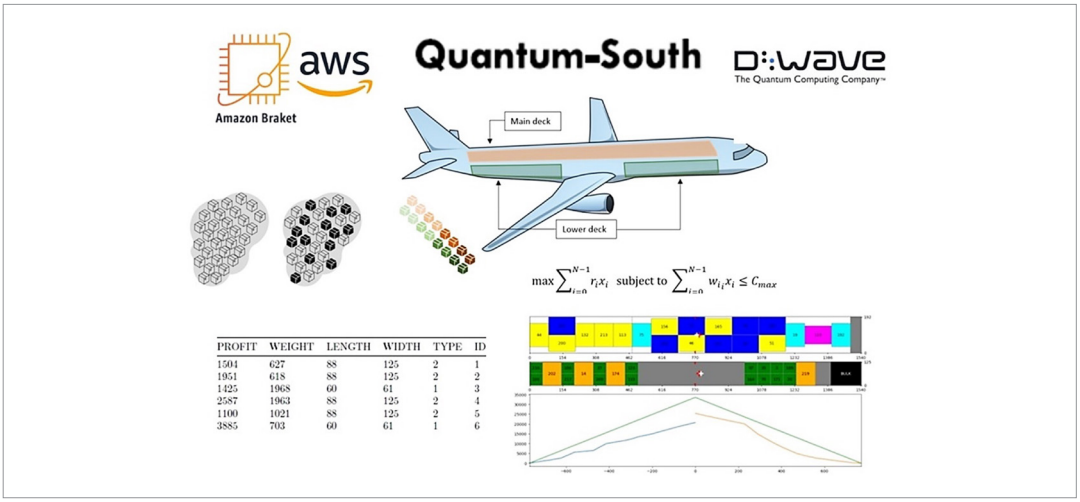
※ Charlotte Hu (2023), Tobias Stollenwerk et al. (2020)

5. 항공 화물 적재 최적화 서비스

항공 화물의 경우 작업을 특히 어렵게 만드는 특정 특성이 나타난다. 예를 들어, 항공기의 동체는 원형 단면을 가지고 있어 단위 부하 장치(Unit load device, ULD)가 활용된 공간을 최대화하기 위해 특정 모양을 갖도록 하고 있다.[199] 항공기로 수송되는 모든 화물은 ULD로 통합되어야 하는데, 즉 특정 치수의 컨테이너 및 팔레트에 수용해야 한다. 다양한 유형의 ULD가 가능하지만 표준화되어 있으며, 각 ULD는 가중치, 너비 및 길이 치수, 관련 수익, 패키지 유형의 고유 식별자, 컨테이너가 나란히 이동할 수 있는지 또는 단일행으로만 이동할 수 있는지 여부를 나타내는 종류의 플래그라는 속성을 가지고 있다. 항공 화물의 주요 문제는 항공기 자체의 물리적 제약에 의해 주어진 일련의 제한에 대해 각 항공기에서 운송되는 수익을 최대화하는 운송할 ULD의 최적 선택을 식별하는 것이다. 미국 Amazon Braket과 캐나다의 D-Wave System과 함께 Quantum-South 라는 양자 응용 프로그램을 개발하였는데, 이는 ULD의 부하를 Airbus A330-200F 및 Boeing 747-400과 같은 대형 항공기의 전체 화물기 구성으로 해결할 수 있는 방법을 제안하였다.

199) Rafael Sotelo (2022)

그림 Ⅴ-4-30 항공 화물 적재 최적화



※ Rafael Sotelo (2022)

6. 항공 운항 시스템 최적화

항공사의 운항 스케줄과 인원 관리에 큰 혼란을 주는 원인은 세계적인 질병의 유행, 악천후, 지진, 작동 상의 문제, 기술적인 문제 등으로 다양하다. 이러한 운항 문제에 대응하여, 운항 스케줄 및 인원 배치를 어떻게 복구시킬지가 항공사가 대처해야 하는 가장 어려운 문제 중 하나다.[200] 현재 솔루션은 단편적이며, 운항 관련 정보의 비중이 높고, 이용률 및 이익의 최대화, 고객 서비스, 고객 만족도에 미치는 영향에 대해서는 크게 고려하지 못한다. 현재 IROPS 해결에 대한 기술적인 제약은 주로 운항 문제를 해결하는 데 도움이 되는 관련 데이터를 충분히 확보하지 못해 데이터가 가시화되지 않은 것과 IROPS 문제를 구성하는 다양한 요소(기체, 승무원, 승객, 장기적인 영향)마다 각각 서로 다른 도구 사용과 복잡한 방법으로 개별적으로 해결하고 있어 비효율적이며 부분적으로 최적화된 솔루션을 단편적으로 개발하고 있다. 양자컴퓨팅은 IROPS로 대응해야 하는 넓은 범위와 수리 최적화를 시행할 때의 복잡한 계산으로 단시간에 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이다.[201] 시나리오 솔루션의 속도와 정밀도를 향상시켜 비행과 승객에 대한 솔루션의 효과를 정량적으로 평가하여 시간 내에 운항 문제에 대응할 수 있을 것이다. 고객 서비스 담당자 및 자동 고객 응대 시스템에서 양자 기계학습을 활용하여 IROPS에 관한 최적의 문제 해결 방법을 제안하는 어드바이스 도구를 제공하고 해당 도구를 자동 고객 관리 시스템에 도입할 수 있다. 예를 들어, 결항을 겪은 승객에 대한 보상을 정할 때, 현금, 숙박 시설, 업그레이드 등의 다양한 선택지 중에서 각각의 승객이 원하는 바에 따라 최적의 보상 방법을 제안할 수 있을 것이다.

200) Katrin Granel (2022)
201) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

그림 Ⅴ-4-31 항공 운항 시스템 최적화



※ Katrin Granel (2022) 집필진 재구성

7. 콘텍스트(Context) 활용 맞춤화 서비스

항공사는 각 승객에게 특화된 서비스를 제공하고, 서비스를 차별화하고, 고객 체험을 향상하여 수익을 증가시킬 수 있다. 고객과의 관계를 구축하고 서비스를 맞춤화하려면 고객 데이터 및 거래 데이터 등을 수집/추출, 데이터 엔지니어링을 실시하여 고객 데이터의 특성 구축, 고객 및 여객 등 상황 특성에 근거하여 고객 분류 모델 학습 및 개인의 여행 상황에 근거하여 최적의 서비스를 특정하고 점수를 매기는 4가지 단계가 필요하다.[202] 맞춤 서비스를 제공하는 시스템은 이미 존재하지만, 고객을 분류하는 단계에서 제약이 있기 때문에, 고객의 기대에 부응하는 서비스를 제공하고 있지는 못하다. 현재 분류 방법은 대부분 인구 통계 데이터나 구매 이력 데이터와 같은 기본적인 고객 특성을 이용하지만, 상황 데이터는 포함되지 않아 제안하는 서비스의 정확도가 낮을 수밖에 없다. 또한 다차원적인 분류를 하지 못하고, 여행자의 희망 조건, 목적, 행동에 대해 콘텍스트의 차이를 효과적으로 잡아내지 못하고 있다. 상황의 특성을 고려하지 않는 이유는 계산 능력과 확장성이 충분하지 않아 복잡한 분류 모델을 구축하기 위한 대량의 데이터 요소를 처리할 수 없기 때문이다. Segment of One(한 개인으로 대상 분류)은 대부분의 항공사가 추구하는 개인화 전략이지만 확장성이 가장 큰 과제이다.[203] 양자적 이점이 달성되면 상황에 맞는 동적 개인화의 가능성을 여는 데 도움이 될 수 있다. 고도의 맞춤 프로세스를 실현하기 위해 양자컴퓨팅을 활용하면 고객 분류를 세분화하고, 더욱 복잡한 고객 특성을 도입함으로써, 다차원적인 고객 분류를 가능하게 한다. 또한 세밀하게 상황 프로파일링을 실시하여, 맞춤 서비스의 정확도를 높인다. 결과에 대한 통찰과 해석을 제공하는 기계학습 모델의 정확도를 높여, 고객 데이터와 고객 만족도의 인과관계를 담당자들이 더욱 정확하게 이해할 수 있게 한다. 기계학습 기능을 강화하여 식별이 가능한 고객 분류의 수와 입도를 기존의 고전 컴퓨터에서는 처리할 수 없는 수준으로까지 끌어올린다. 양자컴퓨팅을 통해 콘텍스트를 활용하는 동적인 맞춤화를 실현한다면, 항공사가 부가 서비스를 통한 수익 증가, 고객 체험의 질 향상, 서비스 차별화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

202) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

203) Tech Briefs (2022)

8. 항공사 네트워크 최적화 서비스

병렬 최적화 문자열을 실행하여 항공사 계획을 가속화하는 것은 중요한 경쟁 요소가 될 것이다. 항공사는 지리적 시장과 같이 변화하는 수요와 진화하는 위기 상황에 빠르게 적응해야 한다.[204] 비행 계획 및 항공기 할당에서 승무원 일정에 이르기까지 네트워크 최적화는 항공사 운영의 핵심이며 모든 항공사의 운영비용에 큰 영향을 미친다. 이러한 프로세스를 합리화하기 위해 많은 노력을 기울이고 있음에도, 여전히 큰 제약이 존재한다. 주로 격리된 의사 결정 지원 도구와 함께 배포된 하위 프로세스의 국부적 최적화로 이어지는 단계별 접근 방식과 관련이 있다. 이러한 도구는 차선의 국소적이고 조정되지 않은 폐쇄적인 솔루션을 생성한다.[205] 예를 들어, 비행경로 계획에 승무원의 일정이 포함되는 경우는 거의 없다. 마찬가지로 승무원의 일정에는 블록 타임이 포함되지 않으며, 블록 타임 계획에는 연료 계획이 고려되지 않는다. 또한 네트워크 계획은 일반적으로 수익 관리(RM) 및 가격 책정과 솔루션 최적화를 조정하지 않는다. 그 결과 수익 최적화라는 동일한 목표로 매일 두 가지 주요 프로세스가 발생하지만 별도의 모델과 매개변수를 사용하게 된다. 연계되지 않는 이러한 접근방식에서는 총비용, 수익, 변화에 대한 적응까지 어떤 부면에서도 만족스러운 솔루션이 만들어지지 않고 있다. 뿐만 아니라 신형 항공기의 도입 및 새로운 항로의 개설 등 운항 상 중요한 변경이 이루어졌을 때에는, 이러한 것들이 혼란의 원인이 된다. 수익 관리 및 가격 설정의 관점에서, 스케줄, 수용 능력, 항공기 설계에 근거하여 서비스를 최적화하더라도, 네트워크 계획에 의해 수익의 최적화를 근거로 이러한 파라미터들이 변경되어버릴 수 있다. 항공사가 이처럼 문제를 분산하여 서로 다른 솔루션을 적용하는 방침을 채용하게 된 가장 큰 이유는 네트워크의 최적화에 관한 대역적인 문제를 단번에 해결하는 방법이 복잡하기 때문이다. 기존의 고전 컴퓨터만으로 이러한 문제를 해결하는 것은 사실상 불가능하다. 앞으로 양자컴퓨터와 고전컴퓨터가 연계되게 되면, 수익 관리, 가격 설정, 비용 목표, 매출, 고객 관계 관리를 고려하여 동적으로 조정하면서도 기체 할당, 스케줄, 블록/게이트, 승무원, 연료를 한 번에 최적화할 수 있을 것이다.

9. 교통망 경로 최적화 서비스

독일 Volkswagen은 미국 Google 및 캐나다 D-Wave Systems과 협력하여 교통 혼잡을 줄이기 위해 이미 양자컴퓨팅을 실제 응용 프로그램에 통합하기 위한 작은 단계를 시작했다.[206] 교통 데이터는 스마트폰과 차량 내부의 송신기의 도움으로 수집되고, 이 데이터는 비양자 알고리즘으로 처리되어 특정 지역의 교통 밀도와 통신매체가 필요한 고객 수를 결정한다. 그 결과를 양자알고리즘으로 쉽게 처리

204) Tech Briefs (2022)
205) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
206) Future Bridge (2020)

하여 통신 사업자를 필요로 하는 고객 수 대비 사용 가능한 통신 사업자 수를 최적화할 수 있다. 택시 또는 대중교통 서비스 회사를 초점 영역으로 적절하게 안내하여 최적화를 수행할 수 있다. 양자컴퓨팅의 측면은 이러한 차량이 특정 초점 영역으로 안내될 수 있거나 특히 교통량이 많은 상황에서 함께 그 영역을 피하도록 암시될 수 있는 가까운 미래의 자율 차량에 매우 잘 적용될 수 있다. 교통 관리, 전기 자동차용 고성능 배터리 구조 최적화 및 새로운 기계학습 프로세스 개발은 앞으로 자동차 업계와 컴퓨팅 개발 업계의 협업의 핵심이 될 영역이다. 실용적인 응용 프로그램은 이미 테스트되었거나 베이징 및 바르셀로나와 같은 대도시에서 사용할 계획으로 알려져 있다.[207] 일본 Denso와 Toyota Tsusho는 2017년 캐나다 D-Wave Systems의 클라우드 기반 양자컴퓨터를 이용하여 태국에서 약 1,300,000대의 상용차에 대한 이동 시간, 차량 위치에 관한 교통 데이터를 평가할 것을 제안했다. 이 기술은 초기 단계에 있음에도 불구하고 기술 회사와 자동차업체는 교통 데이터 평가, 생산 및 물류 유통 등과 같은 일상적인 상황에 이를 통합할 계획을 이미 수립했다.

그림 Ⅴ-4-32 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역



※ FutureBridge (2020) 집필진 재구성

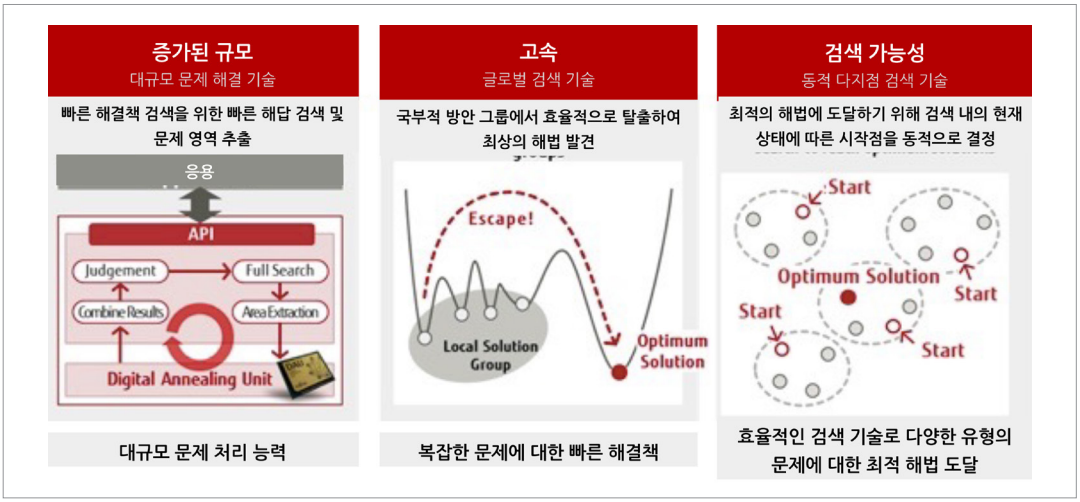
10. 자동차 생산 공급망 및 물류 네트워크 운영 서비스

일본 Fujitsu Limited와 Toyota Systems Corporation은 Fujitsu의 Quantum-Inspired Digital Annealer 컴퓨팅 솔루션을 활용한 공동 시험에서 자동차 생산을 지원하는 데 필수적인 공급망 및 물류 네트워크 운영 최적화를 성공적으로 시연했다.[208] 30분 이내에 기존에 알려지지 않았던 효과적인 유통경로를 발굴해 물류비를 약 2~5% 절감할 수 있는 최적의 경로를 계산해 적재효율을 높이고 운송비를 합리화하는 것이 가능하다. 유통 비용은 트럭 대수, 총 이동 거리, 포장 부품 분류 작업량 등의 변수를 기반으로 계산되었다. Fujitsu, Toyota Systems, Toyota Motor Corporation은 실제

207) Rafael Sotelo (2022)
208) Rafael Sotelo (2022)

공급망 및 물류 운영을 위해 솔루션을 상용화하는 것을 목표로 솔루션을 더욱 검증하고 개선할 예정이다. [그림 V-4-33]에 묘사한 것처럼 이 기술을 실제 작업에 적용하기 위해 Fujitsu Limited와 Fujitsu Laboratories이 이전에 개발한 대규모 문제 해결 기술을 통합하는 새로운 시스템이 개발되었으며, 국부적 방안에서 효율적으로 탈출하면서 가능한 다양한 해법을 검색하는 글로벌 검색 기술과 현재 검색 상태 및 중간 결과를 기반으로 검색 시작 지점을 동적으로 결정하는 동적 다지점 검색 기술로 확대하였다.

그림 V-4-33 일본 Fujitsu의 자동차 생산 지원 최적화



※ HPC wire (2020) 집필진 재구성

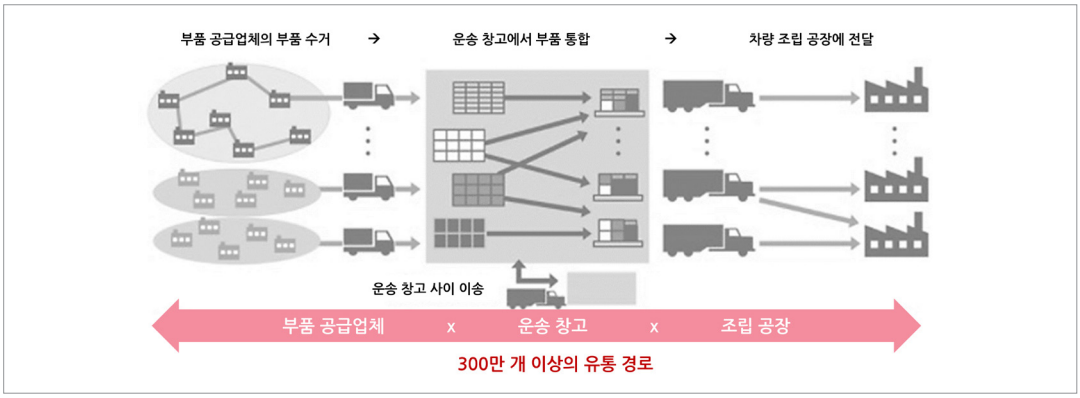
11. 물류자원 최적화 서비스

Ford는 NASA의 양자 인공지능 연구소와 협력하면서 Universities Space Research Association, NASA 및 Google이 공유하는 NASA의 양자어닐러를 사용하여 많은 차량의 자원과 에너지 활용을 최적화하고 있다.[209] 차량 대 경로 매핑을 기반으로 하는 기준에 초점을 맞춰 디젤 운송 차량인 경우로 설계하고, 디젤 엔진은 최적의 차량 성능과 환경 준수를 위해 추적해야 하는 필터로 구성된다. 필터 요소는 차량이 적절한 주행 주기를 가지고 있을 때 가장 좋은 방법으로 관리될 수 있다. 하지만 배달 차량이 하차해야 하는 여러 정거장이 있거나 엄청난 교통 상황에 직면하면 이 주행 주기가 중단된다. Ford는 정차하는 동안 차량이 따라야 하는 최적의 경로를 찾아 다른 여러 차량에 적용할 수 있다고 생각하여 여러 매개변수를 여러 차량에 누적하여 혼잡, 고장, 하차 및 픽업 시간, 위치, 고객 피드백 및 경험과 같은 복잡한 가능성 매트릭스를 작용하였다. 기존 컴퓨터는 제한된 수의 차량 및 기타 병렬 매개변수 측면에서 유용하나 매개변수가 증가함에 따라 기존 컴퓨팅은 적절함을 입증하기 어려워

209) Future Bridge (2020)

양자컴퓨팅을 활용하는 것이 적절하다. Ford는 이러한 문제를 큐비트로 인코딩하고 기존 컴퓨터에 비해 더 짧은 시간에 처리 가능한 양자컴퓨터를 사용하여 문제를 해결하려고 한다. 디지털 어닐러는 현재의 기존 컴퓨팅 기술로는 불가능한 속도로 복잡한 조합 최적화 문제를 해결하고 운송 트럭 수, 수십 개의 공장에 300만 개 이상의 배송 경로가 있는 부품 공급망 최적화 문제, 총 주행 거리 및 패키지 분류 작업을 포함한 변수를 신속하게 계산하는 데 사용되어 가장 비용 대비 효율적인 자동차 접근 방식을 결정하는 것을 돕는다.

그림 Ⅴ-4-34 디지털 어닐러를 이용한 물류 자원 최적화 프로세스



※ HPC wire (2020) 집필진 재구성

12. 도심항공 모빌리티 교통망 제어 서비스

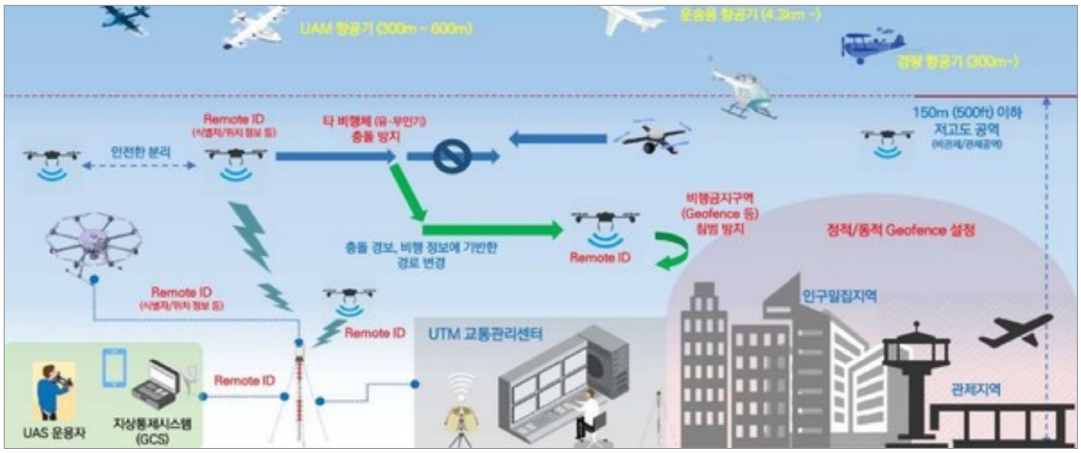
항공 택시와 같은 도시 항공 이동 차량에 대한 개발이 가속화됨에 따라 도심의 하늘을 날아다니는 자동차의 교통을 통제하는 문제가 부각되고 있다. 2030년대 후반에는 수많은 UAM과 드론이 비행할 것으로 예상되기 때문에, 무인교통관리(Unmanned Traffic Management, UTM) 시스템이 필요할 것이다.

일본 Sumitomo Corporation, Tohoku University 및 OneSky Systems는 2021년 양자컴퓨팅을 통해 수천 개의 도시 항공 이동 차량(Urbarn Air Mobility, UAM)용 비행 경로 개발을 위한 파일럿 프로그램을 시작하였다.[210] 2023년 한국 국토교통부와 기상청이 공동으로 진행하는'한국형 도심항공교통(K-UAM) 안전운용체계 핵심기술개발'사업은 도심항공교통체계 구축을 위한 기술개발과 인증체계를 마련하는 사업으로 2028년까지 2,997억 원이 투입된다.[211] KT는 2022년 10월 처음으로 UAM 전용 5G 항공망 구축을 완료하고 2023년부터는 위성통신과 양자암호통신 기술을 적용하여 통신 서비

210) M. Swayne (2021)
211) 이종현 (2023)

스 보안성과 신뢰성을 높이고 있다.[212] 향후 UAM 관련 산업은 더욱 가속화될 것으로 보이며 기존 항공에서 적용되는 교통망 통제가 더욱 가속화될 것이다.

그림 Ⅴ-4-35 UAM 교통체계 및 드론시스템



※ 국토교통부

212) 변윤재 (2022)

제8절 기타 산업

1. 인공지능 향상 서비스

인공지능(AI)은 이미 주류를 이루고 있는 신기술로, 여기에는 다양한 작업을 수행하기 위해 방대한 양의 지식을 기계에 가르치는 작업이 포함된다. AI는 의료, 전자 상거래, 교육, 금융, 보안 및 미디어 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 차세대 AI, 특히 Gen AI(Generative AI)의 결정적인 특징은 의사 결정을 내리고 새로운 정보를 동화하는 속도가 비교할 수 없을 만큼 빠르다는 것이다. 양자컴퓨팅은 통합으로 이러한 AI 시스템의 학습 곡선은 기하급수적으로 가속화될 것이다.[213] AI 개발은 기계학습을 위해 방대한 양의 데이터를 처리해야 하는데 이는 AI가 패턴을 인식하고 더 나은 결정을 내리는 데 도움이 된다. 고전 컴퓨팅이 제 역할을 하고 있지만 AI는 양자기술로부터 많은 이점을 얻을 것이다. 더 빠른 처리는 더 나은 AI 성능으로 이어질 수 있고 최종적으로 AI로부터 더 인간과 같은 반응을 초래할 수도 있을 것이다.[214] 양자컴퓨팅을 통해 AI를 크게 가속화한다는 궁극적인 목표를 향한 중요한 단계로 이것은 우리가 처음으로 이해하는 가상 비서 또는 극도로 사실적으로 행동하는 비 플레이어 제어 비디오 게임 캐릭터처럼 잠재적인 발전이 이루어지고 있다.[215] 양자 강화 딥 러닝은 신경망과 같은 기계학습에 사용되는 현재 알고리즘을 최적화할 수 있다. 기계학습 알고리즘은 일반적으로 최적화 문제로 간주될 수 있으며, 양자 기계는 양자 및 표준 처리를 모두 특징으로 하는 하이브리드 방법을 도입하여 해결가능하다.

2. 전력망 운영 서비스

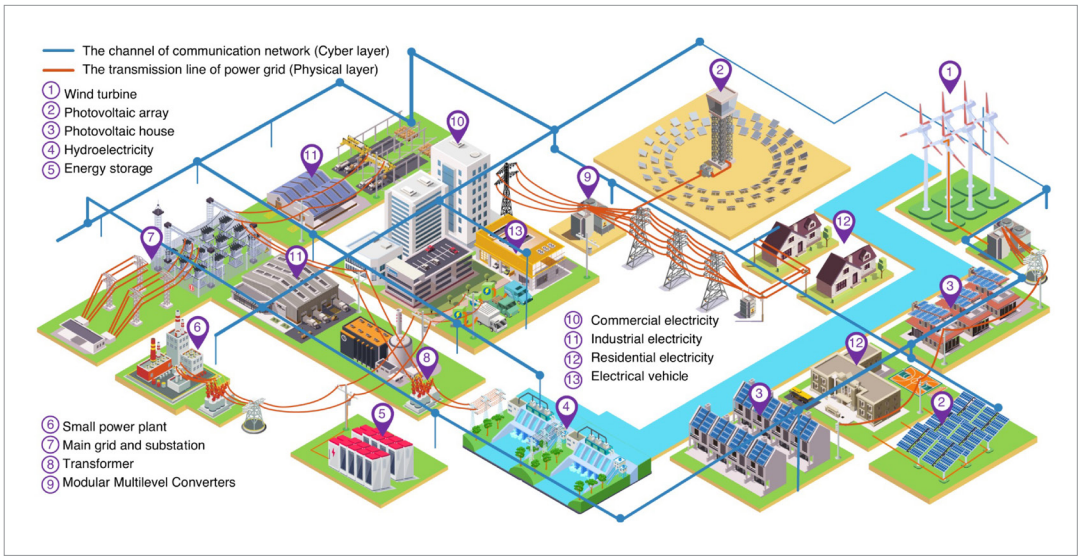
전력망은 선로, 변전소, 변압기 및 발전소에서 가정과 기업으로 전기를 전달하는 기타 구성 요소의 네트워크로써, 태양열 및 풍력 에너지원과 같은 재생 가능 에너지원이 증가함에 따라 변화하고 있다. 전력망에 꾸준히 전력을 공급하는 화석 및 원자력 발전소와 달리 재생 에너지원은 간헐적이며 태양이 비치거나 바람이 불 때만 전기를 공급한다. 실시간 의사 결정과 그리드의 안정적이고 효율적인 운영의 필요성이 요구되는 등 전력망 운영 요소가 점점 더 복잡해지고 있기에 양자컴퓨팅의 도움이 필요하다.[216]

213) Jimmy G. (2023)
214) Quantum Technology and Application Consortium (2021)
215) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)
216) Hari P. Paudel et al. (2022)

전력망 운영자는 예측 전력 수요를 충족하는 동시에 또 다른 제약 조건도 충족해야 하기에 총 운영 비용이 가장 낮도록 관리해야 하며, 이를 위해 최상의 전력 생성 장치를 지속해서 식별하고 배치해야 한다. 또한, 자연적 또는 인위적 사건으로 인한 정전에도 신속하게 대응해야 하며, 장비와 인력을 배치할 장소와 시기도 결정해야 하므로 실시간으로 수행되어야 한다. 이처럼 복잡한 계획 작업은 양자컴퓨팅을 통해 도움을 받을 수 있다.

미국 전력 회사인 Commonwealth Edison Company는 최근 전력 시스템 모델링 및 의사 결정을 위해 양자컴퓨팅을 도입했다. 전력 시스템의 양자 응용 프로그램 중 하나는 분산 에너지 자원 지배적 전력 시스템을 분석하는 것이다.[217] 이는 에너지 지속 가능성을 향한 우위를 모색하는 강력한 솔루션을 제공할 것으로 기대되고 있다. [그림 V-4-36]에서 보듯 물리 계측과 사이버 계층을 포함하는 전형적인 분산 에너지 자원 지배적 전력 시스템에 의해 활성화되고, 사이버 계층은 시스템 조정 및 제어를 위한 고급 측정 인프라 및 사물 인터넷 시스템을 통해 분산 에너지 자원 지배적 전력 시스템 간의 통신을 가능하게 할 것이다.

그림 V-4-36 사이버-물리적 전력 시스템



※ Hang Jing et al. (2023)

217) Hang Jing et al. (2023)

3. 에너지 분야 기타 서비스

열 교환기 네트워크 합성의 목표는 산업 플랜트의 에너지 소비를 줄이는 동시에 플랜트의 총 자본 비용을 최소화하는 것이다. 이를 위해서는 공정 중 가열하거나 냉각하기 위해 공정 흐름 사이 또는 공정 흐름과 유틸리티 흐름(예: 증기, 냉각수) 간에 에너지를 전달하기 위한 최적의 열교환기 네트워크를 결정해야 한다. 물류 및 일정에 있어서 ExxonMobil은 특정 시간 창에서 여러 항구에서 여러 고객에게 석유 제품을 공급하는 비용을 줄일 수 있는 해상 재고 라우팅 문제를 해결하기 위해서, 전력회사 Enel은 연간 3,200만개 이상의 일자리에 수만 명의 현장 근로자에게 파견되고 있어, 근무 시간 대비 근로자의 이동 시간을 줄이는 것을 목표로 파견 관리 속도를 높이는 방안을 검토하고 있다. 전력 회사는 가전제품, 온도 조절 장치, 조명 및 기타 장치를 원격으로 제어할 수 있도록 하여 주택 소유자의 편의와 비용 절감을 제공하는 스마트 홈에서 대량의 데이터에 액세스할 수 있도록, 양자컴퓨팅을 사용하여 이 데이터를 분석하고 운영을 개선할 수 있을 것이다. 마지막으로 유체 흐름 시뮬레이션은 정유에 사용되는 화학 반응기, 다양한 유체를 운반하는 파이프라인, 해양 시추 플랫폼 설계를 위한 해양 역학, 풍력 발전 단지의 기류와 같은 많은 에너지 응용 분야에서 중요하다. 예를 들어, Qubit Engineering은 풍력 발전 단지 개발자에게 최적화된 터빈 레이아웃 설계를 제공하고 풍차 로터 주변의 기류를 시뮬레이션하기 위해 Microsoft Azure Quantum을 사용하고 있다.[218)]

4. 지하 자원 탐색을 위한 시뮬레이션 서비스

미국이 세계 최고의 에너지 산출국이 된 방법인 미생물 또는 나노입자를 유전 저류층의 공극에 주입하는 방식인 나노 공극을 사용하는 비재래형 저류층 개발에서는 양자컴퓨팅이 저류층에서의 분자 수준의 물리 특성을 탐색할 수 있게 함으로써, 지하를 이해하고 저류층 시뮬레이션의 신세대를 개척할 수 있게 한다. 비재래형 저류층에서는 액체 석유가 가스 등의 침투율이 높은 성질인 것처럼 움직이는데 거기서는 단쇄의 탄화수소가 우선적으로 회수되며, 장쇄의 탄화수소는 뒤에 남는다. 양자컴퓨터를 활용하여 석유, 물, 가스의 분자와 암석 표면의 상호 작용을 분자 수준으로 모델링하는 것은 다르시 유동과 비다르시 유동의 차이를 낳는 물리 특성을 해명하는 데 도움이 될 뿐만 아니라 만약 해명된다면, 상당한 이익이 창출될 것이다. 예를 들어, 유정(油井)의 수를 10% 줄일 수 있으면, 비재래형 석유를 생산하는 미국의 상위 32개사의 온라인 현금 유통은 10억 달러의 순손실(2018년 1월~9월)에서 80억 달러의 흑자로 전환되게 될 것이다.[219)] 현재 BP, ExxonMobil 등 석유 메이저들이 IBM의 Q Network에 합류하여 지하 지질학에 대한 이해를 높일 양자컴퓨터를 개발했고, TotalEnergies 및 Shell도 분자 모델링 및 방출 완화를 연구하기 위해 양자컴퓨터를 검토하고 있다.[220)]

218) Hari P. Paudel et al. (2022)
219) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)
220) GlobalData energy (2023)

5. 날씨 예측 서비스

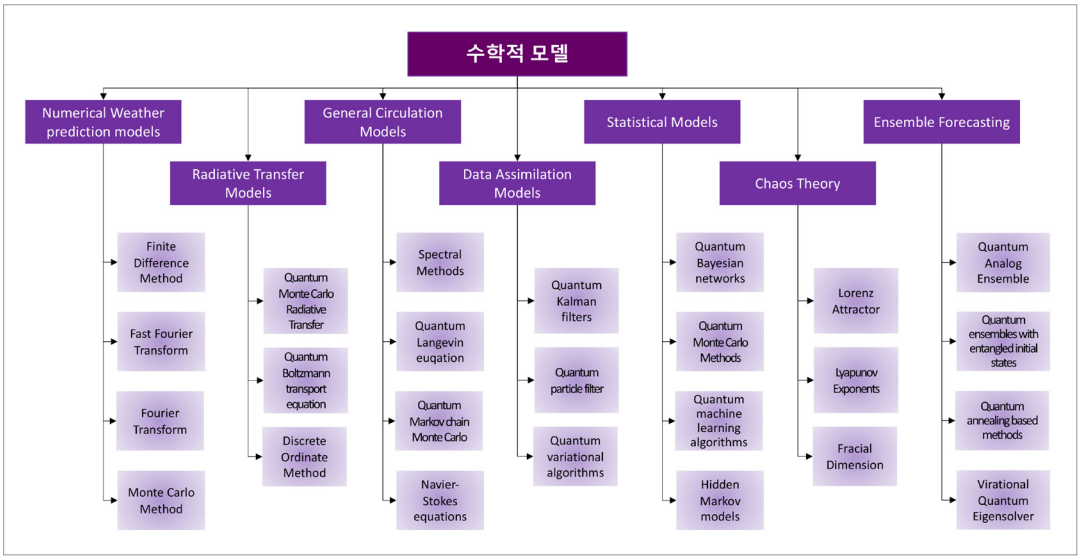
양자컴퓨터는 기후 변화 및 일기 예측 연구에 이바지할 높은 잠재력을 지니고 있다. 우선 병렬처리 기능을 통해 복잡한 기상 시스템의 시뮬레이션을 시행함으로써 활용될 수 있는데, 대기압, 온도, 습도 풍속 등 다양한 변수를 고려하는 기상 모델을 생성하여 미래 기상 패턴을 정확하게 예측할 수 있다. 양자컴퓨터에서 일기 예보를 위한 시뮬레이션에는 지구 대기를 설명하는 수학적 모델과 방정식을 양자상태 및 양자컴퓨터의 작동으로 인코딩하는 작업이 포함된다. 이를 위해서는 이러한 모델의 고전적 표현을 양자 표현으로 변환하고 대기의 물리적 프로세스와 상호 작용을 양자 알고리즘 및 양자 게이트에 매핑해야 한다. 그 후 양자 알고리즘은 양자컴퓨터에서 실행되며, 양자상태는 시간에 따라 진화하여 대기와 기후의 동작을 시뮬레이션한다. 이러한 시뮬레이션의 결과는 미래의 기후 추세와 날씨 패턴을 예측하는 데 사용될 수 있다. 하지만 시뮬레이션은 사용되는 수학적 모델과 방정식의 정확성, 사용된 특정 양자 알고리즘, 사용 가능한 양자 하드웨어에 따라 세부 사항이 달라질 수 있다.[221] 일기 예보를 위해 양자컴퓨터를 사용하면 정확성 증가, 효율성 향상, 더 나은 의사 결정, 고정밀 측정, 불확실성을 다룰 수 있을 것이다. 하지만 여전히 확장성, 노이즈와 오류, 표준화 부족, 비용 증가, 데이터 부족, 기존 인프라와의 통합과 같은 문제를 극복해야 한다.

IBM은 일기예보용 양자컴퓨터를 개발하고, Weather Company University Corporation for Atmospheric Research 및 National Center for Atmospheric Research와 합력하여 이전보다 5배 더 높은 해상도로 기상 현상을 예측할 수 있는 슈퍼컴퓨팅 기반 기상 모델을 개발하였다. Pasqal와 독일 Badische Anilin und Soda Fabrik는 양자 알고리즘을 사용하여 날씨 경향을 예측하고 기후 모델링을 시작하고 있으며, Rigetti Computing는 양자컴퓨터를 통해 하이브리드 양자 접근 방식을 사용하여 날씨 모델링 문제에 대한 솔루션을 개발하고 있다. 이는 극한 기상 현상에 대해 보다 진보되고 정확한 경고가 이루어지고 지역뿐만 아니라 더 큰 규모의 일기 예보에 도움이 될 수 있다. 1QBit는 대용량 데이터를 처리하면서 날씨를 추적하고 예측하는 등의 전통적인 방법을 개선하는 응용 프로그램 작업을 수행하고 있다.

221) Copperpod IP (2023)

일기 예보를 위한 양자컴퓨터 사용에 관한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 응용 프로그램의 타당성과 실용성을 입증하기 위해 더 많은 작업을 수행해야 하지만, 최근과 같은 극심한 기후 변화로 인한 피해와 인명을 구하기 위해서는 가속화가 필요한 분야이다.

그림 Ⅴ-4-37 일기예보 분야의 양자컴퓨팅을 위한 수학적 모델



※ Copperpod IP (2023) 집필진 재구성

제5장
산업화 모델 시사점

양자기술의 발전은 앞으로 많은 변화를 가져올 것이다. 화학 물리 분야에서는 원자-분자 간의 새로운 과학적인 현상을 규명해 줄 수 있는 도구가 되어줄 것이다.[222] 나노소재, 미세구조의 시뮬레이션을 통해 새로운 소재를 발견해 낼 수 있을 뿐만 아니라, 분자구조의 정확한 모델링을 통해 수년이 소요되는 의약산업의 경제적 비용을 앞당겨 줄 수 있다. 정보보호와 국방 등 암호해독 분야에 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 금융, 교통 등에 이르기까지 복잡하면서도 월등한 연산 속도를 필요로 하는 다양한 산업 분야에 걸쳐 혁신을 가져올 것으로 기대된다. 특히 바이오·생명공학 분야에서 3차원으로 접힘 형태를 지니고 있는 단백질과 유전자 구조를 정확하게 예측하고 분석하여 신약개발, 유전자 질환 치료 등이 가속화되게 될 것이다. 또한 계산의 범주가 조합론에 한정되어 최적화된 배열을 찾는 복잡한 교통, 물류 분야에서도 양자컴퓨팅 기술 도입은 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 그런데 양자컴퓨터의 시대는 곧 열릴 수 있을까? 현실 세계의 중요한 특정 문제들을 해결하는 수준으로 발전하기 위해서는 적게는 수백 개에서 수만 개 큐비트 수준의 양자컴퓨터가 필요할 것으로 보이는데, 앞으로 10년 혹은 그 이상의 시간이 더 필요할 것이라고 전망한다. IBM은 2023년도 말을 목표로 1,000 큐비트 개발을 예고하고 있으며, Google, Microsoft 등의 기업들도 10년 이내 개발을 목표로 하고 있다. 물론 10년 후에도 여전히 양자오류정정, 유용한 양자알고리듬 개발 등 아직 넘어야할 산이 여전히 많이 남아있을 수도 있다.

수십 큐비트의 양자컴퓨터 시스템이 실현되면서 우리는 현재까지 모사할 수 없던 미지의 영역으로 한 발자국 내딛게 되었다. 향후 대규모 양자컴퓨터가 구현이 된다면 강력한 사회·경제적 파급효과가 있을 것이며, 현재 단계의 중규모 큐비트 시스템의 구현과 이를 바탕으로 한 풀 스택 양자컴퓨터의 구현은 이를 대비하여 중요한 기술적·경험적 토대가 될 것이다. 아직 대규모 양자컴퓨터를 구현하기 위한 확고한 기술적 로드맵이 없음을 고려할 때 개방된 테스트베드를 보유하고 양자컴퓨터 시스템에 대한 도전적이고 기초적인 연구를 수행할 수 있는 환경을 구축하는 것은 매우 중요하고 유의미하다 할 수 있다. 또한 이러한 테스트베드 운영을 통해서 기존 컴퓨팅 연구자들이나 공학자들이 양자컴퓨팅 커뮤니티에서 공동연구를 할 수 있는 기반을 만들 수도 있을 것이다. 현재 해외 기업들은 각자의 개발 로드맵을 가지고 양자컴퓨터 개발에 박차를 가하고 있다. 물론 가장 핵심적인 기술은 고품질의 큐비트를 많이 확보하는 것이겠지만 큐비트 수와 함께 풀 스택 양자컴퓨터의 다른 요소들을 확장하는데도 많은 노력이 필요할 것으로 예상된다. 실제 기업들의 로드맵들을 잘 살펴보면 흥미롭게도 이러한 이슈들에 대한 언급 및 계획이 포함되어 있는 경우가 많다. 기술 성숙도가 높은 플랫폼 시스템 통합을 위한 다학적 협력 연구에 집중적인 투자를 하면서 동시에 새로운 큐비트 플랫폼 연구와 같은 도전적인 기초연구들에도 폭넓게 투자를 하여 좋은 양자정보연구 환경을 만들어 나간다면 국내에서도 훌륭한 성과들을 많이 얻을 수 있을 것이다.[223]

222) 김용수 (2021)

223) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

최근 양자기술 전반에 관한 관심이 급증하며 세계 주요국 및 국내에서도 양자기술에 대한 투자와 기술개발에 집중하고 있는 추세이다. 양자기술은 무기체계에서 창과 방패로 모두 사용될 수 있다. 초고속 양자컴퓨터에 의한 사이버 공격, 양자레이다에 의한 스텔스 표적 탐지, 양자센싱에 의한 초고감도 표적식별 등이 일례이다. 양자 무기 전력화는 아직까지 각 기술별로 많은 장벽과 한계가 있다. 그러나 양자 무기는 기술 혁신성으로 인해 미래 전장의 패러다임을 바꿀 와해적이고 파괴적인 신무기가 될 것이라 확신되고 있다. 따라서, 국방 선진국들은 양자무기 핵심기술 확보와 체계개발을 위해 열을 올리고 있다. 우리는 양자기술의 혁신성을 무기체계에 어떻게 적용할 것인가 고민하고, 양자 원천기술을 융합하여 미래 전장의 주역이 될 수 있는 신개념 양자 무기체계를 개발하여야 할 것이다. 이를 위해서는 민·군을 막론하고 국내외 관련기술 공동연구 및 정부/기관 간 상호 협업이 무엇보다 중요하다 할 것이다. 우리나라가 디지털정보기술 분야에서 세계적으로 우위에 있지만, 양자컴퓨터와 양자암호 실험연구에서는 다른 선진국에 비해 많이 뒤진 것이 사실이다. 그렇지만 양자컴퓨터와 양자암호 기술이 아직 세계적으로도 충분한 수준에 이르지 못한 데다, 양자센서는 양자컴퓨터와 양자암호를 위한 요소 기술이고 우리나라가 앞서 나갈 수 있는 여지도 있어 좋은 기회가 열리고 있다.[224)]

미래의 게임 체인저가 해결해야 할 과제들에 대해 전문가들은 양자컴퓨터가 소인수분해, 대량 데이터 탐색, 최적경로 예측 등 동시다발적으로 발생되는 정보의 처리가 요구되는 복잡한 계산과 데이터 처리에 강점이 있는 만큼 다양한 산업 분야에서 게임 체인저, 즉 시장의 흐름을 통째로 바꾸거나 판도를 뒤집어 놓을 만한 결정적인 역할을 할 것으로 예측된다. 양자기술의 산업계 적용은 우리가 생각하는 것 이상으로 다양하며, 아직도 개발되지 않은 분야가 무궁무진하다. 미국과 유럽이 미개척 분야를 개척하기 위해, 그리고 시장이 확장될 가능성이 매우 높다고 판단하기 때문에, 그 시장을 선점할 수 있도록 다양한 응용 분야를 발굴하여 개발하는 것이 필요하다.

이제 한국도 기술 선도국과의 격차를 줄여야할 시기가 되었다. 우리나라는 수십 년 이상 꾸준히 투자해온 선도국에 비해 기술 수준이나 연구개발비 규모 면에서나 극복해야할 장벽이 많다. 기술 개발에 난이도가 큰 만큼 정부 차원에서 국가의 미래를 좌우할 핵심기술로 인식하고 긴 안목에서의 지속적인 투자와 종합적인 청사진 설계가 필요하다. 양자 분야의 기초 연구에서부터 응용, 개발 연구에 이르기까지 일관성 있는 중장기 전략이 필요하며, 무엇보다도 국내외 협력기반을 구축하여 다학제 융합연구에 힘써 앞으로의 10~20년 뒤를 대비해야 한다. 출연(연)을 중심으로 대학과 산업계가 참여하는 협업 생태계를 구축하고, 그 어느 때 보다도 협력의 리더십을 발휘하여 학문적 난제뿐만 아니라 인류 공통의 문제를 해결해야 한다.

224) 한국경제 (2021)

양자시대에는 아직 압도적 기술 우위로 기득권을 가진 선발주자가 없다. 양자기술은 미래 기술 패권을 정할 게임 체인저 기술로 세계 각국과 글로벌 기술이 각축전을 벌이고 있어 한국도 시급한 대책 마련이 필요한 상황이다. [그림 V-5-2][225]에 기술한 것처럼, 양자기술 분야는 매우 다양한 기술을 활용하고 있으며 확장가능성이 무궁무진 할뿐만 아니라, 위에서 언급한 것과 같이 다양한 사업서비스 분야를 발굴할 수 있는 가능성도 다양하다고 할 수 있다. 이미 많은 국가와 기업들이 이러한 가능성을 파악하여 의료, 금융 및 교통과 더불어, 보안과 안보 분야에서 주요 활성화되었던 통신 분야도 점점 교통 및 의료와 접목한 사업군을 속속들이 발굴하고 있다. 하지만 아직 독점 기업이 나타나지 않은 것으로 보인다. 즉 아직 추격의 기회는 열려 있으므로, 한국이 보유하고 있는 ICT 인프라 및 역량이나 반도체 제조 분야와 같은 기존 강점을 살릴 수 있는 비교 우위점을 찾아 전략을 세우는 것도 향후 산업경쟁력의 미래를 결정하는데 중요한 역할을 할 것이다. 한국 정부는 2035년까지 양자기술에 3조 원 이상을 투자해 국내 기술 수준을 선도국 대비 85%까지 끌어올리겠다고 밝혔다.[226] 또한 양자 분야 종사자를 확보하고 공급·수요 기업도 1,200개 규모로 육성하는 등 기술개발과 생태계 육성을 병행할 계획이다.

현재 양자 기술 주요 분야는 연산, 통신, 계측 등으로 우리 기술로 양자컴퓨터를 개발하고(연산), 양자 인터넷 강국으로 나아가며(통신), 세계 최고 수준의 양자센서(계측)로 시장을 선점한다는 계획을 세우고 있다.[227] 우선 2031년까지 1000큐비트급 양자컴퓨터를 우리 힘으로 개발해 2035년 상용화할 방침이다. 고성능 양자컴퓨터 개발을 위해 반도체 역량을 적극 활용하고, 민간 주도로 주문형 생산 시설(양자 파운드리)도 별도로 구축할 계획이다. 기술 수준이 비교적 높은 양자통신 분야에선 도시 간 양자네트워크를 구축하고자 한다. 통신 거리를 100㎞대로 구현하고 이 구간에 양자암호통신을 적용하는 등 양자암호통신 전국망을 구축할 예정이다. 이 밖에도 관성, 시간, 전자기장, 광학 등을 계측하는 양자센서 원천기술을 개발해 각 산업군에 적용할 계획이다. 이를 위해서 양자의 물리적 원리와 현상을 이해하고 이를 산업에 적용할 수 있는 핵심 인력을 2035년까지 현재 384명에서 2,500명으로 늘리고, 실제 산업 현장에서 양자 시스템을 구현하는 양자 엔지니어도 1만 명을 육성해 생태계를 꾸릴 계획이다. 한국이 아직 강국과 비교해 기술이 아직 뒤처져 있지만 이러한 계획 등을 통해 향후 다양한 분야에서 양자기술을 충분히 이끌어갈 수 있을 것으로 기대하고 있다.

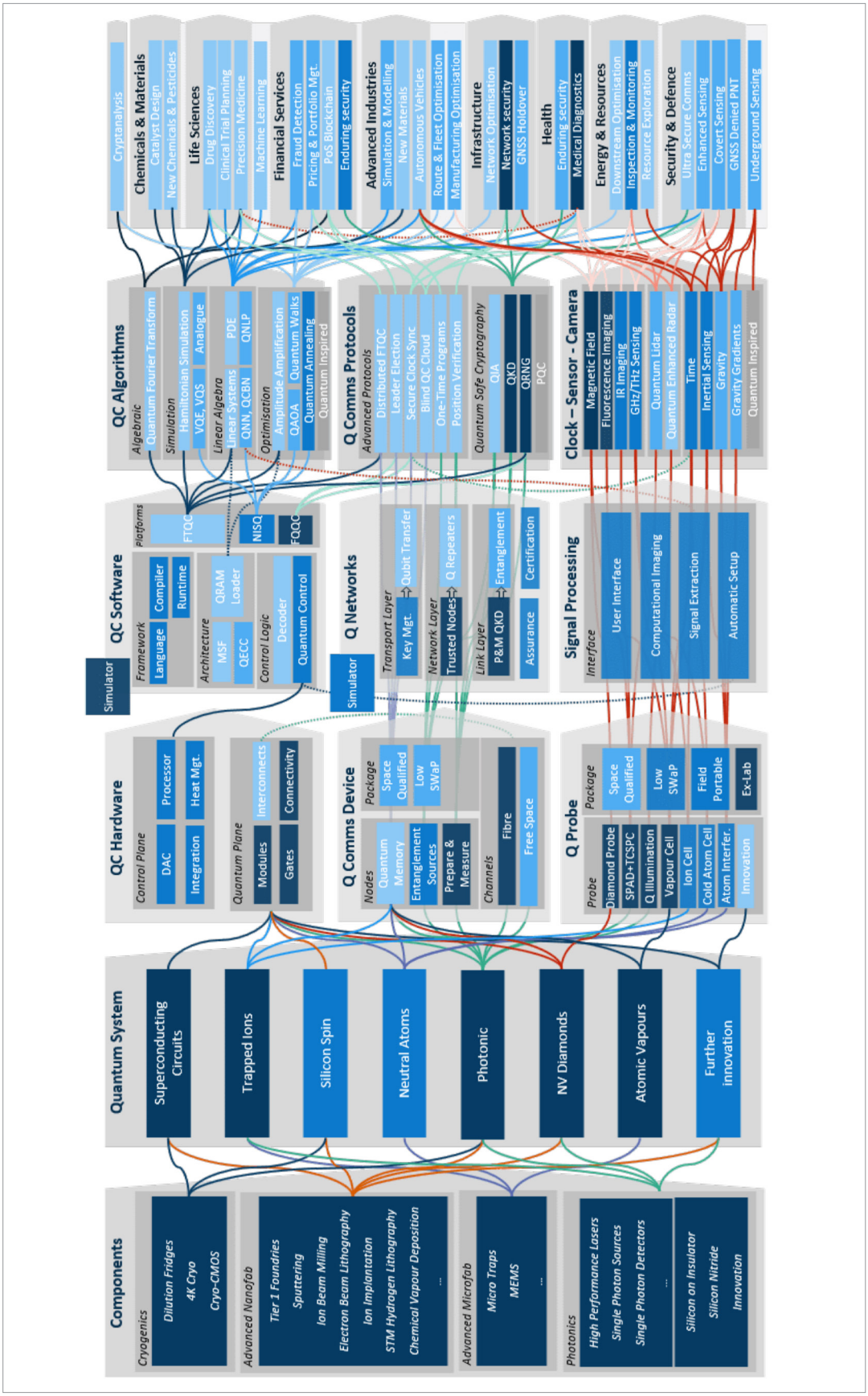
225) David Shaw (2022)
226) 최소라 (2023)
227) 이상우 (2023)

그림 Ⅴ-5-1 양자기술이 가져올 미래상



※ 과학기술정보통신부 (2021)

그림 V-5-2 양자 가치 사슬



※ David Shaw (2022)

참고문헌

• 국내문헌

1	가스신문 (2021.01.05.). 광센싱 기반 가스센싱 시스템은 광범위한 지역 배관 및 탱크 누출 쉽게 확인
2	고광본(2018.03.21.). 서울경제, '950g 헬멧' 뇌자기장 신호장치 개발...자폐 진단 쉬어져
3	과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼 (2022), 2022 양자정보기술 백서
4	구현모 (2020.2.25.). KOTRA, 미래사회의 게임 체인저 '양자 컴퓨터'
5	김봉수 (2021.06), 아시아경제, 퀀텀레이저로 자율주행차 라이다 성능 대폭 개선 가능
6	김봉수 (2021.11.22.), 아시아경제, 韓 연구진, 세계에서 가장 정밀한 '퀀텀 자이로스코프' 개발
7	김봉수 (2022.04.05.), 아시아경제, 나만의 '초능력' AI 비서…양자인터넷 시대가 온다[과학을읽다]
8	김봉수 (2023.06), 아시아경제, 차세대 광반도체 성능 100배 높이는 기술 개발
9	김상범 (2023.06.29.), 경향신문, 포스코, 양자컴퓨터 기술 개발…“2차전지 소재 개발에 사용”
10	김소연 외 (2021). 국방과학연구소, 양자기술과 미래 무기체계 발전전망, 2021년 한국산학기술학회 추계 학술발표논문집
11	김영명 (2023.06.30.), 보안뉴스, 이와이엘, 국정원 암호모듈 검증 KCMVP 획득. ‘Quantum Shieldz’로 론칭
12	김용수 (2021.11.10.). The Science Times, 양자혁명 2.0 시대의 예고 : 양자기술과 양자컴퓨터
13	김인한 (2022.09.28.), 머니투데이, 숨은 천재들이 일냈다...美도 안 주는 '자이로스코프' 기술 독자개발
14	김재형 (2022), 동아일보, 현대車, 양자컴퓨터로 차세대 배터리 개발 나선다
15	김지민 (2017.09), 머니투데이, IP카메라 해킹 피해 예방하려면…"비밀번호만 바꿔도 위협 낮춘다"
16	김진원 (2023.05.10.), 한국경제, 핵 어뢰 탐지, 도·감청 봉쇄…양자기술이 전쟁 판도 바꾼다
17	노신영 (2021.02.02.), BioSpectator, 로슈, CQC와 ‘양자 컴퓨팅’ AD 신약개발 파트너십
18	동아사이언스 (2018.01.20.).중 국, 베이징서 7600㎞ 거리 비엔나까지 무선 양자통신 성공
19	박귀철 (2023.05), 가스신문, ㈜퀀텀센싱, 양자기술 이용 가스안전기기 개발 가속도
20	박남수 (2021.08.06.). 정보통신신문, 양자정보통신 동향과 정보통신공사업 전망
21	박병권, 한상욱 (2022.08). 전기 전자와 첨단 소재, 양자 키 분배 시스템 기술개발 동향. Vol.33, No.4
22	박재희 (2021.07.13.). 옥스드론, 드론용 양자 암호화 모듈을 공급하는 ㈜케이씨에스
23	변윤재 (2022.10), 데일리임팩트, KT, UAM 전용 5G 항공망 구축 완료…국내 최초
24	삼정 KPMG 경제연구원 (2017.11). 양자정보통신, ICP의 새로운 미래
25	서일 (2021.01.13.) BioSpectator, 베링거, 구글과 ‘양자 컴퓨팅’ 신약개발 파트너십
26	서정윤 (2022.07.01.). ZD Net Korea, 과기정통부, 양자암호통신 인프라 구축사업 성과 공개
27	신동윤 (2023.09) 퀀텀, 하이브리드 클라우드에 최적화된 엔드투에드 비정현 데이터 플랫폼 발표, GTT Korea
28	아더킹(2022.03.01), 양자물리학의 원리로 지하에 파묻힌 구조물을 매핑하는 "양자중력구배선" 실험 성공
29	오다인 (2020.01.13.), 전자신문, 이와이엘, 美 공군 드론에 '초소형 암호칩' 공급
30	윤소영 (2022.02.25.). BioSpectator, 팸캐드, 큐노바와 양자컴퓨팅 기반 신약개발 MOU

31	이상우 (2023.06.27.), 아주 경제, '게임 체인저' 양자기술에 3조 투자... 1000큐비트 컴퓨터 우리 손으로
32	이석원 (2023.06), Tech Recipe, GPS 없이 정확한 전세계 선박 위치를
33	이순호 (2022.04.14.). K헬스코리아뉴스, 신약개발도 AI 전성시대 … 양자역학 더해져 정확성·속도 '업그레이드'
34	이정현 미디어연구소 (2023.05.23.), ZDNET Korea, 빌 게이츠 "AI, 구글·아마존 대신할 수도 있다"
35	이종현 (203.04), 조선일보, 1000큐비트급 양자컴퓨터·K-UAM 운용체계 개발 사업, 예타 착수
36	이혁성 (2019), Korea Contents Association, 양자컴퓨터 기술 동향 및 산업 응용, 17(2), 25-28
37	전승현 (2022.10.06.), 데일리팜, 제약, 디지털헬스케어에 꽂히다...새 먹거리 발굴 총력
38	전찬민 (2021.06), 공학저널, 건설현장 지형·공간 정보, 양자라이다로 '정밀 분석'
39	정보통신기획평가원 (2020.12.16.). ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자
40	정예린 (2021.05.10.), 전자신문, 양자암호 100㎞까지 전송…SKT·KT 장비 호환
41	정현 (2022.02.17.).위즈뉴스, KIST, 신소재-신약 개발 앞당길 '실용적 양자컴퓨터' 구현
42	정훈, 이헌규 (2015), 우정경영연구소, 드론을 이용한 물류서비스 추진 방향
43	조성선 (2018.02). 정보통신기술진흥센터, 양자컴퓨터 개발 동향과 시사점
44	지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022.04). 미래 양자기술 동향과 생태계 분석 : 컴퓨팅/센서/양자암호·통신/양자점
45	지혁민 (2022.07.12.), Smart City Today, KAIST 뇌공학과 정재승 박사, 치안분야 '뇌파활용' 시범사업 참여
46	천선우 (2021.06.06.). 글로벌경제신문. LGU+, 양자내성암호로 공연 티켓팅 서비스 보안 강화한다
47	천승현 (2022.10), 데일리팜, 제약, 디지털헬스케어에 꽂히다...새 먹거리 발굴 총력
48	최광민 (2021.04.21.), 인공지능신문, 네이버클라우드, 클라우드 기반 정밀의료병원정보시스템 성공적 구축... 업계 최초 의료법과 개인정보보호법 모두 준수
49	최소라 (2023.07.01.), YTN, 미래 산업의 게임체인저...양자기술로 바뀌는 세상은?
50	최진승 (2023.06), 금융경제, KT, '퀀텀 코리아 2023'에 참가... '퀀텀 드론' 등 양자암호통신 서비스 소개
51	최태우 (2021.05.18.). IT Biz News, 이와이엘, 양자난수생성기-암호화 통합 초소형 단일칩 QCC 개발
52	하수지 (2022.12.05.), 헬스인 뉴스, 트루윈, 반도체 기술 이용한 '양자 분자 진단 기술 시장' 진출
53	한국경제 오피니언 (2021.01.13). [김재완의 21세기 양자혁명] 양자 센서와 하이젠베르크 한계
54	한국연구재단 보도자료 (2019.07.31.) 실험이 아닌 컴퓨터 계산으로 메탄에서 에틸렌 제조
55	한국지능정보사회진흥원 (2021), 양자산업 생태계 가치사슬 및 상용화 로드맵·산업화 모델
56	한세희 (2023.07), ZDNET Korea, 오리엔텀, "양자컴퓨터에서 활용 가능한 금융 플랫폼 개발"
57	허원도 (2012). 한국과학기술정보연구원, 초전도 양자간섭 디바이스의 의료분야 응용
58	홍경표 (2022.07.12.). 연합인포맥스, 한화시스템, KT와 손잡고 항공우주 양자함호 기술 공동개발
59	홍성일 (2023.06), The Guru, SK, 유럽 양자위성 프로젝트 공식 합류…IDQ, 이글-1 이니셔티브 참가
60	황응준 (2021.07.08.), HelloDD, [대덕, 대덕人⑨]'스퀴드 센서' 시작점 이용호 표준연 박사
61	BioSpectator (2021.06.01.). 바보밥 AI, Cryo-EM+양자역학 및 AI 기반 신약개발
62	David (2021.06.24.). The Science Monitor, 英 스타트업 "2023년 위성 양자키 전송"
63	David (2022.01.18.). the Science Monitor, 프랑스 양자기술 개발 20억 달러 투자, 국방혁신
64	David (2022.04.24). The science monitor, 수소 분자 양자센서 전환 시연

65	IRS Global (2022). 4차 산업혁명의 엔진, 양자기술 글로벌 혁신 기술 트랜드 및 향후 전망
66	KRISS (2022.03.31). 다이아몬드 양자센서로 자기장과 온도의 변화 동시에 감지한다
67	Poornima Apte (2023.08.25.), CIO Korea, 실용 사례 풍성, 금융 산업은 양자 컴퓨팅에 대비 중
68	SK 텔레콤 PR실 (2020.01), SK 텔레콤, SKT, 미래 자율주행의 눈 '차세대 단일 광자 라이다' 선보여

• 해외문헌

1	A. Maccarone et al. (2023.05), Optica, Quantum lidar prototpye acquires real time 3D images while fully submerged underwater
2	A. S. Boev et al. (2021), Science Report, Genome assembly using quantum and quantum-inspired annealing, 11
3	Akshay Iyer et al. (2022.01.14.) Frontiers in Immunology, CyTOF® for the Mass
4	Berenice Baker (2022.08), IOT world today, Bosch pioneers quantum digital twin initiative
5	Carlos Oliver, Vidisha Suman(2021.11.14) KEARNEY, Quantum computing: why you should care
6	Case Western Reserve University (2018), the daily, Microsoft partners with CWRU on quantum computing, magnetic resonance fingerprinting
7	Charles Q. Choi (2022), IEEE Spectrum, How quantum computers can make batteries better
8	Charlotte Hu (2023.05.01.), Popular science, How a quantum computer tackles a surprisingly difficult airport problem
9	D. Niraula et al. (2021), Science Report, Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: application to adaptive radiotherapy, 11
10	David Shaw (2022.03.), Fact based insight, Quantum valume chain : Overview
11	E. Scott et al. (2021), Adv. Quantum Technol., Quantum Sensing for Energy Applications: Review and Perspective, 2100049
12	Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022.02.19.). Paving the way towards 800Gbps Quantum-Secured Optical Channel Deployment in Mission-Critical Environments
13	Florian Budde et al. (2019.07.12.). McKinsey & Company, The next big things? Quantum computing's potential impact on chemicals
14	Future Bridge (2020.03.19.). Quantum Computing: A Key to Autonomous Vehicle Industry Success
15	GlobalData energy (2023.08), Offshore Technology, Oil and gas leaders exploring quantum computing technology
16	GQI (2023.08.03.), Quantum computing report, Quantinuum Partners with BMW and Airbus to Model Hydrogen Fuel Cell Membranes
17	Hamilton et al. (2019.10.), 70th International Astronautical Congress (IAC), Overview of NASA's National Space Quantum Laboratory Program
18	Hang Jing et al. (2023), Communications Engineering, Data-driven quantum approximate optimization algorithm for power systems, 2(12)

19	Hari P. Paudel et al. (2022.01.25.). ACS Engineering, Quantum Computing and Simulations for Energy Applications: Review and Perspective
20	Hawaiian Volcano Observatory (2022.03.17.), usgs.gov, Volcano watch-New instrument with new potential : the absolute quantum gravimeter
21	Ian G. (2021.01.05.) Why we need quantum digital twins, https://www.linkedin.com/pulse/why-we- need-quantum-digital-twins-ian-gordon/
22	IonQ (2023.03.03.), IonQ homepage, Improving Battery Chemistry with Quantum Computing
23	Itay Lidovski (2023.02.07.), CPO magazine, How Quantum Computing Could Affect the Automotive Landscape
24	James Dargan (2023.05.09.), The quantum insider, 73 Quantum Computing Startups Challenging Industry Leaders
25	Jing Ruan et al. (2018,10), ACS Appl. Mater. Interfaces, Graphene Quantum Dots for Radiotherapy
26	Katherine Schauer (2023.06), NASA, NASA's Laser Communications Relay: A Year of Experimentation
27	Katrin Granel (2022.03.09.). IBM Blog, Flying into Quantum – a Game Changer for Airlines?
28	Koh Young (2017.05.08.). A quantum leap towards the factory of the future
29	Kosala Herath et al. (2023.08.29.), phys.org, Quantum-enhanced detection for chip-scale wireless communications
30	Laura Boehringer (2023.08.14.), Huntsville Business journal, Davidson and D-Wave bring quantum computing to missile defense scenarios
31	Lauren Saccone (2020.03.25.), Incompliance, Quantum Sensor Could Help Soldiers Communicate Over Entire Radio Frequency Spectrum
32	Lisa Zyga (2016.09.01.). Proposed quantum nano-MARI could generate imgages with angstrom-level resolution
33	Manish Kumar Jha (2023.06), Financialexpress, Quantum computing breakthrough heralds a new era of jet engine design
34	Marta Gilaberte Basset et al. (2019), Laser Photonics Rev., Perspectives for Applications of Quantum Imaging, 2019, 13, 1900097
35	Matt Swayne (2021.06) The quantum insider, Sumitomo Corporation And Partners Investigating Whether Quantum Computers Can Help Steer Air Taxi Traffic,
36	Michal Krelina (2021), EPJ Quantum Technology, Quantum technology for military applications, 8:24
37	Michal Krelina et al. (2023.02), The Journal of the JAPCC, Quantum Technology for Defence. What to Expect for the Air and Space Domains
38	Military Aerospace Electronics (2023.08.04.), Military Aerospace Electronics, Airbus, Quantinuum, and BMW collaborate on fuel cell research with quantum computers
39	New scientist (2023.07), Quantum lidar could help driverless vehicles spot bright objects
40	Nicole (2022.02.28.). Drug Discovery, A Deeper Dive into Near-Term Quantum & Applications
41	NIST (2012.01.24.), Quantum Computers, Cool Nano Loudspeakers Could Make for Better MRIs
42	Omnia Health (2023.06.15.), Omnia Health Cleveland Clinic and IBM's milestone will accelerate biomedical discoveries
43	Optics (2023.06) Quantum gas lidar monitors continuous methane emissions

44	Quantinuum (2023.05.30.), Quantinuum, HSBC and Quantinuum Explore Real World Use Cases of Quantum Computing in Financial Services
45	Quantum Technology and Application Consortium (2021), EPJ Quantum Technology, Industry quantum computing application
46	R. Geng et al. (2023), Nature Communications, Sub-micron spin-based magnetic field imaging with an organic light emitting diode, 14(1), Article 1.
47	Rafael Sotelo (2022.05.06.). Quantum-South, Air Cargo Load Optimization using Quantum Annealing on Amazon Braket
48	Raihan Ur Rasool et al. (2023. 02), Future Internet, Quantum computing for healthcare : A review, 15, 3
49	S. Wilkens et al. (2023), Quantum Inf Process, Quantum computing for financial risk measurement22, 51
50	Sarah Black et al. (2021.07.02). Natureprotocls, CODEX multiplexed tissue imaging with DNA-Conjugated antibodies
51	SDT Inc. (2022.05.31.), SDT Inc, Quantum Cryptography 101: 9 Applications in 2022.
52	Seyed Soheil Mansouri (2023.06), Technical University of Denmark, Quantum leaps towards smarter chemical manufacturing
53	Shitharth Selvarajan et al. (2023), Scientific reports, A quantum trust and consultative transaction-based blockchain cybersecurity model for healthcare systems, 13, 7107
54	Simon Jordan (2020.08.06), Why it's time to start turning quantum sensing theory into real-world commercial advantage
55	Steve Bush (2023.05), Electronics weekly, Royal Navy tests quantum navigation sensor from Imperial College
56	T. Joas et al. (2017), Nature Communications, Quantum sensing of weak radio-frequency signals by pulsed Mollow absorption spectroscopy, 8(964)
57	Tech Briefs (2022.07.01.). Enhancing Aircraft System Monitoring and Reducing Unscheduled Maintenance
58	Theresa Hitchens (2019.07.22.), Breaking Defense, Air Force Eyes New Deep Space Sensors in Australia, Spain
59	Tobias Stollenwerk et al. (2020.11.), IEEE Transactions on Quantum Engineering, Toward Quantum Gate-Model Heuristics for Real-World Planning Problems
60	Tracxn technologies limited (2023.08) Marketmap : Quantum computing
61	Wenhua Gao et al. (2021.04.14.), Security and Communication Networks, Quantum Election Protocol Based on Quantum Public Key Cryptosystem
62	Wisse Hettinga (2023.07), eeNews Smart 2.0, How quantum computer could help design airplanes

• 사이트

1	http://awslabs.github.io/quantum- computing-exploration-for-drug-discovery-on-aws/en/workshop/background
2	https://101 blockchains.com/blockchain-and-quantum-computing
3	https://aite-novarica.com/report/quantum-technology-and-insurance
4	https://copperpod.medium.com/quantum-computers-advancement-in-weather-forecasts-and- climate-change-mitigation-9b5471a56ba9
5	https://jimmysays.medium.com/quantum-computing-meets-ai-an-unprecedented-leap-forward-740fae7e7203
6	https://magnetics.pusan.ac.kr/magnetics/28890/subview.do
7	https://qpicloud.tech
8	https://quantum.az/en/about/what-is-quantum
9	https://www.linkedin.com/pulse/why-we- need- quantum-digital-twins-ian-gordon/
10	https://www.quantum-si.com
11	https://www.sussex.ac.uk /physics/iqt/rsearch/quantum-sensing-rf-and-microwave-detection/

VI 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 동향

제1장 **북미**

제2장 **유럽**

제3장 **기타 국가**

제1장
북미

제1절 개요

미국의 QED-C는 강력한 양자 기반 산업 및 관련 공급망을 활성화하고 성장시킨다는 사명을 갖고, NQI법에 근거하여 책임자인 NIST의 위탁을 받은 SRI International이 관리하는 산업 중심 연합체이다. QED-C는 미국 상무부 산하 국립표준기술연구소(NIST)와 부품 공급업체/제조업체, 소프트웨어 및 하드웨어 시스템을 포함한 양자분야 이해당사자 전반을 아우르는 단체로 150개 기업을 포함해 개발자, 서비스 제공업체 및 실사용자 등 200개 이상의 회원을 지원하고 있다. 캐나다 QIC는 양자컴퓨팅, 양자통신 및 암호화, 양자 감지 및 양자 안전 암호화 기술 개발자와 이러한 기술에 대한 응용 프로그램을 개발하는 회사를 포함하는 캐나다 양자 기술 회사의 컨소시엄이다. 두 컨소시엄은 2022년 대비 2023년 회원사가 증가하였고, 특히 미국의 경우 2022년 대비 2023년 111개 회원기관이 증가하였는데, 산업계의 경우 178개 기업으로 전년도 대비 44개의 회원사가 증가하였다. 반면 캐나다의 경우 전년도 대비 5개의 회원사가 증가하였다.

미국의 QED-C는 산업계 뿐만 아니라 학계, 연구소 및 정부 관련 기관 등 양자 관련 연구, 서비스, 기금을 지원하는 모든 기관을 회원기관으로 등록하고 있는 반면, 캐나다의 QIC는 산업계 위주로 구성되어 있으며 정부 기관이나 자금 지원 기관과 연계하고 별도의 회원기관으로 관리하지 않는 것이 특징이다.

2022년까지 QED-C의 회원사였던 Anyon는 현재 QIC의 회원사로 전환하였고, D-Wave, Ki3 Photonics, Xanadu, Zapata Computing는 2022년에 QED-C 회원사로 가입한 후 2023년에는 QIC의 회원사로도 등록했다.

북미는 양자시장이 가장 빠르게 발달하는 곳으로 지난 2년간 관련 기업이 급속히 증가하는 것으로 나타나고 있다. 캐나다는 미국에 비해 그 수가 적으나, 양자기술 전 분야에 걸쳐 고르게 산업군이 분포된 편이다. 두 나라를 합해 약 200개의 양자관련 기업이 활동하고 있으며 이 중 일부 스타트업은 이미 유니콘 기업으로 성장하고 있다. 양자기술 뿐만 아니라 양자시장의 확장도 가속화되고 있는 북미 시장을 보면 우리도 빠르게 이에 대응할 수 있도록 양자시장의 확보가 필요할 것으로 보인다.

제2절 미국 QED-C (Quantum Economic Development Consortium)

미국은 2018년 제정된 양자법(The National Quantum Initiative Act, NQIA)에 의거하여 미국 대통령은 국가양자조정실(National Quantum Coordination Office) 직속 양자연구정책 자문기구인 국립양자이니셔티브자문위원회(National Quantum Initiative Advisory Committee)를 설치했다. 이에 따라 미국 상무부(Department of Commerce)의 NIST(National Institute of Standards and Technology)는 비영리기구인 SRI International과 협정을 체결하여 QED-C(Quantum Economic Development Consortium, 양자경제개발컨소시엄)을 설립했고, QED-C는 과거 반도체 산업과 유사한 경로를 따라가며 양자산업 공급망을 활성화하고 있다.[1] 이 협의체의 역할은 산업, 학계 및 기타 관련 연구원을 모아 미국이 양자컴퓨팅을 포함한 양자분야에 국가적 우위를 확보할 수 있도록 강력한 양자기반 산업 및 관련 공급망을 지원하고 성장시키는 것이다. 미국 양자산업 조성에 관심이 있는 공공 및 민간단체로 구성된 QED-C는 시장과 실제 사례를 식별하고, 연구 모형, 표준제정과 양자인력 양성에 이바지하는 것이 목표이며, 이를 통해 정부는 기본 연구개발을 지원하고 산업계는 공급망 구축, 제조, 테스트 및 평가를 담당하는 효율적인 역할 분담을 구상하고 있다.[2] 2023년 9월 기준 178개의 기업을 포함한 총 289개의 기관이 QED-C에 참여하고 있다. 2022년 대비 해외 기관들의 참여가 늘었으며 한국도 SK텔레콤을 포함한 두 개의 기관이 회원기관으로 가입하였다.

QED-C는 다음과 같은 목표를 갖고 있다.

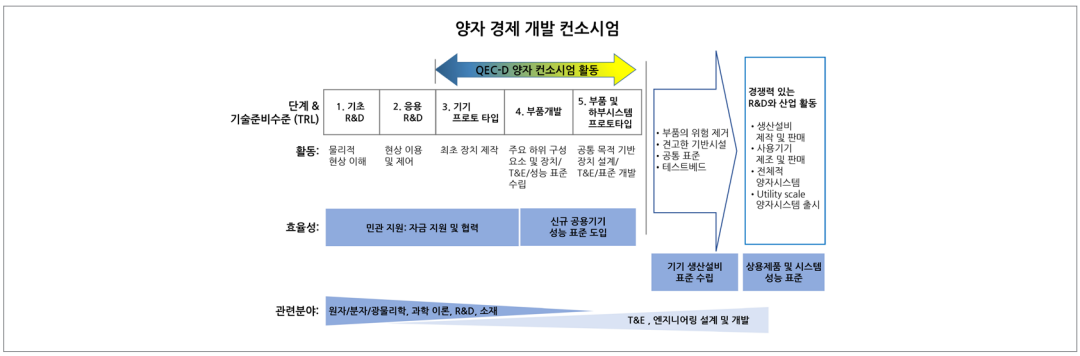
- 강력한 미국 양자생태계 및 양자산업 공급망 활성화 및 지원
- 연방 R&D 투자 우선순위, 표준 및 규정, 양자인력 교육 및 개발을 안내하고 정보를 제공하기 위해 총괄적인 업계 목소리 제공
- 정부 기관과 산업계의 파트너십 촉진 및 조정
- 지적 재산, 효율적인 공급망, 기술 예측 및 양자사용능력 공유 증진
- 양자기술의 잠재적인 경제적 영향 전달
- 양자기반 기술에 대한 영향력이 큰 사용 사례 및 응용 분야 식별
- 광범위한 응용 분야를 실현하기 위한 충족 가능한 기술, 표준 및 성능 측정 기준, 인력의 격차 식별
- 산업계, 학계 및 정부의 이해 관계자와 협력해 기술, 표준 및 인력 격차 메움

[그림 VI-1-1]은 양자정보과학기술의 현황과 QED-C의 목표를 보여준다. 양자컴퓨팅 장치 개발 기간은 5년이 걸리는데, 초기 3년은 목적에 맞는 장치를 고안, 1년간 데이터 생성, 이후 1년 동안은 데이터

1) 지식산업정보원 (2022)
2) David (2019)

분석이 필요하다.[3] QED-C는 목적에 맞는 장치를 고안하는 초기 3년을 3개월로 축소하는 것을 목표로 하고 있다. 미국의 양자장치 개발은 이미 엔지니어링 실용성 단계로 돌입하였으며, 감지, 통신 및 계산 분야에서 중간 규모의 양자컴퓨터(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ) 장치에 대한 확대 적용 기회가 탁월하기 때문에 이것을 상업적으로 확장하는 것이 목표 중 하나이다.

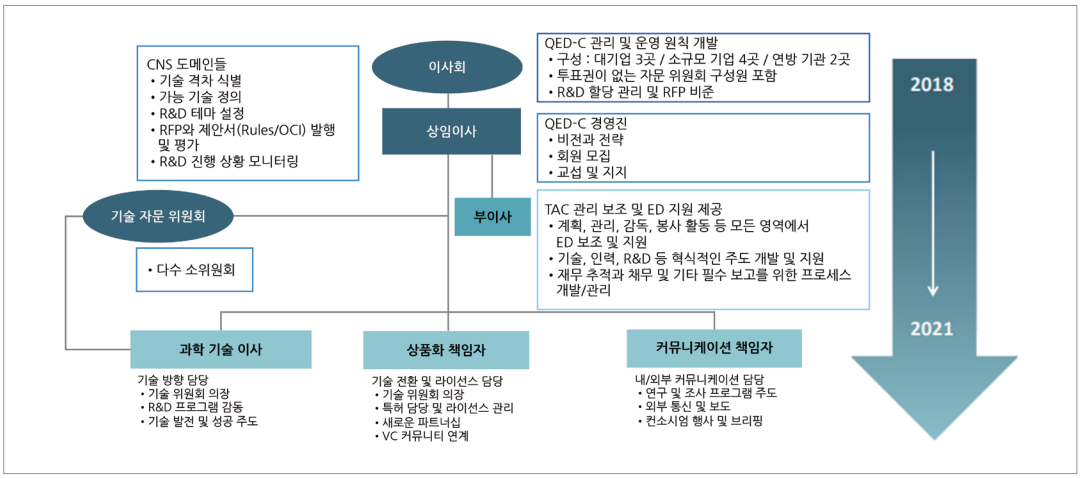
그림 Ⅵ-1-1 양자정보과학기술(QIST) 현황 및 QED-C 목표



※ The Science Monitor (2019)

이러한 목적을 돕는 QED-C 조직의 구조는 [그림 Ⅵ-1-2]와 같다.[4] 기술 분야, 상품화, 커뮤니케이션 책임자들을 각각 전문적인 역할로 실무를 담당할 수 있도록 하고 있으며, 지속적인 연구개발 모니터링을 지속함으로써 양자생태계 활성화를 조직적으로 지원하고 있다.

그림 Ⅵ-1-2 QED-C 조직도

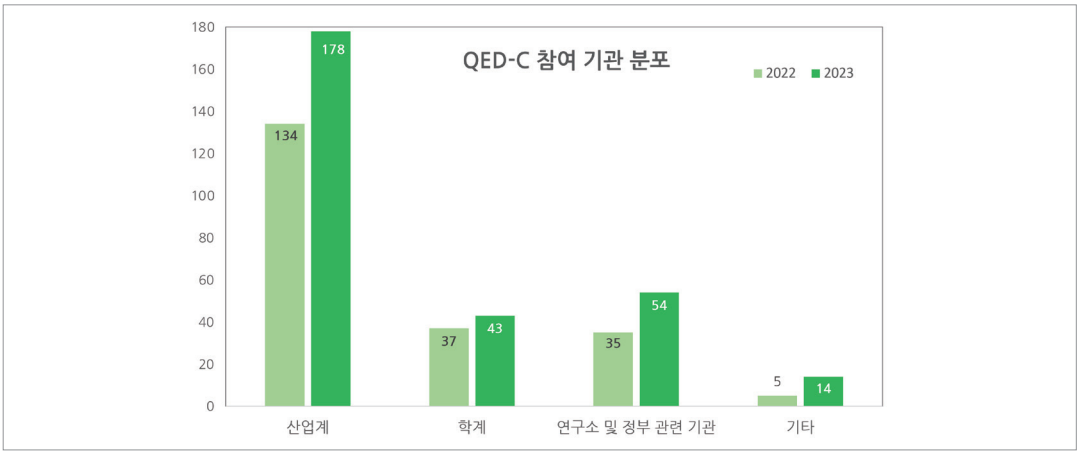


※ 2021 QEDC/SRI International (2021)

3) Susan (2019)
4) QEDC/SRI International (2021)

2022년 5월 기준 QED-C의 미국 내 회원 기관은 134개 기업, 37개 대학교, 35개 정부 관련 기관과 연구소로 확인된다. 2021년 기준으로 150여 개의 기업이 참여하고 있었으나, 현재 16개 기업은 확인되지 않으며, 대학의 경우 2021년 35개였다가 2022년에 두 곳이 증가해 37개 학교가 확인되고 있다. 그 외에 회원으로 오스트레일리아, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 일본, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 스웨덴, 영국 기업 및 파트너가 있으며, 최근 핀란드의 다수의 기업이 QED-C에 가입해, 미국 내 공급망을 확보하기 위해서 적극적으로 활동하고 있다.

그림 VI-1-3 QED-C 참여 기관 현황 (2022년 5월과 2023년 9월 비교)



2023년 9월 기준 QED-C의 미국 내 회원 기관은 현재 289개로, 178개 기업, 43개 대학교, 68개 정부 관련 기관과 연구소로 확인된다. 2022년 5월과 비교하였을 때, 전체 회원 기관은 약 37%로 44개 기업, 6개 대학교, 33개 정부 관련 기관과 연구소가 증가한 것으로 나타나고 있다. 그 외에 회원으로 가입한 국제 기업 및 파트너는 오스트레일리아, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 일본, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 스웨덴, 영국이 있으며, 핀란드의 다수의 기업이 QED-C에 가입해, 미국 내 공급망을 확보하기 위해서 적극적으로 활동하고 있다.

289개의 QED-C 회원 중에는 Google, IBM, Microsoft와 같은 대기업뿐만 아니라, Aliro Technologies, AlphaRail, Cosmic Microwave Technology, Novum-Industria, Triton Systems와 같은 벤처기업도 가입해 활동하고 있다. 벤처기업들은 주로 통신 및 네트워크 분야 또는 양자컴퓨팅과 같은 응용 분야나 소프트웨어 분야에 진출해 있으며, 연구개발이나 서비스 플랫폼을 주로 제공하고 있다. 양자컴퓨팅은 Google, IBM, Microsoft, Honeywell, Rigetti, IonQ, Quantum Circuits 및 Infleqtion(구 ColdQuanta)와 같은 기존 기업뿐만 아니라 신생 기업 모두에서 활발하게 추진되고 있으며 연간 총투자액은 수억 달러라고 알려졌다. 한편 QED-C는 전체 양자공급망을 확인할

수 있고 양자기술의 광범위한 영역에서 실제 양자제품을 제공하는 양자시장(Quantum Marketplace)을 운영하고 있다.[5] 이를 통해 회원사 및 참여 구성원들의 기술과 가능성에 대한 정보를 새로운 고객에게 제공하고, 양자기반 제품 개발에 필요한 고객과 공급업체 간 상호 정보를 확인할 수 있게 돕고 있다. 양자시장은 [그림 Ⅵ-1-4]와 같이 응용/시스템, 하드웨어, 서비스, 소프트웨어, 실수요자, 기타 등 6개의 대분류로 구분하고, 각 대분류는 다시 소분류로 나눠 관련 기업의 수를 표기했다. 2023년 9월 기준 회원 기업 289개 중 양자시장에 보유 기술 및 서비스를 공개한 기업은 74개로 확인되며, 2022년 6월 대비 총 11개 기업이 증가하였다. 양자시장에서 일부 기업은 빠져 있고, 새롭게 진입한 기업도 있지만, 전체적으로 주요 기업들은 시장에 공급을 지속하고 있는 것으로 보인다. 새롭게 진입한 15개 기업은 Bluefors, Global Quantum Intelligence, Hamamatsu Corporation, HKA Marketing, Kyocera Corporation, memQ, Modulight, Pasqal, Qruise, QTI s.r.l., Quantum Microwave, Quaxys, SandboxAQ, Strangeworks, Xanadu이고, 양자시장에서 빠진 11개 기업으로는 Anyon, AT&T, GE Research, JTEC Consulting, Montana Instruments, Pivotport, Q-Sensorix, QuantOpticon, Quantum Computing Report, StrategicQC, Thorlabs가 있다. 2022년 대비 가장 눈에 띄게 증가한 시장은 소프트웨어로 18개 기업에서 27개 기업으로 증가하였고, 다른 분야도 고르게 증가하거나 유지하는 경향을 나타내고 있다.

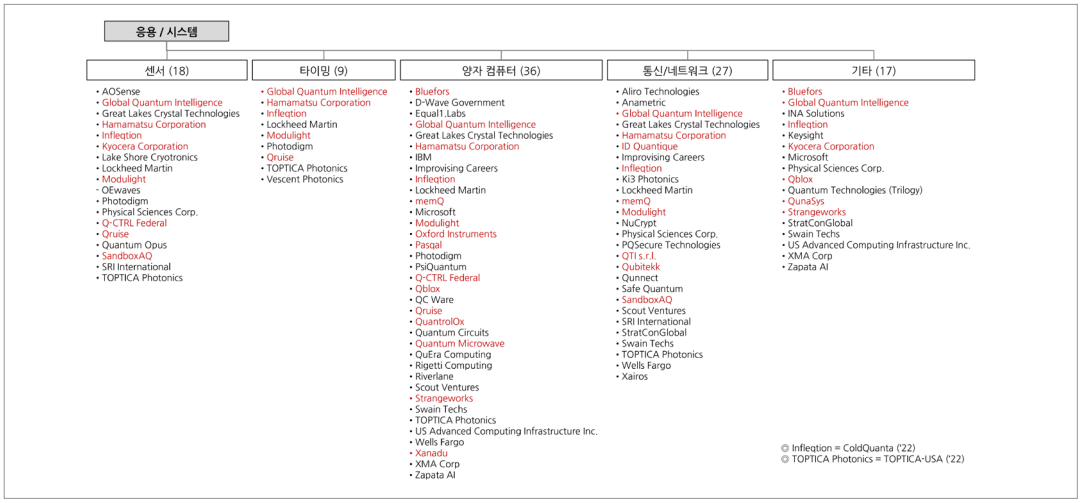
그림 Ⅵ-1-4 QED-C 양자시장 대분류 및 소분류 (2023년 9월 기준)



각각의 소분류별로 포함되는 기업들은 [그림 Ⅵ-1-5]부터 [그림 Ⅵ-1-8]까지 자세히 표시했다. 먼저 응용/시스템 분야는 센서, 타이밍, 양자컴퓨터, 통신/네트워크 및 기타로 분류하였다. 붉은색으로 표시한 것이 2023년에 새롭게 각 소분류 분야에 진입한 기업들이며, 모든 분야에 대해 동일하게 나타내었다.

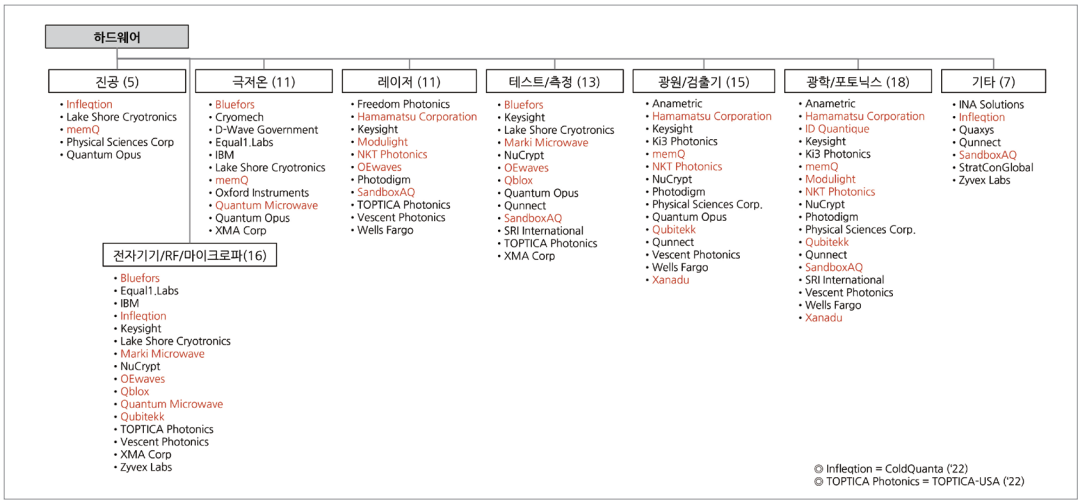
5) https://quantumconsortium.org/quantum-marketplace

그림 Ⅵ-1-5 응용/시스템 분야의 소분류 및 관련 기업명



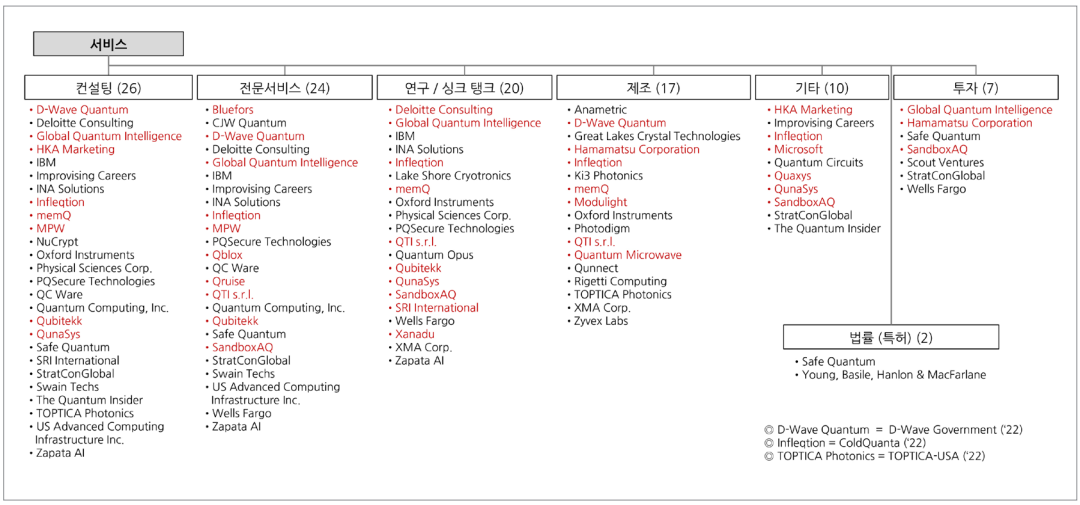
다음으로 하드웨어 분야는 진공, 극저온, 레이저, 테스트/측정, 광원/검출기, 광학/포토닉스, 전자기기, RF, 마이크로파 및 기타로 좀 더 다양하게 세분화할 수 있다. QED-C는 전자기기, RF, 마이크로파를 각각 다르게 분류하고 이에 포함되는 기업들을 구분하고 있지만, 현재는 해당 분야로 분류된 기업들이 똑같으므로 [그림 Ⅵ-1-6]에서는 세 분류를 하나로 통합해 표현했다.

그림 Ⅵ-1-6 하드웨어 분야의 소분류 및 관련 기업명



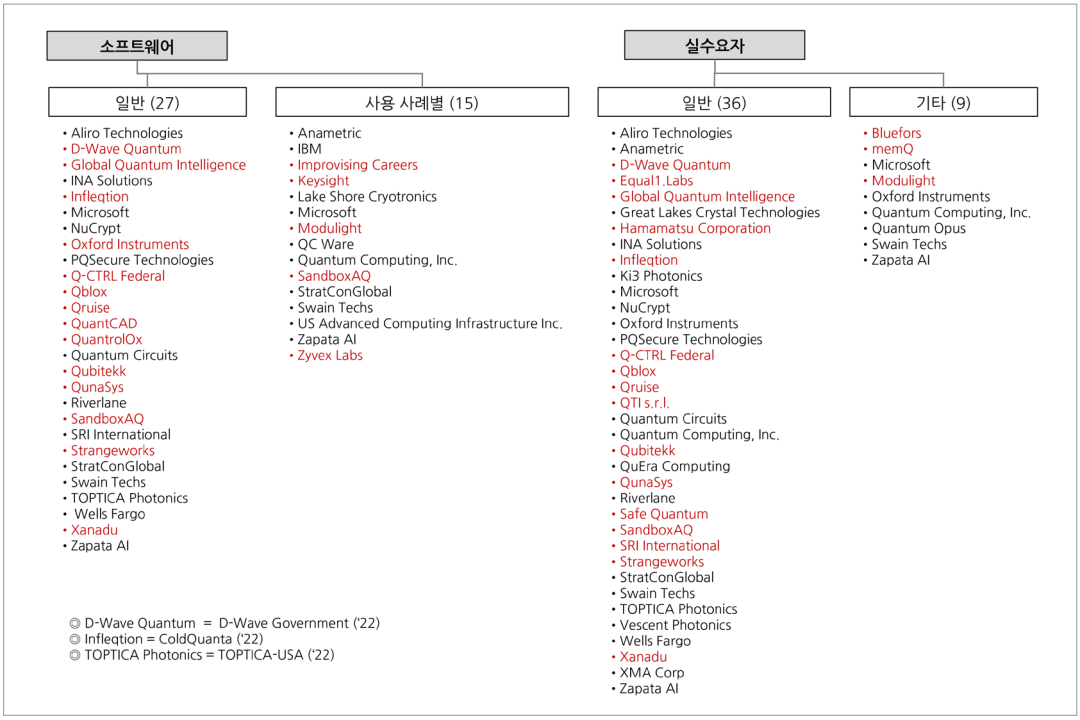
서비스 분야는 투자, 제조, 연구, 컨설팅, 싱크 탱크, 법률 및 특허, 전문 서비스, 기타로 분류돼 있다.

그림 Ⅵ-1-7 서비스 분야의 소분류 및 관련 기업명



소프트웨어 분야는 일반과 사용 사례별로 분류되고, 실수요자에게 공급하는 분야는 일반과 기타로 분류하고 있다.

그림 Ⅵ-1-8 소프트웨어 및 실수요자 분야의 소분류 및 관련 기업명



QED-C 회원사로 가입한 178개 기업에 대한 간략한 소개와 주요 제품 그리고 양자시장에 관련된 내용은 〈표 VI-1-1〉에 기술했다. 2022년에는 회원사였으나 2023년에는 회원사에서 탈퇴한 기업으로는 AT&T, Axion Tech, BAE Systems, Benchmark, Bleximo, Booz Allen Hamilton, Coherent, Corning, Cosmic Microwave Technology, GE Research, Hyperion Research, JTEC Consulting, Microsemi FTS, Montana Instruments, PayPal, Pivotport, Q-Sensorix, QuantOpticon, Quantum Computing Report, Quantum Xchange, SNASurvey, StrategicQC, Thorlabs, Quantum Technologies (Trilogy)로 24개 기업으로 나타나고 있다. 22023년에 회원사로 가입한 기업은 한국의 SK Telecom과 Korean Quantum Computing을 포함한 총 67사로 아래 표에 (23)으로 별도로 표기하였다. 또한 회원사로 가입은 하였으나 정보를 제공하지 않는 기업은 기업명만 기술하기로 한다.

표 VI-1-1 QED-C 회원 기업 소개

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Accenture (23)	
Aegiq	• 기업소개 : 단일 광자 및 통합 양자광학 플랫폼 사용, 차세대 네트워킹 및 컴퓨팅 구축, 양자컴퓨팅 및 양자광학 연구개발 추진 • 홈페이지 : https://www.aegiq.com
ALEKSCO LLC (23)	• 홈페이지 : https://www.aleksco.com
Algorithmiq (Amplitech)(23)	• 기업소개 : 양자 정보, 양자 계산, 양자 기초, 복잡계 및 기타 관련 주제 연구 두 개의 서로 다른 회사명으로 가입함 • 홈페이지 : https://algorithmiq.fi
Aliro Technologies*	• 기업소개 : 하버드 대학교 Narang Lab.에서 분사, IBM, Quantinuum, IonQ, Rigetti Computing 양자하드웨어 공급업체와 협력, 양자시스템 구축 위한 양자네트워크 개발 주도(양자컴퓨팅 및 네트워킹) • 주요제품 : Aliro Q. Network(AQN) • 홈페이지 : https://www.aliroquantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어(일반), 실수요자
AlphaRail*	• 기업소개 : 토론토 대학교 Creative Destruction Lab 2020 Quantum Stream 졸업한 미국 기반 스타트업, 철도 운영 최적화 문제 해결하기 위해 고성능 컴퓨팅 및 양자컴퓨팅 사용 연구 • 홈페이지 : https://www.alpharail.com
Amazon Web Services (AWS)*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 기술 발전 지원 • 홈페이지 : https://www.amazon.com
Anametric*	• 기업소개 : 반도체 설계, 사이버 보안, 칩 규모 양자광자를 위한 기술 및 장치 개발, 남부 감리교 대학교와 공동 연구를 통한 상용화 • 주요제품 : 사이버 보안을 위한 양자포토닉스 • 홈페이지 : https://www.anametric.com • 주요시장 : 하드웨어(광원, 탐지기/광학, 포토닉스), 실수요자, 소프트웨어, 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(제조)
AOSense*	• 기업소개 : 정밀 탐색, 중력 측정 및 시간 측정을 위한 원자 광학 장치 개발 • 주요제품 : 원자 빔 소스, 주파수 표준, 테이퍼 증폭기, 광섬유 주파수 빗, 원자광학센서, 자이로스코프, 가속도계, 관성측정장치, 중력계 • 홈페이지 : https://www.aosense.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Aperio Global*	• 기업소개 : 객체 감지 및 세분화, 사이버 공간 행동 예측 포함한 분류 및 회귀 문제 해결, 전이 학습 활용 가능 Quantum reference models 생성, IBM Quantum Experience 및 Qiskit 사용 AI 솔루션용 양자큐비트(Qubit) 알고리듬 활용 • 주요제품 : 인공지능, 양자센싱/컴퓨팅, 사이버 운영, 네트워크 복원, 국가 안보 • 홈페이지 : https://www.aperioglobal.com
Aquark Technologies (23)	• 기업소개 : University Southampton 분사, 가장 작은 저온 원자 시스템 구축, 영국 사우샘프턴에 최첨단 시설 설립 • 홈페이지 : https://www.aquarktechnologies.com
Atlantic Quantum (23)	• 기업소개 : 양자컴퓨터 구축, 대규모 오류 수정 • 홈페이지 : https://www.atlantic-quantum.com
ATOM Computing*	• 기업소개 : 중성 원자 양자컴퓨팅 중점 시스템 통합 • 홈페이지 : https://www.tom-computing.com
BEIT (23)	• 기업소개 : 양자 컴퓨팅 소프트웨어 R&D, 이론적 알고리즘의 속도 향상 연구 • 홈페이지 : https://beit.tech
Bluefors (23)	• 기업소개 : 극저온 측정 시스템, 냉각기 및 기타 극저온 제품 • 주요제품 : 양자 측정 시스템 • 홈페이지 : https://bluefors.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트, 측정), 서비스(전문서비스), 실사용자(학계 양자 스타트업, 연구센터, 기술기업), 응용/시스템 (양자컴퓨터, 극저온 양자컴퓨팅, 주사 탐침 현미경)
Boeing*	• 기업소개 : 시스템 엔지니어링, 소프트웨어 시뮬레이션, 극저온 원자 물리학, 주파수 안정화 레이저, 초고속 레이저 시스템, 통합 포토닉스, 소형 진공 시스템, 내비게이션 시스템, 이미징 및 감지 기술 • 홈페이지 : https://www.boeing.com
Bohr Quantum Technology Corp. (23)	• 기업소개 : 랙형 양자 네트워킹 시스템, 광섬유 사용 상호연결 양자장치활성화 • 주요제품 : CapricaZero™, 통합 랙, 데이터를 안전하게 순간 이동시키기 위한 광자 얽힘, 양자컴퓨터 얽힘, 소프트웨어 및 하드웨어. • 홈페이지 : https://www.bohrquantum.com
Boston Consulting Group*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 컨설팅 및 자문 서비스, 분석 및 데이터 과학 부문(CG GAMMA)과 양자컴퓨팅의 기계 학습 응용 프로그램 연구 수행 • 홈페이지 : https://www.bcg.com
Cambridge Quantum	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 양자 소프트웨어 및 양자 사이버보안 중점, 양자기술 상용화를 위한 시스템 구축 • 주요제품 : 양자화학, 머신러닝, 알고리듬, 사이버보안, 소프트웨어개발 toolkit • 홈페이지 : https://www.quantinuum.com
Castle-Shield (23)	• 기업소개 : 양자 방지 암호화 제공, 전체 기업 실시간 모니터링, 기업, 공급업체, 유통업체 및 공급망의 규정 준수 측정 • 홈페이지 : https://castle-shield.com
Cisco	• 기업소개 : 양자분야를 다루고 있지 않음(협력관계 유지) • 홈페이지 : https://www.cisco.com
CJW Quantum	• 기업소개 : 2018년 국가 양자발의법(National Quantum Initiative Act) 서명에 중요한 역할(Carl Williams) • 주요제품 : 전략적 /공공정책 컨설팅, 엔지니어링 및 위험 관리 • 홈페이지 : https://www.cjwquantum.com • 주요시장 : 서비스(전문 서비스)
Cryomech*	• 기업소개 : 2단계 저온 냉각기 포함 극저온 냉각기 및 저온 유지 장치 등 극저온 장비 설계 및 제조 • 주요제품 : 냉동기, 저온 유지 장치, 헬륨 관리 시스템, 액체 질소 • 홈페이지 : https://www.cryomech.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
D-Wave Quantum	• 기업소개 : 세계 최초 양자컴퓨터 상용 공급, 양자컴퓨팅 시스템 및 소프트웨어/서비스 개발, 어닐링/게이트 모델 양자컴퓨터 개발, Full Stack 기술 제공, 다양한 문제에 대한 양자응용 프로그램 수행 • 주요제품 : 양자시스템 구축 및 제공(5000+ 이상 큐비트), 도약 양자클라우드 • 홈페이지 : https://www.dwavesys.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 하드웨어(극저온), 서비스(컨설팅, 제조), 실수요자
Danaher Cryogenics (23)	• 기업소개 : 켈빈 이하 극저온을 위해 설계된 저온 유지 장치 제품군 제공 • 홈페이지 : https://danahercryo.com
Deloitte Consulting*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 기초 교육, 전략적 양자여정 로드맵 개발, 워크숍 진행 • 주요제품 : 전문 서비스 • 홈페이지 : https://www.deloitte.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구/싱크 탱크)
DRS Daylight Solutions (23)	• 기업소개 : 중적외선 양자 캐스케이드 레이저 소스 제공 • 주요제품 : UV laser, Mid-IR laser, high power laser system • 홈페이지 : https://daylightsolutions.com
EMW Consulting*	• 기업소개 : 군사/민간 분야 정책, 인력, 교육 육성, 네트워킹 도입 및 사용, 양자정보과학(QIS) 교육, 인력, 기술 육성 정책
Entanglement*	• 기업소개 : QIS 가속화용 고급 양자컴퓨팅, QIS 테스트 베드, 보안 시설 구축, 양자 네트워킹을 위한 프로토타입 공간 제공 • 홈페이지 : https://www.entanglement.ai
EPB (23)	• 홈페이지 : https://epbfi.com
Equal1.Labs	• 기업소개 : 실리콘 기반 양자컴퓨터 플랫폼 개발, 양자컴퓨팅 기능을 상대적으로 전력 소비가 적은 비용 효율적인 소형 폼 팩터로 제공 • 주요제품 : 실리콘 기반 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.equal1.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파), 응용/시스템 (양자컴퓨터). 실사용자(일반)
Ernst & Young (23)	• 기업소개 : 전략, 거래, 혁신 및 기술을 연결하는 접근 방식 제공 • 홈페이지 : https://www.ey.com/en_kr
Ethicqual (23)	• 기업소개 : 날씨, 양자기술, AI • 홈페이지 : https://ethicqual.org
evolutionQ (23)	• 기업소개 : 양자 안전 사이버 보안, 양자컴퓨터 공격 방어 네트워크 구축 지원 • 주요제품 : BasejumpSIM, BasejumpQDN 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.evolutionq.com
ExxonMobil (23)	• 기업소개 : 효율적인 연료 생산, 배기가스 저감 기술 개발 • 홈페이지 : https://corporate.exxonmobil.com
First Quantum (23)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 알고리즘 개발 • 홈페이지 : https://thefirstquantum.com
FormFactor*	• 기업소개 : 극저온 테스트 및 측정 시스템 공급 • 주요제품 : 계측 도구, 양자극저온, 프로브 카드, 프로브 시스템, 분석 프로브 • 홈페이지 : https://www.formfactor.com
Freedom Photonics*	• 기업소개 : 광자 부품, 모듈 및 하위 시스템 제조, 반도체 레이저, 광다이오, 광증폭기/셔터, 고속 광변조기, 광자 지적회로 및 2D/3D 통합, 정교한 마이크로 과학기술 보유. 양자통신/네트워킹 및 감지 • 주요제품 : 레이저 및 레이저 시스템, 광검출기 • 홈페이지 : https://www.freedomphotonics.com • 주요시장 : 하드웨어(레이저)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Frequency Electronics*	• 기업소개 : 원자시계 기술 관련 연구 • 주요제품 : 모듈식 GPS 시간 및 주파수 참조 시스템, 위성통신 지상국 • 홈페이지 : https://www.freqelec.com
General Dynamics Mission Systems*	• 기업소개 : 방위 및 항공우주 회사인 General Dynamics의 사업군에 속함. 안전한 통신 및 정보 시스템 기술 통합 • 홈페이지 : https://www.gd-ms.com
Global Quantum Intelligence (23)	• 기업소개 : 신뢰할 수 있는 데이터, 통찰력, 분석 및 인텔리전스 제공, 양자 기술의 프레임워크와 벤치마크 정의하는 보고서 출판 • 주요제품 : 양자 시장 및 비즈니스 인텔리전스 • 홈페이지 : https://www.global-qi.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 서비스(컨설팅, 투자전문서비스 연구/싱크탱크), 응용/시스템(타이밍, 통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 양자 안정, 양자 공급망, 양자시스템), 실수요자(일반)
Google*	• 기업소개 : Google Quantum AI, 양자컴퓨팅 개발 • 홈페이지 https://quantumai.google
Great Lakes Crystal Technologies*	• 기업소개 : 고품질 다이아몬드 기질과성장한 동위원소 정제(C-12 농축) 다이아몬드 에피층 포함 고성능 다이아몬드 재료 제품군 개발 • 주요제품 : 반도체용 다이아몬드 기판, C-12 다이아몬드 에피웨이퍼(Epiwafer) • 홈페이지 : https://www.glcrystal.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서), 서비스(제조), 실수요자
Haiqu (23)	• 기업소개 :• NISQ용 소프트웨어 계층 구축 홈페이지 : https://haiqu.ai
Hamamatsu Corporation (23)	• 기업소개 : 광자 솔루션 제공, 차세대 장치 및 감지기 연구 • 주요제품 : 광전자 증배관, 단일 광자 애벌란시 다이오드, 광위상 변조기 • 홈페이지 : https://www.hamamatsu.com • 주요시장 : 실수요자(일반), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(투자, 제조), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍)
HKA Marketing Communications (23)	• 기업소개 : 홍보 대행사 • 주요제품 : 홍보, 미디어 관계, 콘텐츠 제작, 마케팅, 전략 자문 • 홈페이지 : https://hkamarcom.com • 주요시장 : 서비스(홍보 컨설팅)
Honeywell*	• 기업소개 : 트랩 이온 기술 기반 양자컴퓨팅 솔루션 • 홈페이지 : https://www.honeywell.com
IBM*	• 기업소개 : 종단 간 양자컴퓨팅 제공, 양자컴퓨터, 오픈 소스 양자컴퓨팅 SDK, 애플리케이션 • 주요제품 : 연구 및 개발, 전문 개발자 인증 프로그램 등 양자컴퓨팅 교육 프로그램 제공 양자컴퓨터, 양자컴퓨팅 애플리케이션, 양자 소프트웨어, 양자컴퓨터 기술 서비스 • 홈페이지 : https://www.ibm.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파), 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구/싱크탱크), 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어
Icarus Quantum (23)	• 기업소개 : 양자 광 발생기 개발, 최초의 결정론적 얽힘 생성기, 생성 속도 50배 이상 향상, 양자 중계기 프로토콜 강화, 장거리 양자 네트워킹 • 홈페이지 : https://icarusquantum.com
Icosa Computing (23)	• 기업소개 : 자산배분 및 신용평가 솔루션 제공 • 홈페이지 : https://icosacomputing.com
ID Quantique	• 기업소개 : 양자 사이버 보안 솔루션(하드웨어, 소프트웨어), 광자 카운터 및 관련 전자 제품 • 주요제품 : Quantum safe security, quantum sensing • 홈페이지 : https://www.idquantique.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 하드웨어(광학/포토닉스)
Iff Technologies (23)	• 기업소개 : Polar+ protein pruning technology • 홈페이지 : https://iff.bio

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Improvising Careers	• 기업소개 : Inside Quantum Technology, Quantum London, Quantum Strategy Institute 등 양자 관련 조직. 워크숍 및 이벤트 진행 • 주요제품 : 이벤트 주최, 중재 패널, 채용 워크숍 • 홈페이지 : https://www.improvisingcareers.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스 등), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터)
In-Q-Tel*	• 기업소개 : 미국 정보 커뮤니티 투자자 • 홈페이지 : iqt.org
INA Solutions	• 기업소개 : 양자기계학습 이용 고급 정보 기술 솔루션 제공 및 설계 • 주요제품 : 양자기계학습, 인공지능, 기계학습 • 홈페이지 : https://www.ina-solutions.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구/싱크 탱크), 응용/시스템(양자기계학습), 소프트웨어(일반), 하드웨어(양자기계학습), 실수요자(일반)
infinityQ Technology, Inc (23)	• 기업소개 : 양자 대체 컴퓨팅 • 홈페이지 : https://www.infinityq.tech
Infleqtion (ColdQuanta)	• 기업소개 : 저온 원자 기술 활용, UHV 및 유리 셀 기술, 클라우드, 기기 및 시스템 설계 기술 제공 양자 물질 시스템, 양자 시간 유지 시스템, 양자컴퓨터, 리드버그 RF 검출기, 양자 • 주요제품 : 관성 센서 • 홈페이지 : https://www.infleqtion.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 실수요자(일반), 하드웨어(전자기기, RF 마이크로파, 진공, 고성능 유리 UHV 셀 통합 소형 저온 원자 시스템 레이저 냉각 시스템 miniMOT 양자 물질 기계 센서 장비 솔루션), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍, 소프트웨어 코어 MOT 원자시계), 서비스(컨설팅, 제조, 전문서비스, 연구/싱크 탱크, 맞춤형 양자 진공 부품, 맞춤형 양자 물질 기계 서비스, 클라우드 기반 양자 물질 기계로서의 양자 연구)
Inside Quantum Technology*	• 기업소개 : 출판, 이벤트, 분석 양자기술 비즈니스 서비스 • 주요제품 : 양자센서 시장 진화(2022~2031), 양자컴퓨팅 어플리케이션 등 시장 분석 자료 • 홈페이지 : https://www.nsidequantumtechnology.com
InterDigital	• 기업소개 : 차세대 무선 통신 시스템 및 AI 솔루션에 양자컴퓨터 사용 모색 • 홈페이지 : https://www.interdigital.com
IonQ*	• 기업소개 : 포착된 이온 양자컴퓨터 구축 및 양자컴퓨팅 스택(Stack)의 모든 측면에서 R&D 수행 • 주요제품 : IonQ Forte(완전한 소프트웨어 구성 가능 양자컴퓨터) • 홈페이지 : https://www.ionq.com
IQM Finland OY (23)	• 기업소개 : 대규모 양자 프로세서에 대한 큐비트 재설정, 판독 및 열 관리, 디지털-아날로그 양자 컴퓨팅에 대한 고유한 하드웨어 • 홈페이지 : https://meetiqm.com
Jenoptik Optical Systems (23)	• 기업소개 : 광학 기술, 반도체 및 전자 제품, 생명 과학 및 의료 기술, 스마트 모빌리티 • 홈페이지 : https://www.jenoptik.com
Keysight*	• 기업소개 : 양자연구개발, 제조 및 배포로 구현 가능한 기술 및 고급 설계 및 검증 솔루션 제공, 양자컴퓨터를 100개 큐비트로 확장 가능한 큐비트 제어 솔루션 제공 • 주요제품 : 큐비트 제어 시스템, 네트워크/스펙트럼 분석기, EDA 소프트웨어, 광자 테스트 시스템 • 홈페이지 : https://www.keysight.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스, 테스트 및 측정), 응용/시스템(구현 기술 테스트 및 측정 장비 Qubit 제어 시스템), 소프트웨어(양자컴퓨터 벤치마킹)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Ki3 Photonics	• 기업소개 : 양자신호처리, 양자통신, 얽힘광자소스, 광섬유 간섭계 시스템, 포토닉시스템, 광섬유 인프라 활용 양자신호 생성, 조작, 배포 및 제어, 병렬/ 다채널 정보처리 가능 양자네트워크 준비 중 • 홈페이지 : https://www.ki3photonics.com • 주요시장 : 응용/서비스(통신/네트워크 등), 서비스(제조), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스), 실수요자
Korean Quantum Computing (23)	• 홈페이지 : https://kqchub.com
Kyocera Corporation (23)	• 기업소개 : 파인세라믹, 부품, 이동통신, 인쇄기 및 양자컴퓨팅 분야의 QPU 패키지, 웨이퍼, 광통신 소자 개발 • 주요제품 : QPU 패키지, 웨이퍼, 광통신 장치 • 홈페이지 : global.kyocera.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서 QPU 패키지 웨이퍼 및 광통신 장치)
L3Harris*	• 기업소개 : 고객 응용 요구 사항 해결 양자기술 식별 및 기술통합 시스템 개발 • 주요제품 : 전자광학/적외선 주야간 감시 장비, 레이더, 통신/전자 정보, 항공전자, 자장 변화 탐지, 음향, 디스플레이 시스템, 시뮬레이터 • 홈페이지 : https://www.l3harris.com
Lake Shore Cryotronics*	• 기업소개 : 극저온 온도 센서 및 계측, 자기 측정기기, 차세대 양자물질 특성 분석 시스템 공급 • 주요제품 : UHV 광학 저온 유지 장치, 극저온 웨이퍼 프로브 스테이션, 양자재료 시험 시스템, 보정된 ULT 센서 • 홈페이지 : https://www.janis.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정, 진공), 서비스(연구/싱크탱크), 응용/시스템(센서), 소프트웨어(온도/자기 제어)
Leidos (23)	• 기업소개 : 항공, 방위, 에너지, 헬스케어, 우주 등 전반적인 분야 • 홈페이지 : https://www.leidos.com
Lightbridge Group (23)	• 기업소개 : 양자기술 기업을 위한 비즈니스 컨설팅, 미국 정부 계약, 상업 마케팅 및 홍보, 임원 채용 및 투자, M&A 자문 서비스 • 홈페이지 : https://www.lightbridge.group
Lockheed Martin*	• 기업소개 : 계산, 고품질 솔루션, 민감한 측정, 넓은 채널 대역폭, 보안 통신 등 양자정보과학(QIS) 적용 • 주요제품 : 컴퓨팅, 감지, 통신 • 홈페이지 : https://www.lockheedmartin.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍)
Marki Microwave*	• 기업소개 : RF 및 마이크로파 구성요소 공급 • 주요제품 : 커넥터형 필터, IQ 혼합기, 커플러(Coupler), 바이어스 티(Bias Tees), 배율기(Multiplier), 이퀄라이저(Equalizer), 발룬(Baluns) • 홈페이지 : https://www.markimicrowave.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정)
Maxxen Group (23)	• 기업소개 : 냉각용 인프라 구축 • 홈페이지 : https://www.maybellquantum.com
Maybell Quantum (23)	• 기업소개 : 얽힌 광자 쌍 및 양자 감지, 단일 광자 소스(SPS) 반도체 칩, 상온에서 작동하는 얽힌 광자 쌍, Quantum Lidar/Radar 개발 • 홈페이지 : https://www.maxxengroup.org
memQ (23)	• 기업소개 : 시카고 대학교에서 분사한 딥테크 기업, 희토류 큐비트 엔지니어링, 양자 인터넷과 광원, 메모리, 양자 중계기와 같은 관련 기술 • 주요제품 : 단일 광자 소스, 양자 메모리, 양자 네트워크 • 홈페이지 : https://www.memq.tech • 주요시장 : 서비스(제조, 연구/싱크 탱크, 컨설팅), 실사용자(연구기업), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터), 하드웨어(극저온, 광원/검출기, 광학/포토닉스, 진공)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Microsoft*	• 기업소개 : 양자하드웨어, 제어, 소프트웨어, 개발 도구 등 컴퓨팅 Stack의 모든 계층에서 병렬 도입, 확장 가능하고 안정적인 양자컴퓨팅 실현에 도움이 되는 위상(Topology) 큐비트 개발 중, 양자 소프트웨어, 어플리케이션 개발 • 주요제품 : Azure Quantum • 홈페이지 : https://azure.microsoft.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터, 화학, 재료, Science job shop scheduling), 서비스(맞춤형 솔루션 개발), 실수요자(일반 연구원, 학생, 개발자), 소프트웨어(일반 고급 차량 관리 작업장 일정)
Minne Quantum*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 및 양자기술 발전을 전담하는 비영리 조직, 양자컴퓨팅 모임 주최 • 주요시장 : https://www.minnequantum.org
Modulight (23)	• 기업소개 : 핀란드 반도체 레이저 제조업체, 광학, 제어 전자 장치, 저소음 드라이버 및 클라우드 연결, 레이저 시스템 구축, 클라우드 연결을 통해 예측 유지 관리 알고리즘, 원격 제어 및 진단과 예방 유지 관리 • 주요제품 : DFB/DBR/VECSEL lasers, 제어 전자장치 포함 레이저 시스템 • 홈페이지 : https://modulight.com • 주요시장 : 실수요자(레이저 칩 및 레이저 시스템 제조업체), 소프트웨어(레이저 시스템 예측 유지 관리), 하드웨어(레이저, 광학/포토닉스), 서비스(제작), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍)
MPW	• 기업소개 : 레거시 기술과 아이디어가 활용됨에 따라 관련성이 높아지고 있는 애플리케이션에 영향 있는 Photonics 개발 • 주요제품 : Quantum 2.0, 포토닉스, 기업 발전 및 전략 • 홈페이지 : https://www.mpw-llc.com • 주요시장 : 서비스(전문 서비스, 컨설팅)
Nexus Photonics (23)	• 기업소개 : 파장 가변 레이저, 고출력, 가변 및 비냉각식 • 홈페이지 : https://www.nexusphotonics.com
NKT Photonics	• 기업소개 : 광섬유 및 레이저 기술 • 주요제품 : 파이버 레이저, 증폭기 및 딜리버리, 코헤라스, 하모닉, 트랩드 이온, 중성 원자, 주파수 변환, 압착광, MOT • 홈페이지 : https://www.nktphotonics.com • 주요시장 : 하드웨어(광학/포토닉스. 레이저, 광원/검축기)
Northrop Grumman*	• 기업소개 : DoD/IC 임무 지원을 위한 QIS 기술 사용 관심, 양자정보과학(QIS) 기술 관련 R&D 수행 중 • 홈페이지 : https://www.northropgrumman.com
Novum-Industria	• 기업소개 : MIT(Massachusetts Institute of Technology) 플라즈마 과학 및 융합 센터에서 분사, 의료 응용(양성자 및 탄소 방사선 요법, PET 동위원소 생산), 보안 응용(특수 핵물질 검출), 초고장/초소형/초전도 사이클로트론 가속기 개발 • 주요제품 : 저온/고온 초전도체 • 홈페이지 : https://www.novum-industria.com
NTT Research (23)	• 기업소개 : 물리/정보, 암호 및 정보 보안, 의료 및 헬스 정보화 • 홈페이지 : https://ntt-research.com
NubisAI (23)	• 기업소개 : 재생 에너지, 산업 및 스마트시티 솔루션 및 컨설팅 서비스, 인프라, IoT/IIoT, 인공지능 기반 최적화, 시스템 설계 및 솔루션 배포 • 홈페이지 : https://nubisai.com
NuCrypt*	• 기업소개 : 양자광자학을 위한 특수 실험실 장비 구축, 양자상태 단층 촬영 측정용 소프트웨어 개발 • 주요제품 : 얽힌 광자 소스, 분산 얽힘 측정, 편광 분석기, 상관 전자 장치, 안정화 지연 간섭계 • 홈페이지 : https://www.nucrypt.net • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(컨설팅), 하드웨어(전자기기, 광학/포토닉스. 마이크로파, RF, 광원/검출기), 소프트웨어, 실수요자

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Octave Photonics (23)	• 기업소개 : 비선형 포토닉스, 차세대 레이저 시스템 구현 • 홈페이지 : https://www.octavephotonics.com
Ode, L3C*	• 기업소개 : 양자계산화학을 위한 차세대 양자논리 전자 및 핵(QLEAN™) 제공, 양자과학, 기술 및 연구(qSTAR)를 통해 서비스 제공하는 사회적 기업, 비결정적 다항식 시간 경도 화학 문제 해결하는 알고리듬 개발 • 홈페이지 : https://odestar.com
OEwaves* ('23년 양자시장 진입)	• 기업소개 : 마이크로파 광자 제품 및 솔루션 제공, 상업 및 군사용 통신, 센서, RADAR/LIDAR, 테스트 및 측정 시스템 지원 제품 • 주요제품 : 초협폭 레이저, 레이저 테스트 및 측정 시스템, 마이크로파 테스트 및 측정 시스템, • 홈페이지 : 마이크로파 발진기, 레이저 잠금 상자 • 주요시장 : https://www.oewaves.com 응용/시스템(센서), 하드웨어(레이저, 테스트/측정, 전자기기, RF, 마이크로파)
Orange Quantum Systems (23)	• 기업소개 : 양자칩용 데이트 장비 제공 • 홈페이지 : https://orangeqs.com
Oxford Instruments	• 기업소개 : 물리학, 양자기술, 신소재, 장치 개발을 위한 장치 설계 및 공급, 극저온 및 고자기 환경 생성을 통한 원자 크기 관련 연구 지원 • 주요제품 : Proteox 시스템, TeslatronPT, Kelvinox 시스템, 습/건식 시스템 • 홈페이지 : https://www.nanoscience.oxinst.com • 주요시장 : 실수요자(일반 연구원, 학생, 개발자), 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반), 기타(자석)
Parity Quantum Computing (23)	• 기업소개 : 양자 아키텍처, 양자컴퓨터용 청사진 및 운영체제 개발 • 홈페이지 : https://parityqc.com
Pasqal (23)	• 기업소개 : 풀스택 중립 원자 양자컴퓨팅 • 주요제품 : 중성원자 양자컴퓨터, 양자알고리즘, 양자응용솔루션 • 홈페이지 : https://www.pasqal.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
Photodigm*	• 기업소개 : 분광학 인증 DBR(Distributed Bragg Reflector) 레이저 • 주요제품 : 분광학 인증 DBR 레이저, 레이저 설계 서비스, Gain chip • 홈페이지 : https://www.photodigm.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(제조)
Photon Spot*	• 기업소개 : 서브 켈빈 극저온 및 단일 광자 검출기 제조 • 주요제품 : 극저온, 검출기 • 홈페이지 : https://www.photonspot.com
Physical Sciences Corp.*	• 기업소개 : 양자센서(가속도계, 자이로스코프, 자력계) 및 양자통신(광자 소스 및 감지)용 지원 기술(초고진공, 통합 포토닉스, 소형 원자 소스) • 주요제품 : 계약 R&D Contract R&D • 홈페이지 : https://www.psicorp.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 센서 등), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스, 진공), 서비스(컨설팅, 연구/싱크 탱크)
PQSecure Technologies*	• 기업소개 : 임베디드 및 IoT 어플리케이션 등 양자안전 암호화 솔루션 설계, 개발 및 구현 프로토콜 보안에 대한 양자위험 분석 • 주요제품 : PQC 하드웨어/소프트웨어 IP, 하이브리드 PQC 솔루션 • 홈페이지 : https://www.pqsecurity.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구/싱크 탱크), 실수요자

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
PsiQuantum*	• 기업소개 : 기후, 의료, 생명 과학, 에너지 분야 양자컴퓨터 구축, 광자 및 전자칩, 양자아키텍처 및 내결함성, 패키징 및 제어 전자 장치, 극저온 시스템, 양자응용 프로그램 등 양자컴퓨팅 Stack 작업 중 • 주요제품 : 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.psiquantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
Q-CTRL Federal ('23 양자시장 진입)	• 기업소개 : 양자제어 엔지니어링, 양자컴퓨팅, 양자감지, 양자지원 탐색 분야 R&D 프로그램 및 소프트웨어 개발 중, Berkeley Lab Advanced Quantum Testbed, Fermilab, NIST에 제공 • 주요제품 : 소프트웨어(Open control, Black opal, Boulder opal, Fire opal) • 홈페이지 : https://www.q-ctrl.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 실사용자(일반), 응용/시스템(양자컴퓨터, 센서)
Q.ANT (23)	• 기업소개 : 정확도와 전력 효율성이 높은 다이아몬드 기술 NV 센터 기반 마이크로칩 크기 자력계 온도, 양자 자이로스코프 개발 • 주요제품 : 자이로스코프, 자력계, 온도/스트레인 센서 • 홈페이지 : https://www.q-sensorix.com
Qausal AI (23)	• 기업소개 : 양자 및 고전 모델, 모니터링 제공 • 홈페이지 : https://www.qausal.ai
Qblox	• 기업소개 : 네덜란드 델프트 기반 양자기술 연구소 QuTech의 분사, 확장 가능 및 짧은 대기 시간 큐비트 제어 장비 개발 추진 • 주요제품 : 제어 및 판독 모듈 • 홈페이지 : https://www.qblox.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정), 서비스(전문 서비스), 실사용자(일반), 응용/시스템(양자컴퓨터, 제어 전자장치)
qBraid	• 기업소개 : 다양한 양자컴퓨팅 언어의 라이브러리 변환 및 최적화, 모든 양자하드웨어에서 호환 가능 양자알고리듬 개발 도구, 상호 운용할 수 있는 양자코드 작성 가능 클라우드 환경 제공 • 주요제품 : 양자컴퓨팅 • 홈페이지 : https://www.qbraid.com
QC Ware*	• 기업소개 : 양자 소프트웨어 및 서비스 공급업체, 양자컴퓨팅 하드웨어용 어플리케이션 개발, AFRL, Aisin, Airbus, BMW Group, Covestro, Goldman Sachs, Total에 서비스 제공 중 • 주요제품 : QC Ware Forge(양자컴퓨팅 클라우드 서비스) • 홈페이지 : https://www.qcware.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스)
QDevil	• 기업소개 : mK에서 실온까지 작동하는 보조 장비 및 특수 부품 개발 및 제조, Niels Bohr Institute(코펜하겐 대학)의 양자소자 센터와 제품 개발 중, 하버드 대학교와 코펜하겐 대학교의 연구 협력기반 Qfilter 개발 • 주요제품 : Qfilter, QDAC(24채널 초안정 저잡음 DAC), QBoard(고속 교환 칩 캐리어 시스템), 필터, Qbox (24채널 브레이크아웃 박스), 샘플 홀더, 마이크로 캐비티(Cavity), 게이트 제어 장치 • 홈페이지 : https://www.qdevil.com
QPRI*	• 홈페이지 : https://www.qprinstruments.com
Qruise (23)	• 기업소개 : 기계학습용 소프트웨어 개발, 과학용 기계학습 개발, noisy quantum computers(NISQ devices) 제어 문제 해결 및 작동 충실도 향상 • 주요제품 : 최적 제어, 양자 디지털 트윈, Bayesian 실험 설계, 교정 및 조정, 시스템 식별 • 홈페이지 : https://qruise.com/features • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 서비스(전문 서비스), 실사용자(일반), 응용/시스템(타이밍, 양자컴퓨터, 센서)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Qrypt*	• 기업소개 : 정보 암호화 위해 양자 난수 생성기 사용 양자엔트로피 생성 양자보안 암호화 솔루션 개발 • 주요제품 : 엔트로피 생성, BLAST 알고리듬, Post-Quantum 암호화, Double Ratchet • 홈페이지 : https://www.qrypt.com
QTI s.r.l. (23) (Quantum Telecommunications Italy)	• 기업소개 : 국립연구위원회(INO-CNR) 산하 이탈리아 국립광학연구소에서 분사 2020년 10월 설립 스타트업, 양자 네트워크 산업용 등급 시스템 • 주요제품 : Quell-X, QKME(키관리 엔터티), QSDN(소프트웨어 정의 네트워크) • 홈페이지 : https://www.qticompany.com • 주요시장 : 실사용자(일반), 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(전문 서비스, 연구/씽크 탱크, 제작)
Quandela (23)	• 기업소개 : 양자클라우드 서비스, 양자컴퓨팅 플랫폼 및 솔루션 제공 • 홈페이지 : https://www.quandela.com
QuantCAD	• 기업소개 : 양자장치 노이즈 문제 해결서비스, 소프트웨어 설계 및 판매 • 주요제품 : 노이즈의 미시적 시뮬레이션 • 홈페이지 : https://www.quantcad.com
Quantinuum*	• 기업소개 : Full Stack 기술을 통해 양자컴퓨팅 개발, Cambridge Quantum와 Honeywell Quantum Solutions 양사 합병 • 주요제품 : 양자강화 사이버보안, 양자컴퓨팅 하드웨어, 양자최적화 개발, 양자화학, AI • 홈페이지 : https://www.quantinuum.com
QuantLR (23)	• 기업소개 : 양자광학 기술 개발, 양자광자 구성 요소 및 하위 시스템 개발 자동처리 프로토 타이핑 플랫폼 구축 • 주요제품 : Cavity-QED/반도체 양자/ 2D 재료 시뮬레이션 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.quantopticon.co.uk
QuantrolOX ('23년 양자시장 진입)	• 기업소개 : 큐비트 조정, 안정화 및 최적화 등 양자기술을 위한 자동화된 기계 학습 기반 제어 소프트웨어 구축, 고체 상태 큐비트에 적용 가능한 소프트웨어 기술 개발 중 • 주요제품 : Machine learning based software for quantum control • 홈페이지 : https://www.quantrolox.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반)
Quantropi (23)	• 기업소개 : Post Quantum Security(TrUE), QiSpace™ 플랫폼 • 홈페이지 : https://www.quantropi.com
Quantum Circuits*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 응용 프로그램 및 Full Stack 양자컴퓨팅 플랫폼 개발 및 공급, 양자솔루션용 공용 클라우드 에코시스템 접속 서비스 • 주요제품 : 양자컴퓨팅 서비스 • 홈페이지 : https://www.quantumcircuits.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반), 서비스
Quantum Computing, Inc.*	• 기업소개 : 비양자 전문가들을 위해 양자컴퓨팅에 간단히 접속할 수 있는 고전 및 양자 소프트웨어인 Qatalyst 공급 • 주요제품 : Qatalyst • 홈페이지 : https://www.quantumcomputinginc.com • 주요시장 : 서비스 (컨설팅, 전문 서비스) 소프트웨어, 실수요자
Quantum Futures (23)	• 기업소개 : 양자 기술 분야 인재 육성 및 확보 • 홈페이지 : https://www.quantum-futures.com
Quantum FutureX (23)	• 기업소개 : 양자와 AI 분야 인재 육성 및 교육 프로그램 제공 • 홈페이지 : https://www.quantumfuturex.ch
Quantum Machines (23)	• 기업소개 : 플랫폼 양자컴퓨팅 • 홈페이지 : https://www.quantum-machines.co
Quantum Microwave* (23)	• 기업소개 : 극저온 열화 결정질 석영 감쇠기 제공 • 주요제품 : 마이크로파-LNA, 절연체, 순환기, 바이어스 티 감쇠기 • 홈페이지 : https://www.quantummicrowave.com • 주요시장 : 서비스(제조), 응용/시스템(양자컴퓨터), 하드웨어(전자기기, RF, 초저온파)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Quantum Opus*	• 기업소개 : 극저온 실험용 소형 초전도 나노와이어 시스템, 양자광학, 양자계산, 광자 결핍 광통신용 초전도 광자 계수 솔루션, 소형 저온 유지 장치, 극저온 전자 장치 공급, 950nm/1550nm 최적화 표준 제품 • 주요제품 : UV-VIS-NIR 검출기, 극저온 전자기기, 원버트/소형 저온 유지 장치 • 홈페이지 : https://www.quantumopus.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서), 서비스(연구/싱크 탱크), 하드웨어(극저온, 광원/검출기, 테스트/측정, 진공 등), 실수요자
Quantum Semiconductor*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 및 감지 응용 프로그램에 적합한 COMS 호환 가능 Group IV 초격자, CMOS 기반 이종접합 광다이오드 개발 • 주요제품 : CMOS 이미지 센서, LiDAR 광검출기, 광전자 특성, 광학/광자 수신기, 양자감지+컴퓨팅+통신, 양자 난수 생성 • 홈페이지 : https://www.quantumsemi.com
Quantum Technical Associates (23)	• 기업소개 : 문제 해결 및 솔루션 개발 • 홈페이지 : https://www.qtausa.com
Quantum Valley Ideas Lab (23)	• 홈페이지 : https://qvil.ca
Quantum1 Group*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 감지, 통신 등 광범위한 양자기술 산업에 투자 • 홈페이지 : https://www.quantum1.group
Quaxys ('23년 양자시장 진입)	• 기업소개 : 반도체 큐비트(초전도, 스핀 및 토폴로지 큐비트)의 기술 기반 하드웨어 교육 제공 • 주요제품 : 초전도 큐비트를 위한 하드웨어 교육, RF 및 마이크로파 교육, 극저온/상온 마이크로파 하드웨어, 양자인력 개발 • 홈페이지 : https://www.quaxys.com • 주요시장 : 하드웨어(전, /RF, 마이크로파), 서비스(전문; 양자 인력 개발/양자 하드웨어 교육)
Qubitekk* ('23년 양자시장 진입)	양자 네트워크용 하드웨어와 소프트웨어 설계, 구축 및 통합, 양자산업 지식 공유 • 기업소개 : 양자 네트워크, 검출기, Entanglement Academy, 엔드투엔드 양자 네트워크와 • 주요제품 : 얽힌 광자 소스, 단일 광자 검출기 및 일치 계수기 • 홈페이지 : https://www.qubitekk.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 소프트웨어(일반), 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구/씽크 탱크), 실사용자(일반)
Qubits Ventures (23)	• 기업소개 : Pre-seed venture fund • 홈페이지 : https://www.qubitsventures.com
QuEra Computing*	• 기업소개 : 중성 원자 기반 양자컴퓨팅 제공 최적화, 시뮬레이션, 재료, 제약, 양자컴퓨터 등 확장 가능한 양자알고리듬 개발 및 공급 • 주요제품 : 양자컴퓨터, 양자알고리듬 • 홈페이지 : https://www..quera.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 실수요자(일반)
QuintessenceLabs	• 기업소개 : 사이버 보안, 키 관리 상호운용성 프로토콜을 준수하는 암호화 키 및 정책 관리 제품, 하드웨어 난수 생성기, 양자 키 분배 시스템 개발 및 기타 암호화 솔루션, 양자 사이버보안 제품 및 솔루션 제공 • 주요제품 : 양자 난수 생성기, 양자엔트로피 증강, 키 및 정책 관리자, KMIP 클라이언트 SDK, 솔루션, 양자 키 배포(qOptica), 일회용 패드 암호화 • 홈페이지 : https://www.quintessencelabs.com
Qulabs AI (23)	• 기업소개 : 양자 통신 및 양자컴퓨팅 기반 솔루션 제공 • 홈페이지 : https://qulabs.ai
QunaSys ('23년 양자시장 진입)	• 기업소개 : 알고리듬 개발을 통해 양자컴퓨팅 기술 구축 • 주요제품 : 양자 소프트웨어, 서비스형 플랫폼, 연구 컨설팅, 양자 교육 • 홈페이지 : https://www.qunasys.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 연구/씽크 탱크), 실사용자(일반), 응용/시스템, 소프트웨어

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Qunnect	• 기업소개 : 통신 인프라를 양자네트워크로 전환하기 위한 하드웨어 구축 • 주요제품 : 양자메모리, 양자얽힘소스, 양자가능장치 • 홈페이지 : https://int.quconn.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(제조), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스, 테스트/측정 등)
QuSecure (23)	• 기업소개 : 사이버 보안, 클래식 및 양자 복원력 보호, 암호화 민첩성, 제어 및 복합 소프트웨어 솔루션 제공 • 홈페이지 : https://www.qusecure.com
Raytheon Technologies* (RaytheonBBN)	• 기업소개 : 전담 Quantum 과학자팀 보유, 양자암호로 보호되는 매트로 네트워크 제공 • 홈페이지 : https://www.rtx.com
Resilient Entanglement (23)	• 기업소개 : 지능형 전력망 구축 • 홈페이지 : https://www.resiliententanglement.us
Rigetti Computing*	• 기업소개 : 양자컴퓨터와 초전도 양자프로세서 구축 통합 시스템, 양자클라우드 서비스 플랫폼(하이브리드 클라우드에 통합 가능), 양자파운드리 서비스(공정 설계 키트 제조), 초전도 양자집적회로 설계 레이아웃 • 주요제품 : 양자클라우드 서비스, 양자파운드리 서비스 • 홈페이지 : https://www.rigetti.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 서비스(제조)
Riverlane	• 기업소개 : 오류 수정 양자컴퓨터용 초저 지연 운영 체계 Deltaflow.OS 구축, 양자-고전 하이브리드 알고리듬 가속화, 하드웨어 R&D 촉진 • 주요제품 : 양자운영 시스템 • 홈페이지 : https://www.riverlane.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반), 실수요자(일반)
Rydberg Technologies*	• 기업소개 : 차세대 감지, 측정, 이미징 솔루션용 양자기술 연구개발 개발, 무선 주파수, 마이크로/밀리미터파, 테라헤르츠 전기장용 양자센서를 위한 원자 증기 셀, 양자 RF 감지 기술, • 주요제품 : EMC 테스트, RF 회로 설계 원자 증기 셀, 광학 주파수 트래커, Rydberg RF 장 프로브, 원자 RF 측정 서비스 • 홈페이지 : https://www.rydbergtechnologies.com
Safe Quantum	• 기업소개 : 양자안전 엔터티 전략, 스트레스 테스트 및 문제 해결 크립토 애자일 전략, 개념 증명 데모 설계 • 주요제품 : 시장 진입 및 퇴출 전략, 기술 및 사업 계획, 서비스로서의 기업가, 전문가 증인 서비스 • 홈페이지 : https://www.safequantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(투자, 법률, 컨설팅, 전문서비스)
SandboxAQ (23)	• 기업소개 : Alphabet Inc.로부터 구성되어 2022년 자본 지원받는 독립적인 회사. 엔터프라이즈 SaaS, AI와 양자 기술(AQ) 결합 솔루션 제공 • 주요제품 : 양자 센싱, 양자 S&O, Post-Quantum Cryptography • 홈페이지 : https://www.sandboxaq.com • 주요시장 : 서비스(투자, 전문 서비스, 연구/씽크 탱크, SaaS), 소프트웨어(일반, 금융서비스, 통신, 재료 ,과학, 네비게이션, 제약, 의료, 공공 부문), 실사용자(일반), 하드웨어(레이저, 광학/포토닉스, 테스트/측정, 자력계), 응용/시스템 (통신/네트워크, 센서)
Scout Ventures*	• 기업소개 : 보안 응용 프로그램 딥 테크 투자자 • 주요제품 : 양자통신 컴퓨팅과 암호화 • 홈페이지 : https://www.scout.vc • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터), 서비스(투자)
Seeqc*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 • 주요제품 : 양자컴퓨팅, 확장성 • 홈페이지 : https://www.seeqc.com

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Single Quantum (23)	• 기업소개 : 초전도 나노와이어 단일 광자 검출기(SNSPD) • 홈페이지 : https://singlequantum.com
Sivananthan Laboratories*	• 기업소개 : 스마트 국가 안보, 산업 모니터링, 공중 보건 및 재생 에너지용 외선 센서 • 주요제품 : 지능형 적외선 센서 및 이미저 • 홈페이지 : https://www.sivananthanlabs.us
SK Telecom (23)	• 기업소개 : 양자통신 관련 기술 개발 및 제공 • 홈페이지 : https://sk.com
SRI International*	• 기업소개 : QED-C 관리하는 미국 비영리 연구 기관 • 주요제품 : 과학 연구소, 소프트웨어, 인공지능 • 홈페이지 : https://www.sri.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 센서), 하드웨어(광학/포토닉스, 테스트/측정), 서비스(컨설팅, 연구/싱크 탱크), 기타(QED-C management team), 소프트웨어(일반)
Stable Lasers*	• 기업소개 : 주파수 안정화 레이저용 부품 및 시스템 공급, 저주파 드리프트 내재 완전 통합형 경량 이동식 랙마운트 시스템 설계 • 주요제품 : 완전 시스템, Fabry-Perot 캐비티, 특수 하우징, 캐비티 하우징, 저잡음 레이저 주파수 전자 모듈 • 홈페이지 : https://www.tablelasers.com
Strangeworks (23)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅의 인간화, 양자기술 통합 가속화 지원 • 주요제품 : 소프트웨어 • 홈페이지 : https://strangeworks.com • 주요시장 : 실수요자(일반), 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반)
StratCon-Global*	• 기업소개 : 양자기술 평가 • 홈페이지 : https://www.stratconglobal.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크 등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 투자, 전문 서비스 등), 하드웨어, 실수요자
Sumitomo (SHI) Cryogenics*	• 기업소개 : 극저온 장비 제조, 2002년 IGC-APD Cryogenics, Inc. 인수 • 주요제품 : 압축기, 크라이오 쿨러, 크라이오 펌프 • 홈페이지 : https://www.shicryogenics.com
Swain Techs	• 기업소개 : 의료 IT, 자동화, 소프트웨어/시스템 엔지니어링 분야 기술 솔루션 제공, 모건주립대학교와 인공지능, 양자컴퓨팅 및 블록체인 연구개발, National Quantum Literacy Network 일원 • 주요제품 : 인공지능, 기계 학습, 사이버 보안 • 홈페이지 : https://www.swaintechs.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터 등), 서비스(컨설팅, 전문 서비스), 소프트웨어, 실수요자
Tektronix	• 기업소개 : 테스트 및 측정 솔루션을 설계 및 제조 • 주요제품 : 오실로스코프 및 프로브, 분석기, Keithley 제품, 신호 발생기, 소스 및 공급 장치, 반도체 테스트 시스템, 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.tek.com
Terranet Ventures*	• 기업소개 : 사이버 보안 서비스, 양자컴퓨팅 응용 프로그램 관련 기술 투자 • 홈페이지 : https://www.terranetventures.com
The Chainblock Company (23)	• 기업소개 : 비즈니스 공급망 및 서비스 네트워크의 약점과 취약성 해결을 위한 다양한 서비스 제공 • 홈페이지 : https://thechainblockcompany.com
The Quantum Insider	• 기업소개 : 양자기술 관련 뉴스와 데이터 제공 및 이해 관계자 연결 • 주요제품 : 양자시장 인텔리전스, 양자데이터, 양자뉴스, 양자연구, 양자컨설팅/마케팅, 양자콘텐츠 • 홈페이지 : https://www.thequantuminsider.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅 등)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
TOPTICA Photonics* (TOPTICA-USA)	• 기업소개 : 레이저 솔루션, 양자응용 고급 레이저 개발, 실제 응용 프로그램으로 양자기술 전환 • 주요제품 : 레이저 랙 시스템, 주파수 빗, 파장 미터, 가변 다이오드 레이저, 레이저 제어 및 잠금 전자 장치 • 홈페이지 : https://www.toptica-usa.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 제조), 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 테스트/측정), 실수요자
Toshiba Corp	• 기업소개 : 양자암호화용 제품 및 통신 제품 출시 예정
Triton Systems	• 기업소개 : 글로벌 비즈니스 벤처기업 • 홈페이지 : 음향, 인공지능, 엔지니어링 재료, 로봇 공학 및 변조 방지, 파괴적 기술 및 재료 설계 • 주요시장 : https://www.tritonsystems.com
Unitary Fund (23)	• 기업소개 : 양자 기술 생태계 조성 지원 501©(3) 비영리 단체 • 홈페이지 : https://unitary.fund
Universities Space Research Association*	• 기업소개 : NASA 요청으로 1969년 설립된 비영리 민간 기업, 100여개 대학, 정부, 기타 기관과 협력해 우주 과학 및 기술 발전 및 교육 촉진 프로그램 운영, 양자컴퓨팅 이론, 알고리듬, 벤치마킹 기술 등 보유 • 홈페이지 : https://riacs.usra.edu/quantum
US Advanced Computing Infrastructure Inc.*	• 기업소개 : 양자어닐링 적용, 양자컴퓨팅 사용 비즈니스 컨설팅, 소프트웨어 통해 솔루션 제공, 투자 고문, 미국 주식 포트폴리오 식별 • 주요제품 : 시카고 퀀텀 넷 스코어, 양자프로젝트 서비스, 포트폴리오 최적화 솔루션, 양자전략 워크숍 • 홈페이지 : https://www.chicagoquantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문서비스)
veetsTech (23)	• 홈페이지 : https://veetstech.com
Verizon	• 기업소개 : 네트워크에 양자기술 사용 보안, 네트워킹 및 통신과 관련 연구 • 홈페이지 : https://www.verizon.com
Vescent Photonics*	• 기업소개 : 양자가능 레이저 기술 제조 및 판매, 연구/개발 가속화를 위한 사용 용이성 및 배포된 시스템을 위한 견고한 턴키 작동용 설계 • 주요제품 : 전개 가능한 광 주파수 빗, 레이저 잠금 상자, 원자 포획/냉각 레이저, 레이저 전류 컨트롤러, 오프셋 위상 잠금 서보 (Servo) • 홈페이지 : https://www.vescent.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 응용/시스템(타이밍), 실수요자(일반)
Vexlum (23)	• 기업소개 : Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers • 홈페이지 : https://vexlum.com
Wells Fargo*	• 기업소개 : 양자얽힘, 양자센서, 양자통신/보안, 및 양자컴퓨팅 연구 및 개발 • 주요제품 : 양자안전금융 환경 • 홈페이지 : https://www.wellsfargo.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(투자, 전문 서비스, 연구 /싱크 탱크), 소프트웨어(일반), 실수요자(일반)
Xairos*	• 기업소개 : GPS 타이밍 대체용 글로벌 타이밍 서비스 구축 • 주요제품 : 양자시계 동기화, PNT, 우주 기반 양자통신 • 홈페이지 : https://www.xairos.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크)

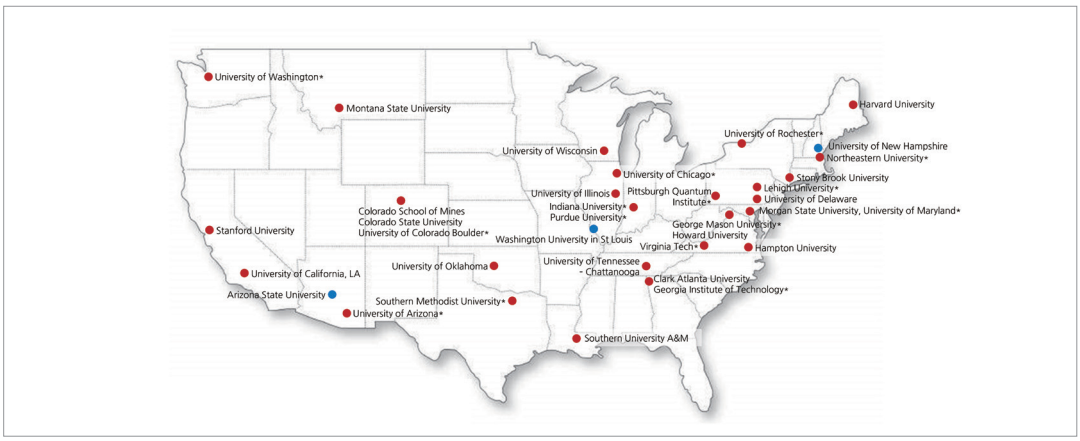
업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Xanadu (23)	• 기업소개 : 포토닉 플랫폼 이용 양자컴퓨터 구축, 오픈 소스 패키지(Strawberry Fields, PennyLane) 제공, 호스팅 서비스 실행 • 주요제품 : Xanadu 양자 클라우드 서비스, PennyLane 소프트웨어 라이브러리, 양자컴퓨터, 양자 기계 학습, 포토닉스 • 홈페이지 : https://www.xanadu.ai • 주요시장 : 서비스(연구/싱크 탱크), 실사용자(일반), 소프트웨어(일반), 응용/시스템(양자컴퓨터), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스)
XMA Corp*	• 기업소개 : 극저온 제품 설계, 최첨단 열화 방법 비초전도성 재료,, 자체 저항 칩 제조 기능 맞춤형 설계 • 주요제품 : 고밀도 감쇠기 블록, DC-65GHz 종단, IR 필터, SMP 및 SMPM 감쇠기, SMA, Tefline 어댑터 • 홈페이지 : https://www.xmacorp.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정), 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 서비스(제조, 연구/싱크 탱크), 실수요자
Young, Basile, Hanlon & MacFarlane*	• 기업소개 : 지적 재산 관리 서비스 제공 • 주요제품 : 특허 포트폴리오 관리, 지식재산 컨설팅 • 홈페이지 : https://www.youngbasile.com • 주요시장 : 서비스(법률)
Zapata AI*	• 기업소개 : 복잡한 계산 문제를 해결하기 위한 양자 소프트웨어 플랫폼 Orquestra® 개발, 양자-고전 Stack 통합 및 자동화로 화학, 금융, 물류, 제약, 엔지니어링 및 재료 문제 해결 • 주요제품 : Orquestra, 양자워크숍 • 홈페이지 : https://zapata.ai/ • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 실수요자
Zettaflops*	• 기업소개 : 고급 컴퓨팅 아이디어를 위한 리소스 제고 (2007년 워크숍 이후 활동하지 않음) • 주요제품 : Petaflops 슈퍼컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.zettaflops.org
Zurich Instruments (23)	• 기업소개 : 2021년 7월 Rohde & Schwarz에 인수, 양자컴퓨팅 제어 시스템 개발, Lock-in 증폭기 및 임피던스 분석기 등 계측 장비 제공 • 홈페이지 : https://www.zhinst.com
Zyvex Labs*	• 기업소개 : 주사 터널링 현미경(STM) 기반 수소 탈패시베이션, 리소그래피 및 관련 패턴 전사 기술 개발, 양자컴퓨팅 백플레인에 사용가능한 극저온 작동 고성능, 저잡음 아날로그 장치 탐구 ZyVector STM 컨트롤러 사용기관 : 메릴랜드 대학교, 샌디아 국립 연구소, 일리노이 대학교, 뉴사우스웨일즈 대학교, 칼리지 런던 대학교 • 주요제품 : 원자 정밀 리소그래피, 패턴 전사, 제작 서비스, 나노 포지셔닝 기술, ZyVector STM 컨트롤러 • 홈페이지 : https://www.zyvexlabs.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 원자적으로 정밀한 제조), 서비스(제조), 소프트웨어(나노포지셔닝을 위한 제어 시스템)

* https://quantumconsortium.org 후원금 지원(74개 기업, 2023.09) (2022년 대비 20개 감소)

QED-C 회원으로 가입한 대학교는 [그림 V-1-9]에 표시한 것처럼, 2023년 9월을 기준으로 2022년보다 6개의 대학교가 증가해 총 43개교이며 주로 동부에 분포하고 있다. 2023년도에 탈퇴한 대학교는 5개교로 오번 대학교, 노스캐롤라이나 주립대학교, 노스이스턴 대학교, SUNY 폴리텍크닉, 텍사스

T&M 대학교이고, 2023년에 신규 가입한 기관은 총 10개 기관으로 아리조나 주립대학교, 뉴햄프셔대학교, 워싱턴 대학교-St. Louis 등 3개 대학교와 덴마크 국립 계측 연구소, 미국 Fluor Marine 해군 핵 연구소, 일본 정보통신연구기관(NICT), 인도 SN 보스 국립 기초 과학 센터, 네덜란드 응용과학연구기구(TNO), 영국 국립물리연구소, 핀란드 VTT 기술연구소 등 7개 연구소가 학계 회원기관으로 가입하였다. 2022년과는 달리 미국 내의 연구기관 뿐만 아니라 세계 각국의 연구기관이 가입한 것이 특징이다. 2022년과 마찬가지로 서부는 워싱턴 대학교, 스탠퍼드 대학교, 캘리포니아 대학교, UCLA, 아리조나 주립대학교와 아리조나 대학교만 가입하고 있다. 아리조나 주립대학교, 클락애틀랜타 대학교, 모간주립 대학교, 남부감리교 대학교, 서던 대학교 A&M, 애리조나 대학교, 테네시 대학교, 뉴햄프셔 대학교는 양자연구를 수행하는 학과나 연구 센터가 확인되지 않으며, 양자분야 강의 제공, 개별적인 연구, 타 대학교의 양자연구그룹이나 센터의 참여 교수로 활동하는 것이 확인되고 있다.

그림 Ⅵ-1-9 QED-C 참여 대학교 (미국, 2022년 기준)



〈표 Ⅵ-1-2〉는 회원 대학교명과 대표하는 교내 양자분야 연구 센터 또는 실험실 명칭과 홈페이지를 보여준다.

표 Ⅵ-1-2 QED-C 회원 대학 및 연구소 내 양자 관련 기관

대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
아리조나 주립대학교 (23)	• 관련조직 : quantum research collaborative 존재, 별도 조직 확인되지 않음 • 홈페이지 : https://www.asu.edu (Arizona State University)
클락애틀랜타 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://www.cau.edu(Clark Atlanta University)
콜로라도 스쿨 오브 마인 (Colorado School of Mines)	• 관련조직 : Technology's Quantum Leap Mines Quantum Engineering Program 운영 및 야금재료공학과, 전자공학과, 물리학과, 응용 수학 및 통계학과 17명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantum.mines.edu

대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
콜라라도 주립 대학교	• 관련조직 : 물리학 및 컴퓨터 과학과 양자분야 교수 일부 소개 • 홈페이지 : https://www.colostate.edu(Colorado State University)
Danish Fundamental Metrology (23)	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://dfm.dk(DFM)
조지 메이슨 대학교* (George Mason University)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering Center : 컴퓨터 과학과, 전자 및 컴퓨터 공학과, 물리학과, 수학과, 물리학 및 천문학과, 기계공학과 등 15명 교수 참여 • 홈페이지 : https://qsec.gmu.edu
조지아 공과 대학교* (Georgia Institute of Technology)	• 관련조직 : Georgia Tech Quantum Institute : 갇힌 이온 물리학 조사, 미세 가공된 이온 트랩 개발, 양자아키텍처 모델링 및 원자 기반 센서 개발 연구 추진 • 홈페이지 : https://gtqi.gatech.edu
햄프턴 대학교	• 관련조직 : IBM-HBCU Quantum Center : 2020년 9월 25일 IBM 1억 투자 • 홈페이지 : https://www.hamptonu.edu(Hampton University)
하버드 대학교 (Harvard University)	• 관련조직 : Harvard Quantum Initiative : 물리학과, 응용 물리학과, 컴퓨터 과학과, 재료 과학과, 전자 공학과, 화학과, 응용 수학과, 수학과, 화학 생물학과, 에너지학과 43명 교수 소속 • 홈페이지 : https://quantum.harvard.edu
하워드 대학교	• 관련조직 : IBM-HBCU Quantum Center • 홈페이지 : https://www.howard.edu(Howard University)
인디애나 대학교 (Indiana University*)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering Center : 양자계산, 양자암호화, 보안 통신 및 고정밀 측정 및 물리학과, 수학과, 화학과, 컴퓨팅 및 공학과, 심리학 및 뇌과학과, 지능 시스템 공학과 25명 교수 참여 • 홈페이지 : qsec.sitehost.iu.edu
리하이 대학교* (Lehigh University)	• 관련조직 : Quantum Computing and Optimization Lab : 복잡한 최적화 문제를 해결하기 위한 새로운 양자컴퓨팅 방법론 개발 • 홈페이지 : https://quantum-computing.lehigh.edu
몬타나 주립 대학교 (Montana State University)	• 관련조직 : 광학 및 양자시스템(물리학과) : 공중 부양 광역학, 양자물질 및 나노 광학, 신호 처리, 메모리 및 레이저를 위한 초안정 레이저 및 재료, RF 포토닉스, 초고속 비선형 광학 및 홀로그래피에 관한 연구 • 홈페이지 : https://physics.montana.edu
모간주립 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://www.morgan.edu(Morgan State University)
Naval Nuclear Laboratory– Fluor Marine (23)	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://navalnuclearlab.energy.gov
NICT (23)	• 관련조직 : 양자정보통신 연구 • 홈페이지 : https://www.nict.go.jp
노스웨스턴 대학교* (Northwestern University)	• 관련조직 : Initiative at Northwestern for Quantum Information Research and Engineering : 물리학과, 천문학과, 재료공학과, 화학과, 전자공학 및 컴퓨터 공학과 40여 명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantum.northwestern.edu
피츠버그 양자협회* (Pittsburgh Quantum Institute)	• 관련조직 : 피츠버그 지역 양자분야 연구 통합 조직 : 피츠버그 대학교(University of Pittsburgh), 카네기 멜런 대학교(Carnegie Mellon University), 듀케인 대학교(Duquesne University)의 물리학, 화학, 공학, 컴퓨터 과학, 비즈니스 및 과학 철학 분야 소속 100여 명 교수 참여 • 홈페이지 : https://www.pqi.org

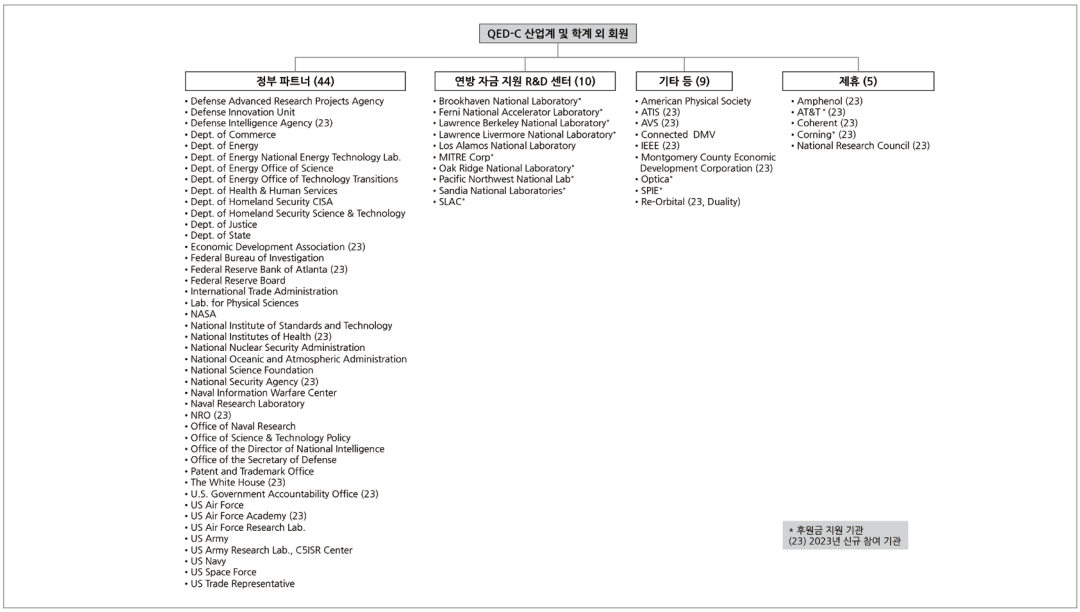
대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
퍼듀 대학교* (Purdue University)	• 관련조직 : • Purdue Quantum Science and Engineering Institute : 단일 원자/분자 규모의 물질-물질 및 빛-물질 간 상호작용, 초저온 원자, 다물질 역학, 원자 앙상블의 간섭의 일시적인 효과, 고체 상태 양자장치, 양자 나노포토닉스 등 53명 교수 참여 • Birck Nanotechnology Center : 양자특성 확인 가능 실험실 • 물리학부 : 헬륨 재포획 및 액화 가능 시스템 보유 • 홈페이지 : https://www.purdue.edu/discoverypark/quantum
SN Bose National Center for Basic Sciences (23)	• 관련조직 : 양자 역학 및 양자 통계학 발전 기념 S.N. Bose 교수 업적 기념 설립 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.bose.res.in
남부 감리교 대학교*	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.smu.edu(Southern Methodist University)
서던 대학교 A&M	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.subr.edu(Southern University A&M)
스탠퍼드 대학교 (Stanford University)	• 관련조직 : Stanford Quantum Computing Association : 교수진 16명 및 SystemX Alliance, Quantum Science and Engineering, QC ware, Moonshot Factory, rigetti, Microsoft, IPB, Google, 및 qBraid과 협력 관계 유지 • 홈페이지 : https://qc.stanford.edu
스토니 브룩 대학교 (Stony Brook University)	• 관련조직 : SUNY Center of Quantum information science at Long Island : 양자통신 분야 연구 집중, 물리학과 및 컴퓨터 과학과 8명 교수 참여 • 홈페이지 : https://stonybrook.edu/cqis
TNO (23)	• 관련조직 : QuTech Research Institute • 홈페이지 : https://www.tno.nl/nl(The Netherlands Organization of Applied Scientific Research)
NPL(23)	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://npl.co.uk(UK National Physical Laboratory)
아리조나 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.arizona.edu(University of Arizona)
캘리포니아 대학교, LA (University of California-LA)	• 관련조직 : UCLA Center for Quantum Science and Engineering : NRT AIF-Q 교육 제공, 물리천문학부, 전자컴퓨터공학부, 화학과, 화학 및 생화학과, 토목환경공학과, 수학과, 신소재 공학과 24명 교수 참여 • 홈페이지 : https://cqse.ucla.edu
시카고 대학교 (University of Chicago)	• 관련조직 : Chicago Quantum Exchange* : 양자정보과학 관련 교육 및 공동 연구 수행을 위해 연구자자와 기관 연결 • 홈페이지 : http://www.chicagoquantum.org
	• 관련조직 : Quantum Engineering : 분자공학부 40명 이상의 교수진 참여 양자중첩 및 얽힘 이용 변형 기술 개발 • 홈페이지 : https://pme.uchicago.edu/themes/quantum-engineering
	• 관련조직 : Quantum Information Science and Engineering Network (QISE-NET) : 시카고 대학교와 하버드 대학교가 공동 운영 및 교육 프로그램 운영 • 홈페이지 : http://qisenet.uchicago.edu
	• 관련조직 : James Franck Institute : 재료 과학, 응집 물질 물리학, 물리 화학, 원자, 분자 및 광학(AMO) 물리학이 교차하는 분야 연구 수행 • 홈페이지 : http://jfi.uchicago.edu

대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
콜로라도 볼더 대학교* (University of Colorado Boulder)	• 관련조직 : CUbit Quantum Initiative : 학제 간 연구 및 교육 수행 • 홈페이지 : http://www.colorado.edu/initiative/cubit
	• 관련조직 : A Joint Institute of UC Boulder and NIST(JILA) : 콜로라도 볼더 대학교와 NIST의 공동 연구소로 설립, 노벨상 수상자인 Eric Cornell과 John Hall을 포함한 물리학과 35명 교수 참여 • 홈페이지 : http://jila.colorado.edu/research/quantum-information-science-technology
	• 관련조직 : Quantum Engineering Initiative : 2021년 설립된 큐비트 양자 이니셔티브 • 홈페이지 : http://www.colorado.edu/engineering/quantum-engineering-initiative
댈라웨어 대학교 (University of Delaware)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering : 큐비트 제어 가능 기계 제작 방법, 큐비트 연산 변환 가능 프로그래밍 또는 기계 언어 개발을 위해 약 35명 교수 참여 • 홈페이지 : https://qse.udel.edu
일리노이 대학교 (University of Illinois)	• 관련조직 : Illinois Quantum Information Science and Technology Center(IQUIST) : 항공우주 공학, 화학, 컴퓨터 과학, 전자 및 컴퓨터 공학, 재료 과학 및 공학, 수학, 기계 과학 및 공학, 철학, 물리학 분야 65명 교수 참여, Chicago Quantum Exchange 회원 • 홈페이지 : https://iquist.illinois.edu
메릴랜드 대학교* (University of Maryland)	• 관련조직 : Quantum at Maryland : 양자컴퓨터, 초 보안 양자네트워킹 및 양자물질 연구 관련 200여 명 과학자 및 엔지니어 참여, NIST, Lockheed Martin, IonQ 등 공동 연구 협력, Mid-Atlantic Quantum Alliance와 협력 • 홈페이지 : https://quantum.umd.edu
뉴햄프셔 대학교 (23)	• 관련조직 : 양자 및 입자 물리학과 참여 • 홈페이지 : https://www.unh.edu (University of New Hampshire)
오클라호마 대학교 (University of Oklahoma)	• 관련조직 : Center for Quantum Research and Technology : 양자센싱, 양자정보, 합성 상관 양자시스템 및 양자재료 분야 연구를 위해 원자, 분자 및 광학 물리학과와 응집 물질 물리학과 교수 15명 참여 • 홈페이지 : https://www.ou.edu/cqrt
로체스터 대학교 (University of Rochester*)	• 관련조직 : Quantum Information and Technology : 전자 사이에 양자역학적 상호작용 생성 방법 탐구를 위해 15명의 교수 참여 • 홈페이지 : https://www.rochester.edu/ccqo/quantum
테네시 대학교-Chattanooga	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : ttps://www.utk.edu(University of Tennessee-Chattanooga)
워싱턴 대학교* (University of Washington)	• 관련조직 : UW QuantumX : 양자응용 및 기초 연구 수행을 위해 물리학과 17명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantumx.washington.edu
위스콘신 대학교*	• 관련조직 : Wisconsin Quantum Institute : 양자센서, 양재재료, 양자컴퓨팅 및 네트워킹 연구를 위한 26명의 교수 참여 • 홈페이지 : https://wqi.wisc.edu(University of Wisconsin-Madison)
버지니아 공과 대학교* (Virginia Tech)	• 관련조직 : Quantum Information Science and Engineering : 양자역학을 실제 응용 분야에 적용하기 위한 연구를 위해 31명 교수 참여 • 홈페이지 : https://provost.vt.edu/destination_areas/qise.html
VTT Technical Research Centre (23)	• 관련조직 : 양자기술예측, 양자컴퓨팅, 소프트웨어, 하드웨어, Post-quantum 암호 연구 • 홈페이지 : https://www.vttresearch.com/fi
워싱턴 대학교 -St. Louise (23)	• 관련조직 : Center for Quantum Leaps에 34명의 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantumleaps.wustl.edu/(Washington University in St Louis)

* https://quantumconsortium.org 후원금 지원(15개 대학교 및 연구소, 2023)*

QED-C의 회원으로 가입한 기관은 [그림 VI-1-10]에서 보는 것처럼 연방 자금 지원 R&D센터(Federally Funded R&D Centers) 및 해당 관리자 10개 기관, 정부 파트너 44개 기관, 5곳의 제휴 기관과 전문 학회 9곳 등 총 68개 기관이 참여하고 있다. 2022년 대비 18개 기관이 늘어났는데, 이 가운데 정부 파트너 기관이 9개로 가장 많은 증가세를 보이고 있다. 작년과 비교하여 인상적인 것은 백악관이 정부 파트너로 참여하고 있음을 공표한 것이다. 이 외의 Defense Intelligence Agency, Economic Development Association, Federal Reserve Bank of Atlanta, National Institutes of Health, National Security Agency, NRO, U.S. Government Accountability Office, US Air Force Academy가 새로이 회원기관으로 이름을 올리고 있다. 또한 양자시장에서 탈퇴한 AT&T, Coherent, Corning은 제휴 기관으로 참여하고 있으며, 기타 기관도 작년 대비 5개 기관이 증가하였다. 연방 자금 지원 R&D 센터는 2022년과 동일하게 10개 기관을 유지하고 있다. 이는 양자기술 및 상업화를 추진하고 있는 다른 여러 나라와 비교해도 매우 큰 규모로, 미국이 양자기술 분야에 상당한 관심이 있음을 보여주는 일례라고 할 수 있다.

그림 VI-1-10 QED-C 정부 파트너 및 연방 자금 지원 R&D 센터 회원



• 브룩헤이븐 국립연구소(Brookhaven National Laboratory, BNL):[6]

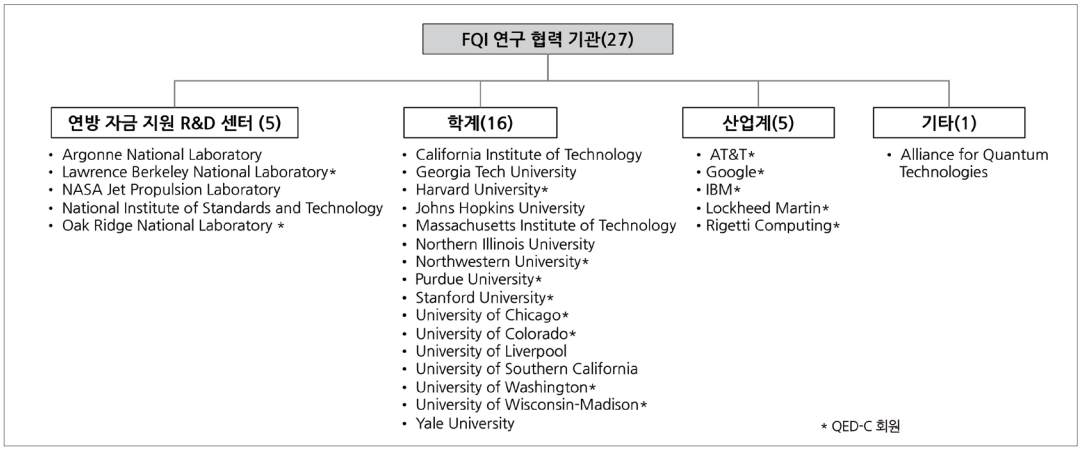
스토니브룩 대학교와 함께 양자인터넷의 비전을 현실로 구현해 안전한 온라인 통신이 가능하도록 협력하고 있다. 약 158km에 걸쳐 두 기관을 연결하는 미국에서 가장 긴 양자네트워크를 구축했는데, 최종 목표인 연구소와 뉴욕시를 연결하기 위해 양자중계기 프로토타입을 개발하고 있다.

6) https://bnl.gov/science/quantum.php

• 페르미 국립가속기연구소(Fermi National Accelerator Laboratory, Fermilab):[7]

Fermilab 양자연구소(Fermilab Quantum Institute, FQI)는 고에너지 물리학 응용 프로그램을 발전시키면서 양자정보과학 연구 및 개발을 추구하고 있다. 이를 위해 새로운 양자기능을 활용하고 자기장의 크기 및 방향 정밀 측정, 위상 변이 측정, 원자시계 앙상블과 같은 애플리케이션을 배포하기 위해 노력 중이다. FQI는 양자컴퓨팅과 양자과학 및 기술의 미래를 발전시키고 형성하기 위해 학술 기관, 산업계 및 국립 연구소를 포함한 27개 다른 조직과 관계를 맺고 양자정보, 포토닉스, 재료 과학 등에 대해서 협업을 진행하고 있다. 협력관계를 유지하고 있는 기관은 [그림 Ⅵ-1-11]과 같으며, 일부 기관은 QED-C 회원으로 동시에 등록되어 있다.

그림 Ⅵ-1-11 페르미 국립연구소 양자연구소 협력 기관

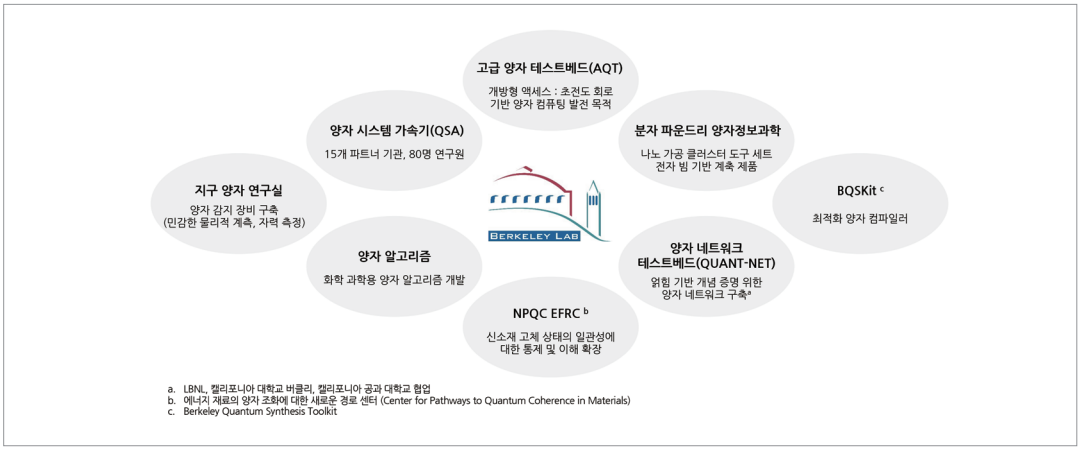


• 로렌스버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL):[8]

[그림 Ⅵ-1-12]에서처럼 LBNL의 다양한 연구 센터는 QuantISED 퀘스트(암흑 물질 입자 측정 센서 개발), 양자재료(강한 상관관계가 있는 물질에 빛을 비추어 그 속성 조사), ALS(새로운 합성 물질과 그 전자, 스핀, 화학적, 물리적 특성 개발 및 이해), 대규모 큐비트 통합 및 광자 변환을 위한 초전도 구조(마이크로파 광자와 고체 물질 간 변환, 초전도 필름/인터페이스의 얽힘 생성 및 특성 향상), NERSC(Perlmutter 사용 양자정보과학 장치 및 기술 개발), 및 양자변환 향상을 위한 AI 지원 제어(광신호를 양자연결로 변환하는 효율성 향상) 등을 연구하고 있다.

7) https://quantum.fnal.gov
8) https://quantum.lbl.gov/

그림 Ⅵ-1-12 로렌스 버클리 국립 연구소 양자기술 관련 연구 그룹



• 로렌스 리버모어 국립연구소(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL):[9]

LLNL은 차세대 양자컴퓨팅 및 감지시스템의 개발을 가능하게 할 새로운 솔루션을 모색하고 있다. 솔루션으로 양자특성을 가진 물질의 합성 및 특성화, 양자시스템에서 잡음 및 결맞음의 근원에 대한 근본적인 이해 및 제어 개발, 양자 및 고전 제어, 센싱 및 컴퓨팅 요소 간의 인터페이스에 대해 고려하고 있다.

• 로스 알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory, LANL):[10]

2005년에 연구 센터로 설립된 LANL 양자연구소(Quantum Institute)는 1998년에 핵자기 공명 기술을 사용해 트리클로로에틸렌(Trichloroethene) 분자 내에 액체 기반 양자컴퓨터의 프로토타입을 만들었고 이를 발전시켜 고체 장치로서 양자컴퓨터를 구성하기 위해 호주 뉴사우스웨일스 대학교, 캘리포니아 공과대학교, 메릴랜드 대학교 등과 고체 매트릭스 또는 격자의 개별 원자를 조작할 수 있는 기술을 탐구하고 있다. 1999년에 약 50km 길이의 광섬유를 통해 양자키를 보내는 것에 성공한 후, 약 16km의 거리에서 공기를 통해 정보를 전송하기 위해 편광된 광자를 사용하는 이동 가능한 독립형 자유 공간 양자암호화 시스템을 개발했다. 이 시스템은 신속하게 설치할 수 있고, 시간대와 상관없이 전송이 가능한 것으로 알려져 있다. 현재 위성과 지상국 사이의 수백 km 거리에 양자키를 전송하기 위해, 지구 궤도 위성에 탑재할 수 있는 더 작은 크기의 시스템을 개발하고 있다.

9) https://quantum.llnl.gov
10) https://quantum.lanl.gov

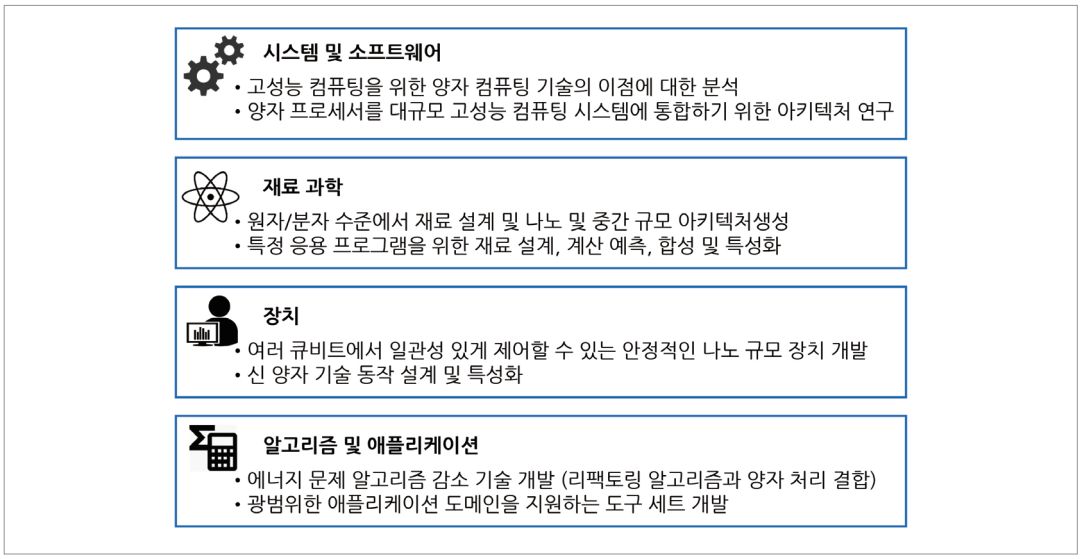
• MITRE Corp.:

비영리 운영 기관이며 20년 이상 양자연구 프로그램을 진행해 온 MITRE의 양자정보과학 그룹(MITRE Quantum Information Science Group)[11]은 고해상도를 유지하면서도 센서의 하드웨어 크기와 무게를 크게 줄여줄 가능성을 발견했다. 한편 매사추세츠 공과 대학교 Dirk Englund 교수 및 샌디아 국립연구소 Matt Eichenfield 박사 등 전문가가 포함된 MITRE 양자 Moonshot[12]팀의 리더인 Gerald Gilbert 박사는 극저온에서 세계 최초의 고속 프로그래밍 가능 광자플랫폼 달성을 공식적으로 알렸다.

• 오크리지 국립연구소 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL):[13]

양자컴퓨팅 연구소(Quantum Computing Institute)는 소재 제조 및 특성화, 고성능 컴퓨팅, 전기 시스템 및 센서에 대한 뛰어난 ORNL의 보유 기술을 활용해 CMOS 기술을 뛰어넘기 위한 아이디어와 플랫폼 개발, 전산공학부 양자정보과학 섹션(Computational Sciences and Engineering Division Quantum Information Science Section)[14]은 에너지, 보안 및 과학적 발견에 대한 미국의 우선순위를 해결, 양자통신 및 네트워킹 그룹은 양자 키 배포 기술 개발을 통해 미국 주요 인프라의 사이버 보안을 개선, 양자전산과학 그룹은 양자프로세서를 활용할 수 있는 고급 도구 및 기술 연구, 양자컴퓨팅 및 센싱 그룹은 양자의 이점을 입증하는 작업을 수행하고 있다.

그림 VI-1-13 오크리지 국립 연구소 양자 연구



11) https://mitre.org/research/technology-transfer/technology- licensing/quantum-information-science
12) https://mitre.org/quantum-moonshot
13) https://quantum.ornl.gov
14) https://ornl. gov/section/quantum-information-science

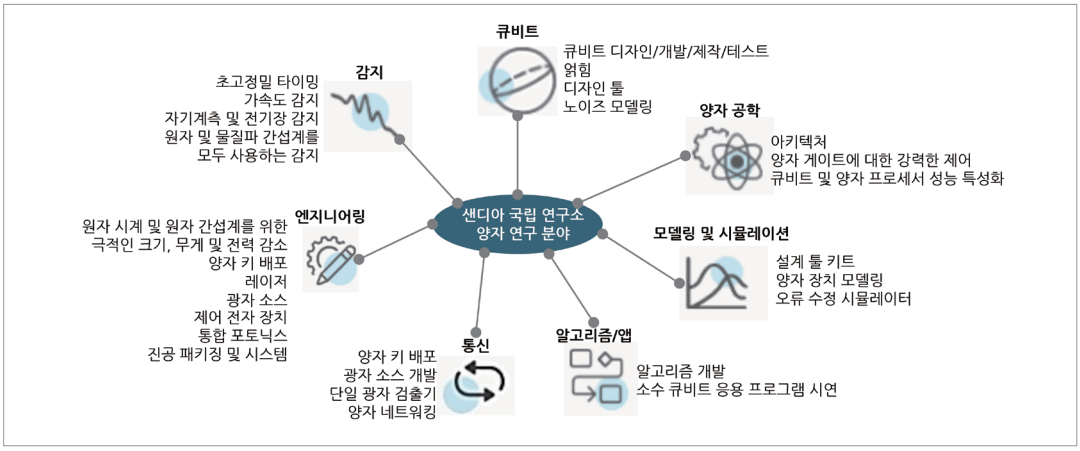
• 태평양 북서부 국립연구소 (Pacific Northwest National Lab, PNNL):[15]

화학, 재료 과학 및 에너지 복원력 부분의 양자컴퓨팅, 시뮬레이션, 통신 및 감지 발전을 위한 연구를 핵심으로 삼고 있으며, 초정밀 재료로 특성화된 초전도 양자컴퓨팅 장치를 개발하는 것으로 목표로 삼고 있다. Microsoft, 워싱턴 대학교, PNNL이 공동으로 설립한 노스웨스트 양자연합(Northwest Quantum Nexus, NQN)[16]은 최근 워싱턴 주립대학교와 IonQ의 NQN 회원 자격을 승인했다. QED-C는 PNNL이 주도하는 Q4NS 국가안보 양자기술 자문위원회를 설립했다.

• 샌디아 국립연구소 (Sandia National Laboratories):[17]

양자정보과학 전체와 고유한 기술 영역인 마이크로 전자 공학 및 양자장치 제조, 나노 기술, 맞춤형 재료 및 고성능 컴퓨팅을 활용해 [그림 VI-1-14]에 기술한 것처럼 다양한 연구를 수행하고 있다. 전자기장을 적용해 이온 또는 라인을 분리하는 MEMS 규모의 표면 전극 이온 트랩을 설계 및 제작하고, 큐비트 시스템의 성능에 대한 실행 가능한 평가를 허용하는 게이트 세트 단층 촬영 및 기타 기술을 개발해 큐비트 특성화 분야를 선도하고 있다. 양자성능 연구실(Quantum Performance Lab, QPL)[18]은 개별 큐비트 및 다중 큐비트 프로세서를 평가하기 위해 게이트 세트 단층 촬영에 대한 참고로 사용되고 큐비트의 노이즈 및 오류를 특성화하고 성능을 정량화하기 위해 오픈 소스 pyGSTi 소프트웨어 패키지를 지원하고 있다.

그림 VI-1-14 샌디아 국립 연구소 양자기술 연구 분야



15) https://pnnl.gov/quantum-information-sciences
16) https://nwquantum.com
17) https://sandia.gov/quantum
18) https://qpl.sandia.gov

• SLAC 국립 가속기 연구소 (SLAC National Accelerator Laboratory, SLAC):[19)]

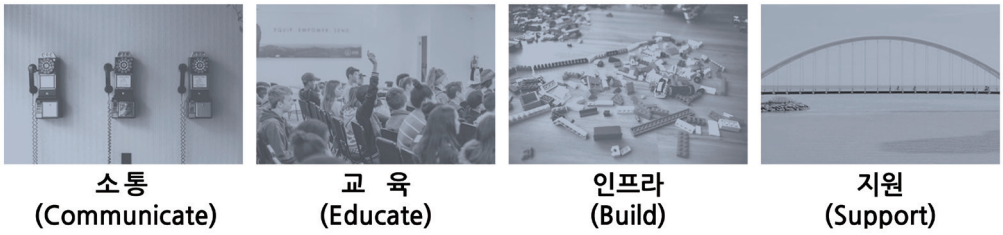
스탠퍼드 대학교와 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)는 양자기초, 아키텍처 및 기계 이니셔티브인 Q-Farm과 동반 관계를 맺었다. 약 50명 이상의 교수진과 연구원들이 큐비트 발견과 설계, 양자시스템 통합, 암흑 물질 탐지를 위한 양자센서, 초기 QIS 애플리케이션, 양자광자 네트워크 통합 플랫폼에 관한 연구를 수행하고 있다.

19) https://qis.slac.stanford.edu

제3절 캐나다 QIC (Quantum Industry Canada)

캐나다는 자국 내 양자기술의 상용화를 촉진하고 캐나다의 경제적 번영을 지속하기 위해 2020년 10월에 캐나다 양자산업협회(Quantum Industry Canada, QIC)를 출범했다. QIC는'세계적 수준의 양자기술 기초 연구를 기반으로 양자시장 초기 선점'이라는 사명 아래 설립됐다.[20] 창립 회원사로 D-Wave, 1Qbit, Xanadu, Zapata 등 24개의 양자기술 기업들이 참여했으며, 2022년 9월 기준으로 8개의 회원사가 추가돼 총 32개의 기업이 협력하였고, 2023년 9월 기준 5개 회원사가 추가되어 37개의 기업이 협력하고 있다. 매년 일정 비율로 증가하고 있으며 Anyon systems의 경우 미국 QED-C에서 탈퇴하고 QIC에만 회원 기업을 유지하는 것으로 보인다. QIC의 회원사는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 등 양자 全 분야를 아우르며, 캐나다에서 가장 상용화에 근접한 기업으로 구성됐다. 이들은 전문 지식과 전략적 시장 접근을 통해 캐나다의 양자 관련 기업을 적극적으로 지원하며, 자국의 양자기술 상용화를 글로벌 무대에 알리기 위해 주 정부 및 연방정부와 손잡고 있다.

그림 Ⅵ-1-15 캐나다 QIC 활동 목표



※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

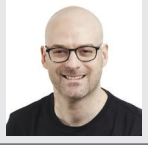
QIC의 모든 회원사는 크게 소통, 교육, 인프라, 지원 총 4가지를 목표로 협력한다. 먼저 소통의 경우 QIC는 전략적 파트너와 투자자, 수요 기관 등 글로벌 무대를 대상으로 캐나다의 양자기술 상용화 정도를 널리 알림으로써, 세계 양자시장에서의 점유율을 높이는 데에 방점을 찍었다. 교육적 측면으로는 양자기술에 대한 캐나다의 성장 기회를 홍보해 양자생태계 내 신생 기업의 유치를 촉진하고, 인재 양성을 위한 자금을 유치하고자 한다. 또한 양자기술의 연구 개발부터 상용화에 이르기까지 캐나다의 양자

20) Quantum Industry Canada

기업을 위한 초기 상업 경로를 구축하는 등 전략적 파트너와 투자자, 정부로 이루어진 네트워크 인프라를 활용해 양자생태계를 확장하고자 노력한다. 마지막으로 양자스타트업 및 성숙 기업이 세계적인 수준의 상업적 성공을 달성할 수 있도록 사업 전략, 협업 마케팅 등 다양한 방면의 전문 지식을 지원한다.

QIC는 캐나다 온타리오주 토론토에 본사를 두고 있으며, 분기별로 회의를 진행한다. QIC의 이사회는 총 6명으로 구성되어 있으며, 1명의 의장과 5명의 회원으로 이루어져 있다. 2023년 10월에는 Lisa Lambert를 CEO로 선정하였다.

표 Ⅵ-1-3 캐나다 QIC 이사회 개요

회원	이름	소개
	Lisa Lambert	現) QIC 대표
	Angela Olano	現) QIC 마케팅&커뮤니케이션 디렉터
	Michele Mosca	現) QIC 의장 現) evolutionQ 최고경영자 前) softwareQ 공동창립자
	Bruno Couillard	現) QIC 이사회 회원 現) Crypto4A 최고기술책임자 & 최고경영자
	Alexandra Daoud	現) QIC 이사회 회원 現) Anyon Systems Inc. 부사장
	Sally Daub	現) QIC 이사회 회원 現) Pool Global Partners 창립자
	Martin Laforest	現) QIC 이사회 회원 現) NRC 양자센서·컴퓨터 도전프로그램 부국장 前) D-Wave 프로그램 디렉터
	Christian Weedbrook	現) QIC 이사회 회원 現) Quantacet 매니징 파트너 前) ACET Banque National 양자전략 디렉터

※ 집필진 작성

QIC는 캐나다의 양자기술 개발 및 상용화를 활성화하기 위해 2022년 1월 온타리오 혁신 센터(Ontario Center of Innovation, OCI)와 파트너십을 체결했다.[21] 두 기관은 양자기술이 의료, 제약, 자원, 금융, 통신, 보안 등 산업 전반에 가져올 막대한 영향력을 인지하고, 캐나다 전역의 비즈니스 네트워크 강화 및 성장 역량 구축에 힘을 쏟고 있다. QIC와 OCI는 각각이 가진 양자기술 전문성과 혁신 네트워크 전문성을 토대로 범국가적 차원의 양자혁신을 일으키기 위한 효과적 협력에 집중하고 있다.

그림 Ⅵ-1-16 QIC-OCI 파트너십 체결(2022)



※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

QIC는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅뿐만 아니라 관련 애플리케이션 기업으로 구성된 컨소시엄으로, 2023년 9월 기준 37개의 기업이 참여하고 있다. 컨소시엄 기업들을 분야별로 구분하면 양자통신 기업 12개, 양자센싱 기업 3개, 양자컴퓨팅 기업 19개, 양자소재·부품·장비·기타 기업 3개로 양자컴퓨팅 기업으로만 이루어진 타 양자기술 선도국 협의체와는 달리 균형 있게 조직된 협회임을 확인할 수 있다. 또한 QIC는 딥 테크(Deep Tech) 벤처기업 투자자인 POOL Global Partners(Sally Daub, sally@poolglobalpartners.com)를 지원 파트너(Supporting Partner)로 삼아 캐나다 기업의 상업화 관련 자금 조달을 지원하고 있다.[22] 2023년에 신규로 가입한 회원사의 경우 (23)으로 표기하였다.

21) https://oc-innovation.ca/
22) https://zpcryo.com

표 VI-1-4 양자통신 기업 개요 (QIC)

기관명	회원 소개 및 개요
CEW Systems Canada Inc.	• 기업소개 : 암호화 회사로 무선통신시스템, 대칭 데이터베이스 암호화 등 다용도의 양자탄력 암호화 기술 제공
	• 홈페이지 : https://www.cew-s.com
	• 네트워크 : Chad Wanless | contact@cew-s.com
Crypto4A	• 기업소개 : 오타와에 기반을 둔 스타트업으로 HSP(Hybrid Security Platform) 등 양자기반 사이버 보안 솔루션 제공
	• 홈페이지 : http://crypto4a.com
	• 네트워크 : Bruno Couillard | bruno@crypto4a.com
EvolutionQ	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 시대 위험 관리 전략과 강력한 사이버 보안 도구 제공
	• 홈페이지 : https://evolutionq.com
	• 네트워크 : Michele Mosca | michele.mosca@evolutionq.com
Infosec Global	• 기업소개 : 암호화 어질리티(Crypto Agility) 관리 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://www.infosecglobal.com
	• 네트워크 : Vladimir Soukharev | vladimir.soukharev@infosecglobal.com
ISARA Corporation	• 기업소개 : 양자보안 솔루션 및 서비스 제공
	• 홈페이지 : https://isara.com
	• 네트워크 : Angelo Fasulo | angelo.fasulo@isara.com
Ki3 Photonics Technologies Inc.	• 기업소개 : 기존 통신 네트워크에서 구현할 수 있는 양자광자 솔루션 개발
	• 홈페이지 : http://ki3photonics.com
	• 네트워크 : Yoann Jestin | yoann@ki3photonics.com
NXM Labs Inc.	• 기업소개 : 자율 보안 소프트웨어 제공
	• 홈페이지 : https://www.nxmlabs.com/
	• 네트워크 : Holly Garnder | holly@nxmlabs.com
PAULI GROUP (23)	• 기업소개 : 블록체인의 포스트퀀텀 전환, web3 플랫폼 제공, 양자 위협 측정, 알람 및 양자 방지 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://pauli.group/
	• 네트워크 : Pierre-Luc Dallaire-Demers | pierre-luc@pauli.group
Q-BLOCK (23)	• 기업소개 : 계산, 통신 및 감지를 위한 네트워크형 양자 아키텍처의 물리적 계층인 모듈형 양자 시스템(Q-블록 모듈) 상용화
	• 홈페이지 : https://www.q-block.ca
	• 네트워크 : Kyung Soo Choi | kschoi@qblock.ca
QEYnet	• 기업소개 : 우주 기반 양자 키 분배(QKD) 기술을 활용한 암호화 제품 및 서비스 구축
	• 홈페이지 : https://qeynet.com
	• 네트워크 : Jennifer Elliott | jelliott@qeynet.com
Quantropi	• 기업소개 : 자사 특허 기술을 활용한 세계 최초의 디지털 QKD 서비스 QiSpace™ 등 제공
	• 홈페이지 : https://www.quantropi.com/
	• 네트워크 : James Nguyen | james.nguyen@quantropi.com
Quantum Bridge Technologies (QBT)	• 기업소개 : 양자중계기 개발 및 양자인터넷 구축
	• 홈페이지 : https://quantumbridgetech.com
	• 네트워크 : Mattia Montagna | mattia@quantumbridgetech.com

표 Ⅵ-1-5 양자센서 기업 개요 (QIC)

기관명	회원 소개 및 개요
High Q Technologies Inc.	• 기업소개 : 양자센싱 분야 스타트업으로 현재 초고감도 화학 분석을 위한 Electron Spin Resonance 제품 개발
	• 홈페이지 : www.highqtechnologies.com
	• 네트워크 : Andrew Boorn | andrew.boorn@highqlp.com
SB Quantum	• 기업소개 : 우주, 국방 등에 활용되는 NV 센서 개발
	• 홈페이지 : https://sbquantum.com
	• 네트워크 : David Roy-Guay | info@sbquantum.com
to. technology	• 기업소개 : 양자센싱 및 양자컴퓨팅 기업으로 초전도 양자장비를 위한 지상 및 우주 기반 제어 장비 개발
	• 홈페이지 : https://www.t0.technology
	• 네트워크 : Joshua Montgomery | joshua@t0.technology

표 Ⅵ-1-6 양자컴퓨팅 기업 개요 (QIC)

기관명	회원 소개 및 개요
1QBit	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 최적화, 시뮬레이션, 머신 러닝, 하드웨어 혁신 등 산업 난제 해결
	• 홈페이지 : https://1qbit.com
	• 네트워크 : Artur Scherer | artur.scherer@1qbit.com
Adaptive Finance Techonolgies (AFT)	• 기업소개 : 양자머신러닝 창업자 육성 프로그램을 통해 탄생한 기업으로 양자AI 기반 투자 관리 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://adaptive.finance
	• 네트워크 : Roman Lutsiv | rlutsiv@adaptive.finance
Agnostiq	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 오픈 소스 워크플로우 오케스트레이션 플랫폼(Open source workflow orchestration platform)인 Covalent 개발
	• 홈페이지 : https://agnostiq.ai
	• 네트워크 : Oktay Goktas | oktay@agnostiq.ai
Anyon Systems Inc.	• 기업소개 : 내결함성 게이트 기반 양자계산을 위한 토폴로지(Topological) 양자컴퓨팅 플랫폼 개발
	• 홈페이지 : http://anyonsys.com
	• 네트워크 : Alireza Najafi-Yazdi |ayazdi@anyonsys.com
BTQ (23)	• 기업소개 : 포스트 양자 소프트웨어 및 하드웨어 제품 개발
	• 홈페이지 : https://www.btq.com
	• 네트워크 : Nicolas Roussy Newton | nic@btq.li
CMC MICROSYSTEMS (23)	• 기업소개 : 비영리 조직, 최첨단 설계, 제조 및 테스트 기능에 대한 액세스를 포함하여 플랫폼 기술 제작 및 공유
	• 홈페이지 : https://www.cmc.ca
	• 네트워크 : Patricia Tokunaga | patricia.tokunaga@cmc.ca

기관명	회원 소개 및 개요
CogniFrame	• 기업소개 : 하이브리드 머신러닝 기업으로 양자어닐러를 활용해 금융 시장 난제 해결
	• 홈페이지 : https://cogniframe.com
	• 네트워크 : Vish | info@cogniframe.com
D-Wave	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어 기업으로 세계 최초로 상용 양자컴퓨터 개발
	• 홈페이지 : https://www.dwavesys.com
	• 네트워크 : Allison Schwartz | aschwartz@dwavesys.com
Entangled Networks	• 기업소개 : Multi-QPU 양자컴퓨팅 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://entanglednetworks.com
	• 네트워크 : Aharon Brodutch | info@entanglednetworks.com
NanoAcademic Technologies	• 기업소개 : 재료 과학, 나노전자공학 및 양자전송을 위한 제1원칙 원자 시뮬레이션 소프트웨어 개발
	• 홈페이지 : https://www.nanoacademic.com
	• 네트워크 : Jeremy F. Garaffa | jeremy.garaffa@nanoacademic.com
NetraMark	• 기업소개 : 양자계산을 활용해 차세대 대화형 기계 지능 플랫폼 개발
	• 홈페이지 : https://netramark.com
	• 네트워크 : Joseph Geraci | joseph.geraci@netramark.com
OTI Lumionics	• 기업소개 : 양자 시뮬레이션, 머신러닝 등을 활용한 재료 발견 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://otilumionics.com
	• 네트워크 : Michael Helander | michael.helander@otilumionics.com
Photonic	• 기업소개 : 스핀-광자 인터페이스, 실리콘 광자, 양자광학 등 차세대 양자기술 개발
	• 홈페이지 : https://photonic.com
	• 네트워크 : Alex Popov | apopov@photonic.com
ProteinQure	• 기업소개 : 토론토 기반의 스타트업으로 양자컴퓨팅, 분자 시뮬레이션 및 기계 학습을 활용해 단백질 치료제 설계 플랫폼 구축
	• 홈페이지 : https://proteinqure.com
	• 네트워크 : Tomas Babej | tomas@proteinqure.com
Quantum Benchmark	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 오류 진단 및 오류 억제, 성능 검증 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://quantumbenchmark.com
	• 네트워크 : Kristine Boone | kristine@quantumbenchmark.com
softwareQ	• 기업소개 : 양자 소프트웨어 기업으로 고수준 알고리듬 설계부터 최적화까지 풀 스택 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://softwareq.ca
	• 네트워크 : Vlad Gheorghiu | vlad@softwareq.ca
Solid State AI	• 기업소개 : 양자머신러닝 소프트웨어 AIMS를 통해 최적화 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://solidstate.ai
	• 네트워크 : Abhi Rampal | abhi@solidstate.ai
Xanadu	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어 기업으로 범용 양자컴퓨터를 구축하고, 양자기계학습 및 응용 프로그램 개발을 위한 오픈 소스 소프트웨어 라이브러리인 PennyLane 개발 주도
	• 홈페이지 : xanadu.ai
	• 네트워크 : david@xanadu.ai
Zapata AI	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 화학, 물류, 금융, 가스, 제약, 재료 등 다양한 분야에 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://zapata.ai/
	• 네트워크 : Pierre-Luc | pierre-luc@zapatacomputing.com

표 Ⅵ-1-7 양자소재·부품·장비·기타 기업 개요 (QIC)

기관명	회원 소개 및 개요
The Quantum Insider (23)	• 기업소개 : 양자 기술 산업에 관한 뉴스와 데이터 제공
	• 홈페이지 : https://thequantuminsider.com
	• 네트워크 : hello@thequantuminsider.com
Universal Quantum Devices	• 기업소개 : 타임 태깅 및 동시 계수 장비인 Logic16 개발
	• 네트워크 : Thomas Jennewein | thomas.jennewein@uwaterloo.ca
Zero Point Cryogenics	• 기업소개 : 양자기술을 위한 극저온 냉각기 제조 기업
	• 홈페이지 : https://zpcryo.com
	• 네트워크 : Chris Cassin | chris@zpcryo.com

제2장
유럽

제1절 개요

유럽에서는 공동을 목표로 양자과학 및 기술을 발전시키기 위해서 다수의 양자기술 관련 협회가 구성되고 있다. 대표적으로 2021년 구성된 비영리 산업협회 'European Quantum Industry Consortium(QuIC)'은 EU 국가와 그 외의 유럽 국가의 양자기술 관련 기업 및 기관들의 협의체로 가장 큰 규모를 이루고 있다. 독일 Quantum Technology and Application Consortium(QUTAC)은 양자컴퓨팅 응용 및 실제 적용에 대한 가속을 위해 13개 기업이 협의체를 이뤄 활동하고 있다. 이외에도 핀란드의 InsituteQ는 대학교와 국립 연구 센터가 중심으로 운영되고 있고, 영국의 UKQuantum은 영국 정부와 글로벌 협의체에 공동의 목소리를 내기 위해서 구성된 협의체로 기업 및 연구기관으로 구성되어 있다. 독일, 핀란드, 영국의 각 협의체는 각 나라의 양자기술 우위를 차지하고, 양자 시장을 선점하기 위한 공통의 목표를 위해 협력하는 것을 목적으로 하고 있다. 각 협의체의 회원수는 작년 대비 증가하였는데 이는 양자기술 관련 기업의 증가와 관련 있는 것으로 보인다. 일부 기업 및 기관은 미국의 QED-C와 유럽의 QuIC에 동시에 가입하고 있는데 이는 각 지역에 본사나 사업장이 있는 경우 가입 가능한 제약으로 인한 것으로 보인다. 유럽 각국의 양자협의체는 독일, 핀란드, 영국처럼 향후 각 나라의 이익을 위해서 구성될 가능성이 있으며, 이미 구성되어 있는 소수의 협의체가 확장될 가능성도 있을 것으로 보인다. 이러한 변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요한데, 이는 유럽 국가의 양자기술 개발 방향에 대한 지표로 활용할 수 있기 때문이다.

다음 2절에서는 QuIC, 3절에서는 InstituteQ, 4절에서는 QUTAC, 마지막 5절에서는 UKQuantum에 대해서 간략하게 기술하고자 한다.

제2절 QuIC (European Quantum Industry Consortium)

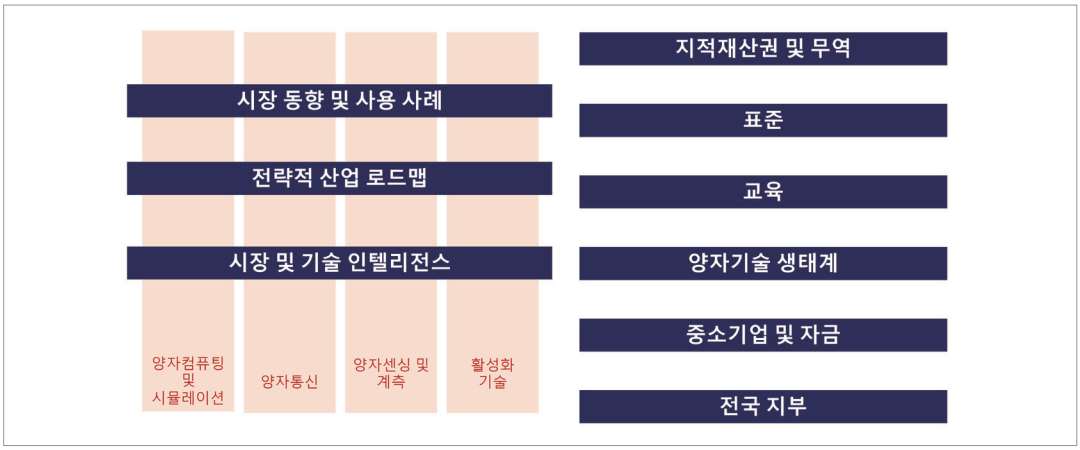
유럽 양자산업 컨소시엄(European Quantum Industry Consortium, QuIC)은 유럽 전역의 대기업, 중소기업, 투자자, 스타트업 등 여러 주요 비즈니스 주체가 설립한 비영리 협회로 유럽 양자 기술 산업의 경쟁력과 경제 성장을 촉진하고 대륙 전체의 가치 창출을 강화하는 것을 목표로 구성되었다. QuIC는 여러 비즈니스 주체와 주요 연구 및 기술 조직 사이에 강력하고 활기찬 생태계를 구축하기 위해 유럽 전역의 협업 허브로 운영되고 있다.

QuIC의 주요 임무는 유럽 양자 기술 산업의 경쟁력과 경제 성장을 촉진하고 대륙 전체의 가치 창출을 강화하는 것이다. QuIC의 주요 활동은 다음과 같다. 유럽 양자 기술의 연구, 개발, 혁신 및 배포를 위한 전략적 목표와 로드맵 개발 및 조정과 구현 지원하고, 유럽 기관 및 기타 이해관계자와 협력한다. 또한 유럽의 산업 성장과 경쟁력을 육성하고, 양자기술 산업을 위한 협업 허브와 활발한 생태계를 구축한다. 양자기술 제품과 서비스를 유럽의 사회적, 환경적 과제를 해결하기 위한 핵심 원동력으로 포지셔닝 한다. 이를 위해 사전 표준화 활동에 참여하고 표준화 기관과 협력할 뿐만 아니라 경쟁력 있는 유럽 양자 기술 산업을 활성화하기 위한 IP 전략을 개발한다. 마지막으로 교육 및 기술 인력 요구 사항과 전문 프로필을 결정하여, 목표를 향해 작업을 조직한다. 요약하자면 QuIC의 활동은 기술(최신 기술, 사용 사례, 전략적 로드맵)과 밀접하게 관련된 것부터 표준, 지적 재산권, 교육, 그리고 생태계 발전을 위한 전반적인 사명을 수행하는 것이다.

QuIC의 실무 그룹은 위의 조건에 따라 9개의 그룹으로 구성되어 있다. 시장 동향 및 사용 사례 실무 그룹은 유럽 산업과 경제적으로 관련된 시장 동향 및 사용 사례를 식별하는 데 참여한다. 이러한 활동은 유럽 양자기술의 범위를 확장하여 아직 양자기술 분야에서 활동하지 않는 회사에 새로운 제품 및 서비스에 대한 아이디어를 제공할 뿐만 아니라 현재 양자기술 플레이어의 포트폴리오를 확장하기 위한 일을 수행한다. 공공 자금 지원 프로그램의 방향을 정하고, 벤처 캐피탈 기업의 투자 우선순위를 공지하는 등 유럽 양자기술 생태계 강화를 지원하는 역할을 하고 있다. 지적 재산권 및 무역 실무 그룹은 유럽의 양자기술 및 관련 분야에 대한 특허 기반과 특허 창출을 개선하는 것을 목적으로 있다. 이 그룹은 유럽에서의 지식 창출을 지원하고 유럽 기업의 지적 재산을 보호하여 해당 지역에 장기적인 경제적 이익을 보장하는 데 도움을 주는 역할을 하고자 한다. 교육 실무 그룹은 양자기술 분야에서 유럽의 인력을 강화하기 위한 교육 요구 사항을 해결하고자 한다. 핵심 분야에는 유럽의 기술 및 격차 구별, 현재 전문가를 위한 교육 개발, 양자기술에 대한 미래의 인력을 준비하기 위해 교육 기관에 훈련 및 교육 방향 제시 및 형성하는 업무를 수행하고 있다. 표준은 신흥 시장과 생태계를 지속 가능한 방식으로 구축하는 데 중요한 요소이기 때문에, 표준 실무 그룹은 모든 양자기술 분야의 표준에 대한 QuIC 회원 간의

요구 사항과 공통 분야를 조정하기 위해서 QuIC 커뮤니티 포럼을 개최한다. 이 그룹은 QUIC 회원과 표준화 기관 간의 요구와 공통 관점에 대한 의사소통 및 시너지 활동 채널을 구축하고 회원 및 EU 관련 기관의 이익을 위해 정보를 생성하고 교환하는 일을 수행하고 있다. 시장 및 기술 인텔리전스 실무 그룹은 유럽의 양자기술 상태와 진행 상황을 파악하고 추적하기 위한 QuIC 커뮤니티 포럼으로 양자 생태계의 최신 기술과 QuIC에 대한 권장 사항을 문서화시키고 양자기술의 전략적 로드맵에 반영한다. 또, 모든 양자분야에 걸쳐 성공적인 산업 양자 생태계를 위해 필요한 요구 사항을 구분하는 역할을 한다. 전략적 산업 로드맵 실무 그룹은 컴퓨팅, 통신, 계측 및 감지, 활성화 기술 등 4가지 주요 양자 분야 모두에 걸쳐 포괄적인 업계 주도 로드맵 개발을 담당한다. 이 그룹은 전략적 산업 로드맵을 통해 전 유럽과 관련 국가에 정책을 알리고, 정부의 지원 방향을 결정하며, 유럽 가치 사슬을 확장하여, 각 양자 분야의 모든 중요한 측면을 포괄하는 지침 역할을 하는 것을 목표로 하고 있다. 기술 분야와 유럽 대륙 전반에 걸쳐 산업계 회원이 점점 증가하면서 전략적 산업 로드맵 실무 그룹의 역할이 더 중요해지고 있다. 생태계 실무 그룹은 QuIC에 존재하는 다양한 양자 커뮤니티를 한군데 모으고, 회원들이 양자 생태계에서 자신의 역할을 계속 강화할 수 있는 구조화된 환경을 제공하는 동시에 유럽과 전 세계에서 양자기술 산업의 미래를 형성하는 데 도움을 주고자 한다. 중소기업 및 자금 조달 실무 그룹은 양자 생태계 내에서 중소기업의 역할과 양자기술 연구, 개발 및 상용화를 위한 자금 조달 출처를 검토한다. 이 그룹은 중소기업 및 스타트업 창업 및 지원에 대한 모범 사례를 벤치마킹할 뿐만 아니라 양자기술을 위한 자금 조달원을 조사한다. 전국 지부 실무 그룹은 유전 전역에 QuIC 지역 지부를 설립하는 데 중점을 준다. 각 지부는 협회의 현지 연락 창구로 의사소통 채널 역할을 수행한다.

그림 Ⅵ-2-1 QuIC 실무 그룹과 역할



※ European Quantum Industry Consortium 집필진 재구성

2023년 9월 26일 기준 현재 QuIC의 회원기관은 홈페이지와 관련 자료를 통합하였을 때 미확인 기관 1곳을 포함하여 183개 기관으로 나타나고 있다. 등급이 확인되지 않은 QTI의 경우 홈페이지에서는 확인되나 공식적으로 회원 자료에서는 언급되지 않고 있다. 2022년 10월의 169개 회원기관 대비 약 19개 기관이 늘어난 것으로 보인다. QuIC 멤버십은 유럽 회원국, 영국, EU 후보 국가 및 관련 국가에 본사가 있는 대기업, 중소기업 및 스타트업은 정회원 또는 준회원으로 가입이 가능하지만, RTO와 학술기관 및 협회는 준회원으로만 가입이 가능하다. 준회원과 정회원의 차이는 총회에서 투표권의 여부와 이사회 선출의 여부만 차이가 있다. 2023년 9월 기준 정회원은 90개 기관에서 99개 기관으로 준회원은 79개 기관에서 83개 기관으로 증가하였으며, 대기업은 1개 회원사가 감소한 반면 중소기업은 9개 회원사로 증가하였다.

표 Ⅵ-2-1 QuIC 회원 분포 (2023년 9월 기준)

회원 유형	정회원	준회원	총회원수
대기업	25	10	35
중소기업	72	31	103
학계 / 연구 / RTOs	-	35	35
협회	-	6	6
기타 (VC & 기금)	2	1	3
총회원수	99	83	182 (QTI 제외)

2023년 기준의 각 나라별 회원 기관수는 아직까지 확인되지 않고 있다. 2022년 10월 기준의 각 나라별 정회원과 준회원 수는 〈표 Ⅵ-2-2〉에 가나다순으로 기술하였다.

표 Ⅵ-2-2 QuIC 회원 국가별 분포 (2022년 10월 기준)

국가명	정회원	준회원	총회원수	국가명	정회원	준회원	총회원수
그리스	1	0	1	아일랜드	2	2	4
네덜란드	10	4	14	영국	8	6	14
노르웨이	1	2	3	오스트리아	5	3	8
덴마크	2	1	3	이스라엘	1	1	2
독일	23	17	40	이탈리아	4	5	9
룩셈부르크	1	0	1	체코	1	0	1
리투아니아	0	1	1	터키	0	1	1
스웨덴	0	1	1	폴란드	3	2	5
스위스	8	5	13	포르투갈	2	1	3
스페인	9	12	21	핀란드	2	2	4
슬로베니아	1	0	1	프랑스	8	11	19

〈표 VI-2-3〉에서는 QuIC의 정회원 중 대기업 회원사 25개 기업을 소개하고 있다. 2023년 현재 QED-C에 동시에 가입한 회원사의 경우(기관명 위에 QED-C로 표기) 5개 기업으로 나타나고 있다.

표 VI-2-3 QuIC 대기업 정회원 (2023년 9월 기준)

기관명	회원 소개 및 개요
Accenture[QED-C]	• 기관소개 : 인공지능, 블록체인, 클라우드, 디지털 엔지니어링 및 제도, 사이버 보안 등 서비스
	• 홈페이지 : https://www.accenture.com/de-de
ADVA	• 기관소개 : 통합 에지 솔루션, Adtran의 합병
	• 홈페이지 : https://www.adva.com
Airbus	• 기관소개 : 항공우주 산업
	• 홈페이지 : https://www.airbus.com
Air Liquide	• 기관소개 : 산업 및 건강을 위한 가스, 기술, 서비스 분야
	• 홈페이지 : https://www.airliquide.com
BASF	• 기관소개 : 화학, 소재 관련 기업
	• 홈페이지 : https://www.basf.com
BBVA	• 기관소개 : 금융 및 디지털 은행 서비스
	• 홈페이지 : https://www.bbva.com/en
Boehringer Ingelheim	• 기관소개 : 연구 중심 바이오제약, 인간 중심 제약과 동물 건강 관련 사업
	• 홈페이지 : https://www.boehringer-ingelheim.com
Bosch	• 기관소개 : 자동차,산업및무역등제품과서비스
	• 홈페이지 : https://www.bosch.com
Cap Gemini	• 기관소개 : 비즈니스 전략 및 운영 관리
	• 홈페이지 : https://www.capgemini.com/pt-en
Deloitte[QED-C]	• 기관소개 : 감사, 보증, 세무, 법률, 컨설팅, 재정 자문, 위험 자문 서비스
	• 홈페이지 : https://www.deloitte.com/global/en.html
Deutsche Bahn	• 기관소개 : 디지털철도화
	• 홈페이지 : https://www.dbsystel.de/dbsystel
Diehl Defence GmbH & Co. KG	• 기관소개 : 국방 및 보안, 방공 시스템 공급업체, 지상 기반 대공 방어, 유도 미사일, 탄약, 훈련 및 보호 분야 첨단 장비 개발
	• 홈페이지 : https://www.diehl.com/defence/de
E.ON	• 기관소개 : 에너지 네트워크 및 에너지 인프라 운영
	• 홈페이지 : https://www.eon.com
Equinor	• 기관소개 : 노르웨이 에너지 회사
	• 홈페이지 : https://www.equinor.com
Ernst & Young	• 기관소개 : 전략, 거래, 혁신, 위험, 보증 및 세무 분야 통합 플랫폼
	• 홈페이지 : https://www.ey.com/en_uk
Eviden	• 기관소개 : 인공 지능, 하이브리드 클라우드, 인프라 관리, 탈탄소화 등 디지털 솔루션 설계
	• 홈페이지 : https://atos.net
Indra Systemas	• 기관소개 : 글로벌 기술 및 컨설팅
	• 홈페이지 : https://www.indracompany.com
Infineon Technologies	• 기관소개 : 자동차, 친환경 산업 전력, 전력 및 센서 시스템, 연결된 보안 시스템 관련 기업
	• 홈페이지 : https://www.infineon.com
KPN	• 기관소개 : 네덜란드 통신사
	• 홈페이지 : https://www.kpn.com

기관명	회원 소개 및 개요
NKT Photonics[QED-C]	• 기관소개 : 레이저 및 첨단 현미경에 전력 제공
	• 홈페이지 : https://www.nktphotonics.com
Roche	• 기관소개 : 데이터 기반 신약 및 새로운 진단법 개발
	• 홈페이지 : https://www.roche.com
SAP	• 기관소개 : 기업용 애플리케이션 소프트웨어 및 엔드투엔드 애플리케이션 및 서비스 제품군
	• 홈페이지 : https://www.sap.com
Thales	• 기관소개 : 국방 및 보안, 항공우주 및 우주, 디지털 신원 및 보안, 운송 시장에 솔루션, 서비스 및 제품 제공
	• 홈페이지 : https://www.thalesgroup.com
TOPTICA Photonics[QED-C]	• 기관소개 : 레이저 포토닉스 제공, 다이오드 레이저, 초고속 광섬유 레이저, 테라헤르츠 시스템 및 주파수 빗
	• 홈페이지 : https://www.toptica.com/
Zurich Instruments[QED-C]	• 기관소개 : Rohde & Schwarz 계열사, 테스트 및 측정 장비 개발 및 판매
	• 홈페이지 : https://www.zhinst.com

〈표 VI-2-4〉에서는 QuIC의 정회원 중 72개 중소기업과 2개의 VC에 대한 기관명과 기관을 소개하고 있다. 〈표 VI-2-3〉과 마찬가지로 2023년 현재 QED-C에 동시에 가입한 회원사의 경우(기관명 위에 QED-C로 표기) 10개 기업으로 나타나고 있다.

표 VI-2-4 QuIC 중소기업 및 VC 정회원 (2023년 9월 기준)

기관명	회원 소개 및 개요
Algorithmiq[QED-C]	• 기관소개 : 생명과학 분야 양자컴퓨팅 활용
	• 홈페이지 : https://algorithmiq.fi
Alice & Bob	• 기관소개 : Cat Qubit 기반 논리 큐비트 개발
	• 홈페이지 : https://alice-bob.com
Amires S.R.O	• 기관소개 : 연구, 개발및프로젝트컨설팅
	• 홈페이지 : https://www.amires.eu
Anaqor	• 기관소개 : 커뮤니티 기반 양자컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://www.anaqor.io
AQT	• 기관소개 : 이온 트랩 양자 장치
	• 홈페이지 : https://www.aqt.eu
aQuantum Software EngineeringS.L.	• 기관소개 : 하이브리드 클래식/양자 소프트웨어 서비스
	• 홈페이지 : https://www.aquantum.es
AROBS Polska	• 기관소개 : 우주 산업, 양자 및 광통신, 기기 및 메커니즘 제어, 페이로드 컴퓨터, 플래시 메모리 모듈 서비스
	• 홈페이지 : https://arobs.com/arobs-polska
Beyond Semiconductor	• 기관소개 : 프로세서를 이용한 보안 컨텍스트 지원
	• 홈페이지 : https://www.beyondsemi.com

기관명	회원 소개 및 개요
Bluspecs	• 기관소개 : 디지털 혁신 지원 (전략적 포지셔닝부터 기술 채택 서비스)
	• 홈페이지 : https://bluspecs.com
CamGraPhic	• 기관소개 : 광통신, 광학 엔진을 통한 데이터 트래픽 수요 지원
	• 홈페이지 : https://www.camgraphic-technology.com
Classiq	• 기관소개 : Classiq 양자 소프트웨어 플랫폼, 양자컴퓨팅 소프트웨어
	• 홈페이지 : https://www.classiq.io
ColibriTD	• 기관소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 및 알고리즘
	• 홈페이지 : https://colibritd.com/en/home-ziad-test-english
Constructor Operations AG	• 기관소개 : 기계지능, 양자기술, 지능형 재료, 실재 하이브리드, 생명공학관련 교육
	• 홈페이지 : https://constructor.org
Creotech	• 기관소개 : 우주 산업, 과학 및 기타 현대 기술 개발
	• 홈페이지 : https://creotech.pl
Da Vinci Labs	• 기관소개 : 딥테크, 인공 지능, 합성 생물학, 양자컴퓨팅 연구
	• 홈페이지 : https://www.davincilabs.eu
Dacoso GmbH	• 기관소개 : 광 네트워크, 지능형 네트워크, 사이버 보안 등 IT 서비스
	• 홈페이지 : https://www.dacoso.com
De Vries & Metman	• 기관소개 : 네덜란드 특허 사무소
	• 홈페이지 : https://dvme.nl
Delft Circuits	• 기관소개 : 유연한 극저온 다중 채널 I/O 솔루션
	• 홈페이지 : https://delft-circuits.com
eleQtron	• 기관소개 : 양자컴퓨터 개발 및 운영
	• 홈페이지 : https://eleqtron.com
Equal1[QED-C]	• 기관소개 : 양자시스템온칩 실리콘으로 구동하는 데스크탑 양자컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://www.equal1.com
Ethicqual[QED-C]	• 기관소개 : 기후, 양자기술 및 AI 분야의 법적, 사회적, 윤리적 위험 측정 및 완화 정책 제안 및 구현
	• 홈페이지 : https://ethicqual.org
EurA-ag	• 기관소개 : 혁신과 기술을 위한 국제 컨설팅
	• 홈페이지 : https://www.eura-ag.com
Heron Robots	• 기관소개 : 로봇 공학, 인공 인지 시스템, AI 및 지능형 자율 시스템 분야 비상장 스타트업
	• 홈페이지 : http://www.heronrobots.com
HQS Quantum Simulations	• 기관소개 : 재료 과학을 위한 소프트웨어 제공
	• 홈페이지 : https://quantumsimulations.de
ID Quantique[QED-C]	• 기관소개 : 사이버 보안 및 양자 제품 및 기술 개발 및 산업화
	• 홈페이지 : https://www.idquantique.com
IQM	• 기관소개 : 산업별 프로그래밍 방식 미디어 구매 및 잠재 고객 인텔리전스 플랫폼
	• 홈페이지 : https://iqm.com
JoS Quantum	• 기관소개 : 금융, 보험, 에너지 분야 양자정보이론 적용
	• 홈페이지 : https://jos-quantum.de
KETS Quantum Security	• 기관소개 : 초소형크기, 최저 무게 및 전력 제공 가능 칩 기반 솔루션, 시스템과 데이터 보호 가능 양자 안전 암호화 솔루션
	• 홈페이지 : https://kets-quantum.com
Kiutra	• 기관소개 : 냉각 솔루션과 서비스 제공
	• 홈페이지 : https://kiutra.com

기관명	회원 소개 및 개요
Lakestar Advisors	• 기관소개 : 투자 기업
	• 홈페이지 : https://lakestar.com
LuxQuanta Technologies S.L	• 기관소개 : The Institute of Photonic Sciences에서 분사, 양자 키 배포 시스템 및 기술 제공
	• 홈페이지 : https://www.luxquanta.com
Mbryonics	• 기관소개 : 광 종단 간 네트워크 이용 우주에 인터넷 구축
	• 홈페이지 : https://mbryonics.com
Menlo Systems	• 기관소개 : 독일 정밀 계측 장비 개발
	• 주요제품 : 광 주파수 빗, 시간 및 주파수 분포용 솔루션, 초안정 레이저, 테라헤르츠 시스템 및 펨토초 레이저
	• 기관소개 : https://www.menlosystems.com
Micro Photon Devices	• 기관소개 : 단일 광자 계수 및 단일 광자 피코초 타이밍 모듈 생산 및 상용화
	• 홈페이지 : http://www.micro-photon-devices.com
MicroR	• 기관소개 : 스위스 국립 연구 역량 센터(QSIT)와 École Polytechnique Fédérale de Lausanne의 스타트업
	• 홈페이지 : https://www.microrsystems.com
Miraex	• 기관소개 : 광자 감지 및 분산 양자컴퓨팅 솔루션
	• 홈페이지 : https://www.miraex.com
Multiverse Computing	• 기관소개 : 양자 소프트웨어 개발, 딥테크 기업
	• 홈페이지 : https://multiversecomputing.com/
nextnano	• 기관소개 : 나노기술 분야를 위한 소프트웨어 솔루션 개발
	• 홈페이지 : https://www.nextnano.de
Nu Quantum	• 기관소개 : Entanglement fabric 구축 및 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://nu-quantum.com
Nvision	• 기관소개 : 대사 수준에서 암치료를 위한 자기 공명 영상
	• 홈페이지 : https://www.nvision-imaging.com
Orange Quantum Systems[QED-C]	• 기관소개 : 양자 칩 성능 테스트 제품 제공
	• 홈페이지 : https://orangeqs.com
ParityQC	• 기관소개 : 양자 아키텍처, 양자컴퓨터를 위한 청사진과 운영 체제 개발
	• 홈페이지 : https://parityqc.com
QAI Ventures	• 기관소개 : 투자 및 액셀러레이터 프로그램 제공
	• 홈페이지 : https://www.qai-ventures.com
Qblox[QED-C]	• 기관소개 : 네덜란드 양자기술 연구소 QuTech의 분사, 클러스터 제어 스택 및 모듈, 양자산업, 트랜스몬, 스핀 큐비트, NV센터, 토폴로지 시스템, 트랩 이온 및 양자 네트워킹에 대한 맞춤형 솔루션
	• 홈페이지 : https://www.qblox.com
QCentroid	• 기관소개 : 양자컴퓨팅에 쉽게 접근할 수 있는 서비스 제공 Quantum as a Service 플랫폼
	• 홈페이지 : https://qcentroid.xyz
QILIMANJARO QUANTUM TECH	• 기관소개 : 아날로그 양자컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://www.qilimanjaro.tech
Qnami	• 기관소개 : 양자 센싱
	• 홈페이지 : https://qnami.ch
QphoX	• 기관소개 : 양자컴퓨터를 양자네트워크로 연결하는 양자모뎀™ 장치 구축, 기계적 중간 공진기를 통해 마이크로파와 광학 광자 결합 양자 변환기
	• 홈페이지 : https://qphox.eu

기관명	회원 소개 및 개요
Qruise[QED-C]	• 기관소개 : 양자를 위한 기계 학습
	• 홈페이지 : https://qruise.com
Quandela[QED-C]	• 기관소개 : 클라우드(광자 양자 처리 장치) 서비스
	• 홈페이지 : https://www.quandela.com
Quanscient Oy	• 기관소개 : 자동 테스트, 시뮬레이션 및 최적화가 백그라운드에서 진행되는 하드웨어 개발
	• 홈페이지 : https://quanscient.com
Quantagonia	• 기관소개 : 양자 하이브리드 컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://www.quantagonia.com
Quantonation	• 기관소개 : 초기 단계 VC 펀드
	• 홈페이지 : https://www.quantonation.com
QuantrolOx Ltd[QED-C]	• 기관소개 : 완전 자동화 양자컴퓨터 개발
	• 홈페이지 : https://quantrolox.com
Quantum Exponential	• 기관소개 : Aquis Stock Exchange(AQSE)에 상장, 양자기술 기업의 포트폴리오 관리
	• 홈페이지 : https://www.quantumexp.co.uk
Quantum Futures[QED-C]	• 기관소개 : 인재 확보 솔루션 제공, 양자컴퓨팅 팀 구축 및 확장
	• 홈페이지 : https://www.quantum-futures.com
Quantum Motion	• 기관소개 : 유비쿼터스 실리콘 기술 기반 내결함성 양자 프로세서 개발
	• 홈페이지 : https://quantummotion.tech
Quantum Technologies Laboratories GMBH	• 기관소개 : 양자 암호화 구현하기 위한 디자인과 프로토타입 개발
	• 홈페이지 : https://www.qtlabs.at
Quantum Technologies GMBH	• 기관소개 : 센서 기술
	• 홈페이지 : https://quantumtechnologies.de
Quartiq	• 홈페이지 : https://www.qtspace.eu
QuiX Quantum	• 기관소개 : 광자 양자 기술 회사, 플러그 앤 플레이 통합 광자 솔루션을 통한 양자컴퓨팅 혁신
	• 홈페이지 : https://www.quixquantum.com
QuSide	• 기관소개 : 양자 기술을 연구, 엔지니어링 및 통합
	• 홈페이지 : https://quside.com
RedWave Labs	• 기관소개 : 암호화, 감지 및 단일 광자 감지용 솔루션 및 제어 전자 장치
	• 홈페이지 : https://www.redwavelabs.com
Riverlane	• 기관소개 : 양자컴퓨팅을 위한 오류 수정 스택 구축
	• 홈페이지 : https://www.riverlane.com
Rotonium	• 기관소개 : 실온 광자 양자컴퓨터 개발 딥테크 회사
	• 홈페이지 : https://www.rotonium.com
Runa Capital	• 기관소개 : 대규모 기술 기반 비즈니스 구축하려는 기업 실무 투자자
	• 홈페이지 : https://runacap.com
Semiqon	• 기관소개 : 실리콘 기반 양자 프로세서를 통한 양자컴퓨팅 확장 및 지원
	• 홈페이지 : https://www.semiqon.tech
Single Quantum	• 기관소개 : 단일 광자 탐지 기술, 초전도 나노 와이어 단일 광자 탐지기 최초 제조 및 상용화, 다중 채널 단일 양자 Eos 광자 검출 시스템
	• 홈페이지 : https://singlequantum.com
Sonnenberg Harrison Partners	• 기관소개 : 지적 재산권 및 기술 법률 분야 서비스 및 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://www.sonnenbergharrison.law
Speedinvest	• 기관소개 : 전문 기금 기업
	• 홈페이지 : https://www.speedinvest.com

기관명	회원 소개 및 개요
Syndesis	• 기관소개 : 의료 분야 양자기술 기반 솔루션 설계 및 적용
	• 홈페이지 : https://syndesis.eu
ThinkQuantum	• 기관소개 : 파도바 대학교(University of Padua)에서 분사한 스타트업, 사이버 보안을 위한 광 및 양자 통신 기술
	• 홈페이지 : https://www.thinkquantum.com
VIGO System	• 기관소개 : MWIR 및 LWIR InAsSb 감지 모듈, 광전자 및 마이크로 전자공학용 반도체 재료 및 장비 생산
	• 홈페이지 : https://vigophotonics.com
Y-Quantum	• 기관소개 : 포르투갈 스타트업, 딥 테크 회사, 컨설팅, 교육 및 연구 서비스
	• 홈페이지 : https://y-quantum.tech

〈표 VI-2-5〉에서는 QuIC의 준회원 중 31개 중소기업에 대한 기관명과 기관을 소개하고 있다. 〈표 VI-2-3〉과 마찬가지로 2023년 현재 QED-C에 동시에 가입한 회원사의 경우(기관명 위에 QED-C로 표기) 1개 기업으로 나타나고 있다.

표 VI-2-5 QuIC 중소기업 준회원 (2023년 9월 기준)

기관명	회원 소개 및 개요
Aurea Technology	• 기관소개 : 단일 광자 계수 모듈 설계 및 제조
	• 홈페이지 : http://www.aureatechnology.com
Bayern Innovativ	• 기관소개 : B2B 서비스, 싱크 탱크 및 지식 네트워크 서비스
	• 홈페이지 : https://www.bayern-innovativ.de
Cambridge Quantum Computing	• 기관소개 : 풀스택 양자컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://www.quantinuum.com
Comda Ltd	• 홈페이지 : https://en.comda.co.il
Cosylab	• 기관소개 : 소프트웨어 및 전자제품, 암치료법 제공,의료 혁신 및 청정융합 에너지 기술
	• 홈페이지 : https://cosylab.com
Cryptonext Security	• 기관소개 : Postquantum암호화시스템
	• 홈페이지 : https://www.cryptonext-security.com
GF MICRO (Garfield Microelectronics Ltd)	• 기관소개 : ASIC 솔루션 설계 및 개발
	• 홈페이지 : https://www.gfmicro.com
Intelliconnect (cryospain)	• 기관소개 : 극저온 엔지니어링
	• 홈페이지 : https://cryospain.com
KEEquant	• 기관소개 : 표준 일관성 통신 기술 기반 양자 키 분배 시스템
	• 홈페이지 : https://www.keequant.com
LIFTT SPA	• 기관소개 : 투자 운영 회사
	• 홈페이지 : https://www.liftt.com
LIGENTEC	• 기관소개 : 지상 및 우주통신, 양자기술, LiDAR, 바이오센서 광집적회로(PIC) 제조 B2B 기업
	• 홈페이지 : https://www.ligentec.com

기관명	회원 소개 및 개요
MyCryoFirm	• 기관소개 : 3K 폐쇄 사이클 저온 유지 장치 설계 및 생산
	• 홈페이지 : https://www.mycryofirm.com
Nutshell Quantum-Safe	• 기관소개 : 양자키배포 컨설팅, 배포, 교육 및 지원
	• 홈페이지 : https://www.nutshell-qs.com
Optware GmbH	• 기관소개 : 데이터 인프라 준비 및 계획 시스템을 통한 최적 의사결정 지원
	• 홈페이지 : https://www.optware.de
Oxford Quantum Circuits	• 기관소개 : 양자컴퓨팅
	• 홈페이지 : https://oxfordquantumcircuits.com
Oxford Quantum Solutions	• 기관소개 : RF, 마이크로파, 방수 및 극저온 커넥터 등 전문 제조
PasqalQED-C	• 기관소개 : 2D 및 3D 배열의 중성 원자 양자컴퓨터 구축
	• 홈페이지 : https://www.pasqal.com
PicoQuant	• 기관소개 : 광자 부품 및 장비의 개발 및 제조
	• 홈페이지 : https://www.picoquant.com
Planetek Italia	• 기관소개 : 지구정보학, 우주 솔루션 및 지구 과학 분야
	• 홈페이지 : https://www.planetek.it
Qbee	• 기관소개 : 양자 알고리즘 공식화 및 양자 연구팀 구성 지원
	• 홈페이지 : https://qbee.eu
Quantum Hardware Systems	• 기관소개 : 기존 기술과 양자 기술 통합 제공, 초전도체 및 반도체 기술 분야 경험 보유
	• 홈페이지 : http://www.quantumhardwaresystems.com
Quantum Optical Technologies	• 기관소개 : 100% 민간 자본으로 운영되는 기술 기업, 양자광학 연구 및 소프트웨어 하우스 구축
	• 홈페이지 : https://qopt.tech
QuantWare	• 기관소개 : 양자 하드웨어 개발
	• 홈페이지 : https://www.quantware.eu
Quant-XSecurity & Coding	• 기관소개 : 맞춤형 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://quant-x-sec.com
Qubit Pharmaceuticals	• 기관소개 : 양자물리학 이용 신약 발견 및 설계
	• 홈페이지 : https://www.qubit-pharmaceuticals.com
Qureca	• 기관소개 : 전문 서비스, 비즈니스 개발, 교육 및 채용을 위한 온라인 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://www.qureca.com
Sateliot	• 기관소개 : 5G NB-IoT를 통해 IoT 연결을 제공하는 위성 사업자
	• 홈페이지 : https://sateliot.space
SaxonQ	• 기관소개 : 다이아몬드 칩 및 양자컴퓨터 개발
	• 홈페이지 : https://saxonq.com
Tyto	• 기관소개 : 유럽PR대행사
	• 홈페이지 : https://tytopr.com
Veriqloud	• 기관소개 : 양자 사이버보안
	• 홈페이지 : https://veriqloud.com
WAINVAM-E	• 기관소개 : 과학자들 간의 학제간 교류
	• 홈페이지 : https://wainvam-e.com

〈표 VI-2-6〉에서는 QuIC의 준회원 중 35개 학계, 연구계, RTO에 대한 기관명과 기관을 소개하고 있다.

표 VI-2-6 QuIC 학계, 연구계, RTO 준회원 (2023년 9월 기준)

기관명	회원 소개 및 개요
CEA (The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission)	• 기관소개 : 프랑스 대체 에너지 및 원자력 위원회
	• 홈페이지 : https://www.cea.fr
CERN	• 기관소개 : 입자 기본 구조 연구
	• 홈페이지 : https://home.cern
CSEM (Swiss technology innovation center)	• 기관소개 : 공공-민간, 비영리 스위스 기술 혁신 센터
	• 홈페이지 : https://www.csem.ch
CSIC (Spanish National Research Council)	• 기관소개 : 스페인 국립 연구 위원회
	• 홈페이지 : https://www.csic.es
DFM (Danish Metrology Institute)	• 기관소개 : 덴마크 국립 계측 연구소
	• 홈페이지 : https://dfm.dk/en
DLR (German Aerospace Center)	• 기관소개 : 독일 연방 공화국의 국립 항공 우주 연구 센터
	• 홈페이지 : https://www.dlr.de/en
FH Technikum Wien	• 기관소개 : 오스트리아 기술 및 디지털화 응용 과학 대학
	• 홈페이지 : https://www.technikum-wien.at
Forschungszentrum Jülich	• 기관소개 : 학제간연구기관
	• 홈페이지 : https://www.fz-juelich.de
Fraunhofer Gesellschaft e.V	• 기관소개 : 독일 응용 연구 기관
	• 홈페이지 : https://www.fraunhofer.de
FTMC (Center for physical sciences and technology)	• 기관소개 : 이탈리아 기초연구 및 기술 개발 과학연구기관
	• 홈페이지 : https://www.ftmc.lt
Gradiant	• 기관소개 : ICT를 활용한 기술 개발 및 혁신, 기업 비즈니스 창출 지원
	• 홈페이지 : https://www.gradiant.org
ICFO	• 기관소개 : 카탈로니아 정부와 카탈루냐 정치 대학교에 의해 설립된 연구소
	• 홈페이지 : https://www.icfo.eu
IMEC	• 기관소개 : 벨기에 반도체 기술 개발
	• 홈페이지 : https://www.imec.be/nl
Institut d'Optique Graduate School	• 기관소개 : 포토닉스관련연구, 고등교육및훈련, 혁신, 비즈니스창출, 컨설팅및기술이전
	• 홈페이지 : https://www.institutoptique.fr
Know-Center	• 기관소개 : AI 및 데이터 과학을 위한 유럽 혁신 및 최첨단 연구 센터
	• 홈페이지 : https://www.know-center.at
LNE	• 기관소개 : 공공 산업 및 상업 기관, 프랑스 경제재정부의 신탁 하 산업 감독
	• 홈페이지 : https://www.lne.fr/en/news/quantum-ampere
National Physical Laboratory	• 기관소개 : 영국 국립 계측 연구소, 국가 기본 측정 표준 개발 및 유지
	• 홈페이지 : https://www.npl.co.uk
PCQT (Paris Centre for Quantum Computing)	• 기관소개 : 파리의 3개 대학(Université Paris Cité, Université PSL, Sorbonne Université)과 CNRS(국립 과학 연구 센터) 및 Inria(국립 디지털 과학 연구소)를 포함하는 과학 컨소시엄
	• 홈페이지 : http://pcqt.fr

기관명	회원 소개 및 개요
PSNC (Poznan Supercomputing and Networking)	• 기관소개 : 디지털 과학을 위한 e-인프라에 대한 액세스 제공
	• 홈페이지 : https://www.psnc.pl
Quantum Center ETH Zurich	• 기관소개 : 취리히 전역 연락 창구, 양자 과학 및 기술 분야의 다양한 과학 및 구조적 활동 조정
	• 홈페이지 : https://qc.ethz.ch
Quantum Delta Netherlands	• 기관소개 : 네덜란드 양자기술 분야 협업 생태계 구축
	• 홈페이지 : https://quantumdelta.nl
QuTech (Tu Delft)	• 기관소개 : 네덜란드 델프트 공과대학교
	• 홈페이지 : https://www.tudelft.nl
Silicon Austria Labs	• 기관소개 : 전자 기반 시스템(EBS) 연구 기관
	• 홈페이지 : https://silicon-austria-labs.com
Simula Research Laboratory AS	• 기관소개 : 과학적 과제에 대한 지식 창출
	• 홈페이지 : https://www.simula.no
Sintef	• 기관소개 : 기술, 자연과학, 사회과학 분야의 다학제적 전문지식을 갖춘 유럽 최대 규모 독립 연구기관
	• 홈페이지 : https://www.sintef.no
Tecnalia	• 기관소개 : 맞춤형 R&D 및 혁신 프로젝트 개발
	• 홈페이지 : https://www.tecnalia.com
TNO	• 기관소개 : 네덜란드 법정 정부 업무 지원 및 고용 증가
	• 홈페이지 : https://www.tno.nl
Tübitak Bilgem (Informatics and Information Security Research Center)	• 기관소개 : 터키 정보학 및 정보 보안 연구센터
	• 홈페이지 : https://bilgem.tubitak.gov.tr
Tyndall National Institute	• 기관소개 : 전자공학과 포토닉스(재료, 장치, 회로 및 시스템) 전문
	• 홈페이지 : https://www.tyndall.ie
University of Cambridge	• 기관소개 : 케임브리지 대학교 공과대학
	• 홈페이지 : http://www.eng.cam.ac.uk/overview-department
University of Oulu	• 기관소개 : 핀란드 오울루 대학교
	• 홈페이지 : https://www.oulu.fi
UPM (Universidad Politécnica de Madrid)	• 기관소개 : 마드리드 폴리테크닉 대학교
	• 홈페이지 : https://www.upm.es/internacional
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	• 기관소개 : 핀란드연구기관
	• 홈페이지 : https://www.vttresearch.com
Wallenberg Center for Quantum Technology (Chalmers University of Technology)	• 기관소개 : 차머스 공과대학교
	• 홈페이지 : https://www.chalmers.se
Waterford Institute of Technology (SETU :South East Technological University)	• 기관소개 : 아일랜드 남동부에 위치한 대학 수준의 교육 기관
	• 홈페이지 : https://www.wit.ie

〈표 VI-2-7〉에서는 QuIC의 준회원 중 10개의 대기업, 6개의 협회, 1개의 기금 및 1개의 기타 기관에 대한 기관명과 기관을 소개하고 있다. 〈표 VI-2-3〉과 마찬가지로 2023년 현재 QED-C에 동시에 가입한 회원사의 경우(기관명 위에 QED-C로 표기) 1개 기업으로 나타나고 있다.

표 Ⅵ-2-7 QuIC 기타 준회원 (2023년 9월 기준)

기관명	회원 소개 및 개요	타입
D-Fine	• 기관소개 : 과학 연구 컨설팅	대기업
	• 홈페이지 : https://www.d-fine.com	
GMV	• 기관소개 : 민간 자본 기술 비즈니스 그룹 (항공, 자동차, 사이버 보안, 국방 및 보안, 우주, 금융, 산업, 의료, 디지털 공공 서비스 및 지능형 교통 시스템 (ITS))	
	• 홈페이지 : https://gmv.com	
IXBlue	• 기관소개 : 포토닉스 솔루션 제공	
	• 홈페이지 : https://www.ixblue.com/photonics-space	
Jenoptik GmbH[QED-C]	• 기관소개 : 광학 기술 및 포토닉스	
	• 홈페이지 : https://www.jenoptik.de	
KPMG	• 기관소개 : 감사, 세금 및 자문 서비스	
	• 홈페이지 : https://kpmg.com/xx/en/home.html	
Lutech SPA	• 기관소개 : 디지털 생태계 설계	
	• 홈페이지 : https://lutech.group	
MERCK	• 기관소개 : 맞춤형 치료 솔루션 제공	
	• 홈페이지 : https://www.merckgroup.com	
Rohde & Schwarz Cybersecurity	• 기관소개 : IT 보안 회사, 속 네트워크 암호화와 제로 트러스트 기반 엔드포인트 보안 제공	
	• 홈페이지 : https://www.rohde-schwarz.com	
SVA	• 기관소개 : 독일 IT 서비스 제공업체	
	• 홈페이지 : https://www.sva.de	
Tecnobit-GrupoOesia	• 기관소개 : 100% 민간 및 스페인 자본 다국적 기업, 혁신 및 변혁 프로젝트 개발 및 구현	
	• 홈페이지 : https://grupooesia.com	
Ametic	• 기관소개 : 디지털 산업	협회
	• 홈페이지 : https://ametic.es	
MINACNED	• 기관소개 : 마이크로시스템과 나노기술 기반 무역 협회	
	• 홈페이지 : https://www.minacned.nl	
Münchner Kreis	• 기관소개 : 독립적인학제간국제플랫폼	
	• 홈페이지 : https://www.muenchner-kreis.de	
PQI (Portuguese Quantum Institute)	• 기관소개 : 포르투갈 양자 연구소	
	• 홈페이지 : https://pqi.pt/en/home	
QVLS (Quantum Technology from Lower Saxony Quantum)	• 기관소개 : 과학문화부와 폭스바겐 재단 출범	
	• 홈페이지 : https://qvls.de	
Spectaris	• 기관소개 : 하이테크 중소기업을 위한 독일 산업 협회	
	• 홈페이지 : https://www.spectaris.de	
Links Foundation	• 기관소개 : 중소기업, 공공 기관, 중간 기관, 비영리 및 문화 기관과 협력	기금
	• 홈페이지 : https://linksfoundation.com	
QTI	• 기관소개 : 이탈리아 최초 양자 통신 회사, 양자 키 분배 시스템 개발 및 생산, 양자 네트워크용 산업 등급 시스템과 제품 제공	-
	• 홈페이지 : https://www.qticompany.com	

제3절 핀란드 InstituteQ

확립된 국가 양자 협력으로 운영되는 InstituteQ의 목표는 양자기술이 사회와 경제 전반에 미칠 파괴적인 잠재력과 영향에 대한 핀란드 사회의 준비 상태를 높이는 것이다. 이에 전문 지식과 자원을 결합함으로써 양자 시대에 커뮤니티의 경쟁 우위를 형성하도록 연구, 교육, 혁신을 수행하고 인프라를 구축하여 상호 이익을 얻는 것을 목표로 하고 있다.[23] 현재 InstituteQ는 핀란드 국가 양자 의제(Finnish National Quantum Agenda)를 작성하고 있으며, 2026년까지 새로운 교육 프로그램, 양자 산업 성장, 탁월한 연구 방향을 추진하여 과학적 발견, 새로운 기술의 채택 및 상업적 기회의 개발을 촉진하고자 한다. Institute Q는 [그림 VI-2-2]에서처럼 세 개의 하위 조직인 ResQ (연구 중심), EduQ (교육 중심), BusinessQ (비즈니스에 중점, 즉 개발, 제품화 및 상업화)로 구성되어 있고, 각 하위 조직은 운영책임자와 각 조직인 알토 대학교(Aalto University), 헬싱키 대학교(University of Helsinki), 핀란드 VTT 기술 연구 센터 소속의 코디네이터 각 1명씩으로 구성되어 있다. 또한 관련 하위 조직 하에는 그 조직에 참여하거나 지원하는 20개 기관 및 기업들이 포함되어 있다. 각 조직의 실무그룹은 〈표 VI-2-8〉에 기술하였다.

그림 VI-2-2 InstituteQ 조직도 및 구성원



23) The Finnish Quantum Institute

표 Ⅵ-2-8 InstituteQ 조직 실무 그룹 구성원

실무그룹	이 름	직 무	연락처
ResQ	Pertti Hakonen	Operations Lead	pertti.hakonen@aalto.fi
	Sorin Paraoanu	Coordination, Aalto	sorin.paraoanu@aalto.fi
	Esko Keski-Vakkuri	Coordination, UH	esko.keski-vakkuri@helsinki.fi
	Visa Vesterinen	Coordination, VTT	visa.vesterinen@vtt.fi
EduQ	Sabrina Maniscalco	Operations Lead	sabrina.maniscalco@helsinki.fi
	Tapio Rasa	Coordination(UH & Aalto)	tapio.rasa@helsinki.fi
	Paolo Muratore-Ginanneschi	Coordination (Master's level & UH)	paolo.muratore-ginanneschi@helsinki.fi
	Jani-Petri Martikainen	Coordination Doctoral level & Aalto)	jani-petri.martikainen@aalto.fi
	Caterina Foti	Outreach, Aalto	caterina.foti@aalto.fi
BusinessQ	Piia Konstari	Operations Lead	piia.konstari@vtt.fi
	Jukka Nurminen	BusinessQ Coordination, UH	jukka.k.nurminen@helsinki.fi
	Ilkka Tittonen	BusinessQ Coordination, Aalto	ilkka.tittonen@aalto.fi
	Olli Nurmi, Ville Kotovirta	BusinessQ coordination, VTT	firstname.lastname@vtt.fi

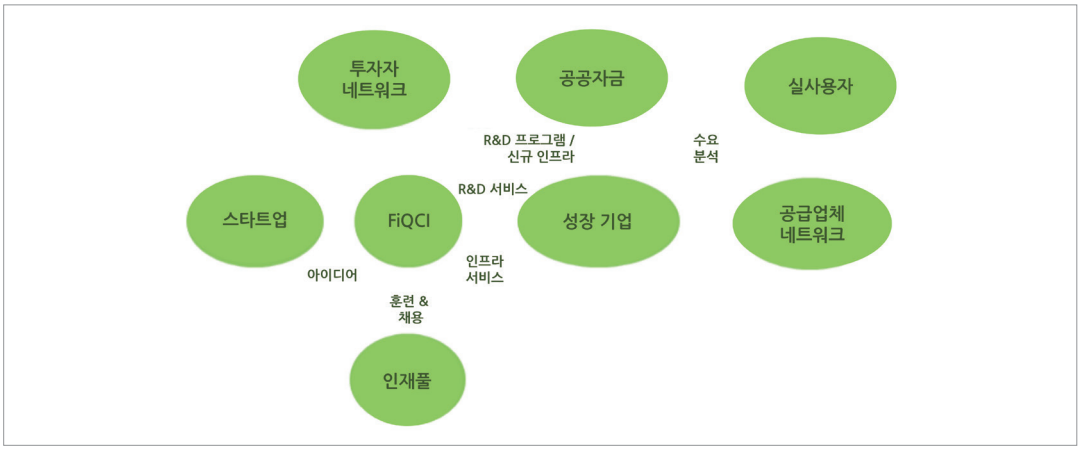
ResQ는 연구 및 인프라 구축을 위한 조직으로 기초 양자과학 및 기술 분야의 연구를 수행하고 조정하고 있다. ResQ의 목표는 양자기술 분야에 대한 관련 국가 인프라 개발을 제안하고 육성하는 것으로 새로운 연구 분야에 대한 기회를 구축하고 독창적인 네트워킹을 지원하며 박사 후 과정 프로그램을 구성한다. 이를 위해서 양자기술 분야의 방문자 프로그램을 구성하고 네트워킹에 중점을 둔 과학 심포지엄을 매년 개최하고 있다. 참여 기관으로는 OtaNano, 핀란드 양자컴퓨팅 인프라(FiQCI), QTF(Quantum Technology Finland) 등 3개 기관이 있다. 알토 대학교와 핀란드 VTT 기술 연구 센터가 공동으로 설립하고 개발한 OtaNano는 Espoo의 Otaniemi 캠퍼스에서 양자 기술을 위한 고급 나노제조, 나노현미경 및 초저온 측정 시설을 제공하는 국가 개방형 연구 인프라이고, FiQCI는 VTT, 알토 대학교 및 CSC – IT center for science Ltd가 공동으로 개발한 새로운 연구 인프라이다. FiQCI는 미래 양자컴퓨터에서 컴퓨팅 기술 활용 계획을 지원하기 위해 컴퓨팅 시간 및 교육과 같은 양자컴퓨팅 서비스를 제공할 예정이다. QTF는 고체 기반 양자 장치 및 응용 분야에서 양자 현상을 활용하기 위한 연구센터로 알토 대학교, 헬싱키 대학교, 핀란드 VTT 기술 연구 센터 등지에 약 120명의 연구원이 협력하고 있다.

EduQ는 교육과 훈련 관련 조직으로 양자과학 및 기술 관련 분야의 학생들을 위한 교육 프레임워크를 개발하고 포괄적인 양자기술 학습 방법을 구상하는 것을 목표로 하고 있다. EduQ는 국립 양자과학기술대학원 운영을 위해 알토 대학교 이과대학 응용물리학과 및 전기공학부 전자나노공학과와 헬싱

키 대학교 이과대학의 학술 서비스를 통합하여 석사 및 박사 과정 학생에게 양자과학 및 기술 분야의 교육을 제공하고 있다. 기존 교육 프로그램을 기반으로 교수진과 제3자 간의 협력을 통해 교육 프로그램 제공을 확장하고 있다. 두 대학교는 양자과학 및 기술 석사 과정을 위해 2021년 9월 1일부터 발효된 '헬싱키 수도권 양자기술 교육 협력' 협약을 체결하여 두 기관의 학생들이 양자기술 강좌를 교차 학습할 수 있도록 했다. Jane and Aatos Erkko 재단의 지원을 받는 양자기술 박사과정에는 현재 약 100여 명의 박사 과정 학생들이 재학 중이며 다양한 양자 기술 관련 분야 간의 가교를 구축하여 광범위한 연구 주제가 진행될 수 있도록 하는 것을 목표로 하고 있다. 특히 산업박사학위는 산업과의 긴밀한 협력을 통해 관련 연구를 추구하며, 현재 양자기술 노키아 산업 박사 과정, IQM, Algorithmiq, SAAB과 4개의 프로그램을 진행하고 있다. 또한 DigiQ 프로그램을 통해 두 대학교의 학생들은 유럽 전역의 양자기술에 관련된 대학 과정(온라인 및/또는 현장), 인턴십 및 교환 프로그램, 4개의 DigiQ 학생 네트워크에 접촉할 수 있다. 이는 현장에서 고도로 숙련된 미래 인력을 교육하고, 조직 간 학생 공동 감독도 촉진할 수 있다. 마지막으로 온라인 플랫폼인 QPlayLearn을 제공하는데 양자과학 및 기술을 재미있는 방식으로 학습할 수 있는 멀티미디어 리소스도 제공하고 있다.

BusinessQ는 혁신과 비즈니스를 위한 조직으로 2021년에 설립되었으며 현재 하드웨어, 소프트웨어, 컨설팅 및 애플리케이션 테스트와 같은 광범위한 영역을 다루는 20명 이상의 회원으로 구성되어 있다. BusinessQ 생태계는 아직 초기 단계여서 규모와 구성이 제한되어 있지만 소프트웨어 및 실사용자의 기업에 국한해서 열어두고 있다. BusinessQ의 주요 목표는 핀란드에서 양자기술의 이점을 극대화하고 비즈니스 성장을 위한 원동력이 되고자 하는 것이다. 이러한 목표를 구현하기 위해 BusinessQ에는 양자기술 기업이 핀란드 혁신 기업과 긴밀히 협력하고 새로운 양자 기반 국제 비즈니스 기회를 창출할 수 있도록 지원하는 운영 및 서비스가 필요하다. BusinessQ의 운영은 InstituteQ 구조 내 VTT에 의해 시작되었으나 생태계가 더욱 성숙해지고 위의 활동이 더욱 세부적으로 정리되면 BusinessQ가 더욱 강력한 운영 구조를 갖추게 될 것이고 커뮤니티에 생태계 서비스를 제공하게 될 것이다.

그림 VI-2-3 BusinessQ 생태계 플레이어



※ The Finnish Quantum Institute 집필진 재구성

BusinessQ는 핀란드 산업과 비즈니스에 양자기술이 미치는 영향을 확대하고 핀란드 양자기술 비즈니스 로드맵 형성 및 기술 제공자 및 실사용자 기업과의 협력 및 토론을 위한 포럼이 되는 것을 목표로 하고 있다. 이 조직은 양자기술을 통한 새로운 비즈니스 창출을 지원하고 비즈니스 생태계 프로젝트를 사전에 계획하고 있다. 특히 양자컴퓨팅을 위한 응용 도메인 개발을 위해 매년 산학 세미나, 중개 및 매치메이킹 이벤트를 개최하여 최첨단 인프라와 교육의 이점을 핀란드 기업과 산업에 전달하기 위해 노력하고 있다.

그림 VI-2-4 BusinessQ 주요 기능



※ The Finnish Quantum Institute 집필진 재구성

BusinessQ 이니셔티브와 주요 주제는 〈표 VI-2-9〉에 기술한 것처럼 생태계 확장 및 네트워킹, R&I 역량 구축, 영향력 창출 및 시장 접근이라는 네 가지 영역에 걸쳐 있다. 이 4개 분야의 단기/중기/장기적 실행 계획은 아래와 같다.

표 VI-2-9 BusinessQ 단기/중기/장기적 실행 계획

	단기 (12개월)	중기 (12-24개월)	장기(24개월 이상)
생태계 확장 및 네트워킹	• 의사소통 및 전파 계획 수립 • 네트워킹 계획 만들기 • 양자컴퓨팅 인프라에 대한 추가 기간 한정 계획 개발 • 유효성, 검증 및 벤치마킹 연구실을 위한 기간 한정 계획 개발	• BusinessQ 서비스 및 가치 제안 정의 • 회원수 증가	• 소프트웨어 개발자(커널, 알고리즘, 모델 또는 애플리케이션 수준 작업) 및 실사용자 커뮤니티 자극

	단기 (12개월)	중기 (12-24개월)	장기(24개월 이상)
R&I 혁신 역량 강화	• 태스크포스 출범 • 모범 사례 공유 및 공동 지식 자산 생성 • 양자컴퓨팅 과제 구성 • 알고리즘 개발자를 위해 FiQCI에 20큐비트 양자컴퓨터 배포 • 핀란드 최초 개방형 아키텍처 양자컴퓨터 테스트베드 시작 • 검증, 유효성 및 벤치마킹 연구실 초기 계획 • 글로벌 최첨단 양자컴퓨터 접근 • 양자칩 제조시설 증설 및 구축을 위한 자금 기획 및 확보	• 클라우드 서비스를 통해 양자기술 리소스에 대한 액세스 제공 • 공동 프로젝트 포트폴리오 구축 • 알고리즘 개발자를 위해 FiQCI에 50큐비트 양자컴퓨터 배포 • 개방형 아키텍처 양자컴퓨터 테스트베드 수십 큐비트로 확장 • 검증, 유효성 및 벤치마킹 연구소 구축 • R&D 및 산업용 양자칩 구축 착수 • 제조 시설	• 알고리즘 설계와 양자기술 하드웨어 개발 간 상호작용 자극 • HPC/QC 통합 개발 가속화 • 양자 우월성 구현 • 알고리즘 개발자 및 애플리케이션을 위한 FiQCI의 양자 이점 컴퓨터 • 개방형 아키텍처 양자컴퓨터 테스트베드 완성 • verification, validation 및 벤치마킹 연구소 완벽 운영 • 운영 중인 양자칩 제조 시설, R&D/파일럿 라인 시설 두 배 확장, 산업용 파일럿 라인 및 생산 시설 4배 확장
영향력 창출	• Helmi QC 사용자 그룹 생성 • 양자기술 新 응용 분야 식별	• PoC 시작	• 참조 구현 및 데이터 준비를 통해 사용 사례 수집 구축
시장에 대한 접근	• 공동전시회 참석	• 핀란드 내에서 컨퍼런스 주선	• 시장 분석 • 비즈니스 클럽 구성

〈표 VI-2-10〉부터 〈표 VI-2-12〉는 현재 InstituteQ에 참여 중인 알토 대학교, 헬싱키 대학교, VTT의 참여 연구 그룹 및 관련 연구 분야와 각 그룹의 리더의 이름, 학과 등에 대해 소개하였다.

표 VI-2-10 InsituteQ 참여 연구 그룹 (알토 대학교)

연구 그룹	연구 분야	그룹 리더	학과
상관 양자 재료	양자물질이론, 얽힌양자물질	Jose Lado	응용 물리학과
다중규모 통계 및 양자물리학	정보 이론, 개방형 양자 시스템	Tapio Ala-Nissilä	
나노자기학 및 스핀 트로닉스	양자자기학, 스핀트로닉스, 마그논-포논결합, 마그논-광자결합	van Dijken	
양자나노역학	기계적 양자소자, 공동 광역학, 큐비트-음향 하이브리드	Mika Sillanpää	
양자현상및장치	양자열역학, 양자소자, 메조시픽 물리학	Jukka Pekola	
양자 수송	이론응집물질물리, 양자수송, 통계물리, 양자정보처리	Christian Flindt	
초전도 큐비트 및 회로 QED	초전도 회로 QED 플랫폼을 활용한 실험적, 이론적 응집물질 및 양자정보	Sorin Paraoanu	
원자 규모 물리학	2D재료, 이종구조, 토폴로지 재료	Peter Liljeroth	
양자 회로 및 상관관계	양자 감지, 양자 재료, 하이브리드 장치, 초전도 시스템의 얽힘, NEMS	Pertti Hakonen	
양자컴퓨팅 및 장치	초전도 회로, 큐비트, 개방형 양자 시스템, 볼로미터	Mikko Möttönen	
양자역학	다체 양자물리학, 초전도성, 나노포토닉스, 보스-아인슈타인 응축, 초저온 기체	Päivi Törmä	응용 물리학과

연구 그룹	연구 분야	그룹 리더	학과
마이크로 및 양자 시스템	포스트 양자 암호화, 양자 알고리즘	Ilkka Tittonen	전자나노 공학과
나노과학과첨단재료	양자기술을 위한 나노물질 및 장치	Harri Lipsanen	
포토닉스	통합 양자 포토닉스	Zhipei Sun	
팔러 그룹	내결함성 양자컴퓨팅, 컴파일러,디코더	Alexandru Paler	컴퓨터 공학과
양자 기계 학습기	인공지능과 머신러닝, 양자 머신러닝	Vikas Garg	
시스템 및 서비스 엔지니어링 및 분석	시스템, 소프트웨어, 데이터 및 서비스 엔지니어링 및 분석	Hong-Linh Truong	
의사소통이론	양자 오류 수정 및 내결함성 계산, QKD	Olav Tirkkonen	통신 네트워킹 학과
통신공학	양자 마이크로파 통신 및 양자비밀통신	Riku Jäntti	
대수학, 정수론 및 응용	양자정보이론, 양자 개인 정보 검색, 포스트 양자 암호학, 양자 매트로이드 이론	Camilla Hollanti	수학 및 시스템분석학과
신기술 상용화	실험실에서 시장까지 양자컴퓨팅	Nina Granqvist	경영학과
GIST Lab	공간데이터 과학, 도시분석 및 모델링, 교통 시뮬레이션/최적화, 예측분석, 공간의사 결정 지원 시스템	Henrikki Tenkanen	건축환경학과
신경영상 방법	신경 영상 계측을 위한 양자감지 (자기측정)	Lauri Parkkonen	신경과학 및 의생명 공학과

표 Ⅵ-2-11 InsituteQ 참여 연구 그룹 (헬싱키 대학교)

연구 그룹	연구 분야	그룹 리더	학과
양자 행동	양자물리학과 신경과학의 인터페이스 *헬싱키대학교 생물 및 환경과학부, 알토대학교 신경과학 및 의생명공학과	Petri Ala-Laurila	연합
생물물리학	전산 생물물리학, 생체분자에서 세포/조직 규모까지 기능	Ilpo Vattulainen	물리학과
전산재료물리학	계산 재료 물리학, 실온 양자 기술을 위한 단일 원자 큐비트	Flyura Djurabekova	
헬텍	정보 이론, 알고리즘 및 소프트웨어	Sabrina Maniscalco	
물리교육연구	교훈 물리학, 개념적 이해, 물리학에서의 수학, 네트워크	Ismo Koponen	
양자장, 중력 및 정보	양자장 및 다체 시스템의 양자 정보	Esko Keski-Vakkuri	
우주기술	우주 과학 임무를 위한 기술 및 장비	Juhani Huovelin	
실험입자물리학	양자 감지, 입자 물리학, 저잡음 전자, RF 기술, 반도체	Matti Kalliokoski	헬싱키 물리학 연구소
역 문제	수치 시뮬레이션, 양자 응용의 이미징, 단층 촬영 문제, 광학 및 양자컴퓨팅의 관계	Matti Lassas	수학 및 통계학과
수리물리학	개방형 양자 시스템 이론, 양자장 이론	Antti Kupiainen	
최적화	비순조적 최적화, 일반 이론, 방법, 기계 학습에 대한 응용 및 역문제	Tuomo Valkonen	
경험적 소프트웨어 공학	양자 소프트웨어 공학	Jukka K. Nurminen	컴퓨터공학과
경험적 소프트웨어 공학II	양자 소프트웨어	Tomi Männistö	
통합 데이터베이스 관리 시스템	데이터베이스 및 데이터 관리, 양자컴퓨팅 및 데이터베이스의 범주 이론	Jiaheng Lu	

연구 그룹	연구 분야	그룹 리더	학과
레이저 분광학	분자 분광학 및 현미경, 광주파수 계측을 위한 고정밀 실험 방법	Markku Vainio	화학과
수치양자화학	양자 방법, 양자컴퓨터의 양자 화학	Susi Lehtola	
이론화학과 전산화학	양자화학방법론, 전자구조이론, 양자컴퓨팅	Dage Sundholm	
양자철학	양자이론 해석, 양자정보 다양성, 양자생물학, 양자인지, 양자이론과 현실, 양자역학 인식론적 문제, 의식에 대한 양자적 접근	Paavo Pylkkänen	철학, 역사, 예술학과

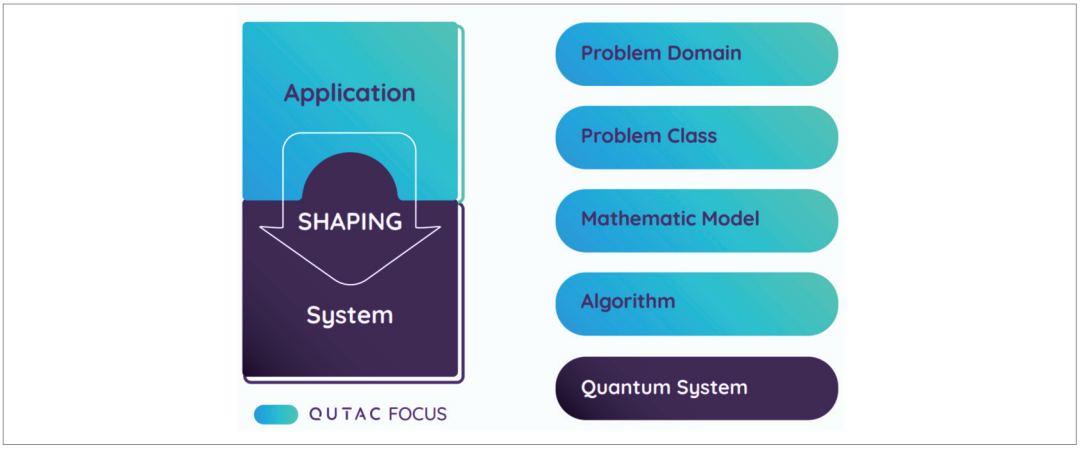
표 Ⅵ-2-12 InsituteQ 참여 연구 그룹 (VTT)

연구 그룹	연구 분야	그룹 리더	학과
실리콘 포토닉스	광자 집적 회로	Timo Aalto	마이크로 전자공학 및 양자기술
응용양자전자	초전도 제조 플랫폼 및 전자공학	Visa Vesterinen	
마이크로 전자 공학 및 양자 기술	고전부터 양자까지 고성능 마이크로시스템	Mika Prunnila	
통합전산재료공학과	재료 개발 및 거동, 양자 화학에서의 양자컴퓨팅	Tom Andersson	지식중심 디자인
포스트 양자 암호화	암호화 및 사이버 보안 적용	Visa Vallivaara	안전하고 연결된 사회
QKD 네트워크 및 통신	QKD 네트워크 제어 및 오케스트레이션	Kari Seppänen	
양자 알고리즘 및 소프트웨어	양자 알고리즘, 양자 정보, 시뮬레이션 및 기계 학습	Ville Kotovirta	양자 알고리즘 및 소프트웨어
양자 예측	양자컴퓨팅 애플리케이션	Tiina Apilo	예측과 데이터 경제
양자계측학	전기 양자 표준기, 원자시계, 극저온 양자소자, 광학집적 초전도 양자소자	Antti Manninen	MIKES

제4절 독일 QUTAC

독일 양자기술 및 응용 컨소시엄(Quantum Technology and Application Consortium, QUTAC)은 독일 정부의 야심찬 목표와 다양한 연구 프로그램을 지원하면서 양자컴퓨팅 생태계를 구축하고 발전시키고자 한다.[24] QUTAC는 비즈니스 영향과 기술 발전의 균형을 맞추면서 양자컴퓨팅을 실용적인 응용 수준으로 끌어올리고 협력하여 새로운 디지털 미래를 적극적으로 형성하는 것을 목표로 하고 있다.[25] 양자컴퓨팅을 실제로 실행하고 상업적으로 성공적인 응용 프로그램으로써 활용하기 위해서는 기술 전문성, 혁신 정신, 경제적 자원, 그리고 협력이 무엇보다 필요하다. 따라서 QUTAC을 통해 참여 구성원들의 고유한 개발 프로젝트에서 얻은 결과를 모으고, 추가 개발을 촉진하고, 실제 사용을 위해 효과적으로 발전시키고자 한다. 가까운 미래, 세계에 혁명을 가져올 수도 있는 양자컴퓨터가 우리의 삶과 일하는 방식을 어떻게 변화시킬지 현재로서는 정확히 알 수 없다. 하지만 일부 산업에서는 특정 응용 시나리오가 이미 구체화 되고 있으며 물류, 운송 또는 금융 분야의 복잡한 최적화 문제를 해결하는 데 실용적이고 경제적인 잠재력을 보여주고 있다.

그림 Ⅵ-2-5 QUTAC Focus



※ QUTAC Application Group (2022)

산업 응용 분야에 중점을 두고 있는 QUTAC은 양자컴퓨팅에 대한 긍정적인 전망을 입증하고 있으며, 초기 실제 적용을 준비하고 있다. 첫 번째 단계에서는 가능한 모든 응용 프로그램과 산업 실현 가능성을 식별하고 이를 통해 성공적인 양자 생태계에 대한 기대와 필요한 투자를 조화시키려고 한다. 양자

24) QUTAC Application Group (2022)
25) Quantum Technology & Application Consortium

컴퓨팅 기술 상용화의 가속화를 위해서 [그림 VI-2-6]에서처럼 산업 활용 사례, 협업, 시장 인큐베이션의 세 가지 행동 영역을 제안하고 있다.

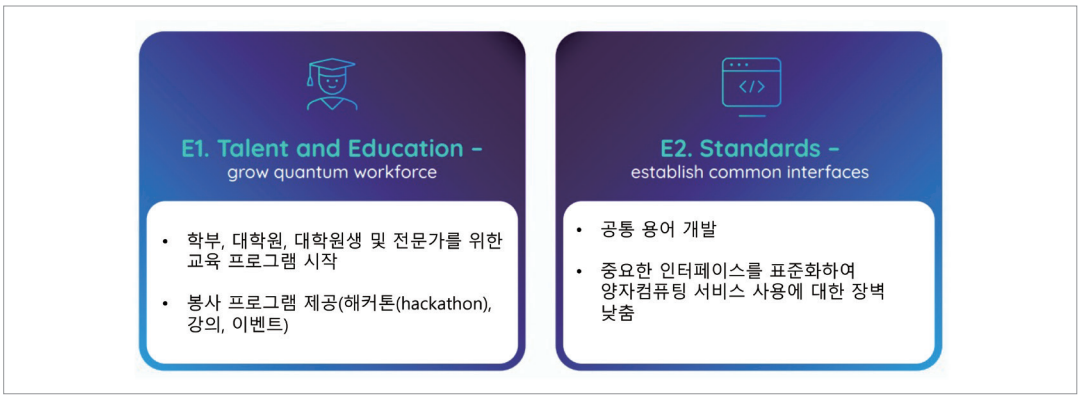
그림 VI-2-6 QUTAC 집중 영역별 조치



※ QUTAC Application Group (2022) 집필진 재구성

이와 더불어 중요한 것은 [그림 VI-2-7]과 같은 조력자의 역할이다.

그림 VI-2-7 QUTAC 조력자



※ QUTAC Application Group (2022) 집필진 재구성

QUTAC의 목표는 독일 산업 내 양자컴퓨팅에 대한 수요 확인, 산업 간 애플리케이션 포트폴리오 기반 구축, 참조 응용 프로그램의 공동 실현 및 컨소시엄 경계를 넘어서는 협력 요청 등이 있다. 이와 함께 QUTAC는 독일을 양자컴퓨팅 분야의 디지털 주권으로 이끌고 이를 통해 유로파를 비즈니스 장소로 발전시키려고 한다.

2023년 10월 QUTAC에는 BASF, BMW group, Boehringer Ingelheim, Bosch, Deutsche Telekom, Infineon Technologies, Lufthansa Industry Solutions, Merck, Munich Re, SAP, Siemens, TRUMPF, Volkswagen의 13개 기업이 참여하고 있고, Airbus는 외부 기여자로 참여하고 있다.

그림 Ⅵ-2-8 QUTAC members



2023년에 Deutsche Telekom, Lufthansa Industry Solutions, TRUMPF 3개의 기업이 QUTAC에 추가로 참여하고 있으며, 이들은 다양한 개발 프로젝트를 통해서 각자의 산업과 여러 부문에서 양자컴퓨팅 분야의 첫 번째 실용적인 응용 프로그램 개발을 추진하고 있다.

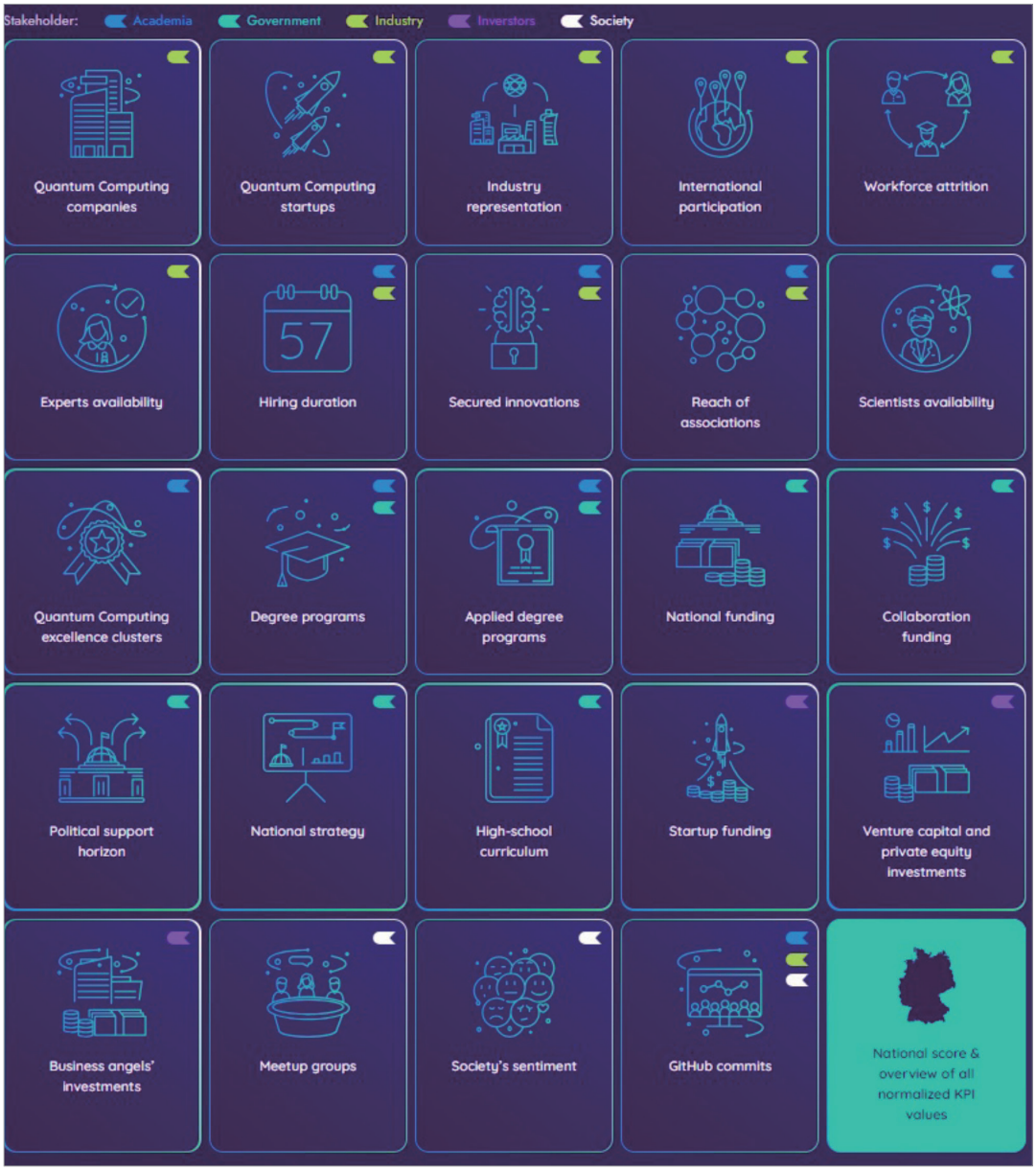
표 Ⅵ-2-13 QUTAC 구성원 소개 및 기여도 (2023년 10월 기준)

기관명	산업 분야	QUTAC 내 역할	프로젝트 (23)
BASF	화학, 재료, 영양 및 관리, 표면기술, 산업 솔루션, 농업 솔루션	· 연구 결과를 산업 현장으로 이전 · 응용 전문 지식 전달 및 교육에 대한 접근	양자컴퓨팅이 화학 촉매 개발에 어떻게 도움이 되는가?
BMW group	자동차 및 오토바이 제조, 금융, 모빌리티 서비스	· 자동차 산업 문제에 대한 양자컴퓨팅 사용 발전 · 로봇 경로 계획/버퍼 최적화, 배터리 개발을 위한 재료 시뮬레이션, 텍스트 처리, 공급망, 물류, 개발 및 생산 최적화 문제	
Boehringer Ingelheim	바이오제약	양자컴퓨팅을 통한 실험실 연구 보완 및 가속하여 신약 발견	시간의 문제
Bosch	제조 및 서비스	양자컴퓨터 지원 최적화 및 기계학습 응용	
Deutsche Telekom(23)	통신	· 통신 분야 양자컴퓨팅 애플리케이션 개발 · 네트워크 최적화, 양자 알고리즘 구현, 양자 암호화 플랫폼 구축, 새로운 통신 및 조정 가능성을 위한 양자 기계적 특성 활용	

기관명	산업 분야	QUTAC 내 역할	프로젝트 (23)
Infineon Technologies	반도체 공급/제조	· 수요-용량 일치 개선 및 센서 기반 공급망 최적화를 위한 새로운 솔루션 구현 · 초전도체, 반도체, 이온 기반 큐비트 연구/개발	양자컴퓨팅을 활용한 공급망 최적화
Lufthansa Industry Solutions(23)	IT 컨설팅, 모바일 플랫폼, 항공	· 항공 및 항공 교통에 대한 양자컴퓨팅 애플리케이션 개발 · 유지 관리 프로세스, 비행 계획 및 경로, 게이트 할당 및 항공 화물 유통의 최적화	
Merck	의료, 생명과학, 전자기기	· 정확한 게놈 편집 기술 개발 · 질병 치료를 위한 독특한 방법 발견, 스마트 장치용 애플리케이션 제공	임상 시험 계획 및 수행 방법 최적화
Munich Re	보험	적용 가능한 시나리오 분석 및 전기자동차 배터리 성능 보험/물류회사 운송 보험과 같은 초기 양자 기반 비즈니스 아이디어 개발	복잡한 위험의 이해, 계산 및 헤징(hedging)
SAP	소프트웨어	· 물류, 제조, 조달 분야에서 양자컴퓨팅 사용 · 운송 경로, 공급망, 생산 계획 최적화 방법 개발	
Siemens	산업, 인프라, 모빌리티	· 작업 현장 관리를 위한 개별 솔루션 활성화 · 다양한 산업 분야 데이터 분석 가속화 위한 기계학습 참여	
TRUMPF(23)	기계, 레이저 기술	· 생산 시 기계 점유 최적화, 기계 학습을 통한 이미지 처리, 레이저 절단 시 열 입력 시뮬레이션을 위한 양자컴퓨팅 애플리케이션 개발·	미래 금속 가공을 위한 최적화된 생산 계획
Volkswagen	자동차 제조	· 경로 계획 프로세스 추가 개발 · 양자 알고리즘 이용 물류와 생산 운송 차량 사용 최적화	자동차 생산 공장의 도장 공장 최적화

QUTAC는 독일 및 유럽 내 사업 위치의 경쟁 우위 선점과 독일에서 자주적인 양자컴퓨팅 생태계 형성을 위해 산업적으로 적용 가능하도록 양자컴퓨팅 개발 과정을 가속화하는 것이 중요하다고 보고 있다. 따라서 양자컴퓨팅 생태계를 정기적으로 모니터링하고 잠재적인 개선 영역을 식별하기 위해 2022년 10월 모든 관련 이해관계자와 실행자를 포함하는 24개 핵심성과지표(KPI)로 구성된 프레임워크 개발을 통해 독일의 성과를 나타내고 있다 (https://www.qutac.de/kpis). KPI는 현 수준을 수시 업데이트하고 있으며 현재 독일의 양자컴퓨팅 관련한 활동을 확인하기 용이하다. 2023년 현재 기준으로 정규화된 총 KPI는 0.54로 표기되고 있다.

그림 Ⅵ-2-9 QUTAC의 24개 핵심성과지표 (KPI)



※ Qauntum Technology & Application Consortium

제5절 영국 UKQuantum

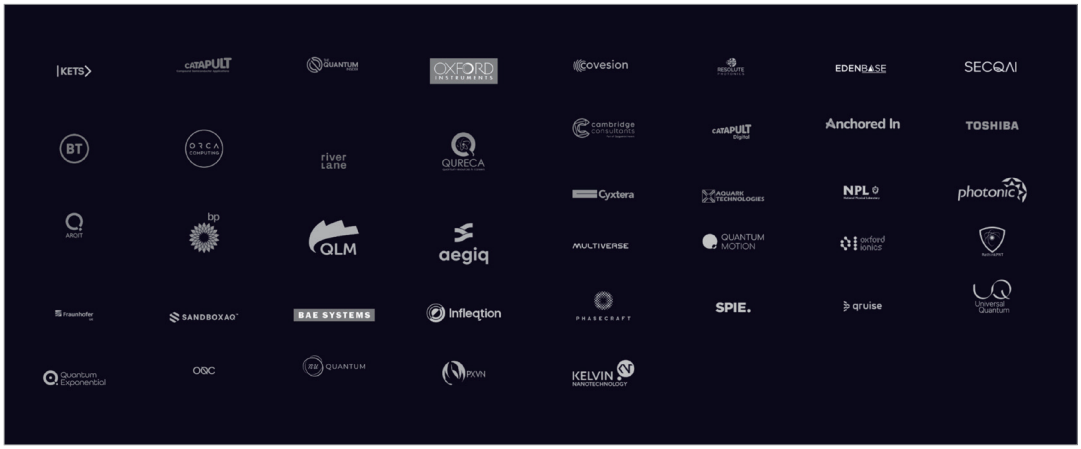
2022년 11월 공식적으로 설립된 무역협회인 UKQuantum은 영국 양자산업을 하나의 목소리로 통합하고, 양자산업을 발전시킬 조정과 정책에 대해 조언하면서 영국 정부와 국제적으로 업계를 옹호하고, 영국 경제 전반에 걸쳐 양자기술의 채택과 혜택에 대해 알리는 것을 사명으로 하고 있다.[26] 스타트업부터 기업 사용자까지 30명 이상의 회원을 보유한 UKQuantum은 영국의 국가 양자 전략(National Quantum Strategy)에서 핵심 파트너로 자리매김하고 있으며 2023년 초 발표된 영국 정부의 25억 파운드 (약 411억원) 규모의 국가 전력에 중요한 의견을 제공하였다. 회원들은 정부의 요청에 의견을 추가하고, 실무 그룹을 통해 피드백을 제공하며, 영국 전역에 웹 세미나 및 이벤트를 주최할 기회를 얻고 있다.

UKQuantum은 2023년 7월 13일, 초기부터 컨소시엄 구성의 중심인물이었던 Jonathan Legh-Smith를 전무이사로 임명하였다. 그는 정책, 전략 및 프로그램 관리를 다루는 R&D 및 혁신 임원으로서 광범위한 경험을 보유하고 있고 현재 국립 양자기술 프로그램 전략 자문 위원회, 국립 양자컴퓨팅 센터 기술 자문 그룹 및 NPL의 양자 계측 연구소 자문 위원회의 회원이다. 이전에는 BT의 과학 담당 책임자로 양자기술, 미래 통신 및 사이버 물리 인프라를 포함한 국가 연구 및 혁신 우선순위에 대한 참여를 주도했다. 그는 BT의 학계 및 산업 연구 파트너십과 함께 10년 넘게 BT의 전략 연구 프로그램을 지휘했다. 또한 BT의 표준 책임자였고 영국 동부에서 BT의 학교 참여 프로그램을 구축하는 등 상업화, 책임 있는 혁신, 평등, 다양성 및 포용 분야에서 컨소시엄의 전략적 방향을 더욱 촉진할 것으로 보인다.

UKQuantum에 가입하기 위해서는 양자기술 산업에 속하고 영국 본사 또는 실질적으로 영국에 사업장이 있는 기업이어야 한다. 회원을 유지하기 위해서는 소규모 회사와 스타트업은 £1,000, 성장하고 있는 회사나 200명 미만의 중소기업은 £2,500, 영국 및 다국적 대규모 조직은 £7,500, 양자기술 분야에 관련된 기타 연구 기관, 대학 및 그룹은 £1,000- £5,000 멤버쉽 비용을 지불해야 한다. 회원으로 가입하게 되면 생태계 전반의 관련 주제에 관한 정기 웹 세미나 및 위원회에 참석 가능하며, 다른 회원 및 조직과 직접 연결할 수 있고, 영국 지도부에 피드백 제공할 수 있으며, 영국의 기회, 우선순위 및 정책에 대한 최신 정보를 얻을 수 있다. 또, 주요 영국 내 정책 및 우선순위를 정의하는 작업에 참여할 수 있으며 업적을 알릴 수 있다. 2023년 10월 기준 회원으로 가입한 기관 및 기업은 [그림 VI-2-10]에 나타난 것처럼 41개로 나타나고 있다. 이 중 몇 기관 및 기업은 QED-C 및 QuIC에도 복수로 가입하고 있다.

26) UKQuantum

그림 VI-2-10 UKQuantum 회원 기관 및 기업



※ UKQuantum

UKQuantum의 실무그룹은 [그림 VI-2-11] 처럼 컴퓨팅, 감지, 통신 전반, 공급망 및 연구기관 전반에 걸친 양 기술 이해관계자의 혼합으로 구성된다.

그림 VI-2-11 UKQuantum 실무 그룹



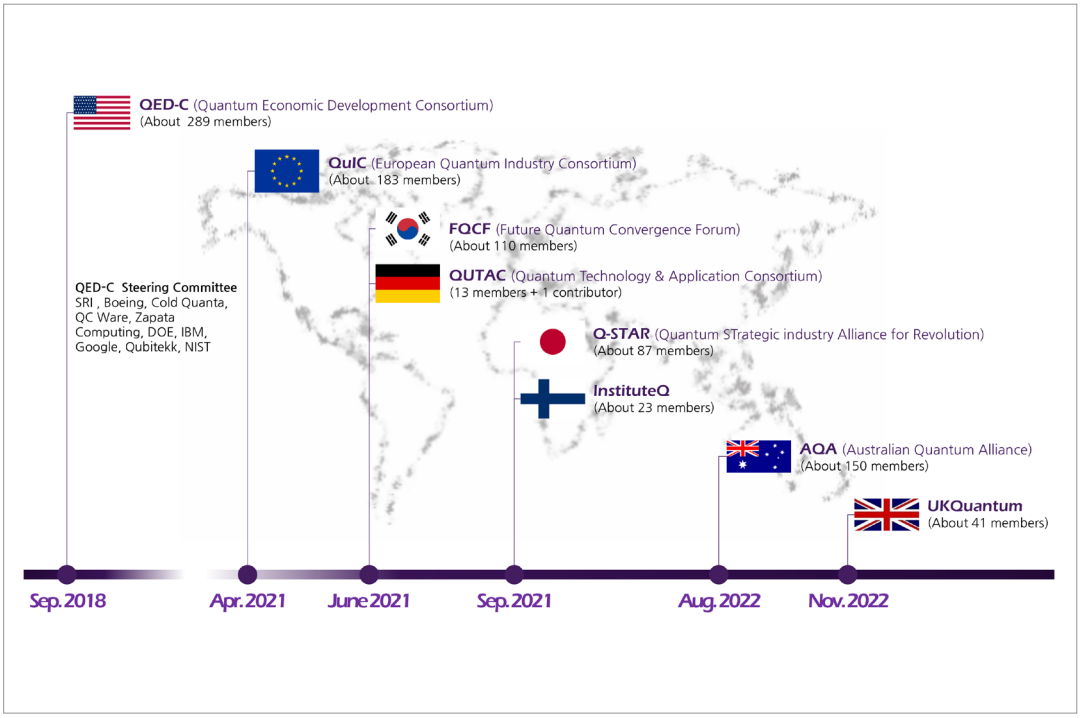
※ UKQuantum

제3장
기타 국가 (일본, 호주)

제1절 개요

2018년 미국을 시작으로 2023년 10월까지 8개의 협의체가 전 세계적으로 확인되고 있다. 특히 2021년에는 유럽 QuIC, 한국 FQCF, 독일 QUTAC, 일본 Q-STAR, 핀란드 InstituteQ를 포함한 5개의 협의체가 발족하였고, 2022년에는 AQA와 UKQauntum 협의체가 새롭게 구성되었다.

그림 VI-3-1 전세계 양자 협의체 (2023년 10월 기준)

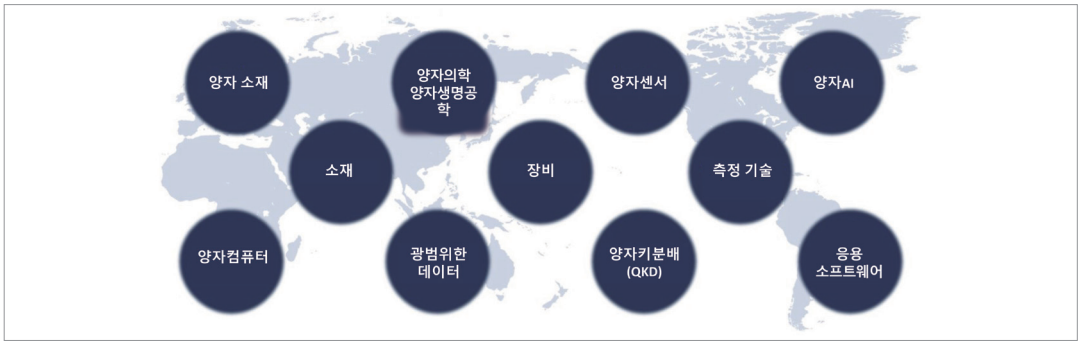


일본 양자기술신산업창출협의회(Quantum STrategic industry Alliance for Revolution, Q-STAR)는 20여 개의 기업과 기관으로 시작하여 2023년 5월 기준 약 59개로 증가하였고, 호주의 호주 양자동맹(Australian Quantum Alliance, AQA)은 10개의 창설 회원 기업과 함께 가장 늦게 구성되었지만 2023년 10월 기준 150개의 회원 기업 및 기관이 가입하고 있다. Q-STAR의 경우 가입 회원 수는 적지만 다양한 사업군이 분포되어 있고 AQA는 짧은 기간 동안 가장 빠르게 규모가 확장되고 있는 것으로 보인다. 아래 2절과 3절에서 각 협의체에 대해서 소개하고자 한다.

제2절 일본 Q-STAR (Quantum STrategic Alliance for Revolution)

일본의 양자기술신산업창출협의회(Quantum STrategic industry Alliance for Revolution, Q-STAR)는 2021년 9월 1일에 설립된 일본의 양자 관련 협의체이다. 설립 초기에는 도시바, 토요타, 후지쯔, NTT, NEC 등 24개 대기업 위주의 구성되었다.[27] Q-STAR는 '양자기술 혁신 국가로서의 일본'이라는 비전 아래 양자기술에 기반을 둔 새로운 산업 및 비즈니스 창출을 목표로 한다. Q-STAR는 이러한 목표 달성을 위해 소재, 장비, 측정 기술, 컴퓨터, 통신 및 시뮬레이션 기술과 같은 서비스를 제공하는 신산업을 창출해 일본 산업을 진흥하고 국가 경쟁력을 높이기 위해 노력한다.

그림 Ⅵ-3-2 일본 Q-STAR 활동 범위



※ Q-STAR (2022)

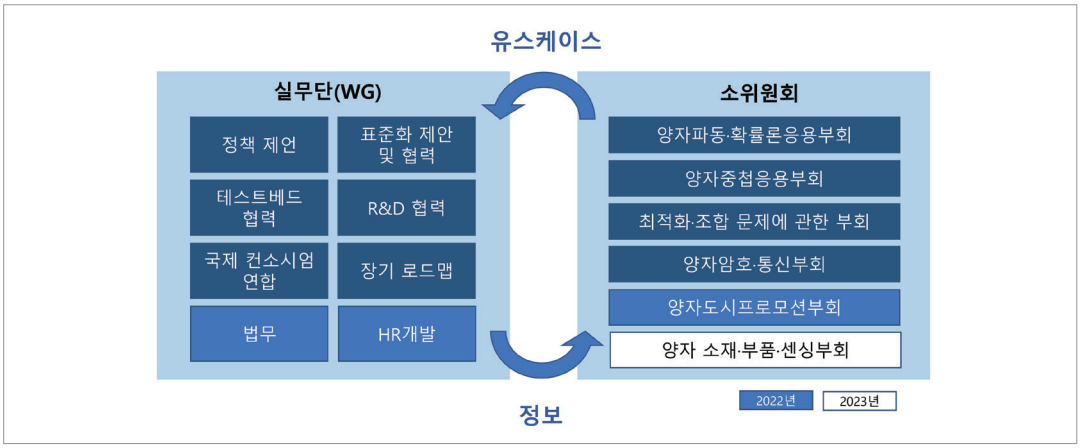
Q-STAR는 양자기술의 상용화를 통한 중장기 신산업 창출을 위해 양자기술 주요 동향 조사 및 산업계 최고 경영진과의 공유, 다양한 산업영역별 상용화 가능성 연구 및 제안, 양자기술에 필요한 소재·부품·장비 연구 및 공유, 양자기술의 적극적인 활용에 필요한 인력 자원 양성 방법론 연구 및 제안, 양자기술 구현에 필요한 지식재산·표준화·윤리에 관한 필수 자료 연구, Q-STAR의 목표 구현을 위한 국내외 양자 관련 기관과의 협력, 국민 의식 고취 및 정책제언 등의 역할을 수행 중이다.

Q-STAR는 크게 이사회와 운영위원회, 소위원회 3개의 조직으로 구성된다. 현재 도시바의 타로 시마다(Taro Shimada) 사장이 이사회의 회장직을 맡고 있으며, 4명의 부회장은 후지쯔와 히타치, NEC, NTT의 최고 경영진급 인사가 맡고 있다. 운영위원회는 총 8개의 실무단(Working Group)으로 이뤄져

27) Quantum STrategic industry Alliance for Revolution

있으며, 양자기술 주요 동향을 조사하고 상용화를 위한 여러 활동을 수행하고 있다. 총 6개의 부회로 구성된 소위원회는 양자기술 유스 케이스(Use Case) 발굴에 주력하고 있으며, 이를 토대로 한 보고서를 주기적으로 발간한다.

그림 Ⅵ-3-3 일본 Q-STAR 조직도



※ Q-STAR (2023)

Q-STAR는 양자암호, 양자컴퓨팅 등 양자기술뿐만 아니라 소재·부품 등의 기반 기술, 양자센서나 양자AI 등의 주요 상용화 기술 같은 연구가 필요한 영역을 파악하기 위해 6개의 부회로 구성된 소위원회를 조직했다. 양자파동·확률론응용 부회는 양자진폭 추정 및 최적화를 활용해 신산업을 창출하는 것을 목표로 한다. 양자중첩응용 부회는 시스템, 서비스, 비즈니스 등에 양자중첩을 적용해 기존 산업 구조의 변화를 모색한다. 최적화·조합 문제에 관한 부회는 실시간 예측과 효율성, 최적화 등 산업계가 직면한 다양한 문제에 최적의 솔루션을 제공하기 위해 양자에 기반한 컴퓨팅 기술인 이징머신(Ising Machine)을 활용한다. 양자암호·통신 부회는 현재 상용화가 활발히 이루어지는 양자암호통신 기술의 사업적 활용을 적극적으로 검토하고 있다. 양자도시프로모션부회는 양자기술을 다양한 관점에서 구현하기 위해 사회 인프라 개발과 관련된 활용 사례를 탐색한다. 마지막으로 양자 소재·부품·센싱부회는 양자 소재·부품·센싱 기술 관련 학계와 산업계의 협력 구축을 목표로 한다.

Q-STAR의 회원 기업 및 기관은 2022년 24개에서 2023년 11월 87개로 두 배 이상 증가하였다. 아래 표에서 2023년에 가입한 주요 기업 및 기관은 (23)으로 표기하였다. 준회원의 증가가 눈에 띄고, 금융 관련 기업의 가입이 많은 편이다. 다른 나라와 다른 점은 부동산, 인쇄, 식품 및 반도체 장비 제조 관련 기업 등 Q-STAR에 가입하는 기업의 사업군이 다양하다는 점이다. 아직 Q-STAR의 홈페이지 상에 회원사에 대한 정보가 제공되고 있지 않기 때문에 앞으로 가입하게 될 기업이나 기관에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

표 Ⅵ-3-1 Q-STAR 주요 특별 회원(Special Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
캐논 (Canon)	• 기관소개 : 사무기기, 카메라, 광학기기 제조회사
	• 주요제품 : 카메라, 진단 장비, 사무용 복합기
	• 홈페이지 : https://global.canon/en/
	• 주요시장 : 카메라, 의료, 산업 장비, 사무기기
교세라 (Kyocera)	• 기관소개 : 전자기기 제조회사
	• 주요제품 : 반도체 처리 장비, 평판 디스플레이 제조 장비, 정보 및 통신 부품
	• 홈페이지 : https://global.kyocera.com/
	• 주요시장 : 정보시스템 및 통신 서비스, 엔지니어링, 반도체 재료, 화학 재료
스미토모상사 (Sumitomo)	• 기관소개 : 통합무역회사
	• 홈페이지 : https://www.sumitomocorp.com/en/jp
	• 주요시장 : 철강, 항공우주, 건설, 인프라, 디지털, 에너지
솜포 홀딩스 (SOMPO Holdings)	• 기관소개 : 생명·손해보험회사
	• 홈페이지 : https://www.sompo-hd.com/en
	• 주요시장 : 보험, 디지털, 간호
조다이 (Chodai, 23)	• 기관소개 : 건설 컨설턴트
	• 홈페이지 : https://www.chodai.co.jp
	• 주요시장 : 교량, 터널 등 토목구조물, 도로, 철도 등
도시바 (Toshiba)	• 기관소개 : 전기·전자기기 제조회사
	• 주요제품 : 양자암호통신 장치 및 서비스
	• 홈페이지 : https://www.global.toshiba/ww/top.html
	• 주요시장 : 에너지, 인프라, 커뮤니티 솔루션, 의료 시스템 및 서비스, IT 솔루션
돗판 (Toppan, 23)	• 기관소개 : 인쇄 회사
	• 주요제품 : https://toppan.com
	• 주요시장 : 출판, 인쇄, 디지털 화상 처리, 액정용 컬러 필터 제조
토요타자동차 (Toyota Motor)	• 기관소개 : 자동차 제조회사
	• 주요제품 : 캠리, 프리우스, RAV4, 시에나
	• 홈페이지 : https://global.toyota/en/
	• 주요시장 : 자동차, 금융, IT
닛폰 전기 (NEC)	• 기관소개 : 통신·전자기기 종합 제조회사
	• 주요제품 : IT 하드웨어 및 솔루션
	• 홈페이지 : https://www.nec.com/
	• 주요시장 : 반도체 IC, 컴퓨터, 우주통신
일본전신전화 (NTT)	• 기관소개 : 통신회사
	• 주요제품 : 통신 장비 및 서비스
	• 홈페이지 : https://www.global.ntt/
	• 주요시장 : 장거리 및 국제 통신, 데이터 통신
히타치 (Hitachi)	• 기관소개 : 전자기기 중심 기계 종합 제조회사
	• 주요제품 : IT 솔루션, 산업기계, 일렉트로닉스
	• 홈페이지 : https://www.hitachi.co.kr/index.html
	• 주요시장 : 전기전자, 중공업, 에너지

기관명	회원 소개 및 개요
픽스스타즈 코프 (Fixstars)	• 기관소개 : IT 회사
	• 주요제품 : 컴퓨팅 보드 및 주변 장치
	• 홈페이지 : https://www.fixstars.com/ja
	• 주요시장 : 의료, 산업 장비, 모바일, 금융
후지쯔 (Fujitsu)	• 기관소개 : 컴퓨터 통합 시스템 설계 기업
	• 주요제품 : 36큐비트 양자컴퓨터 시뮬레이터
	• 홈페이지 : https://www.fujitsu.com/global/
	• 주요시장 : 금융, 신약 개발, 재료
스미토모 미쓰이 파이낸셜그룹 (Sumitomo Mitsui Financial Group)	• 기관소개 : 금융지주회사
	• 홈페이지 : https://www.smfg.co.jp/english/
	• 주요시장 : 상업 금융, 리스, 증권, 소비자 금융
미쓰비시 케미컬 (Mitsubishi Chemical)	• 기관소개 : 기능성 제품, 의료 및 재료 분야 회사
	• 홈페이지 : https://www.m-chemical.co.jp/en/index.html
	• 주요시장 : 재료, 화학, 에너지, IT, 의료
미쓰비시전기 (Mitsubishi Electric)	• 기관소개 : 전기·전자 장비 및 시스템 제조회사
	• 주요제품 : 터빈 발전기, 위성 및 유무선 통신 장비, LCD 장치
	• 홈페이지 : https://www.mitsubishielectric.com/en/index.html
	• 주요시장 : 중전기 기계, 정보통신, 전자 장치, 물류

표 Ⅵ-3-2 Q-STAR 주요 기업회원(Corporate Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
이토추 테크노 솔루션즈 (ITOCHU Techno-Solutions, 23)	• 기관소개 : 시스템통합(SI) 전문 회사
	• 홈페이지 : https://www.ctc-g.co.jp
	• 주요시장 : 컴퓨터 및 네트워크 시스템 판매·보수, 소프트웨어 위탁 개발, 정보 처리 서비스, 과학·공학계 정보 서비스
오사카가스 네트워크 (OSAKA GAS NETWORK)	• 기관소개 : 가스 유통 회사
	• 홈페이지 : https://www.osakagas.co.jp/
	• 주요시장 : 가스, 교육, 컨설팅
KDDI	• 기관소개 : 이동통신 및 유선통신 회사
	• 주요제품 : 개인·가정용 통신 서비스, 기업 대상 ICT 솔루션 서비스
	• 홈페이지 : https://www.kddi.com/
소프트뱅크 (SoftBank)	• 기관소개 : IT 기업이자 투자회사
	• 홈페이지 : https://www.softbank.jp/corp/
	• 주요시장 : 이동통신, 유선통신, IT 솔루션 지원 HW 및 SW
다이이치 생명 홀딩스 (Dai-ichi Life Insurance Company, 23)	• 기관소개 : 생명 보험 지주 회사
	• 홈페이지 : https://www.dai-ichi-life.co.jp
	• 주요시장 : 법인 및 개인 의료 보험, 생명 보험 및 컨설팅 서비스
미쓰비시 다나베 파마 (Mitsubishi Tanabe Pharma)	• 기관소개 : 의약품 제조 및 판매 회사
	• 주요제품 : 피부, 소화, 알레르기 관련 의약품
	• 홈페이지 : https://www.mt-pharma.co.jp/e/
	• 주요시장 : 제약
덴소 (DENSO)	• 기관소개 : 자동차 기술, 시스템 및 부품 공급 기업
	• 주요제품 : 가솔린 및 디젤 엔진 제어 시스템, 에어컨 시스템, 반도체 센서 및 마이크로 전자 장치
	• 홈페이지 : https://www.denso.com/global/en/
	• 주요시장 : 자동차, 반도체
도쿄 해상 홀딩슨 (Tokio Marine Holdings, 23)	• 기관소개 : 보험사
	• 홈페이지 : https://www.tokiomarinehd.com
	• 주요시장 : 보험 지주회사
미즈호 파이낸셜 그룹 (Mizuho Financial Group)	• 기관소개 : 은행지주회사
	• 주요제품 : 금융 솔루션, 자문 서비스, 자산 관리 서비스
	• 홈페이지 : https://www.mizuhogroup.com/
	• 주요시장 : 금융, 보안, 리서치
미쓰이화학 (Mitsui Chemicals)	• 기관소개 : 종합 화학 제조업체
	• 주요제품 : 엘라스토머, 플라스틱 렌즈
	• 홈페이지 : https://www.mitsuichemicals.com/
	• 주요시장 : 모빌리티, 헬스케어, ICT 솔루션, 기초재료
MS&AD 인슈어런스 그룹 홀딩스 (Mitsui Sumitomo Insurance)	• 기관소개 : 생명·손해보험회사
	• 홈페이지 : https://www.ms-ins.com/english/
	• 주요시장 : AI 기반 건강 예측 서비스
미쓰이 물산 (Mitsui & Co, 23)	• 기관소개 : 종합상사
	• 홈페이지 : https://www.mitsui.com
	• 주요시장 : 금속 • 자원, 기계 • 인프라 등 트레이딩, 사업 투자, 사업 경영
미쓰비시 UFJ 파이낸셜 (Mitsubishi UFJ Financial Group, 23)	• 기관소개 : 금융
	• 홈페이지 : https://www.mufg.jp
	• 주요시장 : 금융지주회사

표 Ⅵ-3-3 Q-STAR 주요 준회원(Associate Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
SBS홀딩스 (SBS Holdings)	• 기관소개 : 물류 관련 서비스 제공 지주회사
	• 주요제품 : 제3자물류(3PL), 국제 물류, 물류 관련 컨설팅 서비스
	• 홈페이지 : https://www.sbs-group.co.jp
	• 주요시장 : 물류, 부동산, 환경
노무라종합연구소 (Nomura Research Institute)	• 기관소개 : 경영 컨설팅 서비스 기업
	• 주요제품 : 솔루션 서비스 및 기업·투자정보 제공
	• 홈페이지 : https://www.nri.com/jp
IHI (구 이시카와지마 하리마 중공업, 23)	• 기관소개 : 공학 기업
	• 홈페이지 : https://www.ihi.co.jp
	• 주요시장 : 선박, 우주발사체, 항공기 엔진, 해양 디젤 엔진, 가스 터빈, 가스 기관, 철도 시스템, 자동차용 터보차저, 플랜트 엔지니어링, 산업기계류, 발전소 보일러 및 기타 시설, 현수교 및 기타 구조물
NTT 커뮤니케이션즈 (NTT Communications, 23)	• 기관소개 : 통신회사
	• 홈페이지 : https://www.ntt.com/en/index.html
	• 주요시장 : 글로벌 네트워크 및 통신 서비스, 클라우드 서비스 및 데이터센터
Oxford Instruments K.K. (23)	• 기관소개 : 분석기기 제조사
	• 홈페이지 : https://www.oxford-instruments.jp
	• 주요시장 : 분석기기
가시마 건설 (KAJIMA, 23)	• 기관소개 : 종합 건설 회사
	• 홈페이지 : https://www.kajima.co.jp
	• 주요시장 : 건축설계, 토목공학 설계, 건설, 공학, 부동산 개발
KOKUBU GROUP (23)	• 기관소개 : 식품 도매업체
	• 홈페이지 : https://www.kokubu.co.jp
	• 주요시장 : 식품
Sony Group (23)	• 기관소개 : 다국적 복합기업
	• 홈페이지 : https://www.sony.com
	• 주요시장 : 엔터테인먼트, 금융, 반도체, 전자제품
다이닛폰 인쇄 (Dai Nippon Printing, 23)	• 기관소개 : 인쇄 회사
	• 홈페이지 : http://www.dnp.co.jp
	• 주요시장 : 출판, 인쇄, 정보 산업, 생활 산업, 디스플레이, 전자 부품
다이와 증권 그룹 (Daiwa Securities Group, 23)	• 기관소개 : 증권업 및 금융
	• 홈페이지 : https://www.daiwa-grp.jp
	• 주요시장 : 증권업무, 인터넷 은행, 자산관리
중부 전력 (Chubu Electric Power, 23)	• 기관소개 : 에너지 전력 회사
	• 홈페이지 : https://www.chuden.co.jp
	• 주요시장 : 천연가스 생산, 판매 및 유통, 발전 및 유통, 수력 발전, 풍력, 에너지 거래
TIS 인텍그룹 (TIS, 23)	• 기관소개 : IT 솔루션
	• 홈페이지 : https://www.tis.com
	• 주요시장 : 의료 서비스, 스마트 그리드, 스마트 시티, 전자 금융
도쿄 일렉트론 (Tokyo Electron, 23)	• 기관소개 : 전기전자기업
	• 홈페이지 : https://www.tel.com
	• 주요시장 : 반도체, 디스플레이 제조 장비 사업 분야
도쿄 전력 (Tokyo Electric Power Company Holdings, 23)	• 기관소개 : 전력 회사
	• 홈페이지 : https://www.tepco.co.jp
	• 주요시장 : 전력 공급, 차데모 규격 제공

기관명	회원 소개 및 개요
후지필름 (FUJIFILM Holdings, 23)	• 기관소개 : 정밀화학 • 홈페이지 : https://www.fujifilm.com • 주요시장 : 카메라, 필름, 인화지(프린트), 현상 장치, OA 기기, 화장품 및 건강식품 제조 및 판매
후루카와 전기공업 (Furukawa Electric, 23)	• 기관소개 : 전기 및 전자 장비 회사 • 홈페이지 : https://www.furukawa.co.jp • 주요시장 : 광섬유, 전선, 배선 등 전력 수송용 제품 제조
마쓰다 (Mazda Motor, 23)	• 기관소개 : 자동차 기업 • 홈페이지 : https://www.mazda.com • 주요시장 : 자동차 제조
Marubeni Information Systems (23)	• 기관소개 : IT 회사 • 홈페이지 : https://www.marubeni-sys.com • 주요시장 : 클라우드 서비스, AI, IoT 플랫폼 기반 서비스
미쓰비시 지쇼 (MITSUBISHI ESTATE, 23)	• 기관소개 : 부동산 개발 업체 • 홈페이지 : https://www.mec.co.jp • 주요시장 : 종합 부동산 개발
리코 (Ricoh, 23)	• 기관소개 : 사무기기, 광학 기기 등 제조 판매 • 홈페이지 : https://www.ricoh.co.jp • 주요시장 : 복사기, 팩시밀리, 레이저 프린터 및 그 복합기, 디지털 카메라

표 Ⅵ-3-4 Q-STAR 주요 중소기업 및 스타트업(Small and Medium/Start-up Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
어헤드 바이오컴퓨팅 (Ahead Biocomputing)	• 기관소개 : 신약 개발 및 대규모 바이오 데이터 처리 소프트웨어 스타트업 • 주요제품 : IT 기반 의약품 발견 서비스(CPathPred, Spresso, PKRank), MEGADOCK(단백질-단백질 도킹 소프트웨어), GHOSTZ(게놈 빅데이터 분석 소프트웨어) • 홈페이지 : https://ahead-biocomputing.co.jp/en/ • 주요시장 : 생명 정보, 머신러닝, 고성능 컴퓨팅
QuEL	• 기관소개 : 양자컴퓨터 제어 하드웨어 및 미들웨어 스타트업 • 주요제품 : QuEL-1(양자컴퓨팅 제어시스템) • 홈페이지 : https://quel-inc.com/
큐나시스 (QunaSys)	• 기관소개 : 양자컴퓨터 소프트웨어 스타트업 • 주요제품 : Qamuy(양자화학 계산 소프트웨어), Qulacs(양자회로 시뮬레이터 소프트웨어) • 홈페이지 : https://qunasys.com/ • 주요시장 : 제약 및 화학
그리드 (GRID)	• 기관소개 : AI 최적화 솔루션 제공 기업 • 주요제품 : ReNom(머신러닝, 딥러닝 AI 개발 플랫폼) • 홈페이지 : https://gridpredict.jp/en/
그루브노트 (Groovenauts)	• 기관소개 : 양자컴퓨팅 기반 최적화 솔루션 제공 스타트업 • 주요제품 : MAGELLAN BLOCKS(양자컴퓨터 클라우드 서비스), TECH PARK(어린이 IT 교육 플랫폼) • 홈페이지 : https://www.groovenauts.jp/en/privacy/
SkillUp Ai	• 기관소개 : 온라인 AI 학습 플랫폼 기업 • 주요제품 : 머신러닝, 딥러닝 등 AI 학습 강좌, AI 캠프 • 홈페이지 : https://www.groovenauts.jp/ • 주요시장 : 교육

기관명	회원 소개 및 개요
YDK	• 기관소개 : 항공우주 및 방위사업 관련 기업
	• 주요제품 : 항법장비, 해상장비, 민간항공기 엔진장비, 로켓엔진 점화장치
	• 홈페이지 : https://www.ydktechs.co.jp/en/index.html
	• 주요시장 : 해상 항법 및 항공우주

표 Ⅵ-3-5 Q-STAR 학계 회원 개요

기관명	회원 소개 및 개요	
요코하마국립대학교 양자정보연구센터 (YOKOHAMA National University Quantum Information Research Center)	• 연구분야 :	고효율 프로세서, 양자정보보안
	• 홈페이지 :	https://qic.ynu.ac.jp/en/index.html
Quantum Information Research Center (23)	• 연구분야 :	대규모 양자컴퓨팅 네트워크 구축 목표
	• 홈페이지 :	https://qic.ynu.ac.jp

제3절 호주 AQA

호주 양자 산업 분야의 호주 지역 및 글로벌 리더들은 호주 양자 산업의 목소리를 내기 위해 호주 기술위원회(Tech Council of Australia, TCA)의 후원으로 2022년 8월 31일에 호주 양자동맹(Australian Quantum Alliance, AQA)을 출범시켰다. 현지 선도 기업인 Quintessence Labs, Q-CTRL, Quantum Brilliance, Silicon Quantum Computing, Nomad Atomics 및 Diraq과 글로벌 기업인 Google, Microsoft 및 Rigetti가 창립 회원으로 참여하였다.[28)]

그림 Ⅵ-3-4 호주 AQA 창립 기업들



※ Australian Quantum Alliance

AQA는 호주의 양자 생태계를 촉진, 강화 및 연결하는 것을 목표로 하고 있다. 이에 맞춰 TCA는 '호주를 지역 기술 허브로 전환'이라는 연구 보고서를 발표하였는데, 이에 따르면 양자 산업은 호주에서 가장 잠재력이 높은 신흥 분야 중 하나로 이를 강화할 수 있는 방법에 대해서 기술하고 있다.[29)] 보고서에서는 호주의 선도적인 기술 하위 부문 중 하나인 양자기술에 대해 세계에 가장 혁신적인 솔루션을 제공할 수 있는 독보적인 위치에 있다고 말하고 있다. AQA의 창립자이자 CEO인 Vikram Sharma는 "TCA의 역량을 바탕으로 활발한 양자 산업 발전을 공동으로 추진하고, 정부에 '산업 발전에 대한 지침'을 제공하는 한편, 기업 의사 결정자가 양자 기술을 이해 및 채택하도록 돕고, 국내외적으로 강력한 기반을 구축하기를 희망한다."고 말하였다. TCA의 일부 구성원이기도 한 AQA는 양자산업 전반의 리더들로 구성되었으며 9개의 현지 및 글로벌 기업이 포함되어 있고, TCA는 StartupAUS의 책임을 맡아 초기 및 성장 단계 기술 비즈니스의 이익을 옹호하는 것을 목적으로 한다.

28) Electronics (2022.09.06.)
29) James Dragan (2022.09.01.)

AQA의 임무는 호주의 양자 산업을 촉진, 강화 및 연결하는 것이고 양자산업을 위해 혁신, 일자리 창출 및 경제적 번영을 위한 것이다. 인재 개발 지원과 기술 부문과 일자리를 성장시키는 정책에 대해 업계 및 정부와 긴밀히 협력하고 효과적인 규제 환경을 개발한다. 목적에 맞는 규제로 신제품과 서비스의 조기 도입을 장려하면서 개인 정보 보호 및 데이터 보호를 위한 명확하고 균형 잡힌 구조를 확립한다. 정부, 기업 및 지역 사회와 협력하여 규제의 틀과 정책을 설계하고 새로운 제품과 서비스의 도입을 가능하게 하고 성장, 투자 및 일자리를 지원하는 안전하고 효과적인 규제를 설계한다. 또한 기술 부문의 영향과 이에 영향을 미치는 주요 문제에 대해 고유한 데이터 중심의 연구를 수행하고, 해당 분야의 통일된 목소리로 정부 의사 결정자와 업계를 함께 모아 양자기술의 역할 등에 참여한다.[30] AQA는 산업 전반에 걸쳐 지속적인 기술 창출, 개발 및 채택을 지원하기 위해 호주 정부, 기업 및 더 넓은 지역 사회에 조언하고 참여한다.

글로벌 양자 스타트업의 3% 이상이 호주에서 유래하였는데, 이는 다른 분야의 스타트업의 평균인 1.7%와 비교하였을 때 두 배 가까이 된다. 호주의 양자산업은 양자산업에 대한 전체 글로벌 VC 투자의 3.6%를 유치하였는데 이는 호주의 글로벌 GDP 점유율 1.6%를 초과한다. 호주는 주요 글로벌 기업으로부터 양자 연구 및 개발에 대한 투자를 지속적으로 유치하고 있다. AQA는 이에 발맞춰 초기 단계의 기업이 자금 격차를 해결하고 고성장 기업을 위해 더 많은 목표 달성을 창출해서 새로운 비즈니스를 만들고 성장시키고자 한다. 또, 투자를 장려하고 생산성 향상을 위해 경제 전반에 걸쳐 호주 기업의 기술 활용을 지원하고자 한다. 이와 함께 파일럿 제휴 프로그램을 운영하여 잠재력이 높은 스타트업과 규모를 확장하려는 기업이 기술 생태계와 정부 간의 관계를 이해하도록 기업이 협력하는 방법을 안내하고 있다.

2023년 10월 기준 AQA의 회원은 총 135개 기업이고 제휴 프로그램에 가입한 기업은 15개로 스타트업, 글로벌 기업, 벤처 캐피탈리스트, 자문가, 기술 부문 외부 기술 지원 비즈니스까지 다양한 기업들이 가입하고 있는 것으로 나타나고 있다. 10개의 창립기업 모두 역시 AQA의 회원사로 가입하고 있다. AQA는 회원 기업 및 기관 중 최소한 50%를 호주 회원 기반으로 유지하려고 하고 있다. 회원 기관 및 회원사의 양자기술 관련 분야에 대한 자세한 정보는 아직까지 확인되지 않고 있으며 25개의 일부 기업만 기업 자체 홈페이지를 통해서 확인 가능하다.

30) Australina Quantum Alliance

그림 Ⅵ-3-5 호주 AQA 회원 기업 및 기관



※ Australian Quantum Alliance

그림 Ⅵ-3-6 호주 AQA 제휴 프로그램 가입 기업



※ Australian Quantum Alliance

참고문헌

• 국내문헌

1	지식산업정보원(2022), “미래 양자기술 동향과 생태계분석-컴퓨팅/센서/양자암호 · 통신/양자점”.
2	David(2019), “美 양자생태계 주도 위해 QEDC 컨소시엄 구성…IBM · 아마존 · 인텔 · 구글 등 60여 곳 참여”, The Science Monitor.

• 해외문헌

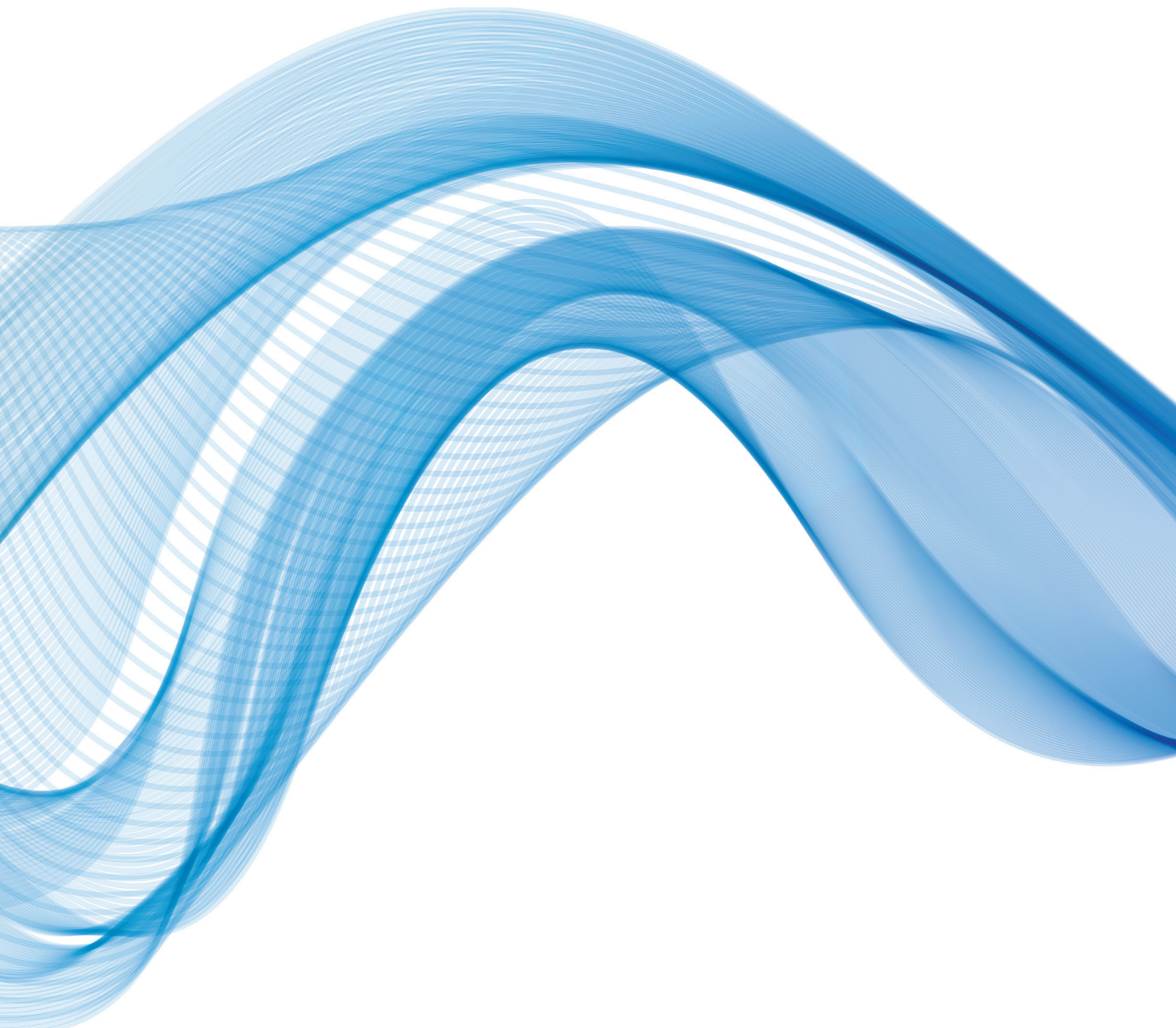
1	QEDC/SRI International(2021), QED-C organization
2	QUTAC Application Group (2022) SpringerOpen, Industry Quantum Computing Applications
3	Susan Rambo(2019), Through QED-C, The U.S. government helps build industry support behind quantum computing, SemiconductorEngineering.

• 사이트

1	https://bnl.gov/science/quantum.php
2	https://instituteq.fi
3	https://mitre.org/quantum-moonshot
4	https://mitre.org/research/technology-transfer/technology-licensing/quantum-information-science
5	https://nwquantum.com
6	https://oc-innovation.ca
7	https://ornl.gov/section/quantum-information-science
8	https://pnnl.gov/quantum-information-sciences
9	https://qis.slac.stanford.edu
10	https://qpl.sandia.gov
11	https://qstar.jp
12	https://quantum.fnal.gov
13	https://quantum.lanl.gov
14	https://quantum.lbl.gov
15	https://quantum.llnl.gov

16	https://quantum.ornl.gov
17	https://quantumconsortium.org
18	https://quantumconsortium.org/quantum-marketplace
19	https://quantumindustrycanada.ca
20	https://sandia.gov/quantum
21	https://techcouncil.com.au/members/quantum
22	https://thequantuminsider.com/2022/09/01/australian-quantum-alliance-launched-to-build-a-thriving-quantum-industry-in-the-country/
23	https://ukquantum.org
24	https://www.electronicsonline.net.au/content/business/news/australian-quantum-industry-leaders-form-alliance-7561019
25	https://www.euroquic.org
26	https://www.innovationnewsnetwork.com/q-star-advocating-quantum-technology-business-world/40272/
27	https://www.qutac.de
28	https://zpcryo.com

부록



편찬위원회

분야	이름	소속	직위(급)	비고
양자이론	김재완	고등과학원	교수	편찬위원장
총괄	김 연	과학기술정보통신부	양자과학기술산업과장	
	최대규	NIA	지능형인프라본부장	
	오윤제	IITP	반도체·양자 PM	
기획	이정기	과학기술정보통신부	양자과학기술산업과 사무관	
	김영희	NIA	네트워크고도화팀장	
	이민경	IITP	양자기술팀장	
양자통신	주정진	ETRI	양자기술연구본부장	
	허 준	고려대학교	교수	
양자센싱	권택용	KRISS	책임연구원	
	문한섭	부산대학교	교수	
양자컴퓨팅	박성수	한림대학교	교수	
	한상욱	KIST	양자정보연구단장	
산업화모델	이준구	KAIST	교수	
소재·부품·장비	송진동	KIST	광전소재연구단장	
간사	김효실	미래양자융합센터	센터장	

집필전문가

집필 분야	성 명	소 속	직위(급)
양자통신 R&D 및 소·부·장	권대성	NSR	연구위원
	김용환	KISTI	선임연구원
	김진봉	㈜피피아이	대표이사
	김철한	서울시립대학교	교수
	문형명	㈜피피아이	연구소장
	박창훈	KIST	포닥
	배광일	KISTI	선임연구원
	백수현	㈜우리로	이사
	백정현	㈜이와이엘	상무
	부박률	코위버㈜	수석
	손일권	KISTI	선임연구원
	엄상윤	아이디퀀티크㈜	대표
	오성곤	㈜우리넷	이사
	윤천주	ETRI	실장
	이원혁	KISTI	단장
	이은주	KISTI	선임기술원
	장진각	NSR	실장
	지세완	NSR	책임연구원
	홍창호	NSR	책임연구원
양자센싱 R&D 및 소·부·장	강노원	KRISS	책임연구원
	고영호	ETRI	선임연구원
	권택용	KRISS	책임연구원
	김헌오	KAIST	연구교수
	배인호	KRISS	책임연구원
	심정현	KRISS	팀장
	이동헌	고려대학교	교수
	이수용	ADD	선임연구원
	임신혁	ADD	선임연구원
양자컴퓨팅 R&D 및 소·부·장	구자승	KRISS	책임연구원
	김도헌	서울대학교	교수
	김요셉	고려대학교	조교수
	김용수	KIST	책임연구원
	김철기	KIST	책임연구원
	문종철	KRISS	책임연구원
	배준우	KAIST	교수
	안재욱	KAIST	교수
	염다현	이화여자대학교	연구교수
	전승우	KIST	선임연구원
	정준호	서울대학교	박사
	정호중	KIST	책임연구원
	차진웅	KRISS	선임연구원
	최가현	KRISS	선임연구원
	최태영	이화여자대학교	교수
통계·산업화모델·협의체	김지현	㈜원익IPS 반도체연구소	부장
	박희철	부경대학교	교수
	윤지원	에스디티㈜	대표이사
양자기술 동향	고민구	한국지식서비스연구원	본부장
	김아정	세종대학교	교수
	김형수	㈜KT	팀장
	심동희	SK텔레콤㈜	팀장
	허 욱	KOREN NOC	부장
기획·취합·편집	김영희	NIA	팀장
	강창우	NIA	책임
	최진욱	NIA	선임
	안호찬	NIA	선임
	장유환	NIA	주임
	김용기	IITP	수석
	김효실	미래양자융합센터	센터장
	박봉원	미래양자융합센터	책임연구원
	한혜미	미래양자융합센터	선임연구원
	정의길	미래양자융합센터	선임연구원
	박지영	미래양자융합센터	전임연구원
	곽은지	미래양자융합센터	연구원

양자정보기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

발행월 2024년 1월
발행인 이종호 · 황종성
발행처 과학기술정보통신부 · 한국지능정보사회진흥원(NIA)
기획·편집 미래양자융합센터
디자인 누만디 + 누만자
ISSN 3022-4004

* 본 양자정보기술 백서의 내용은 과학기술정보통신부 및 한국지능정보사회진흥원의 공식 견해와 다를 수 있습니다.
* 본 양자정보기술 백서의 상업적 활용(비매품)과 무단전제를 금하며,
가공·인용할 때에는 반드시 '양자정보기술 백서'라고 밝혀주시기 바랍니다.

과학기술정보통신부
세종특별자치시 가름로 194(어진동)
www.msit.go.kr

NIA 한국지능정보사회진흥원
대구광역시 동구 첨단로 53
053) 230-1114
www.nia.or.kr

9 773022 400004 35
ISSN 3022-4004



과학기술정보통신부

NIA 한국지능정보사회진흥원



미래양자융합포럼
Future Quantum Convergence Forum



35
9 772022 401001
ISSN 3022-4012

