

양자기술의 효율적 개발을 위한 정책 제언

Policy Recommendations for the Efficient
Development of Quantum Technology

양자기술의 효율적 개발을 위한 정책 제안

Policy Recommendations for the Efficient Development of
Quantum Technology

위원장

박규환(한국과학기술한림원 정회원, 고려대학교 명예교수)

위원

제원호(한국과학기술한림원 정회원, 서울대학교 명예교수)

최한용(성균관대학교 명예교수)

김동규(한국과학기술원 조교수)

김민혁(고려대학교 조교수)

김요셉(고려대학교 조교수)

간사

조동현(고려대학교 명예교수)

요 약 문

양자물리학을 이용한 정보처리나 컴퓨팅으로 대표되는 양자기술은 최근 큰 관심을 받고 있다. 세계 각국의 기업과 정부를 주축으로 양자기술의 산업화와 군사적 활용을 위한 활발한 투자와 연구 개발이 진행되고 있고, 대기업뿐 아니라 이온, 초전도, 그리고 중성원자 등 다양한 플랫폼에서 작동하는 양자컴퓨터를 개발·판매하려는 벤처기업들도 미국과 유럽을 중심으로 급증하고 있다. 그러나 양자기술은 아직 매출과 영업이익으로 이어지는 산업으로 자리 잡지 못했고 거품에 대한 우려가 큰 것도 사실이다.

반면 양자기술에 대한 연구개발이 붐을 이루며 시제품을 제작하고 그 성능을 검사하기 위한 실험 및 계측 장비 시장은 오히려 큰 호황을 맞고 있다. 실제로 지난 20여 년 동안 이 분야 산업에서 연구에 투입된 장비 매출액이 양자컴퓨터 매출액의 수십, 수백 배에 이른다.

이런 점에 착안하여 본 정책과제는 양자 기술 산업의 소재, 부품, 장비 등 가치사슬(Value Chain)에서 우리나라가 어떤 기회를 가질 수 있는지에 대해 살펴보고자 했다.

정책 연구는 오랜 교육 및 연구 경험을 가진 원로 물리학자들과 최근 양자기술 분야에서 활발한 연구를 진행하는 젊은 물리학자들이 함께 토론, 발표, 전문가 세미나, 그리고 심층적인 자료 조사를 통해 정책 아이디어를 모았다.

보고서에선 먼저 플랫폼별 양자기술 현황과 국내 양자기술 국가과제와 정책지원, 그리고 소재, 부품, 장비 시장의 국제적인 현황을 살펴보았다. 이를 바탕으로 이미 포털 형태로 원스톱 서비스를 제공하는 업체가 장악한 범용부품 시장과 오랜 기술력과 사용자의 신뢰로 높은 진입장벽을 쌓은 고성능의 복잡한 시스템 시장 사이의 틈새시장을 주목하였다. 광학계 장비를 사례로 하여, 대표적인 범용제품, 고성능 시스템, 그리고 틈새시장에서 성공한 몇몇 기업의 사례 연구를 했으며, 이로부터 이 시장을 공략하기 위한 여러 정책 방향을 제안하였다. 마지막으로, 양자기술과 같은 지식 집약적인 산업이 성공하기 위해 그 나라의 기초과학 역량이 뒷받침되어야 함을 강조하고자, 기초과학 교육과 연구의 중요성을 강조하였다.

| | | |
|-----|-----------------------------------|----|
| I | 양자기술 정책연구의 필요성 | 11 |
| | 01. 정책연구의 배경 및 필요성 | 12 |
| II | 양자컴퓨팅 하드웨어 기술 현황 | 19 |
| | 01. 초전도 양자소자 | 20 |
| | 02. 중성원자 | 30 |
| | 03. 포획이온 | 38 |
| | 04. 광자 | 45 |
| III | 국내 양자기술 연구과제 및 정책지원 현황 | 53 |
| | 01. 양자기술 국가연구개발사업 | 54 |
| | 02. 양자컴퓨팅 양자전환(QX) 스케일업 벨리 육성지원사업 | 58 |

| | | |
|----|-----------------------------|----|
| IV | 양자기술 소재·부품·장비 가치사슬 및 국산화 전략 | 63 |
| | 01. 양자기술 소재·부품·장비 국산화 필요성 | 64 |
| | 02. 양자기술 가치사슬 | 65 |
| | 03. 국산화 전략 | 71 |
| V | 인센티브 정책 및 산업적 수요 창출 | 75 |
| | 01. 사례별 연구 | 76 |
| | 02. 시사점과 정책 제언 | 81 |
| VI | 기초과학 역할 및 중요성 | 87 |
| | 01. 기초과학 연구의 중요성 | 88 |
| | 02. 기초과학 연구의 예 | 89 |
| | 참고문헌 | 92 |

| | | |
|--------|------------------------------------|----|
| 표 2.1. | 초전도 양자컴퓨터 소재·부품·장비 | 30 |
| 표 2.2. | 양자컴퓨터 플랫폼 특징, 연구방향, 성능 현황 | 51 |
| 표 4.1. | 초전도 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트 | 66 |
| 표 4.2. | 중성원자 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트 | 67 |
| 표 4.3. | 포획이온 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트 | 68 |
| 표 4.4. | 광자 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트 | 69 |
| 표 4.5. | 산업 분야별 관련 기술 및 국산화 가능성 전망 | 72 |
| 표 6.1. | 양자 기초연구의 사례 | 89 |

| | |
|--|----|
| 그림 2.1. 초전도 큐비트 및 리드아웃 공진기 회로도, 큐비트 에너지 레벨 | 21 |
| 그림 2.2. 구글의 105-큐비트 프로세서, IBM의 126-큐비트 프로세서 | 22 |
| 그림 2.3. 구글의 표면 코드 오류정정 결과 | 23 |
| 그림 2.4. 오류정정에 필요한 큐비트 오버헤드 | 24 |
| 그림 2.5. 구글의 양자컴퓨터 로드맵 | 25 |
| 그림 2.6. 300mm 웨이퍼 초전도 양자 프로세서 공정 | 26 |
| 그림 2.7. 초전도 양자 프로세서 사진 | 27 |
| 그림 2.8. 일반적인 초전도 양자컴퓨터 구성 | 28 |
| 그림 2.9. 중성원자 광집게 포획 및 워드베리 원자 얽힘 | 31 |
| 그림 2.10. Caltech의 6100큐비트 중성원자 배열 | 33 |
| 그림 2.11. 하버드 대학에서 구현한 광집게 위치 실시간 제어기술을 활용한 논리 큐비트 및 논리게이트 | 34 |
| 그림 2.12. 중성원자 시스템 구성을 위한 레이저의 실험 셋업 개략도와 진공챔버 | 36 |
| 그림 2.13. 중성원자 하드웨어 소재, 부품 및 장비의 주요 공급 기업 | 37 |
| 그림 2.14. 선형 이온포획장치 | 39 |
| 그림 2.15. 선형 이온포획장치에 포획된 이온의 형광 영상 | 39 |
| 그림 2.16. 아이온큐가 2024년 선보인 35큐비트의 AQ35 이온포획 양자컴퓨터의 핵심부 | 44 |
| 그림 2.17. 이온포획 양자컴퓨터를 구동하기 위한 제어장치 | 44 |
| 그림 2.18. 광자 기반 양자컴퓨팅 시스템 모식도 | 46 |
| 그림 2.19. Thermal Phase Shift와 BTO 기반 위상 변조기와 저손실 SiN 포토닉스로 구성된 제어부 예시 | 49 |
| 그림 2.20. 직접회로를 통해 구성되는 광자 기반 양자컴퓨팅의 시스템 구성부 | 51 |
| 그림 4.1. 양자컴퓨터 생태계 가치사슬 | 70 |

KAST

Research Report

2025

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

I

양자기술 정책연구의 필요성



I

양자기술 정책연구의 필요성

양자기술(Quantum Technology)은 20세기 과학 혁명을 가져온 양자물리학의 기본 원리와 첨단 공학 기술이 결합하면서 새롭게 지평을 열어가는 분야로 각광을 받고 있다. 20세기에 들어오며 등장한 양자물리학은 자연의 근본 원리를 밝히는 순수 기초과학의 핵심 영역으로 자리매김하며 눈부신 발전을 거듭해 왔다. 이 기초연구의 성과로부터 레이저, 반도체, 트랜지스터와 같이 인류 문명의 패러다임을 바꾼 혁신적인 응용기술들이 파생되었다.

01 정책연구의 배경 및 필요성

가. 전통적인 연구개발 공식의 붕괴와 양자기술의 등장

제2차 세계대전 이후, 원자폭탄 개발을 계기로 기초과학 지원이 국가정책의 최우선 순위에 놓였고, 미-소 냉전 경쟁을 거치면서 연구 분야는 대학과 연구소 중심의 기초연구와 산업계 연관성이 높은 응용 연구로 명확하게 분류되게 되었다. 이러한 분류는 연구 지원 정책에도 반영되어, 기초에서 응용, 그리고 산업화에 이르는 점진적인 단계별 지원공식이 반세기 넘게 과학기술 정책의 핵심 기조로 유지되어 왔다.

그러나 양자기술의 등장은 이러한 익숙한 발전 공식이 더 이상 유효하지 않음을 강력하게 시사한다. 냉전 종식 이후 기초연구 지원의 안전판이 사라지고 경제 논리에 기초한 국가별 기술 경쟁이 가속화되면서, 기초연구는 단순한 지적 탐구를 넘어 점차 응용기술 및 경제적 가치와의 연계성을 입증해야 하는 상황에 놓이게 되었다. 최근 양자기술은 여기서 한 걸음 더 나아가, 점진적 발전 단계는 생략한 채 양자물리학의 기본 원리가 실험실 수준에서 곧바로 기술 솔루션으로 전환되는 단계를 가능하게 한다는 인식을 사회 전반에 걸쳐 심어 주고 있다. 지난 세기 수많은 획기적인 기술 발전이 양자 원리에 간접적으로 기초했다면, 현재의 양자기술은 양자 역학적 특성(중첩, 얽힘)을 직접적으로 활용하여 새롭게 혁명적인 기술 발전을 가져오는 제2차 양자 혁명이라 일컬어지면서 전 세계적인 주목을 받고 있다.

나. 기대와 우려의 공존: 정책적 개입의 필요성

양자기술 분야는 현재 기대와 우려가 극단적으로 공존하는 유례없는 상황을 맞이하고 있다. 구글(Google), IBM 등 글로벌 빅테크 기업들의 공격적인 홍보와 투자, 양자 관련 스타트업의 급격한 증가, 그리고 이로 인한 양자 관련 주식 시장의 과열은 과거 순수 기초과학 기반 기술에서는 전례를 찾아볼 수 없던 현상이다.

이러한 과열 양상은 자칫 과거 닷컴 버블 붕괴처럼 현실적 응용 가능성을 벗어난 과도한 사업성 부각으로 인해 투자 피해를 초래할 수 있다. 더욱이 단기적 응용성만을 강조하는 시장 논리가 기초연구 생태계를 훼손할 위험이 크다. 또한, 기술 선점을 위한 국가 간 경쟁 및 정부 주도의 강력한 톱다운(Top-Down) 정책은 학문적 다양성과 창의성을 훼손하여 장기적인 혁신 동력을 상실할 수 있다는 우려 역시 매우 크다. 따라서 양자기술에 대한 국가정책은 단순한 연구개발 투자를 넘어, 이러한 복합적인 위험 요소를 관리하고, 지속 가능한 혁신 생태계를 구축하는 방향으로 설정되어야 한다. 특히 대한민국은 국가 경제 및 산업 기반의 특수성을 고려하여, 비효율적인 경쟁을 피하고 한정된 자원으로 효율적이면서도 전략적인 우위를 점할 수 있는 맞춤형 전략이 절실하다.

다. 양자기술의 현황과 국제적 투자 동향

양자물리학을 이용한 정보처리, 특히 양자컴퓨팅이 국제적으로 큰 관심을 끌며, 이 기술의 산업화는 물론 이에 못지않게 중요한, 군사적 활용을 목적으로 여러 나라 기업과 정부의 활발한 투자가 이어지고 있다. 미국과 중국이 패권 다툼의 하나로 양자기술의 우위를 점하려고 천문학적 투자를 하고 있으며, 구글과 IBM을 비롯한 정보기술 분야 대기업은 양자컴퓨팅의 선두자리를 놓고 치열하게 경쟁하고 있다. 이러한 흐름에 대응하여 유럽, 일본 그리고 우리나라에서도 양자기술이 국가안보와 미래 먹거리에 필수라는 인식 아래 대규모 투자가 속속 이루어지고 있다. 최근에는 대기업뿐 아니라, 이온, 초전도, 그리고 중성원자 등 다양한 플랫폼에서 작동하는 양자컴퓨터를 개발하고 판매하려는 벤처기업이 미국과 유럽을 중심으로 많이 생겨나고 있다.

- 1) 미국과 중국의 패권 경쟁: 미국은 국가 양자 이니셔티브(NQI, National Quantum Initiative)법에 근거하여 국립표준기술연구소(NIST), 국립과학재단(NSF), 에너지부(DOE) 등을 통한 정부 지원을 체계화하고 있다. 특히 축적된 암호 데이터가 향후 양자기술로 해독되는 위협("Harvest Now, Decrypt Later" Threat)에 대비해 미국의 정책은 국가안보와 양자기술 경쟁력 확보에 초점을 맞추고 있으며 정부, 학계, 기업의 협력을 추구하는 개방형 방식을 채택하고 있다. 반면, 중국은 국가 주도의 강력한 톱다운 방식으로 국영 연구소를 중심으로 기술적, 군사적 우위를 점하기 위한 장기 계획으로 양자통신 및 군사기술에 막대한 투자를

집중하고 있다.

- 2) 유럽 및 일본의 전략: 유럽연합(EU)은 양자기술 플래그십(Quantum Technologies Flagship)과 같은 협력 프로그램을 통해 대규모 투자를 하면서 양자 생태계 구축과 기술 자립을 추구하고 있다. 특히 위험 분산을 위해 개방형으로 EU 외 국가들과 국제협력도 추진하고 있다. 일본의 경우 축적된 기초과학 기술 역량을 바탕으로 2050년까지 상용화 양자컴퓨터 개발을 목표로 잡고 초전도 큐비트이나 양자 어닐링 등 분야에서의 기술적 강점을 지닌 학계 중심 연구를 산업화로 전환하는데 정책의 중점을 두고 있다.
- 3) 이러한 국제 경쟁 속에서 대한민국 역시 양자기술을 국가안보와 미래 먹거리의 필수 요소로 인식하고 대규모 투자를 단행하고 있다.

라. 경제적 측면: 장비 시장의 호황

경제적 측면에 있어 양자기술은 짧게는 지난 20여 년, 그리고 최초로 양자 게이트가 구현된 1995년부터 30년 동안 상당한 규모의 연구개발 투자가 이루어졌음에도 불구하고, 대표적 양자기술인 양자컴퓨터의 과학적, 경제적 가치에 대해서는 여전히 여러 의견이 분분하다. 양자컴퓨터의 계산 충실도와 계산속도, 그리고 고전 컴퓨터의 비트(Bit)에 해당하는 큐비트의 개수 등 주요 지표에서 상당한 발전이 있었고, 구글은 몇몇 특별한 계산에서 초전도 기반 양자 연산 장치의 연산속도가 고전 컴퓨터를 능가하는, 소위 양자 우위를 보였다. 그러나 양자컴퓨팅의 핵심인 중첩과 얽힘을 이용하기 위한 기술적 어려움, 즉 극저온, 초정밀, 작동 변수의 절대적인 안정화, 그리고 측정장치에 대한 까다로운 요구사항 등으로 그 발전 속도가 매우 더디다. 양자 우위를 달성한 계산도, 무작위로 샘플을 취하는 형태의 문제로 그 과학적, 기술적 가치가 분명하지 못하다. 이와 같은 이유로, 많은 대기업과 벤처기업이 이 분야에 뛰어들었지만, 아직 매출과 영업이익으로 이어지는 산업으로 자리 잡지 못했다.

이에 비해, 양자컴퓨터 연구개발이 붐을 이루며 시제품을 제작하고 그 성능을 검사하기 위한 실험 및 계측 장비 시장은 큰 호황을 맞고 있다. 초전도 기반 양자컴퓨터의 경우, 절대 0도에 가까운 극저온을 유지할 수 있는 냉동장치가 필수적인데, 유럽의 한두 개 회사가 국제시장을 독점하고 있어 그들이 부르는 게 값일 정도다. 극저온 상황에서 개개 큐비트의 연산을 유도하고, 그 연산 결과를 측정하기 위한 마이크로파 장비 또한 엄청난 부가가치를 가진 산업이다. 한편, 포획이온, 중성원자, 혹은 광자 기반의 양자컴퓨터에서는 레이저 광선이 큐비트의 상태를 결정하고, 연산을 유도하며, 그 결과를 검색하도록 해 준다. 여기에 사용되는 레이저와 광학기기 그리고 광검색장치는 최고의 사양을 요구하며, 기술적 장벽 때문에 역시 큰 부가가치를 가진 산업이다.

이런 상황은 골드러시(Gold Rush) 때 금을 캐서 부를 축적한 사람보다 채굴 장비를 팔아서 부자가 된 사람이 더 많았다는 자조 섞인 이야기를 연상케 한다. 실제로 지난 20여 년 동안 이 분야 산업에서

연구에 투입된 장비 매출액이 양자컴퓨터 매출액의 수십, 수백 배에 이른다. 그리고 이런 상황은 당분간 이어질 것으로 본다. 과학적, 산업적으로 의미 있는 양자컴퓨터의 실현 가능성을 떠나, 우리나라가 미국, 중국 등과 양자컴퓨터의 큐비트 수, 오차 보정능력 등 성능을 놓고 경쟁하기는 어려운 상황이다. 이런 점을 고려할 때, 양자컴퓨터 산업의 소재, 부품, 장비 등 가치사슬(Value Chain)에서 우리나라 기업이 어떤 기회를 가질 수 있는지 살펴보는 것은 중요한 과제이다.

마. 양자기술에 대한 우려: 닷컴 버블과의 비교

양자기술은 AI 기술과 더불어 2000년 닷컴 버블과 종종 비교된다. 천문학적 투자에 비해 수익성이 크게 부족하다는 평가를 받는 AI와 비교하더라도 양자기술은 매출이 거의 없어 닷컴 버블과 유사할 수 있다는 것이다. 그러나 양자기술은 유사성과 더불어 차별성도 확실히 존재하고 이 점은 양자기술 정책 수립에 있어 중요한 요소이다. 닷컴 버블은 당시 많은 기업들이 인터넷 기술로 모든 문제를 해결할 수 있다는 과대 주장을 내세우며 천문학적인 기업 가치 버블을 만든 데서 비롯되었다. 이는 양자컴퓨터가 조만간 고전 컴퓨터를 대체할 것이란 과대 주장을 앞세우며 투자를 유치하고 매출이 거의 없는 양자 관련 기업 가치를 끌어 올린다는 점에서 유사하다고 할 수 있다. 하지만 닷컴 버블은 인터넷이란 이미 대중화된 상용기술을 바탕으로 한 반면 양자기술은 아직 기초과학 단계에 머물고 있고 기술 완성을 위해선 큐비트 불안정성 문제와 같은 근본적인 난제 해결이 선행되어야 하기 때문에 장기적인 개발 연구가 필수적이다. 양자기술은 일시적인 버블 붕괴를 겪더라도 닷컴 기술과는 달리 국가 주도의 대규모 투자를 기반으로 발전해 갈 것으로 보이며, 따라서 정책적인 판단이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

바. 정책연구의 당면 과제: 기초과학과 양자기술 정책의 중요성

결론적으로, 양자와 기술이라는 서로 상반된 가치의 결합은 새로운 기회를 제공함과 동시에 기초과학의 근간을 흔들 수 있는 구조적 문제를 제기한다. 아직 대부분 연구가 기초단계에 머물러 있음에도 기업 및 국가 간 경쟁 등 과열된 상업주의 및 응용 강조로 인해 어느 순간 기초과학 연구의 생태계를 파괴해 버릴 수 있는 위험이 존재하며, 지난 세기 지적 호기심만으로도 존재 가치를 인정받았던 순수 기초연구가 양자기술을 계기로 지나친 기술적 응용성을 강조하는 함정에 빠질 수 있다. 따라서 양자기술에 대한 정책은 일시적인 기술 유행과 투자를 좇는 방식에서 벗어나 다음과 같이 국가 과학기술의 지속적인 발전이라는 보다 큰 틀에서 그 중요성을 확보해야 한다.

- 1) 기초연구 생태계 보호: 지나친 응용성 강조로 인해 순수 과학의 다양성 교육과 지적 호기심 기반 연구가 파괴되는 것을 방지하고, 장기적인 혁신 동력을 유지.

- 2) 전략적 투자 최적화: 국가의 경제적·기술적 역량에 비추어 가장 효율적이고 선도적인 분야(예: 소부장)에 집중하여 투자함으로써, 국제 경쟁에서의 실익을 확보.
- 3) 지속 가능한 인력 양성: 양자기술의 지나친 강조가 순수 과학의 근간을 훼손하지 않도록, 양자 원리에 기반한 깊이 있는 기초과학 교육을 병행 발전시켜 우수 인력을 양성.

국내에선 양자기술에 관련하여 많은 전문가들과 정부의 다양한 노력이 활발하게 이루어지고 있으며 기술 현황 및 정책에 대한 상세한 양자기술 백서가 매년 발간되고 있다. 이에 발맞추어 본 정책과제는 양자기술의 현황과 문제점, 정책전략, 기초과학과의 관계 등 다방면에 걸쳐 살펴보고 대한민국 양자기술 정책의 바람직한 방향성에 대해 고찰하고자 한다.

본 정책과제는 물리학에서 오랜 교육 및 연구 경험을 가진 원로 물리학자들과 최근 양자기술 분야에서 활발한 연구를 진행하는 젊은 물리학자들이 함께 집필하였으며 토론, 발표, 전문가 초청 세미나, 그리고 심층적인 자료 조사를 통해 대한민국 양자기술 정책의 중요성에 대한 의견을 모아 본 보고서를 완성하였다.

본 보고서는 총 6장으로 구성되어 있으며, 양자기술의 현황 분석부터 소부장(소재·부품·장비) 시장 분석, 그리고 구체적인 정책 방향 제안에 이르기까지 다음과 같은 다양한 내용을 다루고 있다.

제1장: 정책연구의 필요성

본 연구의 배경과 목적을 제시하고 양자기술 정책의 중요성을 강조.

제2장: 양자컴퓨팅 하드웨어 기술 현황

초전도, 중성원자, 포획이온, 광자 시스템을 중심으로 각 플랫폼의 작동원리, 현재 기술 수준, 최신 연구 주제, 핵심 소부장 현황을 상세히 정리.

제3장: 국내 양자기술 연구과제 및 정책지원 현황

국가연구개발사업과 최근 양자 기업 육성을 위한 대전시의 양자전환 스케일업 밸리 프로그램을 포함한 국내 양자기술 정책 지원 현황을 정리.

제4장: 양자기술 소재·부품·장비 가치사슬 및 국산화 전략

국내외 양자 산업의 소재·부품·장비(소부장) 시장 규모를 분석하고, 우리나라가 기술 경쟁력을 확보해야 할 핵심 기술 개발 집중 아이টে를 도출하고 제시.

제5장: 인센티브 정책 및 산업적 수요 창출

플랫폼 현황 및 소부장 마켓 분석을 바탕으로, 양자컴퓨팅 산업 생태계의 소부장 가치사슬 경쟁력 확보, 시장 매출 및 이익 실현, 그리고 국방 핵심 기술 내재화를 위한 구체적인 정책 방향을 제안.

제6장: 기초과학의 역할 및 중요성

양자기술 발전이 기초연구의 장기적 안정성과 자율성을 보장하고, 응용과 기초가 순환하며
진화하는 연구 생태계 구축의 필요성 강조.

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

II

양자컴퓨팅 하드웨어 기술 현황



II

양자컴퓨팅 하드웨어 기술 현황

01 초전도 양자소자

가. 연구 동향

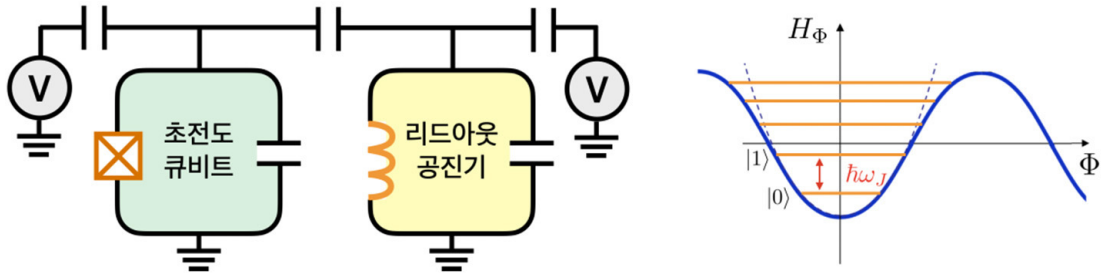
2025년 스웨덴 왕립과학한림원은 맨눈으로 보일 정도로 큰 전자회로에서도 양자적 현상이 나타날 수 있다는 것을 입증한 공로로 존 클라크(John Clarke), 미셸 드보레(Michel H. Devoret), 존 마티니스(John M. Martinis) 세 과학자에게 노벨 물리학상을 수여했다. 초전도 양자컴퓨터의 양자 프로세서는 초전도 물질로 만들어진 전자회로이며 마이크로파를 이용하여 큐비트 상태를 제어하고 측정한다. 다른 양자컴퓨터 플랫폼은 원자, 이온, 광자 등 자연계의 입자를 사용하는 반면에 초전도 양자컴퓨터는 축전기, 인덕터, 조지프슨 접합(Josephson Junction)으로 구성된 인위적인 전자회로를 양자 시스템으로 사용한다(〈그림 2.1.〉(좌) 참조). 기존 반도체 공정 기술을 그대로 적용할 수 있어 확장성과 재현성이 높으며, 에너지 준위를 설계해 원하는 주파수 대역의 큐비트를 제작할 수 있다는 점에서 현재 가장 널리 사용되는 양자컴퓨팅 플랫폼으로 자리 잡았다.

초전도 큐비트는 축전기에 저장된 전하와 자기선속의 양자 상태에 큐비트 정보를 담는다. 단순히 축전기와 인덕터만 사용한 회로는 전하와 자기 선속이 단순한 진동을 하기에 에너지 레벨이 등간격이며, 이는 특정 두 개의 에너지 레벨에만 정보를 담아야 하는 큐비트로 활용하기에는 부적절하다. 초전도 물질 사이에 얇은 절연체 등을 끼워 만든 조지프슨 접합은 전류(I)와 자기선속(Φ)가 $I(\Phi) = I_c \sin(\Phi)$ 의 비선형적인 관계를 가지고 있어, 〈그림 2.1.〉(우)에 보이는 것처럼 에너지 등간격성을 깨트릴 수 있다. 보통 가장 낮은 두 에너지 레벨을 $|0\rangle$ 과 $|1\rangle$ 로 인코딩하여 정보를 표현하며, 양자 상태를 나타내는 주요 물리량이 전하인지 자기선속인지에 따라 전하형(Charge) 큐비트, 플럭스형(Flux) 큐비트로 분류한다. 축전기 용량을 키워 전하 잡음을 줄인 전하형 큐비트 트랜스몬(Transmon)과 인덕터 용량을 키워 자기 잡음을 줄인 플럭스형 큐비트 플럭스늄(Fluxonium)이 대표적이다.

다른 양자 시스템과는 다르게 초전도 큐비트의 에너지 레벨은 외부 조작으로 실시간 제어가 가능하다. 이를 위해서는 초전도 양자 간섭 장치(SQUID, Superconducting Quantum Interference Device)를 사용한다. 조지프슨 접합 두 개가 병렬로 연결된 회로 요소인데 외부 자기장에 의해 조지프슨 접합이 흐르는 두 전류가 서로 간섭한다. 간섭 효과는 조지프슨 접합의 실질 용량 변화를 유발하며, 전자회로의 에너지 간격이 변화한다. 다만 시스템에 부여된 제어 자유도는 외부 환경 노이즈에 민감도를 높인다.

실제 실험에서는 전류 소스를 이용해 자기장 세기를 제어한다.

〈그림 2.1.〉 초전도 큐비트 및 리드아웃 공진기 회로도, 큐비트 에너지 레벨

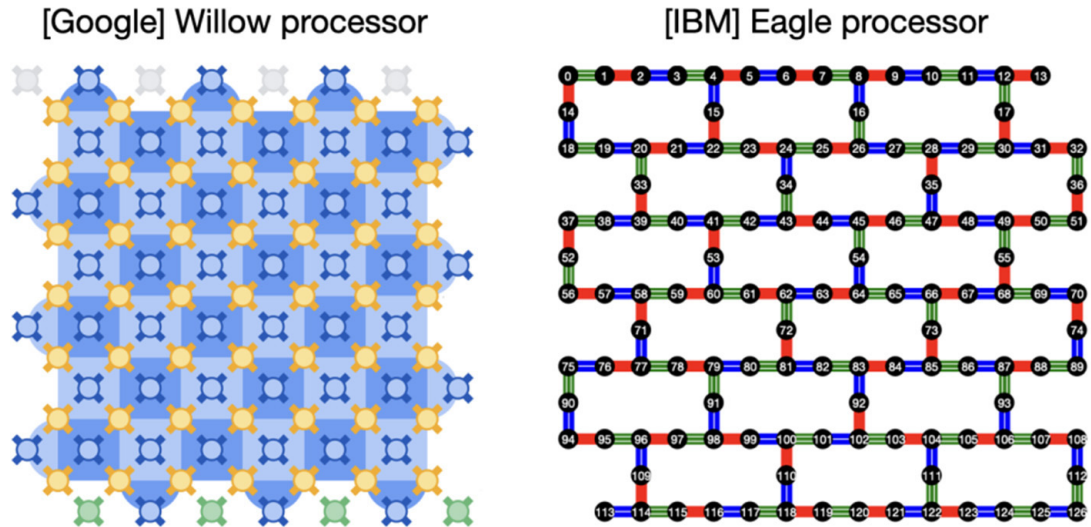


(좌) 초전도 큐비트 및 리드아웃 공진기 회로도, (우) 큐비트 에너지 레벨

초전도 양자 프로세서의 성능은 빅테크 기업의 주도로 빠르게 발전하고 있다. 대표적인 기업으로 구글과 IBM이 있다. 이 둘은 트랜스몬 구조로 큐비트를 만든다는 건 동일하지만 상이한 전략을 취하고 있다. 구글의 양자 프로세서는 SQUID를 사용하여 큐비트 에너지 간격을 조절함으로써 다양한 종류의 큐비트 상호작용, 즉 다양한 양자 게이트를 구현한다. 또한 큐비트의 에너지 간격이 주변 잡음 주파수와 일치하면 큐비트 성능이 심하게 저하되는데 에너지 간격을 조절하여 이를 적극적으로 피할 수 있다. 하지만 높은 제어 자유도는 하드웨어 복잡도를 증가시키고, 외부와의 상호작용을 필연적으로 증가시켜 양자적 성질을 유지하는 결맞음(Coherence) 시간이 상대적으로 나쁘다. 반면 IBM은 단일 조지프슨 접합을 사용하여 트랜스몬을 만들어 하드웨어 복잡도가 낮고 상대적으로 확장성이 뛰어나다. 그러나 큐비트 에너지 간격 제어는 특별한 방법을 사용하지 않는 이상 불가능하여, 활용할 수 있는 양자 게이트에 제약이 있으며 큐비트 에너지 간격과 주변 잡음 주파수가 우연히 일치하게 되는 경우, 해당 큐비트 활용이 거의 불가능하다.

큐비트 에너지 간격 제어의 장단점은 각 회사의 양자 프로세서의 성능 지표를 비교하면 더 명확해진다. 2024년 구글에서 발표한 윌로(Willow) 양자 프로세서의 규모는 105큐비트이며, 결맞음 시간은 $70\mu\text{s}$ 수준이다. 반면 IBM은 2023년 1121큐비트 콘도르(Condor) 프로세서를 공개하였고, 다른 프로세서에서의 결과이긴 하지만 156큐비트 헤론(Heron) 프로세서는 $300\mu\text{s}$ 수준의 결맞음 시간을 보인다. 또 일부 큐비트에서 수 ms의 결맞음 시간이 관측되기도 하였다. 그러나 초전도 양자 프로세서는 인접한 큐비트끼리 다른 에너지 간격을 가져야 한다는 제약사항이 있는데, 에너지 간격이 고정된 IBM의 양자 프로세서는 현재 공정 수준으로 해당 조건을 안정적으로 만족시키기 어렵다. 따라서 수율을 높이기 위해 인접한 큐비트의 수를 줄여야만 했다(〈그림 2.2.〉 참조). 낮은 큐비트 연결성은 양자 오류정정에 있어 큰 단점으로 작용하여, 구글과 달리 IBM은 아직까지 양자 오류정정을 성공적으로 시연하지는 못하였다.

〈그림 2.2.〉 구글의 105-큐비트 프로세서, IBM의 126-큐비트 프로세서



(좌) 구글의 105-큐비트 프로세서 (우) IBM의 126-큐비트 프로세서

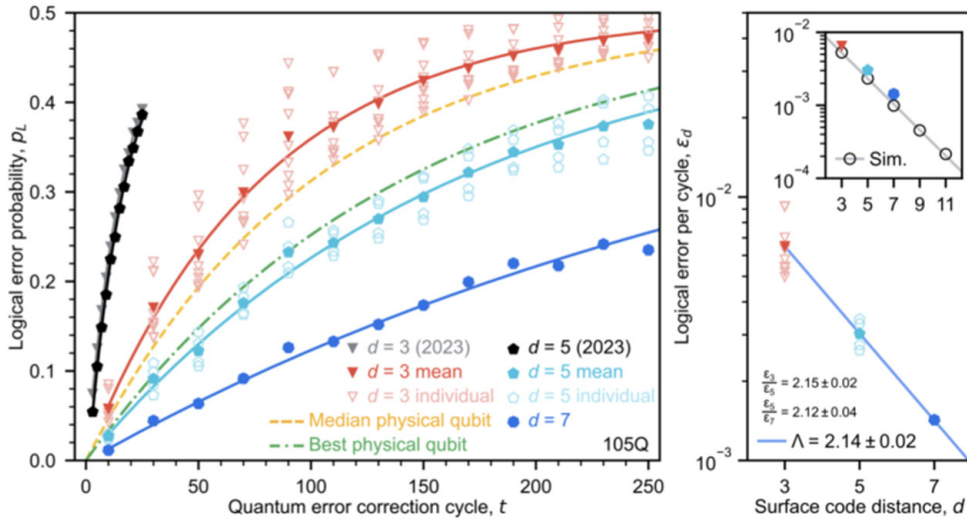
좌: Google Quantum AI and Collaborators (2025). "Quantum error correction below the surface code threshold", Nature, Vol. 638, pp. 920-926.

우: Kim, Y., et al. (2023). "Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance", Nature, Vol. 618, pp. 500-505.

초전도 양자 프로세서의 단일-큐비트와 2-큐비트 양자 게이트 동작 시간은 수십 나노초에서 수백 나노초이며 게이트 오류율은 각 0.01%, 0.3% 정도이다. 초전도 큐비트는 다른 양자 시스템 대비 결맞음 시간이 짧지만 양자 게이트 동작 시간이 짧아 다른 시스템과 유사한 오류율을 보인다. 양자컴퓨터의 목적이 빠른 시간 내에 문제를 푸는 것임을 고려하였을 때, 짧은 게이트 동작 시간은 초전도 양자컴퓨터의 강점이다. 참고로 양자 상태를 측정하는 리드아웃 시간 역시 유사한 수십에서 수백 나노초이며 리드아웃 오류율은 1% 수준이다.

〈그림 2.3.〉은 2024년 구글이 시연한 양자 오류정정 결과를 보여준다. 이는 초전도 양자컴퓨터 발전사에 있어 매우 중요한 마일스톤(Milestone)이다. 구글 연구 팀은 〈그림 2.2.〉(좌)에 보이는 것과 같이 사각 격자 형태로 연결된 트랜스몬을 묶어 하나의 정보를 표현하는 표면 코드(Surface Code)를 구현하였다. distance- n 코드는 $n \times n$ 격자 안 $2n^2-1$ 개의 물리 큐비트로 구성되어 있다. 연구 팀은 distance-3, distance-5, distance-7 논리 큐비트의 오류율을 측정하였고, 규모가 커짐에 따라 오류율이 2배씩 감소하는 것을 확인했다. 물리 큐비트 오버헤드는 $O(n^2)$ 으로 증가하는 반면 오류율은 기하급수적으로 감소하기에 효율적인 오류정정이 가능하다는 것이 입증된 것이다.

〈그림 2.3.〉 구글의 표면 코드 오류정정 결과



Google Quantum AI and Collaborators (2025). "Quantum error correction below the surface code threshold", Nature, Vol. 638, pp. 920–926.

디지털 컴퓨터의 비트 연산당 오류율은 10^{-16} 정도이며 유용한 양자컴퓨팅을 위해서는 10^{-11} 정도의 오류율 수준이 기대된다. 구글 월로 프로세서와 유사한 오류율로 규모를 키울 수 있다면 distance-70, 즉 10,000개의 큐비트를 하나의 논리 큐비트로 사용하면 달성이 가능하다. 그러나 현재 극저온 냉동기의 냉각 용량, 트랜스몬 초전도 회로의 면적 등을 고려하였을 때 하나의 무오류(매우 낮은 오류) 큐비트를 만들기 위해서는 상당한 전력과 공간의 인프라이 요구된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 〈그림 2.4.〉는 초전도 큐비트의 결맞음 시간(오류율) 개선에 따른 오류정정 성능을 보여준다. 결맞음 시간이 3배 증가하면 코드 규모 증가에 따른 오류 개선율이 18배가 되며, 10^{-11} 정도의 오류율은 distance-20, 즉 800개의 물리 큐비트로도 가능해질 수 있다. 이는 오류정정 코드 구현뿐만 아니라 물리 큐비트 자체의 성능 개선 중요성을 여실히 보여준다.

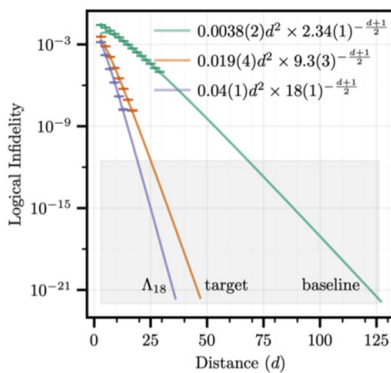
최근 구글 연구 팀은 103큐비트급 초전도 양자 프로세서를 활용하여 시간순서 밖 상관 함수(OTOCs, Out-of-Time-Order Correlators)를 측정함으로써, 고전적 시뮬레이션이 사실상 불가능한 영역에서 검증 가능한 양자 우위를 달성하였다고 보고하였다(Google Quantum AI and Collaborators, 2025.). 이 실험은 깊은 양자 회로에서 발생하는 동역학을 정확히 추적할 수 있음을 보여주었으며, 해당 기법이 분자·재료계의 해밀토니언 파라미터 추정과 같은 실제 물리 문제로 확장될 가능성을 시사한 점에서 현재 수준의 양자 하드웨어가 실질적 응용에 기여할 수 있는 중요한 사례로 평가된다. 이어 발표된 후속 연구(Zhang, C., et al., 2025.)는 실제 분자 NMR 데이터를 이용하여 분자 구조와 관련된 해밀토니언 파라미터를 양자 회로로 추정하는 실험을 수행함으로써, 양자 프로세서가 물리·화학적 파라미터 추정 문제에 적용될 수 있음을 실증하였다. 다만, 현 단계의 노이즈와 회로 규모의 제약으로

인해 양자이득(Quantum Advantage) 을 직접적으로 시연하지는 못하였다. 그러나 초전도 양자 프로세서의 큐비트 수와 게이트 정밀도가 향상됨에 따라, 이러한 접근법이 근시일 내로 실용적 문제에 대한 실제적 이점을 제공할 가능성이 높다고 평가된다.

초전도 큐비트의 오류율은 대부분 결어긋남으로부터 기인한다. 따라서 결맞음 시간을 늘리는 것이 양자 게이트 오류율을 낮추는 궁극적인 해결책이다. 초전도 회로의 결어긋남은 주변 전하 및 자기 잡음, 초전도 회로 주변 결합이나 기판의 유전체 저항, 고에너지 입자로 인한 초전도 깨짐 등이 있다. 이를 극복하기 위해 기존 알루미늄, 니오븀 외 tantalum이 주목받고 있으며, 공정 기술의 발달로 결맞음 시간이 조금씩 증가하고 있다. 공정 기술 외에도 플럭소늄이나 보조닉 큐비트 등 더 낮은 오류율이나 치우침 오류 특성을 가진 새로운 초전도 회로 구조의 큐비트들이 활발히 연구·개발되고 있다.

다른 한편, 양자 오류정정과 더 큰 규모의 연산을 위해서는 양자 프로세서의 큐비트 수를 늘려야 한다. 그러나 양자 프로세서 내 큐비트 수가 늘어갈수록 모든 큐비트가 완벽히 동작할 확률은 기하급수적으로 감소한다. 즉 하나의 양자 프로세서에서 큐비트 수를 늘리는 접근 방법은 수율뿐만 아니라 성능 자체에도 치명적이다. 현재 많은 초전도 양자컴퓨터 연구 팀들은 100개 규모의 고성능 초전도 양자 프로세서 모듈을 제작하고 이를 직접 이어 붙이는 칩렛(Chiplet) 구조나 초전도 케이블로 연결하는 구조를 적극적으로 연구개발하고 있다. <그림 2.5.>의 초전도 양자컴퓨터 개발 로드맵에서 보이듯이 구글, IBM 등은 큐비트 수를 늘리는 전략으로 모듈러 아키텍처를 채택하고 있다.

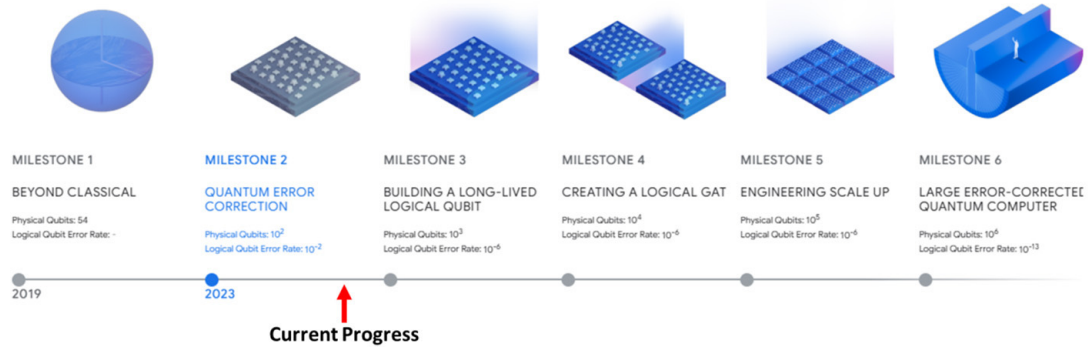
<그림 2.4.> 오류정정에 필요한 큐비트 오버헤드



| Hardware Parameter | Baseline | Target | Desired |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| T_1, T_2 times | 100 μ s | 200 μ s | 340 μ s |
| T_1 tailedness | 71 μ s | 23 μ s | 23 μ s |
| Single-qubit gate error | 0.0004 | 0.0002 | 0.00012 |
| Two-qubit gate error | 0.003 | 0.0005 | 0.00029 |
| State preparation error | 0.02 | 0.01 | 0.00588 |
| Measurement error | 0.01 | 0.005 | 0.00294 |
| Reset error | 0.01 | 0.005 | 0.00294 |
| Single-qubit gate time | 25 ns | 25 ns | 25 ns |
| Two-qubit gate time | 25 ns | 25 ns | 25 ns |
| State preparation time | 1 μ s | 1 μ s | 1 μ s |
| Measurement time | 200 ns | 100 ns | 100 ns |
| Reset time | 200 ns | 100 ns | 100 ns |
| Error suppression rate Λ | 2.34 | 9.3 | 18 |

출처: arXiv preprint, arXiv:2411.10406.

〈그림 2.5〉 구글의 양자컴퓨터 로드맵

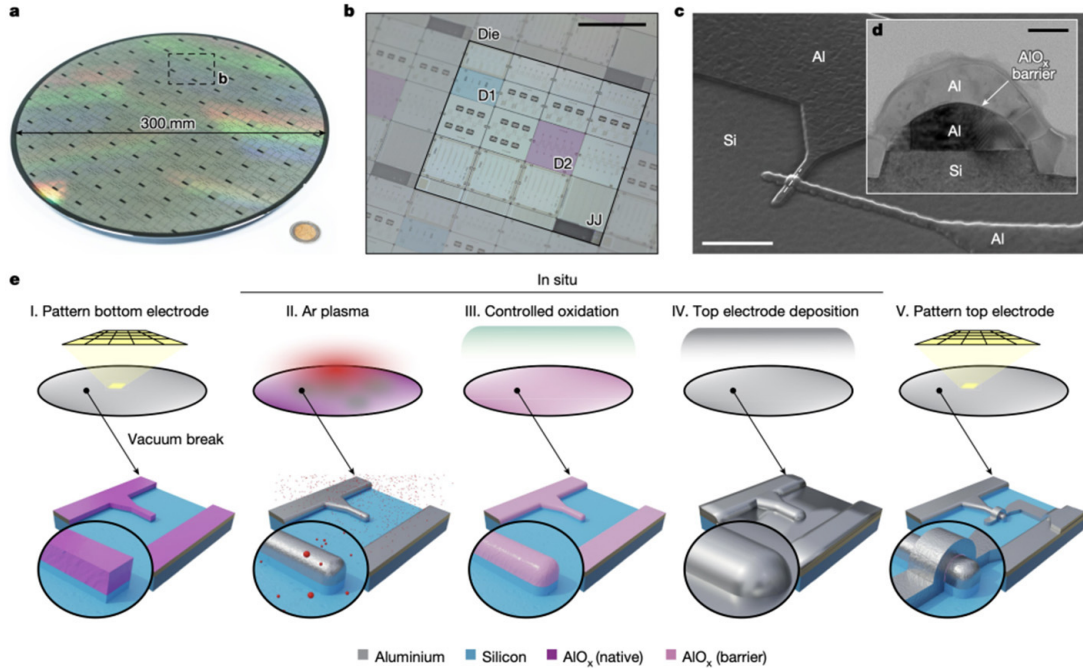


출처: <https://quantumai.google/roadmap>

초전도 양자 프로세서의 확장성 및 개발 효율성을 높이고자 기존 반도체 공정의 고성능 장비들이 하나둘씩 접목되고 있다. 대표적인 예로 2024년 벨기에 반도체 연구소인 Imec은 CMOS 공정에 활용되는 증착기, DUV 파장의 노광, 식각 공정을 활용하여 300 mm 웨이퍼에서 다수의 초전도 양자 프로세서 칩을 한 번에 제작하였으며 $100\mu s$ 수준의 준수한 결맞음 시간을 기록하였다(〈그림 2.6〉). 또한 노벨상 수상자인 존 마티니스 교수는 초전도 양자 프로세서 공정을 획기적으로 발전시키는 것을 목표로 2022년 큐오랩(QoLab) 스타트업을 창업하였고, 수많은 반도체 원천기술을 보유한 미국 어플라이드 머티어리얼즈(Applied Materials)와 손잡고 초전도 양자 프로세서를 위한 공정 장비 개발 및 공정과정 최적화 연구를 수행 중이다.

초전도 양자컴퓨터의 장점은 명확하다. 기존 CMOS 기반 공정 기술로 제작이 가능해 확장성과 재현성이 높고, 마이크로파 신호를 이용하므로 정밀 제어 및 빠른 게이트 동작(수십 나노초 단위)이 가능하다. 또한 마이크로파 펄스 제어가 소프트웨어로 용이하여 다양한 양자 알고리즘의 실험적 구현에 적합하다. 반면 단점으로는 금속-절연계면 결함, 표면 산화막, 자기 잡음 등으로 인해 결맞음 시간이 수백 마이크로초에서 수 밀리초 수준에 머물고, 극저온 냉동기(10mK 수준)가 필요해 시스템 유지 비용이 많이 들며, 큐비트 간 간섭과 패키징 복잡성으로 확장성에 한계가 있다는 점이 있다. 그럼에도 초전도 플랫폼은 현재 가장 성숙하고 실험적으로 앞선 기술로 평가받고 있으며, 고신뢰도 논리 큐비트 구현을 위한 양자 오류정정 실험의 중심에 있다. 향후에는 소재, 공정, 회로 아키텍처의 혁신을 통해 수천 큐비트 규모의 결함허용 양자컴퓨터 실현이 가시권에 들어올 것으로 기대된다.

〈그림 2.6.〉 300mm 웨이퍼 초전도 양자 프로세서 공정



Damme, J. V., et al. (2024). "Advanced CMOS manufacturing of superconducting qubits on 300 mm wafers", Nature, Vol. 634, pp. 74-79.

나. 소재·부품·장비

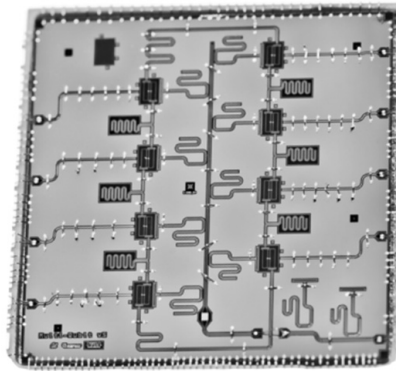
초전도 양자컴퓨터 시스템은 크게 네 단위의 구성으로 구분할 수 있다. 큐비트를 담고 있는 초전도 양자 프로세서, 초전도 상태를 위한 극저온 환경, 열잡음 억제 및 정밀 제어 측정을 위한 마이크로파 수동 소자, 양자 회로를 마이크로파 펄스로 매핑하고 측정 신호를 분석하는 마이크로파 제어 및 분석 장치로 구성되어 있다.

〈그림 2.7.〉은 8-큐비트 초전도 양자 프로세서의 광학 현미경 사진을 보여준다. 알루미늄(Al)이나 니오븀(Nb) 등 초전도 금속을 기반으로 축전기와 인덕터를 만들며, 조지프슨 접합은 공정의 품질과 안전성 때문에 알루미늄을 주로 사용하며 알루미늄 사이에 나노미터 두께의 산화막을 형성하여 구현한다. 〈그림 2.1.〉의 초전도 큐비트는 축전기를 형성하는 두 전극판 사이에 조지프슨 접합을 만들어서 제작하며, 리드아웃 공진기 평면 도파로(Coplanar Waveguide) 공진기를 주로 사용한다.

초전도 양자 프로세서 제작에는 다양한 정밀 소재, 부품, 장비가 유기적으로 결합한다. 먼저 큐비트의 결맞음 시간을 늘리기 위해서 유전 손실이 낮은 고비저항 실리콘($10k\Omega\cdot m$)이나 사파이어 기판을 사용한다. 기판 위에 초전도 금속 박막은 주로 니오븀(Nb)이나 알루미늄(Al) 스퍼터링 타겟을 이용해

스퍼터링 또는 전자빔 증착기를 통해 형성된다. 이후 포토 리소그래피로 전극과 공진기 등을 제작한다. 초전도 큐비트의 핵심 구성요소인 조지프슨 접합은 수백 나노미터 수준의 정밀 공정이 필요하기 때문에 전자빔 리소그래피 시스템이 사용된다. 리소그래피 공정 이후에는 전자빔 증착기를 이용해 산화막층을 포함한 금속 박막을 형성하고, 필요시 이온 밀링 머신으로 산화막 제거를 한다.

〈그림 2.7.〉 초전도 양자 프로세서 사진



Nguyen, L. B., et al. (2024). "Programmable Heisenberg interactions between Floquet qubits", Nature Physics, Vol. 20, pp. 240-246.

제작된 초전도 회로의 품질과 계면 구조, 두께, 표면 조도를 분석하기 위해서는 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)이 사용되며, 이는 조지프슨 접합의 균일성과 산화층 품질을 평가하는 데 핵심적인 역할을 한다. 대규모 양자 프로세서의 특성을 평가하기 위해서는 극저온 웨이퍼 프로브 시스템이 활용되며, 패키징 없이 웨이퍼 단위에서 소자의 특성을 측정할 수 있다.

제작된 칩은 패키징 단계에서 RF 신호를 안정적으로 전달하기 위해 PCB 기판 위에 장착된다. GHz 대역에서 손실이 적은 로저스(Rogers) RF용 유전체가 주로 사용되며, 단일층(Coplanar Waveguide, Microstrip) 또는 다층(Stripline) 전송선 구조로 크로스토크를 최소화하도록 설계된다. 이때 저손실 패키징을 위해 고주파 특성이 우수한 비자화 동축 커넥터가 함께 사용된다. 칩과 PCB 간 전기적 연결은 와이어 본더를 이용하여 주로 초전도 알루미늄(Al) 와이어로 이루어지며, 와이어의 배치 품질과 인덕턴스 제어는 신호 간 크로스토크를 줄이는데 핵심적인 역할을 한다.

양자 프로세서 칩은 무산소동 패키징하며, 구리니켈(CuNi)이나 니오븀티타늄(NbTi) 합금으로 된 저온용 동축 케이블을 통해 마이크로파 신호를 주고받는다. 패키징의 공진모드가 큐비트의 동작 주파수와 겹치게 되면 큐비트 성능이 저하되기에 RF 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 패키징 공진 주파수를 적절하게 설계해야 한다.

초전도 양자 프로세서를 구동하기 위해서는 〈그림 2.8.〉과 같은 셋업이 필요하다. 큐비트가 안정적으로

큐비트에서 반사되어 나오는 마이크로파 신호는 매우 미약하므로, 이를 안정적으로 증폭하기 위한 증폭기가 필수적이다. 가장 먼저 냉동기 내부 가장 낮은 온도 스테이지에는 양자 측정의 정밀도를 극대화하기 위해 조지프슨 접합의 비선형성을 활용한 양자 한계 조지프슨 파라메트릭 증폭기(JPA)가 사용된다. 최근 상용화된 진행파 매개 증폭기(TWPA, Traveling-Wave Parametric Amplifier)는 GHz 대역폭을 제공하며, 다중 큐비트의 동시 측정이 가능한 주파수 멀티플렉싱 구조에 적합하다. 4K 스테이지에는 저온 저잡음 증폭기(HEMT, High Electron Mobility Transistor)를 사용하여 30dB 이상의 증폭과 약 4K의 노이즈 온도를 달성한다. 상온에서는 Si 기반 CMOS 공정으로 제작된 RF 증폭기가 추가로 사용되어, 총 60~70dB의 증폭을 통해 측정 신호의 신뢰도를 높인다.

또한 마이크로파 신호의 방향성과 잡음 차단을 제어하기 위해 서큘레이터(Circulator)와 아이솔레이터(Isolator)가 함께 사용된다. 서큘레이터는 세 포트를 가지고 있고 입력과 반사 신호를 분리하며 신호가 한 방향으로만 전달되도록 설계된다. 서큘레이터에서 한 포트를 50Ω 저항으로 연결하면 아이솔레이터가 된다. 이는 두 포트 간 신호의 역전달을 차단하여 큐비트를 증폭기에서 오는 전자기 잡음으로부터 보호한다. 두 장치는 모두 저온 전용 모델을 사용해야 하며, 필요시 강한 차단을 위해 여러 단을 직렬로 연결한다.

필터(Filter) 역시 양자 신호의 품질을 결정하는 중요한 구성요소다. 주로 사용한 DC-8 GHz 범위의 로우패스 또는 밴드패스 필터는 제어 신호만 통과시키고, 10GHz 이상의 고주파 잡음을 50dB 이상 억제한다. 또한 4K 스테이지 등에서 발생하는 열에 의한 흑체 복사(적외선)가 큐비트에 도달하는 것을 막기 위해 IR 필터가 사용된다. IR 필터는 Eccosorb CR-시리즈 소재를 사용해 GHz-THz 대역의 복사 에너지를 흡수하며, 이는 비평형 준입자(Quasiparticle)의 생성을 억제하여 결맞음 시간을 연장한다.

마지막으로 마이크로파 제어 및 분석 시스템은 GHz 대역의 마이크로파 펄스를 나노초(ns) 단위로 정밀하게 제어하여 큐비트의 양자 상태를 조작하고, 반사 또는 투과 신호를 측정해 상태를 판독한다. 소프트웨어 및 동기화 시스템은 Field-Programmable Gate Array(FPGA) 기반의 제어 하드웨어와 파이썬(Python) 기반의 실험 제어 프로그램으로 구성된다. 이러한 체계를 구성하는 핵심 장비로는, 복잡한 펄스 시퀀스를 생성하는 임의파형 발생기, 국부 발진기, 신호 및 증폭기 구동용 펌프톤을 제공하는 고주파 신호발생기(RF Signal Generator) 등이 있다. 최근에는 이러한 제어 장비들이 하나의 통합 모듈 형태로 발전하여, 펄스 동기화 정밀도와 측정 자동화 수준이 크게 향상되고 있다. 현재 취리히 인스트루먼트(Zurich Instruments), 쿼텀 머신즈(Quantum Machines), 큐블록스(Qblox), 키사이트(Keysight) 등의 기업에서 상용 장비를 공급하고 있으며, 국내에서도 SDT Inc. 등을 중심으로 국산화가 추진되고 있다.

〈표 2.1.〉 초전도 양자컴퓨터 소재·부품·장비

| 초전도 양자컴퓨터 구성요소 | 소재 | 부품 | 장비 |
|----------------|--|--|--|
| 초전도 양자프로세서 | 고비저항 실리콘 기판, 사파이어 기판, 초전도 스퍼터링 타겟 | PCB 기판, 저손실 패키징, 동축 커넥터 | 와이어 본더, 프로브 시스템, 전자빔 증착기, 스퍼터, 이온 밀링 머신, 전자빔 리소그래피, 주사전자현미경, 투과전자현미경, |
| 극저온 환경 | 헬륨-3, 헬륨-4, 액체 질소, 뮤메탈, 전파 흡수 에폭시 | NbTi 케이블, CuNi 케이블 | 4K 맥동관 냉동기, 회석식 냉동기 |
| 극저온 마이크로파 소자 | | 저대역/고대역 필터, 저온 저잡음 증폭기, 양자 한계 증폭기, 아이솔레이터, 서큘레이터, IR 필터 | |
| 마이크로파 제어 및 분석 | | 저대역/고대역 필터, 상온 RF 증폭기, IQ 믹서 | 고주파 신호발생기, 임의파형 발생기, 양자 제어/분석 시스템 |

02 중성원자

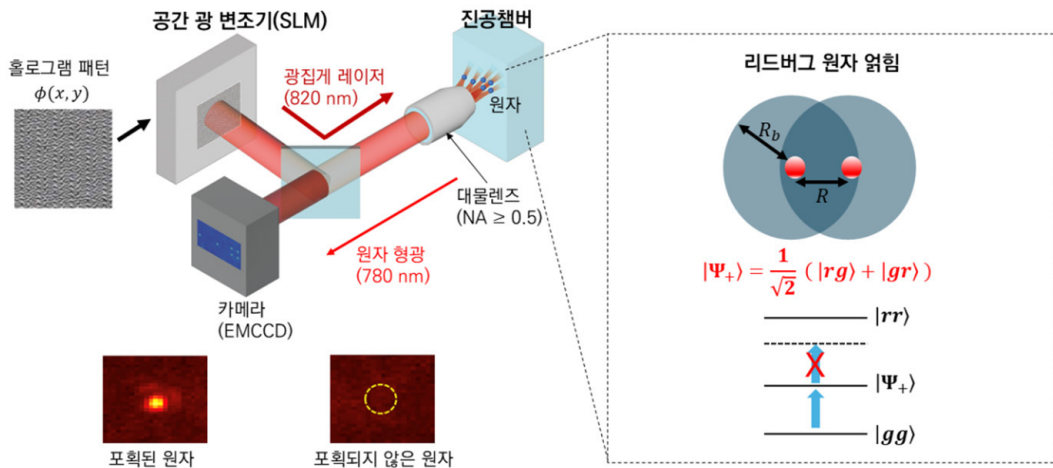
가. 연구 동향

중성원자와 이온포획의 차이는 전기적 쿨롱 상호작용 유무의 차이로, 이온포획과 마찬가지로 에너지 준위가 잘 정의되어 있으며, 레이저에 의해 결 맞는 양자 전이가 가능하다. 중성원자 플랫폼은 이온포획에 비해 양자 정보의 유망한 기술로 부각된 시점이 비교적 최근이다. 그러나 레이저를 이용해 원자를 제어하는 실험 연구는 이미 몇십 년 전부터 원자물리학 분야에서 오랜 기간 수행되었다. 주된 실험 기술은 진공 및 상온에서 원자의 운동에너지를 낮춘 후 특정 공간에 고정시켜 도플러 효과(Doppler Effect) 없이 원자를 제어하는 레이저 냉각(Laser cooling) 기술이며, 1997년에 스티븐 추(Steven Chu), 클로드 코엔타누지(Claude Cohen-Tannoudji), 그리고 윌리엄 필립스(William D. Phillips)가 이를 공로로 노벨 물리학상을 받았다. 중성원자는 전기적 상호작용이 거의 없지만, 주양자수가 매우 높은 뢰드베리(Rydberg) 상태로 전이되면 최외곽 전자의 궤도 반지름이 마이크로미터 크기에 가까워지면서 원자들 사이의 강한 상호작용이 가능하다. 뢰드베리 원자의 상호작용 역시 1990년대에

미국 버지니아 대학의 토마스 갤러거(Thomas F. Gallagher)에 의해 레이저 냉각된 원자 구름 하에서 실험적으로 연구되었다.

그 후 2001년에 프랑스 국립과학연구센터(CNRS)의 그랑지에(Grangier)와 브로웨이스(Browaeys) 그룹에서 회절한계에 가까운 크기의 광집계(Optical Tweezer)로 단원자만을 포획하는 실험이 성공하면서 본격적으로 중성원자를 개별적으로 다루는 실험이 시작되었다. 이후 2008년에 같은 그룹과 미국 위스콘신대학의 마크 사프만(Mark Saffman) 그룹에서 단원자 두 개를 포획하여 뢰드베리 상호작용에 의한 쌍극자 봉쇄(Rydberg Blockade)효과를 관측하였다. 이는 가까운 거리에 있는 두 원자는 동시에 뢰드베리 상태로 전이할 수 없는 효과로, 둘 중에 하나만 뢰드베리 상태에 존재할 수 있는 얽힘 상태를 구현할 수 있다(그림 2.9.)). 이 시점부터 중성원자 및 뢰드베리 원자를 이용하여 양자 정보기술에 활용하고자 하는 연구가 시작되었다.

〈그림 2.9.〉 중성원자 광집계 포획 및 뢰드베리 원자 얽힘



중성원자 플랫폼에서는 광집계에 포획된 원자 한 개가 큐비트이며, 따라서 여러 큐비트를 준비하기 위해서는 많은 수의 광집계 준비가 필수적이다. 이를 위해 현재는 〈그림 2.9.〉와 같이 공간 광변조기(SLM, Spatial Light Modulator)를 활용한 홀로그래프 기술을 기반으로 광집계를 준비한다. 첫 단원자 간 뢰드베리 상호작용을 관측한 후, 비슷한 시기에 2큐비트 얽힘 게이트의 작동을 보인 후, 최근에는 〈그림 2.10.〉과 같이 캘리포니아 공과대학교(Caltech, California Institute of Technology)에서 6000큐비트 플랫폼을 개발하는 등 중성원자 플랫폼 기술이 빠르게 고도화되고 있다. 또한 프랑스의 파스칼(Pasqal), 미국의 큐에라(QuEra)라는 기업에서 뢰드베리 쌍극자 봉쇄가 가능한 약 256큐비트 수준의 중성원자 양자컴퓨터 클라우드 서비스가 시작되어 양자컴퓨터는 이제 실제로 사용해 볼 수 있는 시대가 되었다.

현 시점의 중성원자 양자기술 수준으로 해결할 수 있는 실제 문제 중 하나는 조합 최적화 문제이다. 이는 주어진 노드들 사이의 특정한 연결 관계를 갖는 그래프에서 최적화된 해를 찾는 문제로, 대표적인 NP 문제로 알려져 있다. 특히 이 중 최대독립집합 문제는 워드베리 원자 쌍극자 봉쇄 현상을 이용하여 직접적으로 하드웨어에 인코딩이 가능하다. 현재 양자 어닐링 방법을 이용하여 파스칼 및 큐에라의 클라우드 컴퓨팅을 활용해 이 문제에 접근이 가능하다. 이를 기반으로 무선네트워크의 간섭 최소화, 물류, 교통 등 실생활에서 다양한 스케줄링 문제에 적용 가능할 것으로 기대된다. 또한 최근 워드베리 원자를 이용한 양자 게이트 연구는 CZ 게이트 오류율을 0.1% 수준까지 달성하였다. 가장 최근에 하버드 루킨(Lukin) 그룹에서는 448개 원자를 이용한 Fault-Tolerant Surface Code 운용, Transversal Lattice-Surgery 기반 논리 게이트, 그리고 Reed-Muller 코드의 횡단 T-게이트(Transversal T-Gate)까지 통합적으로 실험이 시연되어, 근시일내에 워드베리 플랫폼이 아날로그 시뮬레이터를 넘어 범용·오류보정 양자컴퓨터 아키텍처로 진입할 것으로 기대된다.

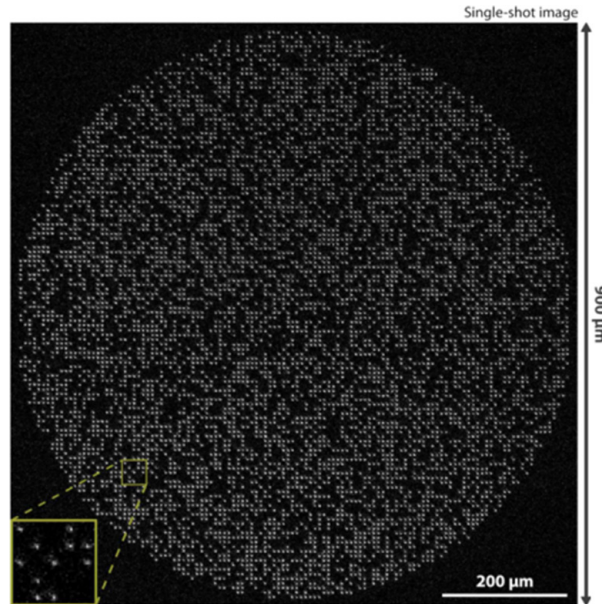
나. 장점

한 플랫폼이 양자컴퓨터로서 뛰어난 성능을 보이려면 아래의 두 가지 조건에서 장점을 가져야 하며, 중성원자 플랫폼은 이를 모두 만족한다.

1) 큐비트 확장성(Scalability)

중성원자 플랫폼은 광집계로 단위자를 포획하면서 큐비트를 생성한다. 따라서 진공챔버 안에 임의의 형태를 갖는 많은 수의 광집계를 효율적으로 제작하는 기술이 매우 중요하다. 현재 주로 사용되는 SLM 등의 홀로그램 장비에는 약 100만 개 정도의 액정 픽셀들을 이용하여 홀로그램을 제작할 수 있으며, 따라서 SLM 1대당 약 10,000개 가까운 광집계를 생성할 수 있다. 하나의 광집계가 원자 하나를 포획하기 위해 필요한 레이저 빔의 세기는 수 mW 수준으로, 이를 유지할 수 있을 정도의 강한 출력을 갖는 레이저만 있으면 하나의 플랫폼에서 큐비트 수를 확장할 수 있다.

〈그림 2.10.〉 Caltech의 6100큐비트 중성원자 배열



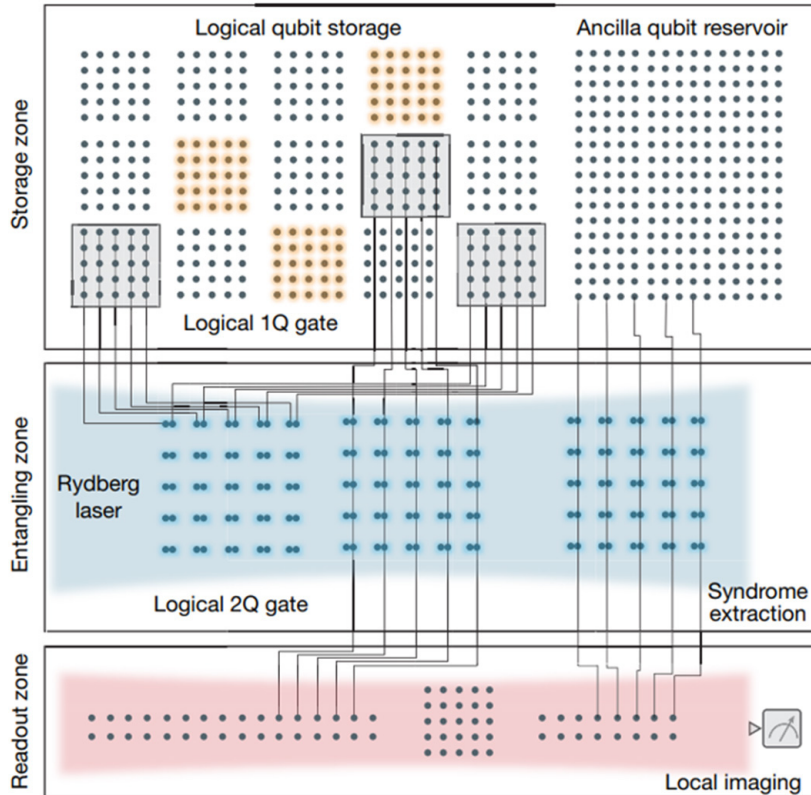
Manetsch, Hannah J., et al. (2025). "A tweezer array with 6100 highly coherent atomic qubits", Nature.

2) 큐비트 연결성(Connectivity, Controllability)

중성원자 큐비트를 포획하기 위한 광집계는 홀로그램 방법을 사용하여 제작되므로, 많은 수의 광집계를 만들 수 있을 뿐 아니라 광집계 배열의 모양도 다양하게 생성할 수 있다. 또한 뢰드베리 상호작용은 가까이 위치한 원자들 사이에서만 일어나므로, 각 광집계 사이의 거리를 자유롭게 조절하는 기술이 곧 큐비트 사이의 다양한 상호작용 연결 관계를 구현하는 것이다. 이러한 기술을 기반으로 최근 중성원자 플랫폼에서는 주어진 복잡한 네트워크 관계에서의 최적화된 해를 찾는 문제들에 접근이 가능하다. 이는 기존의 컴퓨팅 알고리즘으로는 효율적으로 해결할 수 없는 NP-문제에 해당한다. 현재 파스칼 및 큐에라 기업에서 클라우드 서비스 중인 중성원자 양자컴퓨터는 양자 단일컴퓨팅의 방법으로 NP-문제 중 최대독립집합이라 불리는 문제를 주로 해결하는 하드웨어이다.

또한 일부 광집계의 위치를 실시간으로 이동하는 기술 역시 활용되고 있다. 이를 통해 시간에 따라 각 큐비트 사이의 연결성을 바꿀 수 있으므로, 광집계의 위치 제어기술 역시 큐비트 연결성(Connectivity)에 기여한다. 최근 이를 활용하여 하버드 대학의 루킨 그룹에서 논리 큐비트 및 논리게이트, 그리고 양자 오류정정 실험이 시연되었다.

〈그림 2.11〉 하버드 대학에서 구현한 광집계 위치 실시간 제어기술을 활용한 논리 큐비트 및 논리게이트



Bluvstein, D., et al. (2024). "Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays", Nature, Vol. 626, pp. 58~65.

다. 단점

1) 수행 시간 및 결맞음 한계

큐비트의 $|0\rangle$ 과 $|1\rangle$ 의 양자 상태는 확률분포로 주어지기 때문에, 양자컴퓨터는 “큐비트 상태 준비 - 양자 구동 - 상태 측정”의 과정을 여러 번 반복해야 한다. 그러나 중성원자 플랫폼은 이러한 실험 사이클이 매우 느린 편이다. 일반적으로 1회 반복 측정에 0.5~1초가 소요되며, 이 중 반 이상의 시간이 원자 레이저 냉각 및 큐비트 상태 준비에 소요되고, 양자 구동에 걸리는 시간은 약 10마이크로초로 짧다. 이를 극복하기 위해서 최근에는 중성원자 양자 플랫폼의 실험 반복률을 높이기 위해 빠른 원자 광집계 포획, 그리고 큐비트 비파괴 측정 기술 등이 연구되고 있다. 중성원자 양자 하드웨어 기업 파스칼에서 발표한 자사 하드웨어 로드맵에서는 2026년에 반복률 10Hz, 2028년에는 반복률 100Hz 이상을 목표로 하고 있다.

또 다른 단점은, 원자 큐비트 내부에는 밀리초 이상의 긴 결맞음 시간을 가질 수 있는 에너지 준위들이 존재하지만, 원자에 가하는 레이저 자체의 잡음으로 인해 결맞음 시간 및 양자 게이트 신뢰도가 제한되는 점이다. 양자 게이트가 구동되는 시간대인 약 0.1~10마이크로초 이내에서 생기는 위상 잡음이 주된 원인인데, 이는 레이저의 종류에 따라 다르며, 반도체 다이오드 레이저가 이러한 잡음이 제일 높은 것으로 알려져 있다. 타이-사파이어 레이저와 같은 고체 레이저 혹은 광섬유 레이저 등이 이러한 잡음의 정도가 매우 낮은 것으로 알려져, 이를 이용해 최근 2큐비트 양자 게이트 신뢰도를 99.5% 이상으로 달성하였다. 한편 반도체 다이오드 레이저가 아직까지는 효율적인 비용으로 가능한 넓은 파장대역을 다루기 때문에, 이러한 레이저의 위상 잡음을 줄이려는 연구도 진행되고 있다.

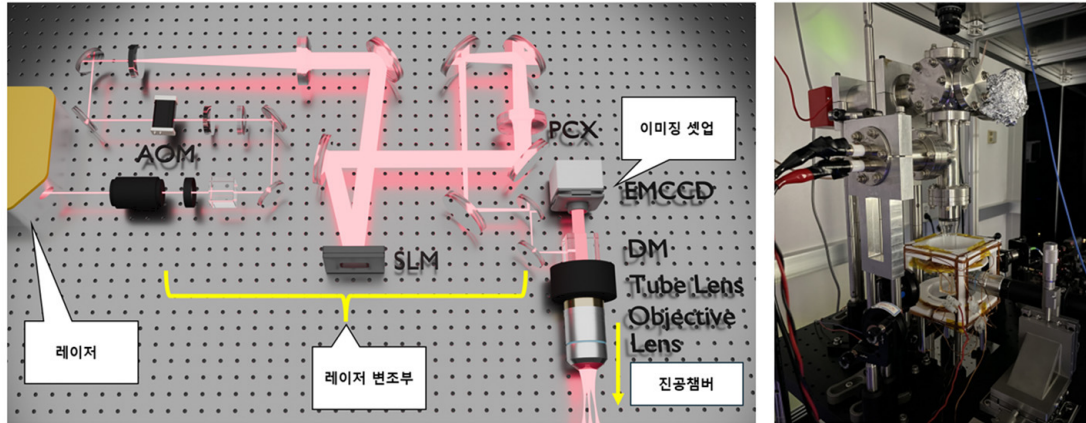
라. 소재·부품·장비

중성원자 하드웨어는 크게 레이저, 레이저 변조, 그리고 진공챔버의 세 부분으로 나뉜다. <그림 2.12.>와 같이 각 레이저에서 나온 빛들이 레이저 변조 부분에서 진폭, 주파수, 위상 등이 변조된 후에 진공챔버에 준비된 원자로 모두 입사되는 방식이다.

1) 레이저

중성원자 플랫폼에서 주로 사용되는 레이저는 약 100MHz 수준으로 떨어진 원자의 초미세구조를 구분할 수 있어야 하기 때문에 레이저의 선폭이 매우 중요하다. 이를 위해 약 100GHz의 선폭을 가지는 반도체 레이저 다이오드에서 회절격자를 이용한 추가 공진기를 덧붙이는 외부 공진기 다이오드 레이저(External-Cavity Diode Laser)를 사용한다. 이러한 레이저들은 보통 1MHz의 선폭을 가지며, 최근 상업적으로 구할 수 있는 레이저의 경우 100kHz 수준의 선폭을 가진다. 완제품의 경우 독일의 톱티카(Toptica), 호주의 모그랩스(MOGLabs) 등의 회사에서 다양한 파장의 외부 공진기 다이오드 레이저를 취급하며, 최근에는 중국의 프레시레이저스(Precilasers)사에서 취급하는 광섬유 레이저도 많이 사용하는 추세이다. 레이저 다이오드 및 회절격자 등의 부품을 직접 구매한 후, 실험실에서 조립하여 사용할 수도 있다. 레이저 다이오드는 톱티카(Toptica), 이글야드(Eagleyard), 니치아(Nichia) 등의 회사에서 취급하며, 회절격자는 토르랩(Thorlabs) 및 스펙트로곤(Spectrogon)사에서 취급한다.

〈그림 2.12〉 중성원자 시스템을 위한 레이저의 실험 셋업 개략도와 진공챔버



2) 레이저 변조부

레이저의 진폭, 주파수 및 위상 변조는 음광 변조기(AOM, Acousto-Optic Modulator)에서 실시한다. 이는 AOM에 RF 주파수(Wave)를 입사하면, 내부 물질이 회절 격자처럼 행동하여 레이저 빛을 회절시키면서 주파수가 RF 주파수만큼 더해지는 원리로, RF 주파수의 진폭 및 주파수에 따라 레이저의 진폭 및 주파수가 대응하여 변조된다. 음향광학 편향기(AOD, Acousto-Optic Deflector)는 AOM과 비교할 때 회절각이 더 크기 때문에, AOD에 여러 주파수 성분을 가진 RF 주파수를 이용하여 여러 개의 광집계를 만들기도 한다. AOM 및 AOD는 구치 앤드 하우스고(Gooch&Housego)사, 에어로다이오드(Aerodiode)사, 에이에이 옵토일렉트로닉(AA Optoelectronic)사, 그리고 인트라액션(IntraAction)사 등에서 공급한다. AOM에 가하는 RF 주파수 구동기(Wave Driver)는 1W 수준의 파워를 필요로 하는데, 대표적인 회사로는 독일의 타임 베이스(Time-Base), 호주의 모그랩스사 등이 있다. 특히 AOM과 AOD에는 적절한 크기와 편광을 갖는 레이저 빔을 입사시켜야 하므로, 거울, 렌즈, 그리고 파장판 등의 광학부품을 사용해야 한다. 대부분 토르랩사에서 취급하며, 더욱 안정적인 광학부품 마운트는 토르랩사의 폴라리스(Polaris) 라인과 뉴포트(Newport), 혹은 래디언트 다이즈(Radiant Dyes)사에서도 공급한다.

광집계 배열을 형성하기 위한 홀로그램 장비는 공간 광변조기(SLM, Spatial-Light Modulator)를 주로 사용한다. 대표적인 회사로는 홀로아이(Holoeye), 하마마츠(Hamamatsu)가 있으나, 대부분 홀로그램 스위칭 속도는 60Hz 정도이다. 홀로그램을 이용하여 광집계를 이동하고자 할 때는 빠른 홀로그램 스위칭 속도가 필요하기 때문에 메도우라크 옵틱스(Meadowlark Optics)사의 SLM을 주로 사용한다.

3) 진공챔버 및 이미징

진공챔버에서 고진공을 만드는 원리는 이온포획의 경우와 비슷하며, 진공챔버에 원자를 공급하는 부품은 아토믹 디스펜서(Atomic Dispenser)를 사용한다. 알칼리 원자의 경우 SAES 게터스(SAES getters)사의 부품을 사용하는데, 알루미늄판 위에 원자를 크롬 등 다른 금속과 혼합된 형태로 쌓아놓고, 전류를 가하면 약 200도 이상 가열되면서 원자 증기가 발생한다. 알칼리 원자뿐 아니라 알칼리토금속 및 희토류 원자는 대표적으로 알파바쿠오(Alfavakuo)사에서 취급한다. 또한 중성원자 플랫폼에서는 원자에 가능한 많은 종류의 레이저 빔을 입사시켜야 하므로, 원자가 존재하는 부분을 유리관을 사용한다. 유리관은 실험실의 상황마다 크기와 모양이 각기 다르므로 대부분 커스텀으로 제작하는데, 일본의 재팬셀(JapanCell), 미국의 프리시전 글래스블로잉(Precision Glassblowing)사에서 주로 담당한다.

광집계를 제작하고, 원자의 형광을 이미징하기 위해서는 높은 개구수(Numerical Aperture)값을 갖는 대물렌즈가 필요하다. 상업적으로 구할 수 있는 대물렌즈는 미쓰도요(Mitutoyo)사가 거의 유일하며($NA=0.5$), 또는 스페셜 옵틱스(Special Optics)사로부터 커스텀으로 제작할 수 있다. 원자를 이미징하는 카메라는 광자증배방식 CCD(EMCCD, Electron-Multiplying CCD)이 있으며, 영국의 옥스퍼드 인스트루먼트(Oxford Instruments)사와 뉘뷔 카메라(Nuvu Cameras)사가 있다. 최근에는 하마마츠사의 QCMOS 카메라도 많이 사용하는 추세이다.

〈그림 2.13.〉 중성원자 하드웨어 소재, 부품 및 장비의 주요 공급 기업

- 레이저:    
- 변조: 기본 광학부품(렌즈, 거울, 필터 등) -   
- Acousto-optic modulator -   
- Electro-optic modulator -  
- Spatial-light modulator -    
- ULE cavity(주파수 안정화용) - 
- 진공: 원자 source(dispenser) -  
- 펌프 -   
- 측정: 카메라(EMCCD, qCMOS) -    

03 포획이온

가. 연구 동향

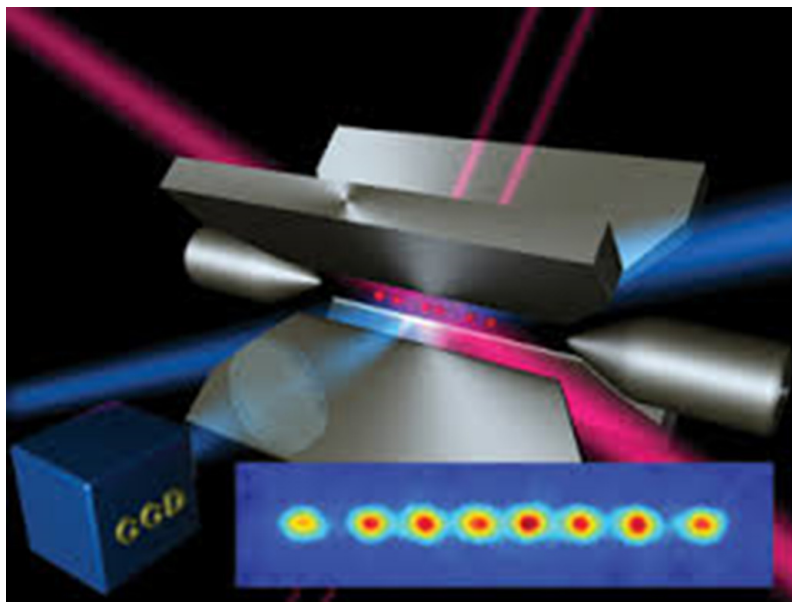
1977년, MIT의 컴퓨터과학자와 응용수학자 3인(리베스타, 샤미르, 아델만(Rivesta, Sharmir, Adelman))이 개발한 암호 체계인 소위 RSA 체계는 두 개의 소수(Prime Number)를 곱하는 연산은 쉽지만, 곱해서 얻어진 숫자를 소인수분해 해서 원래의 두 소수를 찾는 것은 이보다 훨씬 어렵다는 점을 이용한다. 수학에서는 이런 형태의 연산을 한 방향 함수(One-Way Function)라고 부른다. RSA 체계와 이로부터 변형된 한 방향 함수를 이용하는 비슷한 형태의 암호 체계는 현대 군사, 금융을 비롯한 모든 민감한 분야의 가장 기본적인 보안 방법으로 자리 잡았다.

1994년 역시 MIT에 있던 수학자 쇼어(Shor)는 양자계의 얽힘과 중첩, 그리고 이에 가해지는 양자역학적 변환규칙을 응용한 연산을 이용하면 소인수분해에 걸리는 시간을 획기적으로 줄일 수 있다는, 이제는 쇼어 알고리즘이라고 알려진, 아이디어를 발표했다. 쇼어 알고리즘을 이용한 암호해독이 가능하다면, 적군의 암호 체계를 뚫거나 혹은 우리 암호 체계가 적군에게 뚫릴 수 있어서, 쇼어 알고리즘은 양자 연산의 킬러 애플리케이션(Killer Application)으로 주목받았다. 이런 가능성 때문에 양자물리학을 이용한 정보처리에 관한 연구는 국제적으로 큰 관심을 끌었다.

이런 배경에서 1995년 미국 콜로라도 주립대학 내 JILA 연구소의 졸러(Zoller) 교수가 이끄는 이론 팀이 포획된 이온의 2준위계와 그 운동상태의 중첩과 얽힘을 이용해 간단한 양자 게이트를 구현하는 방안을 제안했다. 곧이어, NIST의 원자시계 연구단의 와인랜드(Wineland) 그룹에서 포획된 한 개의 이온을 이용한 최초의 양자 게이트로 Controlled NOT(CNOT)게이트의 작동을 실험으로 보였다. 이로써 양자컴퓨팅이 이론적으로뿐 아니라 인공적으로 준비된 양자 계에서 실제로 구현 가능함을 보였고, 양자컴퓨팅 시대가 열렸다. CNOT게이트는 비록 아주 간단한 단일 연산에 불과하지만, 이들을 적절히 조합하면, 원칙적으로는, 모든 양자 연산을 수행할 수 있는 소위 유니버설(Universal) 양자컴퓨팅이 가능하다.

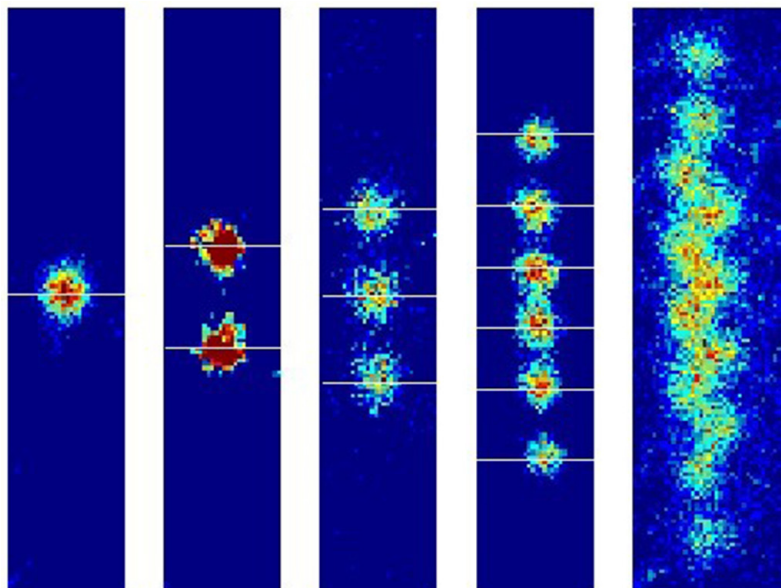
이런 공로로 와인랜드 교수는 2012년에 노벨 물리학상을 수상했고, CNOT게이트 구현 20년 후인 2015년에, NIST 실험의 주역 중 한 명이었던 먼로(Monroe)가 한국인 물리학자 김정상 교수와 함께 아이온큐(IonQ)라는 벤처회사를 창업하면서 양자컴퓨팅 산업화에 새로운 바람을 일으켰다.

〈그림 2.14〉 선형 이온포획장치



이 장치에는 8개의 이온이 포획되어 있다.

〈그림 2.15〉 선형 이온포획장치에 포획된 이온의 형광 영상



나. 장점

포획이온이 최초의 양자 게이트를 구현하는 플랫폼이 될 수 있었고, 아직도 양자 연산의 수월성을 판단하는 몇몇 주요 지표에서 가장 앞서갈 수 있는 이유로는:

- 1) 양자 연산의 기본 단위인 큐비트가 되기 위해서는 0과 1에 해당하는 잘 정의된 2준위계가 필요하다. 그런데 자연에 존재하는 대부분의 양자계는 단순한 2준위가 아니고, 수없이 많은 준위로 구성된 매우 복잡한 구조를 갖는다. 전자, 광자와 같은 기본 입자를 제외하고, 자연에 존재하는 가장 간단한 시스템은 핵과 그 주위를 도는 몇 개의 전자로 구성된 원자 혹은 이온이다. 이들도 완전한 2준위계는 아니지만, 여기에 가장 가깝다. 이들 입자의 운동을 제어해서 포획하고, 적절한 전자기파 혹은 자기장을 걸어주면, 다른 준위들의 영향을 받지 않는 거의 완벽한 2준위를 구현할 수 있다.
- 2) 원자물리학 분야에서는 원자 혹은 이온의 잘 정의된 2준위를 이용해서 시간 혹은 주파수 표준을 정하는 원자시계를 구현해 왔다. 최고의 정확성과 정밀성을 갖는 원자시계를 구현하기 위해서는 원자 상태의 초기화, 중첩상태 생성, 최종상태로의 전이 유도, 그리고 검색이라는 일련의 과정이 철저히 의도한 바대로 제어되어야 한다. 그런데, 이런 요구조건은 최고의 충실도를 갖는 양자 게이트 구현을 위한 조건과 똑같다. 원자시계 연구는 오랜 역사를 통해 이런 문제를 해결해 왔으며, 이는 양자 게이트 구현에 큰 도움이 됐다. NIST 그룹은 원래 한 개의 포획이온을 이용한 원자시계 개발업무를 맡고 있었고, 이런 원자시계는 도량형의 표준인 세슘 원자시계와 겨룰 만큼 좋은 성능을 보였다.
- 3) 고전 컴퓨터와 대비되는 양자 연산의 강점을 가져다주는 핵심적인 요소가 중첩과 얽힘이지만, 이들은 매우 망가지기 쉽다. 진동과 같은 물리적 섭동에도 취약하지만, 특히 외부에서 가해지는 전기장 혹은 자기장에 의한 전자기적 섭동에 취약하다. 포획 이온은 초고진공 환경에서 섭동을 가할 만한 주위 물체로부터 충분히 멀리 떨어져 홀로 존재하기 때문에 양자 조작을 위해 가해진 잘 정의된 전기장과 자기장의 영향을 받을 뿐이다. 그 결과 다른 양자컴퓨터 플랫폼에 비교해서 아주 긴 결맞음 시간을 유지할 수 있다. 이런 점에서 최초의 양자 게이트 구현에 이용된 단 한 개의 포획이온은 양자 게이트 구현에 이상적인 시스템이었다.
- 4) 의미 있는 양자컴퓨팅을 위해서는 많은 수의 큐비트가 동원되어야 하고, 이들의 얽힘 상태를 생성할 수 있어야 한다. 얽힘 상태를 만들기 위해서는 큐비트, 혹은 큐비트를 구현하는 입자들 사이에 어느 정도 강한 상호작용이 있어야 한다. 광자는 상호작용하지 않고, 중성원자는 약한 전기쌍극자 상호작용을 할 뿐이다. 이에 비해, 이온은 강력한 쿨롱 상호작용을 한다. 이런 점이 이온의 포획을 쉽게 해 줌은 물론이고, 한 개 이상의 이온이 포획되어 있을 때 이들 간의 쿨롱 상호작용을 이용한 얽힘을 쉽게 한다.

다. 단점

- 1) 포획이온 기반의 양자컴퓨터는 초고진공 이온포획장치와 전기장과 자기장, 그리고 여러 대의 레이저와 마이크로파 시스템이 만들어 주는 전자기파의 초정밀제어를 요구하며, 이를 구현하고 유지하기 위해서는 매우 복잡한 장치와 난도가 높은 기술이 동원돼야 한다.
- 2) 강한 쿨롱 상호작용은 위에서 정리한 것처럼 포획이온 플랫폼에 여러 장점을 제공하지만, 한편으로는 집적도를 제한하는 요인이 되기도 한다. 10개 이상의 이온이 포획된 경우, 이들 사이의 강한 상호작용이 전체적인 구도를 복잡하게 하면서, 중첩과 얽힘 상태를 만들고 이를 유지 조작하는 것이 매우 어려워진다. 이런 이유로 하나의 양자 연산 시스템에 포획이온, 즉 큐비트 30개 이상을 집적하는 것은 기술적으로 매우 어려운 일이다.
- 3) 수백 혹은 그 이상의 큰 집적도를 위해서는 10~30개 수준의 모듈화된 양자 연산 시스템을 여러 개 만들어, 이들을 양자 정보를 손상 없이 전달할 수 있는 양자 정보 전달 체계로 연결해주는 방안이 연구되고 있으나, 그 시스템이 매우 복잡해서 어려움이 있다.
- 4) 양자역학적 연산을 위한 큐비트의 상태변화에 걸리는 시간이 수 마이크로초 수준으로, 중성원자 플랫폼에서의 시간과는 비슷하지만, 초전도 큐비트의 수 나노초에 비해 매우 길다. 이는 연산속도를 크게 제한한다. 집적도를 크게 높이기 위해서 필요한 양자 정보 전달도 연산속도를 제한하는 요소다.
- 5) 선형으로 늘어선 이온을 독립적으로 제어하고 그 상태를 검색하기 위해서는 레이저 광선을 각 이온에 선택적으로 가해야 한다. 그런데 포획된 이온 사이의 거리는 수 마이크로미터에 불과하므로 좋은 선택성을 구현하고 유지하기 위해서는 레이저 광선 정렬상태의 높은 정밀성과 안정성이 요구된다.

라. 소재·부품·장비

1) 이온포획장치

- 가) 전통적인 선형 이온포획장치와 함께, 2차원 형태의 포획장치가 이용되고, 연구되고 있다. 현대 반도체 리소그래피 기술 관점에서 보면, 사이즈가 큰 장치로, 제작기술보다는 이온의 안정적 포획, 포획된 이온에 레이저와 RF를 정확하고 안정적으로 가하고 그 결과를 검색하도록 해 주는 설계기술이 중요하다. 전극에서 발생하는 전기적 잡음이 가장 큰 외부 섭동 원인으로 알려져 있으며, 전극 표면의 재료와 가공이 중요하다.
- 나) 이온포획 플랫폼의 가장 핵심적인 장치이며, 대부분의 연구 그룹과 기업에서 영업비밀로

보호하는 자체 노하우로 제작된다. 노하우 보호와 수요의 잠재적 크기를 고려했을 때, 시장이 형성될 수 있는 아이템은 아니라고 판단한다.

2) 진공 장비

- 가) 포획된 중성원자나 이온을 이용하는 실험에서는 주변들 떠도는 분자가 포획된 입자와 충돌하며 포획된 입자를 잃어버리는 문제 때문에 고진공이 필요하다. 그런데 양자컴퓨팅 플랫폼으로 사용하는 포획장치에서는 주변 분자와 포획된 이온의 충돌이 이온의 양자역학적 중첩 및 얽힘 상태를 손상하는 문제까지 걱정해야 한다. 이 때문에 기술적으로 가능한 최고의 진공 상태를 유지하기 위한 진공 장비가 쓰인다. 흔히 대기압의 수조 혹은 수십조분의 1 정도의 진공도를 요구한다.
- 나) 초고진공(UHV, Ultra-High Vacuum), 혹은 극초고진공(XUV, Extreme High Vacuum)을 얻기 위해서는 다양한 진공 펌프가 이용된다. 일단 대기압을 십만분의 1 수준으로 끌어내리기 위해서, 시스템 오염을 가져올 수 있는 윤활유가 없는, 드라이 스크롤(Dry Scroll) 혹은 다이어프램(Diaphragm) 펌프가 이용된다. 그다음에는 진공 장치 내 압력을 대기압의 수조분의 1 수준으로 내리기 위해서 강력한 선풍기인 터보 펌프 혹은 장치 내 분자를 이온화해서 벽면에 박아 버리는 이온 펌프가 이용된다. 이와 함께, 남아 있는 분자들과 화학적 결합이 강한 금속화합물을 진공 장치 내벽에 도포하는 방식(Gettering)의 티타늄 승화 펌프 또는 최근 개발된 비증발형 게터(Getter) 펌프가 이용된다. 극초진공을 얻기 위해서는 액체 헬륨을 이용한 극저온 펌프가 동원되기도 한다. 단, 게터링(Gettering) 방식과 극저온 방식으로는 수소분자와 헬륨 원자를 제거할 수 없어서 이온 펌프의 역할은 여전히 중요하다.
- 다) 위에서 언급한 펌프들은 이온포획장치뿐 아니라, 중성원자 포획장치, 그리고 핵물리학 및 입자물리학의 가속기장치 등 기초과학 연구와 반도체, 정밀화학약품 제조 등 제조업에서 널리 쓰이는 장비로 상당한 규모의 시장이 있다.
- 라) 위에서 언급한 모든 펌프는 비교적 간단한 기계 구조이고, 이를 구동하는 제어장치 또한 현대 전자장비 기준으로는 낮은 기술단계에 해당한다. 그런데도 기초과학은 물론, 산업현장에서도 100년 이상의 전통을 앞세운 몇몇 유럽, 일본 그리고 미국 회사들이 시장을 장악하고 있다. 대표적인 회사로는 독일의 레이볼드(Leybold), 파이퍼(Pfeiffer), 영국의 에드워즈(Edwards), 그리고 미국의 애질런트(Agilent)(과거 배리언(Varian)이 흡수됨), 그리고 일본의 울박(ULVAC)이 있다.
- 마) 이와 함께 진공 장치의 배관에 해당하는 일자형, T자형, 십자형 진공 장치, 다양한 밸브와 진공측정 장비 등이 필요하며, 이들 역시 비교적 간단한 기술을 요구하는 장치임에도 불구하고, 몇몇 회사가 포털을 통한 원스톱 서비스를 제공하는 형태로 시장을 장악하고 있다. 대표적인

회사로는 쿠르트 J. 레스커(Kurt J. Lesker)와 파이프 온라인(Pfeiffer On-Line) 등이 있다.

- 바) 이런 진공 장비 및 부품 공급망에서 주목할 만한 회사 하나가 미국의 킴벌 피직스(Kimball Physics)다. 이 회사는 위에서 언급한 것과 같은 간단한 진공 부품에 혁신적인 아이디어를 접목해서 새로운 시장을 창출했다. 킴벌 피직스의 혁신적인 아이디어의 예로는, 기존 정육면체 모양 진공챔버의 8개 모퉁이에 각각 작은 창문을 추가해서 45도 방향으로도 광선을 가할 수 있도록 하는 방식, 두 개의 정육면체 진공챔버를 연결할 때 길이가 긴 기존의 니플(Nipple) 방식 대신, 미리 볼트를 장전해서 매우 짧은 길이의 연결장치를 이용하는 방식 등이 있다.
- 사) 두루 이용되는 부품시장은 포털을 기반으로 하는 원스톱 시스템의 기업이, 초고진공 진공 펌프와 진공 게이지 등 비교적 부가가치가 높은 시장은 전통의 기업이 장악하고 있다. 우리나라의 제조업 능력에서 봤을 때 기술적인 장벽은 높지 않지만, 이런 시장의 진입장벽은 여전히 상당히 높다. 이런 상황에서, 현장에서 일하는 사람들이 필요하다고 생각하는 제품을 혁신적인 아이디어로 제공하는 킴벌 피직스가 우리가 추구해 볼 만한 대안으로 보인다.

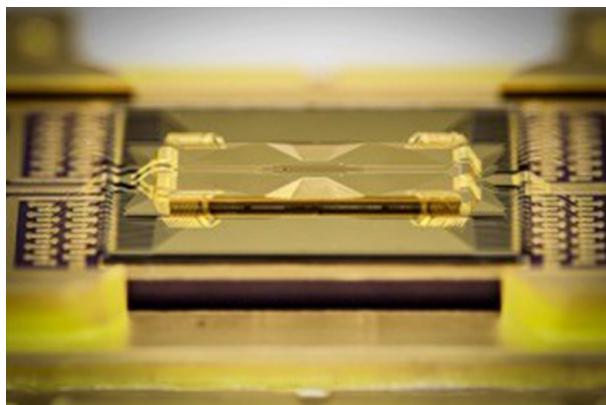
3) 레이저 시스템

- 가) 각각의 이온은 특별한 파장과 세기의 전이선을 갖는다. 따라서 이온의 종류에 따라 포획이온 기반 양자컴퓨터에 필요한 레이저의 사양 또한 다양하다. 그리고 하나의 이온에 대해서도, 연산 과정 즉 이온의 포획, 냉각 및 초기화, 그리고 게이트 조작, 검색 각 과정에서 필요로 하는 레이저도 제각각이다. 레이저의 중요한 사양은 파장과 출력 및 주파수 안정도(주파수 선폭) 등이다.
- 나) 포획이온 양자컴퓨터에서 특히 어려운 점은, 흔히 이용되는 이터븀, 칼슘, 그리고 바륨 이온 모두 300~400 나노미터 대역의 비교적 짧은 파장의 광원을 필요로 하는 점이다. 이 대역은 가시광선의 극단, 혹은 근자외선 대역으로 일반적으로 충분한 출력과 좁은 선폭의 광선을 안정적으로 얻기 어려운 영역이고, 사용되는 광학 부품의 사양도 까다롭다.
- 다) 이온포획 기반 양자컴퓨터에 사용되는 레이저를 공급하는 대표적인 기업은:
- (1) 톱티카 포토닉스(Toptica Photonics): 양자컴퓨터뿐 아니라, 원자 및 분자물리학 연구 전반에서 사용되는 레이저 분야에서 시장지배력이 가장 큰 기업이다. 적외선 대역의 다이오드 레이저 및 광섬유 레이저를 마스터 레이저(Master Laser)와 증폭기로 구성된 혼합형 시스템으로 제공한다. 이들 레이저의 고조파를 생성해 짧은 파장 대역의 레이저도 공급한다.
 - (2) NKT 포토닉스(NKT Photonics): 안정성과 함께 높은 출력을 낼 수 있는 광섬유 레이저에 특화된 기업이다. 반도체 기반 레이저와 상보적인 여러 장점을 가지고 있는 제품을 공급한다.

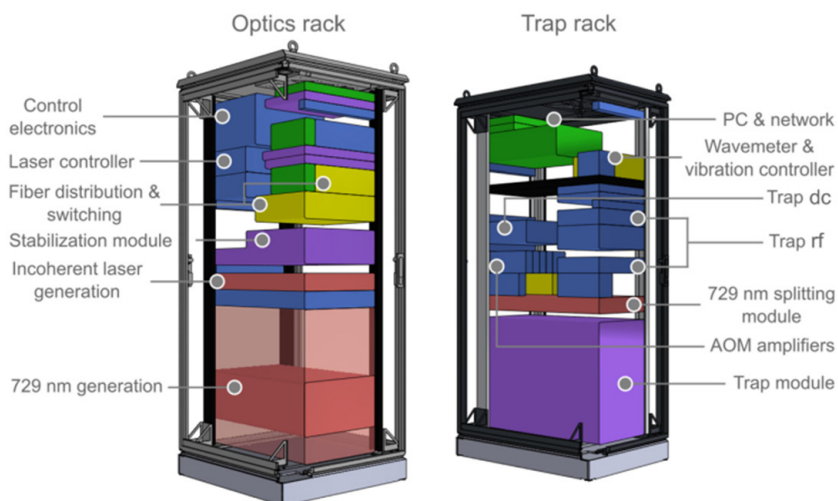
(3) 코히런트(Coherent): 70년대 색소 레이저 시대부터 최고 사양의 연구용 레이저 시스템을 공급하던 전통의 기업이다. 여전히 다양한 유형의 레이저와 높은 사양의 광학 부품을 공급한다.

라) 대표적인 양자컴퓨터 개발 기업인 아이온큐나 퀀티넘(Quantinuum) 등은 이미 시장에 나와 있는 레이저를 구매해서 이용하기보다는, 위에 열거한 레이저 전문업체 등과 협업해서 자신들의 시스템 제작에 최적화된 레이저를 함께 개발하고 있다.

〈그림 2.16.〉 아이온큐가 2024년 선보인 35큐비트의 AQ35 이온포획 양자컴퓨터의 핵심부



〈그림 2.17.〉 이온포획 양자컴퓨터를 구동하기 위한 제어장치



04 광자

가. 연구 동향

광자 기반 양자컴퓨팅은 양자 하드웨어로 빛의 양자 단위인 광자(Photon)를 사용한다. 광자는 상온에서 동작하고 환경과 상호작용이 적어 결맞음 손실에 강인하다는 장점을 지닌다. 또한 레이저, 광섬유, 광학소자 등 광학 기술의 성숙도가 높아 기존 기술을 활용하기 용이하다. 반면 광자의 상호작용이 매우 약하다는 점은 양자 게이트 구현을 어렵게 한다. 두 광자 사이에 직접적인 비선형 상호작용이 없어 두 큐비트 논리게이트를 구현하기가 까다롭다. 이 한계를 극복하기 위해 선형 광학소자와 측정을 활용하는 방법이 개발되었다. 예를 들어 Knill-Laflamme-Milburn(KLM) 프로토콜에서는 선형 광학소자(거울, 빔스플리터 등)와 단일광자 검출만으로도 양자 게이트를 실현할 수 있음을 보였다. 이러한 측정 기반 양자 제어 기법은 광자의 약한 상호작용 문제를 보완하며, 이후 여러 광자 양자컴퓨팅 실험에서 활용되고 있다.

광자 기반 양자컴퓨팅에는 양자 상태 표현 방식에 따라 크게 이산 변수(DV, Discrete-Variable)와 연속 변수(CV, Continuous-Variable) 접근으로 나뉜다. 이산 변수 방식에서는 단일광자의 고전적 모드 특성(예: 편광, 경로(Spatial Mode) 등)이 큐비트를 구성한다. 예를 들어 편광 기준으로 수평 $|0\rangle$ 편광과 수직 $|1\rangle$ 편광에 각각 한 개의 광자가 존재하는 상태를 큐비트 0과 1로 이용한다. 또는 듀얼레일(Dual-Rail) 부호화처럼 두 가지 경로 모드 중 한 경로에 광자가 존재하면 $|1\rangle$, 다른 경로에 있으면 $|0\rangle$ 로 사용할 수도 있다. 이러한 DV 큐비트들은 선형 광학 소자망을 통해 연산 되며, 최종적으로 단일광자 검출기에 의해 측정된다. DV 방식의 장점은 기존 양자 오류정정 이론을 직접 적용할 수 있는 큐비트 형식이라는 점이지만, 앞서 언급한 바와 같이 광자 간 게이트가 비결정론적이어서 많은 보조 광자와 피드포워드 회로가 필요하다는 과제가 있다.

연속 변수 방식에서는 연속적인 값을 취하는 광자의 비고전적 상태를 정보 단위로 사용한다. 대표적으로 압축 상태(Squeezed State)의 양자변위(Q, P 좌표 값)를 이용하여 정보를 부호화하고 연산한다. 연산 과정은 광학적 비선형 효과나 피드백 등을 통해 이루어지며, 최종 측정은 위상 정보를 얻기 위해 동조(Homodyne)검출로 수행된다. CV 양자컴퓨팅은 다수의 모드에 걸친 대규모 얽힘 상태(클러스터 상태) 생성이 비교적 수월하다는 장점이 있다. 이러한 거대 CV 클러스터 상태는 측정 기반 양자컴퓨팅(Measurement-Based QC)의 자원으로 활용되어, 동조 검출의 측정 각도를 조절함으로써 양자 게이트 연산을 구현할 수 있다.

광자 기반 양자컴퓨팅은 DV와 CV 각각의 장단점을 가지고 병행 발전하고 있으며, 두 방식을 결합한 하이브리드 접근까지 연구되고 있다. DV 방식은 큐비트 개념을 그대로 활용하여 양자 알고리즘 적용이 수월하고, CV 방식은 대규모 얽힘 리소스를 활용한 병렬적 양자 연산에 유리하다. 두 경우 모두 광학계를

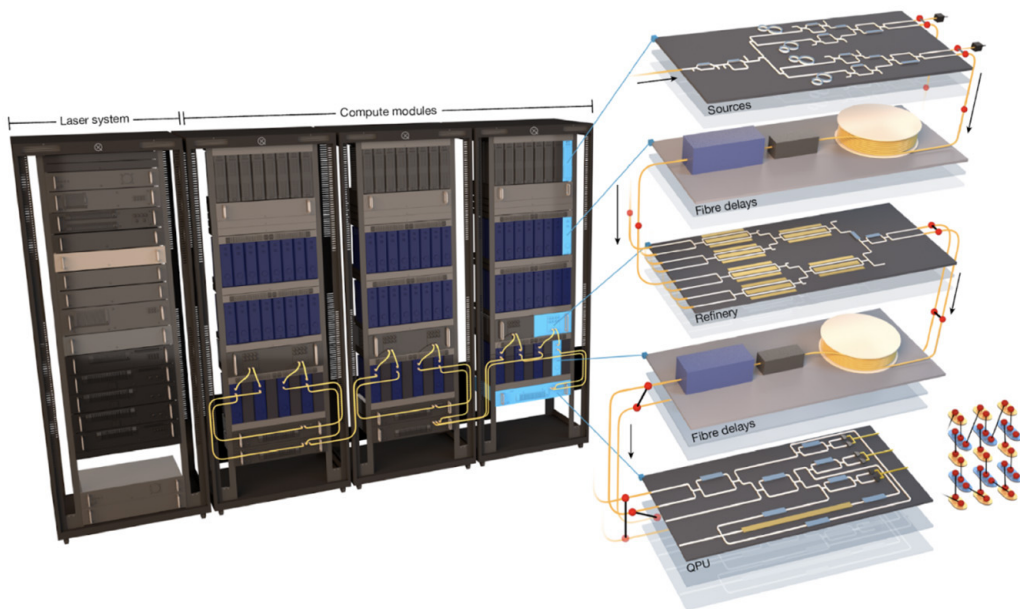
통한 선형 제어와 검출 기반 피드백이 핵심인데, 이는 다음에서 다룰 시스템 구성요소(광원, 제어, 검출)의 발전과 밀접히 관련되어 있다.

최근 광자 기반 양자컴퓨터 연구에서는 반도체 파운드리 공정으로 만든 포토닉 칩 위에서 단일·이중 큐비트 연산과 칩 간 인터커넥트(Interconnect)가 99% 후반대 수준의 충실도로 구현되고, 다수의 스위처·광자수분해 검출기를 결합해 클럭 당 약 10여 개 물리 모드와 수십억 모드 규모의 클러스터 상태를 생성·제어하는 모듈형 시스템이 시연되었다. 뿐만 아니라, 결합내성 양자컴퓨팅에 필요한 GKP 큐비트를 온칩에서 직접 생성·검증하는 광원 기술과, 이를 이용한 실시간 디코딩·피드포워드 제어 루프까지 동작하는 수준에 도달했다. 하지만, 손실과 압축(Squeezing) 등 리소스 품질은 오류내성 임계값을 넘기기 위한 연구가 필요한 수준이다.

나. 시스템 구성: 광원부, 제어부, 측정부

광자 양자컴퓨팅 시스템은 크게 광원부, 제어부, 측정부 세 부분으로 나눌 수 있다. 광원부에서는 양자적 특성을 가진 빛(단일광자 혹은 비고전적 광 상태)을 발생시키고, 제어부에서는 광학소자를 이용해 이 광자들의 양자 상태를 원하는 대로 변환하거나 서로 간섭시키며, 측정부에서는 최종적으로 광자 상태를 읽어 내거나 중간 제어 과정에서 측정을 통해 얽힘 생성이나 광자 선택 등의 상태 조작을 수행한다.

〈그림 2.18〉 광자 기반 양자컴퓨팅 시스템 모식도



1) 광원부

광자 기반 양자컴퓨터의 광원부는 양자 리소스에 해당하는 빛의 양자(비고전적) 상태를 생성하는 역할을 한다. 광원부에서는 단일광자원과 압축광원 두 축으로 개발이 진행 중이며, 재료와 부품으로는 비선형 결정, 반도체 양자구조, 광섬유, 레이저 등이 핵심이다. 최근에는 발생된 광자의 단일광자 순도와 압축 정도를 높이고 반복률과 수율을 개선하는 방향으로 연구개발이 진행 중이다. 또한 여러 광원을 동일한 플랫폼에 집적하거나, 광원-회로-검출기를 하나로 통합하려는 연구도 활발히 수행 중이다. 비고전적 상태를 갖는 빛의 상태를 형성하는 대표적 광원부는 다음과 같이 3가지로 분류할 수 있다.

가) 자발적 변환을 이용한 헤럴딩 광원

자발적 매개변환(SPDC, Spontaneous Parametric Down-Conversion)은 비선형 광학결정(예: PPKTP, LiNbO₃ 등)을 강한 펌프 레이저로 비추면 확률적으로 높은 에너지의 하나의 광자가 낮은 에너지의 두 광자 쌍으로 변환되는 현상을 이용한다. 이렇게 생성된 광자 쌍 중 하나를 검출하면 다른 하나에 단일광자 존재를 헤럴드(Herald)하게 되며, 순수한 단일광자 상태로 활용된다. 비슷한 방식으로 자발적(Spontaneous) 광자 혼합(Four-Wave Mixing) 과정을 SiN이나 Si로 제작된 마이크로링 공진기(Micro-Ring Resonator)에서 일으켜 광자 쌍을 만들고, 한쪽을 검출하여 다른 쪽을 얻는 방식도 있다. 이러한 SPDC/SFWM 기반 광원은 구현이 비교적 쉽지만 여러 쌍이 동시에 나올 확률을 완전히 배제할 수 없고 본질적으로 확률적이라는 한계가 있다. SPDC 기반 광원에서 고품질의 얇힘 광자 쌍을 생성하거나, 보존 샘플링과 같은 다수의 광자 간 간섭 실험에 필요한 수백 개 광자를 동시에 생성하는 수준까지 도달하였다.

나) 양자 발광체 기반의 광원

양자점(Quantum Dot)이나 고체 내 색 중심(Solid-State Color Center) 같은 단일 양자 발광체를 이용하여 레이저 조사에 따라 한 번에 한 개의 광자를 방출하도록 하는 방식도 있다. III-V 반도체 양자점을 나노 공진기 구조에 포함시켜, 펄스 레이저로 여기하면 특정 파장의 단일광자를 높은 확률로 방출시킨다. 이러한 양자점 광원이 방출되는 광자의 높은 구별 불가능성(Indistinguishability)과 수율을 가진다고 보고된 바 있다. 다만 양자점이 포함된 III-V 반도체 소자는 그 자체로 대규모 포토닉 집적회로(PIC)를 만들기에는 공정 프로세스가 미성숙하다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 하이브리드 집적 접근이 연구되고 있다. 이는 양자점 광원 칩에서 나온 단일광자를 별도의 SiN 플랫폼과 같은 저손실 포토닉 회로 칩으로 연결하여 활용하는 방식이다. 양자점과 광회로를 하나의 칩에 이중 집적(Heterogeneous Integration)하는 기술도 개발 중이다.

다) 연속 변수 압축광 광원

CV 방식의 광자 기반 양자컴퓨팅의 리소스로 압축광(Squeezed Light)이 활용된다. 압축광은 광원의 잡음 분포가 한쪽 쿼드러처(Quadrature)에 집중되어 있는 비고전적 상태로, 한쪽 변수의 불확정성은 줄이고 반대편 변수의 불확정성은 늘어난 특징을 가진다. 이러한 상태는 자원은 가우시안(Gaussian) 클러스터 얽힘을 대량으로 생성하는 데 필수적이다. 예를 들어, 서로 다른 위상에서 압축된 두 빔을 빔스플리터(Beam Splitter)로 간섭시키면 2-모드의 압축광 상태가 나온다. 다수의 모드에 대해 이러한 과정을 반복하면 거대한 CV 클러스터 상태를 얻을 수 있고, 이는 측정 기반으로 양자 게이트를 수행하는 연속변수 양자컴퓨터의 연산 리소스를 형성한다. 압축광원 형성에는 폴링 위상이 주기적으로 극성 반전된 PPLN, PPKTP 결정이 많이 사용된다. 이들 결정은 펄스 레이저 광자의 자발 매개하향변환(Spontaneous Parametric Down Conversion)을 통해 신호 및 아이들러 광자 쌍을 발생시키며, 이를 OPO 구성으로 공진시키면 신호-아이들러 모드의 양자 상관도(얽힘)를 갖는 압축 진공 상태를 지속적으로 발생시킬 수 있다.

2) 제어부: 선형 광학회로 및 광학 피드백

광자 기반의 양자 연산과 얽힘 생성은 제어부에 해당하는 선형 광학계로 구성된 회로망을 통해 이루어진다. 광학계의 기본 구성요소는 거울, 빔스플리터 등 선형 광학 소자들이다. 선형 광학계는 광자의 상태에 유니터리(Unitary) 변환을 수행하여 입력 광자 상태를 임의의 출력 상태로 변환시킬 수 있다. 이론적으로는 임의의 유니터리 연산도 충분히 많은 Mach-Zehnder 간섭계(MZI)들의 메시망으로 구현 가능하다는 것이 알려져 있다. MZI는 두 빔스플리터 사이에 위상 변이를 삽입한 구성으로, 출력 비율을 자유롭게 조절 가능한 광학 간섭계이다. 최근 프로그래머블 광집적회로에서는 수십 개 이상의 MZI를 전기신호를 이용해 제어하여, 하나의 칩에서 다양한 광학연산을 소프트웨어적으로 수행된다. 이러한 재구성가능(Reconfigurable) 광학회로는 양자컴퓨팅에서 요구되는 다양한 게이트 입력에 맞춰 회로를 변경하여 범용성을 높인다.

광자 기반의 양자 리소스 간 얽힘(Entanglement)은 주로 이 간섭과 측정의 결합으로 형성된다. 두 광자가 얽히게 하려면 광자 간 상호작용이 필요하여, 비선형(Non-Linear) 광학계가 요구된다. 하지만, 비선형 광학계의 비선형성의 효율이 낮고 이러한 문제점의 해결책으로 선형 간섭계와 극단적인 비선형성을 제공하는 측정을 결합한다. 간단한 예로, 두 개의 구별 불가능 단일광자를 빔스플리터에 동시 입력하면, 두 광자는 Hong-Ou-Mandel 양자간섭을 겪는다. 이때 두 출력에서 각각 한 개씩 광자가 나오는 경우만 선택하면 입력된 두 광자는 얽힌 벨 상태로 투영된다. 이러한 조건부 얽힘 생성 기법은 다수의 광자를 순차적으로 얽히게 하는 클러스터 상태 생성이나 원거리 양자통신의 얽힘 스와핑 등에 활용된다. 이러한 얽힘 생성 원리를 DV 방식에서는 후선택(Post-Selection)과 피드포워드를 통해 얽힘 성공 여부를 판별/보정하고, CV 방식의 측정 기반 연산에서는 클러스터 상태 위에서 각

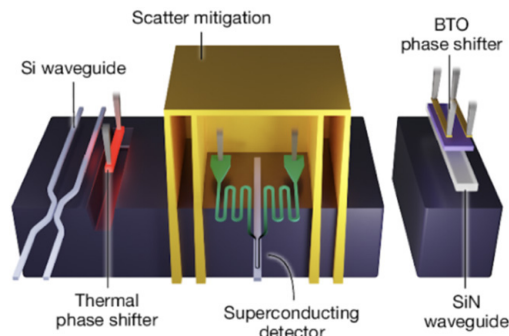
단계마다 측정 각도(위상)를 조절하여 원하는 게이트를 실현한다.

연산을 수행하는 제어부에는 광학계를 프로그래밍하는 광학 스위치와 위상 변조기 등의 능동 소자(Active Components)가 핵심이다. 광자 양자컴퓨팅의 비결정론성을 보완하기 위해 종종 다중화(Multiplexing) 전략이 사용된다. 예를 들어 여러 확률적 광원 중 한 곳에서 광자가 발생하면 이를 신속히 광학 스위치로 선택하여 계산에 투입하고, 실패한 채널은 사용하지 않는 방식이다. 이때 스위치는 나노초 이하의 빠른 광학 변조로 경로를 전환해야 하므로, 전기광학(Electro-Optic) 효과를 이용한 초고속 스위치가 요구된다. 자유광학계에서는 LiNbO_3 Pockels 셀이 이러한 역할을 했으나, 집적회로에서는 박막형 리튬나이오베이트(LNOI-LN on Insulator)이나 바륨 티타네이트(BTO, Barium Titanate) 같은 신소재를 실리콘 포토닉스 공정에 도입하여 온칩 고속 위상 변조기를 구현하는 연구도 최근 활발히 수행 중이다. 사이퀀텀(PsiQuantum) 팀은 최근 BTO 기반 위상 변조기를 300mm 웨이퍼 공정에 통합하여, 수십 나노초 이내에 광 신호 경로를 전환할 수 있는 초고속 스위칭 네트워크를 구현하였다. 이를 통해 비결정적 광자 생성 문제를 다중 채널 동시 사용으로 상쇄하여, 전반적인 연산 성공 확률을 높일 수 있음을 보였다.

초창기의 제어부는 광학 테이블 위에 거울과 렌즈를 배치하는 자유공간(Free-Space) 광학 방식이 주류였으나, 최근에는 위상 안정성과 복잡도를 극대화하기 위해 광자 소자들을 칩 위에 미세 가공하는 집적 광자 칩 기술이 대두되고 있다. Si, SiN 등의 반도체 공정을 이용하여 광도파로(Waveguide)를 나노미터 정밀도로 구현할 수 있다. 집적 칩의 장점은 소형화와 안정성, 그리고 반복 생산성이다. 최근 사이퀀텀(PsiQuantum)이 발표한 결과에서는 300mm 반도체 팹에서 제작된 완전 광자 칩 기술 스택을 선보였는데, 여기에 단일광자 발생, 파장 다중화, 위상 제어, 검출에 필요한 구성요소가 집적되어 있다.

또한, 측정 기반 양자컴퓨팅의 고속 피드포워드 제어를 위해서는 단일광자 검출기로부터 발생하는 신호의 고속 신호 증폭기, FPGA/ASIC와 같은 제어보드, 지터링(Jittering) 관리 및 타이밍 분배를 위한 고전 고속회로가 핵심적으로 요구된다.

〈그림 2.19〉 Thermal Phase Shift와 BTO 기반 위상 변조기와 저손실 SiN 포토닉스로 구성된 제어부 예시



PsiQuantum team (2025). "A manufacturable platform for photonic quantum computing", Nature, Vol. 641, pp. 876~883.

3) 측정부

측정부는 계산 결과를 읽고, 피드포워드를 통해 양자상태를 조작하는 역할을 수행한다. DV / CV 양자컴퓨팅 방식에서 사용되는 광원의 상태 특징에 따라 다음의 두 가지 측정방식이 존재한다.

가) 단일광자 검출기

DV 방식 양자컴퓨팅에서는 광자의 존재 여부(0 또는 1)를 판정하는 단일광자 검출기(SPD, Single-Photon Detector)가 사용된다. 현재 가장 우수한 성능을 지닌 SPD는 초전도 나노와이어 단광자 검출기(SNSPD)이다. SNSPD는 수 나노미터 폭의 초전도 나노와이어를 영하 2~3K 온도로 냉각하여 임계 전류 아래로 바이어스(Bias)한 장치다. 단일광자가 이 나노와이어에 흡수되면 국소적으로 초전도가 깨지면서 전기적 펄스가 발생되고 이를 읽어 광자를 측정하는 원리다. SNSPD의 단점은 극저온 냉각이 요구된다는 점인데, 상전도 임계온도가 더 높은 재료 개발이나 소형 냉동기 기술을 통해 실용화 장벽을 낮출 수 있는 가능성이 있다.

고품질 SPD 제작에 있어 요구되는 핵심 가치기술은 NbN 등의 초전도 박막 재료, InGaAs, Si 등의 반도체 다이오드 제작기술, SNSPD 제작을 위한 전자빔 리소그래피 공정이 있으며, 시스템을 패키징하는 과정에서는 검출 신호를 증폭/처리하는 고속 전자회로 통합도 중요하다.

나) 동조(Homodyne) 검출

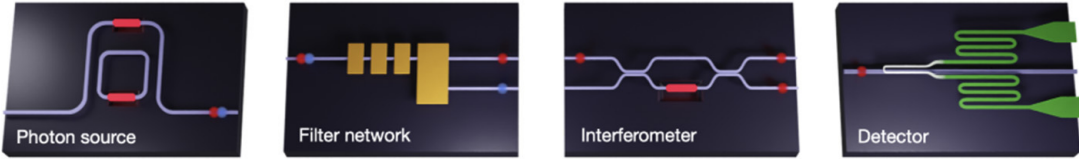
연속 변수 CV 양자컴퓨팅에서는 광자의 상태 분포 값을 읽는 동조 검출기가 사용된다. 많이 사용되는 균형 동조 검출기(Balanced Homodyne Detection)는 두 개의 포토다이오드로 구성되며, 측정 대상 신호광과 강한 로컬 레이저를 섞어 두 검출기에 보내면, 포토다이오드의 출력 전류 차이가 신호광의 직교 성분(예: X 또는 P 분포)에 비례하는 값을 리턴한다. 이를 통해 압축 상태의 잡음 분산이나 두 광 모드 사이의 상관도를 정밀 측정할 수 있다.

동조 검출은 일반적으로 MHz 대역에서 신호를 실시간으로 읽어내며, 전자 증폭기를 통해 출력된다. 광자 기반 양자컴퓨팅에서는 동조 검출로 얻은 연속 값을 디지털 처리 및 피드포워드함으로써 연산을 진행한다. CV 클러스터 상태 위에서 한 모드를 적절한 각도로 동조 측정하면, 그 측정값을 토대로 남은 모드에 선택한 게이트가 적용된다. 동조 검출에 사용되는 부품으로는 낮은 전자 잡음을 갖는 고속 포토다이오드, DC~GHz 대역 증폭기, 위상안정화된 레이저 소스 등이 있다.

나. 광자 기반 양자컴퓨터의 전망

광자 기반 양자컴퓨팅은 상온 동작, 낮은 디코히런스(Decoherence), 광 네트워크와의 호환성 등의 장점을 바탕으로 발전하고 있다. 특히 양자통신 분야와 결합하여 분산형 양자컴퓨팅이나 모듈러 양자컴퓨팅에 유리하다. 한편, 대규모 범용 양자컴퓨터로서는 풀어야 할 난제가 많다. 특히, 양자 오류정정을 위해 필요한 수백만 광자 큐비트를 효율적으로 생성·제어·검출하기 위한 소재·부품 기술 혁신이 요구된다. 순수한 단일광자원을 수만 개 이상 배열하고, 이를 초저손실 광회로로 연결하며, 고효율 초전도 검출기를 매 노드마다 장착된 시스템은 현 기술 수준으로는 어렵다. 집적 포토닉스와 반도체 공정의 발전으로 규모 확장성은 꾸준히 향상되고 있고, 개별 부품의 성능 역시 개선되고 있다.

〈그림 2.20〉 직접회로를 통해 구성되는 광자 기반 양자컴퓨팅의 시스템 구성부



PsiQuantum team (2025). "A manufacturable platform for photonic quantum computing", Nature, Vol. 641, pp. 876~883.

〈표 2.2〉 양자컴퓨터 플랫폼 특징, 연구방향, 성능 현황

| 플랫폼 | 특징 | 연구 방향 | 성능 현황 |
|------|--|---|---|
| 초전도 | <ul style="list-style-type: none"> - 빠른 게이트 속도 - 반도체 공정 호환성 - 극저온 인프라 필요 - 설계 자유도 | <ul style="list-style-type: none"> - 큐비트 성능 향상 - 모듈형 아키텍처 - 양자 오류정정 - 극저온 저전력 - 제어/측정 기술 | 큐비트 수: 1121 T1: 100 μ s~1ms 이상 T2: 100 μ s~1ms 이상 1-큐비트 게이트: 충실도 99.99%, 시간 5~30ns 2-큐비트 게이트: 충실도 99.9%, 시간 5~200ns |
| 중성원자 | <ul style="list-style-type: none"> - 높은 큐비트 확장성 - 다양한 큐비트 연결 관계 구현 - 레이저 성능과 직접적인 연관 - 레이저 기반 빠른 원자 광제어 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 단일 양자컴퓨팅 기반 최적화 문제 - 양자 오류정정 - 큐비트 성능 향상을 위한 레이저 제어기술 | 큐비트 수: 6100 T1: 100s 이상 T2: 10s 이상 1-큐비트 게이트: 충실도 99.98%, 시간 10~50 μ s 2-큐비트 게이트: 충실도 99.5%, 시간 0.1~1 μ s |
| 포획이온 | <ul style="list-style-type: none"> - 가장 간단한 형태의 큐비트를 제공 - 원자시계에 쓰일 만큼 높은 충실도 - 가한 쿨롱 힘에 의한 얽힘 구현의 용이함 | <ul style="list-style-type: none"> - 복잡한 장치의 자동화 및 신뢰도 향상 - 집적도의 제한을 극복하기 위한 모듈화 | Ion Q Forte는 30~36개 큐비트 Quantinuum H1은 32~56 큐비트 1큐비트 게이트 충실도 99.99% 2큐비트 게이트 충실도 99.9% |
| 광자 | <ul style="list-style-type: none"> - 측정 기반 양자컴퓨팅 - 공정라인인 인프라 필요 - 모듈형 아키텍처 | <ul style="list-style-type: none"> - 양자 오류정정 - 광집적회로 기반의 양자 논리 제어 - 저손실 제어/측정 기술 | 물리 큐비트 개수: 12/clock 단일 큐비트 SPAM 충실도: 99.9% 2-큐비트 게이트 충실도: 99% 광자 손실률: 14dB |

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

III

국내 양자기술 연구과제 및 정책지원 현황



III

국내 양자기술 연구과제 및 정책지원 현황

국내 연구기술 연구과제 및 정책지원 현황에 관한 내용을 정리한다. 양자기술의 선진화와 산업 육성을 위해 수행되었던 국가연구개발사업과 양자 산업 생태계 성숙을 위한 양자 기업 육성을 위해 최근 대전시에서 진행되고 있는 프로그램을 소개한다.

01 양자기술 국가연구개발사업

가. 개요

현재까지 국내 대학과 연구소의 양자기술 개발은 국가연구개발사업을 중심으로 이루어져 왔다. 본 보고서에서는 현재까지 추진된 국가연구개발사업을 통해 국내 양자 생태계가 어떻게 발전해 왔는지 검토해 보고자 한다. 이를 위해 한국연구재단의 원천기술개발사업 중 양자 과학기술 관련 주요 연구사업들을 중심으로 분석한다.

1) 양자컴퓨팅 기술개발사업

본 사업은 2019년부터 시작하여 2023년까지 총사업비 445억 원, 총 20개 계속 과제로 진행되어온 사업으로, 5큐비트급 양자컴퓨터 및 시뮬레이터 구현을 위한 하드웨어 기초적 핵심 기술 확보를 목표로 하였다. 또한 하드웨어 구현에 필요한 보조 소프트웨어 및 양자 알고리즘 응용 소프트웨어 개발도 포함되었다. 본 사업을 통해 5큐비트 수준의 이온포획, 실리콘 포토닉스, 원자 및 분자 등의 다양한 플랫폼에서 양자컴퓨팅 구현에 핵심적인 기술 연구가 수행되었다.

2) 양자컴퓨팅 연구 인프라 구축 사업

본 사업은 최근 유망한 플랫폼으로 기대되고 있는 초전도체 기반의 50큐비트 양자컴퓨팅 시스템을 개발 및 구축하여 연구 및 교육용으로 클라우드 서비스를 목표로 하는 사업이다. 2022년부터 2026년까지 약 5년간 총 490억 원이 지원되는 사업이다.

3) 양자컴퓨팅 기반 양자이득 도전 연구사업

본 사업은 2023년부터 2026년까지 약 4년간 총 275억 원 내외로 지원되는 사업으로, 산업, 국방, 공공 및 사회 분야에서 양자컴퓨팅 활용을 통해 혁신 창출 및 난제 해결이 가능한 현장 수요를 기반으로 이에 최적화된 양자 알고리즘과 소프트웨어를 적용하여 양자이득을 실증하는 것을 목표로 하고 있다. 산업적 파급효과가 큰 양자컴퓨팅 혁신 사례를 만듦으로써 국민 체감도를 높이고 국내외 양자 생태계 조성 및 시장을 선점하고자 하는 데 목적이 있는 사업이다. 현재 의료, 소재, 교통 등의 다양한 분야에서 제기되는 문제들을 해결하기 위해 다수의 기업들이 참여하고 있다.

4) 양자기술연구개발선도(양자컴퓨팅) 사업

본 사업은 2023년부터 2026년까지 약 4년간 총 498억 원 내외로 지원되는 사업으로, 양자컴퓨팅 분야의 핵심 기술 고도화 및 차세대 혁신기술 개발 등 선도연구를 통해 국내 기술 경쟁력을 강화하는 데 목적을 두고 있다. 구체적으로, 초전도 및 중성원자, 이온포획 등의 플랫폼에서 개발된 기존의 소규모 양자 프로세서를 대규모로 확장하기 위한 핵심 요소기술 개발을 지원하고, 이를 위한 양자 펌웨어 및 소프트웨어 자원 연구를 지원한다.

5) 소재 혁신 양자시뮬레이터 개발 사업

본 사업은 2023년부터 2027년까지 약 5년간 총 397억 원 내외로 지원되는 사업으로, 수소의 생산, 저장 및 활용 분야 또는 신소재 연구에 특화된 양자시뮬레이터 플랫폼을 개발하여 소재개발 기술 혁신 및 양자컴퓨팅 활용 범위를 늘리는 데 목적을 두고 있다. 현재 한국과학기술연구원(KIST), 한양대, 서울대, 한국과학기술원(KAIST)의 기관에서 양자광학 및 중성원자 기술을 이용하여 양자시뮬레이터 개발 및 활용 가능성 연구가 진행되고 있다.

6) 양자기술 국제협력 강화사업

본 사업은 2023년부터 2027년까지 약 5년간 지원되는 사업으로, 양자기술 선도국과의 전략적 국제협력을 통해 핵심 기술 및 역량을 빠르게 확보하여 우리나라 기술 경쟁력을 갖추는 것을 목표로 하고 있다. 2025년에 166.7억 원이 지원되었으며, 특히 “기술 분야별 국제공동연구실” 프로젝트로 해외 네트워킹 및 국내 애로기술 해결, 기술자문 등을 목적으로 해외 우수 기관과 공동연구실을 구축하여 운영하고 있다. 현재 한-미, 한-유럽 등 다양한 국가들과 진행 중이다.

7) 양자정보과학 연구개발생태계 조성사업

본 사업은 2020년부터 2025년까지 총 495억 원 내외로 지원되는 사업으로, 연구용 양자 소자를

손쉽게 확보하고, 양자컴퓨터를 미리 활용해 볼 수 있는 국내 연구 인프라를 확충하는 데 목적을 두고 있다. 구체적으로는 “양자 소자 제작 지원” 및 “양자 클라우드 서비스 활용 지원” 등의 내용을 추진해 왔다.

8) 양자정보과학 인적기반조성사업

본 사업은 2020년부터 시작되어, 양자 정보과학 분야에 우수인재들이 성장할 수 있도록 지원하는 사업이다. 구체적으로는 해외 우수 기관과의 협력을 통해 연구 주제를 발굴하는 “리더급 연구역량 강화”, 양자대학원 운영, 그리고 국내 박사후과정의 해외 연구 경험 및 교육 과정을 제공하는 “신진연구인력 양성” 등의 내용을 추진해 오고 있다. 특히 본 사업과 함께 고려대, KAIST, 포항공대 등에 양자대학원을 설치하여 양자 분야의 석박사 과정 연구인력을 적극적으로 양성하고 있다.

9) 양자공통기반기술개발사업

본 사업은 2024년부터 시작된 사업으로, 양자기술 연구와 산업화에 필수적인 소재, 부품 및 장비(‘양자 소부장’)의 개발 및 공급 역량을 내재화하여 국내 양자기술 기초 역량을 강화하는 데 목적이 있다. 특히 최근 국가 간 양자기술 수출 통제가 가속화됨에 따라 양자 소부장의 공급이 갈수록 불안정해지고 있어, 핵심 소부장에 대한 시제품 개발 및 기술 이전 등을 지원하고 있다.

10) 양자과학기술 글로벌파트너십 선도대학 지원 사업

본 사업은 국내 대학이 세계적 해외 대학과 기관 차원의 양자과학기술 협력 플랫폼을 구축하여 선도적 연구 프로젝트 기반 공동연구 및 정보교환, 인력교류 등 동반자적 협력을 추진하도록 지원하는 사업이다. 현재 사업 추진 중에 있다.

11) 퀀텀(양자)플랫폼 지원 사업

본 사업은 2025년부터 2029년까지 약 5년간 총 484억 원 내외로 지원되는 사업으로, 국내외 양자 과학기술 산·학·연 연구자들의 역량을 결집하여 개방형 양자 연구거점 및 지원 체계를 구축하는 사업이다. 현재 한국표준과학연구원(KRISS)과 KIST를 양자 연구거점으로 하여 타 정부출연연구기관(출연연)과 양자 공동연구실 추진 및 운영을 시작하였다.

12) 양자컴퓨팅 서비스 및 활용체계 구축 사업

본 사업은 2025년부터 2028년까지 약 4년간 총 497억 원 내외로 지원되는 사업으로, 양자컴퓨터 시스템 구축을 통해 국내 산·학·연 대상으로 양자컴퓨팅 서비스 지원 체계를 확립하는 것을 목표로

하고 있다. 현재 사업 추진 중에 있다.

13) 차세대 양자과학기술 핵심 기초원천연구 사업

본 사업은 양자컴퓨팅 소재 분야에서 기술 돌파 및 혁신이 가능한 차세대 신소재 연구개발을 지원하는 사업이다. 특히 최근 전 세계적으로 양자컴퓨팅 대안 소자로 여겨지는 위상 양자컴퓨팅 소자 개발을 지원하는 사업을 추진하고 있다.

14) 양자과학기술 플래그십 프로젝트(양자컴퓨팅)

본 사업은 국내 양자과학기술 추격 가속화 및 미래 글로벌 선도를 목적으로 8년 내 가시적 성과창출이 가능한 임무지향형 전략 사업이다. 특히 초전도와 중성원자 플랫폼을 중심으로 1,000큐비트급의 확장 가능한 고신뢰도 양자컴퓨팅 핵심 요소기술 및 전체 시스템을 통합 개발하는 것을 목표로 한다. 2025년 10월부터 연구가 개시될 예정이다.

15) 개방형양자공정인프라구축사업

본 사업은 2024년부터 8년간 234억 원 규모로 투입하여 KAIST 주관으로 국내 최대 규모의 첨단 양자 팹 건립과 양자 인프라 시설 장비 구축을 추진한다. 초전도 및 반도체 스핀 등 다양한 플랫폼에서 요구되는 양자 소자 팹의 특성이 기존의 반도체 팹과 매우 다르기 때문에, 양자 전용 공정 시설에 대한 수요 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

16) 양자과학기술 글로벌파트너십 선도대학 지원사업

본 사업은 2025년부터 2029년까지 총 448억 원 수준으로 국내 대학이 양자기술의 세계적 수준을 갖춘 해외 대학과 기관 차원의 양자과학기술 협력 플랫폼을 구축하여 공동연구 및 인력교류 등의 협력을 추진하는 사업이다. 최근 KAIST 및 POSTECH에서 사업을 시작하였다.

나. 정리

지난 6년간 진행된 연구개발사업을 종합하면, 국내 양자 생태계의 활성화를 위해 다양한 형태의 연구과제가 추진되어 왔음을 확인할 수 있다. 양자 하드웨어 분야에서는 초기에는 소수 큐비트 기반의 기초 양자기술 개발에 초점을 맞춘 연구과제가 주를 이루었다. 그러나 최근에는 국가 간 양자기술 수출 규제 등의 이슈로 인해, 양자기술의 국내 내재화 필요성이 부각되고 있다. 이에 따라 한국연구재단의 양자과학기술플래그십프로젝트를 중심으로, 대규모 양자컴퓨팅 시스템 구현을 통한 기술 고도화와

글로벌 선도를 목표로 하는 연구가 추진되고 있다. 이와 함께 양자 공통 기반 기술사업을 통하여 양자 소부장 기술 확보도 고려되고 있다. 한편, 양자 알고리즘과 같은 소프트웨어 분야의 연구과제도 꾸준히 지원되어 왔으며, 특히 국내 기업 주도의 실용적 문제 해결 중심 연구를 통해 산업 생태계 확산을 도모하는 시도도 있었다. 아울러, 국내 양자기술 인프라의 신속한 구축을 위해 해외 우수 연구기관 및 국내 출연연과의 협력 강화가 적극적으로 추진되었다.

02 양자컴퓨팅 양자전환(QX) 스케일업 밸리 육성지원사업

가. 개요

국가 연구개발사업을 통해 국내 양자기술의 전반적인 수준을 높이며 생태계의 활성화를 위해 다양한 연구과제가 추진되어 왔다. 본 장에서는 양자 산업 육성을 위한 대전시의 프로그램을 소개한다.

1) 양자전환 애로기술 해결 및 사업화 촉진

본 사업은 양자전환을 희망하는 기업이 겪는 소재·부품·장비 관련 기술적 난제를 KRISS 등 관련 전문가 지원과 시험·분석·장비 활용 비용 지원으로 해소할 수 있도록 설계되어 있다. 주요 지원 유형은 기술자문·기술개발·기술교육 등 전문가 지원과, 애로기술과 직접 연관된 시험·분석·장비 활용 항목이다. 사업목적은 양자컴퓨팅 적용을 위한 개발 과정에서의 장비 활용 문제와 인재 확보 문제를 해결하는 데에 기여하는 것에 있다. 지원대상은 양자컴퓨터 하드웨어·소프트웨어 구성요소를 개발하고자 하는 양자전환 기업이다.

2) Q-FAB·Q-LAB 연계활용 지원

본 사업은 Q-FAB(성균관대·KAIST·울산과학기술원(UNIST) 등)과 Q-LAB(Joint Quantum Laboratory 등) 인프라를 기업 현장에 연결해 장비·공간 사용, 재료 활용 비용과 공정·시험 관련 교육비를 지원한다. 목적상 인프라 활용과 인력 양성의 병목을 완화하는 데 초점이 맞춰져 있다.

3) QX 사업 운영 및 기술 스케일업 프로그램

본 프로그램은 스케일업 밸리 육성사업 관리로 효율적 사업 운영과 성과 도출을 목표로 하며, 밸리 구축 및 활성화를 도모한다. 기업 입주 유치·관리와 연계 인프라(대전테크노파크(TP) 내 저렴한 임대·시험·인증 시설 활용 등)를 제공하고, 밸리 및 입주 기업 홍보(영상·팸플릿, 대외 기사)를 지원한다.

4) 양자전환 비즈니스 모델 개발

본 사업은 양자컴퓨터용 소부장 기술 제품의 비즈니스 모델 개발과 사업계획 컨설팅을 통해 선제적 시장 진출과 시장 장악력 확보를 도모한다.

5) 퀀텀 전시회 참여 지원

본 사업은 퀀텀코리아 및 해외 전시회를 공동부스 형태로 지원하며, 부스임차료·장치비·운송비와 기업·전시 물품 소개 팸플릿 제작을 포함한다. 항공료·체재비 등은 기업 부담으로 명시된다. 해외 전시 예시는 IEEE Quantum Week, SPIE Quantum West Expo, Quantum World Congress 등이다. 추진은 기업모집·참가 준비·국내·국외 전시 참가의 로드맵에 따라 진행된다.

6) KRISS 주관 양자전환 핵심전략 기술 개발(지정 공모)

본 사업은 반도체·통신·광학 등 국내 강점 기술을 양자컴퓨팅에 활용 가능한 수준으로 전환(QX)하여 핵심 전략기술 확보와 상용화를 도모하는 것을 목적으로 한다. 지정 공모로 수요기술을 선별해 세부과제를 구성하며, KRISS 주관 공동연구 형태로 추진된다. (주)위드웨이브, (주)SDT, (주)케이에이취엔지니어링 3개사가 선정되었고 기업당 총 14억 원의 사업비가 지원되고 있다.

7) 양자전환 일반생산 기술 개발(자율 공모)

본 사업은 기존 산업기술을 양자컴퓨팅 적용 수준으로 올려 일반 생산기술 확보와 상용화를 도모하는 것이 목적이다. 지원대상은 양자컴퓨터 H/W·S/W 구성요소를 개발하고자 하는 양자전환 기업으로 표기된다. 선정과제로 신약 후보 물성 최적화 SW·플랫폼, NbTi 합금 캡릴러형 세미리지드 케이블 국산화, 다중 미세전극 포획이온용 펄스초 레이저 머시닝 등이 포함되어 있다. (주)큐노바, (주)케이에이티메탈, (주)21세기 기업이 선정되었고 기업당 총 3억 원의 사업비가 지원되고 있다.

8) 블루포인트파트너스 퀀텀 창업 지원

본 사업은 양자컴퓨팅 및 관련 기술 기반 창업 활성화를 목적으로, 예비창업자의 초기 안정과 성장을 지원하는 프로그램이다. 대상은 법인설립 예정의 예비창업자이며, 사업계획·자금조달 전략·법률·노무 등 공통 강의(AC형)와 법인설립 시 사업성 검토에 따른 초기투자 집행, 팀스(TIPS) 또는 딥테크(Deep Tech) 추천 기회를 제공한다.

9) 블루포인트파트너스 퀀텀 투자 발굴·유치 지원

본 사업은 양자전환 스케일업을 통해 사업 다각화를 추진하는 기업을 대상으로 투자검토 연계와

네트워킹을 지원한다. 비즈니스 모델·마케팅 전략·사업소개 중심의 네트워킹 지원이 핵심이다. 지원대상은 '퀀텀점프' 참여기업 우선 및 협의체 회원으로 정리되어 있고, 예산은 프로그램 내 지원으로 기재된다.

10) 블루포인트파트너스 비즈니스 스케일업 워크숍

본 프로그램은 연 1회 비즈니스 워크숍을 추진해 비즈니스 중심 최신 동향·전략, 마케팅, 네트워킹을 제공한다. 지원대상과 예산은 프로그램 내 지원으로 운영되며, 타 사업 일정에 따라 변동 가능성을 명시하고 있다. 추진은 워크숍 개최 중심의 연간 로드맵으로 서술된다.

11) 블루포인트파트너스 퀀텀 전략 고도화(IP) 프로그램

본 프로그램은 양자전환에 필요한 전략을 제공하여 '비즈니스가 가능한 특허 및 실시권' 창출을 지원하는 사업이다. 대상은 '퀀텀점프' 프로그램 참여기업이며, 기업 인터뷰 기반 IP 이슈 진단, 기술포지션 매칭, 사업화 지향 IP 전략 수립을 제공한다. 필요기업에는 심사청구용 특허서류 준비와 출원비 일부 보조, AI 기반 특허 검색·분석 시스템 크레딧을 제공한다.

12) 블루포인트파트너스 비즈니스 멘토링

본 프로그램은 투자심사역과의 1:1 멘토링을 통해 IR 준비도 점검과 필요 지원사항을 파악하고, IR 전략·스토리라인·발표 스킬 가이드 및 필요기업 대상 IR 디자인 지원을 제공한다. 투자유치가 필요한 기업에는 VC 미팅 추천, 참여기업 현황에 따른 IR 데모데이 추진, 비즈니스에 필요한 전문가 연계를 지원한다. 또한 투자자와의 구체적 협상 또는 계약 협의 단계에서 필요한 멘토링을 제공한다.

13) 대전테크노파크 기술상용화 지원

본 사업은 양자전환 기업 및 스타트업의 기술 상용화를 통해 양자 산업 생태계 육성과 성장 기반 조성을 목표로 한다. 세부내용은 상용화 시제품 제작, 시험·인증, 디자인 개발, 마케팅 비용 지원으로 구성되며, 예산과 연차별 건수는 문서 내에 제시되어 있다.

14) 대전테크노파크 대전 양자소통 지원

본 사업은 반도체·통신·광학 등 소부장·ICT 기업과 기존 양자 기업·학계·연구계 전문가가 참여하는 '양자전환 산업협의체(QTI-C)'를 구성·운영해 인적·기술·비즈니스 네트워크를 구축하는 것을 목적으로 한다. 대상은 양자전환 희망 기업 또는 기전환 기업, 유관기관 등으로 표기된다. 세부내용으로는 산·학·연 보유 양자 특허기술의 기업 이전 비용과 양자컴퓨팅·양자통신·연구·개발시설 사용 비용을 지원한다.

15) 이노폴리스벤처협회 협의체 운영 지원(QTI-C)

본 사업은 양자전환 산업협의체 운영을 통해 분과별 소그룹과 외부 자문그룹을 구성하고, 정기·수시 교류회와 딥테크 세미나로 협력 네트워크를 구축하는 사업이다. 목적은 양자 산업 생태계 촉진과 저변 확산이며, 관련 활동은 포럼 운영 등을 포함한다. 예산·연차 추진 일정은 문서에 제시되어 있다.

16) 이노폴리스벤처협회 Q-온라인 플랫폼 구축

본 사업은 양자 산업 관련 기술·기업·정책 동향과 기술 트리를 온라인화하고, 국내 생태계 현황 및 세계 동향을 제공하는 정보 시스템과 QX 지원사업 공고·신청 기능을 갖춘 플랫폼을 개발·서비스한다.

17) 이노폴리스벤처협회 국제협력 및 글로벌 공급망 편입 지원

본 프로그램은 수요기업을 대상으로 해외 퀀텀 밸리와 협력 및 워킹그룹 참여를 지원하고, 국가별 퀀텀 기업 방문, 공동 프로젝트·공동 마케팅, 수출 판로 개척 등 네트워크 활동을 지원한다.

18) 이노폴리스벤처협회 퀀텀 청년 인턴십

본 프로그램은 전문인력 채용에 대한 인건비를 지원하는 프로그램으로, 양자전환 수요기업 대상 전문인력 파견을 통해 우수 인재 확보와 기업 미래 경쟁력 강화를 지원하는 사업이다.

19) 이노폴리스벤처협회 양자전환 기술 트리(QX) 개발

본 사업은 초전도·포획이온·포토닉·중성원자 분과 등으로 기술·기업·전문가·제작 DB 정보를 3D 트리(마인드맵) 구조로 제작·제공해 기업의 양자전환 접근을 용이하게 하는 사업이다. 완성된 트리는 2026년 구축 예정의 Q-플랫폼을 통해 열람 가능하도록 한다. 연간 추진 일정은 분과위원회 운영과 트리 개발 단계로 구성된다.

나. 정리

양자 스타트업과 기업이 성장할 수 있는 여러 프로그램이 진행되고 있는 중이다. 기술 컨설팅부터 비즈니스 멘토링 등이 수행되며, 기관에서 요구되는 특정 기술에 대해서는 지정 공모 형태로 연구개발 또한 진행되었다.

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

IV

양자기술 소재·부품·장비 가치사슬 및 국산화 전략



IV

양자기술 소재·부품·장비 가치사슬
및 국산화 전략

01 양자기술 소재·부품·장비 국산화 필요성

한국의 양자기술은 초전도 양자 소자, 포획이온, 중성원자, 광자 등 주요 플랫폼 전반에서 학계와 출연연 중심의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 일부 분야에서는 세계적인 수준의 성과가 나타나고 있다. 그러나 이러한 연구개발의 성과가 산업화로 이어지는 기술 전환 체계는 아직 미흡하다. 대부분의 연구는 기초·선행연구 단계에 머물러 있으며, 실질적인 제품화와 공급망 구축은 초기 수준이다. 현재 국내 양자기술 발전의 큰 병목 중 하나는 핵심 소재·부품·장비(소부장)의 높은 해외 의존도이다. 극저온 냉동기, 저잡음 증폭기, RF 제어 장비, 정밀 레이저 및 광학 모듈 등 고부가 소부장 대부분이 유럽·북미 기업(블루포스, 취리히 인스트루먼트, 키사이트, 토르랩, 미니서킷(Mini-Circuits) 등)에 의해 독점되고 있다. 이로 인해 연구 일정은 해외 공급망에 종속되고, 유지 보수 비용은 증가하며, 전략물자 통제 강화 시 연구와 산업이 동시에 정체될 위험을 안고 있다.

이 문제는 지속적인 외화 유출뿐만 아니라 산업 경쟁력과 기술안보의 문제로 인식되어야 한다. 이미 미국·유럽은 양자컴퓨터, 극저온 냉동기, 극저온 측정 장비 등을 전략물자 리스트에 포함시키고 있으며, 향후 수출 통제는 더욱 강화될 가능성이 높다. 따라서 한국은 주요 장비의 국산화 및 공급망 자립화를 국가전략 차원에서 추진해야 한다.

한편, 양자 산업의 시장은 아직 초기 단계로, “규모의 경쟁”이 아닌 “기술의 신뢰성과 깊이”가 중심이 되는 과도기적 구조를 보인다. 이 시점은 한국이 특정 분야에서 기술적 우위를 확보할 수 있는 전략적 진입 기회이기도 하다. 특히 RF 제어 전자장비, 반도체 공정, 냉동·진공 기술, 광학·레이저 분야는 기존 산업 기반을 활용할 수 있어, 관심을 가지고 집중적으로 투자한다면 단기간에 기술개발이 가능할 것으로 판단된다. 국내 중소·중견기업이 이러한 공통 소부장 영역에 참여하면, 연구 현장의 효율성을 높이고 장기적으로 자립적 산업 생태계를 형성할 수 있을 것이다.

02 양자기술 가치사슬

현재까지는 특정 양자 플랫폼이 양자컴퓨팅 구현에서 뚜렷한 우위를 보이고 있지 않으며, 초전도 양자 소자, 포획이온, 중성원자, 광자, 반도체 양자점, NV(Nitrogen Vacuum) 다이아몬드 등 다양한 물리계가 병렬적으로 연구되고 있다. 이들 플랫폼은 구현 방식과 제어 원리가 서로 다르지만, 그 기저를 살펴보면 냉각·진공·광학·전자제어 등 핵심 기술 인프라에서는 유사한 소재·부품·장비가 활용된다. 따라서 특정 플랫폼을 위해 개발된 소부장은 다른 플랫폼의 연구와 산업 생태계에도 파급효과를 미칠 수 있다.

가. 냉각 및 진공 기술

초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트는 극저온 환경(10mK 수준)에서 동작하며, 포획이온과 중성원자 시스템은 초고진공(10^{-9} torr 이하) 조건이 필수적이다. 희석냉동기, 진공챔버, 저온차폐 시스템은 서로 다른 온도 범위에서 작동하지만, 모두 열·진공 제어라는 공통 원리를 기반으로 한다. 따라서 냉동기·펌프·실(Seal)·피드스루·차폐소재 등의 국산화는 모든 양자 플랫폼의 기반을 강화하는 효과를 가진다.

나. 광학 및 레이저 기술

레이저는 포획이온, 중성원자, 광자, NV 센터 등 거의 모든 양자 플랫폼의 핵심이다. 포획이온은 레이저 냉각과 상태 조작에 다양한 파장(355nm, 729nm 등)을 사용하며, 중성원자 시스템은 다채널 광학 트위저 제어를 위해 고안정 CW 레이저를 필요로 한다. 광자 기반 시스템은 광집적회로와 위상 안정화를 위해 정밀 광학계가 요구되며, NV 다이아몬드는 형광 검출을 위해 고출력 안정 레이저가 필수다. 즉, 파장·출력·안정성은 다르지만 광학부품(렌즈, 필터, 결합기)과 정밀 광기계(마운트, 포지셔너, 광섬유 어레이)는 산업적으로 공통 영역을 형성한다.

다. 전자제어 및 신호 처리 기술

모든 플랫폼은 정밀 전자제어를 필요로 한다. 초전도체는 GHz 대역의 마이크로파 펄스로 제어되고, 포획이온·중성원자는 MHz~GHz 대역 RF 신호로 전기장을 조정한다. 이에 따라 임의파형 발생기(AWG), 저잡음 증폭기, PLL, DAC/ADC, Cryo-Compatible 케이블 등 고주파 전자계통이 필수적이다. 특히 저온 환경에서의 RF 신호 전달 기술은 초전도체에 국한되지 않고, 포획이온 전극 구동 및 광자

칩의 전기광학 변조에도 활용된다.

라. 기판 및 공정 기술

플랫폼별 차이는 있으나, 기판·박막·패터닝 기술은 거의 동일한 공정 체계를 공유한다. 초전도 양자 소자는 고순도 실리콘 또는 사파이어 기판 위에 알루미늄·니오븀을 증착한 후 포토 리소그래피와 전자빔 리소그래피를 하고, 광자 시스템은 실리콘 나이트라이드(Si_3N_4), 리튬나이오베이트(LiNbO_3) 등을 사용한다. 포획이온의 마이크로 전극 칩 또한 금속 증착과 포토 리소그래피로 제작되므로 반도체 제조 인프라와 긴밀히 연결된다. 결국 기판·막질·공정장비의 기술 축적은 플랫폼 간 경계를 허무는 공통 산업 기반이라 할 수 있다.

이처럼 냉각·광학·전자·공정의 4대 축은 모든 양자 플랫폼의 산업 생태계를 관통하며, 공통 소부장의 국산화는 곧 전체 양자 산업 경쟁력의 핵심 기반을 의미한다. 아래의 표와 그림은 각 구현 방식별 핵심 기술 요소와 이를 구성하는 소재·부품·장비의 대표적인 기업들 그리고 기술 간의 가치사슬을 정리하여 보여준다. 해당 자료는 과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼(2025)이 발간한 2024년 양자 정보기술 백서 II의 자료를 바탕으로 재구성하였음을 밝힌다.

〈표 4.1〉 초전도 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트

(가나다 순)

| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|--------------------|--|
| 소재 | 고비저항 실리콘, 사파이어 웨이퍼 | (주)비엠아이티 크라이스코어(Cryscore), 실리콘밸리 마이크로일렉트로닉스(Silicon Valley Microelectronics), 웨이퍼마켓, 웨이퍼코리아, 유니버시티 웨이퍼(University Wafer), 태원과학 |
| | 초전도 타깃 | 레스커(Lesker), 스탠포드 어드밴스드 머티리얼즈(Stanford Advanced Materials), 태원과학 |
| | 저손실 PCB 기판 | 로저스 코퍼레이션(Rogers Corporation) |
| | 헬륨, 액체 질소 | 그린산업가스, 에어리퀴드코리아 |
| | 뮤메탈, 전파 흡수재 | 레이어드(Laird), 뮤실드(muShield), 블루포스, 아뮤니얼(Amuneal), 코앰테크, 쿼텀 마이크로웨이브(Quantum Microwave) |
| 부품 | R 커넥터 | 미니서킷, 앰프놀(Amphenol) RF, 위드웨이브(Withwave), 후버수너(Huber+Suhner) |
| | 저온용 동축 케이블 | 델프트 서킷(Delft Circuits), 블루포스, 코엑스(Coax) Co., 쿼텀 코엑스(Quantum Coax), 크라이오코엑스(CryoCoax), 키콤(Keycom) |
| | 아이솔레이터, 서큘레이터 | 나르다 마이테크(Narda-MITEQ), 로우 노이즈 팩토리(Low Noise Factory), 퀸스타(Quinstar), 파스터넥(Pasternack) |
| | IR/RF 필터 | 미니서킷, 블루포스, 쿼텀 마이크로웨이브, K&L 마이크로웨이브(Microwave) |

| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|-----------------------|--|
| | 상온 RF 소자 | 미니서킷, 위드웨이브, 쿼텀 마이크로웨이브, 키사이트 |
| | 저온 저잡음 증폭기(HEMT) | 나르다 마이테크, 로우 노이즈 팩토리, 미니서킷, 셀레스티아(CELESTIA) TTi, 위드웨이브, 코즈믹 마이크로웨이브 테크놀로지(Cosmic Microwave Technology), 쿼텀 마이크로웨이브 |
| | 양자 한계 증폭기 (JPA, TWPA) | 블루포스, 사일런트 웨이브스(Silent Waves), 콰트웨어(Quantware), BBN, VTT |
| 장비 | 4K 맥동관 냉동기, 희석식 냉동기 | 레이던 크라이오제닉스(Leiden Cryogenics), 메이벨 쿼텀(Maybell Quantum), 블루포스, 옥스퍼드 인스트루먼트(Oxford Instruments), 제로 포인트 크라이오제닉스(Zero Point Cryogenics), 크라이오콘셉트(CryoConcept), 키누(Qinu), 폼팩터(FormFactor) |
| | 고주파 신호발생기 | 로데 슈바르츠(Rohde & Schwarz), 시그널코어(SignalCore), 아나피코(AnaPico), 키사이트 |
| | 마이크로파 제어·분석 시스템 | SDT Inc., 취리히 인스트루먼트, 쿼텀 머신즈, 큐블록스, 키사이트, 타보 일레트로닉스(Tabor Electronics), 텍트로닉스(Tektronix) |
| | 극저온 프로브 시스템 | 블루포스, 폼팩터 |
| | 증착기 | 옹스트롬 엔지니어링(Angstrom Engineering), 코리아바쿰테크, 플라스시스(Plassys) |
| | 전자빔 리소그래피 시스템 | ELIONIX, JEOL, RAITH |

〈표 4.2〉 중성원자 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트

(가나다 순)

| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|------------------|---|
| 소재 | 원자 | 시그마 알드리치(Sigma-Aldrich), 알파바쿠오, (주)하나로티알, SAES 게터스(Getters) |
| | 진공 원자셀 | 재팬셀, 콜드퀀타(ColdQuanta), 토르랩, 프리시전 글래스블로잉 |
| 부품 | 광섬유 | 코스털 커넥션스(Coastal Connections), 토르랩, 파이버피아, OZ 옵틱스(Optics) |
| | 터보 펌프 | 배리언, 파이퍼 배큘(Pfeiffer Vacuum) |
| | 이온 펌프 | 감마 배큘(Gamma Vacuum), (주)알파이브이에스, 애질런트(Agilent) |
| | 게터 펌프 | 감마 배큘, 애질런트, 이베리카 배큘(Iberica Vacuum), SAES 게터스 |
| | EMCCD, sCMOS 카메라 | 안도르(Andor), 하마마츠 |
| | 액정소자 | 메도라크(Meadowlark) |
| | 페브리 페로 공진기 | 스테이블 레이저 시스템즈(Stable laser systems), 토르랩 |
| | 위상 고정 서보 | 토피카 포토닉스 |
| | 음향 광학 변조기 | 구치 앤드 하우스고, 에이에이 옵토일렉트로닉, 인트라액션(IntraAction) |
| | 전기 광학 변조기 | 뉴포커스, 예넵틱(Jenoptik), 퀴빅(Qubig), 토르랩, AdvR, EO 스페이스(Space) |

| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|-----------------------------|--|
| | 광학부품 | 뉴포트, 에드먼드 옵틱스(Edmund Optics), 토르랩, OZ 옵틱스 |
| | 정밀 이미징 광학계 | 미쓰도요, 스페셜 옵틱스 |
| | 주파수 안정화 서보 | 뉴포트, 모그랩스, 베센트(Vescent) |
| 장비 | 다이오드 레이저 | 모그랩스, 자허 레이저테크닉(Sacher Lasertechnik), 톱티카 |
| | 고출력 레이저 | 라이트하우스 포토닉스(Lighthouse Photonics), 벅슬룸(Vexlum), 코히런트(Coherent), 프리시레이저스(Precilasers) |
| | 미세선폭 레이저 | OE웨이브스(Waves), 멘로 시스템즈(Menlo systems), 스테이블 레이저 시스템즈(Stable Laser Systems), 코히런트 |
| | 광주파수 빔 (Frequency combs) | 멘로 시스템즈, 톱티카 |
| | 레이저 주파수 분석기 | 브리스틀 인스트루먼트(Bristol Instruments), 토르랩, 하이피네스(HighFinesse), OE웨이브스 |
| | 전류 공급 장치 | 카엔(CAEN) ELS, 키사이트, SDT |
| | 디지털/아날로그 입출력 장치 | 내셔널 인스트루먼트(National Instrument), 쉐던 머신즈, M-Labs |

〈표 4.3.〉 포획이온 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트

(가나다 순)

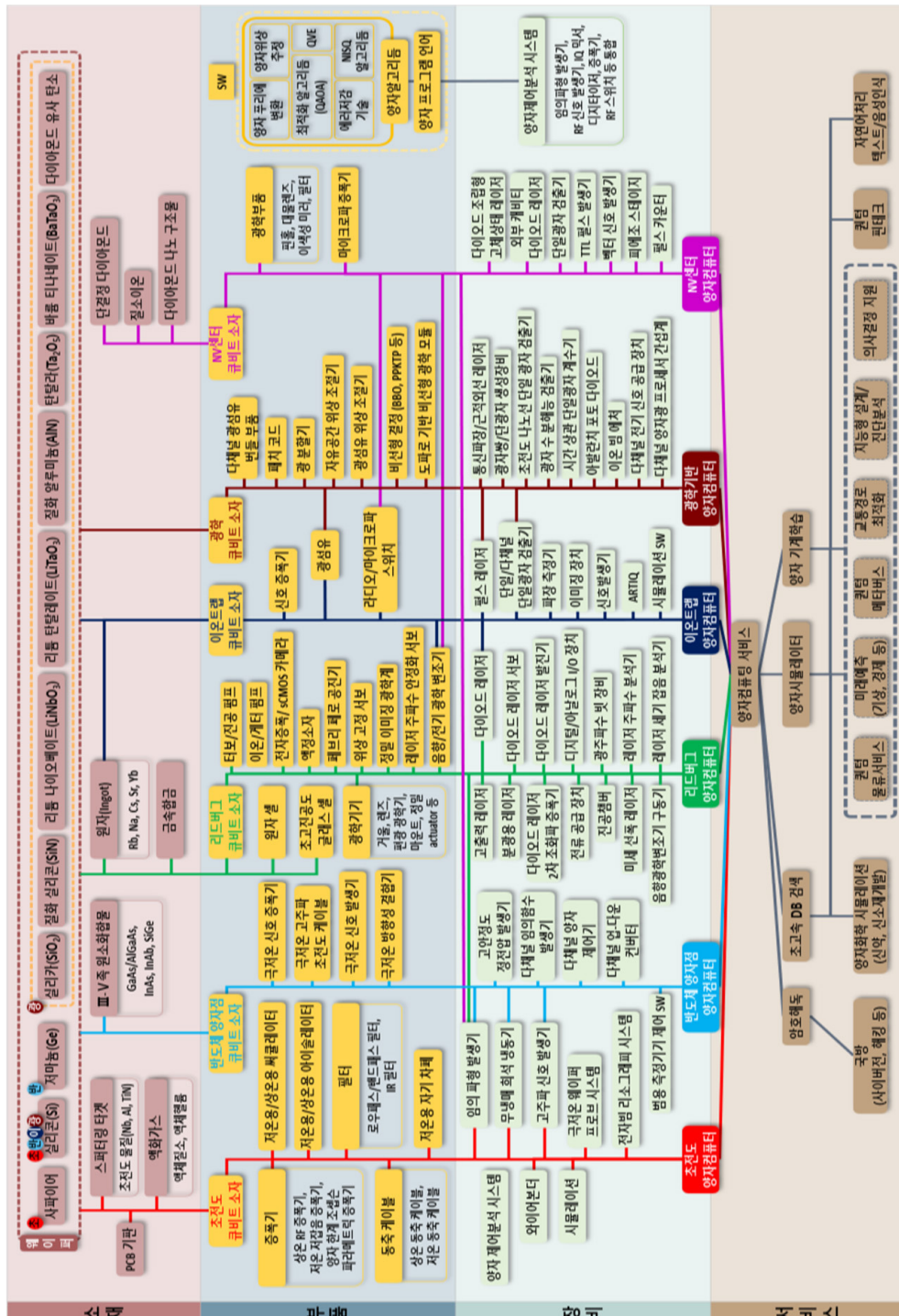
| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|-------------------|--|
| 소재 | 원자 | 시그마 알드리치, 알파바쿠오, (주)하나로티알, SAES |
| | 실리콘 웨이퍼, 유리 웨이퍼 | 실리콘밸리 마이크로일렉트로닉스, (주)비엠아이티, 웨이퍼마켓, 웨이퍼코리아, 유니버시티 웨이퍼, 크라이스코어, 태원과학 |
| 부품 | 광섬유 | 코스텔 커넥션스, 토르랩, 파이버피아, OZ 옵틱스 |
| | 광학부품 | 뉴포트, 에드먼드 옵틱스, 토르랩, OZ 옵틱스 |
| | 음향 광학 변조기 | 구치 앤드 하우스고, 에이에이 옴토일렉트로닉, 인트라액션 |
| | 전기 광학 변조기 | 뉴 포커스(New Focus), 예눔텍, 퀴빅(Qubig), 토르랩, AdvR, EO스페이스 |
| | 마이크로파 스위치, 신호 증폭기 | 미니서킷, 아날로그 디바이스(Analog Devices), 아메리칸 마이크로웨이브 코퍼레이션(American Microwave Corporation) |
| 장비 | 다이오드 레이저 | 모그랩스, 톱티카 포토닉스 |
| | 펄스 레이저 | 코히런트 |
| | 레이저 주파수 분석기 | OE웨이브스, 브리스틀 인스트루먼트, 토르랩, 하이피네스 |
| | 단일광자 검출기 | 싱글 쿼텀(Single Quantum), 엑셀리타스(Excelitas), 우리로, 쿼텀 오푸스(Quantum Opus), 픽셀 포토닉스(Pixel Photonics), 하마마츠, IDQ, Scontel, QC82 |
| | 증착기 | 옹스트롬 엔지니어링(Angstrom Engineering), 코리아바쿰테크, 플라시스 |
| | 전자빔 리소그래피 시스템 | ELIONIX, JEOL, RAITH |

〈표 4.4〉 광자 양자컴퓨터 소재·부품·장비 대표적인 공급 기업 리스트

(가나다 순)

| 구 분 | 세부사항 | 대표 공급처 (공급 기업) |
|-----|--|--|
| 소재 | 실리콘(Si), 실리카(SiO ₂), 질화 실리콘(SiN) | 로그 밸리 마이크로디바이스(Rogue Valley Microdevices), 실리콘밸리 마이크로일렉트로닉스, 유니버시티 웨이퍼 |
| | 리튬 나이오베이트 (LiNbO ₃), 리튬 탄탈레이트 (LiTaO ₃) | 룩스텔리전스(Luxtelligence), 하이퍼라이트(Hyperlight), CSEM, INNOSEMI, NanoLN, NGK Insulators LTD, SiPhotonIC |
| | 질화 알루미늄(AlN) | AMS |
| | 탄탈라(Ta ₂ O ₅) | 옥타브 포토닉스(Octave Photonics), 파이버나인 옵틱스(FiveNine Optics) |
| 부품 | 광섬유 | 코스텔 커넥션스, 토르랩, 파이버피아, OZ 옵틱스 |
| | 다채널 광섬유 번들 | 메이수 옵틱스(Meisu Optics), 뱅가드 포토닉스(Vanguard Photonics), OZ 옵틱스, PHIX 포토닉스 어셈블리(Photonics Assembly) |
| | 광학부품 | 뉴포트, 에드먼드 옵틱스, 토르랩, OZ 옵틱스 |
| | 비선형 결정 | 라이콜(Raicol), FOCtek 포토닉스(Photonics) |
| | 도파로 기반 비선형 광학 모듈 | 코베션(Covesion), NTT 이노베이트 디바이스(Innovate Devices) |
| | 광소자 패키징 | PHIX 포토닉스 어셈블리, SmarAct |
| 장비 | 통신파장 레이저 | 산텍(Santec), 톱티카, NKT 포토닉스 |
| | 근적외선 레이저 | 모그랩스, 스펙트라 피직스(Spectra Physicss), 코히런트, 톱티카 |
| | 양자점 기반 단일광자 광원 | 스패로 쿼텀(Sparrow Quantum), 관델라(Quandela) |
| | 단일광자 검출기 | 스콘텔(Scontel), 싱글 쿼텀, 엑셀리타스, 우리로, 쿼텀 오푸스, 픽셀 포토닉스, 하마마츠, IDQ, QC82 |
| | 시간 상관 단일광자 계수기 | 리퀴드 인스트루먼트(Liquid Instrument), 슈바벤 인스트루먼트(Swabian Instruments), quTAG, |
| | 프로그래머블 간섭계 | 퀵스 쿼텀(Quix Quantum), IPRONICS |
| | 다채널 전기 신호 공급 장치 | Nicslab, SDT |
| | 전자빔 리소그래피 시스템 | ELIONIX, JEOL, RAITH |

〈그림 4.1.〉 양자컴퓨터 생태계 가치사슬



03 국산화 전략

국내 양자컴퓨팅 시장을 보면, 다수의 기업과 스타트업이 응용 알고리즘, 미들웨어, 클라우드 API 연계 등 소프트웨어 영역에 역량을 집중하고 있다. 이는 당장의 진입장벽이 상대적으로 낮고, 글로벌 하드웨어 리소스를 활용해 빠르게 실증사례를 축적할 수 있다는 점에서 분명히 중요하다. 다만 우리 경제의 비교우위는 전통적으로 제조업, 특히 정밀장비·소재·부품 분야에 뿌리를 두고 있으며, 이러한 기반을 양자 소부장으로 확장하지 못하면 중장기적으로 산업 주도권 확보가 어려워진다. 해외 장비 의존이 지속되는 한 연구 속도는 납기·서비스·호환성에 제약을 받고, 전략물자 통제 강화 국면에서 기술안보 리스크도 커질 수밖에 없다. 소프트웨어 경쟁력을 유지하되, 제조 강점을 살린 소부장 포트폴리오를 병행 구축하는 것이 지금 필요한 균형 전략이다.

대한민국 제조업의 저력은 반도체 공정 기술, RF·광통신부품, 정밀 기계가공, 초정밀 측정·제어, 고신뢰 공급망 운영 역량으로 요약된다. 반도체 분야에서 축적한 웨이퍼 가공·박막 증착·리소그래피 기술은 초전도·포획이온·광자·반도체 양자점 등 각 플랫폼의 칩·소자 제작에 직접 연결될 수 있고, 통신·국방에서 다져온 RF 설계·저잡음 증폭·신호 동기화 기술은 양자 제어 전자장비로 전환 가능하다. 디스플레이·광통신에서 축적된 광파·정렬·코팅·섬유 조립 기술은 저손실 광학 부품과 포토닉스 기반 양자 소자에 그대로 적용된다. 정밀 기계·플랜트 분야의 초고진공·열관리·차폐 설계 역량은 희석냉동기, 진공챔버, 라이트타이트·자기 차폐 시스템의 국산화에 활용될 수 있다. 이러한 기반을 양자 요구사항에 맞게 재설계·재조합하면, 비교적 짧은 시간 안에 공통 소부장 전주기에서 의미 있는 국산화를 달성할 여지가 크다.

대기업군의 기존 역량을 구체적으로 양자 소부장에 접목하는 경로를 살펴보면 다음과 같은 기회가 보인다. 반도체 초대형 제조 인프라와 공정 자동화를 보유한 삼성전자와 SK하이닉스는, CMOS 호환형 조지프슨 접합 공정과 마이크로 전극 포획이온 칩, 실리콘 나이트라이드·리튬나이오베이트 포토닉스 웨이퍼의 양산성 개선에 기여할 수 있다. 극저온 CMOS 소자 개발 역시 중요하다. 리소그래피·식각·증착의 공정 융합과 공정 변동성 관리, 웨이퍼 수준 특성평가 자동화는 양자 칩 수율을 좌우하는 핵심 요소다. 통신·전자 분야의 삼성전기, LG이노텍 등은 저잡음 마이크로파 사슬, 다채널 임의파형 발생기, 위상 동기·지터 억제 모듈, 극저온 호환 RF 라인과 필터 등 제어·측정 전자장비에 강점을 이식할 수 있다. 레이저·광학 부문은 국내 광통신부품 기업과 정밀 광기계 업체를 중심으로, 협대역 고안정 레이저, 전기광학·음향광학 변조기, 저손실 파이버·어레이, 초저드리프트 마운트 및 정렬 플랫폼을 양자 규모로 재설계하는 것이 유효하다. 플랜트·기계 대기업과 정밀 부품 중견사는 희석냉동기 본체, 저진동 프레임, 초고진공 펌핑·실(Seal)·피드스루, 라이트타이트·자기차폐 구조 등에서 조기 성과를 낼 수 있다. 재료 기업은 저자성 합금, 극저온용 동·은 합금, 고투과·저산란 광학 유리, 고품질 단결정 다이아몬드, 동위원소 정제 실리콘 등 원소재 국산화의 핵심 파트너가 될 수 있다.

국내 소부장 전환을 가속하려면 수요와 공급을 잇는 메커니즘이 필요하다. 대학·출연연의 파일럿 수요를 한데 묶어 사양 표준을 정의하고, 공공 조달과 실증 과제를 통해 초기 레퍼런스를 축적하는 방식이 효과적이다. 희석냉동기, 저잡음 앰프, 협대역 레이저, 극저온 케이블·커넥터, 진공셀처럼 공통성이 높고 전략물자화 가능성이 큰 품목을 1차 과제로 선정해 상용 시제품을 빠르게 내는 것이 바람직하다. 이 과정에서 대기업은 시스템 통합과 신뢰성·품질 체계를 담당하고, 중견·중소기업은 부품 전문화를 맡으며, 대학·출연연은 성능 평가와 레퍼런스 설계를 제공하는 삼각 협업이 요구된다. 또한 양자 소부장 로드맵을 통해 단기 국산화 품목과 중장기 연구개발 품목을 명확히 구분하고, 표준·인증·시험 인프라를 병행 구축해야 한다. 극저온·광학·RF·진공의 교차 시험이 가능한 공동 테스트베드와 웨이퍼 스케일 극저온 특성평가 설비가 대표적이다.

기업별 역할 분담도 그려볼 수 있다. 반도체 제조·설비 기업은 웨이퍼 수준 공정·측정 장비와 양자 칩 패키징 표준을 주도하고, 통신·국방 전자 기업은 다채널 제어기와 신호 사슬, 위상 동기·타이밍 네트워크를 담당한다. 광학·레이저 기업은 협대역·초저드리프트 레이저와 광섬유·결합 모듈, 정밀 광기계 솔루션을 양자 규격으로 전환하고, 기계·플랜트 기업은 희석냉동기, 진공·차폐 시스템, 저진동 플랫폼을 맡는다. 재료·화학 기업은 동위원소 정제, 초고순도 금속·유전체, 저자성·저손실 소재를 공급하며, 검출기와 포토닉스 분야에서는 반도체·센서 기업이 SNSPD, 포토닉스 집적소자, 저손실 패키징으로 확장할 수 있다. 이러한 산업 매핑을 정부의 전략조달, 세액공제, 규제-특례, 국책금융으로 뒷받침하면, 초기시장의 불확실성을 완충하면서 학습곡선을 단축할 수 있다.

결론적으로, 국내 양자 기업의 소프트웨어 성과는 계속 키워져, 제조업 강점을 살린 소부장 국산화를 병행해야 한국형 양자 산업의 실질적 자립과 성장 동력이 확보된다. 공통 소부장의 표준화·국산화, 전략 품목의 조기 상용 시제품화, 대·중견·중소·연의 역할 분담과 공동 테스트베드 구축이 맞물릴 때, RF, 광학, 냉동기, 반도체 공정을 양자 규격으로 확장하여 글로벌 공급망에서 신뢰할 수 있는 파트너로 자리매김할 수 있을 것이다.

〈표 4.5〉 산업 분야별 관련 기술 및 국산화 가능성 전망

| 산업 분야 | 관련 기술 | 관련 양자 소부장 | 국산화 가능성 전망 |
|-------------|---|--|--|
| 반도체 | EUV/DUV 포토 공정, 웨이퍼 가공, 박막 증착, 리소그래피, 식각, 공정 자동화, 웨이퍼 수준 특성평가, 전자회로 설계 | 반도체 공정 장비, 초전도/포획이온/광자/반도체 양자점 칩 파운드리, TSV 기반 3D 패키징, SiN·LiNbO ₃ 포토닉스 웨이퍼, Cryo-CMOS | 최상- 기존 반도체 제조 역량과 직접 연결, 대기업·파운드리 활용 가능, 수출 확보 시 글로벌 경쟁력 기대 |
| 통신·전자·우주·국방 | RF 소자 설계, 저잡음 증폭기, 신호 동기화, 위상 동기·지터 억제, 다채널 제어 시스템 | 마이크로파 제어 측정장치, 저잡음 마이크로파 증폭기, HEMT, 믹서, 서큘레이터, 극저온 호환 RF 동축 케이블, RF 필터, 적외선 필터 | 상- 통신·전자·우주·국방 분야에서 축적된 RF 및 전자 기술을 기반으로 극저온 호환 및 비자성 재료 적용 가능 |

| 산업 분야 | 관련 기술 | 관련 양자 소부장 | 국산화 가능성 전망 |
|-----------------------|---|---|---|
| 레이저· 디스플레이· 광통신 | 레이저 다이오드, 레이저 안정화, 광파 정렬, 코팅, 광섬유 조립, 포토닉스 설계, 정밀 광기계 | 협대역 고안정 레이저, 주파수 빔, 레이저 증폭기, AOM/EOM, 저손실 광섬유, 광섬유 어레이, 광학 마운트, 저손실 포토닉스 | 중상- 광섬유 및 기타 광학부품 국산화는 비교적 빠르게 가능하나 최고 안정도 레이저 저손실 포토닉스는 중기 연구·개발 필요 |
| 정밀 기계· 플랜트 | 초고진공 설계, 열관리, 차폐 설계, 저진동 구조 제작 | 희석냉동기부품, 진공챔버, UHV 펌프, 라이트타이트·자기 차폐 구조, 저진동 프레임 | 중상- 부품 단위 조기 성과 가능, 희석냉동기 본체는 장기 개발 필요 |
| 재료·화학 | 저자성·극저온 소재, 초고순도 금속·유전체, 단결정 성장, 동위원소 정제 | 저자성 합금, 초고순도 실리콘 웨이퍼, 고순도 알루미늄·니오븀, 단결정 다이아몬드, 저손실 포토닉스 소재 | 중상- 소재 가공 산업 기반은 강하지만 핵심 고순도·동위원소 소재는 중장기 개발 필요 |

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

V

인센티브 정책 및 산업적 수요 창출



V

인센티브 정책 및 산업적 수요 창출

이제까지 본 보고서에서는 양자정보처리 기술의 플랫폼별 기술 현황, 우리나라 정부 차원의 양자기술 개발지원 사업, 그리고 국제적인 산업화 현황 등을 살펴보았다. 이번 장에서는 이와 같은 상황에서 우리나라가 양자컴퓨팅 산업의 생태계, 특히 소재, 부품, 장비 분야 가치사슬에서 기술적 경쟁력을 확보해 시장에서 매출과 이익을 실현하고, 산업과 국방의 핵심 기술을 내재화하기 위한 몇 가지 정책 방향을 제안하고자 한다.

양자컴퓨터를 제작하고, 시험 가동하고, 상품으로 판매할 수 있는 제품으로 만들어 내는 데 필요한 소재, 부품, 그리고 계측 장비는 다양하다. 그리고 플랫폼마다 요구하는 물건들이 모두 다르다. 여기서는 정책 방향을 제안하기 위해서, 한 가지 구체적인 예로, 이온포획장치에 포획된 이온 혹은 광집계에 포획된 중성원자를 이용하는 플랫폼에서 필요로 하는 광학계의 소재, 부품, 계측 장비를 고려해 보기로 한다. 이 분야에서 가장 성공적인 몇몇 기업의 성공 요인을 자세히 분석해 보고, 이런 사례별 연구를 통해서 우리나라 상황에서 벤치마킹할 만한 경우를 찾아보고자 한다.

01 사례별 연구

이온과 중성원자를 냉각 및 포획해서 포획장치에 가두어놓고, 이들 입자의 상태를 큐비트의 0 또는 1에 해당하는 상태로 준비하고(Initialization), 여기에 양자 연산에 필요한 일련의 상태 변환을 이끌어내고(Gate Operation), 마지막으로 그 결과를 검색하는(Detection) 전 과정에서 가장 중요한 것이 레이저를 비롯한 광학계다. 이런 일련의 과정과 장치에 이용되는 광학계는 크게 두 가지 부류로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 간단한 거울, 렌즈, 편광판, 그리고 이들을 지지하는 마운트(Mount) 등 범용부품이고, 둘째는 State of the art급의 레이저 시스템, 또는 단일광자 측정장치와 같은 계측 장비이다.

가. 범용부품

범용부품이라고 하더라도, 양자컴퓨터를 위해서는, 거울표면의 평평한 정도와 반사도에서 혹은 렌즈의

여러 형태의 수차가 얼마나 잘 제어되었는가 등에서 최고급 사양을 요구한다. 다행히 현대 광학 부품 기술은 고급 사양에서도 대량생산이 가능한 수준에 와 있다. 현재 시장 상황을 보면, 범용부품에서는 원스톱 방식의 포털이 시장의 대부분을 장악하고 있다.

광학 계통 범용부품 시장을 장악하고 있는 회사는 미국의 토르랩이다. 마치 아마존이 반스 앤드 노블(Barnes and Nobles)과 같은 기존 유명 서점을 제치고 인터넷 시대에 도서 판매의 최강자가 된 것처럼, 토르랩 역시 기존 에드먼드 옵틱스와 같은 광학 부품 회사를 제치고 인터넷 시대에 가장 성공한 광학 부품 회사가 됐다. 1989년 벨 연구소(Bell Lab) 광학 엔지니어였던 케이블(Cable)이 세운 회사로, 현재는 레이저를 이용하는 실험에 필요한 거의 모든 부품을 포털에서 제공한다. 연구자들이 실험실에서 뭔가 광학 부품이 필요하면, 제일 먼저 토르랩 홈페이지에 들어가 찾아보는 것이 당연한 일이 됐을 정도로 시장을 장악하고 있다. 그 비결로는:

- 1) 더는 카탈로그를 책으로 찍어낼 수 없을 정도로 많은 종류의 다양한 품목을 망라하고 있다.
- 2) 품목마다 판매량이 많아서, 박리다매로 가격 경쟁력이 있다.
- 3) 품목 대부분의 충분한 재고를 확보하고 있어서, 많은 경우 당일 배송이 가능하다.
- 4) 각 품목에 대한 자세한 정보를 일관된 형태로 제공한다. 기본 사양과 사용 매뉴얼은 물론, 제작도면의 컴퓨터 파일, 사용법을 상세히 설명한 튜토리얼 파일과 심지어는 유튜브 동영상상을 제공하므로, 구매한 물품을 쉽고 효과적으로 이용할 수 있다.
- 5) 어떤 부품을 구매하면, 그 부품을 사용하는 데에 필요한 마운트, 컨트롤러, 연관된 광학 부품 등을 하나의 시스템으로 구입할 수 있도록 설계되어 있다.
- 6) 고객들의 피드백을 받아 제품을 개선하거나, 새로운 제품을 출시하는 시스템이 잘 돌아간다.

나. 레이저 시스템

한편, 레이저 시스템은 실제로 에너지를 발생하는 장치로, 양자컴퓨터에 이용되는 레이저에서는, 출력되는 빛의 선폭, 편광, 출력, 모드(Mode)에 대해 요구되는 사양이 매우 높으며, 이런 높은 사양이 오랜 시간 동안 안정적으로 유지되어야 한다. 더구나 큐비트로 이용되는 이온 혹은 원자에 따라, 그리고 같은 원자라도 포획 과정, 초기화 과정, 게이트 작동 과정, 그리고 검색 과정에 사용되는 레이저가 모두 다르기 때문에 각각에 맞는 고사양, 고신뢰도의 레이저 시스템이 필요하다. 요구되는 사양에 따라 특화된 제조사가 여럿 있으며, 여기서는 이들 회사 중 대표적인 예로 특히 적외선대역 다이오드 레이저 시스템에서 독점적 지위를 누리고 있는 독일 톱티카 포토닉스를 들여다본다.

1980년대에 레이저 다이오드가 개발되었다. 레이저 다이오드는 기존 레이저 시스템인 헬륨-네온,

아르곤 이온, 혹은 색소 레이저에 비해 사용이 편리하고, 가격이 저렴하며, 에너지 효율이 높고, 출력이 안정적인 것 등 여러 장점이 있다. 단, 출력되는 광선의 주파수의 튜닝 영역이 좁고 주파수가 안정적이지 못해서, 정밀분광학이나 양자정보처리에 그대로 이용할 수 없으며, 외부에 회절격자를 추가한 소위 외부공진기형 다이오드 레이저로 만들어 사용해야 한다. 1980년대와 1990년대에는 실험실마다 이런 외부공진기형 다이오드 레이저를 직접 제작해서 실험에 이용했으나, 점차 몇몇 회사가 상업적으로 이런 레이저를 제작, 판매하기 시작했다.

이중 가장 성공적인 회사가 독일 뮌헨에서 켄더(Kaender) 박사가 1998년에 세운 톱티카 포토닉스로, 실험실에서 제작한 레이저가 갖는 주파수와 출력 잡음, 모드 불안정(Mode Hop), 제한된 주파수 튜닝 영역과 잔 고장 등의 문제를 뛰어난 전자 제어회로, 합리적인 광학계 및 기계설계 등 우수한 엔지니어링으로 해결한 제품을 내놓아 주목받았다.

초기 제품군은 적외선 대역의 간단한 외부공진기형 다이오드 레이저였으나, 지난 25년 동안 그 파장 대역을 가시광선, 자외선, 그리고 원적외선 대역으로 확장했고, 마스터 레이저의 수십 mW 출력을 수 W까지 증폭해 주는 테이퍼형 증폭기를 이용한 고출력 레이저 시스템, 광섬유 레이저와 광섬유 증폭기, 그리고 파장측정기 등 광 계측장비 등으로 그 제품군을 확장해 나가고 있다. 개개 시스템은 수천만 원에서 수억 원에 이르는 높은 가격에 판매되며, 부가가치가 높은 사업으로 자리 잡았다.

톱티카 포토닉스의 성공 비결로는:

- 1) 가스나 액체 레이저에서 반도체 기반 고체 레이저로 전환되는 기술 전환 시기에 최고 사양을 목표로 기술개발과 제품에 투자한 사업화가 적중했다.
- 2) 독일 특유의 하이테크 중소기업 문화가 유리한 토양을 제공했다.
- 3) 막스 플랑크 연구소(Max Planck Institute)를 비롯한 레이저분광학 및 양자광학 등 초정밀레이저 분광학연구가 활발한 연구소가 최고 사양의 레이저의 큰 시장을 제공했다.
- 4) 이들 연구소 및 대학은 제품에 대한 피드백과 우수 인력배출을 통해 톱티카와 유기적인 협력관계를 발전시켰다.
- 5) 광섬유 레이저, 주파수 빗살(Frequency comb), 테라헤르츠 발생장치 등 새로운 기술이 출현할 때마다 꾸준히 제품군을 확장해 왔다.
- 6) 광섬유 레이저의 강자인 프랑스의 Azurlight System 등 연관 분야에서 기술력을 갖춘 회사들을 인수합병하는 전략으로 제품군을 확장하며 기업의 몸집을 키웠다.

다. 틈새시장

2025년 현재 시점에 우리나라 기업이 토르랩이 자리 잡고 있는 범용 광학 부품 원스톱 포털사업이나, 톱티카 포토닉스와 같은 축적된 기술과 시장의 신뢰를 바탕으로 하는 첨단기술 회사가 장악하고 있는 시스템 시장에 뛰어들어 승부를 걸기는 매우 어려운 상황이다. 위에서 자세히 열거했지만, 토르랩은 미국이라는 거대시장에서 선제적으로 포털사업을 시작함으로써 일종의 게이트 키퍼(Gate Keeper)로 자리 잡았고, 톱티카 포토닉스는 세계 최고의 기초과학과 고급기술의 중소기업 문화를 가진 독일이라는 환경이 있었기 때문에 성공할 수 있었다. 아쉽지만, 우리는 이 두 가지 사업 모델에서 세계 최고의 경쟁력을 갖고 있지 못하고, 시장은 수십 년 전통의 강자들에 의해 이미 장악돼 있는 상황이다.

여기서 우리가 취할 수 있는 사업 모델 혹은 정책 방향은 범용부품과 최고 사양의 시스템 장비 사이의 틈새시장에서 선택과 집중으로 일단 교두보를 확보하는 것이라고 판단한다. 이런 사업 모델로 나름대로 성공을 거둔 회사의 예로는 미국의 콜드 퀀타와 호주의 모그랩스를 들 수 있다.

1) 콜드 퀀타(Cold Quanta)

콜드 퀀타는 2007년 미국 콜로라도 주립대학 내 JILA 연구소의 앤더슨(Anderson) 교수가 창업한 회사다. 1980년대 국제적으로 활발하게 연구된 원자의 냉각 및 포획기술은 원자물리학 분야의 새로운 패러다임으로 등장했고, 1995년 JILA의 위먼(Wieman)과 코넬(Cornell) 교수가 루비듐 원자를 이용한 보즈-아인슈타인 응집(BEC, Bose-Einstein Condensate)에 성공하며 절정에 이르렀다. 이에 따라 국제적으로 이 분야 연구가 활발해지면서 교육과 연구 장비에 대한 수요가 크게 늘었다. 콜드 퀀타는 이런 수요에 부응해서, 초기에는 원자의 냉각 및 포획, 특히 BEC 실험장치를 제작해서 교육 및 연구용으로 판매했다. 그 후 제품군을 점차 확대해 왔으며, 최근에는 중성원자 기반 양자컴퓨터 벤처회사인 인플렉션(Inflection)에 인수 합병됐다. 콜드 퀀타의 사업 모델과 성공 비결은:

가) 원자의 냉각과 포획을 위한 초기 연구에서는 이런저런 형태의 다양한 방법과 실험장치가 시도됐지만, 증기셀을 이용한 자기광포획(MOT), 느린 원자를 공급하는 장치와 이를 다시 포획해서 원하는 실험에 이용하는 두 부분으로 구성된 Double MOT 시스템, 자기장포획을 이용한 BEC 장치 등이 기본적인 실험도구로 확립됐다. 각 실험실에서 이런 장치를 제작하려면 여러 시행착오를 거쳐야 하는데, 일체형으로 이런 시스템을 구매해 이용하는 것이 시간과 심지어는 비용 면에서 효율적일 수 있다는 것이 이 비즈니스의 모델이다.

나) 콜드 퀀타의 원자 칩 형태의 BEC 실험장치가 시장에서 좋은 반응을 받으며, 회사 이름을 국제적으로 알릴 수 있는 계기가 됐다.

- 다) 콜드 쿼타는 볼더(Boulder)에 위치한 콜로라도 주립대학 JILA 연구소 출신들이 주축이 된 벤처회사다. 당시 JILA와 함께 역시 볼더에 위치한 NIST의 시간 및 주파수 연구 그룹이 원자 및 이온의 냉각 및 포획, 그리고 이를 이용한 정밀분광학 연구를 국제적으로 주도하고 있어서 인력공급과 기술 혁신에 유리한 환경이었다.
- 라) 양자컴퓨터 등 양자정보처리가 새로운 연구 및 산업 트렌드로 부상하면서, 콜드 쿼타는 역시 콜로라도 볼더에 위치한 인플렉션이라는 양자컴퓨터 벤처회사와 합병해서 사업영역을 확장해 가고 있다.

2) 모그랩스

2004년 호주 멜버른 대학교 물리학과 로버트 솔튼(Robert Scholten) 교수는 연구용 레이저 시스템의 감당하기 어려운 가격과 이에 비해 아쉬운 성능으로 고민하던 중 이 문제를 스스로 해결하려고 동료들과 모그랩스라는 회사를 창업했다. 초기 제품의 신뢰도와 성능에 문제가 있었으나, 비교적 저렴한 가격을 강점으로 내세워 시장에서 입지를 확보했다. 레이저뿐 아니라 광학기기 제어용 회로와 파장측정기 등 광측정장치로 제품군을 확장해 왔으며, 2025년 5월에 레이저와 광측정장치의 국제적 리더 중 하나인 일본 산텍(Santec)에 인수됐다. 모그랩스의 비즈니스 모델과 성공 비결은:

- 가) 원자물리학 실험이나 중성원자 기반 양자컴퓨터에서 가장 많이 사용되는 적외선 대역의 다이오드 레이저 시스템에서 톱티카 포토닉스의 최고 사양에는 못 미치지만, 대부분의 실험에서 무리 없이 사용할 수 있을 만한 사양의 레이저를 저렴한 가격에 공급하는, 가격 대비 성능이 뛰어난 제품임을 앞세운 전략이 주효했다.
- 나) 레이저와 변조 장치, 예를 들어 광음파변조기(Acousto-Optic Modulator) 등에 전류와 전압, 혹은 고주파 신호를 공급하고 이를 제어하는 회로는, 현대 전자기기의 회로 기준에서 보면 상당히 간단한 장치이다. 그런데도 필요 이상의 성능이나 기능을 제공하며 초고가로 판매되었다. 모그랩스는 꼭 필요한 기능과 적절한 사양을 갖추고 가격을 낮추는 전략으로 시장을 파고들었다.
- 다) 레이저, 제어회로, 광측정장치 순서로 자신들의 특기를 살려 제품군을 확장해 나가는 전략을 썼다.
- 라) 광기술 분야의 국제적인 대기업에 인수됐는데, 여기서도 벤처기업으로서의 유연성과 혁신성을 유지할 수 있을지는 두고 볼 일이다.

3) 김벌 피직스와 리골 테크놀로지(Rigol Technology)

이제까지는 포획이온이나 중성원자 기반 양자컴퓨터의 광학계 시장에서 범용부품과 최종 시스템 사이의 틈새시장을 성공적으로 공략한 두 기업을 살펴봤다. II. 양자기술 현황의 이온포획 플랫폼에 사용되는 진공 장비에서 언급했던, 혁신적 아이디어로 진공 부품의 새로운 시장을 개척한 미국의 김벌 피직스 역시 우리가 이런 맥락에서 주목할 만한 기업이다.

또 하나 빼놓을 수 없는 기업은 전자 계측장비업체인 중국의 리골 테크놀로지이다. 파형 발생기, 파형 측정기, 스펙트럼 분석기, 그리고 다양한 전압, 전류를 공급하는 전원장치 등 계측 장비는 대학교 일반물리실험실부터 최전선의 양자컴퓨터 연구실에 이르기까지 모든 연구실에서 의사의 청진기처럼 기본적인 장비로 두루 이용된다. 오랫동안 물리학과와 전자공학 분야 실험실에서는 미국의 휴렛팩커드(Hewlett-Packard, 키사이트로 분사)와 텍트로닉스(Tektronix)사의 제품이 최고 성능을 자랑하며 독점적 지위를 누렸다. 그런데 최근 10년 사이에 높은 가성비를 앞세운 리골사의 제품이 등장하면서, 극단의 사양이 요구되지 않는 일반적인 계측 장비 시장은 빠르게 리골에 점령되고 있다.

리골은 1998년 중국 베이징에서 세워진 회사로, 현재는 세계 90여 개 국가에서 사업하고 있다. 리골 테크놀로지의 성공 비결은 중국의 저렴한 생산가격을 무기로 한 가격 경쟁력과 함께, 앞서 모그랩스에서와 마찬가지로, 필요한 성능에 적절한 사양으로 장비를 최적화한 점이다. 이와 함께, 중국의 산업이 고도화하고 대학의 연구능력이 향상되면서, 계측 장비에 대한 엄청난 시장을 제공하였다.

02 시사점과 정책 제언

가. 시사점

미국의 쿨드 퀴타와 호주의 모그랩스를 우리가 벤치마킹할 만한 기업형태로 봤을 때, 이들이 시사하는 점은 다음과 같다.

- 1) 앞에서 강조한 것처럼, 범용부품의 다품종 백화점식 사업이나 최고급 사양의 시스템을 제작, 판매하는 기업 모델이 아닌, 중간재 성격의 실험장비에 특화해서 이름을 알려가며 기술력을 인정받는 것이 유효한 전략이라고 판단된다.
- 2) 이들 기업은 모두 대학 연구실에서 실제 레이저와 광학기기를 이용해서 연구하던 사람들이 새로운 시장과 기회를 알아보고 창업한 경우다. 우리나라에도 대학에서 산학협동과 창업을 지원하는 여러 프로그램과 조직이 있지만, 양자기술과 관련된 소재, 부품, 장비 시장의 폭발적인

성장을 고려할 때, 연구자들이 이 분야 사업의 아이디어를 가지고 창업할 수 있는 추가적인 유인책이 필요하다.

- 3) 대학과 함께, 우리나라에는 원천기술을 연구하는 국책연구소가 잘 확립돼 있다. 예를 들어 KRISS의 원자시계 연구 팀은 레이저, 진공, 고주파 관련 장비와 실험에 관한 최고의 사양을 유지해야 하며, 이와 관련된 노하우를 가지고 있다. KIST와 국방과학연구소(ADD) 등의 양자물리학 관련 연구실도 국제적인 경쟁력을 가지고 있다. 이들 연구소의 1차 임무는 국가표준 확립이나 무기개발이지만, 이들이 가지고 있는 노하우가 양자기술 관련 소재, 부품, 장비 사업화에 기여할 수 있도록 규제를 없애고, 사업에 따른 이윤을 공유할 수 있는 인센티브 제도의 확립이 중요하다.
- 4) 우리나라에는 세계 최고의 전자, 기계, 반도체 기업이 있다. 이들 기업의 사업목적과 연구개발 방향은 수조원 시장을 겨냥하고 있어서, 지금 우리가 논하는 양자기술의 소재, 부품, 장비 개발과는 지향하는 바가 크게 다르다. 그럼에도 불구하고, 이들 기업의 회로설계, 기계제작, 미세구조 제작기술이 양자기술 사업에 접목될 수 있다면, 우리만의 상당한 경쟁력을 가져다줄 것으로 확신한다.

나. 정책 제언

이런 관점에서 구체적인 정책으로 다음을 제안한다.

1) 국산 장비·부품 사용 인센티브 제도 도입

국가 연구개발 과제의 평가 항목에 국산 장비·부품 사용률을 반영해야 한다. 과제 제안서나 중간·성과 평가에서 국산 장비를 실제 실험에 활용한 경우 정량 가점을 부여함으로써, 연구자가 자발적으로 국내 제품을 채택하도록 유도할 수 있다. 단순 구매가 아닌 “실제 실험 활용”을 평가 기준으로 삼아야 제도가 형식적으로 흐르지 않고, 실질적 수요 창출로 이어질 것이다.

2) 국산 장비 구매 시 정부 매칭 펀드 및 세제 혜택 제공

연구기관이 국내 제조사의 장비를 구매할 경우, 정부가 일정 비율의 비용을 매칭 펀드 형태로 보조하거나 부가가치세 감면 등의 세제 혜택을 제공해야 한다. 예컨대 국산 저잡음 증폭기, 광학 모듈, 극저온부품 등을 도입할 때 구매비의 일부를 정부가 부담하도록 하는 것이다. 또한 국가연구시설장비진흥센터(NFEC) 내에 ‘국산 양자 장비 패스트 트랙(Fast Track)’ 제도를 신설하여, 국산 장비의 도입 절차를 단축함으로써 국산 장비의 매력도를 높일 수 있을 것이다.

3) 성능 검증 및 인증 체계 확립

국산 장비의 신뢰성을 확보하기 위해 플랫폼 특성(초전도, 포획이온, 광자, 중성원자 등)에 맞춘 표준화된 검증 절차를 마련하고, 이를 통합 관리하는 국가 양자 소부장 성능평가센터를 설립해야 한다. 검증을 통과한 제품은 공공 구매 시 우선 선정 대상으로 지정하고, 인증 소요기간을 단축해 산업계-연구계 간 피드백 속도를 높인다. 표준화된 검증 절차는 국내 제품의 신뢰성을 확보하고, 해외 연구기관의 수요를 창출할 수 있을 것으로 기대한다.

4) 양자기술 바우처 프로그램 운영

중소·중견기업이 양자 알고리즘 검증이나 소부장 성능 측정을 필요로 할 경우, 정부가 연간 5천만~1억 원 규모의 기술 바우처를 제공해 대학·출연연·전문기관 서비스를 이용할 수 있도록 한다. 예를 들어 한국전자통신연구원(ETRI), KIST, KAIST, 고려대 등이 “양자 알고리즘 설계 및 실험대행 서비스” 제공기관으로 등록되면, 기업은 낮은 비용으로 기술을 검증하고 제품을 시장에 신속히 내놓을 수 있다. 이는 산업계의 기술개발 기간을 단축하고, 대학·연구소의 검증 기술을 수익화할 수 있는 구조를 마련한다.

5) 대학 기반 스타트업 창업 촉진

대학 연구실에서 개발된 초전도 제어전자, Cryo-RF부품, 고안정 레이저, 단일광자 검출기 등의 기술이 시장으로 연결될 수 있도록 ‘Quantum Lab Spin-Off Program’을 신설한다. 초기 창업 비용, 인증비, 시제품 제작비 등을 정부가 지원함으로써 연구성과가 산업으로 빠르게 이전되도록 돕는다. 이를 통해 연구-산업 간 경계를 허물고, 양자 소부장 생태계의 자생적 성장을 촉진할 수 있다.

6) 임무지향형 성격의 연구과제 확대

양자 기반 하드웨어 기술개발 과제는 철저한 임무지향형(Mission-Oriented) 성격을 가져야 한다. 현재 추진 중인 양자과학기술 플래그십 프로젝트가 그 대표적인 사례이며, 이와 같은 임무지향적 연구가 지속적이고 안정적으로 운영될 수 있도록 제도적 기반을 마련할 필요가 있다. 또한, 국가연구개발사업 중 양자공통기반기술개발 사업 역시 이러한 임무지향적 성격을 강화할 수 있을 것이다.

7) 큐비트 연계 소부장 가치사슬 생태계·컨소시엄 육성

양자기술은 여러 첨단기술의 집합체이며 근간에는 기초과학의 높은 성숙도가 요구된다. 수입하는 양자컴퓨터의 활용에만 집중되고 있는 기존의 국내 양자 산업 체계를 넘어, 큐비트 시스템을 중심으로 한 소부장 국내 가치사슬을 단계적으로 자립화하여 기술 성숙도를 높이고 양자 산업의 해외 의존 리스크를 완화해야 한다.

대학·연구기관·양자 시스템 기업이 중심이 되어 여러 소부장 기업이 참여하는 컨소시엄/협의체를 구성하여 큐비트 시스템을 중심으로 소부장 가치사슬의 방향성과 성숙도를 높일 수 있는 연구개발 수행을 유도한다. 기존 소부장 연구개발에서는 요구되는 성능이나 정량지표가 공모 시점의 제안요청서에서 결정되는 반면, 가치사슬의 생태계 육성 관점에서는 큐비트와 연계성을 높여 큐비트 제어나 양자 시스템에서 활용될 수 있도록 Quantum Processing Unit(QPU)의 성능 중심으로 생태계가 움직일 수 있는 샌드박스형 프로그램을 제안한다.

8) 양자 대학원-산업 연계 석사 프로그램

양자 대학원에서 배출되는 석사 인력이 졸업 직후 양자 기업의 현장에 즉시 투입될 수 있도록, 대학-기업-정부가 공동으로 설계한 기업 연계형 석사 트랙을 도입하는 것을 제안한다. 미성숙한 산업 구조와 상대적으로 큰 진입 리스크로 인해 우수 인력이 반도체 등 인접·성숙 산업으로 이탈하는 문제를 완화하고, 초기 양자 기업의 인력 확보·정착 비용 부담을 낮춰 선순환을 만들 수 있다.

석사 프로그램 입학생의 1학기(또는 2학기) 종료 시점에 정식 매칭을 확정한다. 학생은 대학원에서 학위 연구를 수행하면서도 매칭 기업과 세미나·멘토링을 병행한다. 졸업 후 해당 기업으로의 전환 채용을 기본 경로로 삼되, 학생의 자율성은 보장한다. 특정 기업 종속 우려에 대해서는 여러 기업 참관·순환 실습을 제도화하고, 학생의 최종 진로 선택권을 보장한다. 단기형 인센티브 의존을 막기 위해 인센티브 종료 후 일정 기간 고용 유지 시 이후 석사 프로그램 기업 선정 시 가점을 주는 형태로 준비한다.

초기 현금흐름이 열악하며 산업의 성숙도가 낮은 중소 양자 기업을 대상으로, 졸업 전후 1년간 한시적 급여 인센티브를 매칭(정부:기업 공동부담)하는 방안을 도입해야 한다.

KAST

Research Report

2025

—

KAST

—

Research Report

—

2025

—

VI

기초과학 역할 및 중요성



VI

기초과학 역할 및 중요성

01 기초과학 연구의 중요성

현대의 양자기술은 오랫동안 자연에 대한 호기심을 기반으로 발전해 온 기초과학이 낳은 산물이다. 현대 문명을 이끌고 있는 레이저나 반도체 기술도 모두 양자물리학에 기초하고 있지만 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱과 같은 현재의 양자기술은 양자 중첩과 얽힘을 미시적으로 제어하여 응용기술로 발전시키고자 하는 노력이다. 기초과학 연구는 보통 상업적 응용과 상관없이 지식의 진보와 확대라는 관점에서 진행된다. 따라서 응용기술의 차원에서 양자기술에 대한 정책을 수립할 때, 기초과학 연구의 역할을 간과하기 쉽다. 그러나 일반적인 공학기술과 달리 양자기술은 본질적으로 기초과학 연구와 분리될 수 없다는 특징을 갖고 있다. 본 보고서가 양자기술을 다루고 있기에 여기에서 강조하는 기초과학은 자연과학 전체를 내포하는 일반적이고 포괄적인 개념이라기보다는 양자기술의 진보와 구현에 직접적으로 연관되는 기초 분야—응집물리학, 양자광학, AMO 물리, 양자 물질 및 위상 물질 연구, 양자 정보이론—등을 의미한다. 이는 고에너지물리나 우주론과 같은 기초과학의 중요성을 강조하지 않는 것이 아니라, 국가 양자기술 전략과 직접 연관이 있는 양자기반 기초과학을 명확히 설명하기 위함이다.

예를 들어, 올해(2025년) 노벨 물리학상은 양자 현상이 원자 크기 정도만 한 미시세계에서만 드러나는 게 아니라, 우리 맨눈에 보일 정도만큼 커다란 거시세계에서도 나타날 수 있다는 점을 1984~1985년 터널링(Tunneling) 실험으로 보인 존 클라크(John Clarke), 미셸 드보레(Michel H. Devoret), 그리고 존 마티니스(John M. Martinis) 세 과학자에게 돌아갔다. 우리가 높은 벽을 부수지 않고 뚫고 지나갈 수 없듯이 터널링은 기본적으로 양자 현상이다. 클라크의 표현대로 초전도체에서 이 실험을 처음 계획하고 실행했을 때만 해도 이 일이 노벨상에까지 이를지 상상도 하지 못했다. 그러나 그 후 칩의 지속적인 발전이 있었고, 특히 이들의 실험을 기반으로 현재 양자비트의 플랫폼으로 가장 널리 쓰이는 초전도 양자비트를 개발하게 되어, 올해 노벨상을 수상하게 되었다.

이렇듯 현대 양자기술이 본질적으로 기초과학 연구인 점은 단순한 철학적 관점이 아니라, 현실적인 연구개발 구조에서 뚜렷이 드러난다. 양자기술에서 발생하는 대부분의 기술적 난제는 결국 양자 역학의 근본 원리로 되돌아가야만 해결된다. 즉, 기초와 응용의 경계가 흐려진 구조를 가지고 있다. 따라서 양자기술의 발전은 순차적인 단계가 아니라 기초와 응용이 순환적으로 맞물려 진화하는 과정이라 할

수 있다.

제2차 세계대전 후 미국을 비롯해 전 세계적으로 과학기술 정책은 기초 분야와 응용 분야로 분류되었고, 기초는 응용기술을 위한 선행 과정으로 받아들여져 왔다. 즉 기초연구의 성과를 토대로 응용기술을 발전시켜 가는 방식으로 정책적 지원도 이에 맞추어 순차적으로 이루어졌다. 그러나 양자기술의 경우 이 방식에서 크게 벗어난다. 양자기술은 하드웨어 개발이란 기술적 단계에서 문제가 발생할 경우 이에 대한 해결은 또다시 순수 기초연구를 필수적으로 요구하기 때문에 순차적인 개발 및 지원이란 개념이 성립되기 어렵다. 이러한 차이점은 아래 예시 표에서 보듯이 양자기술이 양자 역학의 중첩, 얽힘, 불확정성과 같은 근본적인 양자 원리에 기초하고 있고 실제 양자기술이 직면하는 문제점 자체가 근본적인 기초과학 질문들이어서 양자기술의 진보와 완성을 위해선 순수 기초연구와 순환적으로 병행된 개발이 필수적이라 할 수 있다.

〈표 6.1.〉 양자 기초연구의 사례

| 양자 기초연구의 예 | 기초과학 분야 | 해결 문제 | 양자기술 |
|------------|---------|-----------------------|-------|
| 위상 큐비트 | 응집물리 | 디코히런스로 인한 큐비트 불안정성 극복 | 양자컴퓨팅 |
| 양자 오류 수정 | 양자 광학 | 큐비트 오류정정 | 양자컴퓨팅 |
| 원자 간섭계 | 원자 물리 | 고전 센서 정밀도 한계 극복 | 양자센서 |

02 기초과학 연구의 예

가. 양자컴퓨팅

양자컴퓨팅 하드웨어 구현은 전자나 원자로 구성된 다체계 물질 간의 상호작용을 양자역학적으로 이해하고 제어할 수 있어야 한다. 이는 응집물리학의 핵심 연구 분야로, 안정적이면서 예러 발생이 적은 대규모 큐비트를 구현하기 위해 새로운 양자 물질에 대한 이해와 연구가 필수적이다. 주변 잡음으로 인한 디코히런스로 큐비트가 소실되는 것을 막는 것은 양자컴퓨팅의 핵심 난제이다. 결맞음 시간의 향상은 단순한 기술 개선이 아니라, 양자 물질 내부의 결합 구조, 표면의 자성과 전자 상태, 전자-포논 결합 등 미시적 요인의 이해가 필요하다. 따라서 이 문제를 해결하려면 응집물리학의 기초적 이해가 필수적이다. 즉, 공정 기술이 아니라, 물리적 이해의 깊이가 문제의 본질인 셈이다.

마요라나 페르미온(Majorana Fermion)을 활용한 위상 큐비트의 경우 비국소적 특성으로 인해 주변 잡음에 대한 안정성이 확보될 것으로 기대되어 큰 관심을 받고 있다. 최근 반도체와 초전도체 계면에서

위상 큐비트를 구현하려는 노력이 이루어지고 있지만 아직 기초연구 단계에 머물고 있다. 이와 같이 양자컴퓨팅의 기술적 진보는 기초과학의 성숙도에 직접적으로 의존하며, 글로벌 기업 연구소에서도 기초연구 그룹을 함께 운영하는 이유가 여기에 있다. 예를 들면 Scanning Tunneling Microscopy (STM), Angle-Resolved Photo-Emission Spectroscopy(ARPES), Dynamical Mean-Field Theory(DMFT) 연구 그룹 등이 존재한다. 나아가 방위고등연구계획국(DARPA)의 Heterogeneous Architectures for Quantum(HARQ) 프로그램에서는 큐비트 개수를 늘리기 위해 큐비트 시스템들을 광학적으로 연결하는 등 고충실도(High-Fidelity), 고속(High-Speed) 전달(Communication)이 가능한 쿼텀 인터커넥트(Quantum Interconnect)을 구현하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이 역시 양자광학·양자정보이론의 기초적 이해를 필요로 한다. 결국 양자컴퓨팅의 기술적 진보는 기초과학의 성숙도에 직접적으로 의존하며, 기초과학의 깊이가 곧 양자컴퓨팅의 확장 범위를 결정한다.

나. 양자통신

양자 암호 및 양자통신은 노 클로닝(No-Cloning) 법칙과 관측은 양자 상태를 변화시킨다는 양자 역학의 원리에 기초하고 있다. 1984년에 개발된 BB84 프로토콜은 이 원리를 활용하여 도청을 항상 감지하는 방법을 제시하였다. 현재 연구의 장기적 목표는 글로벌 양자 네트워크, 즉 양자 인터넷을 구현하는 것이다. 단순한 점대점 방식 Quantum Key Distribution(QKD) 연결을 넘어서 복잡한 네트워크 구성이 필요하다. 이를 위해서 이론적으로 제안된 양자 리피터(Quantum Repeater)를 통해 보안이 유지되는 양자 계산 분배와 초정밀 동기화를 구현하고자 한다. 양자 리피터는 신호 소실을 극복하기 위해 순수 기초연구과제인 얽힘 교환(Entanglement Swapping) 및 얽힘 순화(Entanglement Purification) 연구가 필요하다. 이처럼 신뢰성을 갖춘 장거리 양자통신 기술을 완성하기 위해서는 기본적인 양자 정보이론 연구가 필수적이다. 또한 2015년 델프트 공대와 NIST에서 수행된 Loophole-Free Bell Test는 양자 역학의 비국소성이 실재함을 실험을 통해 입증한 대표적 성과로, 이후 양자통신 보안성의 물리적 근거가 되었다. 즉, 순수 기초실험이 곧 기술의 신뢰성을 담보하는 기반이 된 것이다.

다. 양자센싱

양자센싱은 양자기술 중 빠르게 상용화가 가능한 분야로, 고전 한계를 넘어서는 정밀도 센싱이 가능하다. 양자 역학의 중첩, 얽힘, 간섭 및 스퀴징(Squeezing) 현상에 기초한 기술로 기초과학 및 의료, 국방 등 다방면에 걸쳐 새로운 발전을 가져올 것으로 기대되고 있다. 냉각 원자를 이용한 간섭계로 NASA에서 지구 중력장을 측정하기 위해 시작된 Quantum Gravity Gradiometer Pathfinder(QGGPF)

등은 기초 원자물리학 연구가 직접 기술로 이어진 좋은 예이다. 다이아몬드 NV 센터는 상온에서 긴 수명을 가진 안정적인 양자 큐비트로 작동한다. 이 장점을 활용하면 나노 스케일의 자기장, 전기장 및 온도 측정이 가능하며 다이아몬드 NV 센터는 이상적인 양자 센서로 각광받고 있다. 특히 단분자 이미징과 같은 생의학 분야에 응용이 가능하다. 이처럼 고체 내부의 결함 구조에 관한 기초과학 연구는 센싱 기술의 새로운 장을 열고 있다.

이러한 센서의 성능 한계는 단순한 공정이나 장비의 정밀도로 정해지지 않고, 그 근본적인 한계는 양자임계현상(Quantum Critical Phenomena)이나 비평형 다체물리의 이해, 즉 기초과학의 깊이에서 결정된다. 따라서 양자센싱의 발전은 기술적 개발이나 성숙이 아니라 기초물리학의 진보와 확장을 통해 이루어진다. 양자기술은 어느 한 단계의 응용 개발만으로 진보하지 않는다. 기초과학의 성숙이 기술적 병목을 해결하고, 기술적 도전이 다시 기초과학을 자극하는, 지속적인 순환 구조를 이루어야만 한다. 따라서 국가 차원의 양자기술 정책은 기초연구의 장기적 안정성과 자율성을 보장하고, 응용과 기초가 서로 순환하며 진화하는 연구 생태계를 구축하는 방향으로 나아가야 한다. 기초연구를 단기성과 중심으로 평가하기보다, 기술 생태계의 뿌리이자 엔진으로서 장기적 관점에서 육성해야 한다. 양자기술의 진보는 결국 기초과학의 깊이에서 비롯된다. 기초과학을 소홀히 하는 사회는 변영이 지속되기 어렵고, 기초과학을 존중하는 사회는 기술의 혁신과 진보를 통해 기반이 단단한 건강한 현대사회로 나아갈 수 있다.

참고문헌

〈국 문〉

이종호·황종성(2025). 2024년 양자정보기술백서 II, 과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원, pp. 154~271.

〈영 문〉

Bluvstein, D., et al. (2024). "Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays", *Nature*, Vol. 626, pp. 58~65.

Damme, J. V., et al. (2024). "Advanced CMOS manufacturing of superconducting qubits on 300 mm wafers", *Nature*, Vol. 634, pp. 74~79.

Google Quantum AI and Collaborators (2025). "Quantum error correction below the surface code threshold", *Nature*, Vol. 638, pp. 920~926.

Google Quantum AI and Collaborators (2025). "Observation of constructive interference at the edge of quantum ergodicity", *Nature*, Vol. 646, pp. 825~830.

Google Quantum AI. (2024). "A Roadmap for Fault-Tolerant Quantum Computing". Retrieved from <https://quantumai.google/roadmap>.

Kim, Y., et al. (2023). "Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance", *Nature*, Vol. 618, pp. 500~505.

Manetsch, Hannah J., et al. (2025). "A tweezer array with 6100 highly coherent atomic qubits", *Nature*.

Mohseni, M., et al. (2024). "How to Build a Quantum Supercomputer: Scaling from Hundreds to Millions of Qubits", *arXiv preprint*, arXiv:2411.10406.

Nguyen, L. B., et al. (2024). "Programmable Heisenberg interactions between Floquet qubits", *Nature Physics*, Vol. 20, pp. 240~246.

PsiQuantum team (2025). "A manufacturable platform for photonic quantum computing", *Nature* Vol. 641, pp. 876~883.

Rad, H. Aghaee, et al. (2025). "Scaling and networking a modular photonic quantum computer", *Nature*, Vol. 638, pp. 912~919.

Zhang, C., et al. (2025). "Quantum computation of molecular geometry via many-body nuclear spin echoes," arXiv preprint, arXiv:2510.19550

KAST Research Report 2025
한림연구보고서 158

양자기술의 효율적 개발을 위한 정책 제언

Policy Recommendations for the Efficient Development of Quantum Technology

발 행 일 2025년 12월
발 행 처 한국과학기술한림원
발 행 인 정진호
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr
편집/인쇄 경성문화사 02) 786-2999
I S S N 2799-5135
977-2799513-00-9 58

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의 없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.

