



# quantum wave

파동의 교차, 지식의 융합  
양자정보학의 세계를 탐험합니다.  
이론적 발견, 기술적 혁신 그리고 미래의 가능성

## quantum wave

quantum wave는 한국양자정보학회에서 발간하는 양자 학술 전문 웹진입니다.

**Qisk** 한국양자정보학회  
Quantum Information Society of Korea

(02455) 서울특별시 동대문구 회기로 117-3 / TEL 02-962-0414 / qis.korea@gmail.com



Qisk  
webzine



# quantum wave webzine

## 파동의 교차, 지식의 융합

양자정보학의 세계를 탐험합니다.  
이론적 발견, 기술적 혁신 그리고 미래의 가능성

### PUBLISHER

한국양자정보학회  
발행인 이동현

### EDITORIAL

편집인 김제형  
편집담당 한국양자정보학회

### INFORMATION

발행일 2026년 02월  
주소 (02455) 서울특별시 동대문구 회기로 117-3  
대표전화 02-962-0414  
홈페이지 <https://quantumwave.co.kr/>

### DESIGN

디자인·인쇄 (주)시우컴퍼니 042-483-5343

본지에 포함된 정보의 전부 또는 일부를 무단으로 제3자에게 공개, 배포, 복사 또는 사용하는 것은 엄격히 금지됩니다.

## About quantum wave

- 04 인사말
- 07 편찬위원 소개

## 양자 큐레이션

- 10 GPS가 사라져도 길을 잃지 않는 법: 양자 자기 항법의 첫 실전 검증
- 14 전기 회로에서 거시적 양자 터널링과 에너지 양자화의 발견
- 20 대규모 오류내성 양자 컴퓨팅을 향한 IBM 로드맵
- 26 광기반 양자 컴퓨팅 소자 기술
- 30 마법 상태 재배: 자원 효율적인 오류 허용 양자컴퓨팅의 구현을 향한 진전
- 34 “임계선을 넘어서” - 구글 Willow 칩이 연 양자 오류 정정의 새 시대
- 38 고체점결함(SiV in Diamond) 양자 메모리를 활용한 도시 규모 광통신망 얽힘 생성
- 42 레이저 없이도 가능한 이온 포획 큐비트의 확장가능한 고신뢰도 제어의 구현

## 열린 강의실

- 48 새로운 양자패러다임: 연속-이산 하이브리드 양자프로세서

## 열린 연구실

- 58 반짝임 그 이상: 다이아몬드의 결함이 만드는 초정밀 양자 센서
- 62 국가 표준에서 양자 혁명까지: 한 걸음 더 들어가 본 '초전도 양자컴퓨팅 시스템 연구단'
- 66 “과학이 예술이 될 때”, 이화여자대학교 IBS 양자나노과학연구단을 찾아간다.

Qisk  
Webzine



# quantum wave message



## 존경하는 한국양자정보학회 회원 여러분,

한국양자정보학회 공식 온라인 웹진 quantum wave가 이번에 오프라인 창간호를 발간하게 되어 매우 뜻깊게 생각합니다. 지난 1년 동안 양자큐레이션, 열린강의실, 열린연구실 등을 통해 소중한 의미 있는 자료들이 축적되어 왔으며, 이러한 노력의 결실이 오프라인 출판물로 이어지게 된 점을 매우 기쁘게 생각합니다.

김제형 전임 편집위원장과 이선경 현 편집위원장을 비롯한 편집위원 여러분의 헌신적인 노력 덕분에 오늘의 결실을 맺을 수 있었습니다. 그간의 노고와 헌신에 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

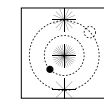
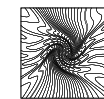
양자기술이 양자-고전 하이브리드 형태의 시너지를 통해 발전하고 있듯이, quantum wave 웹진 또한 온라인 웹진이 완전히 정착되고 활성화되기 전까지는 오프라인 편찬물 발간을 병행하여, 온라인-오프라인 간의 시너지를 도모하고자 합니다. 학회는 앞으로 매년 온라인 웹진에 게재된 다양한 글과 콘텐츠를 정리하여 연 1회 정기 오프라인 편찬물로 발간할 예정이며, 해당 자료는 웹진 홈페이지를 통해 누구나 내려받아 보실 수 있도록 제공할 계획입니다.

학회는 국내외 양자정보 분야의 최신 연구 동향과 소식을 연구자, 산업계 종사자, 대학원생과 학생, 그리고 일반 대중에 이르기까지 폭넓게 전달하고자 합니다. 나아가 학술교류와 소통을 활성화하고, 양자기술의 대중적 확산을 도모하기 위해 다양한 노력을 지속해 나갈 것입니다. quantum wave 웹진이 이러한 역할을 수행하는 대표적인 소통 창구로 자리매김하기를 기대합니다.

회원 여러분께서도 quantum wave 웹진에 많은 관심과 적극적인 참여를 부탁드립니다. 양자기술을 알리고 학회를 소개하는 데 있어 온라인 및 오프라인 웹진을 적극 활용해 주시기를 당부드립니다.

감사합니다.

한국양자정보학회 회장 이동현



# quantum wave



## 짧은 찰나에 담긴 세계

울산 언양의 '반구대 암각화'는 수천 년 전 사람들이 바위에 새긴 삶의 기록으로, 오늘날까지 당시의 세계관을 전해주는 가장 오래된 정보 저장 방식이라 할 수 있습니다.

인류의 기록 방식은 종이와 자기 테이프, 디지털 저장장치를 거쳐 이제는 클라우드와 초소형 칩의 시대로 진화했으며, 우리는 지금 또 한 번의 정보 혁명—인공지능과 양자 정보의 시대를 맞이하고 있습니다.

흥미롭게도 양자 정보는 저장 시간이 매우 짧지만, '큐비트'라는 새로운 정보 단위를 통해 기존의 '더 빠르고 더 많은' 정보 기술을 넘어서는 전혀 새로운 정보 처리 가능성을 보여줍니다. 아직은 실험적이고 미완의 기술이지만, 그 과정은 마치 오래전 바위에 그림을 새기던 일과 닮아 있습니다.

지금의 실험과 기록 역시 언젠가 미래의 누군가에게 새로운 시대의 이야기가 될 것이라 믿으며, quantum wave는 그 이야기들이 만들어내는 물결이 널리 퍼져 나가기를 꿈꿉니다.

이미지 출처 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bangudae3.jpg>  
저작권 Ulsan Petroglyph Museum

## 편찬위원장



**김제형**  
quantum wave '25년 편집위원장,  
울산과학기술원 물리학과 교수



**이선경**  
quantum wave '26년 편집위원장  
한국표준과학연구원 책임연구원



**허준석**  
quantum wave 부편집위원장  
연세대학교 화학과/양자정보학과 교수

## 편찬의원



**김준기**  
성균관대학교 성균나노과학기술원/  
양자정보공학과 교수



**오창훈**  
한국과학기술원 물리학과 교수



**강동연**  
한국과학기술연구원(KIST)  
양자기술연구단 선임연구원



**임향택**  
한국과학기술연구원(KIST)  
양자기술연구단 책임연구원



**박지용**  
국립한밭대학교 기초과학부/  
응용광학과 교수



**채은미**  
고려대학교 물리학과 교수



**서준호**  
포항공과대학교 물리학과 교수



**인용섭**  
국방과학연구소 3연구원 1부 팀장

## 자문위원



**박권**  
고등과학원 물리학부 교수

quantum  
wave

불가능을 넘는 계산, 불확실을 넘는 항법.

# Quantum uration

## 양자 큐레이션

GPS가 사라져도 길을 잃지 않는 법: 양자 자기 항법의 첫 실전 검증

전기 회로에서 거시적 양자 터널링과 에너지 양자화의 발견

대규모 오류내성 양자 컴퓨팅을 향한 IBM 로드맵

광기반 양자 컴퓨팅 소자 기술

마법 상태 재배: 자원 효율적인 오류 허용 양자컴퓨팅의 구현을 향한 진전

“임계선을 넘어서” - 구글 Willow 칩이 연 양자 오류 정정의 새 시대

고체점결함(SiV in Diamond) 양자 메모리를 활용한 도시 규모 광통신망 얽힘 생성

레이저 없이도 가능한 이온 포획 큐비트의 확장가능한 고신뢰도 제어의 구현

Quantum Sensing

# Quantum-assured magnetic navigation achieves positioning accuracy better than a strategic-grade INS in airborne and ground-based field trials

## GPS가 사라져도 길을 잃지 않는 법 양자 자기 항법의 첫 실전 검증

### Quator

임영훈 선임연구원  
국방과학연구소

저자 Q-CTRL

저널 arXiv preprint

게재일 2025. 04. 10.

DOI 10.48550/arXiv:2504.08167



### KEY SUMMARY

호주 Q-CTRL 연구진이 기존의 GNSS (Global Navigation Satellite System) 기반 항법 시스템의 한계를 극복할 대안으로 여겨졌던 자기장 측정 기반의 항법(MagNav)을 양자 센서를 활용해서 처음으로 실전 적용하는데에 성공했다. 원자 기반의 양자 자기장 센서와 자기장 노이즈 제거 알고리즘을 함께 활용하여 비행과 지상 운행을 모두 성공적으로 수행하였고, 전략급 관성항법 장치(INS)보다 매우 뛰어난 위치 정확도를 보여주었다. 이를 통해 양자 센서를 활용한 항법 장치가 실전에도 적용될 수 있다는 가능성을 열었고, 이는 앞으로의 양자 센서 연구에 상징적인 결과가 될 것이다.

정확한 위치와 경로를 제공하는 기술은 현대 과학기술의 핵심적 역할을 담당해 왔으며, 이 가운데 위성항법(Global Navigation Satellite System, GNSS)은 다양한 장점과 높은 신뢰성을 바탕으로 오늘날 항법 시스템의 중심적 위치를 차지하고 있다. 그러나 극자해자·사막 등 위성 신호가 도달하지 않는 지역은 여전히 “지도 밖 영역”으로 남아 있고 전파 방해(jamming)와 가짜 신호 삽입(spoofing)과 같은 위협에도 상시적으로 노출되어 있다는 한계를 지닌다. 이를 보완하기 위한 대체 항법 기술 또한 대개 이동통신 기지국 등 외부 인프라의 지원이 필요하며, 여전히 전파 교란 위험과 낮은 실용성을 극복하지 못하고 있다.

이에 대한 보완책으로 제시된 것은 지구 자기장의 미세 변화를 감지한 후 이를 기존 지구 자기장 지도와 비교해 위치를 보정하는 방식인 자기 이상 항법(Magnetic Anomaly Navigation, MagNav)이다. 이 방식은 외부와의 위치 정보 교환이 없기 때문에 위치가 노출되지 않고 외부 환경에도 영향을 받지 않으며, 전파 교란에 의한 위협으로부터도 자유롭다. 하지만 수십 nT 수준의 아주 미세한 자기장을 정밀하게 감지하고, 측정 정차가 실려있는 플랫폼(선박, 비행기 등) 등에 의한 자기장 노이즈를 실시간으로 제거해내야 하기 때문에 지금까지는 기술적인 어려움에 가로막혀 있었다.

이번에 소개하는 논문은 이러한 기술적 장벽을 넘어선 사례로, 호주 Q-CTRL 연구진이 양자 자기장 센서를 활용해 ‘양자 보정 자기 이상 항법(Quantum-assured MagNav)’을 구현하고 실제 수천 km 규모의 비행 실험에 성공한 연구 결과를 다루고 있다.

본 논문에서 사용한 자기장 센서는 Optically pumped atomic magnetometer (OPAM)이다. 유리 증기셀에 담겨 있는 알칼리 원자의 스핀을 광펌핑을 사용하여 한 방향으로 정렬한 뒤에, 원자와 외부 자기장의 상호작용에 의해 스핀이 세차 운동하는 Larmor precession의 주기를 측정하여 이로부터 자기장의 크기를 알아낸다. 현재까지 개발된 원자 기반 자기장 센서는 10 cm 정도 크기에 증기셀, 레이저, 포토다이오드를 비롯한 구성요소들을 모두 탑재하면서도 수 nT의 자기장 변화를 충분히 탐지할 수 있는 수준까지 발전했고, 다양한 활용가능성을 바탕으로 국외 뿐만 아니라 국방과학연구소를 포함한 국내 산학연에서도 활발하게 연구 중이다. Q-CTRL의 양자 자기장 센서는 루비듐 원자를 사용했고, 약 10 cm, 70 g 정도로 매우 작고 민감도 또한 80 fT/sqrt(Hz) 정도로 세계 최고 수준이다 (그림 1).

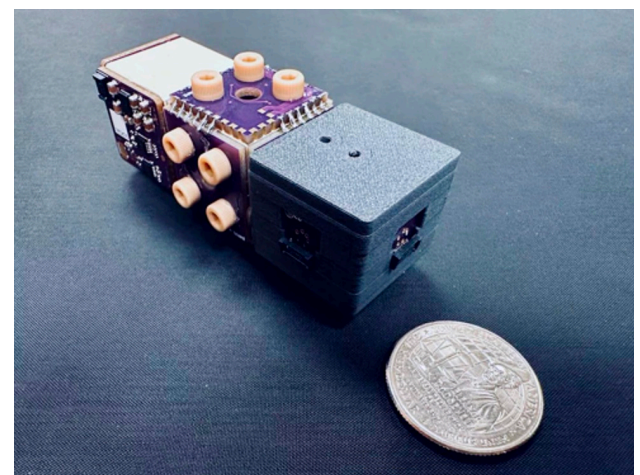


그림 1. 실험에 사용된 양자 자기장 센서 사진 (출처: Q-CTRL 홈페이지)

1. Q-ctrl.com/blog/darpa-selects-q-ctrl-to-develop-next-generation-quantum-sensors-for-navigation-on-advanced-defense-platforms  
 2. Yim et al., AIP Advances 12, 01

또, 이 실험에는 정확한 위치 정보를 얻기 위해서 정밀한 자기장 센서 뿐만 아니라 자기장 측정 보정 소프트웨어 스택이 적용되었다. 이를 위해서는 고도 및 날씨 등에 의한 지구 자기장 지도 변화의 반영에 더하여 플랫폼에 의한 자기장 노이즈 제거가 핵심이다. 자기장 신호를 기반으로 한 항법 보정 계산에 이러한 필터가 반복적으로 수행되는데, 이 스택의 뛰어난 점은 데이터에 대한 후처리가 반영되는 것이 아니라 비행 중에도 실시간으로 보정 값을 적용할 수 있다는 점이다. 더 놀라운 점은, 플랫폼에 대한 상세한 초기 정보 없이도(Cold start) 운행이 시작됐을 때부터 실시간으로 플랫폼 특성을 학습하고 점점 정교하게 만들어 플랫폼 기인 노이즈를 제거한다. 이는 특정 플랫폼과 환경 조건에서만 통용되던 기존의 일회성 보정 방식과 뚜렷하게 대비되는 접근으로, 어떤 플랫폼에도 즉시 적용 가능한 보편적·적응적 항법 기술이라는 점에서 큰 혁신성을 보여준다 (그림 2).

실제 현장 실험의 결과는 매우 놀랍다. 원자 기반의 스칼라 자기장 센서와 상용 벡터 자기장 센서가 결합된 MagNav를 사용하여 최대 19,000 피트 상공에서 6,700 km 이상을 비행할 수 있었다. 이 비행에서의 위치 정확도는 속도 보조가 적용된 관성 항법 장치(Inertial Navigation System, INS)를 사용했을 때보다 최대 46배 정확했고, 최종 위치 정확도는 약 22 m, 비행 거리의 0.006% 수준까지 떨어졌다. 또한, 양자 자기장 센서의 설치 위치가 항공기 외부일 때와, 자기장 노이즈가 약 10배 이상 높은 항공기 내부일 때를 가리지 않고 항상 INS보다 11~38배 향상된 위치 정확도를 보여주었다. 이는 Q-CTRL의 양자 자기장 센서와 노이즈 제거 알고리즘이 “매우 깨끗하고 정확한 지도”를 만들 수 있음을 시사한다. 또, 일반 화물차의 화물칸에 MagNav 시스템을 싣고 15-20 km 정도를 운행했을 때 최종 위치 오차 180 m, 약 7배 향상된 정확도를 달성했다. 이는 최초의 MagNav 기반 지상 실험이다 (그림 3).

결론적으로, 원자 기반의 양자 자기장 센서를 활용한 자기 이상 항법은 전략급 관성항법시스템 (INS) 보다 매우 우수한 위치 정확도를 보여줌과 동시에 외부 노이즈에 대해 안정적이고, 특별한 학습 데이터나 보정 기동 없이 현장에서 바로 재최적화를 할 수 있음을 보였다. 기존 위성시스템 기반 항법(GNSS)의 약점이었던 전파 교란 상황에서도 MagNav가 재활성화될 수 있음이 확인되며, 독립적 항법 기술로서의 실전적 가능성을 보여주었다.

물론 아직까지 보완해야 할 과제들이 산재해 있다. 자기장 지도는 아직 모든 지역에 대해 있는 것이 아니고, 자기장 변화가 적은 지역에서는 정확도가 떨어진다. 또, 태양 폭풍 등의 매우 강한 외부 노이즈는 자기장 변화 탐지를 어렵게 한다. 하지만, 이런 한계에도 불구하고 양자 자기장 센서를 활용한 MagNav가 논의 수준을 넘어서 실전에도 적용이 가능함을 보인 것은 굉장히 고무적이다. 여러 개의 자기장 센서 활용, 자기장 지도 개발 등의 개선이 뒤따른다면 GPS를 대신할 독립적 항법 체계로 자리잡을 것이다.

이러한 우수함을 바탕으로 미국 국방고등연구계획국(DARPA)는 기존 항법 시스템의 대안을 마련하기 위해 Q-CTRL과 약 2,440만 달러 규모의 계약을 맺고 군사용 항법 체계를 위한 차세대 양자 센서 개발을 추진하고 있다.<sup>1</sup> 비단 해외 뿐만 아니라 국내에도 다양한 산학연 연구진들이 양자 자기장 센서 개발 및 연구를 진행하고 있다. 국방과학연구소 또한 독자적인 원자 증기셀 제작 시스템을 구축하고<sup>2</sup> 이를 바탕으로 루비듐 원자 기반 원자 스핀 자이로스코프(Atom Spin Gyroscope)와 양자 자기장 센서 개발을 진행해오고 있다. 이러한 연구들을 계속 이어나가 중국에는 양자역학의 발전이 실험실 안의 미시세계에 머물지 않고, 실제 현실에서의 문제를 해결하기까지 확장되기를 기대한다.

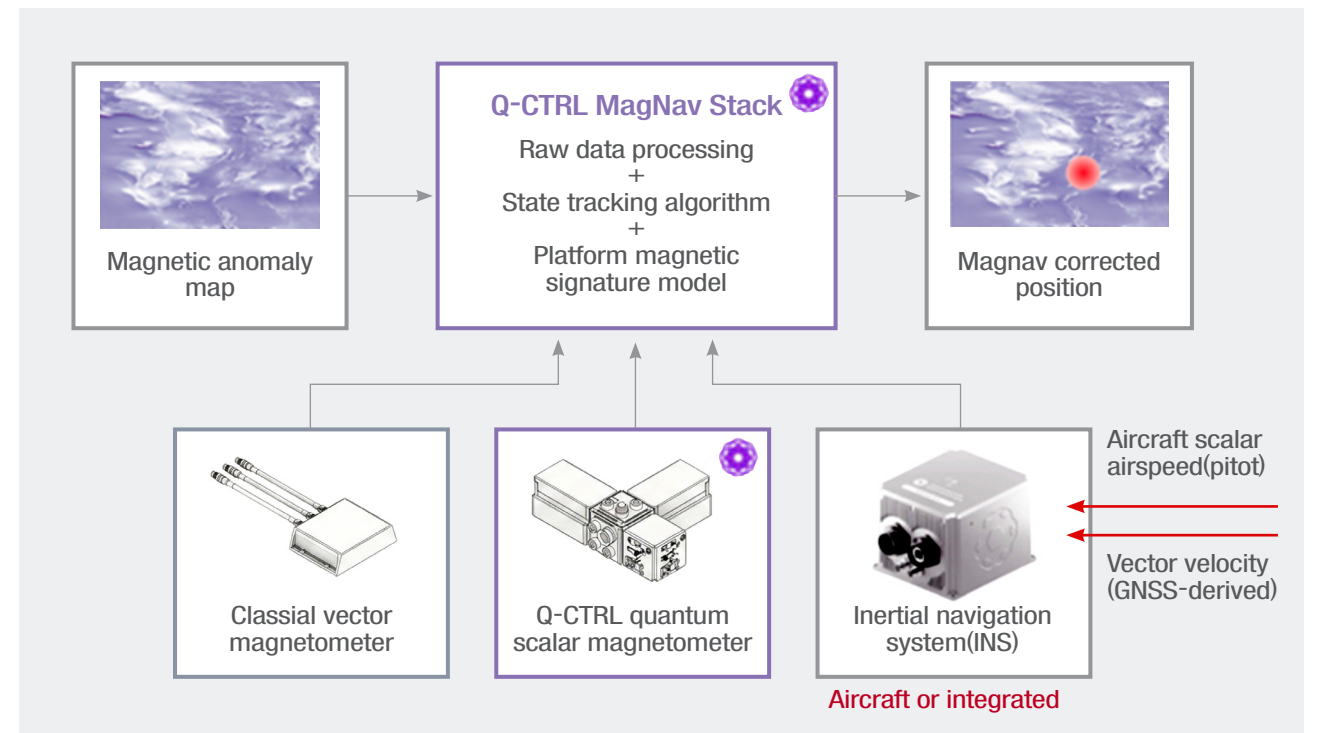


그림 2. Quantum-assured MagNav 시스템 아키텍처 (출처: arXiv:2504.08167)

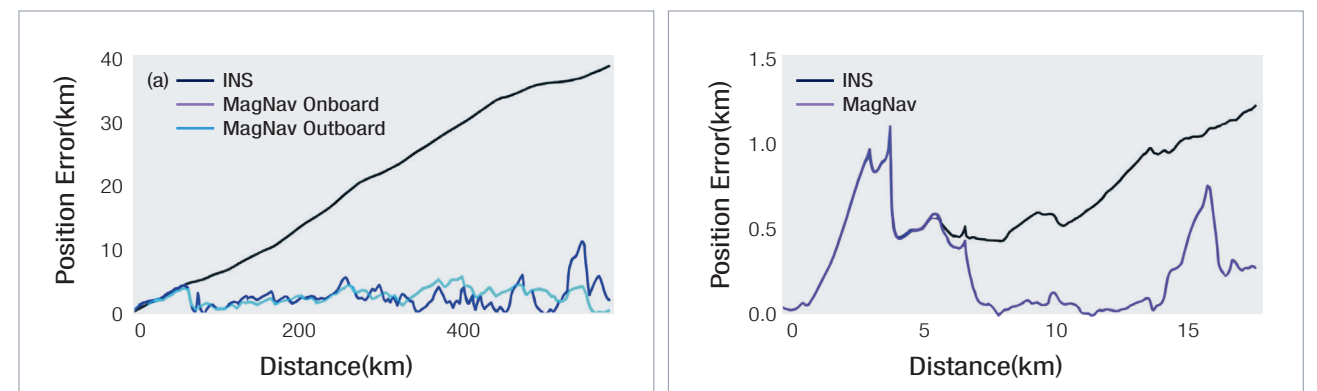


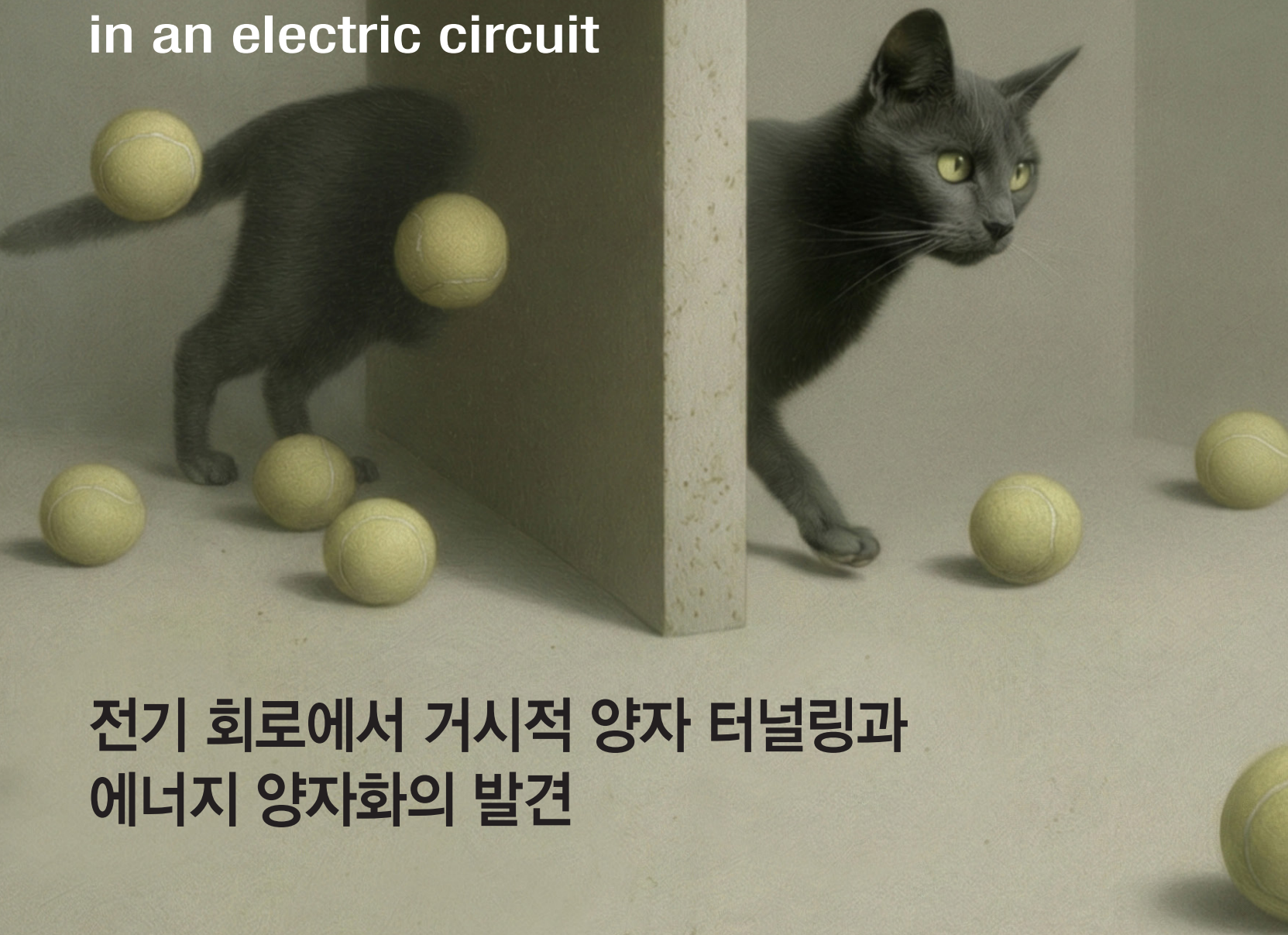
그림 3. 비행 실험(좌)와 지상 실험(우)에서의 MagNav와 INS 간 위치 오차 비교 (출처: arXiv:2504.08167)

### 연구분야의 현재와 미래

호주 Q-CTRL은 AI 기반의 양자 인프라 소프트웨어 분야를 선도하고 있는 글로벌 양자 기술 기업이다. 2017년에 설립되어 글로벌 양자 기술 기업, 스타트업, 연구소 등에 양자 컴퓨팅 하드웨어를 위한 소프트웨어를 제공하고 있다. 뿐만 아니라, 이번에 소개한 양자 자기 항법의 첫 실전 검증, 양자 중력계를 활용한 군함 운행 등 양자 항법 체계 개발을 선도하고 양자 항법 센서 연구를 선도하고 있다. 양자 항법 시스템은 2025년 타임지 “올해의 개발”에도 이름을 올렸다. 국내도 유수의 산학연이 원자를 사용한 양자 센서 개발 연구를 진행하고 있다. 특히, 원자 기반 자기장 센서는 일차적인 개발이 완료되어 필드 테스트를 진행하고 있고, 이를 기반으로 한 항법 체계 마련 또한 시야에 두고 있는 상황이다. Q-CTRL의 양자 항법 검증을 보며 국내외 수많은 연구팀들이 양자 센서의 활용도 및 시장성을 높게 평가하고 있을 것이라 생각한다. 국내에도 이미 관련 연구가 활발히 진행되고 있고 그 성과가 축적되고 있는 만큼, 가까운 미래에 자체 개발된 양자 센서가 실제 현장에 적용되기를 기대한다.

Quantum Computing

# Nobel Prize in Physics 2025: Macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit



## 전기 회로에서 거시적 양자 터널링과 에너지 양자화의 발견

### Curator

구지승 선임연구원  
한국표준과학연구원

카테고리 2025년 노벨물리학상 해설  
양자터널링  
노벨물리학  
에너지의양자화



### KEY SUMMARY

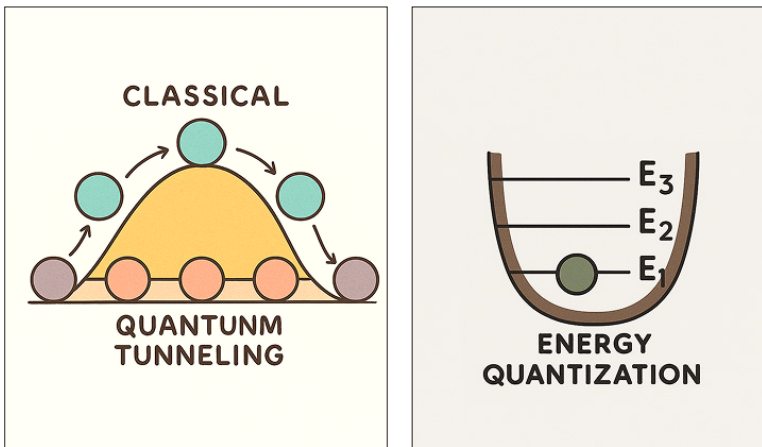
2025년 노벨 물리학상은 “전기회로에서 거시적 양자 터널링(macroscopic quantum tunneling)과 에너지의 양자화(energy quantization)의 발견”이라는 주제로 세명의 물리학자에게 수여되었다. 이들은 초전도 전기회로(superconducting circuits)라는 거시적인 세계에게 양자 터널링과 에너지 양자화라는 양자역학적 현상을 실험적으로 보여주었으며 양자역학을 미시적 세계(원자)에서 거시적 세계(전기회로)로 가져왔다. 그들의 연구결과는 초전도 양자컴퓨터의 토대가 되었으며 차세대의 양자 기술 발전을 위한 기회를 제공한다는 점에서 큰 의미가 있다.

노벨 물리학상 수상 개요

2025년 10월 7일 스웨덴 왕립과학원의 노벨상 위원회는 올해의 노벨 물리학상을 세명의 물리학자인 존 클라크(John Clarke), 미셸 데보레이(Michel H. Devoret), 그리고 존 마르티니스(John M. Martinis)에게 공동 수여하였다.



John Clarke, Michel H. Devoret, John M. Martinis. (출처: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary/>)



양자 터널링과 에너지 양자화에 대한 개념도

연구 주제는 전기 회로(electrical circuit)에서 일어나는 거시적 양자 터널링(macroscopic quantum tunneling)과 에너지 양자화(energy quantization) 현상의 발견이다. 관련 논문이 발표된 1980년대 중반 이후로 근 30년 만에 이 세명의 연구자들은 두 양자역학적 현상의 발견으로 노벨 물리학상을 수상하게 되었다. 양자 터널링은 어떤 입자가 고전적으로는 넘을 수 없는 에너지 장벽을 통과하는 양자역학적 현상을 말한다. 좋은 예로는 원자핵에서 발생하는 alpha decay 현상이 있다. 에너지 관점에서 보면 alpha 입자가 핵에서 분리되어 밖으로 탈출하는 것이 불가능하지만 양자 터널링 현상에 의해 에너지 장벽을 뚫고 탈출할 수 있다. 양자 터널링 현상이 전자나 원자핵과 같은 미시(microscopic) 세계에서 뿐만 아니라 전기 회로 같은 수많은 입자가 존재하는 거시적으로 큰 시스템에서도 양자 터널링이 일어날 수 있음을 발견하였다. 그리고 원자가 불연속적인 에너지 레벨을 갖고 있듯이 전기 회로에서도 에너지가 양자화된다는 것도 발견하였다. 전기 회로에서 거시적 양자 터널링과 에너지 양자화가 가능하다는 발견은 초전도 기반 양자 컴퓨터의 기본 단위가 되는 초전도 큐비트(superconducting qubit)의 토대가 되었다. 전기 회로에 인공원자(=큐비트)를 만들 수 있게 되었고 이 양자화된 시스템에서 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)같은 양자 현상을 구현할 수 있게 된 것이다. 초전도 기반 양자컴퓨팅의 미래 기술의 토대를 마련한 연구결과라고 말할 수 있다. 이번 물리학상이 초전도 큐비트 연구결과 자체에 주어진 것은 아니고 그 것을 가능하게 했던 두 물리현상의 발견에 수여가 된 것이다. 최근에 주목받고 있는 양자 컴퓨터에 대한 기대와 함께 그 기초가 되는 연구를 수행했던 연구자의 노력이 인정받은 것으로 생각된다 (그림 1).

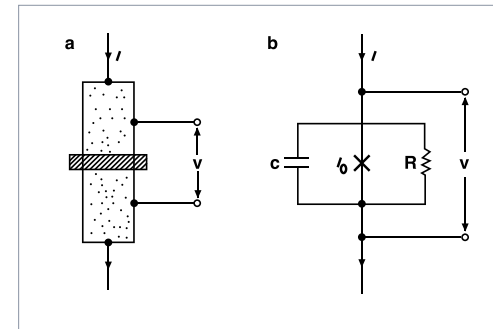


그림 1. (a) 조셉슨 접합은 두 초전도체 얇은 절연체로 나누어진 형태이다. 외부 전류를 가하면서 접합에 걸리는 전압을 측정할 수 있다. (b) 조셉슨 접합의 등가 전기회로를 표현한 것이다. (출처: Ref.[1])

조셉슨 접합과 스위칭 전류 측정

그럼 좀 더 자세히 수상자들의 연구결과에 대해 알아보도록 한다. 연구 결과는 1980년대에 수행한 실험결과가 시초가 되었다. 수상자들은 1985년에 미국 물리학회지 physical review letter에 두개의 중요한 논문을 발표하였는데 이 논문들은 조셉슨 접합으로 이루어진 초전도 회로를 이용하여 거시적 양자 터널링과 에너지 양자화 현상을 실험적으로 관찰한 내용이다. Ref.[1,2] 그 당시 세명은 같은 연구실 소속의 연구자들이었다. 존 클라크는 미국의 버클리대학(University of California, Berkeley)의 물리학과 교수였으며, 미셸 데보레이와 존 마르티니스는 각각 박사후연구원 그리고 박사과정 학생이었다. 그들은 당시 초전도체로 만들어진 전기 회로에 일어나는 양자역학적 현상에 대해 연구하고 있었다. 논문의 내용을 이해하기 위해서는 조셉슨 접합과 측정하는 물리량에 대한 조금의 이해가 필요하다. 그들이 만든 조셉슨 접합(Josephson Junction)은 두개의 초전도체와 그 사이에 있는 매우 얇은 절연체로 이루어진 접합소자이다 (그림 1a). 조셉슨 접합에 외부 전류(bias current)를 흘리면 얇은 절연체가 있음에도 불구하고 초전류(supercurrent)가 흐르는데 이를 조셉슨 효과(Josephson effect)라 부르고 이를 설명한 공로로 브라이언 조셉슨(Brian Josephson) 은 1973년에 노벨 물리학상을 수상하였다. 생각해보면 초전류가 흐른다는 것은 매우 신기한 현상이다. 왜냐하면 전자가 매우 얇은 절연체를 통과하는 것은 양자 터널링으로

설명 가능하지만 두개의 전자로 이루어진 쿠퍼쌍(Cooper-pair)이 얇은 절연체를 통과할 확률은 전자가 통과할 확률의 제곱으로 매우 작아서 설명이 어렵기 때문이다. 초전류가 절연체를 통과하여 흐르는 조셉슨 효과가 나타나는 이유는 초전도체내의 쿠퍼쌍들이 마치 하나로 이루어진 거시적 입자(macroscopic particle-like)처럼 행동하기 때문이다. 이를 기술하는 물리량은 초전도 질서 변수(superconducting order parameter)라고 부르는 양자역학에서 얘기하는 파동함수(wavefunction)이고 두 개의 파동함수사이의 위상차(phi)가 조셉슨 접합의 초전류의 크기를 결정한다.<sup>1</sup> 조셉슨 접합에 외부 전류를 흘리면 접합 내부에는 초전류(supercurrent)가 흐른다. 하지만 접합에 저항이 없기 때문에 Ohm's law에 의해 전압이 제로인 상태(zero-voltage state)로 유지가 된다. 하지만 조셉슨 접합에는 최대로 흐를 수 있는 임계 전류(critical current)가 존재하고 외부 전류가 임계 전류를 넘어서면 전압이 발생한다, i.e., zero-voltage 상태 벗어남. 그런데 실제로는 외부 전류가 임계전류에 도달하기 전에 zero-voltage 상태에서 벗어나 non-zero-voltage 상태로 바뀔 수 있다. 이 때의 초전류를 스위칭 전류(switching current)라 부른다. 이 스위칭 현상은 열에너지 또는 거시적 양자 터널링 현상에 의해 일어나게 된다. 세 연구자들은 온도를 낮춰가면서 스위칭 전류의 반복적인 측정을 통해 거시적 양자 터널링 현상을 관찰할 수 있었다.

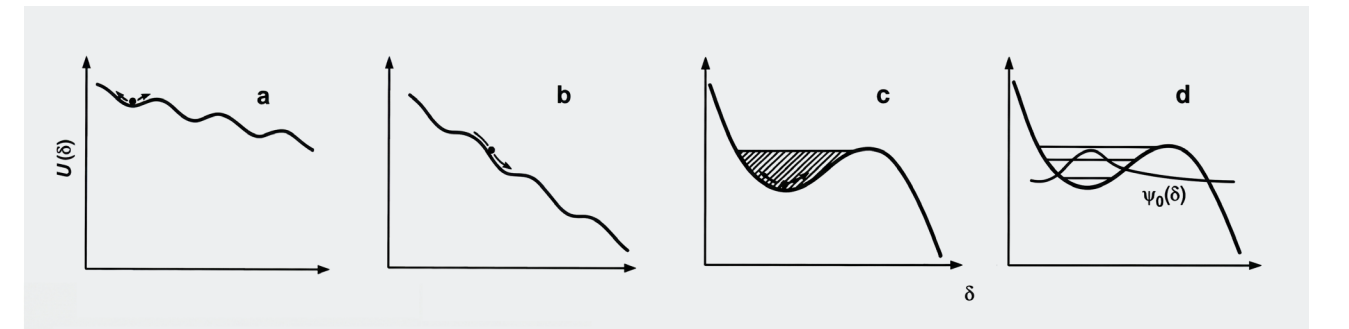


그림 2. (a) 외부 전류가 임계전류보다 작은 경우로 가상 입자가 에너지 우물에 갇혀서 zero-voltage 상태를 유지한다. (b) 외부 전류가 임계전류보다 큰 경우로 가상 입자가 washboard potential을 굴러 내려가고 조셉슨 접합에 전압이 나타난다. 가상 입자가 (c)불연속적인 에너지를 가진 경우와 (d) 불연속적인 에너지를 가진 경우의 에너지를 시각화하였다. (출처: Ref.[1])

전기 회로에서 거시적 양자 터널링 현상의 발견

이 스위칭 전류 측정으로부터 어떻게 거시적 양자터널링 현상을 발견했는지를 이해하기 위해서 외부 전류가 인가된 조셉슨 접합을 기술하는 방식을 이해할 필요가 있다. 조셉슨 접합의 전기회로 모델 (그림 1b)을 통해서 조셉슨 접합의 작동을 우리가 직관적으로 이해하기 쉬운 특정 위치에너지를 가진 가상 입자(phase particle)의 역학적 운동으로 기술할 수 있다 (그림 2). 주기적으로 연속된 언덕같은 형태의 위치에너지는 기울어진 빨래판처럼 보여서 tiled washboard potential이라고 불린다. 인가하는 전류가 증가하면 washboard potential의 기울기가 증가하게 된다. zero-voltage 상태는 이 가상 입자가 washboard potential의 에너지 우물(potential well)에 갇혀 움직이지 못하는 것에 대응된다 (그림 2a). 반면에 외부 전류를 증가시켜 기울기가 충분히 커지면, 예를 들어, 임계 전류보다 커지면, 에너지 장벽이 사라지기 때문에 아래로 계속 굴러 내려가게 되고 이 경우 전압이 나타나게 된다 (그림 2b). 하지만 에너지 장벽이 존재할 때라도 열에너지가 충분하면 입자가 장벽을 넘어가서 아래로 굴러 내려가게 되어 전압이 나타날 수 있다. 이런 프로세스를 thermal activation이라고 부르며 가상 입자가 에너지 장벽을 벗어나게 된다. 비유를 들자면 설악산에 있는 흔들바위를 여러 명의 사람들이 같이 힘을 맞추지 않고 미는 것과 비슷하다. 어떤 순간 힘이 맞으면 충분한 힘이 모아지면 바위는 제자리를 벗어나 산 아래로 굴러 가게 될 것이다. 에너지 장벽을 탈출해서 zero-voltage 상태에서 벗어나는 속도(escape rate)는 온도와 에너지 장벽의 크기에 의존하며 온도가 높거나 에너지 장벽이 낮을수록 이 escape rate이 크다.<sup>2</sup>

1. 조셉슨 방정식(I=I\_c sin(phi))은 접합에 흐르는 초전류와 위상차의 관계를 기술한다. 여기서 I=초전류, I\_c=임계전류, phi=접합의 위상차  
2. Escape rate은 화학에서 물질의 반응 속도와 온도를 설명하는 Arrhenius law를 따른다.

실제 실험에서는 스위칭 전류를 반복적으로 측정하고 이 데이터로부터 가상 입자가 zero-voltage 상태를 탈출하는 escape rate을 측정하였다. 편의를 위해 effective escape temperature라는 유효 탈출 온도(Tesc)가 사용되었다. Arrhenius law에 따라 가상 입자의 escape rate에 대응하는 유효 탈출 온도라는 의미이다. 화학반응에서 온도가 높을 때 반응속도가 빨라지는 것과 같이 유효 탈출 온도가 높은 것은 에너지 장벽을 탈출하는 escape rate이 높은 것에 해당한다. 연구자들은 스위칭 전류를 온도에 따라 측정하여 유효 탈출 온도와 실제 온도를 같이 그래프에 표시하였다 (그림 3). 온도가 높을 때는 thermal activation에 의한 escape rate이 우세하기 때문에 유효 온도와 실제 온도가 거의 같이 변한다. 하지만 온도가 내려가면 유효 온도가 대각선에서 벗어나기 시작하고 유효 온도에 특정 온도에 수렴하게 된다. 열에너지에 충분하지 않아도 thermal activation에 의한 escape rate이 사라져도 - 고정된 escape rate이 존재한다는 것을 의미한다. 이것은 가상 입자가 에너지 장벽을 통과하는 양자 현상인 거시적 양자 터널링 현상의 증거이다! 열에너지가 없어도 가상 입자는 washboard potential의 에너지 장벽을 통과하는 비율이 항상 존재하는 것이다. 이 양자 터널링 속도는 에너지 장벽의 높이와 폭에 의해서만 결정될 것이다. 물론 escape rate의 saturation 현상은 양자 터널링이 아니더라도, 예를 들면, 주변의 전자기적 잡음에 의해 설명이 될 수도 있다. 따라서 조셉슨 접합으로 오는 잡음을 최소화하는 실험적 기술들도 세명의 연구자들에 의해 개발되었다. 후속 실험에서 발견한 에너지 양자화는 전자기적 잡음으로는 설명이 되지 않으며 거시적 양자 터널링과 함께 연구자들의 인정을 받게 되었다 .

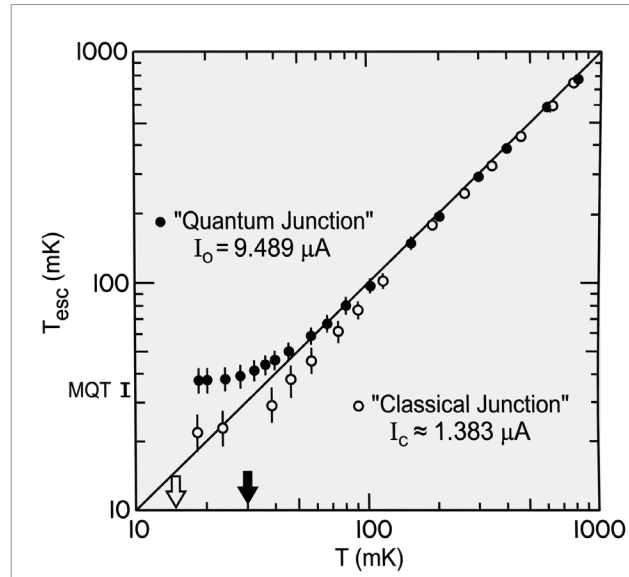


그림 3. 유효 탈출 온도(effective escape temperature)를 실제 온도와 같이 표시하였다. 온도가 낮아지면서 "Quantum Junction"의 유효 탈출 온도가 이론적으로 예측된 포인트 (y축에 MQT로 표시된 곳에 근접한다. "Classical Junction"은 사용된 샘플에 자기장을 걸어서 임계전류를 일부러 낮춘 것을 나타낸다. MQT 온도가 낮아지는 점으로부터 샘플의 온도가 실제로 낮아짐을 보여준다. (출처: Ref.[2])

전기회로에서 에너지 양자화의 발견

거시적 양자 터널링의 발견 후 얼마 지나지 않아 세명의 같은 연구자들은 전기 회로와 같은 거시적 세계에서 에너지가 양자화 된다는 것을 발견하였다. 전기회로를 기술하는 거시적 파라미터(macrosopic variable)가 양자역학의 법칙을 따른다는 것은 보여준 중요한 결과이다. 이를 위해서 연구자들은 조셉슨 접합에 마이크로웨이브 (GHz 주파수 영역)를 가해주면서 zero-voltage 상태에서 전기회로의 에너지가 양자화되어 있다는 실험결과를 발표했다. 이를 위해 마찬가지로 스위칭 전류 측정을 하면서 특정 마이크로웨이브 주파수를 인가하였다. 특정 주파수의 마이크로웨이브를 가했을 때 zero-voltage상태를 탈출하는 비율이 증가하는 현상이 나타났다 (그림 4a). 이 현상의 이유는 가상 입자가 낮은 에너지에서 높은 에너지 상태로 올라가면 에너지 장벽의 높이가 낮아지므로 양자 터널링 비율이 증가하기 때문이다. 이런 터널링 증가 현상이 특정 주파수에서 일어나는 것은 에너지가 연속적이 아닌 양자화되어 있다는 것의 증거였다. 즉 특정 에너지의 광자만을 흡수하거나 방출할 수 있다. 원자의 에너지 레벨이 양자화되어 있듯이 전기 회로와 같은 거시적인 물체에서도 미시세계에서 나타나는 에너지 양자화가 가능함을 보여준 것이다. 초전도체로 구성된 전기 회로를 이용하여 인공적으로 양자 시스템을 구성할 수 있게 된 것에 큰 의미가 있다.

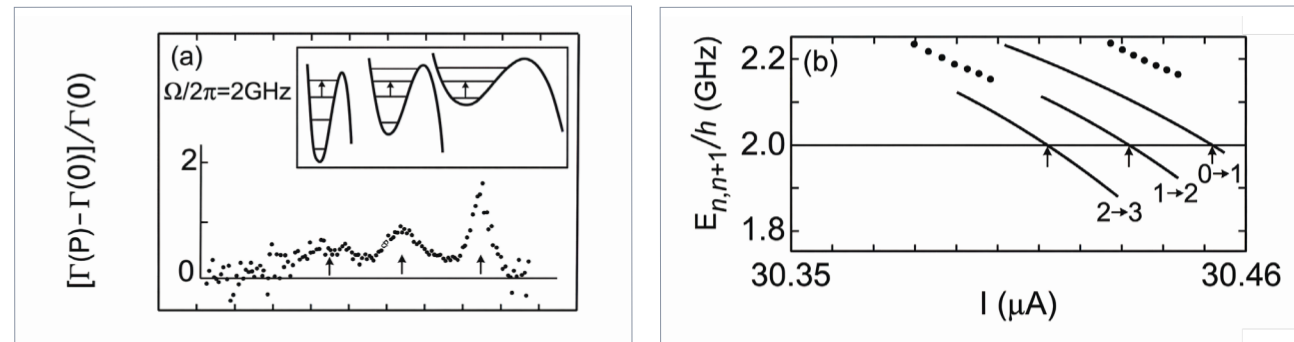


그림 4. (a) 조셉슨 접합에 2 GHz의 마이크로웨이브를 조사하면서 스위칭 전류 측정을 통해 escape rate을 측정하였다. 특정 외부 전류에서 escape rate이 증가함을 보여준다. 데이터에서 검은색 화살표는 2->3, 1->2, 0->1 상태의 에너지 전이에 해당된다. (b) 계산된 에너지 레벨 간격(E\_{n+1}-E\_n)을 외부 전류의 함수로 표시하였다. 검은색 화살표는 마이크로웨이브와 공진이 예상되는 외부 전류값을 나타낸다. (출처: Ref.[2])

연구분야의 현재와 미래

초전도 회로의 양자화된 에너지 레벨에서 가장 낮은 두 에너지 상태를 큐비트(qubit)로 사용할 수 있다. 이런 전기회로를 큐비트로 이용할 때 장점 중 하나는 큰 전자기적인 cross-section을 갖고 있기 때문에 축전지나 인덕터 같은 선형 전기 회로 컴포넌트와 다른 큐비트와 쉽게 커플링이 된다는 점이다. 최초로 1990년도에 초전도 회로를 이용해서 0과 1의 에너지 상태를 갖는 최초의 큐비트인 charge qubit가 만들어졌다. 일본의 야스노부 나카무라(Yasunobu Nakamura)는charge qubit에서 0(기저상태)과 1(들뜸상태)사이에서 결맞음 진동(coherence oscillation)을 관찰하는데 성공하였다. 이는 0과 1사이에 양자 중첩(superposition)을 만들 수 있다는 의미이며 이는 양자 컴퓨팅에서 단일 양자 게이트의 기초가 된다. Charge qubit외에도 phase qubit와 flux qubit 연구가1990년대부터 2000년대 초반까지 활발히 이루어 졌다 (그림 5). 이 세개의 기본적인 큐비트들은 모두 초전도체 기반의 조셉슨 접합, 축전기, 인덕터 등으로 구성된 전기 회로이다. 이제 사람들은 양자컴퓨터의 기본 단위인 큐비트 또는 인공원자를 초전도 회로에서 구현하고 양자 상태를 제어하고 이용할 수 있게 되었다. 2007년에는 트랜스몬(transmon)이라는 변형된 charge qubit이 보고되었고 현재까지 대부분의 초전도 양자 컴퓨팅연구에서 사용되고 있다.<sup>3</sup> 근 20년간 초전도 큐비트 연구에서는 눈부신 성장이 있어 왔다. 큐비트가 양자상태를 유지할 수 있는 시간인 결맞음 시간은 charge qubit의 수 ns에서 트랜스몬의 수백 μs 까지 10만 배 이상 증가하였다. 노벨 물리학상 수상자들도 이렇게 자신들의 연구가 현재의 결과로 이룰 것 이라고 예상하지는 못했을 것이다. 이번 노벨 물리학상의 의미는 최근에 주목받고 있는 초전도 양자컴퓨팅의 근간이 되는 물리적 현상의 발견을 인정받은 것일 것이다. 1980년대 이 세명의 수상자들의 노력이 없었다면 현재 초전도 큐비트도 존재하지 않았을지도 모른다. 미셸 데보레이와 존 마르티니스는 각각 Google quantum AI에서 양자 컴퓨팅 수석 책임연구원과 Qolab이라는 스타트업 회사의 CTO로 초전도 기반 양자컴퓨팅 연구개발을 활발히 하고 있다. 가까운 미래에 모두가 바라는 범용적인 결함허용 양자 컴퓨터(Universal fault-tolerant quantum computer)의 출현을 그들과 함께 할 수 있기를 기대해 본다.

3. 초전도 큐비트 관련 참고 [https://wiki.qisk.or.kr/%EC%B4%88%EC%A0%84%EB%8F%84\\_%ED%81%90%EB%B9%84%ED%8A%B8\\_\(Superconducting\\_Qubit\)](https://wiki.qisk.or.kr/%EC%B4%88%EC%A0%84%EB%8F%84_%ED%81%90%EB%B9%84%ED%8A%B8_(Superconducting_Qubit))

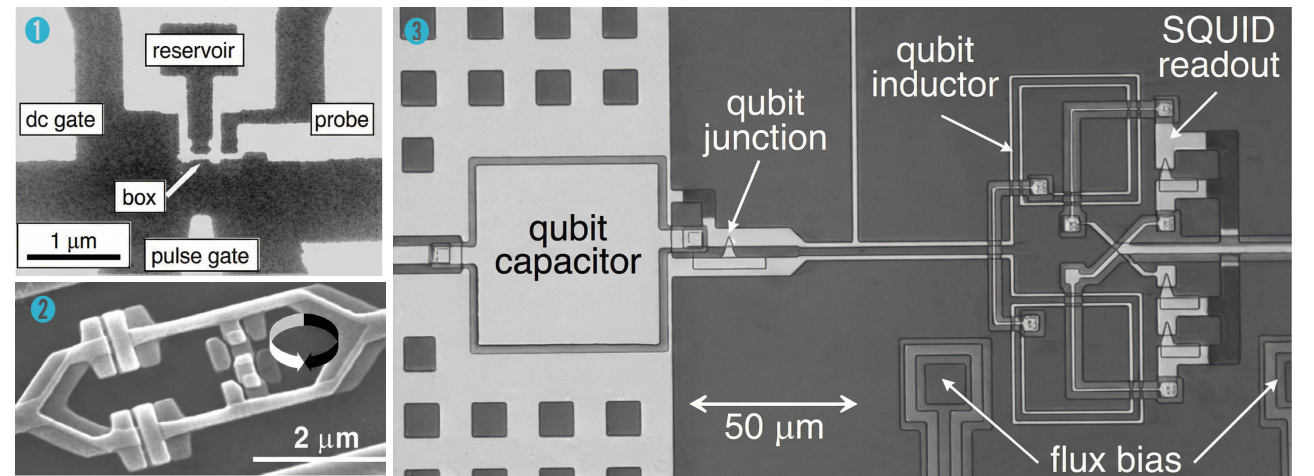
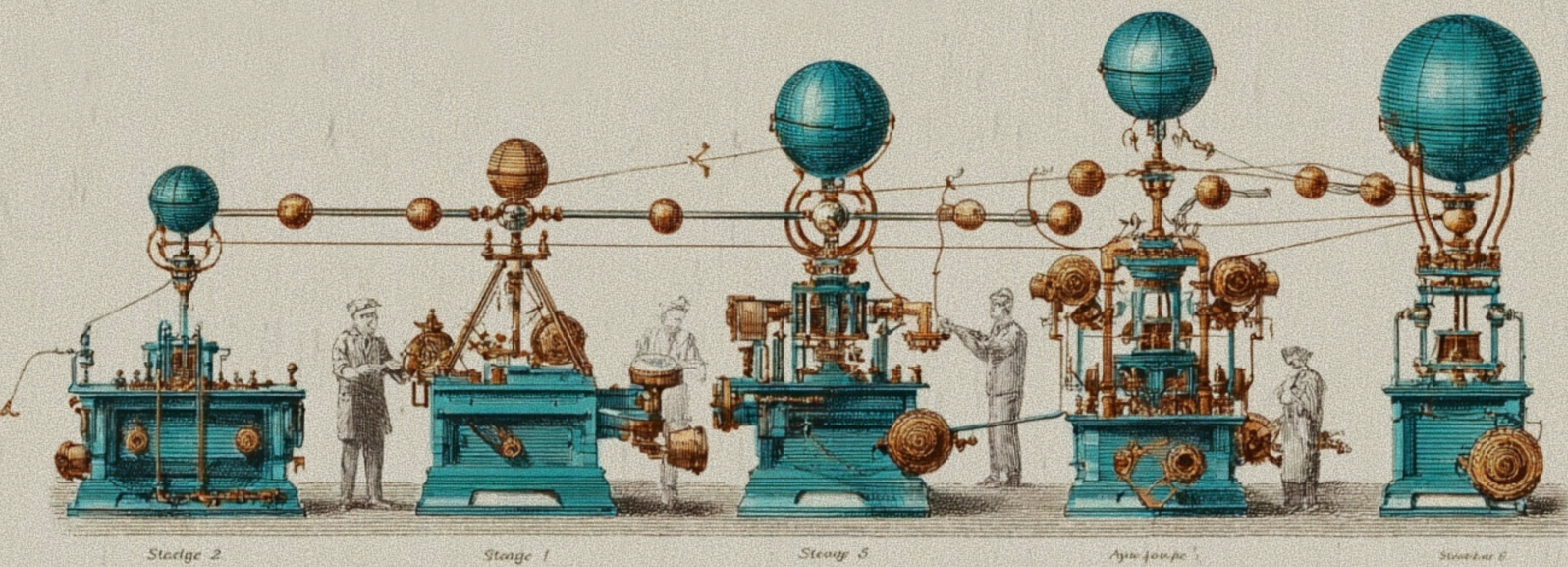


그림 5. ① charge qubit, ② flux qubit, ③ phase qubit. (출처: Ref. [3,4,5])

참고문헌연구

1. Michel H. Devoret, John M. Martinis, and John Clarke, "Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction", Phys.Rev.Lett. 55 1908 (1985)
2. John M. Martinis, Michel H. Devoret, and John Clarke, "Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction", Phys.Rev. Lett. 55, 1543 (1985)
3. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin and J. S. Tasi, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", Nature 398, 786 (1999)
4. I. Chiorescu, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans, J. E. Mooij, "Coherent Quantum Dynamics of a Superconducting Flux Qubit", Science 299, 1869 (2003)
5. J.M. Martinis, "Superconducting phase qubits", Quantum Inf Process 8, 81-103 (2009).
6. Press release. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Sun. 2 Nov 2025. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>
7. Popular information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Sun. 2 Nov 2025. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/popular-information/>
8. Advanced information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Sun. 2 Nov 2025. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/advanced-information/>

# How IBM will build the world's first large-scale, fault-tolerant quantum computer



## 대규모 오류내성 양자 컴퓨팅을 향한 IBM 로드맵

### Curator

권혁준 교수  
고등과학원 계산과학부

저자 1) Theodore J. Yoder, Eddie Schoute, Patrick Rall, Emily Pritchett, Jay M. Gambetta, Andrew W. Cross, Malcolm Carroll, Michael E. Beverland (IBM Quantum).  
2) Tristan Müller, Thomas Alexander, Michael

저널 arXiv preprint

게재일 2025-06-02

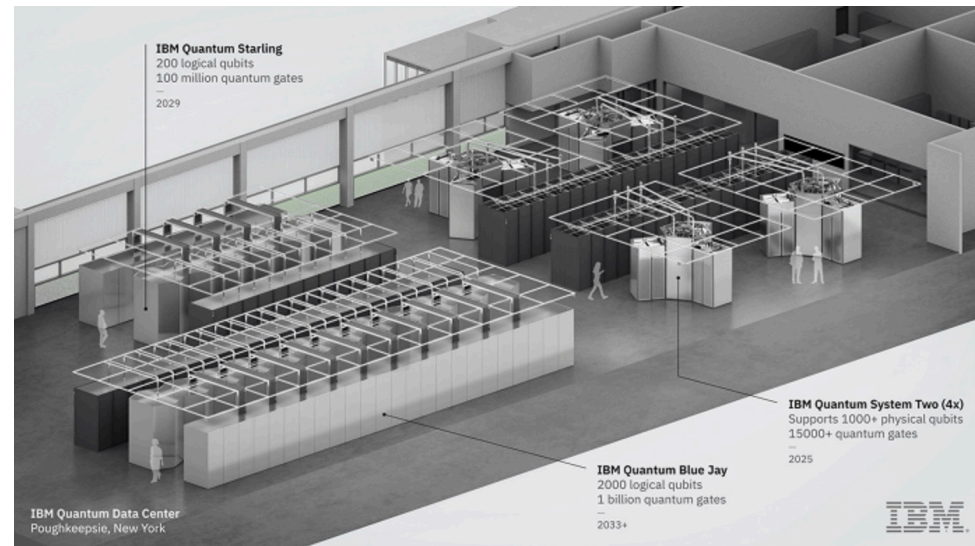
DOI 10.48550/arXiv.2506.03094 10.48550/arXiv.2506.01779

### KEY SUMMARY

IBM Quantum 연구팀은 대규모 오류내성 양자컴퓨팅을 위한 로드맵을 2025년 6월에 발표하였다. 로드맵의 주요 목표는 2029년까지 1억개의 논리 연산을 200개의 논리 큐비트에 적용 가능한 양자컴퓨팅 하드웨어 스타링(Starling)을 개발하고, 이를 확장하여 2000개의 논리 큐비트에 10억개의 오류내성 논리 연산이 가능한 하드웨어 블루제이(Blue Jay)를 2033년까지 개발하는 것이다.



2025년 6월, IBM은 대규모 오류내성 양자컴퓨팅에 대한 로드맵(링크: <https://www.ibm.com/quantum/technology#roadmap>, 한글기사 링크: <https://kr.newsroom.ibm.com/announcements?item=122812>)을 발표하였다. 로드맵의 최종적인 목표는 2033년까지 2000개의 논리 큐비트를 10억개의 양자연산이 가능하도록 하는 수준의 양자 프로세서인 블루제이 (Blue Jay)를 뉴욕주의 포킵시(Poughkeepsie, New York)에 위치한 IBM 양자 데이터 센터에 만드는 것으로, IBM이 대규모 오류내성 양자컴퓨팅을 위한 여정의 출발선에 섰다고 할 수 있겠다. IBM에서 구현하고자 하는 초전도 플랫폼에서의 물리적 큐비트(논리 큐비트가 아니다)의 숫자가 1000군처에 머무르고 있다는 점으로 미루어 볼 때, 상당한 규모의 자본 투입이 가능한 세계적 기업의 입장에서조차 충분히 도전적인 과제라는 것은 분명해 보인다.



IBM 대규모 오류내성 양자 컴퓨터 개요 (출처: <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>)

그렇기에 IBM에서는 이렇게 도전적인 목표를 이루기 위한 로드맵을 두 편의 연구 논문(arXiv.2506.03094, arXiv.2506.01779)을 함께 발표하며 구체적으로 제시하였는데, 보다 자세한 내용은 IBM의 블로그(링크: <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>)에서 확인할 수 있다. 본 양자 큐레이션 글에서는 로드맵에 드러난 핵심 키워드를 바탕으로 IBM에서 세우고 있는 대규모 양자 컴퓨터 개발 계획에 대해 살펴보도록 하겠다.

### 양자오류정정이 가능한 논리 큐비트 생성과 오류내성 양자 컴퓨팅

오류내성 양자 컴퓨팅의 핵심을 관통하는 키워드는 양자오류정정이다. 일반적으로 양자계는 외부의 잡음에 취약하기 때문에 양자 정보의 저장 및 연산 과정에 있어 높은 오류율이 발생하며, 이는 많은 수의 양자 연산이 필요한 실용적 양자 알고리즘의 구현에 있어 가장 큰 걸림돌이 된다. 이를 해결하기 위해, 양자 연산에 사용되는 양자정보(논리적 큐비트)를 여러 개의 물리적 큐비트에 나누어 저장하고, 모니터링하여 오류를 식별 및 수정하는 방식의 양자오류정정이 필수적이다. 이때, 논리적 큐비트를 어떠한 식으로 물리적 큐비트에 저장할 것인지가 핵심이 되는데, 왜냐하면 어떠한 방식으로 오류정정 코드를 구성하는지에 따라서 저장할 수 있는 논리적 큐비트의 숫자가 크게 달라질 수 있기 때문이다.

IBM과 구글 등으로 대표되는 초전도 기반 양자 컴퓨팅에서는 주로 표면코드(Surface code)를 사용하여 오류정정을 연구해 왔다. 양자 큐레이션의 이전 두 글 (오창훈 교수님: <http://quantumwave.co.kr/curation/view/id/3>, 이석형 교수님: <http://quantumwave.co.kr/curation/view/id/5>)에서 이미 표면코드에 대한 구글 연구팀의 결과가 훌륭하게 소개가 되어 있으니, 함께 읽어봐도 좋겠다.

이러한 표면코드는 qLDPC코드의 한 종류이며, qLDPC코드는 (quantum low-density parity check code, 저밀도 패리티 검사 코드)의 약자로 그 이름에서 알 수 있듯이, 오류를 모니터링하기 위해서 측정해야 하는 물리적 큐비트의 숫자가 적은 코드를 의미한다. 실제로 4개의 인접한 물리적 큐비트에 대한 모니터링만으로 양자오류 정정이 가능하다는 장점으로 인해 초전도 플랫폼을 비롯하여 다양한 플랫폼에서 가장 활발하게 연구되었음에도 불구하고, 표면코드의 가장 큰 약점은 큐비트 숫자가 늘어나는 경우 그 확장성이 제한된다는 점이다.

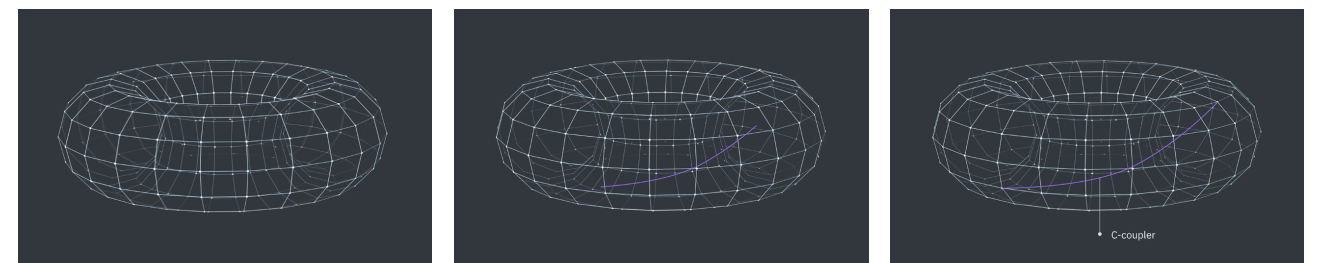
역설적이게도, 오류정정이 인접한 물리적 큐비트에 대한 모니터링만으로 가능하다는 장점이 코드의 구조를 단순화시켜 물리적 큐비트 숫자가 증가함에 따라 저장할 수 있는 논리 큐비트의 숫자를 제한하게 되는 것이다.

그렇다면, 자연스럽게 따라오는 질문은 표면코드의 한계를 극복하기 위해서 어떠한 qLDPC코드를 선택할 것인가에 있다.

### 표면코드의 연결성 확장을 통한 새로운 오류정정 코드 개발

이에 대한 해답을 IBM의 로드맵에서는 기존의 표면코드에 먼 거리의 물리적 큐비트 간의 상호작용을 추가하여, 새로운 qLDPC코드를 만드는 것에서 찾고 있다. 이러한 추가적인 물리적 큐비트들간의 연결성은 기존 표면 코드의 기본적 골격을 유지하여 오류 식별을 위해 모니터링해야하는 큐비트의 수는 비슷한 수준으로 유지하면서도 같은 물리적 큐비트에 저장가능한 논리 큐비트의 숫자를 비약적으로 향상시킬 수 있게 해 준다. 그러나, 큐비트간의 장거리 상호작용은 구현이 매우 까다롭기 때문에, 최대한 적은 수의 장거리 상호작용을 통해 여전히 많은 수의 논리 큐비트를 저장할 수 있는 오류정정 코드를 찾는 것이 중요한 문제이며, IBM 연구팀에서는 이를 위해 2024년에 bivariate bicycle(BB) 코드를 개발하여 Nature지에 발표한 바 있다 [Nature volume 627, pages778-782 (2024)].

IBM의 오류내성 양자 컴퓨팅의 기본 단위는 위에서 설명한 BB 코드를 바탕으로 한 Gross 코드가 되며, 보다 구체적으로는 144개의 물리적 큐비트를 이용하여 12개의 논리 큐비트를 저장하는 것을 시작으로 한다. 참고로 Gross는 12다스, 즉 144 를 나타내는 단위이다. 여기에 오류를 식별하기 위해 필요한 측정 큐비트가 추가로 144개 필요하기 때문에 총 288개의 물리적 큐비트가 연산을 위한 하나의 작은 단위로서 작동하게 된다. 이를 통해 기존의 표면코드에서 필요한 것보다 10배가량 더 적은 물리적 큐비트를 가지고도, 논리적 큐비트의 오류율에 있어서는 비슷한 성능을 보일 수 있을 것으로 IBM은 전망하였다.

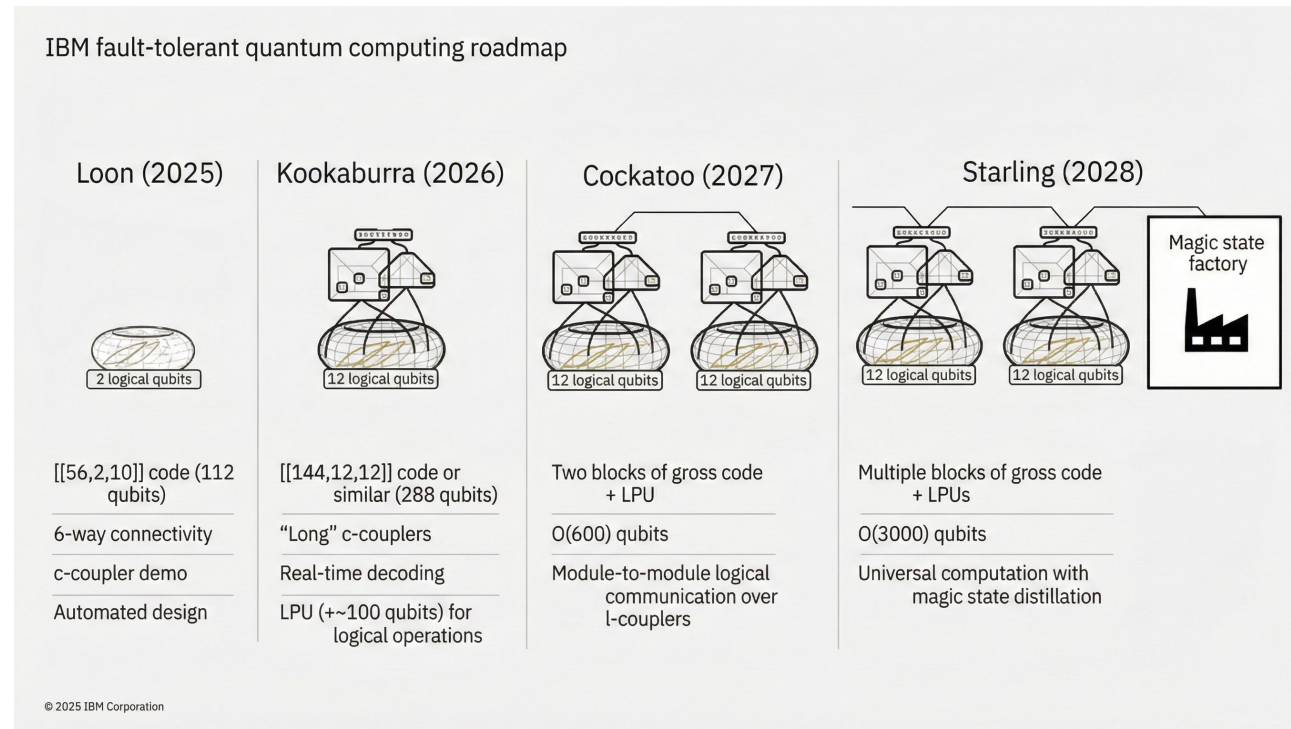


Gross Code. C-coupler를 통해 물리적 큐비트 간의 추가적인 연결성을 확보한다.(출처: <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>)

IBM로드맵에서는 2025년에 IBM 룬(Loon)을 통해 장거리 연결성이 추가를 통해 논리적 큐비트의 효율적인 저장이 가능한 양자 프로세서를 새롭게 선보일 것을 목표로 제시하였으며, 이를 보다 발전시킨 IBM 쿡카부라 (Kookaburra)를 통해 2026년에는 논리적 양자 연산 및 오류정정이 실제로 가능함을 증명할 것으로 예상된다.

### 모듈형 양자 프로세서

그렇지만, 앞서 살펴본 Gross코드로 구현된 12개의 논리 큐비트는 여전히 대규모 양자 컴퓨팅이라 부르기에는 적은 수이다. 이에 대한 해결책으로 IBM은 작은 단위인 12큐비트를 연결하며 더 큰 규모의 논리 큐비트를 만드는, 모듈형 양자프로세서를 로드맵의 다음 과정으로 제시하고 있다. IBM은 이러한 양자 프로세서 간의 연결을 위한 어댑터를 l-coupler로 명명하고, 선행 기술을 IBM 플라밍고(Flamingo)에서 작년에 구현한 바 있다. 이러한 논리 큐비트 모듈간의 연결을 통해 확장성을 꾀하는 동시에, 범용 양자 연산을 위해 필요한 마법 상태(magic state, 이석형 교수의 이전 큐레이션 글 <http://quantumwave.co.kr/curation/view/id/5> 참조)를 자연스럽게 증류하여 원하는 때에 쓸 수 있도록 만드는 것이 목표이다.



IBM의 모듈형 양자 프로세서 로드맵 (출처: <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>)

보다 구체적으로 IBM은 2027년까지 IBM 코카투(Cockatoo)를 통해 두 개의 쿠키부라 모듈을 연결하여 두 모듈 간의 양자 얽힘을 검증하는 것을 로드맵의 다음 목표로 제시한다. 이후 이러한 모듈간 연결성을 더욱 확장하여 2028년에는 200개의 논리 큐비트를 가지는 IBM스타링 칩을 발표할 계획이며, 궁극적으로는 모듈로 연결된 2000개의 논리 큐비트를 IBM 블루제이(Blue Jay)를 2033년까지 만들어 내는 것이 로드맵의 최종 목표이다.

### 빠르고 효율적인 디코딩 알고리즘

마지막으로 주목해야 할 키워드는 양자 오류정정의 새로운 디코딩 방식에 있다. 오류정정 코드의 물리적 큐비트를 모니터링하여 어느 위치에서 오류가 발생하였는지 고전 알고리즘을 통해 식별하는 과정을 일반적으로 디코딩 과정이라고 부르는데, 디코딩에 걸리는 시간이 큐비트가 양자 정보를 저장할 수 있는 시간보다 길어진다면, 당연히게도 오류정정은 더이상 효과적인 방식이지 않게 된다. 문제는 대규모 오류내성 양자 컴퓨팅에서 물리적 큐비트의 숫자가 늘어남에 따라 식별해야 할 오류의 숫자 또한 기하급수적으로 증가하여 디코딩이 어려워진다는 점인데, 고전 컴퓨터의 연산 및 정보 처리 능력이 양자 컴퓨터의 성능을 제한하는 상황이라 할 수 있겠다.

IBM은 이러한 기술적 장벽을 넘기 위해서, 고전 컴퓨터의 연산 능력을 최대한으로 활용하여 오류의 발생여부를 확률적으로 추론하는 믿음 전파(Belief Propagation) 방식을 기반으로 하여 Gross 코드에 특화된 새로운 디코딩 알고리즘을 제시한다(<https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.01779>). 이러한 믿음 전파를 활용한 디코딩 방식은 Union Finding등을 비롯한 확률기반이 아닌 결정론적 디코딩 방식과 비교하여 IBM에서 목표로 하는 복잡한 연결성을 가지는 대규모 큐비트에 대해 더 좋은 효율을 보이며, 오류가 불균일하게 일어나는 실제 하드웨어의 노이즈 모델의 특성을 반영하기가 더 쉽다는 강점을 지닌다. 더 나아가 IBM은 이러한 디코딩 프로토콜을

컴퓨터와의 정보 전달 없이 오류식별 과정을 FPGAs(Field-Programmable Gate Arrays) 혹은 통합된 칩(Application Specific Integrated Circuits, ASICs)에서 동작하도록 만드는 것을 목표로 삼고 있는데, 이는 큐비트의 모니터링 결과를 고전 컴퓨터에 전달하고 식별된 오류를 다시 양자 프로세서로 보내는 과정에서 오는 시간차를 없애 디코딩을 실시간에 가깝게 만든다는 커다란 장점이 있다. IBM에서는 2028년에 공개 예정인 IBM 스타링(Starling)에서 이 모든 과정을 통합하여 2029년에는 200개의 양자연산이 가능한 논리 큐비트를 구현할 것으로 계획하였다.

[나가는 글] IBM은 로드맵에서 2033년까지 대규모 오류내성 양자 컴퓨터의 구현이라는 도전적인 목표를 내세우며, 양자 컴퓨팅의 실용화를 향해 나아가고 있다. 이를 위한 첫 발걸음이라고 할 수 있는 IBM 룬의 발표가 2025년으로 예정되어 있어, 올해가 어느덧 2달 남짓 남은 시점에 그 기대감이 크다고 할 수 있겠다.

IBM이 앞으로의 방향성을 오류내성 양자 컴퓨팅으로 분명하게 제시하였음에도 불구하고, 오류정정 이전의 오류완화기술(error mitigation)방식의 병행 및 소프트웨어 개발 툴킷인 Qiskit의 업그레이드 계획을 밝힌 것 또한 주목할만한 내용이다. 2025년 발표 예정인 120큐비트 규모의 오류정정 없는 IBM나이트 호크(Nighthawk)를 이용한 양자우월성을 실증하고, 이를 기반으로 하여 앞서 설명한 칩간 연결을 바탕으로 한 대규모의 큐비트에서 오류 완화기술을 시험할 것으로 예상된다. 이는 대규모의 오류내성 양자컴퓨터를 궁극적으로 구현하기 위해서는 많은 수의 큐비트의 정밀 제어 및 오류 완화 기술, 그리고 이를 제어하는 소프트웨어 알고리즘의 고도화 또한 매우 중요한 요소로 작용할 수 있다는 점을 시사한다.

IBM이 이처럼 도전적인 수준의 로드맵을 자신 있게 제시할 수 있었던 것은 기술 혁신을 통한 하드웨어의 발전, 오류 정정 코드의 고도화, 그리고 이를 정교하게 제어하기 위한 소프트웨어 및 디코딩 알고리즘의 진보 등 다양한 분야의 기술이 유기적으로 결합된 결과라고 생각된다. 각 단계의 목표를 달성하기까지 여전히 높은 기술적 장벽이 남아 있지만, IBM의 로드맵이 계획대로 실현되어 향후 10년 내에 오류 내성 양자 컴퓨터를 직접 만나볼 수 있기를 기대한다.

### 연구 그룹 소개 및 국내 연구 동향

IBM은 구글, 리게티 등과 함께 초전도 양자 컴퓨팅을 대표하는 회사이다. IBM의 가장 최신 프로세서인 IBM 콘도르(Condor)는 1000개가 넘는 큐비트를 갖추고 있으며, 양자 프로세싱 칩을 대중에게 공개하여 클라우드를 통해 학생/연구자/기업에서 양자 컴퓨터를 직접 사용해 볼 수 있게 하는 서비스를 제공하고 있기도 하다. IBM 연구팀은 하드웨어뿐만 아니라, 양자 알고리즘, 회로 최적화 및 오류완화/정정 기술 개발 등 소프트웨어를 아우르는 양자 컴퓨팅 분야에서 다방면으로 연구를 진행 중이다. 특히 IBM에서 개발한 양자 컴퓨팅을 위한 소프트웨어 개발 툴킷인 Qiskit은, IBM의 양자 프로세서뿐 아니라 다른 하드웨어 플랫폼에서도 널리 활용되고 있다.

IBM이 지향하는 대규모 오류 내성 양자 프로세서의 구현은 단순한 하드웨어나 공정 기술의 발전만으로 달성될 수 있는 목표가 아니라, 물리학, 공학, 컴퓨터과학 등 다양한 분야 간의 긴밀한 협력을 통해서만 가능하다고 생각한다. 국내에서도 양자정보 분야의 실험 및 이론 연구에서 탁월한 성과가 꾸준히 축적되고 있는 만큼, 이들 간의 공동 연구를 통해 큰 시너지를 발휘하고 국내 양자 기술이 한 단계 도약하길 기대한다.

Quantum Computing

# A manufacturable platform for photonic quantum computing

## 광기반 양자 컴퓨팅 소자 기술

### Qurator

손영익 교수  
한국과학기술원

저자 PsiQuantum Team

저널 Nature

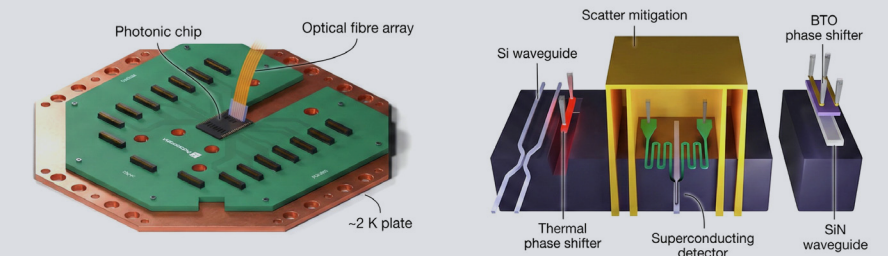
게재일 2025-02-26

DOI 10.1038/s41586-025-08820-7



### KEY SUMMARY

광기반 범용 양자컴퓨팅 제작을 위해서는 측정 기반 프로토콜을 수행할 네 가지 요소 기술들-단일 광자 광원, 고속 광스위치, 단일 광자 검출기, 양자 메모리-이 필수적이며, 또한 이들이 고품질을 유지한 채 대량으로 생산될 수 있어야 한다. 미국 양자컴퓨팅 스타트업 PsiQuantum은 세계적 파운드리 기업인 GlobalFoundries 와 협업하여 이러한 요구 조건의 핵심 성능을 만족하는 하드웨어 기술을 선보였다.



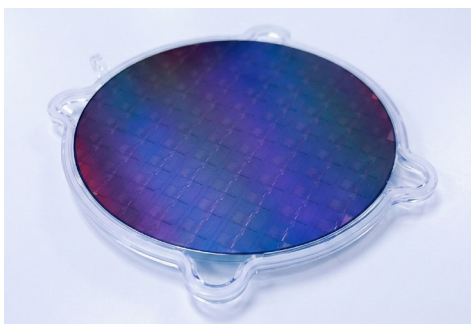
출처: Nature 641, 876 (2025)

### 광기반 양자 컴퓨팅 소자 기술

범용 양자 컴퓨터를 제작하는 방법에는 여러 가지가 있습니다. 현재 기준 초전도 큐비트 방식에 세계적으로 가장 많은 투자가 이루어진 것은 사실이나, 이외에도 다수의 하드웨어 기술이 살아남아 경쟁하고 있습니다. 예를 들어, 하드웨어를 구성하는 재료가 다를 경우, 이를 업계에서는 모달리티 (modality) 라는 용어로 표현하고 있습니다. 현재 범용 양자컴퓨팅 제작에는 5-6개의 모달리티들이 각자의 장점을 표방하며 경쟁적으로 개발에 임하고 있습니다. 이 중 광기반 양자컴퓨팅 기술은 여러 모로 흥미로운 접근법입니다. 다른 모달리티와는 획기적으로 다른 특성을 보유하고 있기 때문입니다. 광자 기반을 제외한 모든 모달리티는 게이트 기반 양자컴퓨팅이라는 아키텍처를 활용합니다. 아키텍처라함은 연산에 이용되는 논리 구조를 뜻합니다. 하지만 광기반 방식의 경우 빛 신호의 고유한 특성으로 인해 측정 기반 연산이라는 다소 특수한 접근법을 사용합니다. 측정 기반 방식은 비교적 널리 알려진 양자 텔레포테이션 프로토콜과 매우 흡사합니다. 미세한 차이를 제외하고 대체적인 하드웨어 동작 내용만 본다면 완전히 똑같습니다. 양자 정보를 측정하여 디지털 정보를 얻어낸 후, 디코더를 통해 이를 해석하고, 그 결과에 기반한 양자 게이트를 가해줍니다. 이러한 동작을 계속해서 반복해 줄 수 있다면 범용 양자 연산을 할 수 있습니다. 이러한 방식으로 연산이 가능함은 이미 2000년도에 발명되었으나, 현재까지 이러한 기능을 수행할 수 있는 하드웨어 기술은 부분적으로만 제시되어 왔습니다. 하지만 이번 2025년에 발표된 PsiQuantum 연구진의 논문을 통해 측정 기반 양자 연산에 필요한 모든 구성 요소가 대량 생산이 가능한 기술임이 대부분 증명되었습니다.

### 핵심은 대량 생산

논문의 저자인 PsiQuantum 팀은 회사의 설립 시점인 2,016년부터 일관되게 실리콘 포토닉스 기술을 추구해 왔고, 이번 논문을 통해 그 간의 축적된 결과를 발표하였습니다. 왜 굳이 실리콘 포토닉스를 쓸까요? 이는 광기반 양자컴퓨터 제작을 위해서는 반드시 대량의 광소자를 양산할 수 있어야 하기 때문입니다.



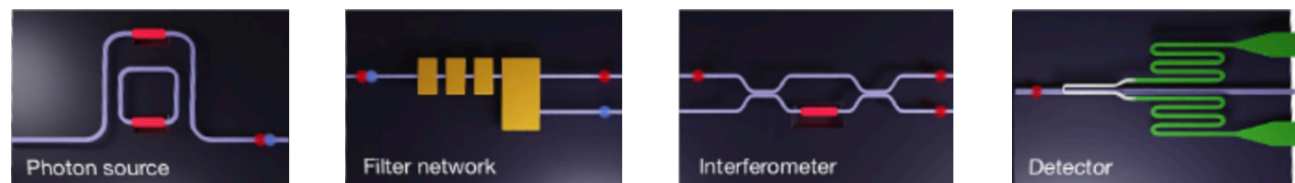
PsiQuantum사에서 제작한 집적 실리콘 양자광학칩 웨이퍼 사진 (출처: Nature 641, 876 (2025))

이러한 대량 자원 필요성은 광자의 특성으로 인해 발생하며, 여기서 말하는 대량은 100-1,000 개 수준의 광소자 개수가 아닙니다. 하나의 소자를 적어도 백 만개 이상, 많게는 수십 억 개 이상을 설계한 대로 생산할 수 있는 경우를 이야기 합니다.

100-1,000 개 큐비트를 이야기하는 시대에 백만개에서 수 십 억이라는 숫자를 들으면 다소 부담스러울 수 있지만, 현대 반도체 기술의 시각으로 바라보면 이는 그리 놀라운 숫자는 아닙니다. 2025년 현재 생산되는 반도체 칩의 경우 1개당 내부에 수 천 억 개의 트랜지스터 보유하는 경우도 있기 때문 입니다. 물론 트랜지스터와 광소자를 같은 잣대로 비교할 수는 없지만, 인류가 가진 최고의 기술이

이러한 수준의 복잡성을 가진 시스템을 대량 생산할 수 있다는 사실이 중요합니다. 기존의 반도체 공정 기술을 조금만 변형하여 적용하면 실리콘 포토닉스 칩을 생산할 수 있고, 생산 기술의 뿌리가 서로 같기 때문에 실리콘 포토닉스 또한 매우 복잡한 수준으로 진화 가능하다는 희망을 가질 수 있기 때문입니다. PsiQuantum 창업자들은 이러한 비전을 바탕으로 회사를 시작했다고 말하고 있습니다.

### 구성 부품: 4개의 광소자



PsiQuantum사에서 제작한 집적 실리콘 양자광학칩 웨이퍼 사진 (출처: Nature 641, 876 (2025))

광기반 양자컴퓨터의 측정 기반 프로토콜을 수행하기 위한 구성 소자는 대략 5종류입니다. 단일 광자 광원, 고속 광스위치, 광지연선, 단일 광자 검출기, 그리고 반도체 입니다. 논문에서는 전자 기술인 반도체를 제외한 나머지 4종의 광소자들에 대해 다루고 있습니다.우선 티탄산 바륨(BTO, Barium titanate)이라는 물질을 활용한 광스위치입니다. BTO 를 선택한 이유는 저손실, 고속, 저전력, 대량 생산이라는 다수의 조건을 동시에 만족해야 하기 때문입니다. BTO가 유일한 물질이라 할 수는 없지만 가장 가능성 높은 후보 중 하나임은 분명합니다. 논문 내용 뿐 아니라 다수의 언론 홍보를 통해 PsiQuantum 은 세계 최고의 BTO 스위치 기술을 보유하고 있음이 알려져 있습니다.

두 번 째로는 광검출기입니다. PsiQuantum 은 초전도나노선 단일광자 검출기 (SNSPD, superconducting nanowire single photon detector) 라는 특수 단일광자 검출 기술을 사용합니다. 이름에서 짐작할 수 있듯, 초전도 물질 때문에 해당 기술은 극저온을 필요로 합니다. 하지만 왜 굳이 까다로운 극저온 환경이 요구되는 기술을 사용할까요? 이는 SNSPD 가 검출 효율 등 다수의 성능치에 있어서 압도적으로 뛰어난 기술이기 때문입니다. 극저온이라는 비싼 값을 치르고서라도 반드시 활용해야만 하는, 대체가 거의 불가능한 기술이라고도 볼 수 있습니다. 단일 광자 검출기는 사실 여러 종류가 있는데, 왜 SNSPD가 대체하기 어려운 기술인지는 광기반 양자컴퓨팅의 요구 특성에 있습니다. 광기반 기술은 다른 모달리티와 다른 종류의 연산 오류를 극복해야 하는 고민을 안고 있는데, 바로 광손실이 이에 해당합니다. 전체 시스템이 매우 적은 광손실율을 담보할 때만 양자 오류 정정과 안정적인 연산이 가능합니다.

검출기의 측정 실패는 일반적인 광손실과 등가이기 때문에, 광기반 양자 컴퓨터에 활용되는 검출기는 거의 100%에 가까운 효율을 가져야 할 뿐 아니라 대량 생산의 형태로 이루어져야 합니다. 논문에서는 이러한 조건에 매우 근접했음을 실험 결과로 입증하고 있습니다.

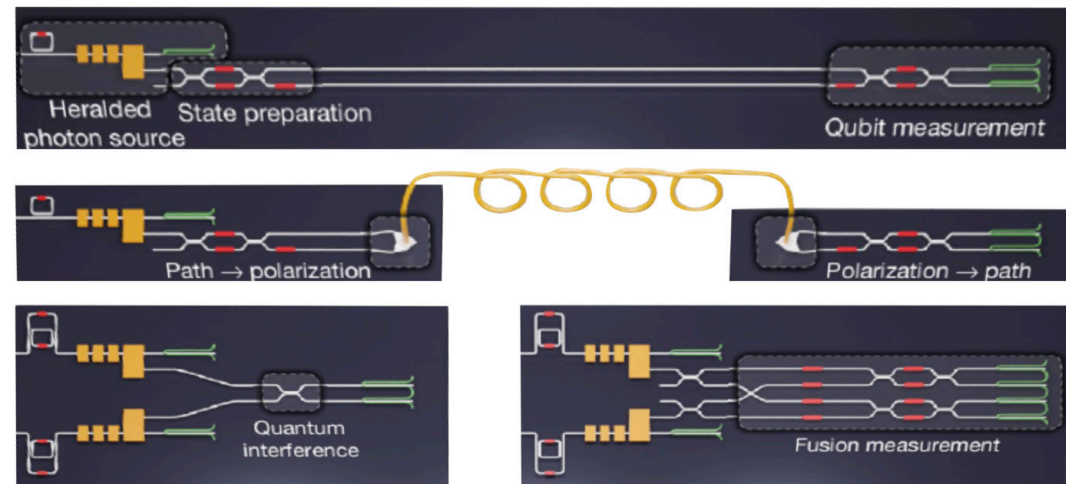
세번째로 광지연선 입니다. 논문에서는 광지연선 자체를 소개하기 보다는 집적형태 도파로의 광손실 수치 및 광섬유-실리콘 포토닉스 칩 간 삽입 손실 수치를 제시하고 있습니다. 모든 수치가 현존하는 모든 실리콘 포토닉스 업계에서 가장 훌륭한 수준입니다. 그런데 왜 단일 모드 (SM, single-mode), 다중 모드 (MM, multi-mode), 그리고 광섬유 관련 수치를 모두 다 제시하는 것일까요? 이는 PsiQuantum 에서 활용하는 아키텍처랑 관련이 있습니다. PsiQuantum 은 광섬유를 일종의 양자 메모리로 활용하는 인터리빙(interleaving) 이라는 특수 아키텍처를 핵심 기술로 활용하므로, 실리콘 포토닉스 칩과 광섬유간 저손실 광자 이동이 필수적입니다. 논문에서는 이를 100 mdB 내외 라는 우수한 성능치로 제시하고 있습니다. 하지만 광섬유는 전체 컴퓨팅 설비의 일부에서만 고성능 메모리로 활용될 뿐, 나머지 양자 컴퓨터의 대부분은 실리콘 포토닉스 칩 도파로로 이루어져 있습니다. 칩 도파로는 광섬유만큼 우수한 저손실 성능을 가질 수는 없지만 광신호가 칩 밖을 출입할 필요가 없으므로 훨씬 더 활용성이 높습니다. 실리콘 포토닉스 도파로는 단면의 크기에 따라 제어는 간편하나 다소 손실이 높은 단일 모드 방식, 손실이 낮아 메모리로서 성능은 우수하나 제어가 까다로운 다중 모드 방식으로 크게 나눌 수 있습니다. 따라서 논문에서는 이 두 도파로의 손실율을 별도로 측정하여 보고한 것입니다.

네 번째로 양자 광원입니다. 논문에서는 광자쌍 생성 방식의 양자 광원을 사용합니다. 광자쌍 생성 연구에는 유전체의 광학적 비선형성을 주로 활용하는데, 2차 비선형성  $\chi(2)$ 를 이용하는 경우를 자발 매개 하향 변환 (SPDC, spontaneous parametric down-conversion), 3차 비선형성  $\chi(3)$ 를 활용하는 경우를 자발 사광자 혼합 (SFWM, spontaneous four-wave mixing) 이라 부릅니다. 논문에서는 후자를 다양한 형태의 공진기를 통해 활용하고 있습니다. SPDC 가 아닌 SFWM 을 활용하는 이유는 논문에서 활용하고 있는 실리콘, 실리콘 나이트라이드 등 물질이 일반적으로 2차가 아닌 3차 비선형성만을 보유하고 있기 때문입니다. 양자 컴퓨터의 연산에는 이렇게 SFWM을 통해 생산된 다수의 단일 광자 광원이 사용되는데, 논문에 언급된 것처럼 여러 가지 조건을 동시에 만족해야 하므로 매우 까다롭습니다. 높은 생성률로 정해진 타이밍에 생산되어야 하며, 매우 많은 독립적 광원들이 양자역학적으로 구분 불가능한 (indistinguishable) 광자를 만들어낼 수 있어야 할 뿐만 아니라, 주파수 도메인에서 높은 순수도를 가져야 합니다. 이 모든 조건을 동시에 만족시키기 위해 PsiQuantum 사가 선택한 방식은 다수의 광자쌍 광원을 통합적으로 운용해 효율을 증대하는 다중화 예고 단일 광자 광원 (multiplexed heralded single-photon source) 입니다.

### 연구 그룹 소개 및 국내 연구 동향

#### 광기반 양자 컴퓨팅의 미래

하드웨어 칩 스택이 갖춰진 만큼 광자를 활용한 측정 기반 양자 연산을 수행할 만한 준비가 되었습니다. PsiQuantum 사에서 대형 양자컴퓨팅 시설 구축을 올해부터 시작한 만큼, 이미 측정 기반 연산이나 오류 정정 등 주요 기능 테스트를 내부적으로 실시 중일지도 모르겠습니다. 대량 생산이 가능한 세계 최고의 양자 광집적회로 기술이 어디까지 양자정보처리 능력을 보여줄 수 있을지 지켜 보는 것, 이를 통해 기존의 게이트 기반 양자 연산 방식들과 어떤 차별성을 만들어 낼 수 있을지가 향후 관련 포인트가 될 것입니다.



실리콘 포토닉스 기반 양자 컴퓨팅을 위한 단일 큐비트 생성과 측정 (Single-qubit state preparation and measurement (SPAM)). 큐비트 연결성 확보, 이광자 양자 간섭과 fusion 의 구현 모식도 (출처: Nature 641, 876 (2025))

Quantum Computing

# Magic state cultivation: growing T states as cheap as CNOT gates

마법 상태 재배  
자원 효율적인 오류 허용  
양자컴퓨팅의 구현을 향한 진전

## Qurator

이석형 교수

성균관대학교 양자정보공학과

저자 Craig Gidney, Noah Shutty, Cody Jones

저널 arXiv preprint

게재일 2024-09-26

DOI 10.48550/arXiv.2409.17595



## KEY SUMMARY

구글 쿼텀 AI(Google Quantum AI) 연구팀이 보편적인 오류 허용 양자 컴퓨팅의 가장 큰 난제였던 '마법 상태(magic state)' 생성 비용을 획기적으로 절감하는 새로운 패러다임, '마법 상태 재배(magic state cultivation)' 기술을 제안했다. 많은 논리적 큐비트 간 상호작용을 필요로 하는 기존의 '마법 상태 증류(magic state distillation)' 방법과 다르게, 단일 코드 패치 내에서 점진적으로 마법 상태의 신뢰도를 키워 나가는 방식을 사용한다. 그 결과, 마법 상태의 생성 비용이 CNOT 게이트와 비슷한 수준으로 감소하여, 양자 알고리즘의 실질적인 구현에 필요한 자원을 수백에서 수천 배까지 줄일 수 있는 가능성을 열었다. 이는 양자 컴퓨터의 상용화를 향한 중요한 이정표가 될 것이다.

### 오류 허용 양자 컴퓨팅의 가장 비싼 구성 요소, 비-클리포드 게이트

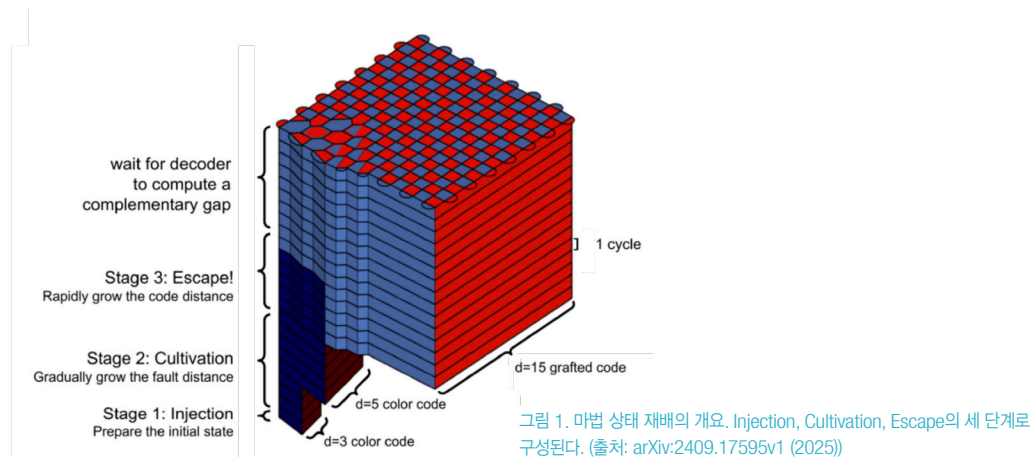
실용적인 양자컴퓨터를 구현하기 위한 여정은 물리적 큐비트에 내재된 오류와의 전쟁과도 같다. 이 문제를 해결할 해법이 양자 오류 정정(quantum error correction)이다. 수많은 물리 큐비트를 묶어 하나의 논리 큐비트를 만들어 오류를 감지하고 수정하는 방식이다. 현재 가장 유력한 후보인 표면코드(surface code)의 경우, CNOT, 하다마드(Hadamard) 게이트 같은 클리포드(C Clifford) 게이트들은 [1]비교적 쉽게 구현할 수 있지만, 결정적으로 보편적인 양자 컴퓨팅에 필수적인 비-클리포드(non-Clifford) 게이트의 구현 비용이 엄청나게 비싸다는 치명적인 단점이 있다. 지금까지 비-클리포드 게이트를 구현하는 표준적인 방식은 '마법 상태 증류(magic state distillation)'였다. 이는 마치 저순도 원액을 여러 번 증류하여 고순도 물질을 얻는 과정과 유사하다. 비-클리포드 게이트를 구현하기 위한 자원 양자 상태를 '마법 상태'라고 하는데, 마법 상태 증류는 노이즈가 있는 저품질 마법 상태를 여러 개 소모하여 복잡한 논리 회로를 통해 오류를 걸러내고 1개 또는 소수의 고품질 마법 상태를 얻어내는 방식이다. 하지만 이러한 방법은 많은 논리 연산들을 필요로 하기 때문에 양자 컴퓨팅의 주요한 병목으로 여겨져 왔다.

### '증류'에서 '재배'로: 패러다임의 전환

이번에 구글 연구팀이 제안한 '마법 상태 재배(cultivation)'는 마법 상태 증류의 고비용 문제를 근본적으로 해결하는 접근법이다. 핵심 아이디어는 여러 저품질 마법 상태를 소모하는 대신에, 하나의 코드 패치 안에서 단일 마법 상태의 품질을 점진적으로 키워내는 것이다.

이 과정은 세 단계로 이루어진다 (그림 1). 첫 단계는 주입(injection)으로, 노이즈가 있는 저품질 마법 상태를 작은 양자 오류 정정 코드에 주입한다. 그 다음의 재배(cultivation) 단계에서는 '검사-성장-안정화' 사이클을 반복한다. 상태의 논리 값을 검사하여 마법 상태로 투사하고(검사), 코드의 크기를 키우고(성장), 오류 감지를 위한 특정 연산자들을 측정하여 상태를 안정화한다(안정화). 마지막 단계는 탈출(escape)로, 품질이 향상된 마법 상태를 알고리즘에 사용하기 위해 더 크고 안정적인 코드로 확장한다.

여기서 중요한 점은, 재배 단계에서 오류가 감지되었을 시 즉시 중단하고 처음부터 다시 시작한다는 것이다. 즉, 오류의 정정을 시도하기보다는 버리고 새로 시작하는 안전한 방법을 선택하여 신뢰도를 극대화한다.



### 기존 방식 대비 큰 성능 개선

마법 상태 재배의 효율성은 놀랍다. 논문의 시뮬레이션 결과 (그림 2)에 따르면, '재배' 기술은 기존의 최첨단 증류 방식보다 수백 배 적은 시공간 부름(큐비트 수 x 소모 시간)으로 훨씬 낮은 오류율을 달성하며, 이는 클리포드 게이트인 CNOT 게이트의 오류율에 근접한다. 특히 물리적 오류율이 0.1%일 때, 10~9수준의 논리적 오류율을 달성했는데, 이는 기존 방식으로는 거의 불가능에 가까운 수치였다.

이러한 큰 진전은 마법 상태 재배가 여러 논리적 큐비트 간의 논리 연산이 아니라 단일 논리적 큐비트 내의 물리적 연산만으로 이루어져 있으며, 도중에 발생하는 오류를 정정하는 대신에 과감하게 버리고 처음부터 시작하는 전략을 택하였기 때문에 가능한 것이다.

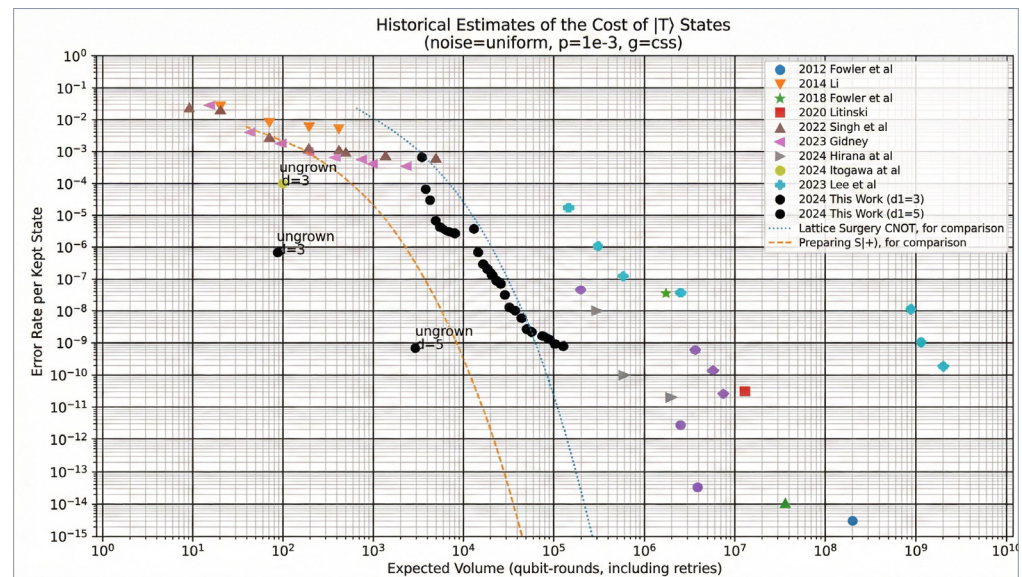


그림 2. 여러 마법 상태 생성 방법의 성능 비교. 가로 축은 필요한 시공간 부름, 세로 축은 생성된 마법 상태의 오류율을 의미하며, 0.1%의 게이트당 물리적 오류율을 가정하였다. 검은색 점들이 마법 상태 증류에 해당되며, 이는 CNOT 게이트의 결과(파란색 점선)에 근접한다. (출처: arXiv:2409.17595v1 (2025))

### 왜 중요한 진전인가?

비-클리포드 게이트는 범용 양자컴퓨팅에 필수적일 뿐만 아니라, Gottesman-Knill 정리에 의해 양자 우위의 달성에도 핵심적인 역할을 한다. 그럼에도 불구하고, 양자컴퓨터의 90% 이상이 비-클리포드 게이트를 위한 마법 상태 생성에 사용되어야 한다고 생각되어 왔을 정도로 큰 병목 지점으로 여겨져 왔다. 구글의 이번 연구 결과는 마법 상태 생성의 자원량을 CNOT 게이트 수준으로 획기적으로 낮추어 범용 양자컴퓨터의 실용화를 앞당길 가능성을 열었다. 또한, 기존의 마법 상태 방법과 다르게 0.1% 수준의 비교적 현실적인 노이즈 수준에서도 잘 작동하며 규모가 작기 때문에 현존하는 하드웨어에서도 구현을 시도해볼 수 있을 것으로 예상된다.

### 남은 과제: 확장성의 문제

마법 상태 재배의 한 가지 주요한 문제점은 확장성에 있다. 오류가 감지되면 버리는 전략을 선택하기 때문에 코드의 크기를 늘릴수록 성공률이 기하급수적으로 낮아진다. 논문에서도 가장 작은 두 개의 코드(오류 거리 3과 5)에서만 분석하였으며, 오류 거리 5일때조차도 성공률이 1%밖에 되지 않는다. 즉, 현재 달성 가능한 10-9 수준의 오류율보다 더 높은 품질의 마법 상태를 얻으려면 성공률이 지나치게 낮아지기 때문에 높은 자원 효율성이라는 장점이 퇴색될 가능성이 크다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 방향의 연구가 필요하다. 예를 들어, 마법 상태 재배를 기존의 증류 방법과 적절히 결합하여 장점만을 택하거나, 재배 과정에서 발생하는 오류를 일부 정정하여 성공률을 높이거나, 새로운 오류정정 코드를 사용하여 재배 과정을 개선하는 등의 연구가 가능하다. 이러한 연구를 통해 복잡한 양자 알고리즘의 구현에 충분할 정도로 더욱 낮은 오류율의 비-클리포드 게이트 구현이 가능해 진다면 실용적인 양자컴퓨터의 구현을 향한 매우 큰 진보가 될 것이다.

### 연구 그룹 소개 및 국내 연구 동향

구글 퀀텀 AI는 초전도 큐비트 기반 양자 컴퓨터 개발을 선도하는 세계적인 연구 그룹이다. 2019년 양자 우위를 시연한 시카모어(Sycamore) 프로세서로 이름을 알렸으며, 최근에는 윌로우(Willow) 칩을 통해 표면 코드를 통한 양자 오류 정정이 이론적 임계값을 넘어 실제로 작동함을 입증한 바 있다. 오류 정정이 가능함을 보인 데서 한 걸음 더 나아가, 이번 마법 상태 재배 연구를 통해 오류 정정을 효율적으로 만드는 방법을 제시하며, 실용적인 양자 컴퓨터를 향한 로드맵을 차근차근 실현해 나가고 있다. 국내에서도 다수의 대학, 연구소, 기업들이 초전도, 이온 트랩, 광자, 중성 원자 등 다양한 플랫폼에서 양자 컴퓨터 하드웨어 개발과 함께 오류 정정 연구를 활발히 진행하고 있다. 구글의 이번 성과는 비-클리포드 게이트의 구현의 진입장벽을 획기적으로 낮추었다. 이를 현실적으로 구현 가능할 정도로 더욱 개선하고, 특정 플랫폼과 하드웨어에 맞게 최적화하는 것이 중요한 연구 방향일 것이다.

Quantum Computing

# Quantum error correction below the surface code threshold

“임계선을 넘어서”  
구글 Willow 칩이 연 양자 오류 정정의 새 시대

## Curator

오창훈 교수  
한국과학기술원 물리학과

저자 Google Quantum AI and Collaborators

저널 Nature 638, 920-926 (2025)

게재일 2024-12-09

DOI 10.1038/s41586-024-08449-y



## KEY SUMMARY

구글의 새 초전도 '윌로우(Willow)' 칩이 마침내 표면 코드 임계값을 넘어섰다. 10개 큐비트로 구성된 거리 7 표면 코드에서 논리 오류율이 거리 5 대비 2.14배 줄어들고, 논리 큐비트 수명이 최고 물리 큐비트보다 2.4배 길어지면서 '큐비트를 더 얹으면 더 좋아진다'는 스케일링 법칙이 처음으로 실험에서 확인됐다. 이는 완벽한 큐비트를 찾기보다는 지금 가능한 '괜찮은' 큐비트를 대규모로 조직하는 전략이 현실적 해법임을 입증하며, 양자 오류 정정을 가설 단계에서 실측 데이터로 끌어올렸다.

**Willow 칩과 실험 설계 - 105 큐비트에서 거리 7까지**

양자컴퓨터는 양자 화학, 양자 시뮬레이션, 암호, 최적화 등 다양한 문제에서 고전컴퓨터와 비교해 계산우위를 가져올 것으로 전망됩니다. 이러한 계산 우위를 실제로 구현하기 위한 많은 노력이 계속되고 있으나, 현재 가장 큰 문제점은 양자 하드웨어에 발생하는 노이즈와 이로 인해 발생하는 계산 오류입니다. 소인수분해 및 양자 화학 문제와 같은 실용적인 문제 해결에 있어서 양자컴퓨터가 고전컴퓨터를 압도하려면 계산인 이루는 게이트 연산이 10-10수준의 오류율을 가져야 한다는 것이 정설입니다. 현실의 초전도, 이온 기반의 큐비트는 아직 10-3안팎에 머뭅니다. 이 거대한 간극을 메우는 현실적인 유일한 방법이 양자 오류 정정(quantum error correction)입니다. 다만 이러한 노이즈가 있는 큐비트 기반의 성공적인 오류 정정은 개별 물리 큐비트(physical qubit)의 평균 오류율 가 코드의 임계값 보다 작을 때만 일어납니다.

또한 평균 오류율이 임계값보다 낮을 경우, 코드의 크기(코드 거리 d)를 증가시키는 방식을 통하여 논리 큐비트의 오류를 의 비율로 더욱 감소시킬 수 있습니다. 따라서 임계값 아래의 오류율을 달성하는 것이 성공적인 양자 오류 정정 코드 구현에 핵심입니다. 다양한 양자 오류 정정 코드 중 현재 가장 각광받고 있는 코드는 표면 코드(surface code)입니다 (그림 1a). 표준적인 표면 코드는 2차원 격자 위에 많은 물리 큐비트를 논리 큐비트(logical qubit) 하나로 쌓아 오류를 실시간으로 감지하고 교정합니다. 양자 오류 정정 코드의 개별 임계값은 코드 및 하드웨어마다 다르지만, 표면 코드 기준으로 약 0.5% 내외로 알려져 있으며 매우 높은 임계값으로 여겨지기 때문에 특히 주목 받는 코드입니다.

구글은 2022년 Nature에 출판된 논문 [Nature 614, 676–681 (2023)]에서 거리 3, 5 코드까지 확장해 코드를 크게 하면 논리 큐비트 오류율이 살짝 더 좋아진다는 힌트를 주며, 임계점 근처에 도달한 것을 확인하였습니다. 그러던 중 2024년 12월 9일 온라인 공개(2025년 2월 호 인쇄)된 새 Nature 논문이 결정적 전환점을 찍습니다. 제목 그대로 "Quantum error correction below the surface-code threshold"— 최초로 '임계선 아래'에 진입했음을 실험으로 입증한 것입니다.

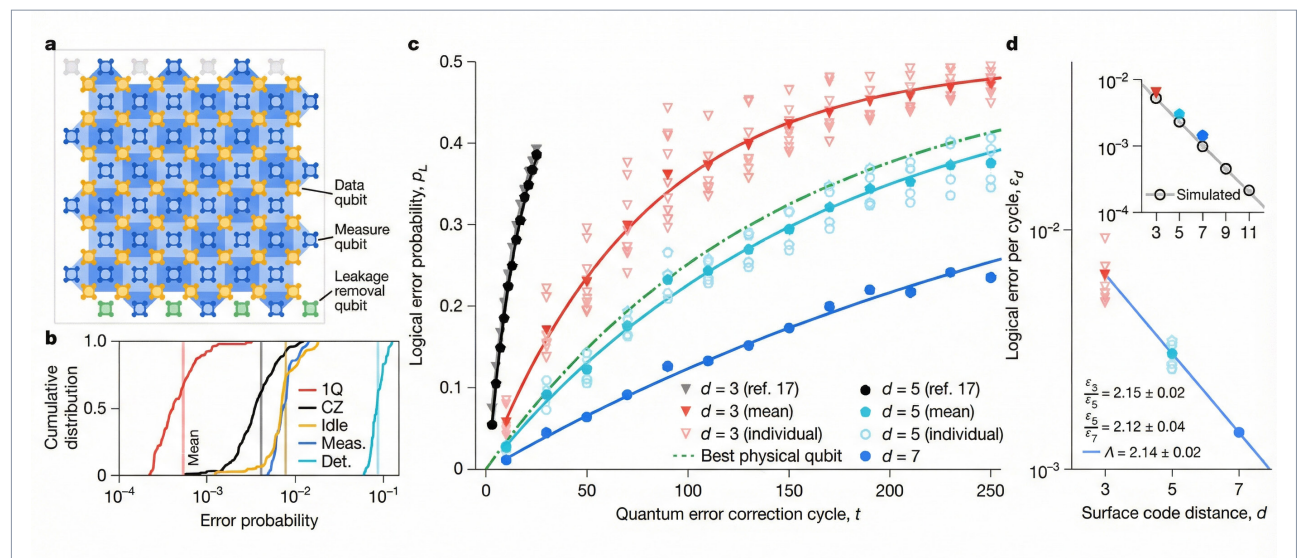


그림 1. a. 표면 코드, b. 연산 및 측정의 오류율, c. 서로 다른 크기의 표면 코드를 활용하였을 때 시간에 따른 논리 큐비트 오류율, d. 표면 코드의 크기에 따른 논리 큐비트 오류율

**Willow 칩과 실험 설계 - 105 큐비트에서 거리 7까지**

이번 연구의 주역은 'Willow'라 불리는 두 개의 초전도 프로세서로 이전까지 구글에서 사용한 Sycamore 초전도 프로세서에 비해 다양한 요소에서 향상된 성능을 자랑합니다. 하나는 72 큐비트(표면 코드 거리 5), 다른 하나는 105 큐비트(표면 코드 거리 7)다. 평균 결맞음 시간  $T_1 \approx 68 \mu s$ , 1-큐비트 게이트 오류율 < 0.1 %, 2-큐비트 CZ 게이트 오류율 < 1 %, 표면 코드 한 사이클은 1.1  $\mu s$ 만에 끝난다. 72 큐비트 칩에는 FPGA 기반 실시간 디코더가 붙어 있어, 측정 결과(신드롬)를 63  $\mu s$  만에 해석해 바로 다음 사이클에 반영합니다.

구글의 연구진은 Willow 프로세서에서 표면 코드를 구축하고, 먼저 각 데이터 큐비트를 표면 코드의 논리적 파울리 연산자 X 또는 Z 기저에 대응하는 상태로 준비하고, 이후 수십 ~ 수백 사이클동안 오류정정 루프를 돌립니다. 각 사이클에서는 측정 큐비트가 인접 데이터 큐비트의 패리티를 읽어오고, 누적된 신드롬을 디코더가 해석해 논리 오류를 추적합니다. 또한, 초전도 큐비트 특유의 'Leakage'( $|2\rangle$  준위로 빠져나감)는 전용 큐비트를 써서 매 사이클 빠르게 제거했습니다.

가장 중요한 결과로는 거리 5에서 거리 7로 확장했을 때 논리 오류율이 = 2.14 ± 0.02 배 감소하는 것을 규명했습니다 (그림 1d). 이는 이론식의 기술기와 일치하며, 임계선 아래로 진입했음을 가리킵니다. 또한 논리 큐비트 수명 291  $\mu s$ 이 최고 품질의 물리 큐비트 수명(119  $\mu s$ )의 2.4 배가 된 것을 확인하였고, 이는 표면 코드를 사용하여 만든 논리 큐비트가 해당 논리 큐비트를 구성하는 물리 큐비트보다 더 좋은 성능을 보인다는 것을 의미하며, 이는 즉 '손익평형점 (breakeven)'(logical > best physical)을 넘었다는 것을 의미합니다. 이러한 지표는 "큐비트를 더 없으면 더 좋아진다"는 교과서적 스케일링을 실험적으로 처음 검증한 값들입니다.

**왜 중요한가- '될까?'에서 '얼마나 크게?'로**

해당 논문의 가장 중요한 결과는 임계선 최초로 돌파했다는 것입니다. 표면 코드를 만든 이후 25년 만에, 물리 오류율을 완전히 임계선 밑으로 낮춘 사례가 등장했습니다. 이제 양자 오류 정정의 성공 가능성은 가설이 아니라 실측 데이터가 되었습니다. 또한 실시간으로 양자 오류 정정을 완성한 하드웨어라는 것이 중요합니다. 일반적으로 신드롬 측정 결과를 처리하는 과정 또한 계산 복잡도 관점에서 어려운 과정으로 알려져 있으며, 따라서 실시간으로 오류 정정하는 것에 어려움을 주는 과정인데, 본 실험에서는 하드웨어, 디코더. 누설 제거까지 하나의 패키지로 실시간으로 작동했다는 점이 특히 중요합니다. 이전 결과는 후처리 디코딩에 많이 의존했고, 실시간 페루프에서는 잡음 누적으로 다시 무너지곤 했습니다.

**남은 숙제- 계산이 아닌 '메모리'였다는 점**

이번 논문은 어디까지나 "거리 7 양자 메모리" 실험이다. 실제 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 양자 메모리를 넘어서 해당 프로세서에 논리 게이트를 적용하는 것이 필수적입니다. 오류를 억제한 상태로 논리 게이트(CNOT, T 등)를 실행하려면 추가 보호 계층이 필요합니다. 또한 2개의 표면 코드 사이에 논리 2-큐비트 게이트를 구현하는 것은 본 논문에서 구현한 메모리를 넘어서 격자 수술 (lattice surgery) 기법 등이 필수적이고, 이를 실제 실험으로 구현하는 것은 양자메모리를 넘어 양자컴퓨팅을 구현하는 것에 중요한 과제가 될 것입니다.

또한 시간당 한 번꼴로 등장하는 고에너지 상관 오류가 발견되었는데, 이 희귀 사건이 장거리 코드에서 '바닥' (floor)을 만든다. 재료 결함, 우주선, 2형 접합 등 뿌리가 복잡해 근본 대책이 필요합니다.

한편 디코더 속도도 문제입니다. 거리 11 ~ 17로 키우면 신드롬 데이터가 폭증하므로, 맞춤형 ASIC 가속기나 병렬 GPU 해법이 필수입니다. 마지막으로, 표면 코드 외에 LDPC, Color Code, Floquet Code같은 대안 코드가 실제 칩에 얹힐 수 있을지, 연구실마다 경쟁이 뜨거워질 전망입니다.

**정리- 임계선 돌파 이후의 과제**

Willow 실험의 중요한 골자는 양자 오류 정정 이론이 제시한 '극단적으로 완벽한 큐비트'를 찾기보다는 '적당히 좋은 큐비트를 대규모로 조직화한 아키텍처를 구성하는 것이 현실적 해법'이라는 것을 실제 하드웨어적으로 구현하고 검증한 것입니다. 이제 양자 오류 정정은 이론적인 제안을 넘어 실제 하드웨어적인 양자컴퓨팅을 실현하는 것이 가능하다는 것을 암시합니다. 물론 양자 오류 정정의 실효성을 검증한 것은 사실이나, 실제 양자 컴퓨터로의 활용에 있어서 계속하여 하드웨어 및 소프트웨어적인 성능 개선이 필수적이다. 양자 오류 정정은 단일 요소의 성능 개선을 넘어, 하드웨어, 제어 전자, 디코더, 컴파일러, 코드 설계가 동시에 진화해야 하는 다학제적 공학 과제라고 볼 수 있습니다. 재료 잡음과 희귀 상관 오류를 줄이는 공정 고도화, 오류 인식을 전제로 한 컴파일러와 동적 스케줄링, 더 빠른 디코더와 LDPC, Floquet 같은 새로운 코드 구조의 탐색까지 모든 층위가 맞물려야만 대규모, 오류 정정된 양자컴퓨터가 현실이 될 것입니다.

**연구 그룹 소개 및 국내 연구 동향**

Google Quantum AI연구팀은 초전도 큐비트 기반의 양자 프로세서 개발의 세계적인 선도 그룹으로, 대표적인 업적으로는 2019년에는 53개의 초전도 큐비트 기반의 Sycamore 프로세서를 통해서 무작위 회로 샘플링을 구현하여 최초의 양자 계산 우위를 주장한 것이 있으며, 최근에는 본 기사에서 주로 다룬 Willow 프로세서를 통해서 양자 오류 정정을 시연하여 오류를 허용하는 범용성 양자 컴퓨터의 시대로 가는 중요한 실험을 성공 하였습니다.

# Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom



고체점결함(SiV in Diamond)  
양자 메모리를 활용한  
도시 규모 광통신망 얽힘 생성

## Qurator

강동연 선임연구원  
KIST양자기술연구단

저자 Knaut, C.M. et al., (Harvard-AWS collaborative research team[M. D. Lukin])

저널 Nature 629, 573-578

게재일 2024-05-16

DOI 10.1038/s41586-024-07252-z



## KEY SUMMARY

하버드대와 AWS가 공동 연구한 논문은 다이아몬드 내 실리콘 빈자리(SiV) 결함 기반 나노광학 양자 메모리 노드 두 개를 구현하고, 이를 약 35km의 도시 상용 광섬유망에 연결해 양자 얽힘을 생성·저장한 사례를 보고한다. 각 노드는 전자스핀과 광자의 상호작용을 통해 시리얼 방식으로 얽힘을 생성하고, 이를 핵스핀으로 전이해 초 단위 시간동안 안정적으로 저장한다. 또한, 1,350nm 텔레콤 파장으로의 양자 주파수 변환 기술을 통합하여 장거리 광손실을 최소화하였다. 이 연구는 고체 결함 기반 양자 메모리 노드가 상용 광통신 인프라에서 실질적으로 작동할 수 있음을 입증하며, 실용적 양자 중계기 및 대규모 양자 네트워크 구축을 향한 중요한 진전을 보여준다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해, 다이아몬드 내 인공 원자인 SiV 결함 중심을 나노포토닉 포토닉 결정 공진기와 결합한 양자 메모리 노드를 개발하고, 이를 실제 도시 광통신망에 통합하는 새로운 접근법을 제안하고 실험적으로 입증하였습니다. 각 노드는 전자스핀과 핵스핀으로 구성된 다중 큐비트 레지스터 구조로 이루어져 있으며, 얽힘 생성, 장기 저장, 오류 검출 기능을 통합적으로 수행할 수 있습니다. SiV 결함은 반전 대칭성을 지녀 광학적으로 매우 안정적이며, 방출 광자의 대부분을 ZPL(Zero-Phonon Line)으로 내보내기 때문에 광자 간 간섭의 신뢰도를 높이는 장점이 있습니다. 실험에서는 공진기로 강화된 광자-스핀 상호작용과 time-bin 기반의 스핀-광자 얽힘 게이트를 활용해 원격 노드 간 고효율의 양자 얽힘 생성을 구현하였고, 생성된 얽힘은 핵스핀 큐비트에 전이되어 1초 이상 안정적으로 저장되었다. 핵스핀 간 얽힘 상태는 내장된 오류 검출 기법을 통해 신뢰성이 보장되었습니다.

양자 얽힘의 전송 과정에서 발생하는 광섬유 손실 문제를 극복하기 위해, 연구진은 SiV 센터에서 방출된 737 nm 광자를 텔레콤 O-band(1350 nm)로 변환하는 단일단계 양자 주파수 변환(QFC) 기술을 구현 하였습니다. 실험 시스템은 하버드 대학 캠퍼스 내의 두 개의 극저온 냉동기로 구성되었고, 두 노드는 캠퍼지-보스턴-워터타운 지역을 순환하는 35 km 실제 도시 광케이블을 통해 연결 되었습니다. 얽힘 생성은 하나의 광자를 시간적으로 두 구간으로 인코딩하여 순차적으로 두 노드와 상호작용 시키고, 마지막으로 한쪽 노드에서 Bell 상태 측정을 통해 수행됩니다. 이 방식은 기존의 두 광자 간 간섭 방식에 비해, 두 노드 간 광로 위상의 정밀한 안정화가 불필요하다는 장점을 가지며, 실제 도시 인프라 환경에서도 얽힘 생성이 안정적으로 작동할 수 있음을 보여주었습니다. 실험 결과, 40 km 저손실 광섬유와 35 km 상용 도시망에서 핵스핀 메모리 간 양자 얽힘의 생성과 장기 저장에 성공하였습니다. 얽힘 생성률은 수 초당 한 번 수준으로 보고되었으며, 이는 상용 통신 인프라에 연동된 양자 얽힘의 실현 가능성을 보여주는 의미 있는 진전입니다. 본 연구는 향후 양자 중계기 구현 및 장거리 양자 네트워크 확장을 위한 주요 기술적 기반을 마련한 사례로 평가됩니다. 저자들은 나노포토닉 구조의 소형화 및 집적도 향상, 양자 주파수 변환 기술의 고도화를 통해 실용적인 대규모 양자 네트워크 구축이 가능할 것으로 전망하며, 이번 연구가 양자 통신 기술의 실제 응용 및 확장에 중요한 전환점이 될 수 있음을 시사합니다.

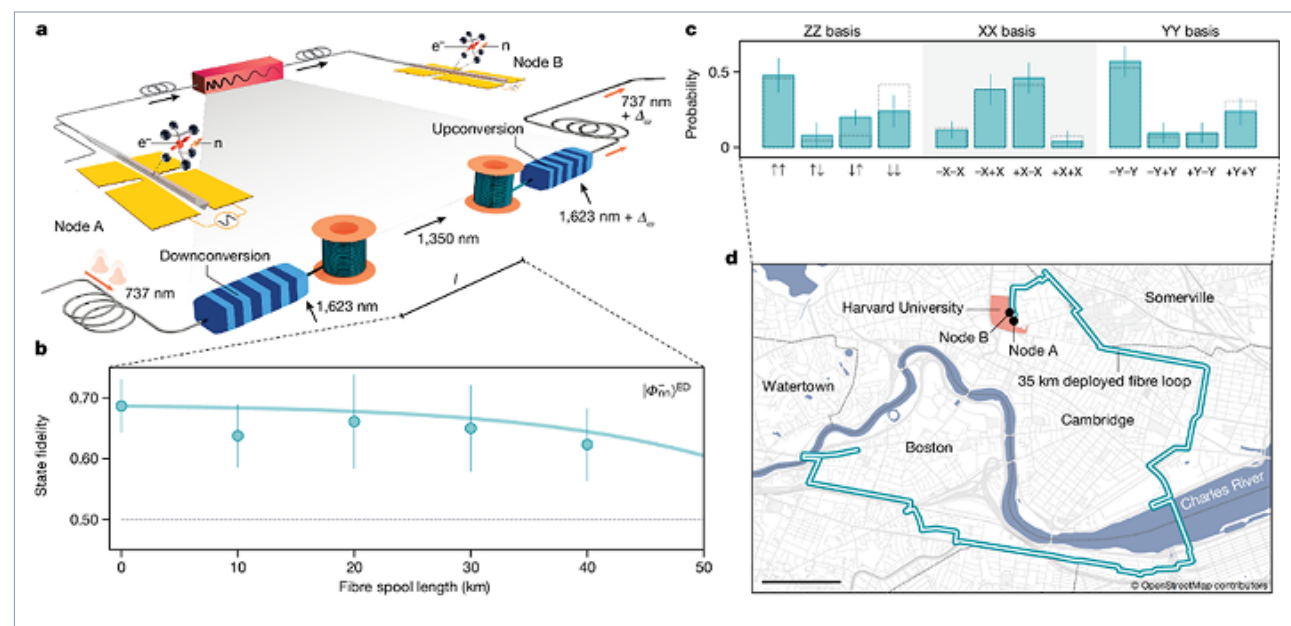


그림 1. 양자 주파수 변환(QFC)을 포함한 시스템 구성과, 실험결과, & 실험에 활용한 상용 광섬유 링크의 지도

### 연구 그룹 소개 및 연구 전망

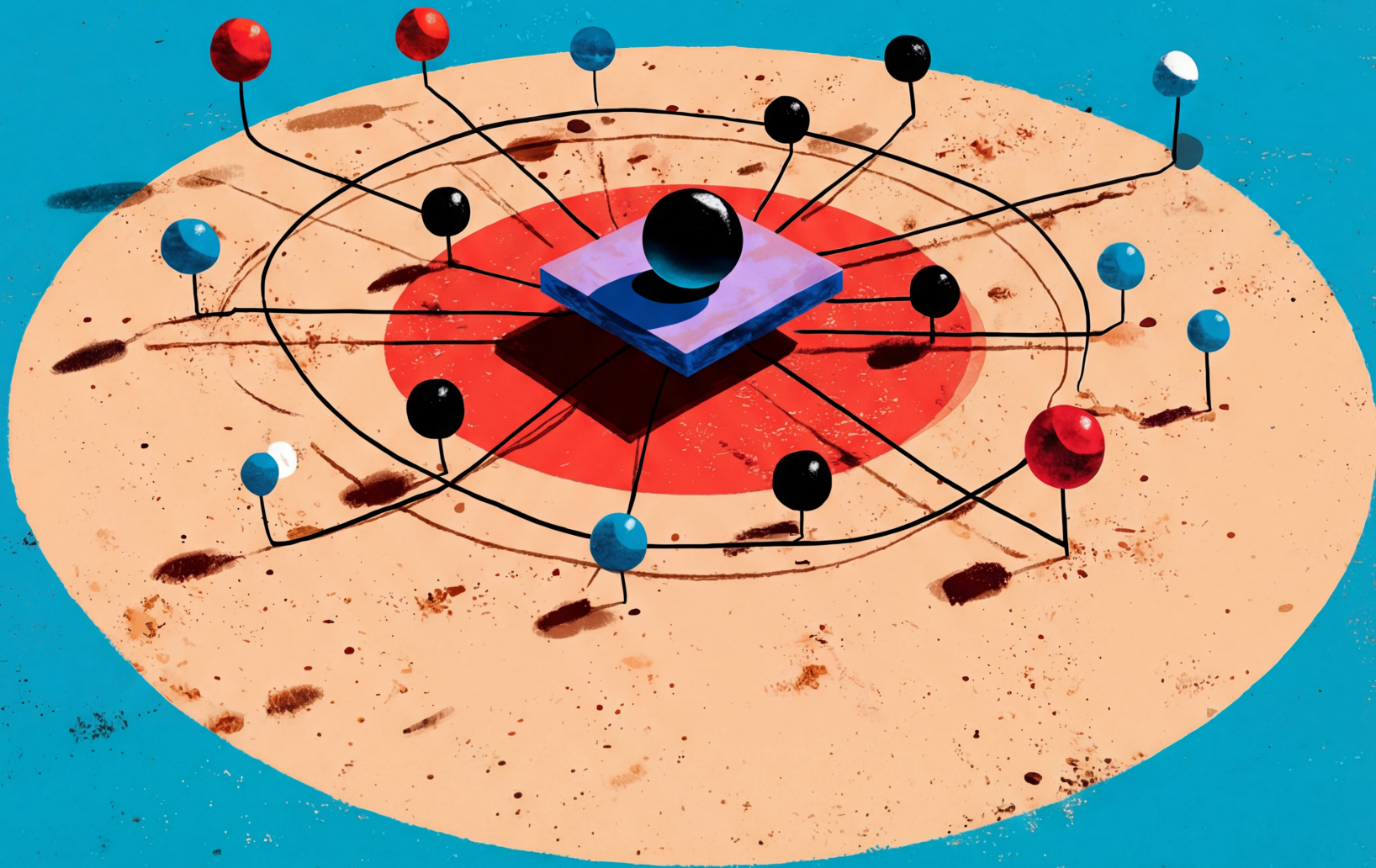
Harvard-AWS 연합 연구팀은 하버드대학교 Mikhail Lukin 교수가 이끄는 양자광학 이론 및 실험 그룹과, Amazon Web Services 산하 Center for Quantum Networking(CQNet)의 공동 연구체로 구성되었습니다. 단 AWS CQNet은 현재 다른 형태로 발전중입니다. 이 그룹은 중성원자(Harvard)에서 세계적 선도그룹임과 동시에 고체 내 결함 중심—주로 다이아몬드 내의 SiV 센터—을 기반으로 한 양자 메모리 기술과 이를 광섬유 기반 네트워크에 통합하는 실험적 역량에서 세계적 수준의 리더십을 보여주고 있습니다. 국제적으로는 QuTech, Caltech, MIT, Cambridge등의 기관이 NV, SiV, SnV, Er 중심 등의 결함 큐비트를 기반으로 한 양자 네트워크 연구를 활발히 전개하고 있습니다. 각 기관은 큐비트 물리, 상호작용 구조, 전송 프로토콜, 메모리-광자 변환기술 등에서 서로 다른 강점을 보이며, 글로벌 수준의 기술 우위 확보를 위한 경쟁이 본격화되고 있습니다.

국내에서도 KIST 양자기술연구단을 비롯하여 서울대학교, KAIST, GIST, 고려대학교, 등 주요 연구기관들이 고체결함 기반 큐비트-광자 간 상호작용 연구, 그리고 파장 변환 기술 등의 분야에서 활발한 연구를 진행 중입니다. 최근에는 NV나 SiV 등 현재 높은 수준의 시스템 기술을 증명한 결함 뿐만 아니라, 차세대 결함계에 대한 관심이 확대되고 있으며, SiV와 유사하되 1-4K 수준의 운용이 가능한 SnV 센터나 대면적 웨이퍼 기술과 호환성이 높은 SiC 결함계, 또는 파장변환기 없이 통신 파장에서 동작 가능한 Er-doped 희토류 양자메모리, 실리콘 기반 T-center 등에 대한 연구도 점차 시도본격화되고 있습니다. 이러한 고체결함계를 활용한 이 노드들이 3개, 5개, 10개로 늘어나고, 광섬유망 위를 달리는 양자 얽힘이 도시와 도시를 잇는 그날이 오게 될 것이다. 다이아몬드 속에서 시작된 이 작은 결함 하나가 양자 인터넷 시대를 여는 연결점이 되고 있습니다.



Quantum Computing

# Scalable, High-Fidelity All-electronic Control of Trapped-Ion Qubits



## 레이저 없이도 가능한 이온 포획 큐비트의 확장가능한 고신뢰도 제어의 구현

### Qurator

김준기 교수

성균관대학교 성균 나노과학기술원 양자정보공학과

저자 C. M. Löschnauer et al., (Oxford Ionics Team)

저널 arXiv Preprint, 2407.07694

게재일 2024-07-10

DOI 10.48550/arXiv.2407.07694



### KEY SUMMARY

양자컴퓨터 개발의 핵심 과제인 고신뢰도 양자게이트를 이온 큐비트에서 레이저 없이 전기적으로 구현하였습니다.

99.99916

(%)

단일 큐비트 게이트 신뢰도

99.97

(%)

얽힘 게이트 신뢰도 (현재 최고)

7

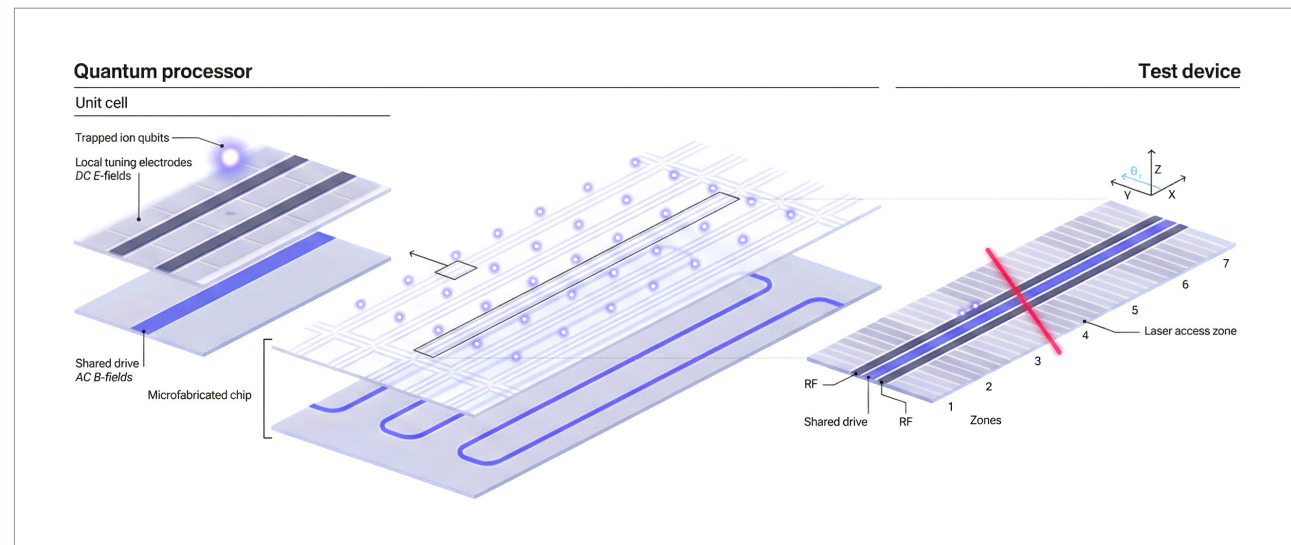
(개)

개별 게이트 정확 설정 수행

특히 얽힘 게이트의 성능은 현재까지 보고된 수치 중 가장 높으며, 여러 큐비트 쌍에 병렬적으로 수행 가능하여 향후 대규모 양자 시스템으로의 확장성에 유리한 특성을 보여줍니다.

실용적인 양자컴퓨터 개발을 위해 해결해야 할 핵심 과제 중 하나는, 확장 가능하면서도 고신뢰도의 양자 게이트를 구현하는 것입니다. 현재 대부분의 양자 프로세서들은 큐비트 수를 늘릴수록 게이트 성능이 저하되는 '규모-성능 간 트레이드오프' 문제를 겪고 있으며, 많은 큐비트를 동시에 정밀하게 제어하는 것은 여전히 큰 기술적 도전 과제로 남아 있습니다. 이온 큐비트의 경우, 특히 대규모 시스템에서 각 이온에 레이저를 개별적으로 조사하는 작업이 매우 복잡하고 어려운 숙제로 남아 있습니다. 최근에는 집적 광학계를 이용한 초소형 광학계 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 여전히 실현 가능한 수준까지는 여러 기술적 난제를 안고 있습니다.

본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 레이저 없이 고신뢰도 양자 게이트를 대규모로 구현하는 접근 방식을 제안하고 실험적으로 입증합니다. 구체적으로는, 이온 포획 칩 하부에 배치된 미세 전선을 통해 강한 자기장 기울기(magnetic field gradient)를 생성하여 이온 큐비트의 상태를 제어하는 방식입니다. 자기장 기울기를 이용한 이온 큐비트 제어 방식은 노벨상 수상자인 David Wineland 박사가 있던 미국 NIST 이온 포획 연구팀에 의해 처음 제안되었으며, 2021년 같은 연구실에서 실험적으로 구현된 바 있습니다. 본 연구는 이 방식을 대규모 시스템에 적용할 수 있도록 확장 가능한 구조로 구현하고, 그 설계 및 원리 증명을 목표로 합니다.



전기적 제어 방식의 이온 포획 양자 프로세서 개념도 및 테스트 디바이스. (원자 이온들은 전압에 인가된 RF/DC 전압에 의해 포획되며, 칩 하부 전선을 통해 생성된 자기장 기울기를 이용해 큐비트 상태가 제어됩니다.)

이온 큐비트는 칩 아래의 전선과의 상대적인 위치에 따라 서로 다른 자기장 기울기를 경험합니다. 전선 바로 위에 위치한 큐비트는 자기장 기울기가 0에 가까워 상호 작용을 거의 느끼지 않지만, 약간 이동된 위치에 있는 큐비트는 의도된 강한 상호작용을 경험하게 됩니다.

이러한 위치 제어는 DC 전압에 인가되는 전압을 조절하여 이온의 위치를 이동시킴으로써 가능하며, 결과적으로 선택적인 게이트 연산이 정밀하게 구현됩니다. 이 방식으로 수행된 단일 큐비트 게이트의 오류율은 Clifford 게이트 기준, SK1 복합 펄스를 사용했을 때  $8.4(7) \times 10^{-6}$  수준으로 매우 낮은 값을 보였습니다.

또한, 게이트가 적용되지 않은 상태에 있는 '숨겨진' 주변 큐비트에서의 제어 오류율도  $1.6(8) \times 10^{-6}$ 로 측정되어, 인접 큐비트 간의 간섭(crosstalk)이 극히 낮음을 확인할 수 있었습니다.

엄밀 게이트 구현에는 이온 큐비트 시스템에서 널리 사용되는 Molmer-Sørensen(MS) 게이트 방식을 자기장을 이용해 적용하였으며, 그 결과 99.97(1)%의 신뢰도를 달성하였습니다. 이는 현재까지 보고된 엄밀 게이트 신뢰도 중 가장 높은 수치로, 오류 정정 코드가 안정적으로 동작할 수 있을 정도로 낮은 오류율에 해당합니다.

또한, 게이트 캘리브레이션 이후 60시간에 걸쳐 99.9% 이상('Three-nines')의 신뢰도를 지속적으로 유지하여, 시스템의 장기적인 안정성과 반복 가능성을 실험적으로 입증하였습니다. 해당 엄밀 게이트 프로토콜은 하나의 전선 상에 배치된 여러 큐비트 쌍에 병렬적으로 적용할 수 있는 구조로 설계되어, 대규모 양자 연산으로의 확장성 측면에서 매우 유망합니다.

다만, 본 논문에서는 병렬 엄밀 게이트 실험 자체를 수행하거나 평가하지는 않았으며, 개별 연산 영역에서의 성능 평가에 집중하고 있습니다.

저자들은 본 연구에서 제안한 기술을 이온 큐비트를 서플링하여 연산을 수행하는 QCCD(Quantum Charge-Coupled Device) 아키텍처에 접목하여, 대규모 양자컴퓨팅 시스템으로 확장할 수 있는 방향을 제시합니다.

QCCD 아키텍처에서는 이온 큐비트들이 포획 포텐셜의 정밀한 제어를 통해 여러 게이트 영역 사이를 이동하며 재배열되고, 이를 통해 복합적인 양자 연산이 수행 됩니다. 미국 Quantinuum사의 이온 포획 기반 양자 프로세서 (H-series) 역시 QCCD 아키텍처를 채택하고 있으며, 최근에는 레이저 기반 엄밀 게이트를 이용해 99.914(3)%의 신뢰도를 달성한 바 있습니다.

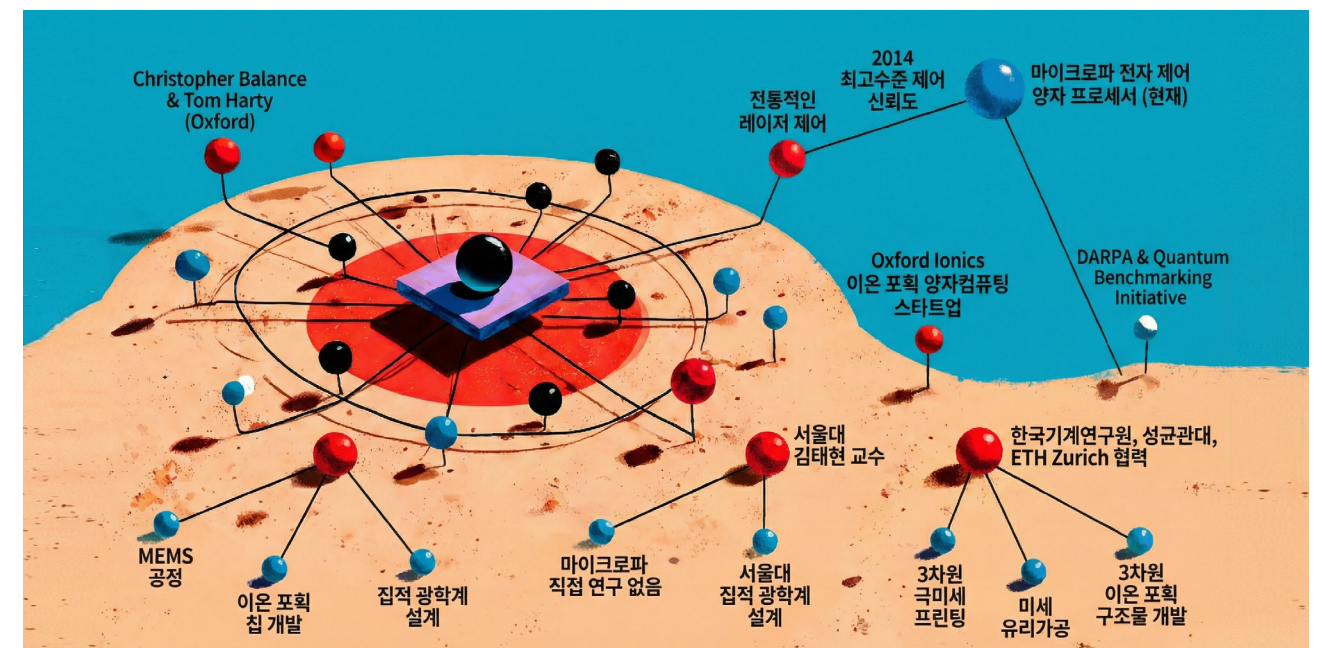
저자들은 본 연구의 접근법을 통해  $3.5 \times 3.5\text{cm}^2$  크기의 칩 상에서 약 1만 개의 큐비트를 제어할 수 있을 것으로 전망하고 있습니다. 한편, 이 방식은 약 1A 수준의 고전류가 필요한 제어 방식이기 때문에 열적 부하가 우려되는 부분 중 하나인데, 저자들은 회로 설계와 열 관리 최적화를 통해 전력 소비를 수백  $\mu\text{W}$  수준으로 억제함으로써, 일반적인 4K 극저온 냉동기로도 시스템을 안정적으로 냉각할 수 있다고 주장합니다.

정리하자면, 이 연구는 전기적 방식에 기반한 이온 큐비트 제어 기술의 확장 가능성과 성능을 검증한 원리증명(proof-of-principle) 실험으로서, 향후 관련 기술 개발의 기반이 될 수 있는 결과를 제시합니다.

### 연구 그룹 소개 및 국내 연구 동향

Oxford Ionics는 Oxford 대학의 David Lucas 교수 연구실 출신의 Christopher Balance 박사와 Tom Harty 박사가 공동 창업한 이온 포획 기반 양자컴퓨팅 스타트업입니다. 이 연구팀은 2014년 이온포획 시스템에서 당시 최고수준의 제어 신뢰도를 보고한 바가 있으며, 현재는 전통적인 레이저 기반 제어 방식 대신 마이크로파 기반의 전자 제어 방식을 적용한 양자 프로세서를 개발 중에 있습니다. 최근에는 DARPA가 주관하는 Quantum Benchmarking Initiative에 참여하는 등, 양자 컴퓨팅 개발과 실용화를 위한 다양한 연구 개발을 활발히 수행 중입니다.

국내에서는 마이크로파 기반의 이온 포획 큐비트 제어에 대한 직접적인 연구는 아직 보고되지 않았으나, 이온 포획 칩 및 확장 가능한 시스템에 대한 연구는 꾸준히 진행되고 있습니다. 서울대학교 김태현 교수 연구실에서는 MEMS 공정을 기반으로 한 이온 포획 칩 개발과 집적 광학계 설계에 대한 연구를 활발히 수행하고 있습니다. 또한 최근에는 한국기계연구원, 성균관대학교, ETH Zurich 간의 협력 연구를 통해, 3차원 극미세 프린팅 및 미세 유리 가공 공정 기반의 3차원 이온 포획 구조물 개발이 진행되고 있어, 국내에서도 확장형 이온 포획 시스템 구현을 위한 기술 기반이 점차 마련되고 있는 상황입니다.



quantum  
wave

연속과 이산의 융합,  
차세대 양자컴퓨팅의 새로운 해답

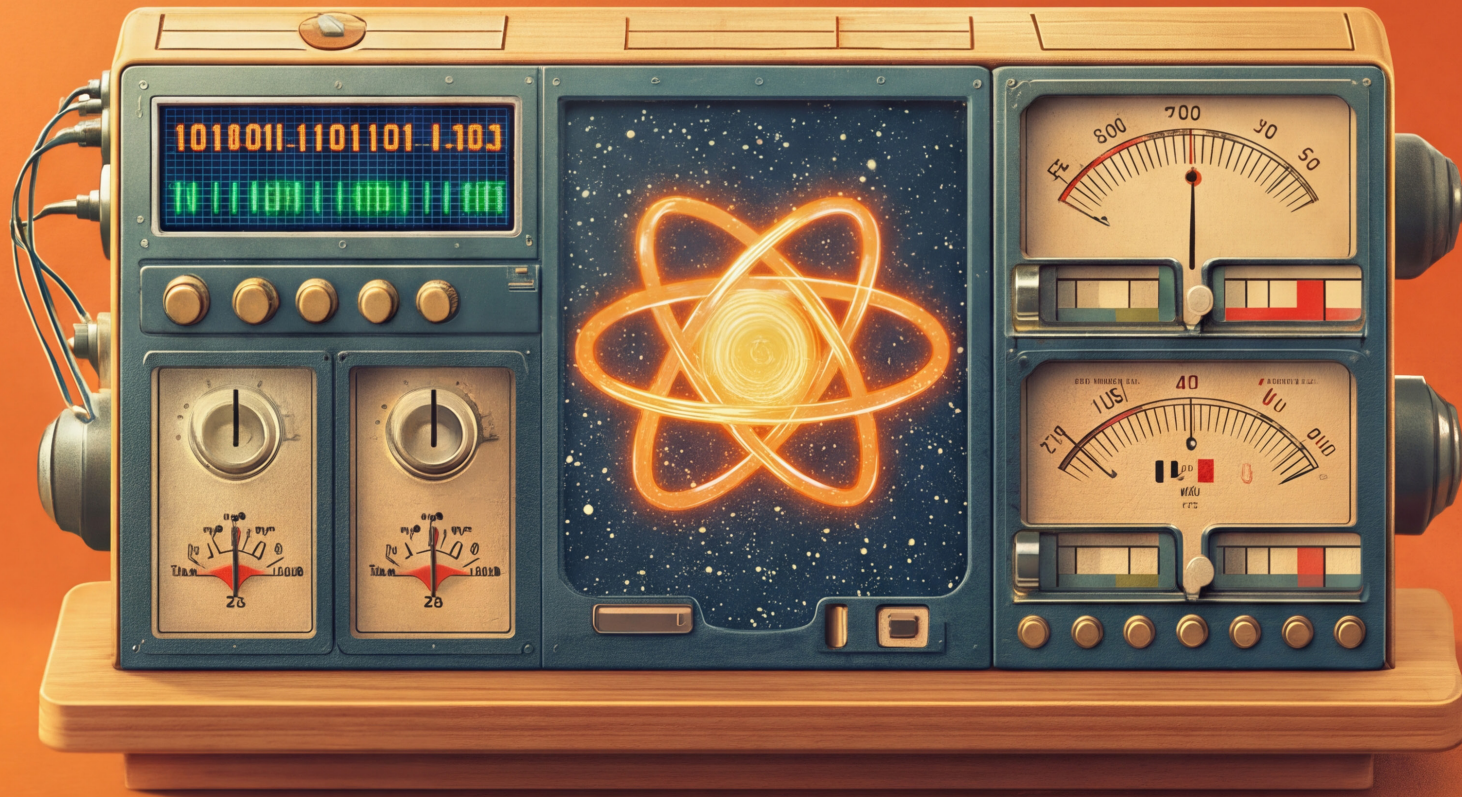
# open Class

열린 강의실

새로운 양자패러다임: 연속-이산 하이브리드 양자프로세서

# 새로운 양자패러다임

## 연속-이산 하이브리드 양자프로세서



### 허준석 교수

연세대학교 화학과 및 양자정보학과

### 공저자

강민혁, 홍정수, 오병두  
(성균관대학교 나노과학기술원)

양자 컴퓨팅

양자 샘플링

양자이득

하이브리드 연속-이산 시스템

해밀토니안 시뮬레이션

### KEY SUMMARY

본 열린강의실에서는 큐비트 기반 양자컴퓨팅의 한계를 보완하기 위해 연속 변수 (보손 모드)와 이산변수 (큐비트) 를 결합한 연속-이산 하이브리드 양자 프로세서의 개념과 응용을 다룹니다. 연속-이산 하이브리드 시스템의 물리적 구현사례 (초전도회로, 이온트랩, 중성원자), 하이브리드 게이트 구조, AMM 및 ISA필요성, 그리고 해밀토니안 시뮬레이션에 대해서 소개합니다. 마지막으로 연속-이산 하이브리드 프로세서의 주요과제와 향후 연구방향을 간략히 제시합니다.

양자 컴퓨팅 분야에서 우리가 가장 크게 기대하는 목표는 단연코 양자 우위와 양자 이득일 것입니다. 양자 우위란, 특정 문제를 고전 컴퓨터로는 사실상 풀 수 없지만 양자 컴퓨터라면 해결할 수 있음을 뜻합니다. 반면, 양자 이득은 양자 알고리즘이 실제 환경에서 고전 알고리즘보다 월등히 우수한 성능을 보일 때 사용되는 용어입니다. 두 개념 모두 고전 컴퓨터보다 훨씬 빠른 속도로 문제를 해결하거나, 기존에는 접근하기조차 어려웠던 영역을 탐구할 수 있으리라는 기대를 반영합니다. 하지만 과연 현재의 양자 컴퓨팅 기술이 이러한 기대를 완벽히 충족할 수 있을까요?

이 물음에 험사리 '그렇다'고 대답하기는 어렵습니다. 가장 큰 이유는 이론적으로 제시된 양자 알고리즘과 실제 하드웨어 기술 사이에 여전히 큰 간극이 존재하기 때문 인니다. 예를 들어, 쇼어 알고리즘은 양자 푸리에 변환을 이용해 정수를 매우 빠르게 소인수분해함으로써, 이론적으로는 고전 알고리즘보다 훨씬 빠르게 RSA 암호를 깨뜨릴 수 있을 가능성을 제시합니다. 그러나 이를 실제 장치에서 구현하려면 오래 유지되는 결맞음 시간이 확보된 큐비트가 필요합니다. 현재 기술 수준의 물리적 큐비트만으로는 이 조건을 충족하기가 쉽지 않으며, 오류 정정 코드를 사용해 논리적 큐비트를 만든다고 해도, 그에 필요한 물리적 큐비트의 수는 현재 가용한 양자 자원을 훨씬 초과합니다.

이처럼 기술적 제약이 분명하므로, 연구자들은 지금 당장 활용 가능한 하드웨어에서도 양자 우위를 발휘할 수 있는 방법을 모색하게 되었습니다. 그 대안으로 주목받은 것이 바로 양자 샘플링 문제입니다. (가우시안) 보손 샘플링, 랜덤 회로 샘플링 등이 대표적 예 입니다.<sup>1</sup> 특히 가우시안 보손 샘플링은 몇몇 실험에서 고전적인 계산 능력을 넘어서는 결과를 냈다고 평가되고, 최근 구글이 추진한 월로우 프로젝트는 랜덤 회로 샘플링을 대규모로 구현해 고전 컴퓨터가 풀기 어려운 영역에서 양자 샘플링을 성공적으로 수행했다는 의의를 남겼습니다.

그렇지만 현실 세계에서 중요한 계산 문제들은 대부분 특정 수학적·물리적 구조를 가지고 있고 이를 활용해 고전 컴퓨터로도 어느 정도 근사적인 해답을 구할 수 있습니다. 반면 양자 샘플링은 이런 구조를 의도적으로 배제하여 고전 컴퓨터가 접근조차 하기 어렵도록 설계된 특수한 형태의 문제들입니다. 다시 말해, 큰 규모의 양자 샘플링 구현은 양자정보학적으로 중요한 이정표라는 데에는 이견이 없지만, 실제 산업이나 연구 현장에서 광범위하게 쓰일 수 있을지는 불명확합니다. 더불어, 기존의 큐비트 기반 양자 컴퓨팅 방식이 가진 비효율성도 고려해야 합니다. 예를 들어, 양자 오류 정정 코드는<sup>2</sup> 물리적 큐비트 여러 개를 묶어 논리적 큐비트로 구성되는데, 이때 필요한 물리적 큐비트의 수가 워낙 많아 현실적으로 구현하려면 많은 난관을 극복해야 합니다. 또한, 보손 시스템처럼 차원이 사실상 무한대에 가까운 양자 시스템을 큐비트로만 표현하려고 하면 많은 자원을 소모하는 비효율적인 상황이 발생합니다. 근사 과정을 통해 보손 시스템을 큐비트로 변환한다고 해도, 그 상태와 게이트를 제대로 표현하기 위해서는 여전히 막대한 양자 자원이 필요합니다.

그렇다면 제한된 양자 리소스를 효율적으로 활용하면서, 고전 컴퓨팅과 비교해 우수한 능력을 발휘할 수 있는 또 다른 방법은 무엇일까요? 최근 주목받고 있는 아이디어 중 하나는, 기존의 (큐비트 기반) 양자 컴퓨팅에 더해 보손 모드를 함께 사용하는 연속-이산(Continuous-Variable-Discrete-Variable) 하이브리드 양자 프로세서를 도입하는 것입니다. 이 글에서는 바로 그 연속-이산 양자 프로세서의 개념과 가능성에 대해 소개합니다. 이어지는 내용은 미국 예일대학의 Steven Girvin 교수가 발표한 리뷰 논문 [Liu2024]을 상당 부분 참고하여 작성했음을 밝혀둡니다.

## 하이브리드 양자 시스템

대부분의 양자 컴퓨팅 연구는 이산 변수인 큐비트를 중심으로 진행되어 왔습니다. 반면, 보손 모드(조화 진동자)는 무수히 많은 상태를 가질 수 있으며, 특히 운동량이나 위치를 이용해 표현할 수 있어 연속 변수로 분류됩니다. 이 두 요소를 결합한 하이브리드 양자 진동자-큐비트 시스템(또는 하이브리드 연속-이산 시스템)은 큐비트와 보손 모드를 함께 활용해 양자 정보를 저장하고 조작하는 방식을 제공합니다.

지난 20년 동안 다양한 양자 컴퓨터 하드웨어에서 하이브리드 장치 아키텍처가 연구되었고, 그 과정에서 양자 제어와 양자 오류 수정에 대한 상당한 이론적·실험적 진전이 이루어졌습니다. 보손 모드는 큐비트들 간의 얽힘을 생성하는 매개체로 활용될 뿐만 아니라, 오류 정정 코드를 구성하거나 스핀-보손 간 상호작용을 시뮬레이션 하는 중요한 요소로도 주목받고 있습니다. 이렇게 탄생한 하이브리드 진동자-큐비트 시스템은 기존의 큐비트 기반 접근법과는 전혀 다른 패러다임을 제시하며, 전통적 방법보다 유리한 장점을 제공할 수 있습니다.

먼저, 보손 모드를 포함한 양자 현상을 더 정밀하게 시뮬레이션할 수 있어 복잡한 물리적 시스템을 한층 효과적으로 분석할 수 있습니다. 둘째, 연속 변수를 활용해 진동자의 무한 차원 상태 공간을 이용하면 자원 효율적인 양자 오류 수정을 수행할 수 있습니다. 하이브리드 시스템은 큐비트의 정밀성과 진동자의 견고함을 결합해 더욱 강력한 양자 시뮬레이션과 개선된 오류 수정 기법을 가능케 합니다. 셋째로, 이러한 시스템은 기초적인 연산에서부터 복잡한 양자역학적 시뮬레이션까지 다양한 양자 작업에 적용될 수 있습니다.

이를 종합해보면 하이브리드 연속-이산 시스템은 양자 컴퓨팅의 영역을 넓히고, 높은 정확도와 효율을 제공할 잠재력을 갖추고 있다고 볼 수 있습니다. 특히 연속 변수와 이산 변수가 지닌 장점을 접목하면, 보손 모드를 이용한 복잡한 양자 시뮬레이션과 오류 수정 메커니즘을 더욱 발전시킬 수 있습니다. 또한, 하이브리드 양자 연속-이산 시스템은 현재 양자 컴퓨팅 기술이 직면한 여러 도전 과제를 극복할 강력한 대안으로도 거론되고 있습니다. 이는 큐비트가 선사하는 정밀한 제어 능력과 진동자가 지닌 우수한 오류 수정 잠재력이 어우러져, 보다 효율적이고 유연한 양자 정보 처리를 가능하게 하기 때문입니다.

지금부터 이러한 하이브리드 시스템의 이론적 기초, 실용적 도전 과제, 그리고 잠재적 응용 분야를 차례로 살펴보고자 합니다. 특히 하이브리드 양자 연속-이산 프로세서의 잠재력과 이를 실현하기 위해 해결해야 할 문제들을 살펴보면서, 추상 기계 모델(AMM; Abstract Machine Models)과 명령 세트 아키텍처(SA; Instruction Set Architectures)<sup>3</sup>의 필요성을 설명할 것입니다. 이에 더해 마지막으로 하이브리드 시스템의 주요 응용 분야 중 하나로 꼽히는 해밀토니안 시뮬레이션도 함께 논의합니다. 이를 통해 하이브리드 양자 시스템이 어떻게 양자 컴퓨팅의 한계를 확장하고, 새로운 가능성을 열어줄 수 있는지 구체적으로 조망해 보고자 합니다.

### 하이브리드 연속-이산 시스템의 물리적 메커니즘

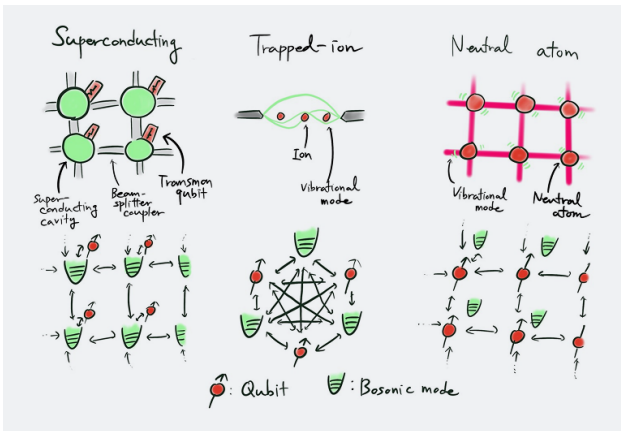


Figure 1. 연속-이산 하이브리드 양자 프로세서: 초전도 회로(좌), 이온 포획(중), 중성원자(우).

구현하는 양자 컴퓨터 하드웨어에 따라 (진동자-큐비트) 하이브리드 시스템의 연결성과 특성이 달라진다. 하이브리드 연속-이산 시스템은 오늘날 다양한 양자 컴퓨터 하드웨어에서 구현되어 왔습니다. 특히 보손 모드를 활용해 큐비트 간 양자 얽힘을 생성하는 연구가 활발히 진행되면서, 보손 모드와 큐비트의 상호작용에 대한 이해가 크게 발전했습니다. 이러한 성과를 바탕으로, 여러 양자 컴퓨터 하드웨어에서 하이브리드 연속-이산 시스템이 이론적·실험적으로 폭넓게 탐구 되고 있습니다. 여기서는 그 대표적인 물리적 구현 사례들을 살펴보겠습니다.

먼저, 초전도 회로를<sup>4</sup> 이용한 사례입니다. 초전도 마이크로파 공진기(연속 변수)는 개별 초전도 큐비트(이산 변수)와 분산 결합된 형태로 구성되어, 큐비트와 마이크로파 진동자(보손 모드)의 광자 상태에 양자 정보를 저장하고 조작할 수

있습니다. 인접한 마이크로파 공진기는 마이크로파 빔가르개로 연결되어 있어, 약 100 ns의 짧은 시간에 99.9% 수준의 신뢰도로 SWAP 게이트를 수행할 수 있습니다. 이를 통해 큐비트와 진동자 간의 원격 통신과 얽힘이 가능합니다. 또한 각 큐비트는 단일 보손 모드에 연결되어 크로스토크가 최소화되며, 공진기 모드를 연결하는 빔가르개를 마이크로파로 실시간 제어할 수 있어 2차원 하드웨어 전반에서 양자 정보를 빠르고 안정적으로 전파할 수 있습니다. 더 나아가 초전도 아키텍처에서는 광자 수 패리티를 비파괴적으로 측정할 수 있으므로, 오류가 발생 하더라도 위치 파악과 수정이 용이하다는 이점이 있습니다.

다음으로, 이온 포획 장치<sup>5</sup>에서는 이온 배열의 모든 집단 운동 모드(연속 변수)가 각각 이온 스핀 큐비트(이산 변수)와 연결되어 있어, 장거리 연결 뿐 아니라 일대일 연결도 가능하다는 특징이 있습니다. 이는 하나의 전기 퍼텐셜에 포획된 이온에게 매우 높은 유연성과 연결성을 제공하지만, 큐비트 간 혹은 진동자-큐비트 간 상호작용은 진동자의 주파수와 스핀 큐비트 주파수의 선형 조합으로 정해진 레이저 주파수를 통해 이루어집니다. 따라서 하나의 퍼텐셜 안에 더 많은 이온이 포획될수록 이온 간 간격이 좁아져 진동자 모드의 주파수 밀도가 높아지고, 그 결과 크로스토크 위험도 커질 수 있습니다.

마지막으로, 광학 집게 배열의 중성 원자<sup>6</sup> 시스템에서는 원자 큐비트(이산 변수)가 개별 원자의 운동 모드(연속 변수)와 연결되는 형태로 구성됩니다.

초전도 아키텍처와 마찬가지로 각 큐비트는 단일 운동 모드에만 연결되어 있어 크로스토크가 최소화되며, 빔가르개 대신 인접한 중성 원자 간 리드버그 상호 작용을 통해 큐비트 간 연결을 형성합니다. 이처럼 다양한 물리적 시스템에서 구현되는 연속-이산 하이브리드 구조는 양자 정보의 저장과 조작 측면에서 높은 확장성과 신뢰도를 확보할 수 있어, 차세대 양자 프로세서의 실현 가능성을 더욱 앞당길 것으로 기대됩니다.

## 양자 게이트: 진동자-큐비트 하이브리드 게이트

이처럼 다양한 양자 컴퓨터 하드웨어는 저마다 보손 모드와 큐비트 간의 고유한 연결 구조와 특성을 갖추고 있습니다. 하드웨어마다 구현하기 쉬운 게이트를 활용해 보손 모드와 큐비트의 상태를 조작할 수 있는데, 큐비트 자체를 다루는 방법은 이미 많은 양자 컴퓨팅 플랫폼에서 잘 확립되어 있으므로, 여기서는 진동자-큐비트 간 상호작용을 기반으로 한 하이브리드 게이트, 특히 이를 통해 보손 상태에 작용할 수 있는 게이트들을 중심으로 살펴보겠습니다.

일반적으로 양자 컴퓨터 하드웨어에 존재하는 보손 모드에는 보손 모드만을 대상으로 하는 게이트도 있지만, 실질적으로는 큐비트와의 상호작용을 통해 보손 모드의 상태를 조절하는 경우가 많습니다. 예컨대, 초전도 회로에서는 보손 모드와 큐비트가 분산 상호작용으로 연결되어 있고, 이온 포획 시스템에서는 제인스-커밍스 상호작용(Jaynes-Cummings interaction)<sup>7</sup>이 사용됩니다. 이들 상호작용은 보손 모드와 큐비트 간 양자 얽힘을 생성할 뿐 아니라, 보손 게이트를 구현하는 기반이 되기도 합니다. 특히 보손 게이트는 전통적인 양자 광학 시스템에서 사용하는 방식보다 복잡한 연산을 비교적 쉽게 실현할 수 있어, 보손 기반 컴퓨팅의 잠재력을 한층 높여줍니다. 보손 상태에 작용하는 게이트는 크게 가우시안 게이트와 비-가우시안 게이트로 나눌 수 있습니다. 가우시안 게이트는 보손의 바락상태로부터 시작해 가우시안 형태의 양자 상태를 유지하면서 변환하는 연산을 말합니다.

- 샘플링 문제는 양자 시스템의 출력 확률 분포를 하나씩 측정하여 샘플링하는 계산 문제로, 대표적으로 보손 시스템에서 사용되는 보손 샘플링과 큐비트시스템에서 사용되는 랜덤 회로 샘플링이 있다. 자세한 내용은 [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_supremacy](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_supremacy) 참조.
- 여러 개의 물리적 큐비트를 사용하여 대칭성이 있는 얽힘 패턴을 만들어, 양자 에러로부터 더 적은 수의 논리적 큐비트를 보호하는 코드이다. 자세한 내용은[https://wiki.qisk.or.kr/%EC%96%91%EC%9E%90%EC%BB%B4%ED%93%A8%ED%8C%85\\_\(Quantum\\_Computing\)#%EC%96%91%EC%9E%90\\_%EC%98%A4%EB%A5%98\\_%EC%A0%95%EC%A0%95\\_\(Quantum\\_Error\\_Correction\)](https://wiki.qisk.or.kr/%EC%96%91%EC%9E%90%EC%BB%B4%ED%93%A8%ED%8C%85_(Quantum_Computing)#%EC%96%91%EC%9E%90_%EC%98%A4%EB%A5%98_%EC%A0%95%EC%A0%95_(Quantum_Error_Correction)) 참조
- 하드웨어에 독립적으로 명령어를 정의하기 위한 추상화 계층. 자세한내용은 [Liu2024] 참조
- Josephson junction이 만들어내는 LC초전도회로의 비선형성을 활용하여 두 단계로 이루어진 시스템을 만들어 양자컴퓨터에 사용하는 장치 [https://wiki.qisk.or.kr/%EC%B4%88%EC%A0%84%EB%8F%84\\_%ED%81%90%EB%B9%84%ED%8A%B8\\_\(Superconducting\\_Qubit\)](https://wiki.qisk.or.kr/%EC%B4%88%EC%A0%84%EB%8F%84_%ED%81%90%EB%B9%84%ED%8A%B8_(Superconducting_Qubit))
- 전기장으로 이온을 포획하여 양자컴퓨팅에 사용하는 장치 [https://wiki.qisk.or.kr/%EC%9D%B4%EC%98%A8\\_%ED%8A%B8%EB%9E%A9\\_\(Ion\\_Trap\)](https://wiki.qisk.or.kr/%EC%9D%B4%EC%98%A8_%ED%8A%B8%EB%9E%A9_(Ion_Trap))
- 광학적 집게로 중성원자를 포획하여 양자컴퓨팅에 사용하는 장치 [https://wiki.qisk.or.kr/%EC%A4%91%EC%84%B1\\_%EC%9B%90%EC%9E%90\\_%EA%B8%B0%EB%B0%98](https://wiki.qisk.or.kr/%EC%A4%91%EC%84%B1_%EC%9B%90%EC%9E%90_%EA%B8%B0%EB%B0%98)
- 큐비트와보손모드간기본상호작용모델. 자세한 내용은 [https://en.wikipedia.org/wiki/Jaynes%26%80%93Cummings\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Jaynes%26%80%93Cummings_model) 참조

변위 게이트, 위상공간 회전 게이트, 단일모드 압축 게이트가 대표적이고, 두 모드 빔가르개/압축/합 게이트 역시 여기에 속합니다. 양자 광학에서는 이들을 선형 광학 요소로 구현할 수 있어 선형 게이트라고도 부르며, 큐비트 게이트의 클리포드 게이트에 비유할 수 있습니다. 클리포드 게이트와 선형 게이트 모두 구현이 비교적 용이하지만, 이들만으로는 유니버설(범용) 컴퓨팅을 달성하기 어렵다는 유사성이 있습니다.

반면, 비-가우시안 게이트는 가우시안 함수를 유지하지 않는 연산으로, 선형 광학 요소만으로는 구현이 불가능해 비선형 게이트라고 부르기도 합니다. 예를 들어, 위치 연산자의 세제곱 항을 포함하는 조화 진동자의 해밀토니안에 대한 시간 진화 연산은 가우시안 상태를 유지하지 못하므로 비-가우시안 게이트에 해당합니다. 가우시안 게이트에 비-가우시안 게이트를 조합하면 보손 시스템에서 유니버설 컴퓨팅을 구현할 수 있으나, 전통적인 양자 광학 방식으로는 이를 실현하기가 쉽지 않았습니다.

이때 진동자-큐비트 하이브리드 게이트는 큐비트와 보손 모드 간의 상호작용을 능동적으로 제어함으로써, 비선형 게이트를 비롯한 보다 복잡한 보손 게이트들을 구현할 수 있게 해줍니다. 예컨대 큐비트 파트의 파울리 연산자 교환 관계나, 시스템 고유의 진동자-큐비트 상호작용을 이용해, 조건부로 작동하는 패리티 게이트·위상공간 회전 게이트·변위 게이트·압축 게이트 등을 구축할 수 있습니다. 더 나아가 숫자 기저(number basis)에 따라 큐비트 회전 변환이나 위상 변환을 달리 적용하는 고차원적 비선형 게이트도 실현 가능합니다. 예를 들어 조건부 변위 게이트를 활용하면 단일 게이트만으로 켓(Cat) 상태를 만들 수 있고, 복잡한 보손 해밀토니안의 시간 진화를 모사하는 연산자들도 구현할 수 있습니다.

이처럼, 하이브리드 게이트 전략을 통해 보손 상태의 제어 범위가 대폭 확장되면서, 보손 모드를 활용한 범용 양자 컴퓨팅이 한층 현실에 가까워지고 있습니다. 이러한 흐름은 향후 양자 하드웨어와 소프트웨어 전반에 중요한 패러다임 변화를 가져올 것으로 기대됩니다.

### 하이브리드 프로세서에 맞춘 AMM 및 ISA의 개발

추상 기계 모델(AMM)은 실제 하드웨어나 구현 세부사항을 배제한 채, 계산 과정을 수학적이고 개념적으로 표현하는 틀로서 알고리즘 설계와 시스템 복잡도를 분리하여 이해할 수 있게 해줍니다. 반면, 명령 세트 아키텍처(ISA)는 프로세서가 이해하고 실행할 수 있는 기계어 명령들의 집합과 그 형식을 정의함으로써, 소프트웨어와 하드웨어가 소통하는 핵심 인터페이스를 제공합니다.

큐비트 기반 양자 컴퓨터와 마찬가지로, 하이브리드 진동자-큐비트 시스템을 본격적으로 구현하려면 단순히 하드웨어만 활용하는 수준을 넘어, 연속 변수와 이산 변수 기술을 통합하기 위한 새로운 양자 오류 수정 전략과 정교한 양자 작업을 지원할 수 있는 견고한 AMM이 필수적입니다. 나아가 이 프로세서를 프로그래밍하고, 그 계산 능력을 제대로 평가하기 위해서는 기존 방식과는 다른 혁신적인 하드웨어-소프트웨어 공동 설계가 필요합니다. 또한, 하이브리드 양자 프로세서의 잠재력을 극대화하려면, 하드웨어에서 수행 가능한 연산을 체계적으로 정의하는 AMM과 ISA를 함께 구축하는 일이 중요합니다. 특히 연속 변수와 이산 변수라는 상이한 양자 시스템을 동시에 다루는 하이브리드 환경에서 보편적 제어를 실현할 수 있는 ISA를 설계하는 것은 매우 중요한 과제지만 기술적로 쉽지 않습니다.

이 아키텍처가 제대로 정립된다면, 하이브리드 시스템의 계산 능력을 정량화하는 것은 물론, 알고리즘을 효과적으로 설계하여 전반적인 효율성과 결함허용오차를 향상시키는 데에도 크게 기여할 것입니다.

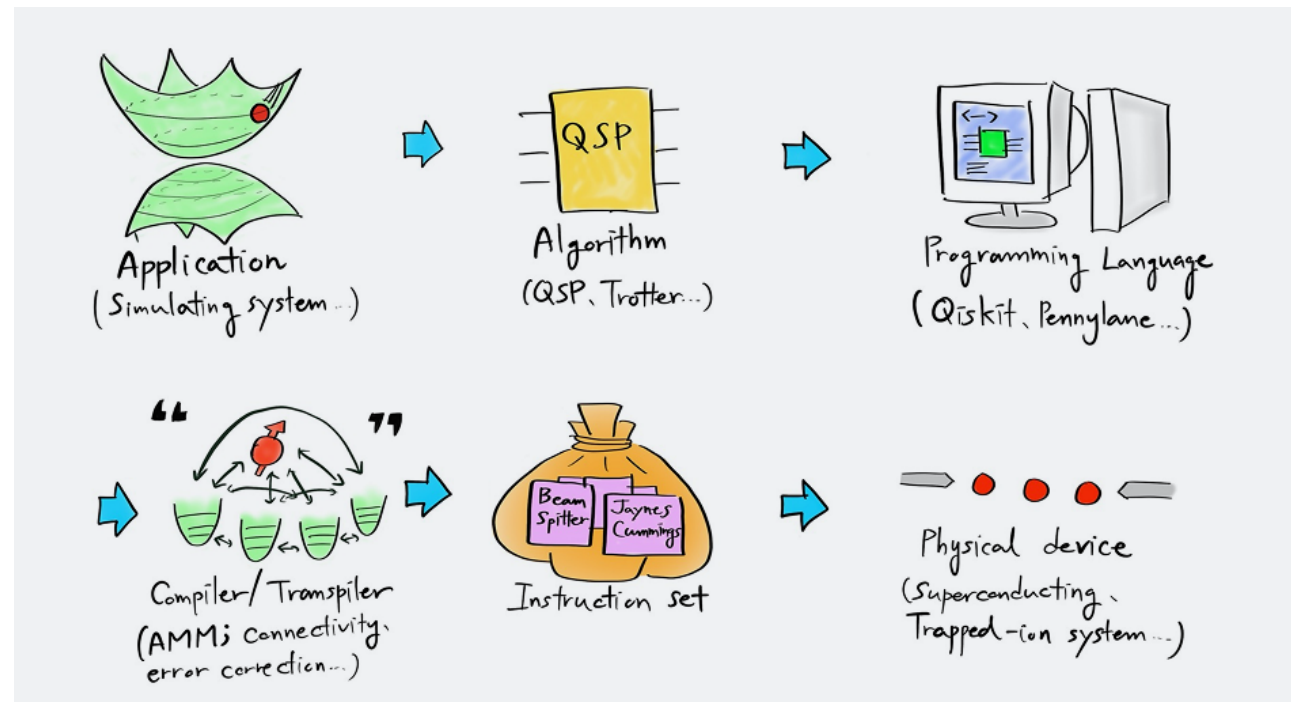


Figure 2. 양자컴퓨팅 아키텍처와 작동순서 예시

Figure 2 그림은 이러한 하이브리드 진동자-큐비트 시스템 아키텍처를 개략적으로 보여줍니다. 예를 들어, 어떤 물리 시스템에서 페르미온과 보손 입자가 함께 등장하는 상황을 시뮬레이션하려 한다면, 먼저 이를 구현할 알고리즘이 필요하고, 알고리즘을 프로그래밍 언어로 표현할 수 있어야 합니다. 이후 작성된 프로그램을 실행하려면, 이에 맞는 AMM과 ISA가 필수적으로 요구됩니다. 이후 컴파일 과정을 거쳐 하드웨어에서 요구하는 네이티브 양자 회로를 생성하고, 최종적으로 시뮬레이션을 실행하게 됩니다. 하이브리드 진동자-큐비트 하드웨어 계층은 크게 세 가지 다른 AMM을 제시할 수 있습니다. 첫 번째 모델은 큐비트 중심으로, 양자 정보가 큐비트에 저장·조작되며, 진동자 모드는 큐비트 간 장거리 양자 통신 버스로서 간접적으로만 활용됩니다. 두 번째 모델은 진동자 중심으로, 공진기 내 광자 상태에 보손 오류 정정 코드를 적용해 양자 정보를 저장·조작하고, 큐비트는 광자 상태를 제어하기 위한 비선형 보조 요소로 활용됩니다. 마지막으로 사용자가 하이브리드 계산이나 보손-스핀을 모두 포함하는 물리 모델 시뮬레이션을 하고자 할 때, 하이브리드 진동자-큐비트 하드웨어를 직접 활용하는 모델이 있습니다. 이 세 가지 AMM은 각각 소프트웨어 스택의 컴파일러 계층에 다른 기능을 노출하며, 그에 따라 별도의 ISA가 필요해 집니다.

이후에는 이러한 시스템을 구체적이고 효과적으로 실행하기 위한 컴파일 방법을 고안해, 이론적·실험적 효율을 최대화해야 합니다. 마지막으로, 하이브리드 양자 프로세서가 실제로 활용될 수 있는 구체적인 사용 사례를 발굴하고 검증하는 과정이 필요합니다. 이러한 모든 과정을 종합적으로 수행함으로써, 하이브리드 양자 시스템의 강점을 최대한 이끌어낼 수 있을 것입니다.

### 양자 하이브리드 시스템의 컴파일 기법

하이브리드 시스템에서 양자 알고리즘을 실제 하드웨어 지침으로 변환(컴파일)하는 기법은, 하이브리드 시스템 내 양자 신호 처리를 구현하는 방법을 말합니다. 일반적으로 컴파일은 한 프로그래밍 언어를 다른 프로그래밍 언어로 변환하는 과정을 말하고, 트랜스파일링은 고수준 ISA를 큐비트 연결 정보를 인식하는 저수준 하드웨어 명령어로 변환하는 과정을 뜻합니다. 여기서는 이 둘을 구분하지 않고, 모두 통칭해 '컴파일'이라고 하겠습니다.

양자 프로그래밍 언어 자체가 아직 초기 단계이며, 특히 보손 프로그래밍 언어와 관련해서는 고전 컴퓨터의 컴파일 방식 수준으로 확립된 체계가 거의 없는 실정입니다. 하이브리드 진동자-큐비트 알고리즘을 컴파일하는 핵심은, 다중 진동자-큐비트 유니터리 연산자를 보손 ISA 중 하나로 얼마나 효율적으로 분해할 수 있는가에 달려 있습니다. 하이브리드 연속-이산 양자 컴퓨터에서 일반적인 알고리즘 작업은 측정과 피드포워드와 교차되는 여러 유니터리 작업으로 구성되며, 측정 결과에 따라 새로운 유니터리를 생성합니다. 또한 하이브리드 구조에는 빔가르개와 같은 네이티브 진동자-멀티큐비트 유니터리가 포함되어 있어, 이를 컴파일 과정에서 기본 요소로 활용할 수 있습니다.

그러나 알고리즘이 복잡해 질수록, 이러한 컴파일 규칙을 하나하나 추가하는 일은 점점 어려워지고 비효율적으로 변합니다. 이 때문에 현대 컴파일러에서는 좋은 회로를 찾기 위해 수치 최적화 알고리즘을 도입하고 있습니다. 일부 초전도 회로 하드웨어 플랫폼에서는 트랜스몬 큐비트들이 서로 직접적으로 근접 연결되어 있지만, 초전도 회로 큐비트/공진기 구조는 크로스토크 문제를 피하기 위해 이러한 직접 연결을 의도적으로 제한합니다. 대신 다중 큐비트 결합 게이트를 공동체로 사용하는 분석적 컴파일 전략을 통해, 고수준 알고리즘이 큐비트와 진동자를 동등하게 취급하면서도 빠르고 신뢰도 높은 SWAP 게이트를 활용해 논리적으로 모두 연결할 수 있게 합니다.

### 응용 가능성: 해밀토니안 시뮬레이션

이제 해밀토니안 시뮬레이션을 중심으로, 하이브리드 진동자-큐비트 시스템을 통해 기대할 수 있는 응용 가능성들을 소개하고자 합니다. 해밀토니안 시뮬레이션은 주어진 양자 시스템의 상태와 시간이 흐름에 따라 변화를 모사하여, 양자 시스템을 이해하는 데 필수적인 역할을 합니다. 하지만 고전 컴퓨터로는 양자 시스템의 규모가 커질수록 계산량과 저장 공간이 지속적으로 늘어나기 때문에, 정확한 모사가 점점 어려워집니다.

이로 인해 다양한 근사적 기법들이 개발되었지만, 이들 역시 한계를 지닙니다. 예를 들어 평균장 이론(Mean-Field Theory)나 준고전 근사법(Semiclassical Approximation)은 입자 간 상관관계를 제대로 포착하지 못합니다. 결합 클러스터 이론(Coupled-Cluster Theory)과 텐서 네트워크(Tensor network) 기반 기법은 힐베르트 공간(Hilbert space)을 제한적으로만 취급하기 때문에, 강한 상관관계가 존재하는 시스템에서는 부정확한 결과를 초래할 수 있습니다. 또한 양자몬테카를로(Quantum Monte Carlo) 같은 샘플링 기반 방법들은 부호 문제나 위상 문제 등으로 인해 활용에 제약이 따릅니다.

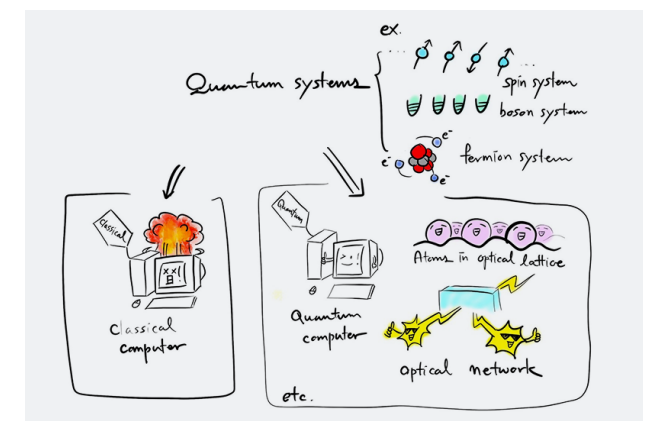


Figure 3. 양자시스템을 클래식컴퓨터에서 시뮬레이션 할 경우, 메모리 및 실행시간에 대해 부하가 걸릴 수 있지만, 양자컴퓨터의 경우엔 보다 효율적으로 처리할 수 있다

이에 대한 대안으로, 양자 컴퓨터나 제어 가능한 양자 시스템을 활용한 해밀토니안 시뮬레이션이 제안되어 왔고, 실제 실험도 진행되어 왔습니다. 예를 들어, 양자 컴퓨터나 광학 격자를 이용한 양자 시뮬레이터에서는 스핀 혹은 페르미온 모델에 대한 시뮬레이션이, 광학 네트워크에서는 보손 모델에 대한 시뮬레이션이 각각 시도되었습니다. 그러나 지금까지 이루어진 해밀토니안 시뮬레이션은 대체로 하나의 종류(스핀, 보손, 혹은 페르미온)만을 다루었으며, 분자양자동역학에서 나타나는 핵의 진동과 전자 간 상호작용이 결합된 문제나, 표준 모델에서의 보손-페르미온 상호작용처럼 두 종류 이상의 해밀토니안을 포함하는 경우, 특히 보손이 포함된 다중 해밀토니안에 대한 시뮬레이션 연구는 활발히 진행되지 못했습니다. 이는 하나의 양자 시스템이 주로 한 가지 자유도(예: 광학 네트워크는 보손 자유도만)를 갖고 있었기 때문이며, 이러한 한계를 극복하기 위해 여러 종류의 자유도를 모두 포함하는 양자 플랫폼의 필요성이 대두되었습니다.

큐비트 기반 양자 컴퓨터의 경우, 큐비트를 활용해 다양한 시스템(스핀, 페르미온, 보손 등)을 모사하고 해밀토니안 시뮬레이션을 수행하려는 시도가 많았습니다. 그러나 특히 큐비트로 보손을 모사하려 할 때, 보손 상태 자체는 근사적으로 구현하기가 비교적 쉽지만, 보손의 연산자를 구현하기 위해서는 너무 많은 큐비트 게이트가 필요해 효율적이지 못하다는 단점이 있습니다.

보손 시스템을 직접 사용하는 경우를 살펴보면, 더 복잡한 보손 해밀토니안을 시뮬레이션하기 위해서는 비-가우시안 연산이 필수적입니다. 그러나 주로 보손을 모사하는 광학 네트워크에서 실제 환경에서 비-가우시안 연산을 구현하는 일은 쉽지 않습니다. 또한 보손 시스템으로 큐비트 시스템을 모사하려 할 때 역시, 큐비트 연산자를 효율적으로 구현하기 어렵다는 단점이 존재합니다.

반면, 진동자-큐비트 하이브리드 시스템은 보손과 큐비트를 동시에 가지는 구조이므로, 기존에 큐비트만 이용해 해밀토니안 시뮬레이션을 하던 방식과 보손만 이용한 방식을 통합할 수 있습니다. 나아가 보손과 큐비트가 결합된 다중 해밀토니안 시뮬레이션까지 효율적으로 수행할 수 있게 해줍니다. 예를 들어, 이온 포획 시스템에서는 진동자-큐비트 하이브리드 게이트를 이용해 진동 모드로 분자의 진동 구조를 모사하거나, 핵 진동 모드와 전자의 상호작용으로 인한 원뿔교차로

(Conical Intersection)<sup>8</sup> 같은 양자 현상을 진동 모드와 큐비트를 사용해 실험한 사례가 보고되었습니다. 또한 진동 모드를 스핀 시스템과 에너지를 교환하는 환경으로 설정해 열린 양자 시스템을 시뮬레이션한 실험도 존재합니다. 더 나아가 표준 모델에서의 보손-페르미온 상호작용 모델을, 진동자-큐비트 하이브리드 시스템을 통해 해밀토니안 시뮬레이션으로 구현하고자 하는 다양한 제안들도 활발히 이루어지고 있습니다.

특히 광학 네트워크와 달리 진동자-큐비트 하이브리드 시스템에서는 보손 계에 대한 비-가우시안 연산자를 더욱 효율적으로 구현할 수 있으므로, 보손이 포함된 복잡한 물리적 시스템도 한층 효과적으로 다룰 수 있게 됩니다. 이는 궁극적으로 양자화학이나 표준 모델은 물론, 다양한 과학 분야에서 다중 해밀토니안을 정확하고 효율적으로 시뮬레이션하는 데 큰 가능성을 열어줍니다.

진동자-큐비트 하이브리드 시스템을 통해 해밀토니안 시뮬레이션을 수행할 때에도, 이 방식은 여전히 게이트 기반 양자 시스템이므로 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서 해밀토니안 시뮬레이션을 위해 사용되던 여러 양자 알고리즘을 그대로 적용할 수 있습니다. 예를 들어, 복잡한 보손-스핀 혹은 보손-페르미온 시스템의 동역학을 분석하기 위해 해당 해밀토니안의 유니터리 연산자를 구현해야 한다면, 이를 진동자-큐비트 하이브리드 게이트로 이루어진 연산들의 곱으로 근사하는 스즈카-트로터 (Suzuki-Trotter)<sup>9</sup> 전개를 사용할 수 있습니다. 또한 유니터리 연산자의 선형 결합(LCU; Linear Combination of Unitaries), 양자 신호 처리(QSP; Quantum Signal Processing)<sup>10</sup>, 양자 특이값 변환(QSVT; Quantum Singular Value Transformation) 등과 같은 알고리즘 역시 적용 가능합니다.

이러한 양자 알고리즘은 원하는 양자 상태를 준비할 때도 활용할 수 있습니다. 예를 들어, 특정 해밀토니안과 초기 양자 상태가 주어졌을 때 에너지 고유 상태(주로 바닥 상태)를 만들고자 한다면, LCU-QSP-QSVT 등의 알고리즘을 통해 해당 초기 상태에서 목표 에너지 고유 상태만 남기도록 필터링 연산자를 구현할 수 있습니다.

마지막으로, 해밀토니안과 초기 상태가 주어졌을 때 그 상태가 갖는 특성을 파악하기 위해 다양한 관측량을 측정하는 일도 진동자-큐비트 하이브리드 시스템에서

가능합니다. 비록 이 시스템에서 보손을 직접 측정하는 방법은 아직 널리 알려져 있지 않지만, 보손이 가진 정보를 큐비트로 전달한 뒤 큐비트를 측정해 이를 대체할 수 있습니다. 이러한 측정 기법은 보손 연산자로 구성된 관측량뿐 아니라, 장(Field)과 보손 간 상호작용 등에 대한 관측량을 측정하는 방법도 포함합니다. 즉, 진동자-큐비트 하이브리드 시스템을 활용하면, 보손이 포함된 다양한 양자 시스템(보손-스핀, 보손-페르미온 등)에 존재하는 여러 관측량을 측정하고 추정할 수 있습니다.

정리하자면, 진동자-큐비트 하이브리드 시스템에서는 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서 사용해 온 양자 알고리즘을 그대로 적용해 해밀토니안에 대한 유니터리 연산자를 생성하고 원하는 양자 상태를 준비할 수 있습니다. 또한 보손과 관련된 여러 관측량을 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 제안되어 있어, 단일 종(스핀-보손-페르미온) 해밀토니안은 물론 보손이 포함된 다양한 종이 결합된 해밀토니안까지 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있습니다. 이는 빛-물질 상호작용이나 핵-전자 상호작용을 다루는 해밀토니안을 보다 정확하고 빠르게 수행할 수 있게 하여, 화학 반응 및 재료 과학 등 실질적 응용 분야에 폭넓게 기여할 수 있을 것으로 기대됩니다.

진동자-큐비트 하이브리드 시스템은 해밀토니안 시뮬레이션뿐 아니라, 여러 양자 정보 분야에서 다양한 응용 가능성을 지니고 있습니다. 예를 들어, 보손 시스템을 활용한 GKP, 이항(Binomial), Cat 코드 등과 같은 오류 정정 코드를 하이브리드 시스템 내에 구현하거나, 이들 보손 기반 오류 정정 코드와 큐비트 기반 오류 정정 코드를 결합해 하이브리드 오류 정정 코드를 만드는 일도 가능합니다. 또한 큐비트의 이산적 정보 형태와 보손의 연속적 정보 형태 간 정보 변환을 통해 양자 정보를 처리하는 방식이나, 보손과 큐비트를 동시에 활용할 최적화 알고리즘 등은 기존의 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서는 구현하기 어려웠던 분야이기도 합니다.

물론, 진동자-큐비트 하이브리드 시스템에서도 해결해야 할 과제들이 존재합니다. 예컨대 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서는 연산자가 상한과 하한을 갖는 유계 연산자로 제한되지만, 보손 시스템에는 위치-운동량 연산자처럼 상한이 없는 무계 연산자들이 존재합니다. 이로 인해 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서 사용되는 양자 알고리즘이나 해당 알고리즘의 분석 방법이 보손 시스템에는 그대로 적용하기

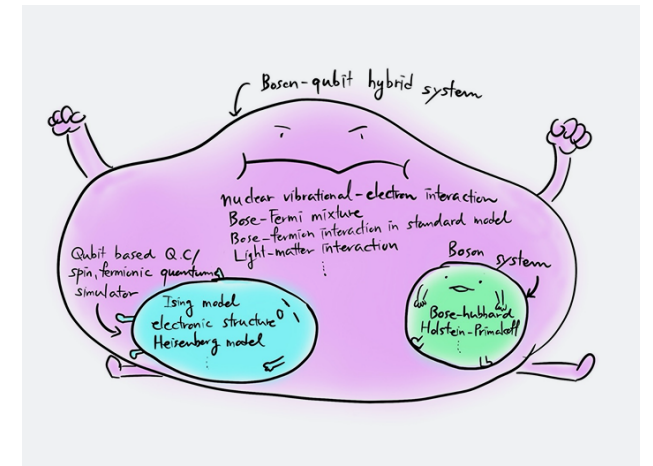


Figure 5. 큐비트 기반 컴퓨터, 보손기반 컴퓨터 각각 시뮬레이션가능한 모델들이 존재하고, 보손 큐비트 하이브리드 컴퓨터에서는 더 넓은 범위의 모델에 대해서 대처 가능하다.

어려운 상황이 발생할 수 있습니다. 따라서 보손 시스템에 맞는 알고리즘과 그에 적합한 분석 방법을 마련해야 합니다.

또한 보손 역시 오류가 발생할 수 있으므로, 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서 결합 허용 양자 컴퓨팅을 위해 오류 정정 코드가 필요한 것처럼, 보손을 위한 오류 정정 코드나 방법 역시 필수적입니다. 아직 이 분야에서는 활발한 연구가 이루어지지 않고 있습니다만, 이러한 문제들은 큐비트 기반 양자 컴퓨터가 보손을 포함하도록 확장되면서 새롭게 부각된 과제들이며, 이를 해결하는 과정은 양자 정보 분야 전반에 대한 우리의 이해를 한층 깊게 해줄 기회이기도 합니다.

종합해 보면, 하이브리드 시스템은 큐비트 기반 양자 컴퓨터에서 한 걸음 더 확장된 가능성을 제시합니다. 아직 연구 초기 단계에 머물러 있지만, 밝혀야 할 부분도 많고 응용 범위로 광범위하므로 앞으로 더욱 활발히 탐색되고 발전될 것으로 기대됩니다.

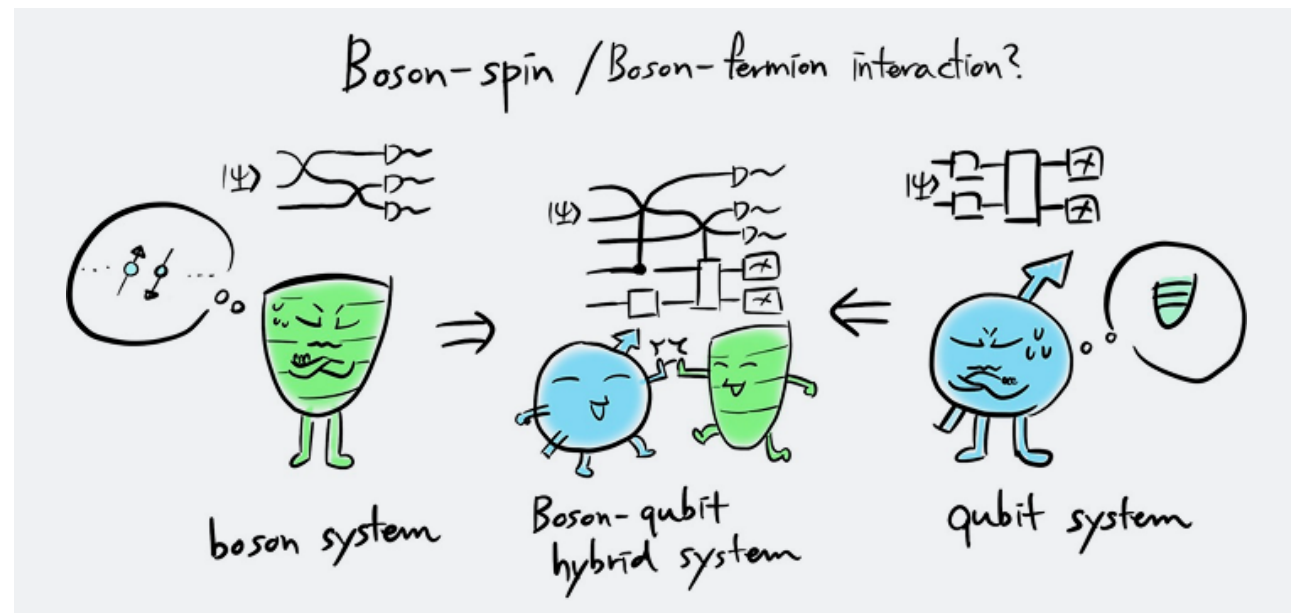


Figure 4. 보손과 큐비트간의 상호작용을 시뮬레이션 할 때에는 보손 또는 큐비트 하나의 시스템만 고려된 컴퓨터보다는 보손-큐비트 하이브리드 시스템(Boson-qubit hybrid system)에서 시뮬레이션하는 편이 효율적일 수 있다.

8. 두 개 이상의 전자 포텐셜 에너지면이 교차하는 지점. 분자동역학에서 전자-핵 상호작용 변화가 급격히 일어날 때 발생하는 에너지구조. 자세한 내용은 [https://en.wikipedia.org/wiki/Conical\\_intersection](https://en.wikipedia.org/wiki/Conical_intersection) 참조  
 9. 양자 시뮬레이션에서 해밀토니안을 합에 대한 분할을 한 후 근사적으로 시간 진화를 구현하는 방법. 자세한 내용은 [https://en.wikipedia.org/wiki/Lie\\_product\\_formula](https://en.wikipedia.org/wiki/Lie_product_formula) 참조  
 10. 블록 인코딩된 단위 연산을 조합하여 다항식 형태의 파장 변환을 수행하는 알고리즘. 자세한 내용은 arXiv:1806.01838 참조

### 결론 및 향후 전망

본 열린강의실에서는 하이브리드 양자 컴퓨팅의 복합적 개념을 쉽게 이해할 수 있도록, 현재 이론 및 실험 동향을 간략히 살펴보았습니다. 진동자-큐비트 하이브리드 아키텍처는 이온 포획이나 초전도체 시스템 등 특정 플랫폼에서 이론적 모델 또는 초기 실험 단계로 연구되고 있지만, 앞으로 양자 시뮬레이션과 알고리즘 플랫폼으로서 크게 발전할 가능성을 지니고 있습니다. 하이브리드 양자 연속-이산 시스템은 막대한 잠재력을 갖추고 있어, 양자 컴퓨팅 기술 전반에 획기적인 진전을 가져올 뿐 아니라 물리-화학 재료 과학 분야의 다양한 문제를 해결할 중요한 기술적 기반으로도 기대됩니다. 특히 이러한 하이브리드 시스템의 개발은 결합 허용 양자 계산을 실현하기 위한 핵심 경로로 주목받고 있습니다. 이 같은 잠재력을 온전히 구현하기 위해서는 하이브리드 양자 연속-이산 패러다임에 대한 지속적이고 심층적인 연구와, 여러 분야의 연구자들 간 긴밀한 협력이 필수적입니다.

### 참고문헌연구

[Liu2024] Liu et al., Hybrid Oscillator-Qubit Quantum Processors: Instruction Set Architectures, Abstract Machine Models, and Applications, arXiv:2407.10381

quantum  
wave

완벽함을 깨뜨려 더 정밀해지다.  
반짝임 너머의 기술

# open lab

## 열린 연구실

반짝임 그 이상: 다이아몬드의 결함이 만드는 초정밀 양자 센서

국가 표준에서 양자 혁명까지: 한 걸음 더 들어가 본 '초전도 양자컴퓨팅 시스템 연구단'

“과학이 예술이 될 때”, 이화여자대학교 IBS 양자나노과학연구단을 찾아간다.

## 퀀텀웨이브 학생 기자단



박연수  
연세대학교  
기계공학부



김성은  
연세대학교  
기계공학부



백원준  
연세대학교  
지구시스템과학과



이성빈  
서울대학교  
물리천문학부



김한결  
광운대학교  
컴퓨터정보공학부



박성근  
고려대학교  
전기전자공학부



김도겸  
한양대학교  
컴퓨터소프트웨어학부



Quantum sensing

# 반짝임 그 이상: 다이아몬드의 결함이 만드는 초정밀 양자 센서

고려대학교 Quantum Sensing and Imaging (QuSI) 연구실

글작성 권템웨이브 학생 기자단

박연수(연세대학교) / 김성은(연세대학교) / 이성빈(서울대학교) / 김한결(광운대학교) / 박성근 (고려대학교)



다이아몬드 NV 센터를 활용한 양자센싱 및 이미징 연구의 기초부터 응용, 산업 활용까지의 예 (출처: K. Kim et al., Advanced Photonics 7, 064002(2025), <https://doi.org/10.1117/1.AP.7.6.064002>)

“고려대 이동현 교수, 양자 센싱-이미징 연구의 최전선 - 양자 기술은 기초와 응용이 동시에 춤추는 독특한 분야”  
고려대학교 물리학과 이동현 교수가 이끄는 Quantum Sensing and Imaging (QuSI) 연구실은 다이아몬드 내 '양자 결함'이라는 특별한 큐비트를 활용해 양자 센싱 및 이미징이라는 두 분야를 개척하고 있습니다.

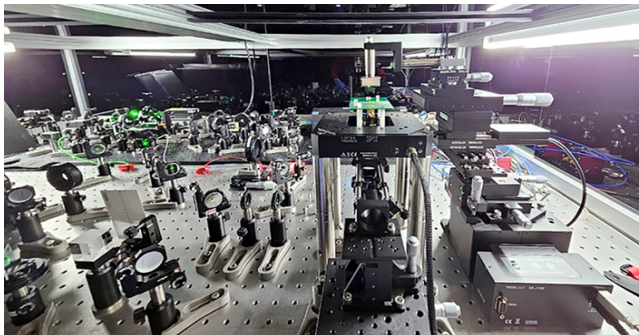
완벽해 보이는 다이아몬드도 그 결정 안을 자세히 들여다보면 수많은 원자 결함들이 존재하고 있습니다. 때로는 이러한 결함들이 핑크 다이아몬드와 같은 보석의 색을 결정하기도 해서 색중심(color center)이라 부르기도 합니다. 연구실의 핵심은 이러한 다이아몬드 속 질소-공극(Nitrogen-Vacancy, NV) 점 결함입니다. 다이아몬드 내부의 이 미세 점결함은 전자의 스핀 상태를 상온에서도 양자 상태를 오래 유지할 수 있어서 차세대 스핀 큐비트로 주목받고 있습니다. QuSI 연구실은 이 NV 센터의 스핀을 정밀하게 조작하는 연구를 진행하면서, NV-핵스핀이나 NV-NV 쌍을 이용한 다중 큐비트 기반의 양자 센싱 프로토콜 개발을 연구하고 있습니다. 다양한 양자 제어 알고리즘을 개발하여 큐비트의 결맞음 시간을 늘리고, 측정 민감도를 고도화하는 등 실용적인 양자 센서 개발에 필요한 토대를 쌓고 있습니다.

QuSI의 연구는 정보 처리를 넘어 미시 세계를 관찰하는 새로운 도구 개발로 확장됩니다. NV 센터를 초민감 센서로 활용해 양자 이미징과 센싱 기술을 발전시키고 있는데, 특히 다이아몬드 NV 센터를 탐침으로 쓰는 주사 탐침 현미경(Scanning Magnetometry) 기술을 개발했습니다. 이를 통해 나노미터 수준의 해상도로 다양한 고체 물질 및 소자의 자기장 분포, 전류 흐름, 스핀 현상을 비파괴적으로 측정할 수 있습니다. 이러한 기술은 첨단 자성 소재나 반도체 소자를 분석하는 데 유용하며, 생체 내 미세 자기 활동 측정이나 단일 분자 수준의 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance, NMR), 나노-MRI(Magnetic Resonance Imaging) 같은 생의학 응용까지 확장이 가능할 것으로 기대됩니다.

연구 외에도 QuSI 연구실은 양자 기술 교육에 힘쓰고 있습니다. 학생과 일반인이 직접 체험할 수 있는 교육용 큐비트·양자 센싱·컴퓨팅 기초 실험 장치(QuLIUS)를 개발해 양자 과학의 문턱을 낮추고 있습니다. 이러한 노력은 미래 인재를 양성하고 국내 양자 과학기술 생태계를 키우는데 밑거름이 되고 있습니다

### 다이아몬드 속, 원자 크기의 ‘큐비트

우리가 일반적으로 떠올리는 다이아몬드는 “완벽하게 정결된 탄소 격자”로 이루어진 보석입니다. 그러나 QuSI 연구실에서 연구되는 다이아몬드는 일부러 격자를 흐트러뜨립니다. 탄소 자리 하나를 비워 결함(vacancy)을 만들고, 그 옆에 탄소 대신 질소를 심습니다. 이렇게 인위적으로 만든 결함 구조는 바로 NV 센터(Nitrogen-Vacancy center)입니다. 얼핏 들으면 단순한 흠결처럼 보이지만, 이 결함은 오히려 다이아몬드 내부에서 전자 스핀을 가진 원자 단위의 양자 큐비트로 기능합니다.



다중 큐비트 기반의 양자센싱 실험 셋업 사진

이동헌 교수는 NV 센터를 설명하면서 흥미로운 비유를 들었습니다. “진공에 있는 이온트랩과 중성원자와 거의 동일할 유사한 특성을 보이지만, 다이아몬드 안에 있기 때문에 훨씬 컴팩트합니다. 그래서 센서로서의 활용성이 뛰어나죠.”

실제로 NV 센터는 양자센싱 측면에서 고전적인 양자컴퓨팅 플랫폼(초전도체 큐비트나 이온트랩)과 비교해 압도적인 여러 장점을 가집니다. 초전도 큐비트는 극저온 냉동기와 복잡한 마이크로파 장치가 필요하고, 이온트랩이나 중성원자는 초고진공 환경과 다단복잡한 트랩 구조가 필수인 반면, NV 센터는 상온-대기압에서, 별도의 트랩 없이도 안정적으로 동작합니다. 이는 “양자 컴퓨터는 거대한 냉장고 속에 들어있다”는 기존의 이미지와는 완전히 다른, 일상 환경 속 양자 센서의 가능성을 여는 대목입니다.

다이아몬드 표면 가까이에 NV 센터를 배치하면 그 큐비트는 나노미터(nm) 거리에서 일어나는 극도로 미세한 변화를 감지할 수 있습니다. 어떤 변화일까요? ‘수십 나노미터 거리의 자기장 변동, 국소 온도 변화, 근처 원자핵의 스핀 움직임’ 이 모든 것을 감지할 수 있습니다.

비유하자면, 기존의 자기력 현미경(Magnetic Force Microscopy, MFM)이나 NMR/MRI 같은 장비가 ‘넓은 바다 위 파도’를 관측하는 기술이라면, NV 기반 양자 센서는 한 방울의 물속에서 일어나는 미세한 흐름까지 읽어낼 수 있는 현미경에 가깝습니다. 단일 분자 혹은 단백질 수준의 구조 분석 가능성이 거론되는 이유도 여기에 있습니다. 방해물 주지 않고 ‘살며시 관찰하는 센서’, 즉 완전한 비파괴 측정이라는 NV 센터의 가장 큰 장점이 실현되는 것입니다.

이 기술이 열어주는 미래는 매우 다층적입니다. 바이오·의료 분야에서는 단백질과 분자 단위의 구조 분석을 가능하게 하여 신약 개발에 새로운 접근을 제공합니다. 생체 내 미세 환경을 실시간 모니터링하는 센서, 나노 의학 기술, 심지어 살아있는 세포 내부를 들여다보는 기술까지도 이론적으로는 NV 센터의 영역에 있습니다. 소재·반도체 분야 역시 큰 변화를 맞이합니다. 배터리 내부의 전류 분포를 10 nm 단위에서 측정하거나, 반도체 공정 중 발생하는 극미세 결함을 비파괴 방식으로 탐지하는 기능은 기존 기술로는 상상하기 어려운 영역이었습니다. NV 센터는 이 불가능을 현실로 만듭니다.

국방·보안 분야는 또 다른 가능성을 제시합니다. 지하 구조물 탐지, 극미약한 자기장의 이상 신호 탐지, 정밀 항법 장치 등 NV 센서를 활용한 기술은 이미 미국·유럽·중국에서 개발·제품화가 진행 중이며, 일부는 실제 배치 단계에 있습니다. NV 기반 센서는 ‘고정밀 자기장-중력 측정 기술의 패러다임을 완전히 바꿀 플랫폼’으로 평가됩니다. 그러나 연구실의 성과를 곧바로 산업 현장에 적용할 수 있는 것은 아닙니다. 이동헌 교수는 현실적인 기술적 과제를 명확하게 짚었습니다. “실험실의 거대한 광학 레이저 장비를 현장용, 휴대용 센서로 만드는 과정에서는 민감도가 떨어질 수 있고, 잡음이나 환경 변화에 취약해집니다.”

실제로 NV 센터는 레이저·광학계·마이크로파 장치 등이 정교하게 맞물려 작동하는 시스템입니다. 이를 손바닥만 한 크기의 포터블 장치로 만들려면, 단순히 부품을 줄이는 것이 아니라 광학 정렬, 소자 내구성, 열 안정성, 전자 신호 처리 등 엔지니어링이 필요합니다. “양자 센서가 실제 산업·국방·의료 현장에서 활약하려면 과학자와 엔지니어가 긴밀하게 협력해, 높은 민감도를 유지하면서도 실사용 환경에서 안정적으로 구동될 수 있는 기술을 완성해야 합니다. 유럽, 미국, 중국은 이미 이 문제를 많이 해결하고며 제품화 단계에 진입하고 있습니다.”

결국 NV 센터의 성공은 ‘과학자의 양자 물리학적 정교함’과 ‘엔지니어의 견고함’이 얼마나 자연스럽게 결합할 수 있는지에 달려 있다고 볼 수 있습니다. QuSI 연구실은 바로 이 경계면, 기초와 혁신, 실험실과 산업, 나노 구조와 일상 기술에서 새로운 시대의 센서를 설계하고 있습니다.

### QuSI 연구실이 꿈꾸는 것 - 단순한 실험실이 아니다

많은 양자 연구실이 “더 많은 큐비트, 더 빠르고 더 깊은 양자 게이트”를 목표로 나아가고 있습니다. 세계적 연구 그룹일수록 경쟁적으로 큐비트 수를 증가시키고, 오류율을 낮추며, 대규모 양자 컴퓨팅의 시대를 앞당기는 데 집중합니다. 하지만 QuSI 연구실의 방향은 조금은 다릅니다.

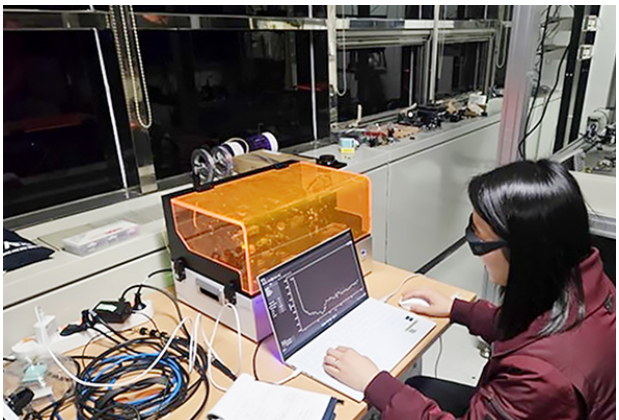
“우리는 5~10개 큐비트만으로도 충분히 의미 있는 양자 센서를 만들 수 있다고 믿습니다.” 이 말은 단순한 선택의 문제가 아니라, 기술적 현실과 산업적 필요를 정확히 파악한 전략에서 나온 것입니다. 현재 연구실은 이미 5큐비트 레지스터 기반 양자 센싱 알고리즘을 구현했으며, 2큐비트 간 게이트 연산도 실험적으로 시연했습니다. 다시 말해, 큐비트 수 경쟁에 끼어드는 것이 아니라 NV 센서 플랫폼이 가장 잘할 수 있는 방향을 중심으로 발전시키는 것입니다. 그렇다고 해서 기술적 야심이 낮다는 의미는 아닙니다. 오히려 QuSI는 “상용화 가능한 소형 양자 센서”라는 매우 현실적이고, 동시에 산업적 파급력이 큰 목표를 바라보고 있습니다. 기존 양자 컴퓨팅 중심 연구가 “거대한 냉각기 속 수백 큐비트 시스템”이라는 실험실 중심의 장비를 다룬다면, QuSI는 우리가 실제 손에 들고 사용할 수 있는 양자 센서를 연구합니다. 이는 양자 기술을 일상 속으로 끌어오는 작업이기도 합니다.

### 교육도 연구의 연장선으로… QuSI가 만든 ‘QuLIUS’

더욱이 흥미로운 점은 QuSI의 목표가 연구에만 머물지 않는다는 것입니다. QuSI는 양자 기술의 확장과 저변 확대를 위해 교육 자체를 연구 분야의 일부로 포함하고 있습니다. 그 핵심이 바로 최근 연구실에서 자체 개발한 교육용 장비 ‘QuLIUS (Quantum Learning and Instructional Unit for Students)’입니다.

QuLIUS는 기존의 양자 실험 장비와 달리, 대형 광학 테이블이나 고가의 레이저 세트가 필요 없습니다. 노트북 하나만 있으면 연결해 사용할 수 있을 정도로 작은 장비이며, 학생들은 이 장치를 통해 스스로 큐비트를 제어하고, 신호를 읽고, 실제 센싱 알고리즘을 체험할 수 있습니다. 단순한 시뮬레이션이 아니라, 실제 NV 센터 기반 큐비트를 만지고 조작하는 경험을 가능하게 합니다. 이미 고려대 학부·대학원 강의에서 활용되고 있으며, 고등학생 대상 교육에도 투입되었습니다.

“양자는 이론 수업으로만 배우면 어렵습니다. 손으로 만지고, 관찰하고, 실험해야 비로소 ‘아, 이런 거구나’ 하고 이해됩니다.” 즉, QuLIUS는 단순한 교육 도구가 아니라, QuSI가 추구하는 ‘양자 기술의 일상화, 교육의 실험화’ 라는 철학을 담은 장치입니다.



QuLIUS를 활용한 양자센싱 대학원 수업 실험 진행 모습

### 양자 기술이 ‘느껴지는 기술’이 되는 순간

이동헌 교수는 인터뷰를 마무리하면서, 양자 기술에 대한 대중의 오해를 조심스럽게 짚었습니다. 사람들은 여전히 양자를 “먼 미래의 기술”, “거대한 연구소 안에서만 가능한 기술”로 생각하지만, NV 센터는 그 인식을 흔들어 놓습니다.

“양자 기술은 먼 미래 기술이 아닙니다. 우리 주변에서 ‘느낄 수 있는’ 기술이어야 합니다.” 다이아몬드 속 결함 하나, 보석 기준으로는 불량이라 불릴 수도 있는 미세한 구조가, 우리와 완전히 동떨어져 있다고 느껴왔던 나노 세계를 현실과 연결하는 다리로 연결 지었습니다. 그 다리 위에서 QuSI는 기초 물리의 깊이와 산업 현장의 실제 요구가 만나는 지점을 탐구합니다.

대규모 양자컴퓨터가 등장하려면 여전히 넘어야 할 장벽이 많다고 이동헌 교수는 말합니다. 극저온 제어, 오류 보정, 소자 집적 등 기술적 난제들이 산처럼 쌓여 있습니다. 그 사이에서 QuSI는 다른 길을 개척하고 있습니다. “작지만 실제로 쓰일 수 있는 양자 장치”라는 분야에서, 이미 세계적으로 경쟁 가능한 성과를 내고 있습니다. “양자 센서가 먼 미래의 그림이 아니라, 오늘 실현 가능한 도구임을 보여주는 연구실” 지금 이 길은 막 시작되었습니다. 하지만 다이아몬드 속 작은 결함이 보여주는 세계는 명확합니다. 양자 기술은 어렵고 먼 곳에 있는 것이 아니라, 우리가 손으로 만지고, 눈으로 관찰하고, 산업에 적용할 수 있는 기술로 이미 우리 앞에 와 있습니다. QuSI 연구실이 열고 있는 이 작은 문은 앞으로 양자 기술이 일상 기술로 확장되는 거대한 흐름의 첫 걸음이 될 것입니다.

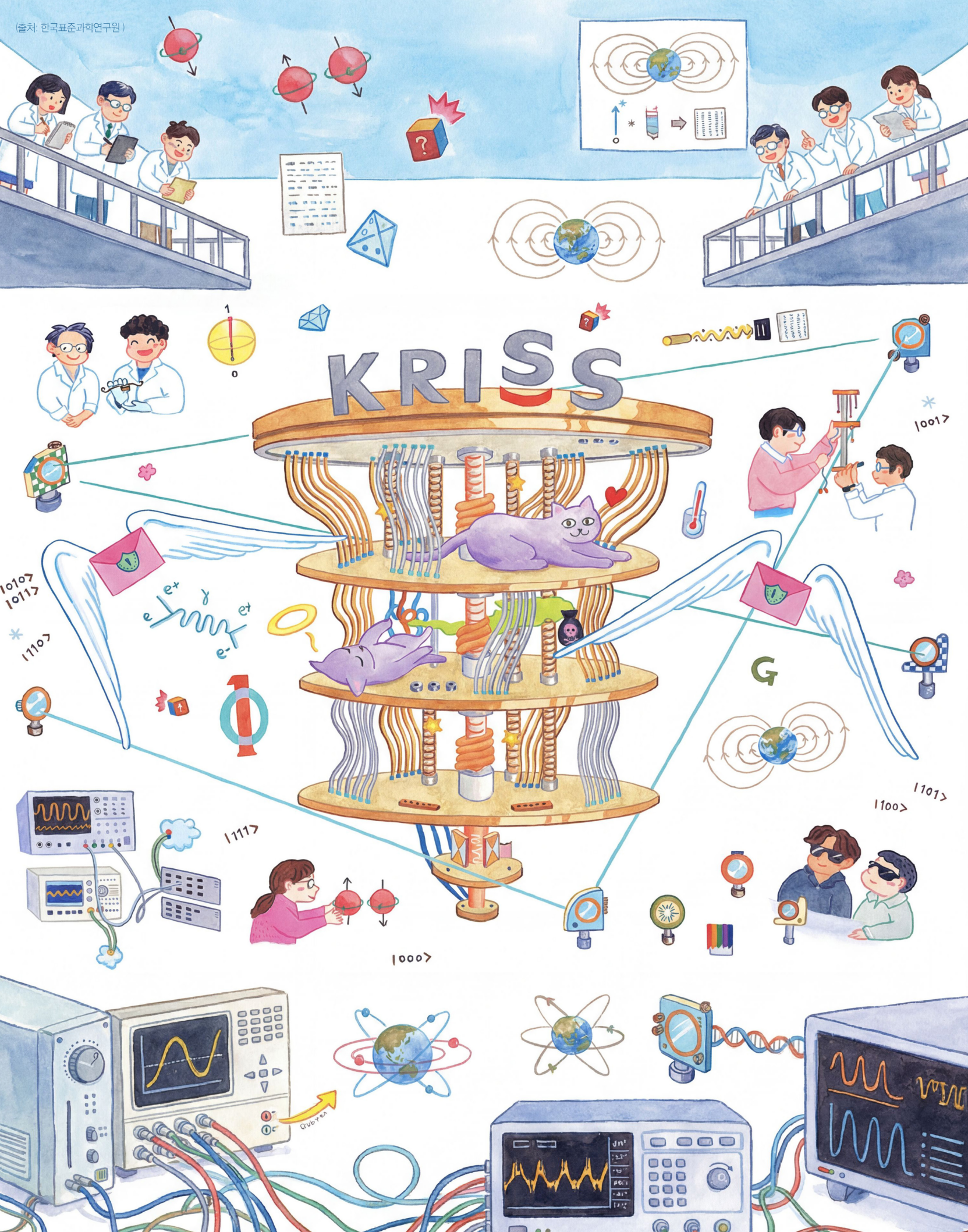
### 양자 시대 인재에게, 필요한 건 ‘인내’와 ‘열린 마음’

“양자 기술은 지금 ‘기초’와 ‘응용’이 동시에 달리는 마라톤입니다. 그래서 단기 성과만 보지 말고, 긴 시간 인내하며, 또 고전 기술, 반도체, 재료공학, 아니면 생물학 등에 이르기까지 다양한 분야를 넘나들 줄 아는 열린 마음이 필요합니다.”

QuSI 연구실은 이 같은 인재를 키우기 위해, 기초 연구와 산업화, 교육을 동시에 추진하고 있습니다. 단순히 논문을 쓰기 위한 연구실이 아니라, “누구나 양자를 만져보고, 느끼고, 쓸 수 있도록” 하는 연구실.

다이아몬드 속 단 하나의 결함이, 우리가 그토록 멀게만 느껴왔던 나노 세계와 현실 세계를 잇고 있습니다. 기초 물리의 정수와, 산업의 수요가 만나는 지점, 그곳에서 QuSI 연구실은 ‘양자 센서가 먼 미래의 그림이 아니라, 오늘 실현 가능한 도구임을 보여주는 증인’이 되고자 합니다.

그리고, 이 길은 이제 막 시작되었습니다.



### Quantum Computing

# 국가 표준에서 양자 혁명까지: 한 걸음 더 들어가 본 '초전도 양자컴퓨팅 시스템 연구단'

## 한국표준과학연구원(KRISST)

글작성 권택웨이브 학생 기자단

이성빈(서울대학교) / 김성은(연세대학교) / 박연수(연세대학교) / 김한결(광운대학교) / 이정우(한국과학기술원)

과학과 빵의 도시, 대전에는 항공우주, 원자력, 에너지, 국방 등 다양한 분야의 정부출연 연구기관들이 자리하고 있습니다. 그 중심에 선 한국 표준과학연구원(KRISST)은 올해로 설립 50주년을 맞이하며, 반세기 동안 우리나라 국가 표준의 기틀을 다져왔습니다.

KRISST는 길이, 질량, 시간, 전류, 온도, 물질량, 광도 - 총 7개의 SI 기본단위를 기준으로 측정의 표준을 마련하고 있으며, 최근에는 보다 정밀한 표준 확립을 위해 자연계의 기초상수를 기반으로 한 새로운 방식의 정의에도 도전하고 있습니다.

이러한 표준의 정밀성은 단순한 수치 이상의 의미를 갖습니다. 정밀한 표준은 과학기술 전반의 신뢰도와 정확도를 뒷받침하는 기반이자, 극한까지 정제된 측정 기술은 새로운 과학을 가능하게 하는 원동력입니다. KRISST는 이 같은 정밀 계측을 위해 광학, 원자, 초전도 등 다양한 물리 시스템에서 제어와 측정 기술을 극한으로 끌어올려 왔습니다.

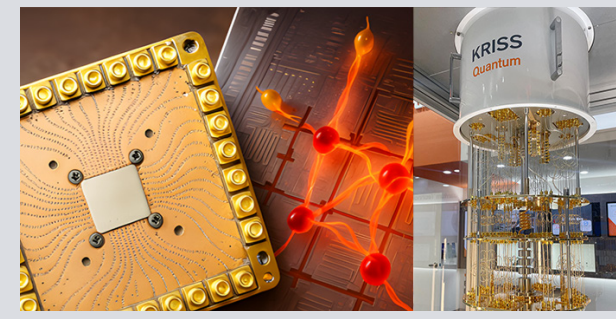
특히, 원자 단위 수준의 불확실성을 제어하고 수십 억 분의 일 초 단위를 측정하는 이러한 기술은 양자 세계를 직접 다루는 데 없어서는 안 될 기반입니다. 다시 말해, 정밀 계측을 위한 표준 기술의 진보는 자연스럽게 양자 상태의 생성, 제어, 측정으로 이어졌고, 이는 곧 양자 기술 개발의 출발점이자 핵심 축이 된 것입니다.

그 결과는 초정밀 원자 시계, 중력계, 양자 자기장 센서 등 첨단 계측기술로 이어졌으며, 이는 곧 양자 과학기술의 핵심 원천기술로도 활용되고 있습니다.

이러한 기술 발전의 중심에는 표준 과학연구원 내 '초전도 양자 시스템 연구단 (단장 이용호)'과 '양자 기술 연구소(소장 최재혁)'가 있습니다. 그 중 초전도 양자 시스템 연구단은 초전도 큐비트 기술을 기반으로 양자컴퓨터의 하드웨어 플랫폼을 개발하며, 국내 양자 컴퓨팅 연구를 선도하고 있습니다.

연구단 로비에는 초고진공, 극저온 환경에서 초전도 큐비트 시스템을 동작 시키기 위한 금색 반짝이는 상들리에 같은 냉각 장치와 최신 연구 성과들이 전시되어 있어 방문객들의 관심을 끌고 있습니다.

오늘은 차세대 양자 정보 기술의 심장부, 표준과학연구원의 초전도 양자 시스템 연구단을 직접 찾아가 그 첨단 연구 현장을 들여다봅니다.



초전도 큐비트 칩 & 연구단 로비에 전시된 초전도 양자컴퓨팅 냉각 시스템



SI 기본단위를 상징하는 7개 기둥의 KRISST 정문원

한국표준과학연구원(KRISST)은 국가 표준을 책임지는 기관으로, 광도·질량 표준, 원자 시계 등 정밀 측정 분야에서 세계적 위상을 갖고 있습니다. 최근에는 양자역학적 현상을 측정 표준에 적극 활용하며, 나아가 초전도 기반 양자컴퓨팅 시스템 개발에도 박차를 가하고 있습니다.

홍창기 선임연구원은 말했습니다. “저희 연구단은 2022년에 신설되었지만, KRISST에서는 이미 30년 넘게 조셉슨 접합(Josephson Junction) 기술을 연구해왔습니다. 이러한 기반 위에서 초전도 양자컴퓨터에 대한 수요 증가에 대응하고자 연구단이 발족되었습니다. 현재 책임연구원 1명, 선임연구원 5명, 책임기술원 1명, 선임기술원 4명으로 구성되어 있습니다.”



KRISST 견학 학생들과 연구소를 설명해주는 홍창기 선임연구원

### 표준과 양자의 만남

KRISST는 오랫동안 ‘측정 표준’을 정의하는 역할을 맡아왔다. 그렇다면 양자역학은 표준 연구와 어떤 관계를 맺고 있을까? “오늘날 많은 측정 표준은 양자역학적 상수를 활용해 재정의됩니다. 예를 들어 미터는 광속을, 전압은 플랑크 상수와 양자 홀 효과를 이용해 정의하죠. 즉, 양자역학은 이미 표준 연구의 핵심에 있습니다. 다만 국민들이 체감하기는 어렵습니다. 일상에서 ‘갑자기 무언가 달라졌다’기보다는, 보이지 않게 정밀도가 높아지고 있다는 점이 중요합니다.”

### 양자컴퓨터의 현재

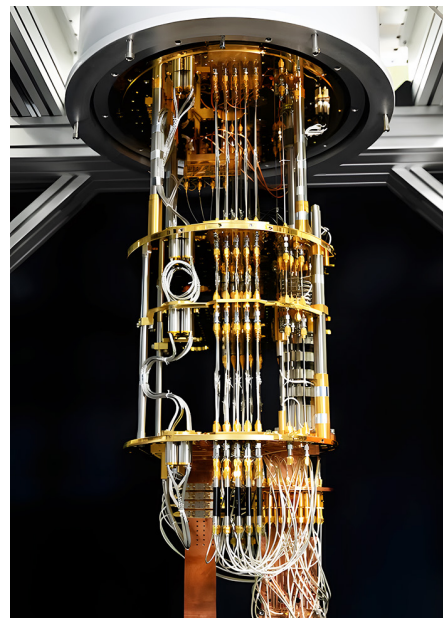
최근 대중 매체에서는 양자컴퓨터가 이미 물류, 화학 계산 등에 활용된다는 보도부터, 수백만 큐비트 없이는 아직 실용화는 멀었다는 의견까지 엇갈립니다. 이에 대해 현장에서 양자 컴퓨팅을 연구하는 홍창기 박사는 현재 개발중인 양자 컴퓨팅 기술 수준에 대해 다음과 같이 말합니다.

“아직 특정 플랫폼이 확실히 우위를 점했다고 말하기 어렵습니다. 다만 전 세계적으로 가장 많은 투자가 이뤄지고 있는 분야는 초전도 플랫폼입니다. 글로벌 기업들이 집중하고 있기 때문이죠. 한국에서도 다양한 플랫폼 연구가 진행되고 있지만, 저희 연구단은 초전도 기반 양자컴퓨터에 집중하고 있습니다. 현재 20 큐비트와 24큐비트 시스템을 연구 중이며, 칩은 성균관대와 협력해 제작하고 있습니다. 향후 플립칩이나 TSV(Through-Silicon Via) 기술은 UNIST와 협력하여 개발해 나갈 예정입니다.”

KRISST는 국가 표준 연구의 오랜 전통을 바탕으로, 양자역학을 활용한 정밀 측정뿐 아니라 미래 양자컴퓨팅 기술 확보에도 도전하고 있다. 학생 기지단은 이번 취재를 통해 “보이지 않는 곳에서 표준과 양자가 이미 긴밀히 맞닿아 있으며, 한국의 양자컴퓨터 개발 역시 연구자들의 꾸준한 협력 속에서 차근차근 진전되고 있다는 점을 확인할 수 있었다.

양자컴퓨터는 아직 수백만 큐비트의 완전한 오류보정 단계에는 이르지 못했지만, ‘NISQ(노이즈가 있는 중간 규모 양자컴퓨터)’라는 과도기적 시대에서 점차 응용 가능성이 탐색되고 있다.

“예전에 고전 컴퓨터가 처음 등장했을 때 가장 먼저 큰 도약을 한 분야는 화학이었습니다. 양자컴퓨터도 마찬가지로 화학 분야에서 가장 먼저 의미 있는 결과가 나올 가능성이 큼니다. 실제로 대학 연구실에서는 대학원생, 학부생들이 모여 스터디 그룹을 꾸려 양자컴퓨터로 어떤 계산을 해볼 수 있을지 연구하고 있습니다. 신약 개발, 금융, 컨설팅 등에서도 양자컴퓨터 활용 가능성에 많은 관심을 두고 있습니다.”



### 양자 이득, 언제 실현될까?

양자컴퓨터가 고전컴퓨터를 뛰어넘는 지점, 이른바 ‘양자 이득(Quantum Advantage)’은 언제쯤 실현될 수 있을까? “일부 알고리즘에서는 이미 양자컴퓨터가 고전컴퓨터를 능가했다는 보고가 나오고 있습니다. 하지만 이는 특정한 문제에 국한된 것이고, 일반적인 상황에서 양자컴퓨터가 항상 빠르다고 말하기는 어렵습니다. 고전 컴퓨터도 문제 유형에 따라 어떤 시스템이 빠를 수 있듯, 양자컴퓨터 역시 문제 정의에 따라 이미 우월할 수도 있고, 앞으로 더 많은 문제에서 강점을 보일 수도 있습니다. 다만 ‘언제 보편적으로 양자 이득을 가진다’는 질문에는 아직 명확히 답하기 어렵습니다.”

### 글로벌 기업과 국가 연구소, 무엇이 다른가?

구글, IBM, IonQ, QuEra 등 글로벌 기업들은 초전도-이온트랩-중성원자 등 다양한 플랫폼에 막대한 투자를 이어가고 있다. 반면 한국에서는 주로 대학과 연구소 중심으로 기술 개발이 진행 중이다

“대기업은 양자컴퓨터가 상용화될 경우 막대한 파급력을 기대하며 투자합니다. 동시에 기업 이미지 차원에서선 선도 기술 확보를 강조하죠. 반면 연구소의 역할은 조금 다릅니다. 대학이 새로운 아이디어와 논문을 만들어낸다면, 연구소는 국가적으로 꼭 필요한 기반 기술을 책임지고 이어가는 곳입니다. 논문으로 보이지 않더라도, 국가가 기술적으로 종속되지 않기 위해 반드시 채워야 하는 영역을 담당하는 것이죠. 한국도 아직 선진 기업에 비해 따라가는 단계일 수 있지만, 지속적인 기술 축적을 통해 격차를 좁혀갈 수 있다고 생각합니다.”



KRISST 견학 학생들과 연구소를 설명해주는 홍창기 선임연구원

### 산·학·연 협력으로 50큐비트 향해

KRISST는 국내 산학연 컨소시엄을 통해 초전도 양자컴퓨터 연구를 이끌고 있다.

“20큐비트, 50큐비트 양자컴퓨터 인프라 구축사업을 통해 성균관대(칩 개발), UNIST(플립칩 및 TSV 공정), KISTI(클라우드 서비스)와 협력하고 있습니다. KRISST는 주관기관으로 측정과 시스템 통합을 맡고 있구요. 올해 3월에는 20큐비트 칩 시험에 성공했고, 현재는 24큐비트 시스템을 구축했습니다. 내년 말에는 50큐비트 시스템까지 확장하는 것을 목표로 하고 있습니다. 동시에 큐비트의 T1, T2\* 결맞음 시간 향상 연구도 진행 중입니다.”

초전도 큐비트 방식은 전 세계적으로 가장 많은 투자가 집중된 분야지만, 극저온 유지·큐비트 간 간섭·오류율 관리 등 기술적 난제가 여전하다. KRISST는 이 중에서도 ‘측정 정확도’와 ‘칩 품질’을 최우선 과제로 삼고 있다.

“KRISST는 측정 기관이다 보니, 가장 중요한 초점은 측정입니다. 첫째, 측정 과정에서 한계가 없도록 하는 것, 둘째, 정확도를 높일 수 있는 앰프 개발, 셋째, 칩 자체의 품질 개선 — 이 세 가지 축에 집중하고 있습니다. 동시에 산학연 협력을 통해 큐비트 수 확대와 국제 협력 과제를 수행하며 균형 있게 연구를 진행하고 있습니다.”

한국표준과학연구원 초전도양자컴퓨팅시스템 연구단은 기술 국산화와 확장성 확보를 통해 국내 양자컴퓨팅 연구의 새로운 지평을 열고 있습니다. 연구단은 앞으로도 학계-산업계와의 협력을 강화하며, 세계적 수준의 양자컴퓨팅 시스템 구축이라는 도전을 이어갈 계획입니다. 양자는 어렵지만 동시에 누구나 함께 도전할 수 있는 분야”라는 연구자의 말처럼, 앞으로도 많은 젊은 인재들과 연구자들이 이 길에 동참해 세계 무대에서 대한민국의 위상을 높여 주기를 기대합니다.



Quantum sensing

# “과학이 예술이 될 때”, 이화여자대학교 IBS 양자나노과학연구단을 찾아간다.

## 이화여자대학교 IBS 양자나노과학연구단

글작성 퀴텀웨이브 학생 기자단

이성빈 (서울대학교) / 박성근 (고려대학교) / 김한결 (광운대학교) / 박연수 (연세대학교) / 이정우 (한국과학기술원)

이화여자대학교에는 세계적인 수준의 최첨단 기초과학 연구기관인 기초과학연구원(IBS) 양자나노과학연구단(Center for Quantum Nanoscience, QNS)이 자리잡고 있습니다. 이 센터는 나노미터 수준, 더 나아가 단일 원자 단위의 세계를 탐구하며, 양자역학의 원리를 실제 기술에 접목하려는 야심 찬 목표를 가지고 있습니다.

연구단의 단장은 나노 과학 및 원자 조작 분야에서 세계적으로 손꼽히는 과학자인 안드레아스 하인리히(Andreas Heinrich) 교수로, 과거 IBM에서 STM(주사터널링현미경, Scanning Tunneling Microscope)을 활용하여 원자를 하나씩 옮겨 그림을 그리거나 게임을 구현하는 퍼포먼스 등은 세계 과학계에 큰 반향을 일으킨 바 있습니다.

QNS는 단순히 과학적 호기심을 넘어서, 미래의 양자정보기술(Quantum Information Technology) 발전에 기여하고자 합니다. 원자를 이미징하고 재배열하는 연구는 단순한 '보여주기'에 그치지 않고, 양자 상태의 정밀한 제어와 측정을 기반으로 STM 팁 끝에 단일 분자를 붙여 자기장과 전기장을 서브-옹스트롬 정확도로 측정하는 양자 센싱 기술과 다중 전자 스핀 큐비트를 성공적으로 조작하는 STM 기반 다중 큐비트 플랫폼과 ESR를 접목한 원자/분자 큐비트의 단일-다중 논리 게이트 등 향후 양자컴퓨팅, 고감도 양자 센서 기술의 기반을 다지는 역할을 하고 있습니다.

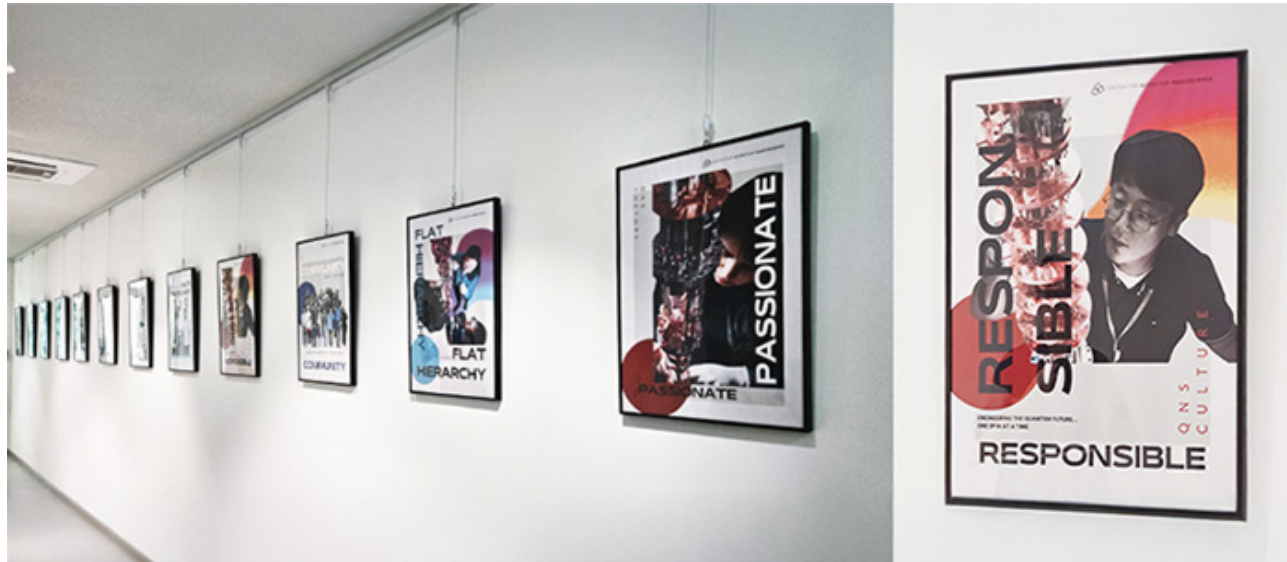
이화여대에 위치한 QNS는 국내외 석학들과의 협력 속에서 세계적 연구 성과를 꾸준히 발표하고 있습니다. 또한 젊은 과학자들에게 세계 최고 수준의 실험 환경과 연구 기회를 제공하며, 차세대 과학기술 인재 양성에도 앞장서고 있습니다. 나아가 국제적인 연구자들이 활발히 교류하는 장이기도 하며, 예술과 접목하여 다양한 방식으로 대중과 소통하는 장이기도 합니다. 기술과 예술, 과학과 사람 사이에서 새로운 길을 모색하는 QNS의 연구자들의 도전과 여정은 이제 막 시작되었을 뿐입니다.

원자 세계를 탐험하며 미래를 설계하는 곳 - 바로 이화여대의 IBS 양자나노과학연구단입니다.



QNS 장원준 박사, Advanced STM for quantum material Team Leader

QNS의 다양성은 연구 방식에만 국한되지 않습니다. 연구단의 삶의 방식과 조직 문화 역시 구성원 모두가 함께 만들어갑니다. 실험실 안에서 원활한 소통과 협업을 위해, 연구자들은 각자가 중요하게 생각하는 가치를 모아 'QNS Culture'라는 가치 기반의 약속을 스스로 정립했습니다. 서로의 차이를 존중하는 환경 속에서, 공동의 과학적 목표를 향해 함께 나아가는 이들의 모습은 글로벌 과학 협력의 새로운 가능성을 보여줍니다.



구성원 스스로가 정한 핵심 QNS Culture 액자 속 'Responsible' 문구가 눈에 띄는 모습

### 한국 최초 큐비트 플랫폼 구축과 원자 단위 양자 제어로 'Outstanding' 평가 획득

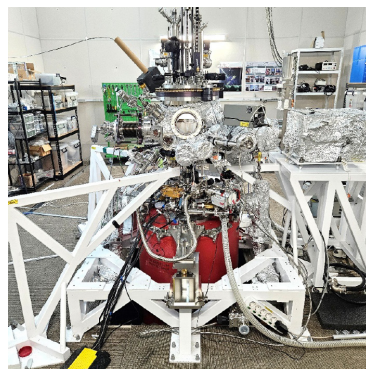
최근 QNS는 IBS 본원 평가에서 최고 등급인 'Outstanding' 평가를 받았습니다. 3년마다 시행되는 이 평가는 연구단의 연구 지속 여부를 결정하는 중요한 지표로, 이번 평가를 통해 앞으로 6년간 현재 연구를 계속할 수 있는 권한을 부여받았다는 점에서 큰 의미가 있습니다.

QNS는 논문의 영향력 지수(impact factor)가 다른 연구단과 비슷한 수준임에도 불구하고, 기존 연구 틀에 얽매이지 않고 독창적이며 도전적인 연구를 꾸준히 이어온 점이 높이 평가받았다고 보고 있습니다. 특히 연구단이 한국 최초 새로운 접근 방식의 큐비트 플랫폼 구축과 원자 단위 양자 제어, 이를 위한 연구 장비를 직접 제작하는 등의 새로운 시도들이 이번 성과에 크게 기여했습니다.

특히 기존의 주사터널링현미경(STM, Scanning Tunneling Microscope)의 한계를 넘어서기 위해, RF 신호를 STM에 더한 ESR (Electron Spin Resonance) STM 시스템을 자체 개발했습니다. 현재는 STM과 광학 실험법을 결합한 새로운 실험 플랫폼을 구축 중이며, 이를 통해 원자 수준에서 양자 상태를 조작하는 새로운 물리 실험의 장을 열고 있습니다.

이러한 실험 기술의 진보는 단순한 장비 개발에 그치지 않고, 실제로 세계적인 연구 성과로 이어지고 있습니다. 대표적으로, QNS의 STM 기반 스핀 큐비트 플랫폼은 2023년 Science에 소개된 바 있습니다. 양자 정보 기술 연구가 초전도체, 이온트랩, 광자 큐비트 기반에 집중되어 있는 것과 달리, QNS는 STM과 물질 표면 원자를 기반으로 한 독창적인 방식으로 큐비트를 구현했으며, 단일 원자 큐비트 제어를 넘어 다수 원자 큐비트 제어와 양자 게이트 구현에 성공하여 세계적인 주목을 받았습니다.

"지금까지 한국에서 자체적으로 시작된 큐비트 플랫폼은 없었기에, 저희가 '새로운 방식의 큐비트 플랫폼'을 개발했다는 점에 큰 자부심을 가지고 있습니다." 이와 더불어, QNS는 Nature Nanotechnology에 발표한 또 다른 연구를 통해, 단일 원자의 전기쌍극자 모멘트와 자기쌍극자 모멘트를 측정하는 데 성공했습니다. 현재 양자 센서 분야에서는 AFM(Atomic Force Microscopy)과 다이아몬드 내 스핀 점 결함을 결합한 방식이 높은 자기장 측정 민감도로 주목받고 있지만, 수십 나노미터 수준의 공간 분해능으로 인해 원자 단위 측정에는 한계가 있었습니다. QNS의 이번 연구는 이 한계를 넘어 1 nm 이하의 원자 수준 공간 분해능을 달성했다는 점에서 큰 의미를 가집니다. QNS의 궁극적인 목표는 양자역학의 본질을 가장 근본적인 수준에서 실험적으로 이해하는 것입니다.



BOB system: mK ESR(electron spin resonance) STM



STM 이미지 기반 양자 세계의 예술적 표현



양자 세계를 표현한 초등학생 미술공모전 작품 수상작

이를 위해 연구단은 표면 위 단일 스핀 원자를 실험 대상으로 삼아, 원자 단위에서 완벽한 제어성과 재현성을 지닌 양자 시스템을 구현하고 있습니다. 단순히 큐비트의 수를 늘리는 기술적 실용성에만 초점을 맞추고 있기 보다는, '큐비트 간 상호작용 과정에서 나타나는 근본적인 양자 현상들'에 더 큰 관심을 가지고 연구를 진행하고 있습니다. 많은 연구자들이 큐비트의 결과적 활용에 집중해왔다면, QNS는 그 과정 속에 놓쳐왔던 기초적인 물리 현상과 원리를 탐구하며 새로운 과학적 통찰을 추구하고 있다고 전했습니다.

양자나노과학 연구에서 원자 단위의 움직임을 제어하는 기술이 크게 주목받고 있지만, 일반 대중에게는 아직 먼 미래의 이야기처럼 느껴질 수 있습니다. 이에 대해 장원준 박사는 이 기술의 진정한 의미는 "가능성을 상상할 수 있게 만드는 데 있다"고 강조합니다.

"지금 원자를 움직일 수 있다는 사실을 사람들에게 알렸습니다. 이걸 바탕으로 이야기꾼들은 '원자를 움직여서 이런 사회를 만들 수 있지 않을까' 하는 스토리를 쓸 것이고, 그 문화를 습득한 다음 세대는 그것을 기반으로 미래를 설계하겠죠. 지금은 비록 실생활에서 당장 쓸 수 있는 기술은 아닐지라도, 이 한 가지 사실이 사회 전체에 굉장히 큰 파장을 줄 수 있습니다."

### “양자의 감동, 예술로 말하다”

QNS를 더욱 특별하게 만드는 요소는 '과학과 예술의 만남'입니다. 센터 내부에는 상주 예술가가 있으며, 과학자와 예술가가 함께 세미나를 열고 영감을 나누며, 양자에서 느낀 감각을 예술로 표현하는 행사 '미술 공모전 (Art Contest)'도 정기적으로 개최하고 있습니다

센터 라운지 한쪽 벽면에는 초등학생들이 양자 세계를 상상하며 그린 미술 공모전 수상작들이 전시되어 있습니다. 원자 단위에서 일어나는 현상을 자유롭게 상상하고 표현한 작품들은, 앞서 언급된 "가능성을 상상하게 할 수 있다"는 말과 깊이 맞닿아 있습니다. 원자를 움직일 수 있다는 사실이 어른들뿐만 아니라 아이들에게도 새로운 세계를 상상하게 만든 것입니다.

QNS는 이처럼 생각의 전환과 사고의 융합이 연구를 한 단계 발전시키는 핵심 동력을 믿고 있으며, 과학과 예술이 만나 창조적인 혁신을 실현하는 문화를 만들어가고 있습니다.



# 오늘이 아닌, 내일의 연구를 설계합니다.

양자 연구의 진짜 경쟁력은 장비를 '조합'하는 것이 아니라 '설계'하는 것에서 시작됩니다. SDT 주식회사는 큐비트 제어부터 극저온 환경, 제어 소프트웨어까지 양자 실험 인프라를 통합 설계·제조하여 장기적 연구 로드맵을 안정적으로 뒷받침하는 한국의 양자기술 전문기업입니다. 저희는 대한민국 연구자들이 오직 연구에만 집중할 수 있도록 가장 안정적이고 신뢰할 수 있는 핵심 하드웨어와 소프트웨어를 공급합니다.



**SDT 주식회사는  
양자 기술 상용화의 중심에서  
무한한 가능성을 현실로 만듭니다.**

## SDT만의 독보적 기술 역량, QDM

QDM(Quantum Design and Manufacturing)은 SDT가 양자 기술 생태계에 필요한 초정밀 부품, 장비, 시스템을 설계·제조하는 맞춤형 프레임워크입니다. SDT는 기성 장비의 단순 공급이 아닌, 연구 및 시스템 환경에 맞는 설계와 제조를 함께 수행함으로써 양자 실험과 시스템 구축에 요구되는 정밀도와 신뢰성을 확보할 수 있도록 지원합니다.

### 통합 설계를 통한 솔루션 시너지

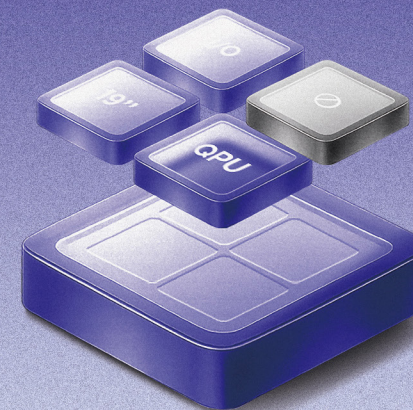
제어·계측 장비부터 냉각 시스템, 정밀 부품, 운영 소프트웨어까지 각각 공급하는 번거로움 없이, 하나의 연구 시스템 관점에서 통합 설계하여 구성 요소 간의 호환성 문제를 근본적으로 해결합니다.

### 국내 기반의 설계·제조 역량

설계부터 제조까지 전 과정을 자사 국내 인프라를 활용하여 직접 수행하고 있습니다. 이를 바탕으로 연구 일정에 맞춘 신속한 대응과 기술 지원이 가능하며, 연구 환경에서 요구되는 커스터마이징에 유연하게 대응합니다.

### 다양한 양자 플랫폼을 고려한 확장성

QDM 접근 방식은 다양한 양자 플랫폼에 유연하게 적용 가능한 구조를 제공합니다. 초기 연구 단계부터 향후 시스템 확장까지 염두에 둔 유연한 연구 인프라 설계를 통해 장기적 연구 로드맵을 안정적으로 뒷받침합니다.



## 대한민국 기술로 완성하는 양자 연구 솔루션

SDT는 QDM 역량을 기반으로 양자 컴퓨팅에 필요한 핵심 기술을 공급하는 최적의 기술 파트너입니다.

Quantum Metrology & Control Solutions

### 국내 연구자를 위한 양자 연구 현장 맞춤형 실험 장비

- QCU** 최대 8.5 GHz의 신호 대역폭으로 큐비트 제어
- TTMU** SDT의 독자적인 IP로 개발된 초정밀 TCSPC
- CCU** 세계 유일 20채널 단일 광자 동시 계수
- PGU** 12채널 초정밀 펄스 생성·시간동기화

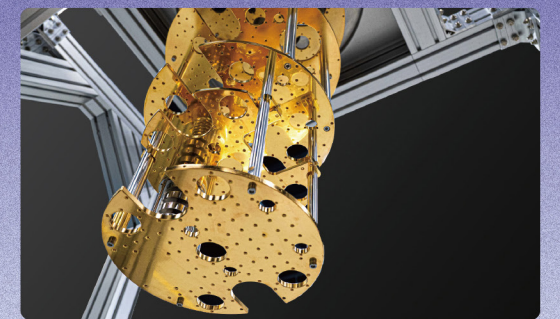


Cryogenic Solutions

### 밀리켈빈급 극저온 구현 국산 극저온 냉각기

**CryoRack** 모듈형 극저온 냉각 솔루션

- 최저온도  $\leq 20$  mK 의 극저온 성능
- 국내 제조 기반의 빠른 납품과 신속한 기술 지원
- 수입 장비 대비 운송·설치·유지보수 비용 절감
- 국내 연구 환경에 맞춘 커스터마이징 지원





# Quantum Control Systems.

Improving single qubits or scaling quantum computers?  
We have solutions for every step of your quantum journey.



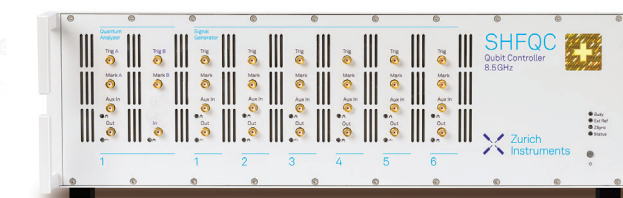
## Next-Level Quantum. From Lab to Industry.

Lab

- Trusted instrumentation
- Intuitive software
- PhD-level expert support

- Truly scalable technology
- HPC- and QEC-ready
- Reliable partnership

Industry



# 연간 국내외 양자 정보 학술 행사 안내

## 한국양자정보학회 주관

날짜	행사명	장소	Link
2. 25~27	한국양자정보학회 정기학술대회	Seoul, Republic of Korea	<a href="https://www.qisk.or.kr/content/conferences/pre_reg_guide.php?id=53">https://www.qisk.or.kr/content/conferences/pre_reg_guide.php?id=53</a>
7. 1~3	Conference on Quantum Information (CQI)	Seoul, Republic of Korea	<a href="https://www.qisk.or.kr/content/conferences/pre_reg_guide.php?id=56">https://www.qisk.or.kr/content/conferences/pre_reg_guide.php?id=56</a>
11. 25~27	IQT(Inside Quantum Technology) Korea 2026	Incheon, South Korea	<a href="https://iqtevent.com/">https://iqtevent.com/</a>

날짜	행사명	장소	Link
3.15~20	APS Global Physics Summit	Denver USA	<a href="https://summit.aps.org/">https://summit.aps.org/</a>
4. 20~22	Quantum Computing Theory in Practice (QCTiP)	University of Oxford, UK	<a href="https://qctipconf.github.io/">https://qctipconf.github.io/</a>
5. 17~21	CLEO	Charlotte, USA	<a href="https://cleoconference.org/">https://cleoconference.org/</a>
5. 17~22	QD2026	Busan, Korea	<a href="https://qd2026.org/">https://qd2026.org/</a>
6. 1~5	APS Division of AMO Physics Meeting	Rhode Island, USA	<a href="https://www.aps.org/events/2026/damop-meeting-2026">https://www.aps.org/events/2026/damop-meeting-2026</a>
6. 7~12	International Quantum Error Correction conference (QEC)	Santa Barbara, USA	<a href="https://qec-conference.org/2026">https://qec-conference.org/2026</a>
6. 8~11	Photonics for Quantum	Waterloo, Canada	<a href="https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-for-quantum">https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-for-quantum</a>
6. 15~18	Optica Quantum 2.0	Glasgow, United Kingdom	<a href="https://www.optica.org/events/topical_meetings/quantum/">https://www.optica.org/events/topical_meetings/quantum/</a>
7. 2~4	Quantum Korea	Seoul, Republic of Korea	<a href="https://www.quantum-korea.kr/">https://www.quantum-korea.kr/</a>
7. 6~10	Single Photon Workshop	Naples, Italy	<a href="https://spw2026.org/">https://spw2026.org/</a>
7. 20~24	Central European Workshop for Quantum Optics (CEWQO)	Erlangen, Germany	<a href="https://www.oqt.nat.fau.de/events/">https://www.oqt.nat.fau.de/events/</a>
8.2~6	CLEO Pacific Rim	Beijing, China	<a href="https://www.cleopacificrim.com/home/about/">https://www.cleopacificrim.com/home/about/</a>
8. 23~27	SPIE Optics+Photonics	San Diego, USA	<a href="https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-photonics">https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-photonics</a>
8. 24~28	QCrypt 2026	Ottawa, Canada.	<a href="https://qcrypt.net/2025/2026/">https://qcrypt.net/2025/2026/</a>
8. 24~28	AQIS2026	Seoul, South Korea.	<a href="http://aqis-conf.org/">http://aqis-conf.org/</a>
8. 31~9. 4	The Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC)	Québec, Canada	<a href="https://tqc-conference.org/2026">https://tqc-conference.org/2026</a>
9. 27~10.01	Frontiers in Optics	Rochester, New York, USA	<a href="https://www.frontiersinoptics.com/">https://www.frontiersinoptics.com/</a>
TBD	한국광학회 제9회 양자정보학술대회	TBD	TBD

## 발행기관



## 후원기관



## 2026년 한국양자정보학회 기업 회원

Quantum Tree



Quantum Berry



Quantum Vine



Quantum Leaf



Quantum Seed

