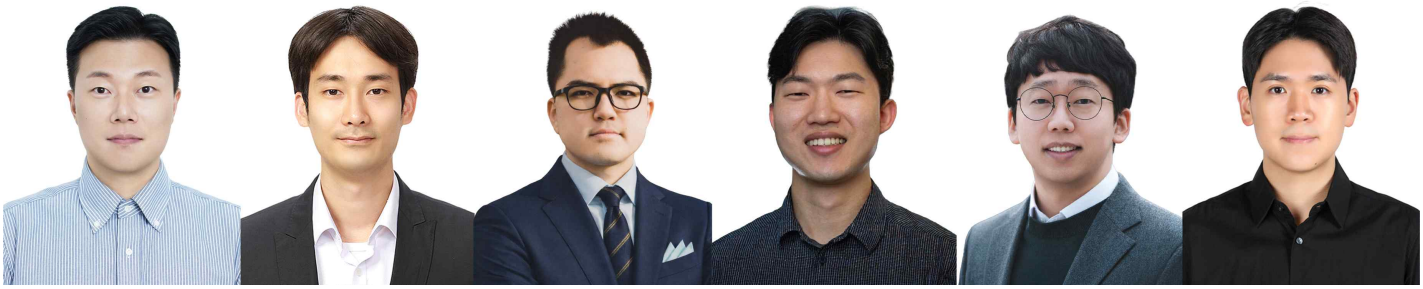
“양자컴퓨터 실용화의 열쇠, 소재·공정에서 찾다”
GIST-고려대-UC 버클리 등,
초전도 양자컴퓨터 핵심 소자 발전 방향 제시

- GIST 반도체공학과 윤훈한 교수가 이끈 국제공동연구팀, 초전도 양자컴퓨터 핵심 부품 '조셉슨 접합'의 소재·공정 기술과 기존 기술의 한계 종합 분석... 국제학술지《Advanced Science》게재
- ▲제조 균일성 ▲에너지 손실 저감 ▲전기적 조절 ▲소형화 ▲잡음 내성 확보 등 양자컴퓨터 실용화를 위한 5대 과제 정리
- 접합 품질을 실제 큐비트 성능 및 대규모 제조 가능성에 연결해 평가하는 연구 방향 제시



▲ GIST-고려대-UC 버클리 등 공동연구팀 단체사진. (왼쪽부터) 윤훈한 GIST 반도체공학과 교수, 장경현 GIST 반도체공학과 석박사통합과정생, 롱 비 응우옌(Long B. Nguyen) 아마존웹서비스(AWS) 양자컴퓨팅센터 Quantum Applied Scientist[前 로렌스버클리국립연구소 Quantum Scientist], 김현성 UC 버클리 물리학과 박사과정생, 김요셉 고려대 물리학과 교수, 진승원 싱가포르국립대학교 양자기술센터 석사과정생[前 고려대학교 물리학과 석사과정생].

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 **반도체공학과 윤훈한 교수 연구팀**이 **고려대학교 물리학과 김요셉 교수, 미국 캘리포니아대학교 버클리**(UC Berkeley) **및 로렌스버클리국립연구소**(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) **연구진**과 함께 **초전도 양자컴퓨터의 핵심 부품인 ‘조셉슨 접합’ 소자의 소재와 제조 기술을 종합 분석하고, 양자컴퓨터 실용화를 위한 기술 발전 방향을 제시**했다고 밝혔다.

‘조셉슨 접합(Josephson junction)**’은** 전기저항 없이 전류가 흐르는 **초전도체 두 개 사이에 매우 얇은 절연층이나 반도체 등을 끼워 넣은 구조**다. 조셉슨 접합을 이루는 두 초전도체 사이에 양자역학적 원리에 따라 초전류가 발생하는 현상인 '조셉슨 효과'를 활용하여 초전도 회로 내에서 양자정보 상태를 구별하고 제어한다.

공동연구진은 **조셉슨 접합의 미세한 결함과 제조 편차가 양자정보 손실과 계산 오류로 이어지는 과정을 설명하고, 조셉슨 접합의 소재와 계면(서로 다른 물질이 맞닿는 경계)의 품질이 양자컴퓨터의 성능과 대규모 제조 가능성에 미치는 영향을 평가하는 지침을 제시**했다.

양자컴퓨터는 양자역학의 원리를 이용해 기존 컴퓨터로는 계산하기 어려운 분자와

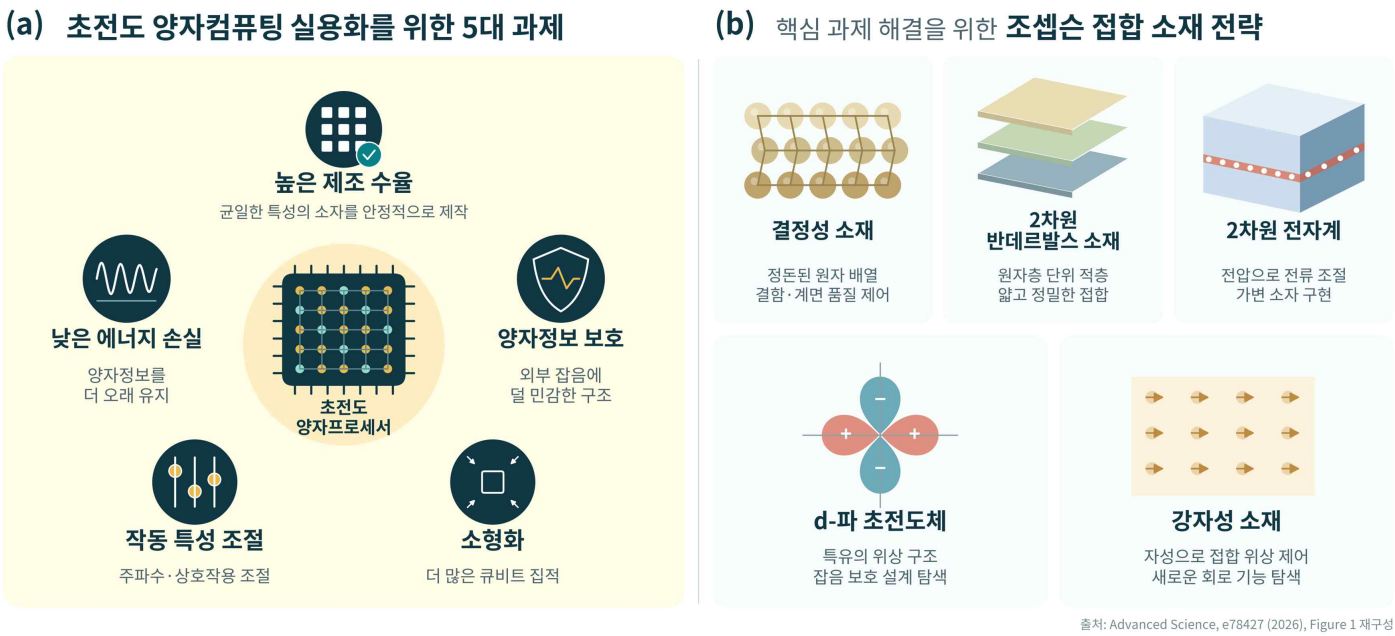
물질의 특성 등을 분석할 수 있어 신약 개발과 신소재 연구 등 다양한 분야에서 활용이 기대된다. 이 가운데 **초전도 양자컴퓨터는 반도체 칩과 유사한 방식으로 회로를 제작하고 전기적으로 제어할 수 있어 활발히 연구**되고 있다.

초전도 양자컴퓨터의 기본 정보 단위인 **'큐비트'를 구현하고 제어하는 데 조셉슨 접합 소자가 핵심적인 역할**을 한다. **조셉슨 접합 소자를 제작**할 때 얇은 장벽의 두께나 접합 면적, 원자 배열에 미세한 차이만 생겨도 큐비트의 작동 특성이 달라질 수 있다.

또한 **접합 내부나 주변 계면의 미세한 결함은 큐비트와 에너지를 주고받거나 작동 주파수를 흔들어 양자정보 유지 시간을 줄이고, 시간에 따른 성능 변동을 일으킬 수 있다.** 이러한 문제가 여러 큐비트에서 발생하면 회로를 정밀하게 제어하고 계산 오류를 바로잡기도 어려워져 **양자컴퓨터의 성능과 확장성을 제한하는 요인**이 된다.

연구진은 초전도 양자컴퓨터 실용화를 위해 **조셉슨 접합 기술이 해결해야 할 핵심 과제**를 다섯 가지로 정리했다.

구체적으로 ▲소자 간 특성 편차를 줄이고 높은 수율*로 일관되게 제작하는 **제조 균일성·재현성** ▲양자정보를 오래 유지하기 위한 **에너지 손실 저감** ▲작동 중 큐비트의 주파수와 큐비트 사이의 **상호작용을 조절하는 기능** ▲더 많은 큐비트를 집적하기 위한 큐비트 회로의 **소형화** ▲소재와 접합·회로 구조를 활용해 양자정보를 **잡음에 덜 민감하게 만드는 보호 설계**다.



출처: Advanced Science, e78427 (2026), Figure 1 재구성

▲ 초전도 양자컴퓨터 실용화를 위한 5가지 핵심 과제와 소재 전략. (a) 높은 제조 수율, 낮은 에너지 손실, 작동 특성 조절, 소형화, 잡음으로부터의 양자정보 보호. (b) 이를 구현하기 위한 결정성 소재, 2차원 반데르발스 소재, 2차원 전자계, d-파 초전도체, 강자성 소재.

연구진은 이 다섯 가지 과제를 기준으로 **현재 널리 사용되는 알루미늄 기반 조셉슨 접합의 성과와 한계를 분석**하고, **차세대 소재와 접합 구조가 각 과제를 해결하는 데 어떤 가능성을 갖는지** 살펴봤다.

예를 들어 **원자 배열이 규칙적인 결정성 소재와 깨끗한 계면**은 에너지 손실을 일으키는 결함을 줄이는 데 도움이 될 수 있다. **초전도체와 반도체를 결합한 접합**은 전압으로 큐비트의 주파수나 큐비트 사이의 연결 강도를 조절하는 데 활용될 수 있으며, **반도체 기반 2차원 전자계**도 이러한 접근에 포함된다. 원자층 단위로 쌓을 수 있는 **2차원 반데르발스 물질**은 두께와 계면을 정밀하게 제어하고 큐비트 회로를 소형화하는 방안으로 연구되고 있다. **d-파 초전도체**나 **강자성 소재**의 고유한 성질을 활용해 잡음에 덜 민감한 접합·회로를 설계할 수도 있다.

*** 수율(Yield)**: 생산한 소자 중 정해진 품질이나 성능 기준을 충족하는 소자의 비율이다.

새로운 소재와 접합 구조가 실제 양자컴퓨터에 적용되려면, **소재 자체의 특성뿐 아니라 이를 이용해 만든 큐비트의 성능과 제조 재현성까지 검증**해야 한다.

이에 연구진은 소재의 원자 배열과 조성, 접합 및 주변 계면의 품질에 관한 분석을 극저온에서 측정한 큐비트 성능과 연결하는 평가 방향을 정리했다. 구체적으로 ▲**양자정보 유지 시간과 연산 정확도** ▲**작동 조절 성능과 잡음 민감도** ▲**시간에 따른 성능 안정성** ▲**소자 간 특성 편차와 제조 수율**을 함께 검증해야 한다는 것이다.

이번 연구는 **소재 개발부터 소자 제작, 양자 회로 설계와 대규모 제조에 이르는 서로 다른 연구 단계를 하나의 관점에서 연결**했다는 점에서 의미가 있다. 이를 통해 관련 분야 연구자들이 양자컴퓨터의 성능과 생산성을 높이기 위해 어떤 소재·공정 기술을 우선적으로 개발해야 할지 판단하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.

특히 **반도체 산업에서 축적된 박막 형성과 미세 패턴 가공, 계면 제어, 공정 관리 및 집적화 기술을 초전도 양자소자 제조에 접목하는 방향을 제시**했다. 개별 소자의 성능 향상을 넘어, 웨이퍼 전체에서 높은 큐비트 성능과 균일한 특성·수율을 함께 확보하고 설계와 제조를 연결하는 공통 공정·평가 기준을 마련하는 것이 중요하다. 이러한 기반은 양자소자를 전문적으로 위탁 생산하는 '**양자 파운드리**' 생태계로 발전하는 데 필요하며, **관련 소재·공정 기술은 초전도 기반 정밀 센서와 양자통신 소자 개발에도 활용**될 수 있다.

윤훈한 GIST 반도체공학과 교수는 "반도체 산업에서 활용하는 정밀 공정 및 분석 기술을 초전도 양자컴퓨터 제작에 적용하되, 양자정보의 손실을 유발하는 오염과 공정 손상을 최소화해야 한다"며, "**반도체 소재·공정 기술을 활용해 양자컴퓨터의**

안정성과 대규모 집적 가능성을 높이는 구체적인 연구 방향을 제시하고, '양자 파운드리' 생태계의 발전 필요성을 강조했다는 데 의의가 있다"고 말했다.

롱 비 응우옌(Long B. Nguyen) 아마존웹서비스(AWS) 양자컴퓨팅센터 박사(前 로렌스버클리국립연구소)는 "양자컴퓨터의 성능과 확장성은 접합 내부의 나노미터 수준 구조와 그 주변 계면의 품질에 크게 좌우된다"며, "이번 논문은 **반도체 소재·공정 기술을 통한 계면 품질 개선이 큐비트 성능과 제조 신뢰성 향상으로 어떻게 이어지는지 평가할 지침을 제공한다**"고 평했다.

김요셉 고려대 물리학과 교수는 "많은 큐비트가 함께 계산하려면 각 큐비트의 특성이 예측 가능하고 시간에 따라 안정적으로 유지돼야 한다"며, "**소재와 공정 단계에서 결함과 편차를 줄이는 연구는 양자 오류 정정이 효과적으로 작동할 수 있는 하드웨어 기반을 마련하는 데 매우 중요**하다"고 밝혔다.

윤훈한 GIST 반도체공학과 교수, 롱 비 응우옌(Long B. Nguyen) 아마존웹서비스(AWS) 양자컴퓨팅센터 Quantum Applied Scientist[前 로렌스버클리국립연구소 Quantum Scientist], 김요셉 고려대 물리학과 교수가 공동 교신저자로, 김현성 UC 버클리 물리학과 박사과정생, 장경현 GIST 반도체공학과 석박사통합과정생, 진승원 싱가포르국립대학교 양자기술센터 석사과정생[前 고려대학교 물리학과 석사과정생]이 공동제1저자로 참여했다.

이번 연구는 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 개인기초연구사업(우수신진연구) 및 국가간협력기반조성사업(한-핀란드 공동연구사업) ▲GIST Global Value-Up 10X 사업 및 Graduate International Research Experience Fellowship 사업 ▲미국 에너지부 Quantum Systems Accelerator 사업 ▲고려대학교 신임교원 연구정착지원사업 등의 지원을 받아 수행됐다.

연구 결과는 **국제학술지 《Advanced Science》에 2026년 10월 28일 온라인으로 게재**됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Advanced Science (IF: 14.1 / 2025년 기준)
- 논문명 : Advances in Josephson Junction Materials and Processes Toward Practical Quantum Computing
(DOI : https://doi.org/10.1002/advs.78427)

- 저자 정보 : 김현성 박사과정생(UC 버클리 물리학과, 공동제1저자), 장경현 석박사통합과정생(GIST 반도체공학과, 공동제1저자), 진승원 석사과정생(싱가포르국립대학교 양자기술센터 석사과정생 [前 고려대학교 물리학과 석사과정생], 공동제1저자), 김요셉 조교수(고려대학교 물리학과, 공동 교신저자), 롱 비 응우옌(Long B. Nguyen) Quantum Applied Scientist(AWS 양자컴퓨팅센터 [前 로렌스버클리국립연구소 Quantum Scientist], 공동교신저자), 윤훈한 교수(GIST 반도체공학과, 공동교신저자)