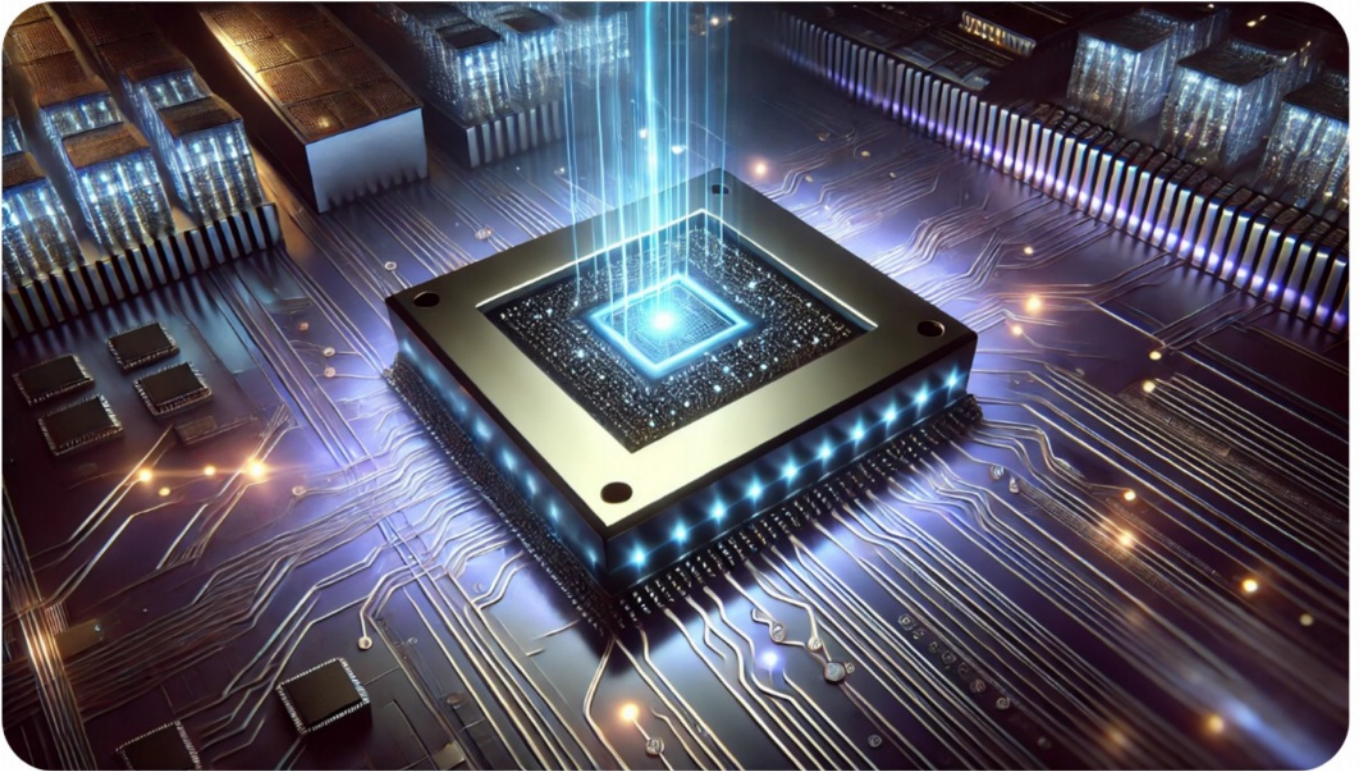


양자컴퓨터 생태계, 다층 협업으로 활성화

저자 : 김수민



양자컴퓨터는 QPU 칩 뿐 아니라 다양한 하드웨어와 소프트웨어가 결합된 생태계다. (ChatGPT로 생성한 이미지)

- 하드웨어 생태계: QPU, 신호 측정 및 제어 장치, 극저온 냉각 설비
- 소프트웨어 생태계: QPU 제어부터 응용 소프트웨어까지
- 양자 클라우드 서비스의 산업별 적용 기술 탐색
- 상용화 시기 대비를 위한 실행 방안 검토 필요

최근 양자컴퓨터 기술이 다시금 주목받고 있다. 큐비트 간 연결성이 개선되고, 양자 오류 정정 기술이 본격 도입되었으며, 양자컴퓨터와 AI와의 융합을 통해 상호 보완적인 발전이 이루어지는 등 새로운 혁신이 나타날 가능성이 높아졌기 때문이다.

AI는 양자 회로 최적화와 오류 보정 알고리즘에 적절히 활용될 경우 양자컴퓨터의 안정성을 높일 수 있다. 양자컴퓨터는 AI 모델의 학습 속도를 높이고, 기존 컴퓨터로는 불가능했던 복잡한 패턴 인식을 가능하게 만들 수 있다. 양자컴퓨터와 AI의 융합이 성공적으로 이루어질 경우, 양자컴퓨터의 산업적 활용 가능성은 더욱 커질 것이다.

양자컴퓨터의 전략적 중요성이 부각되면서 미국, 중국 등 글로벌 주요국은 대규모 투자와 연구개발을 추진 중이다. 물론 현재의 양자컴퓨터는 높은 오류율, 물리적 규모 확장의 한계, 실용적 양자 알고리즘 부족 등 상용화 단계까지 넘어야 할 장벽이 많다. 그럼에도 양자컴퓨터 기술이 국가 간 패권 경쟁의 핵심 요소로 자리 잡으면서, 연구개발 성과 창출이 빨라지고 양자 생태계는 더욱 활성화될 것으로 기대된다.

양자컴퓨터 개발은 구글, IBM, MS와 같은 빅테크 기업들이 주도하고 있다는 인식이 강하지만, 실상은 훨씬 더 다채롭다. 하드웨어 구성 요소가 매우 다양하며 기존 기술을 활용해 접근할 수 있는 영역도 있다. 또한, 소프트웨어 관점에서도 다양한 서비스 기회가 존재한다. 즉, 양자컴퓨터는 특정 기업의 독점적 기술이 아니라, 여러 기업들이 협력하고 경쟁하며 발전시키고 있는 기술이다. 숨겨진 사업 기회를 탐색하거나 활용 관점에서 접근하는 기업들의 사례를 통해 이러한 생태계를 종합적으로 살펴보고자 한다.

양자컴퓨터와 기존 컴퓨터의 차이점

구분	양자컴퓨터	기존 컴퓨터
정보의 기본 단위	큐비트(Qubit, 양자비트) 0과 1을 동시에 표현 가능	비트(Bit) 0 또는 1 중 하나만 표현 가능
연산 방식	양자 중첩과 얽힘을 활용한 병렬 처리	순차적 혹은 병렬 처리
계산값의 특성	확률적 계산 같은 입력 → 다양한 결과, 가장 높은 확률 결과 선택	결정적 계산 같은 입력 → 항상 같은 결과
물리적 기반	양자역학적 현상	전통적인 전자 회로
응용 분야	특화된 문제 해결 복잡한 시뮬레이션 및 최적화 문제 등	범용적 사용 대부분의 실생활 문제 해결 가능



구글의 초전도 양자컴퓨터
자료: 각 사 공식 홈페이지

하드웨어 생태계: QPU, 신호 측정 및 제어 장치, 극저온 냉각 설비

● 양자컴퓨터의 뇌, 양자 프로세서(QPU)

양자컴퓨터의 핵심인 QPU는 글로벌 빅테크 기업과 QPU 전문 스타트업이 주도적으로 개발하고 있다. IBM, 구글, MS 등 빅테크 기업은 이미 오래 전부터 양자컴퓨팅 연구를 시작했다. 이들은 막강한 자본력과 고성능 컴퓨팅 인프라를 기반으로 큐비트 수 확대, 처리속도 및 안정성 향상 등 QPU 성능 고도화에 집중해왔다. QPU의 설계와 테스트에는 복잡한 양자 시스템과 알고리즘을 가상으로 실험해보는 시뮬레이션이 필요한데, 이러한 인프라를 활용하면 양자 알고리즘과 하드웨어의 성능 예측 및 최적화가 가능하다.

양자컴퓨터와 기존 컴퓨터의 주요 하드웨어

주요 HW 요소		기존 컴퓨터	양자컴퓨터
핵심 처리 장치 (프로세서)		• CPU (Central Processing Unit) • 실리콘 기반 반도체	• QPU (Quantum Processing Unit) • (초전도 방식) 초전도체 회로 기반
신호 측정 및 제어 장치	무선주파수 생성 및 측정	• 일반적 주파수 스펙트럼에서 발생하는 신호를 생성, 측정, 분석하기 위한 장치	• 기존 대비 훨씬 정밀한 주파수 제어 기술 필요
	저잡음 측정 및 제어	• 일반적인 증폭기로 잡음 측정 및 제어 가능	• 특정 주파수에서 선택적으로 증폭하고, 원하는 신호만 제거할 수 있는 기술 필요
	임펄스 측정 장치	• 초고속 신호를 정확히 측정, 분석하기 위한 장치	• 마이크로파 신호 및 양자 신호를 분석 가능한 특수 계측기 필요
응용 분야		• 상온 동작 가능, 장치에서 발생하는 열에 대한 쿨러 필요	• (초전도 방식) 극저온 냉각 설비 필요

QPU 전문 스타트업들은 다양한 기술적 배경을 바탕으로 QPU 개발에 참여하고 있다. 일부는 빅테크 기업이나 대학 연구소에서 축적한 전문성을 활용하고 있으며, 스타트업 특유의 유연하고 빠른 R&D 문화를 통해 경쟁력을 확보하고 있다. 이들은 초전도, 이온트랩, 중성원자, 광자 등 다양한 방식의 QPU 개발을 추진 중이다. 예를 들어, 아이온큐(IonQ)는 이온트랩, 큐에라(QuEra)는 중성원자, 자나두(Xanadu)는 광자 기반 기술에 집중하며 각기 다른 방식으로 QPU 성능을 고도화하고 있다.

● 큐비트 신호 측정 및 정밀 제어 장치: 취리히 인스트루먼트, 퀀텀머신

양자컴퓨터는 큐비트의 미세한 양자 상태를 정밀하게 제어하고 측정해야만 신뢰성 높은 연산을 수행할 수 있다. 그러나 큐비트는 외부 환경의 노이즈에 매우 민감하고, 상태 변화가 극도로 빠르게 일어나기 때문에 정밀한 신호 생성, 실시간 피드백, 잡음 최소화 등이 필수적이다. 이를 위해 특수한 신호 측정 및 정밀 제어 장치가 필요하며, 이러한 장치는 큐비트의 상태를 정확히 측정하고 최적의 조건으로 조정하는 역할을 수행한다.

취리히 인스트루먼트(Zurich Instruments)는 2008년 취리히 연방 공과대학에서 스핀오프 형태로 설립된 기업으로, 원래 정밀 계측 장치를 개발하던 회사였다. 이들은 초고주파 신호 처리 및 분석, 저잡음 측정, 정밀 시간 동기화와 관련된 선도적인 기술을 보유하고 있었다. 이를 큐비트 신호 측정에 접목하며 양자컴퓨터 부품·장치 산업에 참여한 것이다. 자동차로 비유하자면, 이들의 기술은 레이더나 라이다(LiDAR)처럼 차량 주행 환경을 정밀하게 측정하는 센서 기술에 가깝다.



취리히 인스트루먼트의 측정·제어 장치
자료: 각 사 공식 홈페이지

한편, 2018년 설립된 이스라엘 스타트업 퀀텀머신(Quantum Machines)의 공동 창립자는 박사 과정 중, 큐비트 제어와 양자 장치의 물리적 구현과 관련된 연구를 수행한 전문가들이다. 퀀텀머신의 강점은 큐비트 신호를 어떻게 제어하고 실행할 지 결정하고 반응할 수 있다는 점이다. 즉, 자동차의 고급 주행 보조 시스템(ADAS)과 유사하게, 양자컴퓨터가 연산 중일 때 실시간으로 큐비트 상태를 점검하면서 문제가 생기면 그에 맞춰 바로 제어 신호를 조작하는 역할을 수행한다.

두 기업의 기술은 큐비트 제어를 위한 상호 보완적 요소로서, 주요 QPU 전문 기업들은 이들의 기술을 니즈에 맞게 적용하고 있다. 취리히 인스트루먼트는 IBM·리게티 등과, 퀀텀머신은 리게티·큐에라 등의 양자 하드웨어와 통합되어 큐비트의 안정성과 신뢰도를 높이는 데 기여하고 있다. 또한 퀀텀머신은 극저온 냉각 설비 기업과 함께 양자컴퓨터의 극저온 환경에서도 신호가 왜곡되지 않도록 신호 전송 및 제어 최적화를 연구하고 있다.

● 극저온 냉각 설비: 블루포스와 옥스포드 인스트루먼트

양자컴퓨터 중 초전도 방식을 사용하는 경우, 안정적 작동을 위해 절대온도 0.01K(-273.14℃) 이하의 극저온 환경이 필요하다. 이렇게 낮은 온도에서는 큐비트가 안정적으로 양자 상태를 유지하고, 외부 환경의 영향을 최소화할 수 있다.

냉각 기술의 핵심인 희석 냉장 방식은 헬륨-3(^3He)과 헬륨-4(^4He)라는 두 가지 헬륨을 이용해 온도를 낮추는 방법이다. 헬륨-3이 헬륨-4와 섞이는 과정에서 열을 흡수하는 성질이 있는데, 이는 따뜻한 물에 얼음을 넣으면 얼음이 녹으면서 주변 열을 흡수해 물을 차갑게 만드는 것과 비슷한 원리이다. 이 과정을 반복하면 절대온도 0.01K 이하까지 냉각이 가능하다. 다만, 극저온 냉각 설비는 냉각 방식, 구조적 복잡성이나 온도 정밀도, 소음 및 진동 제어 등 다양한 측면에서 단순 냉각 장치보다는 고정밀 첨단 기술이 집약된 설비이다.

핀란드 알토 대학교의 저온 연구를 기반으로 설립된 블루포스(Bluefors)는 극저온 냉각 설비 시장을 선도하며, 연구소 및 스타트업을 위해 Lab-as-a-Service(실험실 서비스형 플랫폼)를 운영하고 있다. 이를 통해 연구자는 자체 장비 없이도 양자 실험이 가능하다. 또한, 연구자가 필요에 따라 확장할 수 있도록 모듈형 냉각 시스템도 제공한다. IBM, 구글, 리게티 등 주요 QPU 기업에 극저온 냉각 시스템을 공급하고 있다.



블루포스의 극저온 냉각 설비
자료: 각 사 공식 홈페이지

영국 옥스포드 대학교에서 벤처 기업으로 독립한 옥스포드 인스트루먼트(Oxford Instruments)는 냉각 설비를 만드는 것뿐만 아니라, 극저온 신호 전송 및 계측 장비까지 개발하는 것이 특징이다. 초전도 케이블 및 필터를 통해 큐비트와 제어 시스템 간 신호 손실을 줄이며, 노이즈를 억제해 연산 정확도를 높인다. 이들은 IBM과 리게티의 극저온 환경 최적화 프로젝트에 참여해 신호 계측 및 잡음 제거 기술을 공급하고 있다.

소프트웨어 생태계: QPU 제어부터 응용 소프트웨어까지

다수의 QPU 전문 기업은 자체 하드웨어와 밀접하게 연동되는 End-to-End 소프트웨어를 제공한다. 이는 하드웨어 제어(바텀 레이어)부터 알고리즘 실행(탑 레이어)까지 모든 레이어를 아우르는 소프트웨어로, 하드웨어와 소프트웨어 간 최적화를 극대화할 수 있도록 설계된다. 특히 구글, IBM 등 빅테크 기업들은 이러한 소프트웨어를 오픈소스로 운영하여 외부 연구자가 다양한 플랫폼에서 양자컴퓨팅을 활용할 수 있도록 지원하기도 한다. 다만, 바텀 레이어는 하드웨어와의 연계성이 특히 중요하여, 주로 QPU를 개발하는 기업들의 고유 기술영역으로 간주된다.

양자컴퓨터 S/W의 계층별 주요 역할

소프트웨어 계층	양자컴퓨터에서의 주요 역할	스마트폰 S/W과의 비교
Top Layer	일반 사용자가 직접 사용하는 양자 알고리즘 및 어플리케이션	어플리케이션(App) 등
Middle Layer	응용소프트웨어가 하드웨어에서 실행 가능하도록 변환	운영체제 (안드로이드, iOS) 및 드라이버 등
Bottom Layer	QPU 및 주변 하드웨어 장치 제어	펌웨어 및 하드웨어 제어 시스템 등

QPU를 직접 개발하지 않는 소프트웨어 기업이나 스타트업은 미들 또는 탑 레이어에 집중한다. 먼저, 양자 하드웨어 간 호환성 문제를 해결하는 미들웨어를 개발하는 기업들이 있다. 미들웨어는 다양한 양자컴퓨터에서 동일한 알고리즘을 실행할 수 있도록 변환과 최적화 기능을 제공하며, 덕분에 연구자나 개발자는 특정 하드웨어에 종속되지 않고 다양한 양자컴퓨터에서 알고리즘을 실행할 수 있다.

또한, 하드웨어 변환보다 특정 산업에서 활용할 수 있는 양자 알고리즘 및 응용 소프트웨어(탑 레이어) 개발에 집중하는 기업도 있다. 이들은 금융, 물류, 재료과학, 화학 시뮬레이션 등 실제 산업 문제 해결을 목표로 기업이 양자컴퓨터의 복잡한 작동 원리를 몰라도 쉽게 활용할 수 있도록 한다.

AWS와 같은 기업들은 미들웨어와 탑 레이어를 함께 개발하여 특정 양자컴퓨터에 의존하지 않는 소프트웨어를 구축하고 있다. AWS는 Braket이라는 미들웨어를 통해 다양한 양자컴퓨터를 연결할 수 있는 기능을 제공하고, Braket SDK(Software Development Kit)와 같이 연구자들이 직접 양자 알고리즘을 개발하고 실행할 수 있는 도구(탑 레이어)도 함께 제공한다. 또한, 기존 컴퓨터와 양자컴퓨터를 함께 활용할 수 있는 하이브리드 연산 기능을 제공하여 양자컴퓨팅의 부분적 응용이 가능하도록 돕는다.

양자 클라우드 서비스의 산업별 적용 기술 탐색

다수의 클라우드 플랫폼 기업(AWS, IBM, MS 등)은 고가의 양자컴퓨팅 클라우드 서비스를 운영 중이다. 이를 통해 사용자는 물리적인 양자컴퓨터를 구매하지 않고도 원격으로 QPU에 접근하여 실험할 수 있으며, 초전도, 이온트랩, 중성원자 등 다양한 양자 하드웨어 기술을 경험할 수 있다. 아직 양자컴퓨터의 성능이 기존 슈퍼컴퓨터를 능가하는 단계는 아니지만, 기존 컴퓨터와는 다른 방식으로 작동되는 양자컴퓨터에 대한 이해도를 높이면서 활용 가능성을 탐색하고 있다.

양자컴퓨터의 활용을 추진하는 기업들

산업	기업명	연구 내용	협업 파트너
금융	골드만삭스	금융 파생상품의 가격 산정, 리스크 관리 모델 개선 연구	IBM
	JP모건체이스	금융 모델링, 포트폴리오 최적화, 리스크 분석 등 연구	IBM, AWS
에너지	엑손모빌	산유량 예측, 에너지 탐사, 물류 시스템 최적화 등 연구	IBM
헬스케어	로슈	난치병 치료제 개발 활용 방법 탐구 중	CQC
	클리블랜드클리닉	의료연구용 양자컴퓨터 설치	IBM
자동차	폭스바겐	교통체증 해소 시험 및 실시간 교통 경로 시스템 관련 연구	D-wave
	BMW	자동차 공정 최적화(금속 성형 공정), 배터리 신기술 탐색 등 연구	Nvidia(양자SDK)

주로 산업별 선도 기업들이 양자컴퓨팅 클라우드를 활용해 자사 산업에의 적용 가능성을 탐색하고 있다. 예를 들어, 베링거 인겔하임(Boehringer Ingelheim)과 구글 퀀텀 AI는 양자컴퓨터를 활용해 분자들이 어떻게 움직이고 단백질과 약물이 어떻게 결합하는지를 시뮬레이션하는 연구를 진행한 바 있다. 로슈(Roche)는 양자컴퓨터 소프트웨어 기업 CQC(Cambridge Quantum Computing)와 협업하여 알츠하이머 치료제를 연구하고 있다. 이러한 시도들은 약물의 작용 방식을 정밀하게 분석하고, 신약 개발의 새로운 가능성을 열기 위한 초기 단계의 실험적 접근이다.

골드만삭스는 아이온큐, AWS와 협력하여 양자컴퓨터 기반의 포트폴리오 최적화 및 리스크 분석 연구를 진행하고 있다. 일부 금융 모델에서 기존 알고리즘과 비교해 속도 향상의 가능성을 확인했으며, 이는 금융 시장에서 양자컴퓨팅의 적용 가능성을 검증하기 위한 연구이다.

상용화 시기 대비를 위한 실행 방안 검토 필요

양자컴퓨터의 상용화 시기는 여전히 불확실하지만, 글로벌 기업들은 이미 상용화 시대를 준비하기 시작했다. 양자컴퓨터 기술 발전 속도의 증가, AI 등 기존 컴퓨팅과의 융합을 통한 산업적 활용 가능성 확대 등의 이유로 상용화가 예상보다 빨라질 가능성이 높아졌기 때문이다. 이에 따라 기업들은 지금부터 점진적인 접근법으로 양자컴퓨터와 관련된 사업 및 활용 기회를 검토할 필요가 있다.

첫째, 자사의 핵심 역량이 활용될 수 있는 시장 기회를 검토해볼 수 있다. 예컨대, 정밀 측정 기술에 강점이 있는 기업은 관련 시스템 개발에, 냉각 기술에 강점이 있는 기업은 극저온 냉각 시스템 구축에 참여할 수 있다. 또한 응용 소프트웨어 개발이나 특정 산업 문제 해결을 위한 알고리즘 개발에 특화하는 것도 방법이다.

둘째, 양자컴퓨터는 단일 기업이 모든 기술을 독자적으로 개발하기 어려운 분야로, 외부와의 협업을 고려해야 한다. 초전도, 이온트랩, 중성원자 등 하드웨어 종류도 다양하며, 관련 소프트웨어는 특정 하드웨어 환경에서 최적의 성능을 발휘하도록 설계되어야 한다. 즉, 양자컴퓨터는 서로에게 최적화된 하드웨어와 소프트웨어가 함께 개발되어야 내재한 성능의 구현이 가능하다. 따라서, 글로벌 연구 컨소시엄에 참여하거나, 선도 기업 및 연구소와 협력하여 기술을 공유하고 공동 연구를 수행하는 것이 현실적이다.

셋째, 클라우드 기반 양자컴퓨팅 서비스를 활용하여 문제 해결 노하우를 확보하는 것도 의미가 있다. 양자컴퓨팅의 강점을 활용할 수 있는 분야를 미리 식별하고, 파일럿 프로젝트를 통해 실행 가능성을 검증하는 작업이 가능하다. 이는 양자컴퓨팅이 실용화되었을 때 빠르게 자사 사업에 적용하기 위한 발판이 될 수 있다. 다만, 문제 해결을 위한 현실적인 기대치 설정이 필요하다. 양자컴퓨팅은 모든 컴퓨팅 문제를 해결하는 '만능 해결사'가 아니며, 특정 유형의 문제에서만 획기적인 성능 향상을 제공한다. 양자컴퓨팅과 기존 컴퓨팅의 장단점을 명확히 이해하고, 두 기술을 상호 보완적으로 활용하는 접근법이 필요하다.

양자컴퓨터 시대는 서서히, 그러나 확실히 다가오고 있다. 불확실성 속에서도 지속적인 관심과 투자만이 새로운 기술 패러다임에서 경쟁력을 유지하는 전략이 될 것이다.