

양자컴퓨터 이슈 정리

표준화를 위한 양자컴퓨터 기술경쟁

박광남 kwangnam.park@miraeasset.com

김은지 eunji.kim.a@miraeasset.com

Contents

I. 표준화가 필요한 양자컴퓨터	3
II. 기술 업데이트	
구글 Willow와 양자오류정정	4
마이크로소프트의 토폴로지 양자컴퓨터	5
토폴로지 큐비트와 MZMs	6
분산 양자컴퓨팅	7
III. 기업	
IBM(IBM US)	8
아이온큐(IONQ US)	10
마이크로소프트(MSFT US)	11
알파벳(GOOGLE US)	12
[부록] GTC 2025 Preview	13

I. 표준화가 필요한 양자컴퓨터

누가 트랜지스터가 될 상인가?

- 최초의 컴퓨터 애니악(1945년)은 약 18,000개의 진공관을 사용해서 만들어짐. 진공관이 스위치와 증폭기 역할을 하며 초당 5,000회의 덧셈을 수행. 당시에는 진공관, 릴레이, 기계식 계산기 등 다양한 부품들이 컴퓨터를 만들기 위해 연구됨
- 1947년 트랜지스터 발명과 최초의 트랜지스터 기반 컴퓨터 TRADIC(1954년) 개발 이후 1980년대 PC 보급까지 집적회로(IC)에서 마이크로프로세서 등 약 30년 동안 트랜지스터 관련 기술 고도화
- 트랜지스터는 진공관 대비 작고 신뢰성이 높으며 전력소모와 발열이 적어 컴퓨터의 표준 부품이 됨. 양자 컴퓨터의 기술 개발 속도가 빨라지기 위해서는 트랜지스터와 같은 표준화된 양자 소자가 필요. 현재 양자컴퓨터는 1940년대 진공관 수준

최초의 컴퓨터 애니악의 연산을 위해 사용된 진공관



자료: Wikipedia, 미래에셋증권 리서치센터

20.8B의 트랜지스터가 집적된 엔비디아의 Blackwell GPU



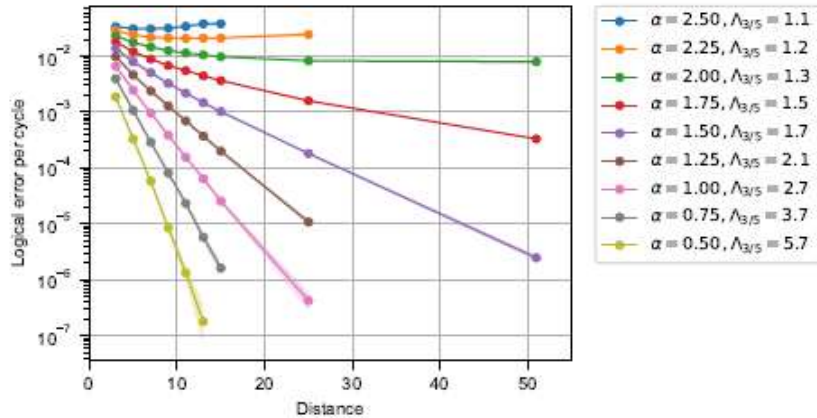
자료: Nvidia, 미래에셋증권 리서치센터

II. 기술 업데이트: 구글 Willow와 양자오류정정

Scaling 실마리를 제공한 윌로우

- 양자 컴퓨터의 성능 향상을 위해서는 큐비트의 스케일링이 필수. 하지만 현재 제어 및 측정 기술로는 큐비트의 숫자가 증가하고 연산 횟수가 증가할수록 오류율이 지속적으로 증가
- 구글 Willow는 양자오류정정(QEC) 기술을 활용, 큐비트의 숫자가 증가할수록 오류율이 낮아지는 양자 컴퓨터를 최초로 물리적으로 구현
 - Willow의 오류 억제인자(λ)는 2.31 ± 0.02 로 코드 거리가 증가할수록 논리적 오류율이 대략 2배씩 감소
 - 오류율 감소의 주요 요인으로 물리적 큐비트의 성능 및 제어 기술, 디코딩 기술 개선 등을 언급
- 반면, 코드 규모가 커질수록 지연시간이 증가하고 물리적 큐비트가 대규모로 필요 → 여전히 현실 문제를 해결할 수 있는 양자 컴퓨터를 만들기 위한 선결 과제가 다수

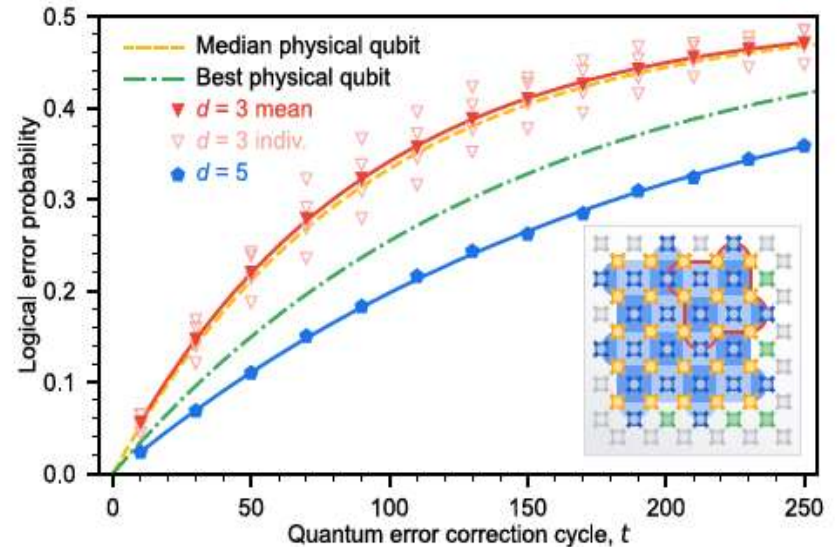
코드 거리와 큐비트의 물리적 오류율에 따라 변화하는 크로스오버 영역



- λ (오류 억제 인자): 코드 거리 증가에 따른 논리적 오류율 감소 비율을 나타내는 지표로, $\lambda > 1$ 일 때 오류 정정이 성공적임을 의미
- 알파(α): 물리적 오류율을 조정하는 스케일링 인자로, 시뮬레이션에서 다양한 오류 수준을 테스트하는 데 사용

자료: Nature, Google, 미래에셋증권 리서치센터

72큐비트 QPU의 QEC 사이클에 따른 논리적 성능



자료: Nature, Google, 미래에셋증권 리서치센터

II. 기술 업데이트: 마이크로소프트의 토폴로지 양자컴퓨터

더 오류에 강한 양자컴퓨터

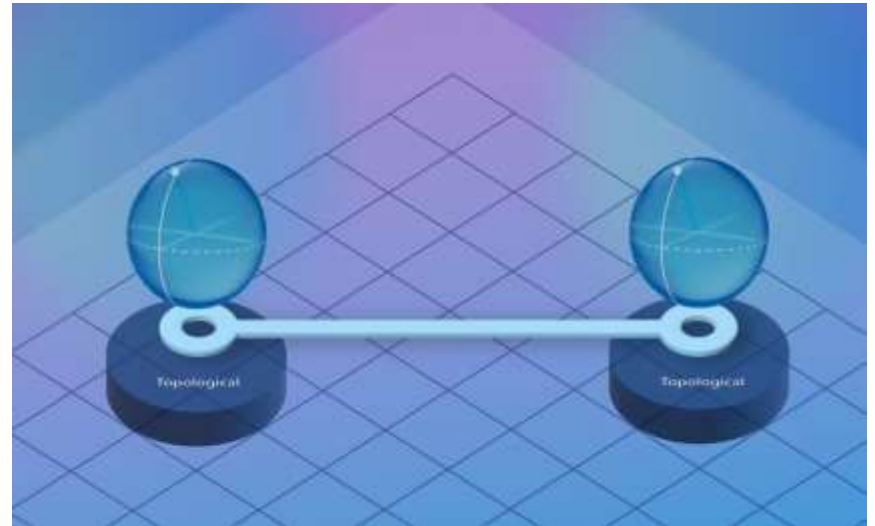
- 토폴로지는 물체를 찢거나 구부리는 등의 연속적인 변형에도 변하지 않는 성질(예: 구멍의 개수, 연결성)을 연구하는 수학의 분야. 공학에서는 이러한 토폴로지적 성질을 활용해 견고하고 오류에 강한 장치를 설계하고 제작하려는 시도가 있음
- 토폴로지 양자컴퓨터는 양자 정보를 시스템의 토폴로지적 성질을 통해 보호하는 양자컴퓨터
 - 양자 정보를 시스템 전체에 분산시켜 저장하여 국소적인 오류가 전체 정보에 영향을 미치지 못함
 - 시스템 전체가 토폴로지적 성질을 활용하기 때문에 국소적인 물리적 조건 변화에도 덜 민감
- 즉, 오류 내성이 강한 토폴로지 성질을 가진 큐비트를 기본 연산 소자로 사용함으로써 기존 양자 컴퓨터의 고질적인 오류 문제를 해결하려는 시도

토폴로지 성질을 가진 마요라나 페르미온 입자를 예측한 에토레 마요라나



자료: 미래에셋증권 리서치센터

양자 정보를 분산 저장하는 토폴로지컬 큐비트



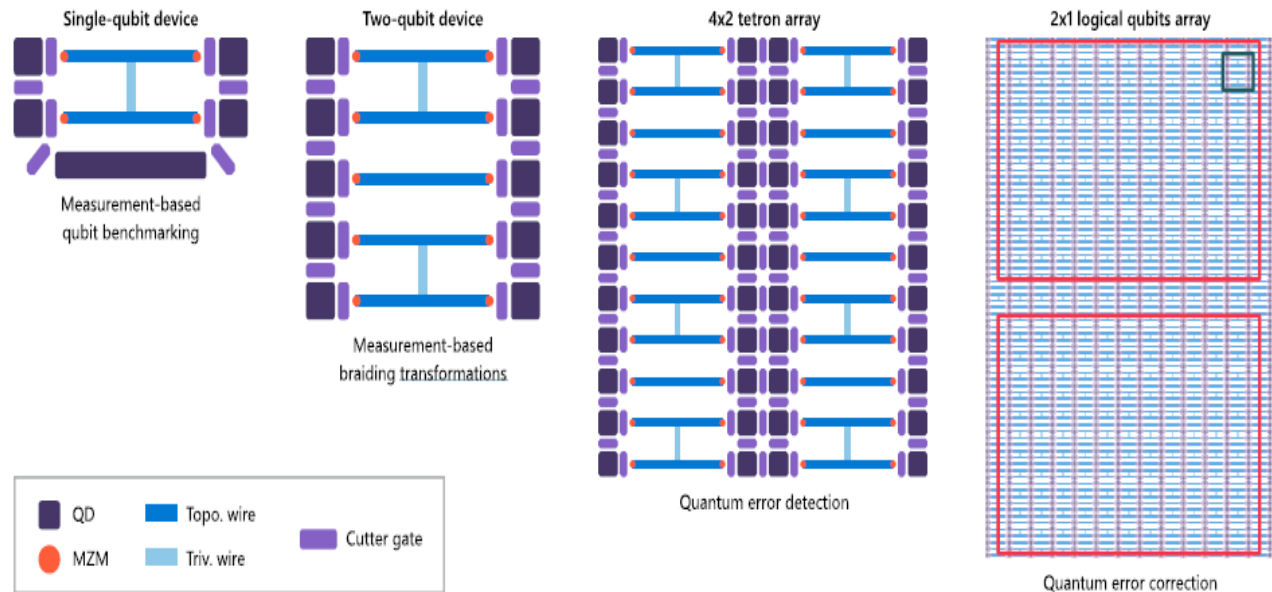
자료: Microsoft, 미래에셋증권 리서치센터

II. 기술 업데이트: 토폴로지 큐비트와 Majorana Zero Modes (MZMs)

토폴로지 큐비트 = 트랜지스터

- 토폴로지 양자컴퓨터는 토폴로지컬 큐비트를 활용, 토폴로지컬 큐비트는 Majorana Zero Modes (MZMs)와 같은 비아벨리언 애니온을 기반으로 작동
- 비아벨리언 애니온은 교환(braiding) 시 비가환적 특성을 가지고 있어 애니온 A와 B를 교환한 후 다시 B와 A를 교환하면 교환 순서에 따라 시스템의 양자 상태가 다르게 변함. 이러한 특징을 양자 게이트 연산(braiding 기반 연산)으로 활용하는 양자 컴퓨터
- MZMs는 마요라나 페르미온의 일종. 토폴로지컬 초전도체에서 특정 조건(예: 반도체-초전도체 이종구조, 자기장 등)을 통해 생성되는 준입자로 양자 정보를 안정적으로 저장하고 처리하는데 중요한 역할을 수행

마이크로소프트의 토폴로지 양자컴퓨터 Majorana 1 칩의 구조와 향후 로드맵



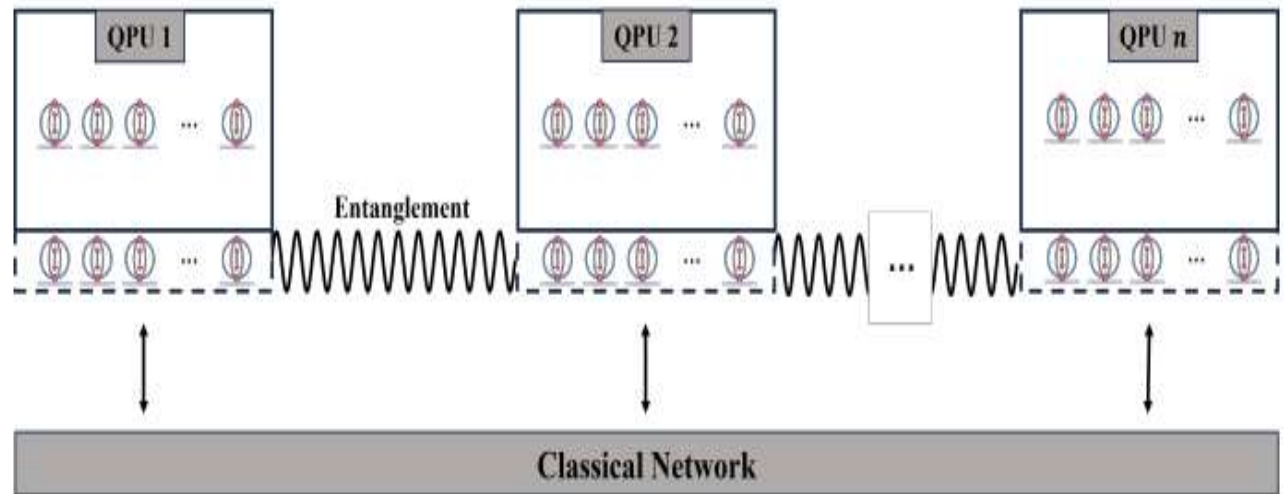
자료: Microsoft, 미래에셋증권 리서치센터

II. 기술 업데이트: 분산 양자컴퓨팅(Distributed Quantum Computing)

대규모 양자 시스템 구축을 위한 노력

- 분산 양자 컴퓨팅(DQC)은 단일 양자 칩에 포함될 수 있는 큐비트 수를 대규모로 확대하기 어려운 기술적 한계를 극복하려는 시도로, 양자 네트워크 기술을 활용하여 모듈식 소형 양자칩(QPU)의 클러스터링을 통해 양자 연산을 수행. ≈ 고전 컴퓨터의 멀티코어 또는 데이터센터
- 양자 얽힘 현상과 전통적인 네트워크 방식을 통해 양자 칩을 연결하며, 연산을 담당하는 데이터 큐비트 외에 통신 큐비트가 필요
- 현재 DQC는 연구 단계 수준: 최신 논문에서 밝힌 QPU간 양자 얽힘의 충실도는 약 96.86%이며 양자 텔레포테이션을 통해 원격으로 구현된 CZ 게이트의 충실도는 약 86%로 매우 높은 오류 발생 확률을 가지고 있음

분산 양자 컴퓨팅의 네트워크 기본 구조



자료: TNO, 미래에셋증권 리서치센터

III. 기업: IBM(IBM US)

[Roadmap]

- 1. 양자적 모듈 인터커넥트
- 2. 오류 정정

- 고전 컴퓨터와의 협업을 통한 문제 해결이 필수적 → 하드웨어/미들웨어/소프트웨어 스택을 동시에 개발 중
- 하드웨어: 칩당 큐비트 수 증가 + 모듈 방식의 스케일링 병행. 양자 오류 정정은 2029년 도입 예정
- 미들웨어/소프트웨어: 알고리즘을 하드웨어 제약에 맞춰 재설계 → 회로 니팅 및 매핑 기술 개발
- **관전 Point**
 - 하드웨어 제품 출시 일정
 - 양자적 모듈 인터커넥트: 도입 여부 및 결맞음 지속 시간의 병목 유무
 - 양자 오류 정정 기술 도입 성공 여부

회로 니팅
양자 회로를 더 짧은 회로로 분해해 병렬 실행하고 고전 하드웨어로 재결합하는 기술

매핑
양자 회로를 QPU의 물리적 구조에 맞게 변환하는 과정

IBM의 양자컴퓨팅 로드맵

연도	하드웨어	미들웨어	소프트웨어
2025	Flamingo 출시(156 큐비트) 고전 모듈 인터커넥트 → 양자적 모듈 인터커넥트 로 변경 • 이것으로 7개의 Flamingo 칩 연결 = 총 1,092 큐비트	시스템 분할 및 병렬 실행 • 칩 간 연결성 증대 • 하나의 칩에서 작은 알고리즘을 병렬 실행	
2026	연산 가능 게이트: 5,000 → 7,500 게이트	병렬 양자 프로세서에 걸친 회로 니팅*	매핑*의 개인화/자동화
2027	연산 가능 게이트: 7,500 → 10,000 게이트	고전 컴퓨팅과 양자 컴퓨팅 결합하는 워크플로우 최적화	사용자 사례별 특화 라이브러리 구축
2028	연산 가능 게이트: 10,000 → 15,000 게이트	-	
2029	Starling 출시: 200 큐비트 양자 오류 정정 기술 도입 양자 모듈 인터커넥트 → 오류 정정 인터커넥트로 개선 연산 가능 게이트: 15,000 → 1억 게이트	-	
2033~	Blue Jay 출시: 2,000 큐비트 연산 가능 게이트 수: 1억 → 10억 게이트	-	범용 양자 컴퓨팅 라이브러리 등장

자료: IBM, 미래에셋증권 리서치센터
주: 연구 일정이 아닌 제품 출시일 기준

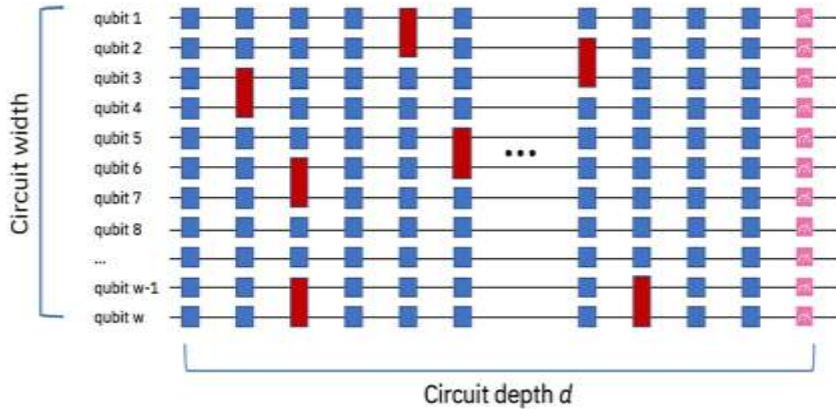
III. 기업: IBM(IBM US)

[Updates]

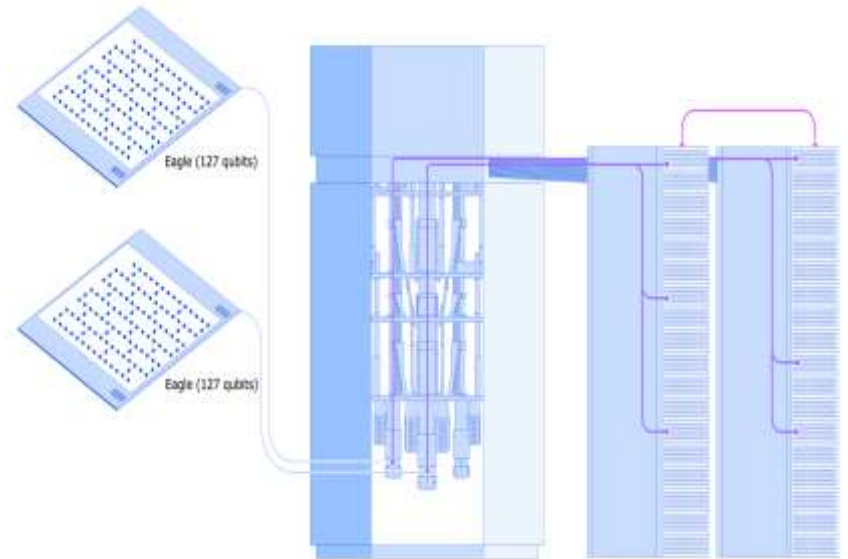
양자 모듈 인터커넥트를 향한 여정

- 연결성 연구: 칩 간 연결(m-coupler, l-coupler) 기술을 접목한 시제품 Crossbill 개발(2024)
 - 칩 내 원거리 큐비트 간 연결(c-coupler): '26년 시제품 Kookaburra 공개 계획
- 100×100 챌린지 달성('24.11): 100개의 큐비트, 깊이 100의 양자 회로를 하루 내에 정확하게 연산하는 양자 컴퓨터 개발 약속(2022년) 이행
 - 최대 5,000개의 2-큐비트 게이트 연산 가능: NISQ 알고리즘을 실행할 수 있는 수준에 도달
 - 다만 정확한 게이트 충실도(fidelity) 값은 미공개
- 회로 절단('24.12): 두 개의 Eagle 프로세서(127 큐비트)를 고전적으로 연결해 최대 142 큐비트의 양자 상태 생성. 서로 다른 QPU의 큐비트 간에 2-큐비트 게이트 연산 성공 → 다음 목표는 **양자적 연결**

양자 회로의 깊이와 넓이. 100×100은 큐비트 100개 × 연산 100단계



고전적 연결로 얽힘 상태의 확률을 복제해 '얽힌 것처럼' 연산



자료: Univ. of Waterloo, 미래에셋증권 리서치센터

자료: IBM, 미래에셋증권 리서치센터

III. 기업: 아이온큐(IONQ US)

[Roadmap]

- 1. 바륨 기반 양자컴퓨터
- 2. 큐비트 수와 충실도

- 알고리즘 큐비트(AQ) 개념 유지: 알고리즘 실행에 유용한 큐비트의 수. 전체 큐비트 수보다 1~2개 가량 적음
- Forte Enterprise: 이전 세대와 달리 표준 데이터센터 폼팩터로 생산
 - 2024년 6월 기준 생산량은 5대
 - 이전까지는 맞춤 제작 방식으로, 생산량은 제품당 1~2대 수준
- Tempo: 큐비트의 소자를 이터븀 이온(Yb+)에서 바륨 이온(Ba+)으로 전환하는 첫 양자컴퓨터
- 관전 Point
 - 바륨 이온 도입을 통한 성능 개선 정도
 - NISQ 기반 유용성: 100개 이상의 큐비트에서 99.99% 이상의 충실도를 달성하는 시점

아이온큐의 양자컴퓨팅 로드맵

연도	개발 목표
2025	게이트 충실도 향상 <ul style="list-style-type: none"> • 2025년 말까지 논리 큐비트에서 2-큐비트 게이트 충실도 99.999% 이상 • 100개 이상의 물리 큐비트 체인에서 2-큐비트 게이트 충실도 99.9% 이상
2026~	Tempo: 바륨(Ba+) 기반 의 상용 양자컴퓨터(#AQ 64) <ul style="list-style-type: none"> • 재구성 가능한 멀티코어 양자 아키텍처(RMQA, 모듈 방식의 작은 양자 프로세서를 서로 연결해 확장하는 방식) 첫 도입 물리 큐비트 게이트 충실도 99.9999% 달성 모듈식 아키텍처 도입: 광자 인터커넥트 사용

자료: IonQ, 미래에셋증권 리서치센터

아이온큐의 양자컴퓨터 제품군 출시 현황 및 계획. 2025년 이후 계획은 미정



자료: IonQ, 미래에셋증권 리서치센터

III. 기업: 마이크로소프트(MSFT US)

[Updates]

위상 큐비트 기반의 'Majorana 1' 공개

- 마요라나 페르미온 쌍을 큐비트로 하는 'Majorana 1' 칩 공개: 최초의 위상 초전도 큐비트 양자 칩
 - 현재는 8 큐비트 규모로, 향후 동일 칩에 100만 큐비트까지 확장 가능할 것으로 기대
- 다만 가능한 2-큐비트 게이트 연산의 종류, 회로의 깊이 등 실제 성능 데이터는 미공개
 - 페르미온 패리티 유지 시간은 1ms 이상이었으나, 결맞음 유지 시간은 공개하지 않음
- 구체적인 마일스톤 달성 목표 및 달성 시점 역시 명확하게 제시하고 있지 않음
- **관전 Point**
 - 성능 데이터 확인: 가능한 2-큐비트 게이트 연산 종류, 결맞음 시간, 회로 깊이 등
 - 마일스톤 2 달성 시점: 하드웨어로 보호되는 큐비트를 기반으로 큐비트 조작 기술을 디지털 방식으로 전환

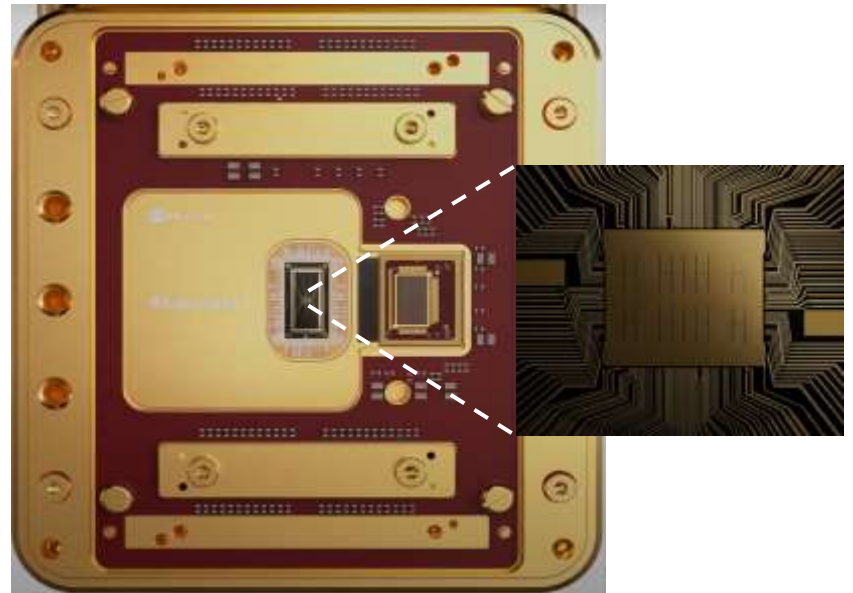
마이크로소프트의 양자컴퓨팅 로드맵

단계	개발 목표
마일스톤 2	하드웨어로 보호되는 큐비트 구성 큐비트 조작 방식 전환: 아날로그 → 디지털
마일스톤 3	얽힘 및 땀기*(braid)의 품질 향상
마일스톤 4	멀티 큐비트 시스템 • 여러 큐비트가 하나의 프로그래밍 가능한 QPU로서 동작할 수 있게 됨
마일스톤 5	신뢰할 수 있는 양자 시스템 • 논리적 큐비트 기반의 양자 연산 시스템 달성
마일스톤 6	1조 분의 1(10^{-12}) 미만의 오류율로 100만~1억 rQOPS로 확장 *rQOPS: 초당 신뢰 가능한 양자 연산의 수

* 땀기: 마요라나 페르미온 한 쌍이 서로의 위치와 부호를 교환하며 위상 변화를 일으키는 연산의 한 종류

자료: Microsoft, 미래에셋증권 리서치센터

'마요라나 1'의 모습(좌). 큐비트는 칩의 작은 부분에 불과(우)



자료: Microsoft, 미래에셋증권 리서치센터

III. 기업: 알파벳(GOOGLE US)

[Updates & Roadmap]

- 1. 최초로 임계 오류율 돌파
- 2. 마일스톤 3 목표 시점 삭제

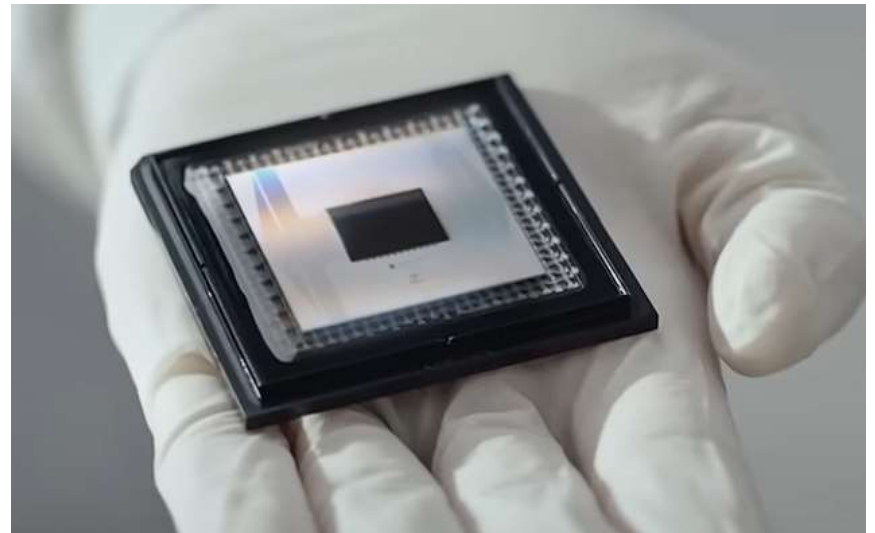
- 최초로 물리적으로 구현된 임계 오류율이 낮아지는 초전도 양자 칩 ‘윌로우’ 공개(2024.12)
 - 임계 오류율: 오류 정정을 반복하여 오류율을 줄일 수 있게 되는 시점. 이 지점을 넘으면 논리 큐비트를 구성하는 물리 큐비트 수를 늘림으로써 오류율을 줄일 수 있음
 - 105개의 물리적 큐비트를 가졌으나, 생성된 논리적 큐비트의 수는 1개(7*7 그리드 기준)로, 실용적 연산은 불가능한 수준
- **마일스톤 3 달성 시점 삭제: 2025+로 기재되어 있던 마일스톤 3 달성 시점이 삭제됨**
 - 마일스톤 3: 장기 생존이 가능한 논리적 큐비트 달성 및 1,000 큐비트로의 스케일링
- **관전 Point**
 - 로드맵의 마일스톤 달성 시점 구체화
 - 물리적 큐비트 오류율의 꾸준한 감소 가능성

구글의 양자컴퓨팅 로드맵

단계	개발 목표
마일스톤 3	- 물리적 큐비트 1,000개 - 장기 생존이 가능한 논리적 큐비트 · 논리적 큐비트 오류율이 1백만 분의 1 이하
마일스톤 4	- 물리적 큐비트 10,000개 - 논리 게이트 생성
마일스톤 5	- 물리적 큐비트 100,000개 - 스케일링 · 100개의 논리 큐비트를 하나의 타일로 묶어 높은 충실도로 게이트 연산 달성 · 3개 이상의 오류 정정 양자 컴퓨팅 활용 사례 확보
마일스톤 6	- 1백만 개 이상의 물리적 큐비트 제어 논리적 큐비트 오류율 10조 분의 1 이하 - 10개 이상의 오류 정정 양자 컴퓨팅 활용 사례 확보

자료: Google, 미래에셋증권 리서치센터

최초로 임계 오류율을 돌파한 ‘윌로우’



자료: Google, 미래에셋증권 리서치센터

부록. GTC 2025 Preview

젠슨 황 CEO와 대담 예정인 기업들

기업명 (티커)	큐비트 종류	양자컴퓨터 시스템	비고
D-Wave (QBTS US)	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 양자 어닐링 방식: 특정 문제만 해결 가능 	<ul style="list-style-type: none"> Advantage: 5,000+ 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> 앨런 바라츠 CEO, 유용한 양자컴퓨터 도달에 15~30년 걸릴 것이라는 젠슨 황 CEO의 발언에 대해 '어닐링 방식에는 해당되지 않는다'며 반박
QuEra Computing	<ul style="list-style-type: none"> 중성 원자(Rb, 루비듐) 큐비트 광 집게(optical tweezer)를 이용한 큐비트의 동적 재배열 	<ul style="list-style-type: none"> Aquila: 10 논리 큐비트(256 물리 큐비트) 2-큐비트 게이트 충실도: 99.5% 	<ul style="list-style-type: none"> 엔비디아의 CUDA-Q 플랫폼에 통합
Atom Computing	<ul style="list-style-type: none"> 중성 원자(Yb, 이터븀) 큐비트 광 집게(optical tweezer)를 이용한 큐비트의 동적 재배열 	<ul style="list-style-type: none"> Phoenix(프로토타입): 100 물리 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> 마이크로소프트의 큐비트 가상화 기술을 통해 오류 정정 효율화
SEEQC	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 	-	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 회로 파운드리 운영 엔비디아와의 협업: 디지털 방식으로 매우 낮은 레이턴시를 갖는 칩간 연결 연구
Pasqal	<ul style="list-style-type: none"> 중성 원자(Rb, 루비듐) 큐비트 광 집게(optical tweezer)를 이용한 큐비트의 동적 재배열 	<ul style="list-style-type: none"> Orion Alpha: 100+ 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> Orion Alpha는 Azure에서 사용 가능 IBM의 Qiskit 생태계에 통합 예정
Infleqtion	<ul style="list-style-type: none"> 중성 원자(Cs, 세슘) 큐비트 	-	<ul style="list-style-type: none"> Sqale: 최대 1,600 큐비트 (정식 출시 x) 엔비디아의 CUDA-Q를 사용해 Sqale 칩의 코드 실행을 에뮬레이션
PsiQuantum	<ul style="list-style-type: none"> 광자 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> 처음부터 백만 큐비트급 양자컴퓨터 생산이 목표 	<ul style="list-style-type: none"> 글로벌파운드리의 Fab 8에서 양자 칩 제조 브리즈번, 시카고에 대규모 양자 컴퓨팅 시설 구축 예정(2025년 착공, '27년 완공 목표)
Quantinuum	<ul style="list-style-type: none"> 이온 트랩(Yb+, 이터븀 이온) 큐비트 QCCD 아키텍처: 이온을 직접 이동시켜 멀리 떨어진 큐비트 간의 연산을 수행 	<ul style="list-style-type: none"> H2: 56 물리적 큐비트(논리 큐비트 12개 이상) 	<ul style="list-style-type: none"> 2022년 엔비디아의 QODA(양자 최적화 아키텍처) 도입
Quantum Circuits	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> Aqumen Seeker: 8 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> IBM의 Qiskit으로 구동 가능
Rigetti (RGTI US)	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> Novera: 9 큐비트 	<ul style="list-style-type: none"> 엔비디아의 CUDA-Q 플랫폼 도입
Alice & Bob	<ul style="list-style-type: none"> 켓 큐비트: 초전도 회로내에서 광자들의 집합적 위상 상태를 큐비트로 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 시스템 x Boson 4: 광자 5개로 켓 큐비트 1개 구현 	<ul style="list-style-type: none"> 엔비디아의 DGX Quantum 도입

주: 물리적/논리적 큐비트를 명시하지 않은 시스템은 1) 각 사에서 명확하게 언급하지 않았거나, 2) 큐비트 pool에 있는 큐비트 수만 언급한 경우(주로 '100+'와 같이 표기됨)

자료: 각 사, 미래에셋증권 리서치센터

Compliance

Compliance Notice

- 당사는 자료 작성일 현재 조사분석 대상법인과 관련하여 특별한 이해관계가 없음을 확인합니다.
- 당사는 본 자료를 제3자에게 사전 제공한 사실이 없습니다.
- 본 자료를 작성한 애널리스트 김은지은(는) 자료작성일 현재 알파벳 15주 보유하고 있습니다.
- 본 자료는 외부의 부당한 압력이나 간섭없이 애널리스트의 의견이 정확하게 반영되었음을 확인합니다.

본 조사분석자료는 당사의 리서치센터가 신뢰할 수 있는 자료 및 정보로부터 얻은 것이나, 당사가 그 정확성이나 완전성을 보장할 수 없으므로 투자자 자신의 판단과 책임하에 종목 선택이나 투자시기에 대한 최종 결정을 하시기 바랍니다. 따라서 본 조사분석자료는 어떠한 경우에도 고객의 증권투자 결과에 대한 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다. 본 조사분석자료의 지적재산권은 당사에 있으므로 당사의 허락 없이 무단 복제 및 배포할 수 없습니다.