

## 3차원 자기교정 양자메모리 기술 진전 주장

(2026.06.09., 양자정보연구지원센터)

- 3차원 자기교정 양자메모리(Self-correcting Quantum Memory) 구현 가능성 제시, 양자컴퓨터 오류정정 오버헤드 감소 기대
  - 3차원 자기교정 양자메모리 이론 제안
    - 미국 Caltech, UC San Diego, 대만 홍하이 연구소(Hon Hai Research Institute) 연구진은 유한 온도 환경에서도 능동적 오류정정 없이 양자정보를 지수적으로 오랜 시간 저장할 수 있는 3차원 양자 시스템을 제안함
    - 현재 양자컴퓨터는 열, 방사선, 환경 잡음 등에 매우 민감하여 지속적인 오류정정이 필수적이며, 이를 위해 다수의 추가 큐비트와 복잡한 제어 시스템이 필요함
    - 연구진은 외부 개입 없이 시스템 자체의 물리적 특성으로 열 잡음을 억제하는 ‘수동형(passive) 양자메모리’를 제안하였으며, 이는 양자컴퓨팅 분야의 오랜 난제 해결 가능성을 제시함.
  - 기존 연구의 한계와 연구 의의
    - 자기교정 양자메모리는 20년 이상 연구되어 왔으나, 기존 이론은 이러한 특성이 4차원 이상의 공간에서만 가능하다고 예측해 왔음
    - 대표적으로 4차원 Toric Code는 자기교정 특성을 보였으나 현실 세계에서는 구현이 불가능하며, 2011년 제안된 Haah Cubic Code 역시 유한 온도에서 충분한 메모리 수명 증가를 달성하지 못한 것으로 평가됨
    - 기존 3차원 코드들은 오류 발생 장벽(Energy Barrier)을 높이는 데 성공했지만, 실제 열 환경에서 장기 안정성을 확보하지 못함
    - 본 연구는 공간 전체에 동일하게 반복되는 대칭적 구조를 포기하고, 비균일한 구조 설계를 도입함으로써 기존 한계를 극복할 수 있다고 주장함

- **지수적 메모리 수명(Exponential Memory Lifetime) 달성 주장**
  - 연구진은 시스템 크기가 증가할수록 논리 큐비트(Logical Qubit)의 저장 시간이 지수적으로 증가한다고 주장함
  - 이는 단순히 시스템 규모가 커질수록 약간 개선되는 수준이 아니라, 대규모 시스템에서 안정성이 획기적으로 향상될 수 있음을 의미함
  - 특정 임계 온도 이하에서는 메모리 수명이 시스템 크기에 대해 지수적으로 증가하며, 이는 기존 3차원 코드의 로그 또는 다항식 수준의 보호 성능을 크게 능가함
  - 장기 양자정보 저장을 위해서는 이러한 지수적 증가 특성이 매우 중요함
- **기술적 구현 원리**
  - 연구진은 CSS 안정자 코드(CSS Stabilizer Code)를 기반으로 새로운 오류정정 구조를 설계함
  - X형 및 Z형 Pauli 오류에 대한 에너지 비용을 단계적으로 증가시키는 변환을 반복 적용하여 오류 확산을 억제함
  - 오류가 커질수록 오류 신호(Error Syndrome)의 크기도 함께 증가하도록 설계하여, 대규모 오류 발생을 에너지적으로 매우 불리하게 만들
  - 코드 구조를 반복적으로 재구성하고 두껍게 만드는 방식으로 열적 요동이 여러 규모로 확산되는 것을 방지함
  - 또한 모든 상호작용은 3차원 공간 내 인접 요소 간에만 발생하는 국소성(Locality)을 유지하여 실제 하드웨어 구현 가능성을 높임
- **무작위성(Randomness)을 활용한 새로운 접근**
  - 연구진은 ‘Random Embedding’ 기법을 도입하여 시스템 기하 구조에 의도적으로 무작위성을 부여함
  - 이는 기존의 규칙적이고 대칭적인 코드 구조에서 발생하는 오류 전파 경로를 제거하는 역할을 수행함

- 결과적으로 저에너지 오류가 시스템 전체로 확산되는 현상을 효과적으로 억제할 수 있음.
- 추가적으로 무작위성을 제거한 결정론적(Deterministic) 구조도 제안하였으며, 향후 더 높은 열 안정성을 제공할 가능성이 있음
- 오류 복구 및 해석 알고리즘
  - 다양한 규모에서 발생하는 오류를 분석하는 Renormalization Group(RG) 기반 디코더를 개발함
  - 작은 규모 오류부터 순차적으로 수정한 후 큰 규모 오류를 처리하는 다중 스케일(Multi-scale) 방식으로 동작함
  - 통계물리학의 Peierls Argument를 활용하여 유한 온도 환경에서 복구 불가능한 오류 발생 확률을 분석함
  - 이를 통해 제안한 구조가 열 환경에서도 높은 안정성을 유지할 수 있음을 이론적으로 제시함
- 양자컴퓨팅에 대한 기대 효과
  - 실험적으로 구현될 경우 현재 양자컴퓨터가 요구하는 대규모 능동형 오류정정 부담을 크게 감소시킬 수 있음
  - 현재의 Fault-Tolerant Quantum Computing은 소수의 논리 큐비트를 보호하기 위해 수천~수백만 개의 물리 큐비트를 요구하는 경우가 많음
  - 자기교정 양자메모리는 이러한 오버헤드와 에너지 소비를 줄여 보다 실용적인 양자컴퓨터 개발에 기여할 수 있음
  - 연구진은 이를 ‘에너지 효율적인 양자 하드디스크(Energy-Efficient Quantum Hard Drive)’ 로 표현함
  - 또한 nonzero 온도에서의 위상질서(Topological Order) 및 새로운 양자상(Quantum Phase) 연구에도 중요한 영향을 줄 수 있음
- 한계점 및 향후 과제
  - 본 연구는 현재 arXiv에 공개된 이론 연구로, 아직 동료평가(Peer Review)를 거치지 않았음

- 100페이지가 넘는 고난도 수학적 분석에 기반하며, 대수위상수학 (Algebraic Topology), 층 이론(Sheaf Theory), 양자 오류정정 이론 등을 활용함
- 임의의 국소 교란(Local Perturbation)에 대한 안정성 증명이 완전히 이루어지지 않았으며 일부 가정이 포함되어 있음
- 실제 물리 시스템에서의 제조 방법 및 구현 기술은 제시되지 않았음
- 초기 상태 준비(Initialization)와 열평형(Thermalization) 과정에서 발생할 수 있는 병목현상도 해결해야 할 과제로 남아 있음
- 본 연구는 양자메모리 문제를 다루고 있으나, 완전한 수동형 내결함성 양자컴퓨터 구현을 위해서는 비-Clifford 게이트를 포함한 범용 양자연산 구현 문제가 추가적으로 해결되어야 함

#### ○ 결론

- 본 연구는 오랫동안 불가능한 것으로 여겨졌던 3차원 자기교정 양자메모리의 가능성을 제시한 중요한 이론적 성과임.
- 특히 기존의 공간 대칭성 가정을 포기하고 무작위성을 적극 활용함으로써 새로운 설계 패러다임을 제안함.
- 다만 아직 이론 단계에 머물러 있으며 실험 검증, 제조 기술, 동료평가 등의 후속 검증이 필요함.
- 향후 연구 결과가 확인될 경우, 양자 오류정정 비용을 획기적으로 줄이는 차세대 양자메모리 기술로 발전할 가능성이 있음

#### (원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/05/13/researchers-claim-advance-in-3d-self-correcting-quantum-memory-could-reduce-quantum-computing-error-correction-overhead/>