

# 새로운 초전도 회로 설계, 위상학적 양자컴퓨팅 발전 가능성 제시

(2026.08.25., 양자정보연구지원센터)

## □ 새로운 초전도 회로, 위상학적 양자컴퓨팅 기반 기술 가능성 제시

### ○ 새로운 초전도 회로를 이용한 비가환 게이지 대칭 구현

- 시카고대학교를 중심으로 한 연구진이 조셉슨 접합(Josephson junction) 기반의 새로운 초전도 회로를 제작하여, 위상학적 양자컴퓨팅에 필요한 것으로 이론적으로 예측되어 온  $Z_3$  조합적 게이지 대칭(combinatorial gauge symmetry)을 실험적으로 구현
- 연구진은  $3 \times 3$  형태의 크로스바(crossbar) 배열로 9개의 조셉슨 접합을 연결한 새로운 회로 구조를 설계, 이를 ‘waffle grid’ 라고 명명
- 기존 IBM · Google 등의 초전도 양자컴퓨터가 주로 평면(planar) 구조에서 인접한 소자들을 연결하는 것과 달리, 새로운 구조는 비평면적 연결을 통해 기존 회로에서는 구현하기 어려운 상호작용을 가능하게 함

### ○ $Z_3$ 게이지 대칭의 실험적 검증

- 특정 자기장을 가했을 때 회로가 이론적으로 예측된  $Z_3$  게이지 대칭을 나타내는 것을 확인
- 실험에서 회로가 하나의 저에너지 상태가 아닌 서로 동등한 6개의 저에너지 상태로 안정화되는 현상을 관측하고, 상태 사이의 에너지 변화 역시 이론적 예측과 일치함을 확인
- 알루미늄 조셉슨 접합을 실리콘 기판에 제작하고 마이크로파 공진기 내부에 배치한 뒤, 자기장 변화에 따른 마이크로파 흡수 및 양자 에너지 스펙트럼을 측정
- 실험 결과를 신경망 기반 변분 몬테카를로(neural-network variational Monte Carlo) 시뮬레이션과 비교한 결과, 측정된 스펙트럼이 이론적 계산과 높은 수준으로 일치

## ○ 위상학적 양자컴퓨팅을 위한 기반 기술 제시

- 이번 연구에서 구현된 ‘waffle’ 회로 자체가 위상학적 큐비트(topological qubit)는 아니며, 실제 위상학적 양자컴퓨터를 구현한 것도 아님
- 연구진은 여러 개의 waffle 회로를 벌집(honeycomb) 형태의 격자로 연결할 경우, 고도로 얽힌 양자 스핀 액체 및 위상학적으로 정렬된 상태를 구현할 가능성이 있다고 제시
- 이러한 집단적 위상 상태에 양자정보를 저장할 경우, 물리적 특성 자체를 통해 특정 잡음에 강한 보호된 양자 상태를 구현할 가능성이 있음
- 따라서 이번 연구는 완성된 양자컴퓨터보다는 향후 위상학적 양자컴퓨팅으로 발전할 수 있는 핵심 하드웨어 구성요소를 실험적으로 검증한 단계에 해당

## ○ 향후 연구 및 응용 가능성

- 현재 실험은 단일 waffle 회로의 반고전적(semi-classical) 영역에서 수행되었으며, 실제 위상학적 양자컴퓨터를 위해서는 여러 회로를 연결한 대규모 격자 구조와 강한 양자 터널링 효과를 구현해야 함
- 향후 waffle 회로를 벌집 격자로 확장하여  $Z_2$  양자 이중체( $Z_2$  quantum double)와 위상학적으로 정렬된 바닥상태를 구현하는 것이 주요 과제
- 비평면적 회로 구조는 양자컴퓨팅뿐 아니라 격자 게이지 이론, 좌절된 자성체, 이색적인 위상학적 물질 상태 등의 양자 시뮬레이션에도 활용될 가능성이 있음
- 특히 원하는 물리적 특성을 하드웨어 자체에 구현함으로써 향후 양자 오류정정 부담을 줄이고 본질적으로 더 안정적인 양자정보 처리를 가능하게 할 수 있다는 점에서 의미가 있음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/07/21/researchers-demonstrate-new-superconducting-circuit-design-that-could-advance-topological-quantum-computing/>