

# AlphaTensor-Quantum으로 AI 강화된 양자 최적화

(2025.04.01., 양자정보연구지원센터)

## □ AI 기반 양자 최적화: AlphaTensor-Quantum

### ○ 개요

- 인공지능(AI)과 양자 컴퓨팅은 경쟁 관계로 인식되지만, 협력할 때 큰 잠재력을 발휘할 수 있음
- 연구진은 AI를 활용해 양자 연산 비용을 줄이는 방법을 개발하여 실용적인 양자 컴퓨터 개발을 가속화할 수 있다고 보고함
- AlphaTensor-Quantum이라는 강화학습 기반 최적화 시스템을 소개함(Nature Machine Intelligence 게재)

### ○ AlphaTensor-Quantum의 역할

- 양자 컴퓨터는 정보를 처리할 때 Clifford 게이트를 사용함
- Clifford 게이트(Hadamard, CNOT 등)는 고전 컴퓨터로 효율적으로 시뮬레이션할 수 있으며, 양자 오류 수정에 주로 활용됨
- 비-Clifford 게이트(T 게이트)는 양자 우위를 확보하는 데 필수적이지만, 높은 연산 비용과 추가적인 오류 수정 자원을 요구함
- T 게이트는 결합 허용(fault-tolerant) 양자 컴퓨팅의 주요 병목 현상을 초래하므로, 이를 최적화하는 것이 대규모 양자 컴퓨팅 구현의 핵심 과제가 됨

### ○ AlphaTensor-Quantum의 작동 원리

- AlphaTensor-Quantum은 기존 AlphaTensor 시스템을 확장하여 양자 회로 최적화에 적용한 것임
- (핵심 기법) : 텐서 분해(tensor decomposition)
- 복잡한 양자 연산을 보다 효율적인 연산 순서로 변환함

- 비-Clifford 연산을 “시그니처 텐서 “로 표현한 후, 강화학습을 이용하여 보다 낮은 랭크(rank)로 분해함
- 최적화된 텐서를 다시 양자 회로로 변환, T 게이트 사용을 줄임
- (보조 구조물(gadgets) 활용) : 여러 연산 요소를 그룹화하여 추가적인 T 게이트 절감 효과를 냄
- (기존 방식과 차별점) 양자 컴퓨팅에 특화된 도메인 지식을 통합하여 최적화 성능을 대폭 향상시킴

○ 연구 결과: 수백 시간의 연구 시간을 절약 가능

- AlphaTensor-Quantum은 기존 T-count 최적화 기법들을 능가함
- (적용 사례) 양자 암호, Shor 알고리즘(소인수분해), 양자 화학 시뮬레이션(예: 철-몰리브덴 보조인자 시뮬레이션) 등 성능 입증
- 유한체 곱셈(finite field multiplication)에 대해 Karatsuba 알고리즘과 유사한 방식을 독립적으로 발견하여 암호학적 연산 최적화에도 기여함
- 일부 회로에서는 기존 기법 대비 T 게이트 수를 50% 이상 감소
- 특정 작업에서 수백 시간의 연구 시간을 절약할 수 있음

○ 응용 및 시사점

- (양자 암호학) 유한체 곱셈 최적화는 양자 암호 공격에 대한 영향을 미칠 수 있음
- (양자 화학 및 재료 과학) 대규모 분자 구조 시뮬레이션이 보다 현실적으로 가능해져 신약 개발 및 신소재 연구 촉진할 수 있음
- (양자 컴퓨팅의 실용화 촉진) T 게이트 사용을 줄이면 양자 알고리즘 실행의 자원 부담이 줄어들고, 실용적인 양자 컴퓨팅 구현이 앞당겨질 가능성이 높음

○ 한계점 및 향후 발전 방향

- 강화학습 모델의 학습 과정이 계산적으로 매우 비용이 많이 듦

- 단일 회로 최적화에도 많은 연산 시간이 필요함
- 텐서 분해 방식이 모든 양자 알고리즘에 최적의 해결책은 아닐 수 있음
- 현재는 T-count 최적화에 집중했으나, T-depth(T 게이트의 순차적 배치 최적화) 문제는 해결하지 못함
- (개선 가능성) T-depth, Clifford 게이트 비용 등 추가적인 최적화 지표를 고려한 업그레이드 가능
- 최신 양자 하드웨어의 제약 조건을 반영하여 최적화 방식 개선
- 강화학습을 이용한 새로운 양자 알고리즘 자동 발견 가능성 탐색
- 실제로 AlphaTensor-Quantum이 Karatsuba 곱셈 기법을 재발견한 것처럼, 쉘은 알고리즘을 창출할 가능성이 있음

#### ○ 결론

- AlphaTensor-Quantum은 AI 기반 양자 회로 최적화의 새로운 가능성을 제시하며, 실용적인 양자 컴퓨팅 실현에 기여할 것으로 기대됨
- 양자 컴퓨팅이 발전함에 따라 AlphaTensor-Quantum이 자동 회로 최적화의 핵심 도구가 될 것 이라고 전망함
- 본 연구는 2023년 Google DeepMind, Quantinuum, 암스테르담 대학교 연구팀이 참여함

#### (원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/03/21/quantum-optimization-gets-an-ai-boost-with-alphatensor-quantum/>