

# 양자 이득을 향한 신중한 경로 제시

(2025.08.07. 양자정보연구지원센터)

## □ 양자 이득을 위한 현실적이고 검증 가능한 로드맵 제안

### ○ 연구 개요 및 의의

- IBM과 Pasqal 연구진이 양자 이득(quantum advantage)를 명확히 정의하고 이를 검증할 수 있는 기준과 절차를 제시하는 새로운 프레임워크를 arXiv에 발표함
- 양자 이득이란 양자 컴퓨터가 고전적 컴퓨터보다 효율성, 비용, 정확도 면에서 실질적 이점을 갖는 시점을 의미하며, 이번 연구는 이 개념을 엄밀히 정립함
- 연구진은 과도한 기대와 회의론 사이에서 균형을 유지하며, 현실적인 문제 영역과 알고리즘 유형을 중심으로 초기 성과를 도출할 수 있는 전략을 제시함

### ○ 신뢰성 확보를 위한 세 가지 검증 전략

- 1단계: 오류 보정 회로를 통해 수학적으로 정확성이 보장된 결과 도출(현재 기술로는 구현 어려움)
- 2단계: 고전적 검증이 가능한 문제 유형 (예: 정수 인수분해, 특정 샘플링 문제 등)
- 3단계: 변분 문제에서 예상값을 산출해 기존 고전값과 비교함으로써 상대적 우위를 확인(예: 분자의 바닥상태 에너지 계산)
- 이 세 가지 방법은 양자 알고리즘의 특성과 하드웨어 수준에 따라 유연하게 적용 가능함

### ○ 유망한 문제 영역과 알고리즘, 양자 이득을 실현할 가능성 높은 세 가지 문제 유형

- (샘플링 문제) 특정 양자 회로에서 확률적으로 높은 출현 빈도를

갖는 출력(비트스트링)을 생성

- (변분 알고리즘) VQE, SQD 등 에너지 준위 추정에 유용하며, 양자 잡음에 강건한 구조로 고전적 검증 용이
- (기댓값 계산) 물리·화학·머신러닝 응용에 중심적인 역할을 하며, 반복 측정을 통한 평균값 산출

○ 장단점 분석

- 샘플링 문제는 검증이 어려우나 큰 성과 가능성 존재
- 변분/기댓값 기반 문제는 비교적 검증이 쉬우나 효과는 제한적일 수 있음
- 실용화를 위해 다양한 문제 특성과 알고리즘 리스크를 균형 있게 고려해야 함

○ 오류 처리 및 하드웨어 제한, 오류가 가장 큰 병목 요인

- (오류 보정) 가장 강력하나 많은 큐비트와 긴 회로 유지가 필요하여 단기적으로는 실현 어려움
- (오류 완화) 통계적 방법으로 편향 제거 (예: zero-noise extrapolation), 샘플링 비용은 높음
- (오류 감지) 오류 발생 시 해당 결과를 제거하는 방식으로, 현재 하드웨어에 실용적이며 실시간 검증 가능
- 연구진은 양자 회로와 고전적 후처리를 결합한 하이브리드 전략이 중단기적으로 유효하다고 판단함

○ 유망 하드웨어 플랫폼

- (초전도 회로) IBM의 Heron 프로세서(156큐비트)는 초당 25만 회 회로 수행 가능, 실시간 피드백 루프 및 동적 회로 기능 탑재
- (중성 원자 기반 시스템) Pasqal의 광핀셋(Rydberg 상태 활용) 기술은 아날로그·디지털 모드 모두 지원 가능하며 물리 시스템 시뮬레이션에 강점

- 양자 모두 HPC 환경(프랑스 GENCI, 독일 Jülich 등)과 연계하여 양자 프로세서를 GPU처럼 통합 운영
- 향후 전망과 제언, 명확하고 검증 가능한 기준 확립 필요
  - 양자 이득 주장은 “반증 가능성(falsifiability)” 을 갖춰야 하며, 명확한 기준 및 벤치마크를 기반으로 검토되어야 함
  - 고전적 기법이 추후 더 나은 결과를 내더라도 실패가 아닌, 전체 분야가 진화하고 있다는 신호로 봐야 함
  - 양자 알고리즘이 고전 알고리즘을 특정 문제에서 단 한 번이라도 능가하면 큰 진전으로 평가될 수 있음
- 점진적 진보와 공동 협력
  - 단기적으로는 점진적 성과(예: 특정 문제에서 소규모 성능 우위, 오류 완화로 인한 정밀도 향상 등)를 중심으로 발전 예상
  - 연구진은 향후 2년 내에 본 연구에서 제시한 영역 중 하나에서 양자 이득의 신뢰할 수 있는 증거가 등장할 것으로 전망하며, 이를 위해 양자·고성능 컴퓨팅(HPC) 커뮤니티 간의 긴밀한 협력이 중요함을 강조함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/07/23/taking-advantage-researchers-offer-a-measured-path-toward-quantum-advantage/>