

수자원-기후 문제 해결을 위한 양자 컴퓨팅의 도전

Water
for future
학술/기술 기사
02



손상영

고려대학교 교수
sson@korea.ac.kr

1. 머리말

2023년 여름, 혹서라는 표현으로는 담을 수 없을 정도의 무더위 속에 세계 학계에 큰 이슈가 등장했다. 상온 초전도체가 국내 한 연구진에 의해서 개발되었다는 소식이 전 세계를 지배한 것이다. 관련 연구자들은 이를 두고 기대에 찬 환호성과 함께 의심의 눈초리를 보냈고, 각자의 검증결과를 마치 경쟁이라도 하듯이 쏟아냈다. 개발의 진위를 떠나 공상 과학에서나 존재할 법한 첨단기술이 현실로 성큼 다가왔음은 부인할 수 없다.

상온 초전도체 개발이라는 거대한 과학적 화두와 맞물려 양자 컴퓨터와 관련된 기술들도 동요되기 시작했는데, 이는 양자 컴퓨터가 이미 현실에 등장해서 상용화에 몰두하고 있기 때문이기도 하다. 이제 과학자들이 고전적인 컴퓨팅 방식으로는 다루기 힘든 복잡한 실제 문제를 양자컴퓨팅을 활용하여 해결할 수 있는 날이 다가오고 있다. 미래 컴퓨팅 분야를 선도할 수 있는 첨단기술인 양자컴퓨팅이 수자원-기후 문제 해결에 어떠한 도움을 줄 수 있을지 고민을 시작할 때이다.

지구상에서 수자원을 포함한 기후시스템이 작동하는 방식은 매우 복잡하다. 이와 관련된 중요한 문제를 해결하려면 마찬가지로 매우 복잡

한 계산과정이 필수적으로 포함된다. 물의 순환과정을 보면 강우-유출-침투-증발산 등의 단계로 설명할 수 있으며 이는 단조롭지 않다. 여기에 식생의 영향과 기후, 인류활동이 더해진다면 그야말로 난제가 된다. 가령 끊임없이 변화하는 구름이 기후에 미치는 미묘한 영향을 시뮬레이션하는 것이 이러한 복잡한 계산의 범주에 해당된다. 이러한 난제스러운 문제는 특히 필요한 계산의 영역(규모)이 커짐에 따라 이진 코드를 기반으로 프로그램 실행하는 기존 컴퓨터로는 해결하기가 점차 더 어려워지고 있다 (물론 병렬처리기법의 도입으로 초고속 계산속도를 활용하여 가시적 성과를 얻고 있음을 주지하고 있지만). 이러한 이유로 계산 비용을 줄이기 위해 근사화(예: 구름 형성과 같은 기후 영향 프로세스 또는 태풍과 같은 기후 영향 현상의 매개변수화)에 의존하는 '모델'을

사용하여 많은 문제를 해결하고 있다. 그러나 이러한 '모델'이 우리가 원하는 수준의 정확성을 보여주지 못하고 있으며, 심지어 이를 문제삼지 않더라도 이미 계산능력은 슈퍼컴퓨터의 한계에 접근하고 있다. 그렇다면 복잡하지만 시급한 과학적 문제에 대한 해결방법을 계속 개발하기 위해 우리는 어디로 향해야 할까? 특히, 최근 수자원-기후 변화와 관련된 연구에서의 사용에 초점을 맞추어 양자 컴퓨팅 기술이 활발히 활용될 수 있는 잠재적인 응용 분야를 최신 기사를 바탕으로 본 기고에서 소개하고자 한다(Giani and Goff-Eldredge, 2022).

2. 양자컴퓨터의 원리

1960년대부터 논리 게이트와 최신 컴퓨터의 구

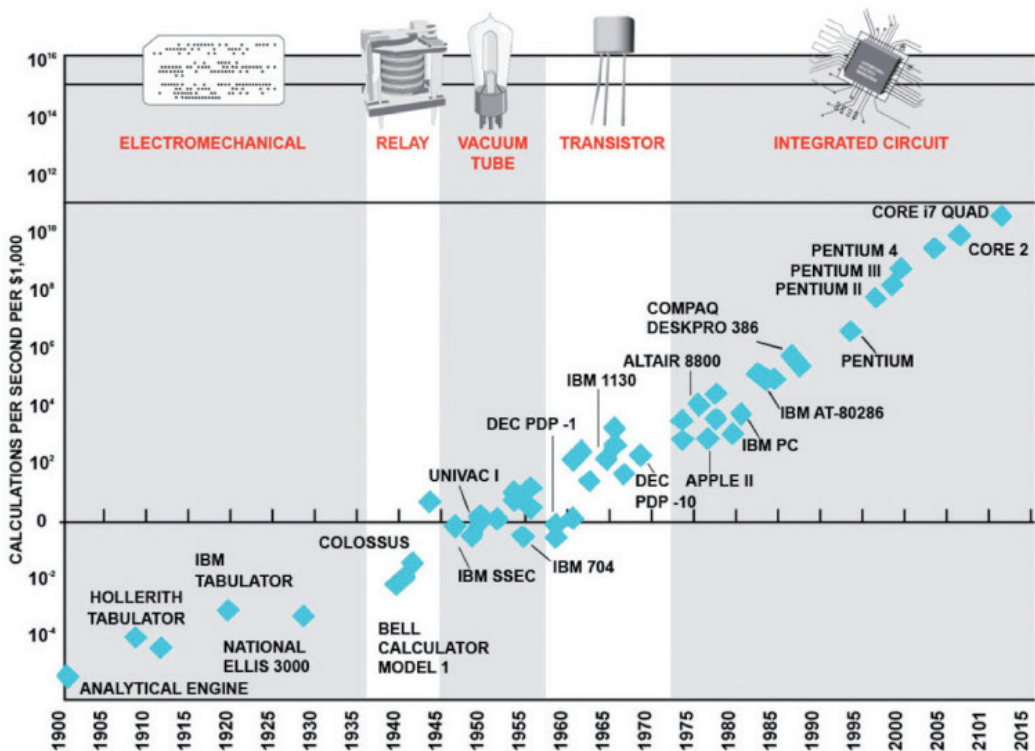


그림 1. 천공 카드에서 집적 회로에 이르기까지 컴퓨터 처리의 발전과정과 계산속도(무어의 법칙)를 보여줌 (그림출처: Steve Jurvetson)

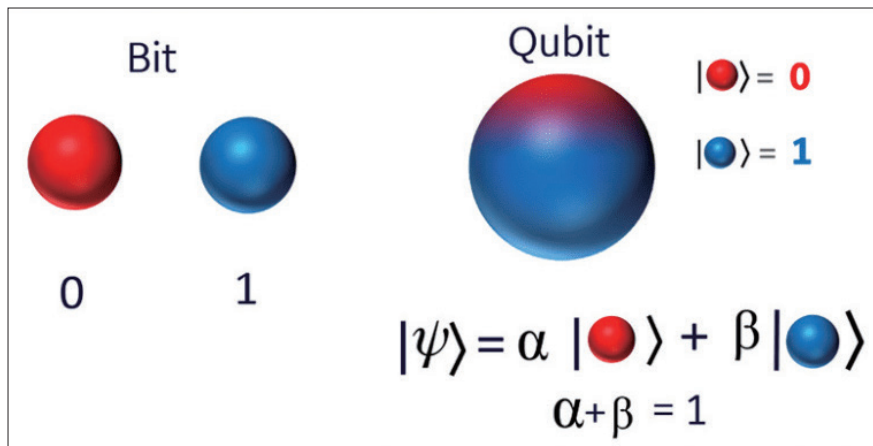


그림 2. 왼편은 이진 비트를 사용하여 정보를 전달하는 고전적 컴퓨터 처리 방식(비트는 꺼짐(0) 또는 켜짐(1)의 두 가지 상태 중 하나)을 보여주며, 오른편은 큐비트를 활용하여 0과 1 사이의 상태 중첩을 통해 적어도 관찰되거나 측정 될 때까지 훨씬 더 많은 계산 능력을 제공할 수 있음을 나타내고 있음. (그림출처: Annarita Gianì)

성 요소인 반도체 트랜지스터는 점점 더 작아지고 빨라져 컴퓨터 성능이 획기적으로 향상되었다. 1965년 Gordon Moore는 개발 중인 새로운 트랜지스터의 크기가 너무 빨리 줄어들어 해가 갈수록 두 배나 많은 트랜지스터가 마이크로칩에 들어갈 수 있음을 관찰했으며(Moore, 1965), 이러한 추세가 미래에도 한동안 지속될 것이라고 예측했다(그림 1). 그러나 개발이 거듭됨에 따라, 트랜지스터의 크기가 약 5나노미터 규모로 작아지게 되면서 반도체 작동의 원리와 예측 가능성을 혼드는 양자 효과(예: 터널링)를 피할 수 없게 되었다. 예상치 못한 양자 효과의 등장으로 최신 집적회로 기반의 컴퓨터는 확장의 한계에 도달했다.

양자 컴퓨팅은 초미세규모에서 지배적으로 등장하는 입자의 양자 속성을 활용한 계산방식이다. 고전적인 이진 컴퓨팅에서 비트는 정보의 기본 단위이며 각 비트는 0 또는 1의 두 상태 중 하나로 코딩될 수 있다. 반면에 양자 컴퓨터의 기본 정보 단위인 양자비트(또는 큐비트)는 '0과 1을 동시에 지닌 상태로 '중첩'이라는 속성을 지니고 있으며(그림

2), 일단 측정되면 큐비트는 0 또는 1의 상태로 붕괴된다. 유명한 슈뢰딩거의 고양이 가 한 번 관찰되면 두 가능성의 중첩으로 존재하는 것이 아니라 살아 있거나 죽은 것으로 발견되는 것과 매우 유사하다고 할 수 있다. 이러한 중첩의 특성으로 말미암아 양자 컴퓨팅의 획기적인 계산효율이 설명될 수 있는데, 이후의 측정과정에 관계없이 계산에 필요한 더 많은 상태(혹은 조건)을 중첩의 형태로 저장하거나 처리할 수 있다는 것이다.

기존 이진 기반의 컴퓨터는 2개의 비트에 $2^2 = 4$ 개의 다른 구성(예: 00, 11, 01 또는 10)을 나타낼 수 있지만 한 번에 하나의 구성만을 계산에 사용하게 된다. 반면에 2개의 큐비트는 이 네 가지 구성의 조합을 중첩의 성질을 활용하여 동시에 발생시킬 수 있으며, 이를 동시에 사용하여 훨씬 더 빠른 병렬 계산을 가능하게 한다. 큐비트의 이러한 특징은 사용 가능한 상태 수(즉, 큐비트)가 증가함에 따라 성능을 기하급수적으로 증가시킬 수 있는데, 가령 n큐비트의 경우 2^n 상태를 계산에 활용할 수 있다는 것이다. 예를 들어 30큐비트로는 10억

개 이상의 상태를 한 번에 다룰 수 있다.

3. 양자컴퓨터를 구현하기 위한 장치기술

정보에 대한 추상적인 수학 모델인 큐비트를 생성하기 위해 핵심적 특징인 중첩 등이 하드웨어에서 물리적으로 구현되고 제어되어야 한다. 큐비트를 갖춘 양자 컴퓨팅을 완성하기 위해 다양한 하드웨어 접근방식이 등장하고 있는데, 가령 IBM, Google 및 D-Wave를 비롯한 회사는 초전도체를 사용하여 큐비트를 생성하고, 초단파를 활용해 보유한 정보를 조작한다. 반면에 IonQ 및 Honeywell 등의 회사는 진공에 부유하는 이온을 포획하고 레

이저로 조작하여 사용하는 접근 방식을 개발하고 있다. 인텔은 실리콘 양자점으로 큐비트를 구축하고 있는데 양자 상태가 실리콘의 전자스핀에 의존하기 때문에 초단파를 사용하여 조작이 가능하다. 그 밖에 다른 곳에서는 광선과 광학 회로를 사용하여 광자 양자 컴퓨터를 개발하는 방법을 연구하기도 한다(Andersen, 2021).

현재 이러한 다양한 양자컴퓨터 구현기술은 일관성 시간(큐비트에 정보를 보관할 수 있는 시간), 오류율, 조작의 어려움 및 비용 측면에서 각기 다른 장단점을 지니고 있다. 하지만 공통적으로 양자 상태의 취약성과 제조에 필요한 극도의 정밀도 달성에 어려움을 토로하는데, 예를 들면 하드웨어 또는 소프트웨어 구성 요소 중 일부에 양자 정보의 붕괴를 방지하기 위해 큐비트를 절대 0도에 가까운 온도로 유지해야 하는 것이 그것이다. 이 때문에 결함이나 오류를 최소화하면서 정확한 결과를 생성할 수 있는 대규모 양자 컴퓨터를 구축하기 위한 노력이 계속되고 있다.

서로 다른 양자 컴퓨터의 성능을 상호 확인하고 벤치마킹하는 것은 여러 가지 이유에서 어렵다. 예를 들어, 개발 중인 다양한 양자 하드웨어와 이러한 기술의 발전 속도가 제각기 다르기 때문에 특정 시점에서의 평가를 통해 이러한 기술의 성능을 예측하기는 쉽지 않다. 또한 각 하드웨어 구성 시 강점은 적용방법에 따라 다르게 나타나고, 고전적인 비트 기반의 알고리즘도 발전을 계속하고 있기 때문에 고전 컴퓨팅 접근 방식과의 비교도 명확히 이루어지지 못하고 있다. 더군다나 작업이 정확하게 수행되고 필요한 정보가 장소간에 이동할 수 있도록 통신 및 제어 장치를 마련하는 것도 쉬운 일이 아니다(Franklin and Chong, 2004).



그림 3. 양자 컴퓨터용 사각형 모양의 프로세서로 프로세서가 정상적으로 작동하도록 초저온을 유지하는데 필요한 극저온 냉각 장치를 포함하고 있음 (출처: D-Wave).

4. 올바른 문제 찾기

양자 컴퓨터를 구축하는 것은 그 자체로 어려운 과제지만 구축된 컴퓨터를 적절히 활용하여 장점을 누리려면 구축 이상의 노력을 수반해야 한다. 동시에 양자 컴퓨터가 획기적인 계산효율을 제공하는 나머지 모든 문제에서 고전 컴퓨터보다 월등한 것으로 오해하면 안된다. 양자 컴퓨터는 단순히 다른 처리방식(혹은 계산개념)을 활용할 뿐이며 경우에 따라서 그 차이를 활용하여 실제적으로 불가능한 수준의 작업도 수행할 수 있다. 기존 컴퓨팅과 마찬가지로 양자 컴퓨팅은 특정 목적과 문제를 위한 소프트웨어 및 알고리즘 설계에도 세심한 주의가 필요하다. 결론적으로 양자 컴퓨팅 개발자의 주요 과제는 주어진 문제에 대해 양자 컴퓨터의 강점을 잘 일치시키고 이러한 강점을 활용하여 문제를 해석하기 위한 소프트웨어 및 알고리즘을 개발하는 것이다(표 1).

특히 양자컴퓨팅에 적합한 문제는 양자 컴퓨터의 능력을 적극적으로 활용하여 가능한 솔루션들을 폭넓게 탐색할 것이다. 따라서 모델 최적화 문제는 양자 컴퓨팅이 적용되기에 가장 적합한 부분 중 하나이다. 다양한 솔루션들이 존재하는 공간에서 상호 작용하는 여러 변수에 가장 적합한 값을 찾는 것과 관련된 최적화 문제는 지역화된 솔루션 또는 최적값에 고착될 우려도 있지만 알고리즘이 검색을 지속했다면 더 나은 솔루션을 찾을 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 예를 들어 관찰된 데이터에 더 적합하거나 더 그럴듯한 가상 시나리오를 기반으로 탐색하는 경우가 그렇다.

한편 양자컴퓨팅은 기계학습에서 모형을 학습 시키기 위한 수단으로도 큰 관심을 불러일으켰다. 또한 양자 컴퓨터는 과학 및 공학 분야에서 흔히 볼 수 있는 응력 분석 및 유체 흐름과 같은 특정 선형 대수 문제를 해결하는 데에도 자연스럽게 적용될 수 있다. 일반적으로 계산의 규모가 커짐에 따

표 1. 양자 컴퓨팅이 수자원-기후 변화 및 다양한 관련 과제를 해결하는데 어떻게 도움이 되는지에 대한 예

분야	도전문제	양자 컴퓨팅의 잠재적 이점
수자원-기후 모델링	시뮬레이션 및 예측 모델의 복잡성과 해상도가 증가함에 따른 컴퓨팅 요구 사항을 적극적으로 충족	확장된 유체 역학 기반 시뮬레이션 수행능력은 모델 개선을 촉진하여 가능한 미래 조건을 더 명확하게 이해하고 더 나은 완화 및 적응 계획을 도출할 수 있도록 도울 수 있음
그리드 안전 및 탄력성	미래의 발전 설비가 견고하고 신뢰할 수 있도록 보장	향상된 기상 및 기후 모델을 통해 인프라를 더 안전하게 배치할 수 있으며 양자 최적화를 적용하여 풍력 발전소와 같은 새로운 자원의 설계를 개선할 수 있음
그리드 관리	발전기(예: 풍력 및 태양열)의 수와 분포가 증가함에 따라 공급과 수요를 일치시키기 위해 리소스 일정 및 배치 조정	양자 최적화는 경제적인 관리 솔루션을 만드는데 도움이 될 수 있으며 작동 조건을 개선하여 소비자 가격을 낮추는데 기여.
양자화학	기술 혁신을 촉진하기 위해 다양한 재료의 분자 규모 특성 및 공정 평가	양자 컴퓨팅은 새로운 에너지 생산(예: 광전지) 및 저장(예: 배터리) 기술의 발견 및 개발을 가속화할 수 있을 뿐만 아니라 기후 변화 완화(예: 탄소 포집)를 위한 개선된 전략개발을 가속화할 수 있음.

라 양자 컴퓨팅의 장점이 나타나는 경우가 많은데, 현재 컴퓨터가 규모가 큰 계산 및 입력자료를 처리하는 데 어려움을 겪고 있다면, 양자컴퓨팅이 가치있게 활용될 수 있는 분야일 가능성이 높다. 이러한 사례는 특히 수자원을 포함한 기후 및 날씨 등 지구 과학 문제에서 쉽게 찾을 수 있다.

5. 수자원-기후문제의 적용 가능성

양자컴퓨팅은 수자원-기후 모델링과 같은 유체 역학 기반 문제 및 시뮬레이션과 관련된 응용 프로그램에서 특히 유용하게 활용될 수 있다. 사실 이미, 유체 역학 문제를 해결하는 데 핵심적인 비선형 미분 방정식에 양자 컴퓨팅을 적용하기 위한 접근 방식이 개발된 사례가 있다(Lubasch et al., 2020). 양자 컴퓨팅으로 이뤄낸 단기 기상 예보 및 장기 기후 예측의 개선은 에너지 시스템의 탄력성과 신뢰성에 도움이 될 수 있다. 수문-기상 예보는 다양한 풍력 및 태양열 발전원을 관리하는 데 점점 더 중요해지고 있으며, 기후에 대한 보다 정확한 예측을 통해, 예를 들어 홍수나 산불 증가로 미래에 영향을 받을 것으로 예상되는 지역에서 발전 인프라를 더 효과적으로 배치할 수 있게 된다. 또한 양자 최적화 기술은, 예를 들어 후류 효과를 최소화하고 에너지 생산을 최대화하기 위해 터빈 레이아웃을 최적화함으로써 풍력 발전소와 같은 발전 시설을 보다 효율적으로 설계하고 운영하기 위해 활용될 수 있다.

또한 양자 컴퓨팅은 수자원 관리, 특히 도시의 급배수망에서 수자원의 급수량을 적절히 조정함으로써 효율적으로 수자원을 사용하는데 활용할 수 있다. 한 가지 흥미로운 질문은 양자 컴퓨터가 대도시의 급배수망, 더 나아가 자연유역을 포함한

경우 최적의 솔루션을 찾을 수 있는지 여부이다. 이러한 복잡한 문제는 운영 비용을 최소화하면서 수자원의 수요를 충족할 수 있는 최적의 운영 수준을 결정하는 데 도움이 될 것이다. 이러한 문제를 해결하는 것은 수자원 환경의 변화(가뭄과 홍수, 그리고 기후의 변화)와 함께 도시가 확장되고 복잡해지면서 그 해결이 점점 더 어려워지고 있다. 수자원의 확보, 보전 그리고 효율적인 활용에 대한 솔루션은 궁극적으로 기후 변화문제를 완화하는데 도움이 될 수 있다.

6. 맺음말

대규모의 안정화된 양자 컴퓨터의 개발 및 활용은 앞으로 수 년 혹은 수 십년이 걸릴 가능성이 높다. 하지만 향후 개발될 시점을 위해 양자컴퓨터를 사용하여 수자원 및 기후와 관련된 중요한 문제를 해결하기 위한 소프트웨어 및 전략을 개발할 준비에 착수해야 한다. 양자 컴퓨팅 연구 커뮤니티는 알고리즘 개발에서 상당한 진전을 이루었지만 이러한 성과가 실제의 문제에서 요구 사항을 충족하도록 하려면 관련 분야의 지식을 갖춘 연구자간의 협력이 필요하다. 즉, 양자컴퓨터 개발자와 수자원-기후, 더 나아가 지구 과학 전문가 간의 협력을 통해 문제를 보다 명확하게 파악하고 아이디어 교환을 통해 주어진 문제해결에 적합한 양자컴퓨터 개발을 가속화할 수 있다.

양자컴퓨팅 개발 및 활용과 직접적으로 관련된 연구자 이외에 다른 부문도 중요한 역할을 해야 한다. 세계 각국에서는 효율적이고 실용적인 양자컴퓨터 개발을 위해 양자 정보 과학(Giani and Eldredge, 2021)에 투자와 지원을 아끼지 않고 있다. 산업계 역시는 순수 연구목적으로 초기에 개

발된 컴퓨터를 실제 문제에 적용하기까지의 격차를 메울 것이다. 이러한 모든 부문 간의 협력을 통해 다가오는 양자 컴퓨팅 혁명은 우리가 직면한 중요한 수자원 및 기후 문제를 해결할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후위기 대응 홍수방어능력 혁신 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(RS-2023-00218873).

참고문헌

- Giani, A., and Z. Goff-Eldredge (2022), How quantum computing can tackle climate and energy challenges, *Eos*, 103, <https://doi.org/10.1029/2022EO220500>. Published on 21 October 2022.
- Almosni, S., et al. (2018), Material challenges for solar cells in the twenty-first century: Directions in emerging technologies, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 19(1), 336-369, <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1433439>.
- Andersen, U. L. (2021), Photonic chip brings optical quantum computers a step closer, *Nature*, 591, 40-41, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00488-z>.
- Franklin, D., and F. T. Chong (2004), Challenges in reliable quantum computing, in *Nano, Quantum and Molecular Computing*, pp. 247-266, Springer, New York, https://doi.org/10.1007/1-4020-8068-9_8.
- Giani, A., and Z. Eldredge (2021), Quantum computing opportunities in renewable energy, *SN Comput. Sci.*, 2, 393, <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00786-3>.
- Lubasch, M., et al. (2020), Variational quantum algorithms for nonlinear problems, *Phys. Rev. A*, 101(1), 010301(R), <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.010301>.
- Moore, G. (1965), Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics*, 38(8), 114, newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/moores-law-electronics.pdf.
- Paudel, H. P., et al. (2022), Quantum computing and simulations for energy applications: Review and perspective, *ACS Eng. Au*, 2(3) 151-196, <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00033>.
- Berger, C., Di Paolo, A., Forrest, T., Hadfield, S., Sawaya, N., Stęchły, M. and Thibault, K., 2021. Quantum technologies for climate change: Preliminary assessment. arXiv preprint arXiv:2107.05362.