

양자과학기술의 현 동향과 전망

유형정 KISTEP 전략기술정책단 부연구위원

1. 머리말

2023년 한 해 동안 가장 주목받은 과학기술 이슈는 단언컨대 양자(量子) 기술이다. 작년 초 스위스 다보스포럼에서 윤석열 대통령은 2023년을 양자과학기술 도약의 원년으로 삼고 양자 과학에 정부 지원을 아끼지 않겠다는 다짐을 한 바 있다. 불과 몇 년 전까지만 해도 양자 기술이 무엇인지에 대해 설명하려면 그 역사와 상세한 정의부터 시작해야 했으나, 이제는 국민 대다수가 적어도 양자 기술이란 것이 존재하고, 이 기술이 우리에게 향후 지대한 영향을 끼칠 미래 신산업이 될 것임에는 큰 의문을 제기하지 않을 것이다. 그럼에도 아직은 양자 기술이란 정확히 무엇인지를 설명하거나, 어떻게 우리의 일상 생활을 변화시킬지에 대해서는 구체적으로 예측하기는 쉽지 않은 상황이다.

양자 기술은 태동 이래 물리학, 수학 등 기초과학 분야 위주로 연구되어 오다가, 컴퓨터 공학, 재료 공학, 전기 공학 등의 학문과 엔지니어링 기술 융합을 통해 활용 영역이 전방위적으로 확대되고 있다. 주로 컴퓨팅, 통신 및 센싱 활용 분야로 범위를 설정하고 있으나, 실제 연구를 위한 소재/소자 단위에서 활용 분야 구분은 쉽지 않으며, 이론 및 알고리즘도 분야 구분 없이 공통으로 중요하게 활용될 수 있다. 또한, 넓은 의미의 양자 기술은 양자역학적 현상의 결과로 일어나는 기술들, 즉 대부분의 반도체, 신소재 및 정밀계측 등의 영역을 모두 포함할 수 있다. 현재 세계적으로 관심을 끌고 있는 양자 기술은 양자역학적 상태를 직접 제어하고 활용하여 정보를 처리하거나 성능을 비약적으로 향상시키는 일에 초점을 맞추고 있다.

양자를 과학으로 볼지, 기술로 판단할지에 대해서도 규격화되어 있지 않고 나라마다 사정이 다르다. 미국은 양자정보과학(QIS, Quantum Information Science), 유럽은 양자기술(QT, Quantum Technolog), 일본 및 중국은 양자과학기술(QST, Quantum Science Technology) 등 다양한 표현을 사용하며, 우리나라의 경우에는 양자기술 또는 양자정보기술(QIT, Quantum Information Technology) 등으로 다양하게 불러 왔다. 그러나 2023년 초 예비타당성 조사 대상사업으로 요구된 R&D 사업 '양자과학기술 플래그쉽 프로젝트' 및 최근 제정된 '양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률'에서는 '양자과학기술'이라는 표현을 공통으로 사용하기 시작하였다. 이에, 본고에서도 양자과학기술이라는 용어를 사용하여 세부적인 기술의 현황과 전망을 간략히 살펴보고자 한다.



출처: 과학기술정보통신부(2021), 양자기술 연구개발 투자전략(안)

[그림 1] 양자 특성과 ICT 기술 융합

2. 본문

2.1 글로벌 양자과학기술 동향 및 전망

2.1.1 양자컴퓨팅

기존 컴퓨터는 기본 단위로 비트(bit)를 사용하고, 2진법으로 명령을 해석해 계산을 수행한다. 여기에 양자역학의 주요 원리인 중첩(superstition)과 얽힘(entanglement) 현상 등을 접목한 큐비트(qubit)를 구현하여 컴퓨터처럼 계산하는 것이 양자컴퓨팅이라고 할 수 있다. 이러한 큐비트를 구현하는 방식으로 초전도체, 이온포획, 광자, 반도체 스핀, 중성원자 등 다양한 플랫폼이 존재한다. 양자컴퓨팅 개발을 위해서는 기존 컴퓨터와 같이 양자 프로세서의 개발이 가장 중요하며, 현재 범용 양자컴퓨터를 위한 하드웨어 중 초전도체, 이온포획, 광자 플랫폼 방식의 투자 비중이 높은 상태이다.

이온포획 방식은 1995년 양자컴퓨터를 위한 기술로 제일 처음 제안된 바 있으며, 양자컴퓨터 구현에 필요한 기본적인 기준들을 탁월한 성능으로 충족하여 초전도체 방식과 함께 가장 실현 가능성이 높은 플랫폼으로 인정받고 있다. 특히 큐비트의 결맞음(coherence) 시간은 1시간 이상으로 다른 어떠한 시스템과 비교할 수 없으며, 그에 따른 게이트 신뢰도(fidelity) 및 최대 얽힘 상태에 있는 큐비트 수에서도 제일 높은 성능을 보여주고 있다. 하지만 느린 게이트 속도(gate speed)와 단일 모듈 구성에서의 큐비트 확장성의 한계는 해결해야 할 숙제이다. 현재 이 방식으로 가장 두각을 나타내고 있는 스타트업 아이온큐(IonQ)는 32큐비트 시스템을 보유 중이며, 모듈 방식으로 확장성의 한계를 개선하려고 하고 있다.

초전도체 방식은 기존 반도체 공정 활용이 가능하여 큐비트 확장성이 우수하며, 게이트 조작에 필요한 시간이 짧아 빠른 게이트 속도를 가지고 있다. 양자오류정정을 시연한 가장 앞선 방식으로, 구글(53큐비트), IBM(433큐비트) 등이 선두 주자이다. 양자 클라우드 서비스도 일부 상용화되어 있다. 하지만 큐비트의 짧은 결맞음 시간 및 상대적인 게이트 신뢰도 문제가 있고, 매우 낮은 온도 유지가 필요하여 소형화에는 다소 한계가 존재한다. 양자컴퓨팅 구현을 위해서는 빠른 게이트 속도와 함께 100%에 가까운 게이트 신뢰도가 필요하므로 하드웨어 개발에 있어서 이 2가지는 중요한 요소로 다루어지고 있다. 다시 말해, 궁극적으로 범용 양자컴퓨터 출현을 앞당기기 위해서는 더 나은 동작 안정성을 확보하고, 큐비트의 중첩 및 얽힘을 정밀하게 제어해야 하며,

게이트 제어 및 오류 정정 등이 구현해야 할 숙제로 남아 있다.

최근에는 장기적인 범용 컴퓨터 개발과 함께, 단기적으로 양자컴퓨터 특성을 극대화하는 특정한 문제들을 발굴하고 그러한 영역에서 슈퍼컴퓨터를 넘어서는 성능을 보이는 양자컴퓨터를 실현하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이미 샘플링 문제에서는 2019년 슈퍼컴퓨터의 성능을 넘어섰고, 최적화 문제, 양자 화학 계산, 인공 지능 연산처럼 해결하기 어려우나 현실에서 유용한 문제들에 있어서도 솔루션을 제공하는 양자컴퓨터를 실현하기 위한 알고리즘 및 AI 응용 연구도 주목받고 있다.

2.1.2 양자통신

현대 암호체계를 무력화할 수 있는 능력을 가진 양자컴퓨터의 개발에 대응하여 안전한 통신환경을 제공하기 위해 현대 암호체계를 보완하거나 대체할 양자암호통신 기술이 연구되고 있다. 양자키분배(QKD, Quantum Key Distribution) 기술은 양자 기술로 생성·분배한 암호키를 현대 암호 체계에 활용하는 기술로, 유선 광케이블을 사용하는 통신망이 가장 먼저 상용화 단계에 도달하였다. 특히 우리나라는 글로벌 상호연동을 위한 ITU 표준 등에서 앞서나가는 성과를 달성한 바 있다. 장거리 통신 한계를 극복하기 위한 무선통신의 경우 위성 기반 4,600km 유·무선 양자암호 통신을 운영 중인 중국을 제외하고는 여러 나라가 비슷한 수준에서 경쟁적으로 연구를 진행하는 중이다. 이와는 별개로 양자 현상을 직접 활용하지는 않는 대체기술인 양자내성암호(PQC, Post Quantum Cryptography)도 연구되고 있다. SW 단에서 구현되기 때문에 QKD 대비 보안 및 편리성 부분에서 상호보완적인 기술이다. 미국 국립표준연구소(NIST)는 PQC 알고리즘 표준 4종을 최근 선정하였고 늦어도 내년부터는 PQC 표준으로 활용될 전망이다.

유·무선 양자암호통신 시장이 형성된 이후에는 양자컴퓨팅, 양자센싱 노드들을 연결하는 양자 네트워크 구현을 위한 기술 연구들도 활발하게 이루어질 전망이다. 양자 메모리/중계기 기술, 양자 정보를 교환하는 얽힘 전송 및 양자 오류 보정 같은 고차원적인 기술이 추가로 확보된다면 궁극적으로 양자컴퓨터나 센서 등 양자기기 간 양자정보 전송이 가능한 양자인터넷(네트워크)로 발전이 예상된다. 양자 인터넷은 현재 인터넷과 달리 정보량이 많아져도 속도가 거의 줄어들지 않으며, 통신의 영역을 넘어서 분산형 양자컴퓨팅과 같은 가상의 대규모 양자컴퓨터를 구성할 수 있다. 따라서 현재 단일 양자컴퓨터에서 달성할 수 없는 문제 해결을 여러 양자컴퓨터를 연결한 양자 인터넷을 통해 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

2.1.3 양자센싱

기존 센서 대비 정밀도, 정확도 및 안정도 등이 매우 높은 양자 센서는 연구개발 단계를 넘어 상용화된 제품들이 출시되고 있다. 글로벌 위성항법 시스템(GPS)과 원자시계, 의료분야의 자기공명영상(MRI) 스캐너 등 대표적인 성공사례를 제외하더라도, 나노스케일 이미징 센서, 휴대용 자기장 및 중력 센서 등도 실험실 단계를 넘어 스타트업에서 산업화 초기 연구가 진행 중이다.

현재 양자센싱 기술은 양자 얽힘이나 압축(Squeezing) 등 양자적 특성을 활용하여 4대 플랫폼(관성·중력, 전·자기장, 시간·주파수, 광·이미징)별 표준양자한계(standard quantum limit)를 극복하기 위한 기술적 난제 해소에 주력하는 동시에 소형화·집적화 및 저전력화 등 실제 산업응용을

위한 최적화 연구도 수행되고 있다. 진정한 의미의 양자 센싱은 높은 차원의 잡음제어 기술을 확보해야 하므로 구현에 상당 기간이 필요할 것이나, 당장 확보된 센싱 기술이 실증 단계를 넘어서게 되면 우주·항공·해양, 모빌리티, 로봇 등 분야에서 기존 센서와 상호보완적으로 사용될 전망이다.

2.2 양자과학기술 국가별 추진현황

2.2.1 국외

세계적으로 활발한 연구개발이 진행되는 가운데, 미국은 가장 발 빠르게 다양한 정책과 비전을 수립하여 양자에 투자하고 있으며, 특히 양자컴퓨터 연구개발을 중점적으로 추진하고 있다.

2017년 National Quantum Initiative(NQI)를 통해 본격적으로 양자과학기술에 대한 연구를 가속화하기 이전인 2008년에 이미 '국가양자정보과학비전'을 수립하고 정부기관 주도로 양자컴퓨터 분야의 대규모 정부 연구개발을 추진하였으며, 2015년 글로벌 기업과 스타트업의 참여를 통해 연구 영역이 확장되었다.

유럽은 2006년 Quantum Europe 프로젝트를 착수하고 연간 525억 원의 투자 계획을 수립하고 양자기술 개발을 구체화하였다. 2021년에는 'EU 2030 디지털 컴파스'를 발표하고 유럽의 기초 연구 역량을 응용 및 상용화에 접목하기 위한 노력을 강화하고 있다. 영국은 2014년 총액 2억 7천만 파운드 금액의 'The UK National Quantum Technologies Programme'을 시작하여 국가 내 4개 양자 허브(Quantum Hub)를 중심으로 전 분야에 걸쳐 양자과학기술연구를 본격화하였다. 독일의 경우 '양자컴퓨팅 로드맵'을 수립하고 경쟁력 있는 양자컴퓨터 구축 및 생태계 조성을 위한 중장기 계획을 발표하였다.

중국은 2022년 정부 주도로 양자 분야에 가장 많은 금액을 투자한 나라이다. 2006년 '국가중장기과학기술발전계획 요강(2006~2020)'에서 4대 중대 기초과학연구로 양자제어를 처음 포함하였으며, 2016년 '13차 5개년 국가과학기술규획(2016~2020)'에 양자통신을 국가전략으로 격상시켜 중대과기프로젝트로 추진하였다. 이는 2017년 북경과 상해 사이 약 2,000km에 달하는 양자통신 시험망을 구축하고 세계 최초로 양자암호통신 위성인 '묵자호'를 쏘아올리는 데 성공하는 계기가 되었다. 또한 오스트리아와 공동으로 대륙 간 QKD를 시연하는 등 자유공간 양자통신을 개발하기 위해 국가역량을 집중하고 있다. 정부의 전폭적 지원 속에 세계 최대의 양자연구소를 구축해 2021년 개소하였다.

일본은 광(光)·양자 분야 기초연구를 중심으로 2008년부터 10년간 장기 지원 사업을 투자한 바 있으며, 대규모 국가 과제보다는 개별 연구 중심으로 분산되어 진행되고 있다. 양자컴퓨터, 양자암호통신 분야의 대규모 연구개발 프로그램 추진과 함께, 양자기술을 3대 국가전략기술로 지정하고 '양자 이노베이션 전략'을 발표하는 등 미래 사회를 준비하고 있다.

2.2.2 국내

우리나라는 2014년 양자정보통신 중장기 추진 전략을 처음 마련하고, 2021년 양자과학기술 연구역량 및 기술주권 확보를 실현하기 위한 '양자기술 R&D 투자 전략'을 발표하였다. 이후 2022

년 양자과학기술을 12대 국가전략기술 중 하나로 선정하고, 구체적인 기술로드맵을 수립하여 단기·중장기 기술개발 방향을 제시하였다. 2023년에는 양자과학기술에 대한 중장기 비전과 종합적인 발전전략을 담은 역대 최초의 '대한민국 양자과학기술 전략'을 발표함으로써 경제안보와 전략적 성장에 양자과학기술이 상당히 중요한 비중을 차지하고 있음을 공표하였다. 특히, 양자 산업화를 위해 세계 최고 수준의 우리 반도체 역량을 적극 활용할 수 있는 민간 주도 양자파운드리 시장을 열어 양자시스템의 소자화, 소형집화 및 양산화를 추진해 나갈 계획이 포함되어 있다. 최근 제정된 '양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률'을 통해 이를 뒷받침할 근거도 마련하였다. 이에 따라 우리나라의 양자기술 수준을 높이기 위한 다양한 R&D가 지속적으로 추진될 것으로 예상된다.

다행히, 우리나라는 일부 분야에서는 경쟁력을 갖추고 있다. 양자통신 분야는 국내 통신사(SKT, KT 및 LGU+) 등 산업계를 중심으로 선도적인 연구를 진행하고 있고, 양자센싱 분야도 KRISS, KIST 및 ADD 등 출연연을 중심으로 경쟁력 있는 연구 결과를 보유하고 있다. 양자컴퓨팅 분야는 구글, IBM에 비하면 앞으로 할 일이 많은 상황이나 정부 주도로 50큐비트 양자컴퓨터 구축 프로젝트를 추진하고 있어 귀추가 주목된다.

3. 맺음말

양자과학기술은 광범위한 산업·안보적 파급력을 가진 파괴적 혁신기술이며 미래 기술의 핵심으로 떠오르고 있다. 본고에서는 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱 등 양자 전반에 관한 기술별 현황을 간략히 확인하였고, 미국과 중국의 경쟁 속 양자과학기술 확보를 위해 국가별 미션 및 미래지향적 전략이 수립되고 있음을 알 수 있었다. 현재 양자 산업에 대한 전 세계 투자 규모는 최고치에 달했으며, 기술의 발전은 그에 비해 느리지만 점진적으로 이뤄지고 있으며, 인재 격차는 다소 좁혀지는 추세이다. 하지만 우리나라는 후발국으로서 기술 개선과 인재 격차를 최소화하기 위한 노력이 여전히 더 필요한 상황이다. 따라서 양자과학기술을 국가전략기술로 선정한 만큼 양자과학기술 육성을 위한 중·장기적인 지원을 통하여 기술과 산업의 선순환 구조를 구축하고 양자기술 선도국으로 진입할 수 있는 토대를 마련할 필요가 있다.

미국이나 영국은 거점연구소의 설립을 통한 기술개발과 인력양성을 추진하고 있으며, 일본은 타 분야 간 네트워크형 연구거점 연구개발 추진을 계획하는 중이다. 우리나라도 거점 연구소 지정이나 전문인력 양성을 위한 논의가 필요할 것이며, 거점 연구소 및 네트워크 연구거점의 역할과 연구 주제, 양자시스템 플랫폼 등 적절한 방향성에 대한 합의는 선행되어야 할 필요가 있다. 다행히도 양자법이 최근 제정되었기 때문에 국제협력, 양자클러스터, 표준화·상용화 방안 등을 포함하는 양자종합계획을 수립할 수 있는 토대는 갖춰졌다고 볼 수 있으며, 국가전략기술에 부합하게 역량을 밀집하여 하루빨리 양자과학기술 선도국가로 도약하기를 희망한다.

※ 본 연구는 2023년 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행됨[글로벌 기술패권 경쟁 대응 기술주권 주요 이슈 심층분석 및 전략수립 방법론 고도화연구]

[참고문헌]

- [1] 양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률, 2023.10.31.
- [2] 과학기술정보통신부 (2021), 「양자기술 연구개발 투자전략(안)」, 2021.04.30.
- [3] 유형정 (2022), 「양자정보기술」, KISTEP 브리프 21호, 2022.07.05.
- [4] 양자정보과학기술연구회 (2022), 「2021 양자 컴퓨팅 기술 백서」, 2022.03.
- [5] William D. Oliver, "Introduction to Quantum Computing", Convergence: The Promise and Reality of AI & Quantum, 2022.11.14.
- [6] 과학기술정보통신부 (2023), "대한민국 양자과학기술 전략", 2023.6.27.
- [7] 한국연구재단 (2021), 「양자인터넷 기술」, R&D BRIEF 2021-26호, 2021.11.29.
- [8] 이동현 (2020), 「양자 센서 연구 동향 및 활용 전망」, IITP 주간기술동향 1960호, 2020.08.19.
- [9] 한국과학기술기획평가원 (2023), "해외 주요국의 양자 산업 투자 및 인재 격차 현황 분석", 동향리포트 23년 08호, 2023.9.5.

※ 출처: TTA 저널 제210호