

ISSUE REPORT

2022.

Vol. 4

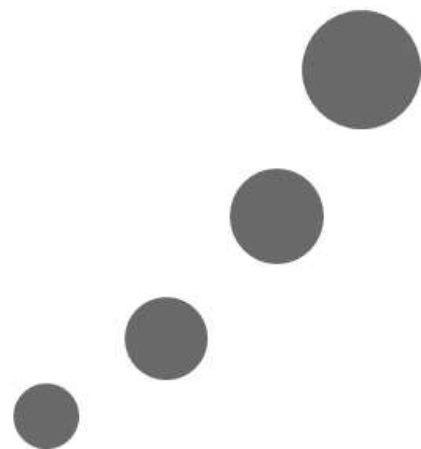
양자컴퓨터의 현재와 전망



TIPA | 이슈 리포트

양자컴퓨터의 현재와 전망

- I. 양자컴퓨터의 개요
- II. 기술개발 동향과 각국 지원정책
- III. 양자컴퓨터의 전망
- IV. 결론 및 시사점

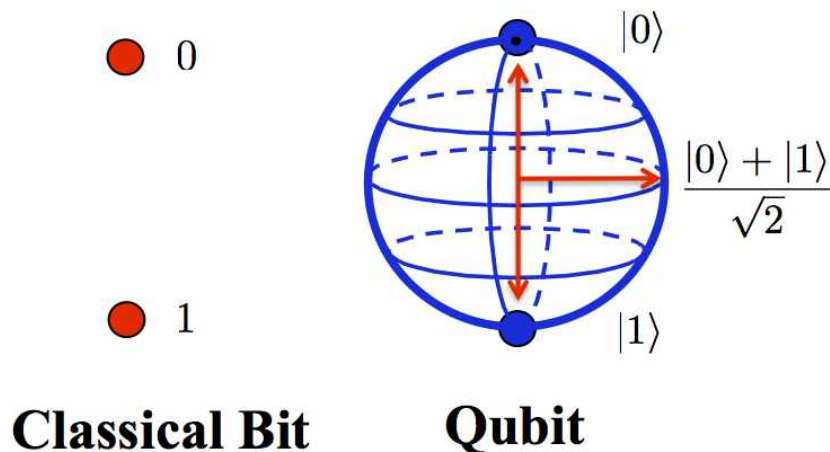


I. 양자컴퓨터의 개요

1 양자컴퓨터의 개념과 특징

- 양자컴퓨터는 중첩(superposition), 얽힘(entanglement) 등 양자역학의 고유한 물리학적 특성을 이용하여, 다수의 정보를 동시 처리할 수 있는 새로운 개념의 컴퓨터로 기존 고전적 디지털 컴퓨터로 해결이 어려운 문제를 풀 수 있는 강점을 보유
- 양자컴퓨터는 정보 처리의 기본 단위로 큐비트(qubit)를 사용. 큐비트는 “0”이면서 동시에 “1”도 될 수 있는 중첩(superposition)상태를 가질 수 있으며, 다중 큐비트 상태를 단일 큐비트 상태로 분리해 낼 수 없는 얽힘(entanglement)현상을 보임. 이는 양자역학의 고유의 특성으로 양자컴퓨터 구동의 기반이 됨

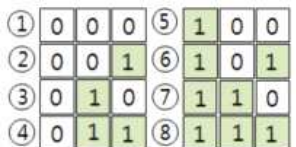
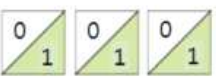
[기존의 비트와 큐비트의 차이]



* 출처: <https://deeptai.org/machine-learning-glossary-and-terms/qubit>

- 특정 문제를 풀거나 연산을 수행할 때 기존의 컴퓨터가 가능한 경우의 수를 하나씩 계산한다면, 양자컴퓨터는 여러 경우의 수를 동시에 계산할 수 있음. 양자컴퓨터의 이런 동시 병렬연산 처리능력은 기존 컴퓨터 대비 비교 불가 수준으로 월등한 연산성능을 보여줄 수 있음
- 기존 컴퓨터는 한 번에 한 개의 계산을 수행해야 하나, 양자 컴퓨터는 한 번의 프로세스로 모든 가능한 숫자에 대한 계산을 수행 가능
- 예를 들어, 1,000 비트 숫자(300자리 정수)를 소인수 분해하는 데에 기존 컴퓨터로 백만 년이 걸릴 계산을 양자컴퓨터는 대략 1초~하루 정도의 시간에 계산 가능
- 2019년 10월, 저명한 학술지 네이처는 구글이 개발한 양자컴퓨터가 현존하는 슈퍼컴퓨터의 한계를 뛰어넘는 이른바 ‘양자 우위(quantum supremacy)’를 세계 최초로 달성했다고 발표했으나, 이는 특정한 문제에 대한 것으로 모든 문제 해결에 더 우위에 선 것은 아님

[기존 컴퓨터와 양자컴퓨터 비교]

구분	기존 컴퓨터	양자 컴퓨터
연산 개념도		
기본 단위	Bit(0 또는 1)	Qubit(0과 1의 중첩)
연산 방법	논리 표에 의한 계산	행렬 함수에 의한 계산
외부 잡음	오류 정정이 쉬움	오류 정정이 어려움
n비트의 정보량	$0 \sim 2^{n-1}$ 중 1개 값만 기억	2^n 의 모든 값을 기억(중첩)
연산 동작 처리량	n bit ALU는 1번 연산 동작 	n qubit ALU는 2^n 연산 동작 

* 출처: 양자컴퓨터 개발 동향과 시사점 (정보통신기술진흥센터, 2018)

□ 동시 병렬 연산 처리능력(양자 병렬성), 기존 디지털 컴퓨터 대비 낮은 운영전력 등 기존 컴퓨터와 차별적 특성

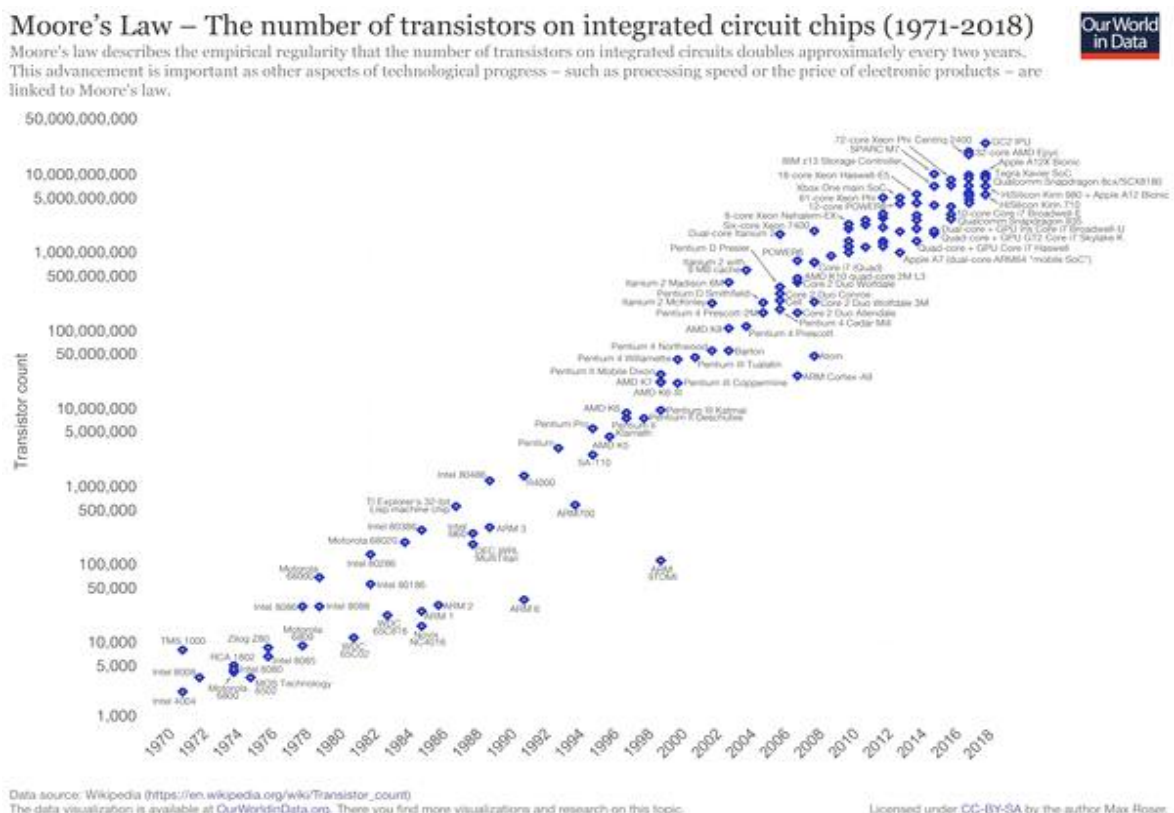
- 양자병렬성이란 기존 컴퓨터는 입력에 대해 선형적인 결과를 보이는 반면, 양자컴퓨터는 양자원리(중첩, 얽힘)를 이용하여 적은 큐비트로도 많은 경우의 수의 정보를 동시에 처리하는 것이 가능하여 비결정론적 연산에 강점을 가짐
 - 현재 사용하는 컴퓨터처럼 단일 경로만 계산할 수 있는 기계의 경우 NP 문제¹⁾를 해결하려면 문제의 복잡도가 증가할수록 지수함수적으로 해결시간이 증가하므로 효율적이지 않음
 - 양자컴퓨터는 비가역적인 변환에 대해서는 오히려 기존 컴퓨터보다 취약할 수 있기 때문에 양자컴퓨터와 기존컴퓨터의 우월성을 직접적으로 비교하는 것은 위험함
- 양자컴퓨터의 예상 운영 전력량이 월평균 약 1,000 ~ 2,000 kWh 정도로 기존 페타급 초고성능컴퓨터 운영 전력량 대비 1% 이내의 획기적으로 적은 에너지가 소모

1) NP 문제의 대표적인 예시가 교통상황 분석으로 도로의 교통상황은 각각의 차량 움직임이 상호작용하여 만들어 내는 현상. 개별 차량의 움직임을 모두 분석하면 교통상황을 예측할 수 있겠지만, 연산에 너무나도 많은 시간이 소요되어 현실적으로 거의 불가능하게 됨

2 양자컴퓨터의 탄생 배경

- (기존 컴퓨터의 한계) 처리해야 할 데이터는 기하급수적으로 증가하는 반면, 연산속도는 CPU 병렬연결 개수와 비례하여 증가함으로써 점차 디지털 컴퓨터의 한계가 나타나기 시작
 - 디지털 컴퓨터는 비트(bit), 즉 2진법(0/1)을 사용하여 트랜지스터에 전류가 흐를 때를 1, 그렇지 않을 때는 0으로 인식해 연산기능을 수행하고 컴퓨터의 연산속도를 향상시키기 위해 트랜지스터를 더욱 많이 집적시킴으로써 CPU 자체의 성능을 높임과 동시에 여러 개의 CPU를 병렬로 연결
 - 한정된 면적에 트랜지스터를 더 많이 집적하기 위한 노력의 결과 트랜지스터 크기는 거의 원자 수십개 수준으로 작아졌고, 이는 회로를 따라 흘러야 할 전자들이 회로 밖으로 빠져 나가는 양자투과 현상과 같은 양자현상이 두드러져 제대로 작동하지 못하게 되어 연산속도 향상 역시 한계에 근접(이러한 문제로 인해 무어의 법칙을 지켜왔던 인텔은 2016년 이후 공정주기를 2년에서 3년으로 전환한다고 발표)
 - 개별 반도체 칩의 성능 개선이 점점 더 어려워짐에 따라 컴퓨터 연산 능력 확대를 위해 슈퍼컴퓨터의 경우 수백만개의 코어를 탑재하고 있으며 이에 따라 컴퓨터의 거대화와 대규모 전력 소모라는 문제점이 추가로 발생하여 한국과학기술정보연구원의 슈퍼컴퓨터인 '누리온'의 경우, 아파트 3천 세대와 맞먹는 전력을 소모하는 것으로 알려져 있으며, 중국 슈퍼컴퓨터 'Tianhe-2'의 소비 전력량은 24MWh로 이는 중소 도시 전체 공급 수준의 전력 소모에 해당

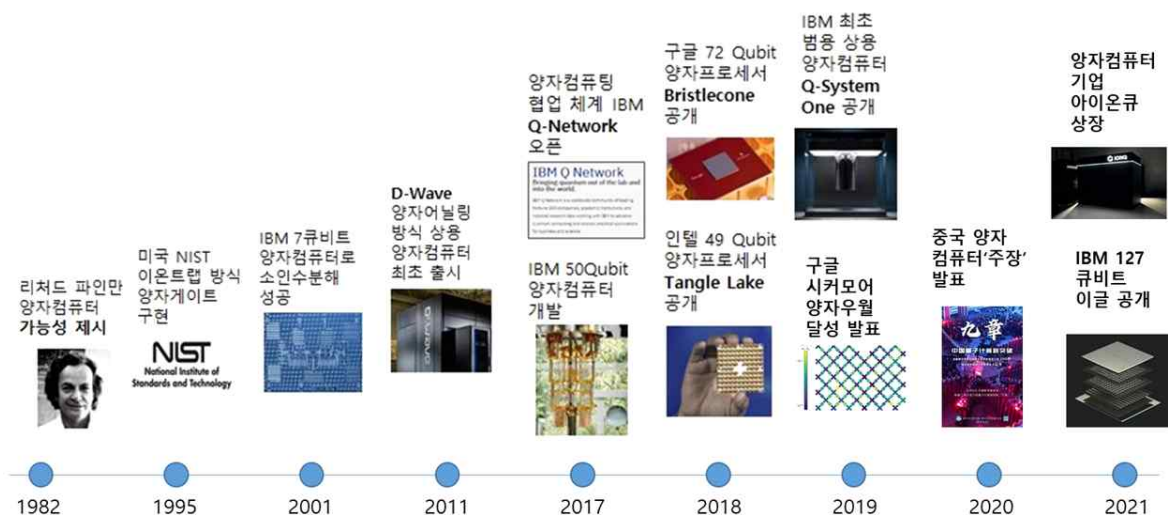
[무어의 법칙]



* 출처: 위키피디아

- (기술의 진화) 1965년 미국의 물리학자 리처드 파인만이 양자컴퓨터 개념을 처음 제시한 후 이러한 개념을 실현시키기 위한 기술적 발전을 통해 현재의 양자컴퓨터가 출현²⁾
- (이론적 기반) 1982년, 파인만이 양자시스템을 기반으로 한 컴퓨팅의 이점을 설파하기 시작하면서 이 분야에 관한 관심이 크게 증대되었고, 1985년에는 영국 물리학자 데이비드 도이치가 튜링 기계 개념에 양자 이론을 적용한 '범용 양자 컴퓨터'에 관한 논문을 발표
 - (새로운 알고리즘) 1994년 미국의 MIT 응용수학과 교수 피터 쇼어는 기존 알고리즘보다 소인수 분해를 훨씬 더 빠르게 처리할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한 이래 1996년 롬그로버, 세스로이드 등이 새로운 양자컴퓨터용 알고리즘을 제안했고, 1999년에는 조르디 로즈가 세계 최초의 양자컴퓨팅 기반 컴퓨터 판매 회사 디웨이브 시스템즈(D-Wave Systems)를 설립
 - (알고리즘의 구현) 2001년, IBM 알마덴 연구센터(Almaden Research Center)는 당시를 기준으로 세상에서 가장 복잡한 양자컴퓨터 계산을 수행³⁾
 - IBM, 스탠포드 대학과 공동으로 진행한 이 프로젝트는 7큐비트 프로세서에서 15를 소인수 분해하는 방식으로 쇼어 알고리즘을 최초 구현했다고 발표
 - (양자컴퓨터 상용화) 2010년에는 디웨이브 시스템즈(D-Wave Systems)가 최초의 상용 양자컴퓨터 '디웨이브원(D-Wave One)'을 출시한 이후 IBM, 아이온큐, 허니웰, 구글 등이 양자컴퓨터 개발과 상용화에 성공
 - (양자우위 달성) 2019년 7월 구글은 자체개발한 시카모어 프로세서가 기존 슈퍼컴퓨터에서 1만 년 걸리는 연산을 200초 만에 해결할 수 있다고 밝혀 양자 우위를 달성했다고 발표
 - 양자우위 증명을 위해 구글 연구팀은 양자 컴퓨터와 슈퍼컴퓨터를 대상으로 무작위 양자 알고리즘을 실행하고 그 값을 얻는 과정을 추적했으며, 슈퍼컴퓨터가 양자 알고리즘을 직접 수행할 수는 없기에 슈퍼컴퓨터는 시뮬레이션을 통해 주어진 양자 알고리즘을 풀도록 했다고 발표

[양자컴퓨터 발전 과정]



* 출처: 양자컴퓨터 시대가 열리고 있다(투이컨설팅, 2019.08.08.)을 기반으로 추가 재구성

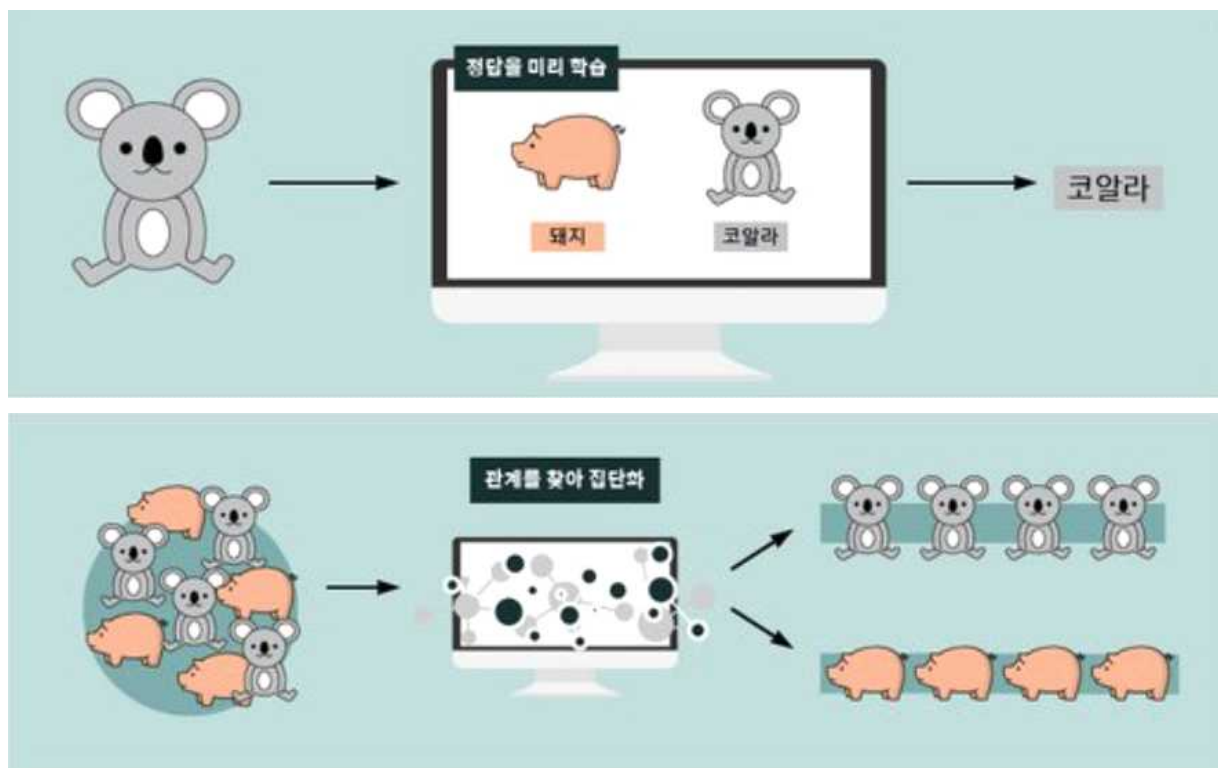
2) 첫 태동부터 현재에 이르기까지... '양자컴퓨팅'의 간략한 역사 살펴보기(CIO,2020.12.01.)

3) IBM, 스탠포드 대학과 공동으로 진행한 이 프로젝트는 7큐비트 프로세서에서 15를 소인수 분해하는 방식으로 쇼어 알고리즘을 최초 구현했다고 발표

□ (새로운 과업의 등장) 기존의 디지털 컴퓨터로는 풀 수 없거나 매우 시간이 오래 걸리는 인공지능 등 새로운 과업이 등장하여 새로운 돌파구가 필요

- 머신러닝의 지도 학습(Supervised Learning)이 정답이 주어진 학습 자료를 이용하여 예측하는 분석 방법이라면 비지도 학습(Unsupervised Learning)은 정답이 주어지지 않은 자료에서 그룹을 식별하기 위한 탐색적 자료 분석으로, 클러스터링(clustering)이 대표적인 방법이고, 비지도 학습을 수행할 때 기계에는 미분류 데이터만이 제공되며, 이러한 경우에 많은 시간이 소요
- 기계학습에 있어 중요한 문제 중 하나는 주어진 데이터의 특징(feature)을 구분해 분류하는 것. 간단한 예로 동물 이미지 학습데이터에서 입, 귀 등의 특징을 바탕으로 분류하기 위한 결정 경계(decision boundary)를 학습, 새로운 이미지가 입력되었을 때 코알라와 돼지로 분류하는 작업을 생각해 보면, 데이터의 특징들이 잘 나타나는 경우에는 선형적 결정 경계만으로 분류할 수 있지만, 입과 귀 모양의 특징으로만 코알라와 돼지를 분류하기 쉽지 않다면 새로운 결정 경계를 찾기 위해 특징에 관한 정보 공간의 차원을 확장해야 하는데 이러한 과정에서 비선형 커널 기술이 필요하고 이부분에 기존 컴퓨터의 경우 연산시간이 많이 소요됨

[지도학습(상)과 비지도학습(하)]



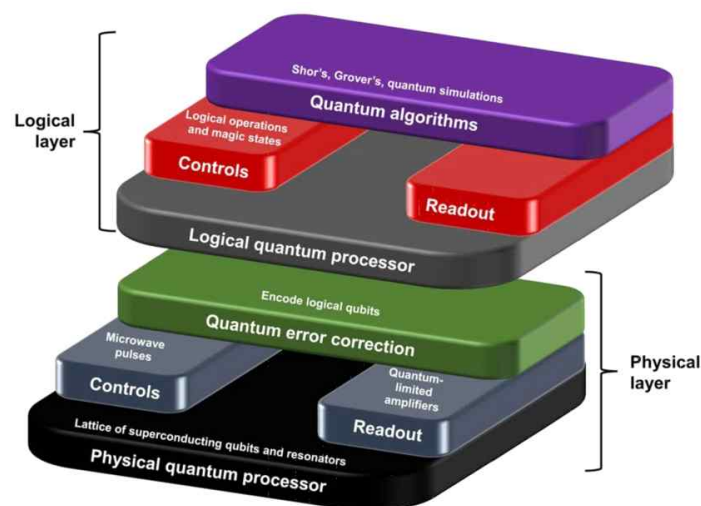
* 출처: [MBL]인공지능, 기계학습, 딥러닝 그리고 GPU 클라우드(steemit)

- 모든 산업에서 최적화 문제를 해결하는 것은 상당한 난제로, 예를 들어 항공 분야의 경우 개별 항공기를 다른 경로에 할당하는 것은 경로와 항공기 수가 증가함에 따라 크기와 복잡성이 매우 빠르게 증가됨. 이러한 문제를 해결하는데 기존의 컴퓨터는 상당한 시간이 걸려, 양자컴퓨터가 최적화 문제 해결에서 장점을 가질 수 있다는 희망이 존재하지만, 지금까지 개발된 양자컴퓨터의 수준으로는 복잡한 문제를 해결할 수 있는 수준은 아닌 것으로 알려짐.

3 양자컴퓨터의 분류⁴⁾

- 큐비트는 양자역학적 상태 2개를 이용하는 시스템을 의미하며, 큐비트를 만들 수 있는 물리계에는 제한이 없어, 예컨대 초전도 현상이나 이온, 중성원자의 불연속적인 에너지 상태 중에서 특정 2개 상태를 골라서 양자상태가 흐트러지지 않는 결맞음(coherent) 상태를 유지하는 한에서 초기화, 임의의 연산, 측정을 할 수 있다면 큐비트가 될 수 있음
- 현재 양자컴퓨터의 양대 선두주자인 IBM과 구글은 ‘초전도 큐비트’를 사용하고 있고, 알루미늄 등 저온에서 초전도성질을 보이는 물질로 조셉슨 접합이라는 양자소자를 만들어 큐비트를 구현
- 미국 양자컴퓨터 스타트업(신생 벤처기업) ‘아이온큐’는 루비듐 원자 등을 진공 상태에서 이온으로 만들어 큐비트 상태를 만들어내며 이때 레이저로 원자 하나하나를 포획해 가두고 컨트롤하는 이온 트랩(포획)이란 고난도 조절기법 활용
 - 상온에서도 동작이 가능하다는 장점이 있는 초전도큐비트와 이온트랩은 게이트 연산방식으로 회로를 설계한다는 점에서 반도체와 비슷한 점도 장점으로 부각 중
- 마이크로소프트(MS)는 2005년부터 상대적으로 결잃음(decoherent) 현상이 최소화될 수 있는 ‘위상수학적 양자컴퓨터’를 개발 중이나, 아직 위상물질이 양자소자의 기본소재로 쓰일 수 있는지 가능성을 확인하고 있는 단계
- 양자점(QD: Quantum Dot)은 3차원 고립 구조체로 불연속적 에너지 준위를 형성하며, 양자점 큐비트는 이러한 불연속적 에너지 준위의 가장 기저에 있는 2개의 상태를 이용하는 시스템으로 세계 반도체 기업인 인텔이 관심을 기울이고 있는 것으로 알려짐
- 고체 점결합 큐비트는 10mK 수준의 극저온에서 동작하는 초전도 큐비트, 초고진공이 필요한 이온트랩 큐비트와는 달리 상온, 상압에서 동작이 가능한 것이 장점으로 국내 KIST가 연구 중

[양자컴퓨팅 구성요소]



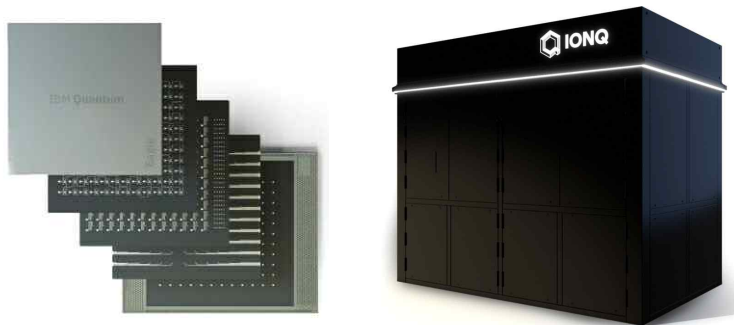
* 출처: 양자컴퓨터 제어 기술(ETRI, 2021)

4) 확장형 양자컴퓨팅을 위한 나노·소재 기술(국가나노기술정책센터, 2020.03)를 바탕으로 재구성

□ (초전도 큐비트) 초전도 큐비트는 트랜스몬 방식의 급진적 발전과 함께 고체소자 기반의 다양한 장점으로 이온트랩 방식과 함께 제품제작 및 상용화를 선도

- (미국 UCSB) 9큐비트 소규모 양자정보 프로세스 및 측정기반 양자 피드백 구현(2015)
- (중국 USTC) 10큐비트 양자얽힘 구현(2017)
- (미국 Google) 54큐비트 sycamore chip 구동 및 quantum supremacy 시연(2019)
- (미국 IBM) 127큐비트 프로세서 이글 공개(2021)
- (한국 KRISS) 2큐비트 트랜스몬 양자 프로세서 구현(2017)

[초전도(IBM)와 이온트랩(IONQ) 예시]



* 출처: IBM, IONQ 홈페이지

□ (이온 트랩) 진공상태에 속박된 이온화 원자의 높은 결맞음 시간으로 독보적인 단일 큐비트 성능

- (미국 UMD 대학) 5큐비트 소규모 양자정보 프로세서 구현(2016)
- (오스트리아 Innsbruck 대학) 14큐비트 양자얽힘 구현(2011)
- (미국 Ion-Q) 79큐비트 시스템 개발, 11큐비트 간 이중 큐비트 게이트 동작 (ionq.com)
- (한국 SKT) 20개 이온 동시 포획 및 단일 큐비트 제어 구현

□ (위상 큐비트) 비가환 애니온(non-Abelian anyon)이라는 고체 내 준입자를 이용하는 위상 큐비트는, 땀기(braiding) 연산의 특성상 외부 잡음에 의한 영향에 대해 원천적으로 강한 양자게이트를 구현할 수 있는 장점을 보유(2020년 현재, 완전한 형태의 위상 큐비트의 구현은 이루어지지 않았으나 실험적인 단계적 발전이 이루어지는 추세)

- (네덜란드 QuTech) Majorana zero-mode 상태의 전도도 관측
- (덴마크 코펜하겐 연구소) 위상 큐비트 소자의 원형 이론적 제안
- (미국 퍼듀대학) 1/3 분수 양자홀 효과에서 anyonic braiding statistics 관측(2020)

- (반도체 양자점 큐비트) CMOS(Complementary Metal Oxide Silicon) 호환 공정과 스핀 상태의 높은 결맞음 시간을 장점으로 차세대 고집적도 큐비트 칩의 잠재력을 보유. 2020년 현재, 수 큐비트 시연 달성 및 초전도 방식의 공진기와 결합한 circuit QED 방법 시도 중
 - (호주 UNSW 대학, 네덜란드 QuTech) 실리콘 2큐비트 양자 프로세싱 구현(2015)
 - (미국 Princeton 대학) 10개 양자점 형성 및 전하 상태 제어(2019)
 - (일본 RIKEN) 반도체 2큐비트 간 비파괴 양자측정 시연(2019)
 - (한국 서울대) GaAs 3큐비트 소자의 단일 큐비트 제어 및 싱글-샷 측정
- (고체 점결합 큐비트) 2020년 현재, 7개 큐비트의 얽힘 시연(수~수십 큐비트의 양자노드와 양자노드 간 광자매개형 얽힘을 형성하는 양자 네트워크방식으로 발전)
 - (독일 University of Stuttgart) 2큐비트 양자게이트 구현⁵⁾
 - (네덜란드 QuTech) 10개 큐비트 시스템의 7큐비트 얽힘 구현⁶⁾
 - (한국 KIST) 단일 큐비트 생성/제어/측정 성공

[KIST의 상온작동 포터블 양자컴퓨터]



* 출처: KIST, 상온 작동 양자 컴퓨터 공개... '대한민국 과학기술 대전' 전시(뉴스1, 2021-12-22)

5) Philipp Neumannjohannes Beckmatthias Steinerflorian Rempphelmut Fedderphilip R. HemmerjØrg Wrachtrup And Fedor Jelezko(2010), Single-Shot Readout of a Single Nuclear Spin, Science, Vol 329, Issue 5991, pp. 542-544)

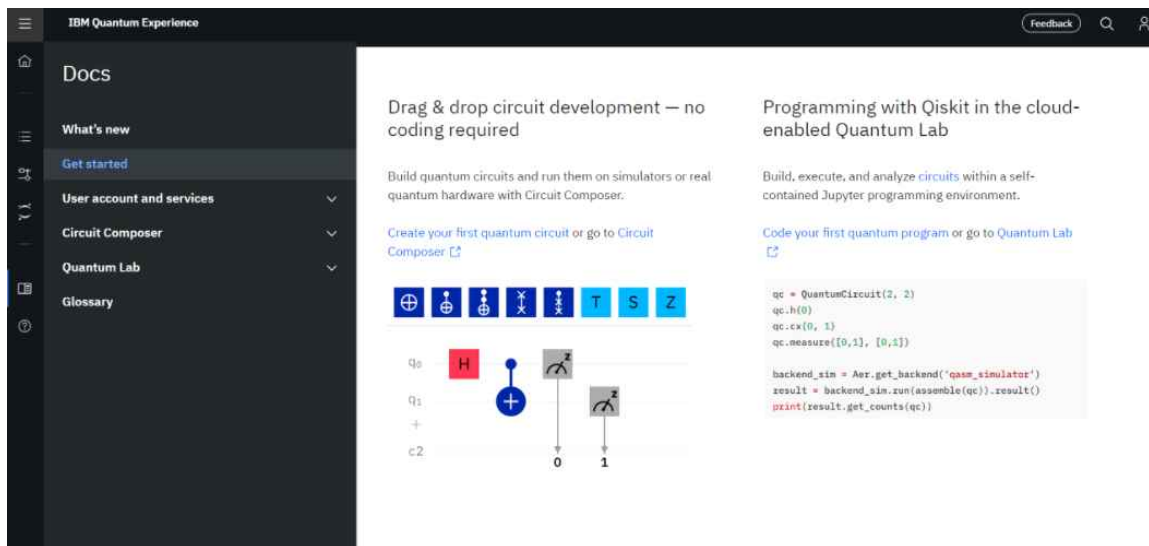
6) C. E. Bradley, J. Randall, M. H. Abobeih, R. C. Berrevoets, M. J. Degen, M. A. Bakker, M. Markham, D. J. Twitchen, and T. H. Taminiau(2019), A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute, Physics. Rev. X9, 031045

II. 기술개발 동향과 각국 지원정책

1 양자컴퓨터 핵심 플레이어

- (IBM) IBM은 2016년 5월, 5큐비트 수준의 범용 양자컴퓨터를 발표하고, 2021년에는 127큐비트 이글 프로세서를 공개하면서 양자컴퓨터 업계를 선도
 - IBM은 1,000큐비트 이상의 양자 시스템이 개발되면 슈퍼컴퓨터를 완전히 뛰어넘을 수 있다고 내다보고, 오는 2023년까지 1,121큐비트 프로세서를 출시한다고 발표
 - IBM은 글로벌 협력체인 '퀀텀 네트워크'를 통해 기술을 개발하고 활용처 등을 연구하고 있으며, 이 협력체는 포춘지가 선정한 500대 기업과 우수 스타트업, 연구소 등 170여개 회원사로 구성되어 있으며 국내 기업·기관은 성균관대, 삼성종합기술원, 카이스트(KAIST) 등이 이미 가입돼 있음
 - 클라우드 서비스인 IBM Q experience는 11개 산업파트너, 13개 허브, 30개 벤처, 34개 대학 등 총 106개 기관이 유료사용 중으로 초기 시제품에 의한 이윤창출 및 재투자의 선순환 구조 마련

[IBM Q experience 화면]



* 출처: IBM

- (구글) 구글은 2021년 5월 미국 캘리포니아에 '퀀텀 인공지능 캠퍼스'를 개소했고, 이 캠퍼스에서 2029년까지 양자컴퓨터를 제작할 것이라고 발표
 - 구글은 2019년 53큐비트 양자컴퓨터 칩을 발표하면서 기존 슈퍼컴퓨터로 푸는데 1만년 걸릴 과제를 약 200초 만에 해결하여 양자우위를 가장 먼저 달성한 기술을 보유했으며, 기업 대상 서비스형 양자컴퓨팅도 제공 중

- 구글은 현재 오류가 수정된 논리적 큐비트 2개가 함께 양자 연산을 하는 '양자 트랜지스터'를 세계 최초로 개발 중이며 몇 년 안에 완성 가능할 전망
- 구글의 목표는 2029년까지 오류 수정 양자 컴퓨터를 구축하는 것으로 이를 위해 100만 개의 물리적 큐비트를 구축해야 하는데 현재 대부분 양자 프로세서는 100큐비트 미만을 가지고 있어 상당한 기간이 소요될 것으로 예상

□ (D-Wave Systems) 캐나다에 있는 기업으로 1999년 양자컴퓨팅을 표방한 최초의 기업이자 최초의 양자컴퓨터 상용화 기업

- 2007년 양자컴퓨터 시연에 이어 2011년 세계 최초로 128 큐비트의 상용 양자컴퓨터 'D-Wave 1'을 개발하여 양산을 시작하였으며 양자컴퓨터 상용화의 발판을 마련한 선도 기업
- 'D-Wave 1' 출시 당시에는 진정한 의미의 양자컴퓨터인가에 대한 논란이 있었으나, Google과 NASA의 실험으로 특정 문제에 대해 약 1억 배 이상의 처리 속도 향상을 확인
- 2013년에는 512 큐비트의 'D-Wave 2'를 개발했고, 2015년에 1,000+ 큐비트의 'D-Wave 2X' 시스템을, 2017년에 2,000+ 큐비트의 'D-Wave 2000Q'를 개발
- 현재 핵심 파트너인 Lockheed Martin을 비롯하여 여러 연구소, 기업, 대학 등에서 D-Wave Systems의 양자컴퓨터를 사용하여 다양한 활용 잠재력을 연구 중
- D-Wave는 2020년에 양자 어닐러 클라우드 플랫폼 Leap2 발표

[디웨이브(D-Wave)의 양자컴퓨터]



* 출처: D-Wave

- (마이크로소프트) MS는 아직 큐비트를 만들지 못하고 있지만, 큐비트를 개발하는 순간 바로 49큐비트급 머신을 만들 수 있는 수준(구글과 다른 접근법을 채택)이라는 평가를 받고 있으며, 양자컴퓨터용 프로그래밍 언어인 '큐샵(Q#)'을 공개하고 개발자 생태계를 구축 중
 - 2004년 미국 캘리포니아에 설립한 양자컴퓨팅 연구소 '스테이션Q'를 포함한 8개 연구소를 통해서 현재 기후변화, 헬스케어 등 분야에 특화된 양자 기술을 연구 중
 - 개발 방식은 '위상 양자컴퓨터(Topological Quantum Computer)로 오류에 대한 내성이 높은 구조이지만, 아직 개발 초기 단계라 장기적 연구가 필요
 - MS는 양자컴퓨터를 활용한 솔루션과 시스템을 쉽게 개발하도록 관련 도구를 제공하기 위해 개발자들을 위한 클라우드 기반 양자컴퓨팅 서비스를 공급(IONQ, QCI, 허니웰의 양자컴퓨터 활용)
- (아이온큐) 한국인이 공동대표로 있는 아이온큐(IONQ)는 초저온에서 작동하는 기존 방식 대신 상온에서도 작동하는 32큐비트 양자컴퓨터를 발표
 - 2028년까지 기존 양자컴퓨터 성능을 1,024큐비트로 높일 계획으로 삼성, 현대차, 아마존, 구글벤처스 등에서 투자금을 유치하며 기술력을 인정받은 바 있음
- (아마존) 아마존은 D-Wave, 리게티, IONQ의 양자컴퓨터를 클라우드 서비스로 출시하는 등('20 하반기), 초기 시제품 수익확보 중
 - 아마존은 2021년 하반기 칼텍스 학교 부지를 임대해 연구센터를 건립하고 양자컴퓨터 연구팀을 배치하여 본격적으로 양자컴퓨터 개발을 위한 투자를 시작
- (중국과학기술대) 2021년 10월 중국과학기술대 판젠웨이(潘建偉) 원사가 이끄는 연구팀은 66큐비트의 초전도 양자 컴퓨터 '쭈충즈(祖冲之) 2.1'를 개발하는 데 성공했다고 알려짐
- (알리바바) 알리바바는 2018년 2월 클라우드에서 사용할 수 있는 11큐비트급 양자컴퓨터를 공개, 5년 이내에 미국을 넘어 세계 최고 양자컴퓨터 기업으로 거듭나겠다는 포부를 발표
- (NTT) NTT와 도쿄대, 국립 이화학연구소 등 일본의 연구팀은 2021년 빛을 사용하는 양자컴퓨터의 기반 기술인 특수한 빛의 개발에 성공했다고 발표
 - 연구팀은 2030년 실용 가능한 수준의 광양자컴퓨터를 내놓는다는 목표로 2022년부터 실제 제작에 들어갈 계획이며, 일본 정부는 양자컴퓨터 기술이 산업 경쟁력뿐 아니라 경제안보에도 영향을 미칠 수 있다고 보고 총 2,000억 엔(약 2조 원) 규모로 개발을 지원 중
- (KIST) 2012년 출연연 최초로 양자 전문 연구조직을 세우고 현재 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션, 양자 센서 등을 연구 중
 - KIST가 연구 중인 다이아몬드 활용 스핀 큐비트는 다른 방식에 비해 앞선 기술은 아니지만, 온도와 진동 등에 예민해 중첩과 얽힘 상태를 잃기 쉬운 두 방식과 달리 안정적 물질 다이아몬드를 활용해 양자의 상태를 잘 유지할 수 있을 것으로 기대되며 또 하나의 장점인 상온에서도 동작하고 빛으로도 조절 가능해 대규모 분산형 양자컴퓨터 개발 가능성이 큰 방식

2 국가별 양자기술 지원정책

- (미국) 미국 정부는 1990년대 중반부터 양자 연구를 진행하였으며, 2009년 대통령 직속 국가과학기술위원회(National Science and Technology Council)가 ‘양자정보과학 연방 비전’을 발표하는 등 양자 분야에 지속적인 관심을 기울여 왔음
 - 국가과학기술위원회가 2018년 양자컴퓨터 부문의 기술우위 확보를 위한 ‘양자정보과학 국가전략’을 발표하였고, 미국은 이를 기반으로 같은 해 「양자연구집중지원법」을 제정함으로써 국가 차원의 종합적이고 일관된 양자 연구 지원 정책 추진 체계를 갖추
 - 2018년 제정된 「양자연구집중지원법」은 양자 연구 관련 대통령 직속 기관을 신설하고 대통령에게 향후 10년간 ‘양자연구 집중지원 프로그램’(National Quantum Initiative Program)을 수립할 역할과 의무를 부여함
- (중국) 2006~2020년 ‘국가 중장기 과학기술 발전 계획’의 국가전략 6대 분야 중 하나로 양자 연구를 선정하여 연간 약 17억 1,700만 위안(약 2,970억 원)을 투자하고, 2020년 완공을 목표로 1,000억 위안(약 17조 3,000억 원)을 투자하여 세계 최대 규모의 양자정보과학국가연구소를 구축 중임
 - 중국은 이미 2015년 ‘제13차 5개년 경제개발 계획(2016~2020년)’에 양자통신 분야를 포함하고, 광섬유 양자 통신망과 위성을 이용한 양자통신 체계 구축, 양자통신을 활용한 잠수함의 위치추적 및 중력파 탐측 등 관련 연구를 진행 중
 - 중국은 2016년에는 세계 최초로 양자 위성통신인 ‘모즈(墨子)호’를 발사하고, 베이징(北京)과 상하이(上海)를 잇는 세계 최장 2천km 구간의 육상 양자 암호 통신망을 구축한데 이어 2021년 처음으로 대학에 양자 과학·기술 박사과정을 개설

['모즈(墨子)호' 발사 장면]



* 출처: 우주로 날아간 묵자(墨子)...중국, 세계 최초 양자통신 위성 '묵자호' 발사 성공(경향신문, 2016.08.16.)

- (일본) 2016년 양자과학기술연구개발기구를 설립하고 2017년부터 양자 비약 플래그십 프로그램(Quantum Leap Flagship Program, 이하 'Q-LEAP')을 시작함⁷⁾
 - Q-LEAP 프로그램에 2018년부터 10년간 220억 엔(약 2,400억 원) 규모를 투자하고, Q-LEAP의 2020년 예산을 전년 대비 2배 넘게 증가시킴
 - 2018년부터 양자기술과 관련한 전문가 회의를 시작해 2019년 내각부가 발표한 일본의 미래 발전 전략인 '종합 이노베이션 전략 2019'에 양자기술 추진 내용을 반영하고 지속적으로 양자기술 발전과 관련한 민간기업과 학회의 의견을 반영해 2020년 1월 '양자기술 이노베이션 전략'을 책정하고 적극적인 양자기술 육성을 위한 적극적인 정책을 책정
 - '양자기술 이노베이션 전략'에서 가장 중점적으로 진행한 내용은 중점영역 설정과 주요 거점을 설립하는 것으로 양자기술 중 중점적으로 발전시킬 분야를 '주요 기술 영역'으로 설정하고 양자기술을 융합해 새로운 기술로 발전할 가능성이 높은 분야를 '양자 융합 이노베이션' 영역으로 설정해 로드맵을 설정
- (EU) 2016년 정부와 산·학·연이 함께 양자 연구 목표를 설정한 양자 성명서를 발표한 후 2018년 양자 플래그십을 출범하여 양자 연구 프로젝트를 추진하고 있음
 - EU는 '제2의 양자혁명 선도'라는 캐치프레이즈를 내세우며 2018년 10월 오스트리아 비엔나에서 '퀀텀 플래그십(양자대표기구, <https://qt.eu/>)'을 출범시키고 이를 통해 양자 기술 분야에 2018년부터 2028년까지 10년간 10억 유로의 예산을 투입할 계획
 - 퀀텀 플래그십은 유럽 전역의 학계, 산업계 양자 기술 전문가 5천여명과 각국의 정부 기관이 참여하는 대규모 프로젝트로 통신, 컴퓨팅, 센싱, 시뮬레이션 총 4개 분야에서 20개 프로젝트에 1억3천만 유로를 지원하여 양자 기술을 집중 육성하겠다는 목표
- (영국) 2014년부터 5년간 지원하였던 4개의 양자 중심 대학에 대한 지원을 5년 연장하고, 이와 별도로 국립양자컴퓨팅센터, 박사급 교육센터 등에 약 3억 2천만 파운드(약 5,040억 원)를 투자함

7) 미래 양자기술 경쟁을 준비하는 일본(KOTRA해외시장뉴스,2021-06-08)

3 우리나라의 양자 기술 연구개발 투자전략

- 정부는 2021년 4월 과학기술정보통신부 장관이 주재하는 제17회 과학기술관계장관회의를 개최하고, 『양자 기술 연구개발 투자전략』을 확정
- (전략 주요 내용) ‘디지털을 넘어 퀀텀의 시대로’를 비전으로 정하고, ‘2030년대 양자 기술 4대 강국 진입(초 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화)’을 목표로 설정
 - (도전적 원천 연구 강화) 양자컴퓨터 상용화에 필요한 양자 프로세서, 알고리즘, 오류보정, 응용 SW 등 4대 핵심 요소기술에 집중 투자하고, 50큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP: Korea Quantum Innovation Platform)을 조기 구축(‘22~‘24)하고, 단계적으로 고도화할 계획
 - (전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축) ‘30년 양자 핵심인력 1,000명 확보를 목표로, 이론-실습-(기업)프로젝트를 통합 제공하는 박사급 전문과정을 개설·운영하고, 양자분야별 전문인력 및 시설을 보유한 출연(연)을 중심으로 허브(Hub)를 지정하고, 대학과 산업계가 협력기관(Spoke)으로 참여하여 연계·협력할 수 있도록 지원할 예정
 - (특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화) 고비용·고사양 장비 및 최상의 공정기술을 보유한 양자 전용 팹(파운드리)을 신속히 구축하여 산학연 공동 활용을 지원하고, 알고리즘에 대한 연구·검증 지원을 위해 양자컴퓨터를 모사하는 양자가상머신을 구축·제공(‘21~)할 계획
 - (양자 기술의 활용 및 산업 혁신 촉진) 산학연이 참여하는 민·관 파트너십(PPP)을 구성·운영하여, 학문적 난제, 산업혁신, 공공·사회 문제 등 양자 기술의 적용이 가능한 난제를 발굴하고, “Q-플래그십 프로젝트”를 통해 난제를 해결하여 경제·사회적으로 유용한 성과 사례 창출을 지원할 계획

[양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략 개요]



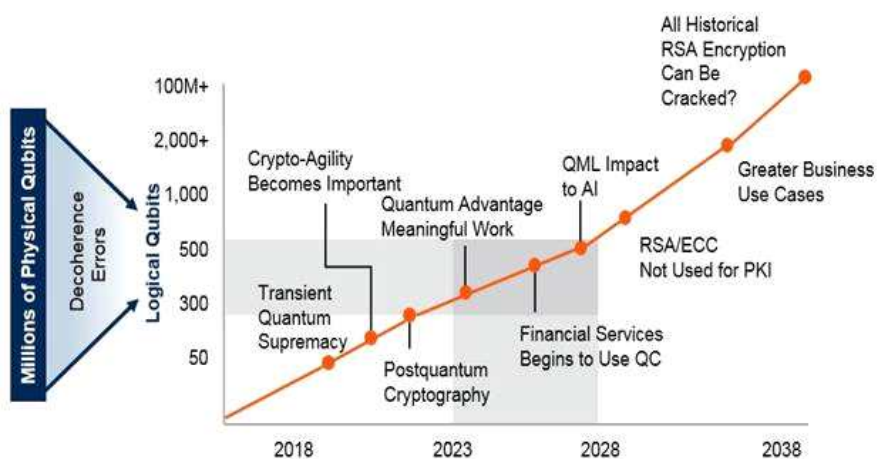
* 출처: 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략(과학기술정보통신부, 2021.04.)

III. 양자컴퓨터의 전망

1 양자컴퓨터가 바꿀 미래⁸⁾

[가트너가 예상한 양자컴퓨터 발전의 타임라인과 활용 범위]

Qubit Timeline Estimates



* 출처: Gartner, 2018

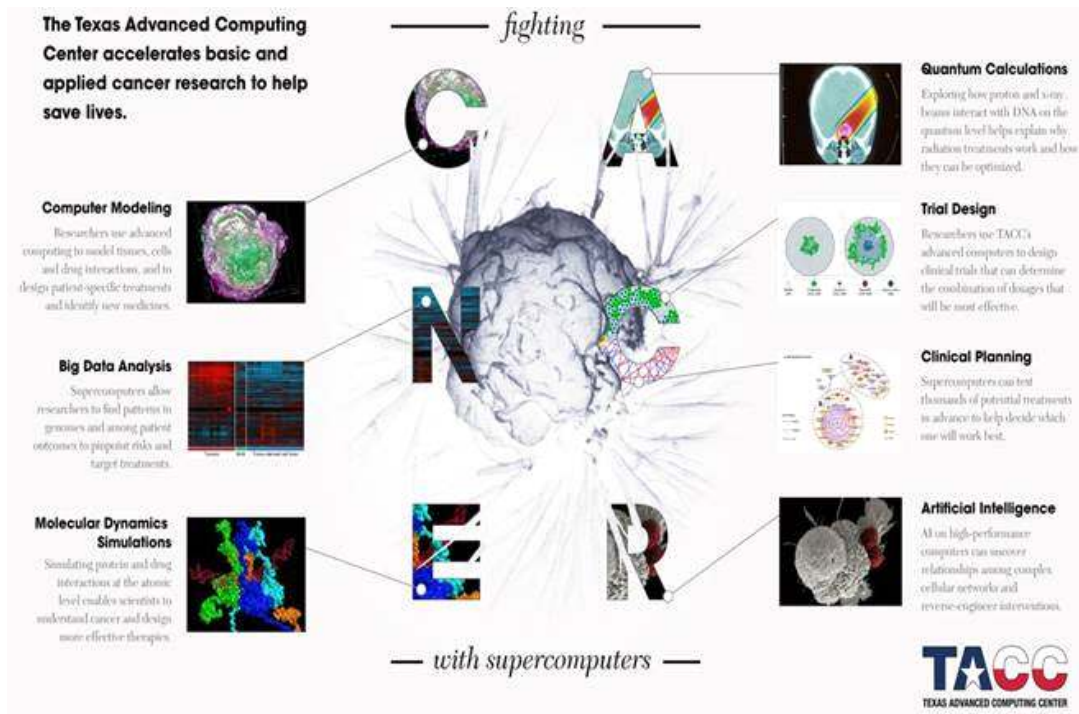
□ (의료) 신약개발과 맞춤형 치료 등 다양한 문제해결에 활용될 가능성

- 미래의 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터보다 훨씬 정확하게 복잡한 분자의 상호작용을 시뮬레이션 할 수 있어 약 후보물질의 효과를 예측하기가 수월해져 신약 개발이 가속화될 가능성이 높음
- 캐나다 스타트업인 프로테인 큐어(ProteinQure)는 현재 양자컴퓨터를 사용해 단백질이 체내에서 어떻게 입체구조가 되는지를 예측할 수 있는데 이것은 기존 컴퓨터에서는 매우 어려운 작업이지만, 양자 컴퓨터를 활용하면, 유호한 단백질을 기반으로 약을 더 쉽게 개발할 수 있을 것으로 기대
- 인간 게놈 해독에 필요한 비용이나 자원을 줄이는 과제는 이미 많은 진전을 거두고 있는데, 고성능의 양자컴퓨터는 이 데이터를 훨씬 빠르게 분류할 수 있기 때문에 게놈 해독의 효율성은 더 나아지고 규모를 확대하기도 쉬워져서 각각의 환자에 맞는 치료 계획을 세울 수 있게 되거나 보다 우수한 맞춤의료를 제공하는 것도 가능해질 전망
- 미국 머크그룹의 벤처 부문은 지난해 9월 양자 계산에 필요한 소프트웨어를 개발하는 자파타 컴퓨팅(Zapata Computing)의 투자 유치 시리즈B(조달금액 3800만 달러)에 참가했고, 미국 바이오 제약사 바이오젠은 캐나다 양자 소프트웨어 개발사 1Q비트(1Qbit), 미국 컨설팅사 액센츄어 등과 손잡고 분자를 비교하는 플랫폼을 개발해 신약 개발 속도를 높이는 중

8) 양자컴퓨터가 가져올 산업 혁신(테크큐브, 2021.03)을 참고하여 재편집

- 암 치료 방법을 연구하고 있는 텍사스 대학의 TACC(Texas Advanced Computing Center)의 모랄레스 (Morales)는 Stampede라는 슈퍼컴퓨터에서 양자 역학 계산 모델을 사용해 양성자 - 암-치료 화학 반응에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실행함으로써 암 환자의 생명이나 건강에 해를 끼치지 않는 최적의 방사선 산출량 및 그 기본 원리에 대해 연구하고 있는바 향후 양자 컴퓨터를 적용한 결과가 기대됨

[TACC의 암 치료 접근 방법]



* 출처: TACC

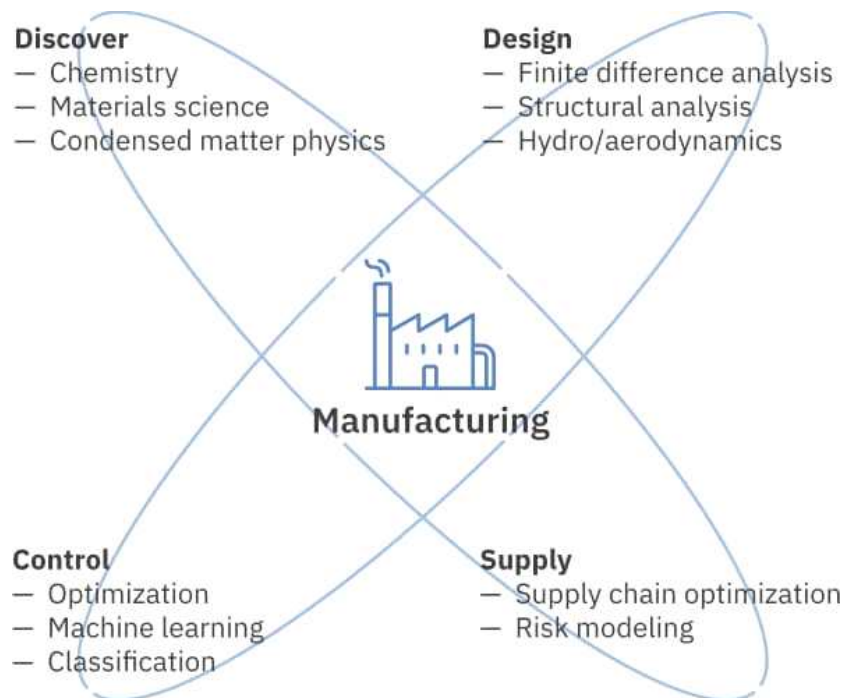
□ (금융) 포트폴리오 구성과 최적 수익 모델 구축에 활용될 가능성이 높음

- 금융 애널리스트는 양자컴퓨터로 데이터 분석을 신속히 처리하고 더 나은 예측 모델을 실행하고 충돌할 가능성을 보다 정확하게 비교 검토함으로써 예측의 정확도를 높일 수 있으며 포트폴리오의 리스크 최적화와 같은 복잡한 문제를 푸는 것도 가능
- 미국 IBM은 2020년 금융 리스크 평가에서 금융 예측 모델의 리스크나 불확실성의 영향을 평가하는 도구인 기존의 몬테카를로 시뮬레이션보다 우수한 결과를 보여준 양자 알고리즘에 관한 연구를 발표
- 영국 너트웨스트 그룹(구 RBS), 호주 커먼웰스은행, 골드만삭스, 씨티 그룹 등 많은 금융 기관은 양자컴퓨팅 스타트업에 출자 중이며, 너트웨스트의 경우 1Q비트가 개발한 양자 알고리즘을 사용해 부실채권 처리에 필요한 비용의 계산 시간을 몇 주에서 초 단위로 단축하는 데 성공했다고 알려짐

□ (제조) 제품과 공정을 설계하거나 품질문제 해결 등 최적화 문제에서 활용 가능

- IBM은 자사 양자컴퓨터를 제조업에서의 주요 용도로서 소재 과학이나 제어프로세스의 분석, 리스크 모델 구축 등을 제시
- 에어버스는 2015년에 양자컴퓨팅 부문을 신설했을 뿐 아니라 양자 소프트웨어 개발사인 미국 QC웨어(QC Ware)와 양자컴퓨터 제조업체 미국 아이온Q(IonQ)에 출자
 - 에어버스가 주목하고 있는 분야 중 하나는 ‘양자 어닐링’ 방식의 양자컴퓨터를 디지털 모델 구축이나 재료 과학에 활용하는 것
 - 예를 들어, 일정한 성능을 가진 양자컴퓨터는 방대한 변수를 신속하게 선별해 가장 효율적인 비행기 날개의 디자인을 결정하는데 기여

[IBM이 제시하는 제조업의 양자컴퓨터 활용 가능성]



* 출처: 양자컴퓨터가 가져올 산업 혁신(테크큐브, 2021.03)

□ (정보보안) 보안분야는 양자컴퓨터 시대의 핫이슈

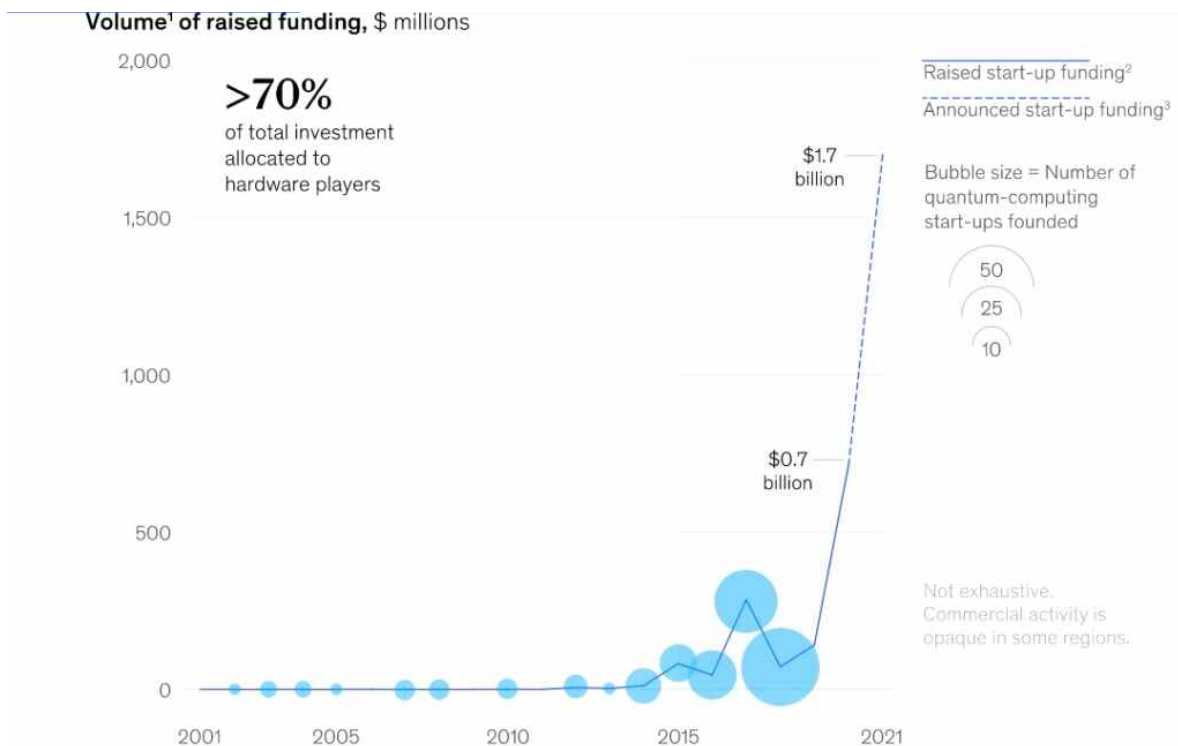
- 1990년대 이론화된 양자 알고리즘 ‘쇼어 알고리즘’은 고성능 양자컴퓨터가 큰 정수의 소인수를 빠르게 찾을 수법을 제시하고 있으며 이것이 현실화 되면 현재 널리 사용되고 있는 ‘RSA 암호’ 등의 암호기술은 고성능 양자컴퓨터에 쉽게 뚫릴 수 있기 때문
- 한편 ‘포스트 양자암호’로 총칭되는 새로운 암호화 기술을 개발해, 이 위협에 대처하려는 기업도 나오고 있으며 이런 기술의 대부분은 고성능 양자컴퓨터로도 해독이 어려운 문제를 만들어내 양자컴퓨터에 대한 내성이 강해지도록 설계

- ‘양자 키 배송(QKD)’이라는 새로운 기술은 양자 역학의 원리를 이용해 암호 키를 전송함으로써 안전성을 유지
 - 양자 시스템은 측정되면 상태가 바뀌기 때문에 제3자가 QKD 통신을 듣는 경우 감지할 수 있기 때문에 양자컴퓨터를 조종하는 해커도 정보를 훔칠 수 없음
 - QKD는 현재 유효 거리(현재 QKD 네트워크의 대부분은 아주 작다) 등 실용 면에서의 과제가 있지만, 조만간 산업의 하나로 성장할 것으로 기대
- (물류) 국제 배송 경로와 공급망의 조정은 매우 복잡하고 방대한 변수가 있음을 감안할 때, 양자컴퓨팅이 물류 과제의 해결사로 기대
 - 독일 DHL은 이미 소포의 포장을 간소화하고 세계의 배달 경로를 최적화하기 위해 양자컴퓨터에 주목하고 있으며 주문 취소나 재배달 등의 변화에 유연하게 대응할 수 있다고 판단
 - 독일 폭스바겐은 2020년 양자컴퓨터 업체 캐나다 D웨이브 시스템즈와 손잡고 포르투갈 리스본에서 버스의 주행 경로를 최적화하는 실증 실험을 실시
 - 각 버스에는 교통상황 변화에 따라 실시간으로 업데이트되는 별도의 경로가 할당됐으며, 폭스바겐은 이 기술을 상용화할 계획
- (인공지능) 양자컴퓨터는 대규모 데이터셋을 분류하고 복잡한 모델을 시뮬레이션하며 최적화 문제를 고속으로 해결
 - 양자컴퓨팅을 이용한 AI는 컴퓨터비전(영상에서 다양한 정보를 얻는 기술)이나 패턴 인식, 음성 인식, 기계 번역 등 다양한 도구를 진화시키는 것이 가능
 - 구글은 기존의 컴퓨팅과 양자컴퓨팅을 결합한 기계학습 툴의 개발에 착수했다고 발표
 - 양자소프트웨어 개발업체 자파타도 최근 단기적으로는 양자컴퓨터를 이용한 기계학습 ‘양자 기계학습’이 양자컴퓨터에 있어 상업적으로 가장 유망한 활용 분야의 하나가 될 것이라는 견해 제시
- (블록체인) 양자컴퓨터는 블록체인에게는 큰 위협
 - 양자컴퓨터에 해독되는 암호화 방식을 사용해 거래를 완료하고 있기 때문에 블록체인 기술과 비트코인이나 이더리움 등의 암호화폐(가상화폐)도 양자컴퓨터의 암호해독이 가능할 가능성이 있음
 - 딜로이트의 분석에 따르면, 비트코인의 약 25%는 양자컴퓨팅의 위협에 노출되기 쉬운 방식으로 저장돼 있어, 양자컴퓨터를 조종하는 해커에게 쉽게 도난당할 가능성
 - 고성능 양자컴퓨터가 개발되면 네트워크의 다른 참가자가 인식하는 것보다 먼저 거래의 암호가 해독돼 거래에 지장이 생기고 분산시스템의 안정성이 무너질 우려도 존재
 - 비트코인과 이더리움 등 기존 네트워크는 개량 버전용 양자 대책을 시도
 - 이것은 ‘양자저항거래장부(QRL)’라는 새로운 블록체인 방식으로 양자컴퓨터에 대항하기 위해 개발이 진행
 - 미국 큐시큐어(QuSecure)나 불가리아 카이세크(Qaisec) 등의 스타트업은 기업용 양자저항 블록체인 기술을 개발

2 양자컴퓨터의 시장 전망

- 맥킨지는 2021년 12월 발표한 보고서에서 양자컴퓨터를 통해 2022년 기업들이 창출해 낼 가치는 약 800억 달러로 100조 원에 육박⁹⁾
 - 양자컴퓨터는 아직 신생 분야이기 때문에 현재 기초 연구를 위한 자금은 대부분 정부 주도로 이루어짐
 - 중국은 양자컴퓨터 개발에 약 15조 원을 투자한다고 밝혔고, 이는 전세계에서 가장 큰 규모이며, 2위는 EU로 양자컴퓨터에 약 7조 2,000억 원을 투입한다는 계획을 공개했고 그 뒤로 미국이 1조 3,000억 원, 영국이 1조 2,000억 원 등으로 집계
 - 2021년 글로벌 양자컴퓨터 스타트업의 투자액 규모는 약 17억 달러로 집계되었으며, 이는 2020년 대비 두 배 이상 늘어난 수치로, 양자컴퓨터 기술이 상용화될수록 민간 기업 투자는 더욱 늘어날 것으로 예상
 - 맥킨지는 양자컴퓨터의 상용화를 위해선 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 기술이 빠르게 발전해야 한다고 분석했고, 특히 하드웨어의 경우 큐비트 수를 늘리고, 오류가 없는 형태로 개발돼 '내결함성' 양자컴퓨터가 구축되어야 할 것으로 예상

[맥킨지가 추산한 양자컴퓨터 투자 규모]



* 출처: 맥킨지

9) Quantum computing use cases are getting real—what you need to know(Mckinsey, 2021)

- ☐ 맥킨지는 양자컴퓨터 생태계를 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 기반 서비스, 산업 사용사례 등에 대해서 전망
- 하드웨어 측면에서 가장 중요한 것으로 충분한 수준의 큐비트 품질을 달성하면서 양자 컴퓨터에서 큐비트 수를 확장하는 문제를 제시
 - 하드웨어는 또한 자본, 실험 및 이론 양자 물리학 경험, 깊은 지식, 특히 구현을 위한 관련 옵션에 대한 영역 지식의 드문 조합이 필요하기 때문에 진입 장벽이 높다고 주장
 - 소프트웨어 중심 스타트업의 수가 양자 컴퓨팅 가치 사슬의 다른 어떤 부문보다 빠르게 증가할 예정
 - 현재 맞춤형 서비스를 제공하고 있는 업체가 더 성숙해지면 툴킷 서비스 개발을 목표로 할 것이고, 양자 컴퓨팅 소프트웨어가 계속 발전함에 따라 조직은 소프트웨어 도구를 업그레이드하고 궁극적으로 완전한 양자 도구를 사용할 수 있게 될 것
 - 개인 또는 모바일 양자 컴퓨팅은 당장은 불가능하기 때문에 결국 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 서비스는 생태계에서 가장 가치 있는 부분이 될 수 있으며 이를 제어하는 사람들에게 엄청난 보상을 제공할 가능성이 높음
 - 대부분의 클라우드 컴퓨팅 서비스 제공업체는 이제 플랫폼에서 양자 컴퓨터에 대한 액세스를 제공하므로 잠재적 사용자가 기술을 시험적용하면서 다양한 경험을 제공
 - 맥킨지는 양자컴퓨터가 제약, 화학, 자동차 및 금융 분야에서 약 3,000억 달러에서 7,000억 달러의 가치 창출을 가져다줄 것으로 전망
 - 신약을 개발하기 위해선 약 10년 이상의 시간과 약 20억 달러의 비용이 소요되는데, 표적 식별, 약물 설계 및 부작용 테스트의 시행착오를 크게 줄일 수 있어 강점이 있다고 주장
 - 화학 분야에선 촉매 설계에 양자컴퓨터를 도입하여 화학 물질의 R&D 기간을 단축하거나, 공급망 최적화 개선에 이바지할 수 있다고 주장
 - 자동차 산업의 경우 효율적인 제조 프로세스를 도입해 자동차의 R&D, 제품 설계, 공급망 관리, 생산 등 다양한 분야에서 혁신이 가능
 - 금융 분야에선 예컨대 대출 기관의 경우 담보에 초점을 맞춘 효율적으로 양자 최적화된 대출 포트폴리오를 통해 대출 상품을 개선하여 이자율을 낮추고 자본을 확보할 수 있는 등 다양한 적용이 가능
- ☐ IDC(International Data Corporation)의 2021년 11월 보고에 따르면 세계 양자 컴퓨팅 시장에 대한 양자 컴퓨팅에 대한 고객 지출이 2020년 4억 1,200만 달러에서 2027년 86억 달러로 2021-2027년 예측기간 동안 50.9%의 CAGR로 성장할 것으로 예측
- 예측에는 서비스로서의 핵심 양자 컴퓨팅과 서비스의 활성화 및 양자 컴퓨팅 주변 장치가 포함
 - 양자 컴퓨팅 기술의 주요 혁신, 서비스 인프라 및 플랫폼 시장으로서 성장하는 양자 컴퓨팅, 양자 기술에 적합한 성능 집약적 컴퓨팅 워크로드의 성장이 시장 성장의 대부분을 주도할 것으로 예상
- ☐ IDC는 또한 양자 컴퓨팅 시장에 대한 투자가 6년 CAGR(2021-2027) 11.3%로 성장하여 2027년 말까지 거의 164억 달러에 이를 것으로 예상
- 여기에는 공공 및 민간 자금 지원 기관의 투자, 전 세계 정부 지출이 포함. 기술 및 서비스 공급업체의 내부 할당(R&D 지출), 벤처 자본가 및 사모 투자 회사의 외부 자금 지원.

3 양자컴퓨터의 해결과제

- 현재의 양자컴퓨터 개발은 여러 선도 기업의 약진에도 불구하고 아직 태동기로 볼 수 있으며 많은 해결 과제가 있음.
 - 현재의 양자컴퓨터는 연산오류에 자유롭지 못하므로 실제 계산결과의 신뢰도가 낮아서 상업적 성공 여부에 대해 많은 우려가 있음
 - 양자컴퓨터가 실제로 유용한 일을 하기 위해서는 무엇보다 결맞음 시간(Coherence Time) 증가, 구현 큐비트 수 증가, 에러율 감소, 양자통신과 융합을 통한 양자컴퓨팅 네트워크 구현 문제 등
 - 양자컴퓨터 개발에 많은 시간과 자원을 들여 어렵게 양자컴퓨터를 완성해도 응용분야를 발굴·확장하고 유용성을 밝혀내지 않으면 활용 가능성이 없어서 사장될 수도 있음
 - IBM, Google, NTT, Alibaba 등 선행 기업들은 클라우드 플랫폼 기반으로 양자컴퓨팅 프로그래밍과 다양한 테스트를 할 수 있는 서비스를 시작했거나 제공할 계획
- 모든 분야에 활용 가능한 범용 양자컴퓨터 개발을 위해서는 큐비트 약 100만 개가 필요한 것으로 예상하고 공학적으로 의미 있는 양자우위가 되기 위해서는 1,000큐비트가 필요하다고 알려지는데 큐비트 수를 늘리는 것도 어렵지만 같이 증가하는 에러를 보정하는 것이 큰 어려움
 - 현재 글로벌 기업들에서는 100개 이상까지 가는 큐비트 양자 컴퓨터를 개발하고 있고, 2023년 혹은 직후에 1,000개, 국내에서는 2026~2027년쯤 50개의 큐비트를 구현하는 것을 목표로 진행 중
 - IBM이 2021년 '3D 패키징', '멀티 레벨 와이어링' 등 신기술을 적용한 이글프로세서를 공개하면서 2023년 진정한 양자우위를 달성하겠다고 주장
 - D-Wave는 2020년 5,640 큐비트 양자컴퓨터를 발표했는데, 이것은 최적화에 특화되어 설계된 양자어닐링 칩으로 구현되었기 때문에 진정한 의미의 범용 양자컴퓨터로 인정하지 않는 분위기이지만 현재 NASA, 구글, 록히드마틴 등 여러 회사들에서 실제로 사용되고 있음
 - 큐비트 숫자를 늘리기 어려운 것은 숫자가 많아지면 작동 어려움이 올라가기 때문에 큐비트 칩을 아무리 잘 만들어도 그 자체만으로 에러를 잡기 힘들. 이런 근원적인 문제를 갖고 있다 보니 양자컴퓨터의 성능향상이 제약됨
 - 위스콘신 대학, 하버드 대학 등은 중성원자 기반 큐비트 기술을 개발 중인데 양자연산 중 오류발생가능성이 상대적으로 낮을 것이라는 기대를 모으고 있음
 - 양자컴퓨터의 성능을 비교하는 데도 단순히 큐비트 개수만이 아니라 양자 연산을 해낼 수 있는 횟수까지 고려한 양자부피 등 다양한 척도가 개발되고 있는 중
 - IBM은 양자 컴퓨팅 하드웨어의 발전 상황을 양자의 크기, 품질 및 속도의 세 가지 성능 속성을 통해 측정

- 양자는 어느 정도 작동하다가 불안정한 상태를 보이는 특성 때문에 불안정함을 줄이고 안정된 상태인 결맞음 시간을 늘리는 것이 매우 중요
 - 고전컴퓨터는 전류의 흐름을 통제하는 것만으로 기초 연산자인 비트를 제어할 수 있었지만, 양자역학적 현상을 일으키는 큐비트를 만들어서 제어하는 것은 매우 어려운 문제
 - 큐비트는 극단적으로 불안정하여 외부 잡음에 의해서 오류가 쉽게 일어나기 때문에 보통 초저온 및 밀폐된 구동 환경이 필요하며, 현재의 양자 프로세서는 단일 큐비트가 아닌 여러 비트를 조합해 오류에 대응
 - 큐비트는 미세한 온도 변화나 소음, 진동만으로도 에너지가 누출되어 연산에 실패하는 ‘결잃음(decoherence)’상태에 빠질 수 있는데, 큐비트 수가 증가할수록 큐비트를 ‘얽힘’상태로 유지하는 것이 어려워져, 단지 큐비트 개수를 넘어 양자컴퓨팅 시스템 전체 오류율이 충분히 낮아야 함
- 양자게이트 기반 양자컴퓨터는 IBM 등의 노력으로 큐비트 수가 증가해왔으나 최근에는 큐비트 증가보다는 동작 안정성, 오류 정정 등에 집중하는 분위기
 - 양자컴퓨터가 고전컴퓨터보다 우수한 성능을 가지는 것을 증명하는 것으로, 전문가들은 양자컴퓨터가 고전컴퓨터를 앞서는 기준으로 50큐비트 이상을 제시
 - 최근 발표되는 100큐비트급 양자컴퓨터들은 큐비트를 물리적으로 만들어 나열은 했지만, 실제 활용 가능한 계산장치를 구현했다고 보기는 어려워 상용화는 요원한 상황
- 장기적으로 양자 컴퓨터 개발에서 중요한 것 중 하나는 대규모의 큐비트를 제어하는 시스템을 개발하는 것
 - 극저온에서의 반도체 소자는 높은 임계 전압, 더 낮은 출력 저항 등 여러 원치 않는 상황에 직면하고 반도체 소자의 자체 발열, 푸아송 잡음 및 플리커 잡음은 제어 신호의 동기화와 큐비트 측정에서의 오류를 악화시킴
 - 현재의 거대한 전자장비와 케이블을 줄이고 위와 같은 여러 어려움을 해결하기 위한 양자 칩과 같거나 비슷한 온도에서 동작하는 제어 칩을 설계하는 방향으로 제어기술에 대한 연구가 진행 중
 - 이미 Google, Intel, Microsoft 등 수많은 세계적 기업들은 극저온 양자 제어 칩 개발에 많은 연구개발을 진행 중
- 양자컴퓨터용 OS나 언어 등에 대한 표준을 장악하기 위한 개발 진행 중
 - 최초 양자컴퓨터 운영체제는 지난 2015년 영국 케임브리지 연구진이 개발
 - 이후 미국 스탠포드대 연구진 등이 다른 운영체제도 개발하면서, 미국 연구팀들이 양자컴퓨터를 위한 차세대 응용 프로그램을 구축할 수 있는 기반을 다짐
 - 중국 양자컴퓨팅 스타트업 ‘오리진 퀀텀(Origin Quantum)’이 중국의 첫 자체 개발 양자컴퓨터 운영체제(OS) ‘오리진 파일럿 OS(Origin Pilot OS)’를 공개

IV. 결론 및 시사점

- (양자컴퓨터의 특징) 기존 디지털 컴퓨터로 해결이 어려운 문제를 풀 수 있는 강점을 보유
 - 1,000 비트 숫자(300자리 정수)를 소인수 분해하는 데에 기존 컴퓨터로 백만 년이 걸릴 계산을 양자컴퓨터는 성능에 따라 1초~하루 정도의 시간에 계산
 - 머신러닝의 비지도 학습에서 그룹을 식별하기 위한 탐색적 자료 분석으로, 클러스터링(clustering)을 수행할 때 양자컴퓨터는 큰 힘을 발휘할 것으로 판단
 - 물류, 화학, 제조 등 다양한 분야에서 나타나는 최적화 문제를 해결할 때 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터에 비해 월등한 성능을 보일 것으로 추정되며, 현재 일부 상용화되고 있음
- (양자컴퓨터 현황) D-Wave가 2007년 양자컴퓨터를 시연한 이래 큰 발전이 있었으며, 2019년 7월 구글은 자체개발한 시카모어 프로세서가 양자 우위를 달성했다고 발표
 - 2021년 IBM은 이글 프로세서를 발표하면서 양자 컴퓨터가 유용한 애플리케이션에서 일반 컴퓨터를 능가하는 시대로 가는 데 있어 중요한 이정표라고 주장
 - 구글은 2021년 5월 미국 캘리포니아에 '퀀텀 인공지능 캠퍼스'를 개소했고, 이 캠퍼스에서 2029년까지 양자컴퓨터를 제작할 것이라고 발표
 - D-Wave의 경우 현재 핵심 파트너인 Lockheed Martin을 비롯하여 여러 연구소, 기업, 대학 등에서 D-Wave의 양자컴퓨터를 사용하여 다양한 활용 잠재력을 연구 중
 - MS는 양자컴퓨터용 프로그래밍 언어인 '큐샵(Q#)'을 공개하고 개발자 생태계를 구축 중
 - 2021년 10월 중국과학기술대 판젠웨이(潘建偉) 원사가 이끄는 연구팀은 66큐비트의 초전도 양자 컴퓨터 '쭈충즈(祖冲之) 2.1'를 개발하는 데 성공했다고 알려짐
- (지원정책) 선진국들은 국가 경쟁력 강화 전략으로 양자기술개발을 집중 추진
 - 미국 정부는 1990년대 중반부터 양자 연구를 진행하였으며, 2009년 대통령 직속 국가과학기술위원회(National Science and Technology Council)가 '양자정보과학 연방 비전'을 발표하는 등 양자 분야에 지속적인 관심을 기울여 왔음
 - 중국은 2006~2020년 '국가 중장기 과학기술 발전 계획'의 국가전략 6대 분야 중 하나로 양자 연구를 선정하여 연간 약 17억 1,700만 위안(약 2,970억 원)을 투자하고, 2020년 완공을 목표로 1,000억 위안(약 17조 3,000억 원)을 투자하여 세계 최대 규모의 양자정보과학국가연구소를 구축 중임
 - EU는 2016년 정부와 산·학·연이 함께 양자 연구 목표를 설정한 양자 성명서를 발표한 후 2018년 양자 플래그십을 출범하여 양자 연구 프로젝트를 추진하고 있음
 - 우리정부는 2021년 4월 『양자 기술 연구개발 투자전략』을 확정하고 50큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP: Korea Quantum Innovation Platform)을 조기 구축('22~'24)하고, 단계적으로 고도화할 계획

- (전망) IDC는 2021년 11월 세계 양자 컴퓨팅 시장에 대한 양자 컴퓨팅에 대한 고객 지출이 2020년 4억 1,200만 달러에서 2027년 86억 달러로 2021-2027년 예측기간 동안 50.9%의 CAGR로 성장할 것으로 예측
- 신약을 개발하기 위해선 약 10년 이상의 시간과 약 20억달러의 비용이 소요되는데, 표적 식별, 약물 설계 및 부작용 테스트의 시행착오를 크게 줄일 수 있어 강점이 있다고 주장
 - 화학 분야에선 촉매 설계에 양자컴퓨터를 도입하여 화학 물질의 R&D 기간을 단축하거나, 공급망 최적화 개선에 이바지할 수 있다고 주장
 - 자동차 산업의 경우 효율적인 제조 프로세스를 도입해 자동차의 R&D, 제품 설계, 공급망 관리, 생산 등 다양한 분야에서 혁신이 가능
 - 금융 분야에선 예컨대 대출 기관의 경우 담보에 초점을 맞춘 효율적으로 양자 최적화된 대출 포트폴리오를 통해 대출 상품을 개선하여 이자율을 낮추고 자본을 확보할 수 있는 등 다양한 적용이 가능
- (해결과제) 큐비트 수의 증가, 결맞음 시간의 증가, 에러율 감소, 상온 작동 등 수많은 해결해야할 과제가 있음
- 현재의 양자컴퓨터는 연산오류에 자유롭지 못하므로 실제 계산결과의 신뢰도가 낮아서 상업적 성공 여부에 대해 많은 우려가 있음
 - 큐비트는 미세한 온도 변화나 소음, 진동만으로도 에너지가 누출되어 연산에 실패하는 ‘결잃음(decoherence)’상태에 빠질 수 있는데, 큐비트 수가 증가할수록 큐비트를 ‘얽힘’상태로 유지하는 것이 어려워져, 단지 큐비트 개수를 넘어 양자컴퓨팅 시스템 전체 오류율이 충분히 낮아야 함
 - 현재 글로벌 기업들에서는 100개 이상까지 가는 큐비트 양자 컴퓨터를 개발하고 있고, 2023~2024년 사이에 1,000개의 큐비트를 가진 양자컴퓨터가 등장할 것으로 예상
 - 장기적으로 양자 컴퓨터 개발에서 중요한 것 중 하나는 대규모의 큐비트를 제어하는 시스템을 개발하는 것
- (전략적 접근 필요) 정부는 기초과학과 정보기술 양측에서 미래 선도형 R&D 전략이 필요
- 2021년 ‘양자 기술 연구개발 투자전략’을 통해 기술개발 지원을 위한 활동에 착수하고 있으나 인공지능과 함께 모든 산업의 판도를 바꿀 것으로 예상되는 양자컴퓨터 분야에 정부 주도의 기술개발 집중이 필요
 - 양자컴퓨터는 새로운 ICT 패러다임을 만들어낼 기술로써 세계 최선도국 미국도 원천기술을 개발하려 적극 지원하는 분야이므로 추격형 기술개발 전략이 적합하지 않은 분야
 - 국내 양자정보기술 정책은 단기적으로도 성과가 가능한 양자통신에 집중해 왔으나, 시장규모나 파급효과가 큰 양자컴퓨터 분야에 대한 투자 확대가 필요
 - 양자정보 처리를 위한 소자 제작의 인프라 기술로 초고순도, 초고정밀도의 소재·공정기술 및 양자상태 제어기술이 필요하므로 이러한 기초과학분야에 적극적인 투자가 필요

- (인재확보 필요) IBM 등 양자컴퓨터 선도기업이 양자컴퓨터 HW·알고리즘 개발을 선도하는 R&D 허브가 되면서 인재와 지식을 흡수하는 중
 - 하버드 대학교, 중국과학기술대학교 등 해외 유명 대학교에서 양자기술관련 학과가 신설되는 중으로 우리나라도 이러한 흐름에 동참하여 인력을 적극적으로 확보할 필요
 - 국내 양자컴퓨터 기술개발 허브 확보를 통해 일류기업을 유치하고 여기에 양자기술관련 여러분야의 전문가가 모일 수 있도록 적극 지원할 필요
 - 선도국에 젊은 연구자(석·박사, Post-Doc.)를 파견하여 프로젝트·교육 등에 참여하고, 해외 석학도 대학이나 연구소로 초빙할 필요

- (소재·부품 등 기초연구) 양자정보 처리를 위한 소자 제작에는 초고순도, 초고정밀도의 소재·공정기술 및 양자상태 제어기술이 필요하기 때문에 이부분에 대한 지원도 필요
 - 일본의 수출규제에서 보듯 소재·부품의 원천기술의 필요성 강조되고 있음을 감안할 때, 양자 원천·부품 기술의 확보의 중요성 부각
 - 우리나라는 양자컴퓨팅 하드웨어 기술 뿐 아니라 소재기술에서도 후발주자이며, 양자컴퓨팅 특화 소재시장은 전무한 상태로 핵심소재 기술개발이 절대적으로 필요
 - 양자기술 실현을 위한 소재·부품개발에는 나노기술 기반의 기존 소재혁신 등이 요구되며, 이때 양산되는 기술·소재가 양자기술 외의 타 분야 발전과 연결됨을 인지하여 정책 및 투자방향 고려
 - 세계 최선도국 미국도 원천기술을 개발하려 적극 지원하는 신생분야로 양자 관련 기초과학 분야에 적극 투자 필요

- (중소기업의 참여 방안) 양자컴퓨터의 개발에는 막대한 자금과 기술력이 필요하지만, 양자 컴퓨팅을 활용한 소프트웨어나 양자컴퓨터의 구축·운영을 도울 수 있는 하드웨어 플랫폼 등의 세부적인 연구로의 접근 기회는 존재
 - 산학연계를 통한 중소기업의 소재, 부품의 개발은 국가적 차원에서도 중요하고 히든챔피언으로써 중소기업이 성장할 수 있는 새로운 기회
 - 인천 송도에 설립이 추진되고 있는 양자컴퓨팅 센터를 중소 벤처기업이 활용할 경우, 인천경제청이 예산을 보조할 계획
 - 거의 모든 산업에서 양자컴퓨터를 이용한 다양한 최적화 방안과 서비스 방안 등이 현재 연구 중이며, 여기에 중소벤처기업의 참여를 촉진할 필요가 있음
 - 양자정보통신기술을 이용한 기술 집약형 중소·벤처기업과 양자정보통신기술 기반 창업 활동의 결과물에 대해 실현 가능성이 인정될 경우 파격적 지원 필요

참고문헌

1. 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략(과학기술정보통신부, 2021.04)
2. 과학기술 한계 극복의 길을 여는 양자컴퓨터(KISTI ISSUE BRIEF, 한국과학기술정보연구원, 2019. 07.)
3. 빛의 속도로 계산하는 꿈의 컴퓨터, 양자컴퓨터(KISTEP 이슈페이퍼, 한국과학기술기획평가원, 2019. 07)
4. 인공지능, 기계학습, 딥러닝 그리고 GPU 클라우드(steemit, 2019)
5. 첫 태동부터 현재에 이르기까지... '양자컴퓨팅'의 간략한 역사 살펴보기(CIO,2020.12.01.)
6. 확장형 양자컴퓨팅을 위한 나노·소재 기술(국가나노기술정책센터, 2020.03)
7. 양자컴퓨터 개발 동향과 시사점(정보통신기술진흥센터, 2018.02)
8. 양자컴퓨터 제어 기술(전자통신동향분석, ETRI, 2021.06)
9. 미래사회의 게임 체인저 '양자 컴퓨터'(KOTRA 해외시장뉴스, 2020.02.25.)
10. 양자점 큐비트 기반 양자컴퓨팅의 국외 연구 동향 분석(전자통신동향분석, ETRI, 2020.04)
11. 양자컴퓨터가 가져올 산업 혁신(테크큐브, 2021.03)
12. KIST, 상온 작동 양자 컴퓨터 공개... '대한민국 과학기술 대전' 전시(뉴스1, 2021.12.22.)
13. 양자혁명 2.0 시대의 예고 : 양자기술과 양자컴퓨터(The Science Times, 2021.11.10.)
14. Quantum computing use cases are getting real—what you need to know (Mckinsey, 2021.12.14.)
15. IDC Forecasts Worldwide Quantum Computing Market to Grow to \$8.6 Billion in 2027(IDC, 2021.11.25.)