

2022 January | Vol. 8

01



융합연구리뷰

Convergence Research Review

탄소중립에 따른 전력 기술의 발전

박종배(건국대학교 전기전자공학부 교수)

풀 스택(Full-stack) 양자컴퓨터 기술 현황과 전망

김준기(성균관대학교 나노공학과 조교수)

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 탄소중립에 따른 전력 기술의 발전
- 37 풀 스택(Full-stack) 양자컴퓨터 기술 현황과 전망



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2022 January vol.8 no.1

발행일 2022년 1월 10일

발행인 김현우

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4977 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 디스플래닝 Tel. 02-6315-4600



탄소중립에 따른 전력 기술의 발전

2018년 인천에서 개최된 유엔 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 총회는 지구 평균 기온이 1.5°C 상승할 경우 기후위기가 발생할 것이라는 결론을 내리고 이를 방지하기 위해 2050년에는 탄소중립을 달성해야 한다는 특별 보고서를 채택했다. 미국, 유럽연합, 영국, 일본 등 전 세계 134개국에서 탄소중립을 선언하였고 우리나라도 온실가스 감축 노력에 적극 동참하고 있다. 이와 더불어, 산업 부문에서도 이산화탄소 배출량이 적은 신재생에너지, 전기자동차와 함께 지능형전력망도 미래유망 산업으로 떠오르게 되었다.

지능형전력망이란 기존의 단방향 전력망에 정보통신기술을 접목하여 실시간으로 정보를 모아 전력이 필요한 곳에 전력망에서 적시에 전달하여 전기 공급을 효율적으로 관리할 수 있게 해주는 기술이다. 에너지 효율을 향상시키고 이를 통해 탄소 배출량을 줄이는 것이 지능형전력망의 핵심이다.

우리나라는 2021년 8월, 세계 14번째로 2050 탄소중립 비전을 국가 비전으로 명시하고 이를 달성하기 위한 국가 전략, 중장기 온실가스 감축목표, 기본계획 수립 및 이행점검 등의 법정 절차를 체계화했다. 본 호 1부에서 세계 주요국의 탄소중립 달성을 위한 전력 부문의 정책과 기술에 대해 소개하며 탄소중립을 달성할 수 있기를 기대해 본다.

풀 스택(Full-stack) 양자컴퓨터 기술 현황과 전망

기술패권 경쟁 시대에 기술 주도권을 확보하기 위해 세계 각국은 첨단과학기술 개발에 사활을 걸고 있다. 양자컴퓨터는 반도체 칩 트랜지스터 1개에 0 또는 1 정보를 하나씩 저장하는 기존 컴퓨터와 다르게, 0과 1이 섞여 있는 '중첩 상태'의 큐비트(Qubit, 양자컴퓨터의 연산 단위)를 이용한다. 이를 활용하면 데이터를 동시다발적으로 처리할 수 있기 때문에 연산능력이 기하급수적으로 향상되어 기존 컴퓨터로 10억 년 걸리는 계산식을 양자 컴퓨터는 100초 만에 해결할 수 있다. 양자 컴퓨터가 차세대 계산기로 주목받는 이유이다.

풀 스택(Full-stack) 양자컴퓨터는 큐비트 플랫폼부터 양자 프로그램 언어까지 모두 아우르는 양자컴퓨터 시스템을 나타내는 용어이다. 본 호 2부에서는 양자컴퓨터와 기존 컴퓨터와의 차이점을 알아보고 풀 스택 양자컴퓨터의 다섯 가지 요소와 국내외 연구 동향 등을 소개한다.

과학기술정보통신부는 '2022년도 연구개발사업 종합시행계획'을 통해 2024년까지 50큐비트 급의 한국형 양자컴퓨터 시스템을 구축한다는 목표를 세웠다. 또한 2020년 6월에는 통신 3사(SK텔레콤, KT, LG유플러스)를 비롯해 현대자동차, SK하이닉스, LG전자, 한국전력 등 기업 25곳이 대학, 연구소들과 '미래양자융합포럼'이라는 협의체를 결성했다. 향후 발전할 양자컴퓨터 분야의 높은 잠재가치를 알아본다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 January vol.8 no.1



01

탄소중립에 따른 전력 기술의 발전

박종배(건국대학교 전기전자공학부 교수)

I 서론

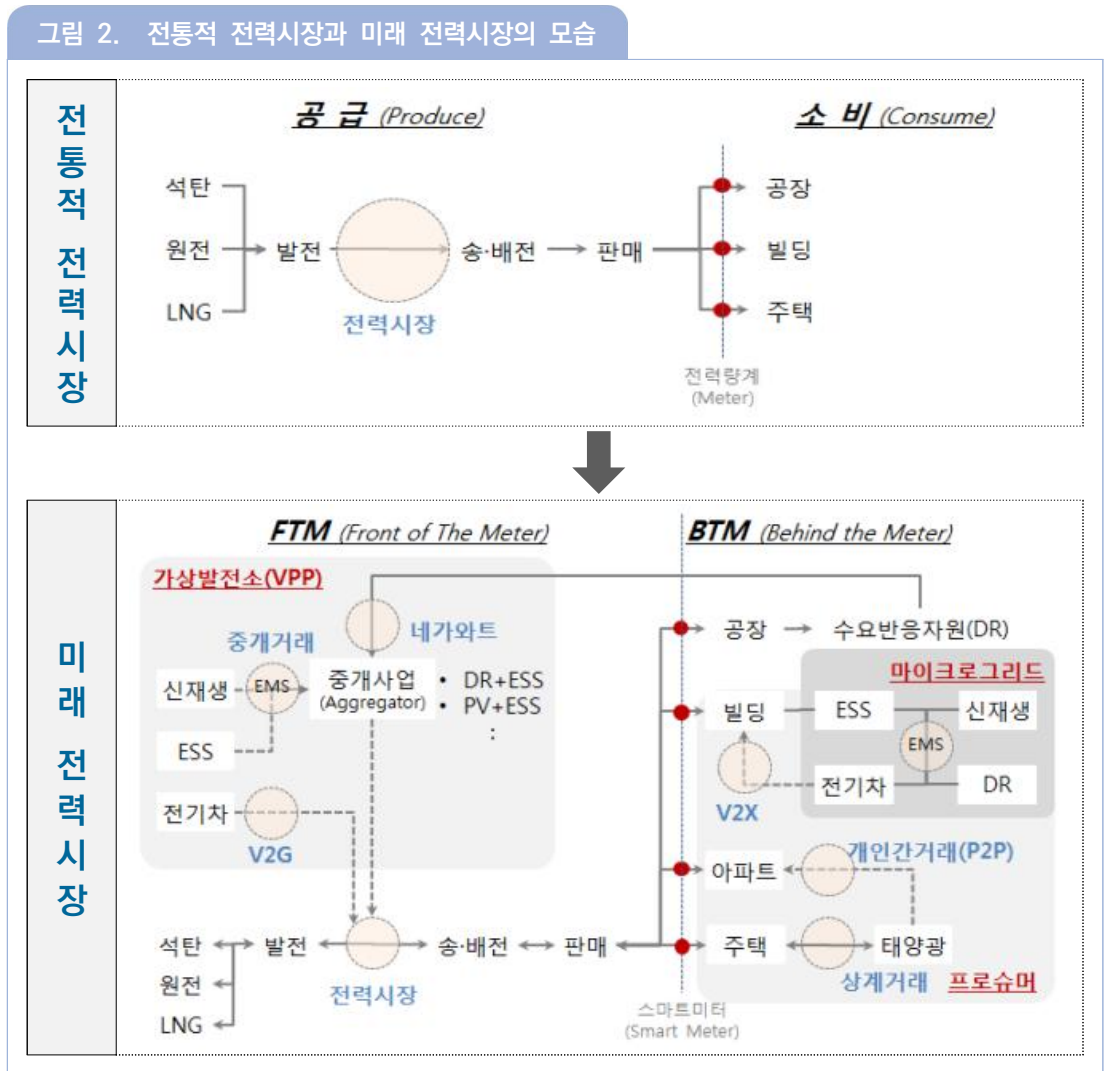
전력망(Electric Grid)이란 전기에너지를 생산하는 발전설비, 생산된 전기에너지를 소비자에게 전달하는 송전/변전/배전과 같은 수송설비, 최종적으로 전기에너지를 소비하는 부하 등 제반 전기설비로 구성되는 대규모 전기회로를 의미한다. 일반적으로 전력망은 전기설비의 물리적 구성의 관점에서 주로 사용되었지만, 최근에는 전력망의 계획, 운용 및 제어 등 시스템에 초점을 두는 전력계통 혹은 전력시스템(Electric Power System)과 구분 없이 사용되고 있다. 위키백과에서는 전력시스템을 전력 생산자로부터 전력 소비자에게 전기를 공급하기 위해 상호 간에 연결된 네트워크로 정의하고 있다(Kaplan, 2009). 전통적인 전력시스템은 수력, 원자력, 석탄, 천연가스 발전소 등과 같은 대형 발전소에서 생산된 전력이 대규모의 송배전망을 거쳐 소비자에게 일방적으로 전달되는 단방향 중앙집중적인 특징을 가지고 있었으며, 전력의 안정적인 공급과 운영은 지역을 대표하는 독점적 전력회사가 담당하였다. 그러나 최근 태양광, 풍력, 열병합 등과 같은 소규모 분산발전과 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System), 전기차 등의 보급이 늘어나 전력 소비자가 일부 공급자의 역할을 담당하기도 하여 소비(부하)와 공급(발전)의 경계가 모호해지고 있으며, 전력의 물리적 흐름도 양방향으로 변화되고 있다.

그림 1. 전통적 전력시장과 미래 전력시장의 특징

구분	전통적 전력시장(계통)	미래 전력시장(계통)
시장주체	이원화 (공급자 vs 소비자)	경계 희석 (예, 프로슈머)
전력거래	전력시장	전력시장, 전력중개거래, P2P 등
시장구조	수직적, 폐쇄적	수평적, 개방적
전력망 역할	공급망(pipeline)	플랫폼(platform)

* 출처 : 산업통상자원부(2018)

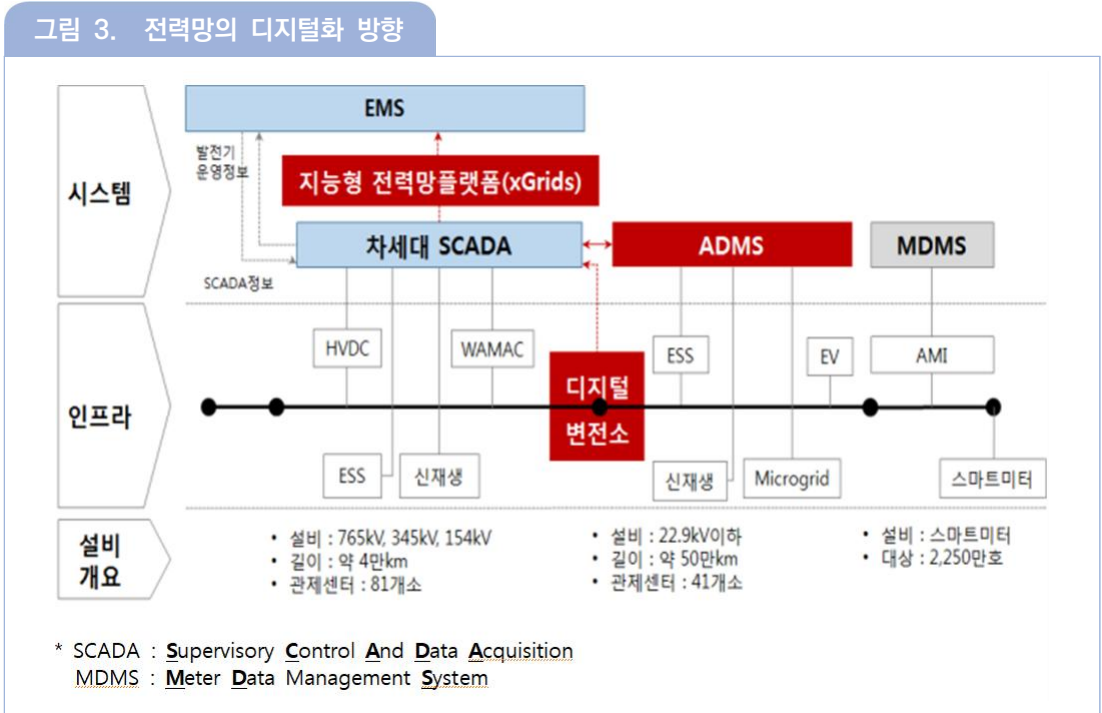
또한, 인공지능, 사물인터넷(IoT, Internet of Things), 빅데이터 등 4차 산업혁명 기반의 정보통신기술이 발전, 송배전, 수요 등 전력망 전 영역에 적용되어 전력시스템의 효율화와 안정화에 기여하고 있다. 전력거래의 방식을 결정하는 전력시장은 중앙급전 발전과 대규모 판매사업자로 구성되었지만, 최근에는 소규모 신재생발전 등을 대행하는 전력중개거래와 일부 국가에서는 개인 간 거래(P2P, Peer to Peer)까지 발전하고 있다.



* 기존 전력시스템에 포함되지 않는 전력량계 하단에 소비자가 태양광, ESS설비 등을 설치·전력을 거래하는 BTM(Behind-The-Meter 또는 Beyond-The-Meter) 시장 성장

* 출처 : 산업통상자원부(2018)

2000년 초·중반부터 미국을 중심으로 스마트그리드의 필요성에 대한 논의가 시작되었다. 당시 스마트그리드는 노후화된 전력망에 정보통신기술을 접목하여 전력공급의 효율화와 전력소비의 합리화를 유인하는 것이 주된 목적이었다. 우리나라의 '제2차 지능형전력망 기본계획'에서는 스마트그리드를 '전력망에 정보통신기술을 적용하여 전기 공급자와 사용자가 실시간으로 정보를 교환하는 등의 방법을 통하여 전기를 공급함으로써 에너지 이용효율을 극대화하는 전력망(지능형전력망법 제2조 제2호)'으로 정의하고 있다. 유사하게 한국스마트그리드사업단에서는 '기존 전력망에 정보통신기술을 접목하여, 공급자와 수요자 간 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 지능형 수요관리, 신재생 에너지 연계, 전기차 충전 등을 가능케 하는 차세대 전력인프라 시스템'으로 정의하고 있다. 즉, 전력망의 디지털화를 통하여 이를 보다 똑똑하게 하고, 안정적이고 효율적인 전력공급과 소비가 가능하도록 하는 목적에 집중되어 있었다. 관련하여 우리나라는 2010년 '국가에너지로드맵' 수립, 2011년 '지능형전력망 구축 및 이용촉진에 관한 법률' 제정, 2012년 '제1차 지능형전력망 기본계획(2012-2016)' 수립, 2018년 '제2차 지능형전력망 기본계획(2018-2022)' 수립 등을 추진하였다. 또한, 2009년부터 2013년까지 대규모 제주 실증사업(지능형검침인프라(AMI, Advanced Metering Infrastructure), 신재생, 전기차, 에너지저장장치(ESS), 가상전력시장)를 추진하였으며 병렬적으로 K-MEG(Korea Micro Energy Grid) 사업(빌딩 및 산업단지 EMS)을 추진한 바 있다. '제2차 지능형전력망 기본계획'에서는 신재생 보급을 중심으로 하는 에너지전환 시대에 소비자가 중심이 되는 전력시장 생태계 구축을 방향으로 설정하고, 주요 정책과제로 1) 스마트그리드 新서비스 활성화, 2) 스마트그리드 체험단지 조성, 3) 스마트그리드 인프라·설비 확충, 4) 스마트그리드 확산 기반 구축 등을 설정하였다. 이를 바탕으로 전력망의 디지털화는 전력계통과 전력시장, 송전, 변전, 배전, 신재생, 저장장치, 전기차 등으로 확대되어 추진되고 있다.



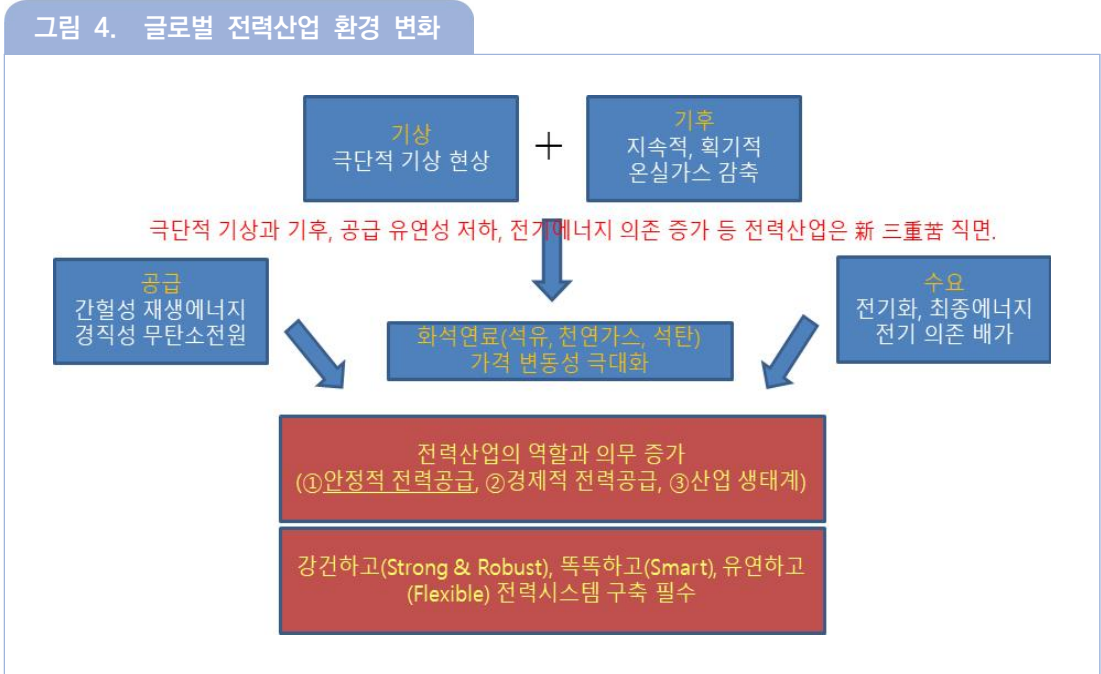
* 출처 : 산업통상자원부(2018)

최근에는 우리나라를 포함하여 글로벌 탄소중립 추진이 본격화되어 전력 부문의 탈탄소화가 논의의 중심에 있다. 전력 및 에너지 부문의 탈탄소화는 간헐성을 가진 신재생 분산형 전원의 보급 확대, 타 에너지 부문의 지속적 전기화에 따른 전력수요 증가, 전력과 타 부문의 유기적 연계에 대한 필요성이 증가하게 되었다. 따라서 전력망의 디지털화는 물론이고 전력시장 기능의 선진화, 에너지 부문 간 연계 활성화, 신재생에너지의 확대에 따른 안정적 전력공급 등이 전력망의 주요 과제이다. 우리나라는 탄소중립 시나리오(2021.10)를 필두로 탄소중립 에너지 기술 로드맵(2021.12), 탄소중립 에너지 혁신 전략(2021.12) 등을 발표하여 전력망의 미래 방향을 설정하고 있다. 융합연구리뷰에서는 탄소중립에 따른 에너지 및 전력 부문의 정책과 기술 동향 및 미래 방향에 대하여 집중적으로 논의할 것이다.

II 글로벌 및 국내 탄소중립과 전력 기술

1. 글로벌 탄소중립과 전력 기술

전 세계의 동시 다발적인 탄소중립 선언과 추진으로 글로벌 전력산업은 지난 100년 이래 가장 큰 변화에 직면하고 있다. 탄소중립과 더불어 신재생에너지의 지속적인 비용 하락으로 전력 부문에서 재생에너지 비중이 급격하게 증가하고 있고, 수송, 건물 등 다른 부문의 화석연료 에너지가 전기로 대체되고 있다. 즉, 최종에너지(최종 소비부문의 에너지 이용설비에 알맞은 형태로 사용되는 에너지)에서 전력이 차지하는 비중이 지속적으로 높아지고 있다. 전력 부문은 지난 10여 년 동안 논의되고 발전한 전력망의 디지털화 및 지능화, 즉, 스마트그리드 기술과 재생에너지 기술이 융합되어 미래 탄소중립의 핵심 수단으로 인식되고 있다. 따라서, 전력부문 기술개발은 이러한 탄소중립 기술의 방향으로 급격하게 선회하고 있다. 한편, 태양광, 풍력과 같은 변동성 재생에너지의 증가, 극단적인 기상과 기온 등으로 글로벌 전력공급의 안정성은 상당히 저해되고 있다. 최근 미국 텍사스 대정전(2021.2), 캘리포니아 대정전(2020.8), 영국 대정전(2019.8), 호주 대정전(2020.5) 등이 대표적인 사례이다. 또한, 글로벌 경기회복으로 에너지 수요 증가, 탄소중립 등으로 화석연료에 대한 투자 및 공급 감소, 재생에너지의 변동성(출력감소)으로 인한 일시적인 천연가스 수요 증가 등으로 전 세계 화석연료 가격이 급등하고 있다. 일례로 2021년 10월 기준으로 두바이(Dubai)유는 작년 대비 93%, 석탄 가격(뉴케슬턴)은 277%, JKM(Japan Korea Marker) LNG 현물가격은 718% 상승하였다. 이는 우리나라를 포함한 글로벌 도매전력시장 가격과 소매 전기요금의 인상으로 연결되고 있다. 따라서, 우리나라를 포함한 세계 여러 국가들은 탄소중립의 달성과 더불어 안정적이고, 경제적인 전력 공급을 위해 기술개발에 매진하고 있다.

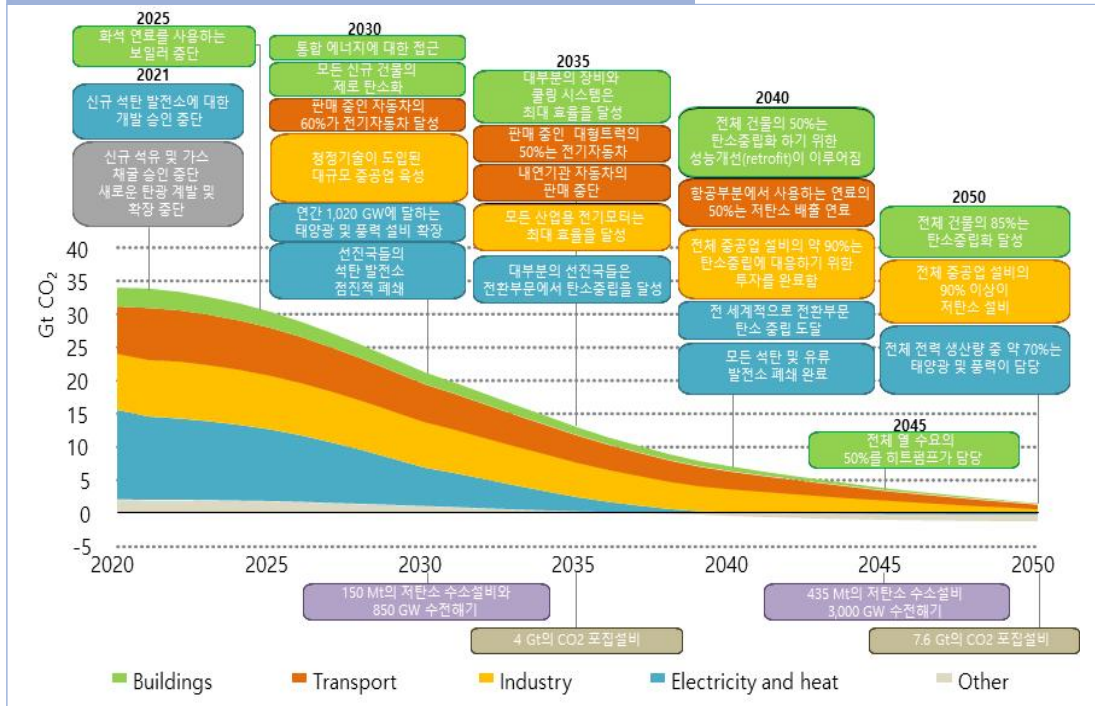


* 출처 : 박종배(2021)

1.1. 국제에너지기구(IEA)의 탄소중립 전망과 전력 기술

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 최근 2021 세계에너지전망(World Energy Outlook 2021) 보고서 '2050년까지 넷제로 달성 : 세계 에너지 부문의 로드맵(Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector)'을 통해서 글로벌 탄소중립을 달성하기 위하여 각 부문의 단계별 기술개발 및 목표를 설정하여 발표한 바 있다(IEA, 2021). 여기에서는 전력 및 열(전환), 산업, 수송, 빌딩, 기타 수소와 CO₂(Carbon Dioxide, 이산화탄소) 포집 등 부문의 단계별 대응 수단과 기술을 언급하고 있다. 전력의 경우, 2040년 탄소중립 달성, 2050년 전력생산의 70% 내외를 태양광 및 풍력 등이 차지하는 것으로 전망하고 있다. 국제에너지기구(IEA)도 탄소중립을 달성하기 위해서 글로벌 전력 부문의 역할을 가장 중요하게 판단하고 있다.

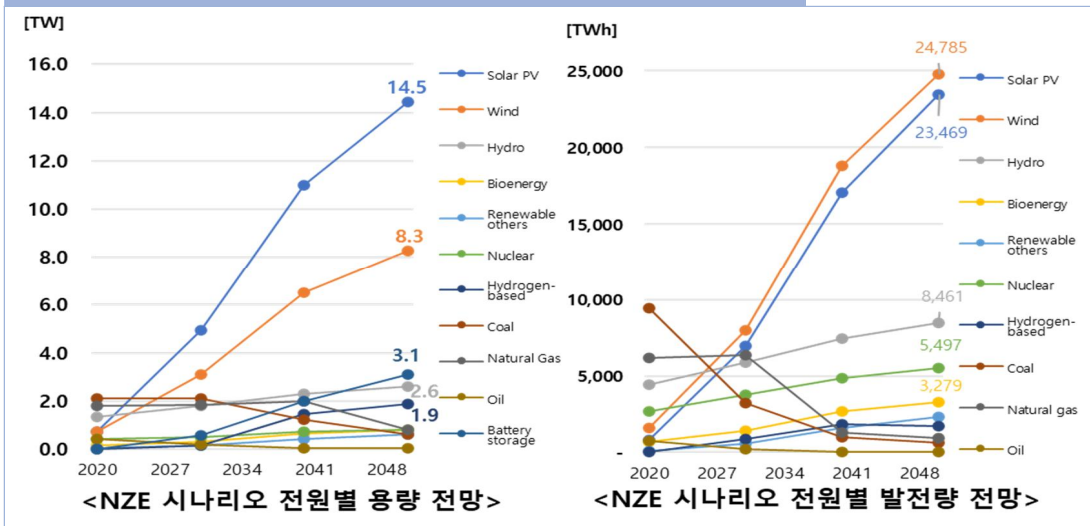
그림 5. 국제에너지기구(IEA)의 부문별 탄소중립 로드맵



* 출처 : IEA(2021)

국제에너지기구(IEA)의 탄소중립 시나리오에 의하면 최종에너지는 현재 대비 약 22% 감소할 것으로 전망된다. 하지만 전기에너지는 지속적으로 증가하여 그 비중이 2020년 20%에서 2030년 26%, 2050년 49%에 이를 것으로 추정되고 있으며, 글로벌 전력 수요는 2050년에 현재보다 2배 이상 성장할 것으로 전망되고 있다. 전력 공급의 기술은 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS, Carbon Capture Utilization and Storage), 수소, 원자력, 태양광 및 풍력 등 재생에너지, 수력 등으로 구성되는데 재생에너지의 비중이 가장 높을 것으로 전망된다. 즉, 글로벌 탄소중립을 달성하기 위하여 전력 부문의 재생에너지 비중은 용량 기준으로는 80%, 발전량 기준으로는 88% 수준까지 성장해야 한다. 재생에너지 가운데 용량으로는 태양광 설비의 비중이 가장 높고, 발전량 기준으로는 풍력설비가 가장 높을 것으로 추정되고 있다.

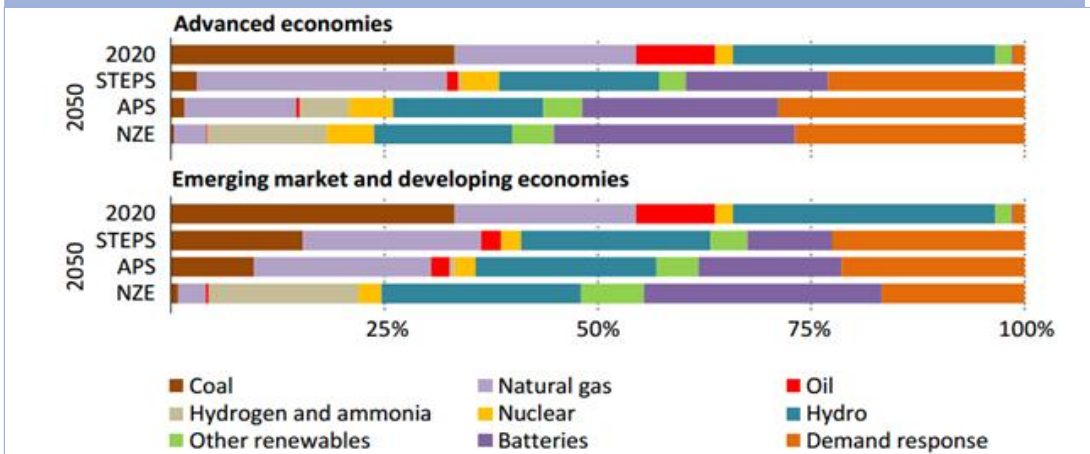
그림 6. 탄소중립 시나리오의 전력부문 전원 및 발전량 구성 목표



* 출처 : IEA(2021)

국제에너지기구(IEA)는 2021 세계에너지전망(World Energy Outlook)에서 2050년 시나리오별 유연성 자원의 구성을 전망하고 있는데, 수요반응(Demand Response), 배터리, 수력, 수소/암모니아 등이 미래의 주요 유연성 공급원이 될 것으로 전망한다. 이는 현재의 유연성 공급원인 원자력, 수력 및 화력설비와 비교했을 때 확연히 달라지는 것을 알 수 있다.

그림 7. 국제에너지기구(IEA) 세계에너지전망(WEO) 2021의 시나리오별 유연성 자원 구성



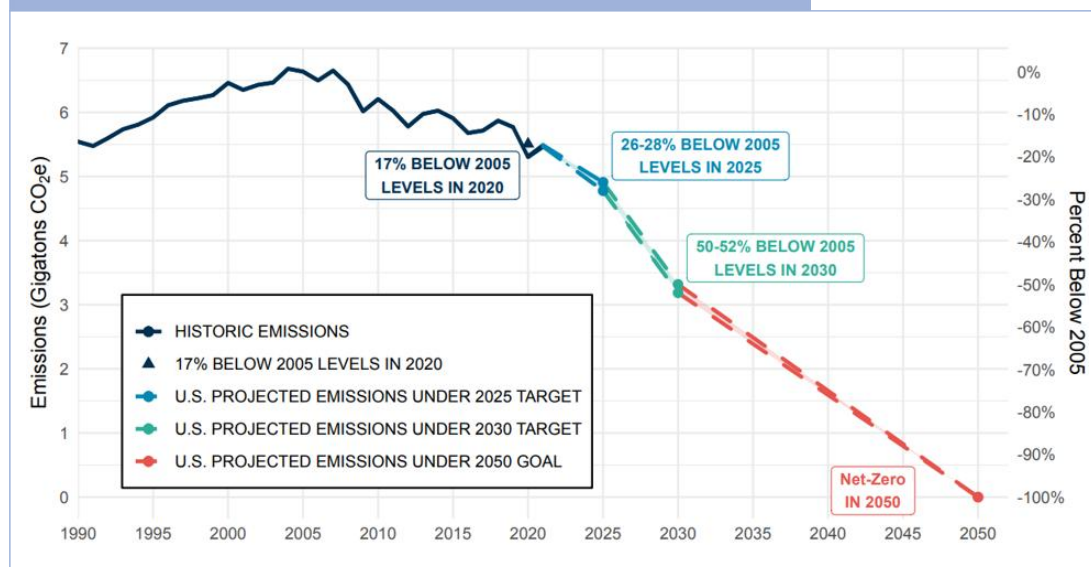
* 출처 : IEA(2021)

한편, 2020년 대비 송배전망의 총 규모는 2050년까지 약 2.5배 확대가 필요하며 이는 신재생에너지의 확대와 전기화에 따른 수요와 공급 증가에 기인한다. 송배전망의 투자는 현재 2,600억 달러 수준에서 2030년 약 8,200억 달러, 2050년에는 약 1조 달러의 투자가 필요할 것으로 전망되고 있다. 전기차의 보급에 따라 충전소는 현재 약 100만 개에서 2030년 4,000만 개 수준으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 한편, 전력시스템에서의 배터리 용량은 현재 160GWh에서 2030년 6,600GWh로 급격하게 증가할 것으로 전망되고 있다. 전력망의 디지털화도 지속되어 2030년에는 약 40%, 2050년에는 50% 수준으로 전망되고 있다.

1.2. 미국의 탄소중립과 전력 기술

미국 바이든 행정부는 트럼프 행정부 때 탈퇴한 파리협약에 재가입하였으며, 행정명령을 통하여 2050 탄소중립을 선언하였다. 또한, 2030년까지 온실가스 배출량을 2005년 대비 50~52% 수준으로 감축한다는 도전적인 목표를 제시하였으며, 이에 따라 미국 국무부는 2021년 11월 ‘미국의 장기전략 : 2050 넷제로 온실가스 배출 경로(The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050)’ 보고서 발표를 통해 탄소중립 달성을 위한 전략을 제시한 바 있다.

그림 8. 미국의 온실가스 배출 실적과 탄소중립 경로별 배출 전망



* 출처 : DOS(2021)

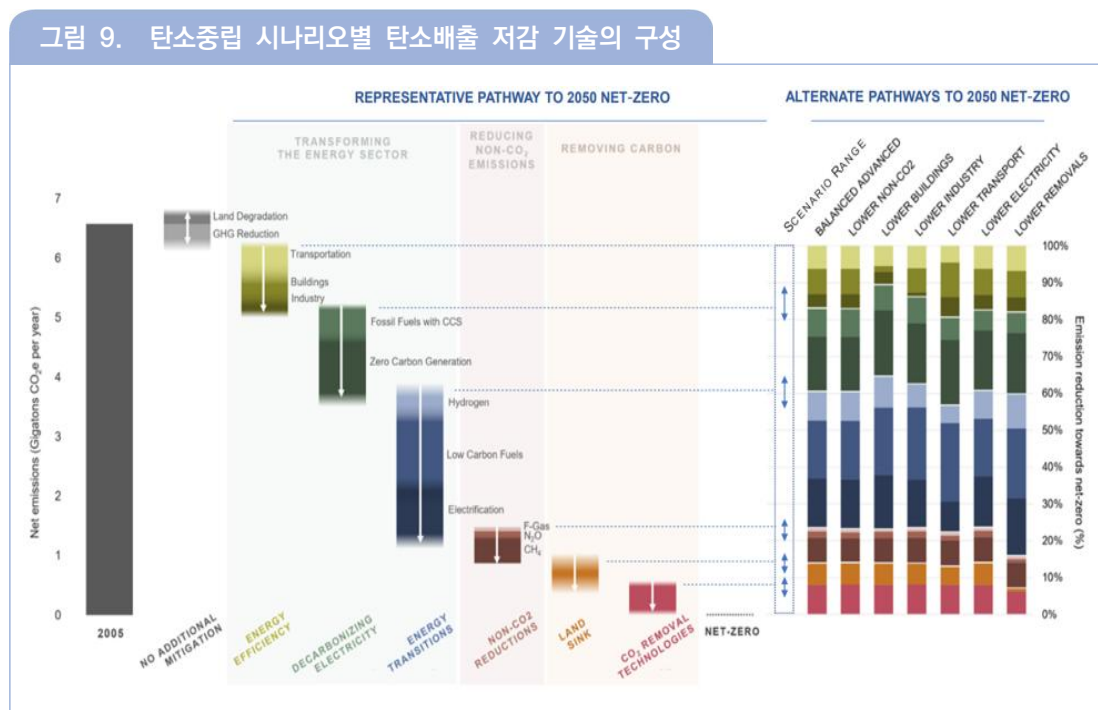
미국은 탄소중립을 달성하기 위하여 5개의 핵심 영역, 즉, 전력부문의 탈탄소화, 최종사용자부문의 전기화 및 청정연료로의 전환, 에너지 소비 효율화, 메탄 및 기타 비(非)이산화탄소(Non-CO₂) 온실가스의 배출 저감, 이산화탄소 흡수 확대 등을 선정하고 이에 집중하고 있다. 전력부문은 미국의 2050 탄소중립 달성에 가장 중요한 분야로 2035년까지 100% 청정 전력을 달성한다는 목표를 설정하였다. 최종에너지 사용에서 자동차, 건물 및 산업 분야는 전기화를 통해, 항공이나 수송 및 일부 산업공정에서 무탄소 전원이거나 바이오 연료와 같은 청정연료를 이용하여 온실가스 배출을 줄이는 것을 목표로 설정하고 있다. 에너지 소비 효율화는 고효율 제품의 사용과 빌딩 에너지 효율화를 주요 수단으로 설정하고 있다. 미국의 탄소중립 전략에서는 6개 부문(탄소 제거, 전력, 수송, 산업, 빌딩, 비(非)이산화탄소 감축)의 기술 진보 속도에 따라 총 12개의 시나리오를 제시하였다. 대표 시나리오는 탄소포집(중간 기술 수준)을 제외한 모든 부문의 기술 진보를 가정한 'Balanced Advanced' 시나리오이다. 여기서 각 한 부문의 기술 저하(Lower)에 따른 영향을 살펴본 6개의 파생 시나리오, 탄소 포집과 전력기술의 발전은 고려하고 나머지는 낮은 기술 진보를 가정한 비판 시나리오, 기준 시나리오에서 유가 및 가스가격 변동에 따른 2개 시나리오, 인구 및 경제 변화에 따른 2개 시나리오를 고려하였다. 각 시나리오에 대하여 정량적 모델을 사용하여 온실가스 감축 수준을 분석하였다.

표 1. 부문별 기술 및 경제 수준에 따른 탄소중립 시나리오의 설정

시나리오 구성	부문별 기술 수준의 설정						모델	
	탄소제거	전력	수송	산업	빌딩	비CO ₂	GCAM	OP-NEMS
Balanced Advanced(대표)	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Non-CO ₂	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Lower	x	
Lower Buildings	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Lower	Advanced	x	
Lower Industry	Medium	Advanced	Advanced	Lower	Advanced	Advanced	x	
Lower Transportation	Medium	Advanced	Lower	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Electricity	Medium	Lower	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Removals	Lower	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	x
Higher Removals/ Lower Technology	Higher	Advanced	Lower	Lower	Lower	Lower	x	x
High Oil & Gas Price	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Low Oil & Gas Price	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
High Population & GDP	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Low Population & GDP	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	

* 출처 : DOS(2021)

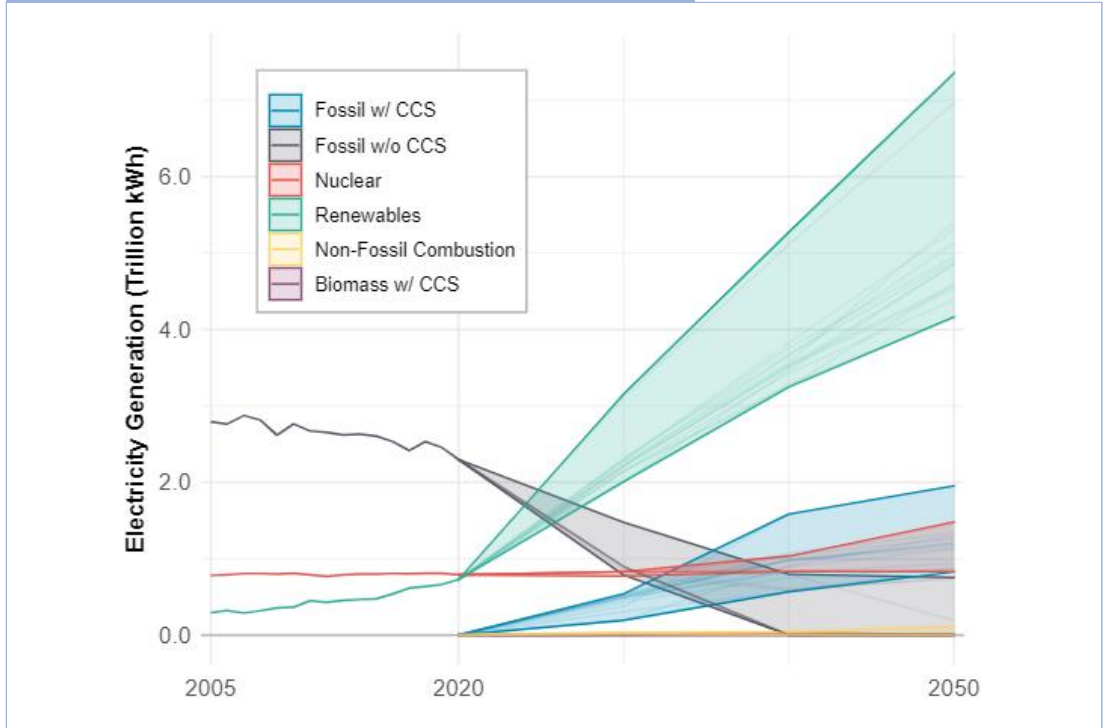
대표 경로인 ‘Balanced Advanced’ 시나리오와 6개 파생 시나리오(각 부문별 기술개발 정도)의 탄소감축 수단을 살펴보면 에너지 부문(에너지효율, 전력부문 非탄소화, 에너지전환)에 집중되어 있음을 알 수 있다. 시나리오별 탄소배출 감축 수준은 상이하나, 수송 및 빌딩에 대한 에너지 효율화를 통해 약 15%(시나리오별 10~19%), 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS)과 신재생을 포함한 저탄소 전력기술을 통하여 약 24%(시나리오별 22~25%), 에너지전환(수소/저탄소연료/전기화)을 통해 약 38%(시나리오별 34~44%)의 감축을 목표로 하고 있다.



* 출처 : DOS(2021)

전력부문의 수단으로는 신재생에너지가 큰 비중을 차지하고 있으며, 기타 원자력, 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS), 바이오메스 등이 고려되고 있다.

그림 10. 탄소중립 시나리오의 에너지원별 발전량 전망



* 출처 : DOS(2021)

전력 부문의 탈탄소화와 더불어 안정적인 전력공급을 위한 인프라 구축은 매우 중요한 요소이다. 이를 위하여 2021년 9월 미국은 인프라투자 및 고용촉진 법안인 ‘초당적 인프라 투자·일자리 법안(Bipartisan Infrastructure Investment and Jobs Act)’을 통과시켰다. 주요 내용은 인프라 투자를 위하여 8년간 총 1.2조 달러의 재원 마련과 이에는 전기차 충전 네트워크 구축, 전력망 투자 등이 포함되어 있다. 특히 전력망의 경우, 청정 전력 공급 및 탄소중립 달성을 위해 대규모 신규 송전선의 건설과 디지털화 등이 고려되고 있다.

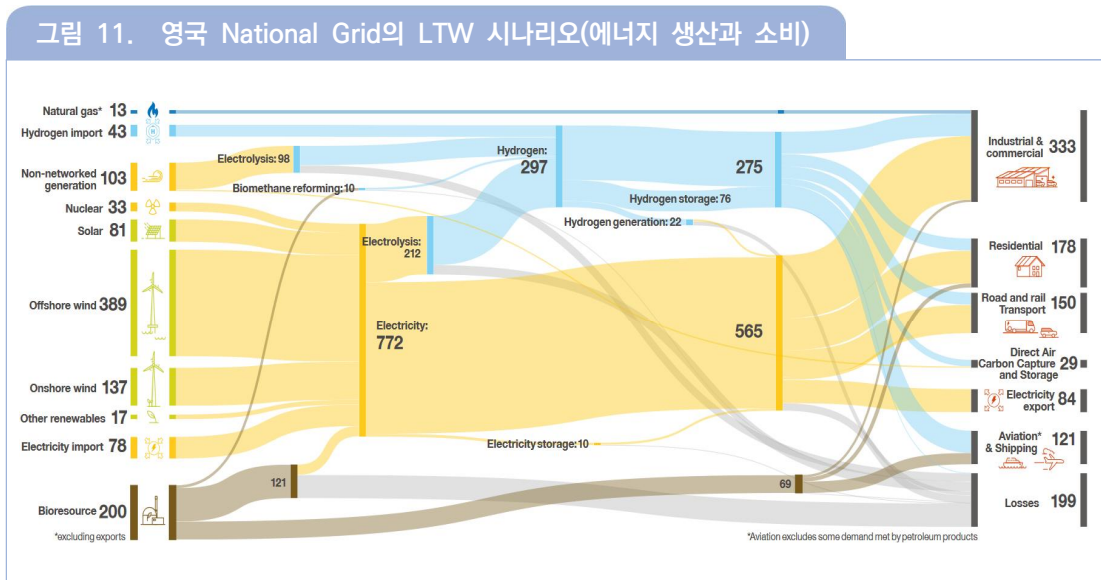
1.3. 영국의 탄소중립과 전력 기술

영국은 '2008년 기후변화법(Climature Change Act 2008)' 제정으로 탄소중립 추진의 법적 기반을 마련하였으며, 2019년 6월 기후변화법 개정과 함께 주요국 최초로 2050년까지 탄소중립을 선언하였다. 2020년 12월 '탄소중립 에너지 백서(The Energy White Paper Powering our Net Zero Future)' 발간, 2021년 10월 '탄소중립 전략(Net Zero Strategy: Build Back Greener)' 등을 수립하여 지속적으로 구체화하고 있다. '탄소중립 에너지 백서'에서 탄소중립 달성을 위해서는 강력한 전기화가 일어나야 할 것으로 전망하였으며, 이에 따라 2019년 대비 2050년의 최종에너지 수요는 25%~30% 감소하였지만, 전력수요는 2019년 대비 2배 정도 증가할 것으로 전망하였다. 증가하는 전력수요는 신재생에너지와 원자력 등 저탄소 에너지원이 차지할 것으로 전망되고 있으며, 신재생에너지와 원자력 발전량은 2019년 대비 각각 4배, 2~3배 증가할 것으로 추정된다.

탄소중립 에너지 백서의 전력 부문 주요 전략은 신재생에너지 보급 확대, 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS), 원자력, 전력시스템 혁신 등을 포함한다. 신재생에너지의 경우, 발전량의 획기적 증대를 목표로 하며, 2030년까지 부유식 해상풍력을 포함한 풍력발전 설비를 40GW 까지 확대를 꾀하고 있다. 화력 발전설비로부터의 탄소 배출량 감소를 위해 차세대 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS), 바이오에너지 탄소포집 및 저장(BECCS, Bioenergy with Carbon Capture and Storage)의 기술개발을 적극 고려하고 있다. 원자력은 차세대 원자력 기술의 개발과 건설을 목표로 하고 있다. 3.85억 파운드를 투자하여 소형 모듈 원자로(SMR, Small Modular Reactor) 및 신형 모듈 원자로(AMR, Advanced Modular Reactor)를 개발하여 전력, 열, 수소 등을 생산하고, 2040년까지 핵융합 기술의 적용을 목표로 하고 있다. 전력시스템 부문은 재생에너지의 간헐성 문제를 완화하고 전력계통 유연성을 확보하기 위하여 전력계통 운영자(ESO, Electricity System Operator) 및 배전망 운영자(Distribution Network Operator)에 대한 인프라 투자를 통해 투명하고 경쟁적인 전력시장을 구현하고자 하며, 유연성 자원 제공사업자 지원과 육성, 용량시장의 확대 등을 목표로 하고 있다. 2021년 10월 발표한 탄소중립 전략은 기존에 발표한 탄소중립 에너지 백서의 주요 사항들을 보다 구체화한 것으로, 발전, 연료공급·수소, 산업, 열·건물, 수송, 천연자원·폐기물·불소가스, 온실가스 제거, 에너지 전환을 위한 공통과제 등과 같은 8개 분야에 대한 기술개발을 포함하고 있다. 전력 부문의 경우, 해상풍력에 대한 투자, 저탄소 수소 기술개발, 원자력 기술개발 등이 있다. 해상풍력에 대한 투자는 탄소중립 에너지 백서와 마찬가지로 2030년까지 40GW 해상풍력, 부유식 해상풍력 1GW 설치를 목표로 하고 있다. 이러한 풍력설비 투자를 유인하기 위한 전력시장 제도로 차액정산계약(CfD, Contract for Differences)을 적용할 것으로 알려져 있다. 저탄소 수소 개발을 위해 수소전략(Hydrogen Strategy)을 별도로 수립하였으며, 2030년까지 2.4억 파운드를 투자하여 5GW의

저탄소 수소생산 역량의 확보를 목표로 하고 있다. 원자력의 경우, 탄소중립 에너지 백서와 유사하나, 2021년 말까지 최소 1개 이상의 대규모 원자력 프로젝트를 추진하고 있다. 기타 바이오에너지 기술개발 등도 적극적으로 고려하고 있다.

영국의 송전 및 계통운용 기업인 National Grid는 FES 2021(Future Energy Scenario 2021)을 통해 전력 부문의 2050년 탄소중립 시나리오(Steady Progression(SP), Consumer Transformation(CT), System Transformation(ST), Leading The Way(LTW))를 제시하고 있다. 소비자 전환 시나리오(CP, Consumer Transformation)에서는 전기난방, 소비자의 행동 변화, 에너지효율, 수요측 유연성 확보를 통하여 탄소중립이 가능하다고 전망하고 있다. 또한, 시스템 전환 시나리오(ST, System Transformation)에서는 낮은 에너지효율이지만 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS), 난방 등에서의 적극적 수소 사용, 소비자의 행동 변화 등을 바탕으로 탄소중립의 달성을 전망하고 있다. 대표적인 LTW(Leading The Way)는 획기적인 소비자의 행동 변화, 난방 등에서 수소와 전기의 공동 사용 등이 반영된 일종의 목표 시나리오이다.



* 출처 : National Grid(2021)

1.4. 일본의 탄소중립 로드맵과 전력 기술

2020년 10월 일본 경제산업성은 2050년까지의 탄소중립 전략을 발표하였다. 주요 내용은 2018년 기준 10.6억 톤인 온실가스 배출량을 전기화 및 탈탄소 전원으로의 전환을 통해 탄소중립을 달성한다는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위해 3개의 대분류 부문(에너지, 운송·제조, 가정·빌딩), 14개의 소분야로 나누어 실행계획을 수립하였다. 각 항목별 5년 단위의 상세 로드맵을 구성하여 구체적인 계획을 수립하였으며, 탄소중립 실현을 위한 분야별 실행계획을 공개하였다. 에너지 산업의 경우, 풍력(해상풍력) 및 태양광을 중심으로 하는 신재생의 육성, 수소 및 암모니아 혼소 기술, 차세대 열에너지, 원자력 등으로 구성된다.

표 2. 일본의 탄소중립 부문별 실행계획

에너지 산업	운송·제조 산업		가정·빌딩
풍력/태양광/지열 (1) • 2040년 30~45 GW 해상 풍력 • 신규 2030년 전력 생산비용 14엔/kWh 달성	전기차/배터리 (5) • 2035년 판매 자동차는 모두 전기차(EV, FCV, PHEV, HEV 포함) 및 충전 인프라를 구축	식품, 농림수산업 (9) • 2050년까지 스마트 농업 및 어업을 통해 탄소중립 실현 • 블루 카본 활용	주택 및 빌딩/ 차세대 열관리 (12) • 2030년 신규 건축물 효율화로 탄소중립 건축물 구현
수소/암모니아 연료 (2) • 2030년 암모니아 20% 혼소 실증 • 2050년 수소 약 2천만 톤 활용	반도체, 정보 통신 (6) • 2040년까지 반도체/정보 통신 산업에서의 탄소중립 달성	항공 (10) • 2030년 항공 분야 수소 및 전기화 등 탄소중립을 위한 핵심 기술을 단계적으로 실현	자원순환 관련 (13) • 2030년경 약 200만톤 바이오 매스 플라스틱 도입
차세대 열에너지 (3) • 2050년까지 메탄 혼소를 기존 인프라에 90% 투입	선박 (7) • 2028년까지 탄소중립 선박(수소, 암모니아) 상용화 실현	탄소 리사이클링/자재 (11) • 2050년 탄소저장 콘크리트 사용 확대 및 건축 활용 • 탄소중립 철강산업 실현	라이프 스타일 관련 (14) • 2050년 소규모 에너지 자원을 활용한 탄소 중립적이고, 탄력적이며 편안한 삶 실현
원자력 (4) • 2030년까지 HTGR(고온 가스) 등 차세대 원전기술과 무탄소 수소생산 기술확립	물류, 운송, 토목 인프라 (8) • 2050년 탄소중립 항구, 항만 및 건설 작업 실현		

* 출처 : 일본 경제산업성(2020), 에너지경제연구원(2021) 재인용

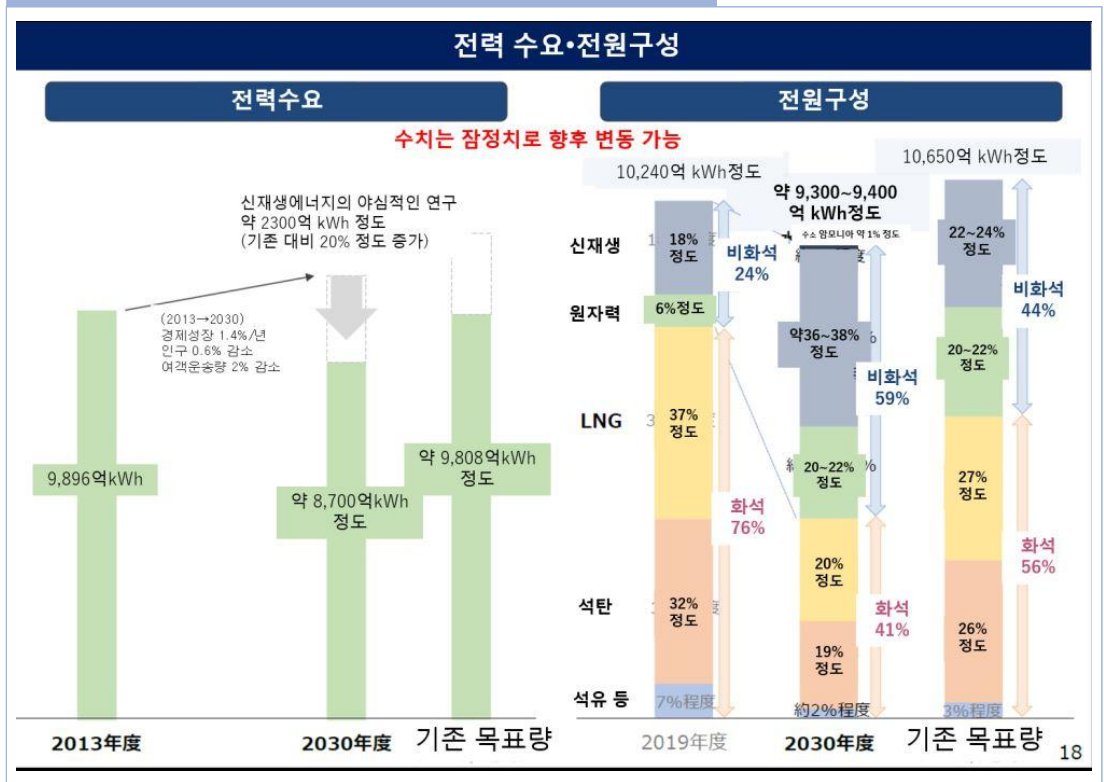
일본 경제산업성은 2021년 '에너지 기본계획'을 통하여 탄소중립 실현을 위한 에너지 분야 계획을 수립하였다. 이전의 에너지 기본계획과는 달리 이번 계획은 중장기 에너지 정책을 구현하기 위한 주요 수단으로 에너지 절약과 비화석 에너지를 대상으로 에너지 수요를 최대한 억제하고 신재생에너지 비중을 높여 온실가스 배출을 제한하는 것을 목표로 하고 있다. 이에 따르면 일본의 2030년 전력수요는 870TWh로 기존 981TWh 보다 낮아졌다. 전원구성은 신재생에너지 비중이 기존 22~24%에서 36~38% 수준으로 크게 증가하였다.

표 3. 2013년 실적 및 2030년 전력수요 및 발전량 목표

구분	전력수요 [TWh]	발전량 비중				
		신재생	원자력	LNG	석탄	석유 등
2013년 기준	989.6	18%	6%	37%	32%	7%
기존 목표 (2030)	980.8	22~24%	20~22%	27%	26%	3%
최신 목표 (2030)	870.0	36~38%	20~22%	20%	19%	2%

* 출처 : 일본 경제산업성 (2021), 대한무역투자진흥공사(2021) 재인용

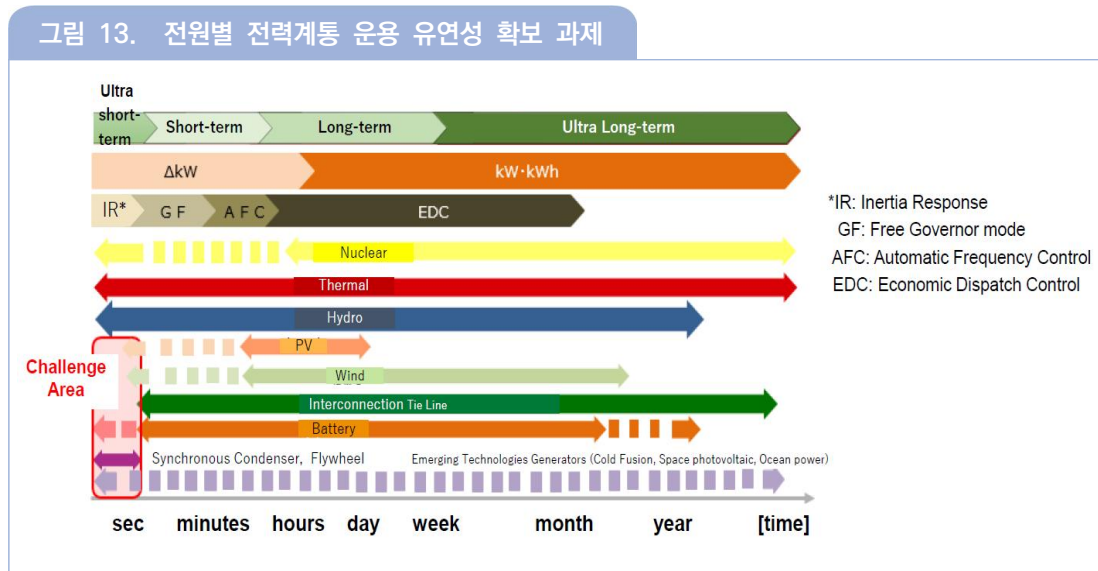
그림 12. 일본의 2030년까지 전력수요 및 전원구성 계획



* 출처 : 일본 경제산업성(2021), 대한무역투자진흥공사(2021) 재인용

2030년 신재생에너지 비중의 획기적 증가와 전통전원(원전, 석탄, LNG 등)의 감소에 따라 관성(Inertia) 부족을 전력계통의 안정적 운영을 저해하는 핵심 요인으로 인식하고, 기술적 해결 방안을 마련 중인 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 '차세대 전력망 안정화 프로젝트'를 국가 차원에서 추진하고

있으며, 실시간 계통관성 측정 및 감시, 전력 관리 장치(PMU, Phasor Measurement Unit)를 이용한 관성 추정, 합성 관성 등 대응 신기술 개발을 추진하고 있다.



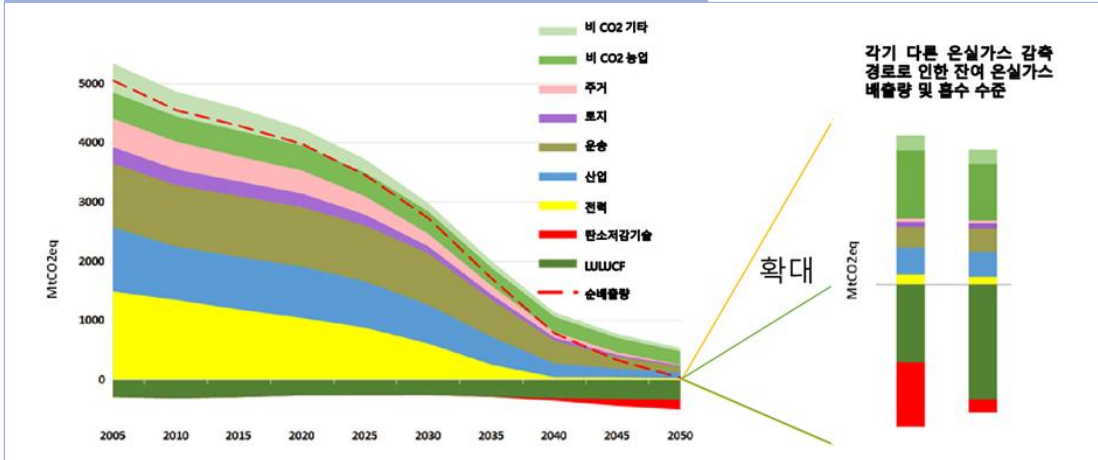
* 출처 : 일본 경제산업성(2021)

2021년 8월 일본 환경성과 경제산업성은 지구온난화 대책 개정안을 발표하였으며, 이번 개정안을 통해 2030년 CO₂ 배출량 목표를 2013년 대비 46% 수준 감축하는 것으로 강화하였다. 이를 위해 부문별 CO₂ 배출량 감축목표를 제시하였으며, 일본 온실가스 배출량의 약 80%를 차지하는 에너지(전기 및 가스 등) 부문의 CO₂ 배출량은 6.8억 톤을 목표로 하고 있다. 이는 2013년 CO₂ 배출량인 약 12.4억 톤에 비해 45% 감축된 매우 공격적인 수준으로 알려져 있다.

1.5. 유럽연합(EU)의 탄소중립 로드맵과 전력 기술

2019년 12월 유럽 집행위원회는 ‘유럽 그린딜(European Green Deal)’을 통해 기후법과 온실가스 감축목표, 유럽연합 탄소배출권 거래제도(EU-ETS) 및 탄소 국경조정 등에 대한 계획을 발표하였다. 이후 2020년 3월 ‘유럽 기후법(European Climate Law)’ 초안 공개를 통해 2050년까지 탄소중립을 선언하였다. 이는 2050년까지 탄소중립 목표 실현을 법제화하고 탄소 감축경로를 구체적으로 설정하는 것이다.

그림 14. 1.5°C 상승 시나리오에서의 온실가스 감축경로



* 출처 : EU(2019)

유럽 기후법은 탄소중립 목표 이행과정과 수단 전반에 대한 점검 등을 포함하고 있으며, 목표 이행 여부나 수단에 대한 점검은 유럽연합 차원과 개별 회원국 차원에서 별도로 진행된다. 최초 평가는 2023년 9월까지이며, 이후 5년 단위로 점검이 있을 예정이다. 탄소중립을 위한 분야별 장기전략 비전은 크게 에너지, 산업, 수소, 빌딩 등으로 구분하여 구체적인 사항을 명시하고 있다.

표 4. EU 탄소중립 실현을 위한 분야별 장기전략

에너지 분야	산업분야
<ul style="list-style-type: none"> • Carbon-Free 에너지 적극적 활용 <ul style="list-style-type: none"> - [태양광] 열에도 활용, [풍력] 해상풍력, 저속풍력 - [원자력] 계통안정화에 활용, [저장] 배터리, 수소 • 新 에너지 운반체 활용: e-hydrogen, e-fuel • 계통 유연성 확보: HVDC, 시장 매커니즘 개선 • 부문간 결합: 전기-가스-열 통합 관리(예:P2X) 	<ul style="list-style-type: none"> • 효율적 에너지 소비를 위한 기술 및 환경 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 팩토리, 스마트 그린 산업단지 - 열의 전력화 : 전기로(전기를 사용하는 용광로), 전기보일러 활용 • 순환경제 도입(Replacement, Recycling, Reuse) • CCUS 적극 활용: 철강, 알루미늄, 화학, 비료 분야 • 공급 원료/연료 교체: 수소, 바이오매스 활용
수소분야	빌딩 분야
<ul style="list-style-type: none"> • 대체연료 사용: 전기, 수소, e-fuel, 바이오 <ul style="list-style-type: none"> - 소형차량 탄소 배출 2040년까지 0 목표 • 전기/수소 충전 위한 인프라 구축 및 신기술 개발 • 해운 온실가스 감축: 2008대비 2050년 50% 감축 <ul style="list-style-type: none"> - 해운 온실가스 배출권거래제 도입('22년부터) - 바이로연료, e-fuel, 천연가스 중심으로 (>90%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 효율적 에너지 소비를 위한 기기 및 기술 도입 <ul style="list-style-type: none"> - 저탄소, 고효율 기기, 고성능 단열 자재 활용 - 스마트 빌딩을 통한 에너지 사용 최적화 • 냉,난방 연료 교체: 태양열, 지열, e-gas 활용 • 제로 에너지 빌딩 도입 <ul style="list-style-type: none"> - 에너지 사용 최소화, 에너지 자립률 최대화

*출처 : EU(2020)

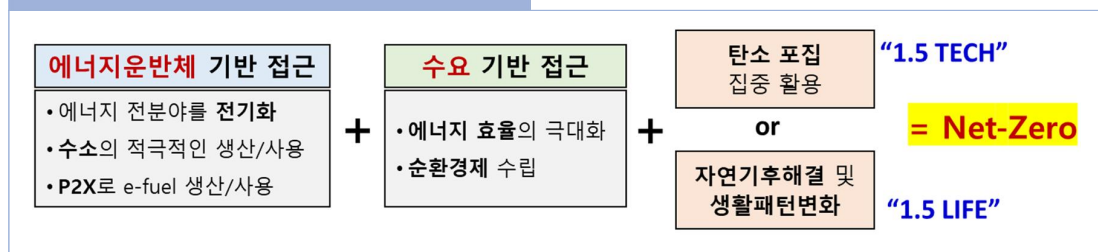
유럽연합(EU)의 탄소중립 전략은 에너지 운반체와 수요의 환경에 따라 시나리오가 구분된다. 먼저 에너지운반체는 에너지를 생산, 수송, 저장 및 활용하는 주 에너지원을 말하는 것으로, 전기, 수소, P2X(재생에너지 등 전력을 수소, 열, 기타 합성연료 형태로 저장하는 방식) 기반 연료를 의미한다. 수요 환경은 에너지 효율을 향상시키기 위한 기술의 이용 여부, 재활용 및 재사용 등을 통한 방법 여부를 포함하고 있다. 이러한 요소들을 중심으로 -80% 수준으로의 탄소배출 감축 시나리오를 만들었으며, 이를 다시 조합하고, 탄소포집과 소비자의 행동 변화 등을 고려하여 최종 시나리오를 설정하였다.

표 5. EU의 탄소중립 시나리오

시나리오(온실가스 감축)		시나리오별 핵심 전략
에너지운반체 기반 GHG 감소 (-80%)	ELEC	• 에너지 수요의 전기화와 전기 공급 증가
	H2	• 에너지 수요에서 e-hydrogen의 사용/ 공급 측면에서의 수소 생산
	P2X	• 에너지 수요에서 e-연료의 사용/ 공급 측면에서의 e-연료 생산
수요기반 GHG 감소 (-80%)	EE	• 건물, 산업 및 운송에서의 에너지 효율 극대화
	CIRC	• 산업과 수송에서의 순환경제
GHG -90%	COMB	• GHG 감소 전략을 조합하되, 특정 기술이나 행동을 완전히 추진하지 않음
GHG -100%	1.5TECH	• 강화된 COMB + 탄소 포집 기술 적극 활용
	1.5LIFE	• 강화된 COMB + 강화된 CIRC + 자연 기후 해결책 + 소비자 선호도 변화

* 출처 : EU(2020)

그림 15. EU의 탄소중립 달성 시나리오



* 출처 : EU(2020)

2021년 7월 유럽연합(EU) 집행위원회는 2030년 탄소배출량을 1990년 대비 55% 수준으로 감축하기 위한 'Fit for 55 패키지' 법안을 발표하였다. 이는 3개의 카테고리로 구성되는 12개 주요 항목과 사회 기후지원 기금(Social Climate Fund) 신설을 골자로 하고 있으며, 유럽 그린딜(European Green Deal)의 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 주요 정책적 수단으로 활용되고 있다.

그림 16. 'Fit for 55 패키지' 주요 내용

가격 결정	목표 설정	규정 강화
<ol style="list-style-type: none"> 1. 항공분야 배출권 거래제 강화 2. 배출권거래제(EU-ETS)에 대하여 육상 및 해상운송, 건축분야로 확대적용 3. 에너지조세 지침 개정 4. 탄소국경조정제도(CBAM) 도입 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 노력분담 규정(ESR) 개정 2. LULUCF 개정 3. 재생에너지지침 개정 4. 에너지효율 지침 개정 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 승용차 및 승합차에 대한 탄소배출 제한 기준 강화 2. 대체연료 및 탄소중립 차량을 위한 인프라 규정 개정 3. 항공운송 연료 기준 (ReFuelEU) 설정 4. 해상운송 연료 기준 (FuelEU) 설정
목표 설정 <ol style="list-style-type: none"> 1. 전환을 위한 사회적 기후 기금 및 현대화 기금 신설 		

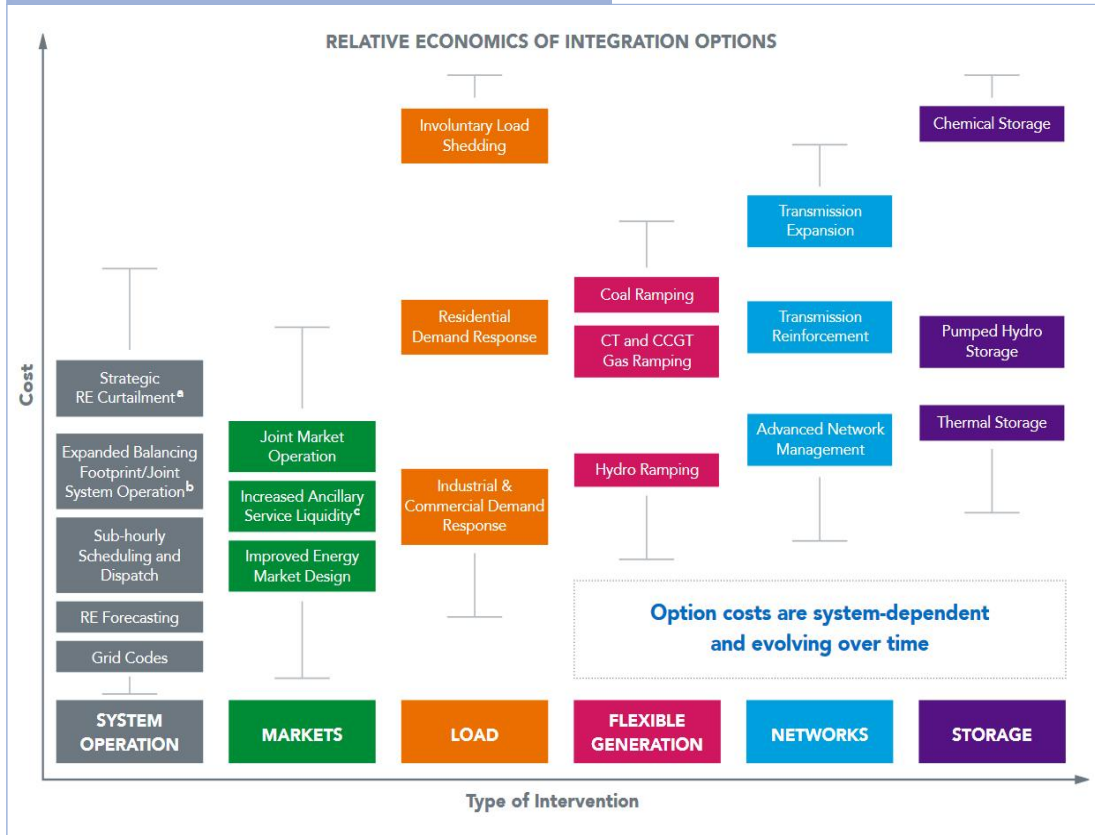
* 출처 : EU(2021), 대외경제정책연구원(2021) 재인용

1.6. 전력시스템 유연성 기술과 전력시장 제도

대표적인 재생에너지인 태양광과 풍력발전은 각각 일사량과 풍속 등 자연 조건에 의해 발전량이 실시간으로 달라지기 때문에 기본적으로 불확실성과 변동성이 발생한다. 최근 탄소중립 전략에 따라 재생에너지에 대하여 보급 확대가 가속되는 가운데, 재생에너지의 변동성은 전력 계통운영(전기가 발전소에서 생산되어 소비자에게 전달되는 과정을 운영하는 것)을 어렵게 하는 주요 원인이 되고 있다. 불확실성은 예측이 매우 힘들기는 하지만 예측 정확도를 높여 줄일 수는 있으나, 변동성은 재생에너지 자원의 고유한 성격이기 때문에 에너지저장장치(ESS) 등을 설치하지 않는 한 문제를 근본적으로 해결하기가 어렵다. 따라서, 재생에너지 변동성 문제를 해결하고 안정적으로 전력 계통운영을 하기 위해서는 유연성 자원의 확보가 필요하다. 전력 계통에서 유연성이란 매 순간 전력수급의 균형을 유지하기 위해 발전과 부하를 최적으로 조절할 수 있는 능력을 말하며, 유연성 자원은 계통운영자 지시나 혹은 자원 스스로 발전량 및 부하를 조절할 수 있는 것들을 말한다.

〈그림 17〉은 유연성 자원과 개략적인 비용 수준을 정리한 것으로, 탄소중립에 따라 재생에너지의 보급이 증가하는 현재 상황에서 그 가치가 점차 높아지고 있는 것을 볼 수 있다. 2015년 미국 신재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)는 재생에너지의 간헐성 문제를 극복하기 위한 다양한 유연성 확보방안을 제시하였는데, 기본적으로 계통운영, 전력시장, 부하, 유연 발전, 송배전망, 저장 등의 영역을 포함한다. 각 영역별 구체적인 방안으로는 1) 보조서비스 시장, 2) 이웃 전력시장(전력계통) 연계, 3) 에너지 시장의 거래시간 축소, 4) 기타 제반 전력시장의 개선, 5) 수요반응자원의 활용, 6) 재생에너지 출력제한, 7) 새로운 보조서비스 상품 발굴, 8) 기존 발전자원의 유연성 활용, 9) 에너지 장치 활용 등을 제시하고 있다.

그림 17. 유연성 확보를 위한 수단과 실행 비용



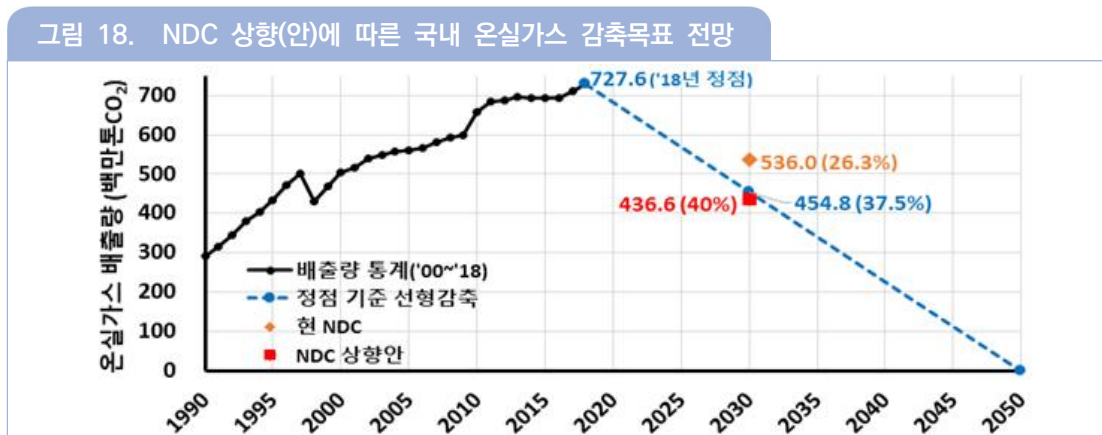
* 출처 : NREL(2015)

2. 우리나라 탄소중립과 전력 기술

우리나라는 2015년 6월 COP21(Conference of Parties, 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회)을 준비하기 위해 '2030 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution)'를 수립하였다. 당시의 목표는 2030년 전망치(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축하는 것으로 설정하였다. 이후 문재인 정부는 2018년 7월 '2030 국가 온실가스 감축 수정로드맵'을 마련하였고, 2019년 12월 '저탄소 녹색성장 기본법 시행령' 개정을 통해 명문화하였다. 2020년 10월, 정부는 탄소중립 시대에 능동적으로 대처하기 위해 '2050 장기 저탄소 발전전략(LED, Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies)'을 발표함과 동시에 2050 탄소중립을 천명한 바 있다. 또한 2021년 10월 '2030 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution) 상향(안)'과 '2050 탄소중립 시나리오(안)'을 발표하였다. 이후 탄소중립 에너지 기술 로드맵(2021.12), 탄소중립 에너지 혁신 전략(2021.12) 등을 발표하여 전력 기술의 미래 방향을 설정하고 있다.

2.1. 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향과 탄소중립 시나리오

2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)은 2018년 온실가스 총 배출량 7.28억 톤 대비 2030년 40%까지 감축하는 것이다. 이에 따라 2030년 온실가스 순 배출량은 4.37억 톤 배출하는 것을 목표로 한다. 이는 연간 4.17% 수준으로 감축해야 하는 것으로, 다른 국가들에 비해서 도전적인 목표로 받아들여지고 있다. 해당 목표를 달성하기 위해 추가적인 감축 수단을 발굴하고, 관련 연구를 수행하는 등 적극적인 노력을 가할 필요가 있다.



* 출처 : 정부 관계부처 합동(2021)

산업부문은 국가생산성 연계 및 기술적 어려움으로 인해 탄소 감축을 달성하기 어려운 분야로, 세목별 에너지 효율화 및 전기화를 중심으로 탄소 감축이 이루어질 전망이다. 건물부문은 고효율 기기 도입을 통해 건물 에너지 소비를 최소화하고, 수요관리 등을 통해 탄소배출량을 감소시킬 전망이다. 수송 분야는 친환경 자동차 보급과 충전 시설 등 인프라를 확대하고 관련 제도들을 개선할 것으로 전망된다.

표 6. 2018년 및 NDC 부문별 탄소배출량 감축 전망

(단위: 백만톤CO₂eq)

구분	부문	기준연도 ('18)	現 NDC ('18년 비 감축률)	NDC 상향안 ('18년 비 감축률)
배출량*		727.6	536.1 (△191.5, △26.3%)	436.6 (△291.0, △40.0%)
배출	전환	269.6	192.7 (△28.5%)	149.9 (△44.4%)
	산업	260.5	243.8 (△6.4%)	222.6 (△14.5%)
	건물	52.1	41.9 (△19.5%)	35.0 (△32.8%)
	수송	98.1	70.6 (△28.1%)	61.0 (△37.8%)
	농축수산	24.7	19.4 (△21.6%)	18.0 (△27.1%)
	폐기물	17.1	11.0 (△35.6%)	9.1 (△46.8%)
	수소	-	-	7.6
	기타(탈루 등)	5.6	5.2	3.9
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-22.1	-26.7
	CCUS	-	-10.3	-10.3
	국외 감축	-	-16.2	-33.5

* 기준연도(2018) 배출량은 총배출량, 2030년 배출량은 순배출량(총배출량 - 흡수·제거량)

* 출처 : 정부 관계부처 합동(2021)

2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)에서 전환부문은 온실가스를 가장 많이 감축해야 하며, 2018년 배출량인 2.696억 톤 대비 44.4% 감소한 2030년 1.499억 톤 배출을 목표로 하고 있다. 이는 이전 국가 온실가스 감축목표(NDC) 기준 배출량 1.927억 톤에 비해서도 25% 가량 감소한 수치이다. 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)의 2030년 전력수요는 에너지 효율화와 수요관리를 통한 감소 요인과 산업 및 수송 등의 타 부문에서의 전기화와 K-반도체 전략 등이 복합적으로 작용하여 제9차 전력수급기본계획의 목표수요 542.5TWh 대비 약 4.5% 증가한 567.0TWh가 될 것으로 전망하였다. 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)에서 전원믹스(전체 전력 생산에서 화석연료, 원자력 등 비재생에너지와 태양광 등 재생에너지가 차지하는 비율)는 신재생에너지를 중심으로 개편이 될 것으로 전망되며, 석탄발전의 발전량은 9차 수급계획에 비해 추가 감소할 전망이다. 무탄소 신전원인 암모니아 발전을 전원믹스에 포함한 것은 인상적이다. 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)에 따른 전원믹스 구성은 아래와 같다.

표 7. 2030년 전원믹스의 구성

		원자력	석탄	LNG	신재생	유류	암모니아	양수·기타	합계
발전량	2018년(TWh)	133.5	239	152.9	35.6	5.7	-	3.9	570.7
	NDC 상향한(TWh)	146.4	133.2	119.5	185.2	-	22.1	6	612.4
발전비중	2018년(%)	23.40%	41.90%	26.80%	6.20%	1.00%	-	0.70%	100%
	NDC 상향한(%)	23.90%	21.80%	19.50%	30.20%	-	3.60%	1.00%	100%
	9차 전력수급(%)	25.0%	34.2%	19.0%	20.8%	-	0.0%	1.0%	100%

* 제9차 전력수급 및 NDC 상향안 값은 2030년 기준

* 출처 : 정부 관계부처 합동(2021), 산업통상자원부(2020) 자료를 바탕으로 저자 정리

2050 탄소중립 시나리오(안)은 2개의 시나리오로 구성된다. A안은 전환부문에서 탄소중립을 달성한 시나리오이며, B안은 천연가스를 일부 사용하는 대신 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS) 등을 적극 활용하여 탄소중립을 달성하는 시나리오다.

표 8. 2050 탄소중립 시나리오 최종(안)

(단위: 백만톤CO₂eq)

구분	부문	2018년	최종(안)		비고
			A안	B안	
배출량		686.3	0	0	
배출	전환	269.6	0	20.7	• (A안) 화력발전 전면중단 • (B안) 화력발전 중 LNG 일부 잔존 가정
	산업	260.5	51.1	51.1	
	건물	52.1	6.2	6.2	
	수송	98.1	2.8	9.2	• (A안) 전기·수소차 등으로 전면 전환 • (B안) 내연기관차의 대체 연료(e-fuel 등) 사용 가정
	농축수산	24.7	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	4.4	4.4	
	수소	-	0	9	• (A안) 국내생산수소는 수전해 수소(그린 수소)로 공급 • (B안) 국내생산수소 일부를 부생·추출 수소로 공급
흡수 및 제거	탈루	5.6	0.5	1.3	
	흡수원	-41.3	-25.3	-25.3	
	CCUS	-	-55.1	-84.6	
	직접공기포집	-	-	-7.4	• 포집 탄소는 차량용 대체 연료로 활용 가정

* 출처 : 정부 관계부처 합동(2021)

산업부문은 에너지 효율화 및 전기화를 통해 온실가스 배출을 80% 이상 감축해야 한다. 이는 저탄소 산업구조로 대전환이 필요한 부문으로, 기술개발 및 시설개선, 배출권 거래제 및 녹색금융 등 온실가스 감축을 위한 투자와 제도 개선 등의 수단이 필요하다. 수송부문은 대체연료 내연기관 허용 여부에 따라 시나리오별 온실가스 배출량이 다르다. 2050년 전환부문 온실가스 배출은 유연성을 제공하는 LNG 설비의 활용 여부에 따라 온실가스 배출량이 다른데, A안은 탄소중립 달성, B안은 0.207억 톤으로 전망하고 있다.

표 9. 시나리오별 전원별 발전량 및 온실가스 배출량

구분	원자력	석탄	LNG	재생E	연료 전지	동북아 그리드	무탄소 가스터빈	부생 가스	기타	합계	예상 배출량 (억톤)
A안	76.9 (6.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0%)	889.8 (70.8%)	17.1 (1.4%)	0.0 (0%)	270.0 (21.5%)	3.9 (0.3%)	-	1257.7 (100%)	0
B안	86.9 (7.2%)	0.0 (0.0%)	61.0 (5.0%)	736.0 (60.9%)	121.4 (10.1%)	33.1 (2.7%)	166.5 (13.8%)	3.9 (0.3%)	-	1208.8 (100%)	0.207
9차 수급	25.0%	34.2%	19.0%	20.8%	-	-	-	-	1.0%	100%	1.927

* 출처 : 정부 관계부처 합동(2021)

전환부문 탄소중립 시나리오는 향후 에너지 기본계획 및 전력수급 기본계획 등을 통해 구체화하고, 석탄발전 감축에 대한 구체적인 경로 산정이 필요하다. 또한 탄소중립 시나리오에서 주 에너지 공급원인 신재생에너지의 설비용량 및 수용성 확보를 위한 노력이 뒤따라야 할 것이다. 이를 위해 전력망에 대한 선제적이고 계획적인 투자가 필요하며, 안정적인 전력계통 운영을 위해 운영기술 및 전력시장에 대한 고도화가 필요하다.

2.2. 전력계통 및 전력시장 기술개발

최근 재생에너지의 급격한 보급으로 우리나라의 전원구성에 큰 변화가 진행되고 있으며, 계통운영 및 전력시장에 상당한 영향을 미치고 있다. 현행 전력시장 운영체계로는 폭발적으로 증가하고 있는 분산형 신재생 자원을 수용하기에는 한계가 있다. 일반적으로 도매전력시장은 에너지 시장, 보조서비스 시장, 용량시장 등으로 구성되지만 우리나라 전력시장은 변동비 기반의 하루-전 에너지 시장만을 운영하고 있다. 이는 계통한계가격(SMP, System Marginal Price, 거래시간별로 적용되는 전력량에 대한 전력시장가격을 의미) 왜곡과 계통 운영 시 제약으로 인한 추가 비용 발생 등 전력시장 효율성을 상당히 저해하고 있다. 2020년 도매전력시장의 총 정산금 435,929억 원 중 에너지정산금이 347,024억 원 수준으로 전체의 79.6%를 차지하고 있어 적지 않은 시장 규모임을 알 수 있다.

표 10. 2020년 전력거래 정산금 실적

	에너지정산금			용량 정산금	비상대비 예비력 정산금	보조 서비스 정산금	전력거래 정산금	정산단가
	전력량	계약	기타					
기저	197,250	5,562	470	31,516	1,515	133	236,446	71.80
일반	132,208	10,067	1,467	34,150	-	258	178,151	95.44
RPS 의무이행 정산금							20,031	
배출권거래 정산금							1,301	
총계	329,458	15,629	1,937	65,667	1,515		435,929	80.35

* 출처 : 전력거래소(2021)

전력시장 제도 개선을 위하여 우선 해외의 상황을 잠깐 살펴보면, 유럽연합(EU)은 하루 전, 당일, 실시간으로 이어지는 3중 정산 체제로 운영되고 있으며, 북미는 하루 전과 실시간 시장으로 구성되는 2중 에너지시장 구조를 도입하고 있다. 또한 에너지 및 용량 등에 대한 선도 및 선물시장을 가지고 있을 뿐만 아니라 송전 혼잡을 완화하기 위한 송전권 시장 등도 도입하고 있다.

그림 19. 미국 도매전력시장의 구성



* 출처 : 전력거래소(2017)

도매전력시장은 현행 하루 전 에너지 시장에서 하루 전 및 실시간 에너지 시장으로 개선되어야 하며, 현재에는 없는 보조서비스 시장의 개설과 에너지 시장과의 상호 최적화 과정을 통하여 합리적인 가격을 도출할 필요가 있다. 이를 위하여 국가 에너지관리시스템(EMS, Energy Management System)과 전력 시장운영시스템(MMS, Market Management System) 등 인프라의 개선이 필요하다.

그림 20. 도매전력시장 개선 방향



* 출처 : 산업통상자원부(2020)

먼저 에너지 시장의 개선은 크게 실시간 시장 도입, 계통제약 반영, 가격 입찰제도 도입으로 요약된다. 이를 위한 전력 시장운영시스템(MMS, Market Management System)의 도입과 차기 계통운영시스템(EMS, Energy Management System)과의 유기적 연계가 필요하다. 시장운영시스템(MMS)은 안전도 제약 기동정지계획(SCUC, Security Constrained Unit Commitment), 실시간 기동정지계획(RTUC, Real-time Unit Commitment), 5분 단위의 안전도 제약 경제급전(SCED, Security Constrained Economic Dispatch), 예비력과 에너지의 동시 최적화(Co-optimization) 등의 기능을 보유하고 있어야 한다. 또한 신재생에너지, 수요반영(DR, Demand Response), 에너지저장장치(ESS), 가상발전소(VPP, Virtual Power Plant) 등 다양한 자원의 체계적 수용과 관리, 고압직류(HVDC, High Voltage Direct Current), 유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission System) 설비의 감시 및 제어, 무효전력의 실시간 관리, 실시간 안정도 해석 등과 같은 기능도 보유하여야 변동성 재생에너지가 주도적인 미래의 전력시장과 전력계통을 안정적으로 운용할 수 있다. 온실가스를 포함한 환경비용의 반영도 에너지 시장에서 구현되어야 한다.

표 11. 에너지 시장의 개선 방향

실시간 시장 도입	계약기반 가격제도	(기저, 일반) 가격입찰 도입
<ul style="list-style-type: none"> • 재생에너지 수용성 확대 (예측 및 입찰 반영) • 시장참여자 공정거래 및 실시간 수급 균형에 대한 시장역할 강화 	<ul style="list-style-type: none"> • 시장 가격결정 발전계획과 계통운영의 운영발전계획 일원화 • 전력시장의 정확한 가격신호 제공 	<ul style="list-style-type: none"> • 비용 기반 규제의 비합리성 및 분쟁 요인 제거 • 환경비용과 사업자 제반 비용의 합리적 반영

* 출처 : 산업통상자원부(2020)

전력시스템에서 유연성 자원을 가장 효율적으로 확보하는 방안은 보조서비스 시장을 개설하는 것이다. 특정 발전기의 예비력 제공은 에너지 시장에서의 거래 기회의 상실과 연계되므로, 가격 입찰을 통한 동시 최적화는 보조서비스 시장의 출발점이기도 하다. 국가 온실가스 감축목표(NDC) 및 탄소중립으로 태양광 및 풍력 등 변동성 재생에너지의 시장 점유는 지속적으로 높아질 것이므로 안정적으로 전력공급을 하기 위하여 예비력 확보 요구는 더욱 커질 것이다. 또한, 향후에는 재생에너지와 원자력 등의 출력 감소가 더욱 빈번해질 것이며, 이를 관리하고 극복하는 방안은 양수 및 에너지저장장치(ESS) 등과 같은 장주기 에너지저장장치를 추가적으로 건설하여 유연성을 높이는 것이다. 이 밖에도, 현행 보조서비스 확보 기준에는 포함되지는 않지만, 계통 관성(Inertia)에 대한 모니터링과 확보 대책이 필요하며, 원자력, 동기조상기, 플라이-휠, 인버터 기반의 합성 관성 등 종합적으로 획득 가능한 자원을 확보해야 한다. 변동성 재생에너지의 보급 확대에 따라, 안정적 전력공급을 위해서는 장주기 에너지저장장치는 필연적으로 필요하다. 이를 위하여 기존 기술인 양수, 리튬이온배터리 에너지저장장치(ESS) 등의 도입이 필요하지만, 이들의 단점을 극복하고 새로운 시장을 창출하기 위하여 다양한 전력저장 신기술을 개발할 필요가 있다. 이 중 중력에너지저장시스템(GESS, Gravity Energy Storage System)은 미국과 유럽을 중심으로 기술개발 최종검증단계까지 돌입하는 등 가장 빠른 개발 진척을 보이고 있다.


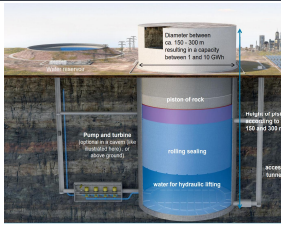
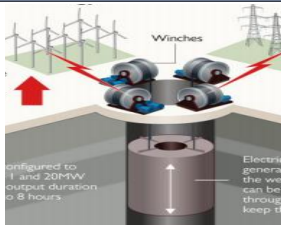
최근 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원은 에너지 탄소중립 기술개발 로드맵을 통하여 총 13개 분야(태양광, 풍력, 청정연료발전, 연료전지, 그린수소, 에너지저장, 전력계통, 섹터커플링, 산단·건물, 에너지설비, 자원순환, 정유, CCUS)에 대한 2050년까지의 기술개발 과제를 발굴한 바 있다. 이 가운데 전력계통 분야는 1) 재생에너지 무제한 접속 전력계통 구현, 2) 인프라 고도화를 통한 전력계통 효율화, 3) 전전화 대비 전력계통 연동형 에너지시스템 구축, 4) 미래 전력계통 전환을 위한 시장 및 거래시스템 혁신 등의 전략방향을 설정하여 2050년까지의 연구개발 방향을 제시하고 있다.

탄소중립을 달성하기 위하여 전력부문의 기술 혁신은 필수적이며 이는 계통운용, 전력시장, 전력저장, 고효율 청정발전원 등을 포함하고 있다. 무엇보다도 안정적 전력공급을 담보하는 탄소중립이 필요하며 이러한 측면에서 전력부문의 제도와 기술의 선진화는 탄소중립의 필요 요건을 밝혀준다.

표 12. 에너지저장장치 신기술 개요

구분	중력에너지 저장시스템	압축공기 저장시스템	액화공기 저장시스템	열에너지 저장시스템
개념	• 중력을 이용한 위치에너지로 전력 저장	• 잉여전력을 압축 • 공기로 저장 후 가열하여 터빈구동	• 잉여전력을 액화 • 공기로 저장 후 재기화시켜 발전	• 잉여전력으로 암석을 가열하여 열을 저장
저장매체	• 콘크리트 등	• 압축공기	• 액화공기	• 암석
장점	• 직관적 기술	• 최대 12시간 에너지방출/빠른응답	• 친환경 • 긴 수명	• 장기저장 가능 • 집적화 용이
단점	• 외부미관	• 낮은 효율/추가가열 시 온실가스배출	• 기술난이도 (극저온 공기액화)	• 낮은 효율
개발단계	• 실증 진행	• 실증/상업화 초기	• 실증/상업화 초기	• 실증 진행
대표업체	• Energy Vault社 • Heindl Energy社 • Gravitricity社	• Hydrostor社	• HighviewPower社	• Siemens Gamesa社

- (Energy Vault社) 33층(110m) 건물 꼭대기에 6개의 크레인을 설치하고 35톤 무게의 약 5천개 콘크리트 블록 매달아 상하 이동시킴
- (Heindl Energy社) 물을 펌핑하여 피스톤(암석)을 상승시켜 에너지를 저장, 전력이 필요할 때 물을 방출시켜(피스톤 하강의 힘을 이용) 터빈을 구동
- (Gravitricity社) 5백~5천톤의 추를 깊이 150~1500m 수직 통로에서 상방(충전), 하방(발전) 이동시킴

구분	Energy Vault社	Heindl Energy社	Gravitricity社
개념도			
완성도	최종 검증단계	검증단계(~2021)	검증단계(~2023)
저장용량	20~80MWh	1~8GWh	1~20MW
수명	35~60년	60년 이상	50년
효율	88~92%	80%	80~90%
응답시간(100%출력)	2.9초	10초 이내	1초 미만
방전 지속시간	8~16시간	8시간 이상	15분~4시간
LCOE(사업자 제시)	57.5원/kWh	108~235원/kWh	197원/kWh

* 그 밖의 프로젝트 : ARES社(미국, 12.5MWh), MGES社(오스트리아, 0.88~4.41MW) 실증시험 중

* 출처 : 전력거래소(2021)

그림 21. 에너지 탄소중립 기술개발(전력계통 분야)

전략방향	Baseline	단기(~2025)	~2030	~2040	~2050	전략방향 목표
재생에너지 무제한 접속 전력계통 구현	• 재생에너지 계통설비 이용률 15% 이하	○ 재생에너지 변동성 수용 전력망 시스템 구축 기술 개발		○ GW급 연근해 송전망 및 전력망 WAMAC 실증	○ 자립 상용화	• (40) 재생에너지 계통설비 이용률 50%
	• 허브변전소 기술개발 계획 수립	○ 재생에너지 전용 허브 변전소 구축 기술 개발 ○ 허브변전소 실증	○ 허브변전소 실증	○ 허브변전소 도입확산	○ 자립 상용화	• (40) 재생에너지원 집중지역 대상 허브변전소 10개소 도입
	• 수용가 마이크로그리드 규모 실증	○ 에너지저장형 배전망 시스템 기술 개발	○ Test Plant 구축 후 200MW급 실계통 실증	○ 에너지 자립형 배전망 도입 확산		• (50) 배전편제센터 41개소 도입
인프라 고도화를 통한 전력계통 효율화	• 육자-제주 비동기 HVDC 연계 운영	○ 재생에너지 변동성 공동대응 국가간 전력망 연계 타당성 검증 및 협약체 구성	○ 국가간 전력망 연계 기술 개발	○ 파일럿 프로젝트 추진		• (50) 동북아 수퍼그리드 활용 GW급 재생에너지 수용성 향상
	• 컨버터스테이션 요소기기 개발 중	○ AC/DC 하이브리드 전력계통 구축 및 운영 기술 개발	○ 파일럿 및 실계통 실증	○ 도입 확산	○ 자립 상용화	• (40) GW급 AC/DC 하이브리드 시스템 도입
	• 계통관성 보조기술 연구 중	○ 계통 유연성 확대 보조서비스 기술 개발	○ 실증 및 보조서비스 시장 연계 운영	○ 보조 서비스 도입확산	○ 자립 상용화	• (40) 100MW급 합성관성 보상 시스템 도입
전전화(全電化) 대비 전력계통 연동형 에너지시스템 구축	• P2G, P2H 개별시스템 개발 중	○ 유연자원 통합운영 기술 개발	○ 배전 계통 연계 실증	○ 유연 자원거래 시장확대		• (40) 200MW 배전계통연계 운전
	• 수용가 단위 수백 kW급 실증	○ 배전망 연계 소규모 전력망 운영 기술 개발	○ 배전선로 연계 실증	○ 배전망 도입 및 확산	○ 자립 상용화	• (40) 10MW급 배전선로 10개소 도입
	• 분산전원 통합관리 시스템 개발 중	○ 분산에너지의 계통연계 통합 운영 기술 개발	○ 통합 운영시스템 실증 및 전력시장 적용	○ 분산자원 거래확대		• (40) 분산원 전원 발전량 150TWh
미래 전력계통 전환을 위한 시장 및 거래시스템 혁신	• V1G 스마트 충전제어 및 소규모 실증	○ 전력계통 연동 허브서비스 지원 VGI 기술 개발	○ VGI 유연충방전 제어 운영 및 상호운영 인증체계 실증	○ VGI 유연자원 상용화		• (30) V2G 총발전량 유연자원화(600MW)
	• (19) 재생에너지 발전비중 8%에서 안정적 운영	○ 탄소중립 관점 전력시장 운영 지원 기술개발	○ 보조서비스 시장 실증 및 운영시스템 구축	○ ESS 전력시장 운영시스템 상용화 구축	○ ESS 운영시스템 상용화	• (50) 재생에너지 발전비중 90% 이상에서 주파수 유지율 99.9%
	• CBP 기반 전력거래시장 운영	○ 지능형 전력거래 및 전력량 보안 인프라 기술 개발	○ 전력거래 플랫폼 운영 실증	○ 전력거래 플랫폼 도입 및 고도화	○ 자립상용화	• (40) 차세대 전력거래 플랫폼 도입

* 출처 : 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원(2021)

III 결론

2018년을 기준으로 우리나라 온실가스 배출의 87%는 에너지부문에서, 37%는 전력 및 열을 포함하는 전환부문에서 발생하고 있다. 즉, 2050 탄소중립과 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안)을 충족하기 위해서는 전력 및 에너지 산업이 그 중심에 있음을 알 수 있다. 전력부문에서 신재생에너지의 지속적 보급을 통한 에너지 전환과 더불어 전력망의 지능화, 제반 인프라와 제도 등이 혁신적으로 개선되어야 두 가지 목표를 달성할 수 있을 것이다. 특히, 타 부문의 탄소중립의 상당 부분은 전기화를 통하여 달성될 것이고, 이는 최종에너지에서 전기가 차지하는 비중이 현재 20% 수준에서 장기적으로 50% 내외까지 증가함을 의미한다. 그러나 현재 수준의 전력망 용량, 기술, 제도로는 이러한 상황을 효율적으로 수용하기 어려울 것이다. 따라서, 전력부문의 기술 혁신은 필수적이며 이는 계통운용, 전력시장, 전력저장, 고효율 청정발전원의 개발, 에너지 섹터의 유기적 연계 등 광범위한 영역을 포함해야 할 것이다. 향후 20~30년 동안 글로벌 전력산업에서의 기술 경쟁은 더욱 치열해지고 시장은 획기적으로 성장할 것이다. 전력부문의 인프라, 제도, 기술의 혁신은 탄소중립뿐만 아니라 미래 먹거리 산업의 창출 관점에서 이해되고 국가 차원에서 체계적으로 지원할 필요가 있다.

저자_ 박종배(Jong Bae Park)

• 학력

서울대학교 전력경제 박사
 서울대학교 전력계통 석사
 서울대학교 전기공학 학사

• 경력

現) 건국대학교 전기전자공학부 교수

참고문헌

〈국내문헌: 가나다순〉

- 1) 대외경제정책연구원(2021), 일본의 2050 탄소중립과 그린성장전략.
- 2) 대외경제정책연구원(2021), EU 탄소감축 입법안('Fit for 55')의 주요 내용과 시사점.
- 3) 박종배(2021), 탄소중립 시나리오의 개선 방향, 한국에너지학회-자원경제학회 공동세미나.
- 4) 산업통상자원부 (2018), 제2차 지능형전력망 기본계획(2018~2022).
- 5) 산업통상자원부 (2019), 전력시장 효율화 방안 연구.
- 6) 산업통상자원부(2020), 제5차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획.
- 7) 산업통상자원부(2020), 제9차 전력수급기본계획.
- 8) 산업통상자원부(2020), 전력시장 효율성 제고 방안 연구.
- 9) 산업통상자원부, 에너지기술평가원 (2021), 탄소중립에너지기술 로드맵.
- 10) 에너지경제연구원(2017), 신재생에너지 보급 확산을 대비한 전력계통 유연성 강화방안 연구.
- 11) 에너지경제연구원(2018), 변동성 재생에너지 확대에 대비한 계통안정화 방안 연구.
- 12) 에너지경제연구원(2021), 세계 에너지시장 인사이트: 일본 정부, '2050 탄소중립 실현을 위한 녹색성장전략' 수립.
- 13) 에너지경제연구원(2021), 세계 에너지시장 인사이트: 환경성·경제산업성, 새로운 2030년 온실가스 감축 목표 반영한 부문별 목표치 설정.
- 14) 에너지경제연구원(2021), 세계 에너지시장 인사이트: IEA가 제시하는 2050 탄소중립 달성의 필수조건.
- 15) 에너지경제연구원(2021), 세계 에너지시장 인사이트: 2050 탄소중립을 달성을 위한 미국의 장기전략.
- 16) 전력거래소(2017), 해외 전력산업동향: 미국 전력시장 동향
- 17) 전력거래소(2021), 2020년도 전력시장 통계.
- 18) 전력거래소(2021), 전력계통 혁신 전략 초안.
- 19) 정부 관계부처 합동(2020), 2050 탄소중립 추진전략.
- 20) 정부 관계부처 합동(2021), 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안.
- 21) 정부 관계부처 합동(2021), 2050 탄소중립 시나리오 안.
- 22) 정부 관계부처 합동(2021), 에너지 탄소중립 혁신전략.
- 23) 코트라 (2021), 해외시장뉴스, 일본 탄소배출량 감축 목표 및 에너지 구조 변화 목표 발표.

〈국외문헌: 알파벳순〉

- 24) BEIS of UK (2020), The Energy White Paper Powering our Net Zero Future.
- 25) BEIS of UK (2021), Net Zero Strategy: Build Back Greener.

- 26) European Commission(2020), Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050.
- 27) European Parliament(2019), Briefing: European policies on climate and energy towards 2020, 2030 and 2050.
- 28) IEA (2021), Net Zero by 2050: A Roadmap for Global Energy Sector.
- 29) IEA (2021), World Energy Outlook 2021.
- 30) Kaplan, S. M. (2009), Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues, CRS Report for Congress, 7-5700.
- 31) NREL(2015), Advancing System Flexibility for High Penetration Renewable Integration.
- 32) NREL(2021), Electrification Futures Study: Scenarios of Power System Evolution and Infrastructure Development for the United States.
- 33) NATAION Grid (2021), Future Energy Scenario 2021.
- 34) U.S. Department of State (2021), The Long-term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.

〈기타자료〉

- 35) (2050 탄소중립 홈페이지) <https://www.gihoo.or.kr/netzero/intro/intro0202.do>
- 36) (에너지정보 소통센터) <https://www.etrans.or.kr/policy/09.php>
- 37) (스마트그리드사업단 홈페이지) <https://www.smartgrid.or.kr/>
- 38) (위키백과 홈페이지) https://ko.wikipedia.org/wiki/전력_계통
- 39) (코트라) <https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotraneews/3/globalBbsDataView.do?setIdx=242&dataldx=190454>



02

풀 스택(Full-stack) 양자컴퓨터 기술 현황과 전망

김준기(성균관대학교 나노공학과 조교수)

“이 세상은 고전적이지 않기 때문에(젠장), 만약 자연계를 모사하는 기계를 만든다면 양자역학적으로 만드는 것이 좋을 겁니다. 그리고 그것은 매우 멋진 문제인데, 왜냐하면 그리 쉽게 보이지 않기 때문입니다.”

- 리처드 파인만(Richard Feynman), ‘Simulating Physics with Computers(1982)’

I 서론

지금으로부터 40년 전인 1981년 여름, 메사추세츠 공과대학의 Endicott 하우스에서 작은 학회가 열렸다. IBM사와 메사추세츠 공과대학 컴퓨터과학 연구실의 지원으로 개최된 이 행사의 주제는 ‘연산의 물리학’이었으며, 참가한 많은 학자들은 자연에 대한 높은 이해를 통해서 더 강력하고 효율적인 컴퓨팅을 구현하기 위한 방안들을 논의하였다. 이 학회에서 파인만(Feynman)은 그의 키노트 강연을 통하여 물리 현상을 모사하는 일에 있어서 기존 컴퓨터의 한계를 지적하고, 만일 양자현상을 이용하는 기계가 있다면 자연계를 모사하는 일을 더 효율적으로 해낼 수 있는 가능성을 제시했다(Feynman, 1982). 바로 오늘날 양자컴퓨터에 대한 아이디어였던 것이다.

그림 1. 양자컴퓨터 연구의 시발점이 된 1981년 ‘연산의 물리학’ 학회



Physics of Computation Conference Endicott House MIT May 6-8, 1981

- | | | | |
|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| 1 Freeman Dyson | 13 Frederick Kantor | 25 Robert Suya | 37 George-Michaels |
| 2 Gregory Chaitin | 14 David Levin | 26 Stan Kogel | 38 Richard Feynman |
| 3 James Crutchfield | 15 Konrad Zuse | 27 Bill Gosper | 39 Laurie Lingham |
| 4 Norman Packard | 16 Edward Ziegler | 28 Luc Fresse | 40 Thangarajan |
| 5 Panos Lagarias | 17 Cal Adam Potts | 29 Madhu Gupta | 41 |
| 6 Jerome Rothstein | 18 Anatol Holt | 30 Paul Benioff | 42 Gerard Vethniac |
| 7 Carl Hewitt | 19 Roland Vollmar | 31 Hans Moravec | 43 Leonard Levin |
| 8 Norman Hardy | 20 Hans Ehrenman | 32 Ian Richards | 44 Lew Levin |
| 9 Edward Fredkin | 21 Donald Griespan | 33 Martin Freese | 45 Peter Gacs |
| 10 Tom Toffoli | 22 Markus Buehner | 34 Danny Hillis | 46 Dan Greenberger |
| 11 Roaf Landauer | 23 Otto Floberth | 35 Arthur Burks | |
| 12 John Wheeler | 24 Robert Lewis | 36 John Cooke | |

* 출처 : Endicott House 사이트

그리고 2019년, 마침내 미국의 구글 양자AI팀은 최초로 양자계산 우월성을 실험적으로 구현했다고 발표하였다 (Arute et al., 2019). 양자우월성이란 양자컴퓨터를 이용하여 특정 문제에 대해 현재의 슈퍼컴퓨터보다 빠른 연산을 수행하는 것으로 양자컴퓨팅 분야의 큰 이정표로 여겨져왔다. 연구진은 무작위 양자회로 샘플링이라는 작업에서 슈퍼컴퓨터로 1만년이 걸릴 것으로 예상되는 계산을 단 200초 만에 수행하였다고 밝혔다. 잇따라 2020년에는 중국 과학기술대학에서도 보존샘플링을 이용한 양자우월성 연구를 발표하였다(Zhong et al, 2020). 공상과학과 같이 느껴지던 양자컴퓨터가 현실로 성큼 다가온 것이다.



* 출처 : (좌) 구글 AI 블로그, (우) 중국 과기대 Chao-Yang Lu 교수 사이트

융합연구리뷰에서는 양자컴퓨터와 기존의 컴퓨터의 차이점, 풀스택 양자컴퓨터의 구성 요소들과 기능을 설명한다. 그리고 현재 연구 동향을 짚어보면서 양자컴퓨터 개발의 현주소를 알아보려고 한다.

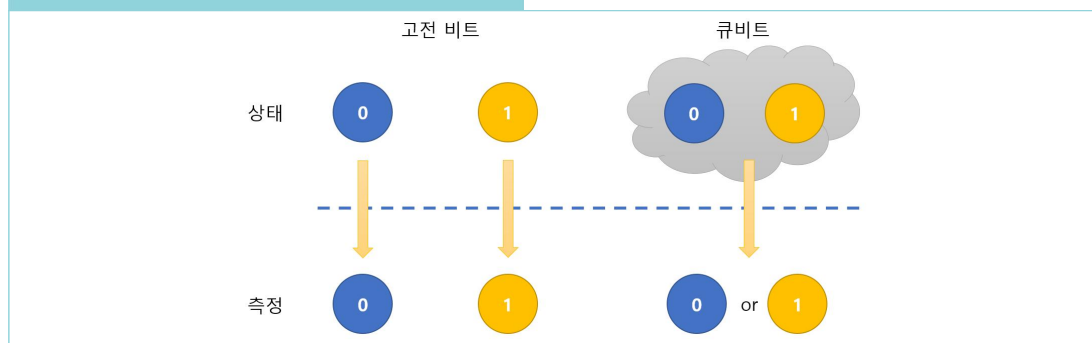
II 풀 스택 양자컴퓨터 기술 개요

1. 양자컴퓨터와 기존 컴퓨터의 차이점

양자컴퓨터란 무엇일까? 양자컴퓨터를 한 문장으로 설명한다면 '양자역학의 중첩과 얽힘을 정보 처리에 활용하는 컴퓨터'라고 할 수 있다. 일반적인 컴퓨터는 정보를 비트(Bit) 단위로 저장하고 처리한다. 비트는 0 또는 1의 값을 가지는 기초 정보 유닛(Unit)으로 모든 컴퓨터는 이 비트를 이용하여 온갖 복잡한 연산을 수행할 수 있다.

하지만 일반 컴퓨터의 비트는 양자역학적 성질을 구현할 수 없다. 양자역학에서는 상태와 측정값이 분리되어있어 측정 전의 상태가 측정값보다 더 높은 자유도를 갖는 것이 가능하다. 이러한 양자역학적 성질을 구현할 수 있는 정보 유닛이 바로 큐비트(Qubit, Quantum Bit의 약자로 양자컴퓨터 연산단위)이다. 양자컴퓨터는 정보를 큐비트 단위에 저장하고 처리하여 연산을 수행한다. 고전 비트는 측정 전 상태와 측정값이 동일하지만 큐비트는 측정 전 상태가 더 높은 자유도를 가지며 측정값은 확률적으로 정해진다. 이때 정보는 큐비트의 양자 중첩과 얽힘을 통해 일반 컴퓨터보다 더 복잡한 고차원의 정보공간(힐버트 공간)에 저장된다. 양자컴퓨터는 큐비트의 중첩과 얽힘을 활용하여 더 효율적으로 정보를 저장 및 처리할 수 있다.

그림 3. 고전 비트와 큐비트의 개념 비교

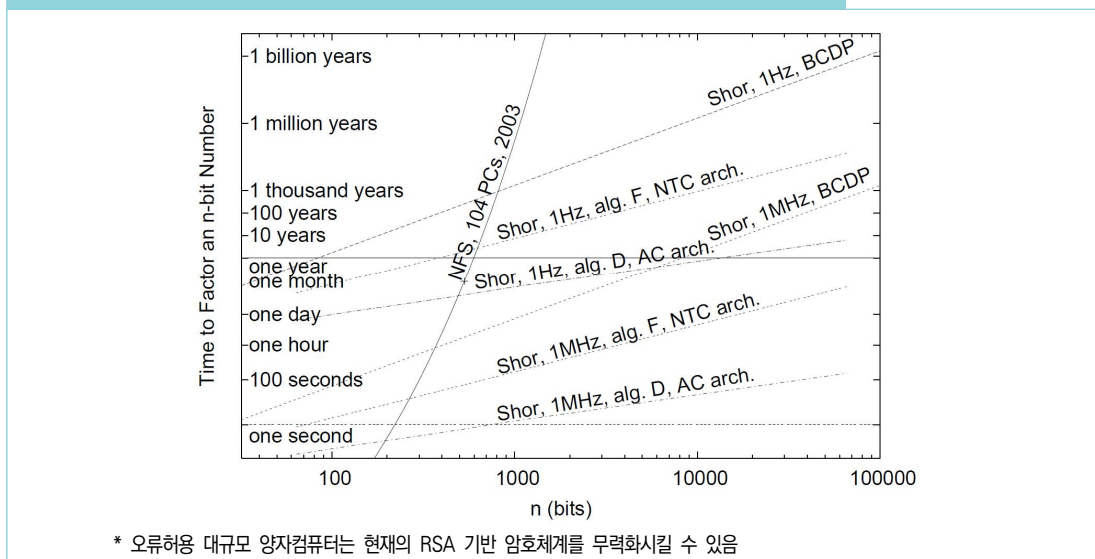


* 출처 : 저자 작성

양자컴퓨팅에 대한 한 가지 흔한 오해는 양자컴퓨터가 현재의 컴퓨팅 기술을 전부 대체할 것이라는 생각이다. 양자컴퓨터는 기존 컴퓨팅 기술의 연장선상에 있는 기술이 아니며, 기존 컴퓨터의 모든 연산을 빠르게 만들어 주지 않는다. 양자컴퓨터에서 기존 컴퓨터 대비 이득, 즉 양자우위를 얻기 위해서는 연산 문제에 따라 특별히 디자인된 양자 알고리즘이 필요하다. 이러한 양자 알고리즘이 존재하는 특수한 문제에 대해서 양자컴퓨터는 기존의 컴퓨터보다 연산을 빠르게 하는 것이 가능하다. 물론 그 외의 일반적인 문제를 위한 고전 알고리즘을 양자컴퓨터로 수행하는 것도 가능하지만, 이때는 기존 컴퓨터보다 특별한 장점이 없을 것이다. 오히려 현재 개발되어 있는 슈퍼컴퓨터가 더 효율적으로 연산을 처리할 가능성이 매우 높다.

양자우위가 달성 가능할 것으로 기대되는 문제들 중 대표적인 것이 바로 소인수분해 문제이다. 소인수분해는 현재 사용되는 RSA(Rivest Shamir Adleman) 암호체계(미국 매사추세츠공대에서 개발한 공개키 암호 시스템)의 근간이 되는 문제이며, 현재까지 알려진 가장 효율적인 알고리즘도 지수함수적인 시간을 필요로 하는 대표적인 NP 문제(‘비결정론적 튜링 기계’라는 장치로 합리적인 시간 내에 풀 수 있는 문제)이다. 양자컴퓨터는 소인수분해 문제를 다항함수 시간 안에 해결할 수 있다는 사실이 이미 증명되어 있으며 이는 대규모 양자컴퓨터가 구현된다면 RSA 암호체계를 무력화할 수 있음을 의미한다. 다만 현재 양자컴퓨터의 규모는 주로 사용되는 2048비트 RSA를 해결하기 위해 필요한 리소스에 비하면 아직은 매우 작고, 대규모 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 앞으로도 많은 기술적 발전이 필요한 상황이다.

그림 5. 소인수분해 고전 알고리즘(NFS)과 양자 알고리즘(Shor)의 비교



* 출처 : Van Meter et al. (2008)

또 한 가지 양자컴퓨터에 대한 오해는 양자컴퓨터의 성능지표에 대한 오해이다. 많은 기업들이 큐비트 수를 양자컴퓨터의 성능지표로 제시하지만, 양자컴퓨터의 성능은 단순히 큐비트 수로 정의될 수 없다. 큐비트의 품질에 해당하는 양자게이트(양자 연산) 오류율, 큐비트 결맞음 시간(정보 저장 유효시간), 큐비트 간 연결성 등을 종합적으로 고려해야 양자컴퓨터의 성능을 온전히 평가할 수 있다. 참고로, 현재 큐비트의 게이트 오류율은 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 수준으로 일반 컴퓨터의 오류율(약 10^{-18})에 비해 매우 높다. IBM사는 양자컴퓨터의 성능을 종합적으로 평가하는 지표로 양자부피라는 척도를 제안하여 매년 자신들의 양자프로세서를 평가하고 있다(Cross et al, 2019). 현재까지 가장 높은 양자부피를 기록한 양자 프로세서는 Quantinuum社(구 Honeywell Quantum 팀, 최근 영국 Cambridge Quantum Computing社와 합병)의 H1 프로세서로 12큐비트, 2048의 양자부피를 보고하였다(Quantinuum 사이트). IBM사의 몬트리얼 프로세서는 27큐비트를 보유하고 있음에도 양자부피가 128의 값을 가지는 것을 고려하면 큐비트 수가 양자컴퓨터의 성능을 대표한다고 볼 수는 없다. 최근에는 양자 회로 구동 속도나 알고리즘 기반 벤치마크(Lubinski, 2021) 등 보다 다양한 양자프로세서 평가방법이 제안되고 있어 활용처에 따라 복합적인 벤치마크 자료를 활용하는 것이 좋다.

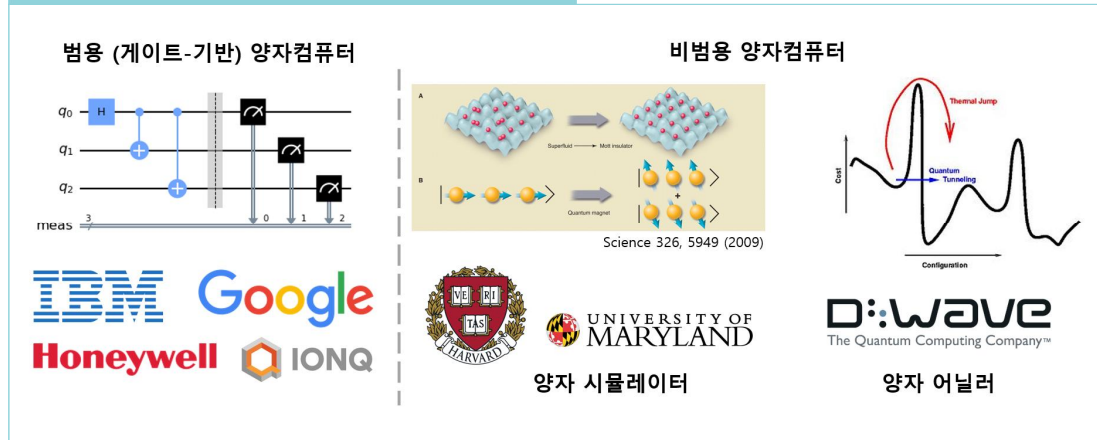
표 1. 현재까지 보고된 양자프로세서의 양자부피 벤치마킹 결과

날짜	양자부피	큐비트 수	제조사	프로세서 이름
2020/01	32	28	IBM	"Raleigh"
2020/06	64	6	Honeywell*	-
2020/08	64	27	IBM	"Montreal"
2020/11	128	10	Honeywell*	"System Model H1"
2020/12	128	27	IBM	"Montreal"
2021/03	512	10	Honeywell*	"System Model H1"
2021/07	1024	10	Honeywell*	"System Model H1"
2021/12	2048	12	Quantum	"System Model H1"

* Honeywell Quantum 부서와 Cambridge Quantum Computing社가 합병하여 Quantinuum으로 사명을 바꿈
 * 출처 : 위키피디아

양자컴퓨터는 흔히 범용 양자컴퓨터와 비범용 양자컴퓨터로 나뉜다. 범용 양자컴퓨터는 일반적인 양자회로를 구동할 수 있는 프로그램이 가능한 하드웨어이다. 반면, 비범용 양자컴퓨터에는 양자 시뮬레이터, 보존 샘플링, 양자 어닐링 등의 제한적인 문제들을 풀 수 있는 양자컴퓨터들이 해당된다. 융합연구리뷰에서는 범용 양자컴퓨터에 주안점을 둔다.

그림 6. 범용 양자컴퓨터와 비범용 양자컴퓨터



* 출처 : 메릴랜드 대학, D-Wave 사이트 및 그 외 저자가 재구성

2. 양자컴퓨터 연구의 개략적 역사

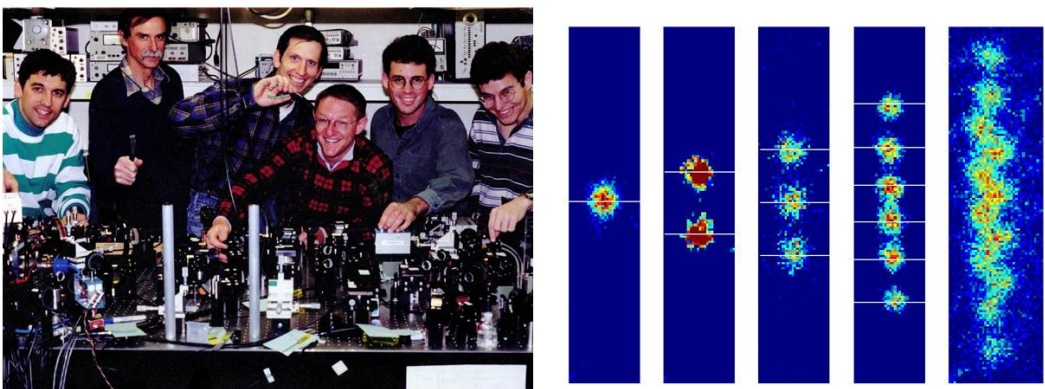
양자컴퓨팅은 초기에는 이론 물리학자들과 컴퓨터 과학자들에 의해 이론적인 내용이 중점적으로 연구되었다. 파인만(Feynman)의 키노트 강연 이후 많은 이들이 새로운 컴퓨팅 모델에 관심을 가졌으며 그 응용가능성에 대한 연구를 진행하였다. 1985년 데이비드 도이치(David Deutsch) 교수는 양자컴퓨터가 양자물리계의 모사뿐만 아니라 다른 문제에도 이점이 있을 수 있음을 처음으로 제시하였다(Deutsch, 1985). 이후 바지라니-번스타인 알고리즘(Bernstein and Vazirani, 1997), 시몬 알고리즘(Simon, 1997)을 통해서 양자컴퓨터가 기존 컴퓨터보다 효율적으로 해결할 수 있는 문제들이 발견되었다.

일련의 연구 결과들 중 1994년 피터 쇼어(Peter Shor) 교수의 소인수분해 알고리즘(Shor, 1999)은 양자컴퓨터 연구에 도화선을 붙이는 계기가 되었다. 이 알고리즘은 양자컴퓨터가 현재 암호체계를 효과적으로 무너뜨릴 수 있음을 증명하여 많은 관심을 불러 일으켰다. 그 외에도 로브 그로버(Lov Grover) 교수의 검색 알고리즘(Grover, 1996) 등 실용성이 있는 다양한 양자 알고리즘이 발견되면서 양자컴퓨터에 대한 관심은 빠르게 커져갔다.

한편 원자물리학, 핵자기공명 등 물리학 실험 분야에서는 이미 미소 양자계의 개별조작을 가능하게 하는 여러 기술적 진전을 만들어 내고 있었다. 이러한 기술적 바탕을 통하여 1995년에는 포획된 이온을 이용한 최초의 양자 논리 게이트의 구현(Monroe, 1995)이 이루어졌고, 2001년에는 핵자기공명을 이용한 첫 번째

쇼어 알고리즘의 구현(Vandersypen, 2001)이 이루어졌다(아쉽게도 핵자기공명 기반의 양자컴퓨터는 확장성에 난점이 있는 것으로 알려져 있다). 2000년대 초반에는 초전도 조셉슨 접합(Josephson Junction, 샌드위치처럼 초전도체 사이에 얇은 금속을 끼워 초전도체끼리 서로 닿지 않더라도 전류가 흐르게 만든 상태)을 이용한 초전도 큐비트의 개발(Devoret et al., 2004)이 빠르게 이루어졌으며 짧은 결맞음 시간 등의 단점을 개선해왔다.

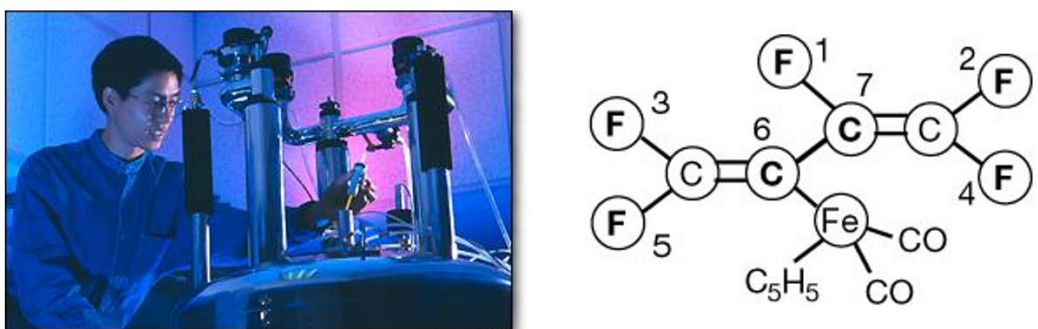
그림 7. (좌) 미국 국립 표준기술연구소(NIST)의 이온 포획 연구팀의 사진,
(우) 포획된 이온의 CCD 사진



* 2012년 노벨상을 수상한 데이비드 와인랜드 교수(왼쪽에서 두 번째)와 IonQ 창립자이며 듀크대 교수인 크리스토퍼 먼로 교수(맨 왼쪽)

* 출처 : NIST 웹사이트

그림 8. (좌) 핵자기공명 실험을 수행하는 아이작 추앙 교수(현 MIT 교수),
(우) 첫 쇼어 알고리즘에 사용된 합성 분자



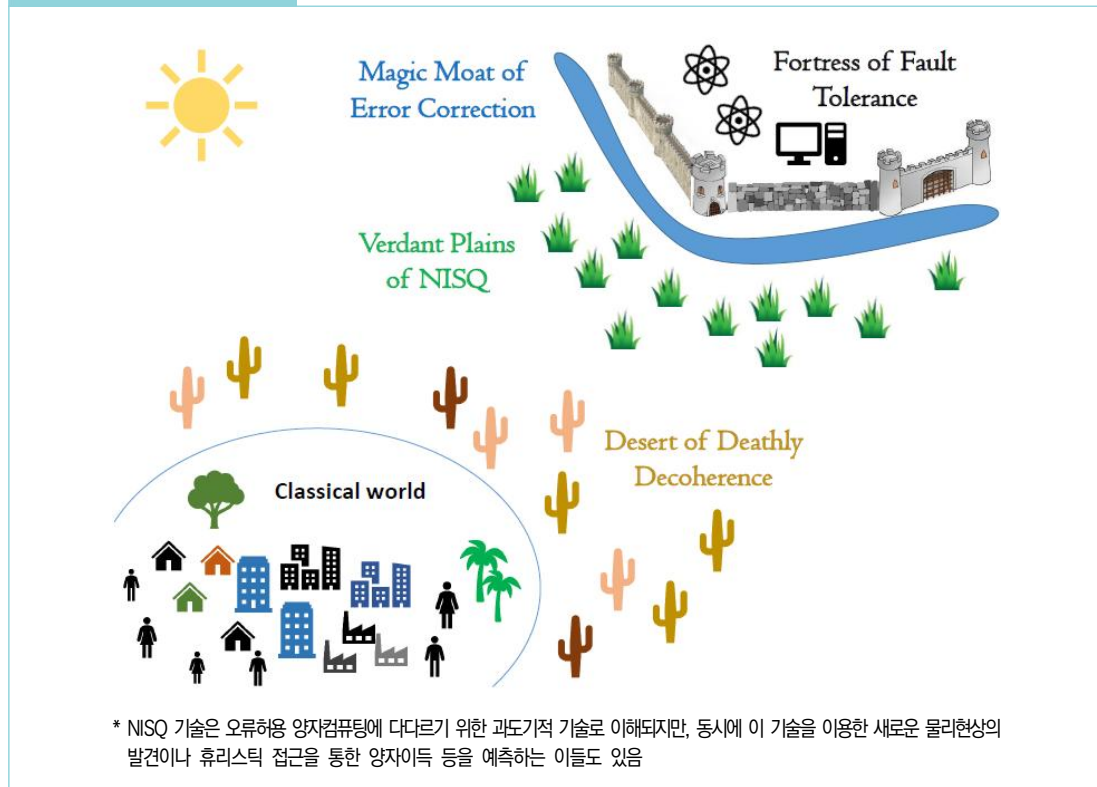
* 아이작 추앙 교수는 7개의 큐비트를 이용하여 15=3x5의 소인수분해를 시연함

* 출처 : IBM

2010년대 중반에 들어서 5개 내외의 소규모 큐비트 시스템이 개발되며 본격적인 소규모 양자컴퓨터가 구현되기 시작하였다. 구글社, IBM社 등 대기업들의 합류와 투자를 바탕으로 양자컴퓨터의 규모는 빠르게 커졌으며 2019년 구글社의 53큐비트 양자컴퓨터를 비롯하여 2021년 중국 과학기술대학의 60큐비트 머신, IBM社의 128큐비트 머신이 속속들이 발표되었다.

캘리포니아 공과대학의 존 프레스킬(John Preskill) 교수는 '잡신호가 있는 중규모의 양자(NISQ, Noisy, Intermediate-Scale Quantum)'라는 단어로 이러한 50~100큐비트 정도의 중규모를 가지는 양자컴퓨터들을 정의하였다(Preskill, 2018). 이 중규모 양자컴퓨터들은 당장의 실용성은 제한적이지만 현재의 디지털 컴퓨터 기술로 완전히 모사하기 어렵기 때문에 컴퓨팅의 새로운 지평을 열 것으로 기대된다. 이론적으로는 고전-양자 하이브리드 알고리즘, 양자 휴리스틱 알고리즘 등 여러 NISQ 알고리즘들이 활발하게 연구되고 있다.

그림 9. NISQ 기술



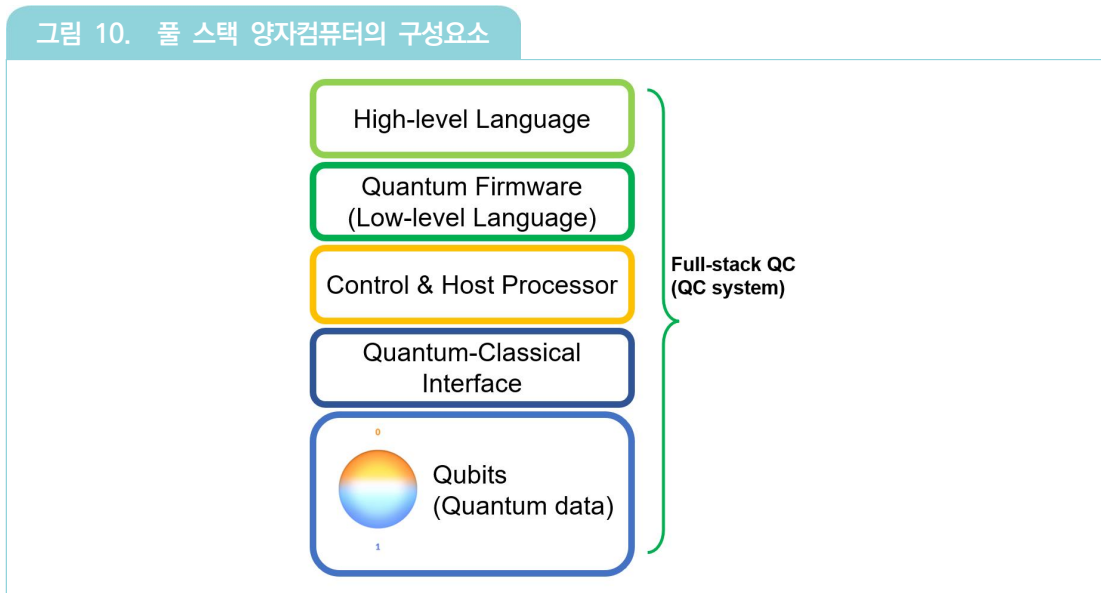
* 출처 : Munro, 2018

반면, 하드웨어 기술의 관점에서는 소수 큐비트 시스템에서 중규모 양자컴퓨터로 넘어가게 되면서 공학적인 설계와 최적화의 요구가 급속도로 증가되고 있다. 따라서 기존 소규모 실험물리학자들이 제작하는 실험장비를 넘어서서 시스템 단위의 통합과 최적화가 중요한 화두로 떠오르고 있으며 많은 공학자들과 컴퓨터 과학자들이 연구 커뮤니티에 합류하여 기여하고 있다.

풀 스택 양자컴퓨터는 큐비트 플랫폼부터 양자 프로그램 언어까지 아우르는 양자컴퓨터 시스템을 일컫는 용어이다. 현재 전 세계 산·학·연에서 이러한 풀 스택 양자컴퓨터의 요소를 개발하고 통합하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 시스템 단위의 연구를 위해서는 다학제적이고 융합적인 접근이 필수적이다.

3. 풀 스택 양자컴퓨터의 요소

풀 스택 양자컴퓨터의 요소는 다섯 가지로, 1) 큐비트(양자 데이터), 2) 양자-고전 인터페이스, 3) 제어 및 호스트 프로세서, 4) 양자 펌웨어(저급 프로그래밍 언어), 5) 양자 고급 프로그래밍 언어로 정리될 수 있다(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). 크게 나누어 첫 세 요소는 하드웨어 스택, 나머지 두 요소는 소프트웨어 스택으로 나눌 수 있다.



* 출처 : Quantum Computing: Progress and Prospects(2019)를 바탕으로 필자가 재구성

3.1. 큐비트(양자 데이터)

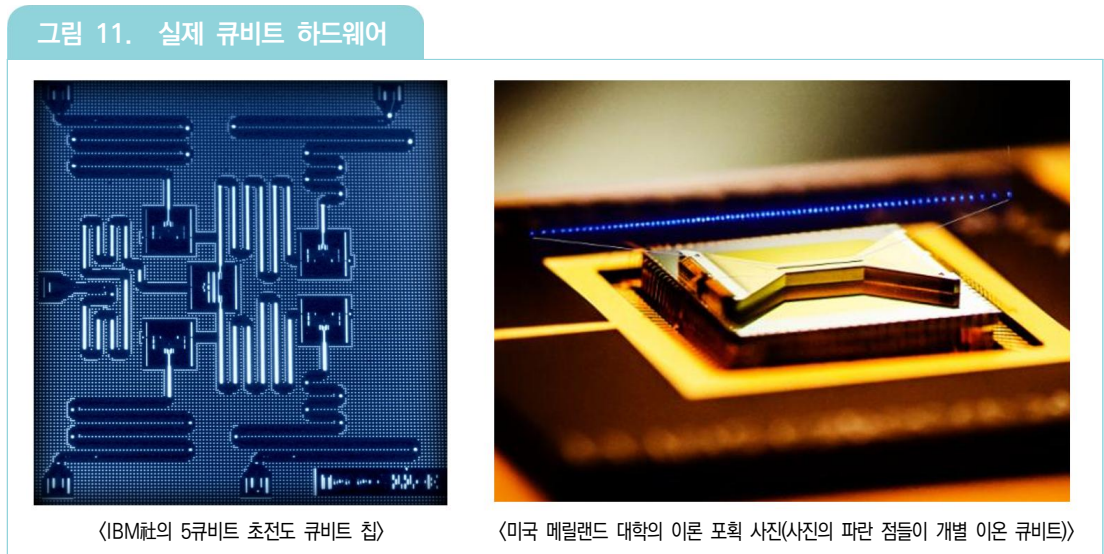
양자상태에 정보를 저장하고 처리할 수 있는 큐비트는 양자컴퓨터의 핵심이라고 할 수 있다. 양자컴퓨터에서 정보는 큐비트의 양자상태에 저장되어 처리된다. 큐비트는 양자역학적 중첩과 얽힘 상태를 가질 수 있을 뿐만 아니라 오랜 시간 동안 양자상태를 유지할 수 있어야 한다. 자연계에서 물리계들은 서로 상호작용하면서 고유의 양자상태를 빠르게 잃어버리는데 이를 결맞음 풀림이라고 한다. 큐비트는 결맞음 풀림을 억제하기 위해 극저온 또는 초고진공($10^{-7} \sim 10^{-10}$ mbar 이하의 진공 정도)을 필요로 하며 이를 통해 양자정보를 오랜 시간 동안 저장할 수 있다. 2000년 데이비드 디빈첸조(DiVincenzo) 교수는 양자컴퓨터를 구성하는 큐비트가 만족해야 하는 5가지 조건을 제시하였는데, 5가지 조건은 큐비트의 확장성, 상태 초기화 기술, 긴 결맞음 시간, 범용 양자게이트, 그리고 큐비트 개별 상태 측정 기술이다(DiVincenzo, 2000). 현재 집중적으로 투자가 진행되고 있는 큐비트 플랫폼들은 이러한 필요조건들을 대부분 만족하고 있다.

양자컴퓨터를 이용하여 임의의 양자프로그램을 구동하기 위해서는 큐비트의 양자상태를 제어할 수 있어야 한다. 특히 두 큐비트 간의 상호작용을 이용하여 양자얽힘(Quantum Entanglement, 둘 이상의 물리계가 강한 상호연관성이 있어 각각 분리해서 기술할 수 없는 상태)을 생성하는 얽힘 게이트의 구현이 매우 중요하다. 큐비트 플랫폼에 따라 얽힘 게이트의 오류율이 다르고, 얽힘 게이트를 구현할 수 있는 큐비트 간의 연결성도 다른데, 이러한 복합적인 부분이 양자컴퓨터의 성능에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 몇몇 큐비트 시스템은 개별적인 양자 얽힘 게이트의 구현 대신 제한된 양자상태 제어만을 구현하고 있으며, 이러한 큐비트 시스템은 비범용 양자컴퓨터로 활용되고 있다.

가장 대표적인 큐비트 플랫폼은 구글, IBM 등 대기업들이 투자를 하고 있는 초전도 큐비트이다(Kjaergaard et al., 2020). 초전도 큐비트는 조셉슨 접합을 이용하여 큐비트를 구현하며, 초전도 현상을 이용하기 때문에 큐비트 칩이 수십 mK의 극저온으로 냉각되어야 한다. 양자컴퓨터 사진에 상들리에처럼 생긴 극저온 냉동기가 자주 등장하는 이유이다. 초전도 큐비트는 초기 짧은 결맞음 시간 등의 문제가 있었지만 지난 20년간 굉장히 빠른 기능 개선을 통해서 현재 가장 좋은 성능을 내고 있는 큐비트 플랫폼 중 하나이다.

또 하나의 양자컴퓨팅 선두 플랫폼은 포획(Trapped) 이온 큐비트이다(Bruzewicz et al., 2019). 이온 큐비트는 전기장으로 포획된 개별 이온들을 레이저로 조작하여 큐비트로 활용한다. 이온 큐비트는 가장 먼저 양자게이트가 구현된 큐비트 중 하나였지만 여러 가지 확장성의 문제로 고체 기반 큐비트보다 개발이 더디게 진행되었다. 하지만 최근 선두 연구그룹들의 기술적 진전을 통해서 이온 큐비트를 기반으로 하는 수십 큐비트 규모의 양자하드웨어가 구현되었으며 높은 큐비트 품질을 토대로 초전도 큐비트 플랫폼과 경쟁 중이다.

그 외에도 중성원자 큐비트, 실리콘 전자 스핀 큐비트, 점결합 큐비트, 광자 큐비트 등 다양한 물리계에서 큐비트를 구현하고 확장가능한 시스템을 구축하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 현재 시점에서 큐비트 간 기술 격차가 있을 수 있지만, 오류허용 양자컴퓨팅을 이용하여 쇼어 알고리즘(Shor's algorithm)을 구현하기 위한 큐비트 개수가 약 100만개 정도임을 고려할 때 향후 어떤 큐비트 플랫폼이 우위를 선점할지는 미지수이다.

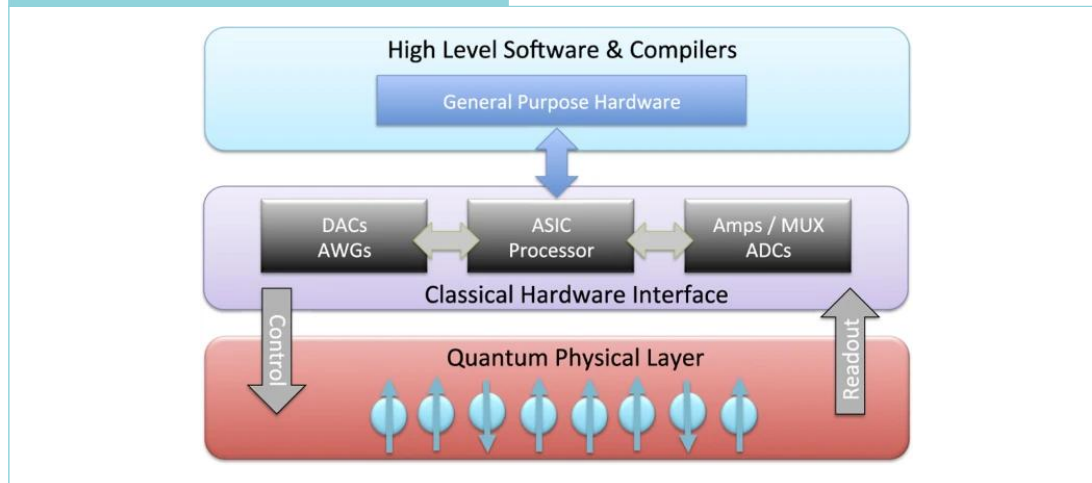


* 출처 : (좌) IBM, (우) 메릴랜드 대학

3.2. 양자-고전 인터페이스

큐비트의 양자상태는 큐비트 종류에 따라 마이크로파 신호 또는 광펄스(Laser Pulse)를 통해 제어된다. 양자-고전 인터페이스는 제어 프로세서에서 생성한 제어 스케줄에 따라 아날로그 제어 신호를 생성하여 큐비트를 제어하고 최종적으로 큐비트 상태를 측정하는 제어 및 측정 인터페이스이다.

그림 12. 양자-고전 인터페이스의 역할



* 출처 : Reilly(2015)

큐비트의 양자정보는 자연적으로 0 또는 1의 디지털이 아닌 연속적인 아날로그 정보로써, 이를 제어하기 위해서는 결맞은 제어펄스가 필요하다. 디지털 신호로 제어되는 기존 컴퓨터와 달리 제어 신호 사이의 동기화와 아날로그 제어 신호의 결맞음이 매우 중요하다. 제어 신호 사이의 위상적 어긋남이나 신호의 주파수 어긋남 등이 양자 게이트의 오류로 축적되기 때문이다. 또한, 아날로그 신호의 특성 상 인접 신호와의 크로스토크(Crosstalk, 누화, 서로 다른 전송 선로 상의 신호가 유도성 결합 따위의 전기적 결합에 의하여 다른 회선에 영향을 주는 현상)에 취약하며 이를 억제하기 위해 제어 신호의 간섭을 막는 것이 기술적인 난관이 되고 있다. 그 결과, 큐비트 수가 증가할수록 확장 가능한 제어 인터페이스를 구축하기 위한 기술적 난이도가 빠르게 증가하고 있다.

일반적으로 정보 저장 단위와 제어 단위가 하나의 실리콘 디바이스에 집적되어 있는 기존 컴퓨터와 달리, 양자컴퓨터에서는 별도의 기술을 가지는 큐비트 플랫폼이 제어/측정 인터페이스와 분리되어 구현되는 경우가 많다. 이때 큐비트와 제어/측정 신호를 큐비트 결맞음을 해치지 않으면서 연결하는 것이 기술적인 난관이며, 개별 큐비트에 선택적으로 제어 신호(마이크로파 또는 광펄스)를 가해주는 기술 역시 양자-고전 인터페이스의 확장성을 어렵게 하는 요소이다.

큐비트 제어 신호의 주파수는 큐비트 공진 주파수에 따라 정해진다. 일반적으로 큐비트의 공진 주파수가 시간에 따라 조금씩 변화하고, 제어 신호의 주파수 역시 오차가 있을 수 있기 때문에 이를 주기적으로 측정하고 보정해주는 것도 중요하다. 시스템의 측정과 보정은 신호 간 간섭, 큐비트의 결합 등을 종합적으로 고려해서

이루어지며 큐비트 수가 증가함에 따라 측정/보정의 비용이 빠르게 증가한다.

양자프로그램의 결과는 큐비트의 상태측정으로 알 수 있다. 큐비트의 측정 결과는 0 또는 1의 이진값으로 나타나게 되며 측정된 이진배열은 프로세서에 전달되어 해석된다. 전체적인 큐비트 값 측정 이외에도 양자 회로 중간에 소수 큐비트를 개별적으로 측정하는 기술은 양자 오류 정정에 핵심적인 기술이다. 이때 측정되는 큐비트 이외의 다른 데이터 큐비트들의 결맞음을 최대한 해치지 않는 상태 측정 기술이 요구된다.

양자컴퓨터의 속도성능은 제어펄스의 속도뿐만 아니라, 주어진 스케줄에 맞는 적절한 제어펄스를 프로그램화하고 최적화하는 시간에도 영향을 받게 된다. 현재까지는 기존 프로세서의 연산속도가 충분히 빨라 양자게이트 시간은 주로 큐비트 상호작용에 의해 제한되고 있다. 이 양자 게이트 시간은 초전도 큐비트의 경우 수십 나노초, 포획된 이온 큐비트는 수~수백 마이크로초의 단위이다.

3.3. 제어 및 호스트 프로세서

제어 및 호스트 프로세서는 소프트웨어 스택에서 주어진 양자프로그램을 수행 스케줄의 형태로 분석하여 양자-고전 인터페이스를 제어한다. 순차적으로 프로그램에 맞는 양자게이트들과 측정을 수행함으로써 양자프로그램을 수행하는 것이 가능하다.

최근 제어 프로세서의 중요성이 특별하게 부각되고 있는 이유는 양자 오류 정정의 필요성 때문이다. 양자 오류 정정은 복수의 물리 큐비트를 이용하여 논리 큐비트를 구성하고, 주기적으로 큐비트의 오류를 측정하여 보정해주는 일련의 작업을 말한다. 양자 오류 정정의 이론적 토대는 이미 1990년대에 마련되었으며, 양자 오류 정정의 구현을 통해서 결합허용 양자컴퓨팅의 실현이 가능할 것으로 생각된다.

양자 오류 정정의 실제적 구현을 위해서는 일부 큐비트를 주기적으로 측정(신드롬 측정)하고 측정 결과에 맞는 피드백을 데이터 큐비트에 가하는 작업을 정기적으로 수행해야 한다. 이때 측정에서 피드백으로 이어지는 레이턴시(Latency, 응답시간)가 충분히 짧아야 오류 정정을 정확하게 수행하는 것이 가능하다. 향후 대규모 양자컴퓨팅을 구현할 경우 상당한 양의 신드롬 정보를 주기적으로 측정 및 분석해야 하는데, 이러한 확장 가능한 고속 제어 프로세서를 구축하는 것이 중요한 과제로 인식되고 있다.

제어 프로세서는 주로 매우 저차원의 추상화 단계에서 구동이 되고, 사용자는 주로 호스트 프로세서를 통하여 양자 프로그램을 실행하게 될 것이다. 호스트 프로세서는 일반적인 고전 컴퓨터로 소프트웨어 스택을 통하여 고급 프로그래밍 언어로 구현된 양자 프로그램을 컴파일하고 제어 프로세서에게 지시를 내리는 역할을 한다. 이때 아키텍처의 디자인에 따라 구현하려는 프로그램 중 연산의 일부만 양자 데이터를 활용하여 계산하는 '가속기' 형태의 컴퓨팅 아키텍처도 제안되고 있다.

그림 13. 풀 스택 양자컴퓨터 하드웨어의 예시(초전도 큐비트의 예)

클라우드 데이터 센터는 유저 인터페이스/접근, 데이터 저장 등을 제공.



제어 프로세서 레이어는 제어 및 측정 레이어를 구동.



극저온 냉동기

제어 및 측정 장비는 큐비트 제어 신호를 생성하고 결과를 측정한다.



신호 연결선에 둘러싸여 있는 큐비트들

* 출처 : Quantum Computing-Progress and Prospects(2019)

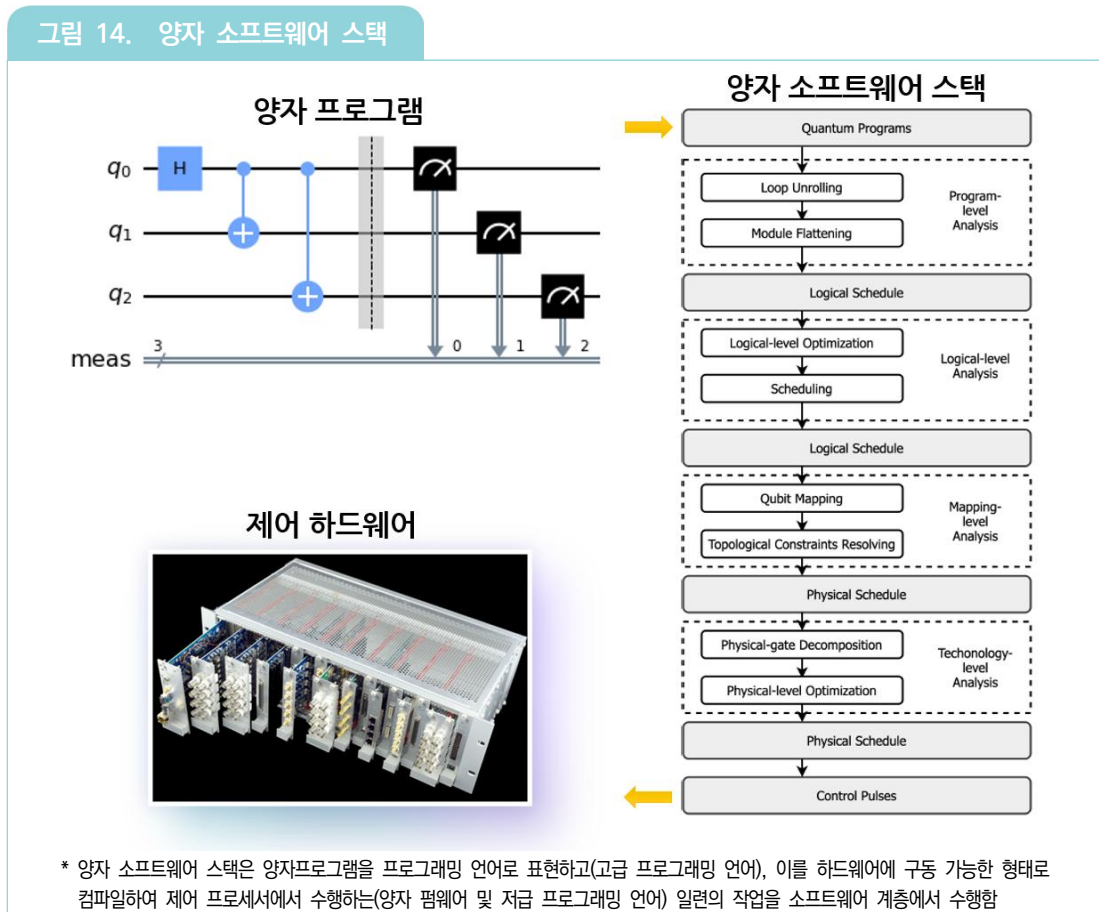
3.4. 양자 펌웨어(저급 프로그래밍 언어)

양자 펌웨어는 호스트 프로세서에 있는 것으로 고급 프로그래밍 언어로 구현된 양자 프로그램을 실제 하드웨어에서 구현하는 역할을 한다. 펌웨어 단에서 양자 프로그램은 양자 어셈블리어 또는 양자 지시어 집합(Instruction Set Architecture)의 저급 프로그래밍 언어들의 형태로 표현되며 게이트 병렬성, 제어 시퀀스 등 양자 프로그램의 구체적인 하드웨어 레벨 제어 표현을 포함한다. 또한 펌웨어는 프로세서 계층과 함께 큐비트의 주기적인 측정 및 보정, 그리고 양자 오류 정정의 소프트웨어적 구현까지 수행한다.

향후 수년간 양자컴퓨터의, 특히 큐비트 레이어의 리소스는 극히 제한될 것으로 예상되며 따라서 저급 프로그래밍 언어 또한 고도의 최적화를 위해서 현재의 컴퓨터보다 하드웨어에 의존하여 구현될 것으로 생각된다. 적은 수의 큐비트로 효율적인 연산을 구현하기 위해서 범용적인 컴파일링보다는 연산-선택적, 하드웨어-선택적인 컴파일링이 필요할 것으로 생각되며 상당한 최적화가 필요할 것으로 생각된다. 반면 보다 장기적인 관점에서 최적화를 추구하면서도 크로스 플랫폼 양자 저급 프로그래밍 언어를 개발하기 위한 노력 또한 지속적으로 이루어지고 있다.

3.5. 양자 고급 프로그래밍 언어

마지막으로 양자 고급 프로그래밍 언어는 양자회로의 형태로 구현된 양자프로그램을 표현하기 위한 프로그래밍 언어로, 일반적인 고급 프로그래밍 언어와 같이 다양한 라이브러리를 제공한다. 고급 프로그래밍 언어에서는 일반적으로 하드웨어의 구체성 없이 추상화된 형태의 양자회로 표현을 제공하며 이를 통하여 손쉽게 양자 프로그램을 만들거나 원하는 백엔드(Backends) 하드웨어 또는 시뮬레이터에서 실행할 수 있도록 한다. 하나의 고급 프로그래밍 언어가 여러 백엔드 하드웨어에서 호환되는 경우도 있으며, 반대로 하나의 백엔드 하드웨어가 여러 가지 고급 프로그래밍 언어를 허용하는 경우도 있기 때문에 고급 프로그래밍 언어의 선택은 다른 풀 스택 양자컴퓨터의 요소들만큼 가깝게 묶여있지는 않다.



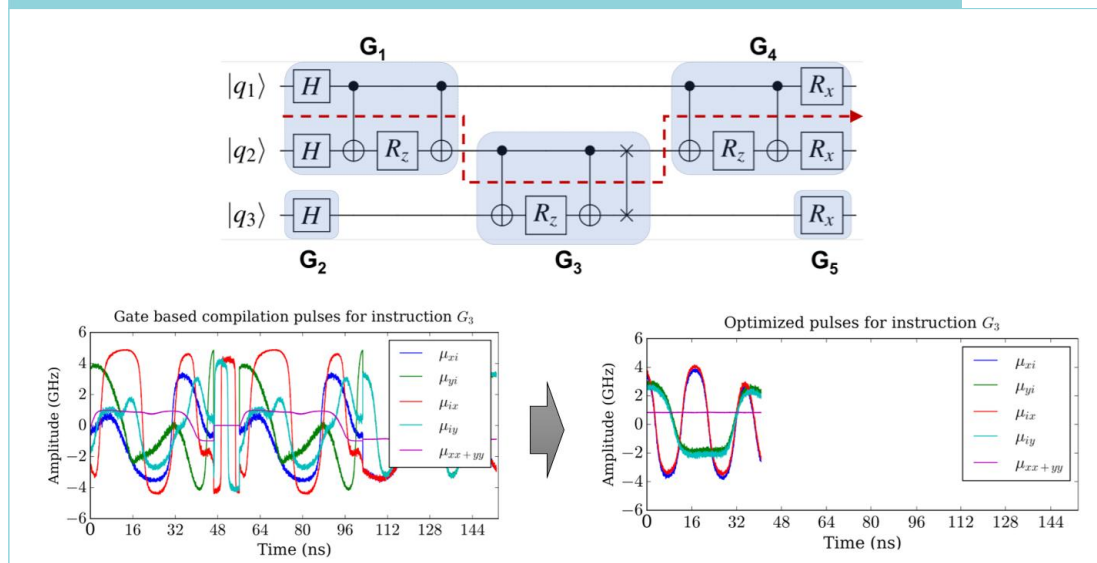
* 출처 : (좌) 제어 하드웨어 사진 : M-labs, (우) Shi(2020)

3.6. 추상화와 최적화

앞서 풀 스택 양자컴퓨터를 이루는 다섯 가지 구성요소를 살펴보았다. 현재 양자컴퓨터는 개발 초기 단계로 매우 제한적인 리소스를 가지고 있는 컴퓨팅 시스템이다. 오랜 기간 동안 높은 집적화와 성능개선을 이루어낸 고전 컴퓨팅 시스템의 경우 단단한 추상화 계층을 통하여 각 요소의 개별적 개선과 최적화를 용이하게 하고 있지만, 현재의 양자컴퓨팅 시스템은 제한된 리소스로 인하여 그러한 구분된 계층을 통한 개별적 접근이 쉽지 않을 가능성이 높다.

따라서 NISQ 시대의 양자컴퓨터 연구는 보다 추상화 단계를 넘어서는 과감한 최적화 시도가 많이 이루어질 것으로 전망된다. 예를 들면 미국 시카고 대학의 연구진은 일반적인 게이트 기반의 큐비트 제어 펄스를 한 번 더 양자-고전 인터페이스 레이어에서 최적화를 시도하여 게이트 구현 시간을 크게 단축시키는 이론적인 연구를 수행한 바 있다(Shi, 2019) <그림 15>. 이러한 종류의 최적화를 잘 구현한다면 보다 자원 효율적인 양자컴퓨팅을 달성할 수 있을 것으로 생각된다. 향후의 양자컴퓨팅 연구는 다섯 가지 요소를 개별적으로 연구하기 보다는 협업과 융합적 접근을 통하여 더 큰 성과를 낼 수 있을 것으로 보인다.

그림 15. 여러 양자 게이트를 묶음으로 최적화하여 구성된 짧은 큐비트 제어 펄스



* 출처 : Y. Shi et al.(2019)

III 풀 스택 양자컴퓨터 연구 동향

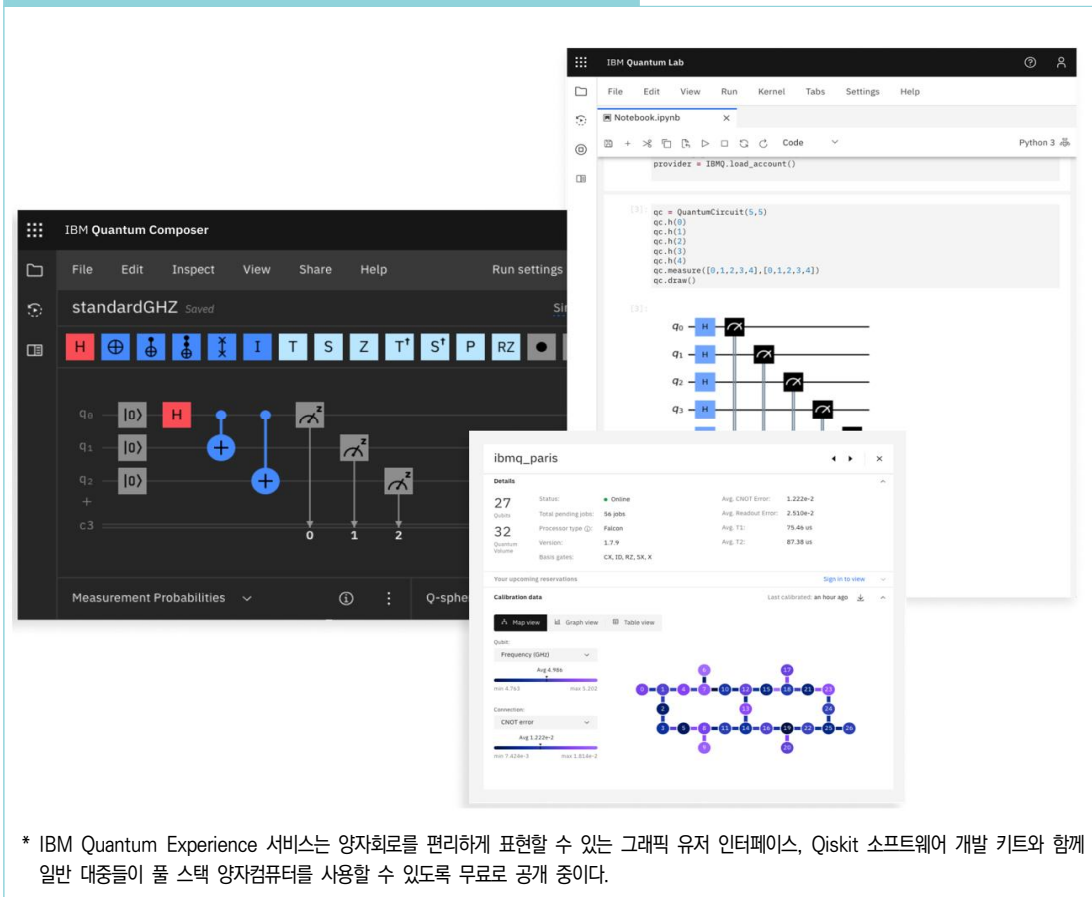
1. 해외 풀 스택 양자컴퓨터 연구 동향

1.1. 산업계 동향

풀 스택 형태의 양자컴퓨터는 현재 기업체에서 많이 개발/보유하고 있다. 양자컴퓨터 개발 기업들은 하드웨어에 익숙하지 않은 응용연구자들에게 양자컴퓨터를 제공해야 할 필요성이 있었기 때문에 신속하게 통합 시스템을 구축하려 노력하였다. 이렇게 구축된 풀 스택 양자컴퓨터들은 클라우드 컴퓨팅의 형태로 사용자들에게 제공되고 있다.

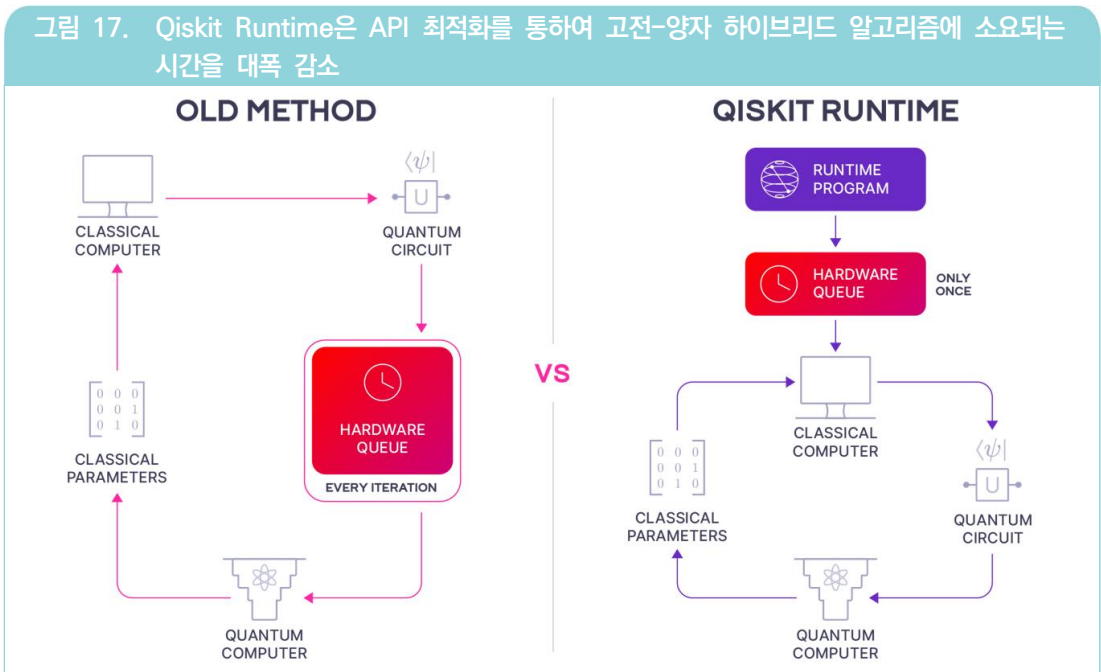
일반 대중들이 가장 쉽게 접할 수 있는 풀 스택 양자컴퓨터는 IBM Quantum의 양자프로세서들일 것이다. IBM사는 2016년 5월 IBM Quantum Experience 서비스를 시작하면서 일반 대중에게 풀 스택 양자컴퓨터를 사용할 수 있는 권한을 제공하기 시작하였다. 처음 공개된 양자컴퓨터는 초전도 기반의 5큐비트 양자컴퓨터로 그래픽 유저 인터페이스를 통해서 간단한 양자회로를 구동할 수 있었다. 이후 꾸준한 기술개발을 통하여 얼마 전 127큐비트 이글 프로세서를 공개하였으며 양자부피로는 128(몬트리얼, Montreal)을 달성하였다. IBM사는 Qiskit(퀴스킷)이라는 고급 프로그래밍 언어 및 소프트웨어 개발 키트를 개발하여 오픈 소스로 공개하였으며, 이를 통해서 자사의 양자컴퓨터 시스템을 보다 효율적으로 제어할 수 있도록 지원하였다. IBM사는 현재(2021년 12월 기준) 24대의 양자컴퓨터를 운용 중이며 이 중 7개의 시스템을 일반 대중에게 무료로 공개하고 있다. 7개 이외의 시스템은 파트너 계약을 맺은 유저 또는 단체에게 선택적으로 서비스를 제공 중이다.

그림 16. IBM Quantum Experience 제공 서비스



* 출처 : IBM Q

IBM사는 다년간 풀 스택 양자컴퓨팅 서비스를 한 경험을 바탕으로 여러 시스템 단위의 개선을 수행하였는데 대표적인 것이 Qiskit Runtime(퀴스킷 런타임)이다. 최근 주목을 받고 있는 VQE(Variational Quantum Eigensolver)와 같은 고전-양자 하이브리드 알고리즘의 경우 매개변수를 갖는 양자회로를 최적화하기 위해서 여러 번 양자회로를 수행해야하는데, 이 경우 클라우드 컴퓨팅에서 발생하는 통신 시간이 상당한 병목현상을 일으키게 된다. IBM사는 이를 소프트웨어적으로 해결하여 100배 이상의 실행시간을 단축하였다.

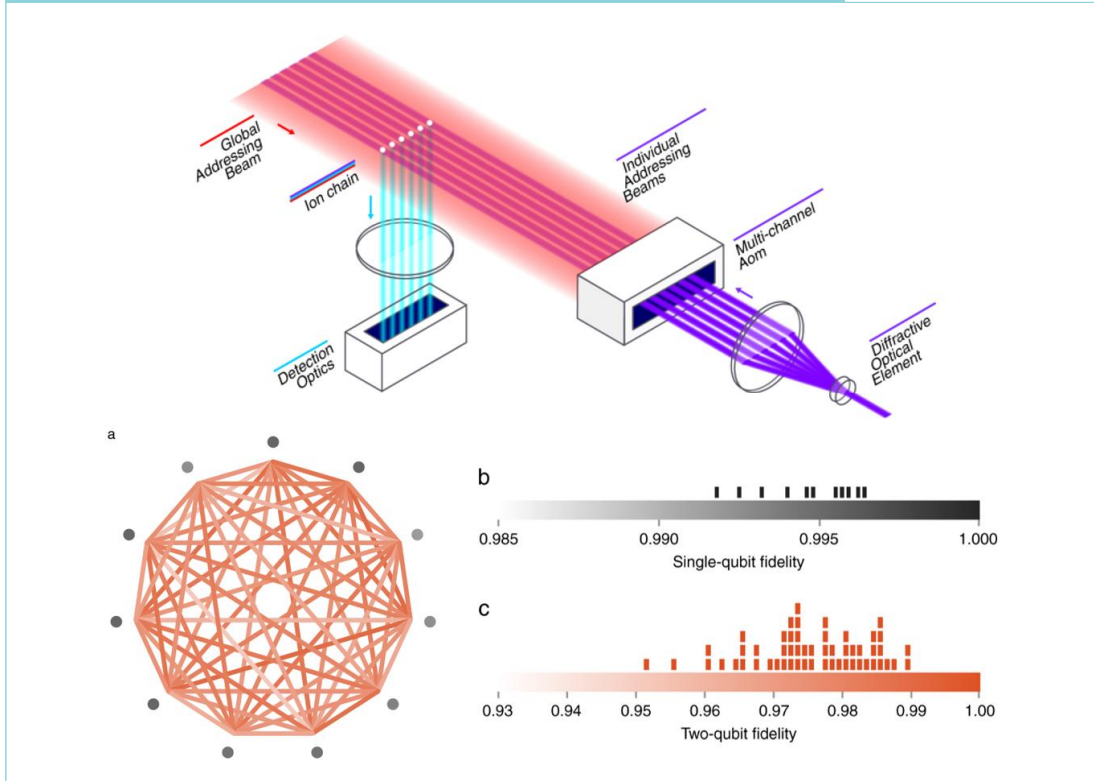


* 출처 : Strangeworks(2021)

구글社は 양자우월성 실험에 활용되었던 53큐비트 시카모어(Sycamore) 양자 프로세서를 보유하고 있으며 협력 연구그룹 또는 기업들에게만 제한적으로 하드웨어 사용을 허용하고 있다. 해당 프로세서를 이용하여 시간 결정(Mi et al., 2021) 등 물리현상에 관한 연구부터 양자 오류 정정에 관련된 실험(Google Quantum AI, 2021)까지 다양한 연구가 수행되어 왔다. 구글社は 양자컴퓨터 소프트웨어 개발 키트인 Cirq를 포함하여 양자화학 라이브러리 OpenFermion, 양자머신러닝 라이브러리 TensorFlow Quantum을 개발하여 오픈소스로 제공도 하고 있다.

미국 IonQ社는 이온 포획 기반 양자컴퓨터를 제작하고 서비스하는 스타트업으로 듀크대학교 크리스토퍼 먼로(Christopher Monroe) 교수(당시 메릴랜드 대학 재직)와 김정상 교수가 공동 창업을 한 것으로 잘 알려져 있다. IonQ社는 현재 11큐비트 양자컴퓨터를 클라우드 서비스 형태로 제공하고 있으며 사용자는 실행하는 양자프로그램의 크기에 따라 비용을 지불해야 한다(Wright, 2019). 이온 포획 기반 양자컴퓨터는 높은 연결성과 낮은 게이트 에러율로 큐비트 수는 적지만 타 플랫폼 대비 좋은 성능을 보인다(Linke, 2017). IonQ社는 큐비트 수를 대폭 늘린 32큐비트 양자컴퓨터를 공개하겠다고 예고하였으며 이미 22큐비트 시스템을 논문(Lubinski, 2021)을 통해 선보인 바 있다.

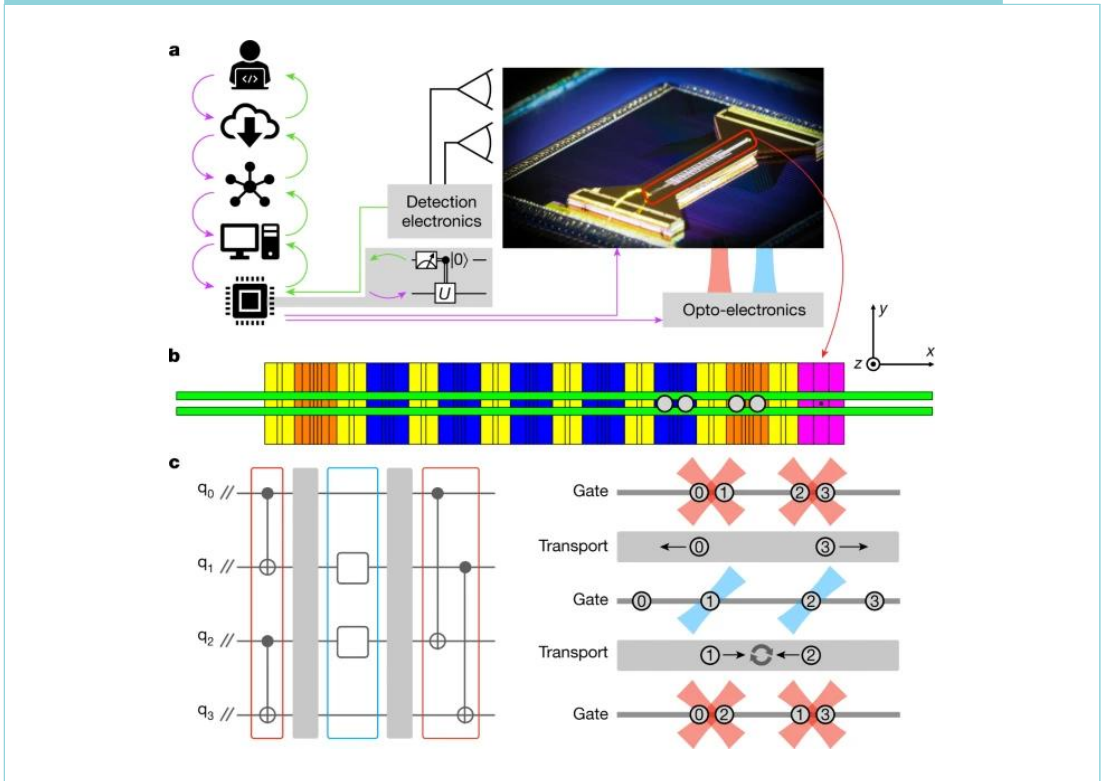
그림 18. IonQ社의 이온 기반 양자컴퓨터의 개념도와 벤치마킹 데이터



* 출처 : Wright et al.(2019)

미국 Quantinuum社는 이온 포획 양자 CCD(Charge Coupled Device, 전자결합소자) 형태의 큐비트 아키텍처를 연구하고 있는데, 이는 이온을 물리적으로 움직여서 양자게이트를 구현하는 방식이다(Pino et al., 2021) <그림 19>. Quantinuum社는 현재까지 12큐비트 프로세서를 개발하여 파트너사에 제한적으로 공개하고 있다. 이 프로세서는 최근 2048의 양자부피를 달성했다고 보고되었고 이는 약 11개의 큐비트로 11개의 양자게이트 층을 신뢰도 높게 수행 가능한 것을 의미한다. 2048의 양자부피는 현재 공식적으로 보고된 가장 높은 측정값이다.

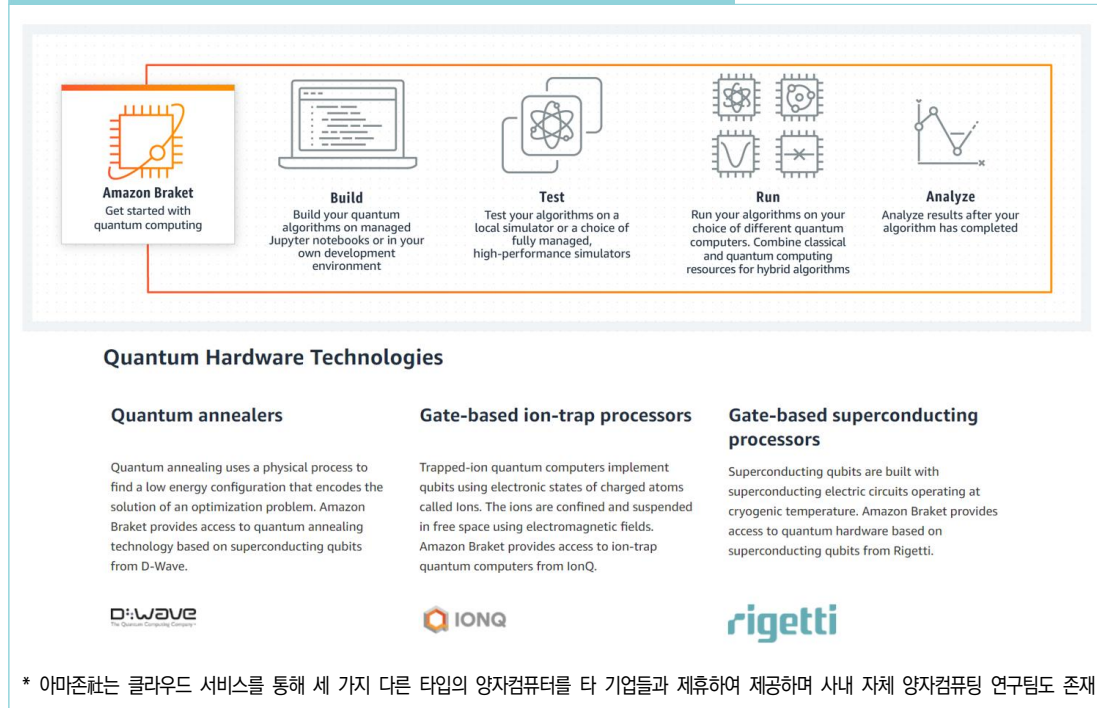
그림 19. Quantinuum(구 Honeywell Quantum)의 양자 CCD 하드웨어의 개념도



* 출처 : Pino et al.(2021)

아마존社의 경우 아직 자체적인 양자컴퓨터 시스템을 보유하고 있지는 않지만 Braket(양자컴퓨팅의 연구개발 환경을 지원하는 풀 관리 시스템) 서비스를 통해서 캐나다 D-wave社의 초전도 기반 양자 어닐러(Quantum Annealer), IonQ社의 포획 이온 기반 양자컴퓨터, Rigetti社의 초전도 기반 양자컴퓨터에 대한 액세스를 유료로 제공하고 있다. 각 백엔드(Backends)에서 양자 프로그램을 구현하기 위한 소프트웨어 개발 키트도 함께 제공 중이다.

그림 20. 아마존사의 자체 양자 컴퓨팅 연구팀 및 제휴 기업



* 출처 : 아마존社 사이트

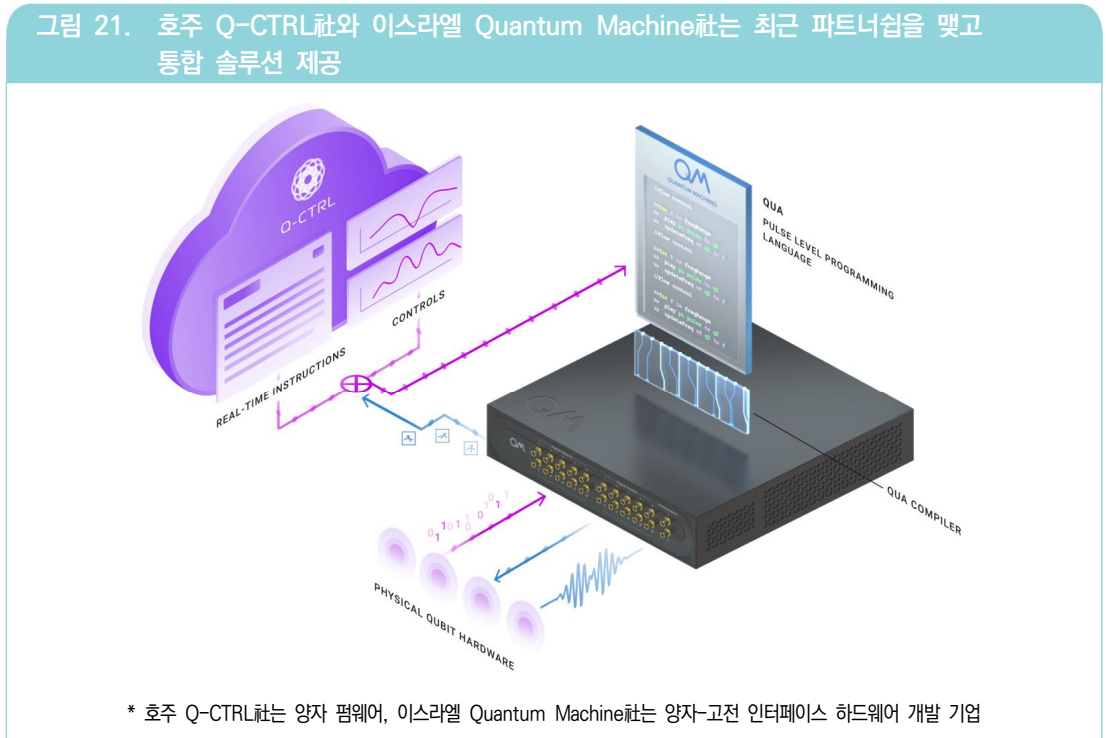
현재 국내 양자컴퓨터 연구자들은 성균관대학교 양자정보연구지원센터를 통해서 양자컴퓨터 클라우드 서비스를 지원받을 수 있다. 양자정보연구지원센터는 IBM社, IonQ社와 각각 파트너십을 맺고 국내 연구자들 및 학생들에게 클라우드 서비스 사용을 지원 중이다.

현재 풀 스택 양자컴퓨팅 클라우드 서비스를 제공하는 많은 기업이 자체적인 소프트웨어 개발 키트를 제공하고 있으며 이를 통해 양자 프로그램을 프로그래밍 언어로 표현하는 것이 가능하다. 대부분의 소프트웨어 개발 키트는 오픈 소스로 공개되어 있으며 이를 이용하여 다른 풀 스택 양자컴퓨터에 사용하는 것도 가능하다. 현재 가장 대중적으로 활용되는 라이브러리는 IBM社의 Qiskit으로 관련 커뮤니티도 활발하게 운영되고 있다.

기업에서 제공하는 풀 스택 양자컴퓨터의 경우 아쉽게도 하드웨어에 대한 구체적인 정보를 알기는 쉽지 않다. 사용자들에게 시스템 하드웨어의 제한적인 정보만 제공되며 일반적으로 추상화된 양자회로 계층 이하의 하드웨어 접근은 제한적으로만 가능하다. 따라서 주어진 양자프로그램의 테스트에는 유용할 수 있으나 계층 간 최적화 등에는 한계가 있다.

기업들 중에는 풀 스택의 특정 요소에 관한 솔루션을 제공하는 기업들도 있다. 호주의 Q-CTRL社は 양자컴퓨터의 성능을 최적화할 수 있는 양자펌웨어 솔루션을 제공하는 기업이다. Q-CTRL社の Boulder Opal 솔루션은 양자게이트의 펄스 최적화, 하드웨어 특성값 조사 및 벤치마크 등을 수행하여 보다 안정적이고 효율적인 양자컴퓨터의 동작을 지원한다.

이스라엘의 Quantum Machine社は 큐비트 제어 하드웨어 솔루션을 전문적으로 취급하는 기업이다. 초전도 큐비트, 양자점 등 다양한 큐비트 플랫폼에서 활용 가능한 양자-고전 인터페이스 하드웨어 및 제어 소프트웨어를 제공하고 있으며, Q-CTRL社와 파트너십을 맺고 양자펌웨어 단까지 포함하는 통합 솔루션을 공동개발하고 있다.



* 출처 : Quantum Machine

1.2. 연구소 및 학계 동향

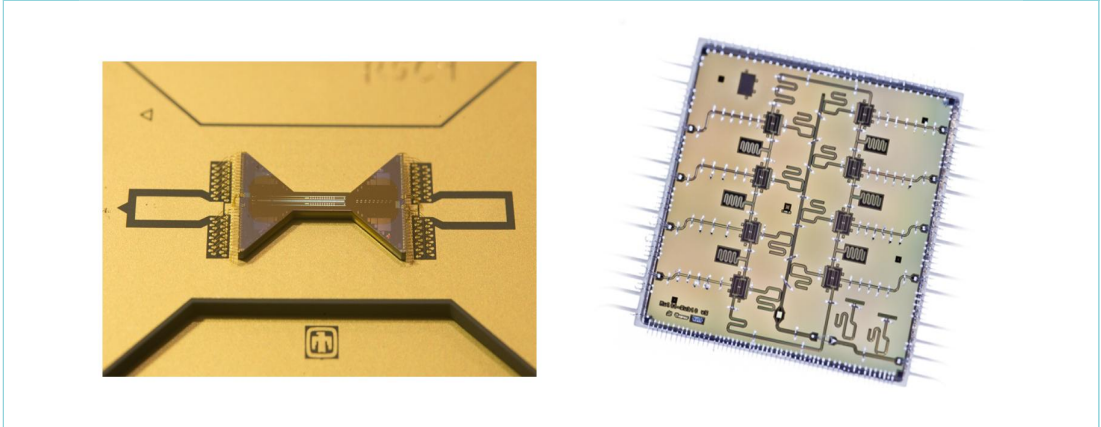
풀 스택 양자컴퓨터를 구축하는 일은 적지 않은 전문인력이 필요한 프로젝트이다. 이에 여러 나라에서 국책연구소 중심의 또는 대학 컨소시엄 프로젝트를 통하여 풀 스택 양자컴퓨터의 구축을 지원하고 있다. 이를 활용하여 오픈 양자컴퓨터 테스트베드를 운영하며 연구 노하우를 쌓고 다학제 협력 연구를 지원하고 있다.

미국 에너지부는 2017년 두 개의 5개년 양자 테스트베드 프로젝트를 시작하고 총 5,630만 달러를 지원하기로 하였다. 미국 샌디아 국립 연구소는 QSCOUT(Quantum Scientific Computing Open User Testbed) 프로젝트를, 미국 로렌스 버클리 국립 연구소는 AQT(Advanced Quantum Testbed) 프로젝트를 수주하여 각각 포획 이온 기반/초전도 큐비트 기반 풀 스택 양자컴퓨터를 개발 및 테스트베드 운영을 목표로 하고 있다.

QSCOUT 프로젝트는 2021년 처음으로 이온 포획 기반 3큐비트 풀 스택 양자컴퓨터 하드웨어를 공개하였다. 기업의 시스템과는 달리 하드웨어의 상세정보가 논문으로 공개(Clark et al., 2021)되어 있으며 연구 제안서를 받아 선정된 연구진에게 시스템 접근 권한을 부여하는 형태로 운영되고 있다. 연구팀은 테스트베드 운영을 위해 별도의 양자 어셈블리어 Jaqal과 펄스 및 파형 정의인 JaqalPaw를 개발하여 사용자들에게 제공하고 있다. 이러한 정보들을 이용하여 사용자는 하드웨어가 어떠한 구조로 이루어져 있으며 어떤 요소를 가지는지 알 수 있으며 제어 펄스 레벨의 심화된 하드웨어 조작성이 가능하다. 연구팀은 장기적으로 하드웨어를 확장하여 32큐비트 수준의 양자컴퓨터 테스트베드를 운영할 계획이다.

AQT 프로젝트의 경우 현재 스파이더넷-8이라는 이름의 8-큐비트 초전도 큐비트 칩을 보유하고 있으며 역시 대부분의 하드웨어 정보가 논문으로 공개되어 있다(Kreikebaum et al., 2020). 또한 웹사이트에서 연구실 및 실험장비 모습을 VR(Virtual Reality, 가상현실)로 직접 확인하는 것이 가능하다. 개방된 정보공개를 통해 기업의 연구보다 실험적이고 도전적인 연구도 가능한데 그 중 하나가 큐트리트(Qutrit) 기반의 양자정보 연구이다. 큐트리트는 큐비트와 달리 세 가지 양자기저 상태를 갖는 정보저장 단위로 AQT 프로젝트에서는 이러한 새로운 정보단위를 이용하여 양자컴퓨팅의 효율을 높이는 연구도 활발하게 진행 중이다. 현재 시스템 활용 및 공동 연구를 위한 제안서를 받고 있으며 이를 통해 열린 협력연구 기회를 제공하고 있다.

그림 22. (좌) QSCOUT 프로젝트에서 개발한 이온 포획 칩,
(우) AQT 프로젝트에서 개발한 8-큐비트 초전도 큐비트 프로세서

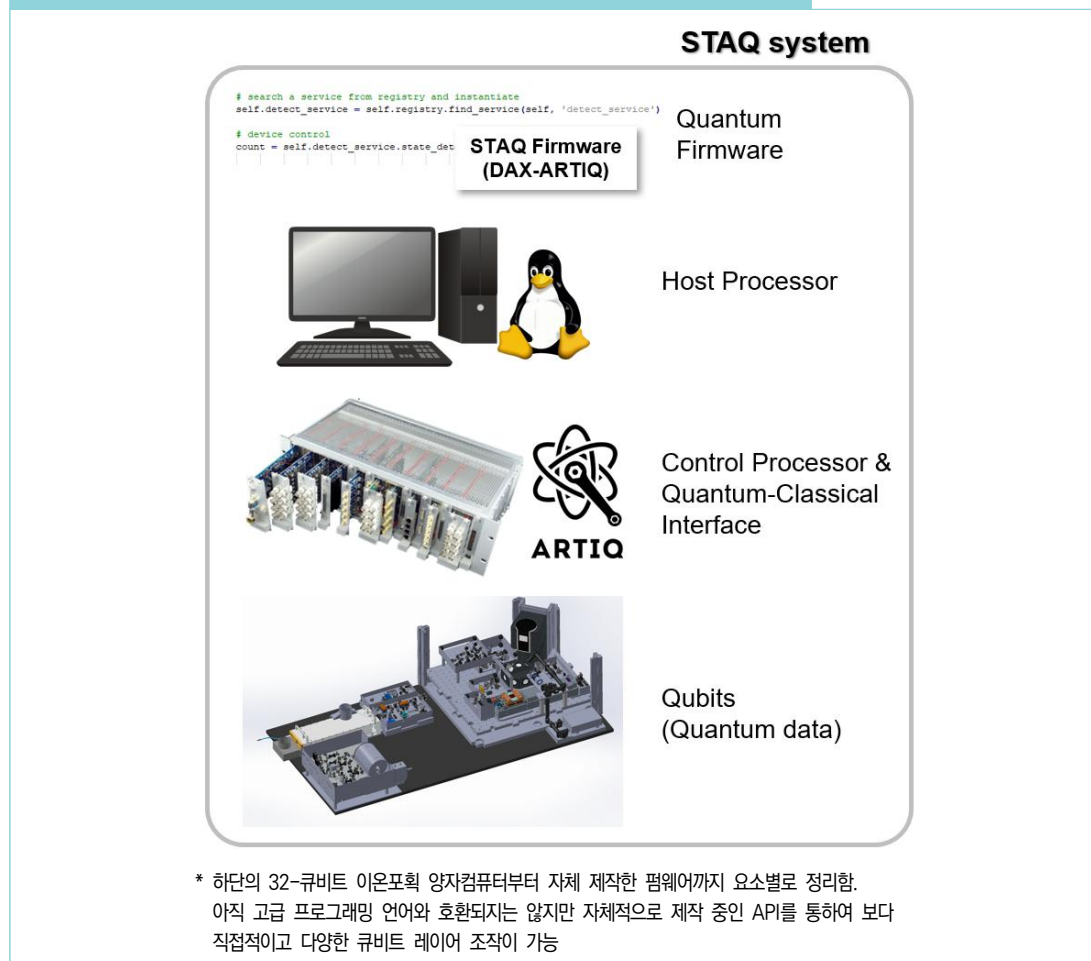


* 출처 : (좌) QSCOUT 홈페이지, (우) AQT 홈페이지

대학에서는 보다 폭넓은 주제의 연구들이 양자컴퓨팅 연구 초창기부터 활발하게 진행되어왔다. 현재 상대적으로 기술이 성숙한 초전도 큐비트나 이온 포획 큐비트의 경우, 미국의 산타바바라 캘리포니아 주립대학, 예일대학, 메릴랜드 주립대학, 그리고 오스트리아의 인스브르크 대학 등에서 활발하게 기초 연구를 진행한 덕분에 현재의 기술수준에 도달할 수 있었다. 지금도 위에 언급된 큐비트 플랫폼은 물론 다양한 양자정보 기술에 대한 기초 연구가 여러 대학 연구실에서 활발하게 진행 중이며, 각국의 정부단위 투자도 꾸준히 증가하고 있는 상태이다.

한편, 최근에는 여러 대학의 컨소시엄 형태의 프로젝트를 통하여 연구역량을 결집하고 풀 스택 형태의 양자컴퓨터를 연구하는 흐름도 활발하게 진행 중이다. 미국 국립과학재단의 지원으로 진행 중인 STAQ(Software Tailored Architecture for Quantum Co-design) 프로젝트도 그러한 다학적 협력 연구 중 하나로, 총 7개 대학의 연구팀이 모여서 이온 포획 기반 풀 스택 양자컴퓨터의 구현과 추상화 계층 간 최적화를 통한 양자이득 달성을 목표로 연구를 진행 중이다. 필자는 이 프로젝트의 일환으로 32-큐비트 이온포획 양자컴퓨터 시스템을 목표로 하는 하드웨어를 디자인 및 구축하는 연구를 듀크대학교에서 수행한 바 있다(Kim et al., 2020). 현재 해당 시스템은 기초 양자게이트의 구현에 성공하여 시스템 최적화 및 큐비트 수 스케일링을 진행 중에 있으며 협력연구를 위하여 인증된 유저의 시스템 원격 접속 및 제어가 가능하도록 하였다.

그림 23. STAQ 프로젝트에서 개발한 풀 스택 양자컴퓨터의 개념도



* 출처 : ARTIQ 하드웨어-M Lab, 그 외 저자 재구성

EPiQC(Enabling Practical-scal Quantum Computation) 프로젝트는 컴퓨터 과학의 관점에서 양자컴퓨터 스택을 연구하는 공동연구 프로젝트이다. 양자컴퓨터 프로그램을 검증·디버그·시뮬레이션하고, 하드웨어 아키텍처를 고려한 연산 최적화를 구현하는 등 양자컴퓨터 스택의 상단에 위치한 소프트웨어 스택을 연구대상으로 하고 있다. 2021년에는 컴퓨터 아키텍처 분야에서 최우수 학회에 속하는 ISCA(International Symposium on Computer Architecture) 학회에서 별도 양자 워크샵을 개최하는 등 활발한 연구교류를 진행 중에 있다.

그림 24. ISCA 2021 학회에서 진행된 IQ 워크샵 포스터와 강연 모습



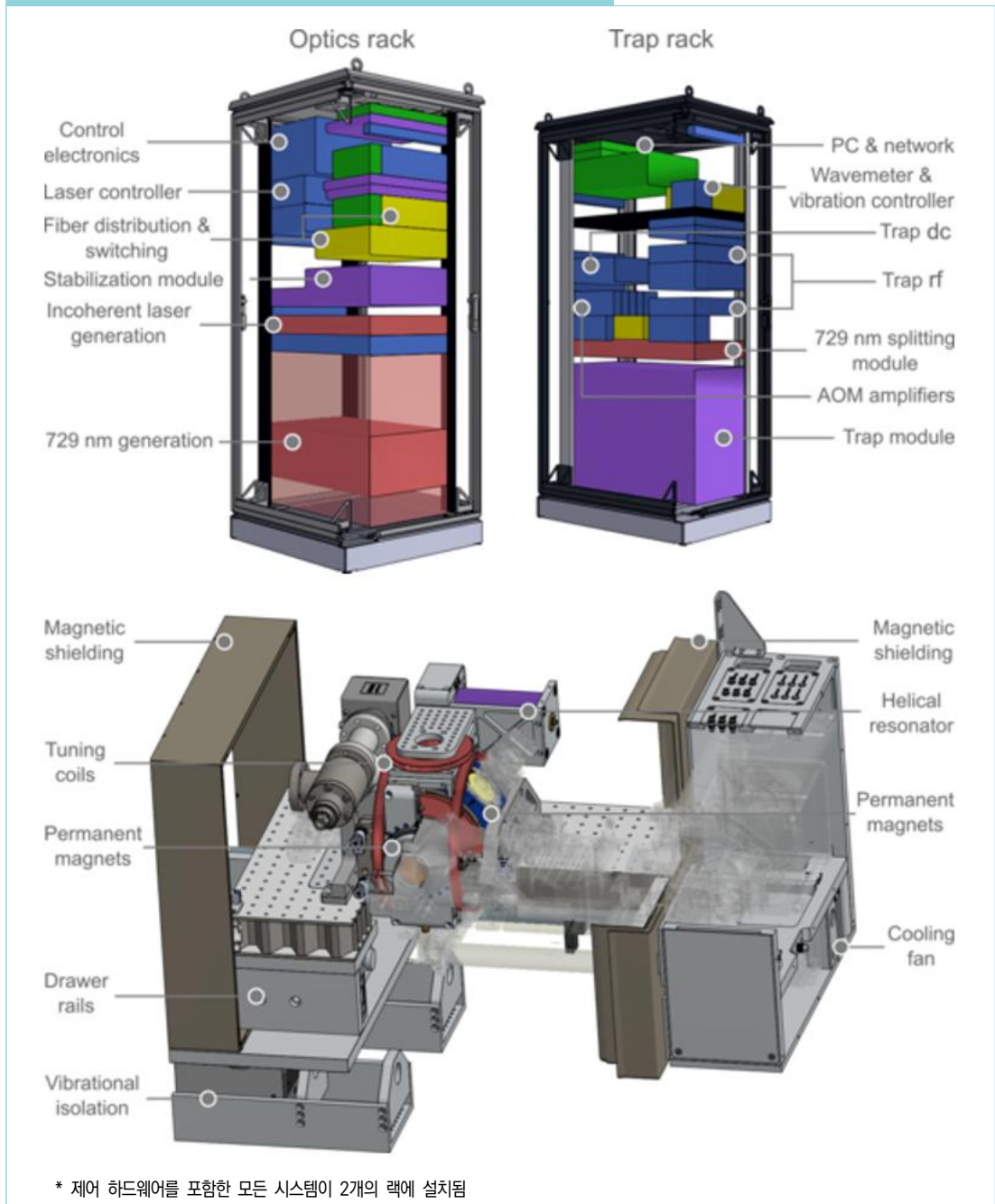
* 컴퓨터 과학 분야에서도 활발하게 양자컴퓨터 연구를 진행 중이다.

* 출처 : ISCA(2021)

유럽 연합은 Quantum Flagship(QF) 프로젝트를 통하여 양자정보 관련 연구를 전폭적으로 후원하고 있다. QF에서 후원하는 총 24개 프로젝트들 중 4개 프로젝트가 양자컴퓨팅을 주제로 다루고 있으며, 응용 및 알고리즘을 연구하는 NEASQC(NExt ApplicationS of Quantum Computing) 프로젝트를 제외한 3개 프로젝트에서 풀 스택 양자컴퓨터를 연구 중이다.

OpenSuperQ 프로젝트는 최대 100큐비트의 초전도 기반 풀 스택 양자컴퓨터를 구축하고 연구자들이 사용할 수 있도록 개방하고자 하는 프로젝트이다. 독일 울리히 연구소를 거점으로 양자컴퓨터 시스템을 구축 중이며 활발한 협력연구를 진행 중이다. AQTION(Advanced Quantum computing with Trapped IONs) 프로젝트는 이온 포획을 기반으로 하는 양자컴퓨팅 연구 프로젝트이다. 7개 대학과 3개 기업이 참여하는 이 프로젝트의 결과물로 제작된 풀 스택 양자컴퓨터는 24개 이온 큐비트의 양자얽힘을 구현했음을 최근 보고하였다(Pogorelov et al., 2021). 이는 현재까지 구현된 큐비트 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger) 상태 중 가장 큐비트 수가 높은 결과이다.

그림 25. AQTION 팀에서 개발한 양자컴퓨터 하드웨어



* 출처 : Pogorelov et al.(2021)

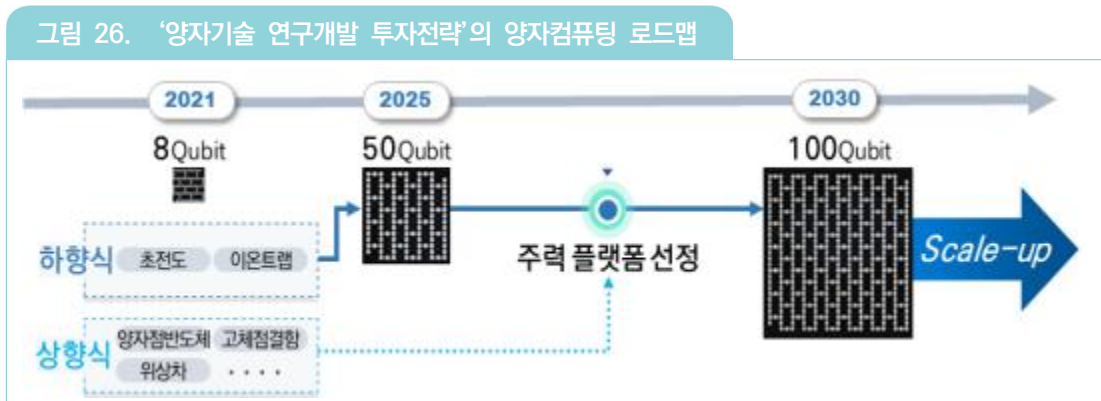
마지막으로 QSLI(Quantum Large Scale Integration in Silicon) 프로젝트는 올해 9월에 시작된 프로젝트로 실리콘 기반 양자컴퓨터를 개발하여 오픈 테스트베드를 운영하는 것을 목표로 하고 있다.

그 외에도 융합연구리뷰에서 모두 다룰 수는 없지만 여러 국가에서 풀 스택 양자컴퓨터를 구축하려는 프로젝트들을 진행 중에 있다. 이들 프로젝트의 공통점은 다학제적이고 융합적인 접근방법을 통하여 End-to-End 시스템을 구축하고 그 과정에서 발생할 수 있는 다양한 물리적·공학적인 문제에 초점을 맞추고 있다는 점이다. 이러한 노력과 경험을 통해서 양자컴퓨팅 연구가 더욱 진보할 수 있을 것이다.

2. 국내 풀 스택 양자컴퓨터 연구 동향

국내 양자컴퓨팅 관련 연구는 아직 적은 수의 큐비트를 다루는 경우가 많아 시스템 단위 통합의 중요성이 높지 않았다. 하지만 기술이 성숙되고 경험이 누적되면서 다른 선두 국가들과 같이 국내에서도 풀 스택 양자컴퓨터의 개발이 이루어질 것으로 생각된다.

정부에서는 이미 '양자기술 연구개발 투자전략'을 통하여 50 큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP, Korea Quantum Innovation Platform)을 2025년까지 구축할 것이며 단계적으로 시스템을 고도화하겠다고 밝혔다. 이러한 야심찬 목표를 달성하기 위해서는 국내 양자정보 및 양자컴퓨팅 연구자들에 대한 전폭적인 지원은 물론 관심이 있는 공학자들이 양자컴퓨팅 분야에 충분히 적응하고 기여할 수 있도록 여러 가지 지원이 있어야 할 것이다.



* 출처: 정부 보도자료(2021)

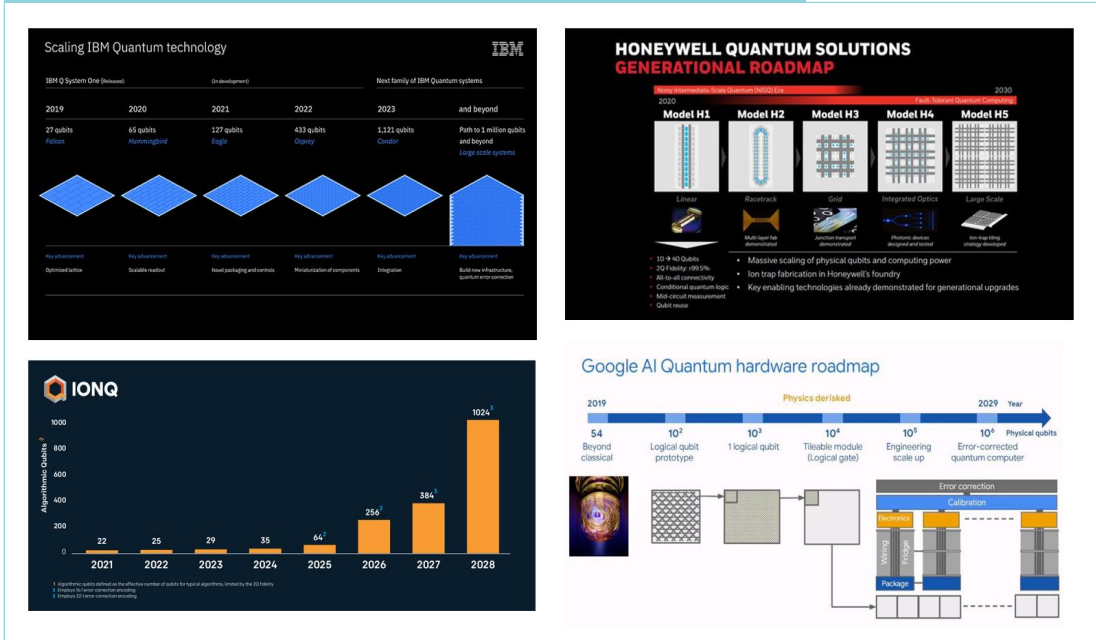
IV 향후 전망

수십 큐비트의 양자컴퓨터 시스템이 실현되면서 우리는 현재까지 모사할 수 없던 미지의 영역으로 한 발자국 내딛게 되었다. 향후 대규모 양자컴퓨터가 구현이 된다면 강력한 사회·경제적 파급효과가 있을 것이며, 현재 단계의 중규모 큐비트 시스템의 구현과 이를 바탕으로 한 풀 스택 양자컴퓨터의 구현은 이를 대비하여 중요한 기술적·경험적 토대가 될 것이다.

기업들에서 제공하는 풀 스택 양자컴퓨터와 학계에서 제작하는 풀 스택 양자컴퓨터는 운영방식에 큰 차이가 있다는 점도 강조하고 싶다. 기업들에서 제공하는 양자컴퓨터는 큐비트 수가 더 많거나 API(Application Programming Interface, 애플리케이션 프로그래밍 인터페이스)가 더 잘 정리되어 있는 장점이 있을 수 있지만 폐쇄적이고 양자컴퓨터의 심층적인 연구를 수행하기에는 제한점이 많다. 아직 대규모 양자컴퓨터를 구현하기 위한 확고한 기술적 로드맵이 없음을 고려할 때 개방된 테스트베드를 보유하고 양자컴퓨터 시스템에 대한 도전적이고 기초적인 연구를 수행할 수 있는 환경을 구축하는 것은 매우 중요하고 유의미하다고 생각된다. 또한 이러한 테스트베드 운영을 통해서 기존 컴퓨팅 연구자들과나 공학자들이 양자컴퓨팅 커뮤니티에서 공동연구를 할 수 있는 기반을 만들 수도 있을 것이다.

현재 해외 기업들은 각자의 개발 로드맵을 가지고 양자컴퓨터 개발에 박차를 가하고 있다. 물론 가장 핵심적인 기술은 고품질의 큐비트를 많이 확보하는 것이겠지만 큐비트 수와 함께 풀 스택 양자컴퓨터의 다른 요소들을 확장하는데도 많은 노력이 필요할 것으로 예상된다. 실제 기업들의 로드맵들을 잘 살펴보면 흥미롭게도 이러한 이슈들에 대한 언급 및 계획이 포함되어 있는 경우가 많다.

그림 27. IBM, Honeywell, IonQ, 구글의 양자컴퓨터 개발 로드맵



* 출처: 각 기업 보도자료

구글사의 양자우월성 실험 이후로 양자컴퓨팅이 많은 주목을 받게 되었고 선두국가와의 기술 격차를 염려하는 시선도 많다. 하지만 양자컴퓨팅 연구는 단거리 경주가 아닌 마라톤이다(Venture Beat, 2019). 기술 성숙도가 높은 플랫폼 시스템 통합을 위한 다학제 협력 연구에 집중적인 투자를 하면서 동시에 새로운 큐비트 플랫폼 연구와 같은 도전적인 기초연구들에도 폭넓게 투자를 하여 좋은 양자정보연구 환경을 만들어 나간다면 국내에서도 훌륭한 성과들을 많이 얻을 수 있을 것이다.

저자_ 김준기(Junki Kim)

- 학력
서울대학교 물리학 박사
서울대학교 물리학 학사

- 경력
現) 성균관대학교 나노공학과 조교수

참고문헌

〈국내외 문헌: 인용순〉

- 1) R. P. Feynman, "Simulating physics with computers.", *International Journal of Theoretical Physics*, **21**, 467(1982). <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02650179>
- 2) F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor.", *Nature*, **574**, 505(2019). <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>
- 3) H.-S. Zhong et al., "Quantum computational advantage using photons.", *Science*, **370**, 1460(2020). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe8770>
- 4) R. V. Meter, K. M. Itoh, and T. D. Ladd, "Architecture-Dependent Execution Time of Shor's Algorithm", arXiv:quant-ph/0507023(2005). <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0507023>
- 5) A. W. Cross et al., "Validating quantum computers using randomized model circuits" *Physical Review A*, **100**, 032328(2019). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.100.032328>
- 6) T. Lubinski et al., "Application-Oriented Performance Benchmarks for Quantum Computing", arXiv: 2110.03137(2021). <https://arxiv.org/abs/2110.03137>
- 7) D. Deutsch, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **400**, 97(1985).<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1985.0070>
- 8) E. Bernstein and U. Vazirani, "Quantum Complexity Theory", *SIAM Journal of Computing*, **26**, 1411(1997). <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/S0097539796300921>
- 9) D. R. Simon, "On the Power of Quantum Computation" *SIAM Journal of Computing*, **26**, 1474(1997). <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/S0097539796298637?mobileUi=0>
- 10) P. W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", *SIAM Review*, **41**, 303(1999).<https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/S0036144598347011?journalCode=siread>
- 11) L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search", STOC '96, 212(1996). <https://dl.acm.org/doi/10.1145/237814.237866>
- 12) C. Monroe et al., "Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate", *Physical Review Letters*, **75**, 4714(1995). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.75.4714>
- 13) L. M. K. Vandersypen et al., "Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance", *Nature*, **414**, 883(2001). <https://www.nature.com/articles/414883a>

- 14) M. H. Devoret, A. Wallraff, and J. M. Martinis, "Superconducting Qubits: A Short Review", arXiv: Cond-mat/0411174 (2004). <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0411174>
- 15) J. Preskill, "Quantum Computing in the NISQ era and beyond", *Quantum*, **2**, 79(2018). <https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>
- 16) E. Munro, "Quantum computing: near-and far-term opportunities", Quantum World Association(2018). https://medium.com/@quantum_wa/quantum-computing-near-and-far-term-opportunities-f8ffa83cc0c9
- 17) "Quantum Computing: Progress and Prospects", National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine(2019). <https://www.nap.edu/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects>
- 18) D. P. DiVincenzo, "The Physical Implementation of Quantum Computation", *Progress of Physics*, **48**, 771(2000).[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/11%3C771::AID-PROP771%3E3.0.CO;2-E](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3978(200009)48:9/11%3C771::AID-PROP771%3E3.0.CO;2-E)
- 19) M. Kjaergaard et al., "Superconducting Qubits: Current State of Play", *Annual Review of Condensed Matter Physics*, **11**, 369(2020).<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605>
- 20) C. D. Bruzewicz et al., "Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges", *Applied Physics Reviews*, **6**, 021314(2019). <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5088164>
- 21) D. Reilly., "Engineering the quantum-classical interface of solid-state qubits", *npj Quantum Information*, **1**, 15011(2015). <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.11>
- 22) Y. Shi et al., "Resource-Efficient Quantum Computing by Breaking Abstractions," in Proceedings of the IEEE, **108**, 1353(2020). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9116963>
- 23) Y. Shi et al., "Optimized Compilation of Aggregated Instructions for Realistic Quantum Computers", *ASPLOS '19*, 1031(2019). <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3297858.3304018>
- 24) X. Mi et al., "Observation of Time-Crystalline Eigenstate Order on a Quantum Processor", arXiv:2107.13571 (2021). <https://arxiv.org/abs/2107.13571>
- 25) Google Quantum AI, "Exponential suppression of bit or phase errors with cyclic error correction" *Nature*, **595**, 383(2021). <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03588-y>
- 26) K. Wright et al., "Benchmarking an 11-qubit quantum computer", *Nature Communication*, **10**, 5464 (2019). <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13534-2>
- 27) N. M. Linke et al., "Experimental comparison of two quantum computing architectures", *PNAS* **114**, 3305(2017). <https://www.pnas.org/content/114/13/3305.full>

- 28] J. M. Pino et al., "Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture", *Nature* **592**, 209 (2021). <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03318-4>
- 29] S. M. Clark et al., "Engineering the Quantum Scientific Computing Open User Testbed," *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, **2**, 1(2021). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9483669>
- 30] J. M. Kreikebaum et al., "Improving wafer-scale Josephson junction resistance variation in superconducting quantum coherent circuits", *Superconductor Science and Technology*, **33**, 06LT02(2020). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab8617/meta>
- 31] J. Kim et al., "Hardware design of a trapped-ion quantum computer for Software-Tailored Architecture for Quantum co-design (STAQ) project", *OSA Quantum* **2.0**, QM6A.2(2020). <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=QUANTUM-2020-QM6A.2>
- 32] I. Pogorelov et al., "Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator", *PRX Quantum*, **2**, 020343 (2021), <https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.2.020343>
- 33] 과학기술정보통신부 보도자료. (2021). <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=1&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3180196&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- 34] Christopher Monroe. (2019). Quantum computing is a marathon not a sprint. *Venture Beat*. <https://venturebeat.com/2019/04/21/quantum-computing-is-a-marathon-not-a-sprint/>

〈기타자료: 홈페이지주소 등〉

- 35] Endicott House 사이트. <https://mitendicotthouse.org/physics-computation-conference/>
- 36] 구글 AI 블로그. <https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html>
- 37] Our World in Data 사이트. OurWorldinData.org
- 38] Quantinuum 사이트. <https://www.quantinuum.com/pressrelease/demonstrating-benefits-of-quantum-upgradable-design-strategy-system-model-h1-2-first-to-prove-2-048-quantum-volume>
- 39] IBM Quantum Services 사이트. https://quantum-computing.ibm.com/services?services=systems&system=ibmq_montreal
- 40] IBM 사이트. <https://research.ibm.com/blog/circuit-layer-operations-per-second>
- 41] NIST 웹사이트. <https://www.nist.gov/nist-and-nobel/dave-wineland/nobel-moments-dave-wineland>
- 42] IBM 사이트. www.ibm.com
- 43] IBM Quantum 사이트. <https://quantum-computing.ibm.com/>
- 44] IBM Quantum Service. https://quantum-computing.ibm.com/services?services=systems&system=ibm_washington

- 45) Qiskit 사이트. <https://qiskit.org/>
- 46) Qiskit Runtime. Strangeworks (2021).<https://quantumcomputing.com/strangeworks/qiskit-runtime>
- 47) Quantum AI 사이트. <https://quantumai.google/>
- 48) IONQ 사이트. <https://ionq.com/>
- 49) 아마존 사이트. <https://aws.amazon.com/braket/>
- 50) D-Wave 사이트. <https://www.dwavesys.com/>
- 51) IonQ 사이트. <https://ionq.com/>
- 52) Rigetti 사이트. <https://www.rigetti.com/>
- 53) 양자정보연구지원센터 사이트. <http://www.qcenter.kr/>
- 54) Q-CTRL 사이트. <https://q-ctrl.com/>
- 55) Quantum Machines 사이트. <https://www.quantum-machines.co/>
- 56) Sandia National Laboratories 사이트. <https://www.sandia.gov/quantum/Projects/QSCOUT.html>
- 57) AQT 사이트. <https://aqt.lbl.gov/>
- 58) Sandia National Laboratories 사이트. https://www.sandia.gov/quantum/Projects/QSCOUT_Jaqal.html
- 59) Sandia National Laboratories 사이트. https://www.sandia.gov/quantum/Projects/Uploads/JaqalPaw_A_Guide_to_Defining_Pulses_and_Waveforms_for_Jaqal.pdf
- 60) STAQ 사이트. <https://staq.pratt.duke.edu/>
- 61) EPIQC 사이트. <https://www.epiqc.cs.uchicago.edu/>
- 62) Quantum Technology 사이트. <https://qt.eu/>
- 63) OpenSuperQ 사이트. <https://opensuperq.eu/>
- 64) AQTION 사이트. <https://www.aqtion.eu/>

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 January vol.8 no.1

이 보고서는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임

(No. NRF-2012M3C1A1050726)