Asian Review of Financial Research 36(1): February 2023
재무연구 제36권 제1호 (2023년 2월), pp.103~129
https://doi.org/10.37197/ARFR.2023.36.1.4
ISSN 1229-0351

양자 금융 연구 현황과 제언

최명수 한양대학교 박사과정
엄찬영 한양대학교 교수
강형구* 한양대학교 교수

요약

최근 인공지능과 머신러닝의 급속한 발전과 함께 양자컴퓨팅이 새로운 기술로 주목받고 있다. 양자컴퓨팅의 개념은 양자 역학의 발전에서 시작되었으며, 이후 기술의 발전과 함께 다양한 분야에 적용되기 시작했다. 양자컴퓨팅은 수많은 조합을 통해 계산되는 문제 처리에 유용하다. 이러한 유형의 문제는 시뮬레이션, 암호, 머신 러닝, 데이터 검색과 같은 여러 분야에서 적용이 가능하다. 해외에서는 이러한 양자컴퓨팅에 대한 특징을 금융에 접목하려는 연구가 시작되고 있다. 양자 금융은 새로운 분야이며, 이는 국내 금융 분야에서 새로운 기회를 만들 수 있다. 양자컴퓨팅은 기존의 컴퓨팅 기술과는 다른 새로운 방식으로 데이터와 정보를 처리한다. 이 과정에서 양자 알고리즘은 복잡한 금융 문제를 해결할 기회를 제공한다. 특히, 양자컴퓨팅은 최적화 문제와 몬테카를로 시뮬레이션에 장점을 가지며, 투자 최적화, 리스크 관리, 트레이딩 시스템 등에 활용할 수 있다. 본 연구에서는 양자 컴퓨터를 금융에 적용하기 위한 연구 현황과 실무 현황을 분석하고, 금융 분야에 적용 가능성을 제시한다. 또한 양자 금융 시대의 준비를 위한 정책적인 시사점과 전략을 제언한다. 이를 통해 양자 금융의 미래에 대한 깊은 이해와 양자컴퓨팅의 활용에 대한 중요성을 강조한다.

주요단어 양자 컴퓨터, 양자 금융, 양자 금융 연구 현황, 양자 옵션 평가, 그로버알고리즘

투고일 2022년 03월 04일
수정일 2022년 08월 25일
게재확정일 2022년 11월 01일

* 교신저자: hyoungkang@hanyang.ac.kr; 전화: +82-2-2220-2883
이 논문은 한양대학교 교내연구지원사업으로 연구되었음(HY-202100000003469)

Asian Review of Financial Research 36(1): February 2023
재무연구 제36권 제1호 (2023년 2월), pp.103~129
https://doi.org/10.37197/ARFR.2023.36.1.4
ISSN 1229-0351

Quantum Finance and Its Implications

MyeongSu Choi Ph.D Candidate, Hanyang University
Chanyoung Eom Associate Professor, Hanyang University
Hyoung-Goo Kang* Associate Professor, Hanyang University

Received 04 Mar. 2022
Revised 25 Aug. 2022
Accepted 01 Nov. 2022

Abstract

Quantum computing is an emerging field that offers the potential to overcome the limitations of classical computers and is gaining attention as the next-generation computing platform. With the growth of interest in quantum computers, the competition to develop more powerful systems has intensified, with leading companies such as IBM, Google, Intel, Microsoft, and Samsung investing in the technology. They are working towards creating more advanced and practical quantum computers that can lead to new applications in various fields. Consequently, quantum computing has become a game-changer in recent years, with applications in cryptography, simulation, machine learning, and data retrieval. Quantum computing is also beingapplied to finance, giving rise to a new field known as quantum finance. This offers a unique way of processing data and information that is different from classical computing technologies. With its ability to perform complex optimization problems faster and more accurately than classical computers, quantum computing has significant potential in finance.

Quantum finance has numerous advantages and limitless potential applications. For instance, it can help financial institutions better manage complex financial products like derivatives and structured products. By providing more accurate risk assessments, portfolio optimization, and trading strategies, quantum finance can enhance the efficiency and accuracy of financial markets. This enables financial institutions to make informed decisions, reduces the likelihood of financial loss, and ultimately benefits both the institutions and their customers. Quantum computing can also reduce the time and cost of complex financial calculations, such as Monte Carlo simulations. This is crucial for financial institutions, as the savings can be reinvested in other areas of the business. Additionally, quantum computing has the

* Corresponding Author: hyoungkang@hanyang.ac.kr; Tel: +82-2-2220-2883
This work was supported by the research fund of Hanyang University(HY-202100000003469)

potential to increase the stability of financial markets by reducing market volatility and increasing investor confidence.
The implementation of quantum finance requires cooperation between the financial sector and the government. Financial institutions should invest in quantum financial technologies and create the necessary infrastructure and regulations. Governments should also provide funding and support through regulation to encourage the development of quantum finance. Financial institutions, governments, and academia must work together to advance the field and maximize the potential of quantum computing in finance. However, implementing quantum finance requires expertise in both quantum computing and finance. Financial institutions need to secure human resources, such as quantum computing experts, to successfully implement quantum finance. This requires close collaboration between the financial sector and academia to develop the necessary skills.
In conclusion, the potential benefits of quantum finance are vast, and its impact on the financial industry could be significant. By enhancing the efficiency, accuracy, and stability of financial markets, quantum finance has the potential to revolutionize the industry and benefit both financial institutions and their customers. It is crucial that financial institutions, governments, and academia work together to invest in and support the development of this emerging field. By exploring the potential and implications of quantum finance, this paper highlights the importance of supporting its growth, which has the potential to shape the future of finance and quantum computing.

Keywords Quantum Computer, Quantum Finance, Quantum Finance Research Status, Quantum Option Pricing, Grover Algorithm

Ⅰ. 서 론

Intel의 공동 창립자인 Moore(1965)는 반도체 집적회로의 성능이 24개월마다 2배씩 증가한다는 무어의 법칙을 언급하였다. 이후 지속적인 발전을 이루어 온 고전 컴퓨터는 물리적인 한계에 다다랐다. 일반적으로 고전 컴퓨터에서 사용되는 5나노미터 반도체 공정은 적혈구보다 1,000배나 작은 수준이다. 반도체 공정 기술의 발달로 반도체 구조물이 수~수십 원자의 크기에 가까워짐에 따라 문제가 발생한다. 양자 특성으로 인한 누설전류(leakage current)가 증가하는 등 공정 기술 개발 난이도가 대폭 증가하는 것이다. 이에 전력 성능비를 증가시키고, CPU 개수를 늘리는 방향으로 고전 컴퓨터의 기술적 한계를 극복하려고 하였다.

그러나 고전 컴퓨터가 가지는 문제는 이것만이 아니다. 과거에 컴퓨터가 처리해야 하는 대상은

숫자나 문자와 같은 정형화된 데이터에 한정되어 있었으나, 최근에는 음성, 이미지, 영상과 같은 비정형화 된 데이터에 대한 처리가 필요하게 되었다. 고전 컴퓨터가 표현할 수 있는 2진수의 데이터로는 이러한 비정형화 데이터의 처리에는 큰 비용이 필요하다. 예를 들어, 이미지를 이루는 가장 작은 단위인 '픽셀(Pixel)'을 이용하여 그림을 표현할 때, $640 \times 480 = 307,200$의 픽셀이 필요하게 된다. 수천만 장의 이미지를 처리하면 2진수로 표현되는 데이터는 기하급수적으로 늘어나게 된다. 현재 이러한 비정형화 데이터의 처리를 위해 그래픽 처리 장치(graphics processing unit, GPU)를 이용한다. 그러나, 이러한 비정형 데이터들은 시간이 지날수록 점점 증가하여 GPU로도 즉각 처리하지 못하는 상황에 이르렀다.

기존의 컴퓨터가 가지고 있는 구조적, 기술적 한계를 극복하기 위한 차세대 컴퓨팅 플랫폼으로 양자 컴퓨터가 주목받고 있다. 양자컴퓨팅은 4차 산업혁명의 기반인 ICBM(IoT, Cloud, Big data, Mobile) 생태계의 핵심 기술로, 2017년과 2018년에 세계경제포럼은 양자컴퓨팅(quantum computing)과 양자컴퓨팅을 위한 알고리즘(algorithms for quantum computers)을 10대 미래 유망기술[1]로 선정하였고, MIT는 실용적 양자 컴퓨터(practical quantum computers)와 재료의 양자 도약(materials' quantum leap)을 10대 혁신 기술[2]로 발표하였다.

양자 컴퓨터는 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement) 등 양자물리의 현상을 이용하여 정보를 연산할 수 있는 컴퓨터이다. 병렬 연산 처리 능력을 기반으로 비트 컴퓨터 대비 비교 불가한 수준으로 빠르게 연산할 수 있다. Shor(1994)는 소인수 분해 알고리즘인 쇼어 알고리즘을 제시하였는데, 양자 컴퓨터를 이용하면 400자리의 소인수 분해를 기존의 방법으로는 10^{10}년 걸리는 시간을 약 하루 정도로 줄일 수 있음을 보였다.

양자 컴퓨터에 관한 관심이 커지면서 우월한 성능의 양자 컴퓨터를 개발하기 위한 경쟁이 치열해지고 있다. Arute et al.(2019)는 현존하는 가장 강력한 슈퍼컴퓨터에서 1만 년이 걸리는 연산이 구글에서 개발한 양자 컴퓨터 Sycamore[3]는 200초 만에 처리할 수 있다고 주장하였다.[4] 2021년 10월,

1) 2017년: Liquid biopsies, Harvesting clean water from air, Deep learning for visual tasks, Liquid fuels from sunshine, The Human cell atlas, Precision farming, Affordable catalysts for green vehicles, Genomic vaccines, Sustainable design of communities, *Quantum computing*
2018년: Augmented reality, Personalized medicine, AI-led molecular design, More capable digital helpers, Implantable drug-making cells, Gene drive, Algorithms for quantum computers, Plasmonic materials, Lab-grown meat, Electroceuticals

2) 2017년: Reversing Paralysis, Self-Driving Trucks, Paying with Your Face, *Practical Quantum Computers*, The 360-Degree Selfie, Hot Solar Cells, Gene Therapy 2.0, The Cell Atlas, Botnets of Things, Reinforcement Learning
2018년:3-D Metal Printing, Artificial Embryos, Sensing City, AI for Everybody, Dueling Neural Networks, Babel-Fish Earbuds, Zero-Carbon Natural Gas, Perfect Online Privacy, Genetic Fortune Telling, *Materials' Quantum Leap*

3) https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html

4) 이 주장에 대하여 경쟁사인 IBM은 구글의 주장에 슈퍼컴퓨터로 1만 년 걸리는 연산이 실제로는 2.5일이면 가능한 수준이며, 구글은

중국의 과학기술대 교수인 Pan Jianwei가 이끄는 연구팀은 66큐비트로 프로그래밍할 수 있는 초전도양자컴퓨팅 시스템인 'Zuchongzhi 2.1'을 개발하였다. 이 양자 컴퓨터는 현재 가장 빠른 슈퍼컴퓨터보다 1,000만 배 빠르며 계산 복잡도는 Google에서 개발한 54큐비트 양자 컴퓨터 Sycamore보다 100만 배 이상 높다고 발표하였다(Zhu et al., 2021).

또한, IBM, Google, Intel, Microsoft, 삼성 등 세계적 기업이 주도하는 가운데 D-Wave System, Rigetti Computing 등 주요 스타트업 기업에 대한 투자도 활발히 진행되고 있다. 특히 2011년에 D-Wave는 양자 기계학습의 하나인 양자 담금질(quantum annealing) 알고리즘에 특화된 128큐비트 양자 컴퓨터를 세계 최초로 상용화하였다(Johnson et al., 2011). 담금질 프로세스(annealing process)는 물체 온도가 높아지면 원자들이 흔들리다가 온도가 낮아지면 원자들이 위치에너지가 가장 낮은 자리를 찾아가려고 하는 현상이다. 큐비트가 스스로가장 낮은 에너지 상태로 간 이후 최종상태를 관측함으로써 원하는 결과는 얻는 방식의 양자 컴퓨터이다(Santoro and Tosatti, 2006).

선진국 국가들을 중심으로 양자 컴퓨터를 핵심 기술로 지정하여 연구 개발을 정책적으로 지원하고 있다. 미국은 2018년부터 양자 컴퓨터 부분에 5년간 약 1조 4,000억 원을 투자하고 있다. 또한, 중국은 5년간 약 16조 5,000억 원을 투자한 양자 정보 과학 국가 연구소를 설립하여 운영 중이다. EU와 일본 등 선진국들 역시 양자컴퓨팅 분야에 대한 투자를 점차 늘려가는 추세이다(Jeong and Choi 2021).

금융 산업에서의 양자컴퓨팅 투자는 글로벌 투자은행을 중심으로 이루어지고 있다. Goldman Sachs와 JP Morgan은 양자 금융을 연구하고 투자하는 글로벌 투자은행이다. Financial Times는 Goldman Sachs가 양자 컴퓨터를 사용하여 복잡한 파생 상품의 가격을 책정하는 방법을 연구하고 있으며, 이를 위해 큰 비용을 투자하고 있다고 밝혔다.[5] 또한 JP Morgan은 물리학 박사들을 퀀트(quant)로 채용하여 퀀텀 퀀트(quantum quant)로 육성하고 지원하고 있다. 퀀텀 퀀트는 양자 알고리즘을 이용해 금융의 문제를 해결하려고 한다.

국내에서도 양자 컴퓨터를 이용한 기계학습, 정보통신 등에 관한 연구를 진행한다. 그러나 아직 양자 컴퓨터를 금융에 활용하고자 하는 연구는 미진하다. 양자 금융은 금융의 문제를 해결하는데 양자물리학과 경제학, 경영학의 이론과 방법을 응용한 학제 간 융합 분야로 정의할 수 있다. 금융의 문제를 설정, 이를 양자 문제로 변환하고 양자 알고리즘을 찾아내는 것이 양자 금융의 핵심이다.

기존 슈퍼컴퓨터 연산 시간을 측정하는데 충분한 디스크 스토리지를 계산하는 데 실패했다고 밝혔다.

5) https://www.ft.com/content/bbff5dfd-caa3-4481-a111-c79f0d38d486

현재 진행되는 연구는 주로 양자 알고리즘을 적용하기 위한 하나의 분야로 금융을 이용하고 있다. 따라서 먼저 금융의 문제를 설정하고 이에 맞는 양자 알고리즘에 대한 연구가 이루어져야 한다.

Ⅱ장에서는 양자 금융의 개발 현황과 학술적인 연구 동향을 분석한다. Ⅲ장에서는 금융에서 활용할 수 있는 양자 알고리즘을 소개하며, Ⅳ장에서는 실제 양자 금융 시대를 준비하기 위한 준비에 대해 제언을 하고자 한다. Ⅴ장에서는 논문을 마무리한다.

Ⅱ. 양자 컴퓨터와 금융

우리가 피부로 접하는 거시세계의 법칙과 달리 전자와 원자가 중요해지는 미시세계에서는 더는 고전 물리학이 통용되지 않는다. 19세기 말 Max Planck가 양자화(quantization)의 개념을 소개한 이후, 많은 물리학자와 수학자들은 미시세계의 현상을 규명하기 위한 연구를 진행해 왔다. Feynman(1982)이 아이디어를 제안한 것을 시작으로, Deutsch and Penrose(1985)가 구체적인 개념을 정립하였던 양자 컴퓨터는 최근 십여 년의 기술발전에 힘입어 현실로 다가왔다. 양자 컴퓨터의 기본적인 원리는 입자의 양자적 특성이 자료를 나타내고 구조화할 수 있다는 것과 양자적 메커니즘이 고안되어 이러한 자료들에 대한 연산을 수행할 수 있도록 만들어질 수 있다는 것이다. 고전 컴퓨터는 하나의 연산에 하나의 정보만 처리할 수 있지만, 양자 컴퓨터는 하나의 연산에 여러 정보를 동시에 처리할 수 있는 양자 병렬성의 특성이 있다.

고전 컴퓨터보다 양자 컴퓨터가 가지는 장점은 모든 문제에 대하여 단순히 연산 속도가 빠르다는 점이 아니라, 특정 문제의 복잡도가 커짐에 따라 해결하기 위한 시간이 빠르게 증가한다는 점이다. 가장 대표적인 문제 중 하나인 그로버 알고리즘(Grover, 1996)은 임의의 함수 f에 대하여 $f(x)=y$를 만족하는 x의 값을 찾는 알고리즘이다. 예를 들어, 4자리 숫자로 이루어진 암호는 총 10,000가지의 경우의 수가 있고, 기존 알고리즘으로는 최대 10,000번의 연산이 필요하다. 그러나 그로버 알고리즘을 사용하면, 최대 100번($=\sqrt{10,000}$)의 연산만으로 암호를 찾을 수 있다. 이 외에도, 함수의 종류를 결정하는 도이지-조사 알고리즘(Deutsch and Jozsa, 1992), 소인수 분해를 하는 쇼어 알고리즘(Shor, 1994)은 양자 컴퓨터가 기존 컴퓨터보다 우월한 성능을 보이는 문제에 적합할 양자 알고리즘이다.

금융기관의 퀀트 애널리스트는 수학적 가정과 모델링을 통해 시장의 움직임을 예측하고, 최적의 포트폴리오를 구축하기 위한 전략을 수립한다. 이 과정에서 막대한 데이터가 사용되며, 양자 컴퓨터는

이 막대한 데이터의 분석을 신속히 처리하고 더 나은 예측 모델을 실행하여 예측의 정확도를 높일 수 있다. 또한, 포트폴리오의 자산 배분 최적화와 같은 문제를 빠르고 정확하게 풀 수 있다. 특히 양자 컴퓨터는 금융 예측 모델의 리스크나 자산 가격 평가에 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션에 강점이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 무작위 샘플링을 통해 결과를 도출하는 컴퓨터 알고리즘이다. 양자 컴퓨터는 양자 특성을 이용하여 큐비트가 적은 경우에도 많은 경우의 수를 동시에 표현할 수 있고, 여러 결과를 동시에 생성할 수 있어서 알고리즘을 통해 시뮬레이션 결과를 몇 초 안에 도출할 수 있게 한다.

본 장에서는 실제 양자 금융을 위한 양자 컴퓨터와 양자 알고리즘 개발 현황과 금융에서의 학술적인 연구 현황에 관해 기술한다.

1. 양자 금융 개발 현황

많은 IB 금융기관이 양자컴퓨팅에 관심을 가지고, 알고리즘에 관한 연구를 진행하고 있고, 실제 성과를 나타내고 있다. 2020년 12월 실리콘밸리에서 열린 Q2B 컨퍼런스[6]에서 Goldman Sachs의 양자 연구 책임자인 William Zeng은 그의 팀이 모든 경로를 양자 메모리에 로드하고 진폭 추정으로 추출함으로써 파생상품 가격 책정에 사용되는 알고리즘을 단순화하는 데 어느 정도 성공하였다고 말했다. 이 방법을 통해 기존 몬테카를로 시뮬레이션 방법보다 백만 개의 잠재적 경로에 대해 파생상품 가격 책정 속도를 천 배나 앞당길 수 있었다고 언급하였다. 또한, JP Morgan의 양자 연구원인 Macro Pistoia는 금융에서 가지고 있는 많은 문제는 양자 컴퓨터의 활용이 가지는 장점인 최적화 문제로 귀결된다고 하였다. 특히 퀀텀 퀀트는 자산 가격 평가의 속도를 높이고, 더 나은 최적의 포트폴리오를 구성하며 정교한 머신 러닝 알고리즘을 통해 수익을 증대할 수 있음을 언급하였다.

IB 금융기관은 금융리스크와 같은 수많은 경우의 수를 고려하기 위해 양자컴퓨팅을 통한 몬테카를로 시뮬레이션의 도입을 추진 중이다. 그리고 중장기적으로 기존 공개키 암호방식이 양자 컴퓨터에 의해 깨질 수 있음을 우려하여 정보보호 차원에도 양자 컴퓨터에 관심을 가지고 투자하고 있다.

이는 금융산업만의 이슈가 아니라 항공우주, 정보보호, 제약 등 다양한 분에서 활용할 수 있다. 특히 금융 분야는 최적 자산 배분, 포트폴리오 최적화, 자산평가, 위험관리 등 양자 알고리즘이 적용될 분야는 다양하다. 이에 Q-CTRL의 CEO인 Biercuk는 양자 알고리즘은 금융의 다양한

6) https://q2b.qcware.com/2020-conference/

분야에 적용할 수 있으므로, 양자 알고리즘의 작은 발전으로도 큰 돈을 벌 수 있음을 이야기하였다. 이미 글로벌 투자은행들인 JP Morgan, Crédit Agricole Group, CITI Group 및 Goldman Sachs 등은 양자연구팀을 구성하고 스타트업 기업과 계약을 체결, 연구를 진행 중이다. JP Morgan은 양자연구팀을 구성하여 양자기술 허브인 시카고 양자 거래소(Chicago Quantum Exchange)라는 양자기술 허브와 파트너십을 맺고 연구를 진행 중이다. Crédit Agricole Group은 스타트업 기업인 QuantFi와 협업 중이며, CITI Group은 1Qbit 및 QC Ware와 같은 양자컴퓨팅 소프트웨어 스타트업에 투자하여 양자컴퓨팅을 준비 중이다. Goldman Sachs는 QC Ware와 함께 금융 분야에 사용하는 양자 알고리즘을 개발하여 궁극적으로 금융 분야에 기존 컴퓨터를 대체하는 알고리즘을 연구 중이다.

물리학자와 퀀텀 퀀트들은 현재 양자 컴퓨터가 기술적으로 한계를 가지고 있음을 인정하고 있다. 이론적으로 수천 개의 큐비트에 대한 연산이 가능한 양자 컴퓨터는 기존의 고전 컴퓨터보다 매우 빠르다. Preskill(2018)은 "Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)"라는 용어를 제안하면서, 양자 오류 보정을 하지 못해 양자 컴퓨터에서 발생할 수 있는 문제에 관해서 이야기하였다. 즉 이상적인 양자 컴퓨터는 아직 현실에 존재하지 않는 한계에도 불구하고, 양자 컴퓨터가 기존 컴퓨터보다 잘할 수 있는 문제를 만들고 알고리즘을 만들기 위한 연구가 진행되고 있다. 금융 분야에서도 이미 글로벌 은행은 이론적인 양자 컴퓨터에서 구현이 가능한 양자 알고리즘을 금융에 접목하려는 시도를 진행 중이다.

몬테카를로 시뮬레이션 방법론은 금융회사가 파생상품을 평가하고 위험을 측정하기 위해 주로 사용된다. 그러나 이 몬테카를로 시뮬레이션 방법론은 정확성을 높이기 위해 충분히 많은 시행 횟수가 필요하다는 문제점이 있다. 즉 많은 양의 연산을 수행하기 때문에 한정된 컴퓨터 자원으로 수행하기에는 많은 시간이필요하다. 특히 금융위기와 같이 금융 시장에 큰 충격이 발생하면 즉각적인 대응이 어려워진다. 휘발성이 강한 금융 시장의 데이터를 바로 반영하기 어려운 것도 이 몬테카를로 시뮬레이션의 단점이다. 이 단점을 해결하기 위해서는 몬테카를로 시뮬레이션의 계산 속도를 높일 필요가 있다.

몬테카를로 시뮬레이션은 하나의 시뮬레이션을 통해 하나의 결과만을 얻을 수 있다. 기존에는 시뮬레이션의 속도를 높이기 위해 분산 감소 기법을 적용하거나, 준난수(Quasi-Random Number)를 이용하는 등 수리적인 방법으로 속도를 개선하였다. 또는 병렬컴퓨터의 등장으로 동시에 여러 번의 시뮬레이션을 반복하여 실행 시간을 줄일 수 있다. 그러나 양자 금융을 이용하면, 한 번에 여러 가지 상황을 동시에 시뮬레이션이 가능하다. 또한, 하나의 시뮬레이션에서 여러 개의 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다.

QC Ware는 고객에게 인터넷을 통해 양자컴퓨팅 플랫폼을 제공하는 QaaS(Quantum as a Service) 업체로 대형 금융기관인 Goldman Sachs와 함께 양자컴퓨팅 하드웨어에 작동할 애플리케이션을 개발하고 있다. 그 결과 몬테카를로 시뮬레이션을 양자 컴퓨터에서 사용할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

Goldman Sachs와 QC Ware는 공동 보도자료를 통해 "1,000배에서 100배로 속도가 빠른 쉘로우 몬테카를로(Shallow Monte Carlo) 알고리즘을 만들어 냈다. 이 알고리즘은 5~10년 뒤에 이용할 수 있을 것으로 예상하는 양자 컴퓨터에서 실행할 수 있다"고 밝혔다.[7)]

결론적으로 컴퓨팅 속도를 기하급수적으로 높일 수 있는 양자 컴퓨팅역량을 금융에 이용한다면, 빠르게 급변하는 시장의 변화에 신속하게 대응하고, 더 효율적인 자원의 배분과 비즈니스를 하기 위한 패러다임을 만들 수 있다. 이렇게 국제 금융 시장의 패러다임은 급변하고 있다. 그러나 국내 금융 시장에는 이러한 변화에 발맞추기 위한 연구나 투자가 미미한 상황이다.

2. 양자 금융 학술 연구 현황

양자 컴퓨터는 하드웨어와 소프트웨어 두 가지 관점에서 상호 작용으로 새로운 패러다임을 형성한다. 소프트웨어의 관점에서 하드웨어를 만드는 D-Wave, 소프트웨어를 만드는 1Qbit 및 금융업계 전문가들은 서로 양자기술에 대한 아이디어를 공유하고 금융 분야에 대한 양자 알고리즘 활용 분야를 모색하기 위한 온라인 커뮤니티 'Quantum for Quants'[8)]를 설립하였다. 이 커뮤니티를 통해 금융업계 전문가들은 포트폴리오 최적화, 위험관리와 같은 금융 문제를 해결할 수 있고, 양자 소프트웨어를 활용하기 위한 전문지식을 공유하였다.

금융에서의 양자 알고리즘은 기존 금융공학의 문제를 양자 영역에서 해결하기 위한 교차 학문으로 주목받고 있다. 학문으로서의 양자 금융은 AI, 블록체인 등과 같은 핀테크(FinTech)에서 양자 컴퓨터의 활용을 가능하게 한다(Lee, 2020). 그 외에도 금융의 다양한 분야에서 양자 컴퓨터를 활용할 가능성에 관해 연구가 선행되었다. 양자 금융은 금융 시장을 모델링하는 데 사용할 수 있다(Schaden, 2002). 또한, 포트폴리오 최적화, 차익거래, 신용 평가를 수행하는데 양자컴퓨팅에서의 알고리즘과 양자 담금질(Quantum Annealing)을 적용할 수 있다. 딥 러닝과양자 머신러닝의 접목은 금융 분야에 존재하는 다양한 문제를 개선할 수 있다. 예를 들어 파생상품의 가격을 계산하거나,

7) https://qcware.com/news/press-release-april-29/

8) Quantum for Quants는 2021년 11월 30일부로 종료되었다. (http://www.quantumforquants.org/)

금융 위험 분석과 같은 다양한 문제에 적용할 수 있다(Orus et al., 2019).

첫째, 양자 컴퓨터는 금융 시장의 데이터를 수많은 활용하는 데 유용하다. 즉 최적의 포트폴리오를 분석하는 데 있어서 투자를 위해 다양한 자산과 관련된 모든 데이터를 이용할 수 있게 할 수 있다. 과거 시장 데이터를 포함하여 최적의 위험 대비 수익 포트폴리오를 찾을 수 있다. 이 과정에서 Markowitz 공식과 Sharpe 비율 등에 기반 한 최적화된 포트폴리오를 찾을 수 있다(Rebentrost and Lloyd, 2018).

둘째, 금융기관의 고빈도 거래(High Frequency Trading) 및 사기(Fraud) 탐지에 활용할 수 있다. 양자컴퓨팅은 양자 이론을 기반으로 시스템과 기술을 만드는 데 집중하는 프로세스이다. 은행, 보험, 고빈도 거래와 같은 금융 부문에서 양자 컴퓨터는 위험을 줄이고 개인화 된 고객 서비스를 제공하며 사기에 대해 필요한 보안 프레임워크를 제공한다. 이를 위해 표적화 및 예측 분석을 제공함으로써 서비스를 최적화하는 데 도움을 줄 수 있다(Ganapathy, 2021).

셋째로, 최적화 문제, 머신 러닝, 시뮬레이션에 대하여 알고리즘에 우수성을 보인다. IBM의 양자 연구원인 Egger는 IBM에서 제공하는 Quantum Backend[9]를 이용하여 고전 컴퓨터에 비해 뛰어난 성능을 보임을 시연하였다. 양자 컴퓨터는 최적화 문제에 적은 단계만으로 최적의 솔루션을 찾을 수 있다. 또한, 머신 러닝 분야에서는 다차원 데이터 모델링을 통해 클래스 분류와 예측의 정확도를 비약적으로 높일 수 있다. 따라서 정확한 솔루션에 더 빨리 도달할 수 있다(Egger et al., 2020).

이렇게 양자 컴퓨터를 금융에 활용하기 위한 소수의 연구가 선행되었고, 진행되고 있다. 선행 연구는 금융 문제를 양자 컴퓨터가 풀 수 있는 문제로 변환하고 이를 양자 컴퓨터에 적용하기 위한 알고리즘의 가능성에 관한 연구들이다.

다음 장에서는 금융에 활용할 수 있는 양자 알고리즘을 소개하고자 한다.

Ⅲ. 금융을 위한 양자 알고리즘

금융에서는 최적화 문제들이 많이 발생한다. 수많은 금융 데이터들을 통해 최적의 의사결정을 내려야한다. 양자 컴퓨터는 동시에 많은 연산을 수행함으로써, 최적화 문제에 대한 고전 컴퓨터가 가지고 있는 기술적 한계와 비용 문제를 해결할수 있다. 포트폴리오 최적화 문제, 리스크 프로파일링

9) Quantum Backend란 양자회로를 시뮬레이션 하기 위한 장치이다.
https://qiskit.org/documentation/stubs/qiskit.providers.ibmq.IBMQBackend.html

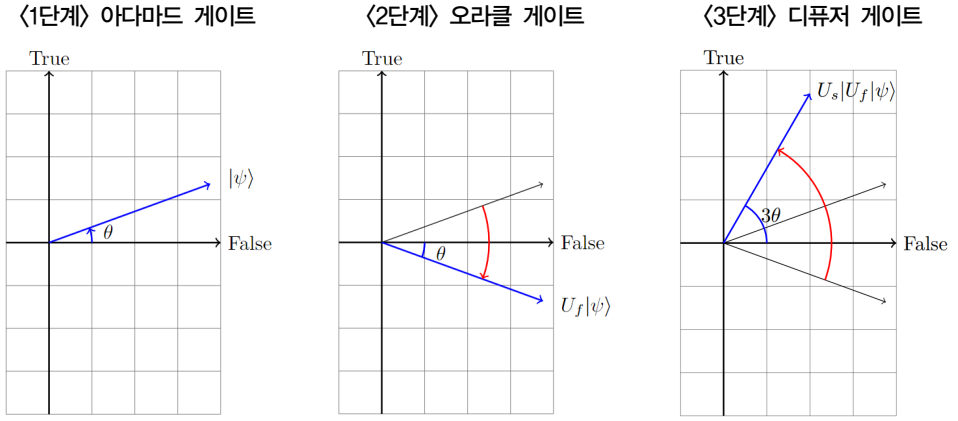
등의 영역에서의 활용이 가능하다. 그로버 알고리즘은 이러한 문제에 유용한 양자 알고리즘이다 (Grover, 1996). 또한, 양자 컴퓨터는 리스크 관리 및 파생상품 평가에서 널리 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션에서의 장점이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 난수를 통해 만들어 낸 임의의 상황으로 문제를 해결하는 방법론이다. 이번 장에서는 그로버 알고리즘을 이용한 최적화 문제 해결 방법, 양자 알고리즘을 통한 몬테카를로 시뮬레이션의 핵심인 난수 생성과 파생상품 평가에 적용하는 방법론을 소개한다.

1. Grover Algorithm for Optimization

1994년 Shor가 발견한 소인수 분해 알고리즘에 자극을 받은 Grover는 새로운 양자 알고리즘을 연구하기 시작하였고, 1996년 그로버 알고리즘을 발견하였다. 그로버 알고리즘은 $y = f(x)$에서의 특정한 x값을 찾는데 유용한 양자 알고리즘으로, 다양한 최적화 문제에 대해서 고전 컴퓨터보다 빠르게 풀 수 있는 알고리즘이다. 크게 3가지 단계로 구성된다.

1단계: (아다마드 게이트) 모든 경우의 수를 중첩시킨다.
2단계: (오라클게이트) 정답을 확인한다.
3단계: (디퓨저게이트) 정답이 아닐 경우 정답일 확률을 증폭시킨다.

그로버 알고리즘을 평면으로 전개하면 다음과 같다. 〈1단계〉에서 정답과 오답이 공존하는 중첩 상태로 만들고, 〈2단계〉에서 오답의 축으로 대칭이동 시킨다. 〈3단계〉에서 다시 원래 벡터를 축으로 대칭이동 하면, 정답의 축으로 가까워진다. 이렇게 〈2단계〉와 〈3단계〉를 반복함으로써, 정답의 축에 가깝게 만들어 준다.



〈그림 1〉 그로버 알고리즘의 기하학적 표현

$f(x)$가 최소가 되는 x'을 찾으려고 한다. x가 가질 수 있는 모든 경우(상태)의 수를 N개, 이 중 n번째 상태를 찾고자 하는 x'(True state)이라고 하자. 이때, 그로버 알고리즘의 시작은 모든 가능한 경우의 수를 중첩하는 것에서 시작된다. 이 중첩 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\psi> = \frac{1}{\sqrt{N}}(|1-st\ state> + \cdots + |n-th\ state> + \cdots + |N-th\ state>)$$
$$= \frac{|True\ State> + \sqrt{N-1}\,|False\ State>}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

이 상태는 모든 상태, 즉 정답과 오답인 상태가 모두 존재하는 중첩 상태이다. 여기서 정답을 나타내는 n번째 상태의 확률은 $1/N$이 된다. 〈그림 1〉에서 (1단계)를 의미한다. 여기서 $\theta = \arcsin(N^{-1/2})$ 이다. (2단계)에서는 오답 축을 기준으로 대칭이동 하는 오라클 게이트 U_f를 나타낸다. (3단계)는 ψ 기준으로 다시 대칭이동을 하여 정답의 확률을 증폭시키는 디퓨저 게이트이다. 이 단계를 통해 처음에 오답축에 대한 각도가 θ에서 3θ로 증가한다. 이러한 단계를 총 k번 반복한다면, $(2k+1)\theta$로 오답축에 대한 각도가 증가하게 된다. 원하는 결과를 얻기 위해서는 오답축과의 각도가 $\pi/2$가 되어야 하므로, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$k = \frac{\pi}{4}\left(\arcsin\left(N^{-\frac{1}{2}}\right)\right)^{-1} - 1 \quad (2)$$

여기서 N이 충분히 크다면, $k \approx \pi\sqrt{N}/4$로 근사할 수 있다. 고전적인 방법보다 작은 시행 횟수만으로도 원하는 결과를 찾을 수 있다.

그로버 알고리즘은 별다른 가정 없이 범용적으로 적용할 수 있는 알고리즘이라는 점에서 강점이 있다. 고전 컴퓨터에서 N개의 데이터 중 하나의 정답을 찾기 위해 $O(N)$의 검색이 필요 할 때, 그로버 알고리즘은 $O(\sqrt{N})$ 만에 결과값을 찾을 수 있게 한다.

물론 문제를 양자 컴퓨터에 적용하기 위해 문제를 최적화하고 알고리즘을 변환하는 작업이 필요하다. 이러한 연구의 하나로 Gilliam el al.(2021)은 Grover Adaptive Search(GAS)를 고안하였다. 이는 Variational Quantum Eigensolver(Tilly et al., 2022)와 Quantum Approximate Optimization Algorithm(Farhi et al., 2014)의 변형 알고리즘을 이용하여 최적화 문제에 대한 해답을 찾아낸다. GAS에서의 오라클 게이트는 임계치 상한, 하한의 모든 값을 반영하여 임계값이 업데이트될 때마다 최적값을 찾을 때까지 검색의 범위를 줄여간다.

금융 분야에서 최적화 문제는 여러 분야에서 활용되며, 그 중의 하나가 자산 배분이다. 자산 배분은 투자자의 위험 선호도에 따라 주식 채권 등 여러 투자자산에 대한 비율을 배분하는 과정이다. 이 과정에서 최적화를 통해 수익률과 위험에 대한 균형점을 찾게 되는데, 이때 GAS는 기존 최적화 알고리즘 더 뛰어난 속도를 보여 줄 수 있다. 또한 데이터 고전적인 방법론에 비해 데이터 크기에 대한 제약을 줄일 수 있어 신속하고 정확한 의사 결정을 할 수 있게 할 수 있다. 또 하나 다른 분야는 머신러닝 분야에서 활용이 가능하다. 양자 머신러닝은 양자 컴퓨터 연구 분야 중 하나로, 금융 분야에서 즉각적인 활용이 가능하다.

2. Pricing of Derivatives

Stefanov et al.(2000)은 아다마드 게이트를 이용한 난수 생성 방법론을 제시하였다. 여기서 아다마드 게이트는 모든 가능한 경우의 수를 중첩 상태로 만들어 주는 역할을 한다. 1개의 큐비트가 중첩되면, $|0>$과 $|1>$이 동시에 존재하는 상태가 된다. 이 경우, 측정 전에는 각각 50%의 확률을 가지게 된다. 2개의 큐비트가 중첩되면, $|00>$, $|01>$, $|10>$, $|11>$총 4가지 경우의 수가 존재하며, 각각의 확률은 25%로 같다. 큐비트가 n개가 된다면 총 2^n 가지의 경우의 수를 중첩 상태로 표현이 가능한 것이다.

$$(H\otimes H\otimes \cdots \otimes H\otimes H)(|00\cdots 00\rangle)$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2^n}}(|00\ldots 00>+|10\ldots 00>+\ldots+|11\ldots 10>+|11\ldots 11>) \quad (3)$$

즉 1부터 2^n까지의 숫자가 모두 같은 확률인 $1/2^n$으로 측정된다. 이 양자 게이트에서 추출될 결과를 s라고 하면, $s/2^n$은 $[0,1]$ 범위에서 균등한 확률을 가지는 $U(0,1)$인 표준균등분포를 가지게 된다.

미국 국립표준기술원 연구팀(Bierhorst et al., 2018)은 이러한 중첩의 원리와 빛의 무작위성을 이용하여 양자난수생성기(QRNG, Quantum Random Number Generator)를 개발했다. 이 양자난수생성기는 무작위로 0과 1의 비트를 생성하는 광자의 상태를 측정한 뒤 그 결과를 프로그램에 입력해 양자 난수를 생성하는 방식이다.

2020년에 출시된 스마트폰 갤럭시 A 퀀텀은 양자난수생성기를 작은 칩셋으로 구현하여 스마트폰에 탑재하였다. SK텔레콤은 "일정 시간동안 센서의 일정 면적에서 감지되는 광자의 개수는 무작위로

발생하는데, 이를 이용해 난수를 생성한다. 양자난수생성기 칩셋은 이 과정을 통해 초당 2000여 개의 양자 난수를 추출하며, 추출할 때마다 난수의 개수가 바뀐다"고 밝혔다.

일반적으로 컴퓨터에서 사용하는 난수는 의사 난수(pseudo random number)이다. 이 난수는 수학적일 알고리즘에 의해서 초기값에 따라 무작위로 생성되는 일종의 '가짜' 난수이다. 이러한 의사 난수는 간단한 알고리즘에 의해서 생성이 되지만, 이 알고리즘이 노출되면 난수를 예측할 수 있다. 따라서이 난수의 품질이 뛰어날수록 보안 측면에서 유리하며, 몬테카를로 시뮬레이션의 수렴속도를 높일 수 있다.

Stamatopoulos et al.(2020)는 그의 연구에서 기존 비트컴퓨터에서의 몬테카를로 시뮬레이션보다 뛰어난 성능을 보이는 양자 알고리즘을 제안하였다. 주가에 대한 로그 노말(log-normal) 분포를 만들고, 모든 가능한 주가의 경우의 수를 고려한 후 페이오프를 적용하는 방식이다. T 시점에 주가가 S_T이고, 그 확률을 $P(S_T)$, 옵션 손익구조(Payoff)를 $f(S_T)$, T 시점에서 현재까지의 할인 계수를 $B(0,T)$라 하면 현재 시점의 옵션 가격은 다음과 같다.

$$V(0) = B(0, T)\sum_{i=0}^{n} f(S_T)P(S_T) \tag{4}$$

옵션 가격 산정을 위한 단계는 다음과 같다.

1) T 시점에 주가가 S_T를 이산화한다. S_T의 최대값($S_{\max}$)과 최소값($S_{\min}$), 그리고 큐비트 개수(n)로 표현 가능한 정보를 통해 만기시점의 주가의 데이터 세트을 정한다.

$$\frac{S_{\max} - S_{\min}}{2^n - 1} \times i + S_{\min}$$

여기서 i는 0부터 $(2^2 - 1)$까지의 정수이다.

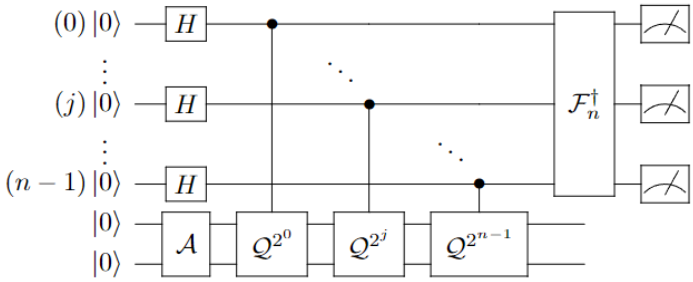
2) 하나의 양자상태(quantum state)에 이렇게 정의된 주가를 대응(Mapping)하고, 해당 확률진폭은 로그-노말 분포의 확률을 부여한다.

3) 단계를 통한 주가에 해당하는 손익구조와 2) 단계의 확률을 통하여 만기시점의 옵션 가격의 기대값을 계산할 수 있다. 이 기대값을 현재가치로 할인하여 현재 시점의 옵션 가격을 얻을 수 있다.

n-개의 큐비트에 대한 확률진폭을 위한 양자 게이트이다. 여기서, H는 아다마드 게이트, $\mathcal{F}^{+}$는 역(Inverse) 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT) 이다. $\mathcal{A}$와 $\mathcal{Q}$는 각각 다음을 만족하는 유니터리(Unitary)이다.

$$\mathcal{A}=\sqrt{1-a}\,|\psi_0>_n+\sqrt{a}\,|\psi_1>_n|1>$$

$$\mathcal{Q}=\mathcal{A}\mathcal{S}_0\mathcal{A}^{\dagger}\mathcal{S}_{\psi_0} \text{ where } \mathcal{S}_0=1-2|0><0| \quad \text{and} \quad \mathcal{S}_{\psi_0}=1-2|\psi_0>|0><\psi_o|<0|$$



〈그림 2〉 확률진폭의 양자 게이트

〈그림 2〉는 Quantum Fourier Transform(QFT)을 이용한 확률진폭 양자 게이트이다(Weinstein et al., 2001). QFT는 시간에 대한 파동함수를 빈도에 대한 분석의 형태로 변환한다. QFT는 양자상태를 측정한다는 의미이고, 이 알고리즘을 이용하여 옵션가격 공식을 산정하기 위한 주가의 확률진폭을 만들어 낼 수 있다. 즉, QFT를 통해 파생상품 가격을 산정하기 위한 문제를 양자 컴퓨터가 적용할 수 있는 문제를 바꾸어 주는 역할을 한다.

고전 몬테카를로 시뮬레이션에서는 주가 경로에 대한 옵션 손익구조를 계산하여 평균을 내는 방식으로 옵션 가격을 산정한다. 만기 시점의 주가는 분포에 의해 정해지며, 이는 시뮬레이션마다 달라진다. 그러나 양자 컴퓨터에서는 큐비트가 표현할 수 있는 양자상태를 미리 정해 놓은 만기 시점의 주가에 대응하고, 그에 대한 확률을 지정하는 방식이다. 이렇게 지정한 확률은 실제 원하는 분포를 반영할 수 있는 장점이 있다. 이런 방식의 양자 몬테카를로는 기존의 몬테카를로에 비해 이론적으로 최소 2배 이상 빠르다(Stamatopoulos et al., 2020).

양자 컴퓨터를 이용하면 주가에 대한 분포를 만드는 방식으로 원하는 분포를 만들 수 있다. 분포를 생성하는 것은 금융 분야에서 옵션가격 산정 이외에도 시계열 분석에도 활용할 수 있다. 마르코프 체인 몬테카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)는 기존의 데이터 세트를 이용해 연속 확률 변수 집합을 기반으로 확률 분포를 생성한다. 일반적으로 MCMC 모형은 선형 회귀와 비교하여 시간과 비용이 많이 소요된다. 이 경우 양자 컴퓨터를 통한 MCMC는 시간과 비용의 단점을 해결할 수 있다.

이번 절에서는 금융에서 활용 가능한 기본적인 두 가지 알고리즘을 소개하였다. 이 외에도 머신러닝을 위한 알고리즘 등 금융에서 활용할 수 있는 양자 알고리즘에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 이러한 알고리즘은 양자 오류를 가정하고 있고, 따라서 연구의 결과가 나오기까지는 많은 시간이 소요된다. 금융의 문제들을 푸는 데 사용하는 알고리즘을 적용하기 위해 필요한 양자 컴퓨터는 아직 현존하지 않는다. 따라서 알고리즘을 위해 필요한 양자 컴퓨터의 연산량을 줄이는 연구는 중요하다. 이러한 양자 알고리즘을 연구하는 것은 미래의 양자 금융 시대를 준비하는 시발점이 된다.

지금까지의 선행연구들은 모두 양자 컴퓨터를 적용하기 위한 하나의 분야로 금융을 접근하고 있다. 따라서 접근 방식에 대한 전환이 필요하다. 금융의 문제를 먼저 만들고 이를 위한 양자 알고리즘을 연구해야 한다.

이를 위해, 양자 알고리즘을 실제로 구현하고 실무에 활용하기 위한 기본적인 양자물리에 대한 이해가 필요하다. 그러나 현재 국내 학교와 금융기관에서는 금융을 위한 양자 컴퓨터 교육 프로그램이 없다. 이에, 다음 장에서는 양자 금융 시대를 준비하기 위해 제언한다.

Ⅳ. 양자 금융을 위한 제언

2022년 6월, 정부는 '50큐비트 양자 컴퓨터 구축 및 양자 인터넷 개발 착수 보고회'를 열었다. 이 보고회에서 양자 컴퓨터 분야에서의 선진국과의 기술 격차를 만회하며, 양자 시스템 사업을 시작했음을 알렸다. 이는 정부의 정책적인 지원을 통한 양자 컴퓨터를 구현하기 위한 시작이다. 그러나 이와 더불어 소프트웨어, 즉 알고리즘에 관한 연구도 진행되어야 한다. 이를 위하여 양자 금융 교육이 시작되어야 한다. 양자 금융은 융합학문으로서, 실무적인 성격의 교육 프로그램이 구성되어야 한다. 양자 물리에 대한 사전지식이 없는 사람들도 양자 컴퓨터의 개념과 작동 방식을 적용할 수 있어야 한다. 이러한 학과 프로그램의 구성은 단기간에 성과를 얻기는 어렵지만, 지속적인 투자와 연구는 양자 금융 시대의 핵심 인재를 육성하기 위한 디딤돌이 될 것이다.

인공지능, 머신러닝 등과 같은 4차 산업 기술과 더불어 디지털 전환은 금융기관의 핵심 화두이다. 디지털 시대에 데이터의 양은 기하급수적으로 많아지고 있고, 이에 새로운 컴퓨터인 양자 컴퓨터가 새로운 대안으로 부상하고 있다. 양자 컴퓨터의 발전과 더불어 이미 글로벌 금융기관들은 양자연구팀

을 구성하고, 학교 연구기관 및 스타트업 기업과 양자 금융 시대를 준비하고 있다. 그러나 국내 금융기관은 아직 이러한 트렌드에 뒤처져있다. 따라서 다음과 같이 현재 국내 금융기관에서 실현할 수 있는 대응 방안에 대해 모색하고자 한다.

첫째, 금융기관의 스타트업에 투자가 필요하다. 국내 금융기관에서 독립적으로 양자 컴퓨터와 알고리즘을 개발하는 것은 기술적으로나 재정적으로 매우 어렵다. 글로벌 기업들 역시 독자적인 개발보다는 스타트업에 투자하여 공동 개발하는 형태의 연구가주로 이루어지고 있다. 국내에서도 양자 컴퓨터 관련 기업이 존재한다. 그러나 정보보안, 통신, 블록체인 등 양자 암호 관련 개발이 주를 이루고 있다. 이러한 스타트업 기업들을 금융에 끌어들이기 위해서는 금융기관들의 투자가 필요하다. 투자를 통해 연구 성과를 공유하고, 이러한 인력들은 금융 시장에 참가하도록 해야 한다.

둘째, 양자 프로그래밍 개발자를 육성해야 한다. 금융과 컴퓨터라는 두 가지 서로 다른 배경을 갖춘 인재는 금융기관에서 중요하다. 금융기관뿐 아니라 혁신산업 전반에서 개발자는 부족하다. 컴퓨터 프로그래밍 기술과 금융 전문지식을 골고루 갖춘 인재는 전 세계적으로도 구하기 어려운 실정이다. 이러한 상황에서 금융과 컴퓨터에 양자 지식까지 필요한 양자 프로그래밍 개발자는 더욱 가치를 가지게 된다. 금융산업과 학교에서 이러한 인재들을 육성하지 못한다면, 양자 금융 시대를 따라가지 못하게 되고 더욱 비싼 비용으로 국외의 개발자나 기술을 들여와야 한다. 따라서 미리 이러한 역량을 가진 개발자들을 육성하기 위한 지원이필요하다.

셋째, 국가에서 정책적인 지원을 끌어내야 한다. 통신, 보안 등의 분야를 포함하여 국가에서 정책적으로 양자 금융 시대를 준비하기 위해 할 수 있는 것이 무엇인지, 어떻게 지원을 할 수 있는지 정부와 금융기관이 서로 머리를 맞대고 고민해야 할 것이다.

Ⅴ. 결론

지금까지 양자 컴퓨터는 물리학과 수학의 영역으로만 여겨져 왔다. 최근 양자 컴퓨터에 관심은 물리학, 수학을 포함하여 암호학, 빅데이터, 금융의 영역에서도 연구가 시작되고 있다. 양자컴퓨팅이 금융에서 활용될 가능성은 무궁무진하다. 그러나 아직 양자물리라는 높은 진입장벽에 의해 금융 분야에서의 활용은 초기 단계이다. 금융에서 사용되는 데이터는 많은 양의 데이터 처리가 필요하다.

따라서 양자 컴퓨터는 이에 강점을 가질 수 있다. 자산 가격 평가, 리스크 측정, 자산 배분 전략, 금융 시장 예측, 머신러닝을 활용한 알고리즘 트레이딩 등의 분야에서 양자 컴퓨터의 활용이 가능함을 연구 중이다.

본 논문에서는 학교와 금융기관에서 양자 금융 시대를 준비하기 위한 역량 있는 인재를 키우는 것 제안한다. 양자 금융은 적은 투자로도 큰 이익을 얻을 수 있는 금융 시장에 적용할 경우, 큰 패러다임을 만들 수 있을 것으로 보인다.

아직 양자 컴퓨터를 일반 기업이나 개인이 이용하기까지는 기술적으로 시간이 필요하다. 하지만 여러 글로벌 기업만이 아니라 스타트업 기업도 양자 컴퓨터 개발에 투자하고 있다. 이러한 기술적인 혁신을 통해 곧 우리의 눈앞에 양자 컴퓨터를 실물로 보게 될 것이다. 양자 컴퓨터가 금융의 패러다임을 바꾸게 하기 위해서는 지금부터 준비를 시작해야 한다. 향후 학교와 금융기관에서 양자 컴퓨터를 활용한 연구, 실무 활용을 하기 위해서는 중 · 장기적인 국가적 관점에서의 정책이 더불어 동반되어야 할 것이다.

References

Arute, F., K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, ⋯ J. M. Martinis, "Supplementary information for Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, Vol. 574 (2019), pp. 505-510.

Deutsch, D., "Quantum theory as a universal physical theory," *International Journal of Theoretical Physics*, Vol. 24 (1985), pp. 1-41.

Deutsch, D., and R. Jozsa, "Rapid solution of problems by quantum computation," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 439 (1992), pp. 553-558.

Deutsch, D., and R. Penrose, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 400 (1985), pp. 97-117.

Dirac, P. A. M., "A new notation for quantum mechanics," *Mathematical Proceedings of the Cambridge*

Philosophical Society, Vol. 35 (1939), pp. 416-418.

Egger, D. J., C. Gambella, J. Marecek, S. McFaddin, M. Mevissen, R. Raymond, … E. Yndurain, "Quantum Computing for Finance: State-of-the-Art and Future Prospects," *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, Vol. 1 (2020), pp. 1-24.

Farhi, E., J. Goldstone, and S. Gutmann, *A Quantum Approximate Optimization Algorithm*, arXiv, 2014.11.14.

Feynman, R. P., "Simulating physics with computers," *International Journal of Theoretical Physics*, Vol. 21 (1982), pp. 467-488.

Ganapathy, A., "Quantum Computing in High Frequency Trading and Fraud Detection," *Engineering International*, Vol. 9 (2021), pp. 61-72.

Gilliam, A., S. Woerner, and C. Gonciulea, "Grover Adaptive Search for Constrained Polynomial Binary Optimization," *Quantum*, Vol. 5 (2021), p. 428.

Grover, L. K., *A fast quantum mechanical algorithm for database search*, arXiv, 1996.11.19.

Jeong, Y. H., and B. S. Choi, "Technical Trend and Challenging Issues for Quantum Computing Control System," *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 36, No. 3 (2021), pp. 87-96.

Johnson, M., M. Amin, S. Gildert, T. Lanting, F. Hamze, N. Dickson, … G. Rose, "Quantum annealing with manufactured spins," *Nature*, Vol. 473 (2011), pp. 194-198.

Lee, R. S. T., "Future Trends in Quantum Finance," in *Quantum Finance: Intelligent Forecast and Trading Systems*, ed. by R. S. T. Lee, 399-405, Singapore: Springer, 2020.

Moore, G. E., "Cramming more components onto integrated circuits," *Electronics*, Vol. 38, No. 8 (1965), p. 6.

Orus, R., S. Mugel, and E. Lizaso, "Quantum computing for finance: Overview and prospects," *Reviews in Physics*, Vol. 4 (2019), 100028.

Preskill, J., "Quantum Computing in the NISQ era and beyond," *Quantum*, Vol. 2 (2018), 79.

Rebentrost, P., and S. Lloyd, *Quantum computational finance: Quantum algorithm for portfolio optimization*, ArXiv:1811.03975 [Quant-Ph], 2018. Retrieved from http://arxiv.org/abs/1811.03975

Santoro, G. E., and E. Tosatti, "Optimization using quantum mechanics: Quantum annealing through adiabatic evolution," *Journal of Physics A: Mathematical and General*, Vol. 39 (2006), pp. R393-R431.

Schaden, M., "Quantum Finance," *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 316 (2002), pp. 511-538.

Shor, P. W., "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring," *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE (1994).

Stamatopoulos, N., D. J. Egger, Y. Sun, C. Zoufal, R. Iten, N. Shen, and S. Woerner, "Option Pricing using Quantum Computers," *Quantum*, Vol. 4 (2020), 291.

Stefanov, A., N. Gisin, O. Guinnard, L. Guinnard, and H. Zbinden, "Optical quantum random number generator," *Journal of Modern Optics*, Vol. 47 (2000), pp. 595-598.

Tilly, J., H. Chen, S. Cao, D. Picozzi, K. Setia, Y. Li, ⋯ J. Tennyson, *The Variational Quantum Eigensolver: A review of methods and best practices*, arXiv, 2022.6.12.

Weinstein, Y. S., M. A. Pravia, E. M. Fortunato, S. Lloyd, and D. G. Cory, "Implementation of the Quantum Fourier Transform," *Physical Review Letters*, Vol. 86 (2001), pp. 1889-1891.

Zhu, Q., S. Cao, F. Chen, M. C. Chen, X. Chen, T. H. Chung, ⋯ J. W. Pan, *Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling*, ArXiv:2109.03494 [Quant-Ph], 2021. Retrieved from http://arxiv.org/abs/2109.03494

〈부 록〉

A. 양자 게이트 및 양자 연산

양자상태(Quantum State)란 양자물리에서 물체의 위치나 운동량을 기술하는 대상을 의미한다. 양자상태에서는 수학적으로 복소수 힐버트 공간(Hilbert Space)에서 크기(Norm)가 1인 벡터로 표현한다. 이는 양자상태를 전자의 스핀으로 설명이 가능하다. 전자의 스핀은 두 가지 값을 가질 수 있다. Dirac(1939)은 이 두 가지 값을 표현하기 위해 켓 벡터(ket vector, $|\cdot>$)와 브라 벡터(bra vector, $<\cdot|$) 개념을 고안하였다. 켓 벡터는 크기가 $n\times1$인 열벡터(column vector)를 말한다. 브라 벡터는 켓 벡터의 전치행렬(transpose matrix)이며 $1\times n$인 행벡터(row vector)이다. 이 켓 벡터를 이용하면 양자상태는 $|0>$ 또는 $|1>$로 표현할 수 있다. 여기서 $|0>$과 $|1>$은 직교 벡터이다. $|0>$과 $|1>$을 기저(Basis)로 하는 양자상태는 다음을 만족하는 계수 α, β에 의해 복소수 공간의 백태로 표현할 수 있다.

$$\Psi = \alpha|0> + \beta|1>$$

여기서 α, β는 확률 진폭(probability amplitude)이며, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$을 만족한다. 이는 수학적으로 $|0> = (0\ 1)^T$, $|1> = (0\ 1)^T$을 의미하고, 위의 식은 아래와 같이 변형된다.

$$\Psi = \alpha\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} + \beta\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}.$$

위의 식은 양자상태가 반지름이 1인 (복소수) 구 위의 한 점으로 표현된다.

고전 컴퓨터에서 0과 1로 표현되는 비트는 양자물리에서는 양자상태를 큐비트(Qubit, Quantum-bit)로 표현된다. 고전 비트 0과 1만 표현이 가능하지만 큐비트에서는 양자상태에서 복소수 공간에서 크기가 1인 모든 점을 표현할 수 있다.

양자 컴퓨터는 유니터리(Unitary) 선형변환을 통해서 양자상태인 큐비트를 변환한다. 이를 통해 연산을 수행하게 된다. 이 유니터리 선형변환 U는

$$|\Psi(t+\delta t)| = U|\Psi(t)|$$

로 나타낸다. 이 식은 t 시간에서 $t+\Delta t$로 시간이 변할 때의 상태 변화를 의미한다. 여기서

유니터리 선형변환은 크기를 유지하는 변환이다.

양자 게이트(Quantum Gate)는 큐비트에 적용되는 유니터리 변환을 의미한다. 고전적인 모든 연산 가능한 함수를 양자 게이트인 유니터리 선형변환으로 전환할 수 있다. 양자 게이트에서도 고전 컴퓨터에서 사용되는 AND, OR, XOR 같은 논리 연산자와 아마다드(Hardamard) 게이트, 스왑(Swap) 게이트, 푸리에 변환(Fourier Transform) 게이트 등을 사용한다. 이러한 게이트들을 이용하여 고전 컴퓨터의 모든 연산과동일한 양자 알고리즘을 만들 수 있다(Deutsch, 1985).

양자 컴퓨터에서도 고전 컴퓨터와 같이 논리 연산을 게이트로 구성한다. 변수를 입력 받아 연산하고 출력하는 행위는 동일하다. 그러나 양자 컴퓨터에서는 중첩을 이용하여 큐비트가 가능한 모든 상태를 동시에 연산하며, 이것이 양자 컴퓨터의 핵심이다.

큐비트는 기하학적으로 블로흐 구(Bloch sphere)를 이용하거나, 행렬(벡터)의 형태로 표현이 가능하다. 물리학을 전공하였거나, 양자물리학에 대한 지식이 많은 사람이라면 3차원의 기하가 받아들이기 쉽다. 그러나 양자물리에 대해 처음 접하는 사람들은 행렬의 연산이 익숙하기 때문에 앞으로의 양자 게이트는 모두 행렬의 연산을 이용하고자 한다.

양자 컴퓨터는 논리 회로인 게이트를 이용하여 큐비트를 조절한다. 이러한 게이트는 일반적인 회로와 동일하게 오른쪽에서 왼쪽으로 시간의 흐름을 나타낸다. 다시 말해 왼쪽에 있는 연산부터 순서대로 계산을 수행한다.

1. 기본적인 대수학

양자 컴퓨터의 언어는 모두 선형대수로 이루어져 있다. 선형대수는 양자 컴퓨터를 구현하거나 코딩하는데 직접적으로 사용되지는 않지만, 선형대수를 통해 큐비트의 상태와 양자 연산을 이해할 수 있게 한다. 예를 들어, 양자 컴퓨터에서 어떤 변수가 입력되었을 때 선형대수 연산을 통해 결과를 쉽게 예측할 수 있다. 양자물리의 기본 개념을 이해하는 것이 양자컴퓨팅을 이해하는 데 도움이 되는 것처럼, 기본적인 선형대수는 양자 알고리즘의 작동 방식을 이해할 수 있게 한다.

켓 벡터와 브라 벡터로 큐비트를 표현하면, 그 후에는 벡터의 연산으로 양자 연산을 표현할 수 있다. 양자 연산에 가장 많이 사용되는 스칼라 곱(Scalar product, dot product)과 텐서 곱(Tensor product)의 개념은 다음과 같다.

·스칼라 곱 (bra vector ×ket vector = scalar)

$$< 0 \mid 1 > = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} (1 \;\; 0).$$

·텐서 곱

$$\mid 0 > \otimes \mid 0 > = \mid 00 > = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ 0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mid 0 > \otimes < 0 \mid = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes (1 \;\; 0) \begin{pmatrix} 1 (1 \;\; 0) \\ 0 (1 \;\; 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

A행렬의 크기가 $n \times m$이고, B 행렬의 크기가 $k \times l$ 일 때, 텐서 곱은 다음과 같이 일반화가 가능하다.

$$\underbrace{A}_{\{n \times m\}} \quad \otimes \quad \underbrace{B}_{\{k \times l\}} \quad = \quad \underbrace{C}_{\{nk \times ml\}}$$

따라서 텐서 곱은 공간을 확장하는 역할을 한다.

텐서 곱을 이용하면 2개 이상의 큐비트도 표현이 가능하다. 예를 들어 2개의 큐비트가 모두 $\mid 0 >$인 경우, $\mid 00 >$으로 표시하며 텐서 곱을 통해 아래와 같이 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\mid 00 > \;\; = \mid 0 > \otimes \mid 0 > = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

마찬가지 방식으로 $\mid 01 >$은 첫 번째 큐비트가 $\mid 0 >$, 두 번째 큐비트가 $\mid 1 >$을 의미하며 행렬로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mid 01 > = \mid 0 > \otimes \mid 1 > = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ 0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

2. X 게이트 (Pauli X Gate)

고전 컴퓨터에서의 Not 연산은 0을 1로, 1을 0으로 뒤집어 주는 논리 연산자이다. 양자 컴퓨터에서는 이를 X 게이트라고 한다. 블로흐 구에서 X 게이트는 180도 회전을 의미한다. 큐비트로는 $|0>$을 $|1>$로, $|1>$을 $|0>$로 바꾸어 주는 연산자이다. 이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$X=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}.$$

위의 행렬식을 이용하면 큐비트의 X 게이트 연산은

$$X|0>=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}$$

로 쉽게 표현이 가능하다. 3차원 공간에서 180도 회전으로 표현하는 것보다, 행렬로 표현하는 것이 물리학 전공자가 아닌 일반인이 양자 컴퓨터를 이해하기 쉬운 방법이다.

$|0>$또는 $|1>$로 초기화된 큐비트가 X 게이트를 지나게 되면, $|1>$과 $|0>$로 큐비트가 변하게 된다.

3. H 게이트 (Hadamard Gate)

중첩이란 양자가 존재 가능한 모든 가능성의 선형 결합으로 표현되는 것이다. 어떠한 문제를 해결할 때, 가능한 모든 경우의 수를 중첩의 상태로 만들어서 정답을 찾아가는 것이 양자 컴퓨터 기술이다. 예를 들어, 미래의 주가에 대한 분포를 예측할 때 가능한 모든 주가의 경우에 수를 중첩 상태를 만들어 주는 것이다. 이처럼 모든 경우의 수를 중첩 상태로 만들어주는 H 게이트는 양자 컴퓨터의 가장 중요한 게이트이다.

$|0>$는 H 게이트에 의해 $|0>$과 $|1>$이 동시에 존재하는 중첩상태가 된다.

$$H|0>=\frac{1}{\sqrt{2}}|0>+\frac{1}{\sqrt{2}}|1>$$

여기서 중요한 것은 $|0>$과 $|1>$의 확률진폭이 모두 $1/\sqrt{2}$이라는 것이다. 이를 다시 말하면 $|0>$과 $|1>$이 발생할 확률이 모두 $1/2$이라는 의미이다. 이 확률진폭을 조절하여 원하는 분포를만들어 낼 수 있다.

이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$H|0>=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ 1\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}|0>+\frac{1}{\sqrt{2}}|1>$$

$$H|1>=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ -1\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}|0>-\frac{1}{\sqrt{2}}|1>$$

$|0>$ 또는 $|1>$로 초기화된 큐비트가 H 게이트를 지나게 되면, $|0>$과 $|1>$이 중첩된 상태로 변하게 된다. $|0>$과 $|1>$이 중첩될 때의 차이점은 $|1>$의 확률진폭의 부호가 다르게 나오는 것이다.

4. Z 게이트 (Pauli Z Gate)

Z 게이트는 위상을 바꾸어 주는 게이트이다. 블로흐 구에서 Y 축 방향으로 180도만큼 회전하는 연산이다. 행렬로 표현하면 결과는 쉽게 표현이 가능하다.

$$Z|0>=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}=|0>$$

$$Z|1>=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ -1\end{pmatrix}=-\frac{1}{\sqrt{2}}|1>.$$

이 게이트는 결과적으로 $|0>$은 영향이 없지만, $|1>$일 때만 확률진폭의 부호를 바꾸어 주는 역할을 한다. $|0>$ 또는 $|1>$로 초기화된 큐비트가 Z 게이트를 지나게 되면, $|0>$이 입력될 때는 변화가 없으나 $|1>$이 입력되면 확률진폭의 부호가 (+)에서 (−)로 변하게 된다.

5. CX 게이트 (Control-X Gate)

CX 게이트는 특별한 역할을 한다. 첫 번째 큐비트가 $|1>$ 일 때만 두 번째 큐비트에 영향을 주는 것이다. 즉 첫 번째 큐비트에 $|0>$을 보내면 CX 게이트는 영향이 없는 반면 $|1>$을 보내면 두 번째 큐브에 X 게이트가 적용이 된다. 예를 들어, $|00>$은 $|00>$이 되지만, $|10>$은 $|11>$, $|11>$은 $|10>$이 된다. 따라서 CX 게이트는 두개의 큐비트가 서로 얽힘 상태가 되도록 만들어준다.

$$CX|00>=|00>,\ CX|01>=|01>$$

$$CX|10>=|11>,\ \ CX|11>=|10>$$

이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$CX|10>=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\\0&0&1&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\end{pmatrix}=|11>$$

6. 양자 연산 예시

양자 컴퓨터는 여러 개의 큐비트를 동시에 연산해야 한다. 2개 이상의 큐비트에 대한 연산의 결과를 예측하거나, 원하는 결과를 만들어 내기 위한 양자 게이트를 만들어야 한다. 이러한 양자 연산의 결과를 예측하기 위해서는 A.1에서의 대수학의 개념을 이용하는 것이 도움이 된다.

예를 들어, 2개의 큐비트에 H 게이트가 적용된 경우를 생각해 볼 수 있다. 두 개의 큐비트에 적용된 각각 H 게이트는 텐서 곱으로 표현이 가능하다. 여기서 첫 번째 큐비트(Qubit 0)의 게이트를 $\otimes$ 연산자 앞에 두 번째 큐비트(Qubit 1)의 게이트를 $\otimes$ 연산자 뒤 적용한다. 만약, 하나의 큐비트에만 게이트가 적용된다면 항등행렬을 적용한다.

$$H\otimes H|00>=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1&1&1&1\\1&-1&1&-1\\1&-1&-1&1\\1&-1&-1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1\\1\\1\\1\end{pmatrix}$$

$$=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix}+\frac{1}{2}\begin{pmatrix}0\\1\\0\\0\end{pmatrix}+\frac{1}{2}\begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\end{pmatrix}+\frac{1}{2}\begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\end{pmatrix}$$

$$=\frac{1}{2}|00>+\frac{1}{2}|01>+\frac{1}{2}|10>+\frac{1}{2}|11>$$

여기에 $|00>$ 큐비트가 입력된다면 $H\otimes H|00>$로 나타나며 이를 행렬의 연산으로 표현하면 다음과 같은 결과 예측이 가능하다. 즉, $|00>$, $|01>$, $|10>$, $|11>$이 각각 발생할 확률이 $1/4$ 인 중첩 상태가 된다.

B. 양자 금융 관련 글로벌 스타트업 회사

회사명	홈페이지	회사 설명
D-Wave System	https://www.dwavesys.com/	캐나다의 하드웨어 기업으로 양자컴퓨팅이 주 사업 모델이다. 최초의 프로토타입 양자 컴퓨터인 D-Wave One을 판매한다. D-Wave One의 프로토 타입은 16큐비트 양자 프로세서를 이용한다.
Rigetti Computing	https://www.rigetti.com/	Rigetti Computing은 캘리포니아 버클리에 있는 기업이다. 양자 칩을 설계 및 제조하고, 이를 제어 아키텍처와 통합할 뿐 아니라 프로그래머가 양자 알고리즘을 구축하는 데 사용할 소프트웨어를 개발한다. 또한, Forest라는 클라우드 플랫폼을 지원한다.
Q-CTRL	https://q-ctrl.com/	Q-CTRL은 호주 시드니에 있는 양자기술을 위한 소프트웨어 개발 회사이다. Q-CTRL은 시드니 대학교 양자 과학 그룹에서 분사하였다.
Chicago Quantum Exchange	https://chicagoquantum.org/	Chicago Quantum Exchange는 양자 정보의 과학 및 엔지니어링을 발전시키고 차세대 양자 과학자 및 엔지니어를 교육한다. 양자 금융을 추진하기 위해 선도적인 학술 연구원, 최고의 과학 시설 및 세계에서 가장 혁신적인 산업 파트너들과 협력하고 있다.
QuantFi	https://www.quantfi.com/	Quantfi는 뉴욕에 본사를 둔 금융 기술(FinTech) 기업이다. 글로벌 자본 시장을 위한 위험, 분석 및 거래 소프트웨어를 제공한다.
1Qbit	https://1qbit.com/	1Qbit는 브리티시 컬럼비아 밴쿠버에 위치한 양자컴퓨팅 소프트웨어 회사이다. 양자컴퓨팅 하드웨어용 범용 알고리즘을 개발하며, 주로 계산 금융, 재료 과학, 양자 화학 및 생명 과학에 중점을 두고 있다.
QC Ware	https://qcware.com/	QC Ware Corp.은 양자 하드웨어에서 실행되는 엔터프라이즈 솔루션을 구축하는 양자컴퓨팅 소프트웨어 회사이다. 고전적으로 훈련된 데이터 과학자가 양자 컴퓨팅에 쉽게 액세스할 수 있도록 하고 단기 하드웨어에서 성능 속도 향상을 제공하는 것을 목표로 하고 있다.