Quantum finance and its implications to practice and academia

MyeongSu Choi, *Ph.D Student, Hanyang University*
Hyoung-Goo Kang[*], *Associate Professor, Hanyang University*

Abstract

In combination of AI and machine learning, quantum computing has attracted much attention recently. Global researchers have just started applying the working principle of quantum computing to finance. This can render the Korean finance community an immense head-start to exploit research and practical opportunities. Indeed, quantum algorithms have advantages in optimizations at financial and Monte Carlo simulation problems. This study analyzes the current status of research and practice that relate quantum computers to finance. In addition, we present a practical education program for quantum finance and suggest policy implications and strategies to introduce it to the domestic financial institutions.

Keywords: Quantum Computer; Quantum Finance; Quantum Finance research status; Quantum Finance practical education

[*] Corresponding author: Hanyang University Business School, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Korea. Tel: +82-2-2220-2883, email: hyoungkang@hanyang.ac.kr

양자금융 연구 현황과 실무 및 교육을 위한 제언

최명수 (한양대학교 박사과정)

강형구* (한양대학교 교수)

요 약

최근 인공지능과 머신러닝의 급속한 발전에 따라 양자컴퓨팅이 새로운 기술로 주목받고 있다. 해외에서는 이러한 양자컴퓨팅에 대한 작동 원리를 금융에 접목하려는 연구가 시작되고 있다. 이러한 양자금융에 대한 연구는 국내 금융 분야에서 새로운 기회를 만들 수 있다. 실제로 양자 알고리즘은 금융에서 다루는 최적화 문제와 몬테카를로 시뮬레이션에 장점을 가지고 있다. 본 연구는 양자컴퓨터를 금융에 적용하기 위한 연구와 실무 현황을 분석한다. 또한, 양자금융을 위한 실무 교육 프로그램을 제시하고 이를 국내 금융기관에 도입하기 위한 정책적인 시사점과 전략을 제언한다.

핵심 단어: 양자컴퓨터; 양자금융; 양자금융 연구 현황; 양자금융 실무 교육;

* 연락담당 저자. 주소: 서울특별시 성동구 왕십리로 222, 경영대학, 04763; E-mail: hyoungkang@hanyang.ac.kr; Tel: 02-2220-2883.

1. 서론

인텔의 공동 창립자인 고든 무어(Gordon Moore)는 반도체 집적회로의 성능이 24 개월마다 2 배씩 증가 한다는 무어의 법칙(Moore, 1965)을 언급 하였다. 이렇게 발전을 이루어 온 고전컴퓨터는 물리적인 한계에 다다랐다. 가장 일반적으로 사용되는 14 나노미터 공정은 적혈구 보다 500 배나 작은 수준이다. 고전컴퓨터가 더 작아져서 원자의 크기에 다다를수록 일반적인 물리법칙이 아닌 양자영역의 물리법칙이 적용이 된다. 이에 기술적으로 더 작아질 수 없는 고전컴퓨터는 대신할 수 있는 양자컴퓨터의 관심이 커지고 있다.

1980 년대, 리처드 파인만(Richard Feynman)은 0 과 1 로만 표현되는 기존의 비트 컴퓨터로는 양자 세계의 실험을 할 수 없음을 이야기하였다. Arute et al.(2019)에 의하면 구글은 현존하는 가장 강력한 슈퍼컴퓨터에서 1 만년이 걸리는 연산을 양자컴퓨터는 200 초만에 처리가 가능하다고 주장하였다[1].

양자컴퓨팅은 기존 고전컴퓨터의 한계를 극복하기 위한 차세대 컴퓨팅 플랫폼으로, 4 차 산업혁명의 기반인 ICBM(IoT, Cloud, Big Data, Mobile) 생태계의 핵심 기술로 주목받고 있다. 양자컴퓨터는 중첩(Superposition)과 얽힘(Entanglement) 등 양자역학의 현상을 이용하여 정보를 연산할 수 있는 컴퓨터이다. 병렬 연산 처리 능력을 기반으로 비트 컴퓨터 대비 비교 불가한 수준으로 빠르게 연산이 가능하다. Shor(1994)는 소인수 분해 알고리즘인 쇼어 알고리즘을 제시하였는데, 양자컴퓨터를 이용하면 400 자리의 소인수 분해를 기존의

[1] 이 주장에 대하여 경쟁사인 IBM 은 구글의 주장에 슈퍼컴퓨터로 1 만 년 걸리는 연산이 실제로는 2.5 일이면 가능한 수준이며, 구글은 기존 슈퍼컴퓨터 연산 시간을 측정하는데 충분한 디스크 스토리지를 계산하는데 실패했다고 밝혔다.

방법으로는 10^{10}년 걸리는 시간을 약 하루 정도로 줄일 수 있다고 하였다. 세계경제포럼은 2017 년과 2018 년 2 년 연속 양자컴퓨팅(Quantum computing)과 양자컴퓨팅을 위한 알고리즘(Algorithms for quantum computers)을 10 대 미래 유망기술[2]로 선정하였다. MIT 는 2017 년과 2018 년에 실용적 양자컴퓨터(Practical Quantum Computers)와 재료의 양자도약(Materials' Quantum Leap)을 10 대 혁신 기술[3]로 선정하였다.

이러한 전망에 힘입어 각 국에서는 양자컴퓨터를 핵심 기술로 지정하여 연구 개발을 정책적으로 지원하고 있다. 미국은 2018 년부터 양자컴퓨터 부분에 5 년간 약 1 조 4,000 억원을 투자하고 있다(Smith, 2018). 또한 중국은 5 년간 약 16 조 5,000 억원을 투자한 양자 정보 과학 국가 연구소를 설립하여 운영 중이다. EU 와 일본 등 선진국들 역시 양자컴퓨팅 분야에 대한 투자를 점차 늘려가는

---

[2] **2017 년**: 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***
2018 년: 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

[3] **2017 년**: 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
2018 년: 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***

추세이다(Jeong and Choi, 2021).

개별 기업도 IBM, Google, Intel, Microsoft, 삼성 등 글로벌 기업이 주도하는 가운데 D-Wave System, Rigetti Computing 등 주요 스타트업 기업에 대한 투자도 활발히 진행되고 있다. 특히 D-Wave 사는 양자기계학습의 하나인 양자 담금질(Quantum Annealing) 알고리즘에 특화된 양자컴퓨터를 세계 최초로 사용화 하였다(Johnson et al., 2011).

2021 년 10 월, 중국의 과학기술대 교수인 Pan Jianwei 가 이끄는 연구팀은 66 큐비트 프로그래밍 가능한 초전도 양자컴퓨팅 시스템인 'Zuchongzhi 2.1'을 개발하였다. 이 양자컴퓨터는 현재 가장 빠른 슈퍼컴퓨터보다 1,000 만 배 빠르며 계산 복잡도는 2019 년 Google 에서 개발한 54 큐비트 양자컴퓨터인 Sycamore[4]보다 100 만 배 이상 높다고 발표하였다(Zhu et al., 2021).

국내에서도 양자컴퓨터를 이용한 기계학습, 정보통신 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 양자금융에 대한 연구는 미진하다. 양자금융은 금융의 문제를 해결하는데 양자물리학과 경제학의 이론과 방법을 응용한 학제간 융합 분야에서 탄생했다. 본 논문에서는 양자컴퓨팅의 원리 및 양자 알고리즘에 대해서 간단히 소개하고, 금융에서의 활용 방안에 대한 제안을 하고자 한다.

2 장에서는 양자컴퓨터에서 사용되는 양자역학의 기본 개념을 소개하고, 중요한 양자게이트를 정리한다. 3 장에서는 양자금융의 연구 현황과 금융에서 활용가능한 양자 알고리즘을 설명한다. 여기에는 실무자 양성을 위한 양자금융 교육 실러버스를 제언한다. 4 장에서는 논문을 마무리한다.

---

[4] https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html

2. 양자역학과 양자컴퓨터

우리가 눈으로 보는 거시세상의 법칙과 다르게 전자나 원자와 같은 미시세계의 입자들은 움직이고 있다. 이 미시세계는 거시세계의 고전물리학의 법칙이 통하지 않고, 오직 수학과 실험으로 파악이 가능하다. 19 세기 말 막스 플랑크(Max Planck)가 양자화(Quantization)의 개념을 소개한 이후, 많은 물리학자와 수학자들은 미시세계의 현상을 규명하기 위한 연구를 진행해 왔다. 이렇게 시작된 양자역학은 고전물리학과 달리 오직 확률밀도의 함수로만 기술된다. 양자역학의 이론은 물리학의 영역에서 뿐 아니라 나노 신소재 개발에 필수적이지만, 아직도 일반 사람들에게 생소한 이유는 확률로만 표현되는 미시영역의 특성 때문이다. 물리학자 리처드 파인만(Feynman, 1982)은 양자역학을 통해서 다차원 연산을 간단히 할 수 있음을 주장하였다. 이후 양자컴퓨팅과 양자 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

양자컴퓨터와 양자 알고리즘을 이해하기 위해서는 양자역학에 대한 깊이 있는 물리학적 지식이 필수적이지는 않지만 기본적인 개념은 필요하다. 따라서, 이하의 절에서는 양자컴퓨터를 이해하기 위한 양자역학의 기본 개념, 기본적인 대수학, 이를 이용한 양자게이트, 그리고 간단한 양자연산에 대한 내용을 설명한다.

2.1 양자역학의 기본 개념

양자상태(Quantum State)란 양자역학에서 물체의 위치나 운동량을 기술하는 대상을 의미한다. 양자상태에서는 수학적으로 복소수 힐버트 공간(Hilbert Space)에서 크기(Norm)이 1 인 벡터로 표현한다. 이는 양자상태를 전자의 스핀으로

설명이 가능하다. 전자의 스핀은 두 가지 값을 가질 수 있다. Dirac(1939)은 이 두가지 값을 표현하기 위해 켓 벡터(ket vector, $|\cdot\rangle$)와 브라 벡터(bra vector, $\langle\cdot|$) 개념을 고안하였다. 켓 벡터는 크기가 $n \times 1$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 $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$로 표현할 수 있다. 여기서 $|0\rangle$과 $|1\rangle$은 직교 벡터이다. $|0\rangle$과 $|1\rangle$을 기저(Basis)로 하는 양자상태는 다음을 만족하는 계수 α, β에 의해 복소수 공간의 백태로 표현할 수 있다.

$$\Psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \tag{1}$$

여기서 α, β 는 확률 진폭(probability amplitude)을 의미하며, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$을 만족한다.

이는 수학적으로 $|0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$, $|1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ 을 의미하며, 위의 식은 아래와 같이 변형된다.

$$\Psi = \alpha\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} + \beta\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \tag{2}$$

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

고전컴퓨터에서 0 과 1 로 표현되는 비트는 양자역학에서는 양자상태를 큐비트(Qubit, Quantum-bit)로 표현된다. 고전비트 0과 1만 표현이 가능하지만 큐비트에서는 양자상태에서 복소수 공간에서 크기(Norm)이 1인 모든 점을 표현할 수 있다.

양자컴퓨터는 유니타리(Unitary) 선형변환을 통해서 양자상태인 큐비트를 변환한다. 이를 통해 연산을 수행하게 된다. 이 유니타리 선형변환 U는

$$|\Psi(t+\Delta t)| = U|\Psi(t)| \quad (3)$$

로 나타낸다. 이 식은 t 시간에서 $t+\Delta t$ 로 시간이 변할 때의 상태 변화를 의미한다. 여기서 유니타리 선형변환은 크기(Norm)을 유지하는 변환이다.

양자게이트(Quantum Gate)는 큐비트에 적용되는 유니타리 변환을 의미한다. 고전적인 모든 연산 가능한 함수를 양자게이트인 유니타리 선형변환으로 전환할 수 있다. 양자게이트에서도 고전컴퓨터에서 사용되는 AND, OR, XOR 같은 논리 연산자와 아마다드(Hardamard) 게이트, 스왑(Swap) 게이트, 푸리에변환(Fourier Transform) 게이트 등이 있다. 이러한 게이트들을 이용하여 고전 컴퓨터의 모든 연산과 동일한 양자 알고리즘을 만들 수 있다(Deutsch, 1985).

양자컴퓨팅을 이해하기 위해서는 양자역학의 기본 개념 중 3가지가 중요하다. 중첩, 얽힘, 측정이 그것이다.

2.1.1 중첩(Superposition)

중첩은 양자컴퓨팅을 하기 위한 양자알고리즘의 핵심이다. 중첩이란 양자상태가 모든 가능한 상태의 선형 조합으로 표현되는 것을 의미한다. 중첩을 표현하는 가장 대표적인 예는 ‘슈뢰딩거의 고양이’이다(Schrödinger, 1935). 슈뢰딩거는 양자역학의 불완전함을 증명하기 위해 이 사고실험을 고안하였다. 사고실험에서는 고양이 한 마리, 청산가리가 든 유리병, 방사성물질인 라듐, 그 방사능을 측정할 수 있는 가이거 계수기, 그리고 망치를 한 상자에 넣는다. 상자는 밖에서 관찰이 불가능하며, 라듐의 반감기는 1시간으로 방사능이 검출될 확률은 50%이다. 이때 1시간 후 고양이는 살아 있을까? 이 질문에 슈뢰딩거는 반드시 살아있거나 죽어 있으나 다만 우리가 모를 뿐이라고 주장하였다. 이 사고 실험은 우리가 살고 있는

거시의 세계에서는 일반적으로 받아들여진다. 그러나 양자세계에서는 고양이가 살기도 하고 죽기도 한 고양이가 존재한다는 것이다. 코펜하겐은 이 상황을 ‘상자를 열기 전에 살아있고 죽어 있는 상태가 중첩되어 있으나, 관측하는 순간 하나의 상태가 된다’ 고 해석하였다(Faye, 2008).

중첩은 고전컴퓨터와 구분되는 양자컴퓨터의 특징이다. 고전컴퓨터에서 1-비트는 1 개의 상태만을 표현이 가능하다. 즉 0 또는 1 의 값을 가지게 된다. 그러나 1-큐비트는 0 과 1 의 값을 동시에 가질 수 있다. 따라서 n-비트에서는 2^n 중 한 개의 정보만 처리하지만 n-큐비트에서는 동시에 2^n개의 정보를 처리할 수 있는 것이다. 그만큼 양자컴퓨터는 고전컴퓨터에 비해 월등한 연산능력을 보여줄 수 있다. 즉, 양자컴퓨터는 고전컴퓨터가 부딪힌 연산 속도의 한계를 극복할 수 있다. 특히 금융에서 다루는 많은 문제들은 수많은 데이터를 필요로 한다. 여기서 양자컴퓨터는 이 문제들의 최적의 결과를 신속하고 정확하게 도출할 수 있게 한다.

2.1.2 얽힘(Entablement)

얽힘은 두개 이상의 양자상태의 복합계(Composite System)는 양자상태가 서로 영향을 주고받는 것을 의미한다. 아인슈타인은 이 얽힘 현상을 일컬어 유령 같은 원격 작용(Spooky Action at a Distance)이라고 하였다(Jammer, 1974).

큐비트들은 서로 얽힘 상태에서 각각의 큐비트는 다른 큐비트의 변화에 바로 변화한다. 서로의 거리에 상관없이 빛 보다 빠른 속도로 반응하는 것이다. 즉 얽힘은 하나의 큐비트를 연산을 하지 않아도 다른 큐비트에 연산 결과에 따라 저절로 연산이 수행되는 것이다. 얽힘은 하나의 큐비트를 측정함으로써 다른 큐비트의 속성을 알 수 있기 때문에 양자컴퓨터에 유용한 특성이다. 이러한 얽힘의

컨트롤이 잘 이루어지는 것을 양자 결맞음(Quantum Coherence)이라 하며, 이러한 상황을 잘 맞들어 낼 수 있는 것이 양자컴퓨터를 구현하는 핵심 기술이다. 이 결맞음은 연산 과정에서 발생하는 오류율과 관련이 있다. 큐비트로 정보를 처리하기 위해선 큐비트가 얽힘 상태로 있어야 한다. 그러나 이 큐비트는 미세한 온도 변화나 소음, 진동만으로도 에너지가 새어 나가 연산에 실패하는 결잃음(Decoherence) 상태에 빠질 수 있다. 아무리 양자컴퓨터가 빠른 연산 능력을 보이더라도, 결맞음 상태를 유지하기 어렵다면 오류율이 커지므로, 양자컴퓨터의 장점은 사라진다.

금융시장의 데이터들은 서로 독립적이지 않고 서로 영향을 받는다. 예를 들면, 미국의 주가는 한국의 주가에 영향을 주기도 하고, 세계 각국의 환율 실시간으로 영향을 주고받는다. 양자 역학의 얽힘을 통해서 이렇게 서로 영향을 받는 금융 데이터들을 모델링 하는데 이용할 수 있을 것이다.

2.1.3 관측(Measurement)

관측은 중첩된 상태 중 하나를 확인하는 조작이다. Heisenberg and Bohr(1958)는 관측을 하는 행위 자체가 양자의 상태에 영향을 미친다는 코펜하겐의 해석을 이야기하였다. 그들은 이 연구에서 미시세계와 거시세계의 차이를 주장하였다. 거시세계에서는 우리의 눈으로 사물을 보던 보지 않던 물질의 상태는 정해져 있다. 그러나 미시세계에서는 그렇지 않음을 밝혔다. 즉, 빛이 파동인지 입자인지는 그 대상을 관측하기 전까지는 그 상태를 알 수 없다고 하였다. 중첩된 상태 중 하나로 결정짓는 것을 관측이다.

양자역학의 관측은 간단히 양자컴퓨터에서 계산의 중간 과정이나 최종 연산의

결과를 도출하는 과정에서 해당 큐비트들의 상태를 측정하는 것이다. 예를 들면, 오늘 주식 시장이 종료하기 전까지 주가지수의 종가는 어떠한 경우의 수도 가능하지만, 실제로 주식 시장 종료 후에는 하나의 숫자로 정해지는 것이다.

2.2 양자게이트 및 양자연산

양자컴퓨터에서도 고전컴퓨터와 같이 논리 연산을 게이트로 구성한다. 변수를 입력 받아 연산을 하고 출력하는 행위는 동일하다. 그러나 양자컴퓨터에서는 중첩을 이용하여 큐비트가 가능한 모든 상태를 동시에 연산하며, 이것이 양자컴퓨터의 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 양자역학에 대해 처음 접하는 사람들은 행렬의 연산이 익숙하기 때문에 앞으로의 양자게이트는 모두 행렬의 연산을 이용하고자 한다.

양자컴퓨터는 논리 회로인 게이트를 이용하여 큐비트를 조절한다. 이러한 게이트는 일반적인 회로와 동일하게 오른쪽에서 왼쪽으로 시간의 흐름을 나타낸다. 다시 말해 왼쪽에 있는 연산부터 순서대로 계산을 수행한다. 본 절에서는 양자게이트 연산에 필요한 기본적인 대수학 및 이를 이용한 양자게이트에 대해 설명한다.

2.2.1 기본적인 대수학

양자컴퓨터의 언어는 모두 선형대수로 이루어져 있다. 선형대수는 양자컴퓨터를

구현하거나 코딩 하는데 직접적으로 사용되지는 않지만, 선형대수를 통해 큐비트의 상태와 양자 연산을 이해할 수 있게 한다. 예를 들어, 양자컴퓨터에서 어떤 변수가 입력되었을 때 선형대수 연산을 통해 결과를 쉽게 예측할 수 있다. 양자역학의 기본 개념을 이해하는 것이 양자컴퓨팅을 이해하는데 도움이 되는 것처럼, 기본적인 선형대수는 양자 알고리즘의 작동 방식을 이해할 수 있게 한다.

고전비트는 0 과 1 로 표현되나, 큐비트는 물리적으로 원자에 대한 조작으로 이해된다. 2.1 절에서 언급한 Dirac 의 표기법(notation)인 켓 벡터와 브라 벡터를 이용하여 큐비트를 대수적으로 표현할 수 있다. 켓 벡터를 이용하면 큐비트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \qquad |1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \tag{4}$$

켓 벡터와 브라 벡터로 큐비트를 표현하면, 그 후에는 벡터의 연산으로 양자연산을 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)

$$\langle 0||1\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}(1 \quad 0) = 0 \tag{5}$$

○ 텐서 곱

$$|0\rangle \otimes |0\rangle = |00\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\\0\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix} \tag{6}$$

$$|0\rangle \otimes \langle 0| = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes (1 \quad 0) = \begin{pmatrix}1(1 \quad 0)\\0(1 \quad 0)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & 0\\0 & 0\end{pmatrix} \tag{7}$$

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

$$\underbrace{A}_{n\times m} \otimes \underbrace{B}_{k\times l} = \underbrace{C}_{nk\times ml} \tag{8}$$

따라서 텐서 곱은 공간을 확장하는 역할을 한다.

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

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\\0\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix} \tag{9}$$

마찬가지 방식으로 $|01\rangle$은 첫번째 큐비트가 $|0\rangle$, 두번째 큐비트가 $|1\rangle$을 의미하며 행렬로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\\0\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\1\\0\\0\end{pmatrix} \tag{10}$$

2.2.2 X 게이트 (Pauli X Gate)

고전컴퓨터에서의 Not 연산은 0을 1로, 1을 0으로 뒤집어 주는 논리 연산자이다. 양자컴퓨터에서는 이를 X 게이트라고 한다. 블로흐 구에서 X 게이트는 180도 회전을 의미한다. 큐비트로는 $|0\rangle$을 $|1\rangle$로, $|1\rangle$을 $|0\rangle$로 바꾸어 주는 연산자이다. 이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$X = \begin{pmatrix}0 & 1\\1 & 0\end{pmatrix} \tag{11}$$

위의 행렬식을 이용하면 큐비트의 X 게이트 연산은

$$X|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{12}$$

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

이 연산을 양자게이트(Quantum Circuit)로는 그림 1과 같이 그릴 수 있다. X 게이트는 X 또는 $\oplus$ 로 그릴 수 있다. $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$로 초기화된 큐비트가 X 게이트를 지나게 되면, 그림처럼 $|1\rangle$과 $|0\rangle$로 큐비트가 변하게 된다.

**** 그림 1 여기에 삽입 ****

2.2.3 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 양자컴퓨터 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 양자컴퓨터의 가장 중요한 게이트이다.

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

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \tag{13}$$

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

이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \tag{14}$$

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \tag{15}$$

이 연산을 양자회로로는 그림 2 과 같이 그릴 수 있다. H 게이트는 H 로 그릴 수 있다. $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$로 초기화된 큐비트가 H 게이트를 지나게 되면, 그림처럼 $|0\rangle$과 $|1\rangle$이 중첩된 상태로 변하게 된다. $|0\rangle$과 $|1\rangle$이 중첩될 때의 차이점은 $|1\rangle$의 확률 진폭의 부호가 다르게 나오는 것이다.

**** 그림 2 여기에 삽입 ****

2.2.4 Z 게이트 (Pauli Z Gate)

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

$$Z|0\rangle = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = |0\rangle \tag{16}$$

$$Z|1\rangle = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = -\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = -|1\rangle \tag{17}$$

이 게이트는 결과적으로 $|0\rangle$은 영향이 없지만, $|1\rangle$일 때만 확률진폭의 부호를 바꾸어 주는 역할을 한다.

이 연산을 양자회로로는 그림 3 과 같이 그릴 수 있다. 이 게이트는 Z 로 그려진다. $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$로 초기화된 큐비트가 Z 게이트를 지나게 되면, 그림처럼 $|0\rangle$이 입력되면 변화가 없으나 $|1\rangle$이 입력되면 확률진폭의 부호가 $(+)$에서 $(-)$로 변하게 된다.

**** 그림 3 여기에 삽입 ****

2.2.5 CX 게이트 (Control-X Gate)

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

$$CX|00\rangle = |00\rangle,\ CX|01\rangle = |01\rangle$$
$$CX|10\rangle = |11\rangle,\ CX|11\rangle = |10\rangle \tag{18}$$

이를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{CX}|10\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |11\rangle \tag{19}$$

이 연산을 양자회로로는 그림 4와 같이 그릴 수 있다. 영향을 주는 큐비트에는 '·' 기호를 영향을 받는 큐비트에 X를 그려준다. 큐비트가 2개 이상인 경우, 처음 큐비트는 'Qubit 0'이라고 하고, 그 다음 큐비트부터 'Qubit 1', 'Qubit 2', … 로 번호가 붙는다. 그림 4 에서 'Qubit 0'이 $|1\rangle$ 인 경우에만 'Qubit 1'의 큐비트에 X 게이트가 적용이 된다.

**** 그림 4 여기에 삽입 ****

2.2.6 양자연산 예시

양자컴퓨터는 여러 개의 큐비트를 동시에 연산을 해야 한다. 2 개 이상의 큐비트에 대한 연산의 결과를 예측하거나, 원하는 결과를 만들어 내기 위한 양자 게이트를 만들어야 한다. 이러한 양자연산의 결과를 예측하기 위해서는 2.2.1 절에서의 대수학의 개념을 이용하는 것이 도움이 된다.

예를 들어, 그림 5 와 같이 2 개의 큐비트에 H 게이트가 적용된 경우를 생각해 볼 수 있다. 두개의 큐비트에 적용된 각각 H 게이트는 다음과 같이 텐서 곱으로 표현이 가능하다. 여기서 첫번째 큐비트(Qubit 0)의 게이트를 ⊗ 연산자 앞에 두번째 큐비트(Qubit 1)의 게이트를 ⊗ 연산자 뒤 적용한다. 만약, 하나의 큐비트에만 게이트가 적용된다면 항등행렬을 적용한다.

$$H \otimes H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} & 1\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \\ 1\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} & -1\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \tag{20}$$

여기에 $|00\rangle$ 큐비트가 입력된다면 $H \otimes H|00\rangle$으로 나타나며 이를 행렬의 연산으로 표현하면 다음과 같은 결과 예측이 가능하다.

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

$$= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{21}$$

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

즉, $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$이 각각 발생할 확률이 $\frac{1}{4}$인 중첩 상태의 결과가 나올 것이 예측 가능하다.

본 장에서는 양자컴퓨터에 대한 이해를 위해 양자역학의 기본개념과 이해를 돕기 위한 선형대수 그리고 이를 이용한 양자게이트를 설명하였다. 다음 3 장에서는

이러한 양자컴퓨터를 금융에 활용하기 위한 국외 연구 현황들을 분석하고, 금융에 적용할 수 있는 간단한 양자알고리즘에 대하여 논의한다.

3. 양자컴퓨터와 금융

금융기관의 퀀트 애널리스트는 수학적 가정과 모델링을 통해 시장의 움직임을 예측하고, 최적의 포트폴리오를 구축하기 위한 전략을 수립한다. 이 과정에서 막대한 데이터가 사용되며, 양자컴퓨터는 이 막대한 데이터의 분석을 신속히 처리하고 더 나은 예측 모델을 실행하여 예측의 정확도를 높일 수 있다. 또한 양자컴퓨터를 통해 포트폴리오의 자산배분의 최적화와 같은 문제를 풀 수 있다. 양자컴퓨터는 또한 금융 예측 모델의 리스크나 자산가격 평가에 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션에 강점을 가지고 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 무작위 샘플링을 통해 결과를 도출하는 컴퓨터 알고리즘이다. 양자컴퓨터는 양자 특성을 이용하여 큐비트가 적은 경우에도 많은 경우의 수를 동시에 표현할 수 있고, 여러 결과를 동시에 생성할 수 있기 때문에 이 알고리즘을 통해 시뮬레이션 결과를 몇 초 안에 도출할 수 있다.

실제로 많은 IB 금융기관들이 양자컴퓨팅 스타트업에 투자하고 있다. 2020 년 12 월 실리콘벨리에서 열린 Q2B 컨퍼런스에서 골드만삭스의 양자 연구 책임자인 William Zeng 은 그의 팀이 모든 경로를 양자 메모리에 로드하고 진폭 추정으로 추출함으로써 파생 상품 가격 책정에 사용되는 알고리즘을 단순화하는 데 어느 정도 성공하였다고 말했다. 이 방법을 통해 기존 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 비해 백만 개의 잠재적 경로에 대해 파생 상품 가격 책정 속도를 천 배나 앞당길 수 있었다고 언급하였다. 또한 JP Morgan 의 양자 연구원인 Macro Pistoia 은

금융에서 가지고 있는 많은 문제들은 양자컴퓨터의 활용이 가지는 장점인 최적화 문제로 귀결된다고 하였다. 특히 퀀텀 퀀트(Quantum Quant)는 자산 가격 평가의 속도를 높이고, 더 나은 최적의 포트폴리오를 구성하며 정교한 머신 러닝 알고리즘을 통해 수익을 증대할 수 있음을 언급하였다.

금융리스크와 같은 수많은 경우의 수를 고려하기 위해 양자컴퓨팅을 통한 몬테카를로 시뮬레이션의 도입을 추진 중이다. 그리고 중장기적으로 기존 공개키 암호방식이 양자컴퓨터에 의해 깨질 수 있음을 우려하여 정보보호 차원에도 양자컴퓨터에 관심을 가지고 투자를 진행중이다.

이는 금융산업 만의 이슈가 아니라 항공우주, 정보보호, 제약 등 다양한 분에서 활용이 가능하다. 특히 금융분야는 최적 자산배분, 포트폴리오 최적화, 자산평가, 위험관리 등 양자 알고리즘이 적용될 분야는 다양하다. 이에 Q-CTRL 의 CEO 인 Biercuk 는 양자 알고리즘은 금융의 다양한 분야에 적용이 가능하므로, 양자 알고리즘의 작은 발전으로도 큰 돈을 벌 수 있음을 이야기하였다. 이미 글로벌 투자은행들인 JP Morgan, Crédit Agricole Group, CITI Group 및 Goldman Sachs 등은 양자 연구팀을 구성하고 스타트업 기업과 계약을 체결, 연구를 진행중이다. JP Morgan 은 양자연구팀을 구성하여 양자 기술 허브인 시카고 양자 거래소(Chicago Quantum Exchange)라는 양자기술 허브와 파트너십을 맺고 연구를 진행 중이다. Crédit Agricole Group 은 스타트업 기업인 QuantFi 와 협업 중이며, CITI Group 은 1Qbit 및 QC Ware 와 같은 양자 컴퓨팅 소프트웨어 스타트업에 투자하여 양자컴퓨팅을 준비 중이다. Goldman Sachs 는 QC Ware 와 함께 금융 분야에 사용하는 양자알고리즘을 개발하여 궁금적으로 금융 분야에 기존컴퓨터를 대체하는 알고리즘을 연구 중이다.

그러나 물리학자들은 물론 퀀텀 퀀트들도 현재 양자컴퓨터가 기술적으로 한계를 가지고 있음을 인정하고 있다. 이론적으로 수천개의 큐비트에 대한 연산이 가능한 양자컴퓨터는 기존의 고전컴퓨터보다 매우 빠르다. 그러나 그러한 양자컴퓨터는 아직 현실에 존재하지 않는다. 이러한 한계에도 불구하고, 이미 은행에서는 이론적인 기계에서 구현이 가능한 양자 알고리즘을 금융에 접목하고자 진행중이다.

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

몬테카를로 시뮬레이션은 하나의 시뮬레이션을 통해 하나의 결과만을 얻을 수 있다. 기존에는 시뮬레이션의 속도를 높이기 위해 분산 감소 기법을 적용하거나, 준난수(Pseudo Random Number)를 이용하는 등 수리적인 방법으로 속도를 개선을 하였다. 또는 병렬컴퓨터의 등장으로 동시에 여러 번의 시뮬레이션을 반복하여 시행 시간을 줄일 수 있었다. 그러나 양자금융을 이용하면, 한 번에 여러가지 상황을 동시에 시뮬레이션 할 수 있다. 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 양자컴퓨터에서 사용할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

Goldman Sachs 와 QC Ware 는 공동 보도자료를 통해 "1,000 배에서 100 배로 속도가 빠른 쉘로우 몬테카를로(Shallow Monte Carlo) 알고리즘을 만들어 냈다. 이 알고리즘은 5~10 년 뒤에 이용할 수 있을 것으로 예상되는 양자컴퓨터에서 실행할 수 있다" 고 밝혔다[5].

결론적으로 컴퓨팅 속도를 기하급수적으로 높일 수 있는 양자컴퓨팅의 역량을 금융에 이용한다면, 빠르게 급변하는 시장의 변화에 신속하게 대응하고, 더 효율적인 자원의 배분과 비즈니스를 하기 위한 패러다임을 만들 수 있다. 이렇게 국제 금융시장의 패러다임은 급변하고 있는 상황이다. 그러나 국내 금융시장에는 이러한 변화에 발 맞추기 위한 연구나 투자가 미미한 상황이다.

3.1 양자금융 관련 학술 연구

2016 년 양자컴퓨터를 만드는 D-Wave, 양자 소프트웨어를 만드는 1Qbit 및 금융업계 전문가들은 서로 양자 기술에 대한 아이디어를 공유하고 금융분야에 대한 양자 알고리즘 활용 분야를 모색하기 위한 온라인 커뮤니티 'Quantum for Quants'[6]를 설립하였다. 이 커뮤니티를 통해 금융업계 전문가들은 포트폴리오 최적화, 위험 관리와 같은 금융문제를 해결할 수 있고, 양자 소프트웨어를 활용하기 위한 전문지식을 공유하였다.

---

[5] https://qcware.com/news/press-release-april-29/

[6] Quantum for Quants 는 2021 년 11 월 30 일부로 종료 예정이다. http://www.quantumforquants.org/

양자 금융은 금융 시장을 모델링하는 데 사용할 수 있다(Schaden, 2002). 포트폴리오 최적화, 차익거래, 신용 평가를 수행하는데 양자컴퓨팅에서의 알고리즘과 양자 담금질(Quantum Annealing)을 적용할 수 있다. 또한 딥 러닝과 양자 머신러닝을 통해 금융분야에 존재하는 다양한 문제를 개선할 수 있다. 예를 들어 파생상품의 가격을 계산하거나, 금융 위험 분석과 같은 다양한 문제에 적용이 가능하다(Orus et al., 2019).

우선 양자컴퓨터는 포트폴리오를 분석하는데 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 기반한 최적화된 포트폴리오를 찾을 수 있다(Rebentrost and Lloyd, 2018).

고빈도 거래(High Frequency Trading) 및 사기(Fraud) 탐지에서 양자 컴퓨팅은 양자 이론을 기반으로 시스템과 기술을 만드는 데 집중하는 프로세스이다. 은행, 보험, 고빈도 거래와 같은 금융 부문에서 양자컴퓨터는 위험을 줄이고 개인화된 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).

양자컴퓨터는 하드웨어와 소프트웨어 두가지 관점에서 상호 작용으로 새로운 패러다임을 형성한다. 기존 금융공학이 가지고 있는 문제를 양자 영역에서 해결하기 위한 교차 학문으로 양자금융을 다루었다. 학문으로서의 양자금융은 AI, 블록체인 등과 같은 핀테크(FinTech)에서 양자컴퓨터의 활용을 가능하게 한다(Lee, 2020).

IBM의 양자 연구원인 Egger는 IBM에서 제공하는 Quantum Backend[7]를 이용하여 최적화 문제, 머신 러닝, 시뮬레이션에 대하여 알고리즘의 뛰어난 성능을 보임을 시연하였다. 양자컴퓨터는 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 양자컴퓨터를 금융에 활용하기 위한 소수의 연구들이 선행되었고, 진행되고 있다. 다음 절에서는 금융에 활용할 수 있는 가장 간단한 양자알고리즘 두 가지를 설명한다.

3.2 간단한 양자알고리즘

몬테카를로 시뮬레이션은 난수를 통해 만들어 낸 임의의 상황으로 문제를 해결하는 방법론이다. 이 방법론은 문제를 해결하는데 가장 쉬우면서도 강력한 도구로 금융에서 많이 사용된다. 이번 절에서는 몬테카를로 시뮬레이션의 핵심인 난수를 양자컴퓨터를 이용하는 알고리즘과 파생상품 평가에 적용하는 두가지 알고리즘의 아이디어를 소개한다.

3.2.1 Quantum Random Number

Stefanov et al.(2000)은 아다마드 게이트를 이용한 난수 생성 방법론을 제시하였다. 여기서 아다마드 게이트는 모든 가능한 경우의 수를 중첩 상태로

---

[7] Quantum Backend란 양자회로를 시뮬레이션 하기 위한 장치이다.
https://qiskit.org/documentation/stubs/qiskit.providers.ibmq.IBMQBackend.html

만들어 주는 역할을 한다. 1 개의 큐비트가 중첩이 되면, $|0\rangle$과 $|1\rangle$이 동시에 존재하는 상태가 된다. 2 개의 큐비트가 중첩이 되면, $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ 총 4 가지 경우의 수가 나오게 된다. 이렇게 큐비트가 n개가 된다면 총 2^n 가지의 경우의 수를 중첩 상태로 표현이 가능한 것이다.

$$\begin{aligned}&(H \otimes H \otimes \cdots \otimes H \otimes H)(|00 \cdots 00\rangle)\\&= \frac{1}{\sqrt{2^n}}(|00 \cdots 00\rangle + |10 \cdots 00\rangle + \cdots + |11 \cdots 10\rangle\\&+ +|11 \cdots 11\rangle)\end{aligned} \tag{22}$$

즉 1부터 2^n까지의 숫자가 모두 같은 확률인 $\frac{1}{2^n}$로 측정이 되는 것이다. 이 양자게이트에서 추출될 결과를 s라고 하면, $s/2^n$ 은 $[0,1]$ 범위에서 균등한 확률을 가지는 $\mathcal{U}(0,1)$ 인 표준균등분포를 가지게 된다.

3.2.2 Pricing of Derivatives

Stamatopoulos et al.(2020)는 그의 연구에서 기존 비트컴퓨터에서의 몬테카를로 시뮬레이션보다 뛰어난 성능을 보이는 양자 알고리즘을 제안하였다. 주가에 대한 로그노말(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.

$$V(0) = B(0,T)\sum_{i=0}^{n} f(S_T)\,P(S_T) \tag{23}$$

고전 몬테카를로 시뮬레이션에서는 주가 경로에 대한 옵션 손익구조를 계산하여 평균을 내는 방식으로 옵션가격을 산정한다. 그러나 양자컴퓨터에서는 주가에 대한

확률을 모델링 하는 방식이다.

이번 절에서는 금융에서 활용 가능한 기본적인 두가지 알고리즘을 소개하였다. 이 외에도 머신러닝을 위한 알고리즘, 최적화 알고리즘 등 많은 알고리즘을 금융에서 활용할 수 있다. 앞에서 언급했듯이, 이러한 알고리즘을 실제로 구현하고 실무에 활용하기 위해서는 기본적인 양자역학에 대한 이해가 필요하다. 그러나 현재 국내 학교 및 금융기관에서는 금융을 위한 양자컴퓨터 교육 프로그램이 전무하다. 따라서 다음 절에서는 교육 프로그램을 어떻게 구성하며, 이러한 교육 프로그램에 도움이 되는 문헌을 추천하고자 한다.

3.3 금융 실무자를 위한 양자컴퓨터 교육 프로그램(실러버스)

금융기관의 실무자들은 물리학에 대한 깊이 있는 지식을 갖기 어렵다. 그러나 어느 정도의 선형대수학에 대한 지식을 가지고 있다고 가정하에 양자컴퓨터 교육 프로그램을 구성할 수 있다. 양자컴퓨터 교육의 최종 목표는 실무에 양자컴퓨팅을 활용하여 문제를 해결하는 것이다. 따라서 실습 교육 또한 필수로 포함되어야 한다. 교육에 대한 실러버스는 Appendix B 와 같이 구성할 수 있다.

물리학에 대한 지식이 없는 문과생들을 가정하고, 전반기에는 양자컴퓨팅을 위한 대수학, 양자역학과 양자 알고리즘에 대한 교육, 후반기에는 실제 금융에서의 양자컴퓨팅 적용 사례 및 활용 방안과 실습으로 구성할 수 있다. 학습자료로는 양자역학이나 개발자 언어로만 표현된 도서 보다는 필요한 개념이 포함된 도서나 논문이 필요할 것이다. 현재 출간된 논문들은 대부분이 물리학 저널에서 발표가 되었고, 내용 또한 물리학에 치우쳐져 있어서 뛰어난 학습 효과를 얻기는 어렵다.

따라서 Silva(2018) 저서의 'Practical Quantum Computing for Developers' 와 Lala(2019) 저서의 'Quantum Computing: A Beginner' s Introduction' 과 같은 실무자를 위한 도서를 통해 시작하는 것이 효과적이다. Silva(2018)의 도서는 양자컴퓨팅에서 프로그래밍을 하기 위한 책이다. 책의 초반부는 양자역학이 어떻게 동작하는지 주요 개념을 설명하고 있다. 이후 양자컴퓨터가 가지는 특징인 큐비트, 얽힘, 중첩과 같은 게이트를 설명하고 파이썬과 Qikist 을 이용하여 IBM 양자 플랫폼에서 프로그램을 만드는 방법을 설명한다. Lala(2019)의 도서는 양자역학에 대한 사전 지식이 없는 사람들도 양자컴퓨터의 개념과 작동방식을 간단하게 설명하였다. 어렵지 않는 수학으로 양자컴퓨터를 풀어가는 것이 전공자가 아닌 사람들도 부담 없이 볼 수 있도록 풀어 쓴 양자컴퓨터 입문서이다.

교육 프로그램의 최종 목표는 IBM 에서 제공하는 SKD(software development kit)인 Qiksit[8] 을 통해 실제 양자회를 구현하고 실험의 경과를 측정하는 방법에 대하여 학습한다. Qiskit 은 양자 프로그램을 생성, 조작하고 IBM Quantum Experience[9]의 프로토 타입 양자장치나 로컬컴퓨터의 시뮬레이터에서 실행하기 위한 도구이다. Qiskit 의 장점으로는 양자컴퓨팅 기초를 배우는 데 예시 코드가 함께 제공된다는 것이다. 또한 이 예시 코드에서는 대학 수준의 양자 알고리즘 또는 양자 계산 과정을 모두 학습할 수 있다.

Qiskit 을 이용하여 2.2.6 절의 그림 5 와 같은 양자회로를 구성하기 하기 위한 파이썬 코드와 이 회로의 결과를 측정하는 코드는 다음과 같다.

<그림 5 의 양자회로를 구성하는 파이썬 코드>

---

[8] https://qiskit.org/

[9] https://quantum-computing.ibm.com/

```
from qiskit import *                ## Import Qiksit Library
## 2 개의 큐비트와 결과를 측정하기위한 2 개의 고전비트로 양자회로 구성
circuit = QuantumCircuit(2,2)
circuit.h(0)                        ## Qubit_0 에 h 게이트 적용
circuit.h(1)                        ## Qubit_1 에 h 게이트 적용
circuit.measure(0,0)                ## Qubit_0 을 Classic Bit_0 로 측정
circuit.measure(1,1)                ## Qubit_0 을 Classic Bit_1 로 측정
circuit.draw()                      ## circuit 그리기
```

<양자회로의 결과를 측정하는 파이썬 코드>

```
## 가상의 Simulator 설정
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')
## 양자 실험
result=execute(circuit,backend=simulator,shots=1000000).result()
## 실험의 결과를 Histogram 으로 도식화
from qiskit.visualization import plot_histogram
plot_histogram(result.get_counts(circuit))
```

위의 코드를 통해 측정된 결과는 그림 6 과 같다.

**** 그림 6 여기에 삽입 ****

2.2.6 절에서 행렬의 연산으로 2 개의 큐비트 중첩의 결과가 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$가 각각 25% 확률로 발생함을 예측할 수 있었다. 실험의 결과를 통해서 예측한 결과와 실제가 일치함을 확인할 수 있다. 이렇게 Qiskit 을 이용하면, 양자 알고리즘을 만드는 것부터 그것의 측정까지 쉽게 해결할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 교육 프로그램은 양자컴퓨터의 이해와 더불어 실제 양자회로를 구현하는 교육을 통하여 금융 문제 및 실무에서 양자컴퓨터를 활용할 수 있는 역량을 키우는 것을 목표로 한다. 이러한 관점에서 Qiskit 은 교육에서 추구하는 목표에 적합한 도구라고 할 수 있다.

3.4 국내 금융기관의 양자금융 도입에 관한 제언

인공지능, 머신러닝 등과 같은 4 차 산업 기술과 더불어 디지털 전환은 금융기관의 핵심 화두이다. 디지털 시대에 데이터의 양은 기하급수적으로 많아지고 있고, 이에 새로운 컴퓨터인 양자컴퓨터가 새로운 대안으로 부상하고 있다. 양자컴퓨터의 발전과 더불어 이미 글로벌 금융기관들은 양자연구팀을 구성하고, 학교 연구기관 및 스타트업 기업과 양자금융시대를 준비하고 있다. 그러나 국내금융기관은 아직 이러한 트랜드에 뒤쳐져 있다.

국내 금융기관에서 단독적으로 양자컴퓨터를 개발하는 것은 기술적으로나 재정적으로 매우 어렵다. 글로벌 금융기관 역시 독자적인 개발 보다는 스타트업에 투자하여 공동개발 하는 형태의 연구가 이루어지고 있다. 국내 금융기관에서는 아직 양자금융 연구 팀을 구성하는 등의 인력 구성은 현실적으로 어렵다. 그러나 국내 양자컴퓨터 스타트업 기업을 발굴하고 투자하여 연구 성과를 공유하는 형태의 준비는 가능하다. 이를 시작으로 양자금융 연구를 위한 인력 풀(Pool)을 구성하고 연구팀을 꾸리는 단계로 진행할 수 있을 것이다.

4. 결론

지금까지 양자컴퓨터는 물리학과 수학의 영역으로만 여겨져 왔다. 최근 양자컴퓨터에 관심은 물리학, 수학을 포함하여 암호학, 빅데이터, 금융의 영역에서도 연구가 진행이 시작되고 있다. 양자컴퓨팅이 금융에서 활용될 수 있는 가능성은 무궁무진하다. 그러나 아직까지 양자역학이라는 높은 진입장벽에 의해 금융분야에서의 활용은 초기단계이다. 금융에서 사용되는 데이터는 방대한 양의 데이터 처리가 필요하다. 따라서 양자컴퓨터는 이에 강점을 가질 수 있다.

자산가격 평가, 리스크 측정, 자산배분 전략, 금융시장 예측, 머신러닝을 활용한 알고리즘 트레이딩 등의 분야에서 양자컴퓨터의 활용이 가능하다.

본 논문에서는 양자컴퓨팅을 처음 접하는 사람들이 양자컴퓨팅을 쉽게 시작할 수 있도록 양자컴퓨팅을 위한 양자역학의 기본 개념을 대수학의 개념으로만 설명하였다. 또한 실무자를 위한 커리큘럼을 제시하였다. 금융관련 전공자들이 쉽게 시작할 수 있는 양자역학 알고리즘을 제시하고, 이를 실무에서 활용할 수 있는 역량을 키우는 것이 핵심이다. 양자금융은 적은 투자로도 큰 이익을 얻을 수 있는 금융시장에 적용할 경우, 큰 패러다임을 만들 수 있을 것으로 보인다.

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

Reference

10 Breakthrough Technologies 2018. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from MIT Technology Review website: https://www.technologyreview.com/magazines/10-breakthrough-technologies-2018/

2017. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from MIT Technology Review website: https://www.technologyreview.com/10-breakthrough-technologies/2017/

Detailed Program-Q2B - December 10. (n.d.). Retrieved October 23, 2021, from Q2B website: https://q2b.qcware.com/december-10/

Dirac, P. a. M. (1939). A new notation for quantum mechanics. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, *35*, 416-418.

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

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

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

Jammer, M. (1974). *Philosophy of quantum mechanics The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*. United States: John Wiley and Sons.

Jeong, Y., jyh31823@etri.re.kr, Choi, B.-S., & bschoi3@etri.re.kr. (2021, June 1). Technical Trend and Challenging Issues for Quantum Computing Control System [Type = Article].

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

Lee, R. S. T. (2020). Future Trends in Quantum Finance. In R. S. T. Lee (Ed.), *Quantum Finance: Intelligent Forecast and Trading Systems* (pp. 399-405). Singapore: Springer.

Moore, G. E. (1965). *Cramming more components onto integrated circuits*. *38*, 6.

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

Parag K. Lala, P. D. (2019). *Quantum Computing: A Beginner's Introduction*. McGraw-Hill Education.

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

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

Shor, P. W. (1994). *Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring*.

Silva, V. (2018). *Practical Quantum Computing for Developers: Programming Quantum Rigs in the Cloud using Python, Quantum Assembly Language and IBM QExperience*. Berkeley, CA: Apress.

Smith, L. (2018, December 21). H.R.6227 - 115th Congress (2017-2018): National Quantum Initiative Act [Legislation]. Retrieved October 18, 2021, from https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227

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

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

These are the top 10 emerging technologies of 2017. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from World Economic Forum website: https://www.weforum.org/agenda/2017/06/these-are-the-top-10-emerging-technologies-of-2017/

These are the top 10 emerging technologies of 2018. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from World Economic Forum website: https://www.weforum.org/agenda/2018/09/top-10-emerging-technologies-of-2018/

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

Appendix

A. 그림

그림 1. 파울리 X 게이트

|0⟩ 큐비트를 |1⟩ 로, |1⟩ 큐비트를 |0⟩ 로 바꾸어 주는 기본적인 양자게이트다.

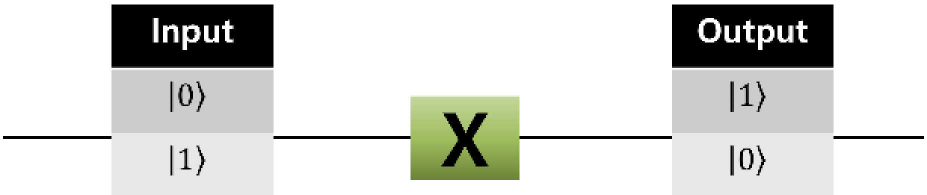


그림 2. H 게이트(아다마드 게이트)

|0⟩ 가 입력되면, |0⟩와 |1⟩가 동시에 존재하는 중첩 상태로 만들어 준다. 이 H 게이트는 중첩 상태로 만들어 주는 중요한 양자게이트다.

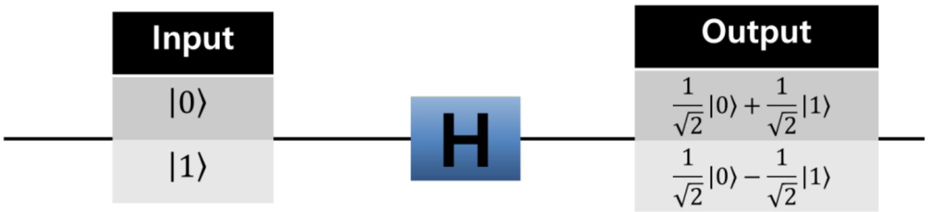


그림 3. Z 게이트

Z 게이트는 |0⟩은 영향이 없지만, |1⟩ 일 때만 확률진폭의 부호를 바꾸어 주는 역할을 한다.

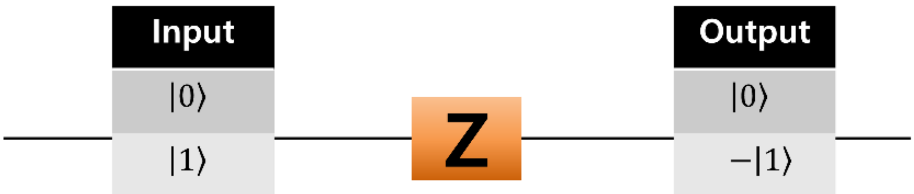


그림 4. CX 게이트(Control X Gate)

CX 게이트는 Qubit 0 이 |1⟩일 때만 Qubit 1 에 X 게이트가 적용되는 게이트이다. |00⟩과 |01⟩ 큐비트가 입력되면 변동이 없지만, |10⟩과 |11⟩이 입력되면 |11⟩과 |10⟩으로 각각 변화한다. 영향을 주는 Qubit 에 '·' 기호를 영향을 받는 Qubit 에 X 를 그려준다.

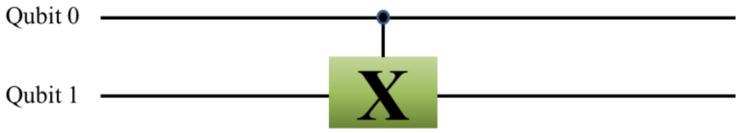


그림 5. 2 개의 큐비트의 양자연산
2 개의 큐비트에 각각 H 게이트가 적용이 되고, 2 개의 큐비트에 모두 $|0\rangle$이 입력되면, 발생 가능한 모든 경우의 수인 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$이 동시에 존재하는 중첩상태가 된다.

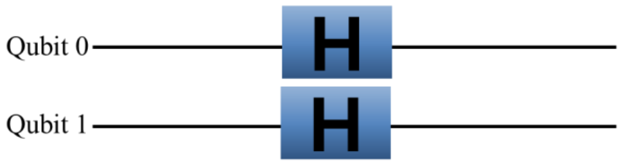
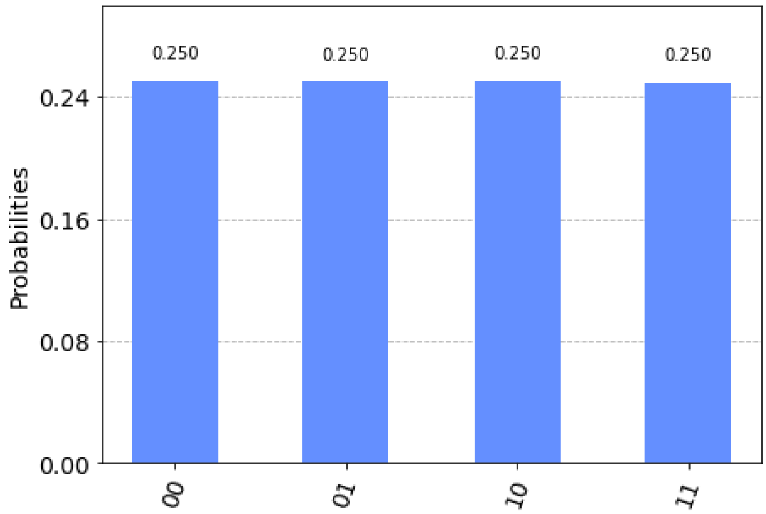


그림 6. 양자컴퓨터를 통한 실험의 결과
2 개의 큐비트에 각각 H 게이트가 적용된 결과는 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ 모두 25% 확률로 측정되는 결과가 예측된다. 실험의 결과를 통해 예측과 실제가 일치함을 확인할 수 있다.



B. 신규 교과목 개요서(제안)

<table>
<tr><td rowspan="2">교과목명</td><td>(국문) 양자컴퓨터와 금융: 양자컴퓨터를 활용한 금융 실무 기초</td><td>이수구분</td><td>학년</td><td>학기</td><td>학점-강의-실습</td></tr>
<tr><td>(영문) Basics of Quantum Computers and Finance</td><td>전공심화</td><td>3.4 학년</td><td>2</td><td>3-3-0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">관장학과</td><td>경영대학, 경제학과등</td><td colspan="2">이수단위</td><td colspan="2">6C 핵심역량</td></tr>
<tr><td>경영, 경제 등 학부(학과,전공)</td><td colspan="2">300</td><td colspan="2">4 차산업혁명관련 과목</td></tr>
<tr><td rowspan="3">수업정보</td><td>교강사수</td><td colspan="4">■단독강의 □2 명이상(팀티칭 또는 옴니버스)</td></tr>
<tr><td>운영방식</td><td colspan="4">■일반강의(설명중심) □토론식 또는 세미나식</td></tr>
<tr><td>수강규모</td><td colspan="4">일반 강좌 운영 규모 : 30-40 명 이상</td></tr>
</table>

국문개요 (상세하게 기술)	본 강의는 물리학 지식이 부족한 학생도 수강할 수 있으며, 학생들은 양자컴퓨터를 금융 문제에 이용하기 위한 기본적인 양자역학 지식과 알고리즘을 학습합니다. 본 강의에서는 IBM 에서 제공하는 Qiskit 라이브러리와 파이썬을 이용하여 간단한 금융 양자알고리즘을 학습하게 됩니다. 이를 위해 강의에서는 고전컴퓨터와 양자컴퓨터의 연산을 비교하고, 양자역학의 기본개념인 중첩, 얽힘, 측정 등을 다룹니다. 또한 금융에서 활용가능한 양자알고리즘을 학습하여, 최종적으로 학생들은 실무에서 양자컴퓨터를 활용할 수 있는 역량을 키우는 것을 목표로 합니다.
영문개요	Students who do not have knowledge of physics can take this class. They can learn basic quantum physics and quantum algorithm to use quantum computers in finance. In this lecture, students will study a simple financial quantum algorithm using IBM Qiskit library and python. To this end, the lecture covers difference of classical computer and quantum computer, and the basic concepts of quantum physics such as superposition, entanglement, and measurement. In addition, students will practice quantum algorithms that can be used in finance, and ultimately aim to develop the ability to use quantum computers in practice

* 교과목 관장학과(부, 전공)에서 작성한다.

수업목표	- 고전컴퓨터와 양자컴퓨터 비교 - 양자컴퓨터를 위한 양자역학의 기본 개념 - 금융에 활용 가능한 양자알고리즘 - 파이썬에서 Qiskit 활용 - 양자컴퓨터의 금융실무에의 활용 능력 고양

수업운영 방식	본 강의는 강의 위주로 이루어집니다. 각 수업 주제에 따른 중간/기말 시험과 양자컴퓨터 활용 과제로 평가가 이루어집니다.
평가방식	출석 (10%) 학습참여도 (10%) 중간고사 (30%) 기말고사 (30%) 과제 (20%)

[수강생 권장 도서]

구분	도 서 명	저 자	출판사
1	Practical Quantum Computing for Developers	Silva, Vladimir	
2	quantum computing: a beginner's introduction	Mark Clow Parag K. Lala	

[주차별 강의 요목 및 과제]

주차	학습 주제	과제
1	교과목 소개 및 선형대수: 학습 진행 방향, 기본적인 대수학 리뷰	
2	양자역학의 기본 개념: 양자역학이란?	
3	양자연산 I: 고전 비트 연산과 양자연산 비교	
4	양자연산 II: 양자게이트	
5	양자연산 III: 양자회로	
6	양자 알고리즘 I: 그로버 알고리즘, 번스타인-라자니리 알고리즘	
7	양자 알고리즘 II: 양자 푸리에 변환, 양자 위상	이론 과제
8	(중간고사)	
9	양자컴퓨터: 양자컴퓨터 구현 방식	
10	양자컴퓨터와 금융 I: 금융 분야에 활용 가능한 양자컴퓨터	
11	양자컴퓨터와 금융 II: 금융 분야에 활용 가능한 양자컴퓨터	
12	양자컴퓨터와 금융 III: 금융 분야에 활용 가능한 양자컴퓨터	
13	파이썬 실습 I: Qiskit Library를 활용한 양자회로 구현	
14	파이썬 실습 II: Qiskit Library를 활용한 양자회로 구현	
15	파이썬 실습 III: Qiskit Library를 활용한 양자회로 구현	코딩 과제
16	(기말고사)	

C. 양자금융 관련 글로벌 스타트업 회사

회사명	홈페이지 주소	회사 설명
D-Wave System	https://www.dwavesys.com/	캐나다의 하드웨어 기업으로 양자 컴퓨팅이 주 사업 모델이다. 최초의 프로토타입 양자 컴퓨터인 D-Wave One 을 판매한다. D-Wave One 의 프로토 타입은 16 큐 비트 양자 프로세서를 이용한다.
Rigetti Computing	https://www.rigetti.com/	Rigetti Computing 은 캘리포니아 버클리에 있는 기업이다. 양자 칩을 설계 및 제조하고, 이를 제어 아키텍처와 통합할 뿐 아니라 프로그래머가 양자 알고리즘을 구축하는 데 사용할 소프트웨어를 개발한다. 또한 Forest 라는 클라우드 플랫폼을 지원한다.
Q-CTRL	https://q-ctrl.com/	Q-CTRL 은 호주 시드니에 있는 양자 기술을 위한 소프트웨어를 개발하는 회사이다. Q-CTRL 은 시드니 대학교 양자 과학 그룹에서 분사하였다.
Chicago Quantum Exchange	https://chicagoquantum.org/	Chicago Quantum Exchange 는 양자 정보의 과학 및 엔지니어링을 발전시키고 차세대 양자 과학자 및 엔지니어를 교육한다. 양자금융을 추진하기 위해 선도적인 학술 연구원, 최고의 과학 시설 및 세계에서 가장 혁신적인 산업 파트너들과 협력하고 있다.
QuantFi	https://www.quantfi.com/	Quantifi 는 뉴욕에 본사를 둔 금융 기술(FinTech) 기업이다. 글로벌 자본 시장을 위한 위험, 분석 및 거래 소프트웨어를 제공한다.
1Qbit	https://1qbit.com/	1Qbit 는 브리티시 컬럼비아 밴쿠버에 위치한 양자 컴퓨팅 소프트웨어 회사이다. 양자 컴퓨팅 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 양자 컴퓨팅 소프트웨어 회사이다. 고전적으로 훈련된 데이터 과학자가 양자 컴퓨팅에 쉽게 액세스할 수 있도록 하고 단기 하드웨어에서 성능 속도 향상을 제공하는 것을 목표로 하고 있다.