



고등과학원 홈페이지  
www.kias.re.kr

HORIZON 홈페이지  
horizon.kias.re.kr

HORIZON 페이스북  
www.facebook.com/KIASnews

# HORIZON

2023 / 2024 — VOL.6

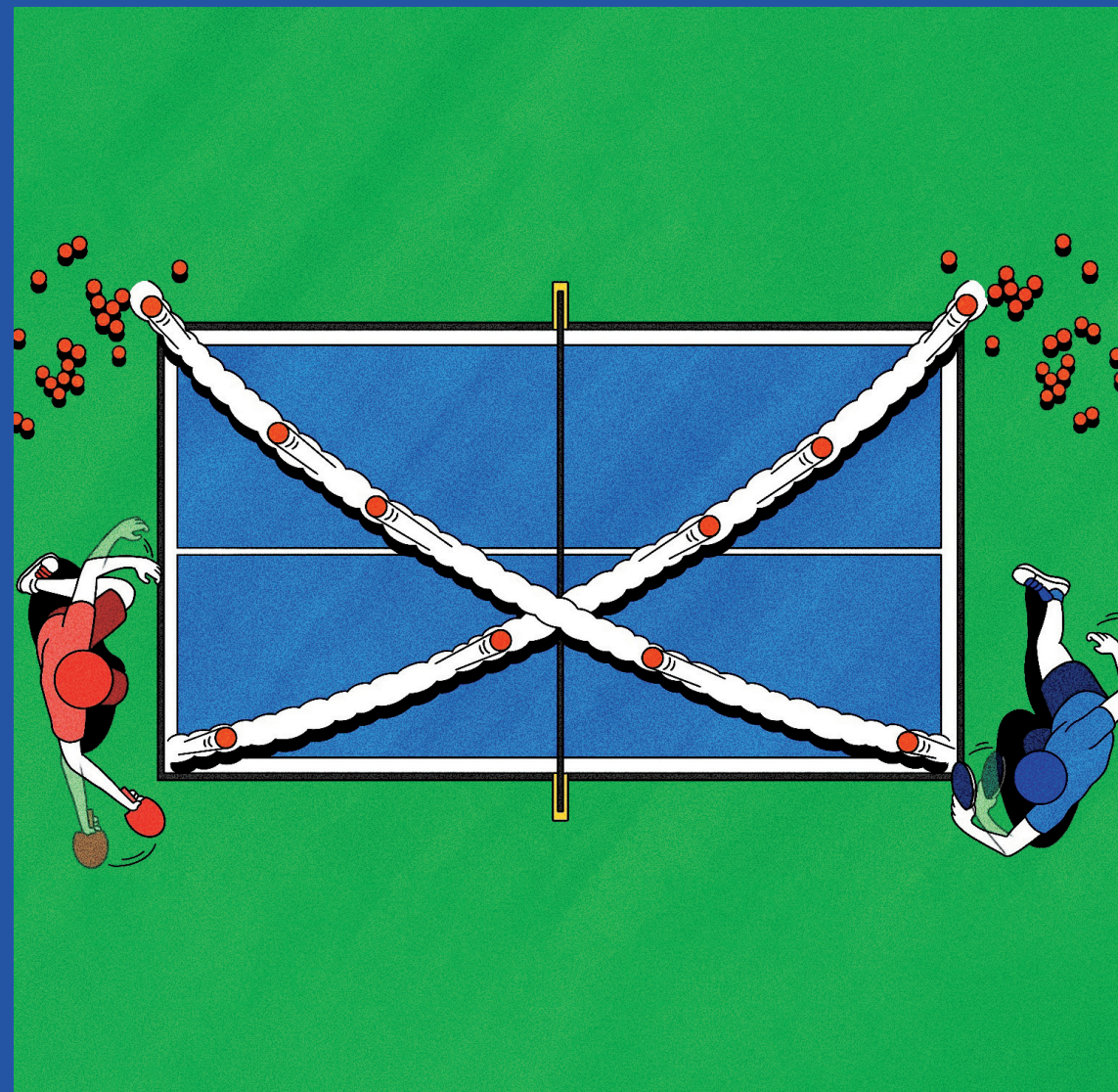
고등과학원

HORIZON

표지 일러스트: CURVESIGN

자유를 원한다면 탁구를 쳐라

2023 / 2024 — vol.6



### Mathematics

물리수학 : 수학과 물리학의  
더욱 놀라운 만남

미분방정식의  
특이점 형성에 관하여

무작위 이산 구조의  
문지방 현상

### Natural Sciences

양자 컴퓨터와  
양자 머신러닝

[현미경의 과학]  
광학 현미경 이모저모[1]

정보전달의 총아[1] :  
디스플레이 기술의 개화

### Transdisciplinary

단백질 구조 및 디자인 연구에서의  
인공지능 활용

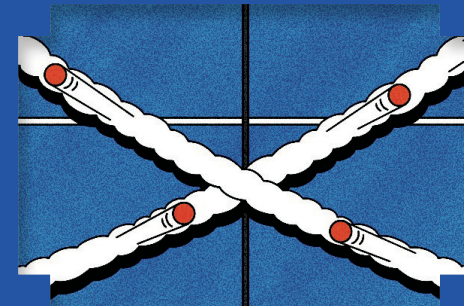
[SF와 나[3]]  
삼체와 나

장인과 탁나무가 함께 만든  
닥종이 과학기술, 기지機智

Korea Institute for Advanced Study

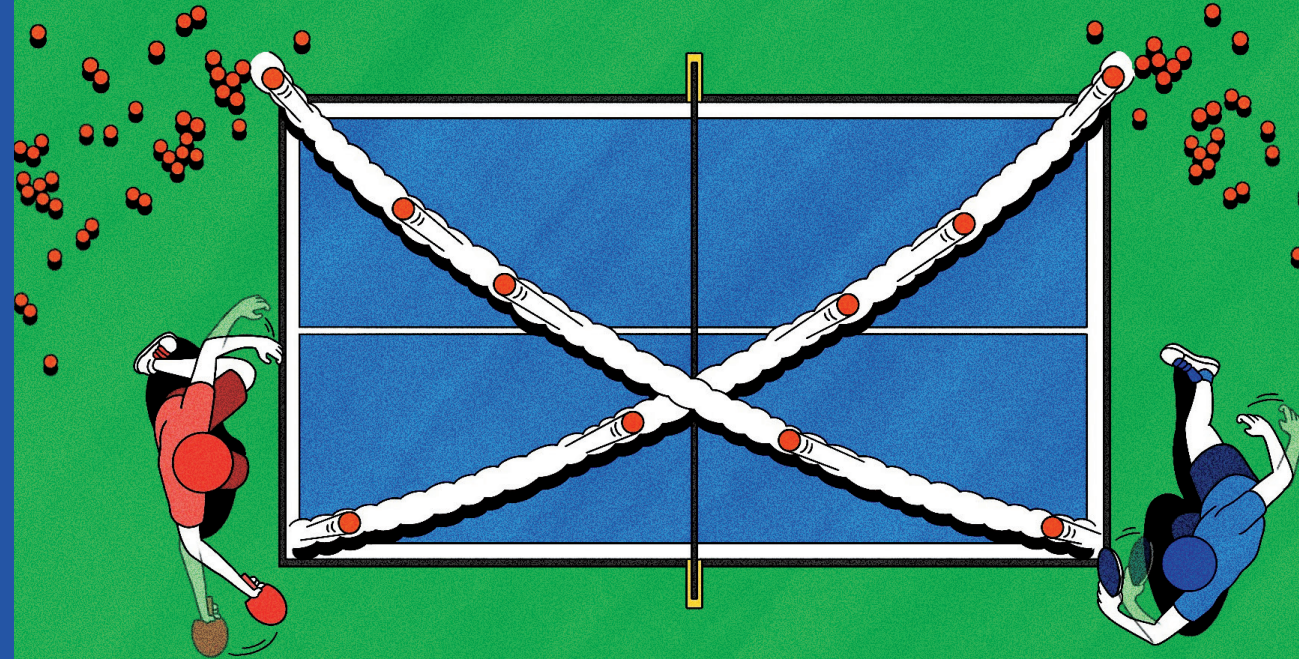


# HORIZON



HORIZON은 고등과학원이 발간하는 과학전문 웹진입니다.

자유를 원한다면 탁구를 쳐라



과학은 우리 모두가 공유해야 하는 삶의 지혜가 되었습니다.

HORIZON은 과학적 성과를 보다 심도 있게 다루되,

한 성과가 과학 전반에 주는 파급적인 의미를 살피고,

결국 인류와 자연을 보는 우리의 시각을

어떻게 변화시킬 수 있는지를 고민합니다.



< 기사 바로가기 >  
글. 백형렬

# CONTENTS

## M.

08  
Mathematics

물리수학 :  
수학과 물리학의  
더욱 놀라운 만남

18  
Mathematics

미분방정식의  
특이점 형성에 관하여

24  
Mathematics

무작위 이산 구조의  
문지방 현상

## N.

30  
Natural Sciences

양자 컴퓨터와  
양자 머신러닝

36  
Natural Sciences

[현미경의 과학]  
광학 현미경 이모저모[1]

46  
Natural Sciences

정보전달의 총아[1] :  
디스플레이 기술의 개화

## T.

54  
Transdisciplinary

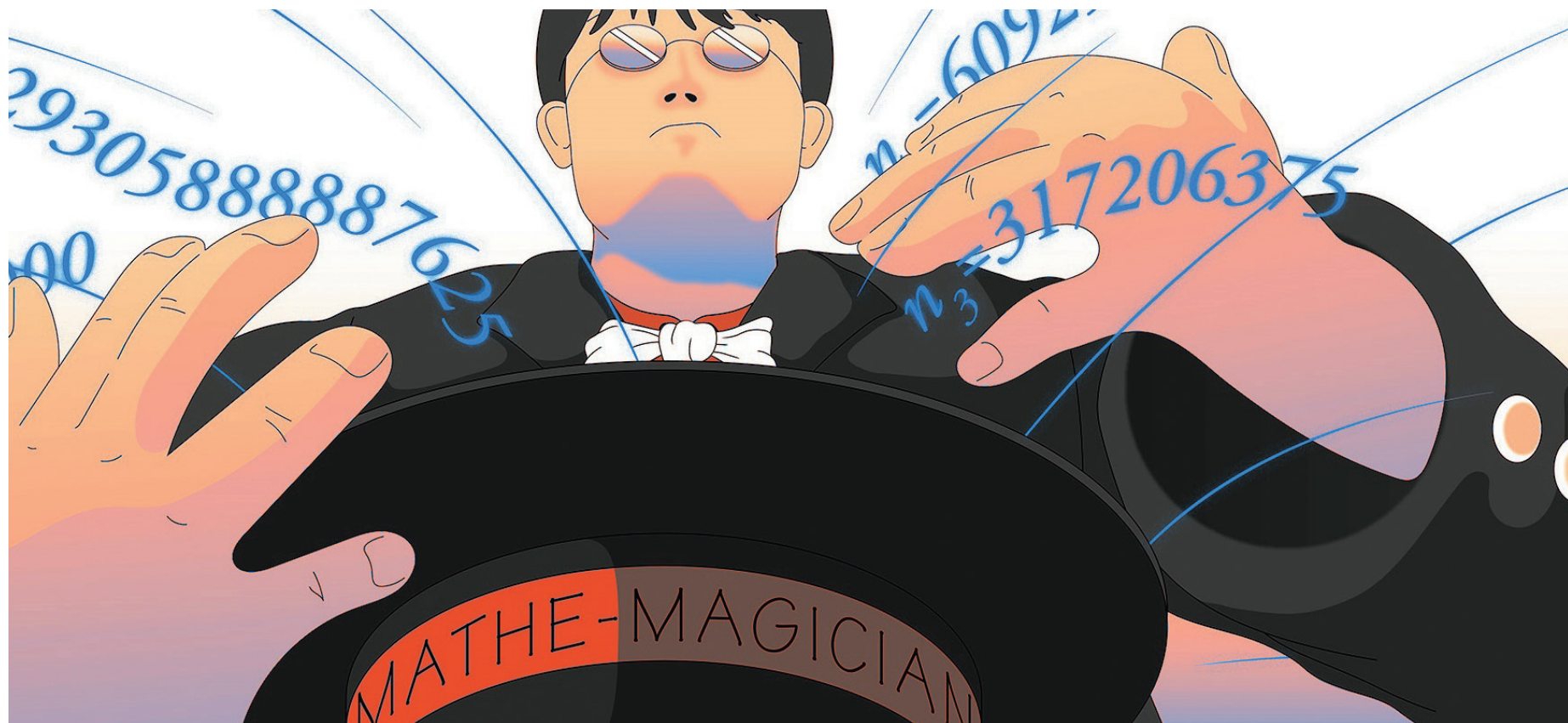
단백질 구조 및  
디자인 연구에서의  
인공지능 활용

60  
Transdisciplinary

[SF와 나[3]]  
삼체와 나

68  
Transdisciplinary

장인과 닥나무가 함께 만든  
닥종이 과학기술, 기지<sup>機智</sup>



# Mathematics

## 물리수학 : 수학과 물리학의 더욱 놀라운 만남

수학과 물리학은 오랜 세월 동안 서로 큰 영향을 미치며 발전해온 두 기초 학문입니다.  
물리수학 Physical Mathematics은 20세기 후반에 처음 등장한 학문으로, 수학과 물리학 사이에  
새로이 밝혀진 관계를 연구하는 분야를 지칭합니다.

글. 유필상(서울대학교 자연과학대학 수리과학부 조교수) 그림. 북극섬

이 글에서는 최대한 기술적인 부분은 제외하고 단순한 예를 들어 이 신생 분야의 핵심 아이디어를 전달하는 것을 목표로 하겠습니다. 지면의 한계로 모든 내용을 충분히 다루지는 못하겠지만, 각주를 통해 HORIZON의 여러 훌륭한 글을 추천하도록 하겠습니다.

### 수학 : 가장 오해받는 학문

수학과 물리학의 관계를 설명하기 위해서는 우선 수학과 물리학이 각각 어떤 학문인지부터 이야기해야 할 것 같습니다.<sup>1</sup> 먼저 수학이란 어떤 학문일까요? 독자 여러분들도 학창시절 10년 이상의 경험을 통해 각자 나름의 아이디어를 가지고 계실 것으로 생각합니다. 그러나 제가 주변의 직장인 친구들과 이야기를 나누어 본 것으로 미루어 짐작하건대, 아마 수학을 '공식을 외우고 주어진 문제를 풀기 위해 그 공식을 적용하는 법을 배우는 학문'이라고 생각하는 분들도 적지 않을 것 같습니다. 하지만 이는 수학자로서 몹시 억울한 오해이기에 이번 기회를 통해 수학에 대한 그 오해를 조금이라도 해소하고자 합니다.

1. 역사적으로 오랜 기간동안 수학과 물리학은 명확히 구분되지 않은 채 자연철학의 일부로 여겨졌습니다. 이 글에서는 편의상 현대적인 관점에서 수학과 물리학을 분리하여 설명하도록 하겠습니다.

다시 수학이 어떤 학문인지에 대한 질문으로 돌아와 보자면, 안타깝게도 수학자들 사이에서도 모두가 동의할 수 있는 정의는 없는 것 같습니다. 그래서 수학이 다른 자연과학과 사회과학의 학문 분야와 차별화된 특징 둘을 짚어봄으로써, 수학에 대한 소개를 시작하고자 합니다.

첫째로, 수학이라는 학문 자체에는 궁극적인 목표가 없습니다. 반면에, 인간의 지성을 통해 정확하게 기술할 수 있는 것이라면 그 어떠한 것이라도 관심 대상이 될 수 있다는 특징이 있습니다. 그래서 자연 환경 및 인간 사회와 관련이 없어 보이는 추상적인 대상들도 수학의 연구 주제가 됩니다. 둘째로, 수학은 정의와 공리로부터 출발하여 증명을 통해 명제의 진위를 결정하는 특징을 가지고 있습니다. 여기서 정의와 공리는 약속된 시작점이고, 증명은 연역적인 방법으로 주어진 명제를 도출해내는 과정을 뜻하기에, 한 번 증명된 명제는 절대적인 의미에서 참이라는 것을 알 수 있습니다. 이 점은 자연

과학과 사회과학의 이론이 실험, 관찰, 통계 등을 통해 귀납적으로 입증되는 것과 대비됩니다.

수학에 대한 추상적인 설명은 일단 이쯤 해두고 수학의 특징을 하나의 예를 들어 더 자세히 설명해 보겠습니다. 아마도 수학 전체에서 가장 중요하고 유명한 결과 중 하나인 피타고라스 정리는

직각삼각형 세 변의 길이가  $a, b, c$  이고 변  $c$ 가 빗변일 때,  $a^2+b^2=c^2$ 이 성립한다

는 명제입니다.<sup>2</sup> 독자들은 이미 이 정리에 익숙하여 대수롭지 않게 생각하실지도 모르겠습니다. 그러나 추상적인 대상에 대한 단 한 줄의 정리가, 언제 어디서 그려진 삼각형이라도 한 각이 직각이라면 공통적으로 만족해야 하는 진리를 전한다는 사실은 곱씹어 볼수록 놀랍고도 아름답게 다가옵니다.

2. 지면의 한계로 인해 이 문서 내에서는 주어진 명제들이 왜 참인지에 대한 설명은 생략하겠습니다. 다만 증명 또한 기계적으로 이루어지는 것과는 거리가 멀다는 점을 말씀드리고 싶습니다. 예를 들어 피타고라스 정리는 350개가 넘는 다양한 증명이 가능합니다.

이제 피타고라스 정리를 수학자의 눈으로(=호기심을 가지고) 살펴보고, 자연스럽게 떠오르는 질문 몇 개를 던져 보며 수학자들이 내놓은 답도 함께 살펴보겠습니다.

• 아주 자연스러운 질문은 ‘피타고라스 정리를 직각삼각형이 아닌 일반적인 삼각형으로 일반화할 수 있는가’입니다.

임의의 삼각형이 주어졌을 때, 세 변의 길이 사이의 관계를 구할 수 있는가?

이와 같은 질문에 정확한 답을 얻기 위해 수학자들은 ‘삼각함수’ 이론을 발전시켰으며, 주어진 질문에 대한 답은 ‘코사인 법칙’으로 주어집니다.

• 수학자들은 어떤 명제를 보았을 때 항상 ‘역은 성립하는가?’라는 질문을 합니다.

세 변의 길이가  $a, b, c$ 인 삼각형이  $a^2+b^2=c^2$ 를 만족할 때, 그 삼각형은  $c$ 를 빗변으로 가지는 직각삼각형인가?

이 질문의 답은 코사인 법칙에 의해 ‘그렇다’로 주어집니다.

• 간단한 직각삼각형의 예로서  $a=1$ 이고  $b=1$ 인 경우를 상상해 보겠습니다. 이러한 직각삼각형의 빗변  $c=c^2=2$ 를 만족해야만 합니다.

$c^2=2$ 를 만족하는  $c$ 는 무엇인가?

이러한 질문은 정수의 비율로 나타낼 수 없는 ‘무리수’라는 개념을 이끌어 냅니다. 유리수와 무리수는 합쳐서 ‘실수’를 이루고 이 개념은 후에 ‘미적분학’을 비롯한 ‘해석학’의 기초가 됩니다.

• 무리수의 길이를 가지는 변을 사용하지 않고 직각삼각형을 만들 수 있을까요?

방정식  $a^2+b^2=c^2$ 을 만족하는 자연수 세 쌍(triple)  $(a, b, c)$ 는 존재하는가? 존재한다면 얼마나 많은가?

이렇게 주어진 방정식  $a^2+b^2=c^2$ 을 만족하는 세 쌍을 ‘피타고라스 세 쌍(Pythagorean Triple)’이라고 부릅니다. 예를 들어 (3, 4, 5), (5, 12, 13) 등이 예가 됩니다. 이는 반지름이 1인 원의 유리해와 일대일 대응하며, 따라서 무한히 많이 존재합니다.

• 이를 보다 일반화 해보겠습니다.

3 이상의 자연수  $n$ 에 대해서  $a^n+b^n=c^n$ 을 만족하는 자연수 세 쌍  $(a, b, c)$ 는 존재하는가?

이에 대한 답으로 17세기 수학자 페르마는 ‘존재하지 않는다’라고 주장했고, 이 명제가 바로 ‘페르마의 마지막 정리(Fermat’s Last Theorem)’입니다. 이 명제는 이후 350여 년간 여러 수학자들을 괴롭혔으나 1994년에 와일즈(Andrew Wiles)에 의해 증명되었습니다. 현대적인 관점에서 와일즈의 증명은 현대

수학의 중요한 가설인 랭글랜드스 프로그램(Langlands Program)의 추측 일부를 증명한 것으로도 볼 수 있습니다.<sup>3</sup>

• 보다 철학적으로

(직각)삼각형이란 무엇인가?

란 질문을 할 수도 있습니다. 이 질문은 사실 피타고라스 정리가 유클리드의 평행선 공리와 동치라는 점을 알고 나면 유클리드의 평행선 공리 자체에 대한 의문으로 볼 수도 있습니다. 실제로 구면 위에서 모든 각이 직각인 삼각형을 그리고 나서 보면 각 변의 길이  $a, b, c$ 가 서로 같기 때문에 이러한 삼각형에 대해서는 피타고라스의 정리가 성립하지 않습니다.

이렇듯 유클리드의 평행선 공리를 포기하고 얻는 새로운 종류의 기하학을 ‘비유클리드 기하학’이라 부릅니다.<sup>4</sup>

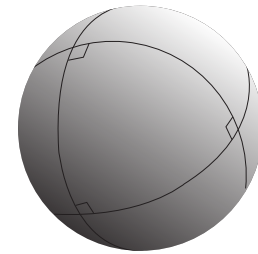


그림 1. — 모든 각이 직각으로 주어진 구면 위의 삼각형. © Wikipedia

• 피타고라스 정리는 빗변의 길이를 다른 두 변의 길이를 통해 알아내는 방법으로 생각할 수도 있습니다. 이 관점에서 다음과 같은 질문을 해 볼 수 있습니다.

일반적인 곡선의 길이는 어떻게 구할 수 있을까?

여기에 대한 답을 찾기 위해 다음 그림을 생각해 봅시다.

[그림 2]에서 곡선을 더욱 잘게 쪼개는 것을 상상해 본다면, 일반적인 곡선의 길이를 무한히 많은 선분의 길이의 합으로 얻어낼 수 있습니다. 여기서 이 선분을 직각삼각형의 빗변

으로 생각하여 피타고라스 정리를 적용한다면, 일반적인 곡선의 길이를 각 선분들의 가로세로 방향의 변위를 통해 알아낼 수 있습니다. 이 아이디어를 일반화함으로써, 비유클리드 기하학에서 다루는 거리공간까지 포함하는 개념인 다양체(Manifold)에 대한 이론체계를 이끌어 낼 수 있습니다. 이러한 대상을 연구하는 분야는 리만기하학(Riemannian Geometry)이라 불립니다.<sup>5</sup>

3. 김완수 교수님의 글 ‘2018 필즈상 수상자 페터 솔체 : 새로운 길을 걸어가는 개척자에서 페르마의 마지막 정리와 랭글랜드스 프로그램과의 관계를, 김연수 교수님의 글 ‘2018년 아벨상 수상자 로버트 랭글랜드스’에서 랭글랜드스 프로그램에 대한 보다 기술적인 소개를 보실 수 있습니다. 더욱 친절한 입문 자료로 신석우 교수님의 강연 ‘랭글랜드스 프로그램에 대하여’도 추천합니다.

4. 비유클리드 기하학의 삼각형에 대해 더 알고 싶다면, 최인혁 박사님의 만화 ‘이것은 기하학인가 아니면 위상수학인가[3] : 좋은 기하, 나쁜 기하, 이상한 기하를 참고하기 바랍니다.

5. 김영훈 교수님의 글 ‘공간의 분류와 대칭성[1] : 기하학의 역사’에서 기하학 전반에 대한 역사적인 관점을 통해 리만기하학에 대해 조금 더 배워볼 수 있습니다.

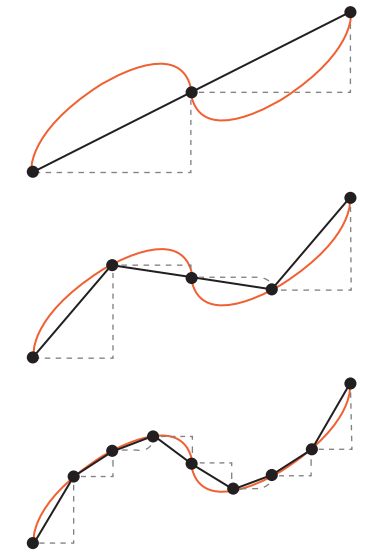


그림 2. — 일반적인 곡선의 길이를 직각삼각형의 빗변의 길이의 합으로 근사하기

다시 한 번 수학이 어떤 학문인지에 대해 정리해 보도록 하겠습니다. 이 글에서 우리는 추상적 대상에 대한 절대적 진리인 피타고라스 정리를 시작점으로 삼고, 호기심을 갖고 추상화와 일반화를 사용하여 자유롭게 질문하며, 엄밀한 방법론을 통해 정확한 답을 찾으려는 노력을 하였습니다. 이를 통해 보편적이며 절대적인 여러 새로운 진리에 다다를 수 있었습니다. 이제 이렇게 얻은 각각의 진리에 대해서도 마찬가지로 자유롭게 질문을 하고 정확한 답을 찾으려 할 수 있습니다.<sup>6</sup> 더 나아가 피타고라스 정리와 다른 시작점 또한 수백, 수천 개가 더 존재하고, 각각의 시작점으로부터 뻗어 나가 자유롭게 질문을 하고 그에 대한 답을 하는 것 역시 수학의 연구 주제가 되겠습니다. 이렇게 다르게 보이는 시작점을 가지고 출발한 수학적 진리들은 신기하게도 때때로 서로 얽히고설킨 구조를 가집니다. 이러한 수학적 진리 사이의 미처 짐작하지 못했던 연관성을 공부하는 것 또한 수학 연구의 핵심적인 부분입니다.

**물리학과 수리물리학 : 자연과학에서 수학의 말도 안 되는 효용성**

물리학이란 어떤 학문일까요? 물리학은 물질, 힘, 에너지, 운동, 시공간과 같은 개념을 연구하여 우리 우주가 작동하는 근본 원리를 이해하는 것을 주 목표로 하는 학문입니다. 그렇다면 호기심을 쫓아 추상적 대상을 탐구하는 수학과 우리 우주의 근본 원리를 이해하려는 물리학은 어떤 관계가 있을까요? 역사적으로 보았을 때 두 학문은 뗄 수 없는 밀접한 관련이 있습니다. 먼저 수학의 입장에서 볼 때, 물리학은 정수의 성질에 대한 연구분야인 정수론과 도형과 공간에 대한 연구분야인 기하학과 함께 수학적 활동의 주요 원천이었습니다. 또한, 물리학의 입장에서 우주의 근본 원리를 정량적으로 기술하는 언어로서 수학이 필수적이었습니다. 이러한 밀접한 관계를 더욱 명확히 설명하기 위해 몇 가지 물리학의 핵심 이론과 그에 해당하는 수학 분야의 예를 들어보겠습니다.

- 고전역학Classical Mechanics은 거시적인 물체에 작용하는 힘과 운동 사이의 관계를 연구하는 분야입니다. 뉴턴 Sir Isaac Newton은 (라이프니츠Gottfried Wilhelm Leibniz와 독립적으로) 미적분학Calculus을 발전시켜 고전역학의 운동 법칙과 만유인력의 법칙을 기술했습니다.<sup>7</sup>

- 전자기학Electromagnetism은 전기Electricity와 자기Magnetism가 만들어내는 현상들을 연구하는 분야입니다. 맥스웰James Clerk Maxwell은 이전에 알려져 있던 전기와 자기 이론들을 통합하여, 이러한 현상들을 전기장Electric Field과 자기장Magnetic Field이 만족시켜야 하는 단 네 개의 편미분방정식Partial Differential Equation; PDE으로 기술하였습니다.<sup>8</sup>

- 상대성 이론Theory of Relativity은 시공간의 성질에 대한 이론입니다. 아인슈타인Albert Einstein의 일반 상대성 이론은 중력의 본질을 시공간의 휘어짐으로 설명했습니다. 이러한 물리적 아이디어를 정확히 기술하기 위해, 앞서 피타고라스 정리로부터 출발해서 순전히 호기심을 통해 다다랐던 리만기하학Riemannian Geometry과 리만기하학의 변주가 반드시 필요했습니다.<sup>9</sup>

- 양자 역학Quantum Mechanics은 고전 역학이 통하지 않는 미시적인 세계의 현상을 연구하는 분야입니다. 보어Niels Bohr, 슈뢰딩거Erwin Schrödinger, 하이젠베르크Werner Heisenberg, 보른Max Born, 디랙Paul Dirac 등 물리학자들은 선형대수학Linear Algebra, 군론Group Theory, 그리고 미분방정식Differential Equation 등의 수학적 언어를 사용하여 미시세계에서 나타나는 물리적 현상의 불연속성과 확률적 특성에 대해 이해하고 이들을 정량적으로 기술하는 이론을 발전시켰습니다.<sup>10</sup>

6. 예를 들어, 거리공간에 대한 공부를 하다 보면 '거리라는 개념이 없는 공간 또한 생각할 수 있을까?' 라는 자연스러운 질문을 할 수 있습니다. 이에 대한 답을 하기 위해서 '위상수학'이라는 학문이 나오게 됩니다. 이 주제에 대해서는 백형렬 교수의 글 '거리 개념이 없는 세상에서 가깝고 멀음 정의하기'가 알기 쉽게 소개하고 있습니다.

7. 이후 고전역학의 이론 체계는 더욱 발전하여 라그랑주 역학Lagrangian Mechanics과 해밀턴 역학Hamiltonian Mechanics이라는 두 가지 서로 보완적인 관점을 갖게 되었습니다. 해밀턴 역학의 수학을 이해하기 위해서는 김준태 교수의 글 '사교 위상수학의 첫 걸음'을 참고하기 바랍니다.

8. 이는 다소 단순화된 설명으로, 맥스웰 방정식Maxwell's Equations의 의미와 의의, 그리고 보다 정확한 역사를 알기 위해서는 박민아 교수님의 글 '[과학의 결정적 순간들] 1888년 9월, 맥스웰주의자들이 승리를 선언한 날'을 참고하기 바랍니다.

9. 오성진 교수님의 글 '블랙홀 안에서는 어떤 일이 벌어질까? : 특수 상대성 이론에서 블랙홀까지'에서 상대성 이론의 물리적인 아이디어와 그에 필요한 수학적 언어를 배울 수 있습니다.

10. 박권 교수님의 흥미로운 연재글 '믿기 힘든 양자Incredible Quantum'는 양자역학의 이모저모에 대해 설명하고 있습니다. 예를 들어 '[4]'에서는 맥스웰의 방정식에 대해서, '[13]'에서는 상대성 이론에 대해 더 많은 정보를 얻을 수 있습니다.

위에서 보듯, 대부분의 경우 물리학에 필요한 수학 분야는 이미 수학 자체로서 발전되었으며, 물리학자들은 이러한 수학을 사용하여 물리학의 아이디어를 명확하게 기술할 수 있었습니다. 추상적인 대상에 대한 호기심에서 발전된 학문이 우주의 원리를 기술하는 올바른 언어로 사용된다는 사실은 매우 놀라운 일입니다. 물리학자 위그너Eugene Wigner는 이러한 사실을 강조하여

**자연과학에서 수학의 말도 안 되는 효용성**  
The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences

이라고 말하기도 했습니다.

수학과 물리학의 관계는 여기서 그치지 않았습니니다. 바로 이러한 관계가 두 분야 모두를 더욱 발전시켰던 것입니다. 물리학이 수학을 도와준 예를 먼저 들어보겠습니다. 디랙 Paul Dirac은 양자 역학에 사용하기 위해 당시까지 수학적 으로 정의되지 않았던 더 일반적인 함수를 도입했습니다. 이는 슈바르츠Laurent Schwartz가 분포Distribution의 이론을 발전시키는 계기가 되었습니다.<sup>11</sup> 분포의 이론은 이후 수학 전반에서 매우 중요하게 활용되고 있습니다. 또한, 수학이

물리학을 도와준 반대의 경우를 살펴보면, 상대성 이론의 아인슈타인 방정식Einstein Field Equations을 수학적으로 연구함으로써 블랙홀의 존재를 예측하고, 상대론적 양자 역학의 디랙 방정식Dirac Equation을 통해 반물질Antimatter의 존재도 예측할 수 있었습니다.<sup>12</sup> 이러한 예측들은 이후 실험적으로 확인되어 우리 우주를 이해하는 데 필수적인 요소가 되었습니다.

이처럼 물리학의 개념을 이해하거나 물리학의 문제를 해결하기 위해 필요한 수학적 방법론을 발전시키고, 또 수학 이론을 응용하고 적용하여 물리학의 새로운 결과를 찾는 분야를 수리물리학Mathematical Physics이라고 합니다.

이제 수리물리학의 성배에 대해 설명드리며 수리물리학에 대한 소개를 마무리하려 합니다. 양자 역학은 미시세계의 입자(=파동)를 기술하는 물리 이론입니다. 반면에 전자기학에서는 전기장과 자기장과 같은 장의 개념을 고전 역학적으로 다룹니다. 입자와 장은 서로 영향을 미치기 때문에 궁극적으로 우주를 기술하는 이론은 장의 개념 또한 양자 역학적으로 다룰 수 있어야 합니다. 이를 성공적으로 기술한 이론체계를 양자장론Quantum Field Theory이라고 하는데, 이는 현재까지 우리 우주의 작동 원리를 설명하는 데에 있어 가장 완결성이 있는 체계입니다. 그 중에서도 특히 표준 모형Standard Model은 가장 성공적인 양자장론의 예시로, 중력을 제외한 모든 힘과 모든 미시입자를 정밀하게 기술하는 데에 성공했습니다.<sup>13</sup>

11. 최인혁 박사님의 만화 '해석학하는 만화[6]: 디랙 델타...??'에서 디랙 델타에 대한 흥미로운 설명을 볼 수 있습니다.

12. 각각의 주제에 대해 오성진 교수님의 글 '블랙홀 안에서는 어떤 일이 벌어질까? : 특수 상대성 이론에서 블랙홀까지'와 박권 교수님의 글 '믿기 힘든 양자Incredible Quantum [13] : 상대성과 양자, 통합되다'를 통해 더욱 배울 수 있습니다.

13. 이현민 교수님의 글 '초중력 이론과 입자 물리학 : 2019 Fundamental Physics Prize에 부처'에서 표준모형에 대해 더 읽어볼 수 있습니다.

실제 물리량을 기술하는 데에 있어 양자장론에서 가장 중요한 양은 상관 함수 Correlation Function로 다음과 같은 형태로 표현됩니다.

$$\langle O_1, \dots, O_n \rangle = \int_{\phi \in \mathcal{F}(M)} O_1(\phi) \cdots O_n(\phi) e^{iS(\phi)} d\phi$$

각 표기법에 대한 자세한 설명은 생략하겠습니다. 만약  $\mathcal{F}(M)$ 이 실수들의 공간으로 주어진다면 이 적분은 미적분학에서 다루는 적분의 형태인  $\int_{-\infty}^{\infty} O_1(x) \cdots O_n(x) e^{iS(x)} dx$  꼴이 됩니다. 흥미로운 점은 일반적으로  $\mathcal{F}(M)$ 이 무한차원이어서 적분이 수학적으로 잘 정의되지 않는다는 것입니다. 그러나 물리학자들은 이러한 표현으로부터 유한한 값을 얻어내는 방법을 고안해냈고, 이렇게 얻은 값들은 알려진 거의 모든 실험 결과를 오차 범위 내에서 설명할 수 있습니다. 이는 수학자의 입장에서는 믿기 어려운 일입니다. 정의도 되지 않는데 유한한 값을 내놓을 수 있고, 또 그 값이 실제로 물리적인 의미를 가진다니요! 이로 인해 생기는 수리물리학의 가장 핵심적인 과제는 양자장론을 이해하기 위해 필요한 수학적 방법론을 발전시키는 것입니다.<sup>14</sup> 이를 해결하는 데 성공한다면 분명 물리학에도 새로운 결과를 내놓을 것으로 보입니다.

14. 밀레니엄 문제 Millennium Prize Problems 중 하나인 '양-밀스 이론의 존재성과 질량 간극 가설 Yang-Mills Existence and Mass Gap'은 바로 표준 모형의 특정한 측면을 엄밀히 이해하는 것과 관련이 있습니다.

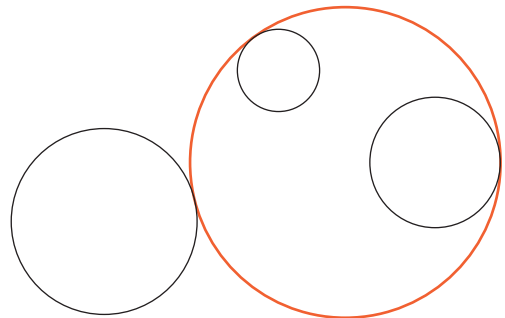


그림 3. ——— 검은색으로 그려진 세 원에 모두 접하는 빨간색 원

**물리수학 : 수학에서 물리학의 말도 안 되는 효용성**

20세기 후반에 들어서 수학과 물리학 사이의 관계에 새로운 혁명이 일어났습니다. 바로 우리 우주를 기술하기 위해 발전시킨 물리학의 이론이 그와 전혀 상관 없어 보이는 순수수학의 문제를 해결하는 데 쓰일 수 있다는 점입니다. 이러한 관찰로부터 물리수학 Physical Mathematics이라 불리는 학문이 탄생하게 되었습니다. 수리물리학의 전제와 완벽히 대조되는 점을 강조해보자면, 물리수학은

**수학에서 물리학의 말도 안 되는 효용성** The Unreasonable Effectiveness of Physics in the Mathematical Sciences

을 찾는 학문이라고 할 수도 있겠습니다. 하나의 예를 들어 더 자세히 설명해 보도록 하겠습니다. 열거 기하학 Enumerative Geometry은 주어진 조건을 만족하는 기하학적 대상의 개수를 세는 분야입니다.<sup>15</sup> 예를 들어, '평면 상에 주어진 서로 다른 두 점을 지나는 직선은 몇 개인가?' 라는 질문에 대한 답이 '1'임은 명백합니다. 더 흥미로운 질문으로 그리스 수학자 아폴로니우스 Apollonius of Perga가 기원전 200년경 제시했던 '평면 상에 주어진 세 원에 모두 접하는 원은 몇 개인가?'가 있습니다.

15. 열거 기하학에 대한 더 자세한 소개는 김영훈 교수님의 강연을 담은 글 '공간의 분류와 대칭성[2]: 기하학자의 꿈'을 참고하시기 바랍니다.

16. 이 질문에 대한 답으로 각  $d$ 마다 정의할 수 있는 가상수 Virtual Number를  $n_d$ 라고 부르겠습니다. 허용된 지면의 제한으로 가상수에 대한 이론적 설명은 생략합니다.

17. 김영훈 교수님의 글 '불멸의 힐버트[4]: 곡선의 수를 찾아라'에서 일반적인 슈베르트 계산법의 의의에 대해 배워볼 수 있습니다.

18. 이 증명은 물리학자들이 답을 내놓은 방식과는 독립적인 방법론을 통해 이루어졌습니다. 따라서 수학자의 관점에서 본다면, 1991년에 내놓았던 물리학자들의 주장은 바로  $n_d$ 가 어떤 수로 주어지는지에 대한 수학적 추측이라 볼 수 있습니다.

아폴로니우스는 이 문제에 대해 '일반적으로 주어진 세 원에 모두 접하는 원은 항상 8개 존재한다'라는 답도 함께 내놓았습니다.

이 분야에서 역사적으로 중요한 질문은 '일반적 Generic 5차 3차원 복소다양체 Quintic Threefold에 살고 있는 차수가  $d$ 인 유리 곡선 Rational Curve은 몇 개인가?'입니다.<sup>16</sup> 여기서  $d$ 는 1 이상의 정수로서,  $d$ 가 증가함에 따라 문제가 매우 어려워 집니다. 실제로  $d=1$ 인 경우에는 슈베르트 Hermann Schubert가 1886년에 슈베르트 계산법 Schubert Calculus을 통해  $n_1=2875$ 임을 발견했지만,<sup>17</sup> 그 다음 경우인  $d=2$ 는 100여년 후인 1986년에야 당대 최신의 대수기하학의 언어를 사용하여  $n_2=609250$ 임을 알아냈습니다. 이후 노르웨이의 수학자 그룹이 1991년에 컴퓨터를 사용하여  $n_3=317206375$ 를 계산했습니다.

여기서 하나의 반전이 있습니다. 바로 1991년, 물리학자 그룹이 모든  $d$ 에 대한  $n_d$ 를 한꺼번에 발표했다는 점입니다! 사실 학회에서 만난 수학자들과 물리학자들은 원래  $n_3$ 에 대해 서로 다른 답을 주장했습니다. 물리학자들이 양자장론의 아이디어를 사용했고 수학적으로 잘 정의되지 않은 방법으로 계산했다는 것을 알고 있던 수학자들은, 당연히 물리학자들이 어딘가에서 실수를 했을 것이라고 믿어 의심치 않았습니다. 그러나 노르웨이 수학자들은 불과 채 3달이 지나지 않아 그들이 사용한 컴퓨터 프로그램의 에러를 찾아냈고, 이를 수정한 결과 물리학자들과 같은 답을 찾아냈습니다. 그 결과가 바로 위에서 언급한  $n_3=317206375$ 입니다. 또한 이미 '답'을 알게 된 수학자들은 오래 지나지 않아 1996년에 물리학자들이 예견했던  $n_d$ 가 모두 옳다는 것을 증명할 수 있었습니다.<sup>18</sup>

독자 여러분들도 이 당시 열거 기하학을 연구하던 수학자들이 얼마나 큰 충격을 받았을지 상상해보기 바랍니다. 추상화와 일반화의 대가인 수학자들이, 그들의 본토인 순수수학의 주요 문제에서, 물리학자들에게 2 : ∞로(컴퓨터 탓을 한다면 3 : ∞로) 진 꼴입니다. 도대체 어떻게 이런 일이 가능했을까요? 물리학자들이 흑마법이라도 배운 것일까요? 그렇습니다. 이 흑마법의 이름은 바로 물리학의 쌍대성 Duality입니다. 물리학자들이 열거 기하학의 문제를 공략한 비법을 간단하게 요약해 보겠습니다.

**20세기 후반에 들어서 수학과 물리학 사이의 관계에 새로운 혁명이 일어났습니다. 바로 우리 우주를 기술하기 위해 발전시킨 물리학의 이론이 그와 전혀 상관 없어 보이는 순수수학의 문제를 해결하는 데 쓰일 수 있다는 점입니다.**

(A) 칼라비-야우 3차원 다양체 Calabi-Yau Threefold  $X$ 가 있을 때마다 특정한 양자장론 두 개를 건설할 수 있습니다.<sup>19</sup> 여기서  $X$ 의 예로는 앞서 살펴보았던 5차 3차원 복소다양체 Quintic Threefold를 사용할 수 있습니다. 편의상 이렇게 만들어진 양자장론을  $\mathcal{T}(X, A)$ 와  $\mathcal{T}(X, B)$ 라고 부르겠습니다.

(B) 5차 3차원 복소다양체  $X$ 에 대해  $n_d = n_d(X)$ 를 구하는 열거 기하학의 문제는 양자장론  $\mathcal{T}(X, A)$ 의 상관 함수 Correlation Function를 구하는 문제와 동일합니다.

(C) 칼라비-야우 3차원 다양체  $X$ 가 있을 때 그와 쌍대 Dual 관계를 가지는 칼라비-야우 3차원 다양체  $X^\vee$ 가 존재합니다. 이는 양자장론  $\mathcal{T}(X, A)$ 와 양자장론  $\mathcal{T}(X^\vee, B)$ 는 서로 다르게 생겼더라도, 그들의 상관 함수는 같아야만 한다는 주장입니다. 이런 상황에서  $X^\vee$ 는  $X$ 의 거울 다양체 Mirror Manifold로 불립니다.<sup>20</sup>

(D) 양자장론  $\mathcal{T}(X^\vee, B)$ 의 상관 함수는 특정한 종류의 적분으로 계산 가능합니다. 이 적분의 계산은 열거 기하학의 계산보다 비교적 쉽게 할 수 있습니다.

(E) 두 양자장론  $\mathcal{T}(X, A)$ 와  $\mathcal{T}(X^\vee, B)$ 의 상관 함수가 동일해야 하므로, 우리가 궁금했던 숫자인  $n_d = n_d(X)$ 가  $\mathcal{T}(X^\vee, B)$ 의 상관 함수로 주어진다고 추측합니다.

19. 이 과정은 불세출의 물리학자 위튼 Edward Witten이 도입한 위상적 꼬임 Topological Twist으로 주어집니다. 이러한 과정을 통해 얻어진 양자장론은 위상 양자장론 Topological Quantum Field Theory이라고 불립니다.

20. 이러한 거울 다양체의 존재성은 초끈이론 String Theory의 T-쌍대성 T-duality으로부터 이끌어 낼 수 있습니다. 물론 수학자의 관점에서는 거울 다양체의 존재성 자체가 이미 놀라운 추측입니다.

이처럼 다양체  $X$ 에 대한 정보를 이와 다른 공간  $X^Y$ 의 정보를 통해 얻어내는 이론을 거울 대칭(Mirror Symmetry) 이론이라고 합니다. 앞서 설명했듯이 이러한 물리학자들의 사고과정은 수학적으로 잘 정의되지 않았음에도 불구하고 결과적으로 무한히 많은 경우에 대해 옳은 답을 주었습니다. 당연하게도 여러 수학자들은 이렇게 순수수학의 방법론을 사용하지 않고도 수학적 진리를 얻어내는 흑마법의 비밀에 큰 관심을 가지게 되었습니다. 이처럼 1991년에 시작된 거울 대칭 이론은 그 후로 여러 순수수학의 연구 방향을 완전히 바꾸며, 그 자체로 새로운 수학 분야로 자리잡게 됩니다.

거울 대칭 이론은 물리수학 분야의 단 하나의 예에 불과합니다. 보다 일반적인 물리수학의 연구는 다음과 같은 단계를 따른다고 볼 수 있습니다.

- ① 순수수학에서 다루고 있었던 문제의 물리적인 문맥을 찾습니다. 거울 대칭 이론의 예에서는 (A), (B)에 해당합니다.
- ② 이렇게 찾은 문맥에서 존재하는 물리학의 흑마법을 사용함으로써 물리적인 결과를 얻습니다. 거울 대칭 이론의 예에서는 (C)에 해당합니다.
- ③ 물리학의 결과를 다시 수학으로 옮깁니다. 거울 대칭 이론의 예에서는 (D), (E)에 해당합니다.

앞서 보았듯이 거울 대칭 이론에서는 이를 통해 이전의 순수수학적인 방법으로는 상상도 할 수 없었던 새로운 추측을 얻었습니다.

또 다른 예인 4차원 매끈한 다양체(Smooth Manifold) 이론에서 물리수학의 역할 또한 간단히 살펴보겠습니다. 기하학과 위상수학에서  $n$ 차원 다양체가 언제 같고 다른지에 대해 답하는 분류(Classification) 문제는 가장 중요한 문제 중 하나로 여겨집니다. 1차원과 2차원 다양체의 분류는 19세기부터 알려져 있었습니다. 3차원 다양체의 분류는 페렐만(Grigori Perelman)이 서스턴(William Thurston)의 기하화 추측(Geometrization Conjecture)과 푸앵카레 추측(Poincaré Conjecture)을 해결함으로써 큰 진전을 이루었습니다.<sup>21</sup> 만약 4차원 이상이라면 문제가

훨씬 어려울 것 같지만, 놀랍게도 단일 연결(Simply Connected)인 5차원 이상의 다양체는 분류가 가능하다는 것이 알려져 있습니다.

하지만 4차원은, 3차원과 같은 기하화 추측도 존재하지 않고 5차원 이상에서 통하는 일반적 이론도 사용할 수 없어 가장 어려운 차원으로 여겨집니다. 주어진 다양체들이 다르다는 것을 증명하기 위한 가장 효과적인 방법은 불변량(Invariant)을 건설하고 계산하는 것인데, 4차원 매끈한 다양체는 그조차 몹시 어려웠습니다. 이러한 상황에서 도널드슨(Simon Donaldson)은 고전 역학적인 게이지 이론(Gauge Theory)의 아이디어를 사용해서 도널드슨 불변량(Donaldson Invariant)을 도입했고, 이는 4차원 매끈한 다양체 이론의 시작을 알렸습니다. 하지만 도널드슨 불변량의 계산은 굉장히 어려웠으므로 이를 이용해 분야의 큰 진전을 이루는 것 또한 어려웠습니다. 이때 물리학자 위튼은 다음과 같은 물리수학의 아이디어를 통해 훨씬 효과적인 불변량을 도입했습니다.

- ① 4차원 매끈한 다양체의 도널드슨 불변량의 물리적 문맥을 4차원 비가환(Non-abelian) 위상 양자장론에서 찾습니다.
- ② 4차원 초대칭 양자장론(Supersymmetric Quantum Field Theory)의 사이버그-위튼 이론(Seiberg-Witten Theory)이라는 흑마법은, 비가환 양자장론이 그보다 훨씬 단순한 가환(Abelian) 양자장론과 같다는 결론을 줍니다.<sup>22</sup>
- ③ 가환 위상 양자장론의 상관 함수를 계산함으로써, 도널드슨 불변량과 같은 양의 정보를 가지면서도 훨씬 다루기 간단한 사이버그-위튼 불변량(Seiberg-Witten Invariant)을 건설합니다.<sup>23</sup>

이렇게 새로 도입된 불변량은 역시나 이전의 수학으로는 상상도 할 수 없었던 대상이며, 수학자들은 이를 이용해 4차원 매끈한 다양체 이론에서 수많은 혁명적인 결과를 얻을 수 있었습니다.

최근에는 랭글랜드 프로그램(Langlands Program)의 대수기하학적 형태인 기하학적 랭글랜드 프로그램(Geometric Langlands

Program)에서도 물리수학의 아이디어를 통해 새로운 추측을 내놓고, 새로운 대상을 건설하고, 새로운 구조를 발견하며, 또 새로운 정리를 증명할 수 있었습니다.

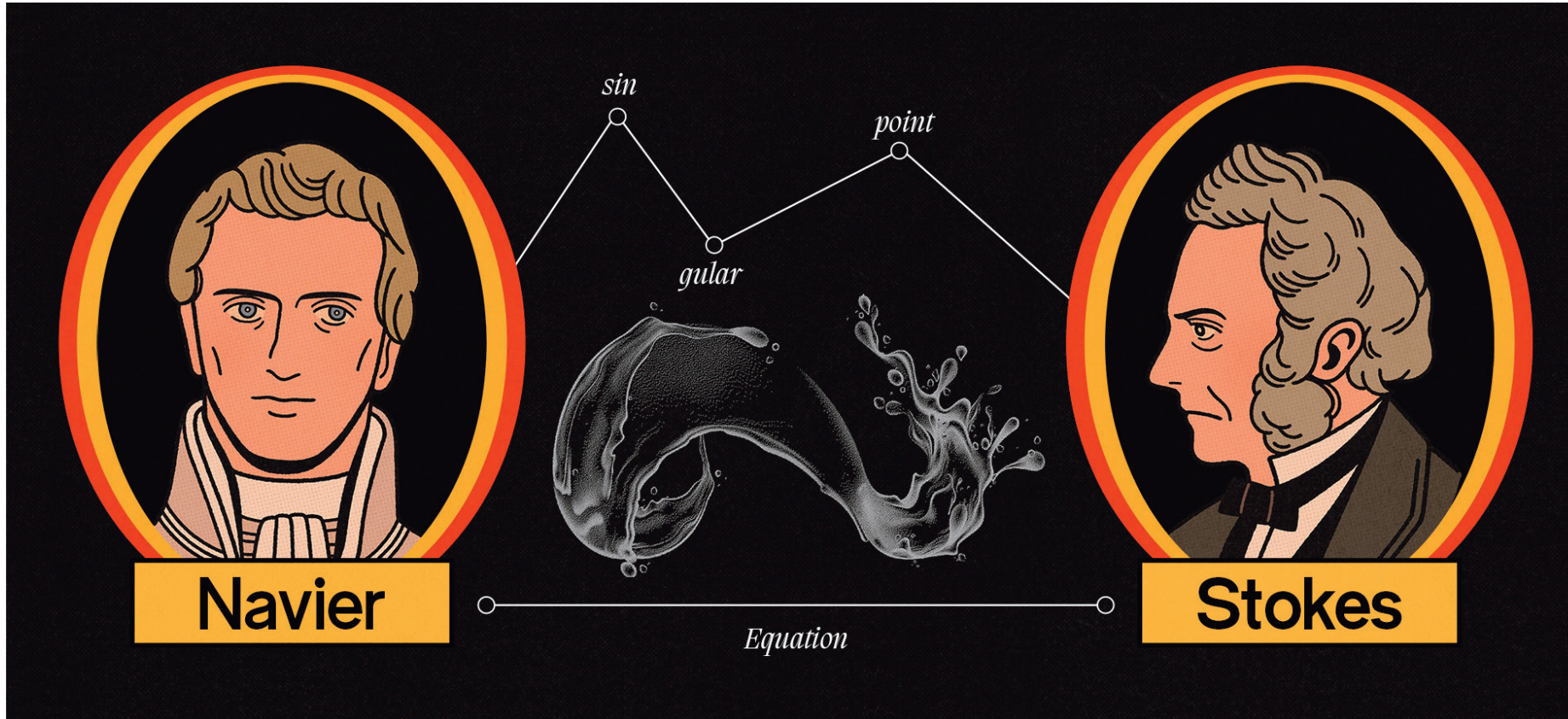
- 21. 최인혁 박사님의 만화 '이것은 기하학인가 아니면 위상수학인가[8]: 몇 개로 어찌 꼬갤 것인가[9]에서 기하화 추측에 대해 더 배워볼 수 있습니다. 시간이 허락한다면 이 시리즈의 모든 만화를 보기를 추천합니다.
- 22. 물리학자들이 말하는 사이버그-위튼 이론은 4차원 초대칭 양자장론에서 재규격화(Renormalization)를 통해 나오는 유효 작용(Effective Action)을 기술하는 이론으로, 물리적으로 굉장히 중요하고 강력한 결과입니다.
- 23. 수학자들이 말하는 사이버그-위튼 이론은 사이버그-위튼 불변량에 대한 이론입니다. 사이버그-위튼 불변량은 물리학자들이 말하는 사이버그-위튼 이론의 극히 일부를 사용해서 만든 불변량이지만, 수학적으로는 굉장히 강력한 도구로 사용됩니다.

**결론**

수학과 물리학은 그 목적과 방법론면에서 몹시 다른 두 기초 학문입니다. 수학은 호기심을 바탕으로 추상적인 대상에 대해 질문하고 그에 대한 정확한 답을 추구하는 학문이며, 물리학은 우주의 근본 원리를 이해하려는 학문입니다. 놀랍게도 물리학을 기술하는 언어로서 수학은 말도 안 되는 효용성을 보였습니다. 이러한 관계는 수학과 물리학 각각의 발전에도 큰 도움이 되었습니다.

20세기 후반에는 더욱 놀랍게도 물리학의 아이디어를 통해 순수수학의 여러 분야에 혁신적인 결과를 낼 수 있다는 사실이 드러났습니다. 이렇게 새로이 밝혀진 수학과 물리학 사이의 관계를 탐구하는 분야가 바로 물리수학입니다. 물리수학은 다양한 수학 분야에 새로운 시각과 맥락을 제공하며 순수수학의 연구 방향을 더욱 풍부하게 만들었습니다. 앞으로도 물리수학의 영향력은 계속 확장될 것으로 기대됩니다. <sup>24</sup>

**앞서 설명했듯이 이러한 물리학자들의 사고과정은 수학적으로 잘 정의되지 않았음에도 불구하고 결과적으로 무한히 많은 경우에 대해 옳은 답을 주었습니다. 당연하게도 여러 수학자는 이렇게 순수수학의 방법론을 사용하지 않고도 수학적 진리를 얻어내는 흑마법의 비밀에 큰 관심을 가지게 되었습니다.**



# Mathematics

## 미분방정식의 특이점 형성에 관하여

클레이 수학연구소가 제시한 7개의 난제 중에서도

비압축성 나비에-스톡스 방정식의 정착성과 특이점 형성에 대한 문제는 상대적으로 널리 알려져 있는 것 같습니다.

나비에-스톡스 방정식은 대기의 흐름을 기술하는 근본적인 방정식이며, 이 방정식의 특이점 형성 여부는 순수수학적으로도 매우 도전적일 뿐 아니라 기상 현상의 예측 가능성과도 관련되어 중요한 문제입니다.

글: 정인지(서울대학교 자연과학대학 수리과학부 조교수) 그림: 전유니

유체의 속도, 압력, 밀도와 같은 함수들의 시간 미분과 공간 미분이 만족하는 관계식입니다.

특이점이란 개념은 미분방정식 분야로 한정하여도 다양한 의미를 갖기 때문에 모든 상황을 포괄하는 정의를 내리기는 어려운 일이지만, 논의를 구체화하기 위하여 하나의 시도를 해보겠습니다. 대략적으로 '시간에 따라서 어떤 미분방정식을 만족하며 변화하는 물리량이 있을 때, 어떤 특정한 시간에 갑자기 모종의 이유로 더 이상 고전적인 방법으로 그 물리량이 어떻게 변해 나갈지 결정할 수 없는 상황'을 특이점이라고 이야기할 수 있을 것 같습니다. 어떤 특정한 물리 현상을 설명하는 미분방정식에서 특이점이 형성된다고 했을 때, 그 특이점을 우리가 어떻게 해석해야 하는지는 상당히 미묘한 문제입니다. 앞서 제시한 특이점의 정의에 함축되어 있는 것은, 이 개념이 수학적으로는 특정 {방정식에 종속}된다는 것입니다. 즉, 특이점이 발생하는 이유는 단순히 그 미분방정식이 현실을 지나치게 단순화하여 주요한 효과를 담지 못했을 가능성과 함께, 미분방정식 자체는 함당하지만 수학적으로 우리가 그것을 올바르게 푸는 방법을 모르는 가능성이 함께 존재합니다. 다시 말해서 특이점의 존재는 물리 모델링 단계에서 해결해야 하는 과제일 수 있고, 방정식의 풀이에 대한 이론을 개선해야 하는 과제일 수 있습니다.

최근에 이르러 컴퓨터 연산 능력의 비약적인 상승과 함께 편미분 방정식 이론의 발전으로 나비에-스톡스 방정식의 특이점 형성의 증명에 이르는 로드맵이 여러 연구자에 의하여 제시되고 있고, 이러한 내용은 쿼타 매거진에 의해서도 몇 차례 소개된 바 있습니다[1, 2]. 이 글에서는 미분방정식에서 특이점의 의미와 함께, 어떻게 컴퓨터를 이용한 계산이 특이점 형성의 증명, 특히 이 나비에-스톡스 방정식에 관한 7대 난제의 해결에 기여할 수 있는지에 관하여 이야기해 보려고 합니다.

### 특이점의 개념

특이점을 설명하기에 앞서, 미분방정식이란 어떤 함수(종속 변수)의 다양한 미분값들이 만족하는 방정식을 의미합니다. 보다 구체적으로, 나비에-스톡스 방정식을 비롯한 물이나 대기(통틀어 유체라고 함)의 흐름을 기술하는 방정식은 그

유체방정식의 경우로 한정하여도, 여러 가지 흥미로운 상황에서 특이점이 형성된다는 것이 잘 알려져 있고, 각각의 경우에 특이점을 올바르게 해석하는 것은 흥미로운 문제가 됩니다. 예를 들어, 해안가에서 파도가 일렁이는 모습을 보면, 파도가 점점 높아지다가 어느 시점에 부서져 내리는 상황을 관찰할 수 있습니다. 그런데, 이러한 파도의 움직임은 기술하는 많은 편미분 방정식에서, 파도의 경계면은 매끈한 함수로 기술된다고 가정하고 있기 때문에, '파도가 부서지기 직전의 순간'에 특이점이 형성된다고 볼 수 있습니다. 또 다른 예로는 항성의 중력 붕괴, 쇼크웨이브의 형성 등을 들 수 있습니다.

다양한 특이점의 사례는 우리에게 많은 호기심을 불러일으킬 뿐 아니라, 특이점 형성의 문제는 미분방정식을 이용한 미래의 예측이라는 관점에서 특히 더 흥미롭고 중요합니다. 가장 좋은 예는 날씨의 예측이고, 나비에-스톡스 방정식이

갖는 큰 의의가 바로 이 방정식이 (극단적으로 단순한 상황에서) 대기의 흐름을 잘 기술한다고 믿어지는 데 있습니다. 고전적으로는, (1) 날씨의 흐름을 관장하는 미분방정식을 정확하게 알고 있고, (2) 현재의 대기 상태를 한없이 작은 오차 범위 내로 측정할 수 있으면, 우리가 미래의 날씨를 알 수 있게 됩니다. 물론 각각이 매우 비현실적인 조건이지만, 이 조건들이 성립된다고 할지라도 사실 하나의 커다란 조건이 추가적으로 필요한데, 그것이 바로 '날씨의 흐름을 기술하는 그 미분방정식(예를 들어 나비에-스톡스 방정식)이 유한한 시간 내에 특이점을 형성하지 않는다'는 것입니다. 다시 말해서, 특이점이 어떤 시간에 형성된다면, 그 이후 날씨의 예측은 근본적으로 불가능한 문제일 수 있습니다. 결정론적인 입장(미래가 현재 상태에 의하여 결정되어야 한다는 믿음)에서는 특이점의 존재 자체가 앞선 (1)의 가정에 모순처럼 보이지만, 결정론적 논의와 무관하게 순수하게 수학적 관점에서 충분히 (1)과 특이점의 존재가 양립할 수 있습니다. 실제로, 기상학자였던 로렌츠는 이미 1969년 논문에서 날씨의 예측은 불안정성으로 인한 어려움을 넘어서, 특이점 형성으로 인하여 근본적으로 불가능한 일이라고 주장하고 있습니다[3].

**자기닮음꼴의 안정적인 특이점 형성**

이제 특이점 형성 과정의 자세한 설명을 위하여 극단적으로 단순화된 예시를 들어 보려고 합니다. 우리가 거리가 1만큼 떨어진 벽에 일정한 속도 1로 화살을 수직하게 쏘는 상황에서, 화살과 벽까지의 거리를 시간  $t$ 에 대한 함수  $D(t)$ 라고 정의한다면, 이 함수가 만족하는 미분방정식은

$$\frac{d}{dt}D(t) = -1, D(t=0) = 1 \quad (2.1)$$

이 됩니다. 이 미분방정식의 해는  $t$ 가 0과 1 사이에 있는 경우  $D(t)=1-t$ 가 되는데,  $t=1$ 인 순간 화살이 벽에 충돌하면서  $t>1$ 인 경우에는 방정식 (2.1)이 의미를 갖지 않게 됩니다.<sup>1</sup>

1. 이 이유는 단순히 미분방정식을 우리가 적는 과정에서, 벽과 화살이 양의 거리를 유지하고 있다는 가정이 들어가기 때문입니다.



그림 1. — 나비에-스톡스 방정식을 만든 조지 스톡스와 클로드 루이 나비에. ©Wikipedia

그러므로  $t=1$ 인 순간에 방정식 (2.1)의 특이점이 형성된다고 볼 수 있는데, 이제 이 상황을 조금 일반화시켜 벽과 평행한 좌표계를  $x$ 라고 나타낼 때, 각 위치  $x$ 마다 공수가 어떤 거리  $D(0, x)$ 로부터 속도 1의 화살을 동시에 벽으로 수직하게 쏘는 상황을 생각해볼 수 있습니다. 놀랍게도 이 간단한 일반화에서, 특이점 형성 (이 경우에는 벽과 화살의 충돌)의 자기닮음성과 안정성을 확인할 수 있습니다. 이를 쉽게 드러내는 것은 새로운 변수  $F(t, x)=1/D(t, x)$ 인데, 여기에서  $D(t, x)$ 는 위치  $x$ 상에서 시간  $t$ 에 벽과 화살과의 거리를 나타냅니다. 그러면  $F(t, x)$ 가 만족하는 미분방정식은

$$\frac{d}{dt}F(t, x) = F^2(t, x), F(0, x) = \frac{1}{D(0, x)} \quad (2.2)$$

이 됩니다. 이제 논의를 간단히 만들기 위하여  $x=0$ 인 점에서 최소값 1을 갖는 적당한 함수  $D(0, x)=(1+2x^2-x^3)\exp(x^2)$ 을 택하여 (2.2)의 해의 그래프가 어떻게 변하는지 조사해 봅시다. 해의 공식

$$F(t, x) = \frac{1}{D(0, x)-t} \quad (2.3)$$

을 이용하여  $t=0, 0.5, 0.8, 0.95, 0.99$  일 때 해의 그래프를 그려보면 [그림 2]와 같습니다. 시간이 1이 되는 순간 점  $x=0$ 에서 화살이 벽에 충돌하므로, 거리의 역수로 정의된  $F(t, x)$ 는  $x=0$ 에서  $t$ 가 1에 다가갈수록 무한대로 발산하게 됩니다.

그런데,  $t=1$ 에 접근하면서 발산하는 이 그래프들은 사실 특별한 보편성(universality)을 가지고 있습니다. 이를 확인하기 위하여, 우선 각 시간  $t$ 에 대해

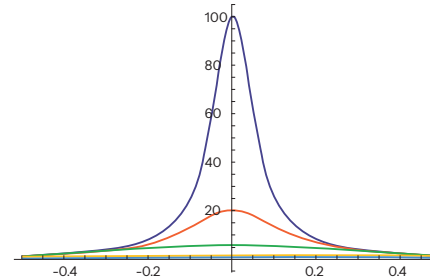


그림 2. — F의 시간에 따른 변화

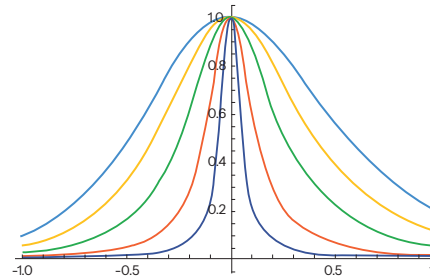


그림 3. — G의 시간에 따른 변화

함수의 최대값을 1로 변환시키는 조작

$$G(t, x) = \frac{F(t, x)}{F(t, 0)}$$

을 가해주고, 같은 시간들에 대해  $G$ 의 그래프를 그려보면 이제 [그림 3]을 얻습니다. 이 경우,  $t=1$ 에 접근할수록 함수의 그래프는 한없이 뾰족해짐을 알 수 있습니다. 이것을 '올바르게' 펼쳐주기 위하여,  $x$  축을 시간에 맞게 늘려서 함수의 그래프가 항상 최대값에서 2계 도함수 값을  $-1$ 로 갖도록 할 수 있습니다. 공식으로는, 단순히

$$H(t, x) = G \left( t, (-\partial_{xx}G)(t, 0) \right)^{-\frac{1}{2}} x$$

입니다. 마지막으로, 같은 시간들에 대해  $H(t, x)$ 의 그래프를 그려 보면 [그림 4]를 얻는데, 여기에서 나타나는 충격적인 사실은,  $t=1$ 에 접근할수록 함수들의 그래프가 정확하게  $1/(1+0.5x^2)$ 라는 특별한 함수로 수렴한다는 것입니다.<sup>2</sup>

2. [그림 4]에는 프로파일의 그래프  $1/(1+0.5x^2)$ 가 함께 그려져 있는데,  $t=0.99$ 의 그래프와 거의 겹쳐져서 구분하기 힘든 상황입니다.

마지막 [그림 4]가 방정식 (2.2)의 특이점이 안정적인 자기닮음꼴이라는 것을 생생하게 보여줍니다. 여기에서, 자기닮음이라는 것은 기하학에서 도형의 닮음과 같은 개념으로, 시간이 특이점에 다가갈수록 함수의 그래프들이 서로 닮아 있다는 것을 의미합니다. 이것을 확인하게 위해서 우리는 그래프의 함수축 ( $F \rightarrow G$ 로의 변형)과  $x$  축 ( $G$ 에서  $H$ 로의 변형)을 시간에 따라 적절하게 변형시켜 주어야 했습니다. 앞으로 이 과정을 편이상 규격화라고 부르겠습니다. 이제, 특이점 형성이 안정적이라는 의미는, 우리가 규격화를 통해서 특이점이 형성되는 순간에 보게 되는 함수(이 경우에는  $1/(1+0.5x^2)$ )가, 초기에 어떤 함수로 시작했는지와 무관하게 같다는 것입니다. 앞으로 이 특별한 함수를 프로파일이라고 하겠습니다. 방정식 (2.2)의 경우에는 해의 공식 (2.3)에 테일러 전개를 이용하여 특이점의 자기닮음성과 안정성을 간단하게 증명할 수 있습니다. 다만, 보다 복잡한 미분방정에 대해서는 일반화가 대부분의 경우 알려져 있지 않기 때문에, 특이점 형성이 일어난다고 할 때 우선 프로파일을 찾는 것부터 시작해서 안정성을 증명하는 것은 어렵고 흥미로운 문제가 됩니다.

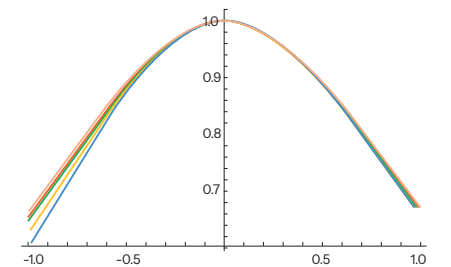


그림 4. — H의 시간에 따른 변화

여기에서 자기닮음성과 안정성의 다른 예시로 확률론에서 나오는 중심 극한 정리<sup>CLT</sup>를 생각할 수 있습니다. 간단히 말해, CLT는 서로 독립이고 같은 분포를 갖는 확률 변수  $X_1, X_2, \dots$  들이 기대값  $\mu$ 와 분산  $\sigma$ 를 가지고 있을 때,  $n$ 개의 합  $X_1 + \dots + X_n$ 을 적절하게 변형해 주면 평균 0, 분산 1인 정규분포  $N$ 로 수렴하게 된다는 것입니다.<sup>3</sup>:

$$\frac{\sqrt{n}}{\sigma} \left( \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} - \mu \right) \rightarrow N, \quad n \rightarrow \infty. \quad (2.4)$$

여기에서 식 (2.4)의 좌변을 보시면 합  $X_1 + \dots + X_n$ 에 세 가지의 변형을 가해야 정규분포가 나오는 것을 알 수 있는데, (i)  $n$ 으로 나누기, (ii)  $\mu$ 를 빼기, (iii) 마지막으로  $\sqrt{n}/\sigma$ 를 곱해 주기입니다. 이 세 가지 조작은 사실 위의 특이점 형성 상황에서 (i) 함수의 최대값을 1로 맞추기, (ii) 특이점이  $x=0$ 에 형성되게 하기(이 조작은 위 예시에서는 최대값이  $x=0$ 에서 유지되므로 할 필요 없었음), (iii) 마지막으로 2계 미분의 값을 1로 맞추기에 해당합니다. 실제로, 편미분 방정식 이론에서 개발된 특이점의 안정성 증명과 정확하게 같은 테크닉으로 CLT를 증명하는 것이 가능합니다[4].

**컴퓨터를 활용한 특이점 형성의 증명**

비압축성 나비에-스톡스 방정식이 특이점 형성을 일으킨다는 것을 증명함으로써 7대 난제를 해결하기 위해서는, 유체의 속도가 어떤 특정한 시간에 무한대로 발산한다는 것을 보여야만 합니다. 이러한 종류의 명제를 증명하는 것은 컴퓨터가 도와줄 수 없는 것처럼 보이지만, 최소한 방정식의 특이점 형성이 안정적인 경우에는 그렇지 않으며, 간단하게 그 이유를 설명해 드리려고 합니다.

우선 우리가 어떤 미분방정식이 갖는 특이점 형성의 프로파일(모종의 이유로) 알고 있는 경우를 생각할 수 있는데<sup>4</sup>, 그러면 이 프로파일의 안정성이란, 그에 대한 섭동<sup>5</sup>이 규격화를 거친 후 시간에 따라 프로파일로 다시 수렴해 간다는 뜻입니다. 그런데, 섭동의 시간에 따른 움직임은 선형화된 방정식으로 묘사할 수 있고, 선형화된 방정식은 중첩원리로 인하여 그 이해가 일반적인 비선형 방정식보다 훨씬 수월하게 됩니다. 보통은 ‘충분히 작은’ 섭동이 프로파일로 수렴해 나간다는 것만 확인하면 되는데, 섭동의 방정식에 대한

매우 세밀한 연구를 통하여 안정성의 정량화를 할 수 있습니다. 즉, 비선형 방정식에서 프로파일로 규격화 후 수렴해 나가는 것이 보장되는 구체적인 섭동의 ‘크기’를 계산해낼 수 있다는 것입니다. 이 단계에서 섭동의 크기를 구체적으로 어떻게 잴 것이냐에 관하여 많은 아이디어가 필요하게 됩니다. 그리고 이 안정성의 정량화 단계에서도 컴퓨터가 크게 기여할 수 있는데, 이것은 구체적으로 어떤 숫자를 제시하는 종류의 문제이기 때문이고, 보다 근본적으로 이 정량화는 프로파일을 정확하게 알지 못하는 상황에서 핵심적인 역할을 하게 됩니다.


비압축성 나비에-스톡스 방정식을 비롯한 여러 편미분 방정식에서 우리는 특이점의 프로파일에 대한 어떠한 정보도 갖고 있지 않으며,<sup>6</sup> 바로 이 부분이 이 난제에 컴퓨터가 가장 크게 기여하고 있는 부분인데, 컴퓨터의 탐색을 통하여 **근사적인 프로파일**을 찾아낼 수 있다는 것입니다.<sup>7</sup> 여기에서 중요한 포인트는 프로파일을 근사적으로만 찾으면 된다는 것인데, Hou의 그룹이 실행 중인 전략은 다음과 같습니다.<sup>8</sup>

3. 여기에서는 ‘시간’을  $n$ 으로 이해하고, 특이점 형성이 무한한 시간이 흐른 후 일어나는 것으로 생각할 수 있습니다.
4. 방정식의 공간 변수가 1차원이거나, 적절한 대칭성을 이용하여 1차원 문제로 환원할 수 있는 경우, 상미분 방정식의 풀이를 통하여 프로파일을 구할 수 있는 경우가 있으며, 대표적인 예시는 비점성 버거스 방정식입니다.
5. 여기에서 섭동(perturbation)이란, 프로파일의 모양을 임의로 약간 흔든 함수들을 통칭합니다.
6. 물론 단순히 특이점이 존재하지 않거나, 존재하더라도 어떤 프로파일을 갖고 있지 않을 가능성이 있습니다.
7. 위의 예시에서는 프로파일이 아주 간단한 함수이고, CLT의 경우에도 가우시안이라는 아름다운 함수로 주어지는데, 특이점의 프로파일은 아주 간단한 방정식(예를 들어 Burgers 방정식)의 경우에도 그 형태가 상당히 복잡하며, 많은 경우 방정식의 특이점 형성이 이미 증명된 경우에도 프로파일의 존재가 알려지지 않은 상황입니다.

8. Chen과 Hou의 최근 연구에서 이러한 전략으로 비압축성, 비점성 유체 방정식을 비롯한 여러 유체 모델에 대해서 특이점 형성이 엄밀하게 증명되었습니다[5, 6].
9. 이것은 마치 아주 커다란 자연수를 소인수분해하는 것은 극도로 어려운 문제지만, 우리에게 많은 소수가 주어져 있을 때 그것을 전부 곱하는 것은 매우 쉬운 문제라는 것과 유사한 상황입니다.

적당한 초기 조건으로부터 슈퍼컴퓨터를 이용하여 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 수치적으로 풀어 나가고, 공간상에서 특이점이 형성되는 것처럼 보이는 점 근처에서 적절한 규격화를 시시각각 해 나가면서 만약 함수가 어딘가로 수렴하는 것처럼 보이면, 컴퓨터에게 적당한 근사함수(예를 들면 고차 다항식)를 달라고 요구합니다. 여기에서 중요한 포인트는, 우리에게 어떤 구체적인 함수가 주어지면, 그 함수가 나비에-스톡스 방정식을 얼마만큼의 오차를 가지고 푸는지 매우 쉽게 계산할 수 있다는 것입니다.<sup>9</sup> 이제, 이 근사함수 근처에서 나비에-스톡스 방정식의 선형화를 연구할 수 있는데, 근사함수가 구체적으로 주어져 있으므로, 선형화된 방정식도 매우 구체적이고, 이 방정식의 안정성을 정량화할 수 있습니다. (물론, 이 방정식이 안정적이지 않다면, 이 전략을 수정하여야만 합니다.) 많이 과장해서 말하면, 이제 이 7대 난제가 단순히 두 개의 숫자(이 근사함수가 가지는 오차와 정량화된 안정성의 척도)의 크기를 비교하는 문제로 환원됩니다. 여기서 명백하게 드러나는 것이, 안정성의 정량화가

프로파일을 근사적으로만 찾아도 된다는 것을 의미하고, 즉, 컴퓨터가 크게 기여할 수 있는 길을 열어주었다는 것입니다. 이 훌륭한 전략에서 첫 번째 커다란 난관은 바로 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 수치적으로 푸는 것이 극도로 많은 시간과 자원을 필요로 한다는 것인데, 이와 관련하여 최근에 주목을 받고 있는 논문 [7]에서는, 시간에 따른 방정식의 수치 풀이를 하지 않고, 뉴럴 네트워크를 이용하여 단순히 근사적인 프로파일만 잡아내는 전략을 도입하여 효율적으로 이 단계를 해결할 수 있다고 이야기하고 있습니다.

이 글을 마무리하며 간단하게 나비에-스톡스 방정식 문제의 풀이가 갖는 의의에 대해 이야기하려고 합니다. 만약에 특이점 형성이 특정한 프로파일을 가지고 자기닮음 형태로 나타난다는 것이 증명된다면, 그로부터 특이점의 관측 가능성, 특이점 이후의 동역학과 예측 가능성의 문제, 현상론적으로 정립된 난류 이론과의 관계 등 물리학적으로도 매우 중요한 여러 문제의 연구를 본격적으로 시작할 수 있게 됩니다. 다시 말해서, 비압축성 나비에-스톡스 방정식의 특이점 형성 문제는 이 분야의 어떤 종착지라기보다는, 반대로 비로소 근본적으로 중요한 문제들에 접근할 수 있는 입구라고 보는 것이 맞습니다. 마지막으로, 우리가 나비에-스톡스 문제의 해결에 이르지 못한다고 할지라도, 이 과정에서 탄생한 새로운 아이디어와 기술이 이미 우리가 미분방정식을 이해하는 새로운 길을 활짝 열어 놓았다는 사실은 명백합니다. 

**참고문헌**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Computer Proof ‘Blows Up’ Centuries-Old Fluid Equations, Quanta Magazine, November 2022.</li> <li>2. Deep Learning Poised to ‘Blow Up’ Famed Fluid Equations, Quanta Magazine, April 2022.</li> <li>3. E. Lorenz, The predictability of a ow which possesses many scales of motion, Tellus (1969), 21: 289-307.</li> <li>4. L. Koralov and Y. Sinai, Theory of Probability and Random Processes, 2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.</li> <li>5. J. Chen and T. Hou, Stable nearly self-similar blowup of the 2D Boussinesq and 3D Euler equations with smooth data I: Analysis, arXiv:2210.07191.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. J. Chen and T. Hou, Stable nearly self-similar blowup of the 2D Boussinesq and 3D Euler equations with smooth data II: Rigorous Numerics, arXiv:2305.05660.</li> <li>7. Y. Wang, C.-Y. Lai, J. Gómez-Serrano, and T. Buckmaster, Asymptotic Self-Similar BlowUp Prole for Three-Dimensional Axisymmetric Euler Equations Using Neural Networks, Phys. Rev. Lett. 130 (2023).</li> </ol>
--	---

## 무작위 이산 구조의 문지방 현상

이 글에서는 최근에 증명된 기댓값 문지방 정리(Expectation Threshold Theorem)에 대해 간략히 소개하고자 합니다.

확률론적 조합론 분야에서 칸-칼라이 추측(the Kahn-Kalai Conjecture)으로 잘 알려져 있던 이 정리는 무작위 이산 구조에서 '문지방(threshold)'과 '기댓값 문지방(expectation threshold)' 사이에 긴밀한 관계가 있음을 보여줍니다.

글. 박진영(Courant Institute of Mathematical Sciences, New York U, 수학과 조교수) 그림. 이혜리



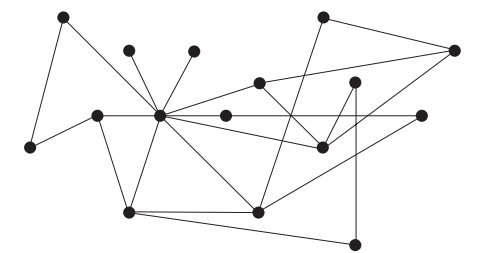
본문의 첫 번째 절에서는 우선 무작위 이산 구조의 한 예인 무작위 그래프를 소개할 것입니다. 이어지는 두 번째 절에서는 무작위 이산 구조의 문지방 현상을 무작위 그래프 위에서 간단한 예로 설명할 것입니다. 마지막 절에서는 기댓값 문지방 정리 또한 예를 통해 설명하도록 하겠습니다.

기댓값 문지방 정리의 정확한 서술은 짧은 글에 실기에는 다소 무리가 있어 이 글에서는 쉬운 예로 간략한 의미 정도를 전달하도록 노력하였습니다. 보다 깊이 있는 (그러나 전문적인 논문보다는 쉽게 쓰여진) 내용이 궁금하신 독자들은 [Par23](영문)을 참고하실 수 있습니다.

### 제1절. 무작위 이산 구조의 예: 무작위 그래프

기댓값 문지방 정리의 주된 내용은 무작위 이산 구조의 문지방 현상이 일어나는 지점에 대한 예측입니다. 이 절에서는 우선 무작위 이산 구조의 뜻에 대해 설명하고자 합니다. 무작위 이산 구조 자체는 일반적이고 추상적인 수학적 대상이라 이 글에서는 독자의 이해를 돕기 위해 보다 구체적인 예르되시-레니 무작위 그래프(Erdős-Rényi random graph)를 예로 들어 설명하겠습니다.

이 글에서 그래프란 꼭짓점과 모서리로 이루어진 구조를 뜻합니다. 아래 그림에 그래프의 예가 있습니다.



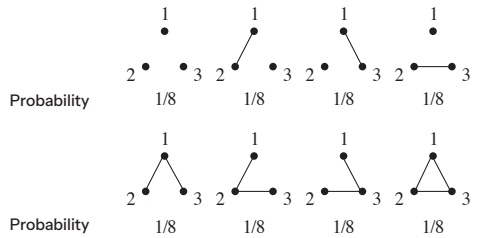
예르되시-레니 무작위 그래프  $G_{n,p}$ 는 두 개의 변수  $n$ 과  $p$ 에 의해 결정되는, 그래프로 이루어진 확률공간입니다. 여기서  $n$ 은 꼭짓점의 개수를 뜻하고,  $p$ 는 각 모서리가 존재할 확률을 뜻합니다. 평면에 1부터  $n$ 까지로 이름이 붙여진  $n$ 개의 점이 있다고 가정하겠습니다. (각 점에 이름이 붙어 있다는 것은 각 점을 서로 구별되는 개체로 여긴다는 뜻입니다.)

이  $n$ 개의 점 중 2개의 점을 골라 연결할 때마다 모서리가 하나씩 생기므로  $n$ 개의 점 위에서는 총  $\binom{n}{2}$ 개의 (이름이 붙은) 잠재적인 모서리를 생각할 수 있습니다.  $G_{n,p}$ 에서  $\binom{n}{2}$ 개의 각 모서리는 확률  $p$ 로 존재하며, 각 모서리의 존재 유무는 다른 모서리의 존재 유무와 독립적으로 결정됩니다. 아래에 작은 예를 들어보겠습니다.<sup>1</sup>

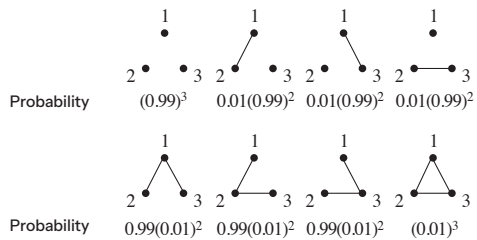
<sup>1</sup> 이해를 돕기 위해  $n$ 의 값이 작은 경우를 예로 들었으나, 실제 연구에서는  $n$ 이 아주 큰 경우를 고려합니다. 보다 정확히는,  $n$ 은 무한대로 발산하는 (그러나 유한인) 변수이고  $p = p(n)$ 는 많은 경우에  $n$ 에 대한 함수(예를 들어,  $p(n) = \frac{1}{n}$  또는  $p(n) = \frac{\log n}{n}$  등)으로 주어집니다.

예 1.1.

(1)  $n=3, p=1/2$ 일 때  $G_{n,p}$ 의 꼭짓점은 3개( $\{1,2,3\}$ )이고 잠재적인 모서리 또한 3개( $\{12,13,23\}$ )입니다. 각 모서리는 확률  $1/2$ 로 서로 독립적으로 존재하므로,  $G_{3, 1/2}$ 의 확률분포는 다음과 같습니다.



(2) 같은  $n$ 에 대해서도  $p$ 의 값을 다르게 할 경우  $G_{n,p}$ 의 확률 분포는 물론 달라집니다. 예를 들어,  $p=0.01$ 과 같이  $p$ 의 값이 작은 경우, 밀도가 낮은 그래프가 나타날 확률이 더 높습니다. 실제로  $G_{3,0.01}$ 의 확률 분포는 다음과 같습니다.



위의 예에서 볼 수 있듯이, 무작위 그래프란 하나의 고정된 그래프가 아니라 확률 분포로 주어집니다. 이때 표본 공간은  $n$ 개의 꼭짓점을 가지는 서로 다른  $\binom{n}{2}$ 개의 라벨 그래프 labelled graph : 꼭짓점마다 서로 다른 이름이 붙여진 그래프로 이루어지고, 각 그래프의 확률은  $p$ 의 값에 따라 결정됩니다.

무작위 그래프는 확률 변수이므로, 무작위 그래프의 연구에는 자연스럽게 확률론의 도구들이 사용됩니다. 다음은 가장 기초적인 계산의 예입니다.

예 1.2.

(1)  $G_{n,p}$ 에 모서리가 존재하지 않을 (즉,  $n$ 개의 모든 꼭짓점이 고립점일) 확률은  $(1-p)^{\binom{n}{2}}$ 입니다. 이렇게 모서리가 하나도 없는 그래프를 이 글에서는 빈 그래프 empty graph 라고 부릅니다.

(2)  $G_{n,p}$ 가  $\binom{n}{2}$ 개의 모서리를 가질 (즉, 모든 잠재적인 모서리가 존재할) 확률은  $p^{\binom{n}{2}}$ 입니다. 이렇게 모든 가능한 모서리가 존재하는 그래프를 완전 그래프 complete graph 라고 부릅니다.

(3)  $G_{n,p}$ 의 모서리의 개수의 기댓값을 구해봅시다. ( $G_{n,p}$ 가 확률변수이므로  $G_{n,p}$ 의 모서리의 개수도 역시 확률 변수입니다.)  $X$ 를  $G_{n,p}$ 의 모서리의 개수를 나타내는 확률변수라고 하겠습니다.  $n$ 개의 꼭짓점 위에 잠재적인 모서리의 개수는  $\binom{n}{2}$ 개이고, 각각의 모서리가  $G_{n,p}$ 에서 존재할 확률은  $p$ 이므로,  $X$ 의 기댓값은

$$\mathbb{E}X = \binom{n}{2}p$$

입니다. 예를 들어  $p=1/2$ 인 경우,  $G_{n,p}$ 는 평균적으로  $\binom{n}{2} \cdot \frac{1}{2} \approx \frac{n^2}{4}$  개의 삼각형을 가집니다.

(4) 세 꼭짓점 위에서 정의된 완전 그래프를 삼각형이라고 부르겠습니다.  $G_{n,p}$ 안에 존재하는 삼각형의 개수  $Y$ 의 기댓값을 위의 예와 유사한 방법으로 구해보겠습니다.  $n$ 개의 꼭짓점 위에 잠재적인 삼각형의 개수는  $\binom{n}{3}$ 개이고, 각각의 삼각형이  $G_{n,p}$ 에서 존재할 확률은  $p^3$ 이므로,

$$\mathbb{E}Y = \binom{n}{3}p^3$$

입니다. 예를 들어  $p=1/2$ 인 경우,  $G_{n,p}$ 는 평균적으로  $\binom{n}{3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 \approx \frac{n^3}{48}$  개의 삼각형을 가집니다.

제2절. 무작위 그래프의 문지방 현상

앞서  $G_{n,p}$ 는 고정된 그래프가 아닌 그래프의 공간 위에서 정의된 확률 변수임을 설명하였습니다. 무작위 그래프 이론에서 주로 관심을 가지는 주제는  $n$ 과  $p$ 가 주어졌을 때  $G_{n,p}$ 의 '전형적인' 구조입니다. 예를 들자면, (주어진  $n$ 과  $p$ 에 대해)  $G_{n,p}$ 가 99퍼센트 이상의 확률로 만족하는 성질들에는 무엇이 있을까 하는 것입니다.

이 문제를 거꾸로 보면, 우리가 관심 있는 그래프 성질(연결성, 평면성 등)이 주어져 있을 때, 그 성질을  $G_{n,p}$ 가 높은 확률로 만족/불만족하는  $p$ 의 값을 구하는 문제로 생각할 수 있습니다. 간략하게 연결성을 예로 들어보겠습니다. 직관적으로 생각했을 때,  $p$ 의 값이 아주 작으면  $G_{n,p}$ 의 모서리의 개수는 (높은 확률로) 아주 적을 것이고, 따라서  $G_{n,p}$ 가 연결 그래프일 확률은 0에 가까울 것입니다. 반면에  $p$ 의 값이 커질수록  $G_{n,p}$ 의 모서리의 개수는 (높은 확률로) 많아질 것이고, 특히  $p$ 가 1에 아주 가까우면  $G_{n,p}$ 는 완전 그래프에 가까우므로  $G_{n,p}$ 가 연결 그래프일 확률은 1에 가까울 것입니다. 그렇다면  $G_{n,p}$ 의 연결/비연결 여부를 결정짓는  $p$ 의 값을 찾을 수 있을까요? 이 문제는 무작위 그래프 이론에서 최초로 다루어진 문제들 중 하나로, Erdős와 Rényi에 의해 다음 결과가 증명되었습니다. (아래 정리에서, 두 함수  $f(n), g(n)$ 에 대해  $f \ll g$ 란  $n$ 이 무한대로 발산함에 따라  $f/g$ 가 0으로 수렴함을 뜻합니다.)

정리 2.1.

(Erdős-Rényi [ER60]).  $n$ 이 무한대로 발산함에 따라 다음의 정리가 성립한다.

$$\mathbb{P}(G_{n,p} \text{가 연결 그래프}) \rightarrow \begin{cases} 0, & p \ll \log n \text{ 일 때} \\ 1, & p \gg \log n \text{ 일 때.} \end{cases}$$

즉,  $G_{n,p}$ 의 연결성은  $p = \log n/n$ 을 전후로 급격한 변화를 보입니다. 이는 무작위 그래프가 보이는 문지방 현상 threshold phenomena의 한 예시이며, 특히  $p = \log n/n$ 을 연결성의 문지방 threshold이라고 합니다.

그래프의 연결성은 독자들에게 문지방 현상을 설명하기 위해 제시한 하나의 예일 뿐임을 알려드립니다. 무작위 그래프 (혹은 더 일반적으로, 무작위 이산 구조)는 훨씬 더 일반적으로 모든 '단조 성질 monotone property'들에 대해 문지방 현상을 보임이 Bollobás와 Thomason의 결과 [BT87]에 의해 잘 알려져 있습니다. 여기서 단조 성질이란 모서리를 추가하는 것에 대해 불변인 성질을 말합니다. 그래프의 연결성, 비평면성, 삼각형의 존재성 등이 이에 속합니다. 보다 형식적인 언어를 이용한 문지방 함수의 정의는 다음과 같습니다.

정리 2.2.

주어진 단조 성질  $\mathcal{F}$ 에 대해 문지방 함수  $p_0(\mathcal{F})$ 란 다음을 만족하는  $n$ 에 관한 함수이다.

$$\mathbb{P}(G_{n,p} \text{가 } \mathcal{F} \text{를 만족}) \rightarrow \begin{cases} 0, & p \ll p_0(\mathcal{F}) \\ 1, & p \gg p_0(\mathcal{F}) \end{cases}$$

일반적으로 주어진 단조 성질의 문지방을 구하는 문제는 매우 매우 어렵습니다. 예를 들어, 해밀턴 회로의 존재성의 문지방을 구하는 문제는 1960년대 무작위 그래프 이론 분야의 가장 큰 미해결 난제 중 하나였으며, 이는 1976년에서야 Pósa [Pos76]에 의해 해결되었습니다. 해밀턴 회로는 생성 그래프 spanning graph의 가장 쉬운 예 중 하나이며, 일반적으로 주어진 생성 나무 spanning tree의 문지방을 구하는 문제는 놀랍게도 아직도 미해결로 남아 있습니다.

**이 문제를 거꾸로 보면, 우리가 관심 있는 그래프 성질(연결성, 평면성 등)이 주어져 있을 때, 그 성질을  $G_{n,p}$ 가 높은 확률로 만족/불만족하는  $p$ 의 값을 구하는 문제로 생각할 수 있습니다.**

제3절. 기댓값 문지방 정리

앞 절의 말미에 언급하였듯이, 일반적으로 주어진 단조 성질의 문지방을 구하는 문제는 매우 어렵습니다. 또한 많은 문지방이 알려져 있는 성질들의 경우, 성질마다 그 성질 고유의 접근법을 취하고 있습니다. 다시 말해, 많은 경우 한 특정한 단조 성질의 문지방을 구하는 데에 사용된 방법을 다른 종류의 단조 성질의 문지방을 구하는 데에 적용할 수 없습니다. 기댓값 문지방 정리(칸-칼라이 추측)이 위력적인 이유는 문지방을 구함에 있어서 단조 성질 전체를 아우를 수 있는 통합적인 방법을 제시하기 때문입니다. 간단히 말하자면, 기댓값 문지방 정리는 임의의 단조 성질의 문지방이 사실은 훨씬 쉽게(?) 근사가 가능한 기댓값 문지방(expectation threshold)으로부터 멀지 않음을 보여줍니다.<sup>2</sup>

- 2. 사실은, 차원이 큰 단조 성질의 기댓값 문지방의 정확한 값은 현실적으로 계산 불가능합니다. 기댓값 문지방의 상계(upper bound)를 구하는 방법이 Talagrand[Tal10]에 의해 알려져 있으며, 많은 단조 성질에 대해 Talagrand의 방법을 이용하여 기댓값 문지방의 근삿값을 구해낼 수 있습니다. 하지만 Talagrand의 방법을 적용하기 어려운 단조 성질도 많으며, 이런 성질들의 기댓값 문지방을 최적으로 근사해내는 문제가 현재 많은 학자의 관심을 받고 있습니다.

기댓값 문지방 정리의 서술을 위해서는 기댓값 문지방의 엄밀한 정의가 필요하지만, 이는 이 글에서 다루기는 어려울 것 같습니다. 대신 아래의 예를 통해 간략하게 기댓값 문지방의 느낌만 전달해보도록 하겠습니다.

단조 성질의 한 쉬운 예로, 그래프가 삼각형을 포함하는 것을 생각해보겠습니다. Erdős와 Rényi는 무작위 그래프 안에 삼각형의 존재 유무의 문지방이  $p=1/n$ 임을 증명하였습니다. 즉, 아래의 정리가 성립합니다.

정리 3.1.

(Erdős-Rényi [ER60]).  $n$ 이 무한대로 발산함에 따라 다음의 정리가 성립한다.

$$\mathbb{P}(G_{n,p} \text{가 삼각형을 포함}) \rightarrow \begin{cases} 0, & p \ll 1/n \text{일 때} \\ 1, & p \gg 1/n \text{일 때.} \end{cases}$$

그런데 사실  $p=1/n$ 이라고 하는 값은 우리가 예 1.2 (4)에서 계산한 삼각형의 개수의 기댓값과 밀접한 관련이 있습니다. 예 1.2 (4)에서  $G_{n,p}$  안에 존재하는 삼각형의 개수  $Y$ 의 기댓값이  $\mathbb{E}Y = \binom{n}{3} p^3$ 임을 보였습니다. 따라서  $p=1/n$ 을 전후로  $Y$ 의 기댓값이 크게 변화합니다. 즉,

$$\mathbb{E}Y \rightarrow \begin{cases} 0, & p \ll 1/n \\ \infty, & p \gg 1/n. \end{cases}$$

이 예의 경우, 이  $p=1/n$ 이 {삼각형을 포함}이라는 단조 성질의 기댓값 문지방이 됩니다. 즉, 기댓값 문지방이란 쉽게 말해 기댓값의 문지방 현상이 일어나는 지점입니다.<sup>3</sup>

따라서 {삼각형을 포함}이라는 성질의 경우, 어려운 증명 과정이 필요한 문지방이 사실은 쉽게 계산 가능한 기댓값 문지방(놀랍게도) 일치함을 알 수 있습니다.

사실은, 위의 기댓값 계산이 {삼각형을 포함}의 문지방의 하계를 주는 것은 쉽게 보일 수 있습니다. 왜냐하면,  $p \ll 1/n$ 인 경우  $G_{n,p}$  내의 삼각형의 개수의 기댓값이 0으로 수렴하고, 이는

$$\mathbb{P}(G_{n,p} \text{가 삼각형을 포함}) \rightarrow 0$$

라는 결론을 주기 때문입니다. 즉, 문지방의 정의에 의해 {삼각형을 포함}의 문지방은 최소한  $1/n$ 보다는 커야 합니다. (유사한 논리로, 임의의 단조 성질에 대해 기댓값 문지방이 항상 문지방의 하계가 됨을 보일 수 있습니다.)

정리 3.1에서 어려운 증명이 필요한 부분은 문지방의 상계, 즉,  $p \gg 1/n$ 일 때

$$\mathbb{P}(G_{n,p} \text{가 삼각형을 포함}) \rightarrow 1$$

을 보이는 부분이며, 일반적으로도 많은 단조 성질의 문지방을 구하는 데 있어서 정말 어려운 부분은 문지방의 상계를 보이는 일입니다.

위의 삼각형의 예와 달리, 일반적으로 모든 단조 성질의

문지방과 기댓값 문지방이 항상 일치하는 것은 아닙니다. 하지만 칸-칼라이 추측이 제기되기 이전까지 알려진 모든 예들에서 문지방과 기댓값 문지방 사이의 비가 적당한 상수 곱하기  $\log n$  이내였습니다. 이런 관찰들에 기반하여, Kahn과 Kalai는 다음의 추측을 내놓았으며, 이는 최근에 저자와 Pham에 의해 증명되었습니다.

정리 3.2.

(Park-Pham [PP02]). 절대 상수  $K$ 가 존재하여, 임의의 단조 성질  $F$ 에 대해 이의 문지방을  $p_c(F)$ , 기댓값 문지방을  $q(F)$ 라 하면,

$$(q(F) \leq) p_c(F) \leq Kq(F) \log n.$$

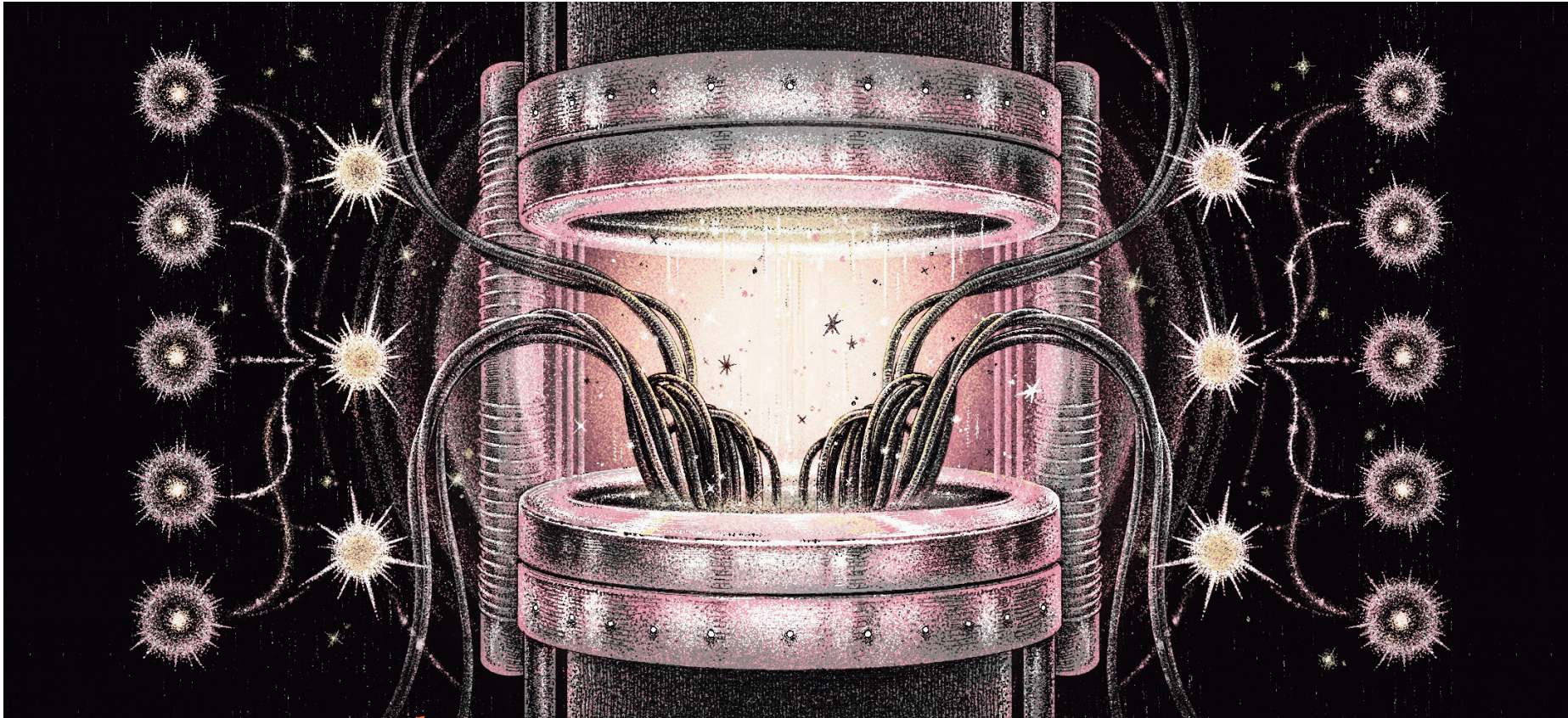
정리 3.2는 정말 강력한 결과이며, 역사적으로 아주 어렵게 여겨졌던 많은 단조 성질의 문지방을 쉬운 방법으로 구할 수 있게 해줍니다. 정리 3.2의 증명은 그 위력에 비해 놀랍도록 쉬운데, 증명의 접근방법은 Erdős와 Rado의 해바라기 추측에 관해 Alweiss-Lovett-Wu-Zhang[ALWZ]이 만들어낸 엄청난 업적과 연관이 있습니다. 재미있는 점은, 해바라기 추측이라는 문제 자체는 문지방 현상과는 조금도 관련이 없다는 점입니다. Alweiss-Lovett-Wu-Zhang의 증명법을 문지방의 상계를 구하는 데 이용할 수 있다는 놀라운 발상은 저자와 Frankston, Kahn, Narayanan에 의해 최초로 이루어졌으며, 이는 2019년 '선형 칸-칼라이 추측'<sup>4</sup>의 해결[FKNP]로 이어졌습니다.

또 한 가지 흥미로운 점은, 칸-칼라이 추측에 의해 유도되는 모든 결과는 이 추측의 약한 버전인 선형 칸-칼라이 추측에 의해 이미 유도가 가능하다는 점입니다. 2019년, 많은 확률론적 조합론 학자의 놀라움을 불러 일으켰던 선형 칸-칼라이 추측의 증명 이후, 이를 이용하여 다양한 단조 성질의 문지방이 증명되어 왔습니다. 칸-칼라이 추측은 이론적으로는 선형 칸-칼라이 추측보다 강력하나, 칸-칼라이 추측의 강도를 이용해야만 하는 (즉, 선형 칸-칼라이 추측만으로는 유도가 불가능한) 단조 성질의 문지방은 현재까지 한 건도 보고되지 않았습니다. 실제로 선형 칸-칼라이 추측을 제기한 Talagrand는 사실 두 추측이 동치일 것이라는 추측을 남겼습니다. 이 Talagrand의 추측은 여전히 열린 문제로 남아 있습니다. <sup>5</sup>

- 3. 다만, '무엇'의 기댓값을 계산해야 기댓값 문지방을 주는지는 일반적으로 구하기 어려우며 이것이 기댓값 문지방의 정의를 기술적으로 만드는 요소입니다. 삼각형의 포함과 같은 쉬운 예에서는 삼각형의 개수의 기댓값을 계산함으로써 기댓값 문지방을 구할 수 있음을 증명할 수 있으며, 이 증명에는 선형 프로그램 쌍대성(LP duality)이 이용됩니다.
- 4. 이름과 달리 이 추측은 Talagrand[Tal10]에 의해 제기되었습니다.

참고문헌

<p>1. [ALWZ] R. Alweiss, S. Lovett, K. Wu, and J. Zhang. Improved bounds for the sunflower lemma. <i>Ann. of Math.</i> (2) 194 (2021), no. 3, 795–815.</p> <p>2. [BT87] B. Bollobás and A. Thomason. Threshold functions. <i>Combinatorica</i> 7 (1987), 35–38.</p> <p>3. [ER60] P. Erdős and A. Rényi. On the evolution of random graphs. <i>Publ Math Inst HungarAcad Sci</i> 5 (1960), 17–61.</p> <p>4. [FKNP] K. Frankston, J. Kahn, B. Narayanan, and J. Park. Thresholds versus fractional expectation-thresholds. <i>Ann. of Math.</i> (2) 194 (2021), no. 2, 475–495.</p>	<p>5. [Par23] J. Park. Threshold phenomena for random discrete structures. <i>Notices of the American Mathematical Society</i>, to appear.</p> <p>6. [PP02] J. Park and H. T. Pham. A proof of the Kahn–Kalai Conjecture. <i>Journal of the American Mathematical Society</i>, to appear.</p> <p>7. [Pos76] L. Pósa. Hamiltonian circuits in random graphs. <i>Discrete Math</i>, 14 (1976), 359–364.</p> <p>8. [Tal10] M. Talagrand. Are many small sets explicitly small?. <i>STOC'10 – Proceedings of the 2010 ACM International Symposium on Theory of Computing</i>, 13–35, ACM, New York, 2010.</p>
---	---



# Natural Sciences

## 양자 컴퓨터와 양자 머신러닝

양자정보과학의 대표적인 응용 분야는 크게 세 가지, 센싱, 통신, 컴퓨팅으로 분류할 수 있는데, 이 세 가지 모두 '데이터'와 밀접한 관련이 있다. 센싱은 데이터를 수집하는 과정이고, 통신은 데이터를 주고받는 과정이며 컴퓨팅은 일련의 연산 과정을 통해 데이터로부터 유의미한 결과값을 얻어내는 과정이기 때문이다. 양자정보과학 기술은 이러한 과정들의 정확도, 효율성, 보안성 등을 현재 기술의 한계점 이상으로 개선하는 것을 목표로 한다.

글. 박경덕(연세대학교 응용통계학과/통계데이터사이언스학과 조교수) 그림. 소만

### 서론

필자의 연구팀은 양자 컴퓨팅, 그 중에서도 양자 머신러닝 알고리즘을 개발하는 연구를 수행하고 있다. 양자 머신러닝에는 크게 두 가지 연구 주제가 있는데, 첫째는 머신러닝을 위한 양자 컴퓨팅, 둘째는 양자 컴퓨팅을 위한 머신러닝이라고 할 수 있겠다. 첫 번째 주제는 빅데이터, 머신러닝, 인공지능 분야가 직면한 다양한 문제를 해결하기 위한 양자 컴퓨팅 알고리즘을 연구하는 것이고, 두 번째 주제는 양자 컴퓨터의 오류 및 결함을 통계적 분석 및 머신러닝으로 보완하는 방법을 개발하는 연구이다. 본 글에서는 첫 번째 주제에 집중하도록 하겠다.

컴퓨팅과 물리학은 불가분의 관계이다. 왜냐하면 정보를 처리하여 유의미한 지식을 추출해내기 위해서는 먼저 정보가 물리적 장치에 저장되어 있어야 하고, 물리적 법칙에 의해 처리되어야 하기 때문이다. 즉, 어떠한 컴퓨터 장치의 성능은 해당 장치가 따르는 물리 법칙에 의해 결정되게 되어 있다. 따라서 고전 물리학보다 더 정확한 이론으로 알려진 양자 물리학의 법칙을 따르는 컴퓨터를 만든다는 것은 자연스러운 시도로 볼 수 있다. 지난 30여 년간 수많은 학자의 노력으로 고전 알고리즘을 뛰어넘는 양자 알고리즘이 개발되어 왔으며, 이론적 근거를 바탕으로 해외 대기업들도 양자 기술에 뛰어들며 양자 알고리즘의 상용화가 빠른 속도로 가시화 되고 있다.

### 양자 알고리즘 시대의 개막

양자 알고리즘의 탄생은 1980년대로 거슬러 올라간다. 당시 몇몇 학자는 자연은 양자 역학을 따르므로, 자연계의 문제를 풀기 위해서는 양자 역학적 원리로 작동하는 양자 컴퓨터가 필요하다고 생각하게 된다. 자연계의 문제를 푸는 것은 매우 중요한 일인데, 현대 산업계가 직면한 수많은 난제는 디지털 컴퓨터와 같이 고전 역학을 따르는 컴퓨팅 모델로 복잡한 자연계를 모사하는 것이 상당히 어렵기 때문에 발생된다. 예시로는 신약 개발, 신소재 개발, 단백질 구조 계산, 효율적 비료 생산, 차세대 배터리 개발 등이 있다. 아마도 양자 역학 문제는 양자 컴퓨터가 더 잘 풀 수 있다는 주장은 그리 불편하지 않게 받아들일 수 있을 것이다. 그런데 1990년대 초부터 양자 알고리즘이 양자 역학과는 전혀 상관없는 몇몇 특정한 문제를 고전 알고리즘보다 지수함수<sup>1</sup>적으로 빠르게

풀 수 있다는 놀라운 사실이 발견되었다. 이러한 발견은 계산 복잡도 이론의 테두리 안에서 양자 컴퓨터와 고전 컴퓨터는 근본적으로 다르다는 것과 특정 문제 해결에 대한 양자 컴퓨터의 우위를 이론적으로 증명하여 학술적 가치는 높았지만, 상업적 가치의 부재와 실제 구현의 어려움 등의 문제가 남아 있었다.

1. 알고리즘 A가 알고리즘 B보다 지수함수적으로 빠르다는 것은,  $n$ 이라는 크기를 가지는 입력값에 대해 어떠한 문제를 풀기 위해 알고리즘 B가  $T(n)$ 의 연산 시간을 필요로 한다면 알고리즘 A는  $\log(T(n))$ 의 연산 시간을 필요로 한다는 것을 뜻한다.

1994년 피터 쇼어는 소인수분해 문제를 기존에 알려진 고전 알고리즘 대비 지수함수적으로 빠르게 해결하는 양자 알고리즘을 개발하였다. 이 문제를 해결하면 널리 쓰이고 있는 RSA 암호 체계가 위협을 받으므로, 양자 컴퓨터는 큰 관심을 받게 된다. 그러나 당시 일부 학자들은 오류 정정을 수행할 수 없다는 이유로 양자 알고리즘의 구현이 불가능하다는 부정적인 반응을 보였다. 하지만 피터 쇼어는 다음해 양자오류정정 코드를 개발하여 양자 컴퓨팅이 근본적으로 가능함을 입증하게 된다. 이에 힘입어 양자 컴퓨팅 분야는 급격하게 발전하기 시작한다. 이후 비정형화된 문제의 정답을 찾는 양자 검색 알고리즘, 양자푸리에변환, 고유값 분해 알고리즘, 선형연립방정식 풀이 알고리즘 등 고전 알고리즘 대비 이차항quadratic<sup>2</sup> 또는 지수함수적 속도 향상이 가능한 다양한 양자 알고리즘이 개발되었다. 중요한 점은, 양자 컴퓨팅 시대의 개막과 함께 개발된 모든 양자 알고리즘은 문제 해결 과정에서 특정 부분에만 적용되는 것이며, 데이터 전처리나 후처리 과정에서는 여전히 고전 컴퓨터가 필요하다는 것이다. 따라서 양자 컴퓨터는 고전 컴퓨터를 완전히 대체하는 것이 아니며, 기존의 고전 컴퓨터와 협력하는 이기종 형태로 사용된다. 고전 컴퓨터가 잘하는 것은 고전 컴퓨터로 하고, 양자 컴퓨터가 잘하는 것은 양자 컴퓨터로 하는 것이다.

2. 이차항적 속도 향상은  $T(n)$ 의 연산 시간을  $\sqrt{T(n)}$ 로 줄일 수 있음을 의미한다.

“양자 역학을 이해했다고 생각한다면 양자 역학을 이해하지 못한 것이다”라는 말이 있을 만큼, 양자 역학은 어렵다고

**고전 데이터는 고전 머신러닝으로, 양자 데이터는 양자 머신러닝으로 분석하는 것이 적어도 속도 측면에서는 바람직한 접근법이다. 하지만 머신러닝에서는 항상 속도만이 중요한 것은 아니다.**

알려져 있다. 하지만 양자정보과학에서 필요한 대부분의 양자 역학적 계산은 복소해석학과 선형대수학만 알면 어느 정도 되기 때문에 꽤 쉽다. 다만 그 결과를 해석하는 것이 어려운 것이다. 양자 컴퓨터에서는 0이면서 동시에 1일 수도 있는 양자 역학적 비트인 큐비트를 정보의 단위로 하여 연산을 수행한다. 0이기도 하고 1이기도 하다는 것을 어떻게 해석해야 할지는 어렵지만, 이것을 수학으로 표현하면 단순히 2차원의 복소 벡터complex vector이다.

양자 역학 법칙을 따라 연산을 수행하는 양자 컴퓨터의 수학적 모델은 선형대수를 통해 이해할 수 있는데, 흥미롭게도 양자 컴퓨터는 특정 선형대수 문제를 아주 빠르게 풀 수 있다. 예를 들어 2009년도에 발표된 양자 선형연립방정식 풀이 알고리즘저자들의 이니셜을 따와 HHL알고리즘이라고도 한다는 역행렬을 구하는 문제를 기존 알고리즘 대비 지수함수적으로 빠르게 풀 수 있다. 역행렬을 구하는 것은 회귀분석, 최소제곱 서포트 벡터 머신least-squares support vector machine 또는 LS-SVM 등 다양한 데이터 기반 예측 문제에서 필요한데, 고전 알고리즘은 여기에 많은 계산 비용을 소모하게 된다. 반면 양자 컴퓨터는 이 문제를 지수함수적으로 빠르게 풀 수 있다. 이러한 놀라운 사실을 바탕으로 양자 머신러닝이라는 분야가 탄생하게 되며, 실제로 회귀분석과 서포트 벡터 머신 SVM을 지수함수적으로 빠르게 해결하는 양자 머신러닝 알고리즘들이 등장하게 된다. 사실 HHL 알고리즘은 양자 고유값 분해 알고리즘을 기반으로 하는데, 주어진 행렬을 대각화하면 역행렬도 쉽게 구할 수 있기 때문이다. 이 양자고유값 분해 알고리즘을 바탕으로 비지도학습의 대표적 예시 중 하나인 데이터 차원 축소를 위한 양자 주성분 분석PCA 알고리즘도

등장한다. HHL 알고리즘과 마찬가지로 여기서도 양자 컴퓨터는 고유값 분해 문제를 고전 알고리즘 대비 지수함수적으로 빠르게 풀어준다. 양자 머신러닝에는 고전 알고리즘 대비 지수함수적인 속도 향상이 보장된 HHL 기반 회귀분석, 양자 서포트 벡터 머신, 양자 주성분 분석 알고리즘뿐 아니라, 고전 알고리즘 대비 이차항적quadratic 속도 향상이 보장된 알고리즘도 있다. 이는 양자 검색 알고리즘과 고유값 분해 알고리즘이 사용되는 양자 진폭 추정 알고리즘을 통해 모수를 추정하는 알고리즘이다. 이러한 예시들만 보아도 이미 충분히 고전 머신러닝의 한계를 뛰어넘는 양자 머신러닝의 시대가 열린 것 같다. 하지만 앞서 언급한 양자 머신러닝 알고리즘의 속도 향상은 어디까지나 이론적인 이야기이고, 현실에는 많은 어려움이 있다.

### 고전 데이터 vs 양자 데이터

앞서 언급한 양자 머신러닝 알고리즘은 공통적인 전제조건이 필요한데, 이는 분석의 대상이 되는 데이터가 양자 상태로 주어져야 한다는 것이다. 지수함수적, 또는 이차항적 속도 향상은 고전 데이터가 양자 데이터로 변환된 후에야 이루어진다. 그런데 고전 데이터를 양자 데이터로 바꾸는 과정 자체에 큰 계산 비용이 들어가며, 여기서 모든 양자적 속도 향상이 사라지게 된다. 즉, 고전 데이터에 양자 알고리즘을 적용하는 것은 일반적으로 매우 부자연스러운 시도이며 반드시 이에 대한 비용을 치러야 한다. 특히 빅데이터와 같이 고차원, 대용량의 고전 데이터를 양자 컴퓨터로 처리하려면 데이터 변환 과정 비용이 매우 비싸다. 반대로 양자 데이터, 즉 양자 상태를 고전 컴퓨터로 분석하는 것도 비용이 매우 비싸다. 예를 들어  $N$ 개의 큐비트로 이루어진 양자 장치가 출력하는 양자 상태를 표현하는 밀도 행렬은 최대  $4^N-1$ 개의 실수와 변수를 가지기 때문에, 해당 양자 상태에 대한 사전 지식이 없다면 밀도 행렬의 변수를 추정하기 위한 측정 횟수는 큐비트 개수 대비 지수함수적으로 증가한다. 즉, 일단 양자 상태를 고전 데이터로 바꾸는 과정 자체가 매우 비싸다. 따라서 양자 데이터를 분석해야 하는 문제는 양자 컴퓨터가 고전 컴퓨터보다 훨씬 빠르게 풀 것이라고 받아들여지고 있다. 어쩌면 양자 센싱 분야가 발전하면 양자 데이터가 증가하여 자연스럽게 양자 머신러닝도 함께 발전할 수 있겠다. 이는 고전 머신러닝 분야가 빅데이터 시대의 도래로 급격한 발전을 경험한 것과 마찬가지로 일 것이다. 요약하자면 고전 데이터는 고전 머신러닝으로, 양자

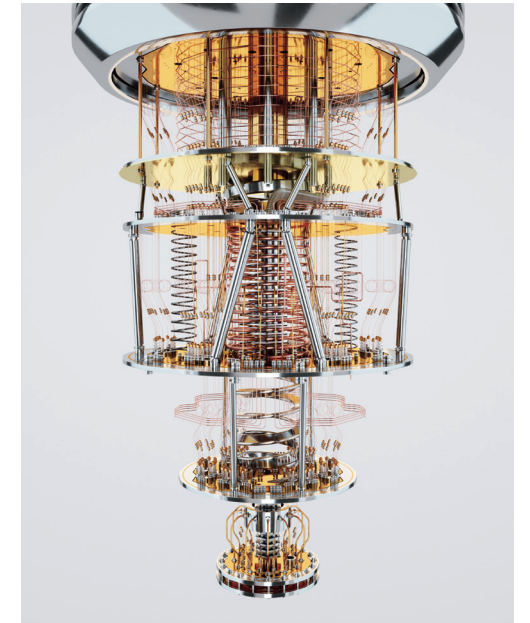


그림 1. 양자 컴퓨터 3D 렌더링 이미지

데이터는 양자 머신러닝으로 분석하는 것이 적어도 속도 측면에서는 바람직한 접근법이다. 하지만 머신러닝에서는 항상 속도만이 중요한 것은 아니다. 아무리 계산(또는 학습)을 오래해도 성능이 개선되지 않는 문제들이 있다. 따라서 고전 데이터에 양자 머신러닝 알고리즘을 적용하는 시도는, 만약 성능이 개선될 수 있다면, 충분히 의미 있는 접근이 될 수 있다.

### 이론과 현실

만약 데이터가 양자 상태로 주어진다고 해도 앞서 언급한 양자 머신러닝 알고리즘은 여전히 극복해야 할 문제가 있다. 이는 양자 회로의 깊이 및 게이트 연산 비용이 큐비트 개수 대비 다항적polynomially으로 증가한다는 것인데, 이러한 양자 회로를 높은 신뢰도로 구현하기 위해서는 양자오류정정 및 결함허용<sup>3</sup> 양자 컴퓨팅이 필요하다. 양자오류정정 및 결함허용 양자 컴퓨팅의 탄탄한 이론은 양자 컴퓨터의 범용성과 확장성을 보장해 주기는 하지만, 이를 실제로 구현하는 양자 컴퓨터 하드웨어 개발은 매우 어려운 숙제로 남아 있다. 근본적으로는 문제가 없어 보이지만, 양자 컴퓨터는 반도체 기반의 디지털 컴퓨터보다 훨씬 만들기 어려우며 기술력이 언제 이론을 따라잡을지는 예측하기가 매우 어렵다. 이러한 배경

에서 현재 양자 컴퓨팅 연구의 방향성은 크게 두 갈래로 나뉘게 되는데, 첫째는 양자오류정정 이론을 기반으로 확장성과 범용성을 모두 구비한 양자 컴퓨팅 시스템을 개발하는 것이며, 둘째는 가까운 미래에 상용화가 가능한 제한된 양자 하드웨어를 이용하여 양자 이득<sup>4</sup>을 달성할 수 있는 양자 컴퓨팅 응용 알고리즘을 개발하는 것이다. 이 제한적 양자 하드웨어를 Noisy Intermediate-scale Quantum<sup>NISQ</sup><sup>5</sup> 컴퓨터라고도 부른다. 말 그대로 결함은 있지만, 큐비트의 개수가 고전 컴퓨터로는 모사하기 어려운 정도의 중규모 수준인 양자 컴퓨터라는 뜻이다. 양자오류정정을 하지 않고도 유의미한 계산 결과를 얻어내려면 양자 회로의 깊이가 알아야 하는데, 보통 양자 회로의 깊이가 큐비트 개수 대비 대수적<sup>logarithmic</sup>으로 증가하거나 또는 큐비트 개수에 따라 증가하지 않는 상수여야 한다. NISQ 컴퓨터에서 구현 가능하고, 고전 알고리즘 대비 증명 가능한 양자 이득을 달성할 수 있는 상업적 문제는 아직 알려져 있지 않다.

3. <https://horizon.kias.re.kr/15547/>

4. 본 글에서 양자 이득이란 성능, 속도 등 하나 또는 그 이상의 지표에서 양자 컴퓨터가 고전 컴퓨터에 비해 이점을 제공하는 것을 의미한다.

5. NISQ를 한글로 번역하자면, 노이즈가 있는 중간 규모의 양자 컴퓨터라고 할 수 있겠다. NISQ에 대한 자세한 내용은 다음 링크에 잘 설명되어 있다: <https://horizon.kias.re.kr/16769/>

**가까운 미래의 양자 머신러닝**

NISQ 컴퓨터로 머신러닝 분야에서 실용적이며 고전 알고리즘 대비 증명 가능한 양자 이득을 달성할 수 있을지는 아직 모르지만, 그럼에도 불구하고 NISQ 컴퓨팅 기반의 머신러닝 알고리즘들이 계속해서 새롭게 개발되고 있다. NISQ 컴퓨터로 접근할 수 있는 머신러닝 문제는 크게 세 가지로 분류될 수 있는데, 첫 번째는 커널 기반 머신러닝이다. 머신러닝에서 커널을 계산하는 것은 데이터를 고차원으로 매핑한 후 데이터 간의 내적을 계산하는 것과 동일한 효과를 갖기 때문에 비선형적 데이터 분석에 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 재미있는 것은 양자컴퓨터가 출력하는 결과값은 커널 함수값으로 나타낼 수 있다. 따라서 양자 알고리즘을 잘 디자인하여 고전

컴퓨터가 계산하기 어려운 커널 함수를 만들어 계산할 수 있다. 물론 계산하기 어려운 커널이 과연 실제 데이터 분석에 있어서 얼마나 유용한지는 불명확하지만, 양자 컴퓨터가 커널 기법과 자연스럽게 연결되는 것은 매우 흥미로우며 앞으로 활용도가 기대된다.

두 번째는 연속 최적화이다. 양자 컴퓨터는 특정한 함수값을 계산하는 것뿐 아니라, 이에 대한 기울기<sup>gradient</sup>도 쉽게 계산할 수 있다. 이러한 특징을 활용하면 모든 경사하강법<sup>gradient descent</sup> 기반의 최적화 문제에 양자 컴퓨터를 사용할 수 있다. 또한, 앞서 언급한 커널 기법과 연계하여 데이터에 맞게 커널을 최적화하는 일도 해볼 수 있다. 머신러닝 분야에서도 경사하강법을 사용하는 모든 알고리즘에 양자 컴퓨팅 기술을 도입해 볼 수 있다. 필자의 연구실에서는 이를 기반으로 양자 합성곱 신경망<sup>Convolutional Neural Network</sup>, 양자 오토인코더, 양자 서포트 벡터 데이터 묘사<sup>Support Vector Data Description</sup>, 고전-양자 하이브리드 딥러닝 등 다양한 알고리즘을 개발하고 있다. 이때 학습 효율성 향상, 메모리 비용 절감, 일반화 오차<sup>generalization error</sup> 감소 등의 효과를 기대해 볼 수 있다.

마지막으로 조합 최적화에도 양자 알고리즘을 적용할 수 있다. N개의 큐비트로 이루어진 양자 컴퓨터는 N 비트로 표현 가능한 2의 N제곱 가지수의 모든 비트 스트링을 양자 중첩 상태로 동시에 처리할 수 있는데, 연산 이후에는 이 중 하나의 비트 스트링만 확률적으로 출력한다. 이러한 성질을 잘 활용하면, 양자 컴퓨터는 N차원 변수의 조합 최적화 문제에서 모든 가능한 경우의 수를 동시에 담고 있는 상태에서 출발하여 최적값이 가장 높은 확률로 뽑히도록 상태를 바꿀 수 있고, 이를 통해 최적화 문제를 풀 수 있다. 조합 최적화에는 외판원 순회 문제<sup>travelling salesman problem</sup>, 그래프 max k-cut 문제 등 NP-hard 문제들이 많은데, 안타깝게도 양자 컴퓨터가 이러한 조합 최적화 문제를 다항 시간 안에 풀 수 있지는 않아 보인다. 일반적으로 전역 최적해를 찾기 위해서는 실행 시간이 큐비트 개수 대비 지수함수적으로 증가하기 때문이다. 한편 어려운 조합 최적화 문제의 국소 최적해를 다항 시간 안에 찾는 무작위 알고리즘 대비 양자 알고리즘이 이점이 있을 수도 있지만, 이에 대해서는 더 연구가 필요하다. 필자의 연구실에서는 비지도 학습 데이터 클러스터링 문제를 조합



그림 2. — NASA@SC19: Achieving Quantum Supremacy with Noisy Intermediate-Scale Quantum Devices

최적화 문제로 해석하여 양자 컴퓨터로 해결하는 알고리즘 개발 연구도 진행 중이다.

**맺는말**

양자 컴퓨팅 기술은 기존 기술의 연장선상에서 컴퓨터의 성능을 향상시키는 것이 아니라, 전통적인 방식과는 완전히 다른 양자 역학의 원리를 활용하여 연산을 수행하는 새로운 개념의 컴퓨팅 기술이다. 양자 머신러닝은 이러한 양자 컴퓨터를 활용하여 기존 머신러닝 기술의 한계를 극복하고자 도전하는 새로운 학문이다. 그러나 양자 컴퓨터 하드웨어는 엄청난 기술적 난이도를 요구하기 때문에 아직은 실용적이지 않다. 하지만 양자 컴퓨터의 성능과 안정성은 지속적으로, 그리고 빠르게 발전하고 있다. 가까운 미래에 수십 개의 큐비트를 안정적으로 제어할 수 있는 양자 컴퓨터 하드웨어가 상용화 되면, 커널 기법, 연속 최적화, 조합 최적화를 사용하는 다양한 머신러닝과 데이터 분석 문제에 양자 머신러닝을 적용해 볼 수 있을 것이다.

만약 양자오류정정 및 결함허용 양자 컴퓨팅이 가능하고, 고전 데이터를 양자 데이터로 변환하는 효율적인 방법을 발견하게 된다면, 다양한 머신러닝 문제에서 지수함수적 또는 이차항적 속도 향상을 달성할 수도 있을 것이다. 또한 양자 컴퓨터 하드웨어의 발전을 위해서, 그리고 NISQ 컴퓨터 활용의 극대화를 위해서는 양자 컴퓨터가 만들어내는 잡음이

섞인 데이터로부터 유의미한 정보를 얻어내는 것이 매우 중요하다. 따라서 고급 머신러닝 및 데이터 분석 기법들이 양자 컴퓨팅 기술 발전에 기여할 수 있을 것이다. 양자 머신러닝은 수학, 물리학, 컴퓨터과학, 통계학 등 다양한 학문 간의 융합적 연구가 매우 중요하다. 다양한 연구자들 간의 활발한 교류와 협업은 분명 양자 데이터사이언스 시대를 앞당길 수 있을 것이다. 또한 현재 빅데이터라고 하면 방대한 양의 고전 데이터를 의미하지만, 언젠가 양자 빅데이터의 시대가 열린다면 분명 양자 머신러닝에 대한 수요도 증가할 것이며, 양자 머신러닝은 현재는 상상할 수 없을 정도로 급격한 발전을 경험하게 될 지도 모르겠다. <sup>KIAS</sup>

**양자 컴퓨팅 기술은 기존 기술의 연장선상에서 컴퓨터의 성능을 향상시키는 것이 아니라, 전통적인 방식과는 완전히 다른 양자 역학의 원리를 활용하여 연산을 수행하는 새로운 개념의 컴퓨팅 기술이다. 양자 머신러닝은 이러한 양자 컴퓨터를 활용하여 기존 머신러닝 기술의 한계를 극복하고자 도전하는 새로운 학문이다.**

## [현미경의 과학] 광학 현미경의 이모저모[1]

광학 현미경이란 주로 가시광영역 400~700nm 파장의 빛을 광원으로 활용하거나 측정하는 현미경을

의미하는 것으로, 측정 대상 및 원리에 따라 여러 종류의 현미경으로 발전되어 왔다.

자외선, 근적외선, 적외선을 광원으로 사용할 수 있으나 이는 특수한 경우에 사용되고, 일반적으로 접할 수 있는

광학 현미경은 대부분 가시광선 영역의 빛을 광원으로 활용 혹은 관측한다.

글: 윤종희(아주대학교 물리학과 조교수) 그림: 김명호



### 광학 현미경이란?

1600년대에 사람의 눈으로 시편을 확대해 볼 수 있는 광학 현미경이 처음 발명된 이후, 세포와 미생물 같이 기존에는 알려지지 않았던 것들을 관측하기 시작했다. 이로 인해 새로운 과학 분야가 탄생하였고, 현재도 수많은 광학 현미경 기술이 개발되어 많은 연구에 활용되고 있다.

광학 현미경은 여러 가지 장점을 갖고 있어 그 활용도가 매우 높다. 가장 큰 장점은 광학 현미경을 통해 확대된 시편의 모습은 눈을 통해서 직접 관찰할 수 있고, 측정된 결과를 직관적으로 이해할 수 있기 때문에 현미경 전문가가 아니어도 현미경 결과를 분석하는 데 큰 어려움이 없다는 점이다. 눈으로 대상을 직접 보고 이해할 수 있기 때문에 유치원 및 초등학교 과학 실습 시간에 광학 현미경을 학습용으로 널리 활용한다. 또 다른 광학 현미경의 장점은 특별한 샘플 준비 과정 없이

빠르게 변화하는 대상을 실시간으로 관측할 수 있는 점이다. 살아 있는 미생물 시편을 현미경을 통해 관찰하면 스스로 움직이며 헤엄치는 것을 관찰할 수 있는데, 전자 현미경 혹은 원자 현미경의 경우 영상을 얻기 위해 시편을 코팅하거나 고정시키는 과정이 필요해 살아 있는 생명체 관찰이 어렵다. 반면, 광학 현미경은 시편의 특별한 처리 과정이 필요하지 않고, 가시광선이 다른 전자 빔이나 X-ray 보다 시편에 손상을 적게 주기 때문에 살아 있는 대상의 관찰이 매우 용이하다. 이런 이유로 광학 현미경은 물질 검사에도 활용이 되지만 의생명 분야에서 폭넓게 활용되고 있다.

가장 간단한 형태의 광학 현미경은 복합 현미경 compound microscope으로 두 개 이상의 렌즈로 구성되어 있고 작은 물체로부터 나온 빛이 렌즈를 통과하면서 물체가 크게 확대된 것처럼 관측할 수 있다. 실험 시간에 광학 현미경을 통해 시편을 관측했던 경험을 떠올려 보면, 준비된 시편을 현미경에 올려두고 대물렌즈를 시편 가까이 위치한 다음 대안렌즈에 눈을 가져가 시편의 높낮이 혹은 대물렌즈의 높낮이를 조절하며 가장 선명하게 상을 볼 수 있도록 만들었다. 이는 광학 현미경의 렌즈를 활용해 상을 확대하고, 렌즈의 초점거리에 따라 상이 맺히는 위치가 달라지기 때문에 가장 선명한 상을 관찰할 수 있도록 조절하는 과정이다. 렌즈를 통해 물체의 모습을 확대할 수 있는 원리는 기하광학 개념을 통해 설명이 가능하다. 빛은 파동과 입자의 성질을 동시에 갖기 때문에 정확히 분석하는 것이 매우 복잡하지만, 기하광학에서는 빛의 직진하는 성질 rectilinear property만을 고려하기 때문에 쉽게 빛이 전달되는 광경로 optical path를 예측할 수 있다. [그림 1]에서 보이는 것처럼 물체의 한 점에서 나온 빛은 대물렌즈를 통과해 대안렌즈의 초점거리보다 짧은 위치에 상을 형성한다. 이렇게 생긴 상은 다시 대안렌즈를 통해 확대된 허상을 형성하며 우리는 실제 크기보다 확대된 시편의 모습을 관찰하게 된다.

렌즈의 초점 거리에 따라서 다양한 크기로 확대 비율을 조절할 수 있지만, 확대할 수 있는 배율의 크기에 따라 관측할 수 있는 영역의 크기가 줄어들기 때문에 보통 하나의 현미경에 2~3개의 대물렌즈를 설치해 시편과 관측 목적에 따라 바꿔가며 영상을 관찰할 수 있도록 한다. 광학 현미경으로 획득할 수 있는 영상의 품질은 빛의 경로를 변경할 수 있는 렌즈에 의해 결정이 되는데, 렌즈의 모양에 따라, 그리고 측정하는

빛의 파장에 따라 수차aberration라고 하는 복잡한 변수가 존재한다. 따라서 광학 현미경의 발전은 정밀한 렌즈 가공 및 제작 기술과 함께 이뤄졌다. 최신 현미경에 활용되는 대물렌즈는 다양한 수차를 보정할 수 있도록 여러 렌즈로 구성되고 특수한 코팅이 되어 있기 때문에 가격이 매우 비싸다.

앞서 언급한 것처럼 광학 현미경은 눈으로 대상을 관측할 수 있고, 카메라로 쉽게 영상을 저장할 수 있다. 또한 렌즈와 카메라, 광원을 포함하여 많은 광학 부품이 가시광선 영역에서 개발되어 자외선, 근적외선, 적외선 영역에 비해 사용할 수 있는 광학 부품의 종류도 많고 가격이 저렴한 장점이 있다. 전자현미경이나 X-ray 현미경과 비교하면 상대적으로 저렴하기 때문에 수많은 분야에서 광학 현미경을 기본 관측 도구로 사용하고 있다. 광학 현미경은 대상을 쉽게 관측할 수 있는 장점이 있지만 빛의 산란에 취약하다는 단점이 있다. 간단히 말하자면, 빛의 산란은 빛이 물질과 반응하여 그 경로를 바꾸는 것이다. 불투명하다고 하는 것은 광학적으로 살펴보면 직진하는 빛이 산란에 의해 경로를 여러 번 바꾸며 기존의 정보를 확인하기 어렵게 되는 것이다. 대표적으로 투명한 물과 우유를 떠올리면 된다. 투명한 물은 빛의 산란이 적어 물속을 살펴볼 수 있지만, 우유는 단백질에 의해 빛의 산란이 많이 일어나 하얗게 보이고 내부를 살펴볼 수 없다. 보통의 광학 현미경으로 수백 마이크로미터의 두께를 갖는 불투명한 시편은 정확히 관측하기 어렵다. 이처럼 광학 현미경을 활용하기 위해서는 시편이 매우 얇거나, 투명하거나 반사가 잘 되어 시편으로부터 충분한 양의 빛 신호가 나와야 하는 조건을 만족해야 한다.

**광학 현미경은 어떤 신호를 측정할까?**

광학 현미경은 빛과 물체의 상호작용에 의한 결과를 관측한다. 물체의 구성에 따라 물체는 고유의 광특성을 갖는데, 이 특성에 따라 빛과 물체가 다양한 상호작용을 하게 된다. 특히, 물체의 광특성 중 굴절률은 물체가 얼마나 빛을 잘 통과 시키는지 결정하는 특성으로 물체와 빛의 상호작용에 큰 영향을 준다. 거울과 같은 표면에서는 빛의 반사가 일어나고, 굴절률이 달라지는 경계에서는 빛의 굴절과 산란이 일어나 광원으로부터 나온 빛의 경로를 바꾼다. 빛 에너지를 흡수할 수 있는 물질은 주어진 빛을 사라지게 만들 수 있다. 이렇게 기존 빛의 광경로와 달라진 광경로는 물체와 배경을 구분할 수 있게 하여 물체를 관측할 수 있게 한다. 반사, 굴절, 흡수, 산란과 같은 빛과 물체의 상호작용 외에도 물체의 광특성에 따라 빛의 위상 및 편광이 변하기도 하고, 빛을 낼 수 있는 물질에서는 광원과 다른 파장의 빛 신호가 발생한다. 또한, 빛을 흡수할 수 있는 물체는 빛 에너지를 진동을 통해 음파로 변환시키는 광음향 효과를 일으켜 빛을 활용하지만 음파 영역에서 물체를 관측할 수도 있다.

광학 현미경은 다양한 빛과 물체의 상호작용 중 특정 신호만을 선별적으로 측정하여 물체를 관측하기 때문에 측정하는 빛과 물체의 상호작용에 따라 여러 종류의 광학 현미경이 존재한다. 측정하는 물체에 따라 필요한 신호가 다르기 때문에 적절한 광학 현미경 종류를 잘 선택해야 한다. 빛과 물체의 상호작용은 크게 표지자 활용의 유무로 구분할 수 있다. 빛의 반사, 굴절, 흡수, 산란의 신호는 관측하고자 하는 대상 및

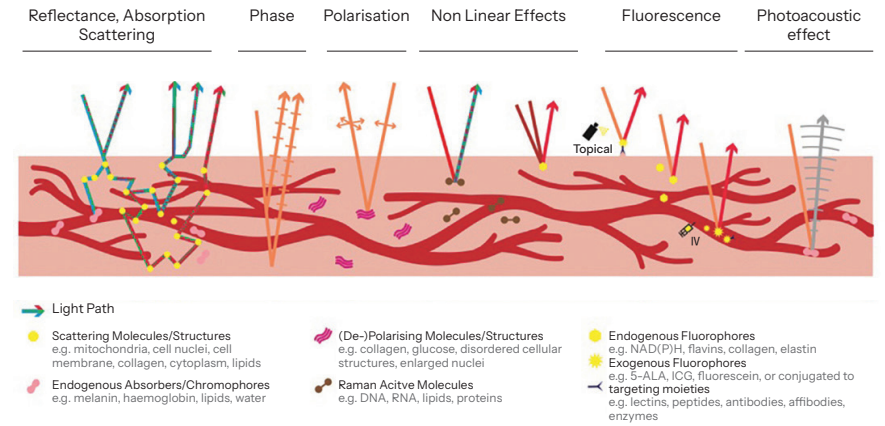


그림 3. — 다양한 빛과 물체의 상호작용[1]

주위 환경에 의해서 모두 일어날 수 있어 특정 대상만 관측하는데 어려움이 있다. 이 문제는 관측하고자 하는 대상에서만 신호를 선별적으로 측정할 수 있으면 해결할 수 있다. 표지자는 이미 알려져 있는 신호를 발생할 수 있는 물질로 관찰 대상에 붙여 놓고, 표지자의 신호만 측정하면 원하는 대상만 관측할 수 있는 장점이 있다. 반면 표지자를 활용하지 않는 현미경의 경우 물체 고유의 광특성에 따른 신호를 측정할 수 있어 원하는 신호를 분석하는 영상 분석 과정이 필요하다. 표지자 활용 유무에 따라 광학 현미경의 종류 및 장·단점이 달라지고, 영상 분석 방법도 달라진다. 본 연재물에서는 먼저 표지자를 활용한 광학 현미경에 대해 소개할 것이다.

**표지자를 활용한 선별적인 대상 관측**

숨은 그림 찾기 할 때 숨은 물체를 배경과 다른 색으로 칠해 놓으면 손쉽게 숨은 물체의 위치를 파악할 수 있다. 이와 비슷하게 관찰 대상에만 표지자를 붙여 놓고, 표지자의 신호만 측정하면 원하는 대상만 선별적으로 측정할 수 있다. 이런 표지자 활용의 장점으로 인해 표지자 개발 연구가 활발히 이뤄졌고, 현재는 형광 물질, 나노파티클, 퀀텀 닷 등 수많은 종류의 표지자가 개발되어 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히 의생명 분야는 복잡한 생체환경 속에서 원하는 유전자, 단백질, 세포의 움직임 등을 관측하는 것이 중요하기 때문에 표지자를 기본 연구 방법으로 활용하고, 표지자 중 형광 물질이 널리 활용되고 있다.

빛을 내는 현상을 발광Luminescence이라고 하고, 발광 중 빛 에너지를 흡수해 다시 빛을 내는 현상을 광발광Photoluminescence이라고 한다. 광발광 현상은 그 원리에 따라 다시 형광Fluorescence과 인광Phosphorescence으로 나뉜다. 형광과 인광 모두 빛 에너지를 흡수하여 빛을 만드는 과정이지만, 형광은 빛 에너지 전달이 끊기면 수 나노 초 이하에 발생하는 빛이 사라지지만 인광은 상대적으로 오랜 시간 빛을 발생한다. 따라서 빛 에너지를 전달했을 때만 즉각적으로 원하는 빛 신호를 발생하는 형광 물질이 많은 곳에 응용되기 시작했다. 형광은 형광펜이나 형광등에 사용되기 때문에 매우 익숙한 단어이다. 형광의 기본 원리를 살펴보면 형광 물질이 빛 에너지를 흡수해서 다시 빛을 방출하는 것이다. 중요한 부분을 형광펜으로 표시한 문서를 복사해 본 경험이 한 번쯤 있을 것이다. 검은색으로 출력된 글자는 복사가 잘 되는 반면, 형광펜으로 표시한 부분은 복사가 잘 되지 않는다. 이는 복사기 원리가 빛이 반사되는 부분은 흰색으로, 글자에 의해서 빛이 흡수된 부분은 어둡게 하는 것이어서 발생한다. 형광펜으로 표시한 부분은 복사할 때 복사기에서 나온 빛을 흡수해 다시 빛을 만들기 때문에, 복사기 입장에서는 형광펜 부분은 복사할 내용이 없는 것처럼 인식해 복사가 잘 안 되는 것이다. 형광의 원리를 조금 더 과학적으로 살펴보면 형광 물질의 전자의 에너지 준위 변화와 관련이 있다. 전자의 에너지 준위는 양자화되어 층층이 나뉘어 있다.

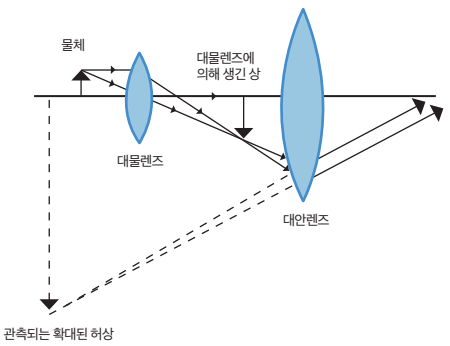


그림 1. — 두 개의 렌즈를 통해 확대된 물체를 관측할 수 있는 원리

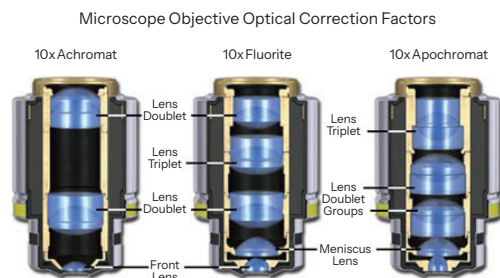


그림 2. — 복잡하게 구성된 대물렌즈의 모습 ©Zeiss

바닥상태(Ground state)에서 안정한 상태로 있던 전자가 광자의 에너지를 흡수하면 높은 에너지 준위로 여기(excitation)되며, 들뜬 상태가 되었다가 일부 에너지를 잃고 다시 바닥 상태의 에너지 준위로 내려오면서 그 에너지 차이만큼 같은 에너지를 갖는 빛의 형태로 방출하는 것이다. 따라서 일반적으로 형광 물질은 흡수하는 빛의 파장이 갖는 에너지보다 적은 에너지를 갖는 빛으로 내보내기 때문에 광원과 다른 색의 빛이 나온다. 빛은 에너지가 높으면 짧은 파장(파란색)을 갖고, 에너지가 낮으면 긴 파장(빨간색)을 갖게 된다. 형광 신호는 짧은 파장의 빛을 흡수해 긴 파장의 빛을 방출하기 때문에 형광 물질에서는 가시광선 영역에서 흡수한 빛보다 더 빨간색 영역으로 바뀐 빛 신호가 나온다. 형광 물질에서 흡수하는 빛과 방출되는 빛의 에너지 파장의 길이가 다른 점은 형광 물질에서 방출된 빛 신호를 측정하기 쉽게 하는 장점이 있다. 필터 혹은 특수한 거울을 활용해 형광 물질 조사에 사용한 빛보다 긴 파장의 빛만 카메라에 측정할 수 있도록 하면, 형광 물질에서 방출된 빛만 측정할 수 있어, 형광 물질이 붙은 대상만 관찰할 수 있게 되는 것이다.

**형광 단백질의 유전자 정보 발견 및 폭넓은 의생명 응용**

형광 물질에 대한 기록은 기원전부터 존재하고 George Gabriel Stokes가 1852년 논문에서 발광하는 현상 중 형광이라는 현상에 대해 이름을 붙인 이후 형광이라는 용어가 사용되기 시작한다. 의생명 연구에 형광 물질을 사용하기 위해서는 표지자가 생체 친화적이라는 특징을 갖고 있어야 한다. 일반적인 생체 친화적 특성이 없는 형광 물질을 표지자로 사용할 경우 생체 기능에 피해를 주거나 면역 반응과 같이 원하지 않는 현상이 발생한다. 따라서 의생명 연구에 형광 물질을 활용하기 위해서는 생체 친화적인 특징을 필수적으로 갖고 있어야 한다. 이런 이유로 형광 물질을 의생명 연구에 본격적으로 활용하게 되는 시점은 형광 단백질의 유전자 정보 발견 이후부터이다.

그러면 생체 친화적인 형광 물질이란 어떤 것일까? 가장 쉽게 생각할 수 있는 것은 형광 물질을 갖고 있는 생명체에서 형광 물질을 추출해서 사용하는 방법이다. 영화나 다큐멘터리에서 바닷속에서 해파리가 파랗게 빛나거나 산호가 형형색색의 빛을 띤 장면을 본 적이 있을 것이다. 아쿠아리움에서 해파리가 있는 수족관을 볼 때 해파리가 빛을 내는 것을 본 경험이 있을 수도 있다.



그림 4. — 다양한 색을 낼 수 있는 형광 물질들 ©Image Credit: Denis Larkin/Shutterstock.com

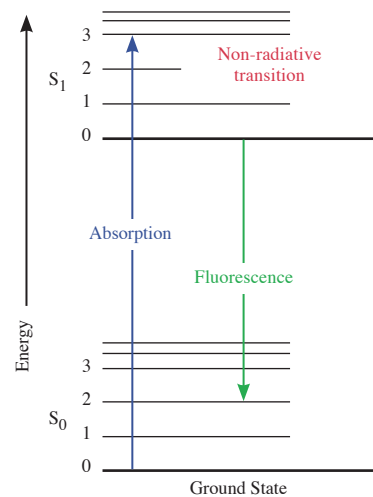


그림 5. — Jablonski diagram을 통한 형광원리 소개 ©Wikipedia

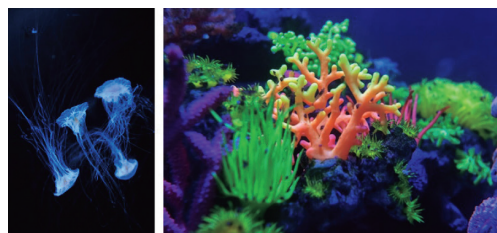


그림 6. — 바닷속에서 관찰할 수 있는 생체 친화적 형광 물질

해파리나 산호가 형형색색의 빛을 낼 수 있는 이유는 형광 단백질을 갖고 있기 때문이다. 형광 단백질의 화학 구조는 원통 형태로 전자가 자유롭게 이동할 수 있어 빛 에너지를 흡수하였다가 빛을 방출할 수 있다. 형광 단백질은 해파리 혹은 산호와 같은 생명체에 존재하기 때문에 생체 친화적인 특성이 있어 의생명 연구에 쉽게 활용할 수 있다. 바다에서 해파리가 빛을 내는 것은 오래전부터 관찰이 되었지만, 실제로 형광 단백질 존재의 확인은 1960대에 이뤄지고, 형광 단백질의 유전자 정보는 1990년대 들어 파악된다. Martin Chalfie, Osamu Shimomura, Roger Y. Tsien 세 명은 해파리로부터 형광 단백질을 추출하고, 유전 정보를 파악하여, 유전자 조작을 통해 여러 색의 형광 단백질을 만들어 많은 분야의 발전을 이룩한 공로로 2008년 노벨 화학상을 받게 된다.[2] 형광 단백질을 관찰 대상에 붙여 놓으면 형광 신호 측정만으로 쉽게 대상의 구조나 기능을 선별적으로 관찰할 수 있다. 이를 통해 세포 내 신호전달 체계, 유전자 전사과정, 세포의 사멸 과정 등 수많은 연구가 가능해졌다. 또한, 칼슘과 같은 이온들도 형광 물질을 통해 관찰이 가능하다. 특정 이온이 없을 때는 형광을 일으키지 않다가 특정 이온이 존재하면 화학적 구조 변화를 통해 형광을 내기 시작한다. 세포 내 칼슘의 농도는 수많은 기능을 담당하는데, 이런 방식을 활용해 세포 혹은 조직 내 실시간으로 변화는 칼슘의 농도 측정도 가능하다. 또한 형광 단백질의 유전자 정보를 알고 있기 때문에 관찰하고 싶은 단백질을 발현하는 유전자 염기서열 뒤에 형광 단백질을 발현할 수 있는 유전자를 유전자 조작 기술을 통해 삽입하면 대상 단백질을 만들 때 자동으로 형광 단백질이 붙어 있는 채로 만들 수 있다. 이렇게 유전자 조작 기술을 통해서 빛을 내는 세포, 조직, 생명체를 만들 수 있어, 발생학, 종양학, 신경과학 등에서 매우 유용하게 사용되고 있다.

**형광 표지자를 관찰하기 위한 다양한 광학 현미경 기술**

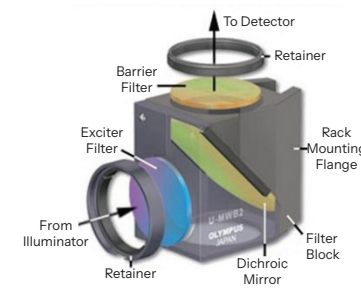
다양한 형광 표지자의 개발은 형광 현미경의 발전과 함께 이뤄졌고, 그 결과 형광 신호 측정 및 응용을 위한 다양한 종류의 형광 현미경이 개발되었다.

**(1) 대면적 형광 현미경**

가장 기본적인 형태의 형광 현미경은 대면적 형광 현미경이다. 형광의 원리가 짧은 파장의 빛을 흡수해 긴 파장의 빛을

방출하기 때문에 대면적 형광 현미경은 시편 전체를 짧은 파장의 빛으로 조사하고, 카메라 앞에는 형광에 의해 방출된 긴 파장의 빛만 측정하기 위한 필터를 두는 방식이다. 광학계를 최적화하기 위해 밴드 패스 필터 2개와 다이크로익 미러로 구성된 큐브를 활용하기도 한다. 밴드 패스 필터는 특정 파장의 빛만 통과시킬 수 있는 필터로 형광 물질을 조사하는 빛과 형광 물질에 의해 방출된 빛을 통과시킬 수 있는 필터를 각각 두고, 그 사이에는 다이크로익 미러를 둔다. 다이크로익 미러는 조성에 따라 특정 파장보다 짧은 빛은 반사시키고 긴 파장은 투과시키는 성질을 갖고 있다. 따라서 2개의 밴드 패스 필터와 하나의 다이크로익 미러를 하나의 큐브로 구성해 놓으면 특정 형광 물질의 영상을 쉽게 얻을 수 있다. 보통 여러 형광 신호를 측정하기 위해 2개 이상의 큐브를 갖고 있어 실험 목적에 따라 조절해서 사용한다.

형광 영상을 위한 필터 큐브



여러 형광 물질로 염색된 세포의 형광 영상

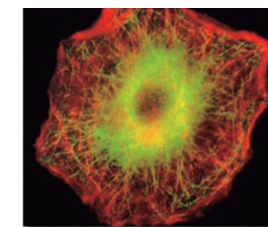


그림 7. — 대면적 형광 현미경에 활용되는 필터 큐브와 세포의 형광 영상 ©Olympus

대면적 형광 현미경의 가장 큰 장점은 시편 전체에 빛을 조사하기 때문에 한 번의 촬영만으로 전체 영역의 형광 신호를 측정할 수 있어 넓은 면적을 빠르게 측정할 수 있는 것이다. 시편 전체의 형광 신호의 변화를 빠르게 측정해야 할 상황에는 대면적 형광 현미경을 유용하게 활용할 수 있다. 반면, 전체 영역에 빛을 조사하고 형광 신호를 측정하면 특정 영역에서 나온 형광 신호가 다른 영역에서 발생한 형광 신호와 겹쳐지기 때문에 공간 해상도가 떨어지는 단점이 있다.

(2) 공초점 형광 현미경

공초점 현미경이 개발된 이후 고해상도 형광영상 획득 및 3차원 영상이 가능해졌다. 인공지능의 대가로 알려진 MIT 마빈 민스키 박사는 1957년 공초점 현미경의 개념에 대한 특허를 출원하였다. 당시 기술적 한계로 구현이 되지 않았던 공초점 현미경은 레이저 및 자동화 스테이지 발명 이후 1990년 무렵 상용화가 되어 현재는 의생명 분야를 포함하여 다양한 분야에 널리 활용되고 있다. 공초점 현미경의 개념은 초점 부분 외에서 오는 빛 신호로 인해 간섭이 발생하거나 영상의 품질이 떨어지는 것을 막기 위해, 현미경의 초점 부위에서 나온 빛이 핀홀이라고 불리는 바늘구멍을 지나 카메라에 측정되도록 하는 것이다. 따라서 초점 외에서 나온 신호는 핀홀을 통과하지 못해 초점에서 신호를 정밀하게 측정할 수 있는 것이다.

이 원리가 형광 신호와 결합하면 형광 영상의 해상도가 높아지고 3차원 영상이 가능해진다. 특정 부분에 빛을 전달해서 형광 신호를 발생한다고 하더라도 빛이 초점을 생성할 때 3차원적으로 에너지가 분포하게 되고 따라서 초점이 맺힌 곳 위아래에도 빛 에너지가 전달되어 형광 신호가 나오게 된다. 이렇게 초점 외 발생하는 형광 신호는 핀홀을 통과하지 못하기 때문에 관측하고자 하는 초점 위치의 형광 신호만 측정하게 된다. 이런 원리로 물체를 3차원 상에서 한 층씩 관찰할 수 있고 이를 광학적인 절편(optical sectioning) 기술이라고 한다. 이를 활용하면 물체의 3차원 구조 중 한 층의 형광 영상을 얻고 물체의 높이를 조절하고 다시 한 층의 형광 영상을 얻는 방식으로 여러 높이의 절편 영상을 획득하고 나면, 측정된 당시의 높이 정보를 알고 있기 때문에 간단한 영상 처리를 통해 물체의 3차원 형광 영상을 얻을 수 있다. 공초점 현미경의 원리를 적용하기 위해 레이저를 활용하는 이유는

레이저의 특징이 단색한 파장의 빛이고, 공간적으로 레이저 빔의 집속(collimation)이 쉬워 원하는 크기의 빛을 쉽게 전달할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 집속된 레이저 빔은 대물렌즈를 통해 작은 초점 영역에만 빛 에너지를 전달하여 그 위치에 서만 형광 신호를 발생시킬 수 있다. 측정하려는 모든 영역에서 형광 신호를 얻기 위해서는 레이저 빔이 전달되는 초점 위치를 변경해야 하는데 이는 2차원 갈바노미터 스캐너를 통해 이뤄진다. 갈바노미터 스캐너는 모터를 통해 거울의 각도를 조절하는 장비로 하나의 거울은 x축 방향, 다른 하나의 거울은 y축 방향으로 회전할 수 있도록 하면 측정하고자 하는 모든 영역에 초점 위치를 옮길 수 있다. 이를 라스터 스캐닝(raster scanning)이라고 하고, 이를 통해 2차원 광학 절편 영상을 획득할 수 있다. 한 장의 절편 영상 획득 후 자동 스테이지를 통해 시편의 높이를 수 nm에서 수백 um까지 움직여 다른 높이의 절편 영상을 획득하는 과정을 거치면 시편의 3차원 형광 영상을 획득할 수 있다. 또한, 여러 대의 레이저를 사용하면 다양한 종류의 형광을 측정할 수 있는 장점이 있다.

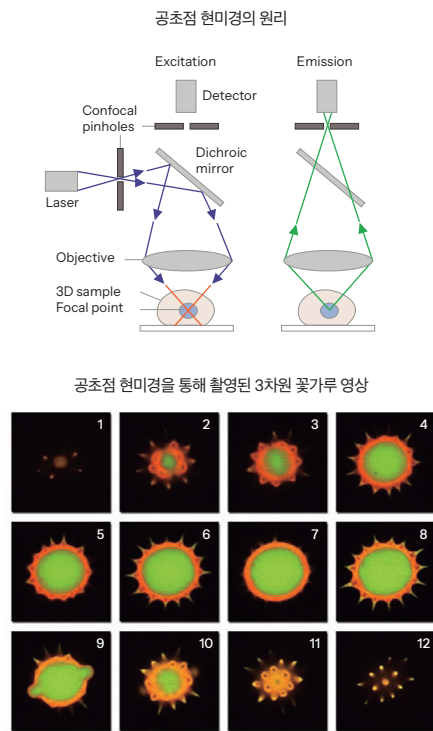


그림 8. 공초점 현미경의 원리와 3차원 형광 영상의 예시 ©Ibidi, olympus

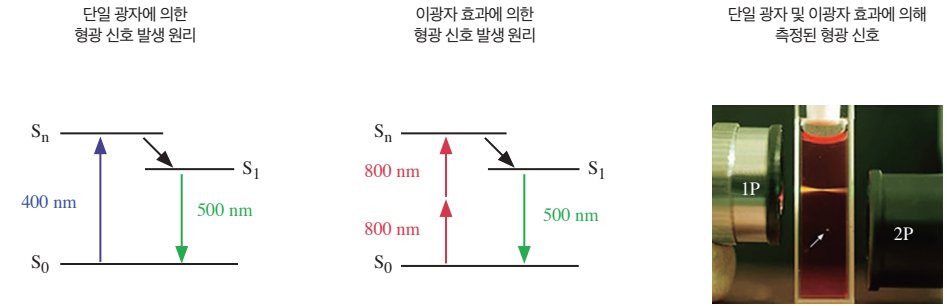


그림 9. 이광자 효과에 의한 형광 발생 원리 ©Teledyne

공초점 현미경은 핀홀을 활용해 초점 외 발생하는 형광 신호를 제거해 3차원 고해상도 영상을 획득할 수 있는 장점이 있으나, 이는 핀홀을 통과한 형광 신호만 측정하기 때문에 형광의 세기가 어두워지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 더 높은 에너지의 레이저를 사용하거나 카메라 노출 시간을 길게 해야 하는데, 이러면 높은 빛 에너지에 의해 시편 및 형광 물질에 손상이 일어나거나, 긴 노출 시간으로 인해 빠르게 변화하는 현상 측정이 어렵다는 한계가 존재한다.

(3) 다광자 현미경

다광자 현미경은 극초단파 펄스 레이저를 광원으로 활용해 비선형을 일으켜 영상을 획득하는 현미경이다. 1931년 Göppert-Mayer의 박사학위 논문에서 이광자 흡수(two-photon absorption)의 이론적인 배경이 제안되고 난 후, 1990년 처음으로 이광자 흡수 현상을 활용한 다광자 현미경이 개발된다. 이후 다광자 현미경이 상용화되고 공초점 현미경에 비해 두꺼운 조직의 3차원 영상 획득 및 살아 있는 동물에서의 영상 획득이 용이하다는 장점이 밝혀져 현재는 살아 있는 개체의 형광 영상을 획득하는 데 널리 활용되고 있다. 앞서 소개한 공초점 현미경도 3차원 영상 획득이 가능하지만 측정 가능한 조직의 두께가 100 um 이하이다. 이는 가시광선 영역의 빛이 생체 조직을 투과하며 산란이 많이 일어나 깊은 조직에 깨끗한 초점을 맺기 어렵기 때문이다. 또한 공초점 현미경은 핀홀에 의해 형광 신호 손실이 있어 밝은 영상을 얻기 위해서는 더 많은 빛 에너지를 전달 해야 하고, 이는 살아 있는 세포 및 조직에 손상을 일으킬 수 있다. 다광자 현미경은 주로 800-900 nm, 경우에 따라서는 1700 nm의 빛을 광원으로 사용하기 때문에 가시광선에 비해 산란이 적게 일어나 더

깊은 곳까지 빛을 전달하여 초점을 맺을 수 있는 장점이 있다. 그 결과 다광자 현미경을 활용하면 500 um - 1000 um 두께의 조직에서도 3차원 형광 영상을 획득할 수 있다. 또한 다광자 현미경의 신호 획득 원리에 따라 핀홀이 필요 없기 때문에, 발생한 형광 빛을 모두 측정할 수 있어 핀홀을 사용하면서 발생하는 단점이 없어진다.

다광자 현미경은 어떤 원리로 형광 신호를 발생하는 것일까? 다광자 현미경은 극초단파 펄스 레이저를 광원으로 사용한다. 펄스는 우리의 심장박동 신호와 같다고 생각하면 된다. 혈액이 심장에 모였다가 나가면서 혈액 순환이 이뤄지는데, 심장은 펌프의 역할을 통해 피를 규칙적으로 내보내고 이를 맥박으로 확인할 수 있다. 마찬가지로 펄스 레이저는 빛 신호가 특정 시간에만 나오는 것을 의미한다. 예를 들어 10Hz의 빛이라고 하면 0.1초당 한 번씩 빛이 나오게 되는 것이다. 극초단파라는 의미는 하나의 빛 펄스의 지속 시간이 매우 짧은 것을 의미한다. 다광자 현미경은 주로 80 Mhz 100 fs 레이저를 활용한다. 이는 초당 8천만 번의 빛 펄스를 발생하는 것을 의미(1.25 x 10<sup>-8</sup> 초마다 한 번의 빛 펄스가 발생하고 하나의 빛 펄스 지속 시간이 100x10<sup>-15</sup>초인 것을 의미한다. 즉, 매우 짧은 시간 동안 순간적으로 빛 펄스가 지속하는 것이다. 에너지는 파워x시간이기 때문에 같은 에너지라 하더라도 시간이 매우 짧으면 파워는 높아지게 된다. 따라서 같은 에너지인 경우 빛 펄스 지속 시간이 펨토초(10<sup>-15</sup>초) 영역이라고 하면 빛의 파워는 매우 크게 높아지게 된다. 이렇게 높은 파워를 갖는 펨토초 레이저로 초점을 만들면 공간적으로 빛이 모여 단위 면적당 매우 높은 파워의 빛이 발생하고, 이렇게 높은 파워의 빛은 확률적으로 비선형 효과를 일으키게 된다.

형광과 관련된 비선형 효과는 다광자 효과이다. 형광의 원리가 빛 에너지를 흡수하여 일부 에너지를 잃고 낮은 에너지를 방출하기 때문에 항상 낮은 빛 에너지(빨간색 영역의 빛)가 발생한다. 반면 다광자 효과는 긴 파장의 빛을 활용하여도 동시에 여러 빛이 전자에 에너지를 전달해 하나의 빛 에너지가 전달하는 것 이상으로 전자를 들뜬 상태를 만들 수 있고 이를 통해 형광 신호를 생성한다.

즉, 낮은 에너지의 빛으로 높은 에너지의 빛을 만들 수 있는 것이다. 이런 다광자 효과는 빛의 파워가 매우 높을 때만 일어나기 때문에 빛이 초점을 형성한 부위에서만 발생해 초점에서만 형광 신호가 나온다. 따라서 초점 외 다른 곳에서 형광 신호가 나오지 않기 때문에 핀홀이 필요 없는 것이다. 이런 원리를 활용해 공초점 현미경과 같이 빛의 초점 위치를 변경하여 2차원 광학 절편 영상을 획득하고 자동 스테이지를 통해 높이를 조절해 3차원 형광 영상을 획득할 수 있다. 긴 파장의 빛을 활용하기 때문에 두꺼운 조직의 깊은 곳 영상 획득이 가능하고, 낮은 에너지의 빛 활용이 가능해 세포 및 조직에 손상을 적게 줄 수 있어 살아 있는 동물의 뇌영상 혹은 오랜 기간 관측하여야 하는 질병 동물 모델의 영상을 획득하는데 활용되고 있다.

극초단파 펄스 레이저를 광원으로 활용하는 현미경은 표지자 없이 특정 물질의 영상을 획득할 수 있는 장점도 존재한다. 다광자 효과의 경우 형광 물질의 신호를 획득하는 데 사용할 수 있지만, 생체 내 존재하는 자가 형광 autofluorescence 신호도 관측할 수 있다. 생체 에너지를 만드는 대사와 관련

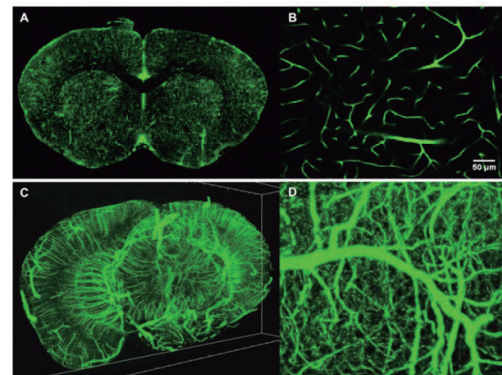


그림 10. — 이광자 현미경으로 측정된 쥐의 3차원 뇌혈관 형광 영상[3]

된 여러 물질은 형광 단백질과 비슷한 구조를 갖고 있다. 따라서 약하지만 빛 에너지를 흡수해서 빛을 방출할 수 있고 이를 자가 형광이라고 부른다. 주로 미토콘드리아와 같이 에너지 생성을 담당하는 물질에서 발생하기 때문에 별도의 염색 없이 자가 형광 영상을 통해 세포의 대사를 측정할 수 있다. 또한, 극초단파 펄스 레이저에 의해 발생하는 비선형 효과 중 물질의 구조와 상호작용하는 2차 및 3차 고조파 생성 second/third harmonic generation이 있다. 이는 물질의 구조에 따라 발생할 수 있는 효과로 2차 고조파는 입사한 빛의 2배 주파수, 3차 고조파는 3배 주파수의 빛을 생성하게 된다. 예를 들어 800 nm 빛을 활용했을 때 2차 고조파가 발생하면 정확히 400 nm이 발생하게 되는 것이다. 이런 2차, 3차 고조파 현상은 생체 물질에서 발생할 수 있다. 콜라겐과 같은 섬유 물질이 대표적인 2차 고조파 생성 물질이다. 따라서 별도의 염색 없이 콜라겐 섬유 분포의 영상을 얻을 수 있고, 이는 암의 발생 및 전이 연구에서 매우 중요한 정보이다. 또한, 신경 세포는 미엘린 myelin이라는 지방층으로 덮여 신경 세포를 보호하며 전기 신호를 빠르게 전달할 수 있는데, 지방이 대표적인 3차 고조파 생성 물질이기 때문에 3차 고조파 영상을 통해 별도의 염색 없이도 뇌 속 신경 세포의 및 신경망의 구조를 영상을 얻을 수 있다. 또한, 이런 고조파 생성 효과는 그래핀과 같이 2차원 물질을 분석하는데도 많이 활용되고 있다.

(4) 광시트 현미경

다광자 현미경은 두꺼운 조직의 3차원 영상을 얻을 수 있지만 래스터 스캐닝을 통해 한 점씩 형광 신호를 측정하여 2차원 영상을 만들어 한 장의 광학 절편 영상을 얻기 때문에 3차원 영상 획득에 오랜 시간이 걸린다는 한계가 있다. 최근 광시트 현미경의 발달로 인해 기존의 공초점 현미경 및 다광자 현미경이 갖고 있던 3차원 영상의 속도 한계를 극복하였다. 이로써 3차원 형광 신호 측정이 빨라져 배아의 발달 연구, 암 연구, 뇌기능 연구 등에 활발히 사용되고 있다. 광시트 현미경의 핵심 원리는 2차원 평면 형태의 빛을 만들어 형광을 여기 excitation시키는 조명으로 활용해 한 번의 촬영으로 한 장의 광학 절편을 측정하는 것이다. 이를 위해 2차원 평면 조명의 방향과 형광 신호를 측정하는 방향이 서로 수직으로 이뤄져 있다.

이 구조는 2차원 평면 조명에서 발생하는 형광 신호만 측정이 가능하고, 조명에 의한 배경 신호는 측정이 되지 않기 때문에 높은 신호 대 잡음비 signal to noise ratio의 형광 영상을 측정할 수 있다. 높은 신호 대 잡음비는 낮은 에너지의 광원 사용이 가능해져 빛에 의한 손상을 최소화할 수 있다. 2차원 평면 조명을 통해 한 장의 광학 절편 영상을 획득하고, 샘플 혹은 광학계를 높이 방향으로 움직여 3차원 영상 획득이 가능하다. 광시트 현미경은 1912년 처음 개념이 제안되었으나 2004년에 이르러 형광 현미경에 적용되었고, 현재는 광시트 현미경이 상용화되었으며 관련한 기술 개발이 지속적으로 이뤄지고 있다. 현재 최신 광시트 현미경은 초당 몇 회의 3차원 영상 측정이 가능하다. 넓은 영역의 3차원 형광 영상을 매우 빠르게 측정해, 배아의 발달 과정, 심장의 움직임, 뇌 전체의 영상 획득 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히 특정 물질에 3차원 상에서 공간적으로 이동을 할 때 광시트 현미경을 활용하면 그 움직임을 파악하기 매우 용이하다.

광시트 현미경의 한계는 시편이 광학적으로 불투명하여 산란이 높으면 정확한 신호를 측정하기 어렵다는 점이다. 산란이 많이 발생하면 2차원의 평면 형태의 빛이 유지되지 않아 고해상도 광학 절편 영상을 얻기 어려워진다. 이를 극복하기 위하여 최근 개발된 조직 투명화 기술과 접목하여 다양한 조직의 생체 기능 및 질병 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 조직 투명화 기술은 조직의 구조와 기능에 관련된 물질들은 유지하면서 산란을 일으킬 수 있는 물질들을 제거하여 투명한 젤리처럼 만드는 기술이다. 이를 활용하면 불투명했던 물질이 투명해지기 때문에 산란으로 인해 발생하는 문제가 사라져 기존의 광시트 현미경을 활용하여 쉽게 형광 영상을 획득할 수 있다.

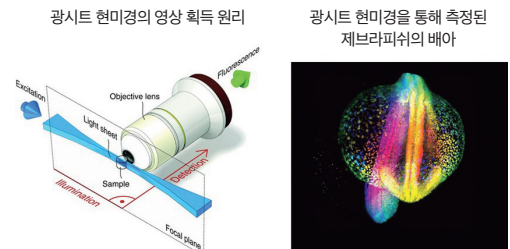


그림 11. — 광시트 현미경의 원리와 예시 @Teledyne, andor

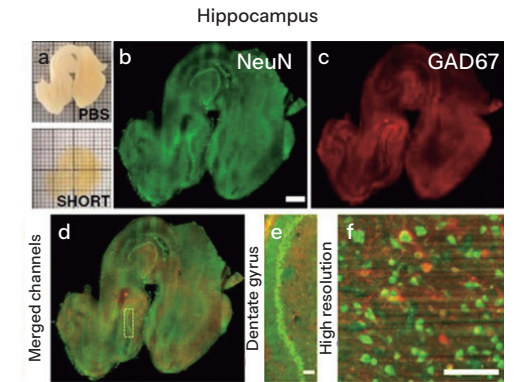


그림 12. — 뇌조직의 투명화 과정 후 광시트 현미경으로 촬영한 해마체 hippocampus의 형광 영상[4]

맺음말

본 연재물에서는 광학 현미경의 기초와 표지자를 활용하는 다양한 형광 현미경에 대해서 살펴봤다. 광학 현미경은 측정하고자 하는 신호에 따라 다양한 원리로 구성될 수 있고, 같은 원리의 현미경이라고 하더라도 시편, 측정 영역, 배율, 해상도, 속도 등 다양한 조건에 의해 다르게 구현될 수 있다. 특히 표지자 중 형광 물질의 원리와 의생명 분야에서의 응용을 다뤘고, 이를 측정하기 위한 여러 형광 현미경을 소개하였다. 소개된 현미경 외에도 더 빠르고 정밀한 형광 영상 측정을 위한 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다. 광학 현미경 2편에서는 표지자를 활용하지 않고 시편을 관측할 수 있는 현미경 종류와 원리를 소개할 예정이다. <sup>KS</sup>

참고문헌

1. Waterhouse et.al., Nature biomedical engineering 3(5), 339-353, 2019
2. Kremers et.al., Journal of Cell Science 124, 157-160, 2011
3. Amato et.al., Frontiers in Neuroanatomy 10, 00031, 2016
4. Pesce et.al., Communications biology 5, 447, 2022



# Natural Sciences

## 정보전달의 총아[1] : 디스플레이 기술의 개화

인류는 언제부터 자신이나 공동체의 삶의 모습을 남기고 싶어 했을까?  
 삶의 한 순간을 정지시켜 이미지로 표현하려 했던 흔적은 역사 속 어느 시기까지 거슬러 올라갈까?  
 지금까지 발굴된 다양한 동굴 벽화로 미뤄 보면 그 시기는 적어도 4~5만 년 이전으로 되돌아간다<sup>1</sup>.

글. 고재현(한림대학교 반도체·디스플레이스쿨 교수) 그림. 윤진상

삼원색을 방출할 수 있는 부하소(subpixel)로 구성되어 있는 게 일반적이다. 이들이 섞이는 비율과 세기가 화소의 색상과 밝기를 결정하고, 이런 화소 수백만 개가 협력해 작동함으로써 우리가 보는 고품질의 영상이 구현된다. 결국 디스플레이의 역사는 피사체를 스캔하고 샘플링해서 화소 단위로 정보를 획득하고 이를 유선 혹은 무선으로 전송한 후, 받은 정보를 바탕으로 피사체의 이미지를 재구성하는 기술을 개발한 역사라 할 수 있다.

2. 'television'은 '멀리라는 뜻 가진 그리스어 'τῆλε'와 시각을 의미하는 라틴어 'visio'의 합성어로, 1900년 러시아 과학자인 콘스탄틴 페르스키(Constantin Persky)가 처음 사용했다.

벽화나 미술 작품이 정적 영상이라면 디스플레이는 움직이는 동적 영상을 구현한다. 움직이는 영상 정보에 대한 욕구는 19세기 후반 벨(Alexander Graham Bell, 1847~1922)의 전화기 발명으로 촉발되었다. 전화기는 전기를 이용한 소리 정보의 원거리 전송을 가능케 했고, 이는 다시 전기를 이용한 영상 정보의 원거리 전송에 대한 기대감을 높였다. 가령 프랑스의 소설가 알베르 로비다(Albert Robida, 1848~1926)는 1883년 펴낸 『20세기 Le vingtième siècle』란 자신의 SF 소설에서 "다양한 프로그램을 선택할 수 있는 대형 스크린 텔레비전 세트, 라디오, 24시간 전 세계 '실시간' 뉴스 보도, 비디오 전화, 대학 텔레비전 강좌, 전화 쇼핑, 빠른 항공 운송, 패스트푸드점, 심지어 유전 공학"<sup>3</sup> 까지 예측함으로써 다가올 20세기의 과학기술에 대한 예리한 통찰력을 보여준 바 있다.

3. A. Fickers, "Television: Histories from Scarcity to Abundance" in Handbook of Communication History (edited by Peter Simonson, Janice Peck, Robert T. Craig and John P. Jackson), published by Routledge: New York (2013), pp. 239-256 에서 재인용.

### 들어가며

여러 감각 기관 중 시각을 통해 취득하는 정보가 압도적인 인간에게 그림 혹은 영상은 정보를 직관적으로 전달하는 대표적 수단으로 활용되어 왔다. 이런 맥락에서 우리는 오늘도 아침에 눈을 뜰 때부터 취침 전까지 스마트폰을 포함한 디스플레이를 손에서 놓지 못하는 생활을 이어가고 있다.

1. A. Brumm 외, "Oldest cave art found in Sulawesi", Sci. Adv. 7, eabd4648 (2021).

디스플레이는 정보를 시각적 형태로 전달하는 전자 소자다. 그 크기는 작은 전자시계부터 100인치가 넘는 대형 TV(tele-vision<sup>2</sup>)에 이르기까지 다양하고, 화면은 보통 수백만 개의 화소(pixel) 배열로 구성된다. 각 화소는 다시 적록청이라는 빛의

동영상을 구현하는 TV가 대중에게 처음 공개된 것은 약 한 세기 전이지만, 지난 세기 디스플레이 기술의 발전은 상전벽해라는 말로는 부족할 정도로 눈부셨다. 디스플레이 기술에 대한 세 편의 원고 중 첫 번째에 해당하는 이 글에서는 인류가 영상에 매혹되어 온 과거로부터 출발해서 20세기 초

발명되었던 기계식 TV의 등장과 쇠퇴에 대해 다룬다. 두 번째 글에서는 음극선관cathode-ray tube, CRT에 기반한 전자식 TV의 등장과 진화, 후퇴를 다루고자 한다. 마지막 글에서는 CRT가 갖는 한계를 극복하고 대면적 디스플레이의 등장을 가능케 한 평판형 디스플레이flat-panel display, FPD 기술의 등장과 기술적 진화, 그리고 디스플레이의 미래에 대해 다룰 예정이다.

**영상 구현의 시작**

벽화나 미술 작품은 그 자리에서 눈으로 직접 감상하는 대상이다. 햇빛이나 주변의 조명이 이를 비추면 염료나 안료의 종류에 따라 가시광 일부 색의 빛이 흡수되고 나머지가 반사됨으로써 우리가 느끼는 그림의 색이 펼쳐진다. 그런데 디스플레이는 한 장소의 영상 정보를 다른 곳으로 전송해 구현하는 기술이다. 현대적 의미의 디스플레이 기술은 20세기 초에 무르익었지만, 영상을 넓게 펼쳐 다수의 사람들이 감상할 수 있는 영상 기술의 역사는 상당히 오래 되었다. 그 시초는 일종의 영상 프로젝터에 해당하는 매직 랜턴 magic lantern일 것이다.

매직 랜턴에 대한 최초의 기록은 1645년 예수회 사제이자 과학자였던 안타나시우스 키르케르Anthanasius Kircher가 남겼다. 그의 한 저서에 실린 [그림 1]을 보면 (비록 광학적으로 문제가 있는 그림이나) 오목 거울의 앞에 놓인 불꽃의 빛을 슬라이드에 비추고 이 빛이 스크린에 영상을 만드는 매직 랜턴의 기본적인 구도가 잘 나타나 있다. 슬라이드는 보통 유리로 만드는데 그림이 그려져 있는 부분으로 빛이 통과하고 나머지 부분은 불투명해서 빛을 차단했다. 매직 랜턴의 최초 발명자로 빛의 파동이론으로 유명한 네덜란드의 하위헌스Christiaan Huygens, 1629~1695가 거론되기도 한다. 그는 특히 [그림 2]에 제시된 것처럼 매직 랜턴에 2~3개의 렌즈를 이용함으로써 더 우수한 품질의 영상을 얻을 수 있었다. 매직 랜턴 초기에는 [그림 1]에서 볼 수 있는 것처럼 무서운 이미지를 띄워서 사람들에게 겁을 주고 교회로 유도하기 위한 종교적, 교육적 수단으로 활용되었지만 18~19세기를 거치며 강의, 엔터테인먼트 등으로 영역이 넓어지며 다양한 목적으로 광범위하게 활용되었다([그림 3] 참조).

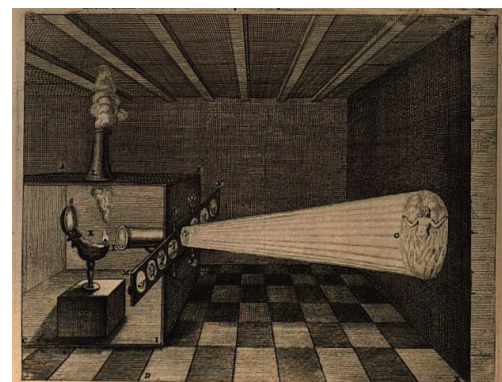


그림 1. ——— 안타나시우스 키르케르의 저서에 수록된 그림으로 매직 랜턴의 개념과 기본 구조를 보여주고 있으나 광학적으로 문제가 있는 그림이다. ©public domain

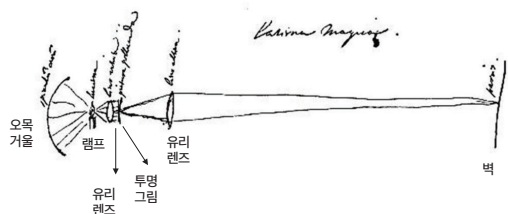
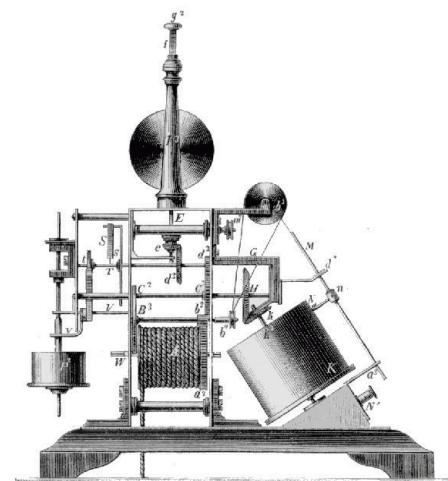


그림 2. ——— 1694년 매직 랜턴의 기본 구조를 보여주는 하위헌스의 스케치 ©public domain



그림 3. ——— 매직 랜턴에 사용된 출처 미상의 종이 슬라이드로, 꼴통에 빠진 소년의 모습이 순차적으로 그려져 있다. ©public domain



Alexander Bain, from the Mech. Mag. p. 101, 1850; Dinglers Journal 117, p. 40, 1850; Zetsche, p. 411-413.

그림 4. ——— 알렉산더 베인이 발명하고 개량한 팩시밀리 머신(1850년).

매직 랜턴은 슬라이드라는 작은 면적 속 그림을 스크린 위에 대면적으로 펼친다는 면에서 한 공간의 영상 정보를 근처 다른 공간으로 확대해 옮긴다는 측면이 있지만, 기본적으로 장거리 영상 정보라는 디스플레이의 조건을 충족할 수는 없었다. 매직 랜턴은 오히려 오늘날 우리가 프로젝션projection 디스플레이라 부르는 기기와 매우 닮아 있고, 디스플레이 시스템의 수신기에 해당한다고 할 수 있다. 영상 정보를 원거리로 송신하는 기술의 초기 아이디어는 19세기 중반 등장한다. 바로 1843년 영국 특허를 취득한 알렉산더 베인Alexander Bain, 1810~1877의 발명품으로, 전선으로 연결되어 동기화된 두 진자의 한쪽에서 획득된 영상 정보가 전선을 타고 다른 쪽으로 이동해 복제된다. 송신기 쪽 진자 밑에 놓인 금속판에는 비전도성 물질로 송신할 패턴이 그려지고, 진자에 연결된 금속 탐침이 표면을 스캔하며 패턴 유무에 따라 전류가 선택적으로 생성되어 수신기로 전송된다. 수신기 진자의 탐침은 송신기 쪽과 동기화되며 기록지 위를 스캔하는데, 종이 위 화학물질은 전류에 반응해 색이 변하기 때문에 송신기 쪽 패턴을 그대로 복제할 수 있다. 말 그대로 오늘날 팩시밀리의 원조 격인 것이다.

비록 상용화되지는 못했으나 베인의 발명품은 디스플레이 기술의 탄생에 필요한 중요한 개념을 제시한다. 바로 피사체를 선의 형태로 스캔해 정보를 취득한다는 개념이다. 오늘날 우리가 래스터 스캔raster scan이라 부르는 방식의 맹아가 이미 19세기 중반 탄생한 셈이다.

비록 상용화되지는 못했으나 베인의 발명품은 디스플레이 기술의 탄생에 필요한 중요한 개념을 제시한다. 바로 피사체를 선의 형태로 스캔해 정보를 취득한다는 개념이다. 오늘날 우리가 래스터 스캔raster scan이라 부르는 방식의 맹아가 이미 19세기 중반 탄생한 셈이다. 하지만 디스플레이는 팩시밀리와는 근본적으로 다르다. 디스플레이는 움직이는 피사체를 스캔하며 실시간으로 위치별 빛의 정보를 감지하고 전달해야 한다. 따라서 빛을 효율적으로 감지하는 물질 혹은 이 물질을 활용한 센서의 개발이 필수적이었다. 이런 맥락에서 1873년 윌로비 스미스Willoughby Smith, 1828~1891가 셀레늄selenium, Se이 빛에 반응해 전기전도도가 변하는 성질이 있다는 사실을 발견한 것<sup>4</sup>은 TV 개발에 있어 획기적 전환점이 된다. 피사체를 스캔해 위치별 밝기를 전기 신호로 변환할 하드웨어적 기반이 마련되었기 때문이다. 1880년 존 페리John Perry, 1850~1920와 윌리엄 에드워드 에어턴W. E. Ayerton, 1847~1908은 저널 <네이처>에 “전기로 본다는 것Seeing by electricity”이라는 제목의 원고를 발표했다<sup>5</sup>. 이 글에서 두 사람은 작은 셀레늄 조각들을 모자이크식으로 배치한 송신기의 개념을 제안한 후, 강한 빛으로 비춰진 피사체가 렌즈를

통해 송신기에 입사되면 셀레늄 조각들이 위치별 광량에 비례하는 전류를 생성할 것이라 보았다. 이 조각들의 신호가 수신기로 전달되면 이를 조합해 2차원 영상을 구현할 수 있다는 것이 이 논문의 핵심 아이디어였다. 페리와 에어턴은 논문에서 수신기에 전달된 전류 신호의 세기에 의해 광량이 조절되는 두 가지 방식을 제안했다. 하나는 자기 바늘이 전류에 반응하도록 함으로써 위치별 빛의 투과율을 바꿀 수 있다는 것이고, 다른 한 방법은 송신기와 동일한 수의 셀레늄 조각을 모자이크처럼 배치한 후 각 조각이 전송되는 전류의 세기에 비례해 빛을 내도록 함으로써 송신기가 포착한 피사체의 빛의 분포를 그대로 흉내내는 것이었다. 두 사람은 “셀레늄에 대한 빛의 효과의 발견은 ‘전기로 본다는 것’의 계획 수립에 필요한 원리를 담고 있다.”라는 문장으로 원고를 마침으로써 몇 년 전 발견된 셀레늄의 광전도 효과의 중요성을 강조했다.

4. Nature, “Effect of Light on Selenium During the Passage of An Electric Current”, 7, 303 (1873).
5. J. Perry and W. E. Ayrton, “Seeing by electric-ity”, Nature, 21, 589 (1880).

19세기 중반 이루어진 여러 발명과 발견으로 인해 디스플레이의 구현에 필요한 피사체 스캔이라는 개념과 이 정보를 전기 신호로 변환할 기반이 마련됨으로써 TV 기술의 구현을 위해 필요한 기술적 요소들이 갖춰지게 된다. 게다가 19세기 말, 사진술과 영화 촬영법이 발달하면서 영상을 멀리 전송하는 기술에 대한 다양한 제안이나 상상력이 덩달아 풍부해진 것도 이 시기다([그림 5] 참조). 그 다음 전개는 당연히 이 요소들에 기반해 TV를 구현하려는 발명가와 공학자들의 시도가 될 것이었다. 그 선두주자는 움직이는 구성 부품을 내장한 기계식 TV였다.

**기계식 TV의 구현**

기계식 TV의 개발과 상용화에 있어 스캐닝 디스크라고도 불리는 님코 디스크Nipkow disk는 가장 중요한 핵심 부품이었다. 1884년 독일의 파울 고틀리프 님코Paul Gottlieb Nipkow, 1860~1940가 발명하고 특허출원한 이 원형 디스크는 [그림 6]에 보이는 것처럼 회전하는 판에 등간격으로 뚫은 구멍이 나선형으로 배치되어 있다. 전송하고자 하는 대상을 렌즈를 이용해 님코 디스크에 투사시키면, 디스크가 회전하며 각 점의 회전선을 따라 대상을 순차적으로 스캔한다. 회전 중심으로

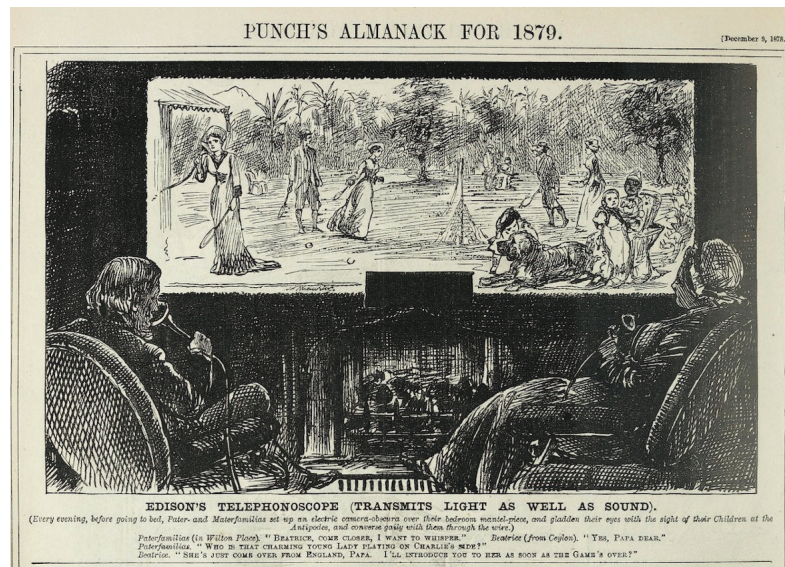


그림 5. ——— 1879년 한 잡지Punch Almanac에 실렸던 미래 기술의 모습을 담은 만화. 대형 디스플레이에 투영된 영상을 두 사람이 감상하며 영상통화를 하고 있다. ©public domain

부터 떨어진 점의 위치나 각도가 모두 다르므로 각 점은 투사된 장면에 대해 자신이 스캔하는 선을 따라 정보를 취하는 것이다. 가령 [그림 6]의 위쪽 그림을 보면 검정 실선으로 둘러싸인 부분에 들어오는 장면을 8개의 구멍이 8개의 선으로 분리해 스캔하게 됨을 알 수 있다. 이때 각 점을 통과한 빛의 세기는 셀레늄과 같은 검출기에 의해 실시간으로 측정되고 전송된다. 대상의 위치별 밝기가 검출기에 동시에 들어오지 않고 순차적으로 감지되기 때문에 광검출기는 여러 조각으로 구분될 필요 없이 하나로 충분했다.

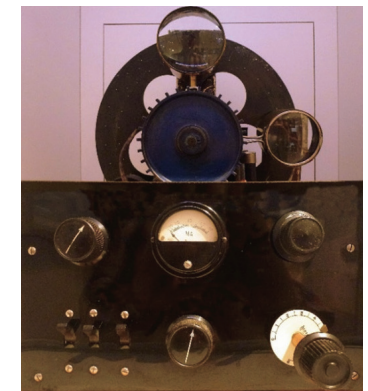
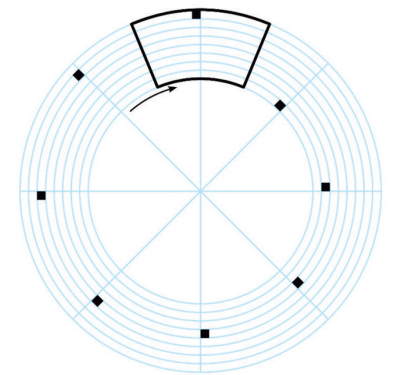


그림 6. ——— 님코 디스크의 개념도(위) 및 1930년대 사용되었던 님코 디스크 기반 TV 수신기(아래). ©CC BY-SA 3.0

TV 수신기에는 송신기의 님코 디스크와 동기화된 또 다른 님코 디스크가 회전을 했다. 송신기에서 전달된 신호는 수신기의 디스크 앞에 배치된 램프에 연결되어 램프의 밝기를 조절한다. 즉, 송신기의 님코 디스크가 스캔한 대상의 위치별 밝기가 그대로 램프에 전달되어 동기화된 밝기를 재현하고 이것이 수신기의 디스크 구멍을 통해 연출되는 것이다. 님코 디스크를 기반으로 한 TV 시스템의 구현을 시도한 가장 중요한 인물은 스코틀랜드 출신 발명가인 존 로지 베어 드 John Logie Baird, 1888~1946였다. 일찍이 다양한 사업에 뛰어 들었던 베어드는 당시 활발히 모색되던 TV 기술의 잠재 가치를 알아본 후 “진정한 텔레비전은 물체의 빛과 그들의 모든 계조와 세부적인 이미지를 실제 관찰자의 눈에 보이는 것처럼 수신 화면에 보이도록 전송하는 것”<sup>6</sup>이라 정의하면서 님코 디스크에 기반한 기계식 TV 개발에 뛰어들었다.

6. D. F. McLean, “Before “True Television”: Investigating John Logie Baird’s 1925 Original Television Apparatus”, Proceedings of the IEEE, 110, 807 (2022).

베어드는 다양한 방식을 시도하다가 송신기와 수신기 모두 님코 디스크로 구현한 기계식 TV를 개발하며 1925년 영국 런던 셀프리지 백화점에서 처음으로 공개 시연을 했다. 당시 시연 영상은 외곽만 인식할 수 있을 정도로 희미하고 조잡했으나, 이를 보기 위해 몰려든 인파로 선풍적인 인기를 끌었다고 한다. 이 행사는 그가 당시 TV 시연을 할 수 있는 유일한 발명가임을 보여준 것이었다. 베어드는 시스템을 개선하며 영상의 품질을 높이기 위해 많은 노력을 기울였다. 당시 피사체의 이미지를 선명히 만들기 위해 매우 강한 조명을

베어드는 당시 활발히 모색되던 TV 기술의 잠재 가치를 알아본 후 “진정한 텔레비전은 물체의 빛과 그들의 모든 계조와 세부적인 이미지를 실제 관찰자의 눈에 보이는 것처럼 수신 화면에 보이도록 전송하는 것”이라 정의하면서 님코 디스크에 기반한 기계식 TV 개발에 뛰어들었다.



그림 7. ——— 1925년 님코 디스크에 기반한 TV 송신기 앞에서 영상이 뚜렷한 얼굴 모양의 인형을 들고 있는 베어드의 모습. ©public domain

비춰주거나 [그림 7]에 보이는 인형처럼 명암 차이가 뚜렷한 대상에 대해 영상 정보를 획득해 중계하곤 했다. 1926년 1월, 그는 영국 왕립연구소에서 움직이는 얼굴 영상을 전파를 이용해 중계하는 TV 시연을 진행했다. 송신기에서 획득된 영상 정보는 라디오 무선 신호를 통해 수신기로 전달되었고 이 신호가 네온 램프의 밝기를 조절한 후 두 번째 님코 디스크를 통과하며 영상으로 구현되었다. 영상의 조잡함과 별개로 이 사건은 보통 세계 최초의 공개 TV 시연으로 간주되고 있다. 당시 저널 <네이처>에 실린 러셀의 평가는 다음과 같다.

*“물론 결과는 완벽하지 않았다. 구현된 이미지는 좋은 영화 필름으로 만든 이미지와 비교할 수 없었다. 하지만 물체와 영상이 닮았음은 분명했고 모든 동작이 절대적으로 충실하고 완벽하게 재현되었다. 우리가 실제 텔레비전을 본 것은 이번이 처음이다. 그리고 우리가 아는 한 베어드 씨는 이 놀라운 업적을 달성한 최초의 사람이다.”<sup>7</sup>*

베어드는 자신의 TV 회사를 설립해 상용화를 시도했고 영국과 미국을 포함한 몇 나라에서 1930년 전후로 일부 상용

방송이 이루어지기도 했다. 그러나 님코 디스크에 기반한 기계식 TV는 기술적 관점에서 태생적 한계를 가질 수밖에 없었다. 님코 디스크는 회전하는 일부 면적을 통해 대상을 스캔하고 동일한 일부 영역으로 대상을 재현하는 방식이어서 영상이 구현되는 면적이 매우 작았고 주로 얼굴이나 어깨를 커버하는 정도의 장면을 담을 수밖에 없었다. 이로 인해 주사선에 해당하는 구멍의 수도 제한적이었는데, 가령 1926년 왕립연구소에서 시연한 베어드의 디스크에는 30개의 구멍이 뚫려 있었다. 오늘날로 비유하면 주사선의 수가 30개에 불과해 대상의 세부적인 모습을 충실하게 재현하는 것이 매우 힘들었다. 게다가 송신기 쪽에서 영상을 스캔하거나 수신기 쪽에서 램프의 빛을 님코 디스크에 보낼 때에도 입사되는 빛의 극히 일부만 디스크 구멍을 통과해야 했기에, 매우 강한 광원이 필요하거나 영상이 흐려서 영상 내 형상을 정확히 인지하기 힘들었으며 깜박거림 현상도 매우 심했다.<sup>8</sup>


7. R. W. Burns, [Television, an international history of the formative years] (The Institution of Engineering and Technology, 1998)에서 재인용.

8. 유튜브에서 ‘Nipkow disk’를 검색하면 이 디스크에 기반한 기계식 TV가 구현하는 영상 사례들을 확인해 볼 수 있다.

이후 미국의 벨 전화 연구소Bell Telephone Laboratories에서는 상당한 자금과 인력을 기반으로 기계식 TV의 기술적 수준을 한계까지 밀어붙이려는 노력이 있었다. 기록에 의하면 최소한 100명 이상의 과학자와 공학자들이 이 개발 과제에 기여했다고 한다. 1927년 벨 연구소가 구현한 기계식 TV에는 50개의 구멍을 가진 디스크가 사용되었고 (이는 50개의 주사선에 해당된다) 초당 18 프레임의 영상이 구현되었다. 수신부의 경우 전통적인 님코 디스크에 기반한 2인치급 소형 화면과 네온 램프를 적절히 가공하고 대면적으로 배치해 60x75 cm<sup>2</sup>의 화면을 구현한, 당시로서는 최대의 디스플레이를 구현하는 두 가지 방식을 선보였다. 게다가 일부 나라에서는 기계식 TV의 주사선 수를 180개까지 올려 해상도를 높인 서비스를 제공하기도 했다.

기계식 TV는 베어드로 대표되듯이 한 명 혹은 소수의 발명가가 아이디어와 집념을 갖고 개발하고 상용화를 밀어붙인 대표적 사례에 해당되지만, 그 결과는 오히려 기계식 TV가 상용화되기에는 한계가 매우 뚜렷하다는 점을 분명히 드러냈다. 고품질 TV 시스템의 개발은 이미 개별 발명가들의 역량이나 아이디어 구현 차원을 넘어 거대한 자본과 다양한 영역의 엔지니어들이 협업을 통해 완성해야 하는 종합 공학의 성격을 가진다는 점이 뚜렷해졌다. 움직이는 부품이 제거되고 송신기와 수신기 모두 전자공학적 부품들로 구성되는 ‘전체 전자식 TV’-electronic TV’의 개발이야말로 시스템으로서의 TV 기술의 완성 및 상용화로 이어질 터였다. 미국의 대형 회사들을 중심으로 전자식 TV의 개발과 상용화가 진전되던 시기는 기계식 TV의 쇠퇴와 맞물려 있었다.

그럼에도 불구하고 디스플레이의 역사에서 기계식 TV가 남긴 족적의 의미는 결코 작지 않았다. 송신기-전송-수신기로 구성되는 디스플레이 시스템에 대한 구체적인 체계적인 이해, 피사체를 화소 단위로 나누어 스캔하고 실시간으로 전송한다는 개념, 이를 다시 인간의 시각을 속일 정도의 빠르기로 재현하는 과정에서 쌓인 기술적 경험은 전자식 TV 개발과 상용화에 소중한 발판이 되었다. 그렇지만 기계식

TV의 시대가 저물고 나서야 음극선관 기반의 전자식 TV가 등장한 것은 아니었다. 오히려 두 기술의 맹아는 20세기 초 병렬적으로 싹트며 발전해 온 측면이 강하다. 음극선관 방식의 전자식 TV의 가능성을 본격적으로 제기한 사람은 영국의 공학자 캠벨 스윈턴A.A. Campbell Swinton, 1863~1930이었다. 후속의 글에서는 스윈턴이 저널 <네이처>에 제시한 아이디어<sup>9</sup>로부터 출발해 음극선관에 기반한 전자식 TV의 개화와 쇠퇴에 대해 다룰 것이다. 

9. A. A. Campbell Swinton, “Distant Electric Vision”, Nature 78, 151 (1908).

## 단백질 구조 및 디자인 연구에서의 인공지능 활용

2020년 딥마인드의 인공지능 알파폴드(AlphaFold)가 오랫동안 난제로 여겨지던 단백질 구조 예측 문제, 즉 아미노산 서열로부터 단백질의 3차원 구조를 알아내는 문제를 풀었다는 것은 인공지능 기술의 큰 성취로 받아들여졌고 많은 관심을 불러일으켰다.

글: 남궁석(충북대학교 생물학과 강사 - SLMS 대표) 그림: LEEGOC(리곡)



### 알파폴드, 그 이후

알파폴드가 등장한지 어언 3년이 가까워지고 있는 2023년 현재, 과연 알파폴드가 불러일으킨 '단백질 구조 예측 혁명'은 구조생물학, 더 나아가 생명과학과 생명공학에 어떤 영향을 미쳤을까? 오랫동안 단백질 구조를 풀고, 이를 이용한 연구를 한 입장에서 과연 알파폴드라는 기술이 어떤 파급효과를 가져왔는지를 알아보려고 한다.

### 알파폴드는 구조생물학 연구를 어떻게 바꾸었는가?

먼저 알파폴드의 유용성을 제일 먼저 실감한 사람들은 실험적인 방법을 통하여 단백질 구조를 풀던 구조생물학자였다.

그전까지 단백질 구조를 푸는 표준적인 방법이던 X선 결정학(X-ray Crystallography)은 단백질을 결정으로 만들고, 결정에

강한 X선을 쬐어, 결정 안의 단백질 원자에 충돌하여 발생하는 회절(Diffraction) 정보를 분석하여 이를 단백질 내의 전자 분포를 추측하는 방법이었다. 단백질 결정에서 형성된 X선 회절 정보는 단백질의 구조에 대한 정보를 가지고 있으나, 이 정보는 불완전한 정보이다. 어떤 물체가 빛을 받아 형성된 그림자는 분명히 어떤 물체의 구조에 대한 정보를 가지고 있지만, 완벽한 정보를 가지고 있지 않은 것처럼, X선 회절의 정보는 파장의 진폭(Amplitude) 정보는 있지만 위상(Phase)에 대한 정보는 결여되어 있다. 그러나 단백질의 구조를 재구성하려면 진폭과 위상에 대한 정보가 다 필요하며, 이러한 위상에 대한 정보를 구하는 것은 전통적으로 단백질 결정학에서 가장 어려운 문제로 알려져 있었다.

현재까지 X선 회절의 위상 정보를 구하기 위해서는 단백질에 X선을 좀 더 효율적으로 튕겨내는 중금속을 넣어 나오는 회절 패턴과 일반적인 단백질의 회절 패턴을 비교하여 그 차이를 분석하고 이를 이용하여 위상 정보를 유추하는 방법을 이용했다. 그러나 이 방법은 그리 쉽지 않아, 단백질 결정을 만들고 회절 데이터를 얻은 후에도 위상을 얻지 못하여 구조를 풀지 못하는 경우가 종종 있었다.

만약 구조를 풀고 싶은 단백질과 구조가 유사한 단백질이 있는 경우라면, 이를 이용해 위상을 계산하여 간단히 전자 밀도를 얻을 수 있다. 이를 분자치환법(Molecular Replacement)이라고 부른다. 만약 우리가 풀고 싶은 단백질의 구조 모델(단백질의 전체가 아닌 일부라도 된다면)이 있으면 이를 '열쇠'로 이용하여 X선 회절 정보의 위상을 계산할 수 있는 것이다. 만약 규명하려는 단백질과 구조가 매우 유사한 단백질의 구조가 풀렸다면, 이 구조를 이용하여 비교적 간단하게 위상을 계산할 수 있다. 효량을 한 번도 본 적이 없지만 모양이 어떻게 생겼는지 알고 있다면, 효량이 그림자를 보고 모양의 모양을 모델로 이용하여 효량의 생김새를 추측하는 것과 비슷하다. 그러나 이미 규명된 단백질과 유사한 구조의 단백질이 아닌 경우 이러한 방법을 사용할 수는 없다.

이 상황에서 알파폴드가 등장하였고, 알파폴드로 예측된 모델은 정확도가 충분히 높기 때문에, 이를 이용하여 분자치환법으로 위상을 얻을 수 있었다. 결정의 회절 데이터까지 얻었지만 위상 결정에 실패하여 구조를 풀지 못했던 회절

데이터를 이용하여 알파폴드로 만든 모델로 바로 구조를 풀었다는 사례들이 속속 등장하였다. 알파폴드의 등장은 X선 결정학에서 가장 어려운 부분이었던 위상 계산 문제를 아주 손쉽게 극복하는 수단을 제공해 준 셈이다.

최근 구조생물학의 대세가 된 초저온전자현미경 Cryo-Electron Microscopy, Cryo-EM 등의 방법으로 단백질의 구조를 푸는 경우에도 알파폴드는 매우 유용하게 사용되기 시작하였다. 초저온 전자현미경으로 단백질 구조를 푸는 작업은 전자현미경으로 관찰된 단백질 입자의 이미지로부터 단백질의 윤곽을 구축하고, 여기에 원자 모델을 구성하는 일이다. 만약 단백질 입자의 윤곽이 고해상도로 형성되는 경우에는 그리 어렵지 않게 정확한 모델을 끼워 맞출 수 있지만, 그렇지 않은 경우 정확한 모델을 만드는 데 매우 많은 시간과 노력이 필요하다. 그러나 알파폴드를 이용하여 단백질 구조에 대한 모델을 만들 수 있다면, 이를 초저온전자현미경으로 만든 윤곽에 매우 손쉽게 끼워 맞출 수 있다.

결론적으로 알파폴드는 좋은 ‘초기 가설’이 되는 단백질 구조 모델을 제공하는 셈이다. 이전에는 실험 데이터를 기반으로 단백질 구조를 구축했다면, 알파폴드 시대에는 알파폴드가 미리 예측한 단백질 구조 모델로부터 시작하여, 이를 실험적 증거로 검증하는 형식으로 구조생물학의 패러다임이 바뀐 셈이다.

여러 가지 실험 방법이 총동원되어 기존에는 엄두도 내지 못했던 세포 내의 거대 구조 복합체의 구조가 밝혀진 사례도 있다. 그 대표적인 사례는 세포 내에서 가장 큰 단백질 복합체인 핵공 복합체 Nuclear Pore Complex다. 핵공 복합체는 세포 내의 핵과 세포질 간의 물질을 교환하는 일종의 통게이트와 같은 역할을 하는 구조물이다. 세포 내에 있는 단백질 구조물 중에서 가장 크며, 약 30종류의 단백질 약 1,000개에 의해 구성되어 있으며, 분자량은 무려 1억 2천만 포도당의 분자량은 180, 일반적인 단백질은 1만에서 10만 정도의 분자량이다에 달한다. 독일의 막스 플랑크 생물물리학 연구소의 연구진들은 세포 내 핵공 복합체의 전체적인 윤곽을 저온 전자 토모그래피 Cryo-Electron Tomography, Cryo-ET라는 실험 기술로 파악한 다음, 30종류의 핵공 단백질 구성 요소를 알파폴드로 예측한 다음, Cryo-ET로 알아낸 윤곽에 끼워 맞추어

핵공 복합체 모델을 구성하였다. 거대한 퍼즐의 윤곽에 알파폴드로 예측한 부품들을 끼워 넣는 것과 비슷한 일이다. 이렇게 구축된 핵공 복합체 모델은 현재까지 구축된 핵공 복합체의 모델 중 가장 정교하다. 이렇게 알파폴드와 실험 구조생물학의 기술들은 함께 단백질 구조를 푸는 데 같이 어우러져 사용되고 있다.

### 단백질의 상호작용의 분석

세포 내에 존재하는 단백질은 대개 홀로 행동하지 않는다. 같은 종류의 단백질 가닥끼리 복합체를 이루거나, 혹은 다른 종류의 단백질 가닥이 만나서 복합체를 이루어 세포 내에서 존재하고 작동한다. 자동차 같은 복잡한 기계는 기계를 구성하는 수많은 부품이 모여서 작동하고, 이러한 부품들 사이의 상호작용이 바로 자동차를 움직이게 하는 메커니즘이 되는 것처럼, 세포 내에 존재하는 단백질 간의 상호작용을 아는 것은 바로 생명현상의 본질을 파악하는 중요한 단계이다.

그렇다면 알파폴드는 단백질 상호 작용을 예측할 수 있는가? 애초에 알파폴드가 개발될 때는 단백질 상호작용의 예측을 염두에 두고 제작되지 않았다. 그러나 알파폴드가 공개된 후 알파폴드를 테스트하던 연구자들은 서로 결합하는 것으로 알려진 두 개의 단백질의 아미노산 서열을 마치 하나의 단백질인 것처럼 이어 붙여 구조를 예측하면, 단백질의 결합 구조를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 발견했다. 이후 딥마인드는 알파폴드 초기 버전이 나온 이후 이를 업데이트하여 단백질 복합체 구조를 보다 정확히 예측할 수 있는 보완 버전을 만들었다.

그렇다면 어떻게 알파폴드는 애초에 의도하지 않았던 단백질 상호작용을 예측할 수 있을까? 이것은 알파폴드가 작동하는 기본 원리와 관련되어 있다. 알파폴드는 단백질의 구조를 결정하는 아미노산 사이의 상호작용을 단백질 진화 정보를 통해 유추한다. 서로 다른 진화 경로를 걸어온 비슷한 단백질은 아미노산 서열이 달라도 거의 유사한 구조를 유지해야 한다. 단백질을 구성하는 아미노산 서열이 달라져도 같은 구조를 유지하기 위해서는 단백질 구조 내에서 서로 접하는 아미노산들은 진화 과정에서 특수한 관계를 가진다.

**세포 내에 존재하는 단백질은 대개 홀로 행동하지 않는다. 같은 종류의 단백질 가닥끼리 복합체를 이루거나, 혹은 다른 종류의 단백질 가닥이 만나서 복합체를 이루어 세포 내에서 존재하고 작동한다.**

가령 어떤 단백질의 20번째 아미노산인양성 전하를 가진 글루탐산과 81번째 아미노산인양성 전하를 가진 라이신이 서로 이온 결합으로 상호작용하고 있다면, 진화 과정 중에서 글루탐산이 아스파르트산과 같은 다른 아미노산으로 변화한다면, 이와 상호작용하는 아미노산인 81번째 라이신 역시 상호작용이 그대로 유지될 수 있도록 다른 아미노산으로 바뀌어야 한다는 것이다. 이렇게 진화 과정 사이에서 서로 같이 변하는 공변화 Covariation 라고 칭한다. 아미노산들은 단백질의 3차원 구조를 암시하는 정보이며, 알파폴드를 포함한 대부분의 단백질 구조 예측 알고리즘은 이러한 단백질 진화 정보 속에 숨겨진 단백질의 3차원 구조를 이용하여 구조를 예측한다.

이러한 아미노산 간의 공변화 관계는 하나의 단백질 내부에서만 존재하는 것이 아닌, 세포 내에서 서로 결합하는 다른 단백질 사이에서도 존재하게 된다. 이러한 공변화 정보를 이용하여 단백질의 구조를 예측하는 알파폴드는 서로 같이 진화해 온 단백질 간의 상호작용 역시 비교적 정확히 예측할 수 있는 것이다.

많은 연구자가 알파폴드의 ‘단백질 상호 작용 예측’ 기능을 이용하여 특정한 단백질끼리 상호작용하는지를 미리 테스트하기 시작했고, 이러한 테스트는 실험으로 검증되기 시작하였다. 기존에 어떤 단백질이 상호작용하는지를 알아보기 위해서는 여러 가지 번거로운 실험이 필요했던 것에 비해서, 단백질 간의 상호작용을 컴퓨터에서 예측할 수 있다는 것은

매우 강력한 파급효과를 가져왔다. 단백질 여러 개로 구성된 단백질 복합체 역시, 하나 하나씩 상호작용을 예측하여 구조를 예측할 수 있다는 것은 매우 큰 의미를 가진다.

**현존하는 인공지능 기반의 단백질 구조 예측 방법의 한계는 무엇인가?**

인공지능 기반의 단백질 구조 예측 알고리즘은 이전의 물리 기반 또는 상동 구조 기반의 알고리즘에 비해서 매우 정확한 단백질 구조를 예측한다. 그러나 이들이 아직 극복하지 못한 한계점은 존재한다. 이 중 하나는 단백질이 가질 수 있는 여러 개의 구조 상태를 예측하는 것이다. 많은 단백질은 상황에 따라서 구조가 변화하며, 이러한 것은 해당 단백질의 기능에 매우 큰 영향을 미친다. 가령 혈액 내에서 산소를 결합하여 운반하는 단백질인 헤모글로빈 Hemoglobin은 산소가 결합한 상태와 그렇지 않은 상태의 구조가 바뀌며, 이러한 구조의 변화가 혈액 중에서 산소를 운반하는 성질과 직접적인 관계가 있다. 세포 밖의 신호를 받아들여서 세포 안으로 전달하는 주된 단백질인 G단백질 연계 수용체 GPCR는 우리 몸 속에 800종이 있으며, 이들은 수많은 약물의 표적이 되는데, 이들 역시 인지하는 물질에 결합하여 활성화되었을 때와 비활성화된 상태의 구조가 서로 다르다.

그러나 현존하는 단백질 구조 예측 방법은 단백질 구조 데이터베이스에 올라와 있는 여러 가지 상태의 단백질 구조를 물리적인 방법이 아닌 뉴럴 네트워크에 의해서 참고하여 구조를 예측하므로, 이로 인해 예측되는 구조는 세포 내에서 가질 수 있는 상태 중의 한 종류 중 더 많은 구조의 예가 데이터베이스에 올라와 있는 상태, 혹은 그 중간 상태의 하나로 예측되어 버린다. 이러한 상황은 단백질이 여러 가지 상황에서 어떻게 구조를 변화시키면서 생물학적 기능을 수행하는지를 구조 예측으로 알기 어렵다는 한계를 보여준다.

또 다른 한계라면, 현재의 구조 예측은 단백질 가닥의 구조만을 예측할 수 있으며, 단백질과 상호작용할 수 있는 수많은 생체 물질당, DNA, RNA, 여러 가지 대사물질 등과의 상호작용을 예측할 수 없다는 것이다. 많은 단백질은 이러한 단백질 이외의 물질과 상호작용하면서 생명 현상에 참여하는데, 이러한 것의 예측은 현재의 단백질 구조 예측 방법에서 제공되고 있지 않다. 물론 단백질 이외의 물질 간 상호작용을 예측

하는 방법들도 개발되고는 있지만, 아직 현재의 단백질 구조 예측 방법론처럼 정확하지는 않다.

결국 이러한 문제는 인공지능 기반의 구조 예측 알고리즘은 현재까지 실험적으로 규명된 구조 정보에 기반한 예측이며, 단백질과 여러 생체 물질의 물리적인 특성은 감안하지 않기에 생기는 한계인 셈이다.

결론적으로 현재 존재하는 단백질 구조 예측 방법은 분명히 구조생물학자 및 단백질 구조의 이용자인 생물학자들에게 큰 혁신을 가져오긴 했지만, 아직 실험적인 구조 규명이 전혀 필요 없을 정도는 아니다. 구조생물학자가 아닌 많은 생물학자는 '알파폴드가 등장한 이후 단백질 구조를 실험적으로 규명하는 구조생물학자는 이제 할 일이 없어지는 것이 아닐까'하는 생각을 하곤 하지만, 아직 실험적인 구조 규명이 필요한 분야는 많이 남아 있다. 설령 이러한 예측이 발전하여 지금 한계로 지적되는 부분에서도 비교적 정확한 예측이 가능하게 되는 시점이 오더라도 이러한 예측을 실험적으로 확인해야 할 필요성은 존재한다.

**알파폴드는 과연 신약 개발에 큰 보탬이 되는가?**

알파폴드가 등장한 이후 알파폴드가 신약 개발의 게임 체인저가 될 것이라는 류의 기사가 다수 등장했다. 오랫동안 세기의 난제로 남아 있던 단백질 구조 예측 문제를 AI의 힘으로 하루아침에 해결했으므로 이제 신약 개발 역시 이에 비견할 속도로 빨라질 것이라는 류의 이야기이다. 그러나 실제 신약 개발의 현장을 보면 상당한 과장이 들어 있음을 알 수 있다.

신약 개발은 여러 가지 조건을 최적화하는 문제로서, 약물의 표적이 되는 단백질의 구조는 신약 개발에 필요한 중요한 정보이긴 하지만, 이것이 오늘날 신약 개발의 병목 지점이라고 보기는 힘들다. 즉, 특정한 표적 단백질에 결합하여 이를 저해하는 물질을 찾는 단계는 신약 개발의 첫 단계에 불과하고, 신약 개발에서 정말 많은 시간과 비용이 소모되는 단계는 가장 후반부인 개발된 신약 후보물질이 과연 인체에서 효과를 발휘하는지, 독성이나 부작용은 없는지 등을 인간을 대상으로 확인하는 임상 시험 단계이다.

그리고 현행의 단백질 구조 예측 방법으로 예측된 단백질 구조는 이전의 예측 방법에 비해서 정확도가 대폭 향상되기는 했지만, 신약 개발에 그대로 사용하기에는 많은 한계가 있다. 단백질 구조는 약물과 결합하는 상태에서는 미세한 구조의 변화를 일으키고, 이러한 미세한 변화는 약물이 단백질을 결합하는지에 큰 영향을 미친다. 이러한 약물에 의한 단백질 구조의 변화는 현재의 인공지능 기반의 구조 예측 방법만으로 쉽게 예측하기 힘들다. 실제로 알파폴드로 예측된 단백질 구조가 화합물의 결합을 예측하는 데 그다지 최적이 아니라는 연구 결과도 나왔다. 알파폴드에 의해서 예측된 단백질 구조나 실험으로 결정된 단백질 구조를 이용하여 화합물이 어떻게 단백질에 결합하는지를 테스트한 결과, 알파폴드로 예측한 단백질 구조는 화합물이 붙어 있지 않은 상태로 실험으로 결정된 단백질 구조와 비슷한 정확도를 기록했다. 문제는 화합물이 붙어 있는 상태에서 실험으로 결정된 단백질 구조는 다른 두 경우보다 훨씬 높은 정확도를 기록했다는 것이다. 약물이 붙게 되면 단백질 구조가 미세하게 달라지는 것 때문에 알파폴드로 예측한 구조는 생각만큼 약물 탐색에 유용하지는 않다는 것을 의미한다.

그러나 이러한 단백질 구조 예측 기술을 기반으로 신약 개발에 도전하는 시도는 계속 이어지고 있다. 딥마인드의 창립자인 데미스 허사비스는 2021년 인공지능 기술을 기반으로 신약을 개발하려는 구글 산하의 스타트업인 '이소모픽 랩

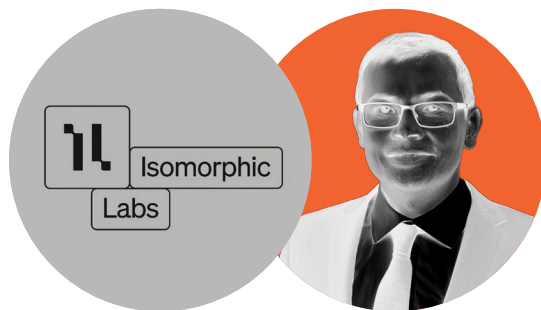


그림 1. ——— 구글 딥마인드 창립자이자 CEO 데미스 허사비스. ©Wikipedia

Isomorphic Lab'을 설립하였다. 이들이 구체적으로 어떤 방법론으로 신약을 개발할지는 아직 확실하지 않다. 분명한 것은 알파폴드를 중심으로 한 인공지능 기술이 중요한 역할을 할 것이라는 정도이다.

**단백질 구조 예측은 우리의 미래를 어떻게 바꿀 것인가?**

분명한 것은 정확한 단백질 구조 예측은 당장의 생명과학 연구의 속도를 증가시키는 혁신적인 발전임에는 분명하지만, 이러한 발전이 어떻게 신약 개발과 같이 대중이 체감할 수 있는 혁신으로 이어질지는 조금 기다려 보아야 한다는 것이다. 흥미롭게도 단백질 구조 예측의 발전은, 단백질 구조 예측이 가능해지면 용이해질 것이라 여겨졌던 소분자 신약 개발 같은 분야보다, 오히려 기존에는 기대하지 않았던 새로운 응용 분야에서 먼저 가시적인 성과를 내고 있다.

그 중의 하나가 '단백질 디자인(Protein Design)'이다. 단백질 디자인은 간단하게 말하면 아미노산 서열로부터 단백질 3차원 구조를 예측하는 구조 예측 과정의 역반응으로, 특정한 단백질 구조를 만들 수 있는 아미노산 서열을 예측하는 방법이다. 이전에는 단백질 구조 예측 자체가 어려웠으므로, 구조 예측의 역함수인 단백질 디자인 역시 정확하게 하지 못했다. 그러나 단백질 구조 예측이 정확해진 지금은 특정한 구조를 가진 단백질을 만들 수 있는 아미노산의 서열을 찾아내는 일 자체가 매우 간단해졌다.

게다가 최근 발전한 이미지 생성 인공지능의 발전과 더불어, 이 원리를 단백질에 적용하여 자연계에는 존재할 법하지만, 실제로 발견되지 않는 인공 단백질의 구조를 생성하는 방법들도 등장하였다. 이러한 기술들이 접목되어 자연계에 존재하지 않았던 구조를 가진 전혀 새로운 단백질을 디자인하는 기술들 역시 등장하였다. 단백질은 생명의 기본 단위인 세포 속에서 '부품'으로 작용한다. 그런데 인간이 진화 과정을 뛰어넘어 자연계에 존재하지 않는 단백질을 디자인하여 만들고, 여기에 기능을 붙여넣을 수 있게 되었다는 것은 매우 중요한 의미를 가진다. 그동안의 '유전공학' 기술은 결국 자연계의 생물이 가진 유전자를 약간 뜯어고치거나 오타를 수정하는 정도의 수준이었다면, 단백질 디자인은 생명체라는 텍스트에서 '문장'의 역할을 하는 단백질을 인공적으로 만들 수 있는 기술인 셈이다.

이러한 기술이 단백질 구조 예측의 발전으로 매우 용이하게 수행될 정도로 발전하였다는 것은 어떤 의미일까? 인류는 드디어 생명의 언어를 문장 단위로 쓸 수 있게 되었다는 것을 의미한다. 자연계에 존재하는 단백질 정도를 겨우 다룰 수 있던 인류가, 원하는 특성을 가진 단백질을 스스로 만들어 낼 수 있게 된 순간은 마치 1950년대 트랜지스터가 발명된 순간과 비슷하다. 트랜지스터 발명 이후 전자공학이 급속도로 발전하여 21세기 IT 문명의 근간이 된 것과 마찬가지로 생명의 기본 부품인 단백질을 자유자재로 만들어 낼 수 있게 된 이후 세상의 변화 속도는 엄청나게 빨라질 것이다. <sup>1)2)</sup>

**참고문헌**

1. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., ... & Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. Nature, 596(7873), 583-589.
2. Callaway, E. (2022). What's next for the AI protein-folding revolution. Nature, 604, 234-238.
3. Mosalaganti, S., Obarska-Kosinska, A., Siggel, M., Taniguchi, R., Turoňová, B., Zimmerli, C. E., ... & Beck, M. (2022). AI-based structure prediction empowers integrative structural analysis of human nuclear pores. Science, 376(6598), eabm9506.
4. Evans, R., O'Neill, M., Pritzel, A., Antropova, N., Senior, A., Green, T., ... & Hassabis, D. (2021). Protein complex prediction with AlphaFold-Multimer. biorxiv, 2021-10.
5. Watson, J. L., Juergens, D., Bennett, N. R., Trippe, B. L., Yim, J., Eisenach, H. E., ... & Baker, D. (2023). De novo design of protein structure and function with RFdiffusion. Nature, 1-3



# Transdisciplinary

## [SF와 나[3]] 삼체와 나

삼체 문제三體問題, three-body problem는 세 개의 물체 간에 작용하는 중력과

그로 인한 움직임을 다루는 고전역학 문제이다.

그 발단은 태양·지구·달 세 천체의 궤도에 대한 물음이었다.

글. 한정훈(성균관대학교 물리학과 교수, 전)HORIZON 편집위원('19.03.-'21.08.)) 그림. 네르(ne\_reu)

인간관계의 혼란스러움 역시 시작은 삼각관계이다. 하지만, 푸앵카레가 내놓은 우울한 증명 이후에도 덜 일반적인 특수 해에 대한 연구는 계속 이어져 왔다. 인간사에서도 모든 삼각관계를 단번에 해결할 방법은 없지만, 개별적인 삼각관계를 하나씩 해결할 방법은 종종 찾을 수 있다는 뜻으로 해석하면 푸앵카레의 증명 이후 이어진 수학자들의 노력이 곧 절망 속에서도 희망을 바랄 이유가 있다는 의미로 전달된다.

소설 『삼체』의 작가 류츠신은 삼체 문제의 일반해가 없다는 증명에 자연스럽게 뒤따를, 절망을 넘어서 희망을 전달하고 싶은 마음으로 이 책을 쓴 것 같다. 우주 어느 곳에는 광속 우주선을 만들고 항성 간 여행을 해외 여행하듯 할 수 있는, 세 개의 태양을 가진 행성에 사는 우주인들이 있다. 세 개의 태양이 만들어내는 궤도의 혼돈이 행성에는 극심한 기후 혼돈으로 이어지고 생존을 위협하는 가장 절실한 문제이기 에 이들을 삼체인이라고 부른다. 양성자 하나에 행성 하나가 가진 지식을 전부 새겨 넣을 정도로 경이로운 과학기술 수준을 갖고 있지만, 정작 세 개의 태양이 불규칙하게 뜨고 지는 혼돈스런 환경은 제어할 바를 몰랐다. 태양들의 위치와 관계에 따라 자기 행성의 문명은 멸망하고 재생되는 과정이 반복되는 냉혹한 환경 속에서 삼체인들은 오직 생존을 위해 감정을 최대한 배제하고 개미나 꿀벌처럼 종족 보존을

아이작 뉴턴은 그의 저서 『프린키피아』에서 세 개의 물체가 중력을 주고 받으며 움직이는 경우에 대해 다루었다. 이후 프랑스의 수학자 장 르 롱 달랑베르와 알렉시스 클레로 Alexis Clairaut는 적절한 근사를 이용한 삼체 문제의 해결법에 관한 논문을 1747년 프랑스 과학 아카데미에서 발표하였다. 피에르시몽 라플라스와 조제프루이 라그랑주 등도 삼체 문제를 연구하였다. 드디어 1890년에 앙리 푸앵카레는 삼체 문제의 일반해를 구하는 것은 불가능하다는 것을 증명하였는데, 이는 훗날 혼돈 이론의 모태가 되었다나무위키 정리 참고. 세 물체 간의 상호 운동 문제가 혼돈스럽다는 건 그보다 많은 사체, 오체, 즉 달랑 두 물체 간의 상호 운동을 제외한 모든 다체 문제에 정확한 해법이 없고 언제든지 혼돈의 도가니로 빠져들 가능성이 있다는 것을 수학적으로 의미한다.



그림1. — 프랑스의 수학자, 물리학자, 천문학자, 과학사상가인 앙리 푸앵카레(Jules-Henri Poincaré, 1854.4.29 ~ 1912.7.17) ©Wikipedia

위해 모든 것을 희생하고 양보하는 삶에 익숙하다. 살아남기 위해 몸에 물 한 방울 남기지 않는 탈수 상태가 되어 방공호 같은 창고에서 버티다가 살 만한 기후가 되면 물을 흡수해서 활동을 시작한다. 삼체인의 생활 방식에 비하면 고통이 심해 눈물마저 말라버린다는 지구적 표현은 여전히 낭만적이다. 종족 전체의 생존에 도움되지 않는 이들은 탈수시킨 후 소각하여 자원을 최적으로 배분해 버린다. 개인의 존엄은 꿈도 꿀 수 없고 오직 문명의 지속만이 지상 목표인 극단적인 전체주의 사회이다.

모행성이 언제 사라질지 모르기에 이들은 생존을 위한 다른 행성을 찾아내고 점령해야만 한다. 그 때 운명처럼 지구에서 보낸 생명체 탐사 전파가 삼체행성에 도착한다. 막상 전파의 첫 수신자인 삼체인은 원시적인 생명체들이 안정적인 삶을 누리고 사는 지구를 있는 그대로 지켜주고 싶었다. “경고한다. 대답하지 마라! 대답하는 순간 그곳의 위치가 파악되어 당신들의 세계는 점령 당할 것이다.” 자신의 종족과 모행성 대신 지구를 온전히 지키고 싶었던, 지구인에게는 메시아 같았던 삼체인의 경고에도 불구하고 문화대혁명의 광기 속에서 인간중의 추악함에 대한 분노가 응어리져 인류에 대한 희망을 잃은 천체물리학자 예원제는 담담히 응답한다. “이곳에 오십시오. 나는 당신들이 이 세계를 얻는 것을 돕겠습니다. 우리 문명은 이미 자신의 문제를 해결할 능력을 잃었습니다. 당신들의 힘이 필요합니다.” 지구에는 비록 물리적 태양이 하나밖에 없지만 인간의 절대 권력과 권력에 취한 인간의 광기라는 또 다른 종류의 태양이 있었고, 그로 인해 발생하는 인간 사회의 삼체 문제를 해결하지 못한 채 외계인에게 해법을 맡겨버린다.

최초의 인간 아담의 타락으로 온 인류가 죄에 빠졌고 예수 그리스도의 대속으로 그를 믿는 자에게 영생과 구원이 다시 주어진다고 성경은 말한다. 삼체에서는 예원제라는 여인의 인류에 대한 절망과 복수심이 삼체인을 지구로 불러들이고, 한 남자의 지극한 사랑을 받은 청신이라는 또 다른 여인이 인류를 대표하여 삼체인에 저항하며 인류를 지켜내는 새로운 이브가 된다. 삼체가 다루는 시간과 공간이 지구식 셈법으로는 헤아리기 힘든 거대한 규모이기에 삼체는 지구의 일상에 속박된 나머지 미처 생각해보지 못한 근원적인 질문을 독자들에게 떠올리게 한다.

*Where Do We Come From? What Are We?*

*Where Are We Going?*

*우리는 어디에서 왔는가? 우리는 무엇인가?*

*우리는 어디로 가고 있는가?*

프랑스 예술가 폴 고갱Paul Gauguin의 마지막 대작으로 알려진 그림 제목이다. 폴 고갱의 외할머니였던 플로라 트리스탕은 ‘만국의 노동자여 단결하라’는 유명한 구호를 최초로 제안한 사람이다. 트리스탕은 1840년에 『런던 산책』을 통해 영국 노동자들의 처참한 생활상을 고발하며 ‘만국의 노동자여 단결하라’는 구호를 만들었고, 이를 잘 알고 있던 프리드리히 엥겔스는 5년 후 『영국 노동 계급의 상태』를 발간했다. 1848년 2월 21일 카를 마르크스와 프리드리히 엥겔스는 《공산당 선언》을 내놓았고, 트리스탕이 만든 이 구호를 끝맺음 구호로 사용하였다. 외할머니를 존경했던 고갱은 그녀의 저술을 평생 가지고 다녔다고 하는데 아마도 마지막 작품의 제목이 근원적인 질문이면서 한번 접하면 잊지 않는 구호의 색채를 띄는 것은 외할머니의 영향이었던 듯하다.

고갱은 건강 악화와 유난히 깊이 사랑한 딸의 죽음으로 인한 낙심에 빗 독촉까지 겹치자 생의 끝자락이 다가오는 것을 예감한 듯 마지막 대작을 완성하고 1903년 5월 8일 세상을 떠났다. 고갱의 마지막 작품은 선악과를 따는 이브의 화신인 듯한 여인을 중앙에 배치한 것을 시작으로 뒷면에 낙원에서 무언가를 품고 추방 당하는 남녀 한 쌍으로 출발해 시계 방향으로 돌아가면서 바닥에 누운 젖먹이 아기부터 바닥에 주저앉아 죽음을 기다리는 듯한 백발 노파로 이어진다. 이 그림은 375cm(가로)x139cm(세로) 크기의 대작으로 왼쪽 상단 구석에 프랑스어로 D'où Venons Nous / Que Sommes Nous / Où Allons Nous가 새겨져 있고, 그림 오른쪽 위 구석에 서명과 날짜P. Gauguin/1897가 써있다. 부유한 증권 중개인의 삶을 던지고 화가가 된 이후 ‘가난과 방랑, 열정과 예술혼, 반문명, 타히티섬, 원시생활, 병마와 자살기도’ 등 겉보기에는 선정적인 단어로 압축되는 삶을 살아온 고갱이 마지막까지 붙들고 씨름을 한 의문은 ‘우리가 어디에서 왔고, 우리는 무엇이고, 어디로 가고 있는가’였다. 원하는 대로 이루어지는 행복한 삶에서는 생겨날 리 없는 질문이다. 이러한 질문을 품지 않고 생을 마치는 사람이 있다면 그야말로



그림 2. — 폴 고갱(우리는 어디에서 왔는가? 우리는 무엇인가? 우리는 어디로 가고 있는가?) ©Wikipedia

**부유한 증권 중개인의 삶을 던지고 화가가 된 이후 ‘가난과 방랑, 열정과 예술혼, 반문명, 타히티섬, 원시생활, 병마와 자살기도’ 등 겉보기에는 선정적인 단어로 압축되는 삶을 살아온 고갱이 마지막까지 붙들고 씨름을 한 의문은 ‘우리가 어디에서 왔고, 우리는 무엇이고, 어디로 가고 있는가’였다.**

축복 받은 인생일 것이다. 평생 어떤 아픔도 슬픔도 괴로움도 없이 늘 화창한 봄날 같은 삶을 살지 않는 한, 우리는 어느 순간 이런 질문에 맞닥뜨릴 수밖에 없다. 삼체 문제와 마찬가지로 이 질문에 대한 정답은 ‘알 수 없다’이기에 타히티섬에서 병마와 가난과 절망으로 매 순간 죽음을 응시하며 그려낸 고갱의 그림이 후손 인류의 대다수가 알고 있는 명화가 되었을 것이다. 고갱의 그 걸작은 일반해는 아니어도 특수해 짚은 되는 답이다.

소설 『삼체』는 미국 대통령부터 전 세계 죄수들과 노숙인들까지, 갑갑한 삶에 갇혀 눈을 들어 하늘을 향해 질문을 던질 수밖에 없는 수많은 사람에게 한 순간의 특수해 품의 답은 제 공하는 책이 될 것 같다. 인생에 대해 어떤 근원적인 의문을 품고 있든 삼체를 접하는 사람은 누구나 자신이 아는 만큼,

자신의 처지에서 가장 설득력 있는 답을 듣게 될 것이다. 다만, 아는 만큼 보이는 것 또한 진리이기 때문에 질문에 따라 답이 달라지는 것이고 변하지 않는 영원한 답은 없다. 어떤 문제를 갖고 삼체를 만나느냐에 따라 답이 달라지는 놀라운 경험을 하게 될 것이다.

‘천지불인’. 30년 전 지진으로 폐허가 된 중국 어느 도시를 배경 사진으로 한 신문 기사에 참사 현장을 본 중국 관료가 한 말이라고 소개된 글이다. 쉬운 한자들로 이루어졌기에 읽기는 쉬웠지만 무슨 뜻인지 알 수 없었다. 입시 지옥을 무사히 탈출하여 좋은 학교를 좋은 성적으로 입학한 뒤 좋은 인생을 살고 있는 명문대 학생인 내게 천지란 햇살 반짝이는 낙원, 인자하고 친절한 이웃집 할아버지 정도였다. 그런데 왜 천지 불인인가? 납득할 수 없었기에 천지불인이라는 쉽고, 강렬

천지와 성인의 풀강아지 취급에 상선약수 처방으로 순응하지 않고 분노한 개인들은 다른 처방을 찾기도 한다. 천지와 성인을 능가하는 더 높은 믿음 체계가령 종교를 만들어 그 속에 귀의하기도 하고, 삼체인을 불러들이는 예원제처럼 외계인의 힘을 빌려 지구의 부조리를 청소해달라고 빌기도 한다.



그림 3. — 중국 고대의 사상가이며 도가(道家)의 시조인 노자(老子) ©Wikipedia

하고, 이해할 수 없는 문장은 친구집에 놀러갔다가 흥취 쳐 다본 지하실 한 권의 잠긴 문에 대한 기억처럼 사라지지 않는 불안으로 잠재의식에 남아 떠돌았다. 그 뒤 삼십 년이 지났다. 다람쥐 쳇바퀴 돌리듯 하루도 쉬지 않고 부지런히 호흡하며 살아온 지금, '천지불인'과 '상선약수'는 천식 환자의 호흡기처럼, 갑갑할 때 틈나는 대로 읊조려서 이 세상을 숨쉬고 살 만한 공간으로 만드는 내 삶의 산소공급기가 됐다.

천지불인의 어원은 노자의 『도덕경』이다. “천지불인(天地不仁) 이만물위추구(以萬物爲芻狗), 성인불인(聖人不仁) 이백성위추구(以百姓爲芻狗) [천지는 인자하지 않으니, 만물을 제사에 사용하는 지푸라기로 엮어 만든 풀강아지 대하듯 한다. 풀강아지는 제사 때는 비단옷을 입혀 아주 귀하게 쓰이다가 제사가 끝나면 시궁창에 내버려져 짓밟히거나 태워진다. 성인은 인자하지 않으니, 백성을 풀강아지 대하듯 한다.]” 지상에서 가장 큰 권력을 가진 자인 천자를 그 자리에 임명할 만한 권위와 자격을 갖춘 어떤 존재인 천지를 정점으로 짜여진 이 세

상의 체계 속에서, 개별적인 존재들은 인간을 포함해서 모두 풀강아지다. 쓸모를 인정받을 때는 비단옷을 입어 화려해 보이지만 쓸모가 소진된 뒤에는 불구덩이에 태워지기를 기다리는 그런 존재다. 전체주의 사회이건 민주주의 사회이건 적용되는 뉴턴 법칙  $ma=F$ 가 있다면 그 F는 바로 '천지불인'이다. '민주주의', '법치주의' 같은 것들이 마찰력이 되어 급속도로 불구덩이에 던져지는 것을 막아준다 해도 한계가 있다. 마찰력 덕분에 하늘에서 등가속도로 떨어지는 빗방울이 우리 피부에 덜 아프듯, 우리 몸이 순식간에 불구덩이 속에 던져지는 걸 면할 수는 있지만, 아무리 마찰력이 강해도 F의 본질은 '천지불인'임을 나는 배웠다. '성인'은 천지의 뜻을 받들어 실행하는 지도층이다. 성인은 나의 친구인 줄 알았으나, 때가 되어 그들이 진정 사랑하는 것은 인간 자체가 아닌 '명분'이었다는 걸 알았다. 명분을 위해 풀강아지를 끊임없이 만들고 쓰고 던져버리는 게 통치의 동역학이다.

세상이 항상 내 뜻대로 돌아가는 것인줄 알던 어린아이

천지불인을 인간 삶의 기본값으로 수용하니 어른이 되었다. 천지불인의 진리는 절망의 쇠고랑이 아니라 천식 걸린 환자에게 주어진 호흡기이다. 나보다 형편이 더 나아 보이는 타인은 비단옷 입을 풀강아지, 나만 못한 타인은 불구덩이에 더 가까이 눕혀진 풀강아지일 뿐이다. 이런 운동 방식에서 유일하게 항상성을 가진 답은 내게 주어진 것에 감사하며 하루하루를 생애 첫날이자 마지막날처럼 사는 것이다.

어떻게 살아야 할까?

“상선약수(上善若水) 수선이만물이부쟁(水善利萬物而不爭) 처중인지소(處衆人之所惡) 고기어도(故幾於道) [가장 좋은 것은 물과 같다. 물은 온갖 것을 이롭게 하면서도 공을 다투지 않고, 모든 사람이 싫어하는 낮은 곳에 머문다. 그러므로 도에 가깝다.] 물은 낮은 곳으로 임한다(居善地). 물은 연못처럼 깊은 마음을 가지고 있다(心善淵). 물은 아낌없이 누구에게나 은혜를 베푼다(與善仁). 물은 신뢰를 잃지 않는다(信善信). 물은 세상을 깨끗하게 해준다(正善治). 물은 놀라운 능력을 발휘한다(事善能). 물은 열 때와 녹을 때를 안다(動善時). 부유부쟁(夫唯不爭) 고무우(故無尤) [오로지 다투지 아니하니 허물이 없다.]” 노자는 물 속에 겸손(謙遜), 지혜(智慧), 포용(包容), 융통(融通), 인내(忍耐), 용기(勇氣), 대의(大義)가 모두 담겨 있다고 한다. 물의 성품이 이 정도이니 '상선약수'가 아닐 수 없다.

과학자로서 나도 물을 찬양한다. 물의 풍부함이 첫 번째 이유고, 생명에 관여함이 두 번째 이유다. 그러나 그 풍부함 때문에 우리는 물이 얼마나 특이한 액체인지 자각하지 못하기도 한다. 액체가 상온(상대 온도 300도) 근방에서 존재하는 것은 정말 드문 현상이다. 유럽의 과학자들은 기체를 액체로 만들기 위해 한 세기 이상을 들여서 기술과 이론을 개발했고, 온네스가 헬륨을 액체로 만들면서 그 노력에 정점을 찍었다. 액체는 고군분투의 과정을 통해 기체에서 겨우 추출해내는 것이 정상인데 물은 '저절로' 존재한다. 역설적이게도 물은 이토록 풍부하지만 물처럼 사는 사람을 찾지 못한 액체 헬륨을 찾은 것만큼이나 어렵다. 우리는 태어나서부터 성인이 되라고 배웠고 성인을 칭송할 뿐 물처럼 사는 자연인 도인을 그다지 칭송하지 않는다. 상선약수는 천지불인, 성인불인에 대한 해독제일 수 있지만, 노자가 칭송한 물다운 현대인에게 물이 아니라 액체 헬륨만큼이나 도달하기

어려운 존재이다.

천지와 성인의 풀강아지 취급에 상선약수 처방으로 순응하지 않고 분노한 개인들은 다른 처방을 찾기도 한다. 천지와 성인을 능가하는 더 높은 믿음 체계가령 종교를 만들어 그 속에 귀의하기도 하고, 삼체인을 불러들이는 예원제처럼 외계인의 힘을 빌려 지구의 부조리를 청소해달라고 빌기도 한다. 하나님의 대홍수 대신 외계인의 대홍수를 비는 것이다. '삼체'의 시작은 그러했다. 자칭 지도자란 사람의 변덕 때문에 인생을 강탈 당한, 뛰어나고 순수했던 과학자 주인공이 찾아낸 방책은 우주를 향해 전파를 쏘는 것이었다. 그녀의 기도에 대한 삼체인의 응답은 '지구 침공'이었다.

전혀 예상하지 못한 일이 닥쳐서 삼재(三災)란이 한꺼번에 몰아친듯 하늘에서도 땅에서도 사람에게서도 기댈 곳을 찾지 못하는 힘든 시간을 견디면서, 육신 또한 끝없는 사막이나 캄캄한 터널을 걷는 것처럼 내일을 확인할 수 없는 힘든 시간을 견뎌본 사람이 『삼체』를 읽는다면 책 속에서 자신에게 맞는 답을 찾을 수 있을 것이다. 이 넓은 세상에 홀로 남겨진 듯한 상황이 되면 비로소 인간이 얼마나 믿지 못할 존재인지, 그럼에도 삶은 얼마나 경이로운 것인지가 보인다. 보도블럭 틈에 피어난 꽃 한송이가 예사롭지 않고, 지하철역 바닥에서 밟히지 않고 살아남기 위해 꿈틀대는 애벌레조차 안쓰러워 안전지대로 옮겨 주게 된다. 세상은 그대로인데 나만 도무지 이해할 수 없는 블랙홀에 갇혀 기약 없는 탈출과 구원을 기다리고 있는 사람들에게, 미국 대통령도 초월을 경험했다는 『삼체』라는 책은 꼭 한 번 읽어볼 가치가 있는 책이다. 오바마 미국 대통령은 “삼체를 읽을 때 작품 스케일이 워낙 커서 백악관의 일상사가 사소하게 느껴졌다”고 평했다. 우리 삶의 조건은 항상 너무 높거나 너무 낮다. 과학자들은 '불안정한 평형 상태'라는 말로 이것을 설명하려고 한다. 누구에게나 딱 알맞은 것은 없다. 『어린 왕자』에서 여우와 어린 왕자가 왕자의 별에 대해 이야기한다. “그럼 네 별은 지구가 아니라 다른 별이란 말이야?” “그래.” “그 별에도 사냥꾼이 있어?” “아니. 없어.” “그거 대단하군! 그럼 닭은?” “없지.” “역시 완전한 것은 없어.” 역시 완전한 것은 없다.

영화 <인터스텔라>는 먼지 가득한 채 황폐해지는 지구를 대체할 인류의 터전을 찾기 위해 원혼을 통해 항성 간 우주

여행을 떠나는 탐험가들의 모험이 중요한 소재다. 멸망이 눈앞에 다가온 듯한 절망적인 순간임에도 “우리는 답을 찾을 것이다. 늘 그랬듯이. We will find a way. We always have.”라는 말을 남기고 과학자 아빠는 사랑하는 딸이 살 수 있는 행성을 찾아 생환의 기약 없는 우주탐험에 나선다. 딸에 대한 아빠의 극진한 사랑이 풀리지 않을 것 같은 문제의 답을 찾는 원동력이다. 사랑을 원동력으로 삼는 지구인들과 달리 과학 기술과 생존본능을 원동력으로 삼은 삼체인들의 이주 준비는 엄청난 대가를 치렀다. 티시 이노호사의 노래 ‘돈데보이’처럼 삼체인들 모두의 목숨을 걸어야 하는 힘들고 어려운 과정이었다. 미국으로 불법 이민을 시도하는 멕시코 남성이 자신의 연인을 그리워하며 어디로 가야 하는지 혼잣말하듯 읊조리는 돈데보이 음조에는 슬픔이 가득하다. 삼체인도 이주 준비를 위해 삼체인 대부분의 생명을 바쳐야 했으니, 내년 넷플릭스가 만들어낸다는 영화 <삼체>에서 삼체인의 이주 준비 과정을 그려내는 배경 음악은 영화 <스타워즈>의 시작과는 달리 한없이 슬프고 쓸쓸할 것이다. 하지만 진짜 큰 문제에 직면한 것은 삼체인이 이사 갈 집으로 택한 지구에 살고 있는 지구인이다. 지구는 물리적 태양이 하나밖에 없는 매우 ‘안정적인’ 행성이지만 인간 군상 속엔 자칭 태양이 되고 싶어하는 지도자란 사람들이 득시글거리 인간적, 사회적 삼체 문제로 골머리를 앓는다. 무능과 탐욕으로 가득한 인간 군상을 때문에 할 수만 있다면 다 쓸어버리고 깨끗하게 새로 시작하게 만들고 싶은 지긋지긋한 곳이지만, 내가 살고 부모가 살고 자식이 살아야 하는 하나뿐인 집이기에 삼체인에게 호락호락 내줄 수는 없다. 지구에서의 삶을 계속 누리고 지키기 위해 지구인들도 궁리할 수 있는 모든 일을 시도한다.

예측 가능한 태양 하나와 상호 작용하며 사는 지구인의 삶도 결코 녹록지 않는데 세 개의 태양과 함께 사는 삼체인의 삶은 얼마나 고달플까 상상하며 저자가 묘사한 삼체인의 생존법을 보는 것도 정말 흥미롭다. 태양이 많아도, 태양이 없어도 견디기 힘든 세계. 너무나 혹독한 시절은 탈수되어 종이 두루마리로 변해서 견디다, 좋은 시절이 되면 다시 물을 만나 몸을 얻어 활동하는 삼체인을 통해 분석쟁유와 사상 통제의 혹독한 시기를 견딘 중국인들의 역사적 경험이 보이는 듯하다. 힘든 시절을 견디는 힘은 책을 읽고 책을 쓰는 데서 나온다는 것을 우리도 유배지 혹은 감옥에서 보낸 편지로 책을 한

권씩 퍼낼 만큼 힘든 시기를 보낸 다산 정약용, 추사 김정희, 신영복 교수 등을 통해 알고 있다. 삼체인들은 세 개의 태양으로 인해 도저히 사람답게 살 수 없는 시기에는 책이 되어 견디다가 태양이 한 개만 보여 살 만한 시절이 되면 비로소 삶을 누린다. 삼체인들이 딱 맞게 떠오른 한 개의 태양을 보고 너 나 할 것 없이 한마음으로 기뻐하며 창고에서 굴러 나와 탈수된 두루마리 상태를 벗어난지 호수와 강과 바다에 몸을 담가 수분을 양껏 흡수하고 몸을 되찾은 기쁨을 만끽하며 서로의 생사와 안부를 확인하고 축하와 위로를 나누는 장면은 숙연하기까지 하다. 우리는 매일 맞이하는 단 하나의 태양에 의한 딱 맞춤형 일출이 그들에게는 엄청난 행운이요, 축복이다. 한 개의 태양이 떠올랐다는 사실은 살 만한 시절이 되었다는 것이고 더 이상 바랄 것이 없는 축제의 소재가 된다. 이에 비하면 우리가 누리는 매일매일의 일출은 엄청난 축복이다. 우리 스스로 두 개의 태양을 더 만들어 혼돈의 세상에 스스로 빠져들기 전까지는, 삼체 행성에서는 한 개의 태양 덕분에 잠시 기쁨을 누리지만, 그 미소가 사라지기도 전에 누구도 예상하지 못한 시기와 장소에 난데없이 3개의 태양이 한꺼번에 떠오르면서 엄청난 재앙을 마주하는 일이 흔하다. 생명보존을 위해 탈수할 시간조차 벌지 못한 채, 세 개의 태양이 뿜어내는 햇살의 열기로 삼체인들이 순식간에 불에 타 한 줄기 연기가 되어 소멸하는 장면에서는 분석쟁유, 문화 대혁명 시기에 어이없이 목숨을 잃은 사람들이 떠올랐다.

가정이든 사회든 국가든 사람들이 모인 곳에는 태양 같은 존재, 달 같은 존재, 지구 같은 존재가 골고루 있다. 태양이 너무 많으면 지구나 달 같은 존재는 견디기 힘들어진다. 문화 대혁명의 중국도 태양이 너무 많았던 것은 아닐까? 그 태양 열기에 삶과 가족과 친구와 이웃을 잃은 사람들을 어루만지는 책 중 하나가 『삼체』이다. 위화가 쓴 소설 『인생』이 흠에서 오는 위안이라면, 류츠신이 쓴 소설 『삼체』는 별에서 오는 위로다.

『삼체』는 지극히 작은 개인이 무한히 큰 우주를 지키는 비밀을 품은 이야기다. 삼체는 하잘 것 없는 개인이 목숨 바쳐 지켜야 할 무엇이 생겼을 때 온 우주를 품게 되고, 유한한 목숨이 다해 쓰러질 때 옆에서 또 누군가가 사랑하는 한 사람을 지키기 위해 우주를 지키는 무거운 일을 감당하게

되어 지금까지 우주가 무한히 존재하고 있다는 비밀을 알려준다. 무궁화가 피고 지고 또 피어 무궁화가 되고 백일홍도 꽃잎 하나가 백일을 가는 것이 아니라 손에 손잡고 이어달리기 하듯 피어난 꽃잎들이 백일을 살아내는 것처럼, 우주도 지금 우리 한 사람 한 사람이 살아내는 힘으로 무한을 지켜 가고 있는 것이다. 바닷가 모래알 하나보다 작고 하찮아 보이는 개개인의 하루가 무한을 만들고 우주를 만든다. 『삼체』를 읽으면 가려져 있던 하늘이 보이고, 하루하루 밥벌이에 급급한 벌레처럼 살아가는 내가 사실은 우주를 지키는 수호자라는 것을 알려준다. ‘가디언스 오브 갤럭시’가 바로 첫바퀴 돌리듯 하루하루를 살아가는 우리의 정체성이다!

영화 <인터스텔라>에서는 아빠와 딸이 한 공간에 있지만 블랙홀의 중력으로 왜곡된 시공간 때문에 소통하지 못한 채 서로를 그리워하고 외로워한다. 1인 1휴대폰 시대가 되면서 자신의 휴대폰으로 만든 블랙홀 같은 세계에 갇힌 것도 모른 채 갇혀 살고 있는 부모, 자식들의 소통이 차원을 뛰어넘는 것만큼 어려운 것은 시공간이 왜곡된 때문인지도 모른다. 해질 무렵 노을빛이 사무치게 외롭고 지구별은 너무 낮설고 인생 곳곳에 포진한 블랙홀의 존재가 눈에 선명하게 들어와 두려움으로 한 발짝도 뻐 수 없을 때, 삼체는 눈을 들어 하늘을 바라보고 숨겨진 구원의 동아줄을 찾을 힘을 준다. ‘천지불인, 상선약수’의 샘을 만나 수시로 목을 축이는 것은 덤으로 받는 선물이다. <sup>키스</sup>

**우리는 매일 맞이하는 단 하나의 태양에 의한 딱 맞춤형 일출이 그들에게는 엄청난 행운이요, 축복이다. 한 개의 태양이 떠올랐다는 사실은 살 만한 시절이 되었다는 것이고 더 이상 바랄 것이 없는 축제의 소재가 된다.**



그림 4. — 2024년 공개된 넷플릭스 오리지널 미국 드라마인 <삼체>의 원작 소설인 중국 소설가 류츠신의 SF소설 『삼체』. ©자음과모음

## 장인과 닥나무가 함께 만든 닥종이 과학기술, 기지(機智)

닥종이의 내구성은 유명하다. 1930년대애나 등장한 한지(韓紙)라는 말이

‘천년’이라는 수식어 덕분에 유구하게 느껴진다.

‘천년 한지’는 8세기 초반의 목판 인쇄물, 『무구정광대다라니경』의 보존 상태가 보증해준 이름이다.

어떤 실험실에서도 해낼 수 없는 천년 세월의 1차 검증을 거친 명성이다.

글. 이정(이화여자대학교 이화인문과학원 조교수) 그림. hanagraph



그림 1. — 중국 후한 중기의 환관, 채후. ‘채후지(蔡侯紙)’라는 종이를 발명하여 종이 제작 기술을 발달시켰다. ©나무위키

최근에는 유럽의 복원 전문가들이 일본의 화지(和紙)와 비교해서 그 우월한 내구성을 재차 확인했다. 교황청의 대형 지구본 등 중요한 유물의 복원에 한지가 선정된 배경이다.<sup>1</sup>

사실 기계식 펄프 종지와 비교하면 대부분의 수공예 종이는 그 수명이 길다. 유럽의 도서관에도 17세기 책이 20세기 책보다 보존 상태가 좋고, 종이 발명가 채후(蔡倫, 50?~121?)을 내세우는 중국에서도 천년 넘는 종이 가 출토되곤 한다. 산성인 기계 종이 가 변색과 부식을 면치 못하는 데 반해, 염기성 잣물로 가공하여 만드는 대부분의 수공예 종이 가 중성을 띠기 때문이라고 한다. 하지만 화지와 비교한 시험에서도 드러나듯 한지의 수명은 수공예 종이 중에서도 독보적이다. 최고 공신은 닥나무와 그 닥나무의 성질을 속속들이 이해했던 장인들이다. 이 글에서는 100년이 안 된 한지라는 말 대신 닥종이라는 말로, 닥나무와 장인이 함께 만든 닥종이 과학기술의 긴 역사를 훑어본다.<sup>2</sup>

닥종이 과학기술이라는 말은 과학계 들릴 것이다. 실제로 말이 되지 않는다. 닥종이를 만들던 신라, 고려, 조선에는 과학 science이나 기술 technology이란 말이 없었다. 과학이나 기술이란 말이 전 세계로 번역되기 시작한 것은 200년이 되지 않는다. 하지만 닥종이는 첨단 과학기술이 꽤 취약한 ‘내구성’이라는 성질에 강하다. 기계 종이는 물론 종이책을 대체하리라고 보았던 디지털 전자매체도 그 수명은 수십 년을 넘기지 못하고, 새로운 기술을 가미한 최근의 저장 장치는 안정성과 수명이 더 짧다고 한다.<sup>3</sup> 이러한 매체에 내구성을 부여할 수 없다면 빅데이터 없이 작동하지 않는 모든 인공지능 기반 분야는 흔들릴 수 있다. 세대를 이어 지식을 전달하며 발전시키던 일에도 문제가 생긴다. 천년 내구성을 얻어낸 일을 만만히 볼 수 없다는 존경을 담아 우선 닥종이 과학기술이라 해보자.

1. 김준래 객원기자, “바티칸에 부는 ‘한지’ 열풍” <사이언스타임즈>, 2015.5.18; 안광호, “한지” 이용해 복원한 ‘요한 23세 교황의 지구본’ 공개, <경향신문>, 2017.4.30.

2. 이 글은 <장인과 닥나무가 함께 만든 역사, 조선의 과학 기술사>, 이정, 푸른역사, 2023에 바탕했다.

3. Manfred Bremmer, “하드디스크 수명 짧아졌다” 시큐어 데이터 리커버리 조사” IT World, 2023.3.22.



나는 이 닥종이 과학기술의 역사를 기지機智라는말로 포착하려 해보았다. 기機는 최초의 중요한 기계라 할 수 있는 베들을 일컫는 한자로, 기계를 통칭하기도 하고 베의 품질을 좌우하는 솜씨, 기미, 기회의 뜻을 갖는다. 지軀는 이러한 사물의 기미를 밝게 알아보고 처리하는 지혜 정도가 된다. '경우에 따라 재치 있게 대응하는 지혜'가 기지이다.



그림 2. — 천 년의 내구성을 가진 닥종이.

하지만 수공예적 내구성이 아무리 대단한 가치라고 하더라도, 그것을 과학기술에 견줄 수 있을까? 그 방식이 너무 다르지 않은가? 한 땀 한 땀 장인이 만든 맞춤옷과 그렇게 만든 명품 가방이 좋다고 해서, 그런 식으로 다수가 필요로 하는 옷과 가방을 만들기는 힘들다. 닥종이의 내구성과 같은 가치는 일부에게나 허용되는 사치이고, 닥종이 과학기술은 한가한 정교함이라고 할 수 있다. 다수를 위해 효율적 생산을 담당해 온 과학기술이 그 가치를 지향할 수는 없지 않은가?

기술자로 꽤 여러 해 효율을 내세우며 일을 했던 내가 닥종이 역사를 공부하며 가장 신기했던 점은, 바로 닥종이가 상당히 효율적인 생산 체제를 만들어갔다는 점이었다. 알다시피 조선 후기에는 인구가 많이 늘었고, 그중에서도 인구의 절반을 넘게 된 양반 인구의 증가 속도는 더욱 가팔랐다. 식자층과 그를 지향하는 계층이 폭증한 것이다. 종이가 부족하고 가격이 올랐을 법하다. 그러나 그런 일은 없었다. 종이 가격은 여러 물가 중 가장 안정적이었다. 오히려 종이가 흔해서 중국에서는 귀하다 귀하게 여기는 종이를 코 푸는 데도 쓰고, 신발 안창으로도 쓴다는 탄식이 들렸다. 게다가 닥종이는 중국과 일본으로 수출까지 되었다. 조선 시대 국경 무역 자료와 강화도 조약 이후 개항장의 무역 자료, 구한말 한국을 방문했던 외국인들의 보고서에서 모두 확인되는 사실이다. 인삼, 말린 해삼, 소가죽 등이 추가 되는 개항 전후 조선의 수출품 목록에

거의 유일한 '공산품'이 종이였다.

나는 이 닥종이 과학기술의 역사를 기지機智라는 말로 포착하려고 해보았다. 기機는 최초의 중요한 기계라 할 수 있는 베들을 일컫는 한자로, 기계를 통칭하기도 하고 베의 품질을 좌우하는 솜씨, 기미, 기회의 뜻을 갖는다. 지軀는 이러한 사물의 기미를 밝게 알아보고 처리하는 지혜 정도가 된다. '경우에 따라 재치 있게 대응하는 지혜'가 기지이다. 기지는 토마스 쿤(Thomas Kuhn)이 『과학혁명의 구조』에서 과학기술 현상의 중요한 지식으로 지적한 암묵지(tacit knowledge)와도 유사한데, 닥종이의 역사에서 드러나는 다양한 기지는 암묵지가 과학기술적 실천 지식으로써 갖는 깊이와 넓이를 풍부하게 드러낸다.

닥종이 기지의 첫 단계는 바로 닥나무라는 사물의 기미를 제대로 이해하고, 그에 밀착된 독특한 공정을 만드는 데서 시작되었다. 종이를 발명한 중국의 공정과는 모든 점에서 다른 공정이다. 종이는 중국의 4대 발명품 중 하나에 들어가기도 하지만 그 착상은 간단하다. 재료가 될 식물재료를 분해해서 묽은 죽처럼 물에 풀어놓고, 김을 뜨듯이 발들을 이용해 종이장을 형성해 얇게 떠낸 다음, 말려서 마무리하는 것이다. 이 말로는 쉬운 일이, 몸소 해보면 생각처럼 되지 않는 것이 문제일 뿐이다.



그림 3. — 닥나무 껍질을 벗긴 후 가공한 섬유. 닥종이의 재료다.

닥나무를 택해 종이를 만들어 본 한반도의 장인들은 이 모든 공정을 변형시켰다. 이들은 우선 닥을 돌 위에 놓고 방망이로 찧어가며 분쇄했다. 완전히 펄프를 만들지 않는 방식을 택한 것이다. 중국에서 뽕나무, 삼, 대나무 등의 재료를 택해 갈아서 만들던 것과 다른 선택이었다. 떨기나무인 한반도 닥나무는 겉껍질을 벗겨내면 중국의 어떤 재료보다 흰 빛을 자랑하는 질긴 속껍질을 갖고 있다. 태평양 연안 어느 섬에서는 옷을 만들기도 한 섬유질 내피이다. 한반도 장인들도 이 질긴 섬유 울의 잠재력을 높이 샀던 모양이다. 이들은 멧돌과 같은 오래된 도구를 외면하고 찧는 방식을 택해서 이 섬유 울을 길쭉하게 살렸다. 잿물도 약한 것을 써서 섬유 손실을 최대한 막았다.

이들은 닥 섬유의 긴 울이 어우러진 재료를 물에 풀어 떠내는 과정에서도 새로운 재료와 공정을 도입했다. 아욱과화초의 뿌리에 있는 점성 물질인데, 이들이 닥풀이라 부른 것이다. 닥풀은 닥 섬유 울이 쉬 가라앉지 않게 돕는다. 이들은 이렇게 통 속에 떠 있는 닥 섬유 울을 종횡으로 엮듯이 떠냈다. 곱게 갈아 만드는 중국에서는 어느 한 방향으로만 움직이면 되었던 것과 달랐다.

이렇게 공들여 떠낸 종이 표면에는 긴 섬유 울이 더러 튀어나올 수 있었다. 이를 처리하기 위한 마무리 공정이 도침(礎石)이

라는 다듬이질이다. 이들이 택한 닥종이 공정에 맞춰 생긴 이 마감 공정은 울 처리만이 아니라 종이의 밀도를 높여 목의 스킴을 조절하는 데도 탁월한 효과를 발휘했다. 광택과 견고함도 더했다. 중국에서 표백과 목 스킴의 조절을 위해 밀랍이나 쌀가루 등의 첨가제를 더하던 것과 다른 방법이었다.

발명에 맞먹는 창의성이 모든 공정에서 보인다. 이 재발명의 결과는 탁월했다. 닥종이는 재료 자체의 흰 빛을 자랑하는 데다 천연 폴리머라는 닥풀로 안정성을 얻었고, 흘림 뜨기로 잘 찢어지지 않고 질겼다. 도침은 그 특성을 더욱 강화하며 광택과 목 스킴을 향상했고, 표백이나 목의 스킴을 조절하기 위한 부패성 첨가물이 불필요해 내구성은 더욱 높아졌다. 덕분에 '고려지'로 통칭되는 한반도 종이에 대한 명성이 서서히 자리잡고, 종이의 발명국임을 자랑하는 중국에 상당한 양의 종이를 비싼 값에 역수출하는 길이 열렸다.

품질은 탁월하다고 하지만 이 재발명은 어찌 보면 의아하다. 원조 공정에 비해 모든 공정이 더 어려운 개악처럼 보인다. 이 '개악'처럼 보이는 결정에 담긴 것이 '기지'이다. 닥나무라는 사물의 낚새에 충실한, 닥나무와 긴밀히 대화하며 발휘되는 '기지'이다. 최고의 재료를 택했으니 그 재료가 제 성질을 마음껏 발휘하도록 모든 과정을 닥나무에 맞춘 것

이다. 닥나무를 닥종이 과학기술의 주인공으로 대접해주는 결정이었다.

말해줘야 할 것은 닥종이 공정에 대한 내 설명은 최선을 다한 추측이라는 것이다. 하나하나 나뉠 진화를 거쳤을 닥종이 공정을 제대로 기록해 놓은 문헌도 없고, 옛 기술을 이어받은 장인도 맥이 끊어진 까닭이다. 일제강점기에 일본 화지의 우수한 기술을 도입하겠다는 총독부의 시도가 있었고, 이어서 전쟁의 혼란까지 따랐다. 게다가 닥종이는 언젠간 한 가지가 아니었다. 두께, 크기, 용도, 색깔별로 매우 많은 종류가 있었으니 닥종이 제작 공정이 단일할 수는 없다. 장판지 만드는 방법으로 편지지를 만들지는 않는다. 과거의 현장으로 돌아갈 수 없는 역사학자가 그중 어느 한 공정도 확실히 밝혀낼 수는 없다. 나는 그저 닥나무를 키워가며 수없이 닥종이를 만들어본 종이 애호가, 전통을 복원해 보고자 하는 장인과 과학자, 남은 닥종이 유물을 물리적, 화학적으로 분석하며 그 성분의 특징과 시대별 변화를 기록한 여러 연구자의 성과에 의지해 닥종이가 몸으로 말하는 것을 듣고자 애썼고, 이를 문헌의 흩어진 기록들과 대조하며 흐릿한 윤곽을 그려 보았을 뿐이다.

내가 살펴본 닥종이의 궤적에서 '고려지'라는 명품의 탄생보다 더 놀라웠고, 더 알려지지 않았던 것은 닥종이 제조가 조선 후기에 더욱 번성하며 새로운 생산, 소비, 재활용 체제를 만들었던 점이다. 사실 닥종이의 명성이나 과학기술적 정교함은 고려청자와 자력루에 미치지 못한다. 하지만 고려청자와 자력루는 일시적이고 개인적인 성취로 끝난 데 반해, 닥종이의 성공은 굴곡이아 겪었지만 개항기까지 지속되었다. 유학 이념에 따라 장인을 천시했던 것은 조선 사회 전반의 현상이었는데, 어떻게 이런 일이 가능했을까? 게다가 조선 초의 관영 제지製紙 체제가 무너지고 제지를 담당한 것은 조선 사회에서 억압받던 불교 사찰이었다.

사실 수출 기록 등에서 감지되는 닥종이 생산의 확대는 『조선왕조실록』 등의 관한 기록에는 잘 드러나지 않는다. 커다란 사찰도 하루아침에 텅 빌 정도로 사찰의 큰 폐단이 종이를 만들어 바치는 종이 사역[紙役]이라는 이야기만 많다. 이는 유교 사회 조선의 불교 탄압이라는 통념을 고스란히 확인시키는 기록인지만, 곧이곧대로 받아들여져 왔다.

그러나 이들 기록은 이상한 점이 많았다. 아버지가 승려인 승려는 없다. 승려는 승려로 태어날 수 없는 것이다. 불교가 제대로 억압되었다면 승려 수는 크게 줄어야 한다. 그런데 그렇지 않았다. 승려가 종교지도자로 대접받지 못한 조선에서 새로 승려가 된 사람이 점점 늘었고, 사찰당 평균 승려 수도 조선이 일제강점기보다 많았다. 영적이고 정신적인 선택도 있겠지만, 사회경제적인 선택이 압도적으로 보인다. 조선은 호적상의 인구가 전체 인구의 40% 정도로 추정된다. 3년에 한 번인 호구 조사가 그냥 부실하다기보다 양반으로 태어나지 못한 다수가 겹겹의 징세를 피하려 유민流民의 삶을 택한 것이 새로운 합의를 만든 결과였다. 전국에 흩어져 있던 천여 개의 사찰국초에는 36개를 남기고 폐쇄되었던 유민들의 중요한 피난처였다. 변변한 농지가 되기는 힘든 사찰 주변 산에 닥나무가 잘 자라고, 불경 인쇄로 제지 기술이 축적되어 있는 점은 닥 재배와 제지를 새로운 승려와 유민의 핵심 사업으로 만들었다.

조선 조정이 이를 반겼다고 할 수는 없다. 백성들이 사적으로 종이를 만들고 판매하며 이익을 추구하는 일은 조선 왕조의 이상과 거리가 멀다. 서울의 조지서造紙署를 비롯해 각 군현에 관영 지소紙所를 두고, 닥과 종이를 현물세금 품목인 공물貢物로 만든 이유이다. 백성들이 말단의 이익인 상공업 대신 농업에 전념해 자급자족하기를 바랐던 것이다.

우리는 혼자 움직이지 못하는 것은 무력하다고 생각한다. 하지만 만만찮은 권력을 가진 왕과 신하들이 만든 관영 생산 체제에 틈을 낸 것은 바로 혼자서 움직이지 못하는 것들이었다. 닥나무가 서울의 조지서나 관영 지소까지 움직여 주지 않으면 어떤 뛰어난 장인도 종이를 만들 수 없다. 저렴한 화석에너지를 신나게 낭비한 짧은 기간 동안 잊고 있던 사실이지만, 혼자서는 움직이지 않는 닥나무를 전국 각 산지에서 운반해 오는 비용은 만만찮았다. 만든 종이도 저절로 서울로 가지 않는다. 고속도로조차 없는 조선에서 이를 이동시키는 유통비가 제조 원가보다 비쌀 수 있는 상황은 종이 공물을 대신 내줄 사람을 찾게 했다. 살길이 막막하던 사찰의 장인들은 이 틈을 파고들어 종이를 만들었다.

우선은 여러 집단에서 사찰의 종이를 환영했다. 하지만 이들도 승려의 편이라고 볼 수는 없었다. 승려와 사찰에 대한

면세권이 일부 유지된 것이 화근이었다. 승려가 조정에 세를 내지 않는 특권을 받았으니 자신들이라고 그 세를 대신 받는 것이 합당하다고 믿는 집단이 많았다. 왕실 주변 세력인 궁가, 각급 관청, 지방의 관아와 군영, 기델 세력이 있는 양반가 모두 사찰에 공짜 종이를 기대했다. 왕조실록에 승려의 종이 사역에 대한 비판이 자주 등장한 배경이다.

사찰의 종이 부담은 조정의 관료도 무리하다고 보는 수준이 되곤 했고, 점차 조정은 '승려도 백성'이라며 승려들에 대한 과도한 세금과 의무를 제재했다. 그렇지만 종이 사역으로 고통받는 사찰에 대한 호소는 19세기까지도 끊이지 않았다. 승려에 대한 천시나 자의적 권력을 행사하려는 집단이 사라지지 않은 것도 한 요소이지만, 더 주목할 것은 승려들이 이런 호소를 주도했다는 점이다. 승려들은 점차 자신들이 제공하는 현물과 의무를 하나하나 기록해서 목록을 만들고, 그 문서화 된 합의선을 넘어서는 요구가 지속되면 그 사태의 부당함을 널리 호소했다. 문제의 공론화였다. 이는 합의에 대한 준수를 강제하거나, 새로운 합의를 명문화시킬

바탕이 되었다. 사찰의 장인들은 닥나무의 요구에 귀 기울이며 좋은 닥종이를 만드는 기지마니 아니라 새로운 사회적 계약을 만들어내는 사회적 기지도 발휘한 것이다.

이 사물과 사회에 모두 발휘되는 기지 덕분에 19세기 사찰은 사라지지 않은 '탄압'의 기록과는 거리가 먼 호황을 보았다. 화재로 조정의 도움을 요청하는 호소문조차 사찰의 놀라운 확장세가 드러났다. 불에 탄 불사가 수백, 수천 칸이 되는 사찰들이 여러 곳이었다. 천여 칸 불사가 소실되어 도움을 받은 사찰이 30년 남짓 후에는 3천여 칸이 났다고 또 구조를 요청했다. 궁궐을 제외한 어떤 건물도 백 칸을 넘지 못했으니, 조선 후기 가장 규모가 큰 건물은 사찰이었다. 불탄 후 30년 만에 세 배가 확장된 사찰을 포함해 이렇게 거대한 사찰은 제지업이 활발했다. 종이를 뜨는 부지淨紙 칸만 120 칸에 승려 수가 수백 명이라는 사찰의 경우 하루 생산량이 최소 6만 장이 된다 종이 뜨는 통 하나로 하루 500-700장 생산한다고 한다.



그림 4. ——— 헌종경릉상릉도감 위계, 1849년 (철종 즉위) ©문화체육관광부 산하 전주 박물관



그림 5. ——— 어람용 위계 속지, 초주지, 헌종빈전훈전도감의례, 1849년 (철종 즉위) ©문화체육관광부 산하 전주박물관

조선 후기 법전에 실린 종이당 무게 기준을 참고하면, 닥 한 근약 375g으로 만들 수 있는 종이는 몇 장에서 수십 장까지 다양하다. 하루 6만 장 정도의 생산량이라면 닥의 수요가 1,000근을 넘나든다. 수많은 닥나무 가지를 꺾고 가공해야 얻을 수 있는 재료이다. 부지 칸만 120칸 정도 되는 시설은 사찰 주변에 저절로 자라는 닥나무를 꺾어서 종이를 만드는 규모가 아니었다. 닥은 실제로 정약용조차 아들에게 재배를 권할 정도로 조선 후기 가장 유망한 상품작물이었다.

하지만 대부분의 제지 사찰은 시장에만 의존하지 않고, 더 안정적인 공급망을 확보하려 애썼던 것으로 보인다. 승려들과 뿌리를 공유한다 볼 수 있는 유민들이 그 공급선이다. 해안가와 섬으로 또 산으로, 만주와 연해주까지 그 이동 영역을 넓히고 있던 유민 중에는 사찰과 밀접한 협력관계를 보이는 집단 이주민들이 있었다. 국경 지역 여러 마을에 중국 말도 하는 승려들이 아내와 자식을 두고 산다고 했고, 승려가 이끌어 백두산 아래 백여 개의 마을이 생겨나고 있다는 보고가 올라왔다. 제지로 유명하던 전라도 사찰 주변에도 닥 키우는 것을 전문으로 하는 화전민 마을에서 수천만 근이 넘는 닥을 사찰에 공급하고, 마을에도 제지 시설을 만든다고 했다. 태어난 고향을 등지고 새로운 삶을 개척하려는 이들이 추구한 삶은 모두 달랐을 것이다. 이들 사이의 관계도 늘 평탄하지는 않았을 것이다. 우리가 알 수 있는 것은 그 중 일부가 닥나무를 매개로 기지를 나누고 연대하며 새로운 가능성을 함께 열어냈다는 것이다.

영·정조 중흥기 이후의 19세기를 보통은 쇠퇴기, 민란의 세기로 본다. 이렇게 닥나무를 중심으로 연결된 이들은 '쇠퇴의 19세기'에 거대한 사찰을 매개로 다양한 고부가가치 종지와 창조지 등 생활지를 수출하며 성장을 이어갔다. '민란의 19세기'에 이들은 일상적 협상과 연대로 새로운 사회적 계약과 생산 체제라고 할 수 있는 것을 만들어갔다. 호적에 등록되지 않은 나머지 60%가 조선 조정을 길들이며 만든 역동적 역사라고 할 수 있다. 닥종이가 자력루의 길을 걷지 않은 것은 이들이 닥나무에 밀착된 사물적 기지를 다양한 사회적 기지를 통해 집단적 성취로 만들었기 때문일 것이다.

그러나 사회적 기지에조차 중요한 것은 닥나무에 대한 깊은 이해와 배려이다. 닥나무가 여럿이 함께 만들어간 복잡한



그림 6. — 휴지 재활용품 : 술병, 합환주 술잔 (영 모습과 밀 바닥)  
© e뮤지엄 emuseum.go.kr

대부분의 제지 사찰은 시장에만 의존하지 않고, 더 안정적인 공급망을 확보하려 애썼던 것으로 보인다. 승려들과 뿌리를 공유한다 볼 수 있는 유민들이 그 공급선이다. 해안가와 섬으로 또 산으로, 만주와 연해주까지 그 이동 영역을 넓히고 있던 유민 중에는 사찰과 밀접한 협력관계를 보이는 집단 이주민들이 있었다.

여정에서 한 번도 뒷자리를 차지하지 않았음은 '휴지(糞紙)'로 만들어진 재활용품과 행정, 소비의 변화에서도 드러났다. 요즘은 쓰레기를 통칭하기도 하는 휴지라는 말은 '쉬는 종이'라는 뜻이다. 휴지는 환지(還紙), '돌아온 종이'와 함께 쉬고 난 다음의 재활용을 염두에 둔 말이고, 한자어지만 중국과 일본에는 없는 말이다. 닥의 특성과 그 특성을 존중한 공정 덕분에 닥종이가 다양하게 재활용이 가능했던 덕분이다. 양반 관료들은 문서고의 종이를 '휴지'라며 가져다가 재생하는 장인들을 처음에는 엄하게 벌했다. 초기의 재생지는 품질도 형편없었다. 하지만 휴지에도 그대로인 닥 섬유를 버릴 수 없었던 장인들은 이 품질을 개선하기 시작했고, 휴지 재활용품의 몸값은 높아졌다. 기름을 먹인 종이 비뚤은 개항 후에 들어온 유리 등잔보다 두세 배는 비쌌다. 이런 재활용품의 변신에 양반 관료들은 휴지 다툼에 나섰다. 두껍기로 유명한 과거시험 낙방지를 놓고 벌어진 경쟁이 가장 뜨거웠다. 이 부서 간 휴지 확보 경쟁 덕분에 휴지는 조선 후기에 가장 투명하게 관리되는 자원 중 하나로 <의궤>와 <등록> 등 공문서에 흔적을 남겼고, 사람들은 집에 휴지 상자를 두고 다 쓴 종이를 모아 닥종이의 다음 생을 준비했다.

한날 휴지를 순환되는 공공자원으로 만드는 닥종이의 여정은 사물에 밀착되어 기지를 발휘하는 일의 힘을 보여준다. 닥나무를 둘러싼 모든 것의 관계를 조금씩 뒤바꿔 나간 힘이다.

팬데믹과 기후 변화는 우리가 사물과 맺은 관계가 뼈격거리고 있음을 뚜렷이 전하고 있다. 하지만 우리 중 상당수는 단숨에 우리를 구원해줄 마법과 같은 과학기술이나 거대한 혁명, 혹은 정치적 결단이라도 기다리듯 그저 손을 놓은 듯도 보인다. 그런 과학기술이 있을까, 모두 한 가지 목표를 향해 혁명하는 것이 가능할까? 천명을 받았다는 조선의 절대왕권 하에서도 왕의 명령이 사찰을 없애지 못했다. 닥종이를 만든 이들이 자신들의 처지를 한탄하며 손을 놓았다면, 조선에서 쇠퇴의 길을 걸었던 다른 기술과 같은 길을 걸었을 것이다. 하지만 집을 떠나 유민의 길을 택한 이들은 닥나무를 통해 국경을 넘나들며 천년 닥종이를 만들고, 조선 사회가 종이를 만들고 쓰고 버리는 방식을 바꿨으며, 자신들에게 새로운 가능성을 열었다.

마법과 같은 과학기술의 편리함을 유지하기 위해서라도 많은 것이 변해야 한다. 에너지 보존의 법칙과 질량 보존의 법칙을 넘어서는 수 없으니, 사실 모든 것이 변하고 있다. 문제는 긍정적 변화를 만드는 것이다. 지금도 애쓰고 있을 해당 분야의 과학기술자들보다 더 많은 이들이 자신의 영역을 벗어나는 지적 유민이 되어 보면 어떨까? 우리의 삶을 떠받쳐왔던 사물을 하나하나 살피며 새로운 관계를 찾아가는 기지를 발휘한다면 닥나무와 장인이 함께 만든 순환의 길을 여기저기서 재발명할 수 있지 않을까?

# HORIZON 2023 하반기 발행목록

P. Puzzles  
M. Mathematics  
N. Natural Sciences  
T. Transdisciplinary

## 7

**P.**  
[7월의 퍼즐] 도미노와 4색 문제  
글. 한동규 그림. 영영

**M.**  
확률편미분방정식과 인공지능  
글. 임성빈 그림. 맞살

**N.**  
태양광 에너지의 효율적인 활용  
글. 장석주 그림. 카디

[SF와 나[2]]  
20세기 중반 SF 소설에 그려진 인공지능  
글. 전구 그림. 유티디엘

인류가 만들어 온 빛 : 세 번째 이야기  
글. 고재현 그림. 오와열

## 8

**P.**  
[8월의 퍼즐] 비스듬히 숨어 있는 정육면체  
글. 조정휘 그림. 정순형

**M.**  
미분방정식의 특이점 형성에 관하여  
글. 정인지 그림. 전유니

**N.**  
레이저 간섭계 중력파 관측소  
(라이고, LIGO)의 레이저 간섭계[1]  
글. 서호성 그림. 정순형

**T.**  
[SF와 나 [3]] 삼체와 나  
글. 한정훈 그림. 네르

[SF와 나[4]] 내가 SF를 즐기는 방법  
글. 이종필 그림. 솔지

빅뱅에서 인간까지[1] : 생명의 역사 2부  
글. 김항배 그림. 김새미

## 9

**P.**  
[9월의 퍼즐] 할래 갈래  
글. 이충명 그림. 엘

**M.**  
무작위 이산 구조의 문자방 현상  
글. 박진영 그림. 이혜리

물리수학 : 수학과 물리학의  
더욱 놀라운 만남  
글. 유필상 그림. 북극곰

**N.**  
라이고 중력파 검출 신호의 이해와  
중력파 신호 교정  
글. 서호성 그림. 한이인

[빛 시리즈 4편, 최종] 인류가 만들어 온 빛,  
인공 광원에 대한 마지막 이야기  
글. 고재현 그림. kimu

**T.**  
연구와 교육을 통해 본 실험실의 탄생과 진화  
글. 홍성욱 그림. 백지은

## 10

**P.**  
[10월의 퍼즐] 동전에 끼인 나무판  
글. 이충명 그림. 이민순

**M.**  
3차원 쌍곡 공간의 강직성 :  
유한 부피에서 무한 부피까지[1]  
글. 김동률 그림. 박다운

**T.**  
[SF와 나[5]] 나는 어쩌다 SF를  
읽게 되었고, 앞으로도 읽을 예정일까?  
글. 고호관 그림. 윤진상

단백질 구조 및 디자인 연구에서의  
인공지능 활용  
글. 남궁석 그림. LEEGOC

## 11

**P.**  
[11월의 퍼즐] 해파리 가족의  
힐베르트 호텔 바캉스  
글. 안진후 그림. 하꼬방

**M.**  
자유를 원한다면 탁구를 쳐라  
글. 백형렬 그림. 정태훈

**N.**  
양자 컴퓨터와 양자 머신러닝  
글. 박경덕 그림. 소만

**T.**  
[SF와 나[6]] 과학기자가 보는 SF  
글. 이충환 그림. 윤진상

원자력 분야의 인공지능 활용  
글. 유용균 그림. Naheat

## 12

**P.**  
[12월의 퍼즐] 고장난 TV와  
거짓말쟁이 퀴즈쇼  
글. 이충명 그림. 홍미현

**M.**  
3차원 쌍곡 공간의 강직성:  
유한 부피에서 무한 부피까지[2]  
글. 김동률 그림. 박다운

**N.**  
월척의 상상은 현실이 된다 -  
항하사에서 영겁까지  
글. 한정훈 그림. 메이우드

**T.**  
감정연재[1] :  
은유 정보처리의 인지과학  
글. 최원일 그림. 스텔라 박

# HORIZON 2024 상반기 발행목록

## 1

**P.**  
[1월의 퍼즐] 새해맞이 복면산  
글. 안진후 그림. 버비

**M.**  
2023 아벨상 수상자 루이스 카파렐리  
글. 최경수 그림. 셀루

**N.**  
정보전달의 총아[1] :  
디스플레이 기술의 개화  
글. 고재현 그림. 윤진상

**T.**  
인공배아 연구와 윤리[1]  
신경 오가노이드와 윤리  
글. 선웅 그림. 홍미현

## 2

**P.**  
[2월의 퍼즐] 천사와 악마와 총명  
글. 이충명 그림. 버비

**M.**  
연속성의 상대성  
글. 백형렬 그림. 최이인

3차원 쌍곡 공간의 강직성 :  
유한 부피에서 무한 부피까지[3]  
글. 김동률 그림. 박다운

**T.**  
장인과 닥나무가 함께 만든  
닥종이 과학기술, 기지(機智)  
글. 이정 그림. hanagraph

## 3

**P.**  
[3월 퍼즐] 안티슬라이드  
글. 조정휘 그림. 버비

**M.**  
확률 편미분 방정식을 이용한 양자장  
이론의 건설[1] : 무한 차원 곱스측도와  
확률 열방정식  
글. 성기훈 그림. 꾸잉

데이터의 모양을 담은 바코드  
글. 김우진 그림. 김명호

**N.**  
양자물 상태의 재발견  
글. 한정훈 그림. 김명호

**T.**  
이공계열 젠더 불균형 문제에 대응하여  
글. 김효민 그림. 셀루

## 4

**P.**  
[4월의 퍼즐] 고장난 전구  
글. 이충명 그림. 버비

**M.**  
2024 아벨상 수상자 미셸 탈라그랑  
글. 남경식 그림. 윤진상

편미분 방정식을 이용한 양자장 이론의  
건설[2] : 재규격화와 파인만 다이어그램  
글. 성기훈 그림. 꾸잉

**N.**  
[현미경 연재[1]] 인간이 본다는 것에  
대한 의미  
글. 윤종희 글. 윤진상

질량 측정[1] : 질량 표준  
글. 조성환 그림. 소만

정보전달의 총아[2] :  
디스플레이의 탄생과 진화  
글. 고재현 그림. sen

## 5

**P.**  
[4월의 퍼즐 해설] 고장난 전구  
글. 이충명 그림. 버비

[5월의 퍼즐] 그림자 건물보기  
글. 안진후 그림. hanagraph

**M.**  
나눗셈만 알면 보이는 범주의 오일러 지표  
글. 김민규 그림. Meg

**N.**  
[현미경의 과학] 광학 현미경 이모저모[1]  
글. 윤종희 그림. 김명호

**T.**  
감정연재[2] : 감정 지각 과정에서  
언어의 역할  
글. 최원일 그림. yongss

[빅뱅에서 인간까지[9]] 인류의 역사 - 1부  
글. 김항배 그림. 이민순

## 6

**P.**  
[5월의 퍼즐 해설] 그림자 건물보기  
글. 안진후 그림. hanagraph

[6월의 퍼즐] 빙글빙글 닳은 분할  
글. 이충명 그림. hanagraph

**M.**  
중점그래프란 무엇인가?  
글. 서동균 그림. 김명호

**N.**  
[현미경의 과학] 광학 현미경 이모저모[2]  
비표지 광학 현미경  
글. 윤종희 그림. 김명호

**T.**  
인공배아 연구와 윤리[2]  
배아모델, 또는 인공배아와 윤리  
글. 선웅 그림. 김명호

---

발행일	2024년 12월
발행처	고등과학원 서울특별시 동대문구 회기로 85 02.958.3711
발행인	노태원
편집위원장	국형태
편집위원	권혁준, 김현규, 백형렬, 이상욱, 최형순
편집자	이서현
디자인·제작	sloment

HORIZON은 한국간행물 윤리위원회의 윤리강령 및 실천요강을 준수합니다. 본지에 게재된 글이나 자료를 고등과학원의 허락 없이 무단 복사, 전재하는 것을 금합니다.

---

HORIZON은 고등과학원이 발간하는 과학 전문 웹진입니다. HORIZON의 목표는 우리 일상과 더 이상 떼어놓을 수 없게 된 과학을 대중에게 널리 알리는 데 있습니다. 과학이 전문화 되면서 과학 분야 사이의 벽 또한 높아지고 있으며, 이에 따라 최신 과학의 성과를 알리는 것은 대중뿐만 아니라 동료 과학자들에게도 필요한 일이 되고 있습니다. HORIZON은 최신 과학의 뛰어난 성과에 초점을 두고, 기존 미디어에서 전달하지 않았던 깊이와 학술적인 논문에서 펼치지 못했던 범위를 모두 탐사해보고자 합니다.

---

고등과학원은 한국의 기초과학을 세계적인 수준으로 끌어 올리고자 1996년 10월에 설립된 과학기술정보통신부 산하 출연연구기관으로, 우리나라 최초의 순수이론기초과학 연구 기관입니다. 수학부, 물리학부, 계산과학부 세 학부를 운영하고 있으며 학부마다 세계적인 석학을 포함한 교수진과 젊고 유능한 연구원들이 활발한 연구 활동을 펼치고 있습니다. 또한 활발한 국제 학술행사 및 세미나, 방문연구 프로그램을 통해 해외의 최신 연구를 국내 학자들에게 소개하고 상호 교류하며 세계적인 수준의 연구를 수행하고 있습니다.