고등과학원 홈페이지
www.kias.re.kr

HORIZON 홈페이지
horizon.kias.re.kr

HORIZON 페이스북
www.facebook.com/KIASnews

고등과학원
KOREA INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY

표지 일러스트. 네르
현대 암호학의 태동[2] : 섀넌의 정보이론적 안정성

HORIZON
2024 / 2025 —— vol.7
Korea Institute for Advanced Study

HORIZON

2024 / 2025 —— VOL.7

고등과학원

Mathematics

60년 난제인 소파 문제를 풀어낸
한국의 수학자
백진언 박사를 만나다

표준기저를 찾아서 [1]

그래프와 곡면의 동상이몽 [1] :
그래프와 위상수학적 대칭

Natural Sciences

[양자컴퓨팅의
다양한 물리적 플랫폼]
초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현

뇌과학(신경과학)의 역사

[현미경의 과학]
엑스선 현미경 [1]

Transdisciplinary

행복의 심리학 :
우리는 함께 행복할 수 있나?

'유사 과학자'
리센코를 아십니까?

빅뱅에서 인간까지 [11] :
인류의 역사 3부

HORIZON

HORIZON은 고등과학원이 발간하는 과학전문 웹진입니다.

현대암호학의 태동[2]: 새넌의 정보이론적 안정성

< 기사 바로가기 >

글. 이기우

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.

CONTENTS

60년 난제인 소파 문제를 풀어낸 한국의 수학자 백진언 박사를 만나다

글. 최은선(KAIST 수리과학과 학사과정) **그림.** ChatGPT 생성

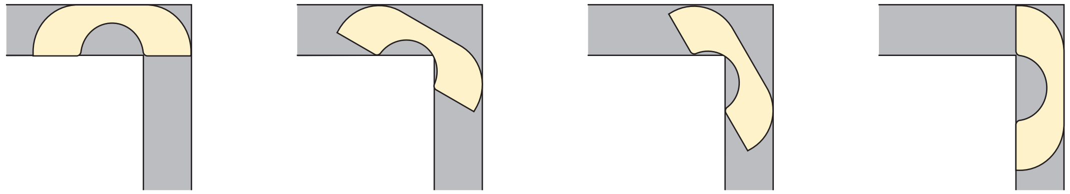


그림 1. —— 소파 문제

“직각 복도를 통과할 수 있는 가장 큰 소파는 무엇인가?”

이 단순한 질문은 수학계에서 반세기 넘게 풀리지 않은 퍼즐로 남아 있었다. 1966년, 캐나다 수학자 레오 모저Leo Moser가 처음 제안한 ‘소파 옮기기 문제’는, 폭이 1인 L자 형태의 직각 복도를 통과할 수 있는 최대 면적의 평면 도형, 즉, ‘이상적인 소파’의 형태를 찾는 것이었다. 쉽게 말하면, 수평 복도에서 시작해 직각 코너를 돌아 수직 복도로 빠져나올 수 있는 도형 중 가장 넓은 것을 찾는 문제다. 이 문제는 초등학생도 이해할 수 있을 정도로 쉬움에도 불구하고 60년 가까이 명확한 해답이 나오지 않아 수학계의 도전 과제로 남아 있었다. 1992년, 수학자 조셉 거버Joseph Gerver는 복잡한 곡선으로 이루어진 도형을 통해 이 문제의 유력한 후보해를 제시했지만, 그것이 정말 최적해optimal solution인지 증명되지 않은 채 수십 년이 흘렀다.

그림 2. 백진언 박사

(1)과 (2)는 거버 소파를 제시한 거버 교수가, 그리고 (3)에서 각도가 60도와 90도 사이에 있다는 것을 거버 교수가, 그 각도가 정확히 90도라는 것을 백 박사가 증명했다.

이러한 난제를 해결한 인물이 바로 백진언 박사다. POSTECH 수학과를 졸업하고, 미국 미시간대학교에서 박사학위를 취득하여 현재는 연세대학교 수학과의 박사후연구원으로 재직 중인 백 박사는 2024년 12월, 조셉 거버 교수가 제시한 소파 도형이 이 문제의 최적해임을 수학적으로 증명한 논문을 arXiv에 공개해 학계의 주목을 받았다.

백 박사의 논문은 아직 리뷰가 공개되기 전이지만, 그의 풀이가 옳다는 것이 학계의 전반적인 분위기다.

신촌의 한 카페에서 백 박사를 만나 소파 문제 증명에 대한 자세한 이야기를 들을 수 있었다. 그의 증명은 크게 두 단계로 줄일 수 있다.

증명의 첫 번째 단계는 고려해야 하는 소파의 조건을 한정하는 것이다. 대략적으로 말하자면 최대 넓이의 소파 형태가 거버 소파와 비슷하다는 것을 증명하는 단계이다. 그렇게 추려진 소파의 조건은 네 가지다.

(1) Monotone 소파일 것
(2) Balanced 소파일 것
(3) 움직이는 과정에서 90도만큼 회전할 것
(4) Injectivity condition을 만족할 것

여기서 (1)과 (2)는 거버 소파를 제시한 거버 교수가, 그리고 (3)에서 각도가 60도와 90도 사이에 있다는 것을 거버 교수가, 그 각도가 정확히 90도라는 것을 백 박사가 증명했다. (4)는 이 증명의 가장 핵심적인 부분인데, 백 박사가 스스로 떠올리고 증명해냈다. 각각의 조건을 조금 더 자세히 들여다보자.

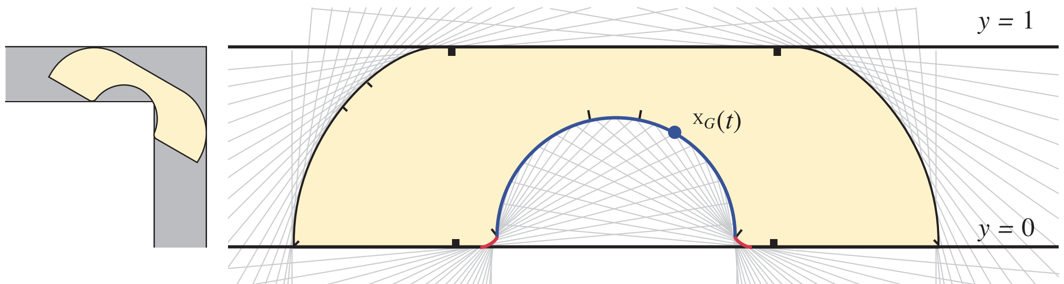


그림 3. 거버 교수가 제시한 소파 도형

(1) Monotone 소파일 것

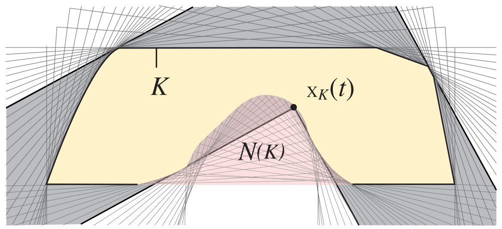


그림 4. Monotone 소파

어떤 소파가 Monotone 소파라는 것은, 소파가 복도를 지나는 도중에 시계방향으로만 단조롭게 회전하는 것을 의미한다. 즉, 소파를 옮기는 와중에, 마치 차를 주차하듯 앞으로 갔다가 뒤로 갔다가 하지 않는다는 것이다. 또한 이 과정에서 이 소파는 복도의 바깥쪽 벽과 늘 접촉해 있다. 이 조건을 통해 우리는 소파를 복도의 교집합으로 볼 수 있으며, 복도의 바깥쪽 벽들이 접선이 되는 볼록한 도형 K를 정의할 수 있다. 그리고 이러한 볼록도형 K가 복도 안을 회전하면서, 복도의 안쪽 벽들이 깎는 부분을 $N(K)$로 정의한다. 이렇게 하면 소파 S가 볼록도형 K에서 영역 $N(K)$를 뺀 모양이 된다. 이러한 소파를 Monotone 소파라고 한다.

(2) Balanced 소파일 것

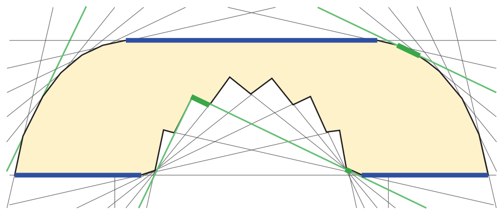


그림 5. Balanced 소파

유한한 각도 집합 Θ를 잡고, 소파 S를 Θ의 각 각도만큼 돌아간 복도들의 교집합 S_Θ로 근사하여 보자. 이때 S_Θ는 다각형이 된다. 이때 Balanced 소파라는 것은 임의의 단위 벡터 $\mathbf{v}$에 대해 $\mathbf{v}$방향의 법선 벡터를 가지는 변들의 총 길이가 $-\mathbf{v}$방향의 변들의 총 길이와 같아지는 조건을 만족하는 소파를 말한다. 만약 이 조건을 만족하지 않는다면 복도의 일부를 변의 총 길이가 더 큰 방향으로 밀어 면적을 더 키울 수 있기 때문에, 최대 넓이를 가지는 소파일 수 없다. 이 조건은 다각형 소파들에 대해 먼저 정의되지만, 이러한 Balanced 조건을 만족하는 다각형 소파의 수열은 결국 최대 넓이의 소파로 수렴한다는 것이 증명된다. 이 조건은 이후 (3)의 90도 회전 조건과 (4)의 Injectivity condition을 이야기하는 데 큰 역할을 한다.

(3) 움직이는 과정에서 90도만큼 회전할 것

복도 L이 직각으로 꺾여 있다고 하더라도, 소파가 꼭 90도만큼 회전해야 한다는 법은 없다. 실제로 거버 교수는 1992년 최대 넓이 소파의 회전 각도 ω가 60도 이상 90도 이하임을 보였다. 이후 Kallus와 Romik은 2017년 그 하한을 약 81.2도까지 끌어올렸다. 그리고 백 박사가 이 회전 각도가 정확히 90도라는 것을 증명해냈다. 증명 과정을 간단히 요약하자면 다음과 같다.

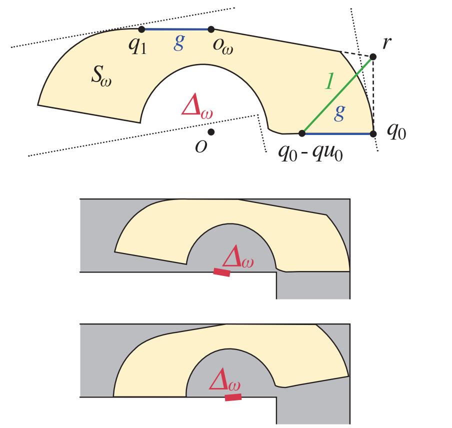


그림 6. 90도 회전 증명 관련 그림

만약 어떤 최대 넓이의 소파 S가 $\omega < 90$도만큼만 회전한다고 가정하면, 수평 방향의 균형 조건을 이용해 S가 실제로 90도-ω만큼 추가 회전할 수 있는 여유 공간이 있다는 것을 보일 수 있다. 따라서 최대 넓이의 소파는 복도를 통과하는 과정에서 90도만큼 회전할 수 있다는 결론이 도출된다.

(4) Injectivity condition을 만족한 것

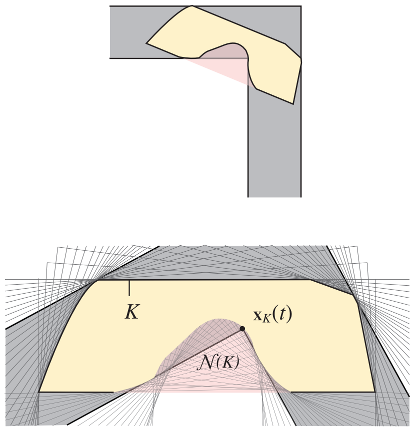


그림 7. ——— 복도를 따라 회전하는 궤적이 형성하는 면적 영역

Injectivity condition이란 회전하는 복도의 안쪽 꼭짓점 궤적 $\mathbf{x}(t)$이 자기 자신과 교차하지 않는다는 것, 즉, injective한 함수라는 의미이다. 이 조건이 만족되면, 꼭짓점이 깎아낸 영역의 넓이를 그린의 정리[Green's theorem]를 이용해 면적 공식으로 정확히 나타낼 수 있으며, 이는 증명에서 면적의 상한을 정밀하게 분석하는 데 중요한 역할을 한다.

$$|\mathcal{N}(K)| \geq (\text{blue region}) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi/2} \mathbf{x}(t) \times \mathbf{x}'(t)\, dt$$

백 박사는 이 조건을 시뮬레이션을 통해 먼저 관찰했다. (2)의 Balanced 조건을 만족하도록 소파를 변화시키는 과정을 반복하다 보면, 모든 궤적이 스스로 교차하지 않고 injective하게 되는 현상을 볼 수 있었다고 한다. 이후 이 현상이 단순한 관찰에 그치는 것이 아니라 수학적으로 증명 가능하다는 것을 보이기 위해, balanced 조건에서부터 ODE를 유도해냈다.

$$\langle \mathbf{A}'(t), \mathbf{v}_t \rangle = \langle -\mathbf{B}'(t), \mathbf{v}_t \rangle + \langle \mathbf{x}'(t), \mathbf{v}_t \rangle$$

이때 회전 중 소파가 복도의 세 점 $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{x}(t)$에서 접한다고 가정하면 균형 조건이 하나의 등식으로 표현되지만, 실제로는 이러한 접점이 항상 존재한다고 보장할 수 없기 때문에, 접촉 여부와 무관하게 항상 성립하는 부등식 형태로 일반화하였다.

$$\langle \mathbf{A}'(t), \mathbf{v}_t \rangle \leq \max(\langle -\mathbf{B}'(t), \mathbf{v}_t \rangle, 0) + |\langle \mathbf{x}'(t), \mathbf{v}_t \rangle|$$

이를 바탕으로 $\langle \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}_0 \rangle < 0$를 보일 수 있고, 여기서 $\mathbf{x}(t)$가 자기 자신과 교차하지 않는다는 결론, 즉 Injectivity condition을 수학적으로 정당화할 수 있게 된다.

증명의 두 번째 단계는, 첫 번째 단계에서 추려낸 소파들 S^i 위에서 넓이의 상한을 설정하는 것이다.

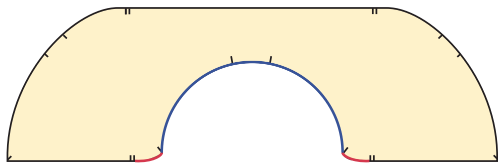


그림 8. ——— 중심부와 두 개의 꼬리로 이루어진 Gerver 소파의 이상적 구조

이를 위해 백 박사는 소파 S를 포함하는 더 큰 도형 R을 정의하고, 그 넓이 $Q(S)$를 상한 함수로 삼는다. 이 도형 R은 하나의 중심[core, 그림의 파란선]과 두 개의 꼬리[tails, 그림의 빨간선]로 구성되며, Gerver 소파의 구조를 일반화한 형태다. 이후 도형 R의 핵심인 모자 부분[cap] K를 왼쪽, 가운데, 오른쪽 영역으로 나누고, 각각의 영역에서 벽 또는 꼭짓점이 깎아내는 기여만을 반영하여 면적을 계산한다. 특히 가운데 부분에서는 Injectivity condition을 통해 자기 교차가 없음을 활용하고, 그린의 정리를 통해 넓이 공식을 엄밀히 표현할 수 있다.

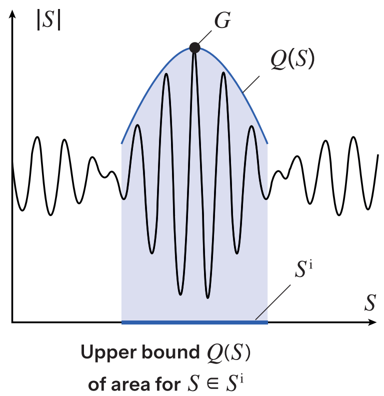


그림 9. ——— 넓이 $|S|$의 이차 오목 상한인 $Q(S)$

다음 단계에서는 이 함수 $Q(K)$가 볼록 집합 위에서 정의된 이차식이고 오목함을 증명한다. 특히 Gerver의 소파 G에 대해서는 이 상한이 정확히 넓이와 일치함을 보여주고, G가 Q의 국소 극대[local maximum]임을 증명함으로써, Q가 이차식이라는 점을 이용해 넓이가 최대가 된다는 결론에 도달하게 된다.

백 박사는 이 문제를 풀겠다고 결심한 지 7년 만에 마침내 해결해냈다. 문제 해결 방식에 대한 직관은 시작한 지 3년쯤 되었을 때 떠올랐지만, 이를 수학적으로 엄밀하게 증명하고 논문으로 정리하는 데에는 상당한 시간이 걸렸다. 처음에는 컴퓨터를 이용한 증명 방식으로 접근했고, 실제로 작동하는 증명 코드도 있었다. 하지만 그 코드는 너무 길고 복잡해서, 증명이 가능하다는 것은 확인할 수 있었지만 이를 완전한 증명으로 정리하는 데 어려움이 있었다고 한다. 결국 그는 증명을 단순화하려고 노력했고, 그 과정에서 컴퓨터가 필요 없어졌다. 2년 동안 공들였던 코드가 필요 없어진 것에 대해 백 박사는 "시원섭섭했다. 그렇지만 이 결과를 쓰려면 증명을 발표하는데 1년은 더 걸렸을 것 같더라. 지금 끝내는 것이 1년 뒤에 끝내는 것보다 훨씬 낫다고 생각했다. 복잡미묘한 마음이었다."라고 표현했다.

백 박사가 길고 긴 7년이라는 시간 동안 한 문제를 잡고 풀어낼 수 있었던 힘은 어디서 왔을까? 백 박사는 어린 시절 XMO라는 올림피아드 카페에 올라와 있는, 다른 사람들이 못 푸는 문제를 푸는 것을 즐겼다. 몇 달 동안 같은 문제를 고민하여 풀어내던 경험이 소파 문제를 해결하는 데도 큰 도움이 됐다고 한다. "그러면서 길게 보았을 때 풀릴 가능성이 얼마나 있는지, 그 감각이 생겼던 것 같다. 소파는 시작할 때부터 왠지 될 것 같은 느낌이 있었다."라고 말했다.

백 박사는 어린 시절 어려운 가정 형편 속에서 자랐다. 수학을 잘 하면 돈을 더 빨리 많이 벌 수 있는 길이 있었을 텐데, 고된 순수 수학의 길을 갈 수 있었던 원동력이 무엇인지 물어봤다. "초등학교 3, 4학년 때 수학을 직업으로 할 수 있다는 걸 알게 된 이후로 계속 꿈이 수학자였던 것 같다. 그 관성으로 여기까지 왔다."면서, "다른 직업을 가지더라도 수학이라는 아름다움은 놓지 못했을 것 같다."고 했다. 또한 "가정형편은 안 좋았지만, 어머님께서 정보를 열심히 찾아 주셨다. 그렇게 KAIST

백 박사는 앞으로 소파 문제와 같은 '기하 최적화' 문제에 도전해보고자 한다. 최근에는 하나의 정다각형을 회전과 평행이동을 허용해 평면 위에 가장 밀도 높게 배열하는 다각형 패킹 문제에 관심을 갖고 있다.

사이버 영재교육원을 알게 되었다."라고 했다. 이때 본인을 가르쳐주었던 KAIST 대학생이 현재 백 박사의 연세대학교 박사후연구원 지도교수인 이준경 교수다. "영재학교를 준비하는 과정에서 중학교 선생님들이 사비를 모아 노트북을 사주시고, 영어학원을 보내주시는 등 물심양면으로 도와주셨다. 그렇게 영재학교를 간 이후에는 영재학교 선생님들의 도움을 많이 받았다. 이러한 배려들 때문에 지금 여기까지 올 수 있었다. 그래서 언젠가 이걸 돌려줘야겠다는 생각을 계속 가지고 있다."라는 이야기를 전해주었다. 백 박사는, 힘든 환경 속에서도 주위의 따뜻한 손길과 제도의 도움을 통해 성장해 온 우리 사회가 함께 길러낸 인재라고 할 수 있다.

백 박사는 앞으로 소파 문제와 같은 '기하 최적화' 문제에 도전해보고자 한다. 최근에는 하나의 정다각형을 회전과 평행이동을 허용해 평면 위에 가장 밀도 높게 배열하는 다각형 패킹 문제에 관심을 갖고 있다. 오각형의 경우에는 이미 해답이 알려져 있어 그 외의 다각형에 대해 탐구하고자 한다. 또한 케플러 추측이라고 알려진 3차원에서의 구 밀도 최적화 문제의 4차원 확장판, 즉, 4차원 공간에서 단위 구를 가장 조밀하게 배치하는 문제를 컴퓨터를 이용해 해결해보고 싶다는 포부도 가지고 있다.

Mathematics

표준기저를 찾아서[1]

글. 김현규(고등과학원 수학부 교수) 그림. 냥즈데이

표준적인 것

수학을 하다보면 만날 수 있는 형용사 중에 '카노니컬canonical'이라는 것이 있다. 찾아보니, 카논canon은 성경의 정경 혹은 정전을 뜻하는 것으로, 카노니컬은 대략 '정경에 따른'이라는 의미를 가지고 있다. 이 단어에 대한 우리나라 문화에 잘 맞는 번역어는 찾기가 쉽지 않고, 그나마 대한수학회 수학용어집에서 대체로 사용되는 '표준', '표준적' 혹은 '표준적인'이 현재로서는 의미 전달 등의 관점에 있어서 나름 괜찮은 번역이라고 생각한다.

주의할 점은 '표준적인'이라는 단어에서 '전형적인(따라서 흔한)'의 의미가 연상될 수도 있겠으나, 수학에서 쓰이는 '카노니컬canonical'은 '전형적인'의 의미가 아니라 '원형적인', '모범적인' 혹은 '가장 훌륭한(따라서 어느 정도의 유일성을 내포하는)'이라는 의미에 가깝다는 점이다. 또한 '카노니컬canonical'은 '스탠다드standard'와도 결이 다르다고 생각한다.

특히 이 글에서 주로 다룰 대상이 벡터공간의 기저basis라는 것인데[1], canonical basis와 standard basis 모두 대한수학회 용어집에는 '표준기저'로 되어 있다. 그러나 필자의 의견으로는, 예컨대 고등학교 기하에서도 다루는 실수체 위의 벡터공간인 $\mathbb{R}^3 = \{(x, y, z) \mid x, y, z \in \mathbb{R}\}$의 기저 $\{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)\}$을 standard basis로 부를 수는 있지만 canonical basis라고 부르기에는 무리가 있다고 본다.

1. 벡터공간과 기저에 대해서는 다음 절에서 설명할 것이고 이 절에서는 그 의미를 몰라도 상관없다.

'카노니컬'의 가장 적합한 번역어를 찾아내어 유통시키는 일도 중요하긴 하지만 그 일은 장기적인 과제로 남기고[2], 이번 글에서는 편의상 임시적인 번역어인 '표준', '표준적', '표준적인'을 사용하기로 한다. 특히 주로 다룰 대상인 canonical basis를 우선 대한수학회 용어집에 의거하여 '표준기저'로 표기하겠다.

2. 좋은 번역어를 찾아낸다면, 마치 '함수관계', '고차 방정식', '변곡점'과 같이 일상이나 언론에서 자주 인용되는 단어로 자리매김할 수도 있을 것이라고 기대한다.

이 '표준적인canonical' 혹은 '표준적'이라는 형용사는 수학의 다양한 분야에서 사용되고 있지만, 여러 분야를 아울러 통용될 만한 엄밀한 수학적 정의를 가진 형용사라기보다는, 다소 두루뭉술하게 사용되고 있다.

얼마 전에 유튜브에서 텍사스 주립대(오스틴) 소속 션 킬Sean Keel교수의 강연[3]을 보다가 킬 교수가 제시한 표준적이라는 형용사의 '일반인을 위한' 정의를 접했는데, 재미있기도 하고 유용하기도 할 것 같아 여기에 소개한다. 어떤 수학적 건설에 대해, 이 건설을 이해할 수 있을 정도로 충분히 교육 받은

사람이라면 누구나 이 건설이 표준적이라는 것에 동의할 수 있는 경우, 이 건설은 표준적인 건설이라는 것이다.

3. Canonical coordinates for Calabi Yau manifolds I – Sean Keel
https://youtu.be/ibsc1fyEYXg 09:15부터

우리나라 말로 표현해 보자면, '이심전심으로 표준적인 것이 표준적인 것이다'라고 할 수 있겠다.

필자는 이 글의 초고를 쓴 이후, 필자가 평소에 친하게 알고 지내는 표준기저에 정통한 수학자 한 분과 표준기저의 정의에 대하여 대화를 나누었는데, 이 대화를 통해서 기저의 표준성을 대하는 두 가지 서로 상반된 접근법이 있다는 점과 이 글의 초고에는 이 둘을 혼용해서 썼다는 점을 깨닫게 되었다. 이 글에서는 표준기저의 의미를 수학적으로 정의하지는 않을 계획이지만(다분히 의도적으로), 표준기저에 대한 두 가지 접근법은 서로 구분하여 생각하는 것이 우리의 논의를 좀 더 명확하게 함에 있어 유용할 것이라고 판단했다. 다소 비수학적 용어 선택이기는 하지만, 이 글에서는 두 종류의 표준기저를 각각 '감성적' 표준기저와 '이성적' 표준기저로 칭하기로 한다. 이러한 구분법은 꼭 벡터공간의 기저뿐 아니라 다른 수학적 대상에도 적용해볼 수 있겠지만, 편의를 위하여 기저에 대해서만 논의해보겠다.

우선 필자의 최근 수학적 입맛에 부합하기도 하고 이 글을 쓰기로 하면서 마음에 두었던 것은 감성적 표준기저로, 이것의 의미는 위에서 언급한 '일반인을 위한' 카노니컬의 정의를 생각하면 된다. 즉, 어떤 특정한 벡터공간의 특정한 기저의 건설에 대한 설명을 들었을 때, 그 설명을 이해하는 누구나 "와, 정말 표준적인걸?"이라고 반응할 만한 기저, 즉, 이심전심으로 표준적인 기저이다.

한편, 이성적 표준기저라고 부를 만한 기저란, 어떤 특정한 수학 분야에서 특정한 종류의 벡터공간들을 다룬다고 했을 때, 그 특수한 맥락에서 좋은 기저가 가질 것으로 기대하는 몇 가지 성질을 목록으로 만들어 공리화한 경우, 그 성질들을 모두 만족하는 기저라고 생각하면 되겠다. 종종 이 성질들의 목록은 워낙 강력해서, 그러한 기저를 하나라도 찾기 전에는 그런 기저가 존재한다는 사실이 기적처럼 느껴지기도 하고, 그러한 기저가 유일할 것이라고 기대하는 것이 자연스러울 정도이다. 그렇지만 보통 그러한 기저가 정말 유일하다는 것을 증명하는 일은 상당히 어려운 일이며 매우 좋은 결과로 인정받을 가능성이 크다. 거칠게 정리하면, 가장 훌륭한 기저, 나아가서 공동 1등 없이 1등으로 훌륭한 기저 정도로 이해할 수 있겠다.

필자의 머릿속에서 이 두 개념이 혼합되어 있었던 이유는, 많은 경우에 주어진 벡터공간의 표준기저라고 부를 만한 기저가 유일할 것이라고 통상 기대하기 때문인 것 같다. 정말 유일한 경우, 그 유일한 표준기저가 감성적 표준기저이기도 하고 이성적 표준기저이기도 한 것이다. 만약 감성적 표준기저만 알려져 있을 때는 이 기저가 이성적 표준기저이기도 한지 확인하는 일을, 이성적 표준기저만 알려져 있을 때는 이 기저가 감성적 표준기저이기도 한지 알아내는 일을 연구 주제로 삼는 것이 자연스럽다.

이 글에서는 무리가 없는 경우 '표준기저'라는 용어를 주로 사용하고, 필요시 이를 감성적 표준기저와 이성적 표준기저로 나누어 접근할 것이다.

벡터공간의 표준기저

혹자는 표준적인 정의나 건설이 정답을 하나로 정해버려서 수학자 개인의 자유와 즐거움을 빼앗는 것은 아닌지 걱정할 수도 있지만, 현실적으로는 자유보다 표준에 의한 부자유가 그리워지는 때도 있으며, 그것은 예컨대 수학 과목 답안지를 채점할 때, 대표적으로는 선형대수학 답안을 채점할 때가 바로 그러하다.

선형대수학의 기본 대상은 벡터공간vector space이며, 이는 집합으로서 원소 간의 더하기, 그리고 원소와 상수의 곱이 정의되어 있고, 모종의 공리들을 만족하는 집합이다. 고등학교

필자의 머릿속에서 이 두 개념이 혼합되어 있었던 이유는, 많은 경우에 주어진 벡터공간의 표준기저라고 부를 만한 기저가 유일할 것이라고 통상 기대하기 때문인 것 같다.

수학에서 화살표로 표현된 벡터들이 살고 있는 공간도 벡터공간의 예시이지만, 원소가 그림이 아닌 추상적인 벡터공간도 많다. 고등학교 수학에서 알게 모르게 다루어진 추상적인 벡터공간으로는 다음의 예시를 들 수 있다 :

$$V = \{3\text{차 이하의 유리계수 다항식들 } f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \ (\text{단, } a, b, c, d\text{는 유리수})\}$$

우리는 누구나 V의 원소 두 개

$$f(x) = a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1\text{과}$$
$$g(x) = a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2\text{를 더하면}$$

$$f(x) + g(x) = (a_1 + a_2)x^3 + (b_1 + b_2)x^2 + (c_1 + c_2)x + (d_1 + d_2)$$

가 되어 역시 V의 원소가 됨을 알고 있고, 또한 V의 원소 $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$와 유리수 α에 대하여 이들을 곱하면

$$\alpha f(x) = (\alpha a)x^3 + (\alpha b)x^2 + (\alpha c)x + (\alpha d)$$

가 되어 V의 원소가 됨을 알고 있다. 따라서 V는 유리수체 $\mathbb{Q}$ 위의 벡터공간이다.[4]

4. 좀 더 정확히는, 벡터공간의 공리들이 모두 만족하는지도 확인해야 한다.

벡터공간의 기저basis는 벡터공간의 부분집합으로서 벡터공간의 모든 원소를 이 부분집합의 원소에 상수곱과 더하기만을 적용하여 표현할 수 있는 가장 작은 집합인데, 예컨대 원소 개수가 네 개인 $B = \{x^3, x^2, x, 1\}$이라는 부분집합이 벡터공간 V의 기저이다. V의 임의의 원소 $f(x)$를 B를 이용해 $a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \cdot 1$와 같이 표현할 수 있으며, 상수계수만 읽으면 (a, b, c, d)라는 숫자 순서열을 얻는다. 기저라는 개념의 정의 중 '가장 작은'이라는 조건을 사용하면, V의 각 원소에 대하여 이러한 숫자열이 유일하게 결정됨을 증명할 수 있다. 이제 이 숫자 순서열을 $f(x)$라는 원소의 좌표 표현으로 볼 수 있다. 즉, 기저를 이용하면, 추상적인 벡터공간의 원소를 구체적인 숫자 좌표로 표현할 수 있게 된다.

그런데 기저는 벡터공간이 정말 아주 특별한 경우가 아니라면 유일하지 않으며, 예컨대 위 예시의 V에 대해서는, $B' = \{(x-1)^3, (x-1)^2, (x-1), 1\}$도 B만큼이나 훌륭한 기저이다(아, '훌륭한'은 수학적으로 정의되지 않은 단어이지만, 곧 그 의미의 일부를 유추해볼 수 있을 것이다). 예컨대, V의 원소 중 $f(x) = 2x^3 - 6x^2 + 5$를 생각해보면, B에 관한 좌표는 $(2, -6, 0, 5)$이지만,

$$2x^3 - 6x^2 + 5 = 2(x-1)^3 - 6(x-1) + 1$$

이므로(확인해보시라!) B'에 관하여 좌표로 표현하면 $(2, 0, -6, 1)$이다. 즉, 기저가 바뀌면, 벡터공간의 원소의 좌표 표현이 바뀐다.[5] 그러니까 벡터공간의 원소를 좌표로만 표현하려면, 어떤 기저를 사용하고 있는지 반드시 밝혀야 한다. 만약 선형대수학 과목에서 V에 관한 어떤 시험 문제의 답이 $2x^3 - 6x^2 + 5$였다면, 그 답을 "좌표 표현이 $(2, -6, 0, 5)$인 원소"라고만 쓸 수는 없고, 예컨대 "기저 $B=\{x^3, x^2, x, 1\}$에 관한 좌표 표현이 $(2, -6, 0, 5)$인 원소"라고 써야 한다는 것이다.

5. [그림1]은 V는 아니지만 이 현상을 보여주는 예시이다.

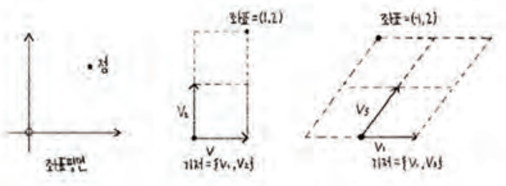


그림 1. ——— 기저가 바뀌면 좌표가 바뀐다.

그런데 만약 어떤 학생이 이 문제의 답을 "기저 $B' = \{(x-1)^3, (x-1)^2, (x-1), 1\}$에 관한 좌표 표현이 $(2, 0, -6, 1)$인 원소"라고 썼다면? 그렇다면 채점자는 직접 $2x^3 - 6x^2 + 5 = 2(x-1)^3 - 6(x-1) + 1$이 성립하는지를 확인해봐야 할 것이다. 그런데 학생들 수십 명이 전부 이런 식으로 답을 서로 서로 다르게 표현한다면? 즉, 같은 원소를 다른 기저들을 사용해 표현한다면? 아마 채점자는, "아, 그냥 남들 다 쓰는 기저 쓰지.."라고 생각할 수도 있을 것이다. 선형대수학의 용어를 사용하기는 했지만 이러한 상황은 물론 중·고등학교에서도 일어날 수 있다. 즉, 중·고

등학교의 어떤 수학 문제의 답이 $2x^3-6x^2+5$인 경우, 어떤 학생은 그 답을 $2(x-1)^3-6(x-1)+1$로 쓸 수도 있지 않겠는가?

이 예시는 가끔은 표준기저가 유용할 때도 있다는 사실을 보여주고 있다. 즉, 모든 사람이 동일하게 사용하는 유일한 표준기저가 있다면, 채점자는 위와 같은 수고를 하지 않아도 되어 만족해할 것이다. 그런데 만일 어떤 수학자가 어느 벡터공간의 어느 표준기저의 건설을 접하고 만족해 했다면, 그 만족감은 이러한 종류의 유용성에서 오기보다는 아마 그 표준성 자체에서 왔을 가능성이 높다. 어떤 건설은 정말 너무나 표준적이어서, 공부하지 않고는 참지 못할 정도일 때가 있다.

다시 위의 벡터공간 V로 돌아와서 질문을 해보자. 고등학교 수학 교육을 받은 사람이라면 누구나 표준기저라고 인정할 만한 V의 기저가 존재하는가? 있다면 무엇인가? 고등학교 수학 교육까지만 받은 사람이라면 당연히 $B=\{x^3, x^2, x, 1\}$이 표준기저라고 생각할 수도 있겠지만, 이 글을 더 읽다 보면 대학교 학부 과정 이상의 교육을 받은 사람은 꼭 그렇게 생각하진 않을 수도 있다는 점을 알게 될 것이다. 예컨대, B나 $B'=\{(x-1)^3, (x-1)^2, (x-1), 1\}$이 (이성적) 표준성의 관점에서는 전혀 차이가 없다고 여길 수도 있다는 관점을 이해할 것이다.

다항식들의 벡터공간

난이도를 약간 높인 (유리수체 위의) 벡터공간의 예시로는 다음이 있다 :

$$\mathbb{Q}[x] = \{\text{변수 } x\text{에 관한 유리계수 다항식들}\}.$$

앞의 예시인 V와 다른 점은, 이번에는 다항식의 차수에 제한이 없다는 것이다. 그럼에도 기저를 찾을 수는 있지만 $\mathbb{Q}[x]$는 기저의 원소 개수가 무한이다. 다음은 누구나 떠올릴 수 있는 $\mathbb{Q}[x]$의 기저의 쉬운 예시이다.

$$\begin{aligned} B &= \{\text{계수가 1인 단항식들}\} = \{1, x, x^2, x^3, \dots\} \\ &= \{x^n \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}. \end{aligned}$$

여기서 $\mathbb{Z}_{\geq 0}$는 0 이상의 모든 정수의 집합이다. 이 집합 B가 (유리수체 위의) 벡터공간 $\mathbb{Q}[x]$의 기저가 된다는 사실은 널리 알려져 있고, 독자에게 당연하게 생각될 수도 있다. 관심 있는 독자들은 직접 증명을 써 보기를 권한다. 그러다보면 $\mathbb{Q}[x]$의 수학적으로 엄밀한 정의가 무엇인지, 그리고 '다항식'이라는 말의 정의가 무엇인지 돌아보는 기회가 될 것이다.

B가 기저인 것을 믿더라도, 또한 B가 어떤 면에서 꽤 훌륭한 기저라고 생각하더라도, 차수의 제한이 있던 이전 경우에서와 같이 비슷한 문제가 있다. 즉, $\mathbb{Q}[x]$에는 B 말고도 다음과 같은 B 못지 않게 훌륭한 기저들이 많다는 것이다 :

$$\begin{aligned} B' &= \{1, (x-1), (x-1)^2, (x-1)^3, \dots\} \\ &= \{(x-1)^n \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}. \end{aligned}$$

이 B'이 억지로 만든 새로운 기저가 아니라 정말 B만큼 훌륭한 기저라는 사실을 살펴보고자 하는데, 그러기 위해 $\mathbb{Q}[x]$의 벡터공간 구조뿐만 아니라 환ring 구조 혹은 대수algebra 구조, 즉, 원소들의 곱하기 구조를 고찰해 보자.

$\mathbb{Q}[x]$의 원소 두 개, 즉, 두 다항식 $f(x)$와 $g(x)$가 있을 때, 중·고등학교 수학 시간에 배운 다항식의 곱 개념을 사용하여 이들의 곱 $f(x)g(x)$를 계산, 즉, 전개할 수 있고, 그 결과를 다항식으로 표현할 수 있다. 예컨대, $f(x)=2x^3-1$, $g(x)=3x+2$의 경우, 이들의 곱 $f(x)g(x)$는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} &f(x)g(x) = (2x^3-1)(3x+2) \\ &= 2x^3(3x+2)-(3x+2) = 6x^4+4x^3-3x-2. \end{aligned}$$

이 연산이 $\mathbb{Q}[x]$에 (원소 간의) 곱하기 구조를 준다.

집합 $\mathbb{Q}[x]$에서 자기 자신으로 가는 함수

$$F : \mathbb{Q}[x] \longrightarrow \mathbb{Q}[x]$$

가 $\mathbb{Q}[x]$의 더하기, 상수곱, 곱하기 구조를 모두 보존하면 이 함수 F를 대수 준동형사상algebra homomorphism 혹은 이 경우 대수 자기준동형사상algebra endomorphism이라고 부른다. 여기에서 F가 어떤 연산 구조를 보존한다는 조건의 의미는, 예컨대 더하기의 경우, 모든 $f(x), g(x) \in \mathbb{Q}[x]$에 대해

$$F(f(x)+g(x)) = F(f(x)) + F(g(x))$$

가 성립함을 말한다. 대수 준동형사상 F가 역함수 F^{-1}를 가지고 F^{-1} 역시 대수 준동형사상일 경우, F를 대수 동형사상algebra isomorphism, 특히 이 경우 대수 자기동형사상algebra automorphism이라고 한다. $\mathbb{Q}[x]$의 대수 자기동형사상의 예시로는 표기법의 헷갈림을 약간 감수하고 적어 보면 다음이 있다 :

$$F(f(x)) = f(x-1).$$

예컨대 이 F는 $2x^3-3x+1$을 $2(x-1)^3-3(x-1)+1$로 보낸다.

기저에 관한 논의로 돌아오면, B'은 B에다가 위에서 예시로 찾은 $\mathbb{Q}[x]$의 대수 자기동형사상 F를 적용해서 얻어짐을 확인할 수 있다. 바로 이 점이 B'을 B만큼이나 훌륭한 기저로 볼 수 있는 대수학적 관점 중 하나이다. 비슷한 논의를 이전 고등학교 수준의 벡터공간의 예시인 V에도 적용할 수 있다.

만일 우리가 $\mathbb{Q}[x]$의 이성적 표준기저를 찾고 있는 중이라면, 즉, 공동 1등이 없이 단독 1등으로 훌륭한 (따라서 유일한) 기저를 찾고자 한다면, 우리는 위의 논의를 통해서 B를 $\mathbb{Q}[x]$의 이성적 표준기저로 보기 힘들 수 있다는 점을 관찰할 수 있다. 왜냐하면 설사 B가 훌륭한 기저일지라도, $\mathbb{Q}[x]$에는 대수학적 관점에서 B만큼이나 훌륭한 기저들이 B'을 포함하여 너무나 많기 때문이다.

난이도를 한 단계 더 높인 벡터공간의 예시로 다음이 있다:

$$\mathbb{Q}[x, y] = \{\text{변수들 } x\text{와 } y\text{에 관한 유리계수 다항식들}\}.$$

즉, 이변수 유리계수 다항식들의 모임인데, 원소의 예시로는 $f(x) = 3x^2y^3-4xy+5y^2-2x+3$이 있다. 이 경우에도 단항식의 개념을 생각할 수 있는데, 계수가 1인 단항식들에는 x^2y^3, xy, y^2, x, 1 등이 있고, 이들이 역시 $\mathbb{Q}[x, y]$의 기저를 이룬다 :

$$B = \{\text{계수가 1인 단항식들}\} = \{x^n y^m \mid n, m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}.$$

물론 B가 정말 기저가 됨을 보여야 하지만, 이것은 독자들에게 흥미로운 연습문제로 남긴다. 이 예시에서도 역시 B만큼 훌륭한 다른 기저가 너무나 많은데, 상황은 이전보다 더 심각하다. 예컨대,

$$B' = \{(x-y^3+2)^n y^m \mid n, m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}$$

도 B만큼이나 훌륭한 기저가 되는데, 그 이유는 역시 B'이 B에다가 $\mathbb{Q}[x, y]$의 대수 자기동형사상을 적용해서 얻어질 수 있기 때문이다(이 대수 자기동형사상은 무엇인가?).

대수기하학Algebraic Geometry의 철학을 이용하여 이 사태를 평가해보면, B와 B'이 똑같이 훌륭한 기저라는 점은, 아인슈타인의 상대성이론에서 내가 사용하는 좌표계나 남이 사용하는 좌표계가 모두 평등한 관계라는 점에 대응된다.

따라서 $\mathbb{Q}[x]$의 경우와 비슷하게, 언뜻 생각하기에는 꽤 표준적이라고 생각될 만한 기저인 B가 $\mathbb{Q}[x, y]$의 기저들 중 대수학적 관점에서 '가장 훌륭하고 유일한 기저'로 보기는 힘든 타당한 이유가 있으므로, 이성적 표준기저라고 부르기가 어렵다고 할 수 있다.

위의 논의를 조금 더 세밀하게 분석해보자면, 우리는 벡터공간 $\mathbb{Q}[x]$나 $\mathbb{Q}[x, y]$에 대해서 꽤 좋아 보이는 기저 B가 이성적 표준기저, 즉, '가장 훌륭하고 유일한 기저'가 아니라고 결론짓기 위하여 '유일성' 부분을 공략하였다. 그러기 위해 이 벡터공간들을 자연스럽게 곱하기 구조가 주어진 대수algebra로 여겼으며, 대수적으로 (모종의 의미로) 훌륭한 임의의 기저에 대수 자기동형사상을 적용하여 얻어지는 새로운 기저도 이전 기저와 똑같이 대수적으로 훌륭하다는 점에 착안하였다. 따라서 대수적으로 유일하게 훌륭한 기저이려면, 대수적으로 훌륭하면서 모든 대수 자기동형사상에 의해 보존되어야만 할 것이다. 그런데 우리가 생각한 특정한 기저 B는 어떤 대수 자기동형사상에 대해서는 보존되지 않는다는 점을 확인했다. 우리는 B가 대수적으로 얼마나 훌륭한지 따져보지는 않았지만, 만약 훌륭하다 하더라도 그만큼의 '훌륭성'을 가진 기저는 B가 유일하지 않다는 것을 알 수 있다.

그러나 아직까지는 대수적으로 (어떤 의미로) 훌륭하면서도 모든 대수 자기동형사상에 의해 보존되는 (B가 아닌) 어떤 다른 기저가 존재할 가능성은 배제할 수 없다. 만약 그런 기저가 있다면 어느 정도는 이성적 표준기저로 불릴 만한 조건을 갖춘 셈이다. 도전을 원하는 독자에게 연습문제를 권하자면, $\mathbb{Q}[x]$와 $\mathbb{Q}[x, y]$의 모든 자기동형사상을 다 찾고, 이 모든 자기동형사상에 의해 보존되는 기저가 존재하는지 확인해보기 바란다. 이 문제는 위의 우리의 논의에서처럼, 정의가 모호한 훌륭성은 건드리지 않고 유일성만 공략하므로 수학적으로 잘 정의된 문제이다.

하지만 필자가 표준기저에 관한 이 글을 구상하면서 독자들에게 전달하고 싶었던 바는 이성적 표준기저라기보다는 감성적 표준기저에 관한 이야기이기 때문에, 이 글이나 다음 연재글에서는 특정한 기저가 각종 좋은 성질을 만족하는지 필자가 직접 확인하는 일은 없을 것이다. 오히려, 그러한 성질들의 확인을 거치지 않고도 수학자를 포함한 독자들에게 감동을 줄 수 있는 기저가 있다는 이야기를 전달하는 것이 목표이다. 요컨대, 위의 연습문제를 풀어보지 않아도 이 글을 음미하는 데에는 아무 문제가 없을 것이다!

정수지수 다항식들의 벡터공간

지금까지의 벡터공간들은 사실 학부 수준에서 다룰 수 있는 가장 쉬운 벡터공간의 예시들이라고 볼 수 있지만, 흔쾌히 (이성적) 표준기저라고 인정할 만한 기저를 적어도 이 글에서는 찾지 못했다. 그럼에도 우리는 좌절하지 않고 오히려 난도를 한 단계 더 높인 예시로 나아가보기로 한다:

$$\begin{aligned}\mathbb{Q}[x, x^{-1}] &= \{\text{변수 x에 관한 정수지수 다항식들}\}\\ &= \{x, x^{-1}\text{에 관한 다항식들}\}\end{aligned}$$

다항식은 단항식 x^n에 상수 계수를 곱한 것들을 더해서 얻어질 수 있었다. 다항식의 경우는 지수 n이 항상 음이 아닌 정수였다면, 이제는 음의 정수도 허용하기로 한다. $\mathbb{Q}[x, x^{-1}]$의 원소의 예시로는 $f(x) = 3x^2 - 1 + 2x^{-3}$이 있다. $\mathbb{Q}[x, x^{-1}]$의 원소들을 통상 **로랑 다항식**Laurent polynomial이라고 부른다. 음수지수를 사용하는 것이 불편하면 로랑 다항식을 유리함수의 형태로 $f(x) = \frac{3x^5 - x^3 + 2}{x^3}$ 으로 표현할 수도 있다. 즉, 로랑 다항식은 유리함수 중 분모가 단항식인 유리함수로 써질 수 있는 것으로 정의할 수 있다.

이 로랑 다항식의 벡터공간 $\mathbb{Q}[x, x^{-1}]$는 다음의 기저를가진다 :

$$\begin{aligned}B &= \{\text{계수가 1인 로랑 단항식들 Laurent monomials}\}\\ &= \{x^n \mid n \in \mathbb{Z}\}.\end{aligned}$$

편의상 $\mathbb{Q}[x, x^{-1}]$를 $\mathbb{Q}[x^{\pm 1}]$로 표현하기도 한다.

이변수로 올라가면 다음의 예시를 얻는다:

$$\begin{aligned}\mathbb{Q}[x^{\pm 1}, y^{\pm 1}] &= \{x, y\text{에 관한 로랑 다항식들}\}\\ &= \{x^{\pm 1}, y^{\pm 1}\text{에 관한 다항식들}\}\end{aligned}$$

아래 부분집합은 $\mathbb{Q}[x^{\pm 1}, y^{\pm 1}]$의 잘 알려진 기저이다.

$$\begin{aligned}B &= \{\text{계수가 1인 로랑 단항식들 Laurent monomials}\}\\ &= \{x^n y^m \mid n, m \in \mathbb{Z}\}.\end{aligned}$$

더욱 일반적으로 N변수 로랑 다항식들의 벡터공간

$$\mathcal{A}_N = \mathbb{Q}[x_1^{\pm 1}, x_2^{\pm 1}, \dots, x_N^{\pm 1}]$$

을 생각할 수 있으며, 아래는 $\mathcal{A}_N$의 잘 알려진 기저이다:

$$B_N = \{x_1^{n_1} x_2^{n_2} \cdots x_N^{n_N} \mid n_1, \dots, n_N \in \mathbb{Z}\}.$$

놀랍게도 다음의 주장을 하려 한다.

주장. B_N은 $\mathcal{A}_N$의 표준기저이다. (거의..)

위의 주장이 감성적인 표준기저를 의미하는지 이성적 표준기저를 의미하는지 명시하지 않았는데, 이는 의도된 바이다. 다음 명제는 B_N을 감성적 표준기저로 여길 수 있을 만한 실마리를 제공한다 :

$$\begin{aligned}&\{\mathcal{A}_N\text{의 원소 중 곱셈 역원을 가지는 원소들}\} =\\ &\{\alpha x_1^{n_1} \cdots x_N^{n_N} \mid 0 \neq \alpha \in \mathbb{Q}, n_1, \dots, n_N \in \mathbb{Z}\}.\end{aligned}$$

풀어서 설명하면, $\mathcal{A}_N$의 원소 $f(x)$에 대하여, 만약 어떤 $g(x) \in \mathcal{A}_N$이 존재하여 $f(x)g(x) = 1$을 만족한다면, $f(x)$는 $\alpha x_1^{n_1} \cdots x_N^{n_N}$ 형태, 즉, 로랑 단항식이어야 한다는 말이다. 증명은 생략하기로 한다(물론, 연습문제다!). 유리상수곱을 무시한다면, 위 명제는 집합 B_N이 '좌표계의 도움 없이' $\mathcal{A}_N$의 대수 구조만 가지고 상당히 깔끔하게 기술될 수 있다는 것을 말해주므로(여기서의 '좌표계'는 앞의 논의에서 기저에 의한 좌표 표현을 이야기할 때 나온 좌표와는 의미가 조금 다르다), B_N을 감성적 표준기저로 볼 수도 있지 않을까 하는 기대를 갖게 한다. 어떤 독자에게는 이 정도의 기술만으로도 충분한 감동을 주었을 수도 있고, 어떤 독자에게는 아직 부족하게 느껴질 수도 있다. 다음 연재글을 쓸 때 필자가 잊어버리지 않는다면, 위 주장을 뒷받침하는 다른 증거를 추가적으로 언급할 수도 있을 것 같다.

한편, 혹시 B_N을 이성적 표준기저로 볼 수 있지 않을까 따져보는 것도 유의미한 일이다. 이전 절에서의 논의를 이용하면, $\mathcal{A}_N$의 대수 자기동형사상들을 모두 찾아서 B_N에 적용해보고 B_N이 이 자기동형사상들에 의해 보존이 되는지 따져볼 수 있다. 이는 대수학에 대한 기본 경험이 있는 독자에게는 간단하면서 재미있는 연습문제일 것으로 생각한다.

표준기저에 대한 중간 결론

지금까지 이 글에서 논의된 바를 약간의 성급한 일반화를 통하여 정리해보면, 주어진 벡터공간이 표준기저를 가지는지의 여부는 이 벡터공간에 곱하기 구조가 있어서 대수algebra 구조를 가질 때에 유의미하게 고려해볼 수 있고, 표준기저라고 부를 만한 가능성이 있는 기저를 가지는 예시로는 로랑 다항식 대수 $\mathcal{A}_N = \mathbb{Q}[x_1^{\pm 1}, x_2^{\pm 1}, \dots, x_N^{\pm 1}]$가 있었다. 한편, 다항식 대수 $\mathbb{Q}[x_1, x_2, \dots, x_N]$에 대해서는 표준기저라고 부를 만한 기저를 적어도 이 글에서는 찾지 못했다.

여기서 정리하고 싶은 관점은, 어떤 벡터공간의 기저의 표준성을 판단할 때에, 벡터공간 구조, 즉, 더하기와 상수곱 구조만 가지고서는 판단의 충분한 근거를 마련하기가 대체로 어려우며, 이 특정한 벡터공간에 추가적으로 주어진 구조, 예컨대 대수 구조, 즉, 곱하기 구조 등을 이용해야 한다는 점이다. 이번 글에서는 표준성 판단의 근거로 사용할 구조를 대수 구조로 한정했지만, 대수 구조가 아닌 다른 수학적 구조도 고려할 수 있으며, 실은 여러 구조를 동시에 중첩적으로 고려할수록 표준성 판단이 용이하고 견고해진다고 할 수 있다. 실제로, 다음 연재글에서는 대수 구조에 더하여 어떤 구조가 이런 판단에 사용되는지를 맛보기로 소개할 계획이다.

기저의 표준성뿐만 아니라 다양한 수학적 현상에 대하여, 그 근거나 원인, 뒷배경이 되는 수학적 구조를 찾고자 하는 것이 필자의 최근 수학 연구에 대한 태도의 주요 구성요소이다. 그런데 많은 수학자가 아무런 거리낌 없이 사용하는 이 '구조structure'라는 단어가 수학을 전문적으로 하지 않는 사람들에게는 생소한 단어일 수도 있겠다는 것을 깨달은 적이 있다. 그래서 독자의 이해를 돕기 위해, 표준성 판단에서 수학적 구조의 역할에 대하여 위에 정리한 관점을 (다소 비수학적인) 비유를 통해 아래와 같이 설명해보고자 한다.

벡터공간에 대응하는 개념으로 '옷을 입은 사람'을 생각해보자. 조금 더 정확히는, 한 사람이 집에 가지고 있는 (속옷을 포함한 의류 등) 모든 패션 물품을 이 벡터공간의 원소라고 생각하자. 이 물품들의 주인인 사람은 이 물품들 간의 관계를 매개해주고 있다고 생각하면 되겠다. 마치 원소 간의 더하기 같이. 기저에 해당하는 개념으로는, 이 사람의 패션 물품들 중 일부의 집합으로서 이것들을 걸쳤을 때 몸의 90퍼센트 이상이 가려지며, 이 중 하나만 빼더라도 몸의 90퍼센트 미만이 가려지게 되는 집합이라고 정의하자. 이 집합을 편의상 '기저패션'이라고 부르자. 이제, 어떤 사람이 기저패션을 입었을 때, 우리는 이 기저패션이 표준적인지 여부를 따져보려 한다.

어떤 벡터공간의 기저의 표준성을 판단할 때에, 벡터공간 구조, 즉, 더하기와 상수곱 구조만 가지고서는 판단의 충분한 근거를 마련하기가 대체로 어려우며, 이 특정한 벡터공간에 추가적으로 주어진 구조, 예컨대 대수 구조, 즉, 곱하기 구조 등을 이용해야 한다는 점이다.

그런데 상황 설정을 여기까지만 하면 어떤 패션을 표준적인 패션이라고 부를지 그 원칙을 정하기가 쉽지 않을 것으로 생각된다. 물론 실생활에서는 어떤 사람이 어떤 패션을 입고 나왔을 때 그걸 보는 사람이 호불호의 느낌 정도는 들 수 있겠지만, "저건 표준적인 패션이군"과 같은 평가를 하려면 이 사람에 대해 정보가 더 있어야 하지 않겠는가? 예컨대 이 사람의 나이가 3세 이하라면, 분명 어떤 패션은 다른 패션보다 (보통의 기준을 가진 다수의 사람에게) 더 표준적으로 느껴질 것이다. 다른 예로 어떤 사람이 태권도인이라면, 나아가 직업이 태권도 사범이고 키가 몇 센티미터인지 알고 있다면, 또한 우리가 패션에 대한 평가를 일과 시간에 태권도장 안에서 하고 있다면, 아마 다수의 사람에게 이 사람의 기저패션 중 표준 기저패션이라고 생각될 만한 것이 어느 정도 특정될 것이다. 이렇듯 어떤 사람이 그저 옷을 입은 사람이라는 사실에 더해 이 사람의 능력, 직업이나 신체적 혹은 사회적 상황을 알고 있을 때, 즉, 그 사람의 추가적인 '구조'에 대한 정보가 주어졌을 때, 이 사람의 기저패션의 표준성 여부를 좀 더 유의미하게 따져볼 수 있는 것이다.[6] 물론, 여러 구조를 중첩적으로 고려할수록 표준성 판단이 더 용이하고 견고해지기는 하지만, 동시에 우리 판단의 일반성, 즉, 적용 가능 범위가 제한되기도 할 것이다.

6. 사실 이 패션을 통한 비유는, 매끄러운 (미분)다양체smooth manifold를 처음 배울 때 위상적 다양체topological manifold가 '입을 수 있는' 매끄러운 구조smooth structure를 설명할 때 꽤 유용하며, 필자는 모 대학의 모 교수님이 미분다양체론 시간에 사용하셨다는 말을 건너 듣고 접하게 되었다. 여기서는 벡터공간과 기저에 대응시키기 위하여 비유를 살짝 변형하였다.

다중 좌표계의 경우

다시 수학으로 돌아오자. 이제 더욱 흥미로운 예시로 점차 나아가고자 하는데, 일변수의 경우는 너무 쉬우므로(!) 건너뛰고, 이변수의 경우를 고려해보자. 대수기하적으로 보자면 이변수 로랑 다항식 대수 하나 $\mathbb{Q}[x^{\pm 1}, y^{\pm 1}]$은 예쁘게 생긴 좌표계가 주어진 예쁜 대수기하적 공간 하나에 대응된다(역시, '예쁜'은 수학적 정의를 가진 말은 아니다). 대수기하에서는 이것을 (2차원) 토러스torus, 즉, 원환면이라고 부르며, 이 경우에 이것을 굳이 집합으로 표현하면 $\{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{Q}, x, y \neq 0\} = (\mathbb{Q}^*)^2$, 즉, 0이 아닌 유리수 두 개의 순서쌍의 집합으로 볼 수 있다. 참고로 필자의 경험상 대부분의 대수기하학자에게 이변수 로랑 다항식 대수는 $\mathbb{C}[x^{\pm 1}, y^{\pm 1}]$을 의미하며, 대응되는 공간은 복소 2차원 공간인, $\{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{C}, x, y \neq 0\} = (\mathbb{C}^*)^2$, 즉, 2차원 (복소) 토러스이다. 하지만 이 글의 목적을 위해서는 굳이 복소수를 도입할 필요가 없으니, 복소수체 $\mathbb{C}$ 대신 유리수체 $\mathbb{Q}$를 계속 사용하기로 한다.

토러스만큼 예쁘지는 않지만 토러스 다음으로 예쁜 대수기하적 공간은 토러스 여러 개를 풀칠하여 만들 수 있다. 편의를 위하여 변수 이름을 다음과 같이 표현한 이변수 로랑 다항식 대수 두 개를 고려하자:

$$\mathbb{Q}[X_1^{\pm 1}, X_2^{\pm 1}], \qquad \mathbb{Q}[Y_1^{\pm 1}, Y_2^{\pm 1}].$$

이 두 대수를 다음의 특정한 관계식들을 이용하여 대수적으로 '풀칠'하여 붙여 보기로 한다.

$$X_1 = Y_1^{-1}, \qquad X_2 = Y_2(1 + Y_1).$$

이 관계식은 두 토러스 혹은 두 좌표계를 풀칠하는 것으로 이해할 수도 있으나,[7] 우리는 두 로랑 다항식 대수를 풀칠하는 것으로 이해하기로 한다.

그림 2. ——— 두 토러스를 풀칠하여 붙인다.

7. [그림2] 참조. 예컨대, 오른쪽 토러스의 점 $(3, 5) \in (\mathbb{Q}^*)^2$는 왼쪽 토러스의 점 $(3^{-1}, 5(1+3)) = (\frac{1}{3}, 20) \in (\mathbb{Q}^*)^2$와 붙게 된다.

풀칠을 한 뒤 얻어지는 다음의 집합을 고려한다 :

$$\mathcal{A} = \mathbb{Q}[X_1^{\pm 1}, X_2^{\pm 1}] \cap \mathbb{Q}[Y_1^{\pm 1}, Y_2^{\pm 1}].$$

교집합을 사용하여 표현된 위 식의 우변을 수학적으로 다음과 같이 좀 더 엄밀히 기술할 수 있다 :

$$\mathcal{A} = \{f(X_1, X_2) \in \mathbb{Q}[X_1^{\pm 1}, X_2^{\pm 1}] \mid f(Y_1^{-1}, Y_2(1+Y_1)) \in \mathbb{Q}[Y_1^{\pm 1}, Y_2^{\pm 1}]\}.$$

즉, X_1, X_2에 관한 로랑 다항식 f 중에서, 위 '풀칠' 관계식을 사용하여 Y_1, Y_2에 관하여 표현했을 때, 즉, X_1, X_2 자리에 $Y_1^{-1}, Y_2(1+Y_1)$을 대입했을 때 Y_1, Y_2에 관한 로랑 다항식이 되는 것들의 모임으로 $\mathcal{A}$를 이해할 수 있다. 대수기하적으로는, $\mathcal{A}$는 풀칠하여 붙인 두 좌표계 모두에 대해 정칙regular인 함수들, 즉, 대역적global으로 정칙인 함수들의 모임이다.

예를 들면

$$f(X_1, X_2) = X_1^{-2} + X_1 X_2 - 1$$

은 우선 X_1, X_2에 관한 로랑 다항식이며, 풀칠 관계식을 이용하여 Y_1, Y_2에 관하여 써보면, 즉, X_1, X_2 자리에 Y^{-1}, $Y_2(1+Y_1)$을 대입해보면

$$\begin{aligned} f(Y_1^{-1}, Y_2(1+Y_1)) &= Y_1^2 + Y_1^{-1} Y_2 (1+Y_1) - 1 \\ &= Y_1^2 + Y_1^{-1} Y_2 + Y_2 - 1 \end{aligned}$$

이 되어 여전히 Y_1, Y_2에 관하여 로랑 다항식이다. 따라서 $f(X_1, X_2) \in \mathcal{A}$이다.

다른 예시로

$$g(X_1, X_2) = X_1 X_2^{-1}$$

는 X_1, X_2에 관한 로랑 다항식이지만, Y_1, Y_2에 관하여 표현해보면

$$\begin{aligned} g(Y_1^{-1}, Y_2(1+Y_1)) &= Y_1^{-1} Y_2^{-1} (1+Y_1)^{-1} \\ &= \frac{1}{Y_1 Y_2 (1+Y_1)} \end{aligned}$$

이고, 분모가 단항식이 아닌 유리식이어서 이는 로랑 다항식이 아니다. 더욱 엄밀히는, 이것을 분모가 단항식인 Y_1, Y_2의 유리식으로 절대 표현할 수 없음을 보일 수 있다(어떻게?). 따라서 $g(X_1, X_2) \in \mathbb{Q}[X_1^{\pm 1}, X_2^{\pm 1}]$이지만 $g(X_1, X_2) \in \mathcal{A}$는 아니다.

$\mathcal{A}$에 대해서 잘 모르더라도, $\mathcal{A}$가 벡터공간이고, 곱하기에도 닫혀 있음은 쉽게 확인할 수 있다. 혹시나 다음 연재가 기다려지는 독자들에게 다음의 질문을 연습문제로 남긴다.

문제. $\mathcal{A}$의 원소들의 예시를 여러 개 찾아보시오. $\mathcal{A}$의 기저를 구하시오. $\mathcal{A}$는 표준기저를 가지는가?

참고로 위 풀칠 관계식은 A_2-타입의 클러스터 χ-다양체cluster χ−variety에 대한 클러스터 변이cluster mutation 공식이다(참고문헌 [1],[2] 참조). 후속 연재 글에서는 위 문제로부터 논의를 이어나가 더욱 흥미로운 현상과 예시를 만나보고, 최근에 여러 연구자가 찾아 헤매는 표준기저 몇 가지에 대해 살펴보기로 한다. 특별히, 기저의 건설이 그 기저의 표준성 판단에 획기적인 도움을 줄 만큼 감동적인 경우를 일부 소개하고, 이를 위해서는 대수 구조, 즉, 곱하기 구조 외에 어떤 구조가 사용되는지 개략적으로 알아볼 것이다.

참고문헌

1. A. B. Goncharov, "Pentagon relation for the quantum dilogarithm and quantized $M_{0,5}^{cyc}$" in *Geometry and Dynamics of Groups and Spaces*, Progr. Math.265, Birkhäuser, Basel, 2008, pp.415--428.
2. V. V. Fock and A. B. Goncharov, *Cluster ensembles, quantization and the dilogarithm*, Ann. Sci. Éc. Norm. Supér. (4)42(6) (2009), 865--930.

Mathematics

그래프와 곡면의 동상이몽[1] : 그래프와 위상수학적 대칭

글. 곽상훈(서울대학교 수학교육과 조교수) 그림. 냥즈데이

우리가 사는 세상은 3차원, 경우에 따라서는 시간을 포함해서 4차원 공간이라고들 한다. 그렇다면 그보다 낮은 차원의 세상은 어떻게 이해해볼 수 있을까? 0차원은 옴짝달싹 못하는 점, 1차원은 앞과 뒤로만 움직일 수 있는 공간, 2차원은 앞뒤에 더해 왼쪽, 오른쪽으로도 움직일 수 있는 공간이 될 것이다. 우리가 사는 3차원 세상은 키도 잴 수 있고 산도 오르고 아파트도 지을 수 있지만, 중력의 영향을 받는 우리는 2차원 세계를 살아가는 것처럼 느끼곤 한다. 차를 타고 점과 선과 화살표로 말하는 내비게이션의 말을 듣다 보면 1차원 세계에 살고 있는 것 같은 착각이 들기도 한다.

이 내비게이션이란 것을 조금 더 파헤쳐보자. 우리는 왜 내비게이션이 필요할까? 한국 지도 위의 두 지점 A, B를 손가락으로는 쉽게 여행할 수 있지만 그 사이를 실제로 차로 이동하려면 정해진 선으로 상징되는 1차원 도로를 따라 이동해야 한다. 안내는 어떻게 이루어지는가. 쉽게 말해 '갈림길이 나오기 전까지는 직진하고, 갈림길이 나오면 맞는 갈림길로 안내'를 반복한다. 결국 자동차 여행의 본질은 갈림길과 다음 갈림길 사이를 직진으로 달리고, 갈림길에서는 다음 직진할 장소를 고르는 것일 뿐이다. 수학에서는 이와 같이 어떤 대상들을 점으로 표현하고, 그 점들 간의 연결 상태를 나타낸 것을 그래프라고 정의한다.[1]

1. 우리가 초등학생 때 배우는 막대그래프, 원그래프 등은 인포그래픽의 가장 기초적인 형태로, 통계를 '그래픽'으로 표현했다는 의미에서 나온 개념이다. 우리가 이 글에서 보게 될 것과 다른 대상이다.

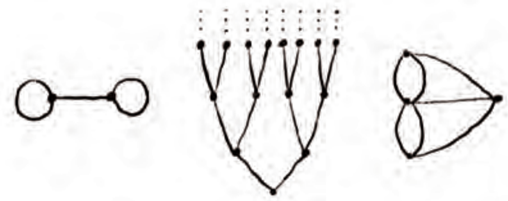


그림 1. 그래프의 예시. 아령 그래프, 칸토어 나무, 쾨니히스베르크 다리 문제에 쓰인 그래프

1. 그래프

그래프는 점들과, 점 사이를 잇는 선으로 정의된 대상이라서 이 세상의 '관계'를 시각화하기에 좋은 추상화 도구이다. 예를 들어 내가 속해 있는 단체의 사람을 모두 점으로 나타낸 뒤, 친구 관계인 사람들 사이에 선을 이어 친목 그래프를 만들어볼 수 있다. 더 나아가, 친한 정도에 따라 변을 굵게 설정하거나, 현실적으로는 친구관계란 비대칭적인 경우가 있으므로 화살표를 넣어 친구라고 생각하는 방향(!)을 명시할 수도 있다. 이처럼 그래프는 실생활에서도 대상과 관계를 규명하는 유용한 도구이다.

수학적으로 정의하자면, 그래프는 꼭짓점이라 부르는 점과 변이라 부르는 선으로 이루어진 대상으로써, 각 변의 양 끝이 꼭짓점과 연결되어 있기만 하면 된다. 이때 변 양 끝이 같은 꼭짓점과 연결되어도 되고 (이런 변을 루프loop라고 부른다) 두 꼭짓점 사이가 여러 개의 변으로 연결되어도 된다. 그 외의 변 위의 다른 점에서는 꼭짓점과 만나선 안 된다. 다시 말해 변은 (서로 다를 필요 없는) 두 꼭짓점 사이의 연결 여부만을 나타낼 뿐이다. 꼭짓점과 변의 개수가 모두 유한하면

유한 그래프, 둘 중 하나라도 무한하면 무한 그래프라고 한다. 우선 이번 글에서는 유한 그래프에 대해서 다루고, 이후 글에서 무한 그래프를 다루어 볼 것이다.

수학자들은 어떤 수학적 대상을 정의하고 나면, 그 대상이 가질 수 있는 구조를 생각해보고, 그 구조를 보존하는 대칭을 생각해본다. 이는 마치 우리가 어떤 한 사람을 좋아하게 되면 그 사람이 좋아하는 음식과 취미 따위를 알아보고, 그것을 기반으로 주변에 맛집을 알아보고 대화를 해나가게 되는 것과 마찬가지이다. 우리는 그래프를 막 정의했으므로 어떤 구조를 줄지 먼저 생각해보자. 사실 정답이 있는 것은 아니지만, 우리는 그래프를 마음대로 늘였다 줄였다 할 수 있는 위상수학적 대상으로 생각할 것이므로, 길이가 정해져 있는 구조는 주지 않기로 하되, 다만 [그림 2]에서와 같이 변을 잘라버리거나 두 꼭짓점을 가져와 붙여버리는 등 '구멍의 개수'를 바꾸는 작업은 허용하지 않도록 하자. 이처럼 거리를 신경 쓰지 않으면서 대략적인 모양만 유지하도록 하는 것을 '위상수학적 구조'를 준다고 표현한다.

위상수학적 구조하에, 그래프에 자연스럽게 생각할 수 있는 대칭은 '연속변형동치homotopy equivalence' 인데, 이것은 쉽게 말해서 주어진 대상을 연속적으로 변형해서 만들 수 있는 대칭이다. 위상수학에서 흔히 커피 잔과 도넛이 같다고 말할 때 하나를 연속적으로 변형하여 다른 것을 만듦으로써 보여주곤 하는데 이때 고려하는 대칭이 바로 연속변형동치이다.

물론 커피 잔과 도넛은 더 나아가 위상동형homeomorphic인 공간이 되기도 한다. 연속변형동치는 '위상동형homeomorphism'보다 약한 대칭인데, 위상동형은 연속적으로 변형 가능해야 할 뿐 아니라, 서로 다른 점을 서로 다른 점으로 보내야 하는 전단사성도 가지고 있어야 해서, 더 제한적인 대칭이다. 특히, 유한 그래프에서는 자기 자신으로 가는 위상동형들이 유한개밖에 없어서, 실로 연속변형동치에 비하면 딱딱한 대칭이라고 할 수 있다.

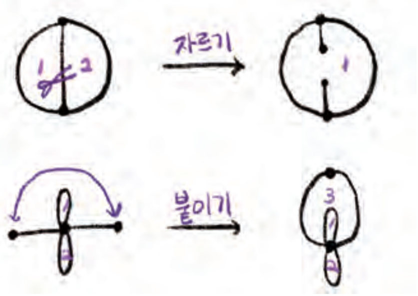


그림 2. 그래프의 위상수학적 구조 중 하나인 '구멍의 개수'를 보존하지 않는 작업들. '자르기'는 구멍의 개수가 줄어 들고, '붙이기'는 구멍의 개수가 늘어난다.

이처럼 하나의 유한 그래프에 고려할 수 있는 위상동형들은 별로 없기 때문에, 조금 더 유들한 대칭인 연속변형동치들을 생각하기로 하자. 하지만 어떤 공간의 대칭이라는 것은, 사실 공간 위의 각 점이 어디로 가야할 지를 일일이 알아야 한다는 점에서 너무나 많은 정보를 갖고 있다. 따라서 이 정보를 조금 압축할 방법이 필요한데, 이런 철학으로 개발된 수학의 분야가 바로 '대수적 위상수학'이다.

2. 기본군

공간을 대수적 대상으로 압축하여 생각하는 방법을 소개하기 위해, 이 대수적 대상인 군Group에 대해 잠깐 소개하도록 하겠다. 군에 대한 이야기는 다른 Horizon 기사에서도 많이 논의가 되었는데, 예를 들어 김상현 교수님의 Horizon 기사 [4] 등을 읽어 보면 좋을 것 같다. 이 글에 맞추어 간단히 설명하자면, 군은 어떤 수학적 대상의 구조를 보존하는 '대칭'들의 모임이라고 이해할 수 있다. 대칭들을 모으면 어떤 성질을 만족하느냐? 일단 '아무것도 안 하기' 항등원에 해당하는 대칭이 있고, 어떤 대칭을 하든 간에 '실행 취소'를 하여 그것을 무를 수 있는 역원이 있고, 그리고 구조를 보존하는 두 대칭을 가져와서 한 대칭 뒤에 다른 대칭을 연달아 하면 그것도 통째로 구조를 보존하는 하나의 대칭으로 볼 수 있듯 대칭들의 '덧셈'이 잘 정의된다. 다시 말해 군은 (굳이 숫자가 아니어도 되는) 추상적인 대상들로 구성되며 그들 사이의 '덧셈, 뺄셈을 논의할 수 있는 집합'인 셈이다.

기본군fundamental group이라는 것은, 어떤 공간을 대수적으로 압축하여 이해해보고자 하는 노력에서 정의된 대상이다.

일단 기하학적인 대상 중에 0차원은 점이고 너무 간단하니, 1차원 공간이 간단한 것 중에 가장 재미있는 공간이 될 텐데, 어떤 공간에 살고 있는 1차원 공간인 폐곡선을 모은 것이 기본군을 이루는 집합이 된다. 이제 [그림 3]을 보면서 읽으면 이해가 더 쉬울 것이다. 여기에 연산을 잘 정의하기 위해서 폐곡선의 '시작점'이 모두 공간 위의 한 점으로 고정되어 있다고 한다. 그러면 각각의 폐곡선은 기본군의 원소가 되고, 두 폐곡선을 '더하려면' 두 곡선을 하나의 곡선처럼 이어서 생각하면 된다. 역원을 정의해야 하니 폐곡선에 방향도 주기로 한다. 항등원은 '시작점에서 아무것도 안 하는' 폐곡선으로 정의한다. 어떤 폐곡선의 역원은 방향만 뒤집으면 된다. 그리고 하나의 폐곡선을 연속변형해서 다른 폐곡선을 만들 수 있으면 기본군에서 같은 원소로 보기로 한다. 그러면 실제로, 왜 폐곡선과 그 역원의 곱은 '아무것도 안 하는' 항등원 폐곡선으로 연속변형 되는지를 알 수 있을 것이다.

예시를 생각해보자. 먼저 속이 빈 원기둥을 생각해보도록 하자. [그림 4]에서 볼 수 있듯, 사실 수직 방향의 이동은 크게 중요하지 않고 몇 바퀴를 돌았는지가 기본군 내 원소의 변별력이 된다. 뫼비우스의 띠는 어떨까? 얼핏 다른 공간이지만, 폐곡선의 입장에서 생각해보면 역시 '몇 바퀴'를 돌았는지가 결국 관건이 된다.

두 공간 모두 모든 폐곡선이 몇 바퀴를 어느 방향으로 돌았는지로 결정되므로, 두 공간의 기본군은 같다. 두 공간이 같은 기본군을 갖는 것이 우연은 아닌 게, 사실 [그림 5]와 같이 두 공간이 모두 '원'으로 연속적으로 변형될 수 있기 때문이다. 실제로 원의 기본군의 원소 또한 각 폐곡선이 몇 바퀴 돌았는지로 결정된다.

이처럼 기본군 내에서는 연속되는 변형으로 얻어지면 같은 폐곡선으로 준다는 정의 때문에, 기본군에서 유용한 다음의 중요한 성질을 얻게 된다:

어떤 두 공간이 연속변형동치이면
그 두 공간의 기본군도 같게 된다.

이것이 기본군이 갖는 대수적 위상수학에서의 중요한 성질 중 하나이다. 다시 말해, 어떤 두 공간이 연속변형동치인지를 알고 싶을 때, 두 공간의 기본군을 계산해보고 서로 다르면 연속변형동치가 아니라는 것을 알 수 있는 것이다.

그러면 자연스럽게 반대 방향도 성립을 하는지 물어볼 수 있다. 즉, 기본군이 같으면 두 공간이 연속변형동치인 것을 알 수 있는가? 애석하게도 그렇지 않다. 예를 들어, 구와 원판은 그 위의 폐곡선을 점으로 연속변형할 수 있으므로 기본군이 자명하게 되지만, 서로 연속변형 동치가 불가능하다. 그 이유를 생각해보면 원판 자체는 점으로 연속변형동치가 되지만, 구는 어떻게 줄이고 늘려도 구 내에 갇혀 있는 3차원 공간을 해소할 방법이 없기 때문이다.

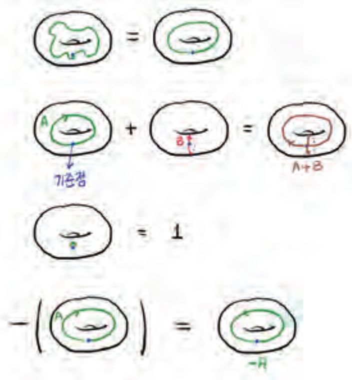


그림 3. 폐곡선의 덧셈, 항등원, 역원, 연속변형이면 같다.

그림 4. 원기둥과 뫼비우스 띠 위의 폐곡선들

(이러한 아이디어를 이용하여 두 대상을 구분할 수 있는 새로운 불변량이 있는데 그것을 호몰로지homology라고 한다.)

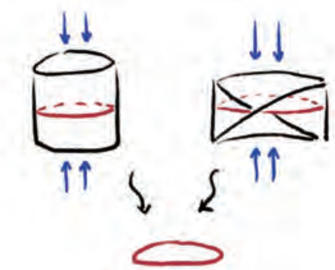


그림 5. 원기둥과 뫼비우스의 띠 모두 원으로 연속변형되는('찌그러지는') 모습

그런데 그래프의 경우에는 이 반대 방향이 성립함이 알려져 있다. 즉, 두 그래프의 기본군이 같으면 사실 연속변형적으로 동치라는 것이다. 그 이유를 단순하게 생각해보면 다음과 같다. 기본군은 그 공간의 1차원 단위블록에 해당하는 폐곡선을 모두 모아 압축한 공간인데, 동시에 그래프 자체가 1차원적인 수학적 대상이다. 따라서 그래프는 기본군으로 압축하는 과정에서 잃는 정보가 없어 그래프의 기본군은 그래프 그 자체에 대한 정보를 모두 갖고 있게 된다. 이를 다시 말하면,

그래프에서 자기 자신으로 가는
연속변형들의 집합을 보는 것은,
그 그래프의 기본군에서 자기 자신으로 가는
자기동형사상들을 보는 것과 같다는 의미가 된다.

이것이 상당히 중요한 패러다임의 전환인데, 바로 위상수학적인 대상의 질문을 대수학적인 질문으로 바꾸었기 때문이다. 이처럼 수학에서는 한 분야의 질문을 다른 분야의 질문으로 바꾸는 과정을 통해서 서로 다른 분야를 넘나드는 게 중요하다. 그 이유는 분야에 따라 발전된 수학의 형태가 다르고 이렇게 답을 모르는 질문의 형태를 바꾸어가다 보면 어느 순간 연구가 잘 되어 있는 분야에 다다르게 될 수도 있기 때문이다.

3. 그래프의 기본군

그렇다면 그래프의 기본군을 알아볼 차례이다. 위에서 서로 연속변형동치인 공간은 같은 기본군을 준다고 했으니, 그래프를 잘 연속변형하여 기본군을 알기 쉬운 공간으로 바꾸면 좋을 것 같다. 일단 꼭짓점이 많아서 어느 것을 기준점으로 해야 할지 헷갈릴 수 있으니 꼭짓점을 하나로 만들면 좋을 것 같다. 이를 위해, 그래프 위에 가장 큰 '생성나무'를 생각해보기로 한다.

생성나무란 무엇인가? 수학자들은 수학적 대상에 재미있는 일상적인 이름을 붙이는 것을 좋아하는데, 나무는 그래프의 특수한 형태로 '싸이클'이 없는 그래프를 말한다. 또 다른 정의로는, 한 점에서 다른 점으로 가는 길이 유일하게 결정되는 그래프를 나무라고 한다. 어떤 그래프의 생성나무는 그 그래프에 들어 있는 나무 중, 모든 꼭짓점을 포함하는 나무로 정의된다. 임의의 그래프를 가져오면 그것의 생성나무가 존재한다는 것은 잘 알려져 있다. 아래 그림에서 생성나무의 예시를 살펴보면 그 존재성을 믿을 수 있을 것 같다.

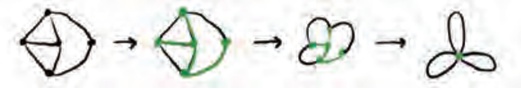


그림 6. ——— 그래프 위 생성나무의 예시와 장미그래프로 변형되는 과정

이러한 생성나무를 하나 잡으면, 그것을 점차 줄이고 줄여서 점으로 만드는 과정은 연속변형으로 볼 수 있다. 이것이 의심스럽다면, 선분을 점으로 줄이는 것은 연속변형이라는 것이라는 사실에서 출발하여 생성나무의 가지 끝에서부터 점으로 줄여나가다 보면 귀납적으로 어떤 나무든지 간에 점으로 줄이는 것이 연속변형동치라는 것을 알 수 있다.

그러면 그래프의 생성나무를 점으로 줄이고 나면 어떤 그래프가 되는가? 바로 장미그래프가 된다.[2]

2. 수학자들이 자연을 얼마나 사랑하는지 느낄 수 있을 것이다. 실제로, 나무들에 작용하는 군을 공부하는 분야의 이름이 수목군론Arboreal group theory이다.

이 장미그래프에는 더할 나위 없이 좋은 기준점이 있다. 바로 꽃잎들이 붙어 있는 중앙점이다. 장미그래프의 기본군을 구하기 위해서, 장미그래프 위에 놓여 있는 폐곡선을 어떻게 나타낼 수 있을까? 조금 생각해보면, 모든 폐곡선은 결국 어떤 잎을 몇 바퀴, 어떤 순서로 돌았는지로부터 나타낼 수 있다. 이것을 코드화하여 각각의 꽃잎을 '가나다'라고 하고 그것을 역방향으로 도는 것을 '고노도'라고 하면, '가노노도고가다' 등이 하나의 폐곡선을 나타내게 된다.

그런데 이렇게 '가나다', '고노도'로 나타낼 수 있는 원소들이 대수적으로 친숙한 대상인데, 바로 자유군의 원소들과 사실상 같은 녀석들이다. 자유군은 백형렬 교수님의 Horizon 기사 [5]에서 소개되었는데, '자유'가 붙은 이유는 '가, 나, 다'와 '고, 노, 도'로 만든 군이면서, 군의 정의에서 나온 '가고=고가=1, 나노=노나=1, 다도=도다=1' 의 관계식 외에는 제약하는 아무런 관계식이 없어서 그렇다. 이러한 자유군은 군론 내에서 '덩치가 큰 군'의 지위를 갖고, 특히 어떤 군들이 자유군들을 부분군으로 갖고 있는지 등의 문제가 중요한 질문이 된다.

다시 정리하면, 우리는 그래프의 기본군을 보고자 그래프를 장미그래프로 연속변형하였고, 장미그래프의 기본군을 구하니 자유군이라는 것을 알게 되었다. 즉, 그래프의 기본군은 자유군이며, 이 자유군의 차수rank는, 장미그래프의 이파리 개수와 같음을 알 수 있다. 이로부터 위에서 주장했던 '두 그래프의 기본군이 같으면 두 그래프는 연속변형동치'라는 명제를 증명할 수 있게 된다. 왜냐하면 두 그래프의 기본군이 같다는 것은 두 그래프의 자유군의 차수가 같다는 것이고, 곧 두 그래프를 같은 꽃잎의 개수를 가진 장미그래프로 연속변형을 할 수 있다는 의미이므로, 결국 두 그래프는 공동의 장미그래프를 중간자로 하여 서로 연속변형동치를 만들 수 있기 때문이다.

4. 그래프의 대칭군은 자유군의 외부대칭군

따라서, 그래프에서 자기 자신으로 가는 연속변형동치들의 모임은 자유군의 자기동형사상들의 모임과 같고, 그래프의 대칭군을 공부한다는 것은 결국 자유군의 자기동형사상들을 공부한다고 볼 수 있다. 수학기호를 하나도 쓰지 않고 마치면 조금 아쉬우니, 이를 수학적으로 어떻게 적는지만 소개하고자 한다. 우선, 자유군은 Free group이라고 하며, 차수가 n인 경우에 주로 F_n이라고 적는다. 자기동형사상은 영어로 자기 자신을 뜻하는 접미사 auto-와 '모양'의 어근을 갖고 있는 morph로 비롯된 함수와 변환을 뜻하는 -morphism이 합쳐져 automorphism이라고 한다. 이 앞 세 글자를 따서 자유군의 자기동형사상군은 Aut(F_n) 이라고 표기한다.

한편, 위상수학에서는 사상들조차도 '하나를 주물러 다른 하나를 만들 수 있으면' 같은 사상으로 보곤 하는데, 이러한 과정을 '연속변형', 영어로는 homotopy라고 한다. 특히, 연속변형으로 같은 두 사상이 기본군에는 어떤 사상을 주는지 생각해보면, 기준점이 연속변형 중에 그리는 자취가 또 하나의 폐곡선을 만들어냄에 따라 연속변형으로 같은 기본군에서는 서로 켤레conjugate인 사상을 주게 된다. 이렇게 서로 켤레인 사상은 군 안의 '내부'적인 시선에서는 달라보이지만 '외부outer'에서는 사실상 같게 보인다. 우리는 연속변형으로 얻어질 수 있는 연속변형동치를 같게 보고자 하므로 기본군에서는 켤레인 자기동형사상끼리 하나로 묶고자 한다. 이 각각의 묶음을 외부자기동형사상outer automorphism이라고 하고, 이런 묶음의 모임을 '외부자기동형사상군'이라고 한다. 자유군의 외부자기동형사상군은 Out(F_n)이라고 표기하며, 논의한 바와 같이 이 '자유군의 외부대칭군'이 곧 그래프의 대칭군, 즉, 그래프에서 자기 자신으로 가는 연속변형동치를 연속변형으로 얻어지는 사상끼리 묶은 군이 된다.

위에서 서술하였듯, 다른 관점을 가지게 되는 것은 새로운 문제를 푸는 데에 도움이 된다. 예를 들어 Out(F_n)은 대수적인 대상이지만, 그것의 부분군들이 어떠한 성질을 갖는지[1, 2], 각각의 원소들이 고정하는 부분군의 최대 차수는 얼마인지[3] 등 많은 대수적인 문제가 이 그래프의 위상수학적 대칭의 관점으로 풀렸다.

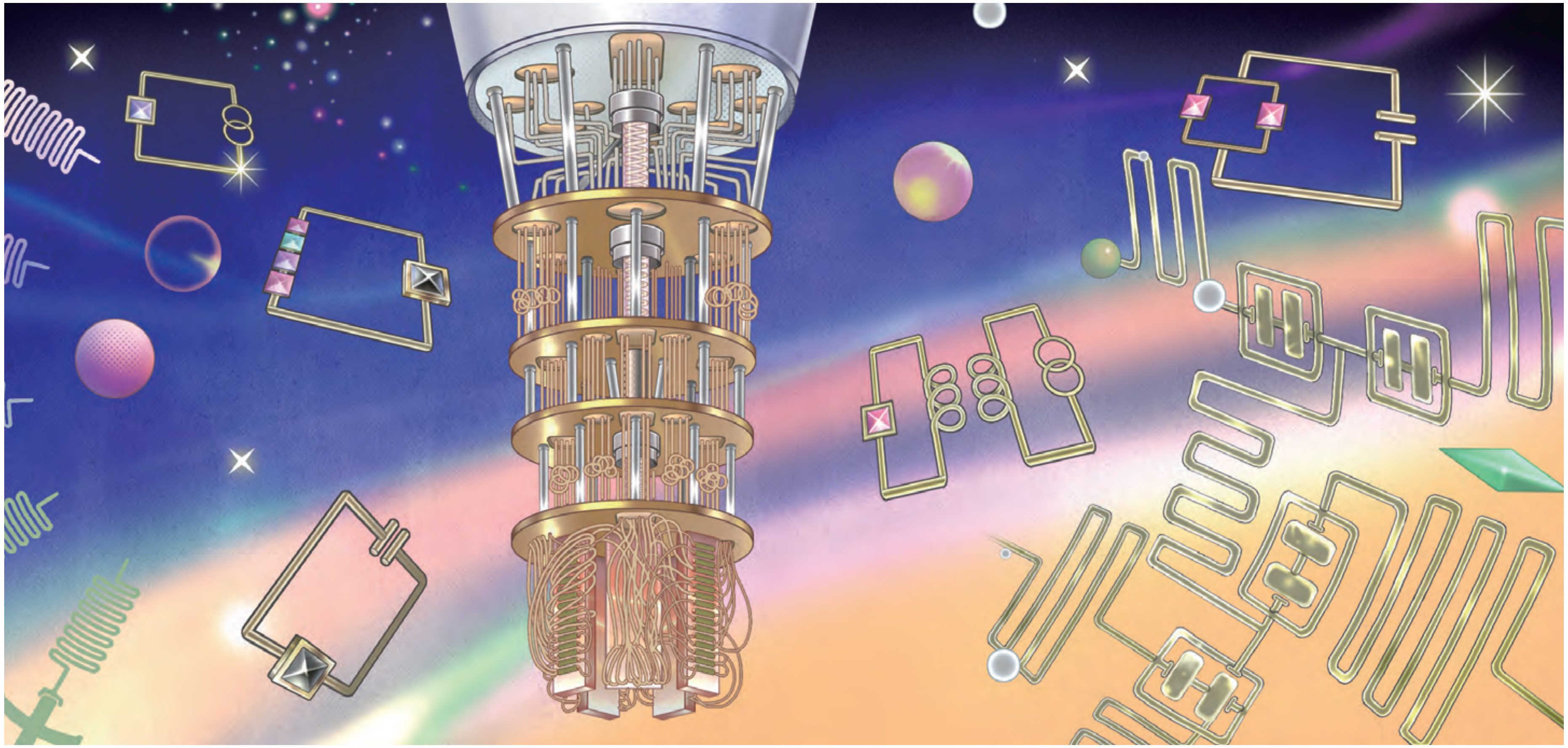
다음 글에서는 곡면과 곡면의 대칭군, 그리고 그래프와의 관계에 대해서 알아보고, 이후에는 무한한 곡면과 그래프에서는 어떻게 이야기가 일반화될 수 있는지에 대해 알아보도록 하겠다.

참고문헌

1. Mladen Bestvina, Mark Feighn, and Michael Handel. The Tits alternative for Out(Fn). I. Dynamics of exponentially-growing automorphisms. Ann. of Math. (2), 151(2):517–623, 2000.
2. Mladen Bestvina, Mark Feighn, and Michael Handel. The Tits alternative for Out(Fn). II. A Kolchin type theorem. Ann. of Math. (2), 161(1):1–59, 2005.
3. Mladen Bestvina and Michael Handel. Train tracks and automorphisms of free groups. Annals of Mathematics, 135(1):1–51, 1992.
4. 김상현. 경계에서 바라본 군. Horizon, 2019. https://horizon.kias.re.kr/9447/.
5. 백형렬. 자유를 원한다면 탁구를 쳐라. Horizon, 2023. https://horizon.kias.re.kr/26251/.

[양자컴퓨팅의 다양한 물리적 플랫폼] 초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현

글. 김요셉(고려대학교 물리학과 교수) **그림.** 메아리(mmmeari)



들어가며

최근 몇 년 사이 IBM과 Google의 양자컴퓨터가 특정 문제를 슈퍼컴퓨터보다 빠르게 계산했다는 소식이 종종 들려온다. 그러나 매번 얼마 지나지 않아 더 뛰어난 고전컴퓨터 알고리즘이 개발되어 슈퍼컴퓨터가 앞섰다는 소식도 함께 전해지곤 한다. 이렇게 엎치락뒤치락 발전하다 보면 언젠가는 양자컴퓨터의 유용성을 실증할 날이 오지 않을까?

양자컴퓨터의 유용성에 대해서는 Horizon의 이전 글 [1], [2]에 잘 설명되어 있어, 이번 글에서는 IBM과 Google을 필두로 빠르게 발전하고 있는 초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현 방법을 소개한다. 샹들리에처럼 생긴 희석식 극저온 냉각기에 부착되어 동작하는 초전도 양자컴퓨터의 동작 원리부터 시작해서 시스템 성능 향상과 확장을 위해 어떤 노력이 이루어지고 있는지 함께 살펴보도록 하자.

왜 초전도체로 양자컴퓨터를 만들까?

초전도 양자컴퓨터는 초전도 물질로 만들어진 전자회로이다. 고전컴퓨터는 회로의 전압 상태로 비트 정보를 표현하지만, 이 장치는 회로의 양자 상태로 큐비트 정보를 표현한다는 점이 독특하다. 비트와는 달리 큐비트는 0과 1을 동시에 표현하는 중첩 상태를 나타낼 수 있고, 큐비트끼리 서로 얽혀 있다면 한 큐비트의 측정 결과가 다른 큐비트 상태에 영향을 미치기도 한다. 이러한 중첩과 얽힘이라는 특성 덕분에 양자컴퓨터만의 독특한 연산 방식이 가능하다. 중첩과 얽힘의 중요성에 대해 알고 싶은 독자는 Horizon의 이전 글 [3]을 참조하기 바란다. 그러나 큐비트 정보는 외부와의 상호작용으로 쉽게 손상될 수 있어 전자회로의 에너지가 외부로 방출되지 않도록 해야 한다. 따라서 전기저항이 0인 초전도체로 전자회로를 제작해야만 양자컴퓨터가 안정적으로 동작할 수 있다.

초전도 회로의 양자 상태를 이해하기 위해서 초전도체의 특성을 알아야 한다. 1957년, 바딘J. Bardeen, 쿠퍼L. N. Cooper, 슈리퍼J. R. Schrieffer는 임계온도 이하에서 저항 없이 전류가 흐르는 초전도 현상을 설명하기 위해 전자가 짝을 이루는 쿠퍼쌍Cooper pair 개념을 도입하였다. 전자는 페르미온 입자이기 때문에 파울리 배타원리에 의해 서로 같은 상태에 있을 수 없지만, 쿠퍼쌍은 보존의 특성을 지녀 초전도체 내 모든 쿠퍼쌍이 결맞음coherence을 유지한 채 하나의 상태로 집단적으로 행동한다. 이 특성 덕분에 초전도체 내의 모든 쿠퍼쌍을 하나의 거시적인 양자시스템으로 간주할 수 있으며, 더 나아가 초전도 회로의 전류나 전압 역시 하나의 양자 상태로 표현이 가능하다.

초전도 LC 회로는 어떤 양자 상태를 가질 수 있을까?

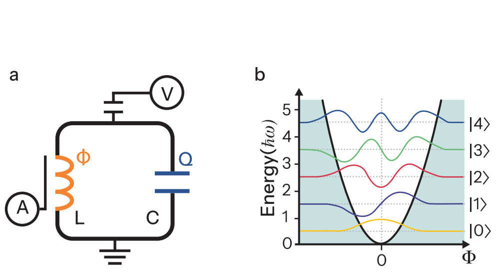


그림 1. a, LC 회로와 양자 상태 제어를 위한 전압 및 전류 소스 b, LC 회로의 퍼텐셜 에너지 및 양자 상태

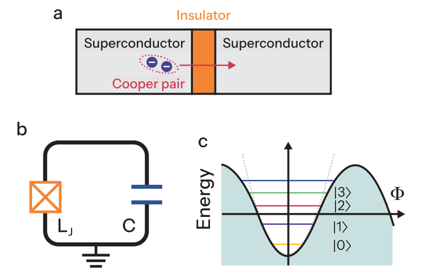


그림 2. a, 조셉슨 정션 모식도 b, 전하 큐비트 회로 c, 전하 큐비트의 퍼텐셜 에너지 및 양자 상태

간단한 예시를 통해 초전도 회로의 양자 상태를 이해해보자. [그림 1a]에 그려진 LC 회로는 인덕터와 축전기로 구성된다. 회로의 유도용량이 L, 정전용량이 C일 때, 회로에 흐르는 전류 I와 축전기에 저장된 전하량 Q는 서로를 이끌며 공진주파수 $\omega = 1/\sqrt{LC}$로 진동한다. 그리고 전류는 인덕터를 관통하는 자기선속 $\Phi = LI$을 유도한다. 먼저 전하량과 자기선속의 관계를 살펴보자. 인덕터의 전압은 패러데이 법칙에 따라 시간에 따른 자기선속의 변화율 $V_L = d\Phi/dt$로 결정되고, 축전기의 전압은 저장된 전하량과 비례하는 $V_C = Q/C$의 관계를 가진다. 병렬회로에서 두 전압의 크기는 같기 때문에 아래의 전하량-자기선속 관계식을 얻을 수 있다.

$$Q = C\frac{d\Phi}{dt}.$$

이 전하량과 자기선속의 관계는 우리에게 익숙한 입자의 운동량 p와 위치 x의 관계인 $p = m\frac{dx}{dt}$ 와 유사하여 종종 정전용량 C를 입자의 질량 m, 자기선속 Φ를 입자의 위치 x로 비유하기도 한다.

LC회로의 헤밀토니안은 다음과 같이 축전기에 저장된 에너지 E_C와 인덕터에 저장된 에너지 E_L의 합으로 표현된다.

$$H_{LC} = E_C + E_L = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L}.$$

운동량과 위치에 대한 비유를 생각해보면, 축전기 에너지 E_C는 운동에너지, 인덕터 에너지 E_L은 퍼텐셜 에너지에 해당한다. 이러한 유사성을 이용해 양자역학 수업 시간에 배우는 입자의 조화운동harmonic motion에 대한 슈뢰딩거 방정식 해를 LC 회로에 적용할 수 있다(양자 조화진동자에 관한 자세한 설명은 Horizon에 기재된 글 [4]을 살펴보는 것을 추천한다). 그 결과로 자기선속에 대한 조화운동 퍼텐셜 에너지와 양자화된 상태함수는 [그림 1b]와 같다. 상태함수의 절댓값 제곱이 자기선속의 확률분포를 나타낸다는 사실을 바탕으로, 노란색으로 그려진 가장 낮은 에너지 상태인 $|0\rangle$을 살펴보자. 그림에서 보이듯이 자기선속이 0인 확률이 가장 높고 자기선속이 양수인 경우와 음수인 경우가 동일한 위상으로 중첩되어 있다. 인덕터의 자기선속은 전류와 비례하기 때문에 $|0\rangle$ 상태에서는 시계 방향으로 흐르는 전류와 반시계 방향으로 흐르는 전류가 확률분포에 따라 중첩되어 있다는 것을 의미한다. 동일한 방식으로 다음으로 에너지가 낮은 보라색의 $|1\rangle$ 상태함수를 해석해보면, 자기선속, 즉, 전류는 $|0\rangle$상태에 비해 상대적으로 큰 값을 가지고 있으며, 시계 방향으로 흐르는 전류와 반시계 방향으로 흐르는 전류가 180도의 위상 차이로 중첩되어 있다는 것을 확인할 수 있다. 전하량의 경우, 운동량과 위치의 관계처럼 전하량의 상태함수와 자기선속의 상태함수가 서로 푸리에 변환 관계에 있다. 따라서 각 에너지 상태에서 전하량이 어떻게 중첩되어 있는지는 독자들이 큰 어려움 없이 직접 생각해볼 수 있을 것이다.

조셉슨 정션은 왜 필요할까?

우리는 LC회로를 큐비트로 사용할 수 있을까? 예를 들어, 가장 낮은 두 에너지 상태인 $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 만으로 양자정보를

표현하고 이를 제어할 수 있을까? 아쉽게도 일반적인 방법으로는 불가능하다. 초전도 큐비트의 상태 제어는 [그림 1a]에서 보이듯이 교류 전압 또는 교류 자기장전류 마이크로파를 회로에 인가하는 방법을 사용한다. 마이크로파의 주파수가 양자화된 에너지 간격의 공진 주파수와 일치하면 마이크로파 진폭에 비례하는 속도로 상태 전이가 발생한다. 만약 $|0\rangle$ 상태로 초기화된 LC회로에 공진 주파수의 마이크로파를 가하면 서서히 $|1\rangle$ 상태로 전이하게 된다. 그러나 [그림 1b]에서 보이듯이, LC회로의 양자 상태는 모두 동일한 에너지 간격을 가지기 때문에 $|1\rangle$에서 $|2\rangle$로의 상태 전이도 발생한다. $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 이외의 상태는 큐비트 정보로 간주되지 않기 때문에 오류로 취급되며, 이는 LC 회로가 큐비트 시스템으로 사용되기 어려운 이유가 된다. 따라서 초전도 회로의 에너지 등간격성을 깨뜨릴 방법이 필요하다.

그 방법이 조셉슨 정션을 활용하는 것이다. 조셉슨 정션은 두 초전도체 사이에 금속, 반도체, 절연체 등 수 nm의 얇은 비-초전도체가 삽입되어 있는 회로 요소이다(그림 2a). 절연층이 중간에 끼어 있더라도 두께가 충분히 얇다면 터널링 현상을 통해 전하 운반자인 쿠퍼쌍이 통과할 수 있어 전기저항 없이 전류가 흐른다. 터널링 확률은 좌우 초전도체 쿠퍼쌍의 양자 상태 위상차이 $\phi = \phi_R - \phi_L$에 의존하며 이에 따라 조셉슨 정션에 흐르는 전류 I_J와 전압 V_J는 다음과 같이 주어진다.

$$I_J = I_C \sin\phi,\ V_J = \frac{\hbar}{2e}\frac{d\phi}{dt}$$

흥미롭게도 조셉슨 전압을 $\Phi = \hbar\phi/2e$ 변수로 다시 정리하면 패러데이 법칙과 같은 꼴인 $V_J = d\Phi/dt$로 쓰일 수 있는데, 여기서 Φ는 초전도체 폐회로를 통과하는 자기선속에 해당한다. 또한 조셉슨 정션은 전류와 자기선속이 비선형적인 관계를 가지는 비선형 인덕터임을 쉽게 확인할 수 있다.

조셉슨 정션의 헤밀토니안은 전류와 전압의 곱을 시간에 대해 적분한 것과 축전기 에너지의 합으로 표현된다.

$$H_{JJ} = \frac{Q^2}{2C} - \frac{\hbar I_c}{2e}\cos\phi$$

여기서 C는 조셉슨 정션 자체의 정전용량이며, [그림 2b]와 같이 병렬로 축전기를 연결하여도 C값만 증가할 뿐 동일한 형태의 헤밀토니안을 가진다. [그림 2c]는 자기선속 $\Phi = \hbar\phi/2e$에 대한 코사인 형태의 퍼텐셜 에너지를 보여준다. 에너지가 낮을 때는 거의 포물선 형태를 띠지만, 에너지가 높아질수록 이 포물선 형태가 양 옆으로 벌어진다. 이는 높은 에너지 상태에서 에너지 간격이 점점 좁아지는 결과를 만들고, 깨어진 에너지 등간격성 덕분에 선택적인 양자 상태 제어가 가능하다.

[그림 2c]의 $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 양자 상태를 살펴보면, ϕ가 0 근처에서만 확률을 가지기 때문에 $\cos\phi \approx 1-\phi^2/2$로 근사할 수 있다. 상수를 제외하고 퍼텐셜 에너지를 다시 써보면 $E_J \approx \left(\frac{\hbar I_c}{4e}\right)\phi^2 = \left(\frac{eI_c}{\hbar}\right)\Phi^2$로 정리되는데, 이를 LC 회로의 인덕터 에너지 E_L과 비교해보면 조셉슨 정션의 유도용량은 $L_J \approx \hbar/(2eI_c)$에 해당한다. 이렇듯 낮은 에너지 상태에서는 조셉슨 정션을 단순한 선형 인덕터로 이해할 수 있다. 더 나아가, $|0\rangle$과 $|1\rangle$의 양자 상태 제어를 위한 공진주파수도 $\omega = 1/\sqrt{L_J C}$로 계산할 수 있다. 참고로, 양자 상태의 상태함수를 전류의 중첩으로 해석할 때 LC회로에서는 전류가 인덕터의 자기선속 Φ와 비례하지만, 조셉슨 정션에서는 전류가 $I_c\sin\phi = I_c\sin(2e\Phi/\hbar)$의 관계를 가지고 있어 초전도체 폐회로의 자기선속 Φ에 비례하지 않을 뿐만 아니라 주기성을 가진다는 점을 유의해야 한다.

초전도 큐비트의 종류

앞서 설명한 것처럼 에너지의 등간격성을 깨뜨려줄 수 있는 조셉슨 정션은 초전도 큐비트 구현에 핵심적인 회로 요소이다. 지금부터는 조셉슨 정션에 축전기와 인덕터를 추가하여 만들 수 있는 두 가지 종류의 초전도 큐비트를 소개하겠다. 먼저 [그림 2b]에 그려진 회로는 조셉슨 정션에 축전기를 병렬로 연결한 전하 큐비트charge qubit이다. 앞서 언급한대로 축전기를 추가하더라도 위의 조셉슨 정션 헤밀토니안 H_{JJ}와 형태가 동일하다. [그림 2c]에 보이는 $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 상태에 정보를 담아 큐비트로 사용하며, 축전기에 저장된 평균 쿠퍼쌍 (전자쌍) 개수로 두 상태가 구분되어 전하 큐비트라 명명되었다. 엄밀하지는 않지만 $|0\rangle$은 축전기에 쿠퍼쌍이 없는 상태, $|1\rangle$은 유한한 쿠퍼쌍이 존재하는 상태로 이해해도 된다. 전하 잡음에 취약하다는 단점이 있지만 축전기의 용량을 늘림으로써 전하 잡음 효과를 완화할 수 있다.

축전기 정전용량이 큰 전하 큐비트는 특별히 트랜스몬transmon이라 부르며 현재 가장 널리 사용되고 있는 초전도 큐비트 종류이다.

단일 조셉슨 정션 대신 두 조셉슨 정션을 병렬로 연결한 SQUID superconducting quantum interference device를 사용하면 주파수 조절이 가능한 전하 큐비트를 구현할 수 있다(그림 3a). 직류 전류로 SQUID 폐회로를 통과하는 자기장을 조절하여 초전도체의 위상을 바꿀 수 있고, 간섭 효과에 의해 SQUID를 지나는 조셉슨 전류 진폭 I_C 조절이 가능해진다. 초전도 큐비트의 에너지 간격, 즉, 공진주파수가 $L_J \approx \hbar / (2eI_c)$에 의존한다는 점을 생각해본다면, 외부 전류로 실시간 공진주파수 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다. 주파수 조절 가능성은 다양한 큐비트 상호작용 및 양자게이트를 구현할 수 있다는 장점이 있지만, 외부 자기장 잡음에 취약하다는 단점도 존재한다. 참고로 현재 IBM은 고정 주파수 트랜스몬 큐비트 구조로, Google은 주파수 조절 트랜스몬 큐비트 구조로 양자프로세서를 개발하고 있다.

다음으로 소개할 플럭스 큐비트flux qubit는 [그림 3b]에서 보이는 회로로, 조셉슨 정션에 인덕터를 병렬로 연결하여 구현한다. 조셉슨 정션과 인덕터가 폐회로를 이루기 때문에 ϕ_{ext}로 퍼텐셜 에너지의 형태 조절이 가능하다. 구체적인 헤밀토니안은 아래와 같이 인덕터 에너지가 추가된 형태이다.

$$H_{Flux} = \frac{Q^2}{2C} - \frac{\hbar I_c}{2e}\cos\phi + \frac{1}{2L}\left(\frac{\hbar}{2e}(\phi + \phi_{ext})\right)^2$$

퍼텐셜 에너지는 포물선 이차함수에 음수 부호의 코사인 함수가 더해진 꼴인데, 외부 자기장 ϕ_{ext}을 0에서부터 조금씩 변화시켜 보면 자기선속 ϕ가 양수와 음수인 영역에 퍼텐셜 우물이 하나씩 만들어진다. 양자 상태 |0>과 |1>은 두 퍼텐셜 우물에 가두어져 자기선속magnetic flux으로 구분되기 때문에 플럭스 큐비트로 불린다. 그리고 자기선속과 전류의 관계성 덕분에 |0>과 |1>이 초전도 회로에 흐르는 전류 방향으로 구분된다고 해석할 수도 있다. 즉, |0>은 축전기를 기준으로 반시계 방향으로 전류가 흐르는 상태, |1>은 시계 방향으로 전류가 흐르는 상태로 이해하면 된다. 참고로 외부 자기장을 $\phi_{ext} = \pi/2$이 되도록 설정하면 자기 잡음에 영향을 덜 받고 전하 큐비트에 비해 훨씬 넓은 에너지 비-등간격성을 가지고 있어 많은 장점을 가진다[5]. 그럼에도 본질적으로 자기 잡음에 취약하기 때문에 유도용량 L을 키운 회로가 주로 사용되며 이러한 플럭스 큐비트를 특별히 플럭소니움fluxonium이라고 부른다. 하지만 코일과 같은 기하학적인 인덕터로는 원하는 정도의 유도용량을 달성하기 힘들어, 조셉슨 정션을 직렬로 연결하거나 나노와이어를 사용하는 등 키네틱 유도용량kinetic inductance을 활용한다.

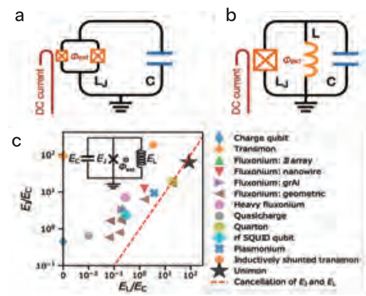


그림 3. ——— a, 주파수 조절 전하 큐비트 회로 b, 플럭스 큐비트 회로 c, 조셉슨 에너지 E_J, 축전기 에너지 E_C, 인덕터 에너지 E_L 비율에 따른 다양한 초전도 큐비트[6]

이 외에도 [그림 3c]에 보이듯이 조셉슨 에너지 E_J, 축전기 에너지 E_C, 인덕터 에너지 E_L의 비율을 조절하거나[6], $Y - \Delta$ 형태와 같은 독특한 초전도 회로 네트워크를 구성하는[7] 등 외부 잡음에 강인한 큐비트를 만들기 위한 노력이 계속 되고 있으며 최근에는 1ms 이상의 양자 결맞음 시간을 가진 초전도 큐비트가 보고되었다[8].

초전도 양자프로세서의 구성

[그림 4a]는 필자가 양자게이트 연구[9]를 위해 사용한 트랜스몬 기반 양자프로세서 칩 사진이다. 이 사진을 통해 초전도 양자프로세서의 구성을 살펴보도록 하자. 초록색으로 표시된 요소들은 각 트랜스몬 큐비트를 구성하는 축전기에 해당하며, 이 축전기들은 축전기 사이에 위치한 조셉슨 정션으로 연결되어 있다. [그림 2b]의 회로와 비교해보라. 큐비트들은 보라색으로 표시된 커플링 공진기를 통해서 정전capacitive 방식으로 상호작용한다. 참고로 상호작용이 너무 강해지지 않도록, 인접한 큐비트들은 서로 다른 공진 주파수를 갖도록 설계한다. 그리고 양자게이트와 양자 상태 측정은 각각 파란색으로 표시된 드라이브 라인과 빨간색으로 표시된 버스bus 라인에 마이크로파 펄스를 주사하여 구현한다. 드라이브 라인은 각 큐비트마다 독립적으로 제작되어 개별적인 양자게이트 구현이 가능하다. 반면 양자 상태 측정의 경우에는, 노란색 리드아웃 공진기마다 공진주파수가 다르다는 점을 이용해 여러 주파수의 마이크로파 펄스를 버스 라인에 동시에 주입하여 여러 큐비트의 양자 상태를 한 번에 측정한다. 양자 상태 측정 원리를 간단히 설명해보면 다음과 같다. [그림 4b]에 도식화하여 그려진 것처럼 초전도 큐비트는 노란색 리드아웃 공진기의 전자기장과 상호작용한다. 이 상호작용 때문에 공진기의 공진주파수가 큐비트 상태에 따라 살짝 변화한다. 이 점을 활용하여 버스 라인을 통해 주입되었다가 반사되는 마이크로파 펄스 신호의 세기나 위상 변화를 측정하여 큐비트 |0>과 |1> 상태를 구별할 수 있다.

초전도 양자컴퓨터의 오류 원인 및 개선 방안

복잡한 문제를 빠르고 정확하게 연산할수록 더 좋은 컴퓨터이다. 이를 기준으로 생각해보면, 양자컴퓨터의 성능 지표로는 큐비트 수, 큐비트 연결성, 게이트 동작시간, 게이트 오류율 등을 꼽을 수 있겠다. 현재 초전도 양자컴퓨터의 수준을 요약하면 다음과 같다. 2023년 말 IBM은 1,121개의 초전도 큐비트 양자프로세서인 Condor를 공개했으며, 이는 현재 가장 큰 규모의 양자프로세서이다. 또한, 많은 연구 그룹에서 단일 큐비트 게이트의 경우 5~30ns 동작 시간에 0.01% 수준의 오류율을, 이중 큐비트 게이트의 경우 30~200ns 동작 시간에 0.1% 수준의 오류율을 보고하고 있다. 시스템 확장성은 나중에 다루도록 하고, 여기서는 게이트 오류의 발생 원인과 개선 방안을 살펴보도록 하자.

앞서 설명한대로 초전도 양자컴퓨터에서는 마이크로파 펄스를 주사하거나 전류로 큐비트 회로를 통과하는 자기장을 변화시키는 방식으로 양자게이트를 구현한다. 오류의 종류는 크게 1) 불완전한 양자게이트 교정calibration이나 원치 않는 큐비트 간 상호작용으로 인한 유니터리 오류와 2) 외부 환경과의 상호작용으로 인한 비유니터리 오류로 분류된다. 대부분의 유니터리 오류는 마이크로파 펄스와 전류의 파라미터를 정밀하게 조정하거나 튜너블 커플러를 사용해 상호작용 세기를 제어함으로써 어느 정도 해결할 수 있다. 그러나 비유니터리 오류는 큐비트가 외부 환경과 상호작용하면서 양자적인 결맞음coherence을 잃게 되는 경우로, 해결이 쉽지 않다. 큐비트의 결어긋남 특성은 주로 두 가지 시간 척도로 대표된다.

1. T1 이완 시간 : 큐비트가 외부로 에너지를 방출하여 |1>에서 |0> 상태로 바뀌는데 걸리는 시간.

2. T2 위상 어긋남 시간 : 큐비트가 외부 환경과 양자적으로 얽히거나 잡음에 의해 에너지 간격이 흔들려 |0>과 |1> 상태의 위상 결맞음을 잃는데 걸리는 시간.

이러한 T1과 T2 시간은 큐비트의 안정성에 중요한 영향을 미치며, 양자컴퓨터의 성능을 결정하는 핵심 요소이다. 대표적인 결어긋남 원인 세 가지와 이를 해결하기 위한 전략을 소개한다.

에너지 손실 : 초전도 양자프로세서를 제어하려면 외부와 도선으로 연결해야 하므로 에너지가 외부로 빠져나갈 수 밖에 없다. 이를 극복하기 위해서는 특정 주파수만 통과하도록 하는 대역필터나 에너지가 단방향으로만 흐르도록 하는 회로 요소를 개발하여 활용할 수 있다. 또한, 회로 요소가 초전도체로 만들어졌더라도 주변 산화막과 기판은 저항을 가지고 있어 유전 손실이 발생한다. 미시적으로 생각해

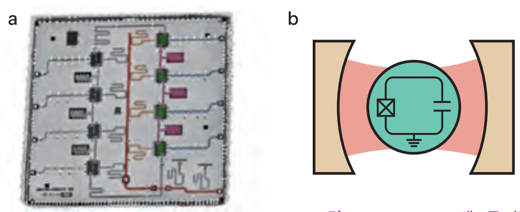


그림 4. ——— a, 트랜스몬 기반의 초전도 양자프로세서 사진 b, 큐비트와 리드아웃 공진기의 상호작용 도식화

보면, [그림 5]에 보이는 산화막이나 공정 과정에서 남은 잔여물 내 결함이 특정 에너지 간격을 가진 2-레벨 양자시스템에 해당한다.

만약 주변 결함의 에너지 간격이 초전도 큐비트와 유사하면 공진에 의해 큐비트의 에너지를 빼앗는 원인이 된다. 따라서 유전 손실이 적은 물질을 기판으로 사용하고, 공정과정에서 산화막과 잔여물을 깨끗이 제거하는 것이 중요하다. 최근에는 주변 결함의 에너지 간격을 전기장으로 제어하여 초전도 큐비트를 보호하는 연구가 활발히 진행 중이다. 마지막으로, 큐비트의 동작 주파수를 낮게 설계하면 전자기장 잡음이 증가하기는 하지만 유전 손실을 줄일 수 있다.

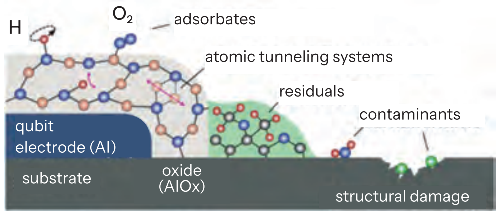


그림 5. 초전도 큐비트의 결어긋남을 유발하는 조셉슨 정션 주변 요소[10]

전자기장 잡음 : 초전도 큐비트는 외부 전자기장 환경에 민감하게 반응한다. 전하 잡음이나 회로를 통과하는 자기장 잡음이 초전도 큐비트의 에너지 간격을 바꾸어 위상 어긋남 오류를 일으킨다. 이를 방지하려면 전자기장 잡음이 적은 전력 소스를 사용하고, 뮤메탈 및 초전도 자기장 쉴드를 사용하여 외부 자기장 잡음을 차단하는 것이 필수적이다. 그리고 큐비트에 인가되는 전압과 자기장에 바이어스를 주어 큐비트의 에너지 간격 변화가 최소화되는 최적의 조건sweet spot에서 큐비트를 동작시키는 것이 도움이 된다. 보다 근본적으로는 [그림 3c]와 같이 축전기, 인덕터, 조셉슨 정션의 값을 조절해 외부 잡음에 강한 최적의 초전도 큐비트를 설계하는 연구가 필요하다. 정전용량을 키워 전하 잡음 효과를 줄인 트랜스몬 큐비트와 유도용량을 키워 자기장 잡음 효과를 줄인 플럭소니움 큐비트가 좋은 예가 되겠다.

열 잡음 : 다른 양자시스템에서도 마찬가지겠지만, 열 잡음은 초전도 양자프로세서에서 특히 중요한 문제이다. 주변 온도가 상승하면 초전도 에너지 갭 이상의 열에너지가 발생하게 되고, 이는 초전도 현상의 중요한 역할을 하는 쿠퍼쌍이 깨져 준입자quasiparticle로 변화하는 원인이 된다. 준입자 수의 증가는 시스템 내 저항을 만들어내며 에너지 손실과 위상 결어긋남을 발생시킨다. 최근 연구에서는 알루미늄이나 나이오븀보다 초전도 에너지 갭이 큰 탄탈룸을 사용하여 양자프로세서를 제작하였을 때 결맞음 시간이 향상된다는 결과가 일관성 있게 보고 되고 있다. 또한 고에너지 방사선으로부터 쿠퍼쌍을 보호하기 위해 적외선, 자연 방사선, 우주선 등에 대한 필터나 쉴드를 사용하는 것이 중요하다. 열에 의한 또 다른 문제는 큐비트가 리드아웃 공진기, 커플링 공진기 등과 상호작용하기 때문에 발생한다. 주변 온도가 높아지면 공진기 내부의 광자 수가 보즈-아인슈타인 통계에 따라 분포하게 되는데, 광자 수에 따라 큐비트 에너지 간격이 조금씩 달라진다. 즉, 열 광자 수 분포에 의해 큐비트의 에너지 간격이 흔들리고 이는 위상 어긋남을 발생시킨다. 따라서 큐비트 주변 요소들을 높은 공진 주파수로 설계하여 열 잡음의 효과를 줄이는 것이 도움이 된다.

초전도 양자컴퓨터의 양자오류보정

현재 초전도 단일 큐비트 게이트의 오류는 0.01% 수준, 이중 큐비트 게이트의 오류는 0.1% 수준까지 낮아졌다. 그러나 실용적인 양자 알고리즘을 실행하기 위해서는 많은 수의 양자 게이트 작용이 필요하며, 이로 인해 누적된 오류는 연산결과의 신뢰성을 낮춘다. 궁극적으로는 큐비트의 결맞음 시간을 늘려 고전컴퓨터의 오류 발생률인 수준까지 오류율을 낮춰야 하겠지만, 현재로서는 뚜렷한 돌파구가 없다. 그래서 큐비트 자체의 오류율을 낮추는 노력과 동시에 양자오류보정 코드를 사용하여 오류를 수정하고자 한다. 오류보정의 핵심 아이디어는 오류율이 충분히 낮다면 여러 큐비트에서 동시에 오류가 발생할 확률이 하나의 큐비트에서 오류가 발생할 확률보다 작다는 것이다. 여러 물리 큐비트를 묶어 양자오류보정 코드를 구성하면 오류를 검출하고 보정할 수 있는 논리 큐비트를 만들 수 있으며, 구성하는 물리 큐비트의 수가 늘어날수록 논리 큐비트의 오류율을 낮출 수 있다. 양자오류보정 원리에 대해 더 자세히 알고 싶다면 Horizon 이전 글을 탐독해 보길 권한다[11].

양자시스템마다 활용할 수 있는 큐비트 상호작용 방식이 달라 구현에 용이한 양자오류보정 코드도 다르다. 초전도 양자

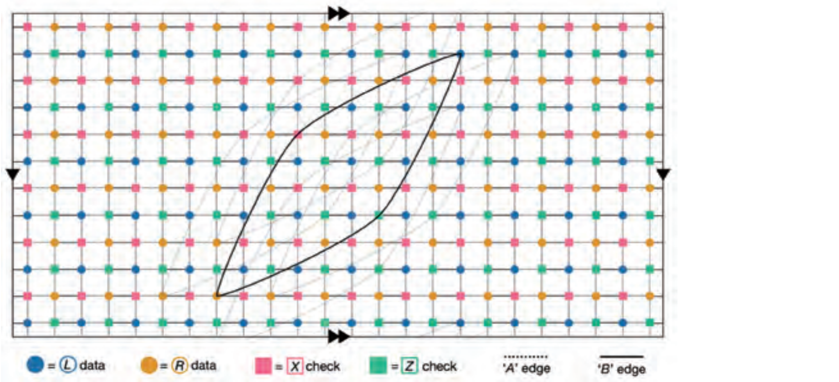


그림 6. 비인접 초전도 큐비트 상호작용('B' edge)를 활용한 양자 오류보정 코드[14]

프로세서에서는 일반적으로 인접한 큐비트 간의 상호작용만 가능하여 이 상호작용만으로 오류 검출과 보정이 가능한 표면 코드 구현을 목표로 한다. 표면 코드의 결함 감내 임계치는 약 1%인데, 이는 물리 큐비트당 오류율이 1%보다 낮아야만 큐비트 수를 늘려 논리 큐비트의 오류율을 낮출 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 상태 초기화, 양자게이트, 양자 상태 측정, 피드포워드 등 양자오류보정 과정 전체의 오류율을 1% 이하로 만들어야 오류보정이 의미가 있다. 게다가 이론적으로는 프로세서의 큐비트 수가 늘어나더라도 물리 큐비트의 오류율은 일정하다고 가정하지만, 실제로는 시스템 복잡도 증가로 물리 큐비트의 오류율이 증가한다. 따라서 양자오류보정을 통해 논리 오류율을 낮추는 것은 매우 어려운 일이다. 좋은 소식은 2024년 Google 연구팀이 105-큐비트 초전도 양자프로세서를 사용하여, 거리-3 표면코드(17 큐비트), 거리-5 표면코드(49 큐비트), 거리-7 표면코드(97 큐비트)로 확장할 때마다 논리 오류율이 약 2.15배씩 감소하는 실험 결과를 얻었다는 것이다[12]. 상당한 노력에도 불구하고 오류율은 여전히 10^{-3} 수준으로 가야 할 길은 멀지만, 양자오류보정 시대의 시작을 알리는 중요한 성과라고 생각한다.

실험적인 노력 외에도, 양자오류보정 코드를 구현하는데 필요한 물리 큐비트 수를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 중요한 연구결과 두 가지만 소개하겠다. 첫째, 초전도 양자컴퓨터의 경우 일반적으로 Z 오류(위상 반전) 발생 확률이 X 오류(비트 반전)보다 높다는 사실을 이용하여, 기존 표면 코드를 개선한 XZZX 표면 코드가 제안되었다[13]. 이 코드는 오류편향 정보를 활용하여 직사각형 형태의 코드를 구성함으로써 결함 감내 임계치를 높이고 오류 검출의 오버헤드를 줄일 수 있다. 둘째, 기존 표면 코드에 비인접한 초전도 큐비트 간의 상호작용을 추가하여 논리 큐비트 구현에 필요한 물리 큐비트 수를 상당히 줄일 수 있는 BB 코드가 제안되었다[14](그림 6 참조). 예를 들어, 기존 표면 코드를 사용하여 0.1%의 물리 큐비트 오류율을 10^{-7}의 논리 오류율로 낮추기 위해서는 약 3,000개의 물리 큐비트가 필요하지만, BB코드를 사용하면 288개의 물리 큐비트로 가능하다. 이는 양자오류보정에 필요한 물리 큐비트 수를 크게 줄일 수 있다는 희망적인 결과이다. IBM연구팀은 이 코드를 실제로 구현하기 위해 비인접 큐비트 커플러를 포함한 새로운 양자 프로세서를 개발에 힘쓰고 있다고 밝혔다. 이 외에도, 일반적인 양자오류보정 코드로는 보정할 수 없는 동시 오류 발생, $|0\rangle$과 $|1\rangle$이외의 양자 상태로의 누출 오류 등을 처리하기 위한 여러 가지 방법론이 제시되고 있다.

초전도 양자컴퓨터의 확장성

마지막으로 초전도 양자프로세서의 확장성에 대해서 살펴보도록 하자. 먼저, 초전도 양자프로세서를 구성하는 요소의 물리적인 크기부터 생각해보자. 앞서 말했듯이, 전하 잡음과 자기 잡음의 효과를 최소화하기 위해서는 초전도 큐비트의

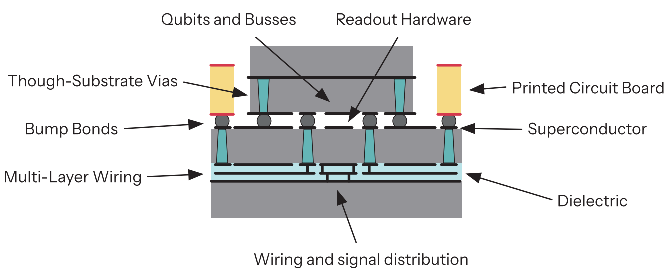


그림 7. —— 초전도 양자프로세서 3차원 적층 구조 모식도[15]

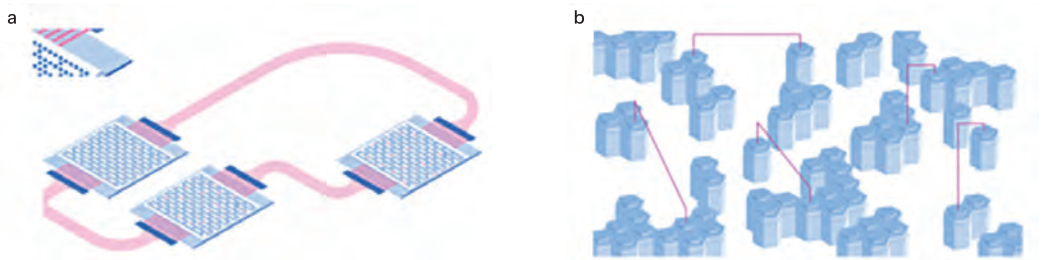


그림 8. —— a, 초전도 와이어를 활용한 근거리 초전도 양자프로세서 연결
b, 옵티컬 광자 및 광섬유를 활용한 원거리 양자프로세서 연결
[15]

정전용량이나 유도용량을 키워야 한다. 이로 인해 칩 위의 초전도 큐비트가 차지하는 면적이 커질 수밖에 없으며, 일반적으로 수백 μm 정도의 크기를 가진다. 비유전율이 높은 물질이나 키네틱 유도용량이 높은 물질을 사용하면 회로 요소의 표면적을 줄일 수 있지만, 대부분의 경우 더 큰 에너지 손실을 유발하여 큐비트 결맞음 시간에 악영향을 끼친다. 또한, 초전도 양자프로세서 요소의 공진주파수가 일반적으로 수 GHz임을 고려하면 마이크로파 한 파장의 길이가 수 cm에서 수십 cm에 이른다. 따라서 커플링 공진기, 리드아웃 공진기를 굽이굽이 말아서 제작하더라도 이들이 차지하는 면적이 작지 않다. 그러므로 초전도 양자프로세서의 집적도를 높이기 위해서는 정전용량이나 유도용량이 크면서도 에너지 손실이 적은 물질을 찾고, 새로운 방식의 초전도 큐비트를 설계하는 등의 돌파구가 필요하다.

현재 초전도 양자프로세서의 집적도를 높이는 방법은 큐비트, 커플링 공진기, 리드아웃 공진기, 드라이브 라인 등을 서로 정전(capacitive) 또는 유도(inductive) 방식으로 연결해 3차원 적층을 하는 것이다. 일반적인 반도체 공정과 유사하게, 레이어를 서로 마주 보게 한 플립 칩 기술과 초전도체로 제작된 실리콘 관통 전극(TSV; Trough-silicon via)을 통해 위아래의 레이어를 연결하는 기술을 사용한다(그림 7). 주로 냉간 용접이 가능한 초전도 인듐을 사용하여 칩 간격을 벌려 적층하는데, 인듐의 무른 성질 때문에 간격 조절에 어려움이 있다. 칩 간격에 따라 위아래 요소 사이의 상호 정전용량이 크게 변해 큐비트 공진주파수가 바뀌거나 상호작용 세기가 변화하는 등의 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 무르지 않은 물질을 덧대거나 추가하여 칩 간 간격을 유지하는 방법들이 제안되고 있다.

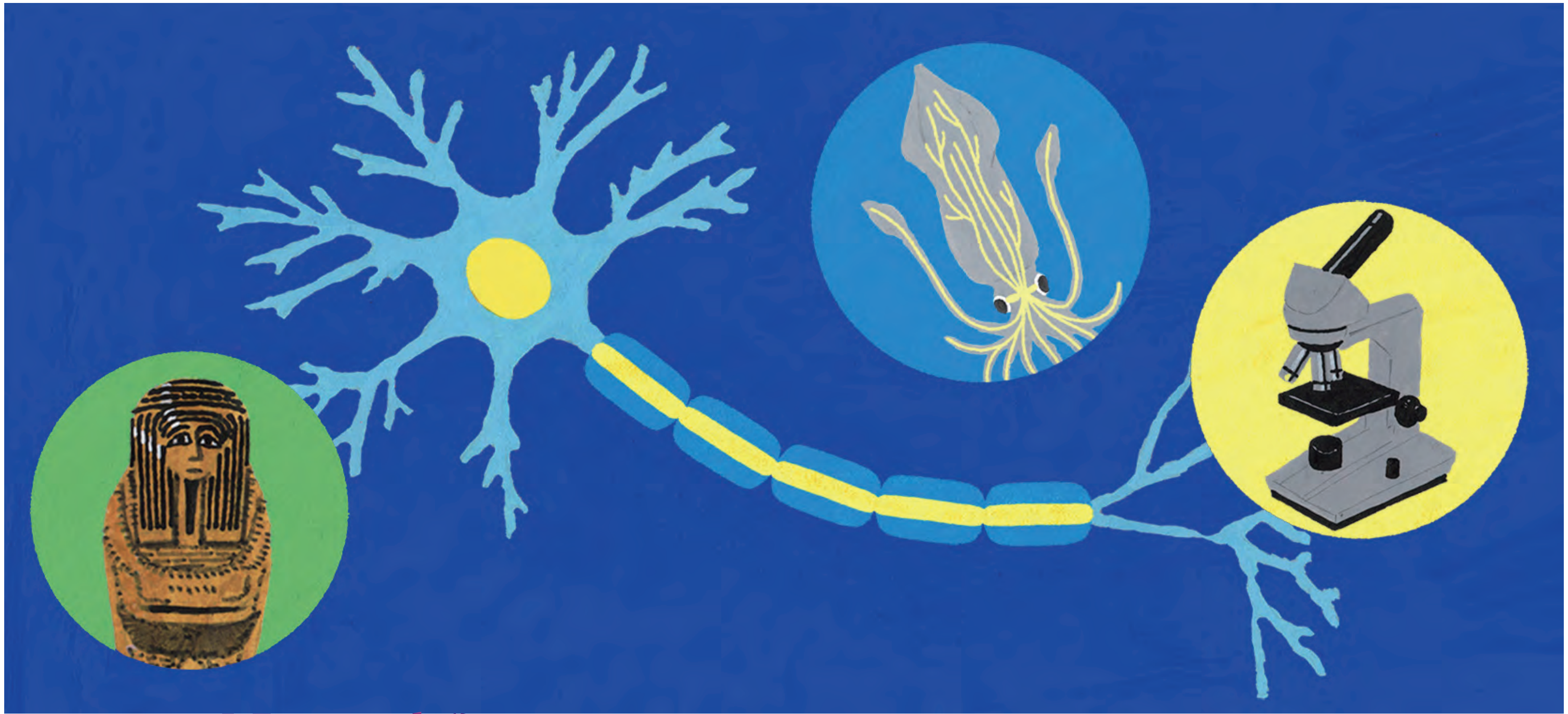
하지만 초전도 양자프로세서 칩 자체의 크기를 늘리는 데는 공정 장비와 웨이퍼 크기의 한계가 있다. 또한 큐비트 수가 늘어날 수록 제어와 측정 과정에서 발생하는 열이 많아져 희석식 극저온 냉각기의 냉각 용량이 걸림돌이 된다. 이를 해결하기 위한 대안으로 여러 개의 초전도 양자프로세서 칩과 희석식 냉각기를 연결하는 모듈러 아키텍처가 주목받고 있다(그림 8). 한번에 큰 프로세서를 만드는 것과 비교해서 작은 프로세서 여러 개를 만드는 것이 수율과 성능 면에서 유리하다. 따라서 초전도 양자 프로세서 칩을 높은 신뢰도로 연결하는 모듈러 기술이 개발되면, 단순히 큐비트 수를 늘리는 것 뿐만 아니라 시스템 복잡도에 따른 물리 큐비트 오류율 증가 문제도 해결할 수 있을 것이다. 이는 물리 큐비트 오류율을 낮게 유지해야 하는 양자오류보정 기술에도 도움이 되어 결함감내 양자컴퓨터를 구현하는 데 중요한 돌파구가 될 것으로 기대한다.

마치며

초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현 방법을 살펴보며 여러 어려움과 진행 중인 노력들에 대해 이야기해 보았다. 현재 초전도 양자컴퓨터가 자랑하는 1,121 큐비트는 우리가 몇만 원이면 살 수 있는 외장 디스크의 저장 용량에 비해 한없이 작은 숫자이며, 높은 오류율로 계산 결과조차 믿기 어려운 쓸모 없는 장치로 생각될 수도 있다. 그런데 양자컴퓨터를 사용해서 양자알고리즘과 양자시뮬레이션을 시연했다는 논문들이 심심치 않게 보이기 시작했다. 언제쯤 일상생활에서 양자컴퓨터의 유용성을 체감하게 될지는 모르겠지만, 최근의 발전 속도는 상당히 놀랍다. 우리는 양자회로 설계, 소재, 공정 방법, 잡음 환경 등 다방면의 연구를 통해 큐비트의 결맞음 시간을 늘리고 오류율을 낮추는 방법들을 하나둘씩 알아가고 있다. 또한, 이론적 발전을 통해 양자오류보정에 필요한 자원의 양도 점차 줄여가며 결함감내 양자컴퓨터 구현에 한 발짝씩 다가가고 있다. 결함감내 양자컴퓨터 구현이 불가능하다는 물리학적 근거가 없기 때문에, 언젠가는 구현될 수 있을 것이라고 기대해본다. 역사의 한복판에서 기술의 발전을 지켜보는 일은 즐거운 일이다. 이 글이 여러분이 이러한 발전을 지켜보고 이해하는 데 조금이나마 도움이 되었기를 바란다.

참고문헌

1. 김한영, 양자컴퓨터의 기원, Horizon (2020). https://horizon.kias.re.kr/12926/
2. 김한영, 양자 우월성, Horizon (2020). https://horizon.kias.re.kr/16137/
3. 허준석, 양자정보: 생물학에서 컴퓨터까지, Horizon (2019). https://horizon.kias.re.kr/9978/
4. 서준호, 겨울리는 진동자들, Horizon (2021). https://horizon.kias.re.kr/19714/
5. L. B. Nguyen et al., “Blueprint for a High-Performance Fluxonium Quantum Processor,” PRX Quantum, 3, 037001 (2022).
6. E. Hyyppäet al., “Unimon qubit,” Nat. Commun. 13, 6895 (2022).
7. A. Gyenis et al., “Experimental Realization of a Protected Superconducting Circuit Derived from the 0-π Qubit,” PRX Quantum2, 010339 (2021).
8. A. Somoroff et al., “Millisecond Coherence in a Superconducting Qubit,” Phys. Rev. Lett. 130, 267001 (2023).
9. Y. Kim et al., “High-fidelity three-qubit iToffoli gate for fixed-frequency superconducting qubits,” Nat. Phys. 18, 783 (2022).
10. J. Lisenfeld et al., “Electric field spectroscopy of material defects in transmon qubits,” npj Quantum Info. 5, 105 (2019).
11. 김한영, 양자오류보정, Horizon (2020). https://horizon.kias.re.kr/15547/
12. Google Quantum AI and Collaborators, “Quantum error correction below the surface code threshold,” arXiv:2408.13687 (2024).
13. J. P. B. Ataides, D. K. Tuckett, S. D. Bartlett, S. T. Flammia, and B. J. Brown, “The XZZX surface code,” Nat. Commun. 12, 2172 (2021).
14. S. Bravyi, A. W. Cross, J. M. Gambetta, D. Maslov, P. Rall, and T. J. Yoder, “High-threshold and low-overhead fault-tolerant quantum memory,” Nature 627, 778782 (2024).
15. S. Bravyi, O. Dial, J. M. Gambetta, D. Gil, and Z. Nazario, “The future of quantum computing with superconducting qubits,” J. Appl. Phys. 132, 160902 (2022).



Natural Sciences

뇌과학(신경과학)의 역사

글. 문제일(DGIST 뇌과학과 교수, DGIST 후각융합연구센터 연구소장) 그림. LIM KIIHWAN

들어가는 글

신경과학 혹은 뇌과학은 뇌를 비롯한 모든 신경계에 관해 연구하는 학문입니다. 과거, 뇌의 기본적인 구성단위인 신경세포(뉴런)가 뇌의 모든 활동을 담당한다고 여겨지던 시대에는 신경과학이라는 용어가 보편적이었지만, 현재 신경계의 활동은 신경세포 외에도 비신경세포도 중요한 역할을 한다는 것이 속속 밝혀지면서 뇌과학이라는 용어가 더 광범위하게 사용되고 있습니다. 실제 뇌는 신경세포보다 비신경세포가 더 많이 분포하고 있기도 합니다. 이에 이하 용어는 뇌과학으로 통일하여 정리하도록 하겠습니다.

서론

뇌는 인간의 지성과 감정을 모두 담당하는 가히 인간 활동의 정수라고 할 수 있습니다. 그러니 다른 동물과 달리 호기심이 많은 인간이 뇌에 호기심을 느끼고 이를 관찰하고 분석하고 실험하는 연구를 하는 것은 당연합니다. 그런데 흥미로운 것은 인간이 호기심을 느끼고 연구를 하는 것이 바로 뇌의 활동이니 결국 뇌가 뇌를 연구하는 상황입니다. 아무튼 인간은 역사적으로 아주 오래전부터 뇌에 궁금증이 많았고, 이를 해결하고자 하는 열망의 하나로 뇌과학 연구가 꾸준히 진행되었고 또 발전했습니다. 이에 인류 뇌과학 연구 역사를 살펴보면서 뇌과학의 범위가 어떻게 시작하여 확장하고 발전해 왔는지 정리해 보도록 하겠습니다.

뇌과학의 발전은 여느 과학과 다름없이 관찰과 분석, 그리고 해석의 과정을 거칩니다. 그리고 이러한 연구 활동은 연구방법론의 발전 없이는 불가능합니다. 따라서 초기에는 관찰에 필요한 연구기법 발명과 이러한 발명이 뇌과학 연구 분야와 접목하면서 뇌과학 발전을 이끌었고, 이후 분석과 해석에 필요한 새로운 기술이 등장하면서 획기적인 발전을 하게 됩니다. 따라서 뇌과학 역사를 설명하면서 비록 직접적인 연관성이 없더라도 뇌과학 연구에 돌파구를 열어준 기술에 대한 설명도 함께 언급하도록 하겠습니다.

고대 시대의 뇌과학 연구

고대 시대는 몸body은 영혼mind, 마음 혹은 정신이 머무르는 곳이라 생각했습니다. 이에 고대 인류가 몸의 어느 부위에 영혼이 머문다고 생각했는지가 뇌과학에 대한 이해도를 파악하는 데 도움이 될 것입니다. 우선 독자분들도 잘 아시다시피 고대 이집트에서 미이라를 만들 때는 콧구멍을 통해 뇌를 조각내 꺼내어 버리고, 사후세계에서 필요하다고 믿었던 위장, 창자, 폐, 간과 같은 장기는 따로 카노푸스의 단지Canopic jars라는 항아리에 보관하였습니다. 심장을 보관하는 항아리는 없었으며, 심장은 미이라 몸속에 그대로 두었습니다. 이집트인들은 심장에 정신이 깃든다고 믿었기 때문에 심장이 없으면 영혼이 돌아와 환생할 때 온전히 되살아날 수 없다고 생각한 것이죠. 사실 미이라가 환생하는 일은 가능하지도 않지만, 설령 그런 일이 일어나도 그 미이라는 보고 듣지도 못하며 또 아무것도 기억하지 못했을 것입니다. 뇌가 없으니까요. 고대 그리스에서는 의성醫聖이라 불리는 히포크라테스기원전 약 460년~기원전

약 370년가 "뇌는 인간의 지능과 감정을 담당하는 곳"이란 말을 남겼고, 아리스토텔레스기원전 384년~기원전 322년는 무슨 이유였는지 "뇌는 흥분한 심장에서 데워진 피나 체액을 식히는 냉각장치이며, 마음이 자리하는 곳은 심장이다"이란 말을 남깁니다. 이러한 논란을 잠재운 것은 로마 시대에 4명의 황제의 시의侍醫를 지낸 그리스 의학자 클라우디오스 갈레노스129~199?의 연구 덕분이었습니다. 갈레노스는 인체 해부를 시행하였고, 특히 신경계에 관해서는 실험적인 연구를 많이 하였는데, 이러한 열정적인 연구를 기반으로 뇌가 감각과 운동을 조절한다고 주장했습니다.

고대 중국도 기록에는 정확하게 남아있지 않지만 '뇌(腦)'라는 한자가 전해지는 것으로 미뤄 짐작건대 아마도 누군가 뇌를 관찰했던 것 같습니다. 한자 '뇌(腦)' 자를 보면, 부수部首로 고기 '肉' 자를 쓰고 오른쪽에는 'ㅛ' 자로 덮인 '흉(凶)' 자가 개미허리(巛) 글자 밑에 있습니다. 그냥 좀 비과학적인 상상을 해보자면, 전쟁터에서 무기로 머리뼈가 손상되어 뇌가 노출된 사체를 본 사람이 주변 사람들에게 머리뼈 속에 있는 것은 뭔가 주름이 많은 흉하게 생긴 고깃덩어리라고 말한 것 같습니다. 실제 한자 '뇌(腦)'는 사람의 머리에서 올라가는 기(氣)(개미허리(巛) 자)와 숨구멍('ㅛ' 자로 덮인 '흉(凶)' 자)을 표현한 표의문자라고 합니다. 정리해 보자면 고대 이집트나 그리스 시대의 뇌과학 연구는 철학자나 의학자의 고찰이나 경험을 기반으로 한 철학이었으며, 로마 시대에 와서 갈레노스가 해부를 통해 뇌의 구조를 관찰하는 연구를 시작함으로써 신경해부학Neuroanatomy이란 형태학morphology 연구 분야가 열리게 됩니다. 이때 이르러서야 비로소 과학으로서의 뇌과학 연구가 시작되었다고 보입니다. 이 시기 뇌과학자들은 맨눈으로 뇌를 관찰하는 것이 다였기에, 현미경과 같은 관찰 장비가 절실했으리라 추측됩니다.

중세 시대의 뇌과학

중세 시대는 종교적인 제약으로 과학으로서의 뇌과학 연구보다는 영혼에 대한 고찰이 더 활발하였습니다. 따라서 과학에 기반한 뇌과학 연구의 발전은 잠시 암흑기를 보냈습니다. 이에 언급할 기록이 거의 없습니다. 중세 시대 이야기에 마녀가 자주 등장하고, 마녀가 제조한 약물로 환각 등의 증세가 있다고 언급된 이야기들은 남아 있습니다. 이로 미루어 볼 때, 이 약물 제조에 관한 충분한 과학적 지식이나 제대로 된 처방전이 기록으로 남아있지 않아 과학의 영역으로 들이기는 어렵지만, 이 약물이 현대 항정신성 약물의 일종이 아니었을까 하는 추측을 하게 됩니다. 혹시라도 이 시기 관련 약물 제조에 대한 기록물이 발견되면, 신경약리학Neuropharmacology 등장의 역사가 매우 앞당겨지지 않을까 생각합니다.

근대 시대의 뇌과학

근대 시대로 들어서면서 등장한 계몽주의는 과학에 많은 영향을 줍니다. 실제 이 시대 철학자들은 높은 수준의 과학적 배경을 갖춘 경우가 많았습니다. 이렇게 과학적 배경을 갖춘 철학자들을 중심으로 뇌와 마음의 관계에 대한 논의가 시작되면서 후세 뇌과학 연구자들에게 많은 영감을 주기 시작하였습니다. 한 예로 "나는 생각한다. 고로 존재한다"라는 명제로 유명한 철학자 르네 데카르트1596~1650는 사체 해부와 같은 과학적인 접근을 통해 몸body과 마음mind, 정신이 따로따로 존재한다는 것을 주장했고, 몸과 마음의 연결이 일어나는 곳이 바로 '뇌'라는 것을 아울러 주장합니다. 지금이야 우리들은 뇌의 기능과 심장의 기능에 대해 잘 알고 있지만, 당시 사람들은 여전히 아리스토텔레스의 주장처럼 마음은 심장에 있다고 생각했습니다. 데카르트 덕분에 현대 뇌과학 연구자들은 비로소 아리스토텔레스로부터 자유로워집니다. 이제 뇌과학 연구자들의 궁금증은 '그럼 뇌는 과연 어떻게 작동하는지'로 옮겨갑니다. 1745년, 네덜란드 라이덴(라이덴 대학평가 순위를 발표하는 도시)대학교의 물리학자 피에터 반 뮈스헨브룩1692~1761 교수는 정전기를 축적하는 도구인 라이덴병Leiden jar을 발명합니다. 이처럼 이 시기 과학자들은 전기에 관한 관심이 높았고, 따라서 대부분의 뇌과학자도 뇌를 구동시키는 힘이 전기일 것으로 추측했던 것 같습니다. 1791년 이탈리아 볼로냐 대학교의 해부학 교수였던 루이지 갈바니1737~1798 교수는 전기 자극을 통해 개구리 근육이 수축하는 현상을 발견합니다. 안타깝게도 갈바니 교수는 이것을 개구리 근육이 전기를 직접 발생시키는 것으로 생각했습니다. 이런 잘못된 해석으로 인해 그 당시에는 그의 발견과 이론이 무시되는 안타까운 시간을 보내게 됩니다. 하지만 그의 이론은 뉴런 발견과 뇌 속 뉴런의 작동 원리가 밝혀진 이후에 다시 조명받으면서 그의 이론이 완전히 틀린 것은 아님이 밝혀집니다. 그 시대가 아리스토텔레스의 주장처럼 마음이 심장에 있다는 설이 인정받는 때였다면, 오히려 갈바니 교수는 칭송받았을 것입니다, 심장은 스스로 전기를 만드는 기관이니까요. 아무튼 갈바니 교수는 뇌과학 연구에 생리학 연구 분야를 들여옵니다. 그 당시 뇌과학 연구자들에게 뇌의 전기 신호를 측정하고 기록하는 실험 장비 발명이 시급했을 것입니다.

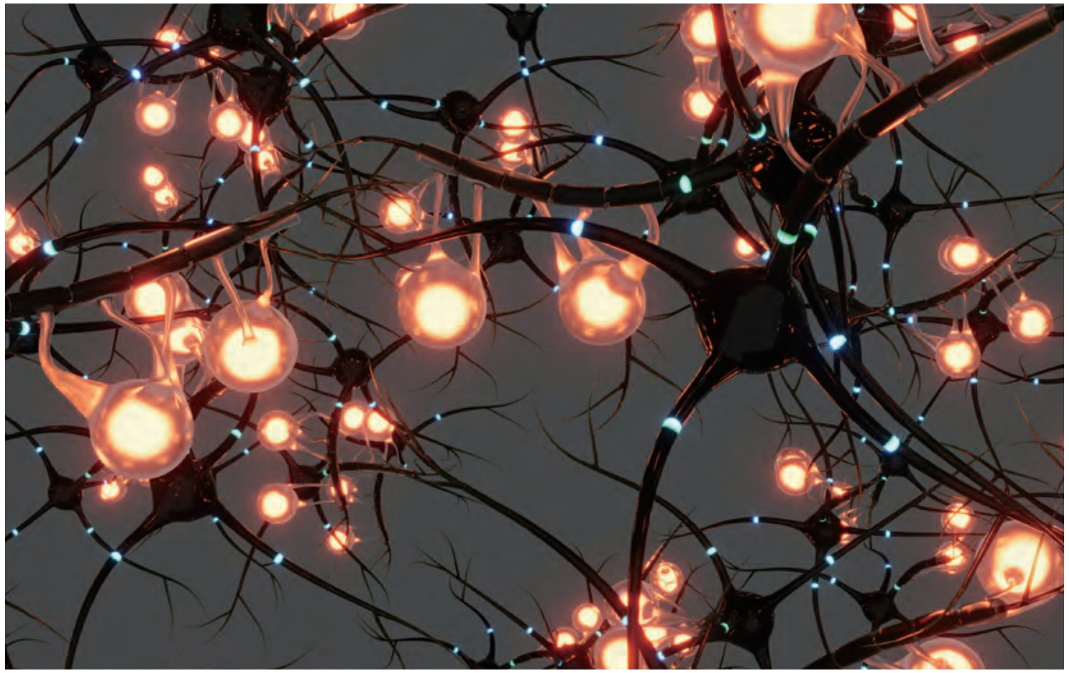
현대 시대의 뇌과학

현대 시대로 들어오면서 뇌과학 연구는 황금기를 맞게 됩니다. 뇌과학 연구자들은 전기생리학Electrophysiology을 이용한 연구 분야를 발전시킵니다. 영국 전기생리학자Electrophysiologist인 앤드루 헉슬리1917~2012 교수는 스승인 생물물리학자Biophysicist 앨런 로이드 호지킨1914~1987 교수와 함께 신경세포 내에서 신호를 전달하는 기전이 전기 신호임을 알아내고 이 전기 신호를 생성하는 기전을 밝힙니다. 전기 신호를 측정하기 위해 전극을 작은 신경세포에 삽입해야 하는데, 이 일은 그 당시에는 기술적으로 매우 어려운 일이었습니다. 하지만 이 두 선구자는 오징어의 거대축삭Squid giant axon을 이용해 기술적인 어려움을 극복하고, 전기 신호를 측정하고 분석하여 마침내 활동전위Action potential가 생겨나는 원리를 밝혀냅니다. 그리고 이 발견 덕분에 호지킨 교수와 헉슬리 교수는, 비록 한참 후에 사실이 아니라고 판명된 "신경세포 간의 신호 전달이 전기적인 작용을 통해 이루어진다"라는 이론을 주장한 호주 신경생물학자Neurobiologist인 존 커루 에클스1903~1997 교수와 함께 1963년 노벨 생리의학상을 받습니다.

과학적 배경을 갖춘 철학자들을 중심으로 뇌와 마음의 관계에 대한 논의가 시작되면서 후세 뇌과학 연구자들에게 많은 영감을 주기 시작하였습니다.

사실 에클스 교수의 해석은 잘못이었음에도 에클스 교수의 연구 방법은 이후 신경전달물질을 통한 신호 전달을 탐구하는 데에도 적극적으로 활용되었기에 함께 수상하게 되었다고 합니다. 이제 현대 뇌과학 연구자들은 단일 신경세포의 전기 신호를 측정하고 분석할 수 있게 되었습니다. 그리고 이런 선구자들의 노력 덕분에 아주 미세한 구조를 가진 신경세포의 전기 신호를 측정하는 일에 도전하는 연구자도 나타납니다. 그리고 이들과 별개로 단일 신경세포들이 함께 만들어내는 뇌 속 전기 신호의 합창을 관찰하려는 꿈을 꾸는 연구자도 나타납니다. 독일 신경정신과학자Neuropsycologist인 한스 베르거1873~1941 박사는 1924년에 뇌의 전기 활동을 기록하는 장비를 발명하여 뇌파를 측정하는 기법인 뇌파 전위 기록기법EEG: Electro Encephalo Graphy을 소개합니다. 이를 통해 뇌파의 일종인 알파파alpha wave를 최초로 발견합니다. 살아있는 사람의 뇌 활동을 직접 측정할 수 있게 되어 이제 뇌과학 연구는 단순히 맨눈으로 뇌를 관찰하는 것 외에도 다양한 방법으로 뇌에 관해 연구할 수 있게 됩니다. 신경전기생리학Neuroelectrophysiology 혹은 Neurophysiology 분야가 뇌과학 연구에 큰 영역을 차지하며, 이를 뒷받침할 실험기기 개발과 실험 결과 해석을 위해 공학은 물론 물리학과 수학과 같은 타 학문과의 교류가 본격적으로 시작됩니다.

또, 17세기 네덜란드의 안톤 레벤후크가 현미경으로 생물학 시료를 관찰하는 방법을 개발하고, 뇌 연구자들은 뇌의 미세 구조를 관찰할 수 있는 기회가 열렸습니다.



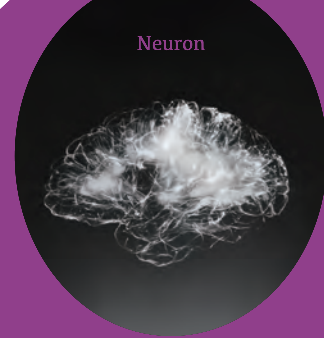
광학현미경의 발명으로 뇌의 미세 구조를 관찰하여 신경세포(뉴런)를 발견하게 된 것입니다. 뇌에는 대략 천억 개의 신경세포가 존재한다고 합니다. 이들 신경세포는 맨눈으로 관찰하기 어려운 작은 크기이므로 꼼꼼한 관찰이 쉽지 않지만, 실제 관찰할 수 있다고 하더라도 신경세포 수가 너무 많아 각각의 신경세포를 구분하여 관찰하는 일은 불가능할 정도로 어렵습니다. 그런데 1873년 이탈리아의 해부/병리학자[Anatomist/Pathologist]인 카밀로 골지[1843~1926] 교수가 광학현미경을 이용한 미세 구조 관찰을 위해 조직을 염색하는 방법(골지 염색법, Golgi stain/method)을 개발합니다. 뇌과학 연구자들에게 너무 행운인 것은 현재까지 그 메커니즘이 알려지지 않았지만, 이 염색법은 제한된 수의 세포를 무작위로 염색하는데 해당 세포는 전체적으로 염색됩니다. 따라서 좁은 공간에 신경세포가 촘촘히 들어찬 뇌 조직을 연구하기에 최적의 염색법인 것이죠. 이 기법을 가장 효과적으로 활용한 뇌과학자는 스페인의 신경조직학자[Neurohistologist] 산티아고 라몬이 카할[1852~1934] 교수입니다. 카할 교수는 골지 교수의 염색법을 이용해 염색된 다양한 신경세포(거의 모든 뇌 조직의 신경세포)를 관찰하고 이를 그림으로 남깁니다. 카할 교수의 집념이라 표현할 수밖에 없는 열정적인 관찰을 통해 신경세포가 서로 떨어져 있음을 발견했고, 이를 바탕으로 '뉴런[Neuron] 이론'을 주장했습니다. 이는 골지 교수가 주장한 신경세포가 그물망처럼 얽혀 있다는 '망상[Reticulum] 이론'과 충돌하는 이론인데, 이러한 이유로 1906년 함께 노벨 생리의학상을 받는 자리에서 서로의 이론을 비난하는 에피소드를 만듭니다. 결국 이 논쟁은 이들 사후 50년이 지나 전자현미경이 등장하고서야 확실하게 정리됩니다. 전자현미경 관찰 결과, 신경세포 사이에 미세한 틈이 있다는 것을 관찰했고, 이로써 과학계는 카할 교수의 '뉴런 이론'에 손을 들어줍니다. 사실 전자현미경을 통해 시각적인 증거로 '뉴런 이론'이 증명되기 이전에 이 논란을 정리한 뇌과학 연구자가 있었는데, 바로 찰스 스콧 셰링턴[1857~1952] 교수입니다. 셰링턴 교수는 자신의 연구를 정리한 그의 한 저서에서 신경세포 간의 소통에 관해 설명하면서 서로 떨어져 있는 신경세포 간의 구조에 대한 이름을 지어줍니다. 그것이 '시냅스[synapse, 연접]'입니다. 이는 '서로 붙잡는다'는 의미의 그리스어 Syn-Aptein에서 창작한 이름입니다.

이제 뇌 속 신경세포가 시냅스란 구조를 가진 채 서로 떨어져 있음을 알게 되었으니, 뇌과학자들은 서로 떨어져 있는 신경세포끼리 어떻게 소통하는지 설명해야 합니다. 그리고 영국 신경과학자[Neuroscientist] 버나드 카츠[1911~2003] 박사가 신경세포의 말단에 서로 떨어져 있는 신경세포에 신호를 보낼 수 있는 물질을 보관하는 저장소[synaptic vesicle]가 있음을 발견했습니다. 이 안에는 신호 전달물질인 화학물질들이 들어 있는데, 이 물질들을 신경전달물질[neurotransmitter]이라고 합니다. 서로 떨어져 있는 신경세포들이 화학물질로 소통한다는 것을 알게 된 것이죠(이런 이유로 synapse를 chemical synapse라고 부르기도 합니다). 이후 스웨덴 약리학자[Pharmacologist] 울프 폰 오일러[1905~1983] 박사나 미국 생화학자[Biochemist] 줄리어스 액셀로드[1912~2004] 박사와 같은 과학자들에 의해 뇌 활동을 조절하는 다양한 신경전달물질이 발견되었고, 이들의 연구는 과학계의 인정을 받아 1970년 노벨 생리의학상을 공동으로 수상하게 됩니다. 이들의 화학적 시냅스의 발견과 기전 연구는 신경약리학[Neuropharmacology]과 신경생화학[Neurochemistry] 분야를 열게 됩니다. 이후 새로운 신경전달물질을 발견하려는 연구가 활발히 진행되고, 이들 신경전달물질의 과다분비나 억제가 우리 정신세계에 영향을 미친다는 것을 알게 됩니다(현대 마녀의 등장이라 할 수 있겠습니다).

이처럼 신경약리학과 정신과학[psychiatry]이 융합되는 시점이 일어나면서, 뇌과학 연구는 새로운 국면을 맞이합니다. 그간 연구자 학문 분야 중심으로 분류하여 정신과학, 신경학, 형태학(해부 및 병리학), 약리학, 생리학, 생물학, 생물물리학, 생화학, 세포학, 공학 등의 학문 이름으로 진행되던 뇌과학 연구는 타 학문 분야와의 융합을 통해 미시적 관점과 거시적 관점을 다면적으로 접근하는 새로운 시도가 필요하다는 생각에 이릅니다. 즉, 본격적으로 다양한 창으로 우리 몸을 이해하고 마음을 들여다보는 새로운 학문으로서의 뇌과학이 열리게 됩니다. 그리고 드디어 1980년 미국 존스홉킨스대학교 의과대학의 약리학과 교수인 솔로몬 스나이더[1938~현재] 교수는 세계 최초로 뇌과학 독립학과인 '신경과학'과를 개설합니다(https://neuroscience.jhu.edu/about). 이 학과에서 학문 분야는 더 이상 주인공이 아닙니다. 뇌에 대한 궁금증과 질문, 그것이 주인공이 되었습니다. 어떤 학문 분야에서 연구하는 것은 중요하지 않고 뇌에 대한 궁금증을 해소하거나 뇌과학이 당면한 질문에 대한 답을 찾기 위해 능동적으로 타 학문과의 융합과 협력을 찾아가는 시대가 열렸습니다. 새로운 기술의 도입이 빨라졌고, 다양한 기기의 발전도 일어납니다. 이제 우리는 좀 더 강력한 장비로 무장한 채 21세기 마지막 프런티어인 뇌라는 소우주로의 여행을 떠납니다.

계속

다음 편에서는 생물정보학 등과 같은 새로운 학문과 다양한 실험기법과 기기 등장으로, 뇌 속 신경망을 관찰하고 해석하는 분야의 등장과 이를 통한 인간 인지 관련 최신 뇌 연구 분야에 대해 정리하도록 하겠습니다. KIAS



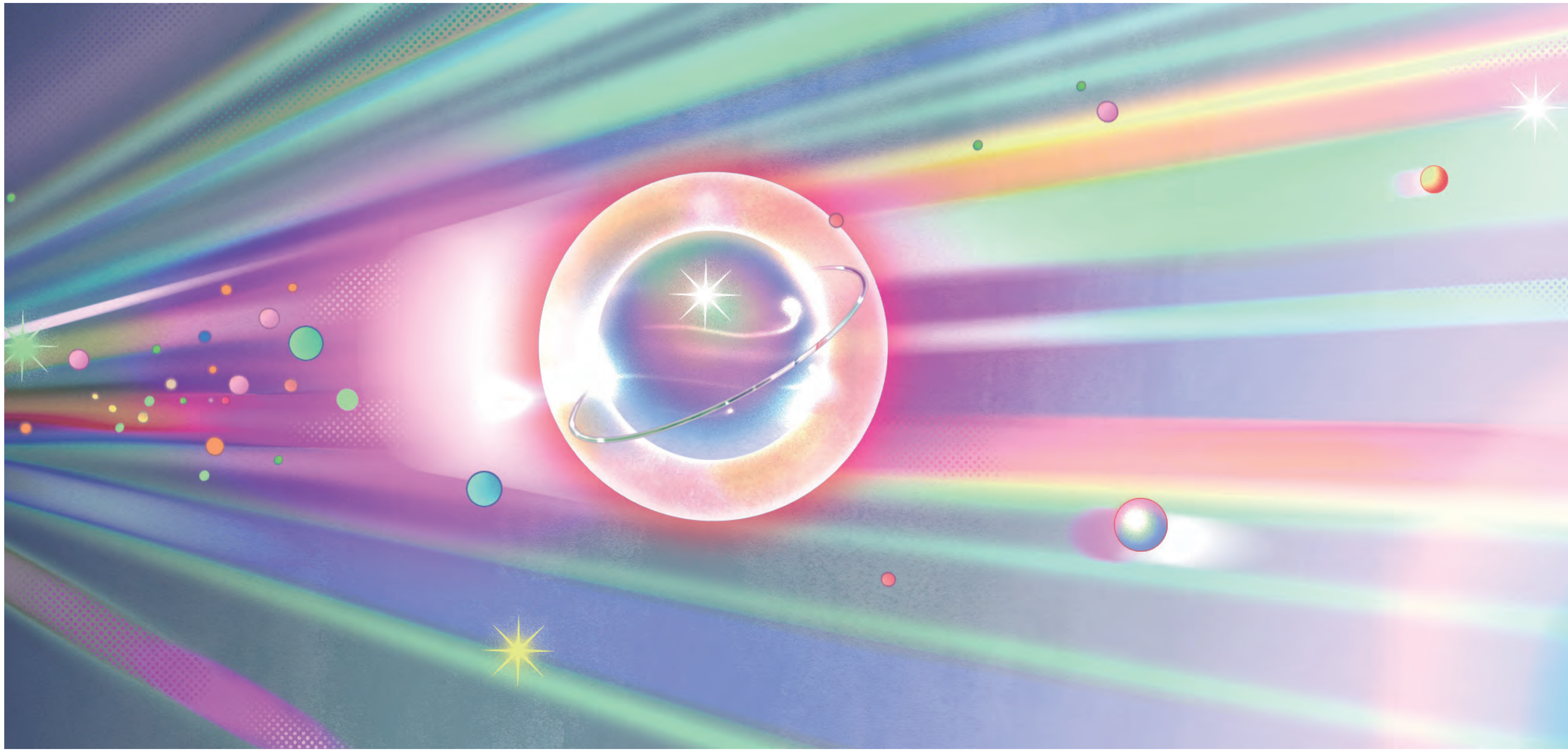
메인 일러스트에 대한 그림 설명

- 신경세포(뉴런, neuron)

이집트 미이라 제작 때 버려졌던 뇌 속 신경세포는 결국 인간 정신활동의 정수로 밝혀진다. 세포체 속 핵을 중심으로 사방으로 뻗어 있는 수상돌기[dendrite : 다른 신경세포에서 보내는 전기화학 신호를 받아들여 신경세포체에 전달하는 역할을 수행]와 신경세포의 세포체로부터 길게 뻗어 나온 하나의 축삭돌기[axon : 활동전위를 전달하는 역할을 수행]가 있다. 축삭돌기의 기능은 오징어를 이용한 연구로 증명하였다. 축삭돌기의 끝은 신경연접[시냅스, synapse]이란 구조를 갖는데, 이곳이 화학신호를 통해 한 신경세포에서 다른 신경세포로 신호를 전달하는 연결 지점이다. 카할 교수는 골지 교수의 염색법을 이용해 염색된 신경세포를 광학현미경으로 관찰하여 처음 시냅스 구조 존재를 주장하였다.

[현미경의 과학] 엑스선 현미경[1]

글. 임준(포항가속기연구소 수석연구원) 그림. 메아리(mmmeari)



들어가며

십수 년 전, 엑스선 현미경에 대한 연구를 처음 시작할 때만 해도 아직 완성되지 않은 학문 분야로 매년 새로운 기술이 발표되고 있었고, 몇 년 내에 극한의 해상도를 갖는 멋진 3차원 엑스선 영상을 얻어 노벨상을 받을 수 있으리라 예상했었다. 하지만 모든 학문 분야가 그렇듯 많은 기술적인 난제에 봉착하여 오늘날까지 실현되지 않았다. 엑스선 영상은 초등학생도 이해할 수 있는 직관적인 물리 현상인 동시에, 빛과 원자의 상호관계를 다룬다는 점에서 매력적인 물리 분야임에 틀림없다.

이번 연재물에서는 엑스선의 발생부터 특성 등 기본 개념과 고품질의 엑스선을 제공하는 방사광가속기에 대한 소개를 다룬다. 더불어 엑스선을 이용한 다양한 현미경에 대해 알아보고, 어떻게 활용되며 한계는 어디까지인지, 전 세계적으로 진행 중인 선진 연구 방향은 무엇인지 고찰하고자 한다.

엑스선의 발견

엑스선은 1885년 독일 과학자 뢴트겐이 진행한 진공관 실험 중 우연히 발견되었고, X-선이란 이름은 기존의 지식으로는 알 수 없는 성질의 전자기파라는 뜻으로 지어졌다. 엑스선의 파장은 수십 nm 부터 수십 pm 수준으로, 에너지로 환산하면 ~100 eV부터 수백 keV의 전자기파(빛)를 말한다. 질량이 없고 파장이 매우 짧기 때문에 대부분의 물질을 투과하는 성질을 가지고 있어, 뢴트겐은 엑스선을 이용해 배우자의 손 엑스선 영상을 세계 최초로 얻을 수 있었다. 이는 현재 의료계에서 널리 활용되는 엑스선 영상의 시초라 할 수 있다. 엑스선의 발견으로 뢴트겐은 1901년 첫 번째 노벨 물리학상을 수상하였다.

엑스선의 발생

엑스선은 전자가 가속될 때 발산하는 전자기파 중에서 특정한 파장대의 빛을 말한다. 여기서 가속이란 벡터량으로 속력의 증가(감소) 또는 진행 방향이 바뀔 때를 뜻한다. 엑스선은 크게 두 가지 방법에 의해 발생한다. 최초 뢴트겐이 사용했던 진공관 엑스선은 가속된 전자가 금속박막의 원자핵에 의해 급속히 감속하면서 발생하는 브램슈탈룽Bremsstrahlung 방사에 의해 발생한 것이다. 현재도 산업용 또는 의료용으로 사용하는 엑스선 발생장치는 대부분 브램슈탈룽 방사를 이용하며, 전자빔의 가속전압, 즉, 전자빔의 에너지에 따라, 그리고 금속 소재에 따라 발생하는 엑스선의 스펙트럼도 변하게 된다.

그림 1. 뢴트겐 진공관 실험장치 사진과 세계 최초의 엑스선 투과 영상
© www.wilhelmconradroentgen.de

방사광 가속기는 전 세계적으로 50개 이상 설치되어 널리 활용되고 있는 엑스선 활용 거대 연구시설로, 우리나라에는 현재 포항 가속기연구소가 유일하다.

전자빔은 일정한 방향으로 주사할 수 있으나, 타깃 금속박막anode에서 발생되는 엑스선은 방사형으로 발산하게 된다. 이러한 큰 발산각을 이용하여 대형 시료, 예를 들어 의료용 엑스선이나 항공 검색대, 비파괴 검사 등 의료·산업용으로 널리 사용된다. 다른 하나는 상대론이 적용되는 매우 빠른 속도의 전자에 의해 발생한다. 정상 상태steady state에서 전자는 스핀을 갖고 회전하면서 쌍극자 방사dipole radiation를 생성한다. 이 상태의 전자가 빛의 속도에 근접한 속도로 진행하면, 특수 상대론에 의해 전자의 진행 방향으로 쌍극자 방사가 향하게 된다. 이렇게 발생된 빛을 방사광synchrotron radiation이라고 부르며, 자외선부터 가시광선, 엑스선에 이르는 넓은 스펙트럼을 가지며 매우 밝고 퍼짐각이 작아 과학 분야 연구용으로 사용하기에 적합하다.

엑스선의 성질

엑스선은 파장이 물질 내부의 원자 간 거리, 즉, 옹스트롬Angstrom 정도의 길이이며, 원자 내부 전자에 의해 완전히 흡수될 수도 있고, 전자에 의해 산란될 수도 있으며, 원자에서 전자를 방출시킬 수도 있다. 이러한 엑스선과 원자와의 상호작용을 활용하여 물질 내부의 원자 구조와 원자 간의 거리를 정확히 측정할 수 있으며, 원자의 화학 상태나 전자의 스핀 상태 등 다양한 물리량을 측정할 수 있다. 파장이 극히 짧지만, 전자기파, 즉, 빛이기 때문에 광학에서 볼 수 있는 다양한 물리 현상을 엑스선을 이용해서도 관찰할 수 있다. 특히 엑스선의 에너지가 가시광에 비해 높기 때문에 빛의 광자 특성을 쉽게 확인할 수 있으며, 파장 특성 또한 어렵지 않게 확인이 가능하여 빛의 이중성dual nature of light을 명확히 볼 수 있다.

방사광 가속기Synchrotron Radiation

엑스선을 논할 때, 반드시 언급되어야 할 것은 방사광 가속기이다. 방사광 가속기는 전 세계적으로 50개 이상 설치되어 널리 활용되고 있는 엑스선 활용 거대 연구시설로, 우리나라에는 현재 포항가속기연구소가 유일하다. 싱크로트론은 전자와 같은 전하를 가진 입자를 극도로 높은 에너지로 가속시키는 장치를 일컫는 말로, 빛의 속도에 가까운 속력을 갖는 전자빔을 발생시킨다. 이렇게 빠른 전자는 강력한 자기장 및 전기장에 의해 가능하며, 동시에 강도를 증가시킴synchronously ramping으로써 이루어진다. 강력한 전자석을 사용하여,

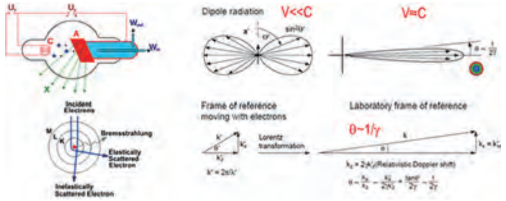


그림 2. ——— (좌) 브렘슈탈룽 방사에 의한 엑스선 발생장치 모식도와 (우) 전자의 속도가 느릴 경우 쌍극자 방사와 전자의 속도가 빛에 속도로 근접할 때 상대론적 운동에 의한 방사광 발생 기본원리 개념도 © www.bnl.gov/nsls2/userguide/lectures/ lecture-2-shaftan

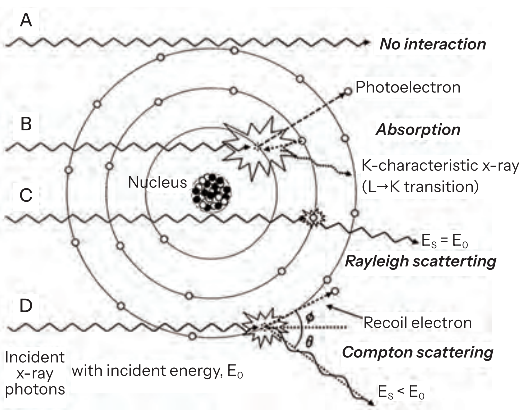


그림 3. ——— 엑스선이 원자와 반응할 때 발생하는 다양한 물리적 현상들 © Journal of Nuclear Medicine Technology March 2005, 33 (1) 3-18

그림 4. ——— 전 세계에서 운영 중인 방사광 가속기 현황(유럽, 미국, 일본 순으로 많다) © Lenny Rivkin talk, PSI, SWISS

공기 분자와의 충돌을 최소화하고 고에너지의 전자빔을 오랜 시간 동안 저장할 수 있는 가느다란 고리 모양의 초고진공 챔버 내에서 전자빔을 집속하고 조향한다. 초기에 싱크로트론은 고에너지 입자 물리학 분야에서 원자의 구조를 연구하기 위해 사용되었으며, 기술의 발전에 따라 점점 높은 에너지로 원자 충돌을 연구할 수 있게 되었다. 그러나 높은 에너지의 전자가 원형 경로를 따라 이동하도록 자기장을 조절하면 극도로 강렬한 방사선, 즉, '방사광'이 방출된다. 미국 스탠퍼드 선형가속기센터에서 1972년부터 활용된 이 방사광은 당시 고에너지 입자 물리학자들에게는 쓸모 없는 '기생' 광원이었지만, 우리는 이를 1세대 방사광 광원이라 부른다. 2세대 방사광은 방사광만을 발생시키기 위해 전자석을 이용해 원형에 비슷한 전자빔 경로를 만들었으며, 전자빔을 저장할 수 있는 저장링을 설치하였다. 최초의 2세대 방사광NSLS은 1978년 미국 브룩헤이븐 국립연구소 내에 설치되었으며, 58개의 빔라인에서 엑스선을 활용한 실험을 하였다. 2000년대 초반, 이 연구소에서 수행한 실험으로 두 개의 노벨 화학상을 수상하기도 했다. 3세대 방사광은 매우 강력한 자기장을 갖는 영구자석을 주기적으로 배열한 위글러wiggler 또는 언듈레이터undulator 장치를 이용해 전자의 요동wiggle을 인위적으로 조정함으로써, 매우 높은 휘도의 결맞는coherent 엑스선을 활용할 수 있도록 설계되었다.

포항 방사광가속기Pohang Light Source, 1995~도 3세대 방사광에 속하며, 현재 전 세계적으로 40여 개의 시설이 운영되고 있다. 2010년대에 들어서서, 미국의 방사광 과학자들은 3세대 방사광의 극한의 장치를 개발하여 설치하였다. 그것은 엑스선 자유전자 레이저, X-ray Free Electron LaserXFEL이다. 3세대 방사광은 수 미터 길이의 언듈레이터를 사용하는 반면, XFEL은 수백 미터 길이의 언듈레이터를 사용한다. 또한 펨토초 펄스의 레이저를 이용해 전자를 발생시킴으로써, 레이저와 같은 특성(높은 결맞음성과 낮은 빔퍼짐각)을 갖는 매우 강력한 펄스파 엑스선을 생성한다. 여기서 강력함을 정량적으로 기술하면, 3세대 방사광의 1억 배 밝기의 빛을 생성한다. 미디어에서 가끔 초고속 카메라로 물풍선이 터지는 순간을 관찰한 영상을 볼 때가 있는데, '배경이 좀 어두운데'라고 생각한 경우가 있을 것이다. 이는 매우 짧은 시간에 카메라에 들어오는 빛의 세기가 약하기 때문으로, 밝은 광원은 초고속 영상을 얻기 위해서 필수적인 조건이다. 엑스선 실험도 마찬가지로, 기존에 일반적인 실험으로는 관찰하기 어려웠던 찰나의 순간, 즉, 펨토초(10-15초)에 일어나는 현상을 짧은 파장(10-10m)의 빛으로 자세히 관찰할 수 있게 되었다. 예를 들어, 얼음이 녹거나 물이 얼어붙는 상전이 과정은 일상에서 쉽게 관찰되는 자연 현상이지만, 매우 빠르게 진행되기 때문에 원자나 분자 단위에서 발생하는 현상은 볼 수 없다. 펄스파 XFEL을 이용하면 얼음이 순간적(~나노초)으로 녹고, 다시 결합하는 동역학적 현상을 관찰할 수 있다(Nat. Commun. 14, 3313 (2023)).

포항가속기연구소에도 2015년 세계에서 3번째로 XFEL을 건설하여 운영하고 있다. 2020년에 접어들면서 기존 3세대 방사광을 4세대 방사광으로 전환하거나, 신규로 건설하는 방사광가속기는 4세대 기술로 건설하는 흐름이 주를 이루고 있다. 4세대 방사광은 기존 3세대 방사광의 단점인 결맞음성을 획기적으로 개선하고 밝기를 100배 이상 향상해, XFEL에 견줄 만한 성능의 방사광을 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 이는 전자석으로 전자빔을 집속하는 기술을 획기적으로 개선하여, 3세대 방사광에서는 필연적으로 발생하는 수평 방향으로 전자빔이 퍼지는 현상을 최소화하여 점광원에 유사한 광원을 만듦으로써 가능해진다. 언급한 바와 같이, XFEL은 매우 밝은 엑스선 레이저로, 기초과학 분야에 매우 유용한 장치이지만, 원형 구조의 3, 4세대 방사광은 원주의 크기에 따라 엑스선의 발생 위치 또는 실험장치(빔라인)가 30~40개 정도로 많은 반면, 선형 구조를 갖는 XFEL은 엑스선이 발생하는 위치가 2~3개로 제한되어 쉽게 이용할 수 없다는 접근성에 한계가 있다. 우리나라에서도 2021년부터 한국기초과학연구원 주관으로 충북 오창에 4세대 방사광 가속기를 건설하는 프로젝트를 시작하였으며, 2028년 운영을 목표로 포항가속기연구소와 공동 건설을 진행하고 있다. 4세대 방사광이 완공되면, 우리나라는 전 세계에서 몇 안 되는 3, 4세대 방사광과 XFEL을 모두 보유한 나라로, 명실상부하게 엑스선 과학을 선도할 수 있는 토대가 마련될 것이라 볼 수 있다.

방사광의 발생 및 빔라인

방사광은 빛의 속도로 상대성 운동을 하는 가벼운 하전입자가 운동 방향에 대하여 횡방향으로 가속을 받으면 발생한다. 방사광 가속기의 주요 장치는 크게 세 부분으로 구성되며, 전자총 pre-injector, 선형가속기 linear accelerator, 저장링 SR : storage ring이 그것이다. 전자총에서 발생된 전자는 선형가속기 가속관을 지나고 고출력 고주파 발생장치를 통과하면서 빛의 속도에 가깝게 가속된다. 전자는 선형가속기 끝단에서 전송관 BTL : beam transfer line과 입사장치 injection system를 통해 저장링에 입사된다. 저장링에서는 전자가 2극 자기장(휨자석)을 지나면서 횡방향의 가속을 받아 궤도가 휘면서 방사광을 발생한다. 저장링은 전자의 궤도를 원형으로 만들어주고(횡방향의 가속을 담당) 궤도를 조절하는 전자석들과 초고진공의 환경을 제공하는 진공장치, 방사광의 방사로 잃은 에너지를 보충해 주는 고주파 공명장치 RF cavity 등과 각종 제어장치로 구성되어 있다. 저장링은 둘레길이가 281m인 원형에 가까운 전자 경로를 제공한다. 저장링에는 24개의 휨 전자석이 있는데 전자가 이 휨 전자석의 자장을 지날 때마다 15도씩 방향을 바꾸어 전체적으로 원형에 가까운 궤도를 연속적으로 돌게 된다. 저장링에는 휨전자석 이외에도 270개 가량의 4극, 6극 전자석과 궤도 수정 전자석이 들어 있어 전자빔을 매우 가늘게(수 마이크론) 집속하고 또 정해진 궤도를 정확히 마이크론 이내 유지하는 역할을 한다. 휨자석에 의해 발생한 방사광(가시광선, 극자외선, 엑스선뿐 아니라 알파선, 베타선, 감마선과 같은 방사선도 발생)은 빔라인으로 보내지며, 빔라인에서는 실험의 종류와 특성에 맞도록 단색화 장치(grating 또는 단결정)를 통해 특정 에너지의 엑스선을 추출하고, 집속 거울과 슬릿 등을 사용하여 빔을 집속하고 (10nm~100um) 재단하여 시료에 조사하게 된다.

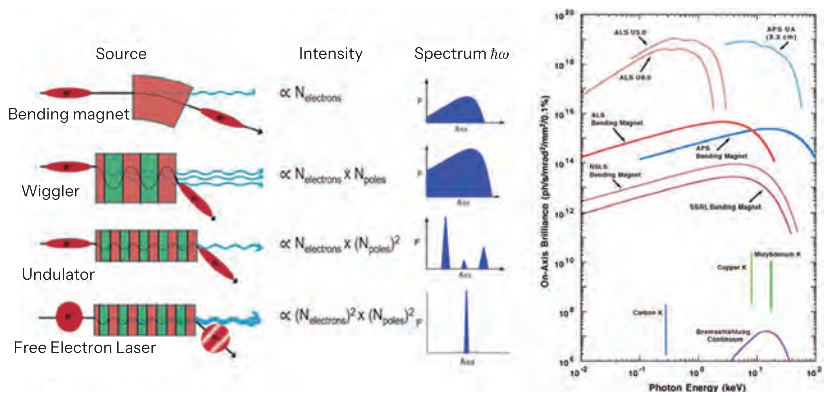


그림 5. (좌) 2세대 방사광원인 휨자석 광원과 3세대 방사광원인 위글러와 언듈레이터 광원, 자유전자 레이저 광원의 스펙트럼 특성과 (우) 방사광원의 에너지별 휘도 분포 ©John R. Helliwell, Nature Structural Biology 5, 614-617 (1998)

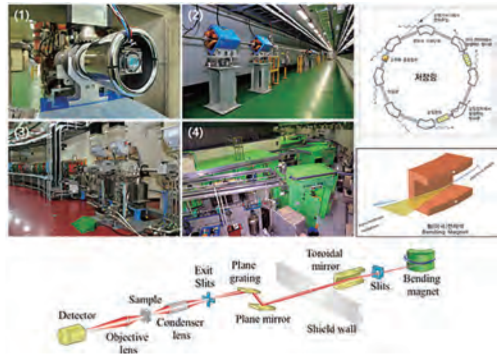


그림 6. 포항가속기연구소에 설치된 PLS-II 방사광 시설 사진. (1) 전자가 발생하는 전자총, (2) 빛의 속도로 가속되는 선형가속관, (3) 가속된 전자를 저장하는 저장링, (4) 발생된 방사광을 사용하는 빔라인 사진. (우) 저장링의 모식도 및 휨자석에 의해 전자가 가속될 때 발생하는 방사광. (아래) 휨자석에 의해 발생된 방사광이 여러 광학 장치를 통과하면서 시료에 조사되는 빔라인의 장치 개념도 예시 © 포항가속기연구소

그림 7. 포항 방사광가속기연구소 전경, 좌측에 선형길이 : 1.1km의 PAL-XFEL과 오른쪽에 원형 원주 : 281m의 3세대 방사광인 PLS-II 사진 © 포항가속기연구소

방사광원의 특성

전술한 바와 같이, 방사광은 빛의 속도에 근접하게 가속된 전자에 의해 발생하는 전자기파로, 높은 휘도, 넓은 스펙트럼, 좁은 발산 각도, 우수한 편광 특성을 갖는다. 방사광에서 말하는 빛의 휘도 brilliance는 1초 동안, 단위 면적에서 단위 각도로 발산하는, 일정 에너지를 갖는 광자의 개수로 표현된다. 브램슈탈룽 방사를 이용한 산업용 엑스선 발생장치의 경우 휘도는 $\sim 10^{8}$ 정도이지만, 3세대 방사광은 $\sim 10^{20}$, 4세대 방사광은 $\sim 10^{23}$, XFEL은 $\sim 10^{30}$ 정도로, 비교가 불가할 만큼 매우 밝다. 빛이 밝다, 즉, 광자가 많다는 의미는 앞서 언급한 초고속 영상뿐 아니라, 광자와 원자가 상호작용을 할 수 있는 확률이 높아진다는 뜻이며, 이는 곧 원자의 미세한 특성도 구분할 수 있다는 의미가 된다. 이렇듯 파장이 짧은, 높은 에너지의 광원을 이용한 실험에서 광원의 밝기는 매우 중요한 요소이며, 방사광원은 엑스선 광원 중에서 극한에 해당하는 것이라 할 수 있다.

또 하나의 중요한 특성 중 하나인 넓은 스펙트럼은, 원하는 하나의 파장의 빛을 선별적으로 사용할 수 있다는 뜻이며, 충분한 세기의 단색광을 시료에 조사할 수 있다. 이러한 가변 파장은 물질 내부의 원자 성분뿐 아니라, 원자 간 구조 분석을 가능케 한다. 일반적으로 사용하는 휨자석에 의해 발생되는 방사광은 수십 um 파장의 infrared에서부터 수백 nm 파장의 가시광선, 수 nm 파장의 극자외선, 수 Angstrom 파장의 엑스선에 이르기까지 대역폭이 매우 넓다.

빔의 발산각도는 광원의 중요한 사양 중의 하나이다. 브렘슈탈룽Bremsstrahlung 방사에 의해 발생한 엑스선의 발산각은 가속전자의 에너지에 의해 차이가 있으나, 일반적인 수백 kV 엑스선 발생장치인 경우, 발산각도는 30도degree 이상이다. 이에 비해 방사광 엑스선의 발산각은, 휨자석 광원의 경우는 ~0.5도(~10 mrad) 수준이며, 언듈레이터 광원의 발산각은 ~0.0005도(~10 urad) 정도이다. 참고로, 가장 안정적인 레이저 광원인 헬륨네온 레이저의 경우 발산각은 대략 0.05도(~1 mrad) 수준이다. 따라서 방사광에서 발생하는 엑스선은 레이저와 비슷한 수준으로 빔의 퍼짐이 발생하므로, 크기가 큰 빔이 필요할 경우나 매우 작은 빔이 필요한 경우 광원으로부터 거리를 충분히 두어야 한다. 예를 들어, 미국의 APS Advanced Photon Source 방사광 가속기의 ISNIn Situ Nanoprobe 빔라인의 경우, 20nm 크기의 엑스선 집속광을 만들기 위해 광원부터 시료 위치의 거리가 220m이다.

마지막으로 방사광 엑스선은 우수한 선형 편광 특성을 갖고 있다. 방사광을 발산하는 가속된 전자들의 진행 방향이, 전자석의 정렬된 방향에 의해 수평 방향으로만 떨림wiggle이 발생하기 때문이다. 특별히 디자인된 전자석을 사용할 경우, 원형 편광의 엑스선을 발생시킬 수도 있다. 이상과 같이, 방사광에서 발생하는 엑스선은 매우 우수한 광원 특성이 있어, 거의 모든 기초 및 응용과학 분야 연구에 활용되고 있으며, 우리나라의 유일한 포항 방사광 가속기에서는 매년 6천여 명의 연구자들이 방문하여 연구를 수행하고 있다.

엑스선 분석기술

방사광 엑스선은 다양한 종류의 시료에 대해 정교하고 광범위한 여러 가지 분석을 동시에 수행할 수 있다. 이러한 기술은 크게 회절 및 산란, 분광법 및 이미징의 세 가지로 나눌 수

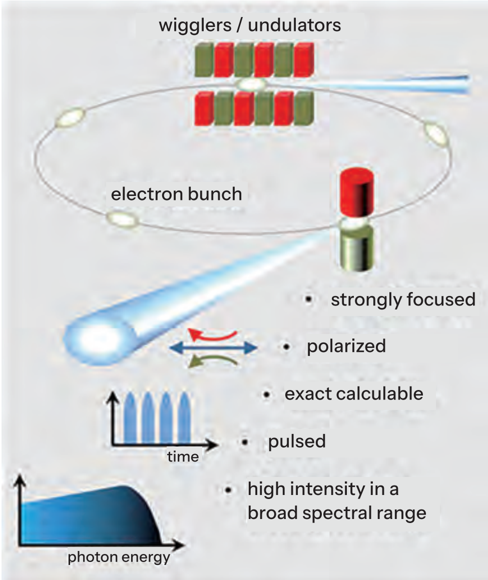


그림 8. —— 방사광원의 특성 : 집속빔, 우수한 편광, 펄스파, 높은 휘도, 넓은 스펙트럼 © www.helmholtz-berlin.de

있다. 가장 오래된 기술로 잘 확립된 분석기술 중 하나는 엑스선 회절이다. 엑스선이 결정crystal을 통과하면 결정을 구성하는 원자 평면의 규칙적인 배열에 의해 산란된다. 이렇게 산란된 엑스선은 특정한 위치에서 보강간섭으로 밝은 점 또는 선을 만들고, 이러한 일정한 밝은 빛 패턴을 분석하면 엑스선을 산란시킨 원자 구조를 역추적하여 재구성할 수 있다. 엑스선 회절은 광물, 세라믹, 바이오, 전자 및 자기 재료와 같은 화학 화합물 및 복합 재료의 구조를 살펴보는 데 유용하다. 이와 대조적으로 엑스선 산란은 결정구조가 확립되지 않은 시료 환경에서 대형 분자 조립체의 구조와 역학에 대한 다양한 통계적인 정보를 얻을 수 있으며, 유기체와 폴리머 및 콜로이드와 같은 많은 복잡한 재료의 구조를 분석하는데 활용된다. 또 다른 주요 기술은 엑스선 분광학으로, 이를 통해 시료의 원소 구성, 화학적 상태 및 물리적 특성을 분석할 수 있다. 엑스선 분광학은 조사하는 엑스선의 에너지 스캔을 통해 시료의 흡수, 반사율 또는 형광을 측정하여 분석하는 것이다. 일반적으로 엑스선은 높은 원자번호를 갖는 금속이 아니라면 투과율이 높다고 생각할 수 있다. 하지만 대부분의 원자는 엑스선을 흡수할 수 있는 특정한 전자 궤도가 존재하며, 이러한

원자마다 고유한 특징인 특정 에너지(흡수 엣지라고 함)에서 엑스선을 급격하게 흡수한다. 시료를 구성하는 원자에 따라 흡수 엣지가 다르며, 특정 원자의 전자상태에 따라서 흡수 스펙트럼도 다르게 나타나므로, 시료 내부의 특정 원자의 화학 상태(전자가수) 변화를 실시간으로 관찰할 수 있다. 이 기술은 이차전지 개발에서 중요한 양극재 연구에 필수적으로 활용되고 있으며, 우리나라 배터리 산업을 이끄는 중요한 요소 기술이다. 전통적인 엑스선 이미징은 시료에 엑스선을 조사했을 때, 시료에 의해 흡수된 엑스선과 투과된 엑스선의 차이를 2차원 영상으로 표현하는 기술로, 시료의 흡수도가 클수록 대비도contrast가 높은 영상을 얻을 수 있다. 이러한 투과된 영상은 시료 내부와 외부의 모든 형상(흡수물질)에 대한 정보를 포함하고 있으며, 충분히 많은 다른 각도에서 투과된 영상을 획득하고 푸리에 변환을 이용하면 3차원 영상을 재구성할 수 있다. 엑스선 영상을 제공하는 다른 기술로는 엑스선 렌즈를 사용하여 나노미터급 해상도를 얻을 수 있는 투과형 엑스선 현미경Transmission X-ray Microscopy, 수십 나노미터 크기의 매우 집속된 엑스선을 시료에 스캔하면서 투과된 영상을 얻는 스케닝 투과형 엑스선 현미경Scanning Transmission X-ray Microscopy, 결맞는 엑스선을 시료에 조사하여 발생한 결맞는 회절무늬를 이용하여 시료의 형상을 재구성하는 결맞음 회절 영상Coherent Diffraction Imaging 등이 있다.

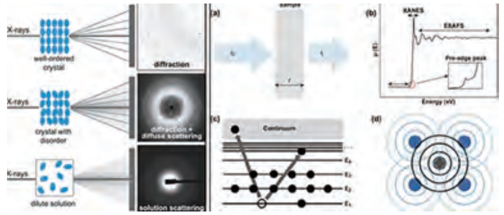


그림 9. —— (좌) 시료의 원자 구조에 따른 엑스선의 회절과 산란 신호 검출. 원자 구조의 결정성에 따라 다른 산란 신호를 나타낸다.
(우) 엑스선 흡수 분광법을 이용한 원자의 흡수 엣지 미세 구조 XANES 스펙트럼과 원자 간 간섭신호에 의한 확장된 흡수 엣지 미세 구조EXAFS 스펙트럼 © Chem. Rev. 117, 7615 (2017), Nano-Micro Letters 11, 47 (2019))

맺음말

본 연재물에서는 엑스선의 기초와 엑스선을 활용한 연구 분야에 대해 살펴봤으며, 방사광원이 제공하는 고급 사양의 엑스선과 이를 이용한 다양한 엑스선 분석기술에 대해 살펴보았다. 다음 연재물에서는 시료의 형상, 내부의 구조, 물질의 구성 원소, 원자의 전자 상태 등을 3차원 공간상에서 정밀하게 분석할 수 있는 엑스선 영상기법에 대해 깊이 있게 소개할 예정이다.

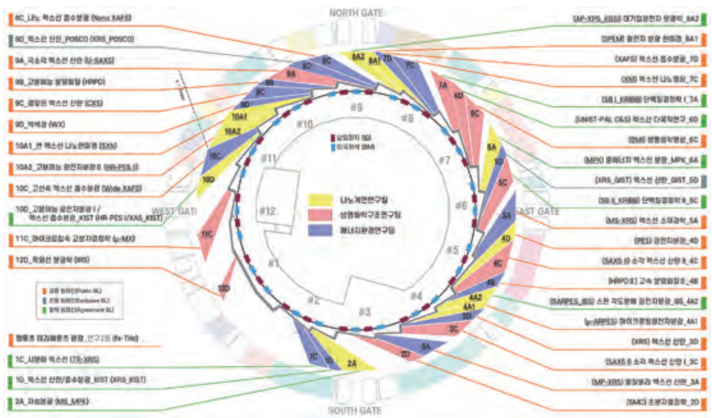


그림 10. —— 포항가속기연구소의 3세대 방사광 가속기인 PLS-II의 빔라인 36기 배치도 © 포항가속기연구소

Transdisciplinary

행복의 심리학 : 우리는 함께 행복할 수 있나?

글. 이윤형(영남대학교 심리학과 교수) 그림. gothic_jang

행복이란?

행복의 사전적 정의는 '생활에서 충분한 만족과 기쁨을 느끼어 흐뭇함 또는 그러한 상태' 혹은 '자신이 원하는 욕구와 욕망이 충족되어 만족하거나 즐거움과 여유로움을 느끼는 상태'이다. 또한 일부 심리학자들은 행복을 개인이 주관적으로 경험하는 긍정적 심리상태라고 정의하며 주관적 안녕감Subjective well-being이 행복의 핵심요소라고 제안하기도 한다. 진화 심리학의 관점에서는 인간도 다른 동물과 마찬가지로 배불리 먹기, 짝짓기, 보금자리 마련하기 등 생존과 종족 번영에 도움이 되는 활동을 경험하게 되면 행복을 느낀다고 제안하며, 행복을 주관적 안녕감이라기 보다는 특정한 사건들에 대한 경험의 결과로 본다.

이처럼 행복에 관한 사전적 정의도, 구체성이 있는 듯 모호한 개념이다. 사실 이것이 행복의 본질일 것이다. 계속 행복이란 무엇인가에 대해 고민하면서 우리 스스로를 불행하게 만들지는 말고, 행복과 관련이 깊은 것이 무엇인지에 대해 생각해보자.

2002년에 노벨 경제학상을 수상한 인지심리학자인 다니엘 카네만은 '행복은 경험보다는 경험에 대한 기억과 관련이 깊다'고 제안하였다. 즉, 행복은 우리가 무엇을 경험하는지가 아니라 우리가 했던 경험을 어떻게 기억하는지와 관련이 더 깊다는 것이다. 많은 경우에 행복한 경험과 행복한 기억은 일치한다. 일반적으로 좋은 사람들과 근사한 식당에서 밥을 먹은 경험은 그 순간에도 행복을 느끼게 해주며 추후에도 행복한 기억으로 남게 된다. 하지만 이후에 배탈이 난다든지, 식사를 함께 했던 사람들과 불편한 관계가 되면, 이 행복했던 경험이 더 이상 행복한 기억으로 남지 않고 화나는 경험 혹은 지우고 싶은 경험이 될 수 있다. 반면 밤새워 연구하고 논문을 작성하는 동안에는 힘들고 행복을 느끼지 못하지만, 연구결과가 나오고 논문이 출판된 후에 돌이켜 보면, 그 과정도 매우 보람되고 행복한 순간이었다고 기억할 수도 있다.

그렇다고 행복을 느끼는 데 경험보다는 기억이 더 중요하니, 우리 모두 정신 승리를 하자고 이야기하는 것은 아니다. 대체로 좋은 경험이 좋은 기억을 만든다. 그리고 무엇보다도 어떤 것을 기억하려면 먼저 경험이 있어야 한다. 즉, 향후에 나의 경험이 기억에 의해 변형될지라도 좋은 경험이 행복의 출발점인 것이다. 그렇다면 생존과 종족 번영에 도움이 되면서 우리에게 가장 많은 행복을 경험하게 하는 핵심적인 좋은 경험은 무엇일까?

사회적 동물의 행복

이와 관련된 놀랍고도 유명한 연구 결과가 『The good life』라는 책에 소개되어 있다. 이 책은 하버드 의대 성인발달 연구팀이 1938년부터 80년 넘게 724명의 참가자의 삶을 추적하여 연구한 내용을 소개하고 있다(너무나 바쁜 우리를 위해 이 프로젝트의 4번째 책임자이자 책의 저자인 Robert Waldinger 교수의 ted 특강이 있으니 이를 참고하는 것도 좋을 듯하다). 연구에 참여한 사람들 중 한 집단은

1938년 연구를 시작할 당시 하버드 재학생이었으며, 다른 집단은 같은 시기, 비슷한 나이의 보스턴 빈민가 지역의 사람들이었다. 연구진은 2년마다 설문, 인터뷰, 건강기록 수집 등 다양한 방법으로 사람들을 조사하였다. 연구에 참여한 사람들을 포함한 대부분의 사람은 부, 명예, 노력이 좋은 삶을 가져온다고 믿었으나, 연구결과 다른 사람들과 좋은 관계를 맺으려 하고, 실제로 좋은 관계를 맺은 사람들이 가장 행복한 삶을 누린다는 것을 발견하였다. 심지어, 다른 사람들과 좋은 관계를 맺은 사람들은 만성질환에 걸릴 확률도 낮고, 인지기능도 더 오래 잘 유지되었다. 즉, 긍정적인 관계를 맺으려고 적극적으로 노력하고 실제로 좋은 관계를 맺은 사람들이 가장 행복하고 건강한 삶을 살았다.

반면 사회적 배제나 거절을 당한 경험은 우리의 지각, 행동, 감정에 부정적인 영향을 미쳐 우리를 우울하고 불행하게 만든다. 예를 들어, 마음이 아프다는 표현처럼 이별을 경험하였을 때에도 신체의 일부를 다쳤을 때 활성화되는 뇌 부위인 배측 대상피질dorsal anterior cingulate cortex과 전측 섬엽anterior insula이 활성화된다(Eisenberger, 2012). 또한, '성격검사 결과, 당신은 살아가면서 점점 혼자가 될 것이다'라는 말을 들은 사람들은 그렇지 않은 사람들에 비해 충동적이고 위험한 선택을 하는 경향이 증가하였으며(wenge, Catanese, & Baumeister, 2002), 사회적 배제 상황을 상상하게 만들면 방의 온도를 더 춥게 지각하고, 공놀이를 할 때 한 사람한테만 공을 주지 않으면 그 사람은 추위를 느끼게 되어 이후에 더 따뜻한 음식이나 음료를 선택하게 된다(Zhong, & Leonardelli, 2008). 즉, 차가운 마음이 실제로 추위를 지각하게 만든다.

이러한 연구결과들은 다른 사람들과의 관계가 사회적 동물인 인간에게 얼마나 중요한 요인인지를 보여준다. 사실 우리는 아침에 일어나서부터 밤에 잠을 자기 전까지 많은 사람과 직간접적인 관계를 맺고 각자 다양한 역할을 하면서 살아간다. 연구실에서 혼자 연구에 몰두하는 사람이라고 혼자 살아가는 것이 아니며 같은 연구 분야의 연구자들뿐만 아니라 연구소 내에서 다양한 일을 하는 여러 사람과 관계를 맺으며 살아간다. 우리는 수많은 관계 속에서 다양한 목표를 갖고 여러 가지 역할을 하며 살아가고 있으며, 이러한 사회적 관계 속에서 나타나는 다양한 모습이 바로 그 사람을 만들어 가는 것이다. 따라서 관계는 행복을 넘어서 개인의 삶 자체에 매우 중요한 요인이다. 그렇다면 우리가 맺을 수 있는 이러한 관계들 중 가장 중요한 관계는 누구와의 관계일까? 가족? 친구? 직장 동료?

다른 이들과의 관계도 매우 중요하지만 나와의 관계는 내가 세상을 바라보고 다른 사람들과 상호작용하는 틀이다. 따라서 사회적 동물인 우리가 맺고 있는 관계 중 가장 중요한 관계는 바로 '나' 자신과의 관계이다. 나와의 좋은 관계가 모든 다른 사람과의 좋은 관계를 위한 시작점이 되므로 나에게 긍정적인 태도를 갖고 호감을 가져야 하며 남들이 나를

그림 1. Physical-social pain overlap, Eisenberger, N. I. (2012). *The pain of social disconnection: examining the shared neural underpinnings of physical and social pain*

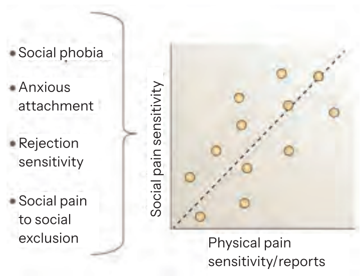


그림 2. Trait consequences, Eisenberger, N. I. (2012). *The pain of social disconnection: examining the shared neural underpinnings of physical and social pain*

그림 3. Example of the averaging procedure, Epley, N. & Whitchurch E. (2008). Mirror, mirror on the wall: Enhancementin self-recognition

이렇게 바라봤으면 좋겠다고 생각하는 바로 그 생각대로 내가 나 자신을 바라봐야 한다. 내가 나에 대해 긍정적인 태도를 가지면, 그 틀로 다른 사람들을 바라보게 되고, 다른 사람들과의 관계에서도 적극적이고 긍정적인 태도를 보일 가능성이 크다. 하지만 나에 대해 부정적인 태도를 가지고 있으면 타인과의 관계에서도 이러한 틀이 작동하여 알게 모르게 다른 사람들을 부정적으로 바라보거나 다른 사람들을 대할 때 부정적인 태도를 보일 수 있다. 이러한 태도는 상대방에게 내가 그 사람을 별로 좋아하지 않는다는 인상을 심어줄 수 있다. 우리는 나에게 호감을 느끼는 사람들에게 호감을 느끼고, 나를 부정적으로 바라보는 사람을 싫어한다.

따라서 좋은 관계를 맺는 첫걸음은 나 자신에 대해 호감을 갖는 것이다. 사실 우리는 이미 은연중에 나를 좋게 보는 경향이 있다. 실제 얼굴 사진과 이를 보정하여 실제에 비해 더 매력적이게 만든 사진들을 제시하고 본인과 친구의 실제 얼굴을 찾아보라고 한 결과, 대부분의 사람들이 친구의 얼굴은 보정하지 않은 실제의 사진을 정확하게 찾았지만, 자신의 얼굴은 더 매력적이게 보정한 얼굴을 실제의 얼굴이라 선택하는 경향이 컸다(Epley, & Whitchurch, 2008). 사진을 찍으면 친구들은 제대로 나오는데 자신만 잘 안 나오는 것처럼 생각되는 이유가 바로 여기에 있다. 하지만 굳이 눈을 씻고 적나라한 내 모습을 직시할 필요는 없다. 나의 착각은 우리의 자존감을 높이고 긍정적인 태도를 갖게 하여 다른 사람들과의 관계에도 도움이 된다. 우리 모두는 타고난 심리학자인 셈이다.

행복한 삶을 위해서 가장 중요한 것은 나와 좋은 관계를 맺는 것이라고 하였다. 일단 나와 좋은 관계를 맺고 나면 이제는 남과 좋은 관계를 맺을 차례다. 남과 좋은 관계를 맺기 위해서는 무엇이 필요할까?

사람 vs 상황

'자기 권리만 주장한다, 이기적이다, 예의를 모른다, 감각적으로 사물을 판단한다, 책임감이 부족하다'

누구를 지칭하는 말일까? 90년대 초 X세대라는 표현이 처음 등장했을 때 X세대의 특징을 설명하던 기사에서 빠지지

않고 등장하던 내용이다. 지금은 40대 후반부터 50대 초반의 나이가 되어버린 X세대가 현재의 젊은 사람들을 바라보는 모습과 매우 닮아 있다. 2020년에 실시한 교육 관련 모기관의 조사에 따르면, 70년대생 교사들(X세대)이 추구하는 직장생활의 핵심 키워드는 책임감인데 반해, 90년대생 교사들(MZ세대)의 키워드는 워라밸이라고 한다. 또한 70년대생들은 안정적인 수입으로 가족과 화목하게 사는 삶을 가장 바람직한 삶으로 바라보았지만, 90년대생과 00년대생은 좋아하는 일, 취미를 즐기면서 사는 삶을 가장 선호하였다. 이렇게 X세대와 MZ세대는 상당히 다르다. 그렇다면 이러한 차이는 어디에서 오는 것일까?

심리학에 기본적 귀인 오류fundamental attribution error라는 개념이 있다. '기본적'이라는 말이 붙을 정도로 매우 일반적인 현상으로, 어떤 것을 판단할 때 기본적으로 사람에게서 원인을 찾으려는 경향을 보인다는 것을 의미한다. 즉, 우리가 타인 행동을 판단할 때 그 원인이 될 수 있는 상황적 요인은 과소평가하고 개인의 특성에서 원인을 찾으려 하는 경향이 있다는 것이다. 상황은 여러 요소가 다양하게 얽혀 있는 경우가 많아서 그러한 모든 관계를 다 파악하는 것은 매우 복잡하고 어려운 일이다. 따라서 우리는 보다 손쉽게 상황보다는 사람에게서 원인을 찾으려 한다. 이는 세대 간의 차이에서도 마찬가지여서 세대 간의 차이를 가져올 수 있는 수많은 원인을 생각하기 보다는 사람들의 특성이 변한 것으로 생각하기 쉽다. 하지만 잘 알다시피 사람들은 잘 안 변한다.

70년대생 교사들은 학교 내에서 학년주임, 교과부장 등 책임 있는 위치에 있을 가능성이 크다. 따라서 이들에게 책임감이 핵심 키워드인 것은 어쩌면 당연하다. 반면, 결혼, 출산 등 개인의 인생사의 중요한 일들이 몰려 있는 시기인 90년대생 교사들의 경우에는 워라밸이 핵심 키워드인 것도 당연한 일이다. 기성세대는 회사와 같이 성장해가며 같이 부유해질 수 있는 기회가 많았다. 따라서 조직이 잘 돼야 내가 잘 된다는 생각으로 워라밸보다는 조직에 헌신하는 경향이 강했다. 경제적으로도 부동산 등 자산 가치 상승의 이익을 얻을 수 있는 기회가 많았다. 하지만 MZ세대의 경우 조직이 잘 되는 것은 좋은 일이지만, 많은 경우에 그것이 반드시 내가 잘 된다는 것을 의미하진 않는다. 또한 지나치게 오른 부동산 가격을 고려한다면 내 집 마련을 위한 저축보다는 취미를 즐기면서 사는 삶을 누리는 것이 현명한 선택일 가능성이 크다. 그렇다고 모든 MZ세대가 다 워라밸을 최고의 가치로 추구하는 것은 아니다. 판교 등지의 벤처기업에서 일하거나 동료들과 창업하여 회사를 키워나가는 수많은 MZ세대는 회사가 잘 되는 것이 내가 잘 되는 것이라 생각하고 워라밸을 무시한 채 일하고 있다. 나와 남이 다른 이유, 세대와 세대 간에 차이가 있는 이유는 사람이 달라서라기보다는 상황이 달라서이다. 따라서 상황에 대한 이해와 고려는 나와는 다른 남을 이해하기 위한 핵심이며 남과 좋은 관계를 맺기 위한 첫걸음이다.

함께 행복하려면?

나의 생각, 관점, 태도와 다른 사람들의 생각, 관점, 태도를 이해할 수 있는 능력을 마음이론Theory of Mind이라고 한다. 우리는 다양한 방식으로 다른 사람들의 내적 정신상태에 대해서 이해할 수 있다. 예를 들어 초콜릿이 담긴 상자를 바라보고 있는 아이를 보며 아이가 그것을 먹고 싶어할 것이라고 추론할 수 있으며, 앞에서 가고 있는 자동차가 차선 한 쪽으로 치우치며 속도를 올리기 시작하면 앞차의 운전자가 차선을 변경하여 추월하고자 한다고 짐작할 수 있다. 또한 병원 앞에서 울고 있는 사람을 보면 소중한 누군가 때문에 마음 아파하는 것이라고 생각하며 전혀 모르는 사람임에도 내 마음도 함께 촉촉해진다. 이러한 마음이론에 기반한 타인에 대한 이해와 공감은 사회 속에서 사람들이 서로에게 유대감을 느끼고 친사회적 행동을 하게 하는 원천이다. 즉, 함께 행복하기 위해서는 타인에 대한 이해와 공감이 필수적이다.

다른 사람에 대한 이해는 나와 다름을 인정하는 것에서 출발한다. 하지만 다름을 인정하는 것이 그리 쉬운 일은 아니다. 우리가 나와 다른 의견을 들으면 먼저 그 생각이 왜 잘못되었는지에 대해서 떠올리려고 하기 때문이다. 따라서 무언가 혹은 누군가에 대해 판단하기 전에 다음과 같이 한 번씩 고민해보자. 우리가 정말 다른 사람을 제대로 이해하고 있을까? 혹시 남과 내가 다른 경우에 상황보다는 개인 특성의 영향을 과대평가하고 있지는 않을까? 심지어는 나와는 다른 의견을 '틀린' 의견으로 여기고 있지는 않는가?

또한 공감을 다른 사람과 동일하게 생각하고 느끼는 것으로 착각하는 사람들이 많은데, 공감은 상당한 인지적, 정신적 에너지와 자원이 소모되는 쉽지 않은 일이다. 공감을 크게 3단계로 구분할 수 있는데 이 중 마지막 단계만이 진정한 공감이라고 할 수 있다. 가장 낮은 수준의 공감은 인지적 공감cognitive empathy으로 '네가 지금 무슨 생각을 하고 어떤 감정을 느끼는지 알겠어'와 같이 상대방의 마음에 대해 이해하는 것이다. 이 수준의 공감은 모두가 다 할 수 있지만 이해는 출발선일 뿐이다. 그 다음은 정서적 공감emotional empathy이라고 하는데, 이는 '네 마음을 잘 알겠어. 나도 너와 같은 마음이야'와 같이 상대방의 마음에 대한 이해를 넘어 나도 그와 같은 감정을 느끼는 것이다. 많은 사람이 정서적 공감을 진정한 의미의 공감이라 착각하는데, 사실 정서적 공감도 진정한 의미의 공감을 위한 필요조건일 뿐이다. 진정한 의미의 공감은 인지적 공감이나 정서적 공감을 넘어서는 공감적 관여empathic concern이다. 공감적 관여는 '네 마음을 잘 알겠어. 그리고 나도 너와 같은 마음이야. 그러니 함께 해결책을 찾아보자'와 같이 타인에 대한 단순한 이해나 타인과 같은 마음을 갖는 것을 넘어 그 상황에 나를 투영하여 문제를 함께 해결해 나가는 과정을 의미한다. 따라서 제대로 공감하는 것은 무척 어려운 일이다. 오히려 공감을 한다는 명목으로 과도한 관심을 보이거나 동정심을 갖게 되면 상대를 불편하게 만들 수 있으며, 한 사람에게 공감하기 위해 다른 사람을 상처 줄 수도 있다. 도움을 주기 위해 조언을 하는 경우가 많이 있는데, 이때에도 과연 이 사람이 조언이 필요한 상황인가, 이 사람이 조언을 구하고 있는가를 먼저 고려해야 한다. 필요한 상황에 적절한 수준으로 공감하지 않으면 공감은 잔소리나 귀찮은 간섭으로 여겨진다.

이 글에서 행복이 무엇인지를 설명하고자 할 의도는 전혀 없었다. 행복이 무엇인지는 사람마다 다르며 그것이 바로 행복의 본질이기 때문이다. 이 글에서 이야기하고 싶은 핵심은 행복과 좋은 관계가 밀접한 관계가 있으며, 사회적 동물인 인간이 행복에 이르는 길은 좋은 관계를 만들어 나가는 것에서부터 시작한다는 것이다. 행복에 이르기 위해 무엇보다도 나와 좋은 관계를 맺자. 나에게 호감을 갖는 것이 나와 좋은 관계를 맺는 가장 좋은 방법이다. 그리고 다른 사람들과도 좋은 관계를 맺도록 하자. 이를 위해서는 먼저 그 사람의 상황을 살펴보고 이해하자. 그리고 다름은 틀림이 아님을 인정하고 적절히 공감하자.

행복에 대한 착각

언제부터인지 모르게 도파민이 화두가 되고 있다. 도파민은 뇌 속 신경전달물질의 일종으로, 뇌의 복측피개, 측좌핵, 전전두 피질 등과 연결된 보상회로에 작동한다. 따라서 도파민이 분비되면 성취감, 쾌락, 흥분을 느끼게 된다. 행복도 이러한 보상회로와 무관하지 않다. 좋아하는 음식을 먹거나, 멋진 옷을 사거나, 가고 싶던 곳에 여행을 갔을 때, 혹은 뛰어난 연구 성과를 이루었을 때 도파민이 분비되는데 이때 우리는 행복감을 느낀다. 따라서 도파민을 분비시키는 활동을 하는 것을 행복을 추구하는 활동이라 착각하기도 한다.

사실 소셜 미디어 등에서 사용되는 도파민이라는 표현은 자극, 재미, 쾌락을 대신해서 지칭하는 말인 듯싶다. 사람들은 자극과 재미, 쾌락을 얻으려고 말하는 대신에 '도파민을 얻기 위해'라 표현하며 게임이나 쇼핑에 열중하기도 하고, 단 음식에 탐닉하거나 영상 시청에 몰두한다. 도파민이 화두가 된 것은 아마도 코로나를 거치면서 스마트폰의 사용이 급격히 증가하고 숏폼 형태의 콘텐츠가 유행하면서부터인 듯하다. 숏폼은 짧은 영상 콘텐츠로 긴 영상의 핵심적인 내용만을 짧게 요약하거나 잘라내 더 강한 자극으로 제공하는 것이다. 이렇게 지속적으로 강한 자극을 주는 영상을 보다 보면, 사람들은 더 이상 기승전결이 있는 일반적인 콘텐츠는 지루해서 못 보게 된다. 강렬한 자극이 반복적으로 들어와서 뇌가 높은 수준의 도파민에 익숙해져서 이제는 강렬한 자극이 일반적인 자극이 된 것이고, 훨씬 더 강렬한 자극을 받아야 하는 상황이 된 것이다.

하지만 기억할 것은 도파민 자체는 나쁜 것이 아니다. 도파민이 부족하면 파킨슨 병이 생길 수 있고, 다른 많은 질환도 도파민 분비의 이상과 관련이 있다고 알려져 있다. 우리가 힘껏 노력해서 성취를 이룰 때 분비되는 도파민은 결코 나쁘지 않다. 문제가 되는 것은 숏폼과 같은 것을 통해 빠르고 쉽게 얻어지는 도파민이다.

그렇다면 숏폼과 같은 빠르고 강한 자극을 추구하는 데서 벗어나고 일명 '도파민 디톡스'를 하려면 어떻게 해야 할까? 많은 사람이 의식적으로 스마트폰을 보지 않으려고 하거나 스크린 타임을 제한하고 알람 설정을 지우는 등의 방법을 선택한다. 하지만 이러한 방법은 실제로는 별로 효과적이지 않다. 이러한 방법은 모두 하고 싶은 것을 참도록 만드는데, 욕망을 참는 데는 상당한 의지를 필요로 하며 우리는 그렇게 의지가 강하지 못하다. 헬스장에서 연초에 회원 모집을 위해 파격 할인을 하는 것은 우리가 연초에는 열심히 운동을 하리라 결심하지만 실제로는 대부분 사람이 초반에만 오다가 만다는 것을 잘 알기 때문일 것이다. 사람들은 잘 안 변하고, 작심삼일이라는 말은 현대를 살아가는 우리에게 여전히 유효하다.

따라서 의지력으로 스마트폰을 멀리하려고 하기 보다는, 집중할 수 있는 다른 무언가를 찾는 것이 좋다. 가급적이면 다양한 곳에서 다양한 방식으로 도파민이 분비될 수 있도록 다양한 활동에 관심을 갖도록 하자. 운동이나 등산과 같이 힘은 들지만 도파민이 건강한 방식으로 분비되게 하는 활동을 한다면 더욱 좋다. 다만 유의할 것은 너무 열심히 하려고 하는 것이다. 운동은 좋지만 지나친 운동은 별로 좋지 않다. 때로는 심심해지는 것도 좋다. 가끔씩 심심한데 우울하거나 조바심 나지 않고, 오히려 편한 느낌을 갖는다면 그것도 좋다. 그리고 잘 자도록 하자. 잠자리에 들기 전에 스마트폰을 보는 것은 삼가도록 하자. 그리고 충분히 자도록 하자. 수면 부족에 시달리면서 행복할 수는 없다.

꼭 해야 할 것은 온라인이 아니라 오프라인에서 좋은 인간관계를 만들기 위해 노력하는 것이다. 이건 열심히 하자. 물론 온라인에서도 긴밀한 상호작용을 할 수 있지만, 실제로 만나서 형성하는 상호관계에 비할 바는 아니다. 그리고 오프라인에서 인간관계를 형성하는 것은 상당한 노력이 필요한 쉽지 않은 일이고 결과가 즉각적으로 보이지 않을 때가 많다. 하지만 두루두루 잘 지내는 좋은 관계보다 서로 믿고 의지할 수 있는 긴밀한 좋은 관계가 행복에 이르는 출발점이라는 것을 기억하자.

의지력으로 스마트폰을 멀리하려고 하기 보다는, 집중할 수 있는 다른 무언가를 찾는 것이 좋다. 가급적이면 다양한 곳에서 다양한 방식으로 도파민이 분비될 수 있도록 다양한 활동에 관심을 갖도록 하자.

참고문헌

1. Eisenberger, N. I. (2012). The neural bases of social pain: evidence for shared representations with physical pain. *Psychosomatic medicine*. 74(2),126-35.
2. Epley, N. & Whitchurch, E. (2008). Mirror, mirror on the wall: Enhancement in self-recognition. *Personality and social psychology bulletin*, 34(9),1159-70.
3. Zhong, CB, Leonardelli, G. J. (2008). Cold and lonely: does social exclusion literally feel cold? *Psychological science*, 19(9), 838-42.
4. Twenge, J. M., Catanese, K. R., & Baumeister, R. F. (2002). Social exclusion causes self-defeating behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, 83(3),606–615.

‘유사 과학자’ 리센코를 아십니까?

글. 이종식(포항공과대학교 인문사회학부 교수) 그림. 가수정

“트로핌 데니소비치 리센코Trofim Denisovich Lysenko, 1898~1976를 아십니까?” 마치 ‘도를 아십니까’를 연상시키는, 과학보다는 미신이나 사이비와 잘 어울릴 법한 이 질문은 어쩌면 리센코와는 잘 어울리는 말일지도 모르겠다. 그레고어 멘델Gregor Mendel, 1822~1884과 토머스 헌트 모건Thomas Hunt Morgan, 1866~1945으로 대표되는 고전유전학을 부정하던 그가 오늘날 과학사의 가장 대표적인 ‘유사 과학자pseudoscientist’로 기억되고 있다는 점을 감안한다면 말이다.

‘강철 원수’ 스탈린Joseph Stalin, 1879~1953의 절대적인 지지를 받아 한때 소련 과학계를 풍미했던 생명과학자 리센코는 어쩌다가 ‘과학의 적’으로 전락하고 말았을까? 그의 삶을 차분히 반추해 보자.

리센코는 누구이며 무엇을 했는가?

리센코는 식물학자였다. 1898년 우크라이나 폴타바Poltava의 농민 가정에서 태어난 그는, 젊은 시절 폴타바 원예연구소와 아제르바이잔의 간자Gandzha 식물육종장에서 식물학과 원예학을 배우고 연구했다. 비교적 초라한 이와 같은 배경과 이력은 그가 훗날 엘리트 과학자들에 대한 원한을 품게 되는 원인 가운데 하나가 되었다.

리센코의 초창기 연구 업적 가운데 가장 대표적인 것으로 춘화 처리법春化, the vernalization treatment과 식물의 상相 발달 이론the theory of phasic development of plants을 꼽을 수 있다. 춘화 처리법은 밀의 겨울 품종(비교적 따뜻한 초가을에 심어져 이듬해 여름에 수확)을 봄 품종(비교적 쌀쌀한 초봄에 파종하여 가을에 수확)으로 바꾸기 위한 그의 노력으로부터 비롯되었다. 리센코는 겨울밀을 봄밀처럼 재배할 수 있다면 더 많은 소련 농민이 혹독한 겨울과 춘궁기를 보다 안정적으로 살아낼 수 있으리라 기대했다. 그는 나름의 실험을 설계·수행한 끝에 발아하기 직전과 직후에 겨울밀을 인위적으로 낮은 온도에 노출시키면 그 생장 패턴을 마치 봄밀처럼 변화시킬 수 있다고 주장했다.

젊은 시절 폴타바 원예연구소와 아제르바이잔의 간자 식물육종장에서 식물학과 원예학을 배우고 연구했다. 비교적 초라한 이와 같은 배경과 이력은 그가 훗날 엘리트 과학자들에 대한 원한을 품게 되는 원인 가운데 하나가 되었다.

그림 1. ——— 1930년대 중반까지 세계적인 권위를 인정받았던 소련 유전학 연구의 퇴보에 결정적인 역할을 한 리센코의 성공과 몰락, 평가를 다룬 로렌 그레이엄의 저서, 『리센코의 망령』 © 도서출판 동아시아

식물의 상 발달 이론은 리센코가 춘화의 효과를 설명하기 위해 고안한 것이다. 그는 모든 식물 유기체는 환경과의 밀접한 관계 속에서 생장하는데, 그 생장 과정 전체는 유기체가 필요로 하는 상이한 환경적 조건을 중심으로 몇 개의 단계相 또는 phase로 구별된다고 분석했다. 예컨대 밀의 생장 초기에 온도라는 환경적 요인이 가장 중요한 단계가 위치한다. 그 이후에는 햇빛에의 노출이 핵심인 단계가 이어진다는 식이다. 춘화 처리는 온도가 관건인 식물 생장 단계에서 인간이 인위적으로 식물의 성질을 원하는 방향으로 개조하는 데 필요한 대표적인 기술이라는 것이 리센코의 입장이었다. 그의 연구가 시사하는 바는 인간의 노력을 통해 자연의 제약을 극복할 수 있으며, 인간의 편익을 위해 겨울밀을 타고난 속성과 달리 봄밀로 거듭나게 만들 수 있다는 것이다.

이후 리센코는 식물의 생장에 관한 자신의 일련의 연구를 일반화하여 동식물의 유전에 관한 체계적인 이론을 세우고자 분투했다. 달리 말하자면, 리센코는 스스로의 지위를 실용적인 식물학 연구자에서 이론 유전학자로 격상시키고자 했던 것이다. 리센코에 따르면, 모든 생명체의 유전은 언제나 유기체와 환경 사이의 물질적 상호관계에 의해 결정된다. 유기체가 여러 환경적 조건을 '내재화'함으로써 유전적 특징을 구성한다고 보았던 것이다. 이는 획득 형질의 유전설(한 유기체가 일생 동안 획득한 특성이 그 후손들에게 전해질 수 있다는 이론)과 맞닿아 있는 생각이었다. 바로 이 지점에서 리센코의 유전 이론은 오늘날 고전유전학classical genetics이라고 불리는 20세기 초 영미 과학계의 최신 유전 이론과 상충했다.

윌리엄 베이트슨William Bateson, 1861~1926과 모건 등이 멘델의 법칙을 재해석함으로써 개창한 고전유전학은 부모 개체로부터 물려받은 유전 물질은 환경을 비롯한 후천적 영향으로부터 독립적이며, 따라서 유전이란 유기체의 일생과는 무관하게 선천적으로 결정되는 과정이라는 설명을 선호했다(이 시기는 '유전자' 개념이나 DNA 이중나선 구조에 관한 지식이 확립되기 이전이었던 만큼 고전유전학의 입지가 오늘날 상상하는 것처럼 탄탄하지는 않았다). 리센코가 보기에 영미 유전학의 이러한 주장은 지나치게 '부르주아적'이고 '비생산적'이었다. 우월한 부모 개체로부터 우월한 자녀 개체가 태어나게끔 모든 것이 정해져 있다면, 환경과 후천적 조건을 아무리 힘써 개선하고자 하더라도 그러한 노력은 적어도 유전적으로는 아무런 소용이 없는 것이 되고 만다. 반면에 리센코의 주장처럼 유전적 과정이 환경이라는 변수의 영향을 상시적으로 받는 것이라면, 환경을 잘 조작하고 통제함으로써 동식물 유기체를 인간의 필요에 맞게 변화시키는 데 인간이 훨씬 더 큰 가능성을 발휘하리라 상정할 수 있다. 이러한 자연에 대한 인위적 가변성variability 또는 가소성plasticity의 전망이 리센코로 하여금 고전유전학을 거부하고 획득 형질의 유전설을 옹호하게 했던 것이다.

리센코는 출세욕에 조급했다. 1930년대 소련의 대기근을 해결할 과학자로 스스로를 우뚝 세우고 싶었다. 상기한 식물 육종학 및 유전 이론에 입각하여 리센코는 자신이 다양한 기후를 포괄하는 드넓은 소련의 국토 어디에서든 계절과 환경에 제약을 덜 받으며 더 넓은 재배면적에서 더 많은 생산량을 낼 수 있는 동식물종을 유전적으로 유도해낼 수 있다고 소리 높였다. 일거에 이 한미한 우크라이나 농민 출신 과학자에게 세간의 이목이 집중되었다. 1940년대에 이르러 그의 명성과 함께 비판도 고조되었다. 고전유전학의 발전 추세에 발맞춰 성장하던 소련의 유전학자들이 리센코의 이론을 반박했던 것이다. 공교롭게도 이들 가운데 다수는 제정 러시아 시대 이래 명문가 출신이었고 유럽 유수 대학에서 엘리트 교육을

받은 과학자들이었다. 리센코는 이들과 과학의 콜로세움에서 정정당당하게 논쟁을 벌이는 대신 편법을 택했다. 리센코는 소련의 비밀경찰에 자신과 척을 진 과학자들을 '반혁명분자'나 서방 세계와 연계된 간첩이라고 고발했다. 이렇게 니콜라이 바빌로프Nikolai Vavilov, 1887~1943, 세르게이 체트베리코프Sergei Chetverikov, 1880~1959, 테오도시우스 도브잔스키Theodosius Dobzhansky, 1900~1975, 게오르기 카르페첸코Georgi Karpechenko, 1899~1941, 니콜라이 콜초프Nikolai Kol'tsov, 1872~1940, 니콜라이 두비닌Nikolai Dubinin, 1907~1998 등 걸출한 유전학자들이 처형되거나 박해를 받았다. 리센코는 끝까지 이들의 피해와 죽음에 대한 책임을 직시하기보다 언제나 자신은 소련 과학계의 아웃사이더이자 약자였다는 피해의식으로 자신의 행위를 정당화했던 것으로 보인다. 리센코의 인정 욕구와 정치 투쟁이 낳은 이 비극(과학사학자들은 이를 '리센코 사건the Lysenko Affair'이라 부른다)은 결국 1948년 다름 아닌 스탈린의 공식적인 승인과 지지를 등에 업고 절정으로 치달았다.

리센코에 대한 오해

여기까지 살펴본 리센코의 행적만으로도 그를 '유사 과학자'나 '과학의 적'이라고 비난하는 것이 그리 지나치지 않은 일처럼 보일 수 있다. 감히 획득 형질의 유전설 같은 구닥다리 이론으로 고전유전학의 아성에 도전하다니 '불경'스럽기 그지없다고 생각하는 독자도 계시리라. 충분히 이해할 만한 반응이다. 다만 리센코에 대해 최종적인 평가를 내리기에 앞서, 짚고 넘어가면 좋을 그에 관한 흔한 오해 두 가지를 살펴보고 싶다. 규범적 단죄보다는 가능한 한 더 정확한 과학사적 이해를 추구하는 것이 학술적으로도 더 유의미할 것이다.

리센코는 끝까지 이들의 피해와 죽음에 대한 책임을 직시하기보다 언제나 자신은 소련 과학계의 아웃사이더이자 약자였다는 피해의식으로 자신의 행위를 정당화했던 것으로 보인다.

첫 번째 오해는 리센코가 고전유전학을 거부하고 획득 형질의 유전설을 지지했기 때문에 그의 유전 이론이 '잘못된' 과학이라는 인식이다. 이 대목에서 획득 형질의 유전설에 대한 우리의 통념을 환기할 필요가 있다. 우리가 흔히 알고 있는 상식은 획득 형질의 유전설이란, 곧 장 바티스트 라마르크Jean-Baptiste Lamarck, 1744~1829의 진화론을 뜻하며 이는 찰스 다윈Charles Darwin, 1809~1882에 의해 논파된 '틀린' 과학이라는 것이다. 그러나 이러한 도식은 엄밀한 과학사적 사실은 아니다. 획득 형질의 유전설은 유럽 지성사·과학사에서 2,000년 이상 보편적으로 유지되어 온 뿌리 깊은 사고방식이며, 라마르크 외에도 아리스토텔레스Aristotle, BCE 384~BCE 322, 안드레아스 베살리우스Andreas Vesalius, 1514~1564, 찰스 라이엘Charles Lyell, 1797~1875, 에른스트 헤켈Ernst Haeckel, 1834~1919, 이반 파블로프Ivan Pavlov, 1849~1936, 그리고 심지어 다윈 본인까지도 포함하여 수많은 과학자에 의해 폭넓게 수용되었던 가설이라고 보는 편이 더 타당하다. 긴 생명과학의 역사에 비춰볼 때, 획득 형질의 유전설을 명시적으로 부정했던 베이트슨과 모건 같은 1900년대 초 영미 고전유전학의 창시자들의 주장이 오히려 예외적인 것이었다. 리센코가 성장한 20세기 전반 러시아 과학계의 풍토에서 획득 형질의 유전설은 주류적 관점이었다고 보아도 무리는 아니다. 따라서 후대의 고전유전학의 성장과 성취를 소급 적용하여 리센코가 획득 형질의 유전설을 지지했다는 사실 자체를 비난하는 것은 적어도 과학사적으로 엄정하고 설득력 있는 판단은 아닐 수 있다.

그뿐만 아니라 후성유전학epigenetics이라는 현대 유전학의 (아직은 논쟁적인) 성과도 획득 형질의 유전설을 근거로 리센코를 비판하는 일을 복잡하게 만들고 있다. 후성유전학은 획득 형질의 유전에 준하는 효과가 분자생물학적으로 발생 가능한 일일 수도 있음을 시사한다. 다시 말해, 환경 등 후천적 경험이 유기체의 DNA 염기서열에 영향을 끼칠 수는 없지만, 일정한 메커니즘(대표적으로 DNA 메틸화)을 통해 특정 유전자를 활성화시키고 발현시키는 데는 작용할 수 있으며, 결과적으로 유전이라는 과정에 일정 정도 개입할 수도 있다는 것이 후성유전학의 함의인 것이다. 오늘날 푸틴 치하의 러시아에서는 후성유전학을 앞세워 리센코를 재평가해야 한다는 목소리가 고조되고 있다. 그의 유전 이론이 결코 틀리지 않았으며, 리센코는 미국과 서유럽 과학계의 반反러시아

그림 2. ——— 20세기 중반, 춘화처리법을 핵심으로 새로운 유전 이론을 주장한 트로핌 리센코. (왼) ©Wikimedia Commons, (오) ©도서출판 동아시아

정서에 의해 억울하게 평가절하된 '위대한' 과학자였다는 것이다. 이러한 러시아의 반응에 대해 소련 과학사의 거장 로렌 그레이엄Loren Graham, 1933~2024은 리센코의 이론리센코주의과 획득 형질의 유전설을 분리하여 이해해야 한다고 역설한다. 획득 형질의 유전설은 후성유전학의 발전에 힘입어 '옳은' 과학으로 판명될 가능성이 있다. 그러나 그럼에도 리센코의 과학은 '틀렸다'. 획득 형질의 유전설은 앞서 언급했듯 리센코만의 전유물도 아니었고, 리센코주의가 곧 획득 형질의 유전론인 것도 아니기 때문이다. 그레이엄은 리센코가 획득 형질의 유전설을 받아들인 것이 문제가 아니라, 그가 획득 형질의 유전설을 토대로 수행했던 실험과 이론적 작업이 표준적인 과학의 방법론(엄정한 기록관리와 통계 작성, 재현 가능성 확보, 연구 절차의 투명성 제고, 유리한 결과와 불리한 결과를 모두 보고하는 것 등)을 밑돌았다는 점이 진정한 문제였다고 강조한다. 일례로 그레이엄은 리센코의 그 유명한 춘화 처리 실험조차 표본으로 겨우 겨울밀 두 포기를 사용했을 뿐이며, 제대로 된 통계 기록이나 대조군 설정도 없이 엉성하게 수행되었음을 밝힌 바 있다. 리센코가 '유사 과학자'였다고 할지라도, 그 이유가 순전히 획득 형질의 유전설 때문만은 아니었던 것이다.

리센코에 대한 두 번째 오해는 그가 우생학eugenics에 연루되었기 때문에 '가짜'라는 점이다. 이는 사실이 아니다. 리센코는 유전에 대한 자신의 이론을 철저히 동식물에만 적용했으며 결코 인간과 관련 짓지 않았다. 1920년대에 획득 형질의 유전설을 바탕으로 사회주의 혁명이 인간의 유전적 진보에 도움이 될 것이라는 주장을 전개한 과학자가 존재하기는 했다. 오스트리아 출생의 파울 캄머러Paul Kammerer, 1880~1926가 바로 그 주인공이다. 1920년대에 캄머러는 소련의 혁명 사회가 교육·위생 등을 극적으로 개선함으로써 그 인민들을 유전적으로 고양시킬 수 있다는 우생학적 견해를 펼쳤다. 그러나 1930년대에 나치 독일의 우생학이 극단화됨에 따라, 소련공산당은 유전에 관한 일체의 생명과학 이론을 인간에 적용하는 것을 금지시켰다. 소련공산당이 이러한 판단을 내린 데에는 나치 우생학의 폐해에 대한 경각심도 주요했지만, 무엇보다도 인간과 인간 사회를 설명하는 가장 적절한 '과학'은 생물학을 포함하는 자연과학이 아니라 마르크스주의 정치경제학이라는 이데올로기적 확신이 자리 잡고 있었다. 리센코는 소련공산당의 이러한 교리를 충실히 받들었다. 그는 자신의 유전 이론을 인간에 적용하기는커녕, 오히려 정적들을 비난하고 공격할 때 그들이 우생학적 연구를 수행한다는 혐의를 제기하고는 했다. 리센코의 흥기는 인간 유전에 대한 후천적 개선·개조 가능성의 전망과는 무관했다.

리센코의 이름을 어떻게 평가하고 기억할 것인가

리센코는 아마도 '유사 과학자'가 맞을 것이다. 그렇게 비판받아 마땅한 삶을 살았던 부정한 과학자였다. 다만 많은 사람이 과학사 속의 이 '빌런'을 성찰 없이 너무 쉽게 소비해 버리는 경향이 있는 것 같다. 리센코를 '유사 과학자'로 낙인 찍기 전에, 왜 그에게 그러한 역사의 단죄가 내려졌는지 더 정확하고 다채롭게 이해하려는 노력과 기꺼움이 우리를 더 '과학적인' 개인으로 만들어 줄 수 있다는 것이 필자의 생각이다. 리센코는 단순히 과학을 공산주의 정치 이데올로기와 엮었기 때문에 '가짜'인 것이 아니었다. 그는 자신의 불우한 계급 배경에서 비롯된 원한 의식에 잠식된 채 다른 과학자들과의 학문적 논쟁이라는 정공법 대신 다른 부정한 방법으로 상대의 위신, 경력, 목숨에 해를 가했기에 '가짜'인 것이다(이런 일은 사회주의·공산주의와 무관하게 자본주의 사회의 과학계에도 언제든 일어날 수 있다). 리센코가 그저 획득 형질의 유전설을 수용했기 때문에 '가짜'인 것이 아니다. 그의 주장과 결론이 타당한지 여부에 앞서, 그가 연구 과정에서 과학적 방법론에 대한 헌신을 보이지 않았기에 '가짜'인 것이다.

끝으로 이 글을 계기로 리센코의 이름을 둘러싼 여러 갈래의 과학사에 관심이 생긴 독자를 위해 한 가지 유의하면 도움이 될 만한 점을 정리해 보자. 우리는 리센코라는 개인, '리센코 사건', '전 지구적 리센코 현상the global Lysenko phenomenon'을 구별할 필요가 있다. 리센코 개인에 대한 우리의 이해와 평가는 주로 그의 과학적 작업과 생애를 대상으로 하는 것이다. 이 글은 바로 이 층위에 초점을 맞췄다. 한편, 리센코 사건에 대한 관심은 1930~1940년대 전후 스탈린 시대 소련 과학계의 역사적 맥락 속에서 과학과 정치의 교차를 다각도로 비판하는 작업과 직결된다. 이는 제정 러시아 시대 이래 러시아 과학사, 소련의 전문 과학 기구 및 제도의 역사, 스탈린의 과학철학, 사회주의 과학사·과학철학 전반을 망라하는 훨씬 더 정교하고 폭넓은 공부를 요한다. 여기서 한층 더 나아가, 전 지구적 리센코 현상에 대한 연구는 소련의 국경마저 초월한다. 리센코의 이론은 20세기 중엽 북한, 중국, 북베트남, 동독, 쿠바 등 다양한 사회주의권 국가로 수출되어 식물학, 유전학, 농정農政에 지대한 영향을 끼쳤다. 그런데 이 국가들에서 리센코주의의 정의, 함의, 효과는 때때로 소련에서의 그것과 동일하지 않았다. 예컨대 필자는 중국과 북베트남에서 '리센코주의'라는 개념이 리센코만의 유전 이론을 좁게 뜻하기보다는 바실리 윌리엄스Vasili Williams, 1863~1939라는 소련 과학자의 토양학과 긴밀히 결합된 형태로 뿌리내렸다는 점을 밝힌 바 있다. 오늘날 과학사학계가 점점 더 서양중심주의Western-centrism에서 벗어나 지구화globalization되고 있는 추세를 고려할 때, 향후 우리가 리센코라는 이름과 관련하여 어떤 새로운 사실과 통찰을 접하게 된다면, 그것은 전 지구적 리센코 현상에 관하여 축적된 연구 성과들로부터 비롯될 공산이 크다.

참고문헌

1. 로렌 그레이엄 저, 이종식 역, 『리센코의 망령: 소비에트 유전학의 굴곡진 역사』, 동아시아, 2021.
2. William deJong-Lambert, Nikolai Krementsov, eds., *The Lysenko Controversy as a Global Phenomenon: Genetics and Agriculture in the Soviet Union and Beyond, Vol. 1 and 2* (New York: Palgrave Macmillan, 2017).
3. Richard Levins and Richard Lewontin, *The Dialectical Biologist* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1985).
4. Jongsik Christian Yi, "Dialectical Materialism Serves Voluntarist Productivism: The Epistemic Foundation of Lysenkoism in Socialist China and North Vietnam," *Journal of the History of Biology*, Vol. 54, No. 3 (September 2021), pp. 513~539.

Transdisciplinary

빅뱅에서 인간까지[11] : 인류의 역사 3부

글. 김향배(한양대학교 물리학과 교수) **그림.** 메이우드

그림 1. 호모 에렉투스와 호모 네안데르탈렌시스의 아프리카와 유라시아 대륙 진출 범위, 호모 사피엔스의 전 세계 진출 방향과 시기(호모 사피엔스의 진출은 남쪽경로설과 북쪽경로설이 있는데, 이 그림에는 북쪽경로설이 반영돼 있다). ©Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spreading_homo_sapiens_ru.svg

인류, 지구를 정복하다

호모 속 인류가 고향인 아프리카를 벗어나 유라시아 대륙으로 진출한 시기는 200만 년 전쯤까지 거슬러 올라간다. 중국 상첸에서 호모 하빌리스가 만든 것으로 추정되는 120만 년 전쯤의 석기가 발견됐고, 조지아 드미니시에서 180만 년 전쯤의 초기 호모 에렉투스로 추정되는 유골이 발견됐다. 하지만 본격적인 진출은 140만 년 전쯤에 아슐리안 석기를 갖춘 호모 에렉투스에 의해 이루어졌다. 100만 년 전쯤까지 호모 에렉투스는 북위 50도 아래의 유라시아 대륙 곳곳에 퍼져 나갔다. 이즈음 동남아시아 해변에 도달한 호모 에렉투스는 낚시와 항해 능력을 갖추기 시작했고, 이에 힘입어 섬 사이에 흐르는 강한 조류를 극복하고 인도네시아의 섬들을 정복해 나갔다. 호모 에렉투스의 뒤를 이어 호모 하이델베르겐시스도 80만 년 전쯤에 유라시아 대륙에 진출했는데, 호모 에렉투스보다 뛰어난 적응력을 발휘하며 유라시아 대륙 구석구석에 퍼져 나갔다. 50만 년 전 전후에 현지에 적응한 호모 하이델베르겐시스로부터 유럽에서는 호모 네안데르탈렌시스가, 아시아에서는 호모 데니소바가 분기했다. 유라시아 대륙에 퍼져 나갔던 여러 인류 종은 호모 사피엔스가 유라시아 대륙에 진출하기 전까지는 지역을 나누어 공존했던 것으로 보인다.

역시 아프리카가 고향인 호모 사피엔스는 이른 추정치에 의하면 27만 년 전쯤부터 시작해서 여러 차례에 걸쳐 아프리카를 벗어나 유라시아 대륙으로 진출을 시도했다. 21.5만 년 전쯤에 그리스에 도착한 흔적이 있으며, 13만에서 11.5만 년 전쯤 사이에는 북아프리카와 아라비아반도를 거쳐 소아시아로 진출했으며, 8만 년 전쯤에 중국까지 도달한 흔적이 있다. 하지만 초기에 진출했던 호모 사피엔스는 모두 멸종했거나 일부만 살아남아 아프리카로 귀환했던 것으로 보인다. 먼저 진출해 자리를 잡고 있었던 다른 호모 속 인류와 경쟁에서 밀렸거나 현지 적응에 실패했기 때문으로 추정된다. 결정적인 판도 변화는 7만에서 5만 년 전 사이에 소위 '남쪽 경로'를 통해 아프리카를 나갔던 호모 사피엔스 무리의 이주로 일어났으며, 이들은 현재 비아프리카 지역에 있는 모든 인류의 조상이 됐다. 동아프리카와 아라비아반도를 잇는 남쪽 경로가 선택된 이유로는, 레반트 지역을 지나는 '북쪽 경로'에는 네안데르탈인이 이미 자리를 잡고 있었고 그들과의 경쟁이 쉽지 않았기 때문으로 보인다. 호모 사피엔스의 본격적인 유라시아 대륙 진출 시기는 소위 '인지 혁명'이

일어난 시기와 겹친다. 이 시기에 호모 사피엔스는 이전보다 월등한 적응력을 갖추게 됐으며, 그 결과 이전의 진출과는 양상이 사뭇 달랐다. 먼저 진출해 있던 호모 속 인류와 경쟁해서 빠른 속도로 이들을 밀어냈고, 호모 에렉투스나 호모 하이델베르겐시스는 진출하지 못했던 호주 대륙과 아메리카 대륙에도 진출했다. 호주에는 6.5만에서 5만 년 전 사이에 도착했는데, 인도네시아 섬과 호주 대륙 사이의 거리를 고려하면, 이들이 배를 제작하고 대양을 항해할 능력을 갖추었음을 추정할 수 있다. 아메리카 대륙으로의 진출은 당시에는 빙하기로 인해 해수면이 낮아서 육지로 이어져 있던 베링 해협을 통해서 이루어졌는데, 이는 호모 사피엔스가 훨씬 고위도 지역의 추위도 극복할 수 있었음을 말해준다.

동물 종이 집단으로 이주하는 주요 요인은 생태환경 변화와 개체수 증가다. 호모 속 인류가 유라시아 대륙으로 이주한 이유도 크게 다르지 않았다. 기후변화와 인구 증가라는 요인이 발생하고 인류의 향상된 적응력이 이를 가능케 했다. 한 서식지의 먹잇감을 감당할 수 있는 개체의 수는 유한하다. 온난한 기후가 유지되는 동안 개체수가 한계 이상으로 늘어나면 이주 압력이 발생한다. 온난한 기후로 초원이 북쪽으로 확대돼서 이동 경로가 형성된다. 온난한 기후가 한랭한 기후로 전환되는 시기에는 인구는 늘어난 상태지만 먹잇감은 전반적으로 감소해 이주 압력은 더욱 높아진다. 서식지 이주가 생존과 번식에 무조건 유리하지는 않다. 적응력이 부족하면 이주는 멸종의 길이 된다. 반면 적응력을 갖춘 집단은 더 강한 집단으로 성장하고, 가끔은 원래 서식지로 회귀해 기존의 집단을 몰아내기도 한다. 이런 과정이 인류를 더욱 적응력이 높은 종으로 진화하게 했을 것이다. 기후변화에 따른 사냥감의 이동을 따라 인류도 같이 이주했다는 주장도 있으나, 사냥감의 이동과 호모 에렉투스의 이동이 시기적으로 일치하지 않는다는 반론이 있다. 왜 굳이 추운 지역으로까지 이주했는지 의문이 들 수도 있다. 하지만 추운 지역으로 이주가 장점도 있다는 주장이 있다. 아프리카에는 동물에서 기원한 전염병이 많고, 이것이 인류의 생존에도 큰 영향이 있는데, 추운 지역에서는 전염병이 줄어들어 인구 증가를 제한하는 한 요소가 사라진다는 점이다. 호모 에렉투스의 적응력이 향상된 데는 커진 몸과 길어진 다리도 한몫했다. 커진 몸은 추위에 유리하고 길어진 다리는 오래 걷는 데 유리하다.

호모 사피엔스의 주요 이주 시기는 극심한 기후변화 시기와 맞물려 있다. 13.5만 년 전 적도 아프리카에 극심한 가뭄이 있었다. 10만 년 전후에는 한랭기로 인해 호모 사피엔스 전체 인구가 수천 명 수준으로 떨어지며 멸종 위기까지 내몰렸다. 이런 사실은 미토콘드리아 DNA를 추적해서 밝혀졌다. 현생 인류는 이때 살아남은 소수 집단의 후손이며, 그로 인해서 현생 인류의 유전자 다양성은 총 개체수가 수천만에 불과한 침팬지의 유전자 다양성보다도 작다. 7.7만에서 6.9만 년 전 사이에는 인도네시아 토바 화산의 폭발이 있었고, 극심한 기후변화가 있었다. 비아프리카의 현생 인류는 이 시기 전후에 유라시아 대륙으로 진출한 소수 집단의 후손이며, 그로 인해서 아프리카 주민의 유전적 다양성이 나머지 세계 주민의 유전적 다양성보다 훨씬 크다. 멸종 위기를 넘기고 다양한 환경에 적응하면서 살아남은 호모 사피엔스는 강력한 경쟁력을 갖추게 됐다. 강한 자가 살아남는 것이 아니라 살아남은 자가 강한 것이다.

호모 사피엔스가 출현한 시기 전후에는 호모 에렉투스, 호모 하이델베르겐시스, 호모 플로레시엔시스, 네안데르탈인, 데니소바인 등이 아프리카와 유라시아에 공존하고 있었다. 하지만 호모 사피엔스가 곳곳으로 퍼져 나가면서 다 멸종하고 호모 사피엔스만 살아남았다. 현생 인류 계통을 제외한 다른 인류 종이 모두 멸종한 원인으로는, 기후변화로 인해 혹독해진 환경과 같은 지역에서 공존하게 된 호모 사피엔스와의 접촉, 이에 따른 경쟁 등이 거론되고 있다. 네안데르탈인의 경우를 보면 유럽에 진출한 호모 사피엔스와 접촉이 있었고 상호교배를 통해 유전자 교환도 이루어졌다. 이들은 주거지와 먹잇감을 두고 경쟁 관계에 있었을 수 있으며, 그것이 네안데르탈인의 멸종을 초래했을 수도 있다. 다른 가능성으로, 접촉을 통한 전염병에 의해 멸종됐을 수도 있는데, 신대륙에 도착한 유럽인이 함께 가져온 전염병에 의해 멸종에 이른 북아메리카 대륙 원주민의 원시 판이라 할 수 있다. 멸종 시기를 전후해서 네안데르탈인이 북위 50도 지역까지 진출한 흔적은 호모 사피엔스와의 경쟁으로 인해 더 혹독한 환경으로 밀려난 끝에 멸종했을 가능성을 시사한다. 아시아의 데니소바인도 네안데르탈인과 마찬가지로 이 지역으로 진출한 호모 사피엔스와 상호교배를 통한 유전자 교환이 있었으며, 이들과의 경쟁에서 밀려 멸종했을 가능성이 크다.

그림 2. 이러한 동굴 벽화는 인지혁명 이후 호모 사피엔스가 상징과 예술을 표현할 수 있는 새로운 사고 능력을 갖추었음을 보여준다.

호모 사피엔스의 전 세계 진출은 다른 인류 종뿐만 아니라 이들의 먹잇감이 되는 많은 대형 포유류 종에도 재앙이 됐다. 인류가 집단 협력을 통해 너무 빠르게 최상위 포식자로 올라서는 바람에 천적이 생겨날 시간적 틈이 없었다. 기후변화에 의한 멸종의 위기를 넘기고 나자 호모 사피엔스는 곧바로 인구를 회복했으며, 천적에 의한 인구증가 통제가 이루어지지 않아 빠르게 인구가 증가해서 전 세계로 퍼져 나갔다. 흥미롭게도 호모 사피엔스의 호주 대륙 진출 시기와 아메리카 대륙 진출 시기는 각각 이들 대륙에서 진화했던 대형 포유류나 조류 고유종의 멸종 시기와 일치한다. 인류 때문이 아니라 기후변화의 영향으로 이들이 멸종했다는 설도 제기되긴 했지만, 오랜 기간 인류와 공존하며 적응했던 아프리카와 유라시아의 대형 포유류와 달리 이들은 새로 유입된 호모 사피엔스에 적응이 되어 있지 않아서 쉬운 먹잇감이 됐기에 멸종했다는 설명이 유력하다. 농경이 시작된 이후에는 천적이 없는 호모 사피엔스의 급격한 번성은 많은 육지 생물의 서식지를 빼앗음으로써 그들에게 큰 위협이 됐고, 이는 앞으로 더 심화할 것으로 보인다. 호모 사피엔스만 살아남아 지구를 정복할 수 있게 된 결정적인 이유는 무엇일까?

인류, 인지 혁명이 일어나다

인류 계통의 뇌는 지난 200만 년 동안 3배 커졌고, 지능 향상에 의한 행동 적응을 통해 인류는 혹독한 빙하기에도 생존과 번식을 이어갈 수 있었다. 하지만 서로 분기한 지 오래 되지 않았고 뇌 용량도 크게 다르지 않았던 네안데르탈인, 데니소바인과 현생 인류 사이에는 지능과 그에 따른 행동에 어떤 차이가 있었기에 이들의 운명이 달라졌을까? 뇌의 크기는 남겨진 머리뼈의 크기를 통해 알 수 있지만, 지능과 행동 변화는 그들이 남긴 유물과 유적을 통해 간접적으로 유추할 수 있을 뿐이다. 하지만 다행히 여기에도 결정적인 단서가 있다. 호모 사피엔스가 남긴 도구, 무덤 부장품, 동굴 벽화 등을 살펴보면 7만 년 전쯤을 전후로 혁신적인 변화가 생겼음이 관찰된다. 기술적인 면에서 접착제를 발명해서 창과 도끼 제작에 활용함으로써 사냥 무기는 더욱 정교해졌고, 배 제작술과 항해술을 축적해 해양을 건넜으며, 바늘을 발명해서 가죽과 모피가 복합된 옷, 신발, 텐트를 제작함으로써 추운 지역에 정착하는 데 성공할 수 있었다. 동굴 벽화에도 물감을 제조해서 채색하는 기술적인 면뿐만 아니라, 내용에서도 예술적인 면과 주술적인 면 모두에서 표현의 진전이 보인다. 이는 인류의 인지 능력에 중대한 변화가 일어났음을 암시한다. 몸은 인간이지만 머리는 사자인 조각품은 인간이 허구적인 대상을 상상할 수 있음을 보여주며, 사체와 같이 묻힌 화려한 부장품은 사후세계에 대한 인식이 생겼음을 보여준다. 멀리 떨어진 집단 사이에도 교역이 있었다는 증거도 등장하는데, 교역의 흔적이 발견되지 않는 네안데르탈인과 대비된다. 이는 친족이나 이웃 집단을 넘어, 모르는 타인과도 협력할 수 있다는 점에서 인간 사회가 규모가 커진 복잡한 사회로 바뀌어 가는 전조였다.

이 변화에 대해 대립하는 두 가지 해석이 있다. 하나는 이 시기쯤에 두뇌의 작동에 관련된 유전자 변이가 발생했고, 이것이 소위 '인지 혁명'이라 불리는 인간의 인지 능력과 추상적 그리고 상징적 사고 등에서 큰 향상을 불러왔다는 것이다. 이는 현생 인류가 신체적으로(해부학적으로) 현대인이 된 시기와 정신적으로(행동학적으로) 현대인이 된 시기가 다르다는 주장이다. 1970년대에는 유럽에서 발견된 여러 유적을 근거로 인지 혁명이 4만 년 전 유럽에서 일어났다는 주장이 일반적으로 받아들여졌다. 하지만 아프리카에서 시기적으로 앞선 비슷한 수준의 유적들이 발견되고 인류의 아프리카 기원설이 공고해지면서, 더 이른 시기에 현생 인류 전체에 일어난 것으로 받아들여지고 있다. 다만 이 주장의 결정적인 근거가 될 유전자 변이가 무엇인지는 아직 분명

하지 않다. 다른 하나는 인간의 인지 능력 향상은 점진적으로 진행됐는데, 단지 7만에서 3만 년 전 사이에 폭발적으로 발현되기 시작했다는 주장이다. 하필 이 시기에 발현된 이유는 인구 성장과 이에 따른 축적 효과, 교류의 증가 등 사회적 요인이 작용했기 때문으로 본다. 다수의 학자는 인지 혁명이 호모 사피엔스의 출현과 같이 일어났다고 믿는다. 아프리카에서 발견된 호모 사피엔스의 유적들을 통해서 볼 때 이런 변화는 7만 년 전 이전부터 있었고, 단지 수렵채집을 하는 작은 규모의 집단에서는 향상된 인지 능력이 발휘될 필요나 기회가 부족했다는 것이다. 이와 비슷한 상황을 생명의 진화에서도 볼 수 있다. 후기의 진핵세포에는 다세포 생물에 필요한 여러 기능에 관련된 유전자가 이미 존재했지만, 단세포로 지내는 동안 그 기능이 발현될 기회가 없다가 다세포 생물이 출현하면서 발현되기 시작했다.

인지 혁명은 집단 협력의 규모를 키우고 유연하게 만들었다. 그것을 통해 이룬 가장 중요한 성취는 집단학습과 문화의 축적이었다. 이것을 가능하게 만든 여러 요인 중 핵심은 상징 언어를 사용하고 허구를 상상하고 믿는 등 인지 혁명을 통해 인류가 새롭게 획득한 인지 능력이다. 많은 동물이 낮은 수준이긴 하지만 언어를 사용하고, 돌고래, 코끼리, 침팬지 등은 상당한 수준의 언어를 사용한다. 네안데르탈인과 데니소바인은 높은 수준의 언어를 사용했을 것으로 짐작된다. 호모 사피엔스가 사용한 상징 언어가 이들의 언어와 다른 점은 다양한 조합이 가능해 우리가 외부로부터 들어오는 정보뿐만 아니라 내부로부터 나오는 정보도 자세하고 정교하게 표현할 수 있다는 점이다. 상징 언어의 발달은 인간의 의사소통, 특히 교수와 학습 능력을 끌어올려 문화와 지식의 축적이 일어나게 했다. 이는 허구를 믿는 능력과 결합하여 문화의 확산뿐만 아니라 유대감의 확산을 일으켜 집단 협력의 규모를 키웠다. 물론 이런 변화의 배경에는 인구의 증가와 집단 규모의 확대, 그리고 집단 간의 경쟁 심화 같은 사회적 요인도 중요하게 작용했음도 간과해서는 안 된다.

인지 혁명은 호모 사피엔스가 아프리카와 유라시아에서 모든 다른 인류 종을 밀어내고 호주와 아메리카를 포함한 모든 대륙의 다양한 환경에 적응할 수 있게 만든 추동력이었다. 인지 혁명이 현생 인류를 성공의 길로 이끈 데는 개체의 인지 능력이 향상된 점보다, 그것을 통해 집단 협력이 더 커진 규모로 유연하게 이루어졌다는 점이 훨씬 크게 작용했다. 유전자 변이에 의존하는 신체 적응을 통해서는 빠르게 변하는 환경에 적응하는 능력을 갖추기 어렵다. 인류는 집단학습으로 문화의 진화와 축적을 함으로써 빠르게 대처할 수 있는 행동 적응을 이뤄냈다. 다수준 선택 진화 이론의 관점에서 보면 빠르게 변하는 환경에 잘 적응하는 문화적 진화와 행동의 혁신을 이루어낸 집단이 다른 경쟁 집단을 밀어내고 살아남은 것이다. 그 결과 인류는 지구 정복을 넘어 농경을 시작하고 문명의 역사로 넘어갈 수 있었다. 인지 혁명은 인간과 인간 사회의 주요한 변화를 이끄는 동역학이 유전자의 진화에서 문화의 진화로 넘어가는 전환점이었다.

인지 혁명이 현생 인류를 성공의 길로 이끈 데는 개체의 인지 능력 향상보다, 그것을 통해 집단 협력이 더 큰 규모로 유연하게 이루어졌다는 점이 훨씬 크게 작용했다.

무엇이 우리를 만들었는가?

우리의 해부학적 구조는 호모 사피엔스가 출현한 30만 년 전과 큰 차이가 없지만, 빠르게 진행하는 문화의 진화 때문에 행동 양상은 그때와 크게 달라졌다. 그렇다고 생물학적 진화가 중요하지 않다는 것은 아니다. 유전자의 변이는 끊임없이 일어나고, 인류의 진화는 지금도 진행 중이다. 놀라운 변화 중 하나는 최근 1만 년 동안에는 뇌의 크기가 줄어들고 있다는 점이다. 이는 인류가 농경을 통해 가축과 곡류를 길들여 변화시킨 것과 마찬가지로 자기-길들이기에 적응한 결과로 해석되고 있다. 거주지역에 따른 피부색의 변화도 진행됐는데, 이는 근대에 이를 근거로 한 인종차별 문제를 불러왔으며, 아직도 그 여파가 남아 있다. 피부색은 그 영향이 중대해서 환경에 빠르게 적응한 사례로, 지역의 위도에 따라 연속적으로 변하며 빠르게 진화가 진행됐다. 비교적 최근에 일어난 변화로는 파란 눈의 진화와 젖당 분해 효소의 활성화 변이가 있다. 파란 눈의 경우 성 선택이 주요하게 작용한 사례로 꼽힌다. 젖당 분해 효소를 만드는 유전자는 나이가 들면 비활성화되는데, 목축과 우유 섭취 문화가 확산함에 따라 그 문화권 내에서는 나이가 들어도 젖당 분해 효소 생성 유전자의 활성이 유지되는 사람들의 비율이 증가했다. 이는 문화-유전자 공진화 사례로 꼽힌다.

모든 다른 생물 종과 마찬가지로 현재 우리의 모습은 수많은 우연과 필연이 엮인 사건과 그 사건이 가져온 환경변화에 적응해서 진화해 온 결과가 축적돼서 만들어졌다. 다세포 동물의 생존 전략으로써 포식을 위한 뇌의 발명은 중대한 전환점이었다. 뇌는 학습을 통해 생존과 번식을 위한 행동 양식을 만들었다. 인류는 뇌 용량의 증가와 인지 혁명을 통해 사회적 학습 능력을 정교화함으로써 행동 양식을 다음 세대로 전달하고 축적할 수 있게 됐다. 인류에게 닥쳤던 빙하기의 혹독한 환경들은 인류를 멸종의 위기까지 몰고 갔지만, 결국 살아남은 인류는 문화를 진화시키며 지식을 축적하는 행동 적응을 통해 빠른 환경변화에 강력한 적응력을 갖춘 종으로 거듭났다. 인류의 현재 모습은 단세포였던 최초의 생명체에서 출발해서 38억 년이란 오랜 시간 동안 진행된 생명의 진화와 더불어, 그 과정에서 발명된 뇌를 기반으로 상대적으로 매우 짧은 시간 동안 진행된 문화의 진화가 축적된 결과다. 우리의 신체는 최초의 호모 사피엔스와 크게 다르지 않지만, 우리의 행동은 생존과 번식을 위한 기본적인 것을 제외하면 그들과 완전히 달라졌다.

끊임없이 변하는 지구가 만들어낸 다양한 환경은 온갖 진화 경로를 개척해서 생존과 번식을 이어온 수많은 생명 가지를 만들어냈다. 각 가지 끝에 있는 종은 각자 고유한 진화 경로를 거쳐서 현재까지 살아남았고, 그중 한 가지 끝에 인류가 자리하고 있다. 각각의 진화 경로에는 각 종이 겪어온 수많은 사건이 기록돼 있다. 그렇다면 인류에 이르는 진화 경로가 만들어지는 데 결정적으로 작용했던 사건들은 무엇일까? 역사에 가정을 도입하는 게 무의미하다지만, 그것이 일어나지 않았다면 우리가 존재하지 않게 되거나 우리의 모습이 완전히 달라졌을 사건을 찾아보는 일은 재미와 더불어 우리가 어떻게 존재하게 됐는지를 돌아보는 계기는 될 듯하다. 우리의 존재에는 어떤 우연과 필연이 작용했을까?

(1) 6,600만 년 전에 지구로 날아온 소행성의 충돌은 대형 파충류의 멸종을 불러왔다. 작은 몸집 덕에 살아남을 수 있었던 포유류는 이 우연한 사건 덕에 번성할 기회를 얻었고, 결국 육지의 지배적인 동물로 올라설 수 있었다. 만약 이 사건이 없었다면 공룡이 지배하는 세상이 지금까지 이어지면서 대형 포유류인 인류가 진화할 기회는 사라졌을 것이다. (2) 판의 이동에 따른 대륙의 재배치는 인류의 진화 방향에 지대한 영향을 끼쳤다. 남극대륙이 남극 지점에 자리 잡으며 대륙빙을 형성했고, 그로 인해 지구의 기온이 낮아지며 빙하기가 시작됐다. 인도 대륙이 아시아 대륙과 충돌하자 빙하기는 가속됐다. 빙하기는 인류를 고난에 몰아넣었지만, 그 고난을 극복하려던 진화의 방향이 인류 모습의 상당 부분을 형성했다. 아프리카판이 분리되며 동아프리카 열곡대가 형성되자 동아프리카 지역은 열대 우림에서 사바나로 바뀌었다. 지리적 우연으로 하필 그곳에 인류의 조상이 살고 있었다. 사바나로의 전환은 인류의 조상을 나무에서 내려와 초원에 적응하며 직립 보행과 집단 협력을 강화해 생존을 도모하는 방향으로 진화를 이끌었다. (3) 직립 보행의 선택은 인류 계통의 진화 방향이 정해지는 데 결정적인 사건이었다. 직립 보행으로 장거리 이동이 가능해졌고 자유로워진 손은 도구의 활용을 원활하게 함으로써 인류가 사냥꾼으로 변모하며 육식의 비중을 높인 선택을 할 수 있었다. (4) 불의 이용과 화식은 충분한 에너지 공급을 통해 뇌 용량이 증가할 수 있게 함으로써 혹독한 기후변화를 행동 양식의 최적화로 극복하는 진화의 방향을 열었다. 이는 학습 능력과 사회성을 극대화함으로써 인류를 최상위 포식자의 지위에 올려놓았다. (5) 인지 혁명이 일어나지 않았다면 호모 사피엔스가 다른 인류 종들을 압도하고 전 세계로 퍼져나가는 일이 일어나지 않았을 수도 있다. 인지 혁명을 통해 인류는 상징 언어를 사용하고 허구를 믿을 수 있게 되면서 집단학습과 협력을 극대화했고, 문화의 진화와 지식의 축적을 통해 농경을 시작하고 문명을 건설하는 방향으로 나가게 됐다.

HORIZON 2024 하반기 발행목록

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

7

P.
[7월의 퍼즐] 생각보다 유용한 모래시계
글. 조정휘 **그림.** Kimjourney

M.
3차원 공간의 흐름
글. 백형렬 **그림.** 버터컵

N.
약한 양자측정의 이해와 응용
글. 김윤호 **그림.** 홍강희 박사

T.
행복의 심리학 :
우리는 함께 행복할 수 있나?
글. 이윤형 **그림.** Gothic_jang

8

P.
[8월의 퍼즐] N등급 충명 소환술
글. 이충명 **그림.** 지은그림

M.
표준기저를 찾아서[1]
글. 김현규 **그림.** Nyangsday

물리 기반 신경망은 전통적 수치해석을
대체할 수 있을까? 1부
글. 권석준 **글.** 김명호

N.
[현미경의 과학] 엑스선 현미경
글. 임준 **그림.** 메아리

T.
[과학의 결정적 순간들]
1950년 맨체스터,
'낯선' 지능을 소개한 튜링
글. 이상욱 **그림.** 윤진상

9

P.
[9월의 퍼즐] 석영 타일 구매 경쟁
글. 이충명 **그림.** 버터컵

M.
기계 학습이 새 환경에 적응하는 방법
글. 하우석 **그림.** 엄지

물리 기반 신경망은 전통적 수치해석을
대체할 수 있을까? 2부
글. 권석준 **그림.** 김명호

N.
[양자컴퓨터의 다양한 물리적 플랫폼]
초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현
글. 김요셉 **그림.** Mmmeari

T.
빅뱅에서 인간까지[10] : 인류의 역사 2부
글. 김항배 **그림.** 네르

10

P.
[10월의 퍼즐] 불가능 도브타일 정육면체
글. 안진후 **그림.** 성률

N.
정보전달의 총아(3) : LCD-PDP
디스플레이 대전- 첫 번째 이야기
글. 고재현 **그림.** 김태균

시간결정(Time Crystal)
글. 한정훈 **그림.** 예니김

양자 감지(Quantum Sensing) -
새롭게 떠오르는 양자기술
글. 장석주 **그림.** Mareykrap

T.
[한국과학기술의 결정적 순간들(10)]
도봉섭
글. 이정 **그림.** 최다혜

11

P.
[11월의 퍼즐] 귀엽고~ 깜찍하게~
써리~원!
글. 한동규 **그림.** 오빅

M.
표준기저를 찾아서[2]
글. 김현규 **그림.** Naheat

N.
정보전달의 총아(4): LCD-PDP
디스플레이 대전- 두번째 이야기
글. 고재현 **그림.** 김현주

엑스선 현미경[2]
글. 임준 **그림.** 손호용

T.
빅뱅에서 인간까지[11] :
인류의 역사 3부
글. 김항배 **그림.** 메이우드

12

P.
[12월의 퍼즐] 크리스마스 트리의 귀환
글. 안진후 **그림.** 우수진

M.
차익거래란 무엇인가?[1]
글. 김동한 **그림.** 차윤아트

N.
뇌과학(신경과학)의 역사
글. 문제일 **그림.** 임기환

T.
생성형 인공지능 시대의
인공 역사라는 문제
글. 현재환 **그림.** 김지희

HORIZON 2025 상반기 발행목록

1

P.
[1월의 퍼즐] MMXXV 거울 미로
글. 한동규 **그림.** 우수진

M.
그래프와 곡면의 동상이몽[1] :
그래프와 위상수학적 대칭
글. 곽상훈 **그림.** 냥즈데이

현대암호학의 태동[1] : 고전암호학
글. 이기우 **그림.** 차윤아트

N.
정보전달의 총아(5) : OLED-LCD
디스플레이 대전(大戰) - 첫 번째 이야기
글. 고재현 **그림.** 임기환

T.
뇌 안의 문자 상자 : 글 읽기의 인지신경과학
글. 최원일 **그림.** 민트썸머

2

P.
[2월의 퍼즐] 발렌타인데이 하트
글. 안진후 **그림.** 우수진

M.
그래프와 곡면의 동상이몽[2] :
곡면과 위상수학적 대칭
글. 곽상훈 **그림.** 냥즈데이

T.
문해력 개인차의 인지과학,
그리고 (공익) 광고 하나
글. 최원일 **그림.** 양동혁

3

P.
[3월 퍼즐] 균형 잡힌 지역 발전
글. 조정휘 **그림.** 발없는 새

M.
표준기저를 찾아서[3]
글. 김현규 **그림.** 영일러스트

N.
[양자컴퓨팅의 다양한 물리적 플랫폼]
측정 기반 양자컴퓨팅과 광집적회로
플랫폼
글. 손영익 **그림.** 네르

뇌과학(신경과학)의 역사[2]
글. 문제일 **그림.** 셀루

T.
[한국 과학기술의 결정적 순간들]
기상학자 국채표
글. 선유정 **그림.** 김명호

4

P.
[4월의 퍼즐] 9중 다이얼 금고
글. 안진후 **그림.** 메이우드

M.
금융수학에서 말하는 차익거래[2]
글. 김동한 **그림.** 우수진

힐베르트의 6번째 문제에 관하여
글. 라준현 **그림.** 오가든

N.
[양자 컴퓨팅의 다양한 물리적 플랫폼]
이온 포획 양자컴퓨터:
기술적 원리와 향후 전망
글. 김준기 **그림.** Kimu

T.
[한국 과학기술의 결정적 순간들]
1975년 박세희, 한국 수학계의
기틀을 세우다
글. 선유정 **그림.** Sommar

5

P.
[5월의 퍼즐] 대리석 구슬 받침대
글. 이충명 **그림.** 메이우드

M.
60년 난제인 소파 문제를 풀어낸 한국의
수학자 백진언 박사를 만나다
글. 최은선 **그림.** 챗gpt 생성

N.
정보전달의 총아(6): LCD-OLED
디스플레이 대전(大戰) - 두 번째 이야기 :
OLED의 선명한 색상에 숨은 비밀
글. 고재현 **그림.** 임기환

[양자컴퓨팅의 다양한 물리적 플랫폼]
측정 기반 양자컴퓨팅과 광집적회로
플랫폼[2]
글. 손영익 **그림.** 네르

T.
'유사 과학자' 리센코를 아십니까?
글. 이종식 **그림.** 가수정

6

P.
[6월의 퍼즐] 삼각형 뒤집기
글. 조정휘 **그림.** KAY

M.
2025 아벨상 수상자 마사키 카시와라
글. 박의용 **그림.** 손호용

현대 암호학의 태동[2]
글. 이기우 **그림.** 네르

N.
[양자컴퓨팅의 다양한 물리적 플랫폼]
원자 기반 QPU를 통해 본
양자컴퓨팅 연구 동향
글. 김동규 **그림.** 김명호

T.
빅뱅에서 인간까지[12] :
문명의 역사 1부
글. 김항배 **그림.** 박기종

발행일	2025년 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 고등과학원이 발간하는 과학 전문 웹진입니다. HORIZON의 목표는 우리 일상과 더 이상 떼어놓을 수 없게 된 과학을 대중에게 널리 알리는 데 있습니다. 과학이 전문화되면서 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 끌어올리고자 1996년 10월에 설립된 과학기술정보통신부 산하 출연연구기관으로, 우리나라 최초의 순수이론기초과학 연구기관입니다. 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.