



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까

분자에서 세포 · 효소 · 에너지까지

컬러 PDF · 개인 영구 소장

이 PDF는 무료 샘플입니다

이 책의 앞표지와 앞 50쪽, 뒤표지를 읽어 보실 수 있습니다. 51쪽부터는 ssbook.kr에서 구매하시면 전체를 보실 수 있습니다.

ssbook.kr/book/tonghap-03

POD 정가 18,000원 → **10,800원** (60%)

ssbook.kr 홈페이지 안내

- **시리즈별 서가** — 인삼 · 오토파지 · 식물성 저탄고지 · 단식 · 생물리학 · 독립영양인간 · 중고등학교 교재 · 채식 · 라이프스타일 · 고대사
- **책마다 고유 주소** — 링크를 보내면 누구나 표지 · 소개 · 무료 샘플을 볼 수 있습니다
- **구매** — 회원가입(이메일 인증) 후 카드 결제(쿠키페이) → 내 서재에서 전체 컬러 PDF 내려받기
- **가격** — 종이책 POD 가격의 60%, 전 페이지 컬러 PDF
- **이용 범위** — 개인 영구 소장 가능, 공개 배포 · 재판매 · 공유 금지(내려받은 파일에는 구매자 정보가 표시됩니다)
- **책 신청 게시판** — 회원은 자유게시판에서 원하는 책 내용을 신청할 수 있습니다

배추는 왜 숨이 죽을까



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

WATER · CARBON · PROTEINS · CELLS ·
MEMBRANES · ENZYMES · ENERGY

배추는 왜 숨이 죽을까

문제로 풀어 가는 통합과학 생명 이야기 1

분자에서 세포·효소·에너지까지 —

통합과학 시리즈 제2권 생명 편, 단양 돌집 과학방의 두 번째 해 (봄~여름)

이광조 박사

판본 v7 · 2026-10-02

배추는 왜 숨이 죽을까

문제로 풀어 가는 통합과학 생명 이야기 1

배추는 왜 숨이 죽을까

이 책은 중학생과 고등학생, 그리고 생명과학을 다시 배우고 싶은 어른이 통합과학의 생명 부분을 원
자에서부터 차근차근 이해할 수 있도록 네 사람의 대화로 풀어 쓴 교양서입니다. 책 속의 인물과 사
건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이며, 과학사와 연구 결과는 실제 문
헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔습니다. **현미경 관찰·DNA 추출·효소 실험은 어른과 함께 하고, 과산
화 수소와 알코올은 불과 눈에서 멀리 하십시오. 산과 숲에서는 허가된 길로만 다니고 보호 식물(단
양쭉부쟁이 등)을 캐거나 꺾지 마십시오.**

차례

머리말 — 원자에서 시작하는 생명	6
일러두기 — 이 책의 짜임	8

제1부 생명을 이루는 원자와 분자

1장 두 번째 봄 — 살아 있다는 것은 무엇일까	11
2장 생명을 이루는 원소 — 탄소·수소·산소·질소·인·황	37
3장 물 — 생명의 용매	47
4장 탄소 뼈대 — 탄수화물과 지질	57
5장 단백질 — 아미노산 목걸이의 접힘	68
6장 핵산 — 뉴클레오타이드의 사슬	83
제1부 단원 마무리 — 수능형 문제	95

제2부 세포

7장 코르크의 작은 방 — 세포의 발견	107
8장 모든 세포는 세포에서 — 세포설	122
9장 세포막 — 인지질 두 겹과 단백질	137
10장 세포 속 공장들 — 세포 소기관	148
11장 세균과 우리 — 원핵세포와 진핵세포, 내공생	158
12장 세포는 왜 작을까 — 표면적과 부피	168
제2부 단원 마무리 — 수능형 문제	179

제3부 물질의 출입

13장 확산 — 향기는 어떻게 퍼질까	191
14장 삼투 — 배추는 왜 숨이 죽을까	201
15장 능동 수송 — 막 단백질이 퍼 나른다	212
제3부 단원 마무리 — 수능형 문제	223

제4부 물질대사와 효소

16장 물질대사 — 세포 속 화학 반응	236
17장 효소 — 생명의 촉매	246
18장 효소의 성질 — 온도·pH·기질 특이성	261
19장 부역의 효소 — 식혜와 된장	271

제5부 생명의 에너지

20장 ATP — 세포의 에너지 화폐	293
21장 광합성 — 빛으로 포도당을 만들다	304
22장 세포 호흡 — 오르막에서 숨이 차는 까닭	319
제5부 단위 마무리 — 수능형 문제	334

부록

부록 A 용어 풀이	344
부록 B 교과 연결표	353
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	355
부록 D 생명과학 기본 수치와 단위	363

머리말 — 원자에서 시작하는 생명

생명과학 교과서를 펴면 세포 그림과 기관 이름, 과정의 이름이 먼저 나온다. 그런데 “배추는 왜 소금에 절이면 숨이 죽을까?”, “살아 있다는 것은 대체 무엇일까?”를 끝까지 물어 들어가면 결국 한곳에 닿는다. **원자**와 원자가 묶인 **분자**다. 살아 있는 몸도 탄소·수소·산소·질소 같은 원자로 되어 있고, 생명은 그 원자들이 쉬지 않고 들고 나며 만드는 짜임이다.

그래서 이 책은 순서를 바꾸었다. 교과서 목차를 참고하되, **앞 장의 개념에서 뒤 장의 개념이 자연스럽게 나오도록** 이어 붙였다. 상권은 생명을 이루는 원소와 물, 탄수화물·지질·단백질·핵산에서 출발한다(제1부). 이 분자들로 지어진 **세포**와 세포막, 세포 소기관을 본 다음(제2부), 물질이 세포막을 드나드는 확산·삼투·능동 수송을 배추 절이기로 확인한다(제3부). 이어 세포 속 화학 반응인 물질대사와 그것을 빠르게 하는 효소(제4부), 그리고 광합성과 세포 호흡으로 생명이 에너지를 얻고 쓰는 길(제5부)에 이른다.

이 연결이 눈에 보이도록 장마다 첫 쪽에 두 가지를 두었다. **〈이 장의 출발점〉**은 그 장이 기대는 앞 장(앞 권 화학 편 포함)의 개념과 새로 세울 개념을 보여 준다. 그 아래 **〈기본개념〉**은 그 장의 핵심 낱말을 한 문장 정의로 모았다. 정의를 손으로 가리고 낱말만 보고 말해 보며 먼저 외운 다음 본문을 읽기 바란다. 단원(부)마다 시작과 끝에는 **지식 그래프**가 있고, 단원 끝에는 그 단원으로 풀어 보는 **수능형 문제** 다섯 개와 풀이가 있다.

장마다 **〈과학의 최전선〉** 상자에는 과학이 아직 밝히지 못한 것을 적었고, 1장의 **〈끝까지 묻기〉**에서는 학생들이 “살아 있다는 것은 대체 무엇일까?”를 끝까지 묻는다. 생명의 정의, 죽음, 생명의 기원, 의식 — 과학이 아는 데까지 정직하게 답하고, 그 끝에서 아직 모른다고 말하는 것이 과학을 지키는 길이라고 믿는다.

어떤 개념도 “그렇다고 외워라”로 시작하지 않으려 했다. 세포가 있다는 것은 훅의 코르크와 레이우엔훅의 현미경, 피르호의 세포설 같은 **실험과 과학사**로 먼저 보여 주고, 그 사람들의 삶도 한두 쪽씩 담았다.

이 책의 무대는 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’이다. 화학 편에서 한 해를 함께한 하린·태오 남매와 두부집 사장 미숙 이모가, 올해는 석지환 교수의 대학 동기이자 은퇴한 생명과학자 도현숙 교수와 봄부터 김장철까지 토요일을 보낸다.

통합과학 시리즈의 둘째 해다. 장마다 본문 속 문제 두 개와 그 풀이 대화가 있다. 먼저 풀어 보고, 풀이 대화와 **풀이 그림**을 따라가며 자기 풀이와 견주어 보기 바란다. 장 끝 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 C에 있다.

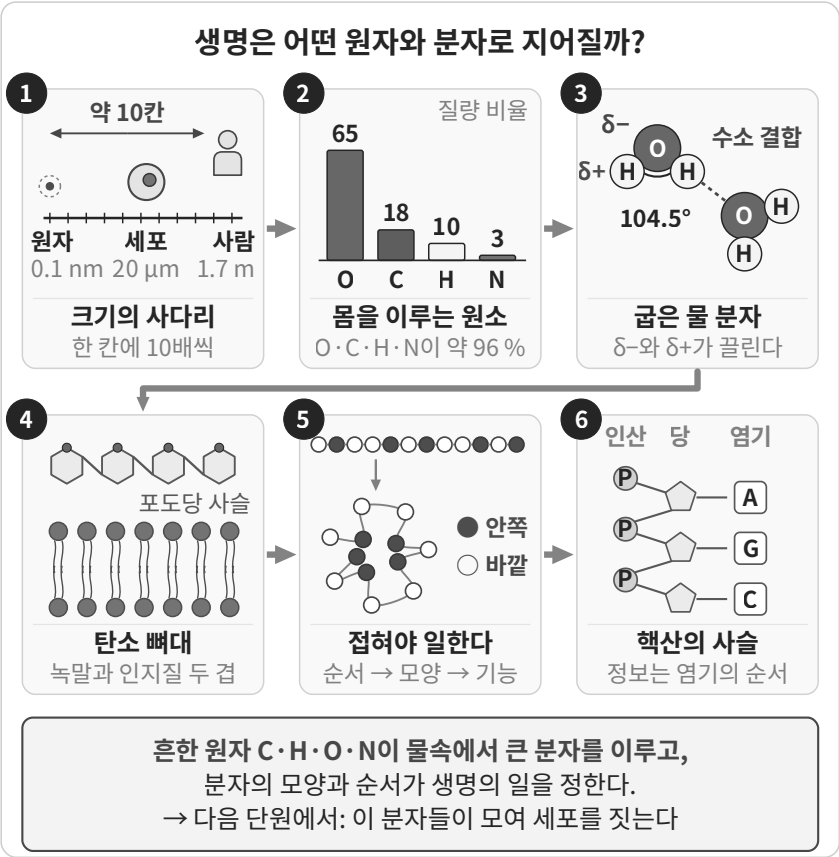
과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔다. 모든 논문의 DOI는 CrossRef에서 확인했다. 그림은 모두 좌표를 계산해 직접 그렸으며, 삼투의 방향, 염기쌍, 코돈 번역, 에너지 흐름의 수치는 손으로 그리지 않고 계산으로 확인했다.

2026년 가을, 이광조

일러두기 — 이 책의 짜임

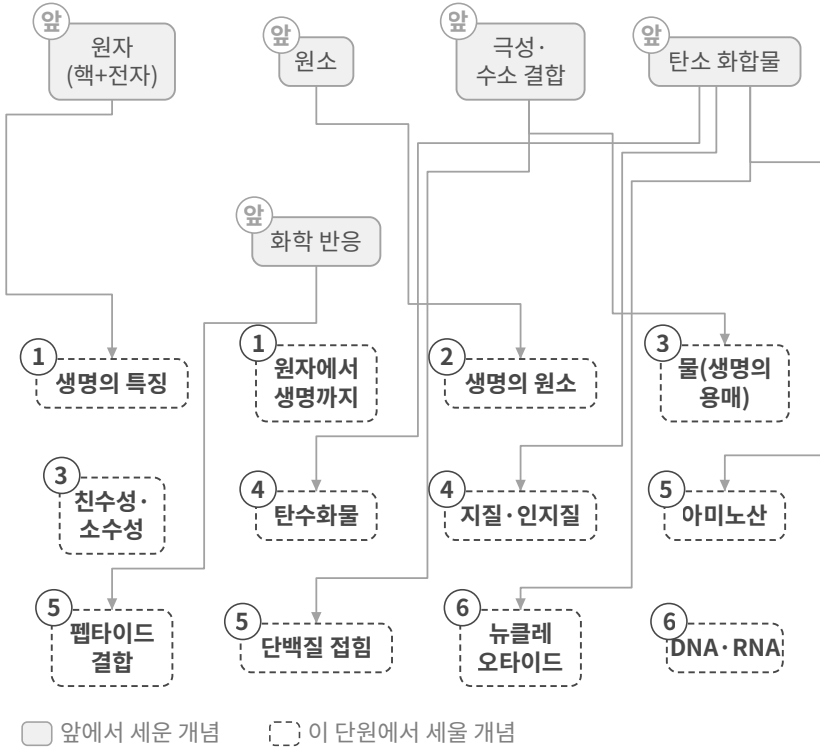
- **무대와 인물** 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’에서 은퇴한 생명과학 교수도 교수(도현숙)와 하린·태오 남매, 두부집 ‘소백두부’의 미숙 이모가 함께 묻고 푼다. 인물과 사건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시다.
- **단원의 짜임** 단원(부)마다 첫머리에 단원 전체를 한 장에 담은 그림과 〈들어가며〉 지식 그래프가, 마지막 장 끝에 〈정리〉 지식 그래프가 있다.
- **장 첫 쪽** 장마다 첫 쪽에 〈이 장의 출발점〉(앞 장에서 가져올 개념, 이 장에서 세울 개념, 이어질 뒤 장)과 〈기본개념〉(그 장의 핵심 개념을 낱말 하나와 한 문장 정의로 모은 표)을 두고, 본문은 다음 쪽부터 시작한다. 〈기본개념〉을 먼저 익힌 뒤 본문을 읽으면 이해가 쉽다.
- **문제와 풀이** 본문 속 문제는 「문제 7-1」처럼 장 번호와 차례를 붙였고, 바로 뒤의 대화와 풀이 그림이 풀이다. 장 끝 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 C에 있다.
- **상자와 이야기** 〈오늘의 정리〉는 그 장의 요점을, 〈과학의 최전선〉은 과학이 아직 밝히지 못한 것을 담았다. 과학자 이야기는 발견한 사람의 삶을 삶의 지도·연표와 함께 실었다. 몇몇 장에는 학생이 “왜?”를 끝까지 캐묻고 교수가 최신 이론을 거쳐 아직 모르는 곳까지 함께 가는 〈끝까지 묻기〉가 있다.
- **단원 마무리 〈수능형 문제와 풀이〉** 단원마다 끝에 수능형 문제 다섯 개와 풀이를 실었다. 대학수학능력시험 기출 문제(한국교육과정평가원이 공개한 2028학년도 수능 예시 문항 포함)를 바탕으로 한 변형 문제이며, 평가원의 저작권 때문에 기출 원문은 신지 않았다. 문제마다 붙인 출처 표기는 바탕으로 된 기출의 학년도·과목·번호이고, 문제는 상황·수치·그림·문장을 새로 쓴 것이다.
- **출처** 본문의 작은 위첨자 번호는 각 장 끝 「이 장의 출처」의 번호다. 논문은 DOI를 CrossRef에서 확인했고 APA 7판 양식으로 적었다.
- **부록 A** 용어 풀이, **B** 교과 연결표(2022·2015 개정 교육과정), **C** 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설, **D** 생명과학 기본 수치와 단위.

생명을 이루는 원자와 분자



제1부 한눈에 보기 — 이 단원의 이야기를 한 장에 담았다. 원 속 숫자는 장 번호

제1부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



[제1부] 단원 들어가며 — 지식 그래프 회색 상자는 앞 단원에서 세운 개념, 점선 상자는 이 단원에서 새로 세울 개념이다. 화살표는 "이 개념이 있어야 저 개념을 이해할 수 있다"는 뜻이고, 원 속 숫자는 그 개념을 세우는 장이다

01

두 번째 봄 — 살아 있다는 것은 무엇일까

출발점 원자(핵+전자) 앞 권

새 개념 생명의 특징 · 원자에서 생명까지

이어짐 생명의 원소 2장 · 현미경 7장

기본개념 이 장의 개념 12개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

오른쪽 정의를 손이나 종이로 가리고, 단어만 보고 정의를 말해 보자. 막히는 단어는 본문에서 굵은 글씨로 다시 만난다.

1	항상성	바깥 환경이 바뀌어도 몸 안의 상태를 일정하게 지키는 성질.
2	생식	생물이 자기를 닮은 자손을 남기는 일.
3	조직	모양과 하는 일이 비슷한 세포가 모인 것.
4	기관	여러 조직이 모여 한 가지 일을 맡은 것.
5	개체	여러 기관이 모여 이룬 한 생물.
6	생명 시스템	세포·조직·기관·개체처럼 부분들이 층층이 모여 함께 일하는 짜임.
7	바이러스	세포로 되어 있지 않아 숙주 세포 안에서만 불어나는 것.
8	목적 법칙성	목표를 향하는 듯한 움직임을 되먹임 장치와 자연선택으로 설명하려는 생각.
9	엔트로피	원자와 분자가 흐트러진 정도를 재는 양.
10	열린 계	바깥과 물질과 에너지를 주고받는 계.
11	RNA 세계	RNA가 정보와 촉매 일을 함께 하던 세계가 DNA·단백질보다 먼저 있었다는 가설.
12	마지막 보편 공통 조상	오늘날 모든 세포 생물이 거슬러 올라가 만나는 가장 가까운 한 뿌리 생물.

3월 첫 토요일 아침, 남한강 가 돌집 과학방에 일 년 만에 다시 불이 켜졌다. 바람은 아직 차지만 마당 끝 산수유에 노란 꽃망울이 맺혀 있었다. 석 교수가 짧은 머리에 등산화를 신은 사람과 함께 들어와 아이들에게 고개를 끄덕여 소개하고는, 손을 한번 흔들고 서울 가는 버스를 타러 나갔다. 탁자에는 도현숙 교수가 가져온 현미경과 돋보기, 손때 묻은 야외 수첩이 놓였고, 미숙은 소쿠리에 마른 콩 한 줌과 두부 한 모, 참기름 한 병을 담아 왔다.

도 교수 반갑구나. 석 교수한테 너희 이야기 많이 들었단다. 작년에 소금 한 알에서 시작해 원자와 결합을 배웠는지?

태오 네. 올해는 생명과학 I 을 골랐는데, 통합과학 생명 부분을 제대로 다지고 싶어서 왔어요.

하린 저는 내년에 고등학생이 돼요. 관찰 일기장도 새로 샀어요.

도 교수 좋구나. 그럼 첫 질문이다. 이 소쿠리 속 마른 콩과 두부, 어느 쪽이 살아 있을까?

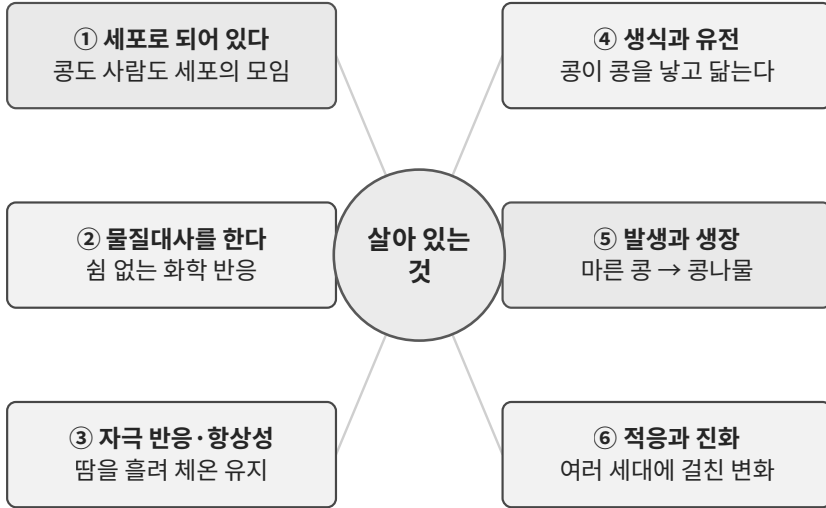
미숙 둘 다 같은 콩인데요. 하나는 불려서 갈았고, 하나는 그냥 말렸을 뿐이에요.

도 교수 바로 그 점이 재미있지요. 원자에서 시작해 보자. 콩도 두부도 탄소·수소·산소·질소 원자로 되어 있단다. 원자의 종류로는 둘을 가릴 수 없어. 그러니 차이는 그 원자들이 **어떻게 짜여 있고, 무슨 일을 하고 있느냐**에 있을 거야.

살아 있는 것이 함께 가진 특징

하린 콩은 물에 담가 두면 싹이 트니까 살아 있는 것 같아요. 그런데 겉으로는 돌멩이처럼 가만히 있어요.

도 교수 겉모습만으로는 알기 어렵단다. 그래서 생명과학 교재들은 살아 있는 것들이 함께 가진 특징의 목록을 세워 두었지¹. 그림 1-1을 보렴.



[그림 1-1] 생명의 여섯 가지 특징 세포로 되어 있다, 물질대사를 한다, 자극에 반응하고 몸 안을 일정하게 지킨다, 생식하고 유전한다, 발생하고 생장한다, 적응하고 진화한다. 살아 있는지는 여러 특징을 함께 보고 판단한다(모식도)

도 교수 첫째, 생물은 **세포**로 되어 있단다. 세포는 7장에서 현미경으로 직접 보게 될 거야. 사람 몸에는 세포가 약 30조 개 있어². 둘째, 몸 안에서 쉬지 않고 화학 반응이 일어나는 물질대사를 한다. 물질대사는 16장에서 자세히 배운다.

미숙 셋째는 자극에 반응하는 거겠지요? 콩나물을 어두운 데서 키우면 노랗게 웃자라요.

도 교수 좋은 예입니다. 추우면 몸을 떨고 더우면 땀을 흘려 체온을 일정하게 지키는 것도 여기 들어가요. 몸 안을 일정하게 지키는 성질을 **항상성**이라 하지요. 넷째는 자손을 남기고 자손이 부모를 닮는 생식과 유전, 다섯째는 씨앗이 싹 트고 자라는 발생과 생장입니다. 여섯째는 여러 세대에 걸쳐 환경에 맞게 바뀌는 적응과 진화인데, 진화는 31장에서 자세히 다룹니다.

태오 로봇 청소기도 벽에 부딪히면 방향을 바꾸잖아요. 자극에 반응하니까 살아 있는 거 아니에요?

도 교수 그럴듯한 반례구나. 로봇은 반응은 하지만 세포로 되어 있지 않고, 스스로 자손을 만들지도 않아. 그래서 특징 하나만 보고 판단하면 안 된단다.

코슬랜드라는 생화학자도 생명을 떠받치는 기둥을 일곱 개나 세우며 여러 조건을 함께 보자고 했지³.

하린 그러니까 마른 콩은 지금 잠깐 쉬고 있는 거라는 거죠? 물을 만나면 다시 일을 시작하고요.

도 교수 그래. 마른 씨앗은 물을 빨아들이면서 멈춰 두었던 화학 반응을 다시 시작해 싹을 틔운단다⁴. 두부는 콩의 세포가 갈려 부서지고 그 속 물질만 엉긴 것이라, 물을 아무리 줘도 자라지 않지.

문제 1-1 살아 있다고 할 수 있을까

그림 1-2는 네 가지 대상이 생명의 특징 네 가지를 가졌는지 조사한 표다(○ 있음, × 없음, △ 숙주 세포 안에서만). 표를 보고 옳게 말한 것은?

	마른 콩	두부	바이러스	로봇 청소기
세포로 되어 있다	○	×	×	×
스스로 물질대사	○	×	×	×
자극에 반응한다	○	×	×	○
스스로 자손을 만든다	○	×	△	×

○ 있음 × 없음 △ 숙주 세포 안에서만

[그림 1-2] 문제 1-1의 그림 마른 콩, 두부, 담배 모자이크 바이러스, 로봇 청소기가 생명의 특징 네 가지를 가졌는지 정리한 표

- ① 로봇 청소기는 자극에 반응하므로 생물이다.
- ② 두부는 콩으로 만들었으므로 세포로 되어 있다.
- ③ 마른 콩은 움직이지 않으므로 생물이 아니다.
- ④ 바이러스는 숙주 세포 밖에서도 스스로 자손을 만든다.
- ⑤ 마른 콩은 표의 네 특징을 모두 가져 생물로 본다.

태오 ①이요. 로봇 칸에 자극 반응이 ○로 되어 있잖아요.

도 교수 칸 하나만 읽었구나. 조건을 다시 읽어 보렴. 표에 특징이 몇 가지였지?

태오 네 가지요. 로봇은 그중 하나만 ○예요. 아, 방금 특징 하나로 판단하면 안 된다고 하셨죠.

도 교수 그림 계획을 세우자. 대상마다 ○가 몇 개인지 세고, 선택지를 하나씩 표와 맞춰 보는 거야.

하린 두부는 모두 ×라서 ②는 틀려요. 마른 콩은 움직이지 않아도 네 칸이 다 ○니까 ③도 틀려요.

미숙 바이러스는 자손 칸이 △네요. 숙주 세포 안에서만 붙어난다니까 ④도 아니고요.

도 교수 그림 1-3처럼 ○의 개수를 세어 보면 한눈에 보이지요. 정답은 ⑤입니다.

	마른 콩	두부	바이러스	로봇 청소기
세포로 되어 있다	○	×	×	×
스스로 물질대사	○	×	×	×
자극에 반응한다	○	×	×	○
스스로 자손을 만든다	○	×	△	×
○의 개수	4	0	0 (△1)	1
판단	생물	생물 아님	경계	생물 아님

○ 있음 × 없음 △ 숙주 세포 안에서만

[그림 1-3] 풀이 그림 대상마다 ○의 개수를 세었다. 마른 콩은 네 특징을 모두 갖고, 로봇 청소기는 하나, 두부는 없다. 바이러스는 숙주 세포 안에서만 자손을 만들어 생물과 무생물의 경계에 있다

하린 특징 하나만 보면 헷갈리고, 모두 모아 봐야 한다는 거네요.

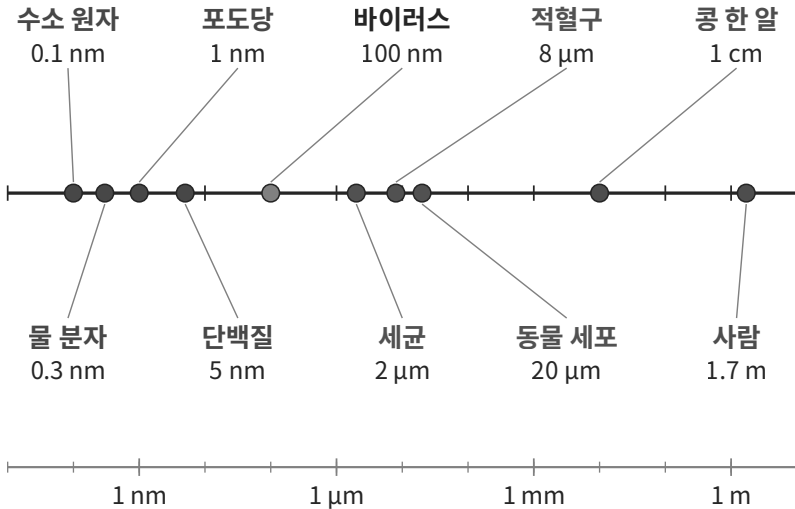
도 교수 그래. 문제를 이해하고, 계획을 세우고, 풀고, 되돌아보는 순서를 올해도 지키자꾸나⁵.

원자에서 생명까지, 크기의 사다리

도 교수가 돋보기로 콩 한 알을 비춰 보이고는 수첩에 긴 사다리를 그렸다.

도 교수 이제 크기를 따라 내려가 보자. 콩 한 알은 약 1 cm, 콩을 이루는 세포 하나는 수십 μm 란다. 동물 세포는 대개 10~30 μm , 세균은 1~5 μm 쯤이지^{1,6}. 세포 속 큰 분자는 몇 nm이고, 물 분자는 약 0.3 nm, 원자는 약 0.1 nm야⁷. 그림 1-4는 한 칸 올라갈 때마다 열 배씩 커지는 사다리란다.

한 눈금 = 10배



[그림 1-4] 원자에서 사람까지 크기의 사다리 가로축은 한 눈금마다 10배씩 커진다. 수소 원자 약 0.1 nm, 물 분자 약 0.3 nm, 포도당 약 1 nm, 단백질 약 5 nm, 바이러스 약 100 nm, 세균 약 2 μm , 적혈구 약 8 μm , 동물 세포 약 20 μm , 콩 약 1 cm, 사람 약 1.7 m(어림값)

하린 원자에서 사람까지 칸이 열 개나 돼요. 그러니까 한 칸이 열 배씩이면 백억 배라는 거죠?

도 교수 맞아. 작년에 원자는 원자핵과 전자로 되어 있다고 배웠지(화학 편 4~5장). 원자들이 전자를 나눠 가지며 공유 결합으로 이어지면 분자가 되었고(화학 편 23장). 올해는 이 사다리를 아래에서부터 올라간단다. 원자 → 분자 → 큰 분자 → 세포 → 조직 → 기관 → 개체 순서지.

하린 조직이란 기관은 뭐예요?

도 교수 모양과 하는 일이 비슷한 세포가 모인 것이 **조직**, 여러 조직이 모여 한 가지 일을 맡은 것이 **기관**이란다. 콩나물의 뿌리, 사람의 위와 심장이 기관이지. 기관들이 모여 한 생물, 곧 **개체**가 된단다. 이렇게 부분들이 층층이 모여 함께 일하는 것을 **생명 시스템**이라 불러.

미숙 우리 가게랑 비슷하네요. 콩 불리는 사람, 가는 사람, 굳히는 사람이 모여야 두부 한 모가 나오니까요.

태오 시험엔 어떻게 나와요? 세포부터 외우면 안 돼요?

도 교수 세포만 외우면 “왜”가 빠진단다. 눈에 보이는 일, 원자·분자의 세계, 화학식을 오가야 하는 게 과학이 어려운 까닭이라는 연구가 있어⁸. 그래서 우리는 눈앞의 콩에서 출발해 원자까지 내려갔다가 차근차근 올라올 거야. 통합과학도 생명을 이렇게 여러 층으로 된 시스템으로 보라고 하지⁹.

미숙 바이러스는 세균보다 한참 작네요. 그럼 바이러스도 살아 있는 건가요?

도 교수 좋은 질문입니다. 1935년 스탠리는 담배 잎의 병을 옮기는 바이러스를 소금처럼 결정으로 뽑아냈어요¹⁰. 결정이 되는 생물이라니, 과학자들도 놀랐지요. 이 물음은 오늘의 최전선에서 다시 봅시다.

문제 1-2 적혈구에 물 분자를 늘어놓으면

그림 1-4의 사다리에서 적혈구의 지름은 약 $8\ \mu\text{m}$, 물 분자의 크기는 약 $0.3\ \text{nm}$ 이다. 적혈구 지름을 따라 물 분자를 한 줄로 늘어놓으면 대략 몇 개가 들어가는지 구하고, 사다리에서 두 크기가 몇 칸쯤 떨어져 있는지 쓰시오($1\ \mu\text{m} = 1,000\ \text{nm}$).

태오 8을 0.3으로 나누면 약 27이니까, 27개요!

도 교수 단위를 다시 읽어 보렴. 8 뒤에 붙은 단위와 0.3 뒤에 붙은 단위가 같니?

태오 아, 하나는 μm , 하나는 nm 예요. 단위부터 맞춰야겠네요.

도 교수 그래, 그게 계획이야. 먼저 같은 단위로 바꾸고, 그다음 나누자.

하린 $8\ \mu\text{m}$ 는 $8 \times 1,000 = 8,000\ \text{nm}$ 예요. $8,000 \div 0.3 \approx 26,700$ 이니까 약 2만 7천 개요.

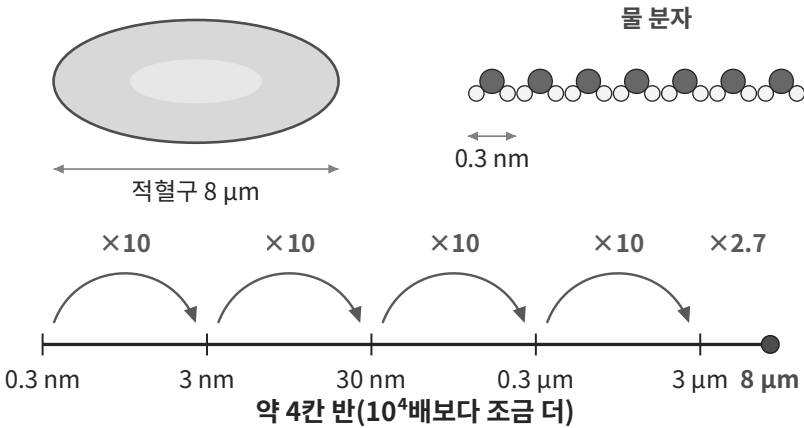
도 교수 그림 1-5가 그 계산이란다. 이제 칸 수를 세어 보자. 10배가 한 칸이면 2만 7천 배는 몇 칸이지?

미숙 10, 100, 1,000, 10,000까지 네 칸이고, 2만 7천은 거기서 조금 더 가니까 네 칸 반쯤이네요.

도 교수 훌륭합니다. 모범 답은 “약 2만 7천 개, 사다리에서 약 4칸 반”이지요. 다른 단위를 그대로 나누는 실수는 시험에서 가장 흔하답니다.

$$\textcircled{1} \quad 8 \mu\text{m} = 8,000 \text{ nm} \quad \rightarrow \quad \textcircled{2} \quad 8,000 \div 0.3 \approx 26,700$$

→ 물 분자 약 2만 7천 개가 한 줄로 들어간다



[그림 1-5] 풀이 그림 적혈구 지름 8 μm 를 8,000 nm로 바꾼 뒤 물 분자 크기 0.3 nm로 나누면 약 2만 7천 개가 된다. 로그 사다리에서는 10배마다 한 칸이므로 약 4칸 반 떨어져 있다

하린 제 적혈구 하나에도 물 분자가 한 줄에 2만 개 넘게 서 있다니, 원자 세계는 정말 작네요.

끝까지 물기 살아 있다는 것은 대체 무엇일까

태오가 연필을 내려놓고 고개를 들었다.

태오 선생님, 아까 특징 여섯 개를 모아 보면 된다고 하셨잖아요. 그런데 그건 ‘살아 있는 것들이 이런 걸 한다’는 목록이지, ‘살아 있다는 게 뭐다’는 답은 아니잖아요.

목록으로는 왜 모자랄까

도 교수 날카롭구나. 맞아, 목록은 정의가 아니란다. 목록의 칸 하나하나에 반례를 대 보자꾸나. 소금물을 졸이면 소금 결정이 점점 커지지. 자라는 거야. 촛불은 초와 공기 속 산소를 들이고 열과 이산화 탄소를 내보내며, 옆심지로 옮겨 붙어 붙어나기도 해. 물질과 에너지가 흘러 드나들고, 퍼지고, 붙어나니 물질대사 비슷한 걸 하는 셈이지. 16장에서 보겠지만 세포는 바로 이 불꽃 같은 반응을 여러 단계로 나누어 천천히 해낸단다.

하린 그럼 불꽃도 살아 있는 거예요? 그건 좀 이상한데요.

도 교수 이상하지. 그래서 과학자들은 목록 말고 이론에 기반 정의를 찾았단다. 미국 항공 우주국 NASA의 우주생물학 프로그램은 생명을 “다윈식 진화를 할 수 있는 자립적 화학계(a self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution)”라고 적어 두었어¹¹. 다윈식 진화란 31장에서 배울 자연선택처럼, 대를 이어 물려받은 정보에 변이가 생기고 그 가운데 잘 남는 것이 늘어나는 과정이란단다. 그림 1-6에 이 잣대를 결정·불꽃·바이러스·세균·사람에 대어 보았단다.

	 소금 결정	 촛불	 바이러스	 세균	 사람
자라거나 불어난다	○	○	△	○	○
물질·에너지 흐름	×	○	×	○	○
유전 정보 물려주기	×	×	○	○	○
다윈식 진화	×	×	△	○	○
스스로 유지된다	×	○	×	○	○
작업 정의로 보면	아님	아님	경계	생명	생명

○ 있음 × 없음 △ 숙주 세포 안에서만

[그림 1-6] 생명의 경계 다섯 대상이 다섯 가지 성질을 가졌는지 정리했다(○ 있음, × 없음, △ 숙주 세포 안에서만). 결정과 불꽃은 자라거나 물질과 에너지를 주고받지만 물려줄 정보가 없어 진화하지 못한다. 바이러스는 정보를 물려주고 진화하지만 혼자서는 해내지 못한다. 맨 아래 줄은 ‘다윈식 진화를 할 수 있는 자립적 화학계’라는 작업 정의로 본 판정이다

태오 결정이랑 불꽃은 물려줄 정보가 없으니까 탈락이네요. 바이러스는 정보도 있고 진화도 하는데 ‘자립’에서 걸리고요.

도 교수 그렇지. 바이러스는 숙주 세포의 기계를 빌려야만 불어나니 스스로 서 있지 못해. 그래서 바이러스를 생명의 계통수에서 빼자는 학자들도 있고¹², 그 주장을 두고는 지금도 논쟁이 이어진단다.

하린 그럼 NASA 정의가 정답이예요?

도 교수 그것도 ‘작업 정의’, 곧 일하기 위해 정해 둔 약속이란다. 베너라는 화학자는 생명의 정의는 언제나 그 뒤에 숨은 생명 이론과 묶여 있고, 진화를 넘어서는 존재를 만나면 이 정의도 바뀌어야 할지 모른다고 했어¹³. 더 근본적인 한계도 있지. NASA 스스로 밝히듯, 우리가 아는 생명의 예는 지구 생명 하나뿐이란단다¹¹. 표본이 하나인데 일반 법칙을 세우기는 어렵지.

하린 그런데 노새처럼 새끼를 못 낳는 동물은요? 그 노새 한 마리는 진화를 못 하잖아요. 그럼 살아 있지 않은 거예요?

도 교수 좋은 반례다. 나는 이 정의를 한 마리를 두고 하는 말이 아니라, 대를 이어 가는 생물의 무리 전체를 두고 하는 말로 읽는단다. 노새도 진화해 온 무리에서 태어난 몸이니까. 그래도 이렇게 단서를 달아야 한다는 것 자체가, 한 문장 정의가 얼마나 아슬아슬한지를 보여 주지.

미숙 김치를 한 집 것만 먹어 보고 ‘김치란 이런 맛’이라고 정하는 거랑 비슷하네요.

태오 그런데 다윈식 진화라는 말이 좀 걸려요. 진화는 생물이 더 나아지려고 애쓰는 거 아니에요? 기린이 높은 잎을 먹으려고 목을 늘인 것처럼요.

도 교수 많은 사람이 그렇게 생각하지만, 31장에서 배운 자연선택에는 미리 정해 둔 목표가 없단다. 이미 생겨난 여러 변이(30장에서 배운다) 가운데 그때의 환경에서 더 잘 남는 것이 늘어날 뿐이지. 갈라파고스의 핀치를 30년 동안 켜 연구에서도 선택의 방향은 가뭄과 큰비에 따라 여러 번 뒤바뀌었고, 짧게는 예측되었지만 길게는 예측할 수 없었어¹⁴.

하린 그래도 심장은 피를 돌리려고 있는 거잖아요. ‘무엇을 하려고’라는 말을 생물학에서 아예 안 쓸 수는 없잖아요.

도 교수 바로 그게 철학자들이 목적론이라 부르는 문제란다. 생물학은 기능이나 목적 같은 말을 빼고는 설명하기 어렵거든. 그래서 1958년 피텐드리라는 생물학자는 ‘목적 법칙성’이라는 새 낱말을 만들어, 목표를 향하는 듯한 움직임은 되먹임 장치로 설명하고, 그런 장치가 생겨난 까닭은 자연선택으로 설명하자고 했지¹⁵. 많은 철학자는 심장의 기능이 피를 돌리는 것이라는 말을, 피를 잘 돌린 조상들의 심장이 걸려져 남았다는 과거의 역사로 풀어 읽는단다¹⁵. 앞을 내다본 계획이 아니라 지나온 길에서 걸려진 결과라는 거야. 하지만 그렇게 풀어도 ‘목적’이라는 말이 깨끗이 지워지는지는 철학자들 사이에서도 아직 논쟁이란다¹⁵.

원자는 살아 있지 않은데

하린 그런데 선생님, 아까 콩이랑 두부가 같은 원자로 되어 있다고 하셨잖아요. 탄소 원자 하나는 살아 있지 않잖아요. 살아 있지 않은 것을 모아 놓았는데 왜 살아 있는 게 돼요?

도 교수 물리학자 슈뢰딩거가 1944년에 쓴 작은 책 『생명이란 무엇인가』가 바로 그 물음과 씨름했단다¹⁶. 그는 먼저 이렇게 물었어. 살아 있는 몸은 어떻게 허물어지지 않고 버틸까? 답은 먹고, 마시고, 숨 쉬는 것, 곧 물질대사지.

그런데 그는 물질을 바꾸는 것 자체가 핵심일 수는 없다고 했어. 질소 원자 하나는 같은 종류의 다른 질소 원자와 조금도 다르지 않으니, 원자를 맞바꾼다고 얻을 게 없다는 거야¹⁶.

태오 그럼 에너지를 먹는 거 아니에요? 음식 칼로리요.

도 교수 슈뢰딩거도 그 답을 검토했단다. 다 자란 몸은 에너지도 들어온 만큼 나가니, 그냥 맞바꾸기만으로는 설명이 안 된다고 했지. 그가 내놓은 답이 유명한 문장이야. “생물이 먹고 사는 것은 음의 엔트로피다(What an organism feeds upon is negative entropy).”¹⁶

하린 엔트로피가 뭐예요?

도 교수 엔트로피는 흐트러진 정도를 재는 양이란단다. 슈뢰딩거가 든 예가 마침 우리 부엌에 있어. 맹물 컵과 설탕물 컵을 닫힌 상자에 두면, 시간이 지나 설탕이 모든 물에 고르게 퍼진다. 설탕 분자와 물 분자가 뒤섞이는 방법의 수가 늘어나는 쪽, 곧 엔트로피가 커지는 쪽으로 가는 거지¹⁶. 13장에서 향기가 퍼지는 확산을 배울 때 이 이야기를 다시 만난단다. 닫힌 계에서는 엔트로피가 저절로 줄지 않는다는 것이 열역학 제2법칙이고, 슈뢰딩거는 엔트로피가 가장 커진 평형 상태가 곧 죽음이라고 했어¹⁶.

태오 그럼 생물은 제2법칙을 어기는 거예요? 몸은 저렇게 질서 있게 짜여 있잖아요.

도 교수 어기지 않는단다. 몸은 닫힌 계가 아니라 열린 계거든. 슈뢰딩거의 말을 풀면, 생물은 살면서 어쩔 수 없이 만드는 엔트로피를 바깥으로 내보내고, 주변에서 ‘질서를 빨아들여’ 제 몸의 질서를 높게 유지한다¹⁶. 동물에게 그 질서는 잘 짜인 유기물, 곧 음식이고, 식물에게는 햇빛이라고 했지. 그리고 쓰고 난 질서는 훨씬 허물어진 꼴로 내놓는다고 했어¹⁶. 그러니 몸 밖까지 합해 세면 엔트로피는 줄지 않는단다. 21장의 광합성과 22장의 세포 호흡이 그 흐름의 실제 모습이야.

하린 그러니까 생명은 질서를 ‘가진’ 게 아니라 질서를 ‘계속 끌어오는’ 거라는 거죠?

도 교수 그렇게 보면 된단다.

태오 그런데 질서로 치면 조금 결정이 더 질서 있지 않아요? 원자가 바둑판처럼 똑같이 늘어서 있잖아요.

도 교수 슈뢰딩거도 바로 그 비교를 했단다. 결정은 같은 무늬가 끝없이 되풀이되는 벽지 같은 질서고, 생명을 실어 나르는 물질은 라파엘로의 태피스트리처럼 되풀이 없이 뜻 있는 무늬를 짜 넣은 ‘비주기적 결정’일 거라고 했지¹⁶. 물리학이 잘 아는 질서는 수많은 원자의 무질서한 움직임이 평균을 내어 생기는 ‘무질서에서 나온 질서’인데, 생명은 유전 물질의 질서가 다음 세대의 질서를 낳는 ‘질서에서 나온 질서’를 따르는 것처럼 보인다고도 했어¹⁶. 그 책이 나오고 9년 뒤인 1953년, 유전 물질인 디옥시리보핵산(DNA, deoxyribonucleic acid)이 두 가닥이 감긴 이중 나선이라는 모형이 나왔단다¹⁷. DNA는 유전 정보를 담은 긴 사슬 분자로, 24장에서 자세히 배운다. 슈뢰딩거가 말한 뜻 있는 무늬가 바로 그 염기의 순서였던 셈이지.

하린 벽지와 수놓은 그림이라니, 결정과 생명의 차이가 확 느껴져요.

도 교수 여기서 내 생각을 하나 말해 볼게. 엔트로피는 허공에 떠 있는 무엇이 아니라, 원자와 분자가 놓일 수 있는 방법이 얼마나 많은지로 정해지는 양이란단다. 슈뢰딩거가 쓴 식에서도 엔트로피는 그 물체를 이루는 원자들이 얼마나 흐트러져 있는지로 정해지지¹⁶. 그러니 셀 원자가 하나도 없으면 엔트로피라는 말도 할 게 없어. 엔트로피는 물질이 있어야 비로소 뜻을 갖는 개념이라는 게 내 생각이야.

태오 그런데 식물은 햇빛에서 음의 엔트로피를 얻는다면서요. 햇빛은 원자가 아니잖아요.

도 교수 좋은 반론이다. 맞아, 슈뢰딩거가 식물의 음의 엔트로피 공급원으로 햇빛을 꼽았듯, 물리학은 빛에도 엔트로피를 매긴단다¹⁶. 그러니 정직하게 고쳐 말하마. 엔트로피는 물질과 에너지가 있는 곳에서만 뜻을 갖는다고. 그리고 하나 더. 슈뢰딩거 자신도 책 뒤 주석에서, 동료 물리학자들의 반대가 있었고 물리학자만 읽는 책이었다면 ‘자유 에너지’로 설명했을 거라고 털어놓았단다¹⁶. 위대한 과학자의 문장도 한 번에 완성되지는 않았다는 뜻이지.

태오 그런데 선생님, DNA도 결국 탄소·수소·산소·질소·인 원자로 된 분자잖아요. 그럼 ‘정보’는 원자 어디에 들어 있어요? 원자를 아무리 들여다봐도 글자는 안 보일 것 같은데요.

도 교수 철학자들도 똑같이 묻는단다. 분자생물학은 암호, 베끼기, 교정, 프로그램처럼 정보의 말을 아주 많이 쓰는데, 그 정보가 무엇인지, 그저

비유인지 정말 있는 무엇인지는 아직 논쟁 중이라고 스탠퍼드 철학 백과는 정리하지¹⁸. 가장 가벼운 뜻은 ‘늘 함께 간다’는 상관이야. 나이트가 나무의 나이를 알려 주듯이. 그런데 이런 뜻의 정보는 어디에나 있어서, 어떤 학자들은 도토리의 유전체가 싹 트는 것보다 썩는 것과 더 잘 맞아떨어진다고 꼬집었단다¹⁸.

미숙 맞아요. 목 쭈려고 도토리를 주워 오면 절반은 벌레 먹고 썩어 있어요.

하린 그럼 서열이 같으면 같은 생명이예요? 염기 순서를 그대로 베끼면요?

도 교수 두 가지 이야기로 답해 보마. 일란성 쌍둥이는 거의 같은 서열을 갖고 태어나지만 분명히 두 사람이지. 쌍둥이 연구 50년치를 모아 보니 사람들 사이 차이에서 유전이 맡는 몫은 평균 절반쯤이었단다¹⁹. 또 조금 뒤에 이야기할 최소 세포에서도, 설계해 합성한 유전체는 이미 살아 있는 세포의 세포질에 옮겨 넣어야만 돌아갔어²⁰. 서열은 악보 같고, 연주하려면 악기와 연주자가 있어야 하는 셈이지. 그래서 막이나 세포 속 구조물처럼 부모에서 자식으로 함께 넘어가는 것이 많으니 DNA만 특별 대접하지 말자는 학자들이 있고, 그래도 핵산은 단백질을 찍어 내는 본이 된다는 점에서 남다르다고 맞서는 학자들이 있단다¹⁸.

태오 그럼 정보는 물질이예요, 아니예요?

도 교수 내 생각을 말하마. 염기 하나 없이 떠다니는 유전 정보를 본 사람은 없으니, 정보도 물질이 있어야 뜻을 갖는다는 데까지는 엔트로피와 같아. 그런데 같은 원자를 다른 순서로 늘어놓으면 다른 정보가 되니, 정보는 원자 하나하나가 아니라 원자의 배열과 그것을 읽어 내는 세포의 짜임 사이에 있다고 나는 본단다. 그 ‘사이’가 정확히 무엇인지는 철학자들도 아직 합의하지 못했어¹⁸.

죽으면 무엇이 사라질까

미숙 그러면 죽는다는 건 뭐예요? 어릴 적 키우던 강아지가 죽었을 때, 몸은 그대로 있는데 무언가가 빠져나간 것 같았어요.

도 교수 그 ‘무언가’를 묻는 게 과학과 철학이 함께 붙든 물음입니다. 원자는 하나도 사라지지 않았지요. 흔히 쓰이는 정의 하나는 ‘유기체 전체의 통합된 기능이 되돌릴 수 없이 멈추는 것’입니다²¹. 원자가 아니라 원자들이 함께 일하던 짜임과 흐름이 멈추는 거예요. 그러면 몸은 슈뢰딩거가 말한 평형, 엔트로피가 커지는 쪽으로 허물어지기 시작합니다

16,21. 철학자들 사이에서는 그 허물어짐이 서서히 진행되니 죽음이
한순간의 사건인지 긴 과정인지를 두고 아직도 논쟁이 있어요²¹.

태오 그럼 살아 있는 동안에는 원자가 그대로 있어요?

도 교수 오히려 반대란다. 1935년 쉰하이머는 무거운 수소로 표시한 물질을 먹여
몸속에서 어디로 가는지 따라갔어²². 그랬더니 몸을 이루는 물질이 쉬지
않고 분해되고 새로 만들어지고 있었지. 이것을 ‘몸 구성 성분의 동적
상태’라 불렀단다²³. 세포 단위로 세어 봐도 사람 몸에서는 하루에 약
3,300억 개의 세포, 무게로는 약 80 g이 새것으로 바뀐다는 계산이 있어
²⁴. 내가 늘 하는 말이 있지. 살아 있는 것은 늘 바쁘다.

하린 그럼 일 년 전의 저랑 지금의 저는 원자가 꽤 다르겠네요? 그런데도 저는
저잖아요.

도 교수 모든 세포가 다 바뀌는 건 아니란다. 핵실험 때 대기 속에 늘었다가 줄어든
탄소-14가 DNA에 새겨진 것을 이용해 세포의 나이를 쟀 연구가 있어.
DNA는 세포가 새로 생길 때 만들어지니 그 속 탄소가 태어난 해를 알려
주지. 어른 대뇌 겉질에서 신경이 아닌 세포는 바뀌지만, 뒤통수엽(시각을
맡는 곳)의 신경 세포는 그 사람과 나이가 같았단다²⁵. 신경 세포라는 집은
평생 가도, 그 속 분자들은 쉰하이머가 본 것처럼 드나들고 있다고 보는
거지²³.

미숙 우리 ‘소백두부’도 그래요. 간판은 처음 그대로인데, 콩 불리는 사람도
맷돌도 몇 번이나 바뀌었어요. 그래도 손님들은 소백두부 맛이
그대로라고 해요. 이어지는 건 사람이 아니라 일하는 방식인가 봐요.

도 교수 아주 좋은 비유입니다. 이천 년도 더 전 그리스 사람들도 같은 고민을
했어요. 플루타르코스의 기록을 보면, 아테네 사람들은 영웅 테세우스가
타고 돌아온 배를 오래 보존하면서 낡은 목재를 떼어 내고 새 목재를 갈아
넣었는데, 그래서 이 배는 같은 배라는 철학자들과 아니라는 철학자들이
맞서는 본보기가 되었답니다²⁶.

태오 그건 같은 배죠. 이름도 자리도 그대로잖아요.

도 교수 그럼 이건 어떨까. 누가 떼어 낸 옛 널빤지를 몽땅 모아 똑같이 다시
짚다고 하자. 이제 ‘원래 배’의 후보가 둘이야. 둘 다 원래 배라면 서로
다른 두 배가 같은 배라는 이상한 말이 되지. 오늘날 철학에서도 이것은
시간을 넘어 같은 것으로 남는다는 게 무슨 뜻인지를 묻는 대표
수수께끼로 다뤄진단다²⁷.

하린 그럼 제 몸에서 빠져나간 원자를 다 모아서 사람을 만들면, 그게 저예요?

도 교수 그런 실험은 할 수도 없고, 과학이 답을 갖고 있지도 않단다. 다만 몸에서는 원자가 쉬지 않고 드나들며 짜임만 이어진다는 것은 측정된 사실이에요²³. 그러니 생명은 원자가 아니라 원자가 지나가는 짜임에 있다고 말할 수 있겠지요. 다만 그 짜임이 왜 ‘나’라는 느낌까지 갖는지는 조금 뒤에 따로 묻기로 해요.

처음 생명은 어떻게 생겼을까

태오 그럼 그 짜임은 처음에 어떻게 생겼어요? 원자들이 저절로 모여서 세포가 됐다는 건 너무 운이 좋은 거 같은데요.

도 교수 생명의 기원은 과학이 가장 모르는 영역 가운데 하나란다. 그래서 확인된 것과 가설을 나눠서 말할게. 오늘날 세포에서 정보는 DNA에, 일은 단백질에 맡겨져 있어. 그런데 DNA를 베끼려면 단백질 효소가 필요하고, 효소를 만들려면 DNA의 정보가 필요하지. 닭이 먼저냐 달걀이 먼저냐 같은 문제야.

하린 그럼 둘 다 아닌 게 먼저였어요?

도 교수 그런 생각이 ‘RNA 세계’ 가설이란단다. 리보핵산(RNA, ribonucleic acid)은 DNA의 사촌 격인 핵산으로, 정보를 담으면서 효소처럼 반응을 돕기도 해. 1986년 길버트는 RNA가 정보와 촉매 일을 함께 하던 세계가 DNA와 단백질보다 먼저 있었다는 생각에 ‘RNA 세계’라는 이름을 붙였단다²⁸. 6장에서 핵산을 배울 때 다시 만나게 될 거야.

태오 그게 실험으로 확인됐어요?

도 교수 조각조각 확인되고 있지. 2009년에는 원시 지구에 있었을 법한 단순한 물질에서 RNA의 부품인 뉴클레오타이드 일부를 만드는 길이 실험으로 나왔어²⁹. 같은 해 다른 연구진은 서로를 합성해 주는 RNA 효소 두 개가 단백질 없이 약 한 시간마다 두 배씩 스스로 불어나게 만들었고, 경쟁을 불이자 재조합으로 생긴 새 복제자가 늘어나 무리를 차지했다³⁰. 작은 다윈식 진화를 시험관에서 본 셈이지. 하지만 생명이 정말 RNA로 시작했는지, 그 RNA가 원시 지구에서 어떻게 생겨났는지는 아직 풀리지 않았어³¹.

하린 반대로 지금 생물에서 거슬러 올라갈 수는 없어요? 족보처럼요.

도 교수 그게 마지막 보편 공통 조상(LUCA, last universal common ancestor) 연구란다. 지금 모든 세포 생물의 계통을 거슬러 올라가 만나는 가장 가까운 공통 조상을 유전자 비교로 그려 보는 거야. 2016년 연구는 원핵생물 유전자 610만 개를 비교해 LUCA까지 거슬러 가는 단백질 무리 355개를 찾았고, LUCA가 산소 없이 수소와 이산화 탄소, 철이 많은 뜨거운 열수 환경에 살았다고 그렸어³². 2024년 연구는 LUCA가 약 42억 년 전에 살았고, 단백질 약 2,600개를 만드는 유전체를 가져 오늘날 원핵생물과 맛먹을 만큼 복잡했으며, 이미 다른 미생물들과 생태계를 이루고 있었다고 추정했단다³³.

태오 42억 년 전에 벌써 그만큼 복잡했으면, 그 전에 훨씬 오래 뭔가 있었다는 거네요.

도 교수 그게 내가 읽는 방식이야. LUCA는 첫 생명이 아니라 살아남은 가지들이 만나는 마디란다. 그리고 그 나이와 대사는 지금도 활발히 논쟁 중이라고 연구자들 스스로 쓰고 있지³³. 만들어 보는 쪽에서도 마찬가지야. 2016년 미국 연구진은 유전체를 설계해 합성하면서 473개 유전자만 남긴 최소 세포 ‘syn3.0’을 만들었는데, 그중 149개는 무슨 일을 하는지 몰랐단다²⁰. 게다가 합성한 유전체는 이미 살아 있는 세포의 세포질에 옮겨 넣어야 돌아갔어²⁰. 이 이야기는 12장 끝에서 자세히 보자꾸나. 우리는 아직 생명 없는 재료만으로 세포 하나를 처음부터 만들지 못한다.

생명을 재는 새 잣대가 있을까

하린 그럼 화성 같은 데서 생명을 찾을 때는 어떻게 해요? 거기 생명은 DNA가 없을 수도 있잖아요.

도 교수 바로 그게 탐사하는 사람들의 고민이란다. 외계 생명 찾기가 어려운 까닭은 무엇이 생명만의 흔적인지 모르기 때문이라고 연구자들이 솔직히 쓰고 있어³⁴. 그래서 특정 분자 대신 ‘복잡함’을 재자는 제안이 나왔지. 작은 조각에서 시작해, 한 번 만든 조각은 다시 써도 된다고 할 때 분자 하나를 완성하려면 적어도 몇 번 이어 붙여야 하는지를 세는 거야. 이것을 분자 조립 지수라 하는데, 질량 분석이라는 방법으로 실제로 잴 수 있음을 보였고, 이렇게 복잡한 분자가 많이 있으면 생명이 만든 흔적으로 보자고 했단다³⁴.

태오 복잡한 분자는 생물만 만든다는 거예요?

도 교수 그게 그들의 주장의 핵심이지. 생물은 같은 복잡한 분자를 계속 짚어 내니까, 우연히 한 번 생긴 것과 다르다는 거야. 2023년에는 이 생각을 넓혀, 물체를 ‘그것이 만들어질 수 있었던 역사’로 정의하고, 한 무리의 물체를 만드는 데 필요했던 원인과 결과의 이어짐을 ‘조립도’라는 수로 재어 선택과 진화를 물리의 언어로 다루겠다는 ‘조립 이론’이 나왔단다³⁵. 생명을 정보와 역사의 언어로 정의하려는 시도지.

하린 그럼 이제 생명을 짚 수 있는 거네요?

도 교수 서두르면 안 된단다. 이 논문은 큰 논쟁을 불렀어. 한 비판자는 쓸모는 있지만 주장만큼 새롭지 않고, 진화나 자연선택을 새로 설명해 주지도 않으며, 발표가 과장되었다고 썼지³⁶. 지금은 시험대에 오른 가설이라고 보는 게 맞아. NASA도 생명의 정의는 과학자와 철학자를 오랫동안 피해 왔다고 적고 있단다¹¹. 생명 탐지 장비를 만들려면 ‘무엇을 찾을지’부터 정해야 하는데, 그게 바로 아직 합의되지 않은 생명의 정의인 셈이야¹³.

태오 그럼 지금까지 지구 밖에서 찾은 건 하나도 없어요?

도 교수 생명은 아직 하나도 찾지 못했어. 다만 생명이 살 만한 조건은 하나씩 확인되고 있지. 토성의 달 엔셀라두스는 얼음 껍질 밑에 바다가 있는데, 2015년 카시니 탐사선이 그 바다에서 뿜어 나오는 물기둥을 뚫고 지나가며 수소 분자를 찾았단다. 바닷물이 암석과 뜨겁게 반응하고 있다는 증거로, 지구 깊은 바다의 열수구처럼 화학 에너지가 나올 수 있다는 뜻이야³⁷. 2023년에는 같은 탐사선의 자료에서, 생명에 꼭 필요한 원소 가운데 가장 귀한 인이 인산염 꼴로 지구 바다보다 적어도 100배 진하게 들어 있다고 추정했지³⁸.

하린 와, 그럼 거기 생물이 있겠네요!

도 교수 살 만하다는 것과 산다는 것은 다르단다. 2025년 화성의 퍼서비어런스 탐사차는 예제로 충돌구의 진흙암에서 유기 탄소와 함께 철·인·황 광물이 반응한 자국을 찾았는데, 연구진은 그것이 생물이 만든 것인지 아닌지는 시료를 지구로 가져와 정밀하게 재야 가릴 수 있다고 썼어³⁹. 생명의 흔적이라고 말하려면 생명 없이 그런 것이 생길 모든 길을 지워야 하니, 그 판정은 늘 열려 있을 수밖에 없다는 지적도 있지⁴⁰.

태오 그럼 DNA 말고 전혀 다른 화학으로 사는 생명도 있을 수 있어요?

도 교수 그건 아직 가설이란다. 2011년에 인 대신 비소를 쓰는 세균을 찾았다는 발표가 있었지만, 다음 해 다른 연구진이 그 세균도 자라려면 인산이

필요하다는 것을 보였어^{41,42}. 다른 화학의 생명은 상상할 수는 있어도 아직 본 사람이 없단다. 표본이 여전히 하나뿐인 거지.

느낌은 어디서 올까

태오 선생님, 하나만 더요. 제 뇌도 원자로 되어 있잖아요. 그 원자는 그냥 탄소고 산소인데, 왜 저는 아프고, 빨간색이 빨갱게 느껴지고, 지금 궁금하다는 느낌이 있어요?

도 교수 그게 생명과학의 맨 끝에 놓인 물음이란다. 철학자 차머스는 1995년 의식의 문제를 둘로 나눴어⁴³. 자극을 구별하고, 정보를 모으고, 말로 보고하고, 주의를 기울이는 일은 뇌의 기능이니 언젠가 신경 과학이 설명할 ‘쉬운 문제’라 했지. 쉽다는 건 방법이 보인다는 뜻이야. 그런데 그런 기능을 다 설명해도 남는 것, 곧 왜 그 처리에 ‘겪는 느낌’이 따르는지를 ‘어려운 문제’라고 불렀단다⁴³. 그는 다른 철학자의 말을 빌려, 의식이 있는 생물이 된다는 것에는 ‘그것이 어떠하다’는 무엇이 있다고 했지⁴³.

하린 그럼 그 어려운 문제는 지금 어디까지 풀렸어요?

도 교수 이론은 여럿이고, 서로 겨루는 중이란다. 2025년에 나온 연구가 좋은 예야. 대표적인 두 이론의 지지자들이 실험 전에 각자의 예측을 미리 공개해 두고, 중립적인 연구진이 256명의 뇌 활동을 여러 방법으로 재어 맞대결을 시켰어⁴⁴. 한 이론인 통합 정보 이론은 신경망이 나눌 수 없게 하나로 엮인 정보로 스스로에게 영향을 미치는 힘이 곧 의식이고 그 자리는 주로 대뇌 뒤쪽이라고 보았고, 다른 이론인 전역 신경 작업 공간 이론은 정보가 이마엽을 중심으로 뇌 전체에 ‘방송’되며 증폭될 때 의식이 생긴다고 보았지⁴⁴.

태오 그래서 누가 이겼어요?

도 교수 둘 다 일부 예측은 맞았지만, 둘 다 핵심 주장에 큰 도전을 받았단다. 뒤쪽 피질 안에서 오래 이어지는 동기화가 보이지 않았고, 이마엽에서는 기대한 반응이 자극이 끝날 때 대체로 나타나지 않았지⁴⁴. 누가 이겼는지보다, 의식을 실험으로 겨루게 했다는 것이 큰 걸음이야. 하지만 이것도 ‘뇌의 어느 활동이 의식과 함께 가는가’를 묻는 연구지, 원자들의 움직임에 왜 느낌이 따르는지에 답한 건 아니란다. 이 책에서는 뇌를 깊이 다루지 않으니, 이 물음은 너희가 들고 가야 할 숙제로 남겨 두마.

하린 그러니까 ‘나’라는 건 원자도 아니고, 아직 과학이 모르는 무언가라는 거죠?

도 교수 원자가 아니라는 건 오늘 본 대로 꽤 분명해. 원자는 드나드는데 나는 이어지니까. 그 이어지는 짜임에 왜 느낌이 깃드는지는, 그래, 모른다.

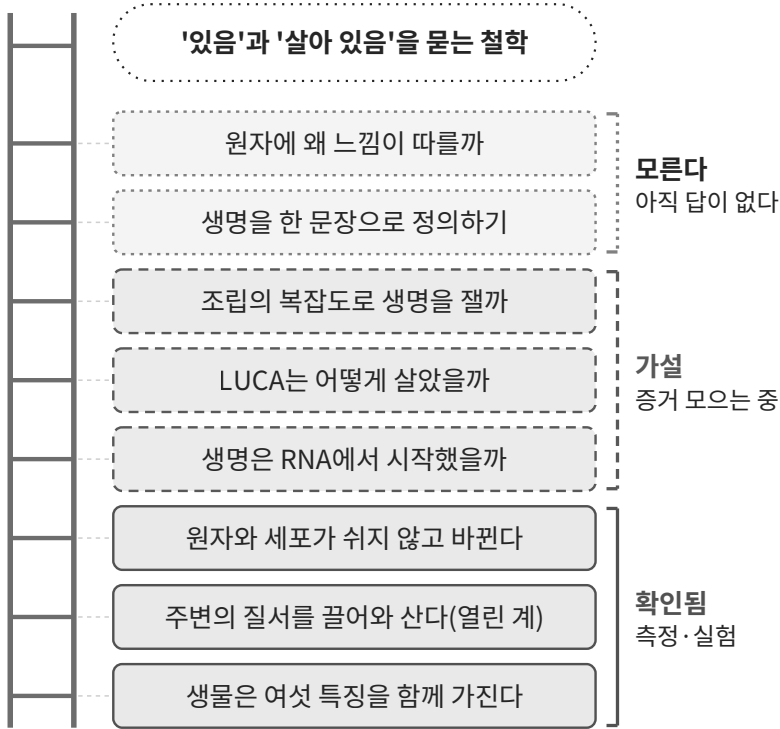
하린 그럼 기억은요? 원자가 바뀌어도 어릴 때 기억은 남아 있잖아요. 테세우스의 배와 달리 저는 제가 저라는 걸 기억으로 알아요.

도 교수 많은 철학자도 먼저 그쪽에 끌린다. 기억 같은 마음의 이어짐이 ‘나’를 잇는다는 생각이지. 그런데 이것도 반례가 있어. 어릴 때 일을 기억하는 중년의 나와, 중년은 기억하지만 어린 시절은 다 잊은 늙은 나를 떠올려 보렴. 기억은 고리마다 이어지지만 처음과 끝은 이어지지 않는데, ‘같은 사람’이라는 말은 처음과 끝도 같아야 하거든⁴⁵. 그래서 우리는 결국 몸이라는 생물체로서 이어진다고 보는 철학자들도 있지⁴⁵. 어느 쪽이든 그 이어짐이 왜 안에서 겪는 느낌을 갖는지는 차머스의 어려운 문제로 되돌아온다⁴³. 테세우스의 배에도 답이 갈리는데, ‘나’에 대해서는 더 말할 것도 없어.

모른다고 말하는 용기

미숙 듣다 보니 과학이 모르는 게 참 많네요. 그래도 교과서에는 다 아는 것처럼 쓰여 있잖아요.

도 교수 그래서 오늘 이 이야기를 꼭 하고 싶었습니다. 그림 1-7은 우리가 오늘 오른 물음의 사다리예요. 아래쪽, 생물이 여섯 가지 특징을 가진다는 것, 생물이 열역학 법칙을 지키며 주변의 질서를 끌어와 산다는 것, 몸의 원자와 세포가 쉬지 않고 바뀐다는 것은 측정과 실험으로 확인되었습니다^{1,16,23,24}. 그 위, 생명이 RNA에서 시작했는지, LUCA가 어떻게 살았는지, 조립의 복잡도로 생명을 썰 수 있는지는 증거를 모으는 중인 가설이에요^{31,33,36}. 그리고 맨 위, 생명을 한 문장으로 정의하는 일, 원자의 움직임에 왜 느낌이 따르는지는 아직 모릅니다^{13,43}.



[그림 1-7] 물음의 사다리 아래 세 칸(생명의 특징, 주변의 질서를 끌어와 사는 열린 계, 쉬지 않는 원자 교체)은 측정과 실험으로 확인되었고, 가운데 세 칸(RNA 세계, LUCA의 모습, 조립 복잡도로 생명 재기)은 증거를 모으는 가설이며, 맨 위 두 칸(생명의 정의, 느낌은 왜 있나)은 아직 모른다. 그 위의 ‘있음’을 묻는 철학과 이어진다

태오 그럼 맨 위 칸은 과학이 아니라 철학이네요?

도 교수 경계가 딱 나뉘지는 않는단다. ‘살아 있다’를 묻다 보면 결국 ‘있다’는 게 무엇인지, 원자가 모여 있는 것과 그 모임이 살아 있는 것은 어떻게 다른지를 묻게 돼. 슈뢰딩거가 물리학자이면서 이런 책을 쓴 것도, 차머스가 철학자이면서 신경 과학이 풀 수 있는 문제와 그렇지 않은 문제를 가르려 한 것도 그 때문이지^{16,43}. 생명 과학은 끝에 가면 ‘있음’과 ‘살아 있음’을 묻는 철학과 만난단다.

하린 그런데 모르는 게 이렇게 많으면, 과학을 왜 해요?

도 교수 모르는 곳이 어디인지 정확히 아는 게 과학이 하는 일이기 때문이란단다. 모르는 걸 아는 척 늘어놓으면, 과학은 웃을 입을 척하는 별거벗은

임금님이 되고 말아. 정직한 과학자는 ‘여기까지는 재 보았고, 여기서부터는 모른다’고 선을 긋는단다. 그 선이 있어야 다음 사람이 어디를 파야 할지 알지.

미숙 텃밭 같네요. 배추씨를 심으면 싹이 트는 건 해마다 보니까 알아요. 마른 씨가 물을 만나면 멈췄던 일을 다시 시작한다는 건 아까 배웠지만, 그 일이 왜 ‘살아 있음’이 되는지는 아직 모른다면서요. 그래도 저는 해마다 씨를 심고, 가을이면 그 배추로 김장을 해요.

도교수 그 마음이 과학의 마음입니다. 모르면서도 들여다보고, 재 보고, 기록하는 거지요. 올해 우리는 이 사다리의 아래 칸부터 차근차근 오를 거예요. 7장에서 세포를 보고, 16장과 20장에서 몸이 바쁘게 일하는 화학을, 31장에서 진화를 배우고, 45장 김장 날에는 원자에서 지구까지를 한 줄로 이어 볼 거예요. 그리고 그날에도 맨 위 칸은 여전히 물음으로 남아 있을 거예요.

하린이 관찰 일기장 첫 장에 큰 글씨로 적었다. ‘살아 있다는 것은 무엇일까? — 아직 모름. 계속 묻기.’

오늘의 정리

- 생명의 특징: 세포로 되어 있음, 물질대사, 자극에 대한 반응과 **항상성**, 생식과 유전, 발생과 성장, 적응과 진화(그림 1-1).
- 특징 하나만으로 판단하지 않고 여러 특징을 함께 본다. 마른 씨앗도 살아 있다.
- 콩과 두부는 같은 원자로 되어 있다. 생명은 원자의 종류가 아니라 짜임과 활동에서 나온다.
- 크기의 사다리: 원자 약 0.1 nm → 물 분자 약 0.3 nm → 단백질 몇 nm → 바이러스 약 100 nm → 세균 1~5 μm → 동물 세포 10~30 μm.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 생명의 특징 가운데 ‘항상성’의 예로 알맞은 것은?
 - ① 짙신벌레가 둘로 나뉘어 두 마리가 된다.
 - ② 올챙이가 자라 개구리가 된다.
 - ③ 더운 날 땀을 흘려 체온을 일정하게 지킨다.
 - ④ 콩이 싹 트고 떡잎을 낸다.
 - ⑤ 부모의 쌍꺼풀이 자녀에게 전해진다.
2. 세균의 길이를 $2\ \mu\text{m}$, 원자의 크기를 $0.1\ \text{nm}$ 라 하자. 세균의 길이는 원자의 몇 배인지 단위를 맞추어 계산하시오.

과학의 최전선 바이러스는 살아 있을까

여기까지 밝혀졌다 — 바이러스는 세포가 아니며 숙주 세포 안에서만 붙어난다. 스탠리는 담배 모자이크 바이러스를 결정으로 뽑아냈고¹⁰, 2003년에는 지름이 약 $400\ \text{nm}$ 로 광학 현미경에 보일 만큼 큰 바이러스도 발견되었다⁴⁶. **아직 모른다** — 스스로 물질대사를 하지 못하는 바이러스를 생명의 계통수에 넣어야 하는지를 두고 반론과 재반론이 오갔다¹². 광학 현미경에 보일 만큼 큰 바이러스가 나오면서, 크기만으로는 바이러스와 세포를 가릴 수 없다는 것도 분명해졌다⁴⁶. **가설과 연구** — 한 가지 잣대 대신 유전 정보, 막으로 둘러싸기, 에너지 쓰기 같은 여러 기동을 함께 보자는 제안이 있다³. 거대 바이러스처럼 경계에 선 존재가 더 발견될수록 이 물음은 더 날카로워질 것이다.

이 장의 출처

1. Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). Campbell biology (12th ed.). Pearson.
2. Sender, R., Fuchs, S., & Milo, R. (2016). Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body. PLOS Biology, 14(8), e1002533. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002533>
3. Koshland, D. E. (2002). The Seven Pillars of Life. Science, 295(5563), 2215–2216. <https://doi.org/10.1126/science.1068489>
4. Bewley, J. D. (1997). Seed Germination and Dormancy. The Plant Cell, 1055–1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>
5. Pólya, G. (1945). How to solve it. Princeton University Press.
6. Milo, R., & Phillips, R. (2015). Cell Biology by the Numbers. Garland Science. <https://doi.org/10.1201/9780429258770>
7. Milo, R., Jorgensen, P., Moran, U., Weber, G., & Springer, M. (2010). BioNumbers—the database of key numbers in molecular and cell biology. Nucleic Acids Research, 38(suppl_1), D750–D753. <https://doi.org/10.1093/nar/gkp889>

8. Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>
9. 교육부. (2022). 과학과 교육과정 (교육부 고시 제 2022-33호 [별책 9]). 교육부.
10. Stanley, W. M. (1935). Isolation of a Crystalline Protein Possessing the Properties of Tobacco-Mosaic Virus. *Science*, 81(2113), 644–645. <https://doi.org/10.1126/science.81.2113.644>
11. NASA Astrobiology Program. (2026). About life detection. National Aeronautics and Space Administration. Retrieved October 1, 2026, from <https://astrobiology.nasa.gov/research/life-detection/about/>
12. Moreira, D., & López-García, P. (2009). Ten reasons to exclude viruses from the tree of life. *Nature Reviews Microbiology*, 7(4), 306–311. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2108>
13. Benner, S. A. (2010). Defining Life. *Astrobiology*, 10(10), 1021–1030. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0524>
14. Grant, P. R., & Grant, B. R. (2002). Unpredictable Evolution in a 30-Year Study of Darwin's Finches. *Science*, 296(5568), 707–711. <https://doi.org/10.1126/science.1070315>
15. Allen, C., & Neal, J. (2026). Teleological notions in biology. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/teleology-biology/>
16. Schrödinger, E. (1944). What is life? The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press. (1962 reprint, Internet Archive: <https://archive.org/details/what-is-life-erwin-schrodinger>)
17. WATSON, J. D., & CRICK, F. H. C. (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature*, 171(4356), 737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
18. Artiga, M. (2024). Biological information. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/information-biological/>
19. Polderman, T. J. C., Benyamin, B., de Leeuw, C. A., Sullivan, P. F., van Bochoven, A., Visscher, P. M., & Posthuma, D. (2015). Meta-analysis of the heritability of human traits based on fifty years of twin studies. *Nature Genetics*, 47(7), 702–709. <https://doi.org/10.1038/ng.3285>
20. Hutchison, C. A., Chuang, R., Noskov, V. N., Assad-Garcia, N., Deerinck, T. J., Ellisman, M. H., Gill, J., Kannan, K., Karas, B. J., Ma, L., Pelletier, J. F., Qi, Z., Richter, R. A., Strychalski, E. A., Sun, L., Suzuki, Y., Tsvetanova, B., Wise, K. S., Smith, H. O., . . . Venter, J. C. (2016). Design and synthesis of a minimal bacterial genome. *Science*, 351(6280), aad6253. <https://doi.org/10.1126/science.aad6253>
21. Omelianchuk, A., & DeGrazia, D. (2026). The definition of death. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/death-definition/>
22. Schoenheimer, R., & Rittenberg, D. (1935). Deuterium as an Indicator in the Study of Intermediary Metabolism. *Science*, 82(2120), 156–157. <https://doi.org/10.1126/science.82.2120.156>
23. Guggenheim, K. Y. (1991). Rudolf Schoenheimer and the Concept of the Dynamic State of Body Constituents. *The Journal of Nutrition*, 121(11), 1701–1704. <https://doi.org/10.1093/jn/121.11.1701>
24. Sender, R., & Milo, R. (2021). The distribution of cellular turnover in the human body. *Nature Medicine*, 27(1), 45–48. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-01182-9>
25. Spalding, K. L., Bhardwaj, R. D., Buchholz, B. A., Druid, H., & Frisén, J. (2005). Retrospective Birth Dating of Cells in Humans. *Cell*, 122(1), 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2005.04.028>
26. Plutarch. (1914). Theseus (B. Perrin, Trans.). In *Plutarch's lives* (Vol. 1, Loeb Classical Library). Harvard University Press. LacusCurtius: https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Plutarch/Lives/Theseus*.html
27. Gallois, A., & Kurtsal, I. (2026). Identity over time. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/identity-time/>

28. Gilbert, W. (1986). Origin of life: The RNA world. *Nature*, 319(6055), 618–618. <https://doi.org/10.1038/319618a0>
29. Powner, M. W., Gerland, B., & Sutherland, J. D. (2009). Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions. *Nature*, 459(7244), 239–242. <https://doi.org/10.1038/nature08013>
30. Lincoln, T. A., & Joyce, G. F. (2009). Self-Sustained Replication of an RNA Enzyme. *Science*, 323(5918), 1229–1232. <https://doi.org/10.1126/science.1167856>
31. Robertson, M. P., & Joyce, G. F. (2012). The Origins of the RNA World. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 4(5), a003608–a003608. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a003608>
32. Weiss, M. C., Sousa, F. L., Mrnjavac, N., Neukirchen, S., Roettger, M., Nelson-Sathi, S., & Martin, W. F. (2016). The physiology and habitat of the last universal common ancestor. *Nature Microbiology*, 1(9), 16116. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.116>
33. Moody, E. R. R., Álvarez-Carretero, S., Mahendrarajah, T. A., Clark, J. W., Betts, H. C., Dombrowski, N., Szánthó, L. L., Boyle, R. A., Daines, S., Chen, X., Lane, N., Yang, Z., Shields, G. A., Szöllősi, G. J., Spang, A., Pisani, D., Williams, T. A., Lenton, T. M., & Donoghue, P. C. J. (2024). The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system. *Nature Ecology & Evolution*, 8(9), 1654–1666. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02461-1>
34. Marshall, S. M., Mathis, C., Carrick, E., Keenan, G., Cooper, G. J. T., Graham, H., Craven, M., Gromski, P. S., Moore, D. G., Walker, S. I., & Cronin, L. (2021). Identifying molecules as biosignatures with assembly theory and mass spectrometry. *Nature Communications*, 12(1), 3033. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23258-x>
35. Sharma, A., Czégel, D., Lachmann, M., Kempes, C. P., Walker, S. I., & Cronin, L. (2023). Assembly theory explains and quantifies selection and evolution. *Nature*, 622(7982), 321–328. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06600-9>
36. Jaeger, J. (2024). Assembly Theory: What It Does and What It Does Not Do. *Journal of Molecular Evolution*, 92(2), 87–92. <https://doi.org/10.1007/s00239-024-10163-2>
37. Waite, J. H., Glein, C. R., Perryman, R. S., Teolis, B. D., Magee, B. A., Miller, G., Grimes, J., Perry, M. E., Miller, K. E., Bouquet, A., Lunine, J. I., Brockwell, T., & Bolton, S. J. (2017). Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes. *Science*, 356(6334), 155–159. <https://doi.org/10.1126/science.aai8703>
38. Postberg, F., Sekine, Y., Klenner, F., Glein, C. R., Zou, Z., Abel, B., Furuya, K., Hillier, J. K., Khawaja, N., Kempf, S., Noelle, L., Saito, T., Schmidt, J., Shibuya, T., Srama, R., & Tan, S. (2023). Detection of phosphates originating from Enceladus's ocean. *Nature*, 618(7965), 489–493. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05987-9>
39. Hurowitz, J. A., Tice, M. M., Allwood, A. C., Cable, M. L., Hand, K. P., Murphy, A. E., Uckert, K., Bell, J. F., Bosak, T., Broz, A. P., Clavé, E., Cousin, A., Davidoff, S., Dehouck, E., Farley, K. A., Gupta, S., Hamran, S., Hickman-Lewis, K., Johnson, J. R., . . . Wolf, Z. U. (2025). Redox-driven mineral and organic associations in Jezero Crater, Mars. *Nature*, 645(8080), 332–340. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09413-0>
40. Mariscal, C. (2026). Life. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/life/>
41. Wolfe-Simon, F., Blum, J. S., Kulp, T. R., Gordon, G. W., Hoefft, S. E., Pett-Ridge, J., Stolz, J. F., Webb, S. M., Weber, P. K., Davies, P. C. W., Anbar, A. D., & Oremland, R. S. (2011). RETRACTED: A Bacterium That Can Grow by Using Arsenic Instead of Phosphorus. *Science*, 332(6034), 1163–1166. <https://doi.org/10.1126/science.1197258>
42. Erb, T. J., Kiefer, P., Hattendorf, B., Günther, D., & Vorholt, J. A. (2012). GFAJ-1 is an Arsenate-Resistant, Phosphate-Dependent Organism. *Science*, 337(6093), 467–470. <https://doi.org/10.1126/science.1218455>
43. Chalmers, D. J. (1995). Facing up to the problem of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 2(3), 200–219. <https://consc.net/papers/facing.html>

44. Cogitate Consortium, Ferrante, O., Gorska-Klimowska, U., Henin, S., Hirschhorn, R., Khalaf, A., Lepauvre, A., Liu, L., Richter, D., Vidal, Y., Bonacchi, N., Brown, T., Sripad, P., Armendariz, M., Bendtz, K., Ghafari, T., Hetenyi, D., Jeschke, J., Kozma, C., . . . Melloni, L. (2025). Adversarial testing of global neuronal workspace and integrated information theories of consciousness. *Nature*, 642(8066), 133–142. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08888-1>
45. Olson, E. T. (2023). Personal identity. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/identity-personal/>
46. Scola, B. L., Audic, S., Robert, C., Jungang, L., de Lamballerie, X., Drancourt, M., Birtles, R., Claverie, J., & Raoult, D. (2003). A Giant Virus in *Amoebae*. *Science*, 299(5615), 2033–2033. <https://doi.org/10.1126/science.1081867>

02

생명을 이루는 원소 — 탄소·수소·산소·질소·인·황

출발점 원소 앞 권 · 생명의 특징 1장

새 개념 생명의 원소

이어짐 물(생명의 용매) 3장

기본개념 이 장의 개념 9개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

오른쪽 정의를 손이나 종이로 가리고, 단어만 보고 정의를 말해 보자. 막히는 단어는 본문에서 굵은 글씨로 다시 만난다.

1	원소	같은 종류의 원자로만 이루어진 기본 물질.
2	미량 원소	철·아이오딘처럼 아주 적은 양이지만 몸에 꼭 필요한 원소.
3	이온	원자가 전자를 잃거나 얻어 전하를 띤 것.
4	핵융합	가벼운 원자핵들이 합쳐져 더 무거운 원자핵이 되는 반응.
5	원자가 전자	원자의 가장 바깥 전자 껍질에 있어 결합에 쓰이는 전자.
6	공유 결합	두 원자가 전자를 나눠 가지며 이어지는 결합.
7	결합 수	한 원자가 공유 결합으로 이을 수 있는 결합의 수.
8	지각	지구의 겉을 이루는 단단한 땅의 겉부분.
9	질량 비율	전체 질량 가운데 한 성분이 차지하는 몫.

같은 날 오후, 점심으로 미숙이 싸 온 두부조림을 나눠 먹은 뒤였다. 과학방 벽에는 작년에 붙여 둔 주기율표가 그대로 걸려 있었고, 창밖 남한강 위로 햇살이 비껴 들었다. 도 교수가 수첩을 펴고 그 주기율표 앞에 섰다.

도 교수 오전에 콩과 두부가 같은 원자로 되어 있다고 했지? 1장에서 생명은 원자의 종류가 아니라 짜임에서 나온다고 했어. 그럼 오후엔 그 원자들의 이름을 불러 보자. 원자에서 시작해 보자꾸나. 주기율표에는 자연에 있는 원소만 90가지쯤 있어. 우리 몸은 그중 몇 가지로 되어 있을까?

태오 사람 몸은 복잡하니까 절반쯤은 쓰지 않을까요?

도 교수 그럴듯하지만, 뜻밖에 아주 적단다.

몸의 거의 전부는 여섯 원소

도 교수 사람 몸의 질량을 원소별로 나누면 산소가 약 65 %, 탄소가 약 18 %, 수소가 약 10 %, 질소가 약 3 %란다¹. 이 넷만 더해도 96 %야. 여기에 뼈와 이의 칼슘, 인, 그리고 황을 더하면 몸의 거의 전부가 설명되지. 1장 크기의 사다리 맨 아래 칸에 있던 원자 가운데, 생명이 주로 쓰는 것은 그림 2-1의 몇 칸뿐이야.

하린 그러니까 몸의 거의 전부가 C, H, O, N, P, S 여섯 글자라는 거죠? 외우기 쉽게 “췌프스”라고 할래요.

도 교수 좋은 주문이구나. 이 원소들은 몸 안에서 제각기 맡은 일이 있단다. 탄소는 모든 생체 분자의 뼈대가 되고, 산소와 수소는 물과 생체 분자에 두루 들어 있어. 질소는 5장에서 배울 아미노산에, 인은 뼈와 6장에서 배울 유전 물질에, 황은 단백질 몇 곳에 들어간단다.

미숙 철이나 아이오딘은 없나요? 빈혈엔 철분, 미역엔 아이오딘이 좋다던데요.

도 교수 있습니다. 다만 아주 적은 양이지요. 이렇게 조금이지만 없으면 안 되는 원소를 **미량 원소**라 합니다. 사람은 하루에 50 μg 에서 18 mg쯤의 미량 원소가 필요하다고 해요². 아이오딘이 모자라면 목의 갑상샘이 호르몬을 제대로 만들지 못하는데, 세계에서 약 20억 명이 아이오딘을 넉넉히 먹지 못한다는 보고가 있어요³.

태오 칼슘이나 나트륨은 몸 어디에 있어요?

H 10 %							He
Li	Be	B	C 18 %	N 3 %	O 65 %	F	Ne
Na 0.2 %	Mg 0.1 %	Al	Si	P 1 %	S 0.3 %	Cl 0.2 %	Ar
K 0.4 %	Ca 1.5 %						

☒ 생명의 주요 원소 C·H·O·N·P·S

☐ 적지만 꼭 필요한 원소

칸 안의 숫자: 사람 몸 질량 비율

[그림 2-1] 주기율표 1~20번에서 생명의 주요 원소 탄소(C)·수소(H)·산소(O)·질소(N)·인(P)·황(S) 여섯 원소가 사람 몸 질량의 대부분을 이룬다. 칼슘·칼륨·나트륨·염소·마그네슘은 적지만 꼭 필요하다

도 교수 칼슘은 대부분 뼈와 이에 들어 있어서 몸무게의 약 1.5 %나 된다¹. 나트륨·칼륨·염소는 화학 편 20장에서 배운 이온의 모습으로 몸속 물에 녹아 있지. 몸은 이 이온들의 양을 일정하게 지키려고 늘 애쓴단다. 1장에서 본 항상성이야.

미숙 짜게 먹은 날 물이 자꾸 당기는 것도 그래서겠네요.

도 교수 네, 몸이 이온의 농도를 맞추려고 물을 찾는 거지요. 그 이야기는 14장에서 배추를 절이며 자세히 봅시다.

별에서 온 원자, 손이 몇 개인 원자

태오 그런데 탄소나 산소는 원래 어디서 온 거예요? 지구가 처음부터 갖고 있었어요?

도 교수 화학 편 10~11장에서 배웠듯이, 우주가 처음 생겼을 때는 수소와 헬륨이 대부분이었던단다. 탄소·질소·산소처럼 더 무거운 원소는 별 속 핵융합과 별의 죽음에서 만들어졌지. 1957년 버비지 부부와 파울러, 호일은 원소

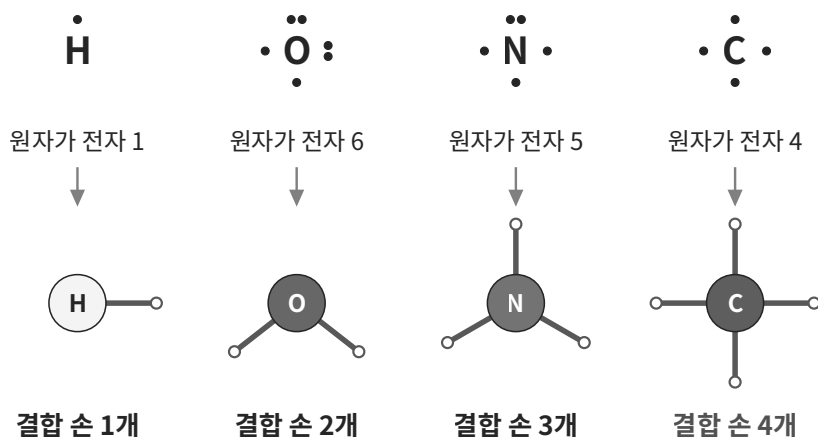
대부분이 별 속에서 만들어지는 과정을 정리했어⁴. 지금은 주기율표의 원소마다 어느 별에서 주로 왔는지 표로 그릴 수 있단다⁵.

하린 그러니까 제 몸의 탄소 원자는 옛날 별 속에서 만들어졌다는 거죠? 우리는 별 부스러기네요.

도 교수 그렇단다. 숨 쉴 때 들이마시는 산소 원자도, 밥 속 탄소 원자도 모두 오래전 별 속에서 만들어져 지구에 모인 것이지. 살아 있는 동안 잠시 빌려 쓰는 셈이야.

태오 그런데 별에서 온 원소는 90가지나 되잖아요. 생물은 왜 그중에서 하필 C, H, O, N을 골라 썼어요? 흔해서요?

도 교수 흔하기로는 규소와 알루미늄도 땅에 아주 많단다. 그러니 흔하다는 것만으로는 설명이 안 돼. 결합하는 방식을 봐야 하지. 화학 편 13장과 화학 편 23장을 떠올려 보렴. 원자는 원자가 전자로 다른 원자와 전자를 나눠 가지며 공유 결합을 한단다. 그림 2-2처럼 수소는 결합 손이 1개, 산소는 2개, 질소는 3개, 탄소는 4개야.



[그림 2-2] 생명의 네 원소가 만드는 공유 결합의 수 원자가 전자가 H 1개, O 6개, N 5개, C 4개여서 결합 손은 각각 1·2·3·4개가 된다. 손이 넷인 탄소는 사슬·가지·고리를 만들 수 있다(전자점식)

태오 손이 넷이면 사방으로 이어져서 긴 사슬도 되고 고리도 되겠네요.

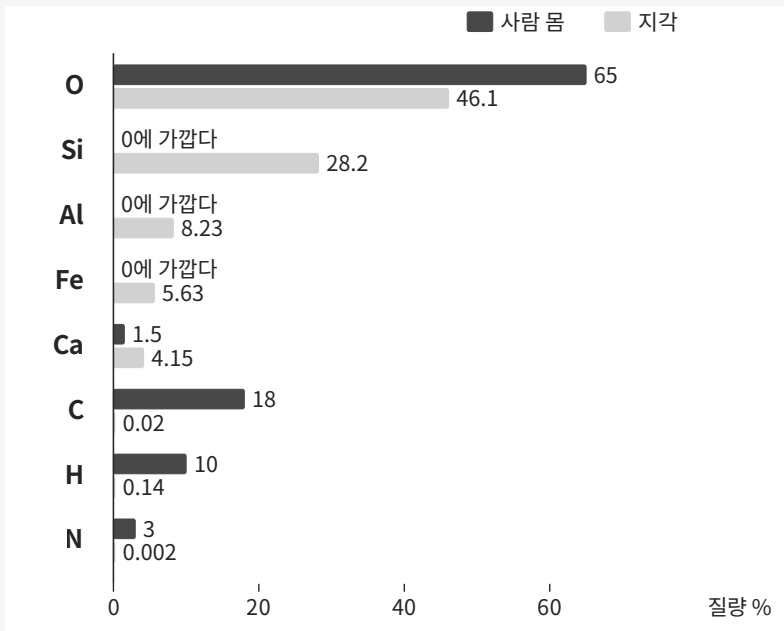
도 교수 바로 그거란다. 손이 많은 탄소가 뼈대를 짜고, 손이 적은 수소와 산소가 그 둘레를 채우는 거야. 이 뼈대 이야기는 4장에서 자세히 하자꾸나.

미숙 인은 대신할 원소가 없나요? 비슷한 원소도 많을 텐데요.

도 교수 2010년에 인 대신 비소를 쓰는 세균을 찾았다는 발표가 있었어요⁶. 그런데 2012년 두 연구팀이 다시 확인해 보니, 그 세균의 유전 물질에서 비소는 나오지 않았고 자라려면 여전히 인이 필요했지요^{7,8}. 놀라운 주장일수록 다른 사람이 되풀이해 확인해야 한다는 좋은 예입니다.

문제 2-1 사람 몸과 땅의 원소

그림 2-3은 사람 몸과 지각(땅의 겉부분)을 이루는 원소의 질량 비율(%)을 나란히 나타낸 것이다. 그림을 보고 옳게 말한 것은?



[그림 2-3] 문제 2-1의 그림 사람 몸과 지각의 원소별 질량 비율(%). (자료: 사람 몸은 표준 교재, 지각은 CRC 자료집)

- ① 두 곳 모두 가장 많은 원소는 탄소이다.
- ② 규소는 사람 몸에서 두 번째로 많은 원소이다.
- ③ 탄소의 질량 비율은 사람 몸이 지각보다 약 900배 크다.
- ④ 사람 몸의 원소 비율은 지각과 거의 같다.
- ⑤ 질소는 지각에서 더 큰 비율을 차지한다.

태오 사람은 흙에서 난 걸 먹고 사니까 비율도 비슷할 것 같아요. ④요.

도 교수 막대를 하나씩 비교해 보았니? 조건을 다시 읽자. 무엇과 무엇을 나란히 놓았지?

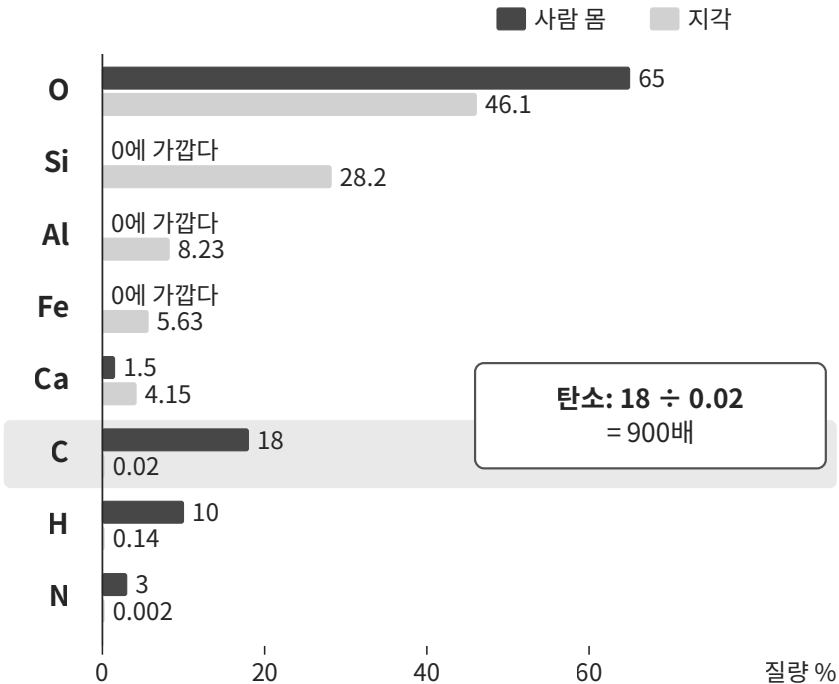
하린 사람 몸이랑 지각이요. 둘 다 산소가 제일 많은 건 같지만, 지각은 둘째가 규소 28 %인데 사람 몸엔 규소가 거의 없어요. 그러니 ④는 아니에요.

도 교수 그럼 계획을 세우자. 선택지마다 해당하는 두 막대를 읽고, 배수가 나오면 나눗셈으로 확인하는 거야.

태오 ①은 둘 다 산소가 가장 많으니 틀렸고, ②도 틀렸어요. 탄소는 사람 몸 18 %, 지각 0.02 %니까 $18 \div 0.02 = 900$ 배예요!

미숙 질소도 사람 몸은 3 %인데 지각은 0.002 %라 ⑤도 틀렸네요.

도 교수 그림 2-4처럼 막대 높이를 나눠 보면 됩니다. 정답은 ③이지요^{1,9}.



[그림 2-4] 풀이 그림 탄소는 사람 몸에서 약 18 %, 지각에서 약 0.02 %이므로 약 900배 차이가 난다. 생물은 주변에서 드문 탄소를 골라 모아 몸을 짓는다

하린 생물은 땅에 흔한 원소를 그냥 쓰는 게 아니라, 드문 탄소를 골라 모은다는 거네요.

도 교수 그래. 되돌아보면, 0.02 %처럼 아주 작은 막대는 눈으로는 0과 구별이 안 된다. 그럴 때는 숫자를 읽어 나눠 보는 습관이 중요해. 식물은 공기 중 이산화 탄소에서, 우리는 음식에서 탄소를 모으지.

문제 2-2 질량 비율과 원자 수

사람 몸 100 g에 산소 65 g, 탄소 18 g, 수소 10 g, 질소 3 g이 들어 있다고 하자. 원자 하나의 상대 질량이 H 1, C 12, N 14, O 16일 때, 이 네 원소 가운데 원자 수가 가장 많은 원소는 무엇이며, 네 원소 원자 전체의 약 몇 %인지 구하시오.

태오 산소가 65 g으로 제일 많으니까 원자 수도 산소가 제일 많아요.

도 교수 질량이 크다고 원자 수가 많을까? 산소 원자 하나는 수소 원자 하나보다 몇 배 무겁지?

태오 16배요. 아, 무거운 원자는 같은 질량에 개수가 적겠네요.

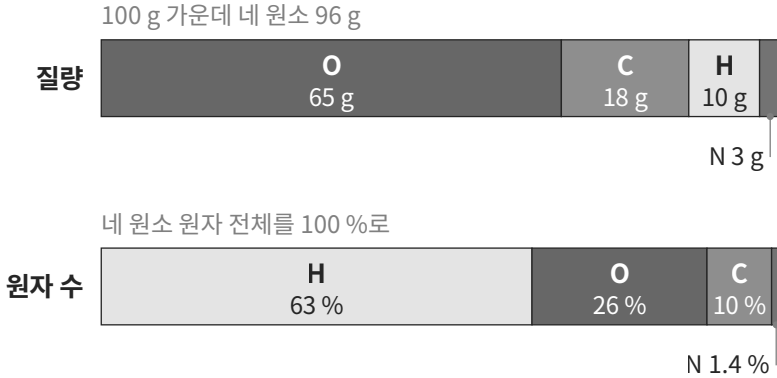
도 교수 그래. 계획은 이거야. 각 원소의 질량을 원자 하나의 상대 질량으로 나누어 원자 수에 비례하는 값을 구하고, 전체에 대한 비율을 내는 거지.

하린 수소 $10 \div 1 = 10$, 산소 $65 \div 16 \approx 4.1$, 탄소 $18 \div 12 = 1.5$, 질소 $3 \div 14 \approx 0.2$ 예요. 다 더하면 약 15.8이고요.

미숙 수소가 $10 \div 15.8 \approx 0.63$ 이니까 63 %쯤이네요. 질량으로는 셋째였는데 개수로는 첫째예요.

도 교수 잘했습니다. 모범 답은 “수소, 약 63 %”입니다. 그림 2-5처럼 질량 막대와 원자 수 막대를 나란히 놓으면 순서가 뒤바뀌는 게 보이지요.

하린 몸속 원자 셋 중 둘은 수소라는 거네요. 3장에서 배울 물에 수소가 둘씩 들어 있으니 그럴 만해요.



$$\text{수소: } 10 \div 1 = 10 \rightarrow 10 \div 15.8 \approx 63 \%$$

[그림 2-5] 풀이 그림 사람 몸의 네 원소를 질량 비율(위)과 원자 수 비율(아래)로 나타냈다. 가벼운 수소는 질량으로는 약 10 %지만 원자 수로는 약 63 %로 가장 많다(계산값)

오늘의 정리

- 사람 몸 질량의 대부분은 O 약 65 %, C 약 18 %, H 약 10 %, N 약 3 %이고, 여기에 P·S·Ca 등이 더해진다.
- 철·아이오딘처럼 아주 적지만 꼭 필요한 원소를 **미량 원소**라 한다.
- 수소·헬륨보다 무거운 원소는 별 속에서 만들어졌다. 우리 몸의 탄소도 별에서 왔다.
- 결합 수는 H 1, O 2, N 3, C 4개. 손이 넷인 탄소가 생체 분자의 뼈대가 된다.
- 질량 비율과 원자 수 비율은 다르다. 원자 수로는 수소가 가장 많다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 사람 몸에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 질량으로 가장 많은 원소는 탄소이다.
 - ② 지각에 흔한 규소가 몸의 주요 원소이다.
 - ③ 질소는 결합 손이 4개여서 뼈대를 만든다.
 - ④ 미량 원소는 양이 적어 없어도 괜찮다.
 - ⑤ 탄소·수소·산소·질소가 질량의 약 96 %를 차지한다.
2. 탄소는 지구의 지각에는 드물지만 생물의 몸에는 많다. 탄소가 생체 분자의 뼈대가 되기에 알맞은 까닭을 결합 손의 수로 설명하시오.

과학의 최전선 생명에 꼭 필요한 원소는 몇 가지일까

여기까지 밝혀졌다 — $C \cdot H \cdot O \cdot N \cdot P \cdot S$ 가 생체 분자의 대부분을 이루고, 철·아연·아이오딘 같은 미량 원소는 아주 적은 양으로 큰 분자의 촉매나 구조 성분이 되어 없어서는 안 된다². **아직 모른다** — 어떤 원소가 ‘꼭 필요한가’의 목록은 아직 확정되지 않았다. 몸에 있지만 무슨 일을 하는지 뚜렷하지 않은 원소도 있어, 필수 원소를 모두 확실히 안다고 할 수 없다¹⁰. ‘필수’의 뜻을 어떻게 정하고 어떤 생물을 기준으로 하느냐에 따라 목록이 달라진다. **가설과 연구** — 생물 속 금속 원소 전체를 한꺼번에 재고 그 쓰임을 밝히려는 연구가 이어진다¹⁰. 인 대신 비소를 쓰는 세균이 있다는 주장은 되풀이 실험에서 인정받지 못했지만⁷, 생명이 쓸 수 있는 원소의 경계를 묻는 좋은 계기가 되었다.

이 장의 출처

1. Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). Campbell biology (12th ed.). Pearson.
2. Mertz, W. (1981). The Essential Trace Elements. Science, 213(4514), 1332–1338. <https://doi.org/10.1126/science.7022654>
3. Zimmermann, M. B. (2009). Iodine Deficiency. Endocrine Reviews, 30(4), 376–408. <https://doi.org/10.1210/er.2009-0011>
4. Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. Reviews of Modern Physics, 29(4), 547–650. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547>
5. Johnson, J. A. (2019). Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements. Science, 363(6426), 474–478. <https://doi.org/10.1126/science.aau9540>
6. Wolfe-Simon, F., Blum, J. S., Kulp, T. R., Gordon, G. W., Hoefft, S. E., Pett-Ridge, J., Stolz, J. F., Webb, S. M., Weber, P. K., Davies, P. C. W., Anbar, A. D., & Oremland, R. S. (2011). RETRACTED: A Bacterium That Can Grow by Using Arsenic Instead of Phosphorus. Science, 332(6034), 1163–1166. <https://doi.org/10.1126/science.1197258>

7. Reaves, M. L., Sinha, S., Rabinowitz, J. D., Kruglyak, L., & Redfield, R. J. (2012). Absence of Detectable Arsenate in DNA from Arsenate-Grown GFAJ-1 Cells. *Science*, 337(6093), 470–473. <https://doi.org/10.1126/science.1219861>
8. Erb, T. J., Kiefer, P., Hattendorf, B., Günther, D., & Vorholt, J. A. (2012). GFAJ-1 Is an Arsenate-Resistant, Phosphate-Dependent Organism. *Science*, 337(6093), 467–470. <https://doi.org/10.1126/science.1218455>
9. Haynes, W. M. (Ed.). (2016). *CRC handbook of chemistry and physics* (97th ed.). CRC Press.
10. Maret, W. (2016). The Metals in the Biological Periodic System of the Elements: Concepts and Conjectures. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(1), 66. <https://doi.org/10.3390/ijms17010066>

물 — 생명의 용매

출발점 극성·수소 결합 앞 권 · 생명의 원소 2장

새 개념 물(생명의 용매) · 친수성·소수성

이어짐 탄수화물 4장 · 지질·인지질 4장 · 삼투 14장 · 생물 농축 43장

기본개념 이 장의 개념 9개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

오른쪽 정의를 손이나 종이로 가리고, 단어만 보고 정의를 말해 보자. 막히는 단어는 본문에서 굵은 글씨로 다시 만난다.

1	화합물	두 가지 이상의 원소가 화학 결합으로 이루어진 물질.
2	극성	분자 안에서 전하가 한쪽은 δ^- , 다른 쪽은 δ^+ 로 치우친 성질.
3	수소 결합	δ^+ 를 띤 수소와 가까운 δ^- 산소·질소 원자 사이의 약한 끌림.
4	이온 결합	양이온과 음이온이 전기적으로 끌려 이룬 결합.
5	친수성	물 분자와 잘 어울려 물에 녹거나 물 쪽을 향하는 성질.
6	소수성	극성이 거의 없어 물과 어울리지 않는 성질.
7	용매	다른 물질을 녹여 용액을 만드는 물질.
8	비열	물질 1g의 온도를 1°C 올리는 데 드는 열.
9	증발	액체 표면의 분자가 기체가 되어 날아가는 현상.

3월 셋째 토요일, 봄비가 그친 아침이었다. 과학방 탁자에는 미숙이 가게에서 가져온 소금, 설탕, 참기름과 투명한 컵 세 개, 그리고 작은 무쇠솥이 놓여 있었다. 도 교수는 수도꼭지를 가늘게 틀어 놓고 플라스틱 자를 손에 들고 있었다.

도 교수 2장에서 우리 몸 원자 셋 중 둘이 수소라고 했지? 그 수소의 상당수는 물 분자 속에 있단다. 사람 몸무게의 약 60 %가 물이거든¹. 오늘은 이 흔한 물이 왜 생명에 특별한지 알아보자. 원자에서 시작해 보자꾸나.

하린 물은 그냥 물 아니에요? 맛도 색도 없잖아요.

도 교수 그 “그냥”이 가장 놀라운 거란다. 먼저 이것부터 보렴.

도 교수가 플라스틱 자를 머리카락에 여러 번 문지른 뒤 가늘게 떨어지는 물줄기 옆에 가져가자, 물줄기가 자 쪽으로 휘었다.

한쪽은 -, 한쪽은 + — 물 분자의 극성

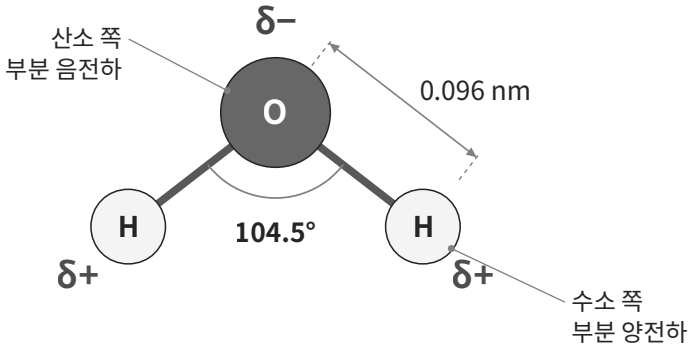
태오 와, 물이 자석처럼 끌려가요! 물에 전기가 있어요?

도 교수 물 분자 전체는 전기적으로 중성이란다. 그런데 한쪽은 조금 -, 다른 쪽은 조금 +를 띠고 있어. 1784년 캐번디시는 수소를 공기 속에서 태우면 물이 생기는 것을 보여, 물이 원소가 아니라 수소와 산소의 화합물임을 알렸지². 물 분자는 산소 원자 하나에 수소 원자 둘이 공유 결합한 H_2O 야.

도 교수 그림 3-1을 보렴. 두 O-H 결합은 약 0.096 nm이고, 104.5°로 굽어 있단다³. 화학 편 24장에서 배웠듯이 산소는 공유 전자쌍을 제 쪽으로 더 세게 당겨. 그래서 산소 쪽은 부분적인 음전하 δ^- , 수소 쪽은 부분적인 양전하 δ^+ 를 띠지. 분자가 굽어 있어서 두 치우침이 서로 없어지지 않고, 분자 전체에 +쪽과 -쪽이 생긴단다. 이것이 물 분자의 **극성**이야.

하린 그러니까 물 분자는 한쪽 끝이 -, 반대쪽이 +인 작은 막대자석 같은 거라는 거죠? 그래서 전기를 띤 자에 끌렸고요.

도 교수 비유로는 좋구나. 이제 물 분자가 여러 개 모이면 어떻게 될까? 한 분자의 δ^+ 수소는 이웃 분자의 δ^- 산소 쪽을 향해 끌린단다. 이 끌림을 **수소 결합**이라 하지. 1920년 레티머와 로드부시가 물의 특별한 성질을 이 생각으로 처음 설명했어⁴. 그림 3-2처럼 물속에서는 수소 결합이 끊졌다 이어졌다 하며 그물을 이룬단다.



산소가 공유 전자쌍을 제 쪽으로 더 세게 당긴다

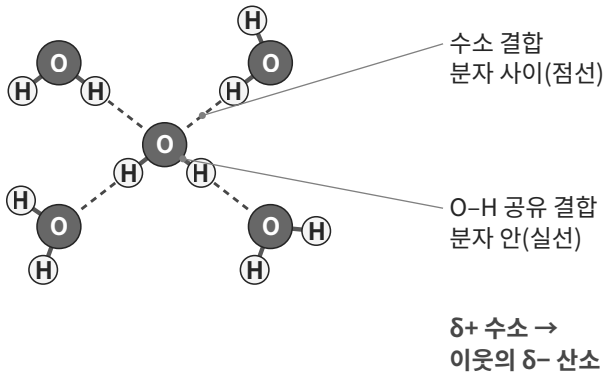
[그림 3-1] 물 분자의 모양과 극성 산소 하나에 수소 둘이 104.5° 각도로 결합했고, O-H 결합 길이는 약 0.096 nm다. 산소 쪽은 δ^- , 수소 쪽은 δ^+ 를 띤다(공-막대 모형)

태오 그럼 물을 끓이면 O-H 결합이 끊어져서 수소 기체와 산소 기체가 나오는 거죠?

도 교수 많은 학생이 그렇게 헛갈린단다⁵. 끓을 때 끊기는 것은 분자와 분자 사이의 수소 결합이야. 수증기도 여전히 H₂O 분자지. 분자 안의 공유 결합은 실선, 분자 사이의 수소 결합은 점선으로 구별해 두렴.

미숙 겨울에 남한강이 위부터 얼고 그 밑에서 물고기가 사는 것도 물 분자랑 관계가 있나요?

도 교수 있습니다. 물이 얼면 분자들이 수소 결합으로 틈이 많은 육각형 짜임을 이뤄서, 얼음이 물보다 가벼워져요⁶. 그래서 얼음이 위에 떠서 이불처럼 덮고, 그 아래 물은 쉽게 얼지 않지요. 대부분의 물질은 고체가 액체보다 무거우니 물이 특별한 셈입니다.



[그림 3-2] 물 분자 사이의 수소 결합(점선) 한 분자의 δ^+ 수소가 이웃 분자의 δ^- 산소를 향한다. 분자 안의 O-H 공유 결합(실선)과 분자 사이의 수소 결합(점선)은 다르다(모식도)

무엇이든 잘 녹이는 물

미숙이 세 컵에 소금, 설탕, 참기름을 한 숟가락씩 넣고 저었다. 소금과 설탕은 금세 사라졌지만 참기름은 동그랗게 모여 위로 떠올랐다.

미숙 장 담글 때 소금물은 잘 만들어지는데 기름은 아무리 저어도 안 섞여요. 왜 그런가요?

도 교수 물 분자의 극성 때문입니다. 소금은 화학 편 21장에서 본 이온 결합 결정, Na^+ 와 Cl^- 가 번갈아 쌓인 것이지요. 물에 넣으면 물 분자들이 δ^- 산소를 Na^+ 쪽으로, δ^+ 수소를 Cl^- 쪽으로 돌려 이온을 하나씩 에워싸고 떼어 냅니다. 설탕은 이온이 아니지만 분자 곳곳에 $-\text{OH}$ 가 있어서 물과 수소 결합을 하며 녹아요⁶.

도 교수 이처럼 물과 잘 어울리는 성질을 **친수성**, 물과 어울리지 않는 성질을 **소수성**이라 합니다. 참기름 분자는 대부분 탄소와 수소로 된 긴 사슬이라 극성이 거의 없어요. 그래서 물 분자들은 기름 대신 자기들끼리 수소 결합하는 쪽을 택하고, 기름은 밀려나 모이지요. 기름 분자의 모양은 4장에서 자세히 봅시다.

하린 녹는다는 건 물 분자가 상대를 끌어안을 수 있느냐의 문제라는 거죠? 이온이나 극성 분자는 안기고, 기름은 안 안기고요.

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 생명편 1

배추는 왜 숨이 죽을까

생명을 이루는 원소와 물, 탄수화물·지질·단백질·핵산에서 출발해 세포의 발견, 세포막과 세포 소기관, 원핵·진핵세포까지 살핍니다.

통합과학 8권 한눈에 보기



1 화학편 1
원자·원소·별



2 화학편 2
결합과 물질



3 생명편 1 · 이 책
분자와 세포



4 생명편 2
유전과 진화



5 물리편 1
힘과 운동



6 물리편 2
전하와 전기력



7 지구과학편 1
공기·물·날씨



8 지구과학편 2
원소·암석·지구

과학과영성출판사

이광조 지음

값 18,000원

값 18000 원

53470



9 791123 106528 1

ISBN 979-11-23065-28-1

이어서 읽으시려면

03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까 — 전체 366쪽

ssbook.kr/book/tonghap-03

판매가 **10,800원** (POD 정가 18,000원)

- 전 페이지 컬러 PDF · 개인 영구 소장
- 카드 결제 즉시 내 서재에서 내려받기
- 공개 배포 · 재판매 금지

발간 도서 목록

다음 쪽부터 과학과영성출판사가 발간한 책 전체 목록(표지 · 가격 · 특징)을 안내합니다.

총 69종 · 판매가는 POD 정가의 60% · 컬러 PDF · 개인 영구 소장

인삼 (6)



만병통치 인삼의 신경내분비시스템
하나의 인삼뿌리는 어떻게 온몸의 스위치를 건드리는가
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-neuroendo



인삼과 당뇨
공복혈당 · 당화혈색소 · 합병증을 개선하는 인삼
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-diabetes



인삼과 대사증후군
허리둘레 · 중성지방 · HDL · 혈압 · 혈당을 개선하는 인삼치유의 과학적 원리
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-metabolic



인삼과 아토피
금산 아토피 마을에서 어린이 임상시험 설계까지
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-atopy



인삼과 암치유
실험실에서 진로실까지, 1,300편의 논문이 말하는 것
₩18,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/ginseng-cancer

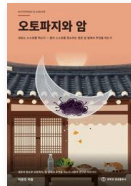


인삼의 임상연구
최신연구와 방법론
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-clinical

오토파지 (2)



스스로를 먹는 몸
오토파지, 자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/eating-self



오토파지와 암
세포는 스스로를 먹는다
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/autophagy-cancer

식물성 저탄고지 (11)



뇌신경 4+2축과 성격유형 그리고 식물성 저탄고지
도파민 · 세로토닌 · 노르에피네프린 · 아세틸콜린 + 글루타메이트 · 가바
₩20,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/brain-axes



당뇨를 개선하는 식물성 저탄고지
혈당 · 당화혈색소 · 체중을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
₩17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-diabetes



고혈압을 개선하는 식물성 저탄고지
 혈압·체중·혈관 건강을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-hypertension



비만을 개선하는 식물성 저탄고지
 체중·허리둘레·체지방을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-obesity



뇌전증을 개선하는 식물성 저탄고지
 뇌전증 환자와 보호자를 위한 논문 근거 기반 식물성 저탄고지 식단
 23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-epilepsy



우울증을 개선하는 식물성 저탄고지
 소화관과 장·뇌 축, 에너지 대사를 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-depression



자폐를 개선하는 식물성 저탄고지
 일곱 갈래 기전이 한 점에서 만난다
 23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-autism



아토피를 개선하는 식물성 저탄고지
 피부 장벽과 면역, 장 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 19,000원 → **11,400원**
ssbook.kr/book/pkd-atopy



치매를 개선하는 식물성 저탄고지
 뇌 에너지 대사와 인슐린 신호, 혈관 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/pkd-dementia



암을 개선하는 식물성 저탄고지
 치료 중 체중 유지와 근육 보존, 영양 상태를 함께 살피는 식물성 케톤식 가이드
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-cancer



관절염을 개선하는 식물성 저탄고지
 염증 신호와 체중 부하, 대사 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-arthritis

단식 (1)



40일간 굶는 몸의 시간표
 카힐의 40일 연구, 혈당과 케톤과 자가포식을 중심으로
 18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/fasting-40days

생물리학 (4)



발골의 강
 피의 흐름에서 발바닥까지, 명과 몸 사이에서 확인된 것과 아직 모르는 것
 18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일
 부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의
 17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/cupping99



세 겹의 뇌, 눈 위의 지휘자
매클린의 삼위일체 뇌와 안와전두엽 이야기
~~10,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/triune-brain



광유전
빛으로 세포를 제어하는 기술 — 원리·실험·회로·치료
~~42,000원~~ → **25,200원**
ssbook.kr/book/optogenetics

독립영양인간 (2)



이암블리코스의 피타고라스적 삶에 관하여
그리스어 원전 완역 · 테일러 판 전편 수록
~~10,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/iamblichus



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지
요하의 흠인형 · 우하량의 여신 · 해명경 · 태을금
화중지 다섯 갈래를 한자리에 놓다
~~26,000원~~ → **15,600원**
ssbook.kr/book/hongsan

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역
대학 기술로 완성하는 분자생물학의 중심원리
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-01



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도
분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 — 기술 22문
항으로 읽는 유전
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-03



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학
제한 효소의 인식·절단 × 조각 길이로 위치 추론
× 재조합·판별 실험 설계
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-05



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송
인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-07



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설
감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩
팥까지 항상성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신
몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역
까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-09



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지대사
포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-10



대입 과학논술 11 — 신경계·활동전위
펄프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-11



대입 과학논술 12 — 생태·진화·생물다양성
에너지는 흐르고 물질은 돈다 — 개체군에서 종 분화까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-12



대입 과학논술 13 — 원자 구조·주기성
전자 배치 × 유효 핵전하 × 이온화 에너지로 읽는 주기성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-13



대입 과학논술 14 — 화학 결합·분자 구조·극성
원자가 전자 세기 × 전자쌍 반발 × 쌍극자 벡터 합
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-14



대입 과학논술 15 — 분자 간 힘·수소 결합·계면
극성 × 분자 간 힘의 서열 × 계면 에너지로 읽는 물질
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-15



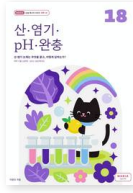
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



대입 과학논술 17 — 화학양론·농도
몰 × 반응식 계수비 × 농도 환산으로 푸는 화학 계산
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-17



대입 과학논술 18 — 산화·환원과 산화수
산화·환원과 산화수 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-18



대입 과학논술 19 — 산·염기·pH·완충
평형(K) × 몰수 계산 × 부피 보정으로 푸는 산·염기
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-19



대입 과학논술 20 — 반응 속도
넘어야 할 언덕 — 반감기에서 촉매, 반응 메커니즘까지
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-20



대입 과학논술 21 — 화학 평형
평형 상수 K × 반응 지수 Q × 르샤틀리에로 읽는 화학 평형
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-21



대입 과학논술 22 — 열화학·엔탈피·자유 에너지
열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
25,000원 → **15,000원**
ssbook.kr/book/nonsul-22



대입 과학논술 23 — 용액·총괄성·상평형
용액·총괄성·상평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-23



대입 과학논술 24 — 기체
기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-24



대입 과학논술 25 — 화학 전자·전기 분해
화학 전자·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-25



01 통합과학 화학 1 — 소금과 별
원자에서 원소의 기원·주기율표까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-01



02 통합과학 화학 2 — 못은 왜 녹슬까
결합에서 반응·산과 염기까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까
본자에서 세포·호소·에너지까지
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-03



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자
유전 정보에서 진화·생태계까지
~~18,500원~~ → **11,100원**
ssbook.kr/book/tonghap-04



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 뒤통질까
원자에서 힘과 에너지까지
~~22,000원~~ → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반
원자에서 전자기파까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/tonghap-06



07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까
대기·기압·복사 에너지로 읽는 날씨
~~21,000원~~ → **12,600원**
ssbook.kr/book/tonghap-07



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다
원자에서 암석·판·지구의 역사까지
~~20,000원~~ → **12,000원**
ssbook.kr/book/tonghap-08

채식 (5)



사상체질과 채식
이제마의 사상·권도원의 팔체질·황제내경을 영
양학과 분자생물학으로 다시 읽다
~~21,000원~~ → **12,600원**
ssbook.kr/book/sasang-veg



체질과 심리신경내분비
사상·팔체질·황제내경과 Big5·MBTI를 몸의
언어로 다시 읽다
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/constitution-neuro

역사 속의 채식인
채식의 역사를 사람들의 이야기로 읽다
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-history

채식이야기
채식에 관한 이야기
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-story

우리 몸은 채식을 원한다
몸이 채식을 원하는 이유
교보문고 판매
ssbook.kr/book/body-wants-veg

라이프스타일 (3)



아주 쉬운 회춘의 원리
노화의 12가지 특징과 식이를 통한 회춘
~~18,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/rejuvenation



피부는 안에서 만들어진다
콜라겐·아쿠아포린·자가포식과 식물성 케톤식
~~18,400원~~ → **11,000원**
ssbook.kr/book/skin-inside

고대사 (5)



동아시아 1만 년의 기후와 땅

한반도에서 본 홀로세의 기후와 지형 변화

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/climate-ea-1



고려 서경(西京)의 위치를 추정하다 1권 방법편

여덟 가지 방법으로 동아시아 고전 지명을 좌표로 옮기기

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/seogyeong-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제1권 기초편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제1~7장)

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/geonames-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제2권 기법편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제8~16장)

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/geonames-2



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제3권 적용편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (적용 사례)

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/geonames-3