



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자

유전 정보에서 진화·생태계까지

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-04

POD 정가 ~~18,500원~~ → **11,100원** (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

늑대가 돌아오자



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

DNA · GENES · VARIATION · EVOLUTION ·
ECOSYSTEMS · EARTH

늑대가 돌아오자

문제로 풀어 가는 통합과학 생명 이야기 2

유전 정보에서 진화·생태계까지 —

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

이광조 박사

판본 v7 · 2026-10-02

능대가 돌아오자

문제로 풀어 가는 통합과학 생명 이야기 2

늑대가 돌아오자

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 — 유전 정보에서 생태계까지	6
일러두기 — 이 책의 짜임	7

제6부 유전 정보

23장 유전 물질은 무엇일까 — 페렴균과 바이러스	10
24장 DNA 이중 나선 — 수소 결합으로 짝지은 두 가닥	25
25장 중심 원리 — DNA에서 단백질까지	41
26장 전사 — DNA를 RNA로 베끼기	51
27장 번역과 유전 암호 — 세 글자 단어	61
28장 돌연변이와 유전자 가위 — 한 글자가 바뀌면	75
제6부 단원 마무리 — 수능형 문제	91

제7부 진화와 다양성

29장 생물 다양성의 세 수준 — 배추흰나비와 석주명	103
30장 변이 — 같은 종도 모두 다르다	117
31장 자연선택 — 다윈과 갈라파고스의 핀치	131
32장 눈앞에서 일어난 진화 — 회색가지나방과 항생제 내성	144
33장 단양숙부쟁이 — 남한강이 지켜 온 꽃	155
34장 생물 다양성은 왜 줄어들고 어떻게 지킬까 — 사라지는 속도를 재다	166
제7부 단원 마무리 — 수능형 문제	177

제8부 생태계

35장 생태계의 구성 요소 — 숲은 누구로 이루어져 있을까	190
36장 생물과 환경 — 빛·온도·물이 생김새를 바꾼다	200
37장 먹이 사슬과 먹이 그물 — 남한강 여울에서 누가 누구를 먹나	210
38장 에너지 흐름과 생태 피라미드 — 왜가리 한 마리를 먹여 살리려면	224
39장 물질의 순환 — 탄소와 질소 원자가 도는 길	238
40장 생태계 평형 — 늑대가 돌아오자	248
제8부 단원 마무리 — 수능형 문제	260

제9부 사람과 생태계

41장 지구 온난화와 생물 — 늦게 지는 단풍, 일찍 피는 꽃	272
------------------------------------	-----

42장 외래종과 조각난 서식지 — 강둑의 덩굴과 숲을 가른 길	282
43장 농약과 먹이 사슬 — 침묵의 봄	293
44장 생태 발자국과 지속 가능한 삶 — 지구 몇 개가 필요할까	307
45장 세포에서 지구까지 — 김장 날의 마지막 토요일	317
제9부 단원 마무리 — 수능형 문제	341

부록

부록 A 용어 풀이	351
부록 B 교과 연결표	366
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	368
부록 D 생명과학 기본 수치와 단위	376

머리말 — 유전 정보에서 생태계까지

상권에서 우리는 원자와 분자에서 출발해 세포를 짓고, 물질이 세포막을 드나드는 길과 효소, 광합성과 세포 호흡으로 생명이 에너지를 얻고 쓰는 길까지 왔다. 하권은 생명이 **어떻게 자기를 이어 가는지**를 묻는다.

DNA가 유전 물질이라는 것을 확인한 실험에서 출발해, 수소 결합으로 짝지은 두 가닥의 이중 나선, DNA에서 RNA를 거쳐 단백질로 가는 중심 원리와 유전 암호, 그리고 한 글자가 바뀌는 돌연변이와 유전자 가위까지 본다(제6부). 그 변이 위에서 자연선택이 일어나 생물이 여러 가지가 되는 진화와 다양성을 배추흰나비와 단양쑥부쟁이로 읽는다(제7부). 이어 생물과 환경이 얹힌 생태계에서 에너지가 흐르고 탄소와 질소가 도는 길을 따라가고(제8부), 마지막으로 지구 온난화, 외래종, 농약의 생물 농축, 생태 발자국처럼 사람이 생태계를 바꾸는 일과 그것을 지키는 일을 다룬다(제9부).

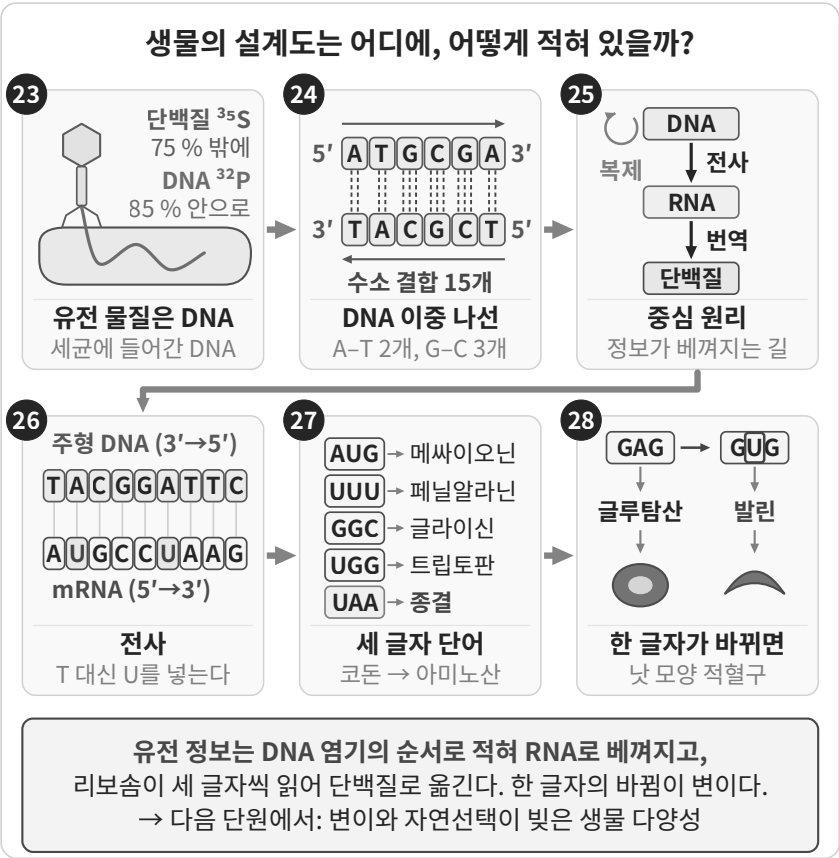
하권도 상권처럼 장 첫 쪽의 〈이 장의 출발점〉과 〈기본개념〉, 문제와 풀이 대화, 풀이 그림, 과학자 이야기, 단원 앞뒤의 지식 그래프와 단원 끝 수능형 문제, 장마다 〈과학의 최전선〉으로 짜여 있다. 마지막 장의 〈끝까지 묻기〉에서는 김장 날 한 해를 마친 학생들이 “살아 있다는 것은 무엇일까?”를 다시 묻는다. 상권을 읽지 않았더라도 따라올 수 있도록 필요한 곳마다 앞 개념을 짧게 되짚었다.

2026년 가을, 이광조

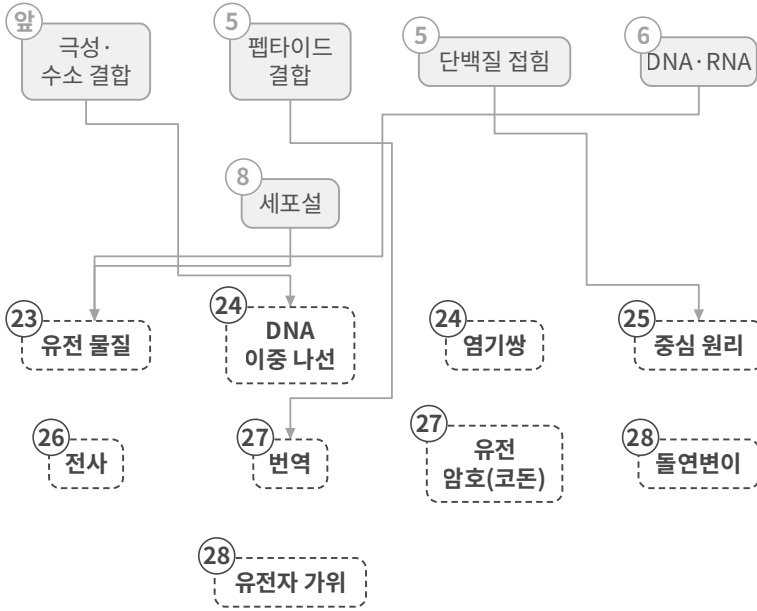
일러두기 — 이 책의 짜임

- **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.

유전 정보



제6부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



□ 앞에서 세운 개념 □ 이 단원에서 세운 개념

[제6부] 단원 들어가며 — 지식 그래프 회색 상자는 앞 단원에서 세운 개념, 점선 상자는 이 단원에서 새로 세운 개념이다. 화살표는 "이 개념이 있어야 저 개념을 이해할 수 있다"는 뜻이고, 원 속 숫자는 그 개념을 세우는 장이다

23

유전 물질은 무엇일까 — 페렴균과 바이러스

출발점 DNA·RNA 6장 · 세포설 8장

새 개념 유전 물질

이어짐 DNA 이중 나선 24장

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	유전 물질	생물의 형질 정보를 담아 자손에게 전하는 물질.
2	페렴균	페렴을 일으키며, 피막이 있는 S형과 없는 R형이 있는 세균.
3	피막	일부 세균의 겉을 둘러싼 매끈한 다당류 껍질.
4	형질 전환	세포 밖에서 들어온 유전 물질 때문에 세균의 형질이 바뀌어 대대로 전해지는 현상.
5	DNA 분해 효소	DNA만 골라 잘게 분해하는 효소.
6	파지	세균을 감염시키는 바이러스로, 단백질 껍질 속에 DNA가 있다.
7	방사성	원자핵이 스스로 깨지며 방사선을 내는 성질.
8	염색질	DNA와 그것을 감은 단백질이 함께 이룬 물질.
9	후성 유전	DNA 염기 서열은 그대로인 채 유전자가 쓰이는 정도가 바뀌어 전해지는 현상.

7월 첫 토요일 오후, 돌집 과학방. 장맛비가 양철 지붕을 두드렸다. 하린은 봄부터 쓴 관찰 일기 두 권을 탁자에 펼쳐 놓았고, 미숙은 쥔 옥수수를 한 바구니 내왔다.

하린 상권을 되짚어 봤어요. 원자에서 물 분자, 탄소 뼈대, 막, 세포, 효소, 그리고 연화봉에서 배운 광합성과 호흡까지요.

도 교수 잘 정리했구나. 원자에서 시작해 보자. 8장에서 모든 세포는 세포에서 생긴다고 했지. 세포가 둘로 나눌 때 새 세포는 어떻게 할 일을 알까? 설계도가 함께 건너가야겠지. 오늘은 그 설계도, 곧 **유전 물질**이 어느 분자인지 찾아가 보자꾸나.

태오 6장에서 DNA라고 배웠잖아요. 답은 이미 나왔는데요?

도 교수 지금은 누구나 알지. 그런데 100년 전 과학자들은 어떻게 알았을까? 그 추리를 따라가 보는 게 오늘 할 일이란다.

단백질일까, 핵산일까

도 교수 1869년 스위스의 미셔는 백혈구의 핵에서 인이 많고 단백질과 다른 물질을 뽑아 ‘뉴클레인’이라 불렀어¹. 1919년 레빈은 핵산이 인산-당-염기 단위가 이어진 사슬이라고 제안했지².

미숙 그럼 그때 벌써 핵산이 설계도라고 알았겠네요.

도 교수 오히려 반대였지요. 5장의 단백질은 아미노산 20가지로 끝없이 다양한 모양을 만듭니다. 핵산은 염기가 네 가지뿐이라 너무 단조로워 보였어요. 그래서 20세기 전반에는 단백질이 유전 물질이라고 믿는 사람이 많았습니다.

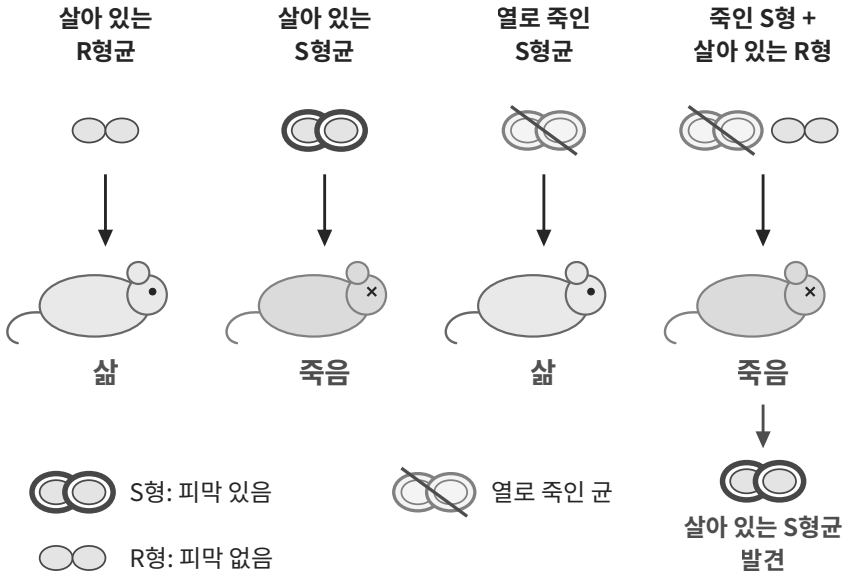
미숙 네 가지라도 순서를 바꾸면 되지 않나요? 한글도 자모 스물넷으로 온갖 책을 다 쓰잖아요.

도 교수 날카로운 생각입니다. 바로 그 생각이 뒤에 옳은 것으로 드러나지요. 하지만 그때는 핵산의 염기 순서를 읽을 방법이 없었고, 네 염기가 단조롭게 되풀이된다고 여기는 사람이 많았어요. 그러니 실험으로 가려낼 수밖에 없었습니다.

하린 그러니까 “정보를 담을 만큼 다양한가”로는 판가름이 안 나니, 실험으로 범인을 찾아야 했다는 거죠?

그리피스의 생쥐 — 죽은 균이 산 균을 바꾸다

도 교수 1928년 영국의 그리피스는 폐렴균 두 종류로 생쥐 실험을 했단다³. S형은 매끈한 다당류 피막이 있어 병을 일으키고, R형은 피막이 없어 병을 일으키지 못해. 그림 23-1을 보렴.



[그림 23-1] 그리피스의 실험 살아 있는 R형균(생쥐 살), 살아 있는 S형균(죽음), 열로 죽인 S형균(살), 열로 죽인 S형균 + 살아 있는 R형균(죽음, 몸에서 살아 있는 S형균이 나옴)(모식도)

하린 넷째가 이상해요. 죽은 S형균과 병 못 일으키는 R형균을 섞었는데 생쥐가 죽었어요.

도 교수 죽은 생쥐의 피에서는 살아 있는 S형균이 나왔단다³. 죽은 균이 되살아난 게 아니야. 셋째 실험에서 죽은 S형균만 넣었을 땐 생쥐가 살았으니까. 죽은 S형균의 무언가가 R형균에 들어가 S형으로 바뀌 놓은 거지. 이것을 **형질 전환**이라 한단다.

미숙 그런데 균을 열로 죽였다면 그 속 물질도 다 망가졌을 것 같은데요. 달걀을 삶으면 흰자가 굳어요.

도 교수 좋은 물음입니다. 18장에서 본 것처럼 단백질은 열을 받으면 모양이 바뀌어 기능을 잃지요. 그런데도 형질 전환을 일으키는 무언가는 끓는 열을 견뎌 냅습니다. 단백질이 아닐지 모른다는 첫 실마리였던 셈이지요.

태오 그러니까 그 ‘무언가’가 설계도인 거죠? 피막 만드는 법이 적힌.

도 교수 그렇지. 그리고 바뀐 S형균의 자손도 계속 S형이었어. 설계도가 대대로 전해진 거란다.

에이버리 — 하나씩 지워 보기

도 교수 1944년 미국 록펠러 연구소의 에이버리와 매클라우드, 매카티는 S형균의 추출물을 깨끗이 정제해 형질 전환을 일으키는 물질을 가려냈단다. 아주 적은 양으로도 R형을 S형으로 바꾼 그 물질에서는 단백질·지질·다당류가 검출되지 않았고, 주로 DNA였어⁴.

도 교수 추출물에 분해 효소를 하나씩 넣어 보는 방법도 썼지. 18장에서 효소는 정해진 기질만 골라 분해한다고 했지? 1946년에는 순수한 DNA 분해 효소를 아주 조금만 넣어도 형질 전환 능력이 완전히 사라진다는 것을 보였어⁵.

문제 23-1 지우개로 범인 찾기

그림 23-2는 에이버리 연구진의 실험을 간단히 줄인 것이다. S형균 추출물을 여러 분해 효소로 처리한 뒤 살아 있는 R형균과 함께 길렀을 때, S형균이 나타났는지(○) 나타나지 않았는지(×)를 보여 준다. 이 결과로 내릴 수 있는 결론은?

S형균 추출물 + 처리		S형균이 나타났나	
(가)	처리 없음		○
(나)	단백질 분해 효소		○
(다)	RNA 분해 효소		○
(라)	DNA 분해 효소		×

모두 살아 있는 R형균과 함께 기름. 파란 점 = S형균 무리

[그림 23-2] 문제 23-1의 그림 (가) 처리 없음 ○, (나) 단백질 분해 효소 ○, (다) RNA 분해 효소 ○, (라) DNA 분해 효소 ×(자료: Avery 등 1944, McCarty와 Avery 1946을 줄여 나타냄)

- ① 형질 전환 물질은 단백질이다.
- ② 형질 전환 물질은 RNA다.
- ③ 형질 전환 물질은 DNA다.
- ④ 형질 전환에는 효소가 반드시 있어야 한다.
- ⑤ 단백질과 RNA가 함께 있어야 형질 전환이 일어난다.

태오 ①이요. 그때 다들 단백질이라고 믿었다면서요.

도 교수 믿음이 아니라 표를 보자. (나)에서 단백질을 없앴는데 결과가 어땠지?

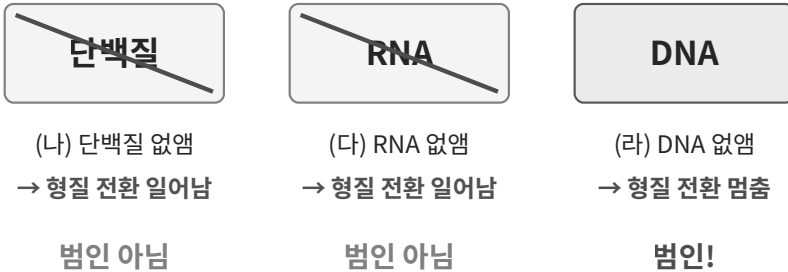
태오 ○요. 단백질을 지워도 S형균이 나왔네요. 그럼 단백질은 아니에요.

도 교수 계획은 이렇단다. 한 물질을 지웠는데도 형질 전환이 일어나면 그 물질은 범인이 아니고, 지웠더니 멈추면 그 물질이 범인이지.

하린 (다)에서 RNA를 지워도 ○, (라)에서 DNA를 지우니까 ×예요. DNA만 없으면 멈춰요.

미숙 김치 맛이 이상할 때 재료를 하나씩 빼 보는 거랑 같네요. 뺐더니 맛이 돌아오는 게 범인이지요.

도 교수 그림 23-3처럼 지워 보면 하나만 남는단다. 정답은 ③이야.



지웠더니 멈추는 것 = 형질 전환 물질 = DNA

[그림 23-3] 풀이 그림 단백질·RNA를 없애도 형질 전환이 일어나므로 둘은 후보에서 빠지고, DNA를 없앨 때만 멈추므로 DNA가 형질 전환 물질이다

태오 그런데도 사람들이 바로 믿지 않았다면 어서요?

도 교수 추출물에 단백질이 아주 조금 남았을지 모른다고 의심하는 사람들이 있었단다. 결정타는 바이러스에서 왔어.

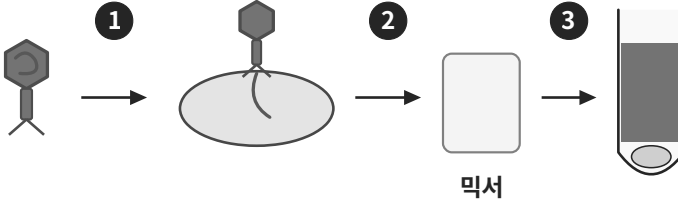
하린 바이러스는 1장에서 세포가 아니라고 배웠던 그거죠?

도 교수 그렇단다. 스스로는 늘어나지 못하고 숙주 세포 안에 들어가야만 불어나지⁶. 그러니 무엇을 들여보내는지가 곧 설계도의 정체란다.

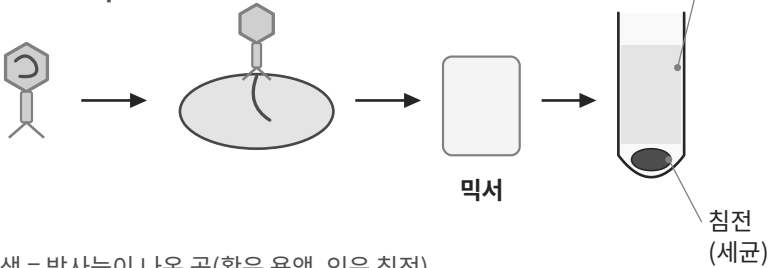
허시와 체이스 — 원자에 꼬리표를 달다

도 교수 파지는 세균을 감염시키는 바이러스야. 단백질 껍질 속에 DNA가 들어있지. 1952년 허시와 체이스는 파지가 세균에 무엇을 집어넣는지 알아보려고 원자에 꼬리표를 달았단다⁷. 그림 23-4를 보렴.

^{35}S : 단백질 껍질 표시



^{32}P : DNA 표시



짙은 색 = 방사능이 나온 곳(황은 용액, 인은 침전)

[그림 23-4] 허시-체이스 실험 방사성 황(^{35}S)으로 단백질 껍질을, 방사성 인(^{32}P)으로 DNA를 표시한 파지를 세균에 감염시킨 뒤 믹서로 흔들어 껍질을 떼어 내고, 세균과 용액에서 방사능을 잰다(모식도)

하린 왜 하필 황과 인이요?

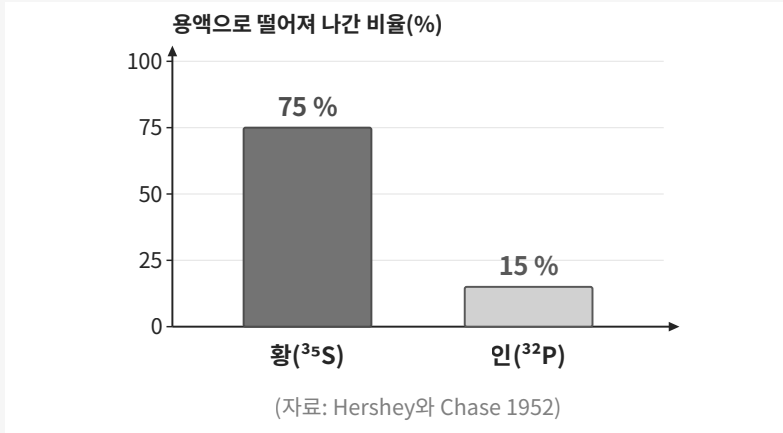
도 교수 원자에서 시작하면 답이 나온단다. 5장의 아미노산 가운데 몇 가지는 결사슬에 황이 있지만 DNA에는 황이 없어. 6장에서 본 DNA의 뼈대에는 인산의 인이 있지만 단백질에는 인이 거의 없지. 황은 단백질만, 인은 DNA만 비추는 꼬리표인 셈이야.

도 교수 감염시킨 뒤 믹서로 세게 흔들면 세균 곁에 붙은 파지 껍질이 떨어져 나가. 그다음 빠르게 돌리면 무거운 세균은 바닥에 가라앉고, 가벼운 껍질은 위쪽 용액에 남지. 그러고 나서 어느 쪽에 황과 인이 있는지 재는 거란다.

태오 설계를 넣은 쪽이 세균 안에 꼬리표를 남기겠네요.

문제 23-2 믹서가 떼어 낸 것

그림 23-5는 감염된 세균을 믹서로 흔든 뒤 용액으로 떨어져 나간 방사성 황과 방사성 인의 비율이다. (1) 세균에 남은 황과 인의 비율을 각각 구하시오. (2) 이 결과가 “세균 속으로 들어가는 것은 주로 DNA다”라는 결론을 뒷받침하는 까닭을 쓰시오.



[그림 23-5] 문제 23-2의 그림 믹서로 흔든 뒤 용액으로 떨어져 나간 비율—황 75 %, 인 15 % (자료: Hershey와 Chase 1952)

태오 (1)은 쉬워요. 황 75 %, 인 15 %요.

도 교수 문제를 다시 읽어 보렴. 그래프는 떨어져 나간 비율이지. 묻는 건 어디에 남은 비율이니?

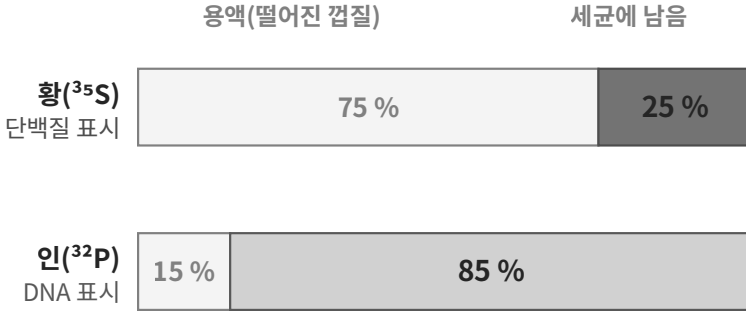
태오 아, 세균에 남은 거요. $100 - 75 = 25 \%$, $100 - 15 = 85 \%$ 예요.

하린 황은 대부분 껍질과 함께 떨어져 나갔고, 인은 대부분 세균 쪽에 남았어요.

도 교수 그림 23-6처럼 황은 단백질, 인은 DNA를 가리킨다는 것까지 이어 보렴.

미숙 껍질은 문밖에 벗어 두고 설계도만 들여보낸 거군요. 그 설계도로 세균 안에서 새 파지가 만들어지고요.

도 교수 그렇습니다. 모범 답은 (1) 황 25 %, 인 85 %이고, (2) 황은 단백질에만, 인은 DNA에만 있으므로 세균에 대부분 남은 인이 DNA가 들어갔음을 보여 주기 때문이지요⁷.



인(DNA)이 대부분 세균 속에 남았다
→ 세균 안으로 들어간 것은 주로 DNA

[그림 23-6] 폴이 그림 황(단백질 표시)은 75 %가 겹질과 함께 용액으로 떨어졌고, 인(DNA 표시)은 85 %가 세균에 남았다. 세균 안으로 들어간 것은 주로 DNA다

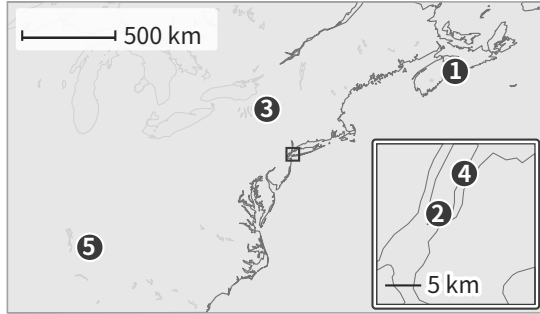
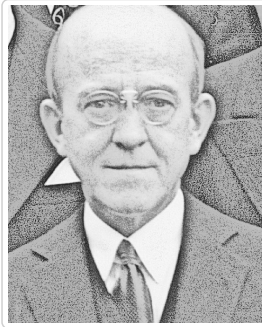
하린 그러니까 세 실험이 모두 DNA를 가리킨 거네요. 세포, 핵, 염색체, DNA의 관계를 헷갈리는 학생이 많다는데⁸, 저는 오늘 순서가 잡혔어요.

도교수 그 DNA가 어떤 모양이기에 설계도가 될 수 있는지는 24장에서 자세히 보자꾸나.

과학자 이야기 오즈월드 에이버리 1877-1955 · 캐나다·미국

태어나 자란 곳 — 에이버리는 1877년 10월 21일 캐나다 노바스코샤주 헬리팩스에서 침례교 목사 조지프 프랜시스 에이버리와 엘리자베스 크라우디의 세 아들 가운데 둘째로 태어났다^{9,10}. 1887년 열 살 때 아버지가 뉴욕 로어 이스트사이드의 매리너스 템플 교회 목사가 되어 온 가족이 뉴욕으로 옮겼다^{10,11,12}. 형 어니스트와 코넷을 배워 일요일 오후마다 교회 계단에서 불며 사람들을 불러 모았고, 국립 음악원 장학생으로 뽑힐 만큼 솜씨가 좋았다^{9,12}. 1892년 형과 아버지가 잇따라 세상을 떠나, 열다섯 살 소년은 어머니와 함께 막넛동생 로이를 돌보았다^{10,11}.

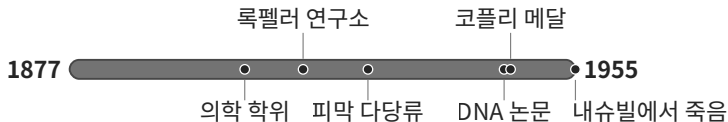
그의 삶을 그림 23-7의 초상과 지도, 연표로 먼저 훑어보자.



오즈월드 에이버리

1877-1955 · 캐나다 · 미국

- ① 할리팩스 — 태어남(1877)
- ② 매리너스 템플 — 뉴욕 이주(1887)
- ③ 콜게이트 대학 — 학사(1900)
- ④ 록펠러 연구소 — 연구(1913~48)
- ⑤ 내슈빌 — 은퇴 · 죽음 · 묻힘(1955)



[그림 23-7] 에이버리의 초상과 삶의 지도, 생애 연표 캐나다 할리팩스에서 태어나 열 살에 뉴욕으로 왔고, 콜게이트 대학과 컬럼비아 대학 의과 대학을 거쳐 1913년부터 35년 동안 뉴욕 록펠러 연구소에서 페렴균을 연구했다. 은퇴한 뒤 동생이 사는 테네시주 내슈빌로 옮겨 그곳에서 세상을 떠났다

배움과 스승 — 1900년 콜게이트 대학을 인문학 학사로 마쳤다. 대학 밴드를 이끌고 웁벤 대회에서 상을 받았지만 과학 과목은 거의 듣지 않았다^{11,13}. 몸집이 작아 친구들은 그를 ‘베이브’라 불렀다^{12,13}. 같은 해 컬럼비아 대학 의과 대학에 들어가 1904년 의사가 되었다^{9,10,11}. 그러나 오래 앓는 환자를 낫게 해 줄 수 없는 것이 괴로워 연구로 돌아섰고, 1907년 브루클린의 호글랜드 연구소에서 세균을 연구하기 시작했다^{9,10,12}. 그곳에서 간호 학생들을 가르치며 ‘교수’를 줄인 ‘페스’라는 별명을 얻었다^{9,12}. 함께 일하던 선배 연구자 벤저민 화이트가 결핵에 걸리자, 그를 따라 결핵 요양원에 가서 결핵 환자를 연구하기 시작했다^{9,10}. 1913년 결핵 환자 연구가 록펠러 연구소 병원장 루퍼스 콜의 눈에 띄어 록펠러로 옮겼다^{10,11}. 1917년 미국이 제1차 세계 대전에 뛰어들자 육군 의무대에 들어가 독감 유행을 연구했다. 캐나다

태생이라 이등병으로 시작했지만, 1918년 미국 시민권을 얻고 대위가 되었다^{10,11}. 독감의 원인으로 의심받던 세균을 잘 기르는 배지를 만들어 널리 쓰이게 했지만, 그 세균은 모든 환자에게서 나오지 않았다. 진짜 원인인 바이러스는 1930년대에야 밝혀졌다^{9,11}.

결혼과 가족 — 평생 결혼하지 않았고 자녀도 없었다^{11,14}. 록펠러에 온 뒤 동료 의사 도세와 한 아파트에 살며, 30년 넘게 밤마다 병의 원인을 두고 이야기를 나누었다^{10,14,15}. 동생 로이도 형을 따라 세균학자가 되어 내슈빌의 밴더빌트 대학 의과 대학에서 가르쳤다^{9,10}. 실험실 동료들과는 말이 많고 다정했지만 큰 모임을 꺼려 학회에도 잘 나가지 않았다. 해마다 여름 메인주의 섬에서 요트를 타는 것이 거의 유일한 나들이였다^{12,13}.

발견 — 에이버리는 록펠러 병원 6층 실험실에서 35년 동안 페렴균 하나를 붙들고 살았다^{10,13}. 페렴균은 피막이 다른 여러 유형으로 나뉜다. 그는 도세와 함께 폐렴 환자의 피와 오줌에서 유형마다 다른 ‘특이 가용성 물질’을 찾았고, 1923년 하이델버거와 함께 그것이 피막의 다당류임을 밝혔다^{10,16}. 단백질이 아닌 당도 면역의 특이성을 정한다는 첫 증거였다^{9,17}. 1929년에는 괴벨과 함께 당을 단백질에 화학적으로 이어 붙이면 면역 반응이 훨씬 세진다는 것을 보였다. 이 원리는 50여 년 뒤 어린이에게 놓는 접합 백신으로 되살아났다^{10,18}. 1928년 그리피스스의 생쥐 실험 소식을 들은 그는 처음에 무언가 잘못되었을 것이라 여겼다. 그러나 연구실에서 생쥐 대신 시험관 속에서도 형질 전환이 일어남을 확인한 뒤, 이 수수께끼는 20년 가까이 연구실의 한가운데 자리했다^{10,19}. 1934년 그레이브스병으로 갑상샘 수술을 받고 돌아와 형질 전환 물질 찾기에 매달렸다^{11,15}. 1943년 65세로 정년을 맞았지만 1948년까지 실험실을 떠나지 않았다^{9,10}. 1943년 5월, 연구실 밖에서 이 결과를 처음 들은 사람은 동생 로이였다¹⁵. 그 편지에서 그는 “거품을 부는 건 재미있지만, 남이 터뜨리기 전에 스스로 터뜨려 보는 게 현명하다”고 썼다고 전한다⁹.

함께한 사람들 — 도세(1882~1964)는 페렴균의 유형을 나누는 방법을 함께 만들었고, 뒤에 컬럼비아 대학으로 옮겨 성홍열이 연쇄상구균 인두염에서 온다는 것과 감기가 바이러스로 생긴다는 것을 밝혔다^{10,20}. 화학자 하이델버거(1888~1991)는 다당류 연구를 이어 항체가 단백질임을 보였고, 현대 면역 화학의 아버지로 불리며 103세까지 살았다¹⁷. 노바스코사 출신의 매클라우드(1909~1972)는 에이버리가 아플 때 형질 전환 연구를 이끌었고,

1941년 뉴욕 대학 미생물학 주임 교수가 되어 떠났다^{11,21}. 그 자리를 이은 매카티(1911~2005)는 1941년 가을 합류해 DNA 양을 재는 시약으로 DNA와 형질 전환 능력이 함께 움직임을 보였다. 뒤에 록펠러 대학 병원장을 지냈고, 1985년 회고록 『The Transforming Principle』을 썼다. 2005년 1월 친구들과 극장에 갔다가 쓰러져 93세로 세상을 떠났다^{11,19}. 연구실에서 10년 넘게 일한 미생물학자 뒤보는 뒤에 풀리처상을 받은 작가가 되었고, 1976년 스승의 전기를 펴냈다^{11,22}.

대표 저서와 논문 - 「The soluble specific substance of pneumococcus」(1923) — ‘폐렴균의 특이 가용성 물질’. 하이델버거와 함께 피막 다당류를 밝힌 논문¹⁶. - 「Chemo-immunological studies on conjugated carbohydrate-proteins」(1929) — ‘당-단백질 접합체의 화학 면역학 연구’. 괴벨과 함께 쓴 접합 백신의 출발점¹⁸. - 「Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types」(1944) — ‘폐렴균 유형을 바꾸는 물질의 화학적 본성 연구’. 매클라우드·매카티와 함께 쓴 논문⁴.

마지막 날들 — 1948년 일흔한 살에 은퇴해 동생 가족이 사는 내슈빌로 옮겼다. 연구를 이어 갈 자리를 마다하고 산책과 정원 가꾸기를 즐기는 시골 신사로 지냈다^{9,11,12}. 1954년 간암 진단을 받았고, 1955년 2월 20일 내슈빌에서 가족이 지켜보는 가운데 세상을 떠났다. 만 77세였다^{10,11,23}. 내슈빌의 마운트 올리벳 묘지에 묻혔다^{9,23}.

남긴 것 — 1945년 영국 왕립 학회의 코플리 메달을 받았다^{10,24}. 노벨상 후보에는 1930~1950년대 내내 수십 차례 올랐지만 끝내 받지 못했고, 노벨 화학상 수상자 티셀리우스는 이를 안타까운 일이라고 했다^{9,10,13}. 제자 뒤보는 추모 글에서 “그의 영광에는 모자람이 없었고, 모자란 것은 우리의 영광이었다”는 물리에르에게 바친 말을 빌려 이 빈자리를 아쉬워했다¹⁰. 레더버그는 그의 연구실이 현대 DNA 연구의 역사적 발판이 되었다고 평가했다⁹. 달의 충돌 구덩이 하나가 그의 이름을 따다⁹.

오늘의 정리

- 20세기 전반에는 다양한 단백질이 유전 물질이라는 생각이 많았다.
- 그리피스(1928): 죽은 S형균의 무언가가 살아 있는 R형균을 S형균으로 바꾸었다(형질 전환).
- 에이버리 연구진(1944): 형질 전환 물질은 DNA다. DNA 분해 효소만 형질 전환을 막는다.
- 허시-체이스(1952): 황(단백질)과 인(DNA)에 꼬리표를 달아, 파지가 세균에 넣는 것은 DNA임을 보였다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 허시-체이스 실험에서 DNA를 표시하는 데 방사성 인을 쓴 까닭으로 옳은 것은?
 - ① 인은 단백질에 가장 많은 원소이기 때문이다.
 - ② 인은 DNA의 뼈대에 있고 단백질에는 거의 없기 때문이다.
 - ③ 인은 방사능이 없기 때문이다.
 - ④ 인은 파지의 껍질에만 있기 때문이다.
 - ⑤ 인은 황보다 가볍기 때문이다.
2. 그리피스 실험에서 열로 죽인 S형균만 넣었을 때 생쥐가 살았다는 결과가 왜 중요한지 설명하시오.

과학의 최전선 유전 정보 없이 유전되는 것 — 후성 유전

여기까지 밝혀졌다 — 지난 20년 동안 DNA를 감은 단백질(염색질)을 바꾸는 효소들이 발견되면서, 염기 서열은 그대로인 채 유전자가 쓰이는 정도를 바꾸는 **후성 유전** 조절은 기전을 따지는 연구 분야가 되었다²⁵. **아직 모른다** — 먹는 것, 들이마시는 공기, 겪은 스트레스가 자손에게까지 전해질까? 환경이 유전자 쓰임에 영향을 주는 것은 분명하고, 후성 형질이 세대를 넘어 전해지는 일은 식물에서는 분명히 일어난다. 하지만 그 가운데 얼마가 환경 탓인지, 사람에게서도 일어나는지는 분명하지 않다²⁶. **가설과 연구** — 세대를 건너뛰는 전달이 있다면, 정자와 난자가 만들어질 때 대부분 지워지는 표지가 어떻게 살아남아 넘어가는지가 핵심 물음이다. 연구자들은 식물과 실험동물에서 그 기전을 찾으며, 우연이나 DNA 차이에서 오는 효과와 가려내려 한다²⁶.

이 장의 출처

- Dahm, R. (2005). Friedrich Miescher and the discovery of DNA. *Developmental Biology*, 278(2), 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2004.11.028>
- Levene, P. (1919). THE STRUCTURE OF YEAST NUCLEIC ACID. *Journal of Biological Chemistry*, 40(2), 415–424. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)87254-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)87254-4)
- Griffith, F. (1928). The Significance of Pneumococcal Types. *Journal of Hygiene*, 27(2), 113–159. <https://doi.org/10.1017/s0022172400031879>
- Avery, O. T., MacLeod, C. M., & McCarty, M. (1944). STUDIES ON THE CHEMICAL NATURE OF THE SUBSTANCE INDUCING TRANSFORMATION OF PNEUMOCOCCAL TYPES. *Journal of Experimental Medicine*, 79(2), 137–158. <https://doi.org/10.1084/jem.79.2.137>
- McCarty, M., & Avery, O. T. (1946). STUDIES ON THE CHEMICAL NATURE OF THE SUBSTANCE INDUCING TRANSFORMATION OF PNEUMOCOCCAL TYPES. *Journal of Experimental Medicine*, 83(2), 89–96. <https://doi.org/10.1084/jem.83.2.89>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.
- Hershey, A. D., & Chase, M. (1952). INDEPENDENT FUNCTIONS OF VIRAL PROTEIN AND NUCLEIC ACID IN GROWTH OF BACTERIOPHAGE. *Journal of General Physiology*, 36(1), 39–56. <https://doi.org/10.1085/jgp.36.1.39>
- Lewis, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance - do students see any relationship?. *International Journal of Science Education*, 22(2), 177–195. <https://doi.org/10.1080/095006900289949>
- Wikipedia. (2026). Oswald Avery. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Oswald_Avery
- Rijkers, G., Dekker, K., & Berbers, G. (2024). Oswald Avery: Pioneer of Bacterial Vaccines and the First to Discover the Function of DNA. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.71465>
- EBSCO. (2026). Oswald Theodore Avery. EBSCO Research Starters. <https://www.ebsco.com/research-starters/history/oswald-theodore-avery>
- Cold Spring Harbor Laboratory DNA Learning Center. (2026). Biography 17: Oswald Theodore Avery (1877–1955). DNA from the Beginning. <https://dnalc.cshl.edu/view/16391-Biography-17-Oswald-Theodore-Avery-1877-1955-.html>
- Colgate Magazine. (2020). Gene idol. Colgate University. <https://news.colgate.edu/magazine/2020/01/31/gene-idol/>
- National Library of Medicine. (2026). The Oswald T. Avery Collection: Biographical overview. Profiles in Science. <https://profiles.nlm.nih.gov/spotlight/cc/feature/biographical>
- Cobb, M. (2016). A Speculative History of DNA: What If Oswald Avery Had Died in 1934?. *PLOS Biology*, 14(12), e2001197. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001197>
- Heidelberger, M., & Avery, O. T. (1923). THE SOLUBLE SPECIFIC SUBSTANCE OF PNEUMOCOCCUS. *Journal of Experimental Medicine*, 38(1), 73–79. <https://doi.org/10.1084/jem.38.1.73>
- Wikipedia. (2026). Michael Heidelberger. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Heidelberger
- Avery, O. T., & Goebel, W. F. (1929). CHEMO-IMMUNOLOGICAL STUDIES ON CONJUGATED CARBOHYDRATE-PROTEINS. *Journal of Experimental Medicine*, 50(4), 533–550. <https://doi.org/10.1084/jem.50.4.533>
- Lederberg, J., & Gotschlich, E. C. (2005). A Path to Discovery: The Career of Maclyn McCarty. *PLoS Biology*, 3(10), e341. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030341>
- Wikipedia. (2026). Alphonse Dochez. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Alphonse_Dochez
- Wikipedia. (2026). Colin Munro MacLeod. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Colin_Munro_MacLeod
- Wikipedia. (2026). René Dubos. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Ren%C3%A9_Dubos
- Find a Grave. (2026). Dr Oswald Theodore Avery (1877–1955). <https://www.findagrave.com/memorial/14677221/oswald-theodore-avery>
- Wikipedia. (2026). Copley Medal. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Copley_Medal

25. Allis, C. D., & Jenuwein, T. (2016). The molecular hallmarks of epigenetic control. *Nature Reviews Genetics*, 17(8), 487–500. <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.59>
26. Heard, E., & Martienssen, R. A. (2014). Transgenerational Epigenetic Inheritance: Myths and Mechanisms. *Cell*, 157(1), 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.02.045>

DNA 이중 나선 — 수소 결합으로 짝지은 두 가닥

출발점 극성·수소 결합 앞 권 · 유전 물질 23장

새 개념 DNA 이중 나선 · 염기쌍

이어짐 중심 원리 25장 · 돌연변이 28장

기본개념 이 장의 개념 8개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

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

1	X선 회절	규칙적으로 늘어선 원자에 X선이 흠어져 무늬를 만드는 현상으로, 원자 배열을 읽는 데 쓴다.
2	샤가프 규칙	DNA에서 A의 양은 T와, G의 양은 C와 거의 같다는 관찰.
3	이중 나선	DNA 두 가닥이 반대 방향으로 놓여 서로 감긴 모양.
4	염기쌍	두 가닥의 염기가 수소 결합으로 이룬 짝(A-T 2개, G-C 3개).
5	상보성	한 가닥의 염기 순서가 정해지면 짝 규칙에 따라 다른 가닥의 순서가 정해지는 성질.
6	히스톤	DNA를 실패처럼 감는 단백질.
7	유전체	한 생물의 세포 한 벌에 든 DNA 전체.
8	뉴클레오솜	DNA 146염기쌍이 히스톤 8개로 된 실패를 감아 이룬 단위.

7월 둘째 토요일 오전, 돌집 과학방. 장마가 잠시 건혀 창으로 햇살이 들었다. 탁자에는 브로콜리 한 송이, 소금, 주방 세제, 커피 거름종이, 얼음물에 담가 둔 에탄올 병이 놓여 있었다. 모두 보안경을 썼고, 에탄올은 불에 잘 붙으니 가스레인을 꺼 두었다.

도 교수 23장에서 유전 물질은 DNA라는 것을 확인했지. 오늘은 그 DNA를 눈으로 보고, 어떤 모양이기에 설계도가 될 수 있는지 알아보자. 원자에서 시작해 보자. 6장에서 본 뉴클레오타이드의 인산은 음전하를 띠고, 화학 편 24장에서 배운 수소 결합이 오늘의 주인공이란다.

브로콜리에서 DNA 꺼내기

하린이 브로콜리 꽃봉오리를 잘게 다져 소금물과 함께 절구에 찼었다. 미숙이 세제를 한 숟가락 넣고 살살 저은 뒤 거름종이로 걸렀다. 태오가 컵을 기울여 차가운 에탄올을 벽을 따라 천천히 부었다. 두 층의 경계에서 흰 실 뭉치가 스르르 떠올랐다.

하린 와, 솜사탕 같아요! 이게 전부 DNA예요?

도 교수 세포 수십만 개의 DNA가 엉킨 뭉치란다. 그림 24-1로 단계마다 분자에게 무슨 일이 있었는지 보자. 찼으면 세포가 흩어지고, 세제는 9장의 인지질 두 겹으로 된 세포막과 핵막을 녹여 DNA를 풀어놓아. 소금의 Na^+ 는 인산의 음전하를 가려 DNA 가닥끼리 뭉치게 돕지. DNA는 극성이라 물에는 녹지만 에탄올에는 잘 녹지 않아 두 층의 경계에서 엉겨 나온단다¹.

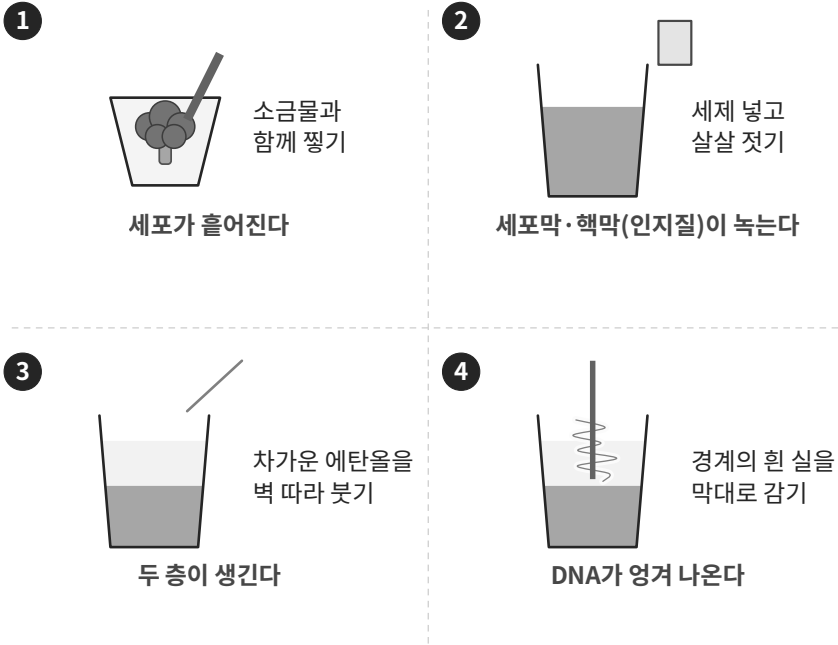
미숙 설거지할 때 세제가 기름때를 녹이는 거랑 같네요. 막도 기름 같은 분자로 되어 있으니까요.

태오 아까 세제를 넣고 살살만 저으라고 하신 건 왜예요? 세게 저으면 더 빨리 섞일 텐데요.

도 교수 DNA는 아주 가늘고 긴 사슬이라 세게 저으면 토막토막 끊어진단다. 짧게 끊기면 서로 엉기기 어려워 실 뭉치가 잘 안 보이지¹.

하린 그러니까 이 흰 뭉치는 세포 속에 있던 긴 실들이 소금 덕에 뭉치고, 에탄올에 쫓겨 나온 거죠?

도 교수 잘 정리했구나. 그런데 이 실에 설계도가 어떻게 적혀 있는지는 모양을 알아야 풀 수 있단다.



[그림 24-1] 브로콜리 DNA 추출 ① 소금물과 함께 찌기 ② 세제를 넣어 막 녹이기 ③ 걸러 낸 즙에 차가운 에탄올을 붓기 ④ 경계에서 엉긴 흰 DNA를 막대로 감기. 단계마다 분자에게 일어나는 일을 옆에 적었다(모식도)

사진 51과 이중 나선

도 교수 이 실은 너무 가늘어 현미경으로도 모양이 보이지 않아. 그래서 과학자들은 X선을 쬔단다. 원자들이 규칙적으로 늘어서 있으면 흩어진 X선이 무늬를 만들어. 이 현상이 **X선 회절**이고, 그 무늬로 원자 배열을 거꾸로 알아낼 수 있단다.

도 교수 1953년 런던 킹스 칼리지의 프랭클린과 고슬링은 물기를 머금은 DNA 섬유에서 선명한 X자 무늬 사진을 얻었어. 흔히 ‘사진 51’이라 부르지. 그들은 이 무늬가 나선과 맞고, 인산 뼈대가 바깥에 있으며, 3.4 nm마다 같은 모양이 되풀이된다고 보았단다². 같은 연구소의 윌킨스 연구진도 나선을 가리키는 사진을 냈지³.

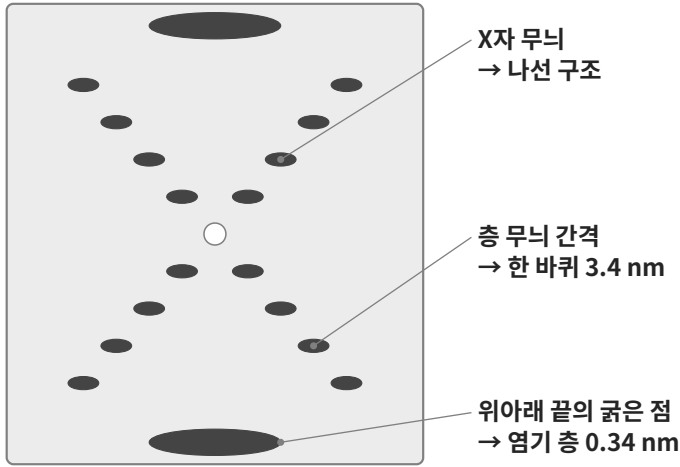


사진 51을 본뜬 모식도

[그림 24-2] X선 회절 무늬 읽기 가운데 X자는 나선이라는 표시이고, 위아래 끝의 굵은 점은 0.34 nm 간격의 염기 층을, 층 무늬 간격은 한 바퀴 3.4 nm를 가리킨다(사진 51을 본뜬 모식도)

태오 X자 하나 보고 어떻게 나선을 알아요?

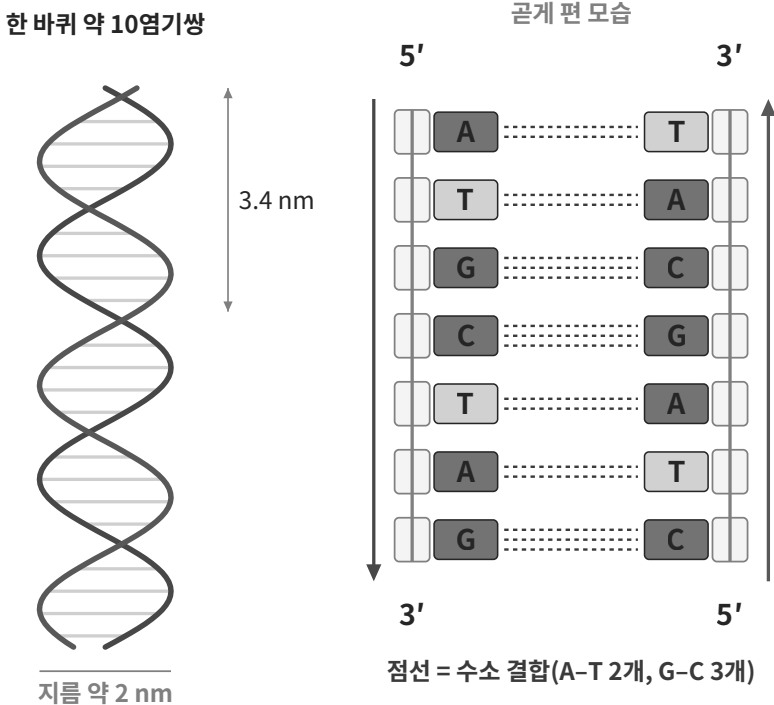
도 교수 용수철을 옆에서 보면 선이 비스듬히 엇갈려 X처럼 보이지. 그림 24-2처럼 X의 기울기는 나선이 감긴 각도를, 줄무늬 간격은 한 바퀴의 길이를 알려 준단다. 회절 무늬도 그렇단다. 프랭클린의 자료는 모형을 세우던 사람들에게 결정적인 잣대가 되었어⁴.

하린 그러니까 사진은 “나선이고, 뼈대는 바깥, 한 바퀴는 3.4 nm”라는 조건표를 준 거네요. 모형은 그 조건을 다 맞춰야 하고요.

도 교수 또 하나의 실마리는 1950년 샤가프의 규칙이었지. 여러 생물의 DNA를 분석했더니 생물마다 염기 조성은 달라도 A의 양과 T의 양이, G의 양과 C의 양이 거의 같았어⁵. 1953년 폴링은 인산이 안쪽에 모인 세 가닥 나선을 내놓았지만, 이 자료들과 맞지 않아 틀린 것으로 드러났단다⁶.

도 교수 같은 1953년 케임브리지의 왓슨과 크릭은 두 가닥이 서로 감기고 염기가 안쪽에서 짝을 짓는 **이중 나선** 모형을 발표했어⁷. 그림 24-3을 보렴. 두 가닥은 서로 **반대 방향**으로 놓여 있어. 당의 탄소 번호를 따라 한 가닥이 5'→3'로 내려오면, 짝 가닥은 3'→5'로 내려오지. 도로의 위아래 차선처럼

나란히 달리되 방향이 거꾸로인 셈이야. 한 바퀴에 약 10염기쌍, 길이 약 3.4 nm, 지름은 약 2 nm란다⁸. 왓슨·크릭·윌킨스는 1962년 노벨 생리의학상을 받았어⁹.



[그림 24-3] DNA 이중 나선과 염기쌍 두 가닥의 당-인산 뼈대가 바깥에서 반대 방향(5'→3', 3'→5')으로 달리고, 안쪽에서 A-T는 수소 결합 2개, G-C는 3개로 짝짓는다. 한 바퀴 약 3.4 nm, 지름 약 2 nm(모식도)

수소 결합이 정한 짝

하린 왜 A는 꼭 T하고만 짝을 지어요?

도 교수 모양과 수소 결합의 수가 맞아야 하기 때문이란다. 화학 편 24장에서 수소 결합은 N-H나 O-H의 수소가 이웃 분자의 N·O에 끌리는 약한 인력이라고 했지. A와 T 사이에는 수소 결합 2개, G와 C 사이에는 3개가 맞물려. 1956년 폴링과 코리가 G-C의 셋째 수소 결합을 제안했고, 오늘날 교과서의 설명이 되었지^{8,10}.

태오 수소 결합은 공유 결합의 한 종류죠? 그래서 튼튼한 거고요.

도 교수 많이 헛갈리는 곳이란다¹¹. 수소 결합은 원자를 잇는 공유 결합이 아니라 분자 부분 사이의 약한 끌림이야. 하나하나는 약해서 두 가닥을 지퍼처럼 열 수 있고, 수백만 개가 모이면 단단하지. 이렇게 짝이 정해져 한 가닥의 순서가 다른 가닥의 순서를 정하는 성질을 **상보성**이라 해. 왓슨과 크릭은 두 가닥이 풀려 저마다 새 짝을 맞추면 DNA가 똑같이 베껴진다고 내다보았단다¹².

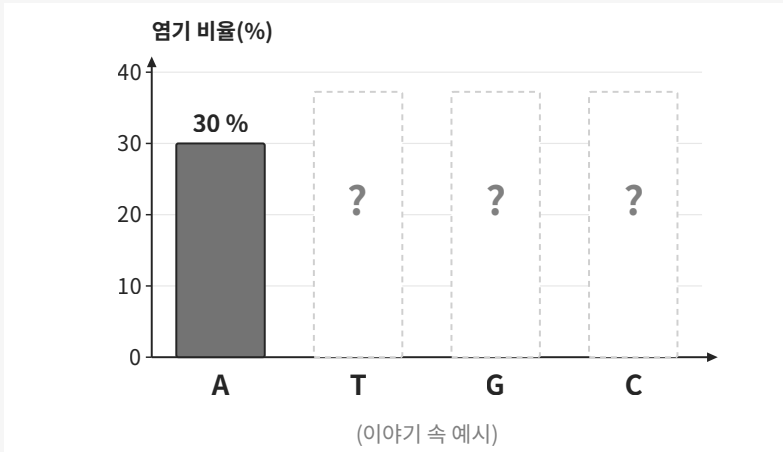
미숙 두부 틀과 두부처럼, 한쪽 모양을 알면 다른 쪽이 정해지는 거네요.

태오 시험엔 어떻게 나와요? 짝 맞추기만 하면 되나요?

도 교수 짝과 함께 방향, 수소 결합 수를 한꺼번에 묻는단다. 샤가프 규칙으로 비율을 셈하는 문제도 자주 나오지.

문제 24-1 샤가프의 저울

그림 24-4는 어떤 생물의 DNA에서 네 염기의 비율을 재다가 A만 적어 둔 기록이다(이야기 속 예시). A가 30 %일 때 G의 비율은?



[그림 24-4] 문제 24-1의 그림 네 염기 가운데 A 30 %만 적혀 있다(이야기 속 예시)

- ① 20 %
- ② 30 %
- ③ 35 %
- ④ 40 %
- ⑤ 70 %

태오 ⑤요. A와 G를 합치면 100이니까 70 %.

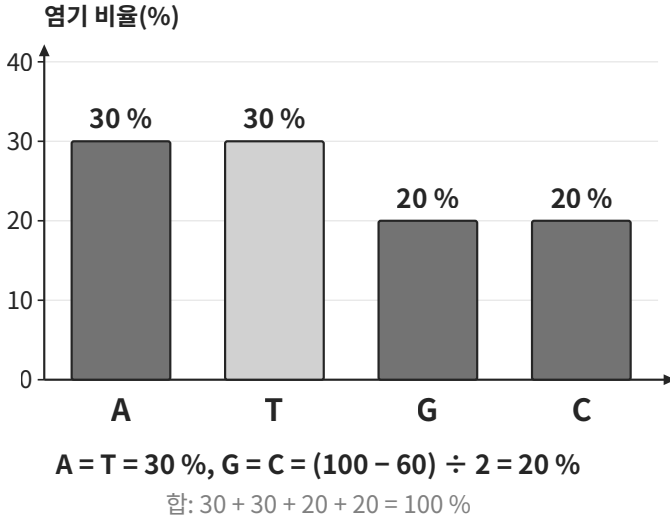
도 교수 조건을 다시 읽어 보렴. 염기는 몇 가지지?

태오 네 가지요. 아, A하고 G만 있는 게 아니네요.

도 교수 계획을 세우자. 짝 규칙으로 먼저 T를, 그다음 남은 몫을 G와 C가 나눠 가지는 거야.

하린 A-T 짝이니까 T도 30 %예요. A와 T를 합치면 60 %, 남은 40 %를 G와 C가 똑같이 나누니 G는 20 %예요.

도 교수 그림 24-5처럼 막대를 채우면 합이 100 %로 딱 맞는단다. 정답은 ①이야.



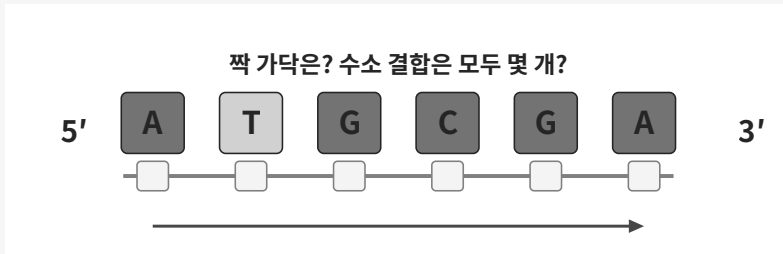
[그림 24-5] 풀이 그림 A = T = 30 %, G = C = 20 %. 네 막대의 합은 100 %다

미숙 A-T가 많은 DNA는 G-C가 적고, 그 반대도 마찬가지겠네요.

도 교수 그렇습니다. 샤가프가 여러 생물에서 본 규칙은 사실 두 가닥이 짝을 지은 흔적이었지요. 짝이 정해져 있으니 양도 같을 수밖에요⁵.

문제 24-2 짝 가닥 쓰기

그림 24-6은 DNA 한 가닥의 일부 5'-ATGCGA-3'이다. (1) 짝을 이루는 가닥의 염기 순서를 방향과 함께 쓰고, (2) 이 여섯 염기쌍 사이의 수소 결합은 모두 몇 개인지 구하시오.



[그림 24-6] 문제 24-2의 그림 5' 끝에서 3' 끝으로 A, T, G, C, G, A가 이어진 한 가닥

하린 짝은 TACGCT예요. 수소 결합은 여섯 쌍이니까 12개요.

도 교수 두 가지를 되물어 보자. 짝 가닥은 어느 쪽에서 어느 쪽으로 달리지?
그리고 모든 쌍의 수소 결합이 2개였니?

하린 반대 방향이니까 3'-TACGCT-5'예요. 그리고 G-C는 3개였어요!

태오 A-T, T-A, A-T가 2개씩이라 6개, G-C, C-G, G-C가 3개씩이라 9개,
합쳐서 15개예요.

도 교수 그림 24-7에 쌍마다 적어 두었다. 모범 답은 (1) 3'-TACGCT-5', (2)
15개야.

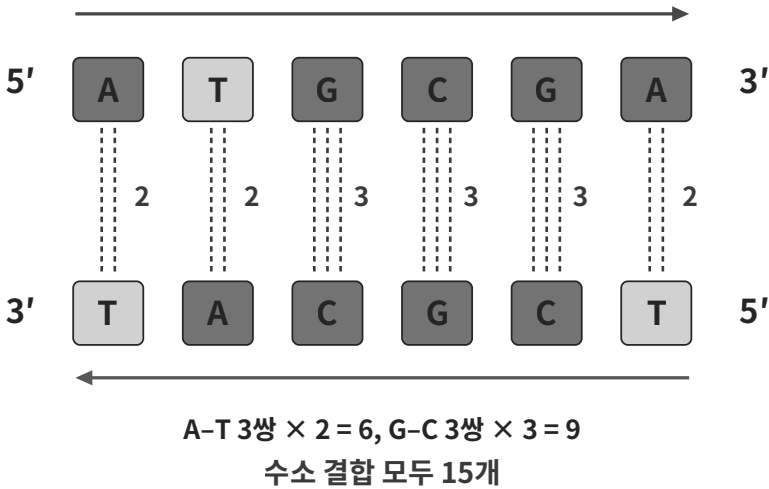
미숙 G-C가 많을수록 두 가닥이 더 단단히 붙어 있겠네요.

도 교수 그렇습니다. 사람 세포 한 벌의 DNA는 약 30억 염기쌍이지요¹³. 한 쌍이
0.34 nm이니 곧게 펴면 약 1 m, 두 벌이면 2 m쯤 됩니다. 그것이 지름 몇
μm밖에 안 되는 핵 속에 접혀 들어 있어요⁸.

하린 2 m짜리 실을 먼지보다 작은 공에 넣은 셈이네요. 어떻게 엉키지 않아요?

도 교수 DNA는 히스톤이라는 단백질 실패에 감겨 차곡차곡 접힌단다¹⁴. 그
접힘이 세포 속에서 정확히 어떤 모양인지는 아직 연구 중이야. 2001년에
사람 유전체의 초안을 처음 읽었고¹⁵, 2022년에야 빈틈없이 다 읽었으니,
읽는 것과 접힌 모양을 아는 것은 또 다른 일이지¹³.

미숙 긴 국수를 엉키지 않게 타래로 감아 두는 것과 비슷하겠네요.



[그림 24-7] 풀이 그림 위 가닥 5'-ATGCGA-3'에 짝 가닥 3'-TACGCT-5'가 반대 방향으로 붙는다. 수소 결합은 A-T 3쌍 $\times$ 2 = 6개, G-C 3쌍 $\times$ 3 = 9개, 모두 15개

과학자 이야기 로절린드 프랭클린 1920-1958 · 영국

태어나 자란 곳 — 프랭클린은 1920년 7월 25일 런던 노팅힐에서 태어났다. 은행가 엘리스 프랭클린과 유리엘 웨일리의 다섯 남매 가운데 둘째이자 맏딸이었고, 집안은 넉넉하고 이름난 유대계 가문이었다^{16,17,18}. 열한 살에 런던 해머스미스의 세인트 폴 여학교에 들어갔는데, 물리와 화학을 가르치는 몇 안 되는 여학교였다. 그녀는 이곳에서 과학과 라틴어, 운동에서 두루 뛰어났다^{16,17,19}.

그녀의 삶을 그림 24-8의 지도와 연표로 먼저 훑어보자.



[그림 24-8] 프랭클린의 삶의 지도와 생애 연표(저작권이 풀린 사진을 찾지 못해 이름 카드로 대신했다) 런던 노팅힐에서 태어나 케임브리지에서 화학을 공부했고, 런던 남서쪽의 석탄 연구소와 파리의 국립 중앙 화학 연구소를 거쳐 런던 킹스 칼리지와 버크벡 칼리지에서 X선 회절로 DNA와 바이러스를 연구했다. 첼시의 병원에서 세상을 떠나 윌스던의 유대인 묘지에 묻혔다

배움과 스승 — 1938년 케임브리지 대학 뉴넘 칼리지에 들어가 화학을 공부하고 1941년 졸업했다^{16,17,18}. 마지막 해에 마리 퀴리의 제자였던 프랑스 물리학자 아드리엔 바일과 사귀며 프랑스어와 프랑스 생활을 좋아하게 되었다^{16,17}. 이어 화학자 노리시 밑에서 대학원 연구를 시작했지만 한 해 만에 그만두었다. 노리시는 뒷날 그녀가 여성의 지위를 남성과 같게 높이려 한 것이 마음에 들지 않았다고 털어놓았다^{16,17}. 1942년부터 런던 남서쪽 킹스톤의 영국 석탄 이용 연구 협회에서 석탄 속 미세한 구멍을 연구했고, 이 연구로

1945년 케임브리지에서 박사 학위를 받았다^{16,17,18}. 1947년 바일의 소개로 파리 국립 중앙 화학 연구소의 결정학자 메링 밑에 들어가, 결정이 고르지 않은 물질을 X선 회절로 분석하는 기술을 익혔다^{16,17,18}. 주말이면 동료들과 산을 탔고, 프랑스 요리와 프랑스어에 능숙해졌다¹⁷.

결혼과 가족 — 결혼하지 않았고 자녀도 없었다^{16,17}. 1956년 미국을 돌아 만난 한 과학자를 마음에 두었지만, 곧 병의 첫 증상이 나타나자 스스로 관계를 정리했다^{16,17}. 부모에게 돈을 받지 않고 자기 월급으로만 살았고, 여행할 때도 3등칸을 즐겨 탔다¹⁷. 여동생 제니퍼 글린은 뒷날 언니의 삶을 다룬 글을 남겼다^{16,17}.

발견 — 1951년 1월 킹스 칼리지의 랜들 연구실에 들어온 그녀는 습도를 조절할 수 있는 카메라를 만들어, DNA 섬유가 마른 상태의 짧고 굵은 ‘A형’과 젖은 상태의 길고 가는 ‘B형’으로 바뀐다는 것을 가려냈다^{16,17,20}. 킹스 칼리지에는 여성이 들어갈 수 없는 남성 전용 휴게 식당이 있어 그녀를 언짢게 했지만, 점심은 대개 연구소 동료들과 남녀가 함께 쓰는 식당에서 먹었다^{16,17}. 1952년 7월에는 A형이 나선이 아니라고 여겨, 고슬링과 함께 “A형 나선의 죽음”을 알리는 장난 부고를 써 월킨스를 놀렸다^{16,20}. 1953년 1월 30일, 월킨스는 찾아온 왓슨에게 사진 51을 보여 주었다. 버크백으로 옮길 준비를 하던 프랭클린의 사진은 고슬링을 거쳐 월킨스에게 넘어가 있었고, 고슬링은 그녀도 알고 있었다고 말한다^{16,20}. 2월에는 페루츠가 그녀의 계산이 담긴 연구 보고서를 크릭에게 건넸다. 이 보고서는 공개 자료는 아니었지만 비밀도 아니었고, 왓슨과 크릭은 이를 허락 없이 자기들 모형을 확인하는 데 썼다^{17,20}. 그녀의 3월 17일 원고는 이미 두 가닥 나선에 이르러 있었다^{16,17}. 그 뒤 버크백에서 5년 동안 바이러스 논문 17편을 냈고, 담배 모자이크 바이러스는 단백질 조각이 나선으로 쌓여 속이 빈 막대를 이루고, RNA 가닥이 그 단백질 사이에 나선으로 감겨 있음을 밝혔다^{17,18,21}.

함께한 사람들 — 대학원생 고슬링(1926~2015)은 사진 51을 함께 찍었고, 그녀가 버크백으로 떠난 뒤에도 그녀의 지도를 받아 학위 논문을 썼다. 뒤에 런던 가이 병원의 의학 물리학 교수가 되어 초음파로 동맥 경화를 진단하는 기술을 발전시켰다^{22,23}. 월킨스(1916~2004)와는 성격이 정반대라 끝내 가까워지지 못했다. 그는 1962년 노벨상을 받았지만, 평생 고슬링에게 자기가 그녀에게 모질었는지를 되물곤 했다^{17,22,24}. 버크백의 학과장 버널(1901~1971)은 그녀를 데려왔고, 그녀의 사진을 “어떤 물질에서 찍은

X선 사진 가운데 가장 아름다운 것”이라 기렸다^{17,18,25}. 1953년 말 버크벡에 온 클루그(1926~2018)는 그녀의 사진에 반해 함께 바이러스를 연구했고, 그녀가 세상을 떠난 뒤 연구 모임을 이끌었다. 1982년 노벨 화학상 수상 연설에서 그는 큰 문제에 도전하는 본보기를 그녀에게서 배웠다고 말했다^{17,26,27}.

대표 저서와 논문 - 『The physical chemistry of solid organic colloids with special reference to coal』 (1945) — ‘석탄을 중심으로 본 고체 유기 콜로이드의 물리 화학’. 박사 학위 논문^{16,18}. - 「Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons」 (1951) — ‘흑연이 되는 탄소와 되지 않는 탄소의 결정 성장’²⁸. - 「Molecular configuration in sodium thymonucleate」 (1953) — ‘티모핵산 나트륨의 분자 배치’. 고슬링과 함께 사진 51을 실은 논문². - 「Evidence for 2-chain helix in crystalline structure of sodium deoxyribonucleate」 (1953) — ‘A형 DNA에서 찾은 두 가닥 나선의 증거’²⁹. - 「Structure of tobacco mosaic virus」 (1955) — ‘담배 모자이크 바이러스의 구조’²¹.

마지막 날들 — 1956년 미국 출장 중 배가 불러 오는 것을 느꼈고, 런던으로 돌아와 그해 9월 수술에서 배 속의 종양 둘이 발견되었다^{16,18}. 세 차례 수술과 시험적인 항암 치료를 받으면서도 일을 놓지 않아, 1956년에 논문 7편, 1957년에 6편을 냈다^{16,18}. 1958년 4월 16일 런던 첼시의 로열 마스던 병원에서 난소암으로 세상을 떠났다. 만 37세였다^{16,17,19}. 이튿날 윌스턴 유대인 묘지의 가족 묘역에 묻혔고, 묘비에는 “과학자. 바이러스에 대한 그녀의 연구와 발견은 인류에게 오래도록 이로움으로 남을 것이다”라고 새겨졌다^{16,30}.

남긴 것 — 노벨상은 세상을 떠난 사람을 후보로 올릴 수 없어, 1962년 DNA 구조로 상을 받을 때 그녀는 이미 대상이 될 수 없었다^{24,31}. 그녀의 무덤은 2017년 영국의 문화재로 지정되었다³⁰. 1968년 왓슨의 회고록 『The Double Helix』는 그녀를 까다롭고 고집 센 사람으로 그렸고, 클루그는 같은 해 그녀의 기여를 바로 알리는 글을 써 맞섰다. 1975년 친구 앤 세이어가 쓴 전기와 2002년 매덕스의 전기가 그녀의 참모습을 널리 알렸다^{16,17}. 탄생 100주년인 2020년 영국은 사진 51을 새긴 50펜스 동전을 냈다²⁰. 2000년 킹스 칼리지는 새 건물을 ‘프랭클린-윌킨스 빌딩’이라 이름 지었다¹⁷.

오늘의 정리

- 세제는 막을, 소금은 인산의 음전하를, 에탄올은 DNA의 용해를 다루어 DNA를 뽑아낸다.
- 사진 51(프랭클린·고슬링, 1953)과 샤가프 규칙($A = T$, $G = C$)을 바탕으로 왓슨과 크릭이 이중 나선 모형을 세웠다(1953).
- 두 가닥은 반대 방향($5' \rightarrow 3'$, $3' \rightarrow 5'$)이고, 한 바퀴 약 10염기쌍·3.4 nm, 지름 약 2 nm다.
- 염기쌍은 수소 결합으로 짝짓는다: A-T 2개, G-C 3개. 한 가닥이 정해지면 짝 가닥이 정해진다(상보성).

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. DNA 이중 나선에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 두 가닥은 같은 방향으로 놓여 있다.
 - ② 염기는 나선의 바깥쪽에 있다.
 - ③ A는 C와 수소 결합 3개로 짝짓는다.
 - ④ G의 양과 C의 양은 거의 같다.
 - ⑤ 염기쌍을 잇는 것은 공유 결합이다.
2. G-C 염기쌍이 많은 DNA와 A-T 염기쌍이 많은 DNA 가운데 두 가닥을 떼어 놓기 더 어려운 쪽을 고르고 까닭을 설명하시오.

과학의 최전선 세포 속 DNA는 어떻게 접혀 있나

여기까지 밝혀졌다 — DNA 146염기쌍은 히스톤 단백질 8개로 된 실패를 감아 뉴클레오솜을 이룬다¹⁴. 유전체 전체의 3차원 근접 지도를 그려 보니, 열린 염색질과 닫힌 염색질이 두 구획으로 나뉘고, 매듭 없이 촘촘히 뭉친 모양과 맞았다³². **아직 모른다** — 교과서에는 뉴클레오솜 사슬이 30 nm 굵기 섬유로, 다시 더 굵은 섬유로 접힌다고 그려 왔다. 그러나 세포 속 염색질을 직접 보니 지름 5~24 nm의 무질서한 사슬이 밀도를 달리해 뭉쳐 있었다³³. 염색질 구조는 아직 다 이해되지 않았으며, 액체처럼 움직이는 구조라는 증거가 늘고 있다³⁴. **가설과 연구** — 염색체에는 서로 자주 맞는 구역들이 있는데, 이것이 어떻게 생기는지는 분명하지 않다. 단백질 고리가 DNA를 밀어내며 고리를 키우다 경계에서 멈춘다는 ‘고리 밀어내기’ 모형이 제안되어 검증되고 있다³⁵.

이 장의 출처

- Genetic Science Learning Center. (2026). How to extract DNA from anything living. University of Utah. <https://learn.genetics.utah.edu/content/labs/extraction/howto/>
- FRANKLIN, R. E., & GOSLING, R. G. (1953). Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate. *Nature*, 171(4356), 740–741. <https://doi.org/10.1038/171740a0>
- WILKINS, M. H. F., STOKES, A. R., & WILSON, H. R. (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: Molecular Structure of Deoxypentose Nucleic Acids. *Nature*, 171(4356), 738–740. <https://doi.org/10.1038/171738a0>
- Klug, A. (2004). The Discovery of the DNA Double Helix. *Journal of Molecular Biology*, 335(1), 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2003.11.015>
- Chargaff, E. (1950). Chemical specificity of nucleic acids and mechanism of their enzymatic degradation. *Experientia*, 6(6), 201–209. <https://doi.org/10.1007/bf02173653>
- Pauling, L., & Corey, R. B. (1953). A Proposed Structure For The Nucleic Acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 39(2), 84–97. <https://doi.org/10.1073/pnas.39.2.84>
- 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>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.
- Nobel Prize Outreach. (2026). The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1962. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1962/summary/>
- Pauling, L., & Corey, R. B. (1956). Specific hydrogen-bond formation between pyrimidines and purines in deoxyribonucleic acids. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 65(1), 164–181. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(56\)90185-0](https://doi.org/10.1016/0003-9861(56)90185-0)
- Henderleiter, J., Smart, R., Anderson, J., & Elian, O. (2001). How Do Organic Chemistry Students Understand and Apply Hydrogen Bonding?. *Journal of Chemical Education*, 78(8), 1126. <https://doi.org/10.1021/ed078p1126>
- WATSON, J. D., & CRICK, F. H. C. (1953). Genetical Implications of the Structure of Deoxyribonucleic Acid. *Nature*, 171(4361), 964–967. <https://doi.org/10.1038/171964b0>
- Nurk, S., Koren, S., Rhie, A., Rautiainen, M., Bizkadze, A. V., Mikheenko, A., Vollger, M. R., Altemose, N., Uralsky, L., Gershman, A., Aganezov, S., Hoyt, S. J., Diekhans, M., Logsdon, G. A., Alonge, M., Antonarakis, S. E., Borchers, M., Bouffard, G. G., Brooks, S. Y., . . . Phillippy, A. M. (2022). The complete sequence of a human genome. *Science*, 376(6588), 44–53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>
- Luger, K., Mäder, A. W., Richmond, R. K., Sargent, D. F., & Richmond, T. J. (1997). Crystal structure of the nucleosome core particle at 2.8 Å resolution. *Nature*, 389(6648), 251–260. <https://doi.org/10.1038/38444>
- International Human Genome Sequencing Consortium, Whitehead Institute for Biomedical Research, Center for Genome Research., Lander, E. S., Linton, L. M., Birren, B., Nusbaum, C., Zody, M. C., Baldwin, J., Devon, K., Dewar, K., Doyle, M., FitzHugh, W., Funke, R., Gage, D., Harris, K., Heaford, A., Howland, J., Kann, L., Lehoczký, J., . . . Morgan, M. J. (2001). Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409(6822), 860–921. <https://doi.org/10.1038/35057062>
- Wikipedia. (2026). Rosalind Franklin. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Rosalind_Franklin
- Elkin, L. (2009). Rosalind Elsie Franklin. Shalvi/Hyman Encyclopedia of Jewish Women, Jewish Women's Archive. <https://jwa.org/encyclopedia/article/franklin-rosalind>
- Biography.com Editors. (2020). Rosalind Franklin. Biography.com. <https://www.biography.com/scientists/rosalind-franklin>
- English Heritage. (2026). Rosalind Franklin [Blue plaque]. <https://www.english-heritage.org.uk/visit/blue-plaques/rosalind-franklin/>
- Cobb, M., & Comfort, N. (2023). What Rosalind Franklin truly contributed to the discovery of DNA's structure. *Nature*, 616(7958), 657–660. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01313-5>

21. FRANKLIN, R. E. (1955). Structure of Tobacco Mosaic Virus. *Nature*, 175(4452), 379–381. <https://doi.org/10.1038/175379a0>
22. Attar, N. (2013). Raymond Gosling: the man who crystallized genes. *Genome Biology*, 14(4), 402. <https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-4-402>
23. Wikipedia. (2026). Raymond Gosling. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Raymond_Gosling
24. NobelPrize.org. (1962). The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1962. Nobel Prize Outreach. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1962/summary/>
25. Wikipedia. (2026). John Desmond Bernal. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/John_Desmond_Bernal
26. NobelPrize.org. (1982). Aaron Klug – Biographical. Nobel Prize Outreach. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1982/klug/biographical/>
27. Wikipedia. (2026). Aaron Klug. In Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Aaron_Klug
28. Franklin, R. E. (1951). Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 209(1097), 196–218. <https://doi.org/10.1098/rspa.1951.0197>
29. FRANKLIN, R. E., & GOSLING, R. G. (1953). Evidence for 2-Chain Helix in Crystalline Structure of Sodium Deoxyribonucleate. *Nature*, 172(4369), 156–157. <https://doi.org/10.1038/172156a0>
30. Historic England. (2017). Tomb of Rosalind Franklin (List Entry No. 1444176). <https://historicengland.org.uk/listing/the-list/list-entry/1444176>
31. NobelPrize.org. (2026). Frequently asked questions. Nobel Prize Outreach. <https://www.nobelprize.org/frequently-asked-questions/>
32. Lieberman-Aiden, E., van Berkum, N. L., Williams, L., Imakaev, M., Ragozy, T., Telling, A., Amit, I., Lajoie, B. R., Sabo, P. J., Dorschner, M. O., Sandstrom, R., Bernstein, B., Bender, M. A., Groudine, M., Gnirke, A., Stamatoyannopoulos, J., Mirny, L. A., Lander, E. S., & Dekker, J. (2009). Comprehensive Mapping of Long-Range Interactions Reveals Folding Principles of the Human Genome. *Science*, 326(5950), 289–293. <https://doi.org/10.1126/science.1181369>
33. Ou, H. D., Phan, S., Deerinck, T. J., Thor, A., Ellisman, M. H., & O'Shea, C. C. (2017). ChromEMT: Visualizing 3D chromatin structure and compaction in interphase and mitotic cells. *Science*, 357(6349), eaag0025. <https://doi.org/10.1126/science.aag0025>
34. Maeshima, K., Ide, S., Hibino, K., & Sasai, M. (2016). Liquid-like behavior of chromatin. *Current Opinion in Genetics & Development*, 37, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2015.11.006>
35. Fudenberg, G., Imakaev, M., Lu, C., Goloborodko, A., Abdennur, N., & Mirny, L. A. (2016). Formation of Chromosomal Domains by Loop Extrusion. *Cell Reports*, 15(9), 2038–2049. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2016.04.085>

25

중심 원리 — DNA에서 단백질까지

출발점 단백질 접힘 5장 · 염기쌍 24장

새 개념 중심 원리

이어짐 전사 26장 · 생명 시스템 종합 45장

기본개념 이 장의 개념 8개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

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

1	유전자	DNA 가운데 단백질이나 RNA 하나의 정보가 적힌 부분.
2	중심 원리	유전 정보가 DNA → RNA → 단백질로 옮겨지고 단백질에서 핵산으로는 되돌아가지 않는다는 생각.
3	복제	DNA 두 가닥이 풀려 저마다 짝을 맞추어 똑같은 DNA 둘이 되는 것.
4	유전자 발현	유전자의 정보가 RNA와 단백질로 만들어져 실제로 쓰이는 것.
5	전령 RNA	DNA의 유전자 정보를 베껴 리보솜으로 나르는 RNA.
6	역전사	RNA를 보고 DNA를 만드는 일로, 일부 바이러스가 한다.
7	딸세포	세포가 나뉘어 새로 생긴 세포.
8	비암호화 RNA	단백질로 만들어지지 않는 RNA.

7월 셋째 토요일 오후, 돌집 과학방. 여름방학 첫 주라 마당에서 매미가 쉬지 않고 울었다. 탁자 위 유리병에는 지난주 브로콜리에서 뽑은 흰 DNA 실이 에탄올에 잠겨 있었고, 미숙은 소백두부의 낡은 비법 공책과 주문 쪽지 한 묶음을 들고 왔다.

태오 이 흰 실에 설계도가 적혀 있다는 건 알겠어요. 그런데 실이 어떻게 두부 단백질이나 제 머리카락이 돼요?

도 교수 원자에서 시작해 보자. 24장에서 DNA는 네 가지 염기가 줄지어 선 두 가닥이고, A는 T와, G는 C와 수소 결합으로 짝짓는다고 했지. 5장에서 단백질은 아미노산 20종이 줄지어 이어진 사슬이라고 했고. 염기의 줄과 아미노산의 줄, 오늘은 이 두 줄이 어떻게 이어지는지 보자꾸나.

유전자는 효소를 만든다

도 교수 먼저 “유전자가 무슨 일을 하는가”부터 물어야 했단다. 1941년 미국의 비들과 테이텀은 붉은뽕곰팡이에 X선을 쬔었어. 그랬더니 어떤 곰팡이는 비타민 하나를 스스로 만들지 못했고, 그 물질만 먹이에 넣어 주면 잘 자랐지¹.

하린 유전자 하나가 망가지니까 반응 하나가 멈춘 거네요?

도 교수 그렇지. 그 반응을 맡은 것은 17장에서 배운 효소, 곧 단백질이야. 그래서 “유전자 하나가 효소 하나를 만든다”는 생각이 나왔단다. 유전자는 긴 DNA 가운데 단백질 하나의 정보가 적힌 **한 부분**이지. 사람 세포 한 벌의 DNA는 약 30억 염기쌍인데², 단백질을 만드는 유전자는 2만~2만 5천 개쯤이란단다³.

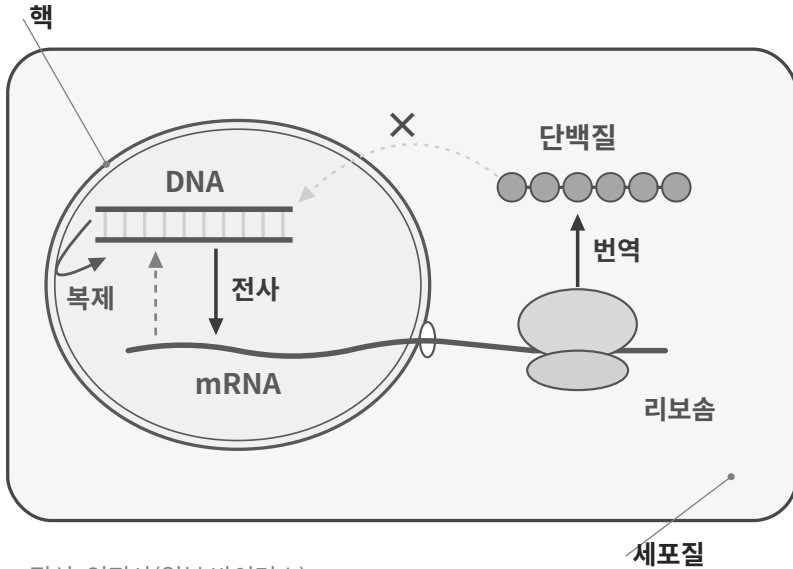
미숙 그럼 두부의 콩 단백질도 콩의 유전자가 만든 거겠네요.

도 교수 그렇지요. 콩 세포의 유전자에 적힌 순서대로 아미노산을 이어 만든 것이 두부 속 단백질입니다. 문제는 염기의 순서가 어떻게 아미노산의 순서가 되느냐였지요.

크릭의 화살표

도 교수 1957년 영국의 크릭은 한 강연에서 두 가지 생각을 내놓았어. 이듬해 논문으로 나왔지⁴. 하나는 DNA 염기의 순서가 아미노산의 순서를 정한다는 생각이고, 다른 하나는 정보가 한번 단백질로 들어가면 다시

핵산으로 돌아 나오지 못한다는 생각이야. 뒤의 것을 **중심 원리**라 부른다. 이 강연이 생물학을 ‘정보의 흐름’으로 생각하게 바꾸었다고 평가받지⁵.



점선: 역전사(일부 바이러스)

× : 단백질에서 핵산으로 가는 길은 없다

[그림 25-1] **중심 원리** DNA는 복제되어 똑같은 DNA가 되고, 핵 속에서 RNA로 베껴진 뒤 세포질의 리보솜에서 단백질로 옮겨진다. 일부 바이러스는 RNA에서 DNA를 만든다(점선). 단백질에서 핵산으로 가는 화살표는 없다(모식도)

도 교수 그림 25-1을 보렴. DNA의 정보는 먼저 RNA로 베껴지고, RNA가 리보솜에서 단백질로 옮겨진단다. DNA를 RNA로 베끼는 일을 **전사**, RNA를 읽어 단백질을 만드는 일을 **번역**이라 하는데, 26장과 27장에서 자세히 다룰 거야. 이렇게 유전자의 정보가 실제 단백질로 만들어져 쓰이는 것을 **유전자 발현**이라 한단다.

미숙 DNA는 그냥 제자리에 두고, 왜 굳이 RNA를 거치나요?

도 교수 이 두부집 공책을 보면 알 수 있지요. 비법은 공책 한 권에만 있고, 공책은 늘 서랍 속에 있습니다. 주방에는 오늘 쓸 부분만 쪽지에 옮겨 적어 붙이지지요?

미숙 공책에 콩물이라도 튀면 큰일이니까요. 쪽지는 버리고 또 쓰면 되고요.

도 교수 DNA가 그 공책입니다. 핵 속에 머물고, 필요한 유전자만 RNA 쪽지로 베껴 핵 밖 리보솜으로 보내지요. 1961년 브레너·자코브·메셀슨은 유전자의 정보를 리보솜으로 나르는, 금방 만들어졌다 사라지는 RNA를 찾아냈습니다⁶. 이것이 **전령 RNA(mRNA, messenger RNA)**예요. 이름 그대로 정보를 심부름하는 RNA지요.

하린 그러니까 DNA는 원본, mRNA는 쪽지, 단백질은 쪽지를 보고 만든 두부라는 거죠?

태오 시험엔 어떻게 나와요? 어디서 일어나는지를 묻던데요.

도 교수 10장에서 본 세포 속 공장을 떠올리렴. DNA의 복제와 전사는 DNA가 있는 핵 속에서, 번역은 리보솜이 있는 세포질에서 일어난단다. 세균처럼 핵이 없는 세포에서는 셋이 모두 세포질에서 일어나지.

태오 그런데 염기 글자는 네 가지뿐이고 아미노산은 20가지잖아요. 글자 하나가 아미노산 하나면 모자라지 않아요?

도 교수 좋은 셈이구나. 글자 하나로는 4가지, 두 개를 묶으면 $4 \times 4 = 16$ 가지라 여전히 모자라. 세 개를 묶어야 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 가지로 넉넉하지. 실제로 세 글자가 한 단어라는 것은 27장에서 자세히 배울 거야.

하린 네 글자 알파벳으로 스무 가지 낱말을 쓰려면 적어도 세 글자짜리 낱말이 필요하다는 거죠?

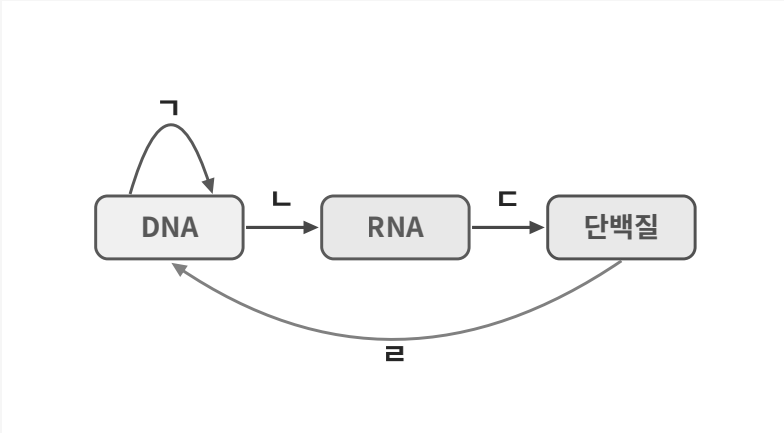
도 교수 그렇단다. 그런데 화살표를 “DNA가 RNA로 변한다”로 읽는 사람이 많아. 대학생 128명 가운데 36 %가 그렇게 답했다는 연구도 있지⁷. 화살표는 물질이 바뀐다는 뜻이 아니라 **정보가 베껴진다는** 뜻이야. DNA는 베낀 뒤에도 그대로 남는단다.

태오 그럼 RNA에서 DNA로 가는 점선은요? 거꾸로는 안 된다면서요.

도 교수 날라롭구나. 1970년 테민과 미즈타니는 어떤 바이러스 안에 RNA를 보고 DNA를 만드는 효소가 있음을 찾았어⁸. 이것을 **역전사**라 하지. 크릭은 같은 해 중심 원리를 다시 정리했는데, 핵산끼리는 정보가 오갈 수 있어도 **단백질에서 핵산으로는 가지 않는다는** 핵심은 그대로였단다⁹. 리보솜 자체도 RNA가 펩타이드 결합을 만드는 RNA 기계이니, RNA는 쪽지이자 일꾼인 셈이지¹⁰.

문제 25-1 정보가 흐르는 길

그림 25-2는 DNA·RNA·단백질 사이에 그려 본 화살표 ㄱ~ㄴ이다. 사람 세포에서 일어나는 정보의 흐름만 있는 대로 고른 것은?



[그림 25-2] 문제 25-1의 그림 ㄱ. DNA → DNA ㄴ. DNA → RNA ㄷ. RNA → 단백질 ㄹ. 단백질 → DNA

- ① ㄴ
- ② ㄴ, ㄷ
- ③ ㄱ, ㄴ, ㄷ
- ④ ㄴ, ㄷ, ㄹ
- ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ, ㄹ

태오 DNA에서 RNA, RNA에서 단백질. ②요.

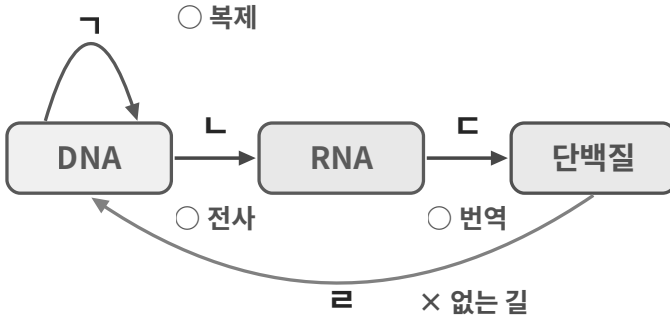
도교수 조건을 다시 읽어 보자꾸나. “정보의 흐름”이라고 했지, 단백질로 가는 길만 묻지는 않았어. 세포가 둘로 나눌 때 새 세포도 DNA를 가져야 하잖나?

태오 아, 24장의 짝 규칙대로 두 가닥이 풀려 각자 짝을 만들면 똑같은 DNA가 둘 되죠¹¹. 그것도 DNA에서 DNA로 정보가 가는 거네요.

도교수 그럼 계획을 세우자. 화살표마다 세포 속에서 실제로 일어나는지 하나씩 따져 보는 거야.

하린 ㄱ은 복제, ㄴ은 RNA로 베끼기, ㄷ은 단백질 만들기라서 셋 다 일어나요.
ㄹ은 크릭이 없다고 한 길이에요.

도 교수 그림 25-3처럼 표시해 보자. 정답은 ③이란다.



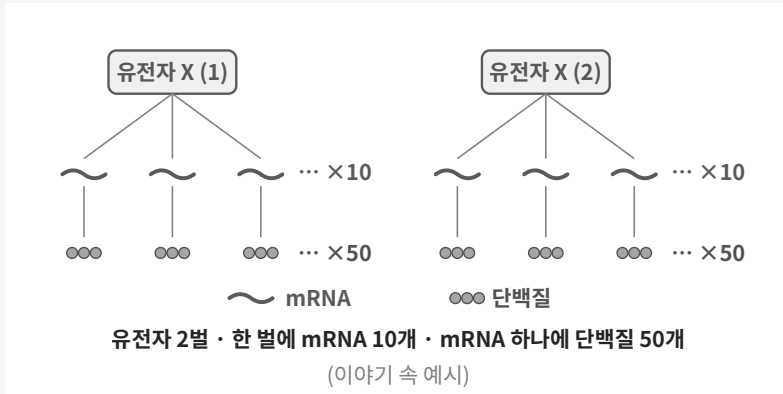
사람 세포에서 일어나는 흐름: ㄱ, ㄴ, ㄷ

[그림 25-3] 풀이 그림 복제(ㄱ), DNA → RNA(ㄴ), RNA → 단백질(ㄷ)은 사람 세포에서 일어나는 흐름이고, 단백질 → DNA(ㄹ)는 중심 원리가 없다고 한 길이다

미숙 단백질은 두부 같은 완성품이라, 두부를 보고 공책을 고쳐 쓰는 일은 없다는 거군요.

문제 25-2 원본의 잘못과 쪽지의 잘못

그림 25-4는 어느 세포에서 단백질 X가 만들어지는 수를 나타낸 것이다(이야기 속 예시). 유전자 X는 세포에 두 벌 있고, 한 벌에서 mRNA가 10개씩 만들어지며, mRNA 하나에서 단백질이 50개씩 만들어진다. (1) 단백질 X는 모두 몇 개인가? (2) mRNA 한 개에 글자가 잘못 베껴진 경우와 유전자 한 벌에 잘못이 있는 경우, 잘못된 단백질은 각각 몇 개인지 쓰고 어느 쪽이 더 오래 남는지 쓰시오.



[그림 25-4] 문제 25-2의 그림 유전자 X 두 벌 → mRNA 한 벌에 10개 → mRNA 하나에 단백질 50개(이야기 속 예시)

하린 10 곱하기 50은 500이니까 500개요.

도 교수 조건을 다시 보렴. 유전자가 몇 벌이라고 했지?

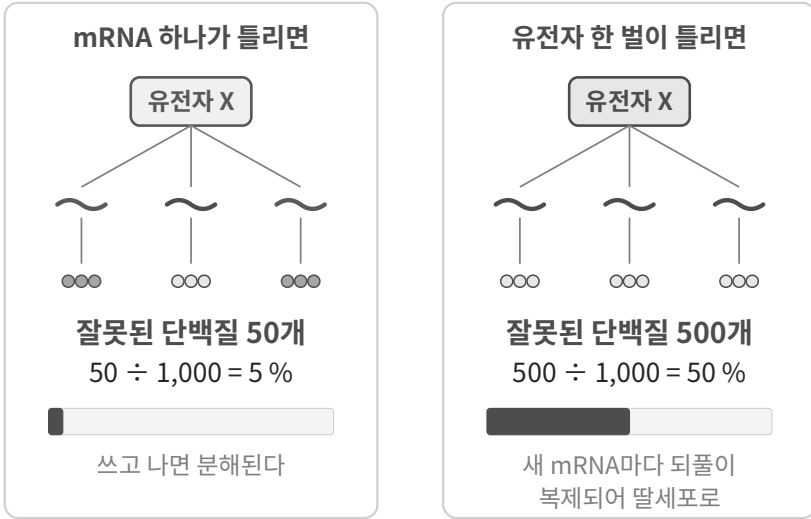
하린 두 벌이요. 그럼 $2 \times 10 \times 50 = 1,000$ 개예요.

도 교수 이제 (2)의 계획이야. 잘못이 어디에 있는지에 따라 가지 몇 개가 물드는지 세어 보자.

태오 mRNA 하나가 틀리면 그 쪽지로 만든 50개만 틀려요. 유전자 한 벌이 틀리면 거기서 나온 mRNA 10개가 다 틀리니까 500개요.

도 교수 그림 25-5가 그 나뭇가지란다. 게다가 mRNA는 쓰고 나면 곧 분해되지만, 유전자의 잘못은 새 mRNA를 만들 때마다 되풀이되고 복제되어 딸세포로도 넘어가지. 모범 답은 (1) 1,000개, (2) mRNA 쪽은 50개, 유전자 쪽은 500개이고 유전자의 잘못이 더 오래 남는다는 거야.

$$\text{모두 } 2 \times 10 \times 50 = 1,000\text{개}$$



갈색 = 잘못된 정보를 지닌 분자 · 유전자 한 벌 뒀만 그림 (이야기 속 예시)

[그림 25-5] 풀이 그림 잘못이 mRNA 하나에 있으면 단백질 50개(5%), 유전자 한 벌에 있으면 500개(50%)가 잘못되고, 유전자의 잘못은 복제로 다음 세포까지 이어진다(이야기 속 예시)

미숙 쪽지는 버리면 그만이지만 공책이 틀리면 대대로 틀린 두부가 나오겠네요.

하린 그래서 세포가 원본을 핵 속에 꼭꼭 모셔 두는 거군요.

오늘의 정리

- 유전자는 DNA 가운데 단백질 하나의 정보가 적힌 부분이다(사람은 2만~2만 5천 개).
- 중심 원리: 유전 정보는 DNA → RNA → 단백질로 옮겨지고, 단백질에서 핵산으로는 되돌아가지 않는다(크릭, 1958).
- DNA는 핵 속 원본으로 남고, 필요한 유전자만 mRNA로 베껴 세포질의 리보솜으로 보낸다.
- 화살표는 물질이 변한다는 뜻이 아니라 정보가 베껴진다는 뜻이다. RNA → DNA(역전사)는 일부 바이러스에서 일어난다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 중심 원리에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① DNA가 화학 반응으로 RNA로 바뀌어 없어진다.
 - ② 단백질의 아미노산 순서가 DNA로 옮겨 적힌다.
 - ③ DNA의 정보는 RNA를 거쳐 단백질로 옮겨진다.
 - ④ mRNA는 핵 속에 머물고 DNA가 리보솜으로 나간다.
 - ⑤ 모든 생물과 바이러스는 RNA에서 DNA를 만든다.
2. 세포가 DNA를 핵 밖으로 내보내지 않고 mRNA를 거쳐 단백질을 만들면 좋은 점을 두 가지 쓰시오.

과학의 최전선 단백질이 되지 않는 RNA

여기까지 밝혀졌다 — 사람 유전체에서 단백질을 만드는 유전자는 2만~2만 5천 개쯤이다³. 그런데 세포는 단백질이 되지 않는 RNA도 많이 만든다. 리보솜의 RNA는 펩타이드 결합을 직접 만드는 일꾼이다¹⁰. **아직 모른다** — 길이가 긴 ‘비암호화 RNA’를 만드는 유전자가 유전체의 큰 부분을 차지하고 세포 분화와 발생을 조절한다는 쪽은, 그 분류와 기능 확인이 아직 어렵다고 말한다¹². 반대로 증거 대부분은 이런 RNA 대다수가 전사의 잡음이거나 작은 조절 구실만 하고, 사람의 몸에 꼭 필요한 것은 비교적 적다는 쪽이라는 주장도 있다¹³. **가설과 연구** — 두 쪽 모두 RNA 하나하나를 없애거나 바꿔 보았을 때 몸에 무슨 일이 생기는지 확인하는 실험이 더 필요하다고 본다. 중심 원리의 화살표 가운데 ‘RNA에서 멈추는 길’이 얼마나 중요한지가 걸린 문제다.

이 장의 출처

1. Beadle, G. W., & Tatum, E. L. (1941). Genetic Control of Biochemical Reactions in Neurospora. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 27(11), 499–506. <https://doi.org/10.1073/pnas.27.11.499>
2. Nurk, S., Koren, S., Rhie, A., Rautiainen, M., Bizkadze, A. V., Mikheenko, A., Vollger, M. R., Altemose, N., Uralsky, L., Gershman, A., Aganezov, S., Hoyt, S. J., Diekhans, M., Logsdon, G. A., Alonge, M., Antonarakis, S. E., Borchers, M., Bouffard, G. G., Brooks, S. Y., . . . Phillippy, A. M. (2022). The complete sequence of a human genome. *Science*, 376(6588), 44–53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>
3. International Human Genome Sequencing Consortium (2004). Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431(7011), 931–945. <https://doi.org/10.1038/nature03001>
4. Crick, F. H. C. (1958). On protein synthesis. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 12, 138–163.
5. Cobb, M. (2017). 60 years ago, Francis Crick changed the logic of biology. *PLOS Biology*, 15(9), e2003243. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003243>

6. BRENNER, S., JACOB, F., & MESELSON, M. (1961). An Unstable Intermediate Carrying Information from Genes to Ribosomes for Protein Synthesis. *Nature*, 190(4776), 576–581. <https://doi.org/10.1038/190576a0>
7. Wright, L. K., Fisk, J. N., & Newman, D. L. (2014). DNA → RNA: What Do Students Think the Arrow Means?. *CBE—Life Sciences Education*, 13(2), 338–348. <https://doi.org/10.1187/cbe.cbe-13-09-0188>
8. TEMIN, H. M., & MIZUTANI, S. (1970). Viral RNA-dependent DNA Polymerase: RNA-dependent DNA Polymerase in Virions of Rous Sarcoma Virus. *Nature*, 226(5252), 1211–1213. <https://doi.org/10.1038/2261211a0>
9. CRICK, F. (1970). Central Dogma of Molecular Biology. *Nature*, 227(5258), 561–563. <https://doi.org/10.1038/227561a0>
10. Nissen, P., Hansen, J., Ban, N., Moore, P. B., & Steitz, T. A. (2000). The Structural Basis of Ribosome Activity in Peptide Bond Synthesis. *Science*, 289(5481), 920–930. <https://doi.org/10.1126/science.289.5481.920>
11. WATSON, J. D., & CRICK, F. H. C. (1953). Genetical Implications of the Structure of Deoxyribonucleic Acid. *Nature*, 171(4361), 964–967. <https://doi.org/10.1038/171964b0>
12. Mattick, J. S., Amaral, P. P., Carninci, P., Carpenter, S., Chang, H. Y., Chen, L., Chen, R., Dean, C., Dinger, M. E., Fitzgerald, K. A., Gingeras, T. R., Guttman, M., Hirose, T., Huarte, M., Johnson, R., Kanduri, C., Kapranov, P., Lawrence, J. B., Lee, J. T., . . . Wu, M. (2023). Long non-coding RNAs: definitions, functions, challenges and recommendations. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 24(6), 430–447. <https://doi.org/10.1038/s41580-022-00566-8>
13. Ponting, C. P., & Haerty, W. (2022). Genome-Wide Analysis of Human Long Noncoding RNAs: A Provocative Review. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 23(1), 153–172. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-112921-123710>

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 생명편 2

늑대가 돌아오자

유전 물질의 정체와 DNA 이중 나선, 전사와 번역, 돌연변이와 유전자 가위를 거쳐 변이와 자연선택, 진화와 생물 다양성으로 나아갑니다.

통합과학 8권 한눈에 보기



1 화학편 1
원자·원소·별



2 화학편 2
결합과 물질



3 생명편 1
분자와 세포



4 생명편 2 · 이 책
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 18,500원

값 18500 원

53470



9 791123 065298

ISBN 979-11-23065-29-8

이어서 읽으시려면

04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자 — 전체 378쪽

ssbook.kr/book/tonghap-04

판매가 **11,100원** (POD 정가 18,500원)

- 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 안과전두엽 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 흙인형 · 우하랑의 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 콩팥까지 항상성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신
몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지
~~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



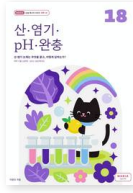
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



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 뒤통해질까
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 홀로세 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/seogyyeong-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