



스스로를 먹는 몸

오토파지, 자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법

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/eating-self

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



AUTOPHAGY

스스로를 먹는 몸

자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법

몸은 날마다 자기를 헐어 다시 짓는다, 세포가 스스로를 고쳐 쓰는 법

이광조 지음

AUTOPHAGY

스스로를 먹는 몸

자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법

이광조 지음

 과학과 영성출판사

스스로를 먹는 몸

자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법

스스로를 먹는 몸

자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법

지은이	이광조 박사 (한국식품영양연구소 소장)
연구소	한국식품영양연구소 · 충남 금산군 금성면 장목동길 8-18 · 전화 070-4070-3369 · klifestyle.net
판본	초판 · 판본 v1 · 2026-09-21
판형	신국판 152×225mm · 본문 Noto Serif CJK KR 10pt
근거 자료	이 책이 쓴 자가포식 논문 데이터베이스 autophagy_db(PubMed 자가포식 논문 123,423편의 서지·초록, 오픈엑세스 전문 72,065편, PDF 58,939편 — 수집은 계속 늘어난다). 그 가운데 철화·정정·초록 없는 문헌을 뺀 코퍼스 118,742편을 근거로 썼고, 인용한 논문은 모두 PubMed 원 서지와 영어 초록으로 확인했다

이 책은 자가포식(오토파지)에 관한 연구를 일반 독자가 이해할 수 있도록 풀어 쓴 교양서입니다. 의학적 진단이나 치료를 대신하지 않습니다. **지금 받고 있는 치료나 드시는 약을 이 책을 읽고 스스로 바꾸지 마십시오.** 특히 단식이나 열량제한을 시작하기 전에는 반드시 담당 의사와 먼저 상의하십시오. 당뇨병이나 인슐린을 쓰시는 분, 임신·수유 중인 분, 섭식장애 병력이 있는 분, 성장기 청소년, 근육량이 적은 고령자, 암 치료를 받고 있는 분은 오래 굶는 방법을 스스로 시작하지 마십시오. 이 책에 나오는 약(라파마이신·메트포르민·클로로퀸 등)은 모두 처방이 필요한 약이며, 처방 없이 구해 복용하는 것은 위험합니다. 책 속의 인물과 사건은 설명을 위해 지어낸 것이며, 인용한 연구는 모두 실제 논문으로 각 장 끝에 출처를 밝혔습니다.

차례

지은이와 연구소	7
이 책을 읽기 전에	9

제1부 스스로를 먹는다

1장 스스로를 먹는다는 말	14
2장 세포라는 작은 도시	20
3장 만들면 부수어야 한다	26
4장 두 개의 분해 체계	32
5장 발견의 역사	38

제2부 어떻게 일어나는가

6장 굶긴 세포 안에서 벌어지는 일	45
7장 시작 신호와 첫 자리	51
8장 부품 목록 — ATG 단백질들	58
9장 막에 깃발을 꽂는다 — LC3	64
10장 늘어나고, 닫히고, 옮겨진다	70
11장 리소좀과 만나, 다시 태어난다	76

제3부 세 가지 얼굴

12장 대자가포식 — 큰 주머니로 감싼다	83
13장 미세자가포식 — 리소좀이 직접 삼킨다	89
14장 샤페론 매개 자가포식 — 한 올씩 끌어당긴다	94

제4부 무엇이 켜고 끄는가

15장 영양이 있으면 잠근다 — mTOR	101
16장 에너지가 떨어지면 연다 — AMPK	107
17장 리소좀을 늘리는 지휘자 — TFEB	113
18장 스트레스가 부르는 청소	119
19장 하루의 리듬, 기관마다 다른 시계	125

제5부 골라서 먹는다

20장 유비퀴틴 꼬리표와 화물 수용체	132
21장 망가진 발전소를 골라낸다 — 미토파지	138

22장 기름방울을 꺼내 쓴다 — 리포파지	145
23장 침입자를 먹는다 — 제노파지	151
24장 소포체·리보솜·철, 그리고 뭉친 단백질	157

제6부 몸 전체에서

25장 태어난 첫날의 자가포식	163
26장 뇌 — 버릴 수 없는 세포의 살림법	169
27장 간 — 굶을 때 가장 바쁜 기관	175
28장 근육과 지방 — 쓰고 남기는 저울	181
29장 심장·혈관·신장	187
30장 면역세포 — 먹기에서 시작한 면역	193

제7부 어긋날 때

31장 청소가 느려지는 몸 — 노화	200
32장 알츠하이머와 파킨슨병	206
33장 암 — 양날의 칼	213
34장 지방간·당뇨·비만	219
35장 감염·염증·자가면역	225
36장 리소좀 축적병과 희귀 유전병	231

제8부 재고, 움직이고, 나아간다

37장 어떻게 재는가	238
38장 무엇이 자가포식을 움직이냐	245
39장 약으로 조절할 수 있는가	256
40장 어디까지 밝혀졌고 어디로 가는가	264

부록

부록 A · 용어 사전	271
부록 B · ATG 단백질 일람	276
부록 C · 자가포식을 재는 법	279
부록 D · 근거 지도	281
부록 E · 더 읽을 거리	284
부록 F · 찾아보기	286

지은이와 연구소

이 책은 **한국식품영양연구소**에서 기획하고 썼습니다.

연구소는 먹는 것과 몸의 관계를 문헌으로 따져 묻는 일을 합니다. 특정 식품이나 제품을 권하기 위해서가 아니라, **그 식품이 몸속 어느 스위치를 건드리는지**를 밝히기 위해서입니다. 그러자면 먼저 그 스위치가 어떻게 생겼는지를 알아야 합니다. 이 책이 나온 이유가 그것입니다.

자가포식은 지난 삼십 년 동안 생명과학에서 가장 빠르게 커진 분야 가운데 하나입니다. 2016년 노벨 생리의학상이 이 연구에 간 뒤로는 대중 매체에도 자주 나옵니다. 그런데 한국어로 된 자료는 대개 둘 중 하나입니다. 하나는 전공자를 위한 교과서와 논문이고, 다른 하나는 “몇 시간 굶으면 오토파지”라는 한 문장짜리 건강 정보입니다. 그 사이가 비어 있습니다.

이 책은 그 사이를 메우려고 썼습니다. 중학교 2학년이 읽어도 따라올 수 있게 쓰되, 다 읽고 나면 논문 초록을 읽을 수 있을 만큼은 정확하게.

이 책을 만든 방식

이 책은 지은이의 기억이나 다른 대중서의 요약으로 쓰지 않았습니다. PubMed에 실린 자가포식 논문의 서지와 초록을 모두 내려받아 **autophagy_db**라는 데이터베이스를 새로 만들고, 거기서 근거를 하나하나 찾아 썼습니다. 철회되거나 정정된 논문은 자동으로 걸러 냈습니다. 인용한 논문은 모두 원 서지와 영어 초록으로 확인했고, 각 장 끝에 정식 서지를 붙였습니다.

그림 48점은 모두 이 책을 위해 새로 그렸습니다. 외부 이미지를 가져오거나 인공지능으로 만든 것이 아니라, 파이썬 스크립트가 도형과 곡선과 글자를 좌표로 하나하나 찍어 벡터 그림으로 그린 것입니다. 그렇게 하면 글자가 겹치는지, 글자가 너무 작지는 않은지, 소기관이 세포 밖으로 나가지는 않았는지를 **기계가 먼저 검사할 수 있습니다**. 이 책의 그림은 모두 그 검사를 0건으로 통과한 뒤, 컬러와 흑백으로 출력해 눈으로 다시 확인했습니다.

지은이

이광조 박사 · 한국식품영양연구소 소장

서울대학교에서 식품영양학 박사학위를 받았습니다. 사람을 대상으로 한 무작위 대조시험을 제1저자로 수행해 국제 학술지(SCIE)에 발표했고, 이후 문헌 기반 건강 교양서를 꾸준히 써 왔습니다.

연구소 · 충남 금산군 금성면 장목동길 8-18 · 070-4070-3369

이 책을 읽기 전에

우리 몸은 날마다 자기를 조금씩 헐어서 다시 짓습니다. 밖에서 보면 어제의 나와 오늘의 나는 같은 사람이지만, 그 안에서는 단백질 하나하나가 끊임없이 만들어지고 부서지고 다시 만들어집니다. 만드는 이야기는 학교에서 배웁니다. DNA가 있고, RNA가 있고, 리보솜이 단백질을 짓는다고. 그런데 **부수는 이야기**는 거의 배우지 않습니다. 이 책은 그 부수는 쪽의 이야기입니다.

세포가 자기 안의 낡고 망가진 것을 스스로 써서 분해하고, 그 재료를 다시 쓰는 일을 **자가포식**(自家捕食, autophagy)이라고 부릅니다. 그리스어로 auto는 ‘스스로’, phagy는 ‘먹는다’입니다. 말 그대로 **스스로를 먹는** 일입니다. 1963년에 이름이 붙었고, 2016년 노벨 생리의학상이 이 연구에 갔습니다. 지금은 뇌질환, 간, 근육, 면역, 암, 노화까지 거의 모든 분야의 논문에 이 말이 나옵니다.

그런데 이 말이 대중에게 알려진 방식은 조금 이상합니다. 대부분 “몇 시간 굶으면 오토파지가 켜진다”는 한 문장에서 시작해 그 문장으로 끝납니다. 그 문장이 틀린 것은 아닙니다. 다만 그 문장 하나만 들고 있으면, 굶는 시간을 늘리는 것 말고는 할 수 있는 이야기가 없습니다.

이 책은 그 문장 앞에 있는 것을 설명합니다. 자가포식체라는 주머니가 어떻게 생기는지, ATG라는 이름이 붙은 단백질들이 무슨 일을 하는지, mTOR와 AMPK가 무엇을 읽고 스위치를 돌리는지, 미토파지와 리포파지가 어떻게 다른지, 연구자들이 그것을 어떻게 재는지, 그리고 그 장치가 어긋날 때 몸에서 무슨 일이 일어나는지를 차례로 따라갑니다.

읽고 나면 여러분은 논문 초록을 읽고 무슨 말인지 알아들을 수 있게 됩니다. 이를테면 “LC3-II가 늘었다”는 문장이 왜 그것만으로는 청소가 잘되었다는 뜻이 아닌지까지(37장).

이 책의 자리 — 세 권 가운데 첫 권

같은 시기에 자가포식을 다루는 책이 세 권 있습니다. 이 책은 그중 **개론서**입니다. 각각이 맡은 자리는 표 III-1과 같습니다.

[표 III-1] 세 권의 자리

책	다루는 것
『스스로를 먹는 몸』 (이 책)	자가포식이 무엇이고, 어떻게 일어나고, 무엇이 조절하고, 몸 어디에서 무슨 일을 하고, 어떻게 재는가
『오토파지와 암』	암에서의 자가포식 — 이 책에서는 33장 한 장만 다룹니다
『오토파지와 40일 단식』	장기 단식의 실천 — 이 책에서는 38장 한 장만 다룹니다

그래서 이 책에는 식단표도, 단식 일정표도 없습니다. 대신 **그 모든 실천이 무엇을 건드리려는 것인지**가 들어 있습니다. 기계를 쓰는 법이 아니라 기계의 속을 보는 책이라고 생각하시면 됩니다.

이 책의 근거

이 책의 문장 끝에 붙은 같은 표시는 근거가 된 논문의 고유 번호입니다. P 다음의 숫자는 그 논문의 PubMed 번호(PMID)이며, 지어낸 숫자는 하나도 없습니다.

이 책을 위해 PubMed에 실린 자가포식 논문의 서지와 초록을 모아 **autophagy_db**라는 자료 더미를 새로 만들었습니다. 자가포식 기구, 미토파지, 선택적 자가포식, 샤페론 매개 자가포식, 조절, 신경, 암, 대사, 노화, 단식과 운동, 심혈관, 간과 신장, 면역, 약물과 천연물, 사람 대상 연구, 모델 생물, 총설의 열일곱 갈래로 나누어 모았고, 공개된 오픈엑세스 전문과 PDF도 함께 내려받았습니다. 제목이 무관하거나, 초록이 없거나, **철회되었거나** **정정된** 논문을 걸러 내고 남은 것이 이 책이 쓴 자료입니다. 정확한 편수는 판권 쪽에 적었습니다.

철회된 논문을 걸러 냈다는 말을 가볍게 넘기지 말아 주십시오. 자가포식은 연구가 폭발적으로 늘어난 분야이고, 그만큼 이미지 조작이나 재현 실패로 철회된 논문도 적지 않습니다. 이 책은 그런 문헌을 자동으로 빼고 시작했습니다.

근거 표지 읽는 법

문장 끝의 괄호 기호는 그 결과가 **어디서** 나왔는지 알려 주는 이정표입니다. 세포와 동물의 결과를 사람의 결과처럼 쓰지 않기 위한 장치입니다. 표지의 뜻은 표 III-2와 같습니다.

[표 III-2] 근거 표지 읽는 법

표지	뜻
[세포]	접시 위의 세포나 효모에서 나온 결과
[동물]	생쥐·선충·초파리 같은 동물에서 나온 결과
[세포·동물]	둘 다
[증례]	한두 사람의 경험을 자세히 기록한 보고
[사람·관찰]	여러 사람을 지켜보며 견준 연구
[사람·시험]	사람에게 직접 해 보고 견준 연구
[종합]	여러 연구를 모아 함께 본 결과

미리 말씀드립니다. **이 책에는 [세포]와 [동물] 표지가 압도적으로 많습니다.** 그것이 이 분야의 현재 모습이기 때문입니다. 이 책이 쓴 코퍼스에서도 세포와 동물 연구가 사람 연구보다 스무 배 넘게 많습니다(40장 그림 40-1). 그 사실을 숨기고 모든 결과를 사람의 이야기처럼 쓰면 읽기는 시원하겠지만 정직하지 않습니다. 대신 이 책은 **총을 나눠 보여 드립니다.** 여기까지가 실험실에서 토렷하게 밝혀진 것이고, 여기까지가 사람에게서 확인된 것이고, 여기부터가 지금 연구 중인 것이라고.

등장인물

이 책은 서울 변두리 시장통의 국밥집 ‘해뜰참’ 2층에 모인 네 사람의 대화로 이루어져 있습니다. 봄에서 겨울까지, 가게 문을 닫은 토요일 저녁 열두 번입니다. 국밥을 파는 사람이 ‘끓으면 세포가 청소를 한다’는 이야기를 듣는 자리라는 것이 이 책의 작은 농담입니다. 네 사람은 표 III-3과 같습니다.

[표 III-3] 이 책의 네 사람

이름	나이·역할	이 자리에 앉은 까닭
정수경 교수	53세, 생명과학과 교수	자가포식을 23년 연구했다. 효모에서 시작해 지금은 생쥐 간의 미토파지를 본다 — 전문가
강만호	58세, 국밥집 '해뜰침' 주인	건강검진에서 지방간과 당뇨 전단계가 나왔다. “그래서 뭘 하면 되냐”를 묻는다
오세영	46세, 물리치료사	어머니가 파킨슨병 초기 진단을 받았다. “그게 사람한테도 되나요”를 묻는다
민하람	15세, 중학교 3학년	만호의 조카. 어려운 말이 나올 때마다 “그게 무슨 뜻이에요?”를 대신 물어 준다

네 사람은 지어낸 인물입니다. 이들이 나누는 대화는 만든 것이지만, **대화 속에 들어 있는 과학과 숫자는 모두 실제 연구에서 가져온 것입니다.**

이 책을 읽는 법

- **차례대로 읽으시길 권합니다.** 1부에서 세포와 리소좀을 익히고, 2부에서 주머니가 만들어지는 순서를 보고 나면 그 뒤가 훨씬 수월합니다.
- 용어가 헛갈리면 부록 A(용어)와 부록 B(ATG 단백질 일람)를 보십시오.
- 그림을 건너뛰지 마십시오. 이 책의 그림 48점은 모두 좌표를 하나하나 찍어 새로 그린 것이고, 본문이 말로 못 하는 것을 대신 말합니다.
- **의학적 결정은 이 책으로 내리지 마십시오.** 이 책은 몸속에서 무슨 일이 일어나는지를 설명하는 책이지, 무엇을 먹고 무엇을 끊으라고 지시하는 책이 아닙니다. 지금 드시는 약이나 치료를 이 책을 읽고 바꾸지 마시고, 반드시 주치의와 상의하십시오. 특히 임신 중이거나, 당뇨약을 드시거나, 섭식장애가 있었거나, 성장기 청소년이라면 단식이나 열량제한을 스스로 시작하지 마십시오(38장).

이제 시장통 국밥집 2층으로 올라가 보겠습니다. 첫 번째 토요일입니다.

제 1 부

스스로를 먹는다

스스로를 먹는다는 말

삼월 첫째 주 토요일 저녁 일곱 시. 시장통 국밥집 ‘해뜰침’은 이미 불을 켜다. 만호가 2층으로 올라가는 좁은 계단의 전등을 켜자, 접이식 상을 펴 놓은 작은 방이 드러났다. 세영이 먼저 와 있었고, 하람은 상 위에 공책을 펴 놓고 연필을 굴리고 있었다.

만호 교수님, 이렇게 와 주셔서 감사합니다. 저 이번 건강검진에서 지방간이 나왔거든요. 당뇨도 전단계라고 하고. 그래서 유튜브를 좀 봤는데, 다들 **오토파지**라는 걸 얘기하더라고요. 열여섯 시간 굶으면 세포가 청소를 한다고.

정 교수 그 얘기를 몇 번이나 들으셨어요?

만호 한 서른 번쯤요. 근데 다 똑같은 얘기만 해요. 굶으면 켜진다, 그게 끝이에요.

정 교수 그래서 저를 부르신 거군요. 좋습니다. 제가 이 분야를 스물세 해 했는데, 그 한 문장 앞에 삼십 년치 이야기가 있어요. 그 이야기를 처음부터 해 볼게요. 하람이도 따라올 수 있게.

하람 저 중3인데 괜찮아요?

정 교수 괜찮아. 우리 넷이 어떤 사람들인지는 그림 1-1에 적어 뒀어. 대신 조건이 하나 있다. 내가 어려운 말을 쓰면 **그때마다 끊어**. “그게 무슨 뜻이에요”라고. 그게 네 일이야.

하람 그럼 지금 하나 있어요. 오토파지가 무슨 뜻이에요?



[그림 1-1] 네 사람과 열두 번의 토요일 이 책의 등장인물과 각자가 맡은 질문(모식도)

스스로를 먹는다

정 교수 좋은 출발이다. **오토파지**는 영어 autophagy를 그대로 읽은 거야. 그리스어에서 왔어. auto는 ‘스스로’, phagy는 ‘먹는다’. 붙이면 **스스로를 먹는다**가 돼. 우리말 학술 용어로는 **자가포식**이라고 해. 자기 자신을 붙잡아 먹는다는 뜻이야. 이 책에서는 자가포식으로 통일해서 부를게 ¹.

하람 세포가 자기를 먹어요? 그럼 없어지잖아요.

정 교수 전부 먹는 게 아니야. **남고 망가진 부분만** 골라서 먹어. 그리고 먹은 걸 분해해서 나온 재료로 새 부품을 만들지. 그러니까 먹는다고보다는 **뜯어서 다시 쓴다**에 가까워.

세영 재활용이네요.

정 교수 정확합니다. 세포 안의 재활용 센터예요. 그런데 집에서 하는 재활용이랑 조금 달라요. 집에서는 버릴 걸 내놓으면 밖으로 나가잖아요. 세포는 **밖으로 못 내놔요**. 세포막 안에서 다 처리해야 합니다. 그래서 안에 분해 공장을 하나 두고, 거기로 쓰레기를 실어 나르는 겁니다.

만호 그 공장이 뭔데요?

정 교수 리소좀이라고 합니다. 다음 장에서 제대로 볼 거예요. 오늘은 이름만 기억해 두세요. 리소좀, 세포 안의 분해 공장.

왜 갑자기 이 말이 여기저기 나오나

세영 그런데 이게 왜 이렇게 유행이에요? 저희 어머니가 파킨슨병 초기 진단을 받으셨는데, 병원에서 받은 안내문에도 이 말이 나오더라고요.

정 교수 세 가지가 겹쳤습니다. 첫째, **2016년에 노벨 생리의학상**이 이 연구에 갔어요. 일본의 오스미 요시노리 선생이 받으셨습니다. 그게 큰 계기가 됐죠. 둘째, 이 장치가 고장 나면 생기는 병이 **너무 많다**는 게 드러났어요. 치매, 파킨슨병, 지방간, 당뇨, 암, 심장병, 어떤 희귀 유전병까지 ². 셋째, 굶거나 운동하면 이게 커진다는 게 알려지면서 건강 정보 쪽에서 크게 다루기 시작했구요.

만호 그럼 유튜브 얘기가 틀린 건 아니네요?

정 교수 틀리지 않았습니니다. 다만 **그 한 문장이 전부인 것처럼** 들리는 게 문제예요. 사장님, 국밥 끓이실 때 “불을 켜다”가 전부입니까?

만호 아니죠. 사골을 몇 시간 고아야 하고, 언제 거품을 걷어야 하고, 간은 마지막에 맞춰야 하고…….

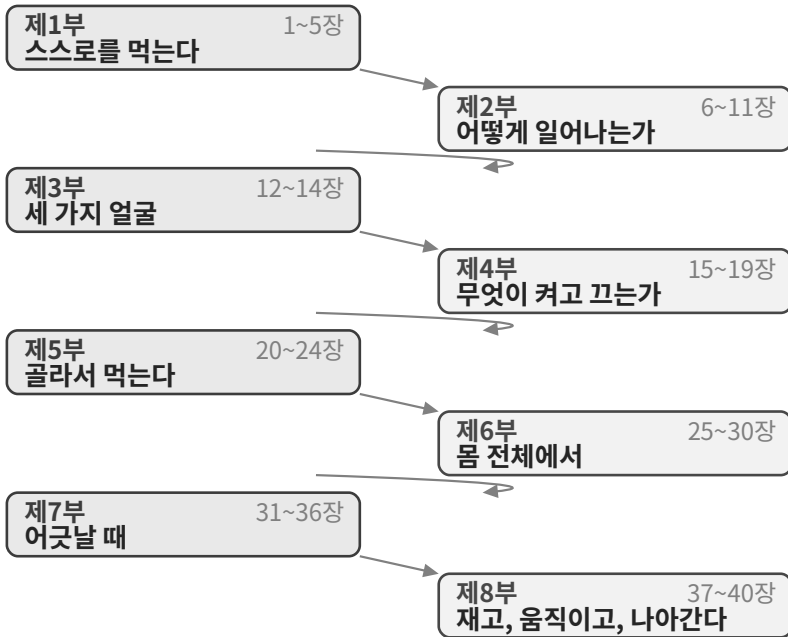
정 교수 그렇죠. “불을 켜다”는 그 많은 일 중 하나예요. 자가포식도 그렇습니다. 스위치를 켜는 건 시작일 뿐이고, 그다음에 막이 생기고, 자라고, 닫히고, 공장으로 실려 가고, 분해되고, 재료가 나오고, 그 재료가 다시 쓰이는 긴 과정이 있어요. 게다가 **뭘 골라서 먹느냐**가 아주 중요한데, 그 얘기는 아예 안 나오죠.

하람 골라서요? 아무거나 먹는 게 아니예요?

정 교수 아무거나 먹는 것도 있고, 딱 정해서 먹는 것도 있어. 망가진 발전소만 골라 먹는 것, 기름방울만 골라 먹는 것, 침입한 세균만 골라 먹는 것. 이름도 다 따로 있어. 5부에서 그것만 다섯 장을 쓸 거야.

이 책이 걸어갈 길

정 교수 그래서 오늘부터 열두 번에 걸쳐 이 순서로 갈 겁니다. 그림 1-2를 보세요.



세포 안의 일 → 몸 전체의 일 → 사람에게서 확인된 것

[그림 1-2] 이 책이 걸어갈 길 여덟 부의 차례와 각 부가 다루는 장. 세포 안의 일에서 시작해 몸 전체의 일로, 마지막에 사람에게서 확인된 것으로 간다

정 교수 1부에서는 세포와 두 가지 분해 체계를 익히고, 연구의 역사를 봅니다. 2부에서는 주머니가 만들어지는 순서를 처음부터 끝까지 따라갑니다. 3부는 자가포식의 세 가지 방식, 4부는 무엇이 스위치를 켜고 끄는가, 5부는 골라 먹는 이야기입니다. 6부에서 몸 전체로 나가고, 7부에서 어긋났을 때 생기는 병을 보고, 8부에서 어떻게 재고 무엇으로 움직이는지를 봅니다.

만호 제 지방간은 언제 나와요?

정 교수 34장입니다. 조금 멀죠? 그런데 그때 가서 이해하시려면 22장의 **리포파지**를 아셔야 하고, 리포파지를 이해하시려면 20장의 **화물 수용체**를 아셔야 하고, 그걸 이해하시려면 9장의 **LC3**를 아셔야 해요. 그래서 순서대로 갑니다.

세영 저희 어머니 건은요?

정 교수 32장입니다. 다만 21장 미토파지를 먼저 보셔야 해요. 파킨슨병과 자가포식이 만나는 자리가 바로 거기거든요. 사실 파킨슨병 유전자 이름인 **파킨**이, 미토파지를 켜는 단백질 이름이기도 합니다.

세영 그게 같은 거예요?

정 교수 같습니다. 그 얘기를 하려고 오늘부터 스물한 장을 쌓는 겁니다.

이름이 여럿인 이유

세영 그런데 오토파지, 자가포식, autophagy..... 같은 걸 왜 이렇게 여러 말로 불러요?

정 교수 학문이 들어온 길이 여럿이어서 그렇습니다. 일본에서 만든 한자어가 먼저 들어와 자가포식이 됐고, 영어 논문을 직접 읽는 사람들은 오토파지라고 부릅니다. 최근에는 대중 매체가 영어 발음을 그대로 쓰면서 오토파지가 더 널리 퍼졌어요.

하람 어떤 걸 써야 해요?

정 교수 글로 쓸 때는 **자가포식**이 정확해. 뜻이 담겨 있으니까. 말로 할 때는 편한 대로 쓰되, 뜻은 알고 쓰자. 표 1-1에 이 책에 계속 나올 말 몇 개를 미리 적어 둘게.

만호 다섯 개면 외울 만하네요.

정 교수 이 다섯 개면 이 책의 뼈대는 잡으신 겁니다.

세영 그럼 다음 주에는 뭘 하나요?

정 교수 세포 안을 좀 더 들여다봅니다. 리소좀이 어떻게 생겼는지, 왜 산성인지. 그걸 알고 나면 그다음이 전부 쉬워집니다.

만호 그럼 오늘은 여기까지 하죠. 국밥 한 그릇씩 드시고 가세요.

정 교수 오늘은 먹고 가겠습니다. 굶는 얘기는 서른여덟 번째 장에나 나오니까요.

[표 1-1] 이 책의 기본 용어

말	뜻	처음 나오는 곳
자가포식(오토파지)	자기 안의 낡고 망가진 것을 싸서 분해하고 다시 쓰는 일	1장
리소좀	분해효소가 든 산성 주머니. 분해가 일어나는 곳	2장
자가포식체	화물을 감싼 이중막 주머니	6장
미토파지	망가진 미토콘드리아를 골라 치우는 일	21장
자가포식 흐름	주머니가 만들어져 분해되기까지의 속도	37장

하람의 정리

- **자가포식**은 세포가 자기 안의 낡고 망가진 것을 스스로 싸서 분해하고, 그 재료를 다시 쓰는 일이다.
- 오토파지(autophagy)는 auto(스스로) + phagy(먹는다). 우리말로는 자가포식.
- 분해가 일어나는 공장은 **리소좀**이다.
- “끓으면 쪼갬다”는 맞는 말이지만, 긴 과정의 첫 단추일 뿐이다.
- 무엇을 **골라서** 먹느냐가 이 이야기의 절반이다.

이 장의 출처

1. Yang, H., Li, X., Wang, K., Zou, Y., Shi, Q., Yang, Y., Zhao, Q., & Zou, W. (2026). Autophagy: From Molecular Mechanisms to Disease Regulation and Therapeutic Strategies. Current Issues in Molecular Biology, 48(3). <https://doi.org/10.3390/cimb48030285>
2. He, J., & Qi, T. (2026). Autophagy: mechanisms, roles in human diseases, and therapeutic perspectives. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 14, 1776289. <https://doi.org/10.3389/fcell.2026.1776289>

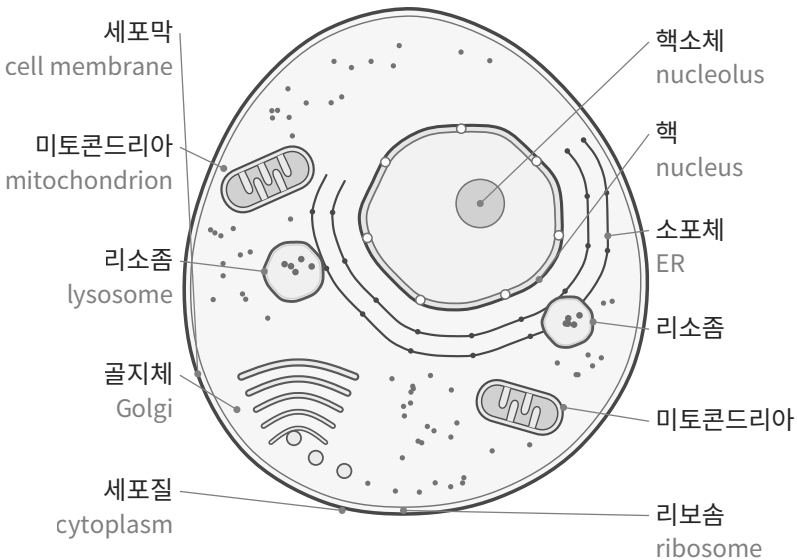
02

세포라는 작은 도시

하람이 공책에 ‘리소좀’이라고 적고 물음표를 세 개 그렸다. 만호가 주전자에 물을 올렸다.

하람 교수님, 그럼 세포부터 다시 알려 주세요. 학교에서 배우긴 했는데 이름만 외웠어요.

정 교수 그게 제일 좋은 출발이야. 이 책에서 쓸 무대를 오늘 다 깔아 두자. 그림 2-1을 봐.



[그림 2-1] 세포라는 작은 도시 동물세포의 단면과 주요 소기관(모식도). 이 책에 나올 무대를 한 장에 모았다

도시의 지도

정 교수 세포를 도시라고 생각해 보자. 가장자리에 **세포막**이 있어. 도시의 성벽이지. 그런데 이 성벽은 벽돌담이 아니라 기름막이야. 아무나 드나들 수 없고, 문을 지키는 단백질들이 박혀 있어.

하람 가운데 큰 동그라미는 핵이죠?

정 교수 맞아. **핵**은 시청이자 도서관이야. DNA가 거기 있어. DNA는 이 도시의 설계도 전부고. 그런데 설계도는 밖으로 안 나가. 복사본만 나가지. 그 복사본이 RNA야.

세영 핵 안에 더 진한 점이 있네요.

정 교수 **핵소체**입니다. 리보솜 부품을 만드는 자리예요. 리보솜은 단백질을 짓는 공장이고요. 그림에서 세포 안에 흩어진 작은 점들이 다 리보솜입니다. 이게 이 도시의 **건설회사**예요.

만호 그럼 짓는 쪽은 리보솜이고, 부수는 쪽이 리소좀이네요.

정 교수 정확합니다. 이름이 비슷해서 헷갈리시는데, 아주 좋은 대비예요. **리보솜은 짓고, 리소좀은 부순다.** 이 책은 부수는 쪽 이야기입니다.

발전소와 물류창고

정 교수 길쭉한 강낭콩 모양 보이시죠. **미토콘드리아**입니다. 발전소예요. 우리가 먹은 것과 숨쉬 산소를 써서 **ATP**라는 에너지 화폐를 만듭니다. 세포가 쓰는 에너지의 거의 전부가 여기서 나와요.

하람 왜 안에 지그재그가 있어요?

정 교수 막이 접혀 들어간 거야. **크리스타**라고 해. 표면적을 넓히려고 그렇게 접혀 있어. 발전 장치가 그 막 위에 줄줄이 박혀 있거든. 이게 중요한 이유가 있어. 미토콘드리아는 **망가지기 쉬워**. 발전하면서 찌꺼기가 나오는데 그게 활성산소야. 자기가 만든 찌꺼기에 자기가 상하는 거지. 그래서 망가진 미토콘드리아를 골라 치우는 전용 장치가 있어. 그게 **미토파지**야. 21장에서 크게 다룰 거야.

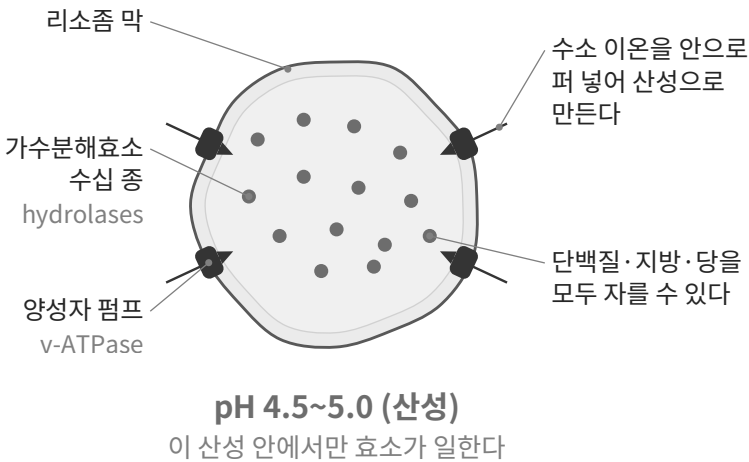
정 교수 핵을 둘러싸고 겹겹이 감긴 저 막은 **소포체**입니다. 단백질을 만들어 접고 다듬는 작업장이예요. 표면에 리보솜이 다닥다닥 붙어 있어서 까끌까끌해 보이죠. 그 옆에 접시를 겹쳐 놓은 것 같은 게 **골지체**입니다. 완성된 단백질을 포장해서 주소를 붙여 내보내는 우체국이에요.

세영 순서가 있네요. 리보솜에서 만들고, 소포체에서 접고, 골지체에서 포장하고.

정 교수 그렇습니다. 그리고 그 포장 라인에서 나오는 물건 중 하나가 바로 리소좀에 들어갈 **분해효소**예요. 부수는 쪽도 만들어야 하니까요.

리소좀 — 이 책의 주인공

정 교수 이제 오늘의 주인공입니다. 그림 2-2를 보세요.



[그림 2-2] 리소좀 한 개 막에 박힌 양성자 펌프가 수소 이온을 안으로 퍼 넣어 내부를 산성으로 만든다. 그 산성에서만 60여 종의 가수분해효소가 일한다(모식도)

정 교수 리소좀은 막으로 둘러싸인 작은 주머니입니다. 안에 분해효소가 60가지 넘게 들어 있어요. 단백질을 자르는 것, 지방을 자르는 것, 당을 자르는 것, 핵산을 자르는 것. 웬만한 건 다 자를 수 있습니다¹.

만호 그렇게 위험한 걸 몸 안에 두면 어떡해요? 터지면요?

정 교수 아주 좋은 질문입니다. 두 겹으로 막아 뒀어요. 첫째, **막**입니다. 효소가 밖으로 못 나와요. 둘째, 그리고 이게 더 기막힌 건데, **효소가 산성에서만 일합니다.**

하람 산성이요?

정 교수 리소좀 안은 pH가 4.5에서 5 사이야. 식초랑 비슷한 정도지. 세포질은 pH 7.2쯤 되는 중성이고. 리소좀 효소는 산성에서만 제대로 작동하도록 만들어져 있어. 그러니까 혹시 새어 나와도 중성인 세포질에서는 거의 일을 못 해. **이중 안전장치야.**

세영 어떻게 안을 산성으로 만들어요?

정 교수 막에 펌프가 박혀 있습니다. **양성자 펌프**, 정식 이름은 **v-ATPase**예요. ATP를 써서 수소 이온을 리소좀 안으로 밀어 넣습니다. 수소 이온이 많아지면 산성이 되죠. 그림 2-2의 검은 막대가 그 펌프입니다.

만호 ATP를 쓴다고요? 부수는 데 에너지를 쓴다는 게 좀 이상한데요.

정 교수 이상하죠? 그런데 그게 핵심입니다. **부수는 일도 공짜가 아닙니다.** 펌프를 돌려야 하고, 주머니를 만들어야 하고, 실어 날라야 해요. 세포가 그 비용을 치르고서라도 부수는 이유가 있다는 뜻이죠. 그 이유가 다음 장 내용입니다.

세포는 얼마나 작은가

하람 세포가 얼마나 작아요?

정 교수 사람 세포는 종류마다 다른데 보통 지름이 10~30마이크로미터야. 1마이크로미터는 1밀리미터의 천분의 일이지. 머리카락 굵기가 70마이크로미터쯤 되니까, 머리카락 단면에 세포 여러 개가 들어가.

만호 그 안에 그 많은 게 다 들어 있습니까?

정 교수 들어 있습니다. 미토콘드리아는 길이가 1~2마이크로미터, 리소좀은 지름 0.1~0.5마이크로미터입니다. 그리고 세포 하나에 미토콘드리아가 수백 개, 리소좀이 수십에서 수백 개 있어요.

세영 붐비겠네요.

정 교수 아주 붐빕니다. 세포 안이 물처럼 물을 거라고 생각하기 쉬운데, 실제로는 **단백질이 뽁뽁하게 들어찬 젤리**에 가깝습니다. 그래서 무엇이든 자기 힘으로 멀리 못 가요. 레일과 모터가 필요한 이유가 그겁니다(10·26장).

하람 그럼 자가포식체가 리소좀을 우연히 만날 확률은 낮겠네요.

정 교수 그래서 우연에 맡기지 않아. 미세소관 레일로 데려가고, HOPS가 끌어당기고, SNARE가 맞춰 붙이지(11장). **세포 안의 일은 대부분 우연이 아니라 배달이야.**

정 교수 이 책에 계속 나올 소기관을 표 2-1에 모았습니다.

[표 2-1] 이 책에 나올 세포 소기관

소기관	하는 일	이 책에서
세포막	안과 밖을 가른다	격리막의 재료가 되기도 한다(7장)
핵	DNA 보관·복사	TFEB가 들어가 유전자를 켜다(17장)
리보솜	단백질을 짓는다	남으면 리보파지로 치운다(24장)
소포체	단백질을 접고 다듬는다	격리막의 주된 공급원(7장), ER-파지(24장)
골지체	포장·배송	리소솜 효소를 보낸다
미토콘드리아	ATP를 만든다	망가지면 미토파지로 치운다(21장)
리소솜	분해·재활용	이 책의 종착점

하람 리소솜이 세포 안의 주인공이었네요.

정 교수 이 책에서는 그렇단다. 예전에는 리소솜을 그냥 쓰레기통으로 봤어. 그런데 지금은 세포가 “지금 배부른가 굶주렸나”를 판단하는 자리로 봐. 그 얘기가 열다섯 번째 장에 나와.

세영 쓰레기통이 판단을 해요?

정 교수 창고에 물건이 얼마나 있는지를 보면 살림 형편을 알 수 있잖아요. 세포도 그렇게 합니다.

하람의 정리

- 리보솜은 짓고, 리소솜은 부순다. 이름이 비슷하지만 하는 일은 반대다.
- 리소솜 안은 pH 4.5~5의 산성이고, 60가지가 넘는 분해효소가 그 산성에서만 일한다.
- 산성은 막에 박힌 **양성자 펌프(v-ATPase)**가 ATP를 써서 만든다.
- 효소가 새어 나와도 중성인 세포질에서는 거의 일을 못 한다 — 이중 안전장치.
- 미토콘드리아는 자기가 만든 활성산소에 자기가 상하므로, 전용 청소 장치가 따로 있다(미토파지, 21장).

이 장의 출처

1. Trivedi, P. C., Bartlett, J. J., & Pulinilkunnil, T. (2020). Lysosomal Biology and Function: Modern View of Cellular Debris Bin. *Cells*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/cells9051131>

만들면 부수어야 한다

만호가 보리차를 따랐다. 밖에서 시장 정리하는 소리가 올라왔다.

만호 교수님, 아까 그 말이 계속 걸려요. 부수는 데 왜 에너지를 써요? 그냥 놔두면 안 됩니까? 아까운데.

정 교수 국밥집 주인이 하실 만한 질문이네요. 반대로 여쭙게요. 주방 냄비를 한번도 안 버리고 십 년 쓰시면 어떻게 됩니까?

만호 바닥이 늘어붙고, 손잡이가 흔들리고…… 결국 못 쓰죠.

정 교수 단백질도 똑같습니다. 단백질은 아미노산이 길게 이어진 사슬이 **정확한 모양으로 접혀** 있을 때만 일합니다. 그런데 쓰다 보면 모양이 조금씩 틀어져요. 열에 상하고, 활성산소에 상하고, 엉뚱한 분자가 달라붙고. 한번 잘못 접힌 단백질은 **스스로 못 고칩니다**.

하람 고칠 수가 없어요?

정 교수 대부분은 못 고쳐. 샤페론이라는 도우미 단백질이 다시 접어 주려고 애쓰긴 하는데, 심하게 망가지면 포기해. 그때부터는 두 가지 길밖에 없어. **부수거나, 쌓이거나**.

쌓이면 무슨 일이 생기나

정 교수 잘못 접힌 단백질은 표면에 끈적한 부분이 드러납니다. 원래는 안쪽에 숨어 있어야 할 부분이죠. 그게 드러나면 **서로 들러붙어요**. 하나가 둘이 되고, 둘이 넷이 되고, 결국 덩어리가 됩니다.

세영 그 덩어리가……

정 교수 네. 어머니 얘기를 조금 앞당기면, 파킨슨병에서 신경세포 안에 쌓이는 **루이소체**가 그런 덩어리입니다. 알츠하이머병의 아밀로이드와 타우도 그렇고요. 32장에서 제대로 볼 겁니다. 오늘은 원리만요. **부수지 않으면 쌓이고, 쌓이면 뭉치고, 뭉치면 세포가 병들니다**.

만호 그럼 부수는 건 손해가 아니라 필수네요.

정 교수 필수입니다. 그런데 이유가 하나 더 있어요. 이게 더 중요할지도 몰라요.

부수는 것이 곧 재료 공급이다

정 교수 우리 몸에서 단백질이 하루에 얼마나 만들어졌다 부서지는지 아세요?
보통 성인 기준으로 **하루에 200~300그램**쯤 됩니다.

만호 그렇게나요? 저 하루에 단백질 그만큼 안 먹는데요.

정 교수 바로 그겁니다. 우리가 음식으로 먹는 단백질은 하루 60~90그램쯤이죠.
그런데 몸에서는 200~300그램이 새로 만들어집니다. 모자라는 만큼은 어디서 왔을까요?

세영 부순 걸 다시 쓴 거네요.

정 교수 그렇습니다. **몸은 자기가 부순 아미노산을 대부분 다시 씁니다.** 재활용률이 아주 높아요. 자가포식은 그 재활용 고리의 한 축입니다. 부수는 일이 곧 짓는 일의 재료 공급이에요. 그림 3-1을 보세요.



[그림 3-1] 단백질의 일생 만들어진서 일하다가 분해되기까지 걸리는 시간은 단백질마다 크게 다르다(모식도)

수명이 다 다르다

정 교수 그런데 단백질마다 수명이 완전히 다릅니다. 어떤 세포질 효소는 몇 분 만에 사라지고요. 간의 단백질은 평균 몇 시간에서 며칠, 근육 단백질은 1~2주쯤 갑니다¹.

하람 평생 안 바뀌는 것도 있어요?

정 교수 있어. 눈의 수정체를 이루는 **크리스탈린**이라는 단백질은 태어날 때 만들어진 게 평생 가. 거의 바뀌지 않아.

하람 그럼 그건 망가지면요?

정 교수 그게 백내장이야.

하람 아.....

정 교수 그러니까 이렇게 정리할 수 있어. **자주 바뀌 주는 부품은 오래 버티고, 안 바뀌는 부품은 결국 탈이 난다.** 이게 이 책 전체를 관통하는 생각이야.

끓었을 때 무엇을 혈어 쓰나

만호 그럼 제가 하루 끓으면 몸이 제 단백질을 혈어 쓴다는 거죠? 근육이 빠지는 건가요?

정 교수 순서가 있습니다. 가장 먼저 쓰는 건 간에 저장해 둔 **글리코겐**이에요. 포도당을 실타래처럼 감아 둔 겁니다. 그런데 이건 반나절이면 거의 바닥납니다.

만호 그다음은요?

정 교수 그다음부터 두 갈래로 갑니다. 하나는 지방을 꺼내 쓰는 길이고, 다른 하나가 **자가포식으로 단백질을 혈어 아미노산을 만드는 길**입니다. 간에서 특히 활발해요. 27장에서 자세히 볼 겁니다.

세영 그럼 끓으면 반드시 근육부터 빠지는 건 아니네요?

정 교수 짧게 끓는 동안에는 몸이 근육을 먼저 혈지 않으려고 꽤 애씁니다. 성장호르몬이 올라가고, 지방 쪽으로 무게가 실리죠. 다만 **오래 끓으면 이야기가 달라집니다.** 그 경계가 어디인지는 사람마다 다르고, 나이와 근육량에 따라 크게 달라요. 그래서 이 책은 “몇 시간 끓으세요”라고 말하지 않습니다. 38장에서 왜 그런지 말씀드릴게요.

왜 회전율이라고 부르나

정 교수 만들어지는 속도와 부서지는 속도가 균형을 이루는 걸 **회전율** (turnover)이라고 합니다. 이 단어를 기억해 두세요. 논문에 계속 나옵니다².

만호 장사할 때 쓰는 그 회전율이요?

정 교수 같은 말입니다. 식당에서 테이블 회전율이 높다는 건 손님이 빨리 들고 난다는 뜻이잖아요. 단백질 회전율이 높다는 건 빨리 만들어지고 빨리 부셔진다는 뜻입니다. **양이 많다는 뜻이 아니라, 흐름이 빠르다는 뜻이에요.**

정 교수 이 부분이 나중에 아주 중요해집니다. 37장에서 “자가포식체가 많이 보인다”는 말이 왜 “청소가 잘되고 있다”는 뜻이 아닌지를 다룰 건데, 바로 이 이야기예요. 쌓여 있는 양과 흐르는 속도는 다른 겁니다.

세영 주방에 설거지거리가 쌓여 있으면, 많이 먹은 걸 수도 있고 안 치운 걸 수도 있다는 거네요.

정 교수 완벽한 비유입니다. 그 비유를 37장까지 들고 가 주세요. 자가포식 연구에서 제일 많이 하는 실수가 바로 그겁니다. 사진 한 장을 찍어 주머니가 많이 보인다고 “청소가 활발하다”고 결론 내리는 것. 실제로는 리소좀이 막혀서 주머니가 정체된 것일 수도 있거든요.

하람 그럼 어떻게 구분해요?

정 교수 막는 약을 일부러 넣어서 견칩니다. 원래 막혀 있던 세포에 막는 약을 더 넣어 봐야 별 차이가 없겠죠. 잘 흐르던 세포에 막는 약을 넣으면 주머니가 확 쌓일 거고요. 그 차이가 곧 흐르던 속도입니다. 이것도 37장입니다.

그럼 단백질을 많이 먹으면 되나

만호 그러면 단백질을 많이 먹으면 안 부셔도 되는 거 아닙니까?

정 교수 재료 쪽만 보면 그렇게 생각할 수 있습니다. 그런데 두 가지가 걸립니다.

정 교수 첫째, **부수는 이유가 재료만이 아닙니다.** 품질 관리가 더 중요해요. 재료가 넘쳐도 망가진 단백질은 치워야 합니다. 안 치우면 쌓이고 뭉칩니다.

정 교수 둘째, 단백질을 많이 먹으면 **mTOR가 계속 켜집니다.** 15장에서 볼 텐데, mTOR는 짓는 쪽을 켜고 부수는 쪽을 끕니다. 그러니 재료를 대면서 동시에 청소를 막는 셈이 됩니다.

세영 그럼 적게 먹어야 하나요?

정 교수 그게 그렇게 단순하지 않습니다. 28장에서 볼 텐데, 나이가 들면 같은 양의 단백질로 근육을 만드는 힘이 떨어집니다. 노인에게는 오히려 더 필요해요.

만호 또 경우에 따라 다르군요.

정 교수 그래서 이 책은 “많이 드세요” “적게 드세요”를 말하지 않습니다. 대신 **무엇이 어느 스위치를 건드리는지**를 보여 드립니다. 그걸 알면 자기 상황에 맞게 판단하실 수 있습니다.

정 교수 부수는 일이 필요한 이유를 표 3-1에 정리했습니다.

[표 3-1] 부수는 일이 필요한 세 가지 이유

이유	무슨 일이 일어나나	막히면
품질 관리	잘못 접힌 단백질·망가진 소기관을 치운다	덩어리가 쌓이고 세포가 병든다(32장)
재료 공급	아미노산·지방산·당을 되찾는다	끓었을 때 버틸 재료가 없다(25·27장)
양 조절	필요 없어진 부품의 수를 줄인다	소기관이 과하게 늘어난다

만호 그러니까 부수는 게 손해가 아니라는 거죠.

정 교수 손해가 아니라 **살림**입니다. 그리고 다음 주에는 그 살림을 맡은 두 가지 체계를 보겠습니다. 하나는 이미 나왔고, 다른 하나가 이 책의 주인공입니다.

하람 리소좀이요.

정 교수 그렇지. 그런데 리소좀으로 가는 길을 누가 만드느냐가 다음 이야기야.

하람의 정리

- 단백질은 정확히 접혀 있을 때만 일하고, 한번 심하게 망가지면 스스로 못 고친다.
- 부수지 않으면 쌓이고, 쌓이면 서로 들러붙어 덩어리가 된다.
- 몸은 하루 200~300그램의 단백질을 새로 만드는데, 먹는 양보다 훨씬 많다.
모자라는 재료는 부순 것에서 나온다.
- 단백질마다 수명이 다르다. 몇 분짜리부터 평생 가는 것까지.
- **회전율**은 양이 아니라 흐름의 속도다. 이 구분이 37장에서 결정적으로 쓰인다.

이 장의 출처

1. Ferreira, R. P., & Duarte, J. A. (2023). Protein Turnover in Skeletal Muscle: Looking at Molecular Regulation towards an Active Lifestyle. *International Journal of Sports Medicine*, 44(11), 763–777. <https://doi.org/10.1055/a-2044-8277>
2. Raffener, M., Zhu, S., González-Fuente, M., & Üstün, S. (2023). Interplay between autophagy and proteasome during protein turnover. *Trends in Plant Science*, 28(6), 698–714. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.01.013>

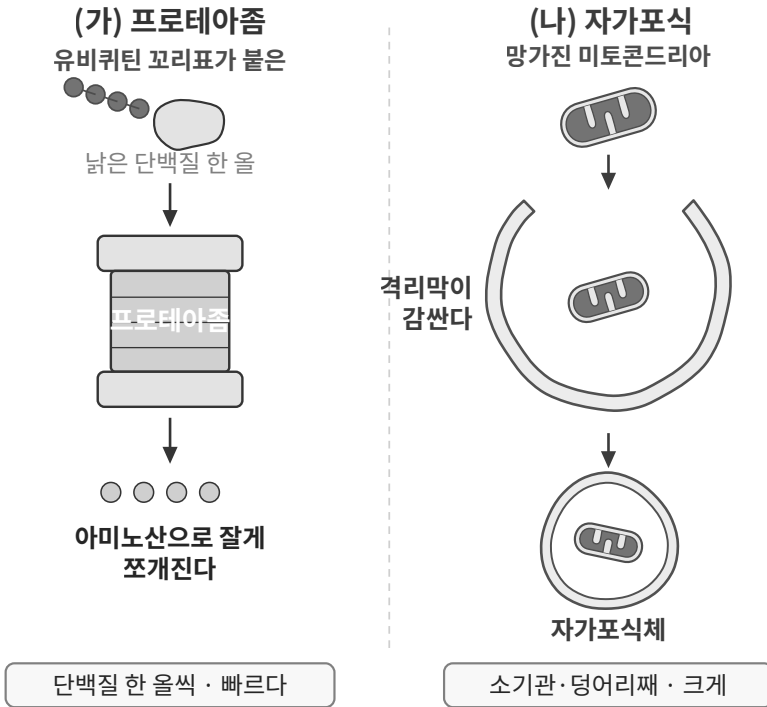
04

두 개의 분해 체계

세영이 어머니 병원 예약 문자를 확인하고 전화기를 얹어 놓았다.

세영 교수님, 부수는 게 중요하다는 건 알겠어요. 그런데 아까부터 리소좀 얘기만 하셨잖아요. 세포에 부수는 장치가 그거 하나뿐인가요?

정 교수 아닙니다. 둘입니다. 그리고 이 둘을 구분하는 게 오늘의 전부예요. 그림 4-1을 보세요.



[그림 4-1] 두 개의 분해 체계 (가) 프로테아좀은 꼬리표가 붙은 단백질을 한 올씩 받아 잘게 자르고, (나) 자가포식은 소기관이나 덩어리를 주머니로 싸서 통째로 넘긴다(모식도)

하나: 프로테아좀 — 한 올씩

정 교수 첫 번째는 **프로테아좀**입니다. 이름에 ‘프로테인’이 들어 있죠. 단백질 분해기예요. 모양은 통처럼 생겼습니다. 가운데가 뚫린 원통인데, 안쪽 벽에 자르는 칼날이 붙어 있어요.

하람 통 안으로 들어가야 잘리는 거예요?

정 교수 그래. 그런데 구멍이 아주 좁아. 그래서 **접혀 있는 단백질은 못 들어가**. 한 올로 쪽 펴져야 들어갈 수 있어. 입구에 있는 뚜껑 부분이 단백질을 붙잡아서 펴 가면서 밀어 넣지. 그것도 ATP를 써.

세영 그러면 아무거나 들어가는 게 아니겠네요.

정 교수 아주 까다롭습니다. **꼬리표가 붙은 것만** 받아요. 그 꼬리표가 **유비퀴틴**입니다. 아주 작은 단백질인데, 이게 여러 개 사슬처럼 이어 붙으면 “이건 부숴라”는 표시가 됩니다.

만호 누가 붙여요?

정 교수 전담 효소들이 있습니다. 이 꼬리표 체계를 밝힌 연구도 노벨 화학상을 받았어요. 2004년입니다. 그러니까 세포가 뭘 부술지 정하는 방식만으로 노벨상이 두 번 나온 셈이죠.

둘: 자가포식 — 통째로

정 교수 두 번째가 자가포식입니다. 프로테아좀이 한 올씩이라면, 자가포식은 **통째로**예요.

하람 얼마나 큰 것까지 먹을 수 있어요?

정 교수 미토콘드리아 하나를 통째로 먹을 수 있어. 소포체 일부도 뜯어서 먹고, 세포 안에 들어온 세균도 통째로 싸. 프로테아좀 구멍으로는 절대 못 들어가는 것들이지.

세영 크기 차이가 그렇게 나요?

정 교수 프로테아좀 구멍은 지름이 1.3나노미터쯤 됩니다. 머리카락 굵기의 약 팔만분의 일이죠. 미토콘드리아는 길이가 1,000나노미터가 넘고요. **천 배 가까이 차이가 납니다**. 그러니 방법 자체가 달라야 합니다.

정 교수 그래서 자가포식은 전혀 다른 전략을 씁니다. 자를 수 없으면 **싸서 옮기자**. 막을 새로 만들어서 대상을 감싸고, 그 주머니를 통째로 리소좀에 넘깁니다. 그 주머니가 **자가포식체**예요.

왜 굳이 막을 새로 만드나

하람 그런데 이상해요. 리소좀이 바로 옆에 있으면 그냥 리소좀이 먹으면 되잖아요. 왜 주머니를 따로 만들어요?

정 교수 아주 날카로운 질문이다. 세 가지 이유가 있어.

정 교수 첫째, **리소좀은 수가 적고 자리가 정해져 있어**. 세포 하나에 리소좀이 수십에서 수백 개쯤 있는데, 대부분 핵 근처에 모여 있어. 그런데 치워야 할 건 세포 구석구석에 있지. 특히 신경세포는 축삭이 1미터까지 길어. 리소좀이 거기까지 갈 수가 없어. 그러니 현장에서 먼저 포장을 해서 보내는 편이 낫지(26장).

정 교수 둘째, **골라 담을 수 있어**. 주머니를 만들면서 안에 뭘 넣을지 정할 수 있거든. 막이 자라면서 대상을 감싸는 동안, 그 대상에 붙은 표식을 읽어 가며 따라가. 그게 5부에서 볼 ‘골라 먹기’야.

정 교수 셋째, **안전해**. 리소좀 막을 열어서 큰 걸 삼키려면 막이 불안정해지겠지. 분해효소가 새면 큰일이야. 주머니를 따로 만들어 가져와서 막끼리 붙이는 편이 훨씬 안전해.

만호 택배 박스 같은 거네요. 물건을 그냥 들고 가는 게 아니라 포장해서 보내는.

정 교수 좋은 비유입니다. 그런데 이 택배는 박스를 **매번 새로 만들어요**. 있던 박스를 꺼내 쓰는 게 아니라, 필요할 때마다 막을 새로 지어서 접습니다. 그 과정이 2부 전체 내용입니다.

둘은 경쟁하지 않는다

만호 그럼 둘 중에 뭐가 더 중요하니까?

정 교수 그 질문에 답이 없다는 게 답입니다. 둘은 **말은 일이 달라요**. 표 4-1을 보시죠.

[표 4-1] 프로테아좀과 자가포식

	프로테아좀	자가포식
무엇을	날개 단백질	단백질 덩어리·소기관·세균
어떻게	한 올로 퍼서 통에 넣는다	막으로 싸서 리소좀에 넘긴다
표시	유비퀴틴 사슬	유비퀴틴 + 화물 수용체(20장)
속도	분 단위로 빠르다	십수 분에서 시간 단위
한번에	하나	아주 많이
크기 한계	좁은 구멍을 지나야 한다	사실상 없다

정 교수 그리고 이 둘은 서로 **돕습니다**. 프로테아좀이 막히면 잘못 접힌 단백질이 쌓이잖아요. 그러면 그게 뭉쳐서 덩어리가 되고, 덩어리는 프로테아좀으로 못 들어가요. 그때 자가포식이 나서서 덩어리째 치웁니다¹.

세영 백업이네요.

정 교수 백업이자 보완입니다. 반대도 있어요. 자가포식이 막히면 프로테아좀 쪽 부담이 커집니다. 둘 중 하나가 무너지면 다른 하나가 더 일하다가 같이 지치는 구조예요².

하람 그럼 왜 굳이 두 개를 만들었을까요?

정 교수 좋은 질문이야. 진화가 설계를 한 건 아니지만, 결과적으로 보면 이렇게 말할 수 있어. **작고 흔한 일은 싸고 빠르게, 크고 드문 일은 비싸고 확실하게**. 국밥집으로 치면 그릇 하나 설거지하는 것과, 술을 통째로 들어내서 닦는 것의 차이야.

만호 술 닦는 날이 따로 있죠. 매일은 못 해요.

정 교수 그게 정확합니다. 다만 하나 덧붙이면, 자가포식이 아예 꺼져 있는 것도 아닙니다. 평소에도 **낮은 세기로 늘 돌아갑니다**. 이걸 기초 자가포식이라고 불러요. 술을 매일 닦지는 않아도 물때는 매일 훑어 내는 셈이죠. 그리고 이 기초 수준이 사실 아주 중요합니다. 굼었을 때 확 올라가는 것보다, 평소에 꾸준히 도는 쪽이 신경세포 같은 데서는 훨씬 결정적이에요(26·32장). 자가포식이 늘 최고 속도로 돌지 않는 이유도

그겁니다. 비싸거든요. 그래서 **필요할 때 켜는 스위치**가 있어야 하고, 그 스위치 이야기가 4부입니다.

유비쿼틴 이야기를 조금 더

하람 유비쿼틴은 왜 꼬리표로 쓰여요? 다른 걸 써도 되잖아요.

정 교수 몇 가지 장점이 있어. 첫째, **작아**. 아미노산 76개니까 붙여도 원래 단백질을 크게 방해하지 않아.

정 교수 둘째, **떨 수 있어**. 떼어 내는 효소가 따로 있어서 “역시 부수지 말자”로 되돌릴 수 있지. 도장을 찍었다 지울 수 있는 셈이야.

정 교수 셋째, **여러 개를 이어 붙일 수 있어**. 그러면 하나의 표시로 여러 뜻을 나타낼 수 있지. 20장에서 이 얘기를 자세히 할 거야.

세영 그런데 그 꼬리표가 자가포식에서도 쓰인다고 하셨죠.

정 교수 그렇습니다. 이게 이 분야에서 재미있는 지점이에요. **같은 꼬리표를 두 체계가 나눠 읽습니다**. 프로테아좀은 자기 방식으로 읽고, 자가포식은 중개인을 통해 읽어요.

만호 그러면 헷갈리지 않습니까?

정 교수 그래서 이어 붙는 자리가 다릅니다. 그 얘기도 20장입니다. 오늘은 “꼬리표는 하나, 읽는 쪽은 둘”까지만 기억해 주세요.

세영 두 체계가 있다는 걸 오늘 처음 알았어요.

정 교수 대부분 그러합니다. 프로테아좀은 교과서에 짧게 나오고 자가포식은 아예 안 나오는 경우도 많거든요. 그런데 몸에서 실제로 일어나는 양으로 보면 둘 다 큼니다.

만호 다음 주에는요?

정 교수 이 연구의 역사를 보겠습니다. 누가 어떻게 알아냈는지를요. 그걸 알면 왜 이 분야가 이런 모양인지가 이해됩니다.

하람의 정리

- 세포에는 부수는 체계가 둘 있다. **프로테아좀**과 **자가포식**.
- 프로테아좀은 좁은 통이라 한 올로 퍼진 단백질만 받는다. 꼬리표는 **유비퀴틴**.
- 자가포식은 막으로 싸서 통째로 넘긴다. 소기관도 세균도 가능하다.
- 크기 차이가 천 배 가까이 나므로 방법 자체가 다를 수밖에 없다.
- 둘은 경쟁이 아니라 **분업이고 백업**이다. 하나가 막히면 다른 하나가 더 일한다.

이 장의 출처

1. Dikic, I. (2026). The ubiquitin-proteasome system and autophagy as guardians of the cellular proteome. FEBS Letters, 600(13), 1829–1841. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.70371>
2. Raffener, M., Zhu, S., González-Fuente, M., & Üstün, S. (2023). Interplay between autophagy and proteasome during protein turnover. Trends in Plant Science, 28(6), 698–714. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.01.013>

05

발견의 역사

첫 번째 토요일의 마지막 이야기. 하람이 공책을 세 장째 넘겼다.

하람 교수님, 이걸 누가 어떻게 알아냈어요? 세포 안을 어떻게 봐요?

정 교수 그게 오늘 마지막 이야기야. 사실 이 분야의 역사가 이 분야를 이해하는 가장 빠른 길이기도 해. 그림 5-1을 봐.



[그림 5-1] 자가포식 연구의 100년 리소좀 발견에서 2016년 노벨상까지(연표)

우연히 찾은 주머니

정 교수 1950년대 중반, 벨기에의 **크리스티앙 드뤼브**가 간세포를 갈아서 성분을 나누는 실험을 하고 있었습니다. 인슐린 작용을 보려던 거였죠. 그런데 이상한 걸 발견합니다. 어떤 효소가 **갓 갈았을 때는 활성이 낮다가, 며칠 두면 활성이 높아지는** 거예요.

만호 효소가 시간이 지나면 강해져요? 거꾸로 아닙니까?

정 교수 거꾸로죠. 드뤼브는 이렇게 생각했습니다. **효소가 막 속에 갇혀 있는 게 아닐까**. 막이 있으면 바깥의 측정 시약이 효소에 못 닿으니 활성이 낮아 보이겠죠. 며칠 두면 막이 터지고, 그제서야 효소가 드러나는 거고요.

세영 그럼 그 막주머니가……

정 교수 리소좀입니다. 1955년에 이름을 붙였어요. 그리스어로 lysis(분해) + soma(몸). **분해하는 몸**이라는 뜻입니다. 이 발견으로 드뤼브는 1974년 노벨 생리의학상을 받습니다.

굼긴 쥐의 간세포 사진

정 교수 그다음이 중요합니다. 1962년쯤, 전자현미경으로 간세포를 찍던 연구자들이 이상한 사진을 얻습니다. **막 속에 미토콘드리아가 통째로 들어 있는** 사진이었어요.

하람 미토콘드리아가 주머니 안에 있었다고요?

정 교수 그래. 그리고 더 중요한 게 있어. 그런 사진은 **굼긴 쥐**나 특정 호르몬을 넣은 쥐의 간에서 훨씬 많이 나왔어. 정상적으로 먹인 쥐에서는 드물었고.

세영 굼으면 커진다는 게 그때 나온 거네요.

정 교수 그렇습니다. 그리고 그때 이미 핵심 사실이 다 들어 있었어요. **굼으면 늘어났다. 소기관을 통째로 썬다. 막이 있다. 간에서 뚜렷하다**. 1963년에 드뤼브가 국제 학회에서 이 현상에 **autophagy**라는 이름을 붙입니다.

만호 그럼 육십 년 전에 다 알았네요?

정 교수 현상은 알았죠. 그런데 **어떻게** 일어나는지는 전혀 몰랐습니다. 사진은 결과만 보여 줘요. 그 주머니를 무엇이 만드는지, 어떤 단백질이 관여하는지는 사진으로 알 수 없습니다. 그래서 삼십 년 가까이 거의 제자리였어요.

효모를 굶긴 사람

정 교수 1988년, 도쿄대의 **오스미 요시노리** 선생이 자기 실험실을 열고 효모를 들여다보기 시작합니다. 효모는 빵이나 술 만들 때 쓰는 그 단세포 곰팡이예요.

하람 왜 효모예요? 사람 세포를 보지.

정 교수 세 가지 이유가 있어. 첫째, 빨리 자라. 몇 시간이면 세대가 바뀌어. 둘째, **유전자를 마음대로 망가뜨릴 수 있어.** 하나씩 고장 내 보면서 어떤 게 필요한지 알아낼 수 있지. 셋째, 효모에는 리소좀에 해당하는 큰 주머니가 있어. **액포**라고 해. 세포의 절반 가까이를 차지할 만큼 커서 현미경으로 잘 보여.

만호 그런데 그게 사람하고 같습니까?

정 교수 거의 같습니다. 놀랍게도요. 이 장치는 **효모에서 사람까지 거의 그대로 보존돼 있습니다.** 십억 년 넘게 안 바뀐 겁니다. 그만큼 근본적인 장치라는 뜻이죠.

분해되지 않게 막아 두자

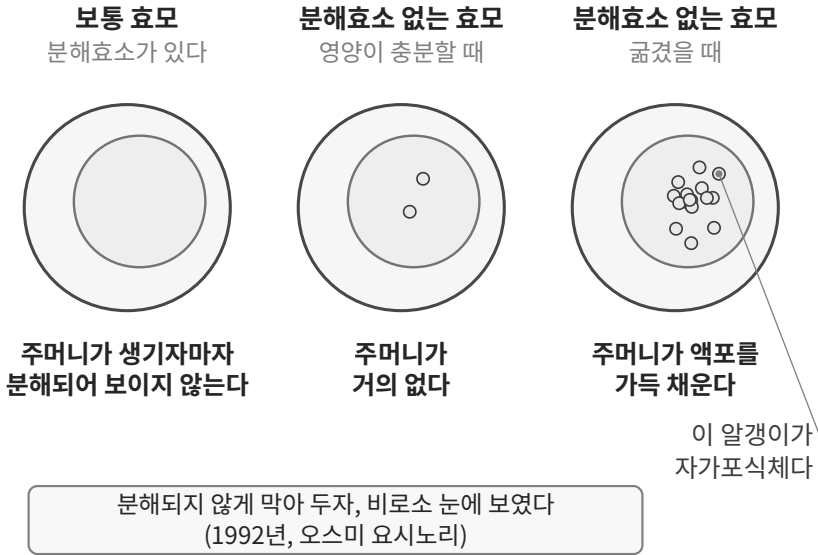
정 교수 그런데 문제가 있었습니다. 효모를 굶기면 자가포식이 일어날 텐데, 주머니가 액포에 도착하자마자 **바로 분해되어 버려요.** 그러니 안 보입니다.

세영 너무 빨라서 안 보이는 거네요.

정 교수 그렇습니다. 오스미 선생의 결정적인 발상이 여기 있습니다. **액포 안의 분해효소를 없앤 돌연변이 효모**를 쓴 겁니다. 그러면 주머니가 도착해도 분해가 안 되니까 액포 안에 그대로 쌓이겠죠.

만호 배수구를 막고 물을 트는 거군요.

정 교수 정확히 그겁니다. 그렇게 만든 효모를 굶겼더니, 액포 안에 작은 알갱이들이 가득 차서 **춤추듯 움직이는** 모습이 현미경에 보였습니다. 1992년이었습니다. 그림 5-2입니다.



[그림 5-2] 오스미의 효모 실험 분해효소를 없앤 효모를 굶기자 액포 안에 자가포식체가 쌓여 처음으로 눈에 보였다(모식도)

부품 목록을 손에 넣다

정 교수 여기서부터가 진짜입니다. 이제 **눈으로 볼 수 있는 현상**이 생겼으니, 유전자를 하나씩 망가뜨려 보면서 “이 알갱이가 안 생기는 효모”를 찾으면 되는 거예요.

하람 그러면 그 유전자가 필요한 유전자네요.

정 교수 맞아. 1993년에 그렇게 찾은 유전자가 한 번에 **열다섯 개**였어. 처음엔 APG라고 불렀다가 나중에 **ATG**로 이름을 통일했지. autophagy-related gene, 자가포식 관련 유전자야. 지금은 마흔 개가 넘어¹.

세영 그게 사람한테도 있어요?

정 교수 있습니다. 거의 다요. 효모의 Atg8이 사람의 **LC3**이고, 효모 Atg6이 사람의 **BECN1**입니다. 이름만 다르고 하는 일은 같아요. 그래서 이 책에서 효모 이름과 사람 이름이 나란히 나올 겁니다. 부록 B에 대응표를 넣어 두었습니다.

정 교수 2016년, 오스미 선생이 노벨 생리의학상을 받습니다. 수상 이유가 “자가포식 기구의 규명”이었어요. **주머니를 찾은 사람이 1974년에 받고, 그**

주머니를 만드는 유전자를 찾은 사람이 2016년에 받은 겁니다. 사십이 년 걸렸습니다.

만호 오늘 얘기 들으니까 유튜브가 왜 그 한 문장만 하는지 알겠네요. 뒤에 이렇게 긴 게 있는 줄 모르니까.

정 교수 다음 주부터 그 뒤를 봅니다. 주머니가 어떻게 생기는지, 처음부터 끝까지요.

왜 삼십 년이 걸렸나

만호 현상을 알고도 삼십 년을 못 나간 게 저는 이상합니다.

정 교수 세 가지 벽이 있었습니다. 표 5-1에 정리했습니다.

[표 5-1] 연구를 막던 세 가지 벽

벽	무엇이 문제였나	어떻게 넘었나
젤 수가 없었다	전자현미경 사진은 한 순간만 보여 준다	효모 액포 안에 쌓아 두고 광학현미경으로 봤다(1992)
유전자를 모른다	어떤 단백질이 관여하는지 몰랐다	효모 돌연변이를 하나씩 걸러 ATG 유전자를 찾았다(1993)
사람과 같은지 모른다	효모에서 찾은 것이 사람에도 있는가	사람에서 대응하는 유전자가 차례로 확인됐다

세영 효모 하나로 세 개를 다 넘었네요.

정 교수 그렇습니다. 그래서 이 분야에서 모델 생물의 힘을 이야기할 때 늘 이 사례가 나옵니다. 사람에게 직접 물었으면 답을 못 얻었을 질문을, 효모에게 물어서 얻은 겁니다.

하람 근데 효모는 사람이랑 너무 다르잖아요.

정 교수 다르지. 그런데 **다른 부분과 같은 부분이 나뉘어** 있어. 세포가 굼었을 때 대응하는 기본 장치는 같고, 기관이나 조직 수준의 이야기는 달라. 그러니까 효모에서 얻은 답은 세포 안의 이야기까지야. 그다음은 생쥐에게 묻고, 마지막에 사람에게 물어야 해.

만호 사다리처럼 올라가는군요.

정 교수 40장에서 그 사다리를 그림으로 보실 겁니다.

만호 오늘 얘기 중에 제일 놀란 건 배수구를 막았다는 대목입니다.

정 교수 연구에서 그런 발상이 결정적일 때가 많습니다. 보이지 않는 것을 보이게 만드는 것.

하람 저도 그런 거 하고 싶어요.

정 교수 그런데 그 발상 앞에 사 년의 준비가 있었어. 효모를 고르고, 굼기는 조건을 잡고, 돌연변이를 구하고. **좋은 아이디어는 준비된 사람에게만 쓸모가 있어.**

세영 다음 주부터는요?

정 교수 2부입니다. 주머니가 만들어지는 순서를 처음부터 끝까지 따라갑니다. 여섯 주 걸립니다.

하람의 정리

- 1955년 드뤼브가 **리소좀**을 찾아냈다. 효소가 막 안에 갇혀 있다는 추론에서 시작됐다.
- 1962년 굼긴 쥐의 간세포 전자현미경 사진에서 미토콘드리아를 품은 주머니가 보였고, 1963년 **autophagy**라는 이름이 붙었다.
- 삼십 년 가까이 “현상은 알지만 기구는 모르는” 상태였다.
- 1992년 오스미가 **분해효소를 없앤 효모를 굼겨** 자가포식체를 눈으로 보았고, 1993년 **ATG 유전자**를 한꺼번에 찾아냈다.
- 이 장치는 효모에서 사람까지 거의 그대로 보존돼 있다. 노벨상이 두 번(1974, 2016) 나왔다.

이 장의 출처

1. Furukawa, K., Ginevskaia, T., & Kanki, T. (2024). Re-exploration of all ATG genes. Autophagy Reports, 3(1), 2386194. <https://doi.org/10.1080/27694127.2024.2386194>

제 2 부

어떻게 일어나는가

06

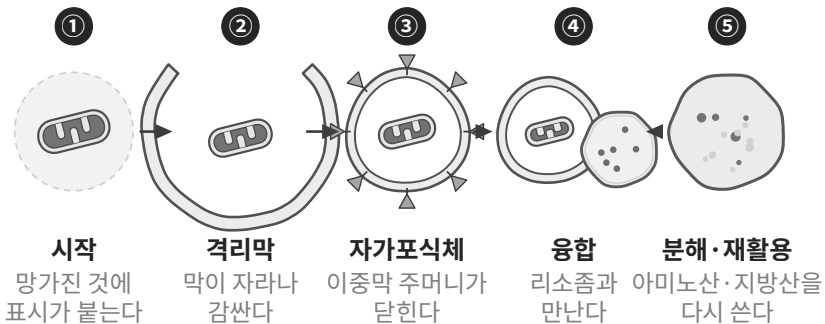
굵긴 세포 안에서 벌어지는 일

두 번째 토요일. 만호가 상 위에 국밥 대신 보리차와 삶은 콩 한 접시를 내놓았다.
“오늘은 굵는 애기 한다니까 좀 덜 차렸습시다.”

정 교수 오늘부터 여섯 번에 걸쳐 **주머니가 만들어지는 순서**를 볼 겁니다. 오늘은 먼저 전체 순서를 한 번에 훑고, 다음 주부터 한 단계씩 뜯어봅니다. 지도를 먼저 보고 길을 걷는 거죠.

하람 지도부터 좋아요.

정 교수 그림 6-1이 그 지도야.



굵기거나 스트레스를 받으면 이 다섯 단계가 몇 분 안에 시작된다.
평소에도 낮은 세기로 늘 돌아가고 있다.

[그림 6-1] 자가포식 다섯 단계 시작에서 재활용까지의 전체 순서(모식도). 이 책의 2부는 이 다섯 단계를 하나씩 펼친다

① 시작 — 무엇을 치울지 정한다

정 교수 첫째, 신호가 옵니다. “지금 청소할 때다”라는 신호예요. 아미노산이 줄었거나, 에너지가 떨어졌거나, 망가진 소기관에 표시가 붙었거나.

만호 세포가 아미노산이 줄어든 걸 어떻게 알아요?

정 교수 그걸 재는 센서가 있습니다. **mTOR**라고 해요. 4부에서 크게 다룰 겁니다. 오늘은 “재는 장치가 있다”까지만요.

세영 그럼 굵는 것 말고도 시작 신호가 있는 거네요.

정 교수 여럿입니다. 굵음, 운동, 저산소, 산화 스트레스, 세균 침입, 망가진 미토콘드리아. 심지어 **아무 일 없어도** 낮은 세기로 늘 돌아갑니다. 4장에서 말씀드린 기초 자가포식이죠.

② 격리막 — 막이 자라 감싼다

정 교수 신호가 오면 세포질 어딘가에 **작은 막 조각**이 생깁니다. 그리고 그게 자랍니다. 접시처럼 평평하다가 점점 오므라들면서 컵 모양이 되고, 컵이 깊어지면서 대상을 감쌉니다.

하람 어디서 막이 와요? 없던 게 생기는 거예요?

정 교수 아주 좋은 질문이고, 그게 7장 전체야. 미리 말하면 **여기저기서 꾸어 와**. 소포체에서 가장 많이 오고, 골지체·미토콘드리아 바깥막·세포막에서도 와. 이 자라는 중인 막을 **격리막** 또는 **파고포어**라고 불러.

세영 격리한다는 뜻인가요?

정 교수 그렇습니다. 치울 것을 나머지 세포질로부터 갈라 놓는 막이라는 뜻이에요.

③ 자가포식체 — 입이 닫힌다

정 교수 막이 다 자라면 **입이 닫힙니다**. 이게 중요한 순간이에요. 닫히는 순간 막이 두 겹이 됩니다.

하람 왜 두 겹이 돼요?

정 교수 종이 한 장을 둥글게 말아서 양 끝을 붙인다고 생각해 봐. 안쪽 면과 바깥쪽 면이 생기지? 그런데 그 종이가 아주 얇은 주머니였다면, 안쪽 면이 곧 **안쪽 막**이고 바깥쪽 면이 **바깥 막**이 돼. 그래서 이중막이야.

만호 그럼 두 겹 모두 분해됩니까?

정 교수 안쪽 막만 분해됩니다. 바깥 막은 리소좀 막과 **합쳐집니다**. 그래서 남지 않아요. 이 완성된 이중막 주머니가 **자가포식체**입니다.

④ 융합 — 리소좀과 만나다

정 교수 자가포식체는 스스로 분해할 능력이 없습니다. 분해효소가 없거든요. 그래서 **리소좀을 찾아가야** 합니다.

세영 어떻게 찾아가요? 세포 안이 넓을 텐데.

정 교수 레일이 있습니다. **미세소관**이라는 단백질 줄기가 세포 안에 그물처럼 깔려 있어요. 자가포식체가 그 레일에 모터 단백질로 매달려서 핵 근처로 끌려갑니다. 리소좀이 주로 거기 모여 있거든요.

만호 지하철 같은 거네요.

정 교수 비슷합니다. 그리고 만나면 **막끼리 붙습니다**. 비눗방울 두 개가 붙어 하나가 되듯이요. 이때 SNARE와 HOPS라는 단백질들이 두 막을 정확히 맞춰 줍니다. 아무 막이나 붙으면 안 되니까요.

⑤ 분해와 재활용 — 끝이 아니다

정 교수 합쳐지면 리소좀의 효소가 쏟아져 들어옵니다. 안쪽 막과 그 안의 화물이 분해되죠. 이 합쳐진 주머니를 **자가리소좀**이라고 합니다.

하람 그럼 끝이에요?

정 교수 아니야. 여기서부터가 세포한테는 진짜 목적이야. 분해해서 나온 **아미노산·지방산·당·뉴클레오티드**가 다시 세포질로 나와, 그 재료로 세포는 지금 가장 급한 단백질을 새로 만들어. 굵은 세포한테는 이게 생명줄이지.

정 교수 그리고 마지막에 하나 더 있습니다. 재료가 빠져나가고 나면 그 자리에서 **리소좀이 다시 만들어집니다**. 쓰고 버리는 게 아니라 되살아나요. 11장에서 다룰 겁니다.

한 번에 몇 개나 만드나

하람 주머니가 한 번에 하나씩 생겨요?

정 교수 아니야. 굵긴 세포 하나에서 동시에 수십 개가 생겨. 그리고 서로 멀리 떨어진 자리에서 따로따로 시작해. 한 군데서 공장처럼 찍어 내는 게 아니라, **여러 현장에서 동시에 짓는** 거지.

세영 크기도 다 달라요?

정 교수 다릅니다. 보통 지름이 0.5마이크로미터에서 1.5마이크로미터쯤 되는데, 뭘 싸느냐에 따라 달라져요. 미토콘드리아 하나를 싸려면 크게 만들어야 하고, 작은 단백질 덩어리면 작게 만들면 되죠. **화물이 크기를 정합니다.**

만호 그럼 미리 크기를 재고 만드는 겁니까?

정 교수 그게 참 신기한 부분입니다. 막이 자라면서 화물의 표면을 따라가거든요. 화물에 붙은 표시와 막의 표지가 서로 손을 잡고 있어서, **감싸는 동안 계속 붙어 있는 겁니다.** 그러니 화물이 끝나는 지점에서 막도 오므라들게 되죠. 20장에서 그 손잡이 이야기를 합니다.

얼마나 걸리나

만호 이 다섯 단계가 얼마나 걸립니까?

정 교수 시작 신호가 오고 첫 격리막이 보이기까지 **몇 분**입니다. 주머니 하나가 만들어져서 분해되기까지는 세포 종류에 따라 **십여 분에서 한 시간** 안팎이고요.

세영 생각보다 빠르네요.

정 교수 빠릅니다. 그래서 세포를 굵긴 실험에서 몇 시간 만에 뚜렷한 변화가 보입니다. 다만 하나 주의하실 게 있어요. **접시 위의 세포를 아미노산 없는 배양액에 담그는 것과, 사람이 한 끼를 거르는 것은** 세기가 전혀 다릅니다.

만호 얼마나 다른데요?

정 교수 접시 실험은 아미노산을 **0에 가깝게** 만듭니다. 사람이 하루를 굶어도 핏속 아미노산은 그렇게까지 안 떨어져요. 몸이 여러 방법으로 떠받치거든요. 그러니까 세포 실험에서 본 세기를 사람 몸에 그대로 옮겨 상상하면 안 됩니다. 이 책이 **세포** 표지를 붙이는 이유가 그겁니다.

세영 방향은 같고 세기는 다르다.

정 교수 오늘 가져가실 문장이 그겁니다.

평소에도 돌아간다

세영 교수님, 아까 아무 일 없어도 돌아간다고 하셨는데, 얼마나 돌아가요?

정 교수 조직마다 다릅니다. 그런데 **간과 심장, 신경세포에서는 평소에도 꽤 돌아갑니다.** 특히 신경세포는 굼어서 올리기 어려운 대신 기초 수준이 높습니다(26장).

만호 그럼 굼는 게 별 의미가 없는 겁니까?

정 교수 그렇게까지는 아닙니다. 간에서는 굼었을 때 뚜렷하게 올라가요. 다만 **“굼어야 켜진다”는 말은 틀렸습니다.** 늘 켜져 있고, 굼으면 세기가 올라가는 겁니다.

하람 불이 꺼져 있다가 켜지는 게 아니라, 약하게 켜져 있다가 밝아지는 거네요.

정 교수 아주 정확한 비유야. 그리고 이 구분이 중요한 이유가 있어. 25장에서 볼 텐데, **기초 자가포식이 아예 없으면 못 살아.** 굼었을 때 올라가는 부분은 그 위에 얹히는 거야.

세영 그럼 기초가 더 중요할 수도 있겠네요.

정 교수 병과 관련해서는 기초 쪽이 더 중요한 경우가 많습니다. 신경퇴행성 질환이 대표적이에요(32장).

정 교수 다섯 단계를 표 6-1에 한 줄씩 적었습니다.

[표 6-1] 자가포식 다섯 단계 한눈에

단계	일어나는 일	주연	이 책에서
① 시작	신호를 읽고 첫 자리를 잡는다	ULK1 복합체	7장, 4부
② 격리막	막이 자라 대상을 감싼다	ATG9·ATG2·LC3	7~10장
③ 자가포식체	입이 닫혀 이중막 주머니가 된다	ESCRT	10장
④ 융합	리소좀과 막이 합쳐진다	SNARE·HOPS	11장
⑤ 분해·재활용	화물이 분해되고 재료가 나온다	리소좀 효소	11장

세영 오늘은 지도만 봤는데도 머리가 정리되네요.

정 교수 다음 주부터 이 다섯 칸을 하나씩 열어 볼 겁니다. 그리고 하나 당부드리면, **이 다섯 단계를 순서대로 외워 두세요.** 앞으로 나올 이야기가 전부 이 순서 위에 얹힙니다.

하람 시작, 격리막, 자가포식체, 융합, 분해.

정 교수 그거야. 그 다섯 마디면 이 책의 절반은 들고 있는 셈이야.

하람의 정리

- 자가포식은 **시작 → 격리막 → 자가포식체 → 융합 → 분해·재활용**의 다섯 단계다.
- 격리막은 없던 막을 새로 만드는 게 아니라 여기저기서 꾸어 온다(7장).
- 입이 닫히면서 **이중막**이 된다. 안쪽 막과 화물만 분해되고 바깥 막은 리소좀 막과 합쳐진다.
- 자가포식체는 미세소관 레일을 타고 리소좀으로 간다.
- 분해는 끝이 아니라 **재료 공급**이다. 리소좀도 다시 만들어진다.
- 접시 위의 굽김과 사람의 한 끼 거르기는 **방향은 같고 세기는 다르다.**

“끓으면 켜진다”, 그 한 문장 앞에는 무엇이 있을까?

“몇 시간 끓으면 오토파지가 켜진다.” 자가포식(오토파지)은 대개 이 한 문장으로 소개되고 거기서 끝납니다. 이 책은 그 문장 앞에 있는 긴 이야기를 꺼냅니다. 자가포식체라는 주머니가 어떻게 생기는지, ATG 단백질들이 무슨 일을 하는지, mTOR와 AMPK가 무엇을 읽고 스위치를 돌리는지, 미토파지와 리포파지는 어떻게 다른지를 차례로 따라갑니다.

무대는 서울 시장동 국밥집 ‘해뜰침’ 2층입니다. 자가포식을 23년 연구한 생명과학과 교수, 지방간과 당뇨 전단계 진단을 받은 국밥집 주인, 어머니가 파킨슨병 진단을 받은 물리치료사, 그리고 “그게 무슨 뜻이에요?”를 묻는 중학생이 열두 번의 토요일 저녁에 둘러앉습니다. 8부 40장, 좌표로 새로 그린 그림 48점이 세포라는 작은 도시를 보여 줍니다.

PubMed 자가포식 논문으로 직접 만든 데이터베이스에서 근거를 하나하나 찾아 썼고, 세포·동물·사람에서 나온 결과를 표지로 나누어 보여 줍니다. 다 읽고 나면 자가포식 논문의 초록을 펼쳐 무슨 말인지 알아들을 수 있게 됩니다.

이 책에서 만나는 것

- 세포 안의 분해 공장 리소좀과 자가포식체의 만남
- 영양과 에너지를 읽는 스위치 mTOR·AMPK·TFEB
- 망가진 발전소만 골라 치우는 미토파지
- 뇌·간·근육·면역, 몸 전체에서 자가포식이 하는 일

① 과학과 영성출판사

값 18,000원

값 18000 원

03470



9 791123 065458
ISBN 979-11-23065-45-8

이어서 읽으시려면

스스로를 먹는 몸 — 전체 292쪽

ssbook.kr/book/eating-self

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 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 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



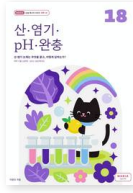
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
 유기 화학·생체 분자·고분자 문제 해설
 24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



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 문제는 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 문제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
 25,000원 → **15,000원**
ssbook.kr/book/nonsul-22



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



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



대입 과학논술 25 — 화학 전자·전기 분해
 화학 전자·전기 분해 문제는 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
±8,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-03



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자
유전 정보에서 진화·생태계까지
±8,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/tonghap-04



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 뒤통해질까
원자에서 힘과 에너지까지
±2,000원 → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반
원자에서 전자기파까지
±4,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/tonghap-06



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



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다
원자에서 암석·판·지구의 역사까지
±8,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/tonghap-08

채식 (5)



사상체질과 채식
이제마의 사상·권도원의 팔체질·황제내경을 영
양학과 분자생물학으로 다시 읽다
±1,000원 → **12,600원**
ssbook.kr/book/sasang-veg



체질과 심리신경내분비
사상·팔체질·황제내경과 Big5·MBTI를 몸의
언어로 다시 읽다
±8,000원 → **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
±8,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/rejuvenation



피부는 안에서 만들어진다
콜라겐·아쿠아포린·자가포식과 식물성 케톤식
±8,400원 → **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/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