



07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까

대기·기압·복사 에너지로 읽는 날씨

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-07

POD 정가 ~~21,000원~~ → **12,600원** (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

구름은 왜 떨어지지 않을까



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

AIR · WATER · WEATHER · OCEAN · CLIMATE
· SUN · STARS

구름은 왜 떨어지지 않을까

문제로 풀어 가는 통합과학 지구과학 이야기 2

통합과학, 고1 통합과학, 통합과학2, 고등학교 과학, 과학 교양서, 대기, 기압,
복사 평형, 온실 효과, 구름과 비, 대기 대순환, 태풍, 해류, 엘니뇨, 기후 변화,
탄소 순환, 태양계, 조석, 별의 일생, 우주 팽창 —

통합과학 시리즈 제4권 지구과학 편, 단양 돌집 과학방의 네 번째 해

(가을~겨울)

이광조 박사

판본 v6 · 2026-10-02

구름은 왜 떨어지지 않을까

문제로 풀어 가는 통합과학 지구과학 이야기 2

구름은 왜 떨어지지 않을까

이 책은 중학생과 고등학생, 그리고 지구과학을 다시 배우고 싶은 어른이 통합과학의 지구과학 부분을 원자에서부터 차근차근 이해할 수 있도록 네 사람의 대화로 풀어 쓴 교양서입니다. 책 속의 인물과 사건, 시험 점수와 관찰 기록은 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이며, 과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔습니다. 지도의 해안선·판 경계·지진·화산 위치와 기후 그래프의 수치는 공개 관측 자료에서 그렸습니다. 동굴·절벽·강가 답사는 반드시 어른과 함께, 허가된 길로만 다니십시오. 암석 채집은 보호 구역(천연기념물·국립공원)에서 하지 마십시오. 염산 반응 실험은 묽은 염산을 보안경과 장갑을 끼고 어른과 함께 하고, 태양은 맨눈이나 망원경으로 절대 직접 보지 마십시오.

차례

머리말 — 공기와 바다에서 별까지	6
일러두기 — 이 책의 짜임	7

제6부 공기 — 분자의 바다

25장 공기는 분자의 바다 — 기압은 분자의 충돌이다	10
26장 대기의 층 — 하늘은 층층이	22
27장 햇빛과 지구의 에너지 수지 — 들어온 만큼 나간다	34
28장 온실 효과 — 분자가 떠는 이유	45
제6부 단위 마무리 — 수능형 문제	62

제7부 물과 날씨

29장 물 분자의 특별한 성질 — 날씨의 연료는 수소 결합	76
30장 구름과 비 — 구름은 왜 떨어지지 않을까	88
31장 바람은 왜 부나 — 기압 차와 돌아가는 지구	104
32장 지구를 도는 공기 — 대기 대순환	114
33장 기단·전선·태풍 — 날씨가 바뀌는 까닭	124
제7부 단위 마무리 — 수능형 문제	141

제8부 바다

34장 바닷물 — 짠맛은 어디서 왔을까	155
35장 해류 — 바다의 강	165
36장 바다와 대기의 대화 — 엘니뇨와 라니냐	176
37장 파도와 해일 — 물은 제자리, 에너지는 멀리	191
제8부 단위 마무리 — 수능형 문제	203

제9부 기후와 기후 변화

38장 기후는 무엇이 정하나 — 밀란코비치와 빙하기	215
39장 얼음이 기억한 기후 — 빙하 코어와 산소 동위 원소	229
40장 지금 일어나는 기후 변화 — 킬링 곡선과 탄소의 지문	240
41장 기후 변화의 영향과 대응 — 탄소 순환과 해수면	255
제9부 단위 마무리 — 수능형 문제	268

제10부 태양계

42장 태양계의 탄생 — 가스와 먼지의 원반에서	280
43장 태양 — 가장 가까운 별	291
44장 행성과 작은 천체 — 무엇으로 만들어졌나	302
45장 달과 지구, 그리고 조석 — 바다를 끄는 힘의 차이	312
제10부 단원 마무리 — 수능형 문제	324

제11부 별과 우주

46장 별까지 얼마나 멀까 — 연주 시차와 별의 밝기	337
47장 별의 색과 일생 — 별빛 속의 원자	352
48장 은하와 우주 — 리버트의 자, 늘어나는 공간	368
49장 다시 단양에서 — 지구계와 우리	383
제11부 단원 마무리 — 수능형 문제	408

부록

부록 A 용어 풀이	420
부록 B 교과 연결표	429
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	431
부록 D 지구과학 기본 수치와 단위	440

머리말 — 공기와 바다에서 별까지

상권에서 우리는 원자에서 출발해 광물과 암석, 보이지 않는 지구 속, 움직이는 판, 돌에 적힌 지구의 역사까지 왔다. 하권은 고체 지구를 감싼 **공기와 물**, 그리고 그 너머의 **하늘**을 묻는다.

공기는 분자의 바다다. 공기의 압력과 층, 햇빛과 지구가 주고받는 복사, 온실 효과를 분자로 읽는다(제6부). 물이 증발하고 응결하며 숨은 열을 나르고, 공기가 오르내려 구름과 비, 바람과 태풍을 만드는 길을 본다(제7부). 바닷물이 왜 짜고, 해류와 깊은 바다의 순환, 엘니뇨가 어떻게 생기는지를 거쳐(제8부), 기후를 정하는 것과 지금 기후가 어떻게 바뀌고 있는지를 실제 관측 자료로 확인한다(제9부). 마지막으로 태양과 행성이 어떻게 생기고 움직이는지(제10부), 별이 얼마나 멀고 어떻게 살다 죽으며 우주가 어떻게 생겼는지(제11부)에 이른다.

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 한 해를 마친 학생들이 단양의 돌 앞에서 “우리는 무엇이고, 지구는 왜 여기 있는가?”를 묻는다. 상권을 읽지 않았더라도 따라올 수 있도록 필요한 곳마다 앞 개념을 짧게 되짚었다.

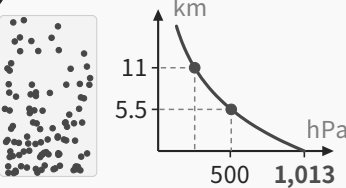
2026년 가을, 이광조

일러두기 — 이 책의 짜임

- **무대와 인물** 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’에서 은퇴한 지구과학 교수 윤 교수(윤해진)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** 지구과학 기본 수치와 단위.

공기 — 분자의 바다

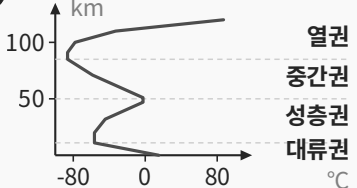
25



km
11
5.5
hPa
500 1,013

공기는 분자의 바다
5.5 km마다 기압이 절반

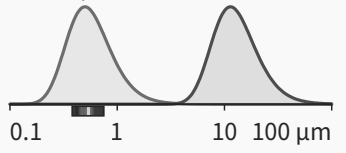
26



km
100
50
-80 0 80
°C
열권
중간권
성층권
대류권

층층이 쌓인 하늘
기온이 오르내리는 네 층

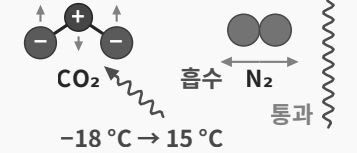
27



태양 5,800 K 지구 255 K
0.1 1 10 100 μm

들어온 만큼 나간다
복사 평형 온도 -18 °C

28

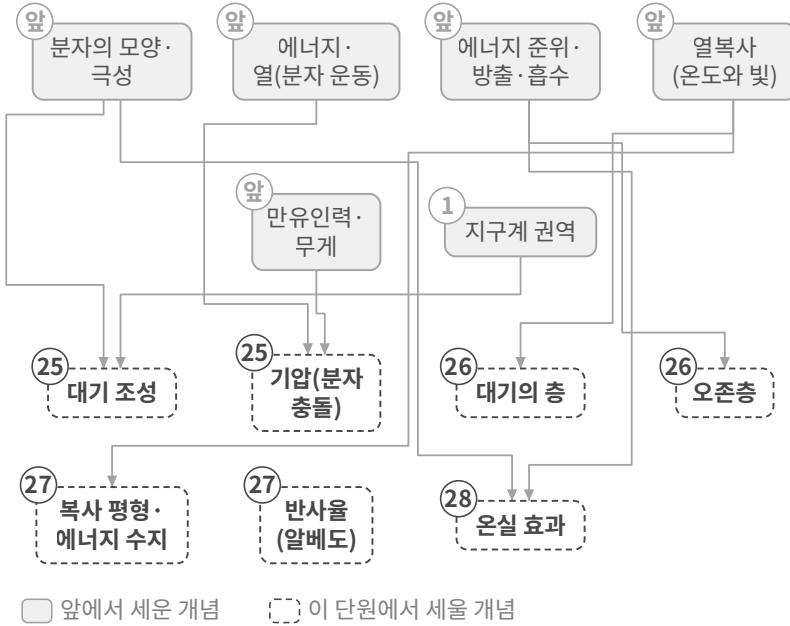


CO₂ 흡수 N₂ 통과
-18 °C → 15 °C

떠는 분자가 붙잡는다
평균 기온을 33 °C 올린다

기압은 분자의 충돌이고, 햇빛이 들어온 만큼 적외선이 나간다.
떠는 온실 기체 분자가 적외선을 붙잡아 땅을 덥힌다.
→ 다음 단원에서: 물 분자가 구름·바람·날씨를 만든다

제6부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



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

공기는 분자의 바다 — 기압은 분자의 충돌이다

출발점 분자의 모양·극성 앞 권 · 에너지·열(분자 운동) 앞 권 · 만유인력·무게 앞 권 · 지구계 권역
1장

새 개념 대기 조성 · 기압(분자 충돌)

이어짐 대기의 층 26장 · 포화·이슬점 30장 · 단열 팽창·기온 감률 30장 · 기압 경도력 31장

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	마른 공기	수증기를 뺀 공기로, 질소 약 78%·산소 약 21%·아르곤 약 1%인 것.
2	아르곤	공기의 약 1%를 차지하는, 1895년에 찾아낸 기체 원소.
3	ppm	100만분의 1을 나타내는 단위로, 공기 분자 백만 개 가운데 몇 개인지 나타내는 것.
4	기압	공기 분자들이 부딪치며 넓이 1 m^2 를 미는 힘.
5	공기 기둥	어떤 넓이 위에 대기 꼭대기까지 쌓인 공기.
6	헥토파스칼	1 hPa 이 100 Pa 인 압력 단위.
7	토리첼리의 실험	수은을 채운 관을 거꾸로 세워 약 76 cm 기둥으로 기압을 잴 실험.
8	진공	분자가 거의 없는 빈 공간.

9월 첫 토요일 아침, 단양 돌집 과학방. 여름 방학이 끝나고 네 사람이 다시 모였다. 창밖은 아직 늦더워졌지만 하늘은 한결 높아졌다. 탁자 위에는 바늘이 달린 둥근 기압계와 부풀린 풍선 두 개, 그리고 과자 봉지 하나가 놓여 있었다.

윤 교수 봄부터 여름까지 우리는 발밑의 돌을 따라 걸었지. 원자가 모여 광물이 되고, 광물이 모여 암석이 되고, 판이 움직여 산맥과 바다를 만들고, 돌은 그 긴 역사를 기억했단다. 오늘부터는 고개를 들어 보자꾸나. 하권의 첫 질문은 이거야. 우리 머리 위에 있는 공기도 원자와 분자로 되어 있을까?

하린 공기는 보이지도 않고 만져지지도 않는데요. 그래도 바람이 불면 느껴지긴 해요.

미숙 지난주에 친정 영월에서 과자 한 봉지를 사 들고 고개를 넘었더니 봉지가 빵빵하게 부풀었어요. 그것도 공기 때문인가요?

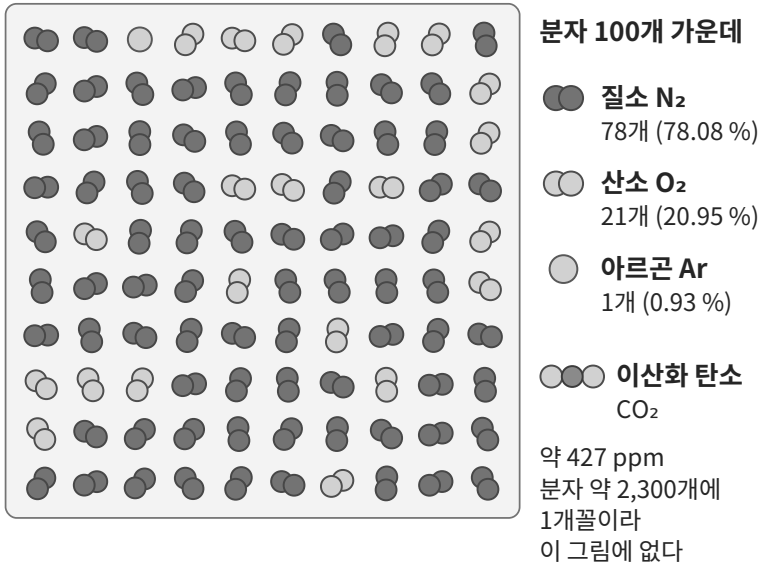
윤 교수 좋은 관찰입니다. 오늘 그 봉지가 왜 부풀었는지 원자에서 시작해 풀어 보지요.

공기는 무엇으로 되어 있나

윤 교수 공기는 여러 기체 분자가 섞인 것이란다. 마른 공기 분자 100개를 모아 보면 대략 질소 분자 N_2 가 78개, 산소 분자 O_2 가 21개, 아르곤 원자 Ar이 1개쯤이야¹. 그림 25-1처럼 말이다. 이산화 탄소 CO_2 는 분자 약 2,300개 가운데 한 개꼴로 아주 적어. 지금은 약 427 ppm, 곧 백만 개 가운데 427개지².

태오 대학 첫 시간에 배웠어요. 미국 국립 해양 대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)이 하와이 마우나로아산에서 CO_2 를 재깎아요. 날씨와 바다와 대기를 관측하는 미국 기관이구요.

윤 교수 그래. 그 기록은 40장에서 자세히 보자꾸나. 공기 성분에도 과학사가 숨어 있단다. 1890년대 영국의 레일리는 공기에서 산소를 빼고 얻은 질소가 화학 반응으로 만든 질소보다 조금 무겁다는 것을 알아챘어. 차이를 끝까지 쫓은 끝에 1895년 램지와 함께 공기 속에 숨어 있던 새 기체 아르곤을 찾아냈지³.



[그림 25-1] 마른 공기 분자 100개 질소 분자 78개, 산소 분자 21개, 아르곤 원자 1개다. 이산화 탄소는 분자 약 2,300개 가운데 1개꼴이라 이 그림에 한 개도 들어가지 못한다(자료: 피카르 외 2008)

하린 그러니까 무게 차이 조금을 그냥 넘기지 않아서 공기의 1%를 새로 찾은 거죠?

윤 교수 정확해. 돌도 공기도 작은 차이에 기억을 남긴단다.

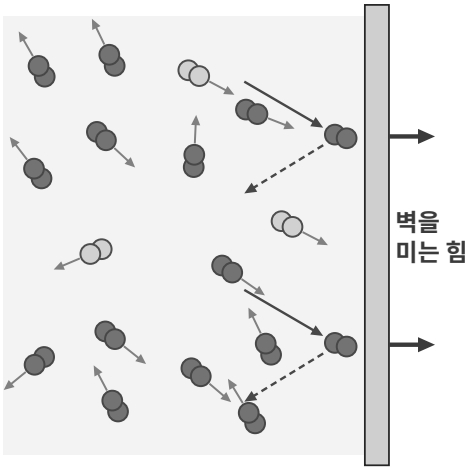
기압 — 분자가 두드리는 힘

윤 교수 물리 편 하권 52장에서 배운 걸 떠올려 보자. 온도는 분자가 얼마나 빨리 움직이는지를 나타낸다고 했지⁴. 15 °C 공기에서 질소 분자는 평균 초속 약 470 m로 날아다닌단다. 소리보다 빠르지. 1 cm³ 안에 이런 분자가 약 2.5×10^{19} 개 들어 있어⁵.

태오 그렇게 빠른 분자가 그렇게 많으면 계속 부딪치겠네요.

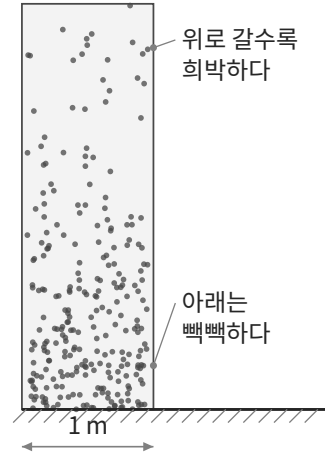
윤 교수 그래. 분자 하나는 1초에 수십억 번 다른 분자와 부딪치고, 벽이나 우리 피부에도 쉬지 않고 부딪친단다. 하나 하나는 아주 작은 충격이지만 수가 엄청나서 모이면 큰 힘이 돼. 넓이 1 m²를 미는 이 힘을 **기압**이라고 해. 그림 25-2의 왼쪽이 분자 충돌로 본 기압이야^{4,5}.

(가) 분자의 충돌



부딪칠 때마다 벽을 조금씩 민다.
모두 합한 힘 ÷ 넓이 = 기압

(나) 공기 기둥의 무게



해수면 1 m² 위 공기
약 10 t → 1,013 hPa

[그림 25-2] 기압을 보는 두 눈 (가) 분자가 벽에 부딪쳐 튀어 나갈 때마다 벽을 조금씩 민다. 이 충돌을 모두 합한 힘이 기압이다. (나) 같은 기압을 넓이 1 m² 위에 쌓인 공기 기둥의 무게로 볼 수도 있다. 해수면에서 그 질량은 약 10 t이다(모식도)

윤 교수 오른쪽은 다른 눈이야. 분자들은 무게가 있어 지구가 당기니(물리 편 하권 37·38장) 아래로 모이지. 아래 공기는 위에 쌓인 공기 기둥을 떠받치느라 눌러 있고, 그래서 충돌도 잦단다. 해수면 기압은 평균 1,013 **헥토파스칼** (hPa)이야. 1 m² 위에 공기 약 10 t이 얹혀 있는 셈이지⁵.

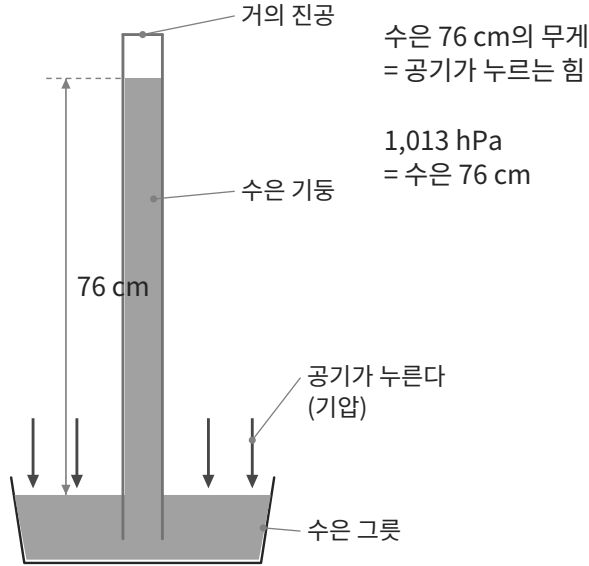
미숙 10 t이요? 그런데 왜 우리는 안 찌그러져요?

윤 교수 몸속 공기와 액체도 같은 힘으로 바깥을 밀기 때문이지요. 안팎이 같으면 우리는 느끼지 못합니다. 한쪽만 줄어들 때 비로소 드러나요. 고개 위에서 봉지 속 공기는 그대로인데 바깥 공기 분자가 덜 부딪치니, 봉지가 밖으로 밀려 부풀 겁니다.

토리첼리의 관과 높이에 따른 기압

윤 교수 그럼 기압을 어떻게 잴까? 이탈리아의 토리첼리는 한쪽이 막힌 1 m 유리관에 수은을 가득 채워 수은 그릇에 거꾸로 세우는 실험을 1644년

편지로 알렸어. 수은은 흘러내리다가 그릇의 수면에서 약 76 cm 높이에서 멈췄지⁶. 그림 25-3을 보렴.



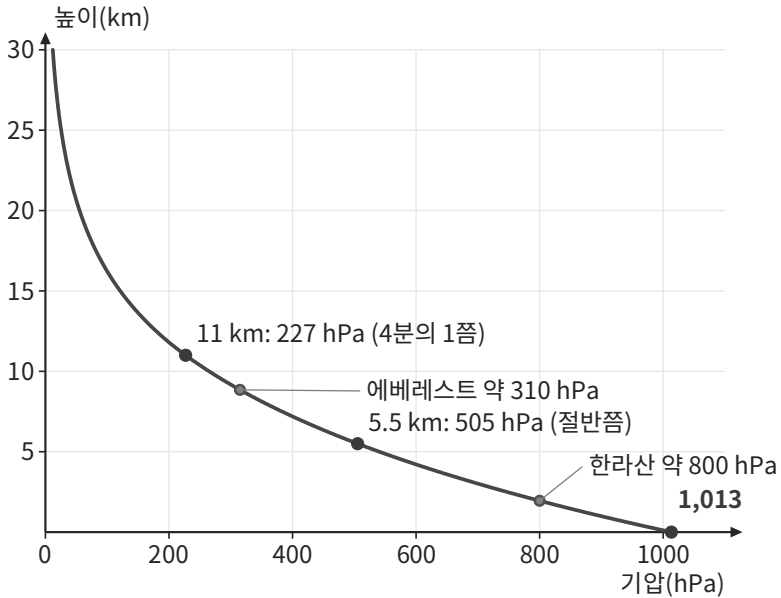
[그림 25-3] 토리첼리의 실험 수은 기둥은 그릇 수면에서 약 76 cm 높이에서 멈춘다. 관 위쪽은 거의 진공이다. 그릇 수면을 누르는 공기의 무게와 수은 기둥의 무게가 맞서기 때문이다(모식도)

하린 관 위쪽 빈 곳은 뭐가 있어요?

윤 교수 거의 아무것도 없는 진공이란다. 그릇 수면을 두드리는 공기 분자의 힘이 수은 76 cm의 무게를 떠받치는 거야. 수은은 물보다 13.6배 무거우니, 물로 하면 기둥이 약 10.3 m가 되어야 하지. 1648년 파스칼의 부탁으로 페리예가 피드돔산에 이 관을 들고 올라가 보니, 꼭대기에서 수은 기둥이 약 8 cm 낮아졌단다⁶.

태오 위로 가면 위에 남은 공기가 적으니까 누르는 무게도 줄어드는 거네요.

윤 교수 그래. 기압은 그 위에 남은 공기의 무게와 같으니까 말이야. 높이 약 5.5 km마다 기압은 대략 절반이 된단다⁷. 그림 25-4처럼 한라산 꼭대기(1,950 m)에서는 약 800 hPa, 에베레스트 꼭대기에서는 약 310 hPa이야.



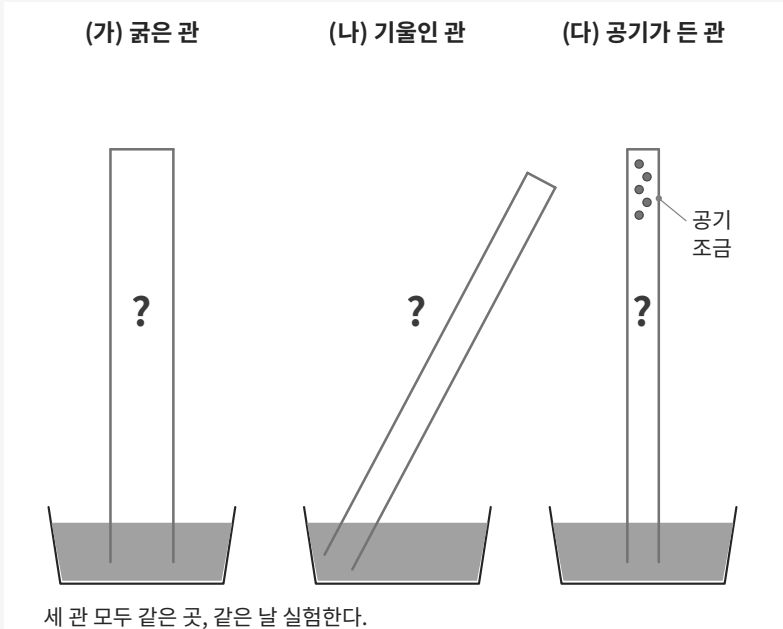
[그림 25-4] 높이에 따른 기압 해수면 1,013 hPa에서 약 5.5 km마다 절반쯤으로 줄어든다. 한라산과 에베레스트 꼭대기의 기압을 표시했다(자료: 미국 표준 대기 1976)

하린 곧게 줄지 않고 점점 완만해지네요. 아래쪽 공기가 위 공기에 눌러서 뻥뻥하니까요?

윤 교수 바로 그거야. 공기는 눌리면 줄어들어서 아래에 몰려 있단다. 물처럼 눌러도 부피가 거의 그대로라면 곧은 선이 되었을 거야.

문제 25-1 토리첼리 관 바꿔 보기

그림 25-5는 토리첼리의 실험을 세 가지로 바꾼 모습이다. (가)는 더 굵은 관, (나)는 기울인 관, (다)는 관 위쪽 빈 곳에 공기가 조금 들어간 관이다. 같은 곳에서 실험할 때 옳은 것은?



[그림 25-5] 문제 25-1의 그림 세 관의 수은 기둥 높이는 비워 두었다

- ① (가)는 수은이 무거워져 기둥의 높이가 76 cm보다 낮다.
- ② (나)는 기울인 만큼 기둥의 수직 높이가 76 cm보다 낮다.
- ③ (다)는 기둥의 높이가 76 cm보다 낮다.
- ④ 세 관을 모두 소백산 꼭대기로 가져가면 기둥이 높아진다.
- ⑤ 수은 대신 물을 넣어도 기둥의 높이는 76 cm이다.

태오 굵은 관에는 수은이 더 많이 들어가니까 무거워져서 낮아지겠죠. ①이요.

윤 교수 조건을 다시 읽어 보자. 공기는 그릇 수면의 넓이 1 m^2 마다 미는 거였지? 관이 굵어지면 무엇이 같이 커질까?

하린 관이 누르는 바닥 넓이도 커져요. 무게도 넓이도 같이 커지니까 1 m^2 마다 누르는 힘은 그대로예요.

윤 교수 계획을 세우자. 기둥을 떠받치는 것은 넓이 1 m^2 당 힘, 곧 기압이고 이것은 수직 높이로만 정해진단다. 그럼 (나)는?

태오 기울여도 수직 높이는 76 cm 그대로겠네요. 관을 따라 켜 길어지고요.

윤 교수 (다)에서는 관 위에 들어간 공기 분자들이 수은 기둥 윗면을 아래로 두드리지. 그러면?

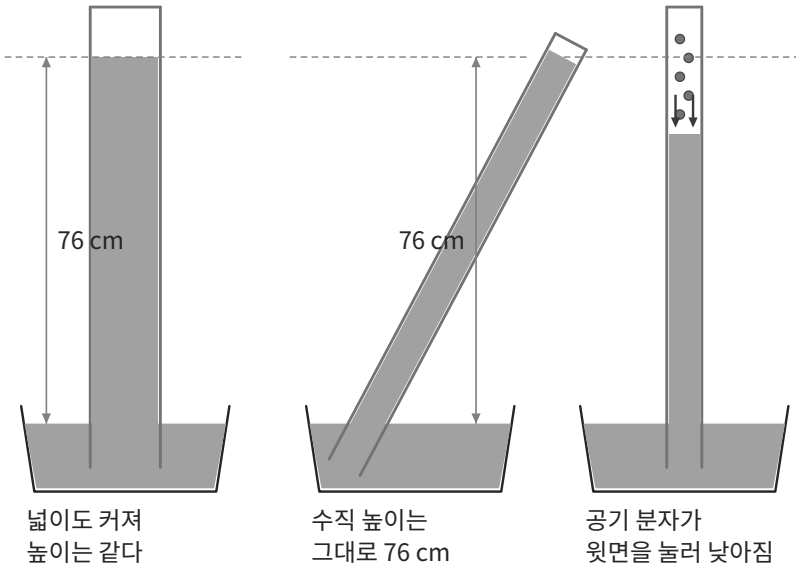
미숙 위에서 누르니까 기둥이 밀려 내려가겠네요. 그림 25-6처럼요.

윤 교수 그래서 정답은 ③이야. 산꼭대기에서는 기압이 낮아 기둥이 낮아지고, 물은 13.6배 가벼우니 약 10.3 m 까지 올라가야 하지.

(가) 굽은 관

(나) 기울인 관

(다) 공기가 든 관



[그림 25-6] 풀이 그림 (가) 굽은 관과 (나) 기울인 관도 수직 높이는 76 cm 로 같다. (다) 관 위에 들어간 공기가 수은 윗면을 눌러 기둥이 낮아진다

문제 25-2 여객기 밖의 공기

그림 25-7처럼 여객기가 높이 11 km에서 난다. 이 높이의 기압은 약 226 hPa, 해수면 기압은 1,013 hPa이다. (1) 여객기보다 위에 있는 공기는 대기 전체 질량의 약 몇 %인가? (2) 해수면 넓이 1 m² 위에 쌓인 공기 기둥의 질량은 약 몇 kg인가? (1 hPa = 100 N/m², 중력 가속도 9.8 m/s²)



[그림 25-7] 문제 25-2의 그림 해수면과 높이 11 km의 기압

태오 11 km면 5.5 km의 두 배니까 절반의 절반, 25%요!

윤 교수 어림으로는 훌륭하구나. 그런데 문제는 실제 기압을 주었지. 기압이 무엇과 같다고 했지?

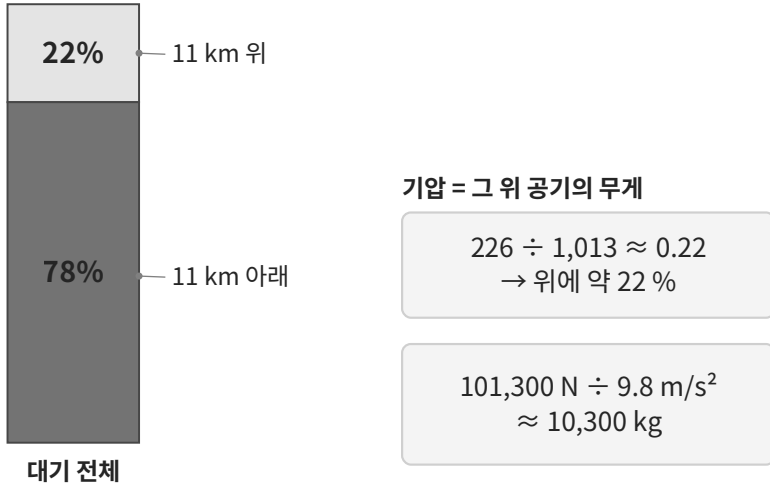
하린 그 위에 남은 공기의 무게요. 그러니까 226을 1,013으로 나누면 위에 남은 공기의 비율이에요. 약 0.22, 22%예요.

윤 교수 그렇지. 그림 25-8을 보렴. 여객기 아래에 공기의 약 78%가 깔려 있는 셈이란다. (2)는?

태오 1,013 hPa는 101,300 N/m²이고, 무게를 9.8로 나누면 질량이에요. 약 10,300 kg이에요.

미숙 1 m² 위에 10 t이라더니 계산으로도 나오네요.

윤 교수 모범 답은 (1) 약 22%, (2) 약 10,300 kg 이란다. 태오의 25%와 조금 다른 건 위로 갈수록 공기가 차가워져 더 빨리 줄어들기 때문이야. 그 까닭은 26장에서 이어서 보자.



[그림 25-8] 풀이 그림 기압은 그 위 공기의 무게이므로 $226 \div 1,013 \approx 0.22$, 여객기 위에는 대기의 약 22%만 남는다. 해수면 1 m^2 위 공기는 $101,300 \text{ N} \div 9.8 \text{ m/s}^2 \approx 10,300 \text{ kg}$ 이다

오늘의 정리

- 마른 공기는 N_2 78.08%, O_2 20.95%, Ar 0.93%와 약간의 CO_2 (약 427 ppm)로 된 분자의 바다다.
- 기압은 빠르게 움직이는 공기 분자들이 부딪치며 넓이 1 m^2 를 미는 힘이다. 그 위에 쌓인 공기 기둥의 무게와 같다.
- 토리첼리의 수는 기둥은 해수면에서 약 76 cm, 곧 1,013 hPa이다. 수직 높이만 기압으로 정해진다.
- 기압은 위로 갈수록 줄어 약 5.5 km마다 대략 절반이 된다. 공기는 눌러서 아래에 몰려 있다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 높은 산에 오르면 과자 봉지가 부푸는 까닭으로 옳은 것은?
 - ① 봉지 속 공기 분자의 수가 늘어나기 때문이다.
 - ② 바깥 공기 분자가 봉지를 두드리는 힘이 줄어들기 때문이다.
 - ③ 산 위에서는 중력이 없어지기 때문이다.
 - ④ 봉지 속 공기가 모두 아르곤으로 바뀌기 때문이다.
 - ⑤ 산 위의 공기 분자가 더 빨리 움직이기 때문이다.
2. 높이 5.5 km마다 기압이 절반이 된다고 어렵하면, 높이 16.5 km의 기압은 약 몇 hPa인지 구하고 그 아래에 대기의 약 몇 %가 있는지 쓰시오.

과학의 최전선 아주 옛날 공기는 얼마나 무거웠을까

여기까지 밝혀졌다 — 오늘 공기의 성분과 기압은 정밀하게 잰다¹. 옛 공기는 돌에 남은 흔적으로 거꾸로 읽는다. 27억 년 전 화산재에 찍힌 빗방울 자국의 크기로 그때 공기 밀도가 지금의 2배보다 작았다는 한계가 나왔다⁸. 같은 무렵 바닷가에서 굳은 용암 속 기포 크기로는 기압이 지금의 절반도 안 되었다는 추정치가 나왔다⁹. **아직 모른다** — 한편 30억~35억 년 전 석영 속에 갇힌 옛 공기의 질소를 재어 보니 질소의 양이 지금과 크게 다르지 않았다는 결과도 있다¹⁰. 시생누대 대기의 기압과 성분은 방법마다 다른 답을 주며 아직 불확실성이 크다¹¹. **가설과 연구** — 기압이 낮았다면 당시 대기의 질소가 생물 작용이나 암석으로 옮겨 갔다는 가설이 나온다. 연구자들은 더 많은 시대의 기포·빗방울 자국·포유물을 모아 옛 공기의 무게를 시대별로 이어 보려 한다¹¹.

이 장의 출처

1. Picard, A., Davis, R. S., Gläser, M., & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45(2), 149–155. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004>
2. NOAA Global Monitoring Laboratory. (2025). Trends in atmospheric carbon dioxide. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
3. Strutt, J. W., & Ramsay, W. (1895). Argon, a new constituent of the atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. (A.)*, 187–241. <https://doi.org/10.1098/rsta.1895.0006>
4. Maxwell, J. C. (1860). *Illustrations of the dynamical theory of gases*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 20(130), 21–37. <https://doi.org/10.1080/14786446008642902>
5. Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Academic Press.
6. Middleton, W. E. K. (1964). *The history of the barometer*. Johns Hopkins Press.

7. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, & United States Air Force. (1976). U.S. Standard Atmosphere, 1976 (NOAA-S/T 76-1562). U.S. Government Printing Office. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>
8. Som, S. M., Catling, D. C., Harnmeijer, J. P., Polivka, P. M., & Buick, R. (2012). Air density 2.7 billion years ago limited to less than twice modern levels by fossil raindrop imprints. *Nature*, 484(7394), 359–362. <https://doi.org/10.1038/nature10890>
9. Som, S. M., Buick, R., Hagadorn, J. W., Blake, T. S., Perreault, J. M., Harnmeijer, J. P., & Catling, D. C. (2016). Earth's air pressure 2.7 billion years ago constrained to less than half of modern levels. *Nature Geoscience*, 9(6), 448–451. <https://doi.org/10.1038/ngeo2713>
10. Marty, B., Zimmermann, L., Pujol, M., Burgess, R., & Philippot, P. (2013). Nitrogen Isotopic Composition and Density of the Archean Atmosphere. *Science*, 342(6154), 101–104. <https://doi.org/10.1126/science.1240971>
11. Catling, D. C., & Zahnle, K. J. (2020). The Archean atmosphere. *Science Advances*, 6(9), eaax1420. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1420>

대기의 층 — 하늘은 층층이

출발점 에너지 준위·방출·흡수 앞 권 · 열복사(온도와 빛) 앞 권 · 기압(분자 충돌) 25장

새 개념 대기의 층 · 오존층

이어짐 복사 평형·에너지 수지 27장

기본개념 이 장의 개념 10개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

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

1	표준 대기	높이에 따른 평균 기온과 기압을 정해 둔 대기 모형.
2	대류권	지표에서 약 11 km까지, 위로 갈수록 기온이 내려가고 날씨가 생기는 층.
3	성층권	대류권 위 약 50 km까지, 오존이 자외선을 흡수해 위로 갈수록 따뜻해지는 층.
4	중간권	성층권 위 약 85 km까지, 기온이 다시 내려가 대기에서 가장 추운 곳이 있는 층.
5	열권	중간권 위의 아주 희박한 층으로, 분자가 매우 빨라 기온이 높은 곳.
6	오존	산소 원자 셋으로 된 분자 O_3 로, 자외선을 흡수하는 것.
7	오존층	높이 약 15~35 km에 오존이 많이 모인 층.
8	프레온	냉장고와 스프레이에 쓰다가 성층권에서 염소를 풀어 오존을 부순 물질.
9	오존 구멍	남극 봄철에 성층권 오존이 크게 줄어드는 현상.
10	몬트리올 의정서	프레온을 단계적으로 없애기로 1987년에 맺은 국제 약속.

같은 토요일 오후, 과학방 마당. 햇살이 따가웠고 바람은 잔잔했다. 윤 교수가 헬륨을 채운 커다란 풍선 하나를 꺼내 줄을 풀었다. 풍선은 소백산 쪽 하늘로 곧게 떠올라 금세 접이 되었다.

하린 풍선은 어디까지 올라가요? 우주까지 가요?

윤 교수 오전에 배운 걸로 생각해 보자. 위로 갈수록 기압이 줄지? 바깥 공기 분자가 덜 두드리니 풍선은 점점 부풀다가 결국 터진단다. 기상 관측에 쓰는 큰 풍선은 온도계와 무선 송신기를 매달고 30 km 남짓까지 올라가며 높이마다 기온과 기압을 보내 와¹.

태오 그 기록을 모으면 하늘의 기온 지도가 나오겠네요. 위로 갈수록 계속 추워지겠죠? 산꼭대기가 추우니까요.

윤 교수 100여 년 전 사람들도 그렇게 생각했단다. 그런데 풍선이 뜻밖의 답을 가져왔지.

풍선이 찾아낸 층

윤 교수 1902년 프랑스의 테스랑 드 보르와 독일의 아스만은 따로따로 기구를 수백 번 띄웠어. 그런데 약 11 km 위부터는 기온이 더 내려가지 않았단다. 처음에는 측정이 틀린 줄 알았지만 몇 번을 해도 같았어².

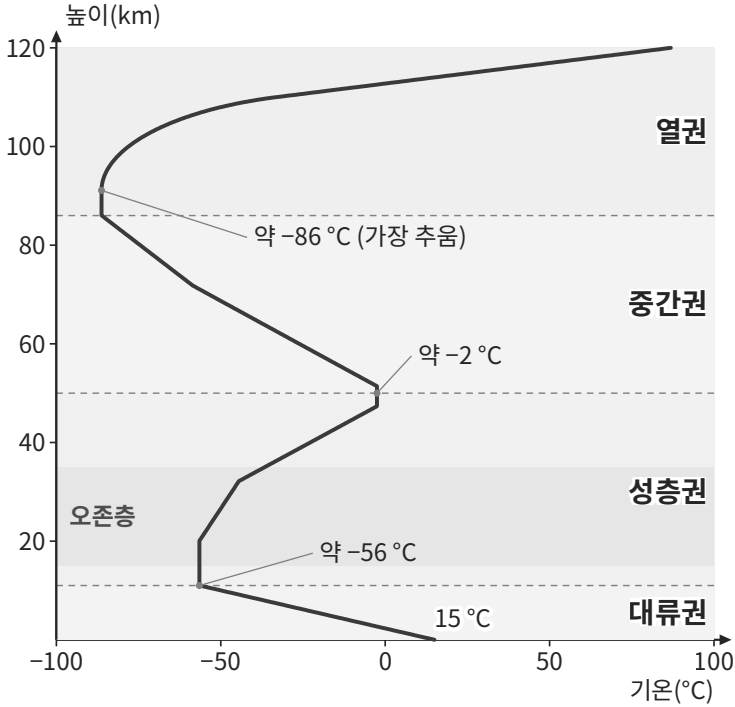
미숙 산에 오르면 추워지니 계속 추워질 줄 알았는데, 어디서 멈춘다니 신기하네요.

윤 교수 그림 26-1은 지금 쓰는 표준 대기의 기온이에요. 기온이 오르고 내리는 방향이 바뀌는 곳마다 층을 나눕니다³.

윤 교수 맨 아래가 **대류권**이란다. 땅이 햇빛을 받아 데워지고, 그 땅이 바로 위 공기를 데우지. 그래서 아래가 따뜻하고 위로 갈수록 1 km에 평균 약 6.5 °C씩 차가워져. 11 km쯤에서는 약 -56 °C야³. 데워진 공기가 올라가고 찬 공기가 내려오며 뒤섞이니 구름과 비, 곧 날씨가 모두 이 층에서 생긴단다. 대류권의 두께는 곳에 따라 달라서 뜨거운 적도에서는 약 17 km, 차가운 극에서는 약 8 km란다¹.

하린 적도는 땅이 더 뜨거워 공기가 더 높이 솟구치니까 층도 두꺼운 거네요.

태오 그다음은 기온이 다시 올라가는 **성층권**이고요.



[그림 26-1] 높이에 따른 기온과 대기의 네 층 대류권에서는 위로 갈수록 내려가고, 성층권에서는 올라가며, 중간권에서 다시 내려가 가장 추운 곳이 되고, 열권에서 크게 올라간다(자료: 미국 표준 대기 1976, 열권 기온은 태양 활동에 따라 크게 달라진다)

윤 교수 그래. 약 50 km까지 기온이 올라 0 °C 가까이 된단다. 그 위 **중간권**에서는 다시 내려가 85 km쯤에서 약 -86 °C, 대기에서 가장 추운 곳이 돼. 별똥별이 불타는 곳이 이 근처야. 그 위 **열권**은 공기가 아주 희박하지만 분자 하나하나가 매우 빨라 기온이 수백 °C를 넘는단다. 물리 편 상권 33장의 오로라가 바로 이 층에서 빛나지¹.

하린 그러니까 층을 가르는 기준은 높이가 아니라 기온이 꺾이는 곳이라는 거죠?

윤 교수 정확해. 그럼 성층권은 왜 위로 갈수록 따뜻할까? 거기에 햇빛을 먹는 분자가 있기 때문이란단다.

오존 — 광자가 결합을 끊고 붙인다

윤 교수 물리 편 상권 27장에서 빛은 광자 알갱이이고, 파장이 짧을수록 광자 하나의 에너지가 크다고 했지? 산소 분자 O_2 의 두 원자를 떼어 놓으려면 광자 하나가 약 $8.3 \times 10^{-19} \text{ J}$ 을 가져와야 해. 이런 광자는 파장이 아주 짧은 자외선뿐이란단다.

1 자외선이 O_2 를 끊는다



2 산소 원자가 O_2 에 붙는다



3 오존이 자외선을 먹고 쪼개진다



[그림 26-2] 성층권에서 오존이 생기고 없어지는 고리 ① 짧은 자외선 광자가 O_2 의 결합을 끊어 산소 원자 둘을 만든다. ② 산소 원자가 다른 O_2 와 붙어 오존 O_3 가 된다. ③ 오존은 조금 긴 자외선 광자를 흡수해 다시 O_2 와 산소 원자로 쪼개진다(모식도)

윤 교수 그림 26-2를 보렴. 1930년 영국의 채프먼이 이 고리를 처음 세웠단다⁴. 광자가 결합을 끊고, 떨어진 산소 원자가 다른 O_2 에 붙어 **오존** O_3 가 되지. 오존은 다시 자외선을 먹고 쪼개져. 자외선의 에너지가 이렇게 분자를 끊고 붙이는 사이 결국 공기 분자의 운동, 곧 열이 된단다. 그래서 성층권이 따뜻한 거야.

하린 끊고 붙이고 또 끊으면서 자외선을 계속 걸러 내는 거네요.

윤 교수 그래. 오존은 높이 약 15~35 km에 많이 모여 있어서 이곳을 **오존층**이라고 해. 1926년 영국의 돕슨은 땅에서 햇빛의 자외선 세기를 재어 대기 전체의

오존 양을 알아냈지⁵. 그 오존을 모두 모아 해수면 기압으로 누르면 두께가 약 3 mm밖에 안 된다¹.

미숙 3 mm로 온 지구의 자외선을 막는다니요. 장독 뚜껑보다 얇네요.

윤 교수 얇아도 광자를 하나하나 붙잡으니 충분하답니다. 파장이 가장 짧은 자외선은 성층권 위에서 거의 다 걸러지고, 조금 긴 자외선 일부만 땅까지 내려와요. 여름 한낮에 햇볕에 오래 있으면 살갗이 빨갛게 타는 것이 그 일부 때문이지요.

태오 그럼 오존이 조금만 줄어도 땅에 닿는 자외선이 늘겠네요.

오존 구멍과 몬트리올 의정서

윤 교수 그 얇은 층이 위험해진 적이 있습니다. 1974년 몰리나와 롤런드는 냉장고와 스프레이에 쓰던 프레온이 성층권까지 올라가 자외선에 쪼개지면, 풀려난 염소 원자가 오존을 되풀이해 부순다고 예측했어요⁶. 그림 26-3처럼 염소는 반응 뒤에 다시 풀려나 또 오존을 부수지요.

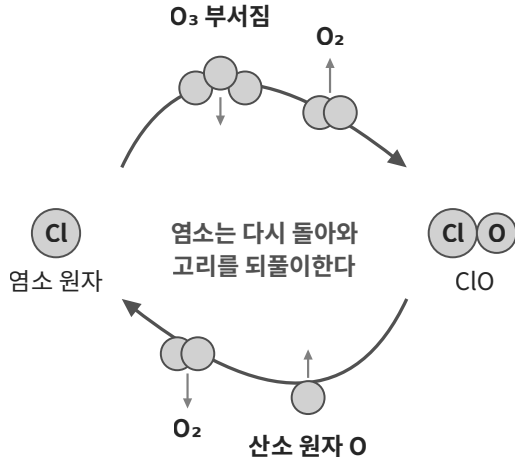
윤 교수 1985년 파먼과 동료들은 남극 기지의 관측에서 봄철 오존이 크게 줄어든 것을 발표했습니다. **오존 구멍**이지요⁷. 두 예측과 관측 덕분에 1987년 세계는 **몬트리올 의정서**를 맺고 프레온을 단계적으로 없애기로 했어요⁸. 몰리나·롤런드는 크뤼천과 함께 1995년 노벨 화학상을 받았습니다⁹.

하린 예측이 먼저 나오고, 11년 뒤에 관측으로 확인된 거네요. 그리고 온 세계가 함께 약속을 지킨 거고요.

윤 교수 그래. 원자 하나의 반응을 따져 본 연구가 지구 전체를 지킨 드문 예란다.

태오 그럼 오존 구멍 때문에 지구가 더워지는 거죠?

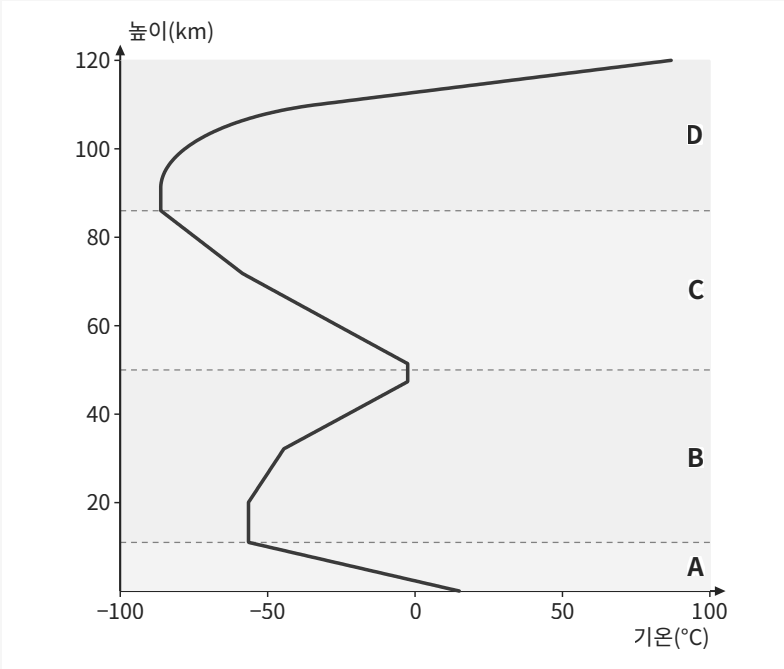
윤 교수 많이 헛갈리는 부분이란다. 오존 구멍은 자외선을 막는 층이 얇아지는 일이고, 지구가 더워지는 온실 효과는 적외선을 흡수하는 다른 현상이야. 온실 효과는 28장에서 자세히 배운다. 다행히 남극 오존 구멍은 2000년 무렵부터 조금씩 줄어드는 조짐을 보인단다¹⁰.



[그림 26-3] 염소 원자의 오존 파괴 고리 염소 원자 Cl이 오존을 부쉘 ClO가 되고, ClO가 산소 원자를 만나 다시 Cl로 돌아온다. 염소는 없어지지 않고 고리를 계속 돈다(모식도)

문제 26-1 기온 그래프로 층 읽기

그림 26-4는 높이에 따른 기온을 나타낸 것이고, A~D는 대기의 네 층이다. 옳은 것은?



[그림 26-4] 문제 26-1의 그림 층 이름 대신 A~D로 나타냈다

- ① A에서는 위로 갈수록 기온이 올라간다.
- ② B에서 기온이 올라가는 것은 오존이 자외선을 흡수하기 때문이다.
- ③ C에는 대기에서 가장 높은 기온이 있다.
- ④ D는 공기가 가장 뽀뽀한 층이다.
- ⑤ 구름과 비는 주로 B에서 생긴다.

태오 D는 기온이 제일 높으니까 공기도 가장 많이 모여 있겠쥬. ④요.

윤 교수 조건을 다시 보자. 25장에서 공기는 어디에 몰려 있었지?

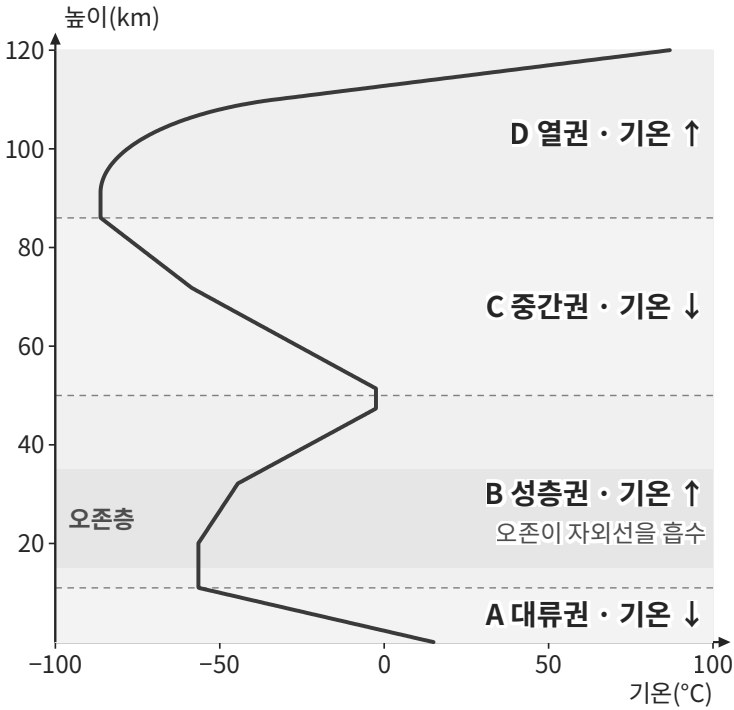
태오 아래쪽이요. 위로 갈수록 기압이 줄었으니까요. D는 제일 위라서 오히려 가장 희박하네요.

윤 교수 계획은 이렇단다. 그래프에서 층마다 기온이 오르는지 내리는지 먼저 읽고, 그 까닭을 떠올려 보자. 그림 26-5를 보렴.

하린 A는 위로 갈수록 내려가니 ①은 틀렸어요. 구름과 비도 A, 곧 대류권에서 생기니까 ⑤도 틀렸고요.

미숙 C는 가장 추운 곳이 있는 층이니 ③도 아니네요. 남는 건 ②예요.

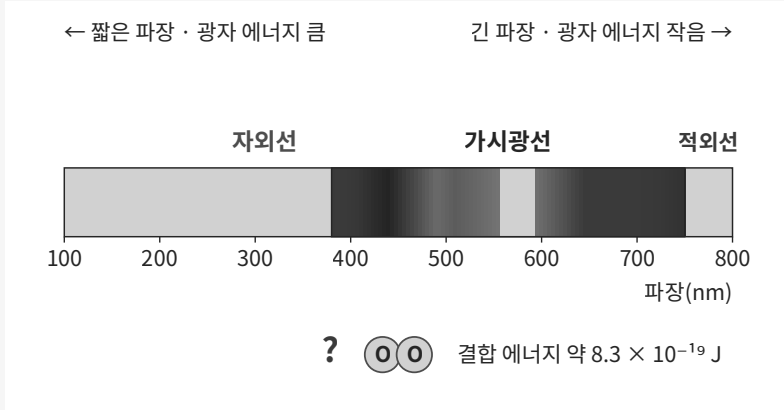
윤 교수 그래. 정답은 ②란다. B, 곧 성층권은 오존이 자외선 광자를 흡수해 데워지지.



[그림 26-5] 풀이 그림 기온이 내려가는 A(대류권)와 C(중간권), 올라가는 B(성층권)와 D(열권). B를 데우는 것은 오존의 자외선 흡수다

문제 26-2 산소 분자를 끊는 빛

산소 분자 O_2 의 결합을 끊으려면 광자 하나가 약 $8.3 \times 10^{-19} \text{ J}$ 의 에너지를 가져야 한다. 광자의 에너지 E 와 파장 λ 사이에는 $E = hc \div \lambda$ 의 관계가 있다($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$). O_2 를 끊을 수 있는 빛의 가장 긴 파장은 몇 nm인지 구하고, 그림 26-6에서 그 빛이 어느 영역인지 쓰시오.



[그림 26-6] 문제 26-2의 그림 햇빛의 파장 영역. 짧은 파장이 왼쪽이다

태오 에너지가 크면 파장도 길 것 같은데요. 가시광선쪽이요?

윤 교수 식을 다시 보자. 파장 λ 가 분모에 있지. 에너지가 크려면 파장이 어때야 하지?

태오 짧아야 해요. 반대였네요.

하린 $\lambda = hc \div E$ 로 바꿔서 넣을게요. $6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8$ 은 약 1.99×10^{-25} 이고, 이것을 8.3×10^{-19} 로 나누면 $2.4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 예요.

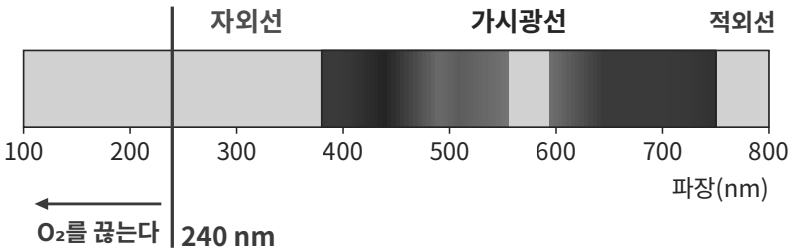
윤 교수 1 nm는 10^{-9} m 이니 240 nm지. 그림 26-7에서 이 파장을 찾아보렴.

미숙 보라색 빛(약 400 nm)보다도 왼쪽이니 자외선이네요.

윤 교수 모범 답은 약 240 nm, 자외선이란다. 이보다 짧은 광자는 모두 O_2 를 끊을 수 있어서 성층권 위에서 거의 다 흡수돼 땅까지 오지 못하지.

← 짧은 파장 · 광자 에너지 큼

긴 파장 · 광자 에너지 작음 →



$$\lambda = hc \div E = 1.99 \times 10^{-25} \div (8.3 \times 10^{-19})$$

$$\approx 2.4 \times 10^{-7} \text{ m} = 240 \text{ nm}$$

[그림 26-7] 풀이 그림 $\lambda = hc \div E \approx 240 \text{ nm}$. 이보다 짧은 파장(왼쪽)의 광자만 O₂의 결합을 끊을 수 있다. 가시광선보다 훨씬 짧은 자외선이다

오늘의 정리

- 대기는 기온이 높이에 따라 바뀌는 방향으로 대류권·성층권·중간권·열권의 네 층으로 나눈다.
- 대류권은 땅이 데운 공기가 뒤섞이는 층으로 날씨가 생기고, 위로 갈수록 평균 1 km에 약 6.5 °C씩 기온이 내려간다.
- 성층권의 오존층에서는 자외선 광자가 O₂·O₃의 결합을 끊고, 산소 원자가 다시 불기를 되풀이하며 자외선을 걸러 내고 공기를 데운다.
- 프레온의 염소가 오존을 되풀이해 부수어 오존 구멍이 생겼고, 1987년 몬트리올 의정서로 프레온을 없애 가고 있다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

- 오존층에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 대류권 맨 아래에 있다.
 - ② 적외선을 흡수해 지구를 데운다.
 - ③ 자외선을 흡수하며 성층권을 데운다.
 - ④ 오존 구멍은 지구 온난화의 직접 원인이다.
 - ⑤ 염소 원자는 오존과 한 번 반응하면 사라진다.
- 열권은 기온이 수백 °C가 넘는데도 그곳에 손을 내밀면 뜨겁게 느끼지 못할 것이다. 그 까닭을 분자의 수와 충돌로 설명하시오.

과학의 최전선 오존층은 언제 다 회복될까

여기까지 밝혀졌다 — 몬트리올 의정서 뒤 남극 오존 구멍은 2000년 이후 줄어드는 회복의 첫 징후를 보였고, 그 주된 까닭은 대기 중 염소가 줄어든 것이다¹⁰. 2022년 국제 평가는 남극은 2066년 무렵, 북극은 2045년 무렵, 중위도까지 합한 평균은 2040년 무렵 1980년 수준으로 돌아간다고 내다보았다¹¹. **아직 모른다** — 남극 밖에서 오존이 회복되고 있다는 증거는 아직 제한적이고 확신이 낮다¹¹. 위 성층권 오존은 늘고 있지만 아래 성층권 오존은 1998년 이후에도 계속 줄어 전체 회복을 가리고 있을 수 있다는 분석이 있다¹². **가설과 연구** — 2012년 이후 금지된 프레온 한 종류의 농도가 예상보다 느리게 줄어, 보고되지 않은 새 배출이 있었음이 밝혀졌다¹³. 연구자들은 위성과 지상 관측, 대기 모형을 함께 써서 회복 속도를 계속 확인하고 있다.

이 장의 출처

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: An introductory survey (2nd ed.). Academic Press.
- Hoinka, K. P. (1997). Die Tropopause: Entdeckung, Definition, Bestimmung. Meteorologische Zeitschrift, 6(6), 281–303. <https://doi.org/10.1127/metz/6/1997/281>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, & United States Air Force. (1976). U.S. Standard Atmosphere, 1976 (NOAA-S/T 76-1562). U.S. Government Printing Office. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>
- Chapman, S. (1930). XXXV. On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 10(64), 369–383. <https://doi.org/10.1080/14786443009461588>
- Dobson, G. M. B., & Harrison, D. N. (1926). Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 110(756), 660–693. <https://doi.org/10.1098/rspa.1926.0040>

6. Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810–812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
7. Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315(6016), 207–210. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
8. Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme. (2024). The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>
9. The Royal Swedish Academy of Sciences. (1995). Press release: The 1995 Nobel Prize in Chemistry. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1995/press-release/>
10. Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., & Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269–274. <https://doi.org/10.1126/science.aae0061>
11. World Meteorological Organization. (2022). Scientific assessment of ozone depletion: 2022 (GAW Report No. 278). WMO. <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/>
12. Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., . . . Rozanov, E. V. (2018). Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(2), 1379–1394. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>
13. Montzka, S. A., Dutton, G. S., Yu, P., Ray, E., Portmann, R. W., Daniel, J. S., Kuijpers, L., Hall, B. D., Mondeel, D., Siso, C., Nance, J. D., Rigby, M., Manning, A. J., Hu, L., Moore, F., Miller, B. R., & Elkins, J. W. (2018). An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557(7705), 413–417. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2>

27

햇빛과 지구의 에너지 수지 — 들어온 만큼 나간다

출발점 열복사(온도와 빛) 앞 권 · 대기의 층 26장

새 개념 복사 평형·에너지 수지 · 반사율(알베도)

이어짐 온실 효과 28장 · 대기 대순환 32장 · 수온 약층·밀도 34장

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	에너지 수지	지구에 들어오고 나가는 에너지를 장부처럼 견주어 맞춘 것.
2	반사율	들어온 햇빛 가운데 되돌려 보내는 비율로, 알베도라고도 하는 값.
3	태양 복사	표면 약 5,800 K인 태양이 가시광선 근처에서 가장 세게 내는 복사.
4	지구 복사	약 255 K인 지구가 파장 10 μm 근처 적외선으로 내는 복사.
5	태양 상수	대기 바깥에서 햇빛에 수직인 1 m^2 가 1초에 받는 약 1,361 W/m^2 의 에너지.
6	복사 평형	흡수하는 복사 에너지와 내보내는 복사 에너지가 같아 온도가 일정한 상태.
7	복사 평형 온도	흡수와 방출이 같아지는 온도로, 지구는 약 255 K(-18°C)인 값.
8	지구 에너지 불균형	지구가 흡수하는 햇빛과 내보내는 적외선 사이의 작은 차이.

9월 둘째 토요일 한낮, 과학방 옥상. 구름 한 점 없이 맑았다. 윤 교수가 물을 똑같이 담은 종이컵 두 개를 햇볕에 나란히 놓았다. 하나는 검은 종이로, 하나는 흰 종이로 감쌌고 컵마다 온도계를 꽂았다. 네 사람은 모자를 쓰고 그늘막 아래에 앉았다.

윤 교수 지난주에 공기가 분자의 바다라는 것과, 대기가 기온에 따라 층층이 나뉜다는 것을 보았지. 그 기온을 정하는 것은 결국 햇빛이란단다. 태양은 절대 직접 보지 말고, 컵의 온도계만 보자꾸나.

태오 30분쯤 지났는데 검은 컵이 벌써 몇 도나 더 높아요.

미숙 여름에 검은 장독이 뜨끈뜨끈하고, 흰 옷이 시원한 것과 같네요.

윤 교수 같은 햇빛을 받았는데 왜 다를까요? 오늘은 햇빛이 지구에 들어와서 어떻게 나가는지 장부를 적어 보겠습니다.

튀겨 내는 빛, 먹는 빛

윤 교수 흰 종이는 받은 햇빛을 대부분 되돌려 보내고, 검은 종이는 대부분 흡수해 원자와 분자의 진동, 곧 열로 바꾼단다. 들어온 햇빛 가운데 되돌려 보내는 비율을 **반사율**, 또는 **알베도**라고 해. 갓 내린 눈은 0.8이 넘고, 숲은 0.1~0.2, 바다는 0.1보다 작지¹.

하린 그러니까 반사율 0.8은 햇빛 10을 받으면 8을 돌려보내고 2만 먹는다는 거죠?

윤 교수 정확해. 지구 전체로 보면 반사율은 약 0.3이란단다. 들어온 햇빛의 30%쯤을 구름과 얼음, 땅과 바다가 되돌려 보내지. 그 대부분은 구름의 몫이야^{2,3}.

미숙 구름이 그렇게 많이 되돌려 보내요? 여름에 구름이 해를 가리면 금세 서늘해지긴 하지요.

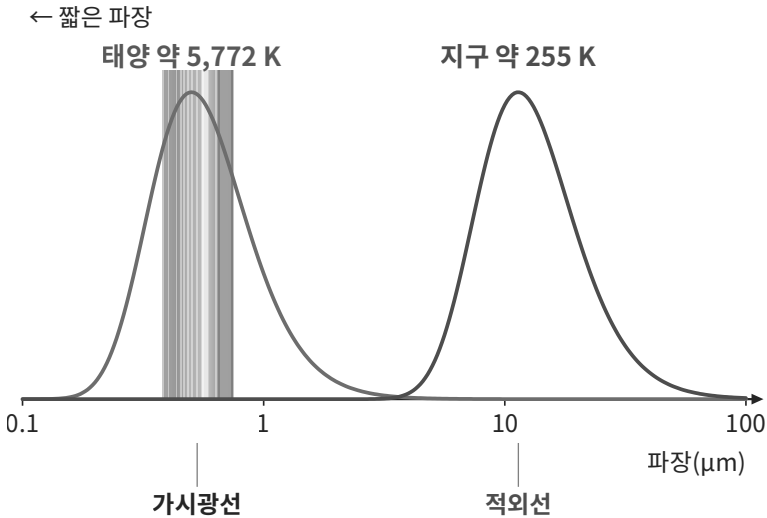
윤 교수 네. 구름의 작은 물방울들이 햇빛을 사방으로 흩뜨려 위로도 많이 돌려보내거든요. 흥미롭게도 북반구는 땅이 많아 더 반사하고, 남반구는 구름이 더 반사해서 두 반구가 돌려보내는 햇빛의 양이 거의 같답니다².

태오 우연치고는 신기하네요. 시험엔 어떻게 나와요?

윤 교수 반사율이 크면 흡수가 적다, 이것 하나면 된단다. 수치는 교재의 대략값을 쓰면 돼.

햇빛과 지구 빛 — 온도가 정하는 복사

윤 교수 물리 편 상권 25장에서 뜨거운 물체는 빛을 낸다고 했지. 온도가 높을수록 더 많이, 더 짧은 파장으로 낸단다. 1879년 슈테판이 실험으로 찾은 규칙을 1884년 볼츠만이 이론으로 이끌어 냈어. 물체 걸면 1 m^2 가 1초에 내는 에너지는 절대 온도의 네제곱에 비례한다는 것이지. $E = \sigma T^4$ 이고 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 야.



[그림 27-1] 태양 복사와 지구 복사 표면이 약 5,800 K인 태양은 가시광선 근처에서 가장 세게 빛나고, 약 255 K인 지구는 파장 $10\text{ }\mu\text{m}$ 근처의 적외선으로 빛난다. 짧은 파장이 왼쪽이다(흑체 복사 계산, 두 곡선의 높이는 각각 맞춤)

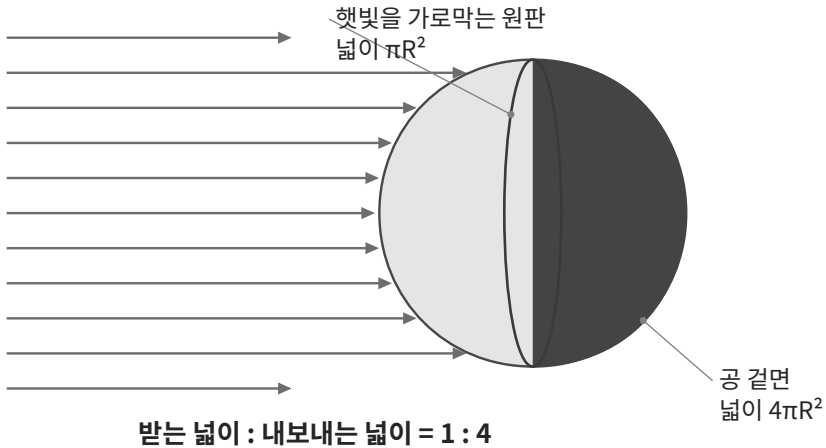
윤 교수 그림 27-1을 보렴. 태양은 걸면이 약 5,800 K라서 가시광선 근처로 빛나지. 지구는 훨씬 차가워서 눈에 보이지 않는 적외선으로 빛난단다. 그래서 들어오는 햇빛과 나가는 지구 빛은 파장이 서로 겹치지 않아.

태오 지구도 빛을 낸다고요? 밤에 지구가 빛나진 않잖아요.

윤 교수 적외선이라 눈에 안 보일 뿐이란다. 열화상 카메라로 보면 땅도 사람도 모두 환하게 빛나지.

복사 평형 — 지구의 에너지 장부

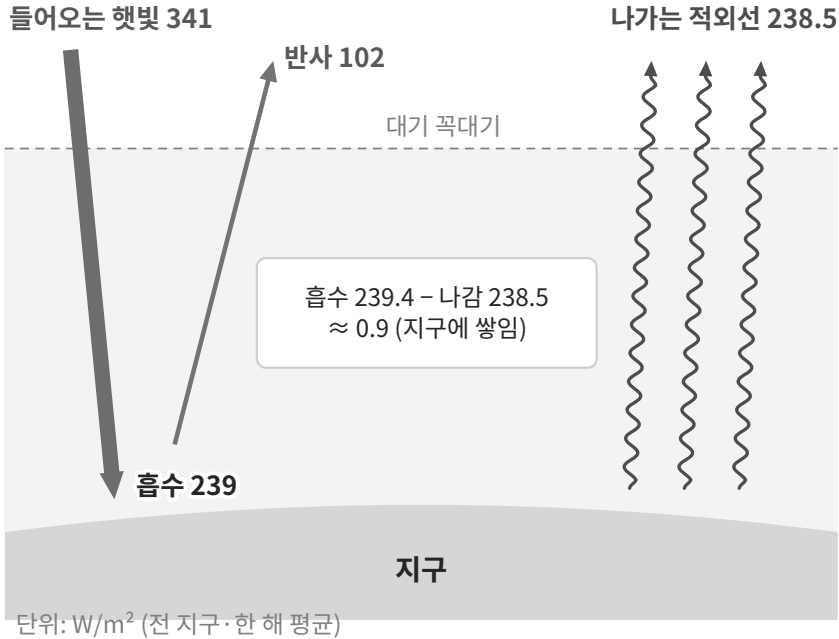
윤 교수 대기 바깥에서 햇빛에 수직인 1 m^2 는 1초에 약 $1,361 \text{ J}$ 을 받는단다. 이것을 **태양 상수**라고 해. 2011년 위성 관측으로 다시 쟀 값이야⁵. 그런데 지구는 둥글고 돌지. 그림 27-2를 보자.



[그림 27-2] 햇빛을 받는 넓이와 내보내는 넓이 지구가 가로막는 햇빛은 반지름 R 인 원판(πR^2)만큼이지만, 적외선은 공 겉면 전체($4\pi R^2$)에서 나간다. 그래서 지구 겉면 1 m^2 가 받는 햇빛은 평균 $1,361 \div 4 \approx 340 \text{ W/m}^2$ 이다(모식도)

하린 햇빛을 가로막는 건 원판 넓이 πR^2 인데, 겉면은 $4\pi R^2$ 이니까 네 배로 나눠야 하는 거네요. 밤인 쪽과 비스듬히 받는 곳까지 고르게 나누면요.

윤 교수 그래. 평균 약 340 W/m^2 가 들어오고 그 30%가 반사되니 약 238 W/m^2 를 흡수하지. 온도가 일정하려면 흡수한 만큼 적외선으로 내보내야 해. 들어온 만큼 나가는 이 상태를 **복사 평형**이라고 해. 1997년 킬과 트렌버스가 관측을 모아 이런 장부를 처음 자세히 그렸고, 2009년 위성 자료로 다시 고쳤지. 그림 27-3이 그 장부야^{6,7}.



[그림 27-3] 지구의 에너지 장부(전 지구 평균, W/m²) 들어오는 햇빛 341 가운데 102는 반사되고 239가 흡수된다. 우주로 나가는 적외선은 238.5로, 흡수한 것보다 약 0.9 적다(자료: 트렌버스 외 2009)

윤 교수 이제 $\sigma T^4 = 238$ 로 놓고 T 를 구해 보자. $238 \div (5.67 \times 10^{-8})$ 은 약 4.2×10^9 이고, 그 네제곱근은 약 255야. 255 K, 곧 약 -18°C 란다¹.

미숙 가게 장부 같네요. 들어온 돈보다 나간 돈이 많으면 통장이 줄고, 적으면 쌓이잖아요.

윤 교수 딱 맞는 비유입니다. 그런데 지구의 장부는 저절로 맞춰지는 힘이 있어요. 흡수가 더 많으면 지구가 데워지고, 데워지면 σT^4 에 따라 내보내는 적외선이 빠르게 늘지요. 반대로 내보내는 쪽이 많으면 식어서 덜 내보내고요. 그래서 온도는 들어오고 나가는 것이 같아지는 곳에 자리를 잡습니다.

하린 그러니까 복사 평형 온도는 지구가 알아서 찾아가는 온도라는 거죠? 옥상의 검은 컵도 계속 뜨거워지지 않고 어느 온도에서 멈추고요.

윤 교수 그래. 컵도 데워질수록 적외선과 바람으로 열을 더 많이 내보내니 어느 온도에서 멈춘단다.

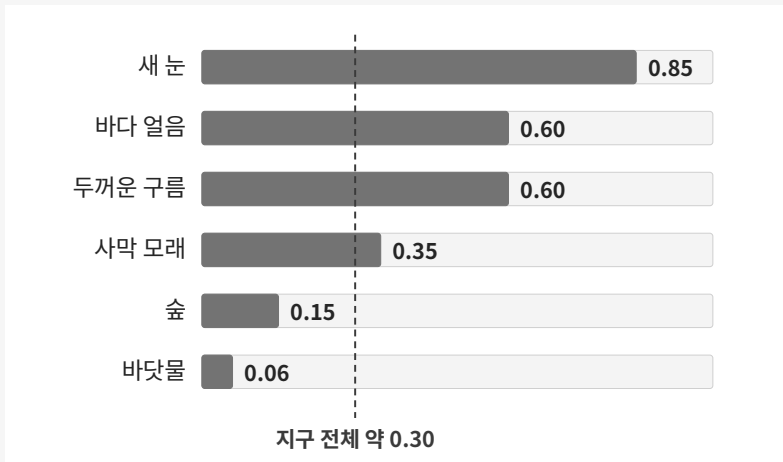
태오 -18℃요? 지구 평균 기온은 15℃쯤 아닌가요? 계산이 틀렸나 봐요.

윤 교수 계산은 맞단다. 33℃나 되는 이 차이가 바로 대기가 하는 일이야. 그 비밀은 28장에서 이어서 풀자. 하나 더 있지. 적도 쪽은 흡수하는 햇빛이 내보내는 적외선보다 많고, 극 쪽은 거꾸로 모자란단다. 적도에서는 햇빛이 머리 위에서 곧게 내리쬘고, 극에서는 비스듬히 넓게 퍼지며 눈과 얼음이 많이 되돌려 보내기 때문이지. 그런데도 적도는 해마다 더 뜨거워지지 않고 극도 더 얼어붙지 않아. 그 차이를 대기와 바다가 적도에서 극으로 열을 날라 메우기 때문이란단다³. 이 흐름은 32장과 35장에서 자세히 배운다.

태오 바람과 바다가 결국 햇빛의 장부를 맞추는 일꾼이네요.

문제 27-1 흡수하는 햇빛이 늘어나는 변화

그림 27-4는 여러 겉면의 반사율(대략값)이다. 지구가 흡수하는 햇빛을 늘리는 변화로 옳은 것은?



[그림 27-4] 문제 27-1의 그림 겉면에 따른 반사율의 대략값(자료: 대기과학 교재)

- ① 넓은 땅이 새 눈으로 덮인다.
- ② 낮은 구름이 바다 위를 더 넓게 덮는다.
- ③ 도시의 지붕을 흰색으로 칠한다.
- ④ 북극 바다의 얼음이 녹아 검푸른 바닷물이 드러난다.
- ⑤ 사막 모래 위에 흰 소금 층이 넓게 생긴다.

태오 구름이 많아지면 우리가 덥잖아요. 구름 낀 밤이 따뜻하니까 ②요.

윤 교수 문제를 다시 읽어 보자. 묻는 것은 흡수하는 **햇빛**이야. 구름은 햇빛을 어떻게 한다고 했지?

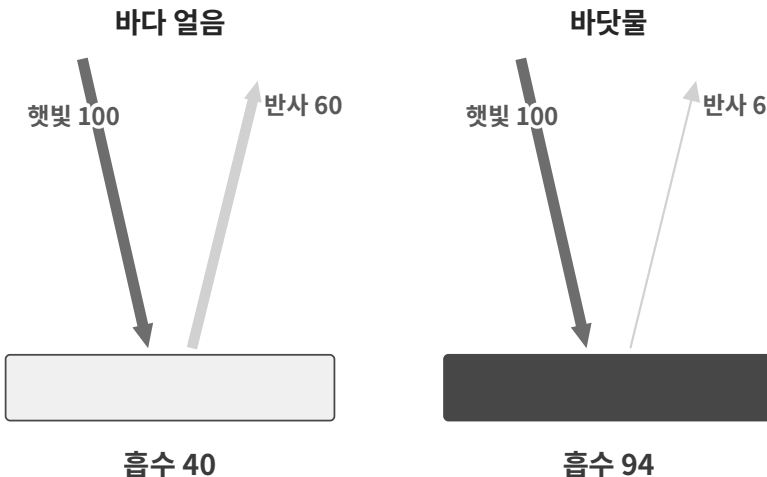
태오 아, 지구 반사의 대부분이 구름이라고 했어요. 구름이 늘면 햇빛은 오히려 더 튕겨 나가네요.

윤 교수 계획을 세우자. 보기마다 반사율이 커지는지 작아지는지만 따지면 된단다. 작아지면 흡수가 늘지.

하린 새 눈, 흰 지붕, 흰 소금은 모두 반사율을 키워요. 바다 얼음이 녹으면 반사율이 0.6쯤에서 0.1도 안 되게 떨어지고요.

미숙 그림 27-5처럼 햇빛 100 가운데 얼음은 60을 돌려보내는데 바다는 대부분 먹어 버리네요.

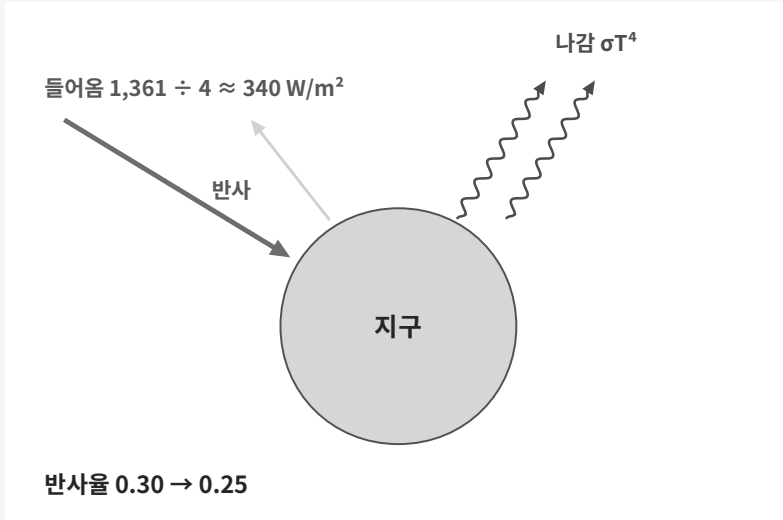
윤 교수 그래서 정답은 ④예요. 바다가 더 데워지면 얼음이 더 녹는 고리가 되기도 하지요.



[그림 27-5] 풀이 그림 햇빛 100이 바다 얼음에 닿으면 약 60이 반사되고 40이 흡수되지만, 바닷물에 닿으면 약 6만 반사되고 94가 흡수된다

문제 27-2 반사율이 줄면 몇 도가 될까

그림 27-6처럼 태양 상수는 $1,361 \text{ W/m}^2$ 이고 지구의 반사율은 0.30이다. 지구의 반사율이 0.25로 줄었다고 하자. 새 복사 평형 온도는 몇 K인지 구하고, 원래의 255 K와 비교하시오($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$).



[그림 27-6] 문제 27-2의 그림 들어오는 햇빛, 반사되는 햇빛, 나가는 적외선의 관계

태오 반사율이 0.05 줄었으니 기온도 5%쯤, 13 K 오르지 않을까요?

윤 교수 온도는 에너지에 곧바로 비례하지 않았지. 식을 다시 떠올려 보자.

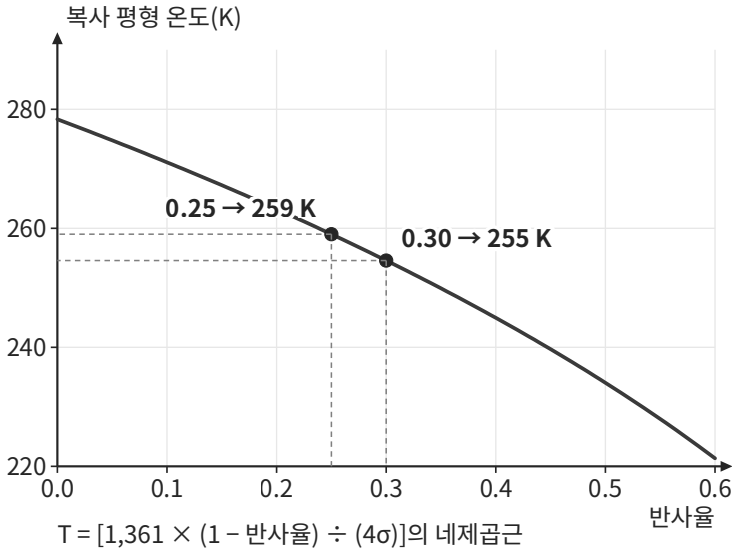
하린 σT^4 가 흡수한 에너지와 같아요. 흡수는 $1,361 \div 4 \times (1 - 0.25)$ 이니 약 255 W/m^2 예요.

윤 교수 그다음은?

하린 $255 \div (5.67 \times 10^{-8})$ 은 약 4.5×10^9 이고, 제곱근을 두 번 하면 약 259예요.

윤 교수 그림 27-7을 보렴. 흡수가 약 7% 늘어도 온도는 그 네제곱근만큼, 곧 2%가 채 안 되게 오르지. 모범 답은 약 259 K, 원래보다 약 4 K 높다는 거란다.

미숙 반사율 0.05 차이로 4 °C라니, 구름과 얼음이 조금만 달라져도 크겠네요.



[그림 27-7] 풀이 그림 반사율에 따른 복사 평형 온도. 반사율 0.30에서 255 K, 0.25에서 259 K다. 흡수가 약 7% 늘 때 온도는 네제곱근만큼, 약 1.7% 오른다

오늘의 정리

- 반사율(알베도)은 들어온 햇빛 가운데 되돌려 보내는 비율이다. 지구 전체는 약 0.3이고, 대부분 구름이 정한다.
- 물체는 온도에 따라 복사를 내며 1 m²당 에너지는 σT^4 이다. 태양은 가시광선 근처, 지구는 적외선으로 빛난다.
- 태양 상수 1,361 W/m²를 4로 나누고 30%를 빼면 지구는 약 238 W/m²를 흡수한다.
- 흡수한 만큼 내보내는 복사 평형 온도는 약 255 K(-18 °C)로, 실제 평균 15 °C보다 33 °C 낮다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 지구의 복사 평형 온도를 계산할 때 태양 상수를 4로 나누는 까닭으로 옳은 것은?
 ① 햇빛의 4분의 3이 반사되기 때문이다.
 ② 햇빛을 가로막는 원판 넓이가 공 겉면 넓이의 4분의 1이기 때문이다.
 ③ 지구가 하루에 네 번 자전하기 때문이다.
 ④ 태양과 지구 사이 거리가 4배이기 때문이다.
 ⑤ 적외선의 에너지가 햇빛의 4분의 1이기 때문이다.
2. 흰 종이와 검은 종으로 감싼 두 컵을 햇볕에 두면 검은 컵의 물이 더 따뜻해진다. 그 까닭을 반사율과 흡수로 설명하시오.

과학의 최전선 지구에 쌓이는 에너지를 얼마나 정확히 잴까

여기까지 밝혀졌다 — 지구는 흡수하는 햇빛보다 약간 적은 적외선을 내보낸다. 들어오는 에너지의 약 0.3%인 이 차이가 지구 에너지 불균형이다⁸. 1971~2018년 쌓인 열의 약 89%가 바다로 들어갔고, 나머지는 땅을 데우고 얼음을 녹이고 대기를 데웠다⁹. **아직 모른다** — 불균형은 위성이 재는 들어오고 나가는 두 큰 흐름의 작은 차이라서, 위성만으로 그 절대값을 정하기는 어렵다. 그래서 바닷속 열 증가로 기준을 맞춘다^{7,9}. 이렇게 맞춘 위성 자료와 바다 관측은 2005~2019년 불균형이 뚜렷이 커졌음을 함께 보였지만, 그 추세에는 자연 변동도 섞여 있다⁸. **가설과 연구** — 추세의 주된 원인은 구름과 바다 얼음이 줄어 햇빛 흡수가 늘고, 미량 기체와 수증기가 늘어 나가는 적외선이 줄어든 것으로 분석된다⁸. 연구자들은 더 긴 위성 기록과 수천 개의 바다 관측 뜰개로 이 불균형을 계속 재고 있다.

이 장의 출처

1. Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: An introductory survey (2nd ed.). Academic Press.
2. Stephens, G. L., O'Brien, D., Webster, P. J., Pilewski, P., Kato, S., & Li, J. (2015). The albedo of Earth. Reviews of Geophysics, 53(1), 141–163. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
3. Lindsey, R. (2009). Climate and Earth's energy budget. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
4. Boltzmann, L. (1884). Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. Annalen der Physik, 258(6), 291–294. <https://doi.org/10.1002/andp.18842580616>
5. Kopp, G., & Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance: FRONTIER. Geophysical Research Letters, 38(1), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

6. Kiehl, J. T., & Trenberth, K. E. (1997). Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2)
7. Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311–324. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
8. Loeb, N. G., Johnson, G. C., Thorsen, T. J., Lyman, J. M., Rose, F. G., & Kato, S. (2021). Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate. *Geophysical Research Letters*, 48(13), e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>
9. von Schuckmann, K., Cheng, L., Palmer, M. D., Hansen, J., Tassone, C., Aich, V., Adusumilli, S., Beltrami, H., Boyer, T., Cuesta-Valero, F. J., Desbruyères, D., Domingues, C., García-García, A., Gentile, P., Gilson, J., Gorfer, M., Haimberger, L., Ishii, M., Johnson, G. C., . . . Wijffels, S. E. (2020). Heat stored in the Earth system: where does the energy go?. *Earth System Science Data*, 12(3), 2013–2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>

온실 효과 — 분자가 떠는 이유

출발점 분자의 모양·극성 앞 권 · 에너지 준위·방출·흡수 앞 권 · 복사 평형·에너지 수지 27장

새 개념 온실 효과

이어짐 CO₂·기온 기록 40장

기본개념 이 장의 개념 7개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

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

1	적외선 온도계	물체에서 오는 적외선의 세기로 온도를 읽는 기구.
2	전하 치우침	분자 안에서 + 전하와 - 전하의 중심이 서로 어긋난 상태.
3	온실 기체	떨 때 전하 치우침이 바뀌어 적외선을 흡수하고 다시 내놓는 기체.
4	흡수 띠	기체가 적외선을 강하게 흡수하는 파장의 범위.
5	대기의 창	온실 기체가 거의 흡수하지 않아 지표의 적외선이 우주로 곧장 나가는 파장대.
6	온실 효과	온실 기체가 땅의 적외선을 흡수했다가 일부를 되돌려 땅을 더 따뜻하게 하는 현상.
7	기후 민감도	대기 CO ₂ 가 두 배가 되어 새 평형에 이를 때 오르는 기온.

같은 토요일 오후, 과학방. 옥상에서 내려온 네 사람 앞에 윤 교수가 권총처럼 생긴 적외선 온도계를 내밀었다. 하린이 창밖 마당의 돌담을 겨누자 32 °C가 떴고, 맑은 하늘을 겨누자 숫자가 영하로 뚝 떨어졌다.

윤 교수 오전에 계산한 지구의 복사 평형 온도가 몇 도였지?

태오 -18 °C요. 그런데 실제 평균은 15 °C라서 33 °C나 차이가 났어요.

윤 교수 그 33 °C의 비밀을 오늘 풀어 보자. 원자에서 시작해 보자꾸나. 공기 분자 가운데 누가 지구의 적외선을 붙잡을까?

미숙 방금 하늘을 겨누니 영하가 나왔는데, 하늘에서도 적외선이 내려오긴 하나 봐요?

윤 교수 좋은 질문입니다. 이 온도계는 들어오는 적외선의 세기로 온도를 읽지요. 하늘에서도 적외선이 내려온다는 뜻이에요. 그 적외선을 내는 것이 누구인지가 오늘의 주인공입니다.

틴들의 관 — 기체마다 다른 흡수

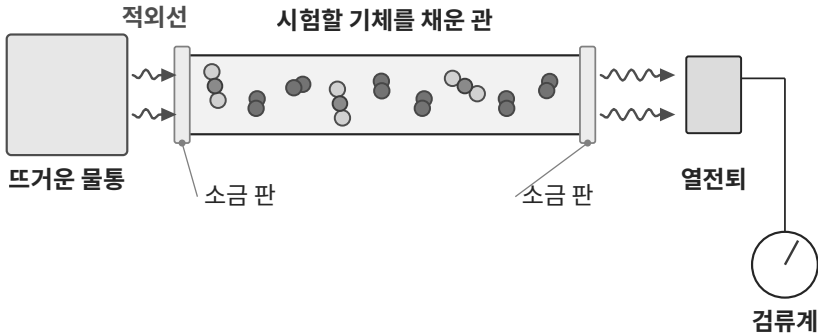
윤 교수 1859년 영국의 틴들은 긴 관의 양 끝을 적외선이 잘 지나는 소금 판으로 막았어. 한쪽에는 뜨거운 물통을 두고, 다른 쪽에는 들어오는 열을 재는 열전퇴를 두었지. 관에 여러 기체를 채워 가며 열이 얼마나 지나오는지 잰단다¹. 그림 28-1이 그 장치야.

윤 교수 산소·질소·마른 공기는 적외선을 거의 그대로 통과시켰어. 그런데 수증기와 이산화 탄소, 석탄 가스는 적외선을 강하게 흡수했지. 1861년 그는 더 많은 기체로 측정을 넓혀 이 결과를 정리해 발표했단다^{2,3}.

하린 그러니까 공기의 99%인 질소와 산소는 빼고, 아주 적은 기체들이 열을 붙잡는다는 거죠?

윤 교수 정확해. 이제 까닭을 원자에서 찾아보자.

흡수하는 기체일수록
열전퇴에 닿는 적외선이 줄어든다



[그림 28-1] 틴들의 실험 장치 뜨거운 물통에서 나온 적외선이 기체를 채운 관을 지나 열전퇴에 닿는다. 기체가 적외선을 흡수할수록 검류계 바늘이 덜 움직인다(모식도)

분자가 떠는 이유

윤 교수 화학 편 24장에서 분자는 원자들이 공유 결합으로 이어진 것이라고 배웠지. 그 결합은 용수철처럼 늘었다 줄었다 하며 늘 떨고 있단다. 물리 편 상권 27장에서는 원자가 정해진 에너지 준위를 가져서, 준위 차이에 꼭 맞는 광자만 흡수한다고 했어. 분자의 떨림에도 이런 준위가 있지. 분자의 떨림 준위 차이는 마침 적외선 광자의 에너지와 비슷하단다.

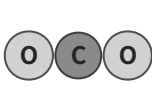
하린 26장에서는 자외선 광자가 O_2 의 결합을 끊었잖아요. 적외선도 결합을 끊어요?

윤 교수 좋은 비교다. 파장 10 μm 인 적외선 광자의 에너지는 240 nm 자외선 광자의 약 40분의 1밖에 안 돼. 결합을 끊기에는 턱없이 모자라고, 용수철처럼 이어진 원자들을 조금 더 세게 떨게 할 뿐이지. 자외선은 결합을 끊고, 적외선은 결합을 흔든다고 기억하렴.

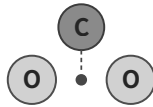
미숙 끊는 빛과 흔드는 빛이군요.

CO₂가 굽혀 떠다

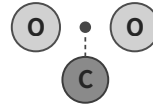
● 두 산소의 가운데(- 쪽)



치우침 0



치우침 ↓



치우침 ↑

→ 치우침이 생겼다 없어졌다 → 적외선 흡수

N₂가 늘었다 줄었다 떠다



치우침 0



치우침 0



치우침 0

→ 언제나 치우침 0 → 적외선 흡수 없음

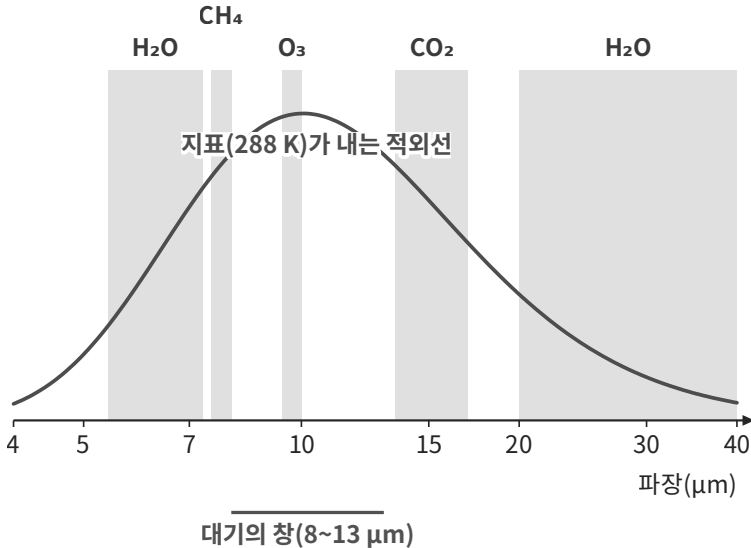
[그림 28-2] 분자의 떨림과 전하의 치우침 CO₂가 굽혀 떨면 가운데 탄소(+ 쪽)와 양쪽 산소(- 쪽)의 중심이 어긋나 전하의 치우침이 생겼다 없어졌다 한다. N₂는 같은 원자 둘이라 늘어나고 줄어도 치우침이 생기지 않는다(모식도)

윤 교수 그런데 조건이 하나 더 있어. 떨 때 분자 안의 전하 치우침이 바뀌어야 전자기파인 빛과 주고받을 수 있지. 그림 28-2를 보렴. CO₂는 탄소가 조금 +, 산소가 조금 -야. 굽혀 떨면 +와 -의 중심이 어긋나서 적외선을 흡수한단다. N₂와 O₂는 똑같은 원자 둘이라 아무리 늘어나고 줄어도 치우침이 생기지 않아. 그래서 적외선을 거의 흡수하지 않지⁴.

태오 그럼 아르곤은요? 원자 하나라서 떨 짝도 없겠네요.

윤 교수 그렇지. 이렇게 떨 때 전하 치우침이 바뀌어 적외선을 흡수하고 다시 내놓는 기체를 **온실 기체**라고 해. 수증기 H₂O, 이산화 탄소 CO₂, 메테인 CH₄, 오존 O₃가 대표적이란다. CO₂는 파장 약 15 μm의 적외선을 특히 잘 흡수하는데, 지구가 가장 세게 내는 10 μm 근처와 가깝지⁴. 그림 28-3처럼 말이야.

← 짧은 파장



[그림 28-3] 지구가 내는 적외선과 온실 기체의 흡수 띠 수증기· CO_2 ·오존·메테인이 흡수하는 파장에서는 지표의 적외선이 우주로 곧장 나가지 못한다. 8~13 μm 근처는 흡수가 적은 대기의 창이다. 짧은 파장이 왼쪽이다(288 K 흑체 곡선 계산, 흡수 띠는 모식)

온실 효과와 아레니우스의 계산

윤 교수 온실 기체는 땅이 내는 적외선을 흡수했다가 사방으로 다시 내놓는단다. 그 가운데 절반쯤은 다시 땅으로 내려오지. 방금 하늘을 겨눈 온도계가 읽은 것이 바로 이 적외선이야. 땅은 햇빛에 더해 하늘에서 내려오는 적외선까지 받으니 -18°C 보다 따뜻해져 15°C 가 된단다. 이것이 **온실 효과**야⁴.

미숙 겨울에 이불을 덮으면 몸의 열이 덜 빠져나가 따뜻한 것과 비슷하네요.

하린 그런데 아까 맑은 하늘을 겨누니 영하가 나온 건 왜예요? 하늘에서 적외선이 내려온다면서요.

윤 교수 맑은 날에는 대기의 창, 곧 온실 기체가 흡수하지 않는 파장으로 땅의 적외선이 우주까지 곧장 빠져나가거든. 하늘에서 내려오는 적외선도 높고 차가운 공기에서 오니 약하지. 구름이 끼면 물방울이 적외선을 붙잡아 되돌려 보내서 숫자가 크게 올라간단다. 구름 낀 겨울밤이 맑은 밤보다 덜 추운 까닭이야⁴.

미숙 구름이 겨울밤에 이불 노릇을 하는 거네요. 그럼 수증기, 구름, 이산화탄소 가운데 어느 이불이 제일 두꺼워요?

윤 교수 좋은 비유입니다. 오늘날 온실 효과는 수증기가 약 절반, 구름이 약 4분의 1, CO₂가 약 5분의 1을 맡고 있지요⁵. 그런데 수증기는 기온이 내려가면 비와 눈이 되어 빠져나갑니다. 그래서 응결하지 않는 CO₂가 기온을 정하는 조절 손잡이 노릇을 하고, 수증기는 그것을 따라 늘고 줄지요⁶.

윤 교수 1896년 스웨덴의 아레니우스는 CO₂가 흡수하는 적외선의 양으로 땅의 온도를 손으로 계산했다. CO₂가 줄면 빙하기처럼 식고, 늘면 따뜻해진다는 결과였지⁷. 그는 CO₂가 두 배가 되면 기온이 약 5~6 °C 오른다고 셈했어³.

태오 1896년에 컴퓨터도 없어요? 지금 값하고 맞아요?

윤 교수 1967년 마나베와 웨더러드는 복사와 대류를 함께 넣은 모형으로 CO₂가 두 배일 때 약 2 °C 오른다는 답을 냈어⁸. 마나베는 이 일로 2021년 노벨 물리학상을 받았단다⁹. 관측도 뒤따랐지. 2001년에는 위성이 켜 지구의 적외선 스펙트럼에서 CO₂ 흡수 띠로 나가는 빛이 1970년보다 줄어든 것이 확인되었고¹⁰, 2015년에는 땅으로 내려오는 CO₂의 적외선이 10년 동안 늘어난 것을 직접 재었어¹¹.

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 지구과학편 1

구름은 왜 떨어지지 않을까

공기와 대기의 층, 햇빛과 온실 효과에서 구름과 비, 바람과 대기 대순환, 기단·전선·태풍과 바다까지 날씨의 원리를 풀어 갑니다.

통합과학 8권 한눈에 보기



1 화학편 1
원자·원소·별



2 화학편 2
결합과 물질



3 생명편 1
분자와 세포



4 생명편 2
유전과 진화



5 물리편 1
힘과 운동



6 물리편 2
전하와 전기력



7 지구과학편 1 · 이 책
공기·물·날씨



8 지구과학편 2
원소·암석·지구

과학과영성출판사

이광조 지음
값 21,000원

값 21000 원
53450



9 791123 065328
ISBN 979-11-23065-32-8

이어서 읽으시려면

07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까 — 전체 442쪽

ssbook.kr/book/tonghap-07

판매가 **12,600원** (POD 정가 21,000원)

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

발간 도서 목록

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

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

인삼 (6)



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



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



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



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



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



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

오토파지 (2)



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



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

식물성 저탄고지 (11)



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

단식 (1)



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

생물리학 (4)



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



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



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



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

독립영양인간 (2)



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



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

중고등학교 교재 (30)



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



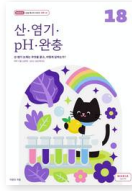
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 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 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