



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다

원자에서 암석 · 판 · 지구의 역사까지

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.

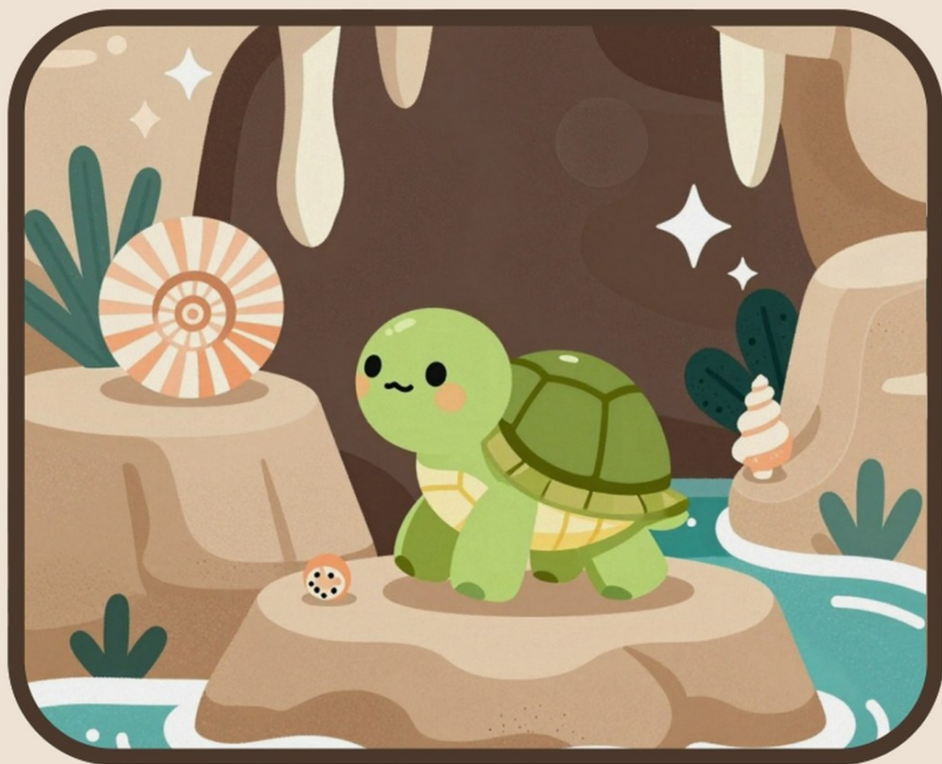
ssbook.kr/book/tonghap-08

POD 정가 20,000원 → **12,000원** (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

단양의 돌은 바다였다



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

ATOMS · MINERALS · ROCKS · PLATES ·
QUAKES · DEEP TIME

단양의 돌은 바다였다

문제로 풀어 가는 통합과학 지구과학 이야기 1

원자에서 암석·판·지구의 역사까지 —

통합과학 시리즈 제4권 지구과학 편, 단양 돌집 과학방의 네 번째 해 (봄~여름)

이광조 박사

판본 v6 · 2026-10-02

단양의 돌은 바다였다

문제로 풀어 가는 통합과학 지구과학 이야기 1

차례

머리말 — 돌 하나에서 시작하는 지구	6
일러두기 — 이 책의 짜임	8

제1부 지구를 이루는 원자

1장 네 번째 봄의 첫 토요일 — 지구과학은 무엇을 보는가	11
2장 지구는 무엇으로 만들어졌나 — 원소의 존재비	23
3장 규소와 산소의 사면체 — 지각의 뼈대	33
4장 광물 — 원자 배열이 겉모습을 정한다	43
제1부 단위 마무리 — 수능형 문제	60

제2부 암석과 암석의 순환

5장 마그마에서 굳은 돌 — 화성암	73
6장 물과 공기가 돌을 부순다 — 풍화와 침식	85
7장 쌓이고 굳은 돌 — 퇴적암	96
8장 누르고 데운 돌 — 변성암	107
9장 돌은 돌고 돈다 — 암석의 순환과 에너지	117
제2부 단위 마무리 — 수능형 문제	129

제3부 지구의 속

10장 지진파로 지구 속을 본다 — 떨림이 가져온 편지	141
11장 지각·맨틀·핵 — 지구의 층	152
12장 지구 속의 열 — 원자핵이 데우는 행성	167
13장 암석 속의 나침반 — 지구 자기장과 고지자기	182
제3부 단위 마무리 — 수능형 문제	194

제4부 움직이는 판

14장 대륙은 움직인다 — 베게너의 대륙 이동	206
15장 바다 밑의 지도 — 해저 확장	221
16장 판 구조론 — 판과 판 경계	235
17장 땅이 흔들리는 까닭 — 지진	246
18장 땅속의 불 — 화산은 왜 터지고, 왜 흐르나	260
19장 한반도의 땅은 어떻게 만들어졌나 — 단양의 돌은 바다였다	271

제5부 지구의 역사

20장 지층이 들려주는 시간 — 스테노와 허턴이 읽은 순서	295
21장 원자 시계 — 돌의 나이를 숫자로 재다	309
22장 화석이 들려주는 생명의 역사 — 영월의 삼엽충과 지질 시대	339
23장 대멸종 — 지구 환경이 크게 바뀐 날들	354
24장 땅속의 자원 — 원자가 모인 곳, 햇빛이 잠든 곳	365
제5부 단위 마무리 — 수능형 문제	377

부록

부록 A 용어 풀이	389
부록 B 교과 연결표	394
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	396
부록 D 지구과학 기본 수치와 단위	404

머리말 — 둘 하나에서 시작하는 지구

지구과학 교과서를 펴면 지구의 층과 판의 경계, 지질 시대표가 먼저 나온다. 그런데 “단양 강가의 이 석회암은 어떻게 여기 있을까?”, “지구 속은 볼 수 없는데 어떻게 알까?”를 끝까지 물어 들어가면 결국 한곳에 닿는다. **원자**다. 지구도 원자로 되어 있고, 그 원자는 별 속에서 태어났다. 광물의 모양도, 화산의 성질도, 둘의 나이도 원자가 어떻게 놓이고 어떻게 변하는지에서 나온다.

그래서 이 책은 순서를 바꾸었다. 교과서 목차를 참고하되, **앞 장의 개념에서 뒤 장의 개념이 자연스럽게 나오도록** 이어 붙였다. 상권은 지구를 이루는 원소와 규소·산소 사면체, 광물에서 출발한다(제1부). 그 광물이 모인 암석이 마그마에서, 퇴적과 변성으로 만들어지고 돌고 도는 길을 본 다음(제2부), 지진파와 열, 자기장으로 보이지 않는 지구 속을 읽는다(제3부). 그 지식으로 대륙 이동에서 판 구조론까지, 지진과 화산이 왜 판의 경계에 모이는지를 실제 관측 자료로 확인하고(제4부), 마지막으로 지층과 화석, 방사성 동위 원소로 돌에 적힌 지구의 역사를 숫자로 읽는다(제5부).

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

장마다 **〈과학의 최전선〉** 상자에는 과학이 아직 밝히지 못한 것을 적었고, 21장의 **〈끝까지 물기〉**에서는 학생들이 “시간은 무엇으로 재고, 시간이란 무엇인가?”를 끝까지 묻는다. 과학이 아는 데까지 정직하게 답하고, 그 끝에서 아직 모른다고 말하는 것이 과학을 지키는 길이라고 믿는다.

지도와 그래프는 되도록 실제 관측 자료로 그렸다. 해안선은 Natural Earth, 판 경계는 Bird(2003), 지진은 미국 지질조사국(USGS)의 규모 6 이상 기록, 화산은 미국 해양대기청(NOAA)의 자료를 썼다. 과학자들의 삶도 한두 쪽씩 담았다.

이 책의 무대는 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’이다. 화학·생명·물리 편에서 세 해를 함께한 하린·태오 남매와 두부집 사장 미숙 이모가, 올해는 은퇴한

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

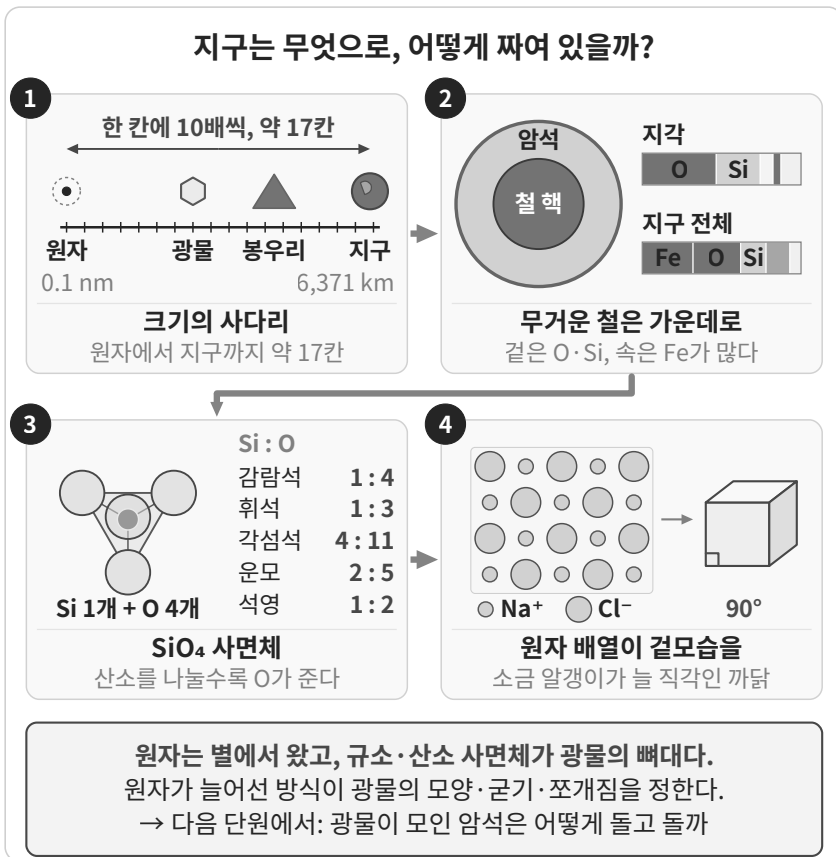
과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔다. 모든 논문의 DOI는 CrossRef에서 확인했다. 그림은 모두 좌표를 계산해 직접 그렸으며, 방향과 수치는 손으로 그리지 않고 계산으로 확인했다.

2026년 가을, 이광조

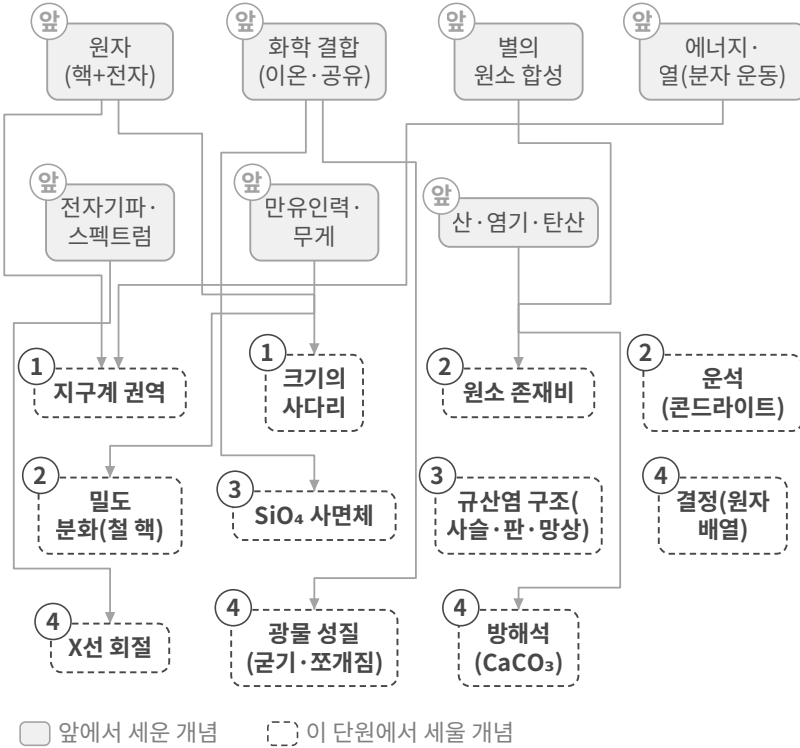
일러두기 — 이 책의 짜임

- **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.

지구를 이루는 원자



제1부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



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

01

네 번째 봄의 첫 토요일 — 지구과학은 무엇을 보는가

출발점 원자(핵+전자) 앞 권 · 에너지·열(분자 운동) 앞 권

새 개념 지구계 권역 · 크기의 사다리

이어짐 원소 존재비 2장 · 대륙 이동 14장 · 대기 조성 25장 · 연주 시차 46장

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	크기의 사다리	원자에서 지구까지 크기를 한 칸에 10배씩 늘어놓은 눈금.
2	지구계	지권·기권·수권·생물권과 외권이 물질과 에너지를 주고받는 하나의 체계.
3	지권	암석과 흙, 지구 속을 아우르는 권역.
4	기권	지구를 둘러싼 공기층.
5	수권	바다·강·호수·지하수·빙하 같은 지구의 물 전체.
6	생물권	지구에 사는 모든 생물과 그들이 사는 곳.
7	외권	기권 바깥의 우주 공간.
8	되먹임	한 변화의 결과가 처음 변화를 키우거나 줄이는 일.

3월 첫 토요일 아침, 충북 단양 도담삼봉. 하늘은 맑지만 남한강 바람이 아직 차다. 강둑 풀밭에는 밤새 내린 서리가 하얗게 남아 있고, 강 한가운데 세 봉우리가 물 위로 솟아 있다.

하린이 강둑 난간에 기대어 세 봉우리를 휴대 전화로 찍었다. ‘소백두부’의 미숙은 보온병에 담아 온 따뜻한 콩물을 종이컵에 따라 돌렸고, 청주에서 첫차를 타고 온 태오는 새로 산 야외 조사 수첩을 펼쳤다. 지난겨울, 화학 편의 석 교수와 물리 편의 차 교수는 “이제 땅과 하늘 차례”라며 세 사람에게 한 분을 소개해 두었다. 허리춤에 지질 망치와 돋보기를 차고, 목에 휴대용 위치 측정기를 건 노신사가 강둑을 따라 천천히 걸어왔다.

윤 교수 반갑구나. 윤해진이란다. 한국지질자원연구원에서 오래 돌과 퇴적층을 들여다보다가, 은퇴하고 고향 단양으로 돌아왔지. 올해 3월부터 12월까지 토요일마다 땅과 바다와 하늘을 함께 읽어 보자꾸나.

하린 선생님도 윤 씨네요! 저희도 윤 씨예요.

윤 교수 그렇구나. 성만 같고 친척은 아니란다. 그래도 한 해 같이 돌을 두드리다 보면 집안 식구처럼 될지도 모르지.

미숙 저는 두부집 하는 미숙이에요. 친정이 영월이라 어릴 때 냇가에서 벌레 모양이 새겨진 돌을 주우며 놀았어요.

윤 교수 반갑습니다. 영월 냇가라면 그 돌이 무엇인지 짐작이 가는군요. 그 이야기는 여름에 영월에 가서 직접 확인해 보지요.

태오 저는 태오예요. 올해 청주에 있는 대학의 지구환경과학부에 들어갔어요.

하린 하린이예요. 고2가 되어 지구과학 I 을 골랐는데, 고1 통합과학의 지구과학부터 제대로 다시 잡고 싶어요.

윤 교수 좋아. 그럼 첫 질문이다. 저 봉우리는 무엇으로 되어 있을까?

태오 화산에서 나온 용암이 굳은 바위 아니예요? 저렇게 뾰족하게 솟았으니까요.

윤 교수 그럴듯하구나. 그런데 도담삼봉은 **석회암** 봉우리란다. 4억 년도 더 전에 얇은 바다 밑에 쌓인 층이 굳은 돌이라고 밝혀져 있지¹. 돌은 기억한다. 올해 우리는 돌이 기억하는 이야기를 읽는 법을 배울 거란다.

하린 바다요? 단양은 바다에서 한참 먼 내륙인데요.

윤 교수 그 수수께끼가 상권의 제목 『단양의 돌은 바다였다』란다. 바다 밑의 돌이 어떻게 강 한가운데 산처럼 섰는지는 7장과 19장에서 자세히 풀어 보자꾸나.

원자에서 시작해 보자

윤 교수 먼저 앞 권에서 배운 것을 떠올려 보자. 하린이는 작년에 무엇을 배웠지?

하린 물리 편 상권 2장에서 원자는 가운데 원자핵과 돌레의 전자로 되어 있다고 배웠어요. 화학 편에서는 원자가 전자를 잃거나 얻어 이온이 되고, 이온과 원자가 결합해 물질을 만든다고 했어요.

윤 교수 그래. 지구과학도 바로 거기서 출발한단다. 원자에서 시작해 보자. 저 석회암은 칼슘·탄소·산소 원자가 CaCO_3 라는 짜임으로 모인 것이고, 강물은 H_2O 분자, 바람은 $\text{N}_2\cdot\text{O}_2$ 분자의 흐름이야. 땅도 물도 공기도 원자로 되어 있으니, 원자의 성질을 알면 지구의 성질이 풀린단다.

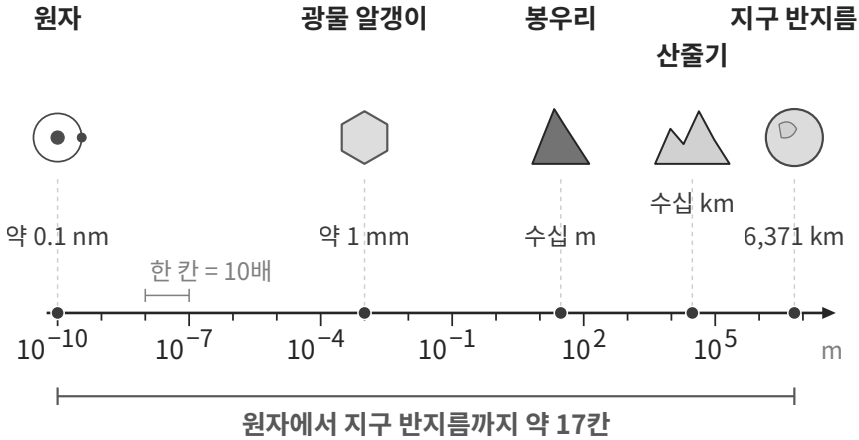
태오 그래도 원자는 너무 작고 지구는 너무 크잖아요. 둘을 어떻게 이어요?

윤 교수 그래서 **크기의 사다리**를 놓는단다. 원자 하나의 반지름은 대부분 0.1 nm, 곧 10^{-10} m 안팎이야². 돋보기로 보이는 광물 알갱이는 1 mm쯤, 저 봉우리는 수십 m, 소백산 줄기는 수십 km란다. 지구의 평균 반지름은 6,371 km지³. 그림 1-1처럼 사다리 한 칸을 10배로 잡으면, 원자에서 지구까지 약 17칸을 올라가야 해.

하린 그러니까 지구과학은 이 사다리 전체를 오르내리는 과학이라는 거죠?

윤 교수 바로 그거야. 광물은 원자가 규칙적으로 늘어선 것이고, 암석은 광물 알갱이가 모인 것이며, 산은 암석이 쌓이고 밀려 올라간 것이란다. 아래 칸의 성질이 위 칸의 모습을 정하지. 그래서 이 책은 원자에서 광물, 암석, 지구의 속, 공기와 바다, 별의 순서로 올라간단다.

미숙 그런데 지구 반지름이 6,371 km라는 건 어떻게 잴대요? 줄자를 댈 수도 없잖아요.



[그림 1-1] 크기의 사다리 한 칸이 10배인 눈금 위에 원자(약 10^{-10} m), 광물 알갱이(약 1 mm), 봉우리(수십 m), 산줄기(수십 km), 지구 반지름(6,371 km)을 놓았다. 원자에서 지구까지 약 17칸이다

윤 교수 좋은 질문입니다. 약 2,200년 전 알렉산드리아의 에라토스테네스가 처음으로 그럴듯하게 잴지요. 하짓날 정오에 남쪽 시에네의 우물 바닥까지 해가 곧게 비칠 때, 알렉산드리아의 막대 그림자는 약 7.2° , 곧 원의 $1/50$ 만큼 기울었습니다. 그래서 두 도시 사이 거리의 50배가 지구 둘레라고 계산했지요⁴. 오늘날에는 정밀한 측량으로 평균 반지름 6,371 km를 씁니다³.

태오 그림자 각도 하나로 지구 크기를요? 시험엔 어떻게 나와요?

윤 교수 비례식 한 줄이면 된단다. $7.2^\circ : 360^\circ = \text{두 도시 사이 거리} : \text{지구 둘레}$. 한 조각의 길이로 원 전체를 아는 거야.

지구계 — 네 권역이 주고받는다

윤 교수 1972년 달로 가던 아폴로 17호 승무원들이 지구 전체를 한 장에 담은 사진을 찍었다⁵. 흰 구름과 파란 바다, 갈색 땅과 남극의 얼음이 한눈에 들어왔지. 그 무렵부터 과학자들은 땅·공기·바다·생물을 따로 보지 않고 서로 얹힌 하나의 계로 보기 시작했어. 이것을 **지구계**라고 한단다⁶.

하린 계라면 물리에서 에너지를 따질 때 쓰던 그 ‘계’요?

윤 교수 그래. 에너지와 물질을 주고받는 부분들의 묶음이지. 지구계는 크게 넷으로 나눈단다. 암석과 흙과 지구 속의 **지권**, 공기의 **기권**, 바다·강·얼음의 **수권**, 살아 있는 것들의 **생물권**이야. 여기에 지구 바깥 우주 공간인 **외권**을 더하지⁷.

미숙 그럼 여기 도담삼봉에 다 있네요. 봉우리는 지권, 강물은 수권, 바람은 기권, 물고기랑 저 소나무는 생물권이고요.

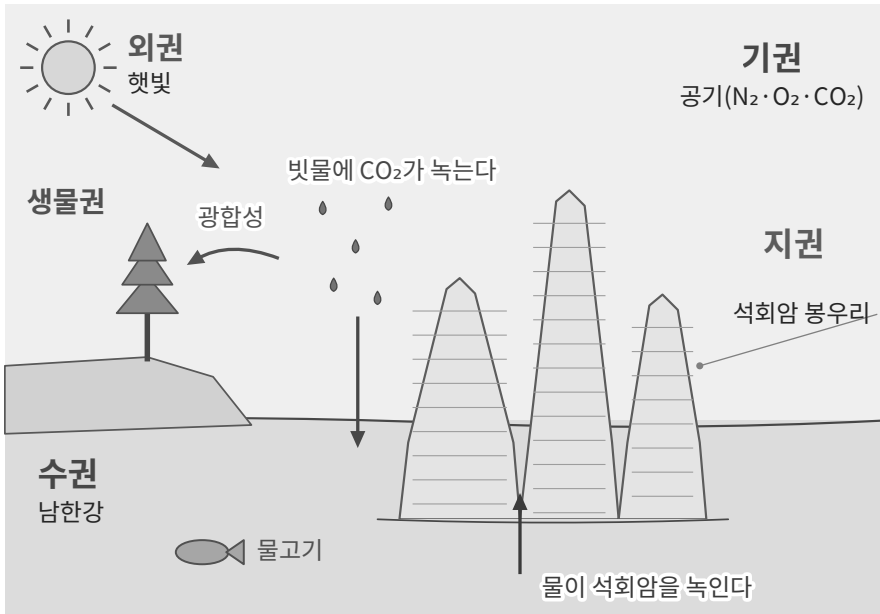
윤 교수 정확합니다. 중요한 것은 권역들이 서로 주고받는다라는 점이지요. 그림 1-2를 보세요. 공기의 이산화 탄소가 빗물에 녹아 약한 산이 되고, 그 물이 석회암을 아주 천천히 녹입니다. 기권과 수권과 지권이 함께 일하는 셈이지요. 이 일은 6장의 풍화에서 자세히 봅니다.

태오 생물권은 좀 약하지 않아요? 생물이 땅이나 공기를 바꾸진 못하잖아요.

윤 교수 그렇지 않단다. 공기 속 산소는 광합성하는 생물이 오랜 세월 만들어 낸 것이야⁷. 1974년 러브록과 마굴리스는 생물권이 대기의 조성을 조절한다는 가설까지 내놓았지⁸. 이런 생각들이 모여 1980년대에 지구를 하나의 계로 연구하는 지구계 과학이 자리 잡았단다⁶.

하린 그럼 이 모든 걸 움직이는 에너지는 어디서 와요?

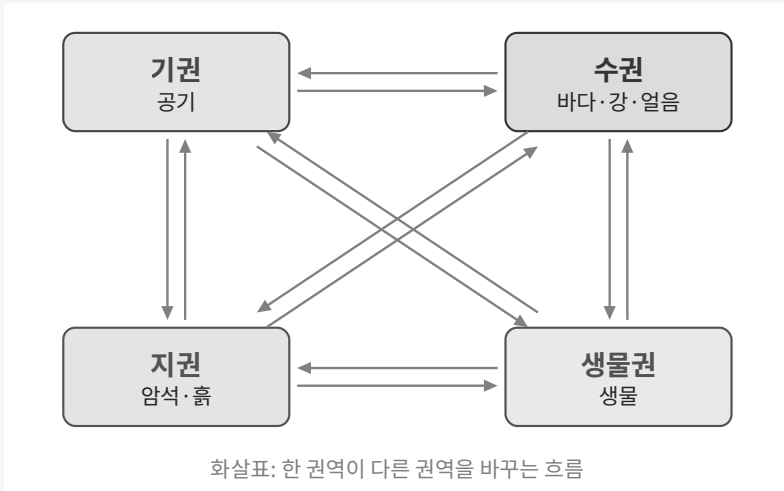
윤 교수 두 곳이란다. 하나는 외권의 태양에서 오는 빛이고, 또 하나는 지구 속의 열이지. 물리 편 하권에서 배운 대로 에너지는 모습을 바꿀 뿐 사라지지 않아. 햇빛은 바람과 비를, 지구 속 열은 화산과 지진을 움직인단다. 속의 열이 어디서 오는지는 12장에서 원자핵과 함께 자세히 볼 거야.



[그림 1-2] 도담삼봉에서 본 지구계 지권(석회암 봉우리)·기권(공기)·수권(남한강)·생물권(소나무·물고기)이 물질과 에너지를 주고받고, 외권의 태양에서 빛이 들어온다. 화살표는 흐름의 예다(모식도)

문제 1-1 어느 권역에서 어느 권역으로

그림 1-3은 지구계의 네 권역과 그 사이를 오가는 흐름을 화살표로 나타낸 것이다. 다음 가운데 ‘기권 → 수권’의 흐름에 해당하는 것은?



[그림 1-3] 문제 1-1의 그림 지구계의 네 권역(지권·기권·수권·생물권)과 그 사이를 오가는 화살표

- ① 남한강 물이 석회암 봉우리를 천천히 녹인다
- ② 소나무 뿌리가 바위틈을 벌린다
- ③ 강바람이 강물에 물결을 일으키고 수면을 식힌다
- ④ 화산 가스가 하늘로 퍼진다
- ⑤ 물고기가 물에 녹은 산소를 들이마신다

태오 ④요. 화산 가스가 하늘로 가니까 공기랑 관계있잖아요.

윤 교수 조건을 다시 읽어 보렴. 화살표는 어디서 출발해 어디로 가야 하지?

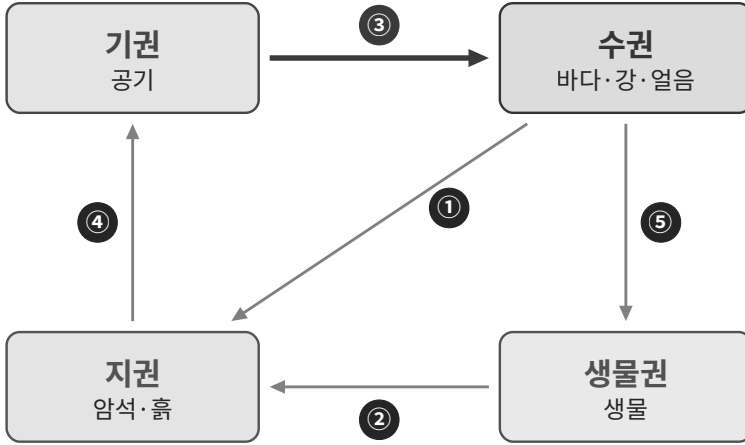
태오 기권에서 출발해 수권으로요. 아, 화산 가스는 땅속에서 나와 공기로 가니까 지권 → 기권이네요.

윤 교수 그래. 그럼 계획을 세우자. 보기마다 ‘무엇이 바꾸었나(출발)’와 ‘무엇이 바뀌었나(도착)’를 적어 보는 거야.

하린 ①은 물이 돌을 바꾸니 수권 → 지권이고, ②는 생물권 → 지권, ⑤는 수권 → 생물권이네요.

미숙 ③은 바람이 물을 흔들고 식히니까 기권 → 수권이네요. 김장 날 바람이 불면 배추 절인 소금물이 금세 차가워지는 것처럼요.

윤 교수 그림 1-4처럼 다섯 보기를 모두 화살표로 옮겨 보면 한눈에 보이지요. 정답은 ③입니다.



- ① 강물이 석회암을 녹인다: 수권 → 지권
- ② 뿌리가 바위틈을 벌린다: 생물권 → 지권
- ③ 바람이 물결을 일으키고 식힌다: 기권 → 수권
- ④ 화산 가스가 하늘로 퍼진다: 지권 → 기권
- ⑤ 물고기가 녹은 산소를 마신다: 수권 → 생물권

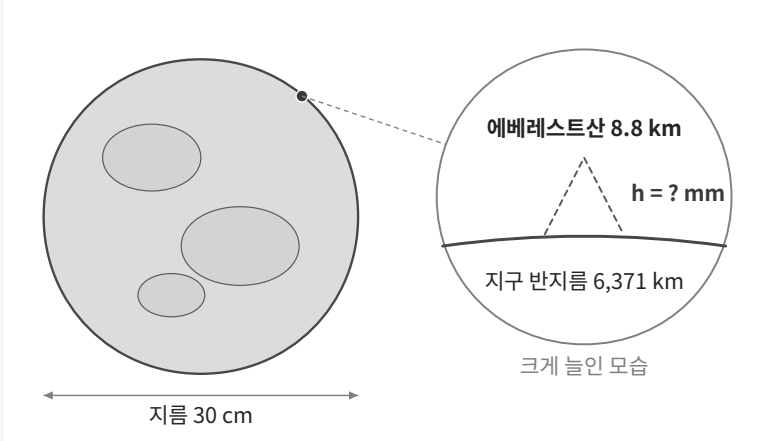
[그림 1-4] 풀이 그림 다섯 보기를 ‘출발 권역 → 도착 권역’ 화살표로 옮겼다. 기권에서 수권으로 가는 화살표는 ③ 하나뿐이다

하린 그러니까 권역 이름만 보지 말고, 무엇이 무엇을 바꾸었는지 방향을 따져야 한다는 거죠?

윤 교수 그래. 지구계 문제는 늘 흐름의 방향이 열쇠란다.

문제 1-2 지구본 위의 에베레스트산

지름 30 cm인 지구본을 만들려고 한다. 지구의 평균 반지름을 6,371 km, 에베레스트산의 높이를 약 8.8 km라 할 때, 그림 1-5의 지구본에서 에베레스트산은 몇 mm 높이로 솟아야 하는가? 종이 한 장의 두께(약 0.1 mm)와 비교하시오.



[그림 1-5] 문제 1-2의 그림 지름 30 cm 지구본과, 그 표면 한 곳을 크게 늘여 에베레스트산 자리를 표시한 모습. 산의 높이는 물음표로 남겼다

태오 지구본에 산맥이 울퉁불퉁 튀어나와 있던데요. 에베레스트면 1 cm쯤은 되지 않을까요?

윤 교수 느낌보다 계획이 먼저란다. 지구본의 반지름은 얼마지?

하린 지름이 30 cm니까 반지름은 15 cm예요.

윤 교수 지구본은 진짜 지구의 모든 길이를 같은 비율로 줄인 것이야. 그 비율부터 구해 보자꾸나.

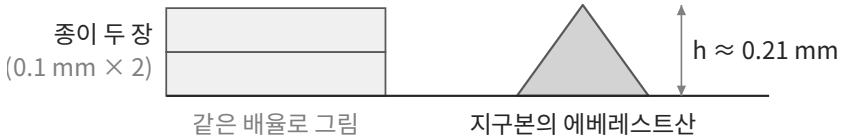
하린 6,371 km는 637,100,000 cm예요. 15 cm를 이걸로 나누면 약 4,250만분의 1이에요.

태오 그럼 8.8 km, 곧 880,000 cm를 4,250만으로 나누면... 약 0.021 cm, 0.21 mm네요! 1 cm는커녕 1 mm도 안 되네요.

윤 교수 그림 1-6처럼 비례식 한 줄로 써도 간단다. $15 \text{ cm} : 6,371 \text{ km} = h : 8.8 \text{ km}$. 모범 답은 약 0.2 mm, 종이 두 장 두께쯤이야.

$$15 \text{ cm} : 6,371 \text{ km} = h : 8.8 \text{ km}$$

$$h = 8.8 \times 15 \div 6,371 \text{ cm} \approx 0.021 \text{ cm} \approx 0.21 \text{ mm}$$



[그림 1-6] 풀이 그림 지구본 반지름 15 cm : 지구 반지름 6,371 km = 높이 h : 8.8 km. $h \approx 0.21$ mm로, 종이 약 두 장 두께다

미숙 어머, 가게에서 파는 지구본의 산은 엄청 부풀린 거네요.

윤교수 그렇습니다. 사다리의 위 칸에서 보면 아래 칸의 거대한 산도 굴뚝질의 오돌도돌함보다 알아지지요.

오늘의 정리

- 지구과학은 원자(약 0.1 nm)에서 지구(평균 반지름 6,371 km)까지, 한 칸이 10배인 크기의 사다리 약 17칸을 오르내리며 땅·물·공기·우주를 본다.
- 원자의 성질이 광물을, 광물이 암석을, 암석이 산과 땅의 모습을 정한다. 그래서 이 책은 원자에서 시작한다.
- 지구계는 지권·기권·수권·생물권과 외권으로 이루어지며, 권역들은 물질과 에너지를 주고받는다. 문제를 풀 때는 흐름의 방향(출발 → 도착)을 따진다.
- 지구계를 움직이는 에너지는 태양의 빛과 지구 속의 열에서 온다.
- 에라토스테네스는 그림자의 각도(원의 1/50)와 두 도시 사이 거리로 지구 둘레를 처음 계산했다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 다음을 크기가 작은 것부터 바르게 늘어놓은 것은?
 ① 지구 반지름 → 산줄기 → 봉우리 → 광물 알갱이 → 원자
 ② 원자 → 광물 알갱이 → 봉우리 → 산줄기 → 지구 반지름
 ③ 광물 알갱이 → 원자 → 봉우리 → 산줄기 → 지구 반지름
 ④ 원자 → 봉우리 → 광물 알갱이 → 산줄기 → 지구 반지름
 ⑤ 원자 → 광물 알갱이 → 산줄기 → 봉우리 → 지구 반지름
2. 두 도시가 남북으로 800 km 떨어져 있다. 같은 날 정오에 한 도시에서는 막대 그림자가 생기지 않았고, 다른 도시에서는 햇빛이 7.2° 기울어 들어왔다. 에라토스테네스의 방법으로 지구 둘레를 구하시오.

과학의 최전선 구름은 지구를 식힐까, 데울까

여기까지 밝혀졌다 — 지구계에서는 한 권역의 변화가 다른 권역을 바꾸고, 그 결과가 처음 변화를 키우거나 줄이는 되먹임이 일어난다. 구름은 그 대표다. 기후 모형과 이론, 관측은 대체로 같은 그림을 보여 준다. 따뜻해지면 높은 구름은 더 높이 올라가고 열대의 낮은 구름은 줄어들며, 고위도의 낮은 구름은 두꺼워진다⁹. **아직 모른다** — 그러나 구름 되먹임은 이산화 탄소에 대한 기후의 반응에서 단연 가장 큰 불확실성의 원천이다⁹. 최신 기후 모형 27개가 계산한 기후 민감도는 1.8~5.6 K로 크게 벌어졌고, 그 주된 까닭은 중위도 낮은 구름이 얼마나 줄어드느냐였다¹⁰. **가설과 연구** — 구름은 물방울 하나에서 수천 km의 공기 흐름까지 크기의 사다리 여러 칸에 걸쳐 있다. 그래서 구름과 대기 순환이 어떻게 서로 얹히는지 이해하는 것이 기후 과학의 핵심 과제로 꼽힌다¹¹.

이 장의 출처

1. 국가유산청. (2026). 명승 단양 도담삼봉(丹陽 島潭 三峰). 국가유산포털. <https://www.heritage.go.kr/heri/cul/culSelectDetail.do?VdkVgwKey=15,00440000,33>
2. Slater, J. C. (1964). Atomic Radii in Crystals. The Journal of Chemical Physics, 41(10), 3199–3204. <https://doi.org/10.1063/1.1725697>
3. Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. Journal of Geodesy, 74(1), 128–133. <https://doi.org/10.1007/s001900050278>
4. American Physical Society. (2006). This month in physics history: June, ca. 240 B.C.: Eratosthenes measures the Earth. APS News, 15(6). <https://www.aps.org/publications/apsnews/200606/history.cfm>
5. NASA. (2007). Blue Marble – Image of the Earth from Apollo 17. <https://www.nasa.gov/image-article/blue-marble-image-of-earth-from-apollo-17/>

6. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Dube, O. P., Dutreuil, S., Lenton, T. M., & Lubchenco, J. (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1), 54–63. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0005-6>
7. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. G. (2020). *Earth: An introduction to physical geology* (13th ed.). Pearson.
8. LOVELOCK, J. E., & MARGULIS, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus*, 26(1-2), 2–10. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1974.tb01946.x>
9. Ceppi, P., Brient, F., Zelinka, M. D., & Hartmann, D. L. (2017). Cloud feedback mechanisms and their representation in global climate models. *WIREs Climate Change*, 8(4), e465. <https://doi.org/10.1002/wcc.465>
10. Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po - Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, 47(1), e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019gl085782>
11. Bony, S., Stevens, B., Frierson, D. M. W., Jakob, C., Kageyama, M., Pincus, R., Shepherd, T. G., Sherwood, S. C., Siebesma, A. P., Sobel, A. H., Watanabe, M., & Webb, M. J. (2015). Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 8(4), 261–268. <https://doi.org/10.1038/ngeo2398>

02

지구는 무엇으로 만들어졌나 — 원소의 존재비

출발점 별의 원소 합성 앞 권 · 만유인력·무게 앞 권 · 지구계 권역 1장

새 개념 원소 존재비 · 운석(콘드라이트) · 밀도 분화(철 핵)

이어짐 SiO_4 사면체 3장 · 지각·맨틀·핵 11장 · 지구의 나이 21장 · 성운설·태양계 탄생 42장 · 지구형·목성형 행성 44장

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	운석	하늘에서 지구로 떨어진 우주의 돌이나 쇳덩이.
2	원소 존재비	어떤 물체 속에 원소가 얼마나 들어 있는지 나타낸 비율.
3	콘드라이트	작은 구슬이 박힌 돌 운석으로, 태양계 초기 재료를 거의 그대로 간직한 것.
4	지각	지구의 가장 바깥을 덮은 얇은 암석 겹겹질.
5	평균 밀도	지구 질량을 부피로 나눈 값으로, 약 5.51 g/cm^3 .
6	핵	지구 한가운데에 철이 모여 이룬 무거운 부분.
7	밀도 분화	녹은 행성에서 무거운 철은 가운데로, 가벼운 물질은 바깥으로 갈라지는 일.
8	D/H 비	물의 수소 가운데 무거운 수소인 중수소가 섞인 비율.

3월 둘째 토요일 오후, 돌집 과학방. 아침부터 봄비가 내려 창밖 마당이 젖었다. 벽 한쪽을 차지한 광물 표본장 앞에 두꺼운 운석 도감이 펼쳐져 있다.

미숙이 우산을 털며 들어서자 윤 교수가 도감의 한 쪽을 가리켰다. 잘라 낸 단면에 좁쌀만 한 둥근 알갱이가 빼곡히 박힌 돌 사진이었다.

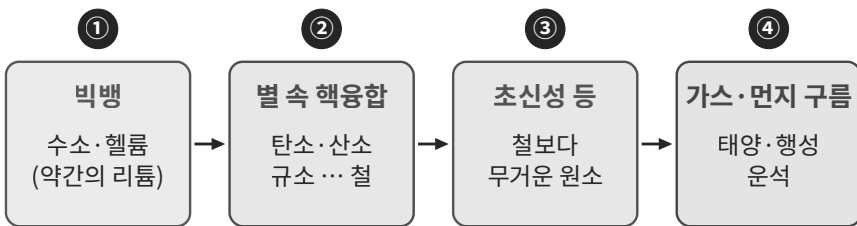
윤 교수 지난주에 크기의 사다리를 놓았지. 맨 아래 칸이 원자였고. 오늘은 그 원자들이 어디서 와서 지구가 되었는지 따라가 보자꾸나. 원자에서 시작해 보자.

별에서 온 원자들

윤 교수 하린아, 화학 편에서 원소가 어디서 만들어진다고 배웠지?

하린 화학 편 7장에서 빅뱅 때는 수소와 헬륨, 그리고 약간의 리튬만 생겼다고 배웠어요. 화학 편 10장에서는 별 속 핵융합이 탄소·산소부터 철까지 만들고, 화학 편 11장에서는 초신성이 철보다 무거운 원소를 흩뿌린다고 했고요.

윤 교수 잘 기억하는구나. 1957년 버비지 부부와 파울러, 호일이 수소·헬륨보다 무거운 원소 대부분이 별 속의 여러 핵반응으로 만들어진다는 이론을 한 편의 논문으로 정리했단다¹. 그림 2-1이 그 길이야. 별이 만든 원자들이 가스와 먼지 구름으로 흩어졌고, 그 구름에서 태양과 지구가 태어났지.



지구의 원자는 별이 만든 원자들이 모인 것이다

[그림 2-1] 지구 원자들이 걸어온 길 ① 빅뱅이 수소·헬륨을, ② 별 속 핵융합이 탄소·산소·규소·철을, ③ 초신성이 더 무거운 원소를 만들었다. ④ 이 원자들이 모인 가스·먼지 구름에서 태양과 행성, 운석이 생겼다(모식도)

태오 그럼 지구도 우주처럼 수소가 제일 많겠네요? 태양이 거의 수소잖아요.

윤 교수 그럴듯한 추론이구나. 태양에서는 정말 수소와 헬륨이 압도적이야. 태양 대기의 흡수선을 읽어 원소마다 얼마나 있는지를 재지. 그런데 원소마다 기체에서 고체로 굳는 온도가 다르단다. 철·마그네슘·규소·칼슘·알루미늄은 높은 온도에서도 고체 알갱이가 되지만, 수소·헬륨은 좀처럼 고체가 되지 않아². 태양 가까이 뜨거운 곳에서 자란 지구는 돌과 쇠가 되는 원소는 붙잡고, 가벼운 기체는 거의 놓쳤단다.

하린 그러니까 지구는 우주의 재료 가운데 굳기 쉬운 것만 골라 모은 거라는 거죠?

윤 교수 바로 그거야. 그래서 어떤 물체에 원소가 얼마나 들었는지, 곧 **원소 존재비**를 태양과 지구가 서로 다르게 가진단다.

운석 — 지구 재료의 기본

미숙 그런데 지구 속은 파 볼 수가 없잖아요. 지구 전체에 무엇이 얼마나 들었는지는 어떻게 알아요?

윤 교수 그때 이 사진의 돌이 도움이 됩니다. 하늘에서 떨어진 운석 가운데 좁쌀 같은 구슬이 박힌 것을 **콘드라이트**라고 하지요. 콘드라이트는 태양계가 생길 때의 재료를 거의 그대로 간직했습니다. 가장 원시적인 콘드라이트의 조성은 휘발성 원소만 빼면 태양 대기의 조성과 잘 맞아요².

태오 아, 그럼 콘드라이트가 지구를 만든 반죽의 기본이군요.

윤 교수 그렇단다. 맥도너와 선은 운석과, 땅 위로 올라온 깊은 곳의 암석을 함께 써서 지구 전체의 조성 모형을 세웠어³. 지구 전체 질량으로 보면 철이 약 32%, 산소 약 30%, 규소 약 16%, 마그네슘 약 15%란다⁴. 네 원소가 지구의 90% 남짓을 차지하지.

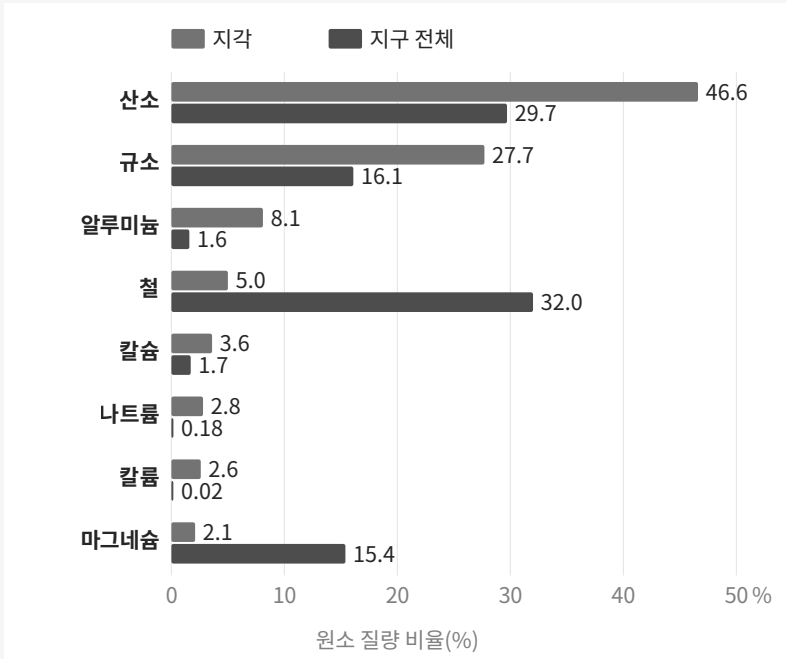
하린 그럼 우리가 밟고 있는 땅, 지구 겉껍질은요?

윤 교수 겉껍질인 **지각**은 직접 캐서 썰 수 있지. 1924년 클라크와 워싱턴은 수많은 암석의 분석값을 평균해 지각의 조성을 추정했단다⁵. 오늘날 교재의 값은 산소 46.6%, 규소 27.7%, 알루미늄 8.1%, 철 5.0%, 칼슘 3.6%, 나트륨 2.8%, 칼륨 2.6%, 마그네슘 2.1%야⁶. 이 여덟 원소가 지각 질량의 98% 남짓이지.

미숙 어머, 지구 전체엔 철이 제일 많으면서 땅에는 5%뿐이네요. 그 많은 철은 다 어디 갔대요?

문제 2-1 지각과 지구 전체의 원소

그림 2-2는 지각과 지구 전체에 든 주요 원소의 질량 비율(%)을 나타낸 것이다. 이 그림에 대한 설명으로 옳은 것은?



[그림 2-2] 문제 2-1의 그림 지각(위)과 지구 전체(아래)의 주요 원소 질량 비율(%). (자료: 지각은 Tarbuck 외 2020, 지구 전체는 McDonough 2003)

- ① 지각에서 가장 많은 원소는 규소다.
- ② 지구 전체에서 철의 비율은 지각에서보다 작다.
- ③ 지각에서 산소와 규소를 합하면 질량의 70%를 넘는다.
- ④ 마그네슘은 지구 전체보다 지각에서 비율이 더 크다.
- ⑤ 알루미늄은 지구 전체에서 네 번째로 많은 원소다.

태오 ①이요. 규소는 반도체도 만들고 모래에도 많잖아요. 지각은 규소가 제일 많은 거예요.

윤교수 느낌 말고 그림을 다시 읽어 보렴. 지각의 막대 가운데 가장 긴 것은 무엇이지?

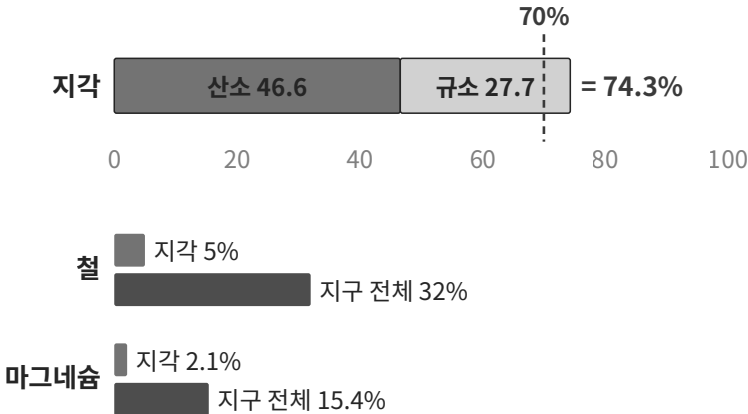
태오 산소네요, 46.6%. 규소는 27.7%로 두 번째고요. ①은 틀렸어요.

윤 교수 그래. 계획을 세우자. 보기마다 그림에서 해당 막대 두 개를 찾아 숫자로 견주는 거야.

하린 ②는 철이 지구 전체 32%, 지각 5.0%라 거꾸로예요. ④도 마그네슘이 지구 전체 15%, 지각 2.1%라 거꾸로고요.

미숙 ⑤는 지구 전체에서 철, 산소, 규소, 마그네슘 순이니까 네 번째는 마그네슘이지요.

윤 교수 남은 ③을 그림 2-3처럼 계산해 봅시다. $46.6 + 27.7 = 74.3\%$ 로 70%를 넘지요. 정답은 ③입니다.



[그림 2-3] 풀이 그림 지각의 산소(46.6%)와 규소(27.7%) 막대를 이어 붙이면 74.3%로 70% 선을 넘는다. 철과 마그네슘은 지구 전체 쪽이 훨씬 길다

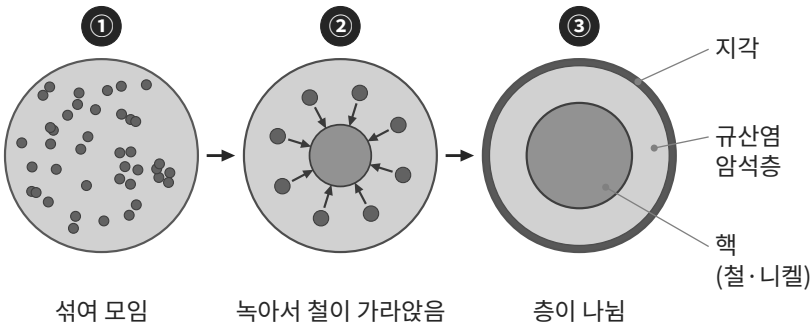
하린 지각은 산소와 규소가 네 개 중 세 개꼴이네요. 그 둘이 어떻게 붙어 있는지는 3장에서 배울 거죠?

무거운 철은 가운데로 — 밀도 분화

윤 교수 이제 미숙 씨의 물음, 사라진 철을 찾아봅시다. 1798년 캐번디시는 납 공 사이의 아주 약한 끌림을 재어 지구의 평균 밀도가 물의 약 5.5배임을 얻었지요⁷. 그런데 지표의 암석은 물의 2.7배쯤입니다⁶.

미숙 겉은 가벼운데 평균은 무거우면, 속에 아주 무거운 게 들어 있다는 말이네요. 두부 만들 때 콩물을 끓이면 무거운 찌꺼기는 솥 바닥에 가라앉고 거품은 위로 뜨는 것처럼요.

윤 교수 좋은 비유입니다. 갓 생긴 지구는 작은 천체들이 3,000만~4,000만 년에 걸쳐 모여 자랐고, 부딪칠 때 나온 열로 깊은 곳까지 녹은 바다가 되었다고 봅니다. 그 속에서 금속 철이 방울로 모여 가라앉아 철이 풍부한 핵을 이루었지요⁸.



[그림 2-4] 밀도 분화 ① 철과 암석 성분이 섞인 채 모인 어린 지구. ② 뜨겁게 녹은 층에서 무거운 철 방울이 가라앉는다. ③ 가운데에는 철·니켈 핵, 바깥에는 규산염 암석층, 맨 위에는 가벼운 지각이 남는다(모식도)

태오 철 원자가 산소나 규소 원자보다 무거워서 가라앉은 거예요?

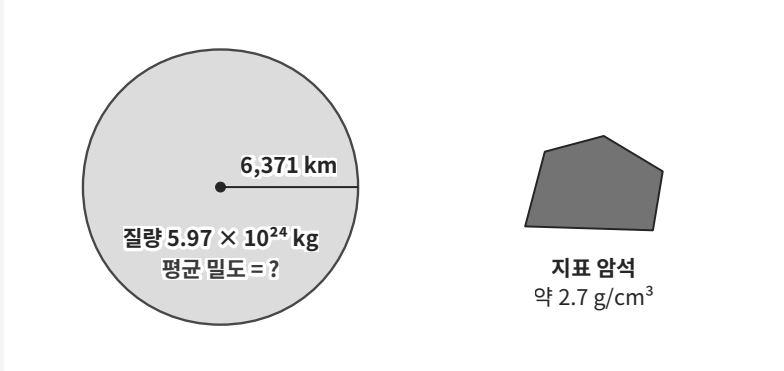
윤 교수 원자 하나만 봐도 철(원자량 56)은 규소(28)나 산소(16)보다 무겁단다. 게다가 금속 철은 원자가 촘촘히 채워져 밀도가 약 7.9 g/cm^3 나 되지만, 규소와 산소가 얼기설기 이어진 암석은 3 g/cm^3 안팎이야. 그림 2-4처럼 녹은 지구에서 무거운 것은 가운데로, 가벼운 것은 바깥으로 갈라졌지. 이것이 **밀도 분화**란다.

하린 그러니까 지각에 철이 적고 산소·규소·알루미늄이 많은 건, 가벼운 것들이 위로 떠올라서라는 거죠?

윤 교수 그래. 핵과 지각 사이의 두꺼운 암석층이 맨틀인데, 그 층들은 11장에서 지진파로 자세히 들여다볼 거야.

문제 2-2 지구의 평균 밀도

그림 2-5처럼 지구의 질량은 약 5.97×10^{24} kg, 평균 반지름은 6,371 km이다⁶. (1) 지구의 평균 밀도를 g/cm^3 단위로 구하시오(구의 부피 = $\frac{4}{3} \times \pi \times \text{반지름}^3$). (2) 지표 암석의 밀도가 약 2.7 g/cm^3 일 때, (1)의 결과로 지구 속에 대해 무엇을 알 수 있는지 쓰시오.



[그림 2-5] 문제 2-2의 그림 질량과 반지름이 주어진 지구와, 밀도 2.7 g/cm^3 인 지표 암석 한 조각

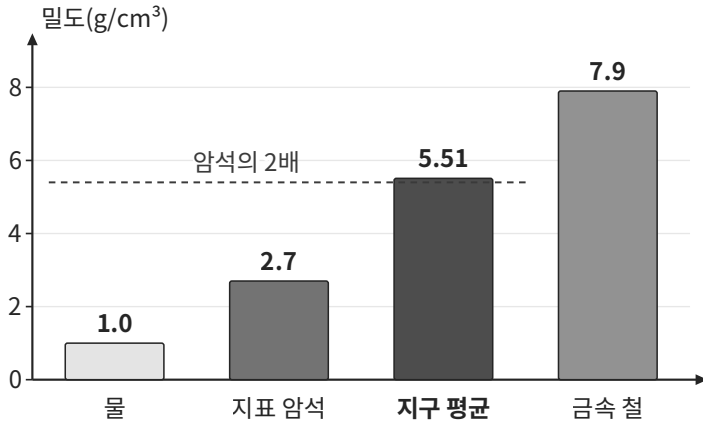
태오 질량 나누기 부피니까... 5.97×10^{24} 를 6,371로 나누면 되죠?

윤 교수 잠깐, 부피는 반지름이 아니라 반지름의 세제곱에 비례한단다. 그리고 단위부터 맞추자꾸나.

하린 반지름을 m로 바꾸면 6.371×10^6 m예요. 세제곱하면 약 $2.586 \times 10^{20} \text{ m}^3$ 이고, $\frac{4}{3} \times \pi$ 를 곱하면 부피는 약 $1.083 \times 10^{21} \text{ m}^3$ 예요.

태오 그럼 밀도는 $5.97 \times 10^{24} \div 1.083 \times 10^{21} \approx 5,510 \text{ kg/m}^3$. 1 g/cm^3 가 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 니까 5.51 g/cm^3 요!

윤 교수 캐번디시가 얻은 5.5배와 거의 같구나. 그림 2-6에 밀도를 나란히 놓아 보자.



[그림 2-6] 풀이 그림 물(1.0), 지표 암석(2.7), 지구 평균(5.51), 금속 철(7.9)의 밀도(g/cm^3) 막대. 평균이 겉 암석의 두 배를 넘으므로 속에는 훨씬 무거운 물질이 있어야 한다

미숙 평균이 겉의 두 배가 넘으니까, 속 어딘가는 5.51보다도 훨씬 무거워야 평균이 맞겠네요.

윤 교수 그렇습니다. 모범 답은 (1) 약 5.51 g/cm^3 , (2) 지구 속에는 지표 암석보다 훨씬 밀도가 큰 물질, 곧 철이 모인 핵이 있다는 것이지요.

하린 저울과 자로 잰 두 숫자만으로 지구 한가운데를 짐작하다니, 둘이 정말 기억하고 있네요.

오늘의 정리

- 수소·헬륨은 빅뱅에서, 탄소·산소부터 철까지는 별 속 핵융합에서, 더 무거운 원소는 초신성 등에서 만들어졌고, 지구는 그 원자들이 모인 구름에서 태어났다.
- 뜨거운 태양 가까이에서 자란 지구는 고체가 되기 쉬운 원소(철·산소·규소·마그네슘)를 모으고 가벼운 기체는 거의 놓쳤다.
- 콘드라이트 운석은 지구 재료의 견본이다. 지구 전체는 철 약 32%, 산소 약 30%, 규소 약 16%, 마그네슘 약 15%이다.
- 지각은 산소 46.6%, 규소 27.7%, 알루미늄 8.1%, 철 5.0% 순이다.
- 지구 평균 밀도(5.51 g/cm^3)는 지표 암석(2.7 g/cm^3)의 두 배가 넘는다. 녹은 어린 지구에서 무거운 철이 가운데로 가라앉은 밀도 분화 때문이다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 지각에 철이 지구 전체보다 훨씬 적은 까닭으로 가장 알맞은 것은?
 - ① 철은 별 속에서 만들어지지 않았기 때문이다.
 - ② 어린 지구가 녹았을 때 무거운 철이 가운데로 가라앉았기 때문이다.
 - ③ 철은 기체라서 우주로 날아갔기 때문이다.
 - ④ 지각의 철이 모두 산소로 바뀌었기 때문이다.
 - ⑤ 지각의 철은 사람이 다 캐어 썼기 때문이다.
2. 지구 전체 조성을 알아내는 데 콘드라이트 운석을 쓰는 까닭을 태양 대기의 구성과 관련지어 설명하시오.

과학의 최전선 바다의 물은 어디서 왔을까

여기까지 밝혀졌다 — 물 분자의 수소 가운데 무거운 수소(중수소, D)가 얼마나 섞였는지를 나타내는 D/H 비는 물의 출신지를 가리키는 지문이다. 지구 바닷물의 D/H는 약 1.56×10^{-4} 이다⁹. 원시 운석 86개를 켜 연구는 운석 속 물이 혜성의 물보다 중수소가 적고, 혜성은 지구 물의 주된 출처가 아니라고 보았다¹⁰. **아직 모른다** — 지구 물의 기원은 오랫동안 논의되었지만 합의에 이르지 못했다¹¹. 혜성마다 값도 다르다. 로제타호가 켜 혜성 67P는 지구의 약 3배였지만¹¹, 혜성 103P/하틀리 2는 지구 바닷물과 비슷했다⁹. **가설과 연구** — 지구와 동위 원소 구성이 가장 닮은 엔스타타이트 콘드라이트는 물이 없는 운석으로 여겨졌다. 그런데 이 운석 13개에서 예상보다 많은 수소가 나왔고 D/H도 지구 깊은 곳의 값과 비슷했다. 그래서 지구의 물 대부분이 처음부터 지구를 만든 재료 속에 들어 있었다는 가설이 힘을 얻고 있다¹².

이 장의 출처

1. Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. *Reviews of Modern Physics*, 29(4), 547–650. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547>
2. Lodders, K. (2003). Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. *The Astrophysical Journal*, 591(2), 1220–1247. <https://doi.org/10.1086/375492>
3. McDonough, W., & Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
4. McDonough, W. (2003). Compositional Model for the Earth's Core. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 547–568). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/02015-6>
5. Clarke, F., & Washington, H. (1924). The composition of the Earth's crust. Professional Paper. <https://doi.org/10.3133/pp127>
6. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. G. (2020). *Earth: An introduction to physical geology* (13th ed.). Pearson.

7. Cavendish, H. (1798). Experiments to determine the density of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 88, 469–526. <https://doi.org/10.1098/rstl.1798.0022>
8. Wood, B. J., Walter, M. J., & Wade, J. (2006). Accretion of the Earth and segregation of its core. *Nature*, 441(7095), 825–833. <https://doi.org/10.1038/nature04763>
9. Hartogh, P., Lis, D. C., Bockelée-Morvan, D., de Val-Borro, M., Biver, N., Küppers, M., Emprechtinger, M., Bergin, E. A., Crovisier, J., Rengel, M., Moreno, R., Szutowicz, S., & Blake, G. A. (2011). Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2. *Nature*, 478(7368), 218–220. <https://doi.org/10.1038/nature10519>
10. Alexander, C. M. O., Bowden, R., Fogel, M. L., Howard, K. T., Herd, C. D. K., & Nittler, L. R. (2012). The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets. *Science*, 337(6095), 721–723. <https://doi.org/10.1126/science.1223474>
11. Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J. J., Bieler, A., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., Eberhardt, P., Fiethe, B., Fuselier, S., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K., Hässig, M., Jäckel, A., Kopp, E., . . . Wurzel, P. (2015). 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, 347(6220), 1261952. <https://doi.org/10.1126/science.1261952>
12. Piani, L., Marrocchi, Y., Rigaudier, T., Vacher, L. G., Thomassin, D., & Marty, B. (2020). Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. *Science*, 369(6507), 1110–1113. <https://doi.org/10.1126/science.aba1948>

규소와 산소의 사면체 — 지각의 뼈대

출발점 화학 결합(이온·공유) 앞 권 · 원소 존재비 2장

새 개념 SiO_4 사면체 · 규산염 구조(사슬·판·망상)

이어짐 결정(원자 배열) 4장 · 화성암 5장 · 화산(점성·분출) 18장

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	배위수	이온 하나를 바로 둘러싼 반대 전하 이온의 개수.
2	규산염 사면체	규소 이온 하나를 산소 이온 넷이 둘러싼 세모뿔 모양의 단위.
3	감람석	사면체가 서로 떨어져 있고 마그네슘·철 이온이 붙잡고 있는 광물.
4	휘석	사면체가 한 줄 사슬로 이어진 광물.
5	각섬석	사면체 사슬 두 줄이 나란히 붙은 광물.
6	운모	사면체가 판을 이루어 판 사이가 얇게 잘 벗겨지는 광물.
7	석영	사면체가 산소 넷을 모두 나누어 규소와 산소만으로 된 단단한 광물.
8	망상 구조	사면체가 산소 넷을 모두 이웃과 나누어 이룬 3차원 그물 짜임.
9	장석	규소 자리 일부에 알루미늄이 들어간 망상 구조로, 지각에서 가장 흔한 광물 무리.
10	브리지머나이트	깊은 땅속의 높은 압력에서 생기는 페로브스카이트 구조의 MgSiO_3 광물.

3월 셋째 토요일 오전, 돌집 과학방. 맑고 바람이 잦아든 날이다. 광물 표본장 앞 탁자에 탁구공 한 봉지와 작은 유리구슬, 올리브색·검은색·반짝이는 은색·투명한 광물 조각 다섯 개가 놓여 있다.

윤 교수 지난주에 지각 질량의 74%가 산소와 규소라는 걸 봤지. 오늘은 그 둘이 어떻게 붙어서 돌의 뼈대가 되는지 보자꾸나. 원자에서 시작해 보자. 화학 편 27장에서 규산염 광물을 잠깐 만났던 것 기억나니?

하린 네. 규소와 산소가 이어진 광물이라고만 배웠어요. 모양까지는 자세히 안 봤고요.

작은 규소, 큰 산소

윤 교수 화학 편 20장에서 원자가 전자를 잃으면 양이온, 얻으면 음이온이 된다고 했지. 광물 속 규소는 전자 넷을 내주어 Si^{4+} , 산소는 둘을 받아 O^{2-} 가 된단다. 그런데 크기가 아주 달라. 산소 넷에 둘러싸인 Si^{4+} 의 반지름은 약 0.026 nm, O^{2-} 는 약 0.14 nm야¹. 산소가 다섯 배쯤 크지.

태오 전자를 받으면 커지고 내주면 작아지니까 그렇겠네요.

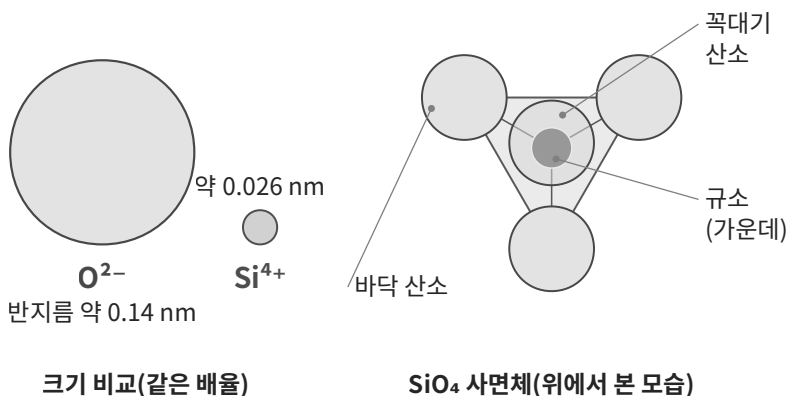
윤 교수 그래. 이제 탁구공을 산소, 유리구슬을 규소라고 해 보자. 탁구공 셋을 세모로 놓고 그 위에 하나를 얹어 봐. 가운데 틈에 구슬이 딱 들어가지?

하린 들어가요! 공 넷이 구슬 하나를 감싸는 세모뿔 모양이 돼요.

윤 교수 1929년 폴링은 이런 이온 결정에서 양이온 둘레에 음이온이 다면체를 이루고, 둘러싸는 개수는 두 이온의 반지름 비로 정해진다는 규칙을 세웠단다². 이온 하나를 바로 둘러싼 반대 이온의 개수를 **배위수**라고 해. 규소와 산소의 반지름 비는 약 0.19라서, 산소 넷이 규소 하나를 감싸는 배위수 4가 된단다.

미숙 그림 3-1을 보니 장독대에 항아리 셋 놓고 가운데 위에 하나 더 얹은 모양이네요.

윤 교수 딱 그 모양입니다. 이것을 **규산염 사면체**, 곧 SiO_4 사면체라고 하지요. 화학 편에서 분자 모양을 배울 때 본 메테인(CH_4)처럼 네 꼭짓점이 고르게 벌어진 모양입니다. Si와 O 사이의 결합은 이온 결합과 공유 결합의 성질을 함께 지닌, 아주 튼튼한 결합이에요³.



[그림 3-1] 규산염 사면체 왼쪽은 크기를 맞춘 Si^{4+} (반지름 약 0.026 nm)와 O^{2-} (약 0.14 nm). 오른쪽은 산소 넷이 규소 하나를 둘러싼 SiO_4 사면체를 위에서 본 모습으로, 산소 셋은 바닥에, 하나는 꼭대기에 있다

하린 전하를 세어 보면요, 규소 +4에 산소 -2가 넷이면 -8이니까... 사면체 하나가 -4예요. 이대로는 중성이 안 되네요?

윤 교수 날카롭구나. 그래서 사면체는 둘 중 하나를 한단다. 마그네슘·철 같은 양이온을 곁에 붙여 전하를 맞추거나, 이웃 사면체와 꼭짓점의 산소를 나누어 주는 거야. 산소 하나를 둘이 나누면 그만큼 음전하가 줄어들지.

산소를 나누는 다섯 가지 방법

윤 교수 1930년 브래그는 X선으로 밝힌 여러 규산염의 짜임을, 사면체가 산소를 나누는 방식에 따라 정리했단다⁴. X선으로 원자를 보는 방법은 4장에서 자세히 배울 거야. 그림 3-2가 그 다섯 가지란다.

하린 그러니까 나누는 산소가 많아질수록 사면체가 점점 크게 이어진다는 거죠? 날개에서 사슬로, 판으로, 그물로요.

윤 교수 그래. 나누는 산소가 늘수록 규소 하나당 산소는 4개에서 2개까지 줄고, 사면체 묶음의 음전하도 줄어든단다. 그만큼 곁에 붙는 양이온도 덜 필요하지. 감람석에는 마그네슘·철이 많고 석영에는 하나도 없는 까닭이 여기 있어.

하린 탁자 위 조각들은 각각 어느 쪽이에요?

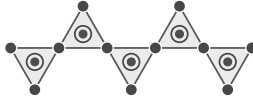
독립형 — 감람석

Si : O = 1 : 4



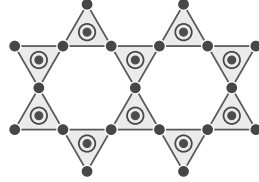
단사슬 — 휘석

Si : O = 1 : 3



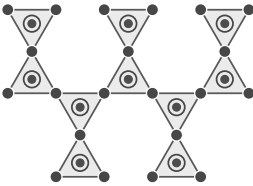
복사슬 — 각섬석

Si : O = 4 : 11



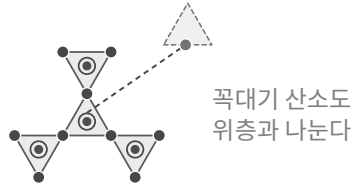
판상 — 운모

Si : O = 2 : 5



망상 — 석영

Si : O = 1 : 2



● 바닥 산소 ◎ 규소와 그 위 꼭대기 산소 세모 하나 = 사면체 하나

[그림 3-2] 사면체가 산소를 나누는 다섯 가지 방법 독립형(감람석, Si : O = 1 : 4), 단사슬(휘석, 1 : 3), 복사슬(각섬석, 4 : 11), 판상(운모, 2 : 5), 망상(석영, 1 : 2). 나누는 산소가 많을수록 규소 하나당 산소가 줄어든다

윤 교수 올리브색 조각이 **감람석**이야. 사면체가 서로 떨어져 있고, 사이사이 마그네슘·철 이온이 붙잡고 있지. 검은 기둥 모양은 사면체가 한 줄 사슬로 이어진 **휘석**, 그 옆은 사슬 두 줄이 나란히 붙은 **각섬석**이란단.

태오 은색으로 반짝이는 건 운모죠? 손톱으로 밀면 얇게 벗겨지네요.

윤 교수 그래. **운모**는 사면체가 옆으로 이어져 판을 이룬단다. 판 안은 Si-O 결합으로 튼튼하지만, 판과 판 사이는 칼륨 이온이 약하게 붙잡고 있어서 그 사이가 잘 벗겨지지⁵. 투명한 **석영**은 사면체의 산소 넷이 모두 이웃과 나뉘어 3차원 그물을 이룬 망상 구조야. 끊기 쉬운 곳이 없어 단단하고 매끈하게 쪼개지지 않는단다.

하린 그러니까 산소를 몇 개 나누느냐에 따라 광물의 모양과 성질이 달라진다는 거죠?

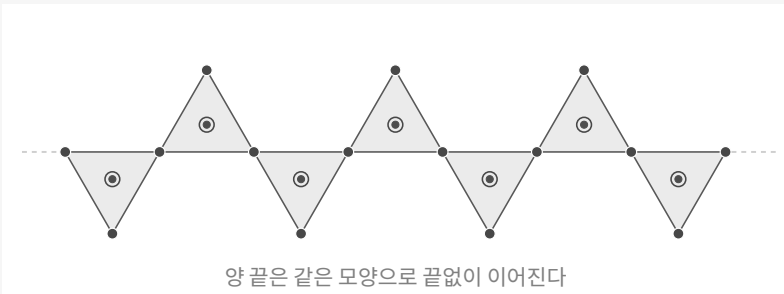
윤 교수 정확해. 결합이 약한 방향이 광물이 갈라지는 방향이 된단다. 이 성질들은 4장에서 자세히 볼 거야. 지각에서 가장 흔한 광물 무리는 석영처럼 망상 구조인 **장석**이란단. 규소 자리 일부에 알루미늄이 들어가고, 모자란 전하를 칼륨·나트륨·칼슘이 채우지⁶. 5장에서 배울 화강암이 바로 석영과 장석이 주인공인 돌이야.

미숙 감람석은 어디에 많아요? 이름이 예뻐서요.

윤 교수 감람석은 땅속 깊은 곳에 아주 많습니다. 11장에서 자세히 볼 맨틀의 윗부분은 감람석이 주인공인 암석이지요⁵.

문제 3-1 사슬을 이룬 사면체

그림 3-3은 어떤 규산염 광물에서 SiO_4 사면체가 이어진 모양을 위에서 본 것이다. 이 광물에 대한 설명으로 옳은 것은?



[그림 3-3] 문제 3-1의 그림 사면체가 한 줄로 이어진 모양을 위에서 본 것. 세모 하나가 사면체 하나이고, 점은 산소 이온이다

- ① 사면체끼리 산소를 하나도 나누지 않는다.
- ② 사면체 하나는 이웃 사면체들과 산소 2개를 나누어 가진다.
- ③ 규소와 산소의 개수비는 1 : 2이다.
- ④ 판과 판 사이가 약해 얇은 판으로 잘 벗겨진다.
- ⑤ 석영이 이런 모양으로 이어져 있다.

태오 사슬이면 휘석이고, 휘석은 SiO_2 아니예요? 그럼 ③이요.

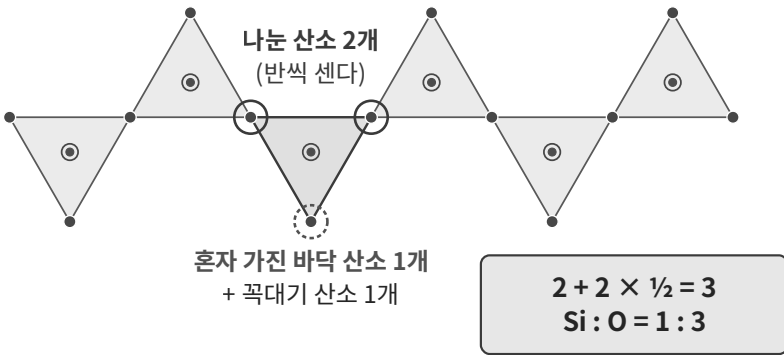
윤 교수 SiO_2 는 어떤 구조의 식이었지? 그림 3-2를 다시 보렴.

태오 아, 산소 넷을 모두 나누는 망상 구조, 석영이요. 사슬은 그보다 덜 나누니까 1 : 2가 아니겠네요.

윤 교수 그래. 계획을 세우자. 사면체 하나를 골라, 이웃과 나누는 산소와 혼자 가진 산소를 세어 보는 거야.

하린 가운데 사면체는 왼쪽 이웃과 하나, 오른쪽 이웃과 하나를 나뉘요. 나누는 산소가 2개, 혼자 가진 산소가 2개예요.

윤 교수 나눈 산소는 두 사면체가 반씩 가지니, 규소 하나당 산소는 $2 + 2 \times \frac{1}{2} = 3$ 개가 되지. 그림 3-4처럼 말이야. 그래서 $\text{Si} : \text{O} = 1 : 3$ 이란다. 정답은 ②야.



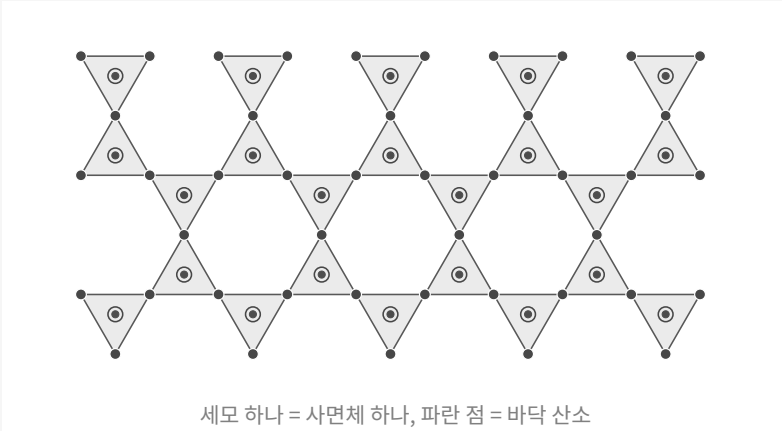
[그림 3-4] 풀이 그림 가운데 사면체 하나를 골라 이웃과 나누는 산소 2개(반씩)와 혼자 가진 산소 2개를 세면 규소 하나당 산소 3개, 곧 $\text{Si} : \text{O} = 1 : 3$ 이다

미숙 나눠 쓰는 건 반만 내 몫으로 친다, 이웃과 담장 나누는 셈이네요.

윤 교수 정확합니다. ④는 운모 같은 판상 구조, ⑤의 석영은 망상 구조의 이야기지요.

문제 3-2 판을 이룬 사면체의 식

그림 3-5는 운모처럼 사면체가 판을 이룬 구조의 일부이다. 사면체마다 바닥의 산소 3개를 이웃과 나누고, 꼭대기 산소 1개는 혼자 가진다. (1) 규소와 산소의 개수비를 구하시오. (2) 규소 2개를 묶음 하나로 할 때 그 묶음의 전하를 구하시오. (3) 산소 4개를 모두 나누는 망상 구조와 비교하시오.



[그림 3-5] 문제 3-2의 그림 사면체가 바닥의 산소 셋을 이웃과 나누며 옆으로 이어져 판을 이룬 모습(위에서 본 모습)

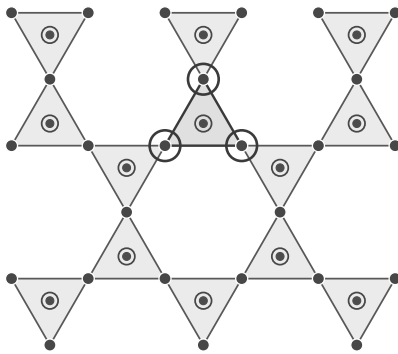
하린 문제 3-1이랑 같은 방법이에요. 혼자 가진 산소 1개에 나눈 산소 3개의 반을 더하면 $1 + 3 \times \frac{1}{2} = 2.5$ 개예요.

태오 규소 1에 산소 2.5니까, 두 배 해서 $\text{Si} : \text{O} = 2 : 5$. 식으로 쓰면 Si_2O_5 !

윤교수 좋아. 전하는?

태오 규소 둘이 +8, 산소 다섯이 -10이니까 -2예요. 그래서 운모에는 칼륨 같은 양이온이 판 사이에 끼어 전하를 맞추는 거군요.

윤교수 그림 3-6에 세는 방법을 정리했단다. 망상 구조는?



판상(운모)

$$1 + 3 \times \frac{1}{2} = 2.5$$

Si_2O_5 , 전하 -2

망상(석영)

$$4 \times \frac{1}{2} = 2$$

SiO_2 , 전하 0

빨간 세모: 셀 사면체 하나

[그림 3-6] 풀이 그림 판상 구조의 사면체 하나는 혼자 가진 산소 1 + 나눈 산소 $3 \times \frac{1}{2} = 2.5$ 개로 $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ 가 된다. 망상 구조는 $4 \times \frac{1}{2} = 2$ 개로 SiO_2 , 전하 0이다

하린 산소 넷을 모두 반씩 가지니 $4 \times \frac{1}{2} = 2$, SiO_2 예요. 전하가 $+4 - 4 = 0$ 이라 다른 이온이 필요 없네요. 석영이 규소와 산소만으로 된 까닭이군요.

윤 교수 모범 답은 (1) $\text{Si} : \text{O} = 2 : 5$, (2) $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ 로 -2, (3) 망상 구조는 SiO_2 로 전하가 0이라 다른 양이온 없이도 중성이란다.

미숙 많이 나눌수록 산소가 줄고, 곁에 붙는 이온도 필요 없어지는군요.

윤 교수 그렇습니다. 규소와 산소만으로 촘촘히 이어질수록 사면체 그물이 커지는 셈이지요. 이 차이는 5장에서 배울 마그마의 끈적임과도 이어집니다.

오늘의 정리

- 광물 속 규소는 작은 Si^{4+} (약 0.026 nm), 산소는 큰 O^{2-} (약 0.14 nm)이다. 반지름 비가 약 0.19라서 산소 넷이 규소 하나를 둘러싼다(배위수 4).
- 이 단위가 SiO_4 사면체이며, 전하는 -4이다. 양이온을 곁에 붙이거나 이웃과 산소를 나누어 전하를 맞춘다.
- 산소를 나누는 방식에 따라 독립형(감람석 1 : 4)·단사슬(휘석 1 : 3)·복사슬(각섬석 4 : 11)·판상(운모 2 : 5)·망상(석영 1 : 2)으로 나뉜다.
- 나눈 산소는 반씩 센다. 판상은 $1 + 3 \times \frac{1}{2} = 2.5$, 망상은 $4 \times \frac{1}{2} = 2$.
- 결합이 약한 방향이 갈라지는 방향이다. 운모는 판 사이가 약해 얇게 벗겨지고, 석영은 약한 곳이 없어 단단하다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

- 다음 중 규소 하나당 산소의 수가 가장 많은 규산염 구조는?
 - 망상 구조
 - 판상 구조
 - 복사슬 구조
 - 단사슬 구조
 - 독립형 구조
- 감람석 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ 에서 사면체 하나의 전하는 얼마이며, 마그네슘·철 이온은 몇 개가 필요한지 전하로 설명하시오(마그네슘·철 이온은 모두 +2가로 본다).

과학의 최전선 지구 깊은 곳의 규산염은 어떤 모양일까

여기까지 밝혀졌다 — 땅 위의 규산염에서 규소는 산소 넷에 둘러싸이지만, 아주 높은 압력에서는 산소 여섯에 둘러싸인다³. 지구에서 가장 흔한 고체로 여겨지는 페로브스카이트 구조의 MgSiO_3 는 반세기 동안 자연 표본을 찾지 못하다가, 충격을 받은 운석 속에서 발견되어 브리지머나이트라는 이름을 얻었다⁷. **아직 모른다** — 핵 바로 위, 약 2,700 km 깊이, 지표 공기 압력의 120만 배가 넘는 압력과 약 2,500 K의 온도에서 이 광물이 SiO_6 팔면체 판이 쌓인 새 구조로 바뀐다는 실험이 있다. 그 깊이에서 지진파가 갑자기 달라지는 층의 원인일 수 있다고 보지만, 아직 가능성으로 제시된 단계다⁸. **가설과 연구** — 새 구조의 알갱이는 판 모양이라 흐름 속에서 한 방향으로 늘어서고, 그러면 지진파의 빠르기가 방향에 따라 크게 달라질 수 있다⁸. 고압 실험과 지진파 관측을 맞대어 보며 이 가설을 가리는 연구가 이어지고 있다.

이 장의 출처

1. Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5), 751–767. <https://doi.org/10.1107/s0567739476001551>
2. Pauling, L. (1929). THE PRINCIPLES DETERMINING THE STRUCTURE OF COMPLEX IONIC CRYSTALS. *Journal of the American Chemical Society*, 51(4), 1010–1026. <https://doi.org/10.1021/ja01379a006>
3. Liebau, F. (1985). *Structural Chemistry of Silicates*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50076-3>
4. Bragg, W. L. (1930). The Structure of Silicates. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 74(1-6), 237–305. <https://doi.org/10.1524/zkri.1930.74.1.237>
5. Klein, C., & Dutrow, B. (2007). *The manual of mineral science* (23rd ed.). Wiley.
6. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. G. (2020). *Earth: An introduction to physical geology* (13th ed.). Pearson.
7. Tschauer, O., Ma, C., Beckett, J. R., Prescher, C., Prakapenka, V. B., & Rossman, G. R. (2014). Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science*, 346(6213), 1100–1102. <https://doi.org/10.1126/science.1259369>
8. Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N., & Ohishi, Y. (2004). Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO_3 . *Science*, 304(5672), 855–858. <https://doi.org/10.1126/science.1095932>

광물 — 원자 배열이 겉모습을 정한다

출발점 화학 결합(이온·공유) 앞 권 · 전자기파·스펙트럼 앞 권 · 산·염기·탄산 앞 권 · 규산염 구조(사슬·판·망상) 3장

새 개념 결정(원자 배열) · X선 회절 · 광물 성질(균기·쪼개짐) · 방해석(CaCO_3)

이어짐 녹음(원자 진동) 5장 · 풍화(화학·물리) 6장 · 석회암(옛 바다) 7장 · 변성암(원자 재배열) 8장 · 고지자기·자기 역전 13장

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	결정	원자·이온이 3차원으로 규칙적으로 되풀이해 들어선 고체.
2	브래그 법칙	두 원자 면의 반사 길 차이가 파장의 정수배일 때 X선이 보강된다는 관계.
3	X선 회절	결정 속 원자 면에서 X선이 특정한 방향으로만 세게 나오는 현상.
4	균기	광물이 굽힘에 버티는 정도.
5	모스 굳기계	광물 열 가지를 활석 1부터 다이아몬드 10까지 늘어놓은 굳기의 잣대.
6	방해석	균기 3이고 묶은 염산에 거품을 내는 CaCO_3 광물.
7	쪼개짐	결합이 약한 면을 따라 매끈한 평면으로 갈라지는 성질.
8	조흔색	광물을 초벌구이 판에 긁었을 때 남는 가루의 색.
9	전이대	깊이 410~660 km에서 감람석이 고압 광물로 바뀌는 땅속 층.
10	링우다이트	전이대에서 감람석이 바뀌어 생긴, 물을 품을 수 있는 고압 광물.

3월 넷째 토요일 오후, 돌집 과학방. 흐린 하늘에서 가는 봄비가 내린다. 탁자 위에 보안경과 묶은 염산이 든 스포이트 병, 초벌구이 타일, 쇠못, 유리판, 그리고 투명하거나 불투명한 광물 조각 다섯 개가 놓여 있다.

미숙이 가게에서 쓰는 굵은 천일염을 한 줌 가져와 검은 종이 위에 쏟았다. 하린이 돋보기를 대더니 소리를 질렀다.

하린 소금 알갱이가 전부 네모예요! 큰 것도 작은 것도 모서리가 다 직각이에요.

윤 교수 좋은 걸 봤구나. 지난주에는 사면체가 이웃과 산소를 나누는 방식을 봤지. 오늘은 원자와 이온이 그렇게 되풀이해 늘어난 모양, 곧 원자 배열이 광물의 겉모습을 어떻게 정하는지 보자꾸나. 원자에서 시작해 보자.

모서리의 각은 언제나 같다

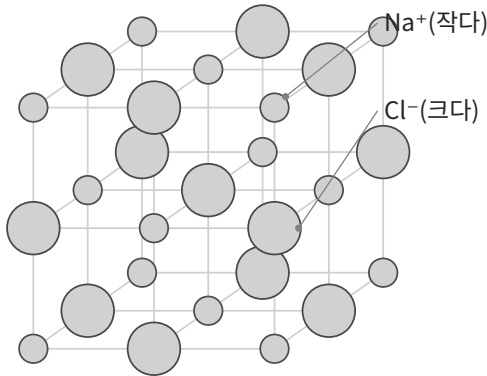
윤 교수 1669년 덴마크의 스테노는 크기와 모양이 제각각인 수정(석영) 결정들도 마주한 면 사이의 각은 늘 같다는 것을 알아냈단다¹. 소금 알갱이가 크든 작든 모서리가 직각인 것과 같은 이야기야.

태오 왜 그래요? 크게 자라면 모양도 달라질 것 같은데요.

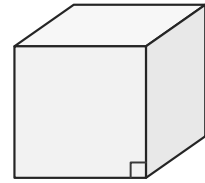
윤 교수 벽돌로 담을 쌓는다고 생각해 보렴. 담이 높아지든 길어지든 벽돌이 같은 방식으로 쌓이면 모서리의 각은 변하지 않지. 원자·이온이 3차원으로 규칙적으로 되풀이해 늘어난 고체를 **결정**이라 한단다. 소금은 Na^+ 와 Cl^- 가 가로·세로·높이로 번갈아 늘어서서 정육면체 모양이 되지². 그림 4-1을 보렴.

하린 그런데 원자는 0.1 nm라고 했잖아요. 이렇게 늘어난 걸 어떻게 확인해요? 현미경으로도 안 보일 텐데요.

윤 교수 좋은 질문이야. 물리 편 상권 25장에서 배웠듯 보이는 빛의 파장은 약 380~750 nm란다. 원자 사이 거리보다 천 배 넘게 길어서, 빛으로는 원자의 줄을 가려낼 수 없어. 원자 사이 거리만큼 짧은 파장의 빛이 필요하지. 그게 바로 X선이란단다.



암염 속 이온의 배열(일부)



소금 알갱이
모서리가 직각

[그림 4-1] 암염(NaCl)의 원자 배열 작은 Na^+ 와 큰 Cl^- 가 가로·세로·높이로 번갈아 들어서 정육면체를 되풀이한다. 그래서 소금 알갱이는 크기와 상관없이 모서리가 직각이다

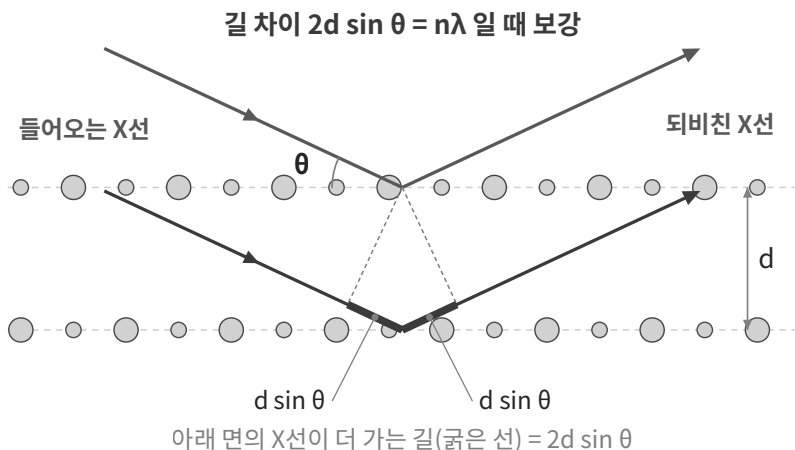
X선으로 원자의 줄을 읽다

윤 교수 1912년 독일의 라우에는 결정이 X선에 대해 촘촘한 격자처럼 작용할 거라고 생각했어. 프리드리히와 크니핑이 결정에 X선을 쏘았더니, 뒤의 사진판에 규칙적인 점무늬가 찍혔단다³. X선이 파동이라는 것과 결정 속 원자가 규칙적으로 늘어서 있다는 것이 한꺼번에 드러났지.

태오 점무늬는 봤는데, 그걸로 원자가 어떻게 놓였는지는 어떻게 알아요?

윤 교수 그 풀이를 케임브리지 대학의 젊은 연구생이 내놓았단다. 윌리엄 로런스 브래그는 점무늬를 원자가 많이 모인 면들이 X선을 거울처럼 되비친 것으로 보았어. 아버지 윌리엄 헨리 브래그와 함께 X선 분광계를 만들어, 운모의 쪼개짐 면에서 X선이 반사되는 것을 쟀 거야⁴.

하린 그림 4-2에서 아래 면에 반사된 X선이 더 먼 길을 가네요.



[그림 4-2] 브래그 반사 간격 d 로 들어선 원자 면에 X선이 각 θ 로 들어와 되비친다. 아래 면에서 반사된 X선은 위 면의 것보다 $2d \sin \theta$ 만큼 더 간다. 이 길 차이가 파장의 정수배일 때만 두 반사가 서로 보강되어 선 빛이 나온다

윤 교수 그래. 물리 편 하권 55장에서 파동의 마루와 골, 파장을 배웠지. 두 파동이 겹칠 때 마루와 마루가 만나면 서로 보태져 세지고(보강), 마루와 골이 만나면 서로 지워진단다(상쇄). 두 면에서 반사된 X선의 길 차이는 $2d \sin \theta$ 야. 이것이 파장 λ 의 정수배일 때만 선 반사가 나온단다. 이것이 **브래그 법칙** $n\lambda = 2d \sin \theta$ 야. 이렇게 결정에서 X선이 특정한 방향으로만 세게 나오는 것을 **X선 회절**이라고 해.

태오 그림 파장이랑 각도를 알면 원자 면 사이의 거리 d 를 거꾸로 구할 수 있겠네요!

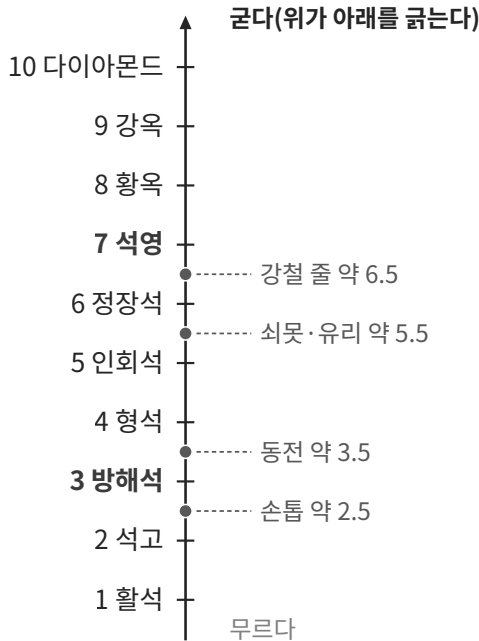
윤 교수 바로 그거란다. 1913년 로런스 브래그는 이 방법으로 암염의 원자 배치를 처음 밝혔어. 그 안에 NaCl이라는 분자는 따로 없고, Na^+ 하나를 Cl^- 여섯이 둘러싸는 배열이 끝없이 되풀이된다는 것이었지². 1915년 브래그 부자는 X선으로 결정 구조를 분석한 공로로 노벨 물리학상을 함께 받았단다⁵.

굳기·쪼개짐·조흔색 — 결합이 겉모습을 정한다

윤 교수 이제 탁자 위 광물로 직접 해 보자. 먼저 보안경을 쓰렴. 광물이 굽힘에 버티는 정도를 **굳기**라고 한단다. 모스는 광물 열 가지를 활석 1부터 다이아몬드 10까지 늘어놓아 굳기의 순서를 정했지⁶. 유리판을 굽어 보렴.

하린 투명한 이 조각은 유리에 흠집을 내요. 쇠못으로 긁어도 멀쩡하고요.

윤 교수 그건 석영이야. 굳기 7이지. 3장에서 본 대로 모든 방향이 튼튼한 Si-O 결합으로 이어져, 긁으려면 그 결합을 끊어야 하거든. 옆의 비슷하게 투명한 조각은 쇠못에 쉽게 긁히지? 그건 굳기 3인 **방해석**(CaCO₃)이란단다
6. 그림 4-3에 흔한 물건과 함께 굳기의 사다리를 그려 두었어.



[그림 4-3] 모스 굳기계와 생활 속 기준 광물 열 가지(활석 1 ~ 다이아몬드 10) 옆에 손톱(약 2.5), 동전(약 3.5), 쇠못·유리(약 5.5), 강철 줄(약 6.5)을 놓았다. 위의 것이 아래 것을 긁는다

태오 둘 다 투명하면 굳기 말고도 구별하는 법이 있어요?

윤 교수 묶은 염산을 한 방울 떨어뜨려 보렴. 방해석에서만 거품이 보글보글 오르지. 화학 편에서 배운 산과 탄산염의 반응으로 $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 가 되어 이산화 탄소가 나오는 거야. 그리고 방해석을 톱 치면 비스듬한 세 방향의 평면으로 갈라져 기울어진 상자 모양이 된단다.

하린 결합이 약한 면을 따라 갈라지는 거죠? 3장의 운모처럼요.

윤 교수 그래. 결합이 약한 면을 따라 매끈하게 갈라지는 성질이 **조개짐**이야. 운모는 한 방향, 장석은 거의 직각인 두 방향, 방해석과 암염은 세 방향으로 조개지고, 석영은 조개짐 없이 조개썩테기 같은 곡면으로 깨진단다⁶.

미숙 이 검은 쇳덩이 같은 돌을 하얀 타일에 그었더니 붉은 갈색 가루가 묻어나요. 겉과 색이 다르네요.

윤 교수 그게 **조흔색**, 곧 가루의 색입니다. 적철석(Fe_2O_3)은 검은 검거나 은빛이어도 가루는 늘 붉은 갈색이지요⁶. 겉의 색은 불순물이나 빛의 반사에 따라 바뀌지만 가루의 색은 원소와 원자 배열이 정하니 믿을 만합니다.

문제 4-1 방해석을 찾아라

그림 4-4는 광물 A~E의 시험 결과이다. 방해석으로 가장 알맞은 것은?

광물	유리를 긁는가	쇠못에 긁히는가	뭍은 염산 거품	쪼개짐	조흔색
A	○	×	×	없음 (곡면)	흰색
B	×	○	×	세 방향 (직각)	흰색
C	○	×	×	두 방향 (거의 직각)	흰색
D	×	○	○	세 방향 (비스듬)	흰색
E	○	×	×	없음	붉은 갈색

○ 그렇다 × 아니다

[그림 4-4] 문제 4-1의 그림 광물 A~E로 유리 긁기, 쇠못 긁기, 뭍은 염산 반응, 쪼개짐, 조흔색을 시험한 결과표

- ① A
- ② B
- ③ C
- ④ D
- ⑤ E

태오 B요. 세 방향으로 쪼개진다고 돼 있잖아요. 방해석도 세 방향이랬어요.

윤 교수 조건을 다시 보렴. B의 쪼개짐은 어떤 각이지?

태오 세 방향이 서로 직각이네요. 그건 소금 같은 암염이네요. 방해석은 비스듬했고요.

윤 교수 그래. 쪼개짐만으로는 헛갈리니 계획을 세우자. 가장 확실한 시험부터 차례로 걸러 내는 거야.

하린 방해석은 뭍은 염산에 거품이 나와 해요. 거품이 난 건 D 하나예요.

미숙 D는 유리는 못 굽고 쇠뿔에는 굽혔으니 굳기 3이랑도 맞고, 쪼개짐도 비스듬한 세 방향이네요.

윤 교수 그림 4-5처럼 걸러 내면 한 줄로 끝나지요. 정답은 ④입니다.

① 묶은 염산에 거품?



② 쇠뿔에 굽히고 유리는 못 굽나?



③ 쪼개짐이 비스듬한 세 방향?



세 시험이 모두 D를 가리킨다 → 방해석

[그림 4-5] 풀이 그림 ① 염산에 거품이 나는가 → D만 남는다. ② 쇠뿔에 굽히고 유리는 못 굽는가(굳기 3 안팎) → D. ③ 쪼개짐이 비스듬한 세 방향인가 → D. 세 시험이 모두 방해석을 가리킨다

하린 나머지도 알겠어요. 유리를 굽고 쪼개짐이 없는 A는 석영, 두 방향 쪼개짐의 C는 장석, 가루가 붉은 E는 적철석이에요.

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 지구과학편 2

단양의 돌은 바다였다

지구를 이루는 원소와 광물에서 시작해 화성암·퇴적암·변성암의 순환, 그리고 지구의 속까지 돌의 이야기를 따라갑니다.

통합과학 8권 한눈에 보기



1 화학편 1
원자·원소·분



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
공기·물·날씨



8 지구과학편 2 · 이 책
원소·암석·지구

과학과영성출판사

이광조 지음

값 20,000원

값 20000 원
53450



9 791123 106533 5
ISBN 979-11-23065-33-5

이어서 읽으시려면

08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다 — 전체 406쪽

ssbook.kr/book/tonghap-08

판매가 **12,000원** (POD 정가 20,000원)

- 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 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 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



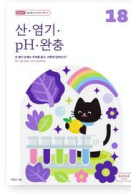
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
 유기 화학·생체 분자·고분자 문제 해설
 24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



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 × 르사틀리에로 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