



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 따뜻해질까

원자에서 힘과 에너지까지

컬러 PDF · 개인 영구 소장

이 PDF는 무료 샘플입니다

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

ssbook.kr/book/tonghap-05

POD 정가 ~~22,000원~~ → **13,200원** (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

미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 (원자에서 힘과 에너지까지)



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

MASS · INERTIA · GRAVITY · FRICTION ·
MOTION · ENERGY · LIGHT

미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 (원자에서 힘과 에너지까지)

문제로 풀어 가는 통합과학 물리 이야기 2

힘과 에너지까지 —

통합과학 시리즈 제3권 물리 편, 단양 돌집 과학방의 세 번째 해 (여름~겨울)

이광조 박사

판본 v10 · 2026-10-02

미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 (원자에서 힘과 에너지까지)

문제로 풀어 가는 통합과학 물리 이야기 2

미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 (원자에서 힘과 에너지까지)

이 책은 중학생과 고등학생, 그리고 물리를 다시 배우고 싶은 어른이 통합과학의 물리 부분을 원자에서부터 차근차근 이해할 수 있도록 네 사람의 대화로 풀어 쓴 교양서입니다. 책 속의 인물과 사건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이며, 과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔습니다. 전기 실험은 건전지(1.5 V)처럼 낮은 전압으로만 하고, 가정용 콘센트·전자레인지·고압선에는 절대 손대지 마십시오. 번개가 칠 때는 넓은 곳과 물가를 피하십시오. 자석은 어린이가 삼키지 않게 하고, 심장 박동기를 쓰는 사람 가까이 두지 마십시오.

차례

머리말 — 다시 원자로 돌아가 힘과 에너지를 묻다	6
일러두기 — 이 책의 짜임	7

제8부 원자의 질량과 관성

34장 원자의 무게 — 질량은 어디에 있을까	10
35장 관성 — 원자들이 모여 만든 버팀	21
제8부 단위 마무리 — 수능형 문제	33

제9부 힘의 정체

36장 네 가지 기본 힘 — 원자를 붙잡는 힘들	44
37장 모든 원자는 서로 당긴다 — 뉴턴의 만유인력	55
38장 중력과 무게 — 관성 질량과 중력 질량	68
39장 손으로 미는 힘의 정체 — 접촉력은 원자 사이 전기력	78
40장 마찰력 — 맞닿은 원자들이 붙잡는 힘	88
41장 힘의 합성과 평형 — 자유 물체도	98
제9부 단위 마무리 — 수능형 문제	110

제10부 운동의 법칙

42장 운동을 기록하다 — 속력·속도·가속도와 그래프	121
43장 갈릴레이의 빗면 — 자유 낙하	131
44장 힘과 가속도 — $F = ma$	145
45장 작용과 반작용 — 로켓은 무엇을 밀까	154
46장 수평으로 던진 물체 — 포물선의 비밀	165
제10부 단위 마무리 — 수능형 문제	177

제11부 운동량과 충돌

47장 운동량과 충격량	188
48장 충돌 안전장치 — 에어백·헬멧·안전띠	199
49장 운동량 보존 — 당구공과 로켓	210
제11부 단위 마무리 — 수능형 문제	221

제12부 에너지의 전환과 보존

50장 일과 에너지 — 힘이 한 일	232
---------------------	-----

51장 역학적 에너지 보존 — 알파인코스터	242
52장 미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 — 마찰과 열, 에너지 보존	251
53장 발전소 — 여러 에너지를 전기 에너지로	265
54장 전력 수송 — 변압기와 고압선	275
제12부 단원 마무리 — 수능형 문제	289

제13부 파동과 빛

55장 파동 — 물질을 타고 가는 떨림, 소리	302
56장 전자기파의 쓰임 — 전파에서 감마선까지	313
57장 빛에 실은 정보 — 전반사·광섬유·디지털 신호	323
58장 빛은 알갱이다 — 광전 효과	332
제13부 단원 마무리 — 수능형 문제	346

제14부 원자가 만드는 신소재와 에너지

59장 반도체 — 도체와 절연체 사이	357
60장 빛과 전기를 바꾸다 — LED와 태양 전지	368
61장 저항이 0인 물질 — 초전도체와 그래핀	378
62장 원자핵의 에너지 — 핵분열과 핵융합, 태양	389
63장 다시 별빛 아래 — 원자에서 우주까지, 에너지와 우리의 미래	404
제14부 단원 마무리 — 수능형 문제	429

부록

부록 A 용어 풀이	439
부록 B 교과 연결표	446
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	448
부록 D 물리 기본 수치와 단위	457

머리말 — 다시 원자로 돌아가 힘과 에너지를 묻다

상권에서 우리는 원자 속 전하에서 출발해 전기장과 자기장, 전동기와 발전기, 전자기파까지 왔다. 하권은 다시 원자로 돌아간다. 이번에 물을 것은 원자의 **질량**이다.

원자의 질량은 거의 전부가 가운데 아주 작은 원자핵에 모여 있다. 물체의 질량은 결국 그 속에 든 양성자와 중성자의 양이고, 이 질량이 운동의 변화에 버티는 성질이 **관성**이다. 그리고 질량을 가진 모든 원자는 서로를 당긴다. 이것이 **만유인력**이다. 원자는 전기적으로 중성이라 큰 물체끼리는 전기력이 서로 상쇄되고, 가장 약한 중력만 남아 사과를 떨어뜨리고 달을 붙잡는다. 한편 책상 위의 책을 떠받치는 힘과 미끄럼틀의 마찰력은, 맞닿은 원자들의 전자끼리 밀고 당기는 **전기력**이다. 상권에서 배운 전하가 여기서 다시 돌아온다.

이렇게 힘의 정체를 원자에서 밝힌 다음에야, 뉴턴의 운동 법칙과 운동량, 에너지와 그 보존을 이야기한다. 마찰로 사라진 듯한 역학적 에너지는 원자들의 무작위 운동, 곧 열이 된다. 미끄럼틀이 따뜻해지는 까닭이다. 이어 상권의 전자기 유도로 발전소와 송전을, 전자기파로 정보 통신을, 원자 속 전자의 에너지 준위로 광전 효과와 반도체·태양 전지를, 원자핵의 에너지로 태양과 원자력 발전을 설명한다.

하권도 상권처럼 문제와 풀이 대화, 풀이 그림, 과학자 이야기, 장 첫머리의 〈이장의 출발점〉, 단원 앞뒤의 지식 그래프, 장마다 〈과학의 최전선〉 상자로 짜여 있다. 상권을 읽지 않았더라도 따라올 수 있도록 필요한 곳마다 앞 개념을 짧게 되짚었다.

2026년 가을, 이광조

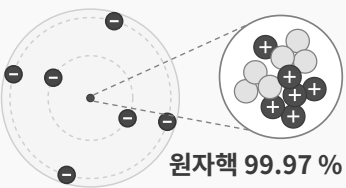
일러두기 — 이 책의 짜임

- **무대와 인물** 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’에서 은퇴한 물리학자 차 교수(차정우)와 하린·태오 남매, 두부집 ‘소백두부’의 미숙 이모가 함께 묻고 푼다. 인물과 사건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이다.
- **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** 물리 기본 수치와 단위.

원자의 질량과 관성

물체의 무게와 게으름은 어디서 올까?

34

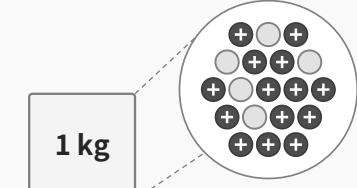


원자핵 99.97 %

전자 0.03 %

질량은 원자핵에
원자는 텅 비었고 핵이 무겁다

34



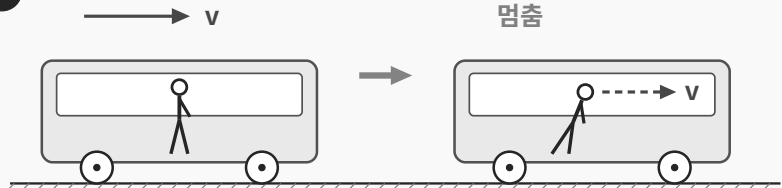
1 kg

핵자 6×10^{26} 개

질량 = 핵자의 양
양성자 + 중성자를 센다

↓

35



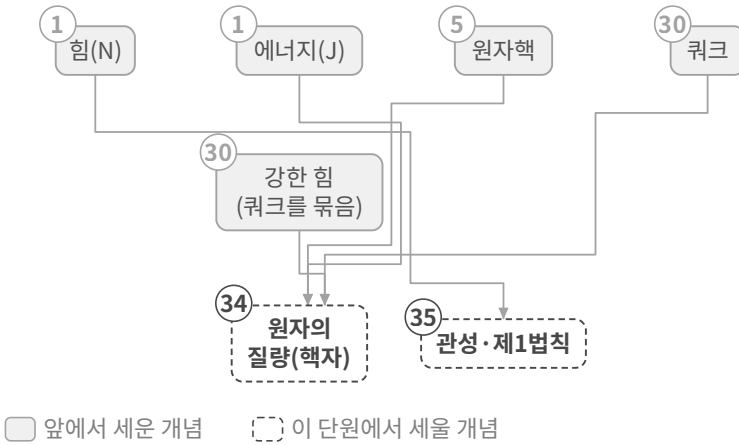
→ v

멈춤

관성: 하던 운동을 계속한다
달리던 버스가 서면 몸은 앞으로 간다

물체의 질량은 원자핵 속 핵자의 양이고,
질량이 클수록 운동 상태를 바꾸기 어렵다(관성).
→ 제9부: 운동을 바꾸는 힘의 정체를 찾는다

제8부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



[제8부] 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

원자의 무게 — 질량은 어디에 있을까

출발점 에너지(J) 1장 · 원자핵 5장 · 쿼크 30장 · 강한 힘(쿼크를 묶음) 30장

새 개념 원자의 질량(핵자)

이어짐 관성·제1법칙 35장 · 만유인력 37장 · $F = ma$ 44장 · $E = mc^2$ · 질량 결손 62장

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	질량	물체에 들어 있는 물질의 양.
2	원자 질량	원자 하나의 질량으로, 그 99.9 % 이상이 원자핵에 있는 것.
3	양성자 질량	1.67×10^{-27} kg으로, 약 99 %가 쿼크를 묶는 강한 힘의 에너지에서 오는 값.
4	탄소-12	양성자 6개와 중성자 6개로 된 탄소 원자로, 원자 질량 단위의 기준.
5	원자 질량 단위	탄소-12 원자 질량의 12분의 1로, 약 1.66×10^{-27} kg인 단위.
6	핵자 수	원자핵 속 양성자와 중성자를 합한 개수로, 원자의 질량을 거의 정하는 수.
7	전자 질량	9.1×10^{-31} kg으로, 양성자의 약 1836분의 1인 값.
8	양성자 스핀 수수께끼	쿼크 세 개의 스핀을 더해도 양성자의 스핀이 다 설명되지 않는 문제.

충북 단양, 남한강 가에 옛 정미소를 고쳐 만든 ‘돌집 과학방’이 있다. 올봄부터 토요일마다 이곳에 넷이 모인다. 대학에서 물리를 가르치다 은퇴하고 소백산천문대에서 별을 보여 주는 차정우 교수, 올해 고등학교 1학년으로 통합과학을 배우는 윤하린, 11월에 수능을 보는 하린의 오빠 윤태오, 그리고 남매의 이모로 구경시장 옆에서 두부집 ‘소백두부’를 하는 한미숙이다. 8월 첫째 토요일 아침, 선풍기 두 대가 도는 과학방 탁자 위에 미숙이 가게에서 쓰는 전자저울과 물 1 L가 든 병을 올려놓았다. 저울 눈금은 1.00 kg을 가리켰다.

미숙 두부 한 모 무게를 재는 저울이에요. 여름방학 동안 뭐든 재 보자고 하셔서 가져왔어요.

차 교수 고맙습니다. 하권의 첫날에 딱 맞는 도구네요. 원자에서 시작해 보자꾸나. 봄부터 여름까지 우리는 원자가 지닌 **전하**를 따라갔지. 전자와 원자핵을 찾아내고(3~5장), 마찰 전기와 도체를 거쳐(6~8장) 전하가 만드는 전기력과 전기장을 보고(9~12장), 흐르는 전하가 자기장을 만든다는 데서(13~18장) 전자기 유도와 전자기파까지 갔어(19~25장). 그다음 원자 속 전자가 궤도를 옮기며 빛을 내고 먹는 모습을 보았고(26~28장), 그 빛으로 우주를 읽어 원자의 재료가 어디서 왔는지(29~32장), 오로라가 왜 빛나는지(33장)까지 따라갔단다. 하권에서는 원자가 지닌 또 하나의 성질, **질량**을 따라가 볼 거야. 이 물 1 kg의 질량은 원자의 어디에 들어 있을까?

태오 원자 전체에 골고루 퍼져 있지 않을까요?

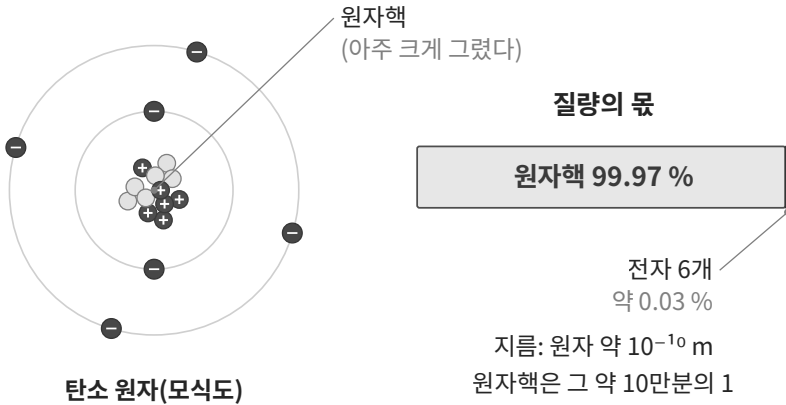
원자핵이 거의 다 가진다

차 교수 먼저 말부터 정하자. **질량**은 물체에 들어 있는 물질의 양이고, 단위는 kg이야. 저울 눈금이 kg으로 알려 주는 값이 이것이지. 저울이 실제로 무엇을 재는지는 38장에서 자세히 따져 보자. 이제 원자 속으로 들어가 보자꾸나. 1911년 러더퍼드는 금박에 알파 입자를 쏘아, 원자의 양전하와 질량이 가운데 아주 작은 원자핵에 모여 있음을 알아냈단다¹.

하린 5장에서 배웠어요. 원자핵은 원자보다 10만 배쯤 작다고요.

차 교수 그래. 원자는 지름이 약 10^{-10} m이고, 원자핵은 그 10만분의 1 정도야². 원자를 지름 100 m 운동장만큼 키우면 원자핵은 한가운데 놓인 1 mm 모래알만 하지. 그런데 질량은 거꾸로란다. 양성자 하나의 질량은

1.67×10^{-27} kg, 전자는 9.1×10^{-31} kg이야. 나누어 보면 양성자가 전자보다 약 1836배 무거워³. 중성자는 양성자보다 아주 조금 더 무겁고⁴.



[그림 34-1] 원자의 크기와 질량 원자핵의 지름은 원자의 약 10만분의 1이지만(그림에서는 원자핵을 크게 그렸다), 원자 질량의 99.9 % 이상을 가진다. 탄소 원자에서 전자 6개의 질량은 전체의 약 0.03 %다(모식도)

미숙 그러니까 부피는 전자가 다 차지하고, 무게는 원자핵이 다 가져간 거네요.

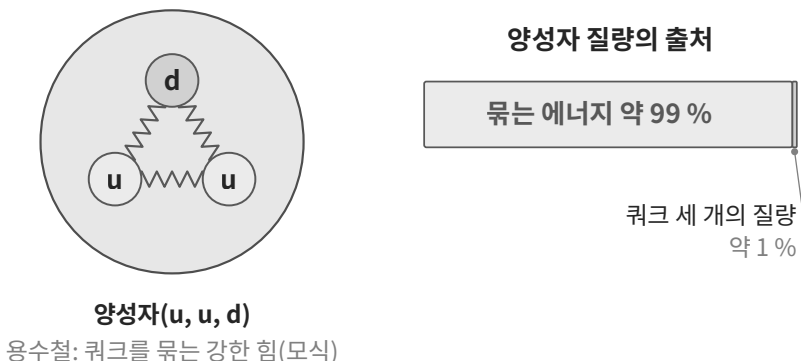
차 교수 네, 그림 34-1이 그 모습입니다. 탄소 원자 하나에서 전자 6개의 질량을 모두 더해도 전체의 약 0.03 %예요. 원자 질량의 99.9 % 이상이 원자핵, 곧 양성자와 중성자에 들어 있지요. 31장에서 이 둘을 묶어 핵자라고 불렀던 것 기억하시지요? 우주의 처음 3분 동안 양성자와 중성자가 뭉쳐 헬륨 원자핵이 되고, 남은 양성자가 수소 원자핵이 되었다고 했지요⁵. 이 물병 속 물 분자의 수소 원자핵도 그때 생긴 것이고, 산소 원자핵은 훨씬 뒤 별 속에서 만들어졌답니다⁶.

양성자의 질량은 어디서 왔을까

차 교수 한 걸음 더 들어가 보자. 30장에서 양성자와 중성자는 쿼크 세 개로 되어 있다고 했고, 31장에서 양성자는 u, u, d라는 것을 보았지⁷. 전자를 양성자에 세게 쏘는 실험으로 그 속에 점 같은 알갱이가 있다는 것도 확인되었고⁸. 그럼 양성자의 질량은 쿼크 세 개의 질량을 더한 것일까?

태오 당연히 그렇겠죠. 부품 무게를 더하면 전체 무게잖아요.

차 교수 그런데 입자 물리학자들이 정리한 쿼크의 질량을 더해 보면, 세 개를 합쳐도 양성자 질량의 약 100분의 1에 그친다⁹. 나머지 약 99 %는 쿼크를 서로 붙잡아 묶는 강한 힘의 **에너지**에서 나와. 2008년 슈퍼컴퓨터로 쿼크 사이의 힘을 처음부터 계산해, 양성자와 중성자의 질량을 실험값 그대로 얻어 낸 연구가 이를 확인했지¹⁰.



[그림 34-2] 양성자 질량의 출처 쿼크 세 개(u, u, d) 자체의 질량을 모두 더해도 양성자 질량의 약 1 %에 그친다. 나머지 약 99 %는 쿼크를 묶는 강한 힘의 에너지에서 나온다(모식도)

하린 에너지가 질량이 된다고요? 그게 뭐예요?

차 교수 아인슈타인이 1905년에 “물체가 가진 에너지가 곧 그 물체의 질량”이라는 것을 보였단다¹¹. 에너지와 질량을 잇는 식은 62장 원자핵 에너지에서 자세히 배우고, 쿼크를 묶는 강한 힘은 36장에서 자세히 보자. 오늘은 그림 34-2처럼 “우리 몸 질량의 대부분은 쿼크를 묶는 에너지”라는 것만 기억하렴.

미숙 두부 한 모의 무게도 결국 그 에너지 덩어리라니, 두부가 달리 보이네요.

차 교수 그렇지요. 다만 이 에너지는 양성자 속에 단단히 갇혀 있어서, 두부를 먹는다고 풀려나지는 않습니다. 음식이 주는 에너지는 원자핵이 아니라 원자 바깥 전자들이 이루는 결합에서 나오지요. 원자핵 속 에너지를 꺼내는 이야기는 62장에서 자세히 다룹니다.

원자 질량 단위와 원자 세기

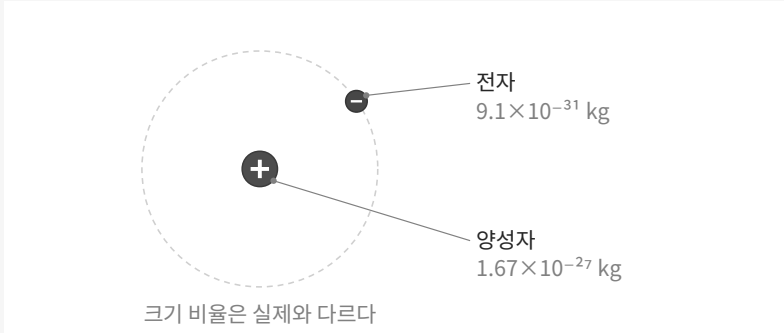
차 교수 원자 하나는 너무 가벼워서 kg으로 쓰면 불편해. 그래서 탄소-12 원자 질량의 12분의 1을 **원자 질량 단위**로 쓴단다. 약 1.66×10^{-27} kg으로, 양성자나 중성자 하나의 질량과 거의 같지³. 그러면 원자의 질량은 핵자 수로 거의 정해져. 수소는 약 1, 탄소는 12, 산소는 16 원자 질량 단위야.

하린 그러니까 물체의 질량은 그 안에 든 핵자가 몇 개인지 세는 것과 거의 같다는 거죠?

차 교수 정확해. 이 생각이 하권의 출발점이란다. 다음 장에서는 이 질량이 움직임의 변화에 버티는 성질을 배우고, 37장에서는 질량을 가진 모든 원자가 서로 당긴다는 법칙을 배울 거야. 둘 다 오늘 센 핵자의 양에서 이어진단다.

문제 34-1 수소 원자 속 전자의 몫

그림 34-3은 수소 원자의 모식도다. 원자핵은 양성자 하나(1.67×10^{-27} kg)이고 전자 하나(9.1×10^{-31} kg)가 둘레에 있다. 수소 원자 전체 질량 가운데 전자가 차지하는 비율에 가장 가까운 것은?



[그림 34-3] 문제 34-1의 그림 양성자 하나와 전자 하나로 된 수소 원자(모식도, 크기 비율은 실제와 다르다)

- ① 약 50 %
- ② 약 10 %
- ③ 약 1 %
- ④ 약 0.05 %
- ⑤ 0 % (전자는 질량이 없다)

태오 입자가 둘이니까 반반, ①이요.

차 교수 조건을 다시 읽어 보렴. 개수가 같으면 질량도 같을까?

태오 아니요, 양성자가 훨씬 무거워요. 1836배요.

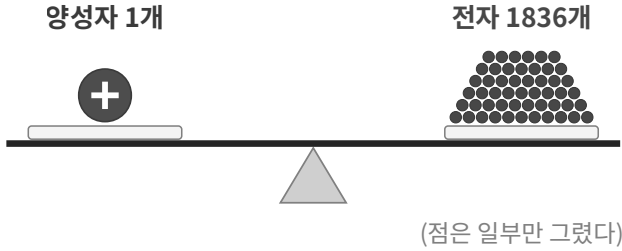
차 교수 그림 계획을 세우자. 전자 질량을 1이라 하면 양성자는 1836이지. 전체는?

하린 $1836 + 1 = 1837$ 이요. 전자의 몫은 $1 \div 1837$ 이니까... 약 0.00054, 곧 0.054 %예요.

차 교수 그림 34-4처럼 시소 한쪽에 양성자 하나를 올리면, 반대쪽에 전자를 1836개 올려야 겨우 맞는단다. 정답은 ④야.

수소 원자에서 전자의 몫

$$1 \div (1836 + 1) \approx 0.0005 = \text{약 } 0.05 \%$$



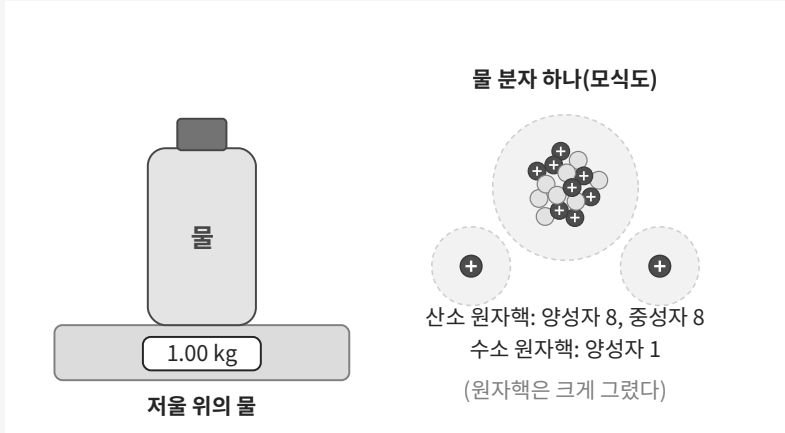
[그림 34-4] 풀이 그림 양성자 하나와 전자 1836개가 시소에서 균형을 이룬다. 수소 원자에서 전자의 몫은 $1 \div 1837$, 약 0.05 %다

미숙 ⑤는 왜 틀려요? 이렇게 가벼우면 없다고 해도 될 것 같은데요.

차 교수 가볍지만 0은 아닙니다. 전자의 질량은 9.1×10^{-31} kg으로 정확히 재어져 있어요³. 되돌아보면 “개수”와 “질량”을 구별하는 것이 이 문제의 열쇠였지요.

문제 34-2 물 1 kg 속의 원자 세기

그림 34-5처럼 저울 위의 물은 1.0 kg이다. 물 분자 하나(H_2O)의 질량은 약 18 원자 질량 단위로, 3.0×10^{-26} kg으로 어림한다. (1) 물 1.0 kg 속 물 분자는 몇 개인가? (2) 물 분자 하나에 든 양성자와 중성자는 모두 몇 개인가? (3) 물 1.0 kg 속 핵자는 몇 개이며, 여기에 핵자 하나의 질량 1.67×10^{-27} kg을 곱하면 얼마인지 쓰시오.



[그림 34-5] 문제 34-2의 그림 저울 위의 물 1.0 kg과 물 분자 하나(산소 원자핵은 양성자 8개와 중성자 8개, 수소 원자핵은 양성자 1개)

태오 (1)은 $1.0 \div (3.0 \times 10^{-26})$ 이니까... 3.3×10^{25} 개요. 10을 25번 곱한 수라니, 세다가 수능 끝나겠어요.

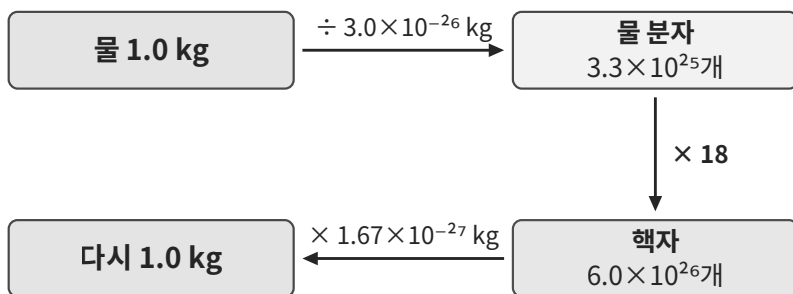
차 교수 계산은 맞았다. (2)는 그림을 보고 세어 보렴.

하린 산소 원자핵에 양성자 8개와 중성자 8개, 수소 두 개에 양성자 1개씩이니까 모두 18개예요. 원자 질량 단위 18과 같네요!

차 교수 그렇지. 그림 (3)은 그림 34-6처럼 사슬로 이어 보자.

태오 $3.3 \times 10^{25} \times 18 =$ 약 6.0×10^{26} 개. 여기에 1.67×10^{-27} kg을 곱하면... 1.0 kg! 처음 무게로 돌아왔어요.

차 교수 모범 답은 (1) 약 3.3×10^{25} 개, (2) 18개, (3) 약 6.0×10^{26} 개, 곱하면 약 1.0 kg이란단. 전자의 질량을 빼고 썼는데도 1.0 kg이 나오지? 물체의 질량은 곧 그 속 핵자의 양이라는 뜻이야.



물체의 질량 = 그 속 핵자의 양

[그림 34-6] 풀이 그림 물 1.0 kg → 물 분자 3.3×10^{25} 개 → 핵자 6.0×10^{26} 개 → 핵자 질량을 곱하면 다시 1.0 kg. 물체의 질량은 그 속 핵자의 수로 거의 정해진다

미숙 저울 눈금 1 kg이 사실은 핵자 6×10^{26} 개의 개수였군요.

과학의 최전선 양성자의 질량과 스핀은 어디서 올까

여기까지 밝혀졌다 — 양성자 질량의 대부분이 쿼크 자체가 아니라 쿼크를 묶는 강한 힘의 에너지에서 온다는 것은, 2008년 슈퍼컴퓨터 계산이 양성자와 중성자의 질량을 실험값 그대로 재현하면서 확인되었다¹⁰. **아직 모른다** — 양성자에는 질량 말고도, 18장에서 전자에게서 본 것처럼 스스로 도는 성질인 스핀이 있다. 쿼크 세 개의 스핀을 더하면 양성자의 스핀이 될 것 같았지만, 1988년 유럽의 뮤온 산란 실험은 쿼크의 스핀이 양성자 스핀의 일부만 설명한다는 것을 보였다¹². 나머지가 어디서 오는지는 ‘양성자 스핀 수수께끼’로 남아 있다. **가설과 연구** — 쿼크를 묶는 글루온이나 양성자 속 쿼크의 움직임이 나머지 몫을 지닌다는 생각이 있다. 30장에서 본 것처럼 빠른 입자를 양성자에 쏘아 속을 들여다보는 방법⁸으로, 그 몫을 하나씩 나누어 재려는 연구가 이어진다.

오늘의 정리

- 질량은 물체에 든 물질의 양(단위 kg)이다. 원자 질량의 99.9 % 이상은 원자핵(양성자·중성자)에 있고, 전자는 양성자의 약 1/1836이다.
- 원자핵의 지름은 원자의 약 10만분의 1이지만 질량은 거의 다 가진다.
- 양성자 질량 가운데 쿼크 자체 질량은 약 1 %뿐이고, 나머지는 쿼크를 묶는 강한 힘의 에너지에서 나온다.
- 원자 질량 단위(약 1.66×10^{-27} kg)는 핵자 하나의 질량과 비슷하다. 물체의 질량은 그 속 핵자의 수로 거의 정해진다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 원자의 질량에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 원자 질량의 대부분은 전자가 차지한다.
 - ② 원자핵은 원자 부피의 대부분을 차지한다.
 - ③ 양성자의 질량은 쿼크 세 개의 질량을 더한 것과 같다.
 - ④ 원자 질량의 99.9 % 이상은 원자핵에 있다.
 - ⑤ 전자는 질량이 없다.
2. 탄소 원자(양성자 6개, 중성자 6개) 1.0×10^{26} 개의 질량은 약 몇 kg인지 원자 질량 단위(1.66×10^{-27} kg)를 써서 구하시오.

이 장의 출처

1. Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 21(125), 669–688. <https://doi.org/10.1080/14786440508637080>
2. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). Fundamentals of physics (11th ed.). Wiley.
3. Tiesinga, E., Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. (2021). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018. Reviews of Modern Physics, 93(2), 025010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025010>
4. Borsanyi, S., Durr, S., Fodor, Z., Hoelbling, C., Katz, S. D., Krieg, S., Lellouch, L., Lippert, T., Portelli, A., Szabo, K. K., & Toth, B. C. (2015). Ab initio calculation of the neutron-proton mass difference. Science, 347(6229), 1452–1455. <https://doi.org/10.1126/science.1257050>
5. Cyburt, R. H., Fields, B. D., Olive, K. A., & Yeh, T. (2016). Big bang nucleosynthesis: Present status. Reviews of Modern Physics, 88(1), 015004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.015004>
6. 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>

7. Gell-Mann, M. (1964). A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters*, 8(3), 214–215. [https://doi.org/10.1016/S0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9163(64)92001-3)
8. Bloom, E. D., Coward, D. H., DeStaebler, H., Drees, J., Miller, G., Mo, L. W., Taylor, R. E., Breidenbach, M., Friedman, J. I., Hartmann, G. C., & Kendall, H. W. (1969). High-Energy Inelastic e – p Scattering at 6° and 10°. *Physica l Review Letters*, 23(16), 930–934. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.930>
9. Particle Data Group, Workman, R. L., Burkert, V. D., Crede, V., Klempt, E., Thoma, U., Tiator, L., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Amsler, C., Antonelli, M., Aschenauer, E. C., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, S., Barnett, R. M., Baudis, L., Bauer, C. W., . . . Zyla, P. A. (2022). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(8), 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>
10. Dürr, S., Fodor, Z., Frison, J., Hoelbling, C., Hoffmann, R., Katz, S. D., Krieg, S., Kurth, T., Lellouch, L., Lippert, T., Szabo, K. K., & Vulvert, G. (2008). Ab Initio Determination of Light Hadron Masses. *Science*, 322(5905), 1224–1227. <https://doi.org/10.1126/science.1163233>
11. Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?. *Annalen der Physik*, 323(13), 639–641. <https://doi.org/10.1002/andp.19053231314>
12. Ashman, J., Badelek, B., Baum, G., Beaufays, J., Bee, C., Benchouk, C., Bird, I., Brown, S., Caputo, M., Cheung, H., Chima, J., Ciborowski, J., Clift, R., Coignet, G., Combley, F., Court, G., D'Agostini, G., Drees, J., Düren, M., . . . Ziemons, K. (1988). A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function g1 in deep inelastic muon-proton scattering. *Physics Letters B*, 206(2), 364–370. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(88\)91523-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(88)91523-7)

35

관성 — 원자들이 모여 만든 버팀

출발점 힘(N) 1장 · 원자의 질량(핵자) 34장

새 개념 관성·제1법칙

이어짐 네 가지 기본 힘 36장 · 등가 원리 38장 · $F = ma$ 44장 · 포물선 운동 46장

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	운동 상태	멈춰 있는지, 어느 쪽으로 얼마나 빠르게 움직이는지를 함께 이르는 것.
2	관성	물체가 지금의 운동 상태를 그대로 지키려는 성질.
3	사고 실험	실제 장치 없이 머릿속에서 조건을 바꿔 가며 결과를 따지는 일.
4	알짜힘	물체에 작용하는 모든 힘을 더한 힘.
5	뉴턴 제1법칙	알짜힘이 0이면 물체가 정지 또는 등속 직선 운동을 이어 간다는 법칙.
6	등속 직선 운동	같은 빠르기로 한 방향으로 곧게 가는 운동.
7	지하 검출기	땅속 깊이 두어 드문 입자의 신호를 기다리는 장치.

8월 첫째 토요일 오후, 과학방 창밖으로 매미 소리가 쏟아졌다. 오전에 34장 공부를 하며 쓴 저울과 쇠구슬이 아직 탁자 위에 있었다. 차 교수가 가방에서 매끈한 천 한 장을 꺼내 탁자 끝에 깔고, 그 위에 물을 반쯤 채운 유리컵을 올렸다. 미숙은 혹시 몰라 걸레를 들고 섰다. 차 교수가 천을 아래로 휩 잡아당기자 천만 빠져나오고 컵은 물 한 방울 흘리지 않고 제자리에 남았다.

모두 우와!

하린 천이 컵 밑을 문지르며 지나갔는데, 컵은 왜 따라오지 않았어요?

차 교수 오늘은 그 까닭을 찾는 날이란다. 원자에서 시작해 보자. 오전에 34장에서 원자의 질량은 거의 다 원자핵에 있고, 물체의 질량은 결국 그 속 양성자·중성자, 곧 핵자가 얼마나 많은가라고 했지? 그 질량이 오늘 이야기의 주인공이란다.

원자의 양이 곧 버팀이다

차 교수 한미숙 씨, 가게에서 빈 수레와 두부 판을 가득 실은 수레를 밀어 보면 어떻던가요?

미숙 가득 실은 수레는 처음 떼기가 힘들어요. 굴러가기 시작하면 이번엔 세우기가 힘들고요. 골목 모퉁이에서 방향 틀기도 어렵죠.

차 교수 바로 그겁니다. 물체는 지금의 운동 상태, 곧 멈춰 있으면 멈춘 채로, 움직이고 있으면 같은 빠르기로 곧게 가려는 성질이 있지요. 이것을 **관성**이라고 합니다. 관성은 질량이 클수록 큼니다^{1,2}.

태오 원자량은 무슨 상관이에요?

차 교수 양성자 하나의 질량이 1.67×10^{-27} kg이니, 1 kg짜리 물체에는 핵자가 약 6×10^{26} 개 들어 있단다. 두부를 가득 실은 수레는 빈 수레보다 핵자가 훨씬 많아. 핵자 하나하나가 운동의 변화에 버티니, 많이 모일수록 버팀도 커지는 거지. 관성은 원자들이 모여 만든 버팀이란다.

차 교수가 탁자 위에 크기가 비슷한 탁구공과 쇠구슬을 나란히 놓았다. 하린이 같은 손가락으로 똑같이 튕기자 탁구공은 탁자 끝까지 쪼르르 굴러갔고, 쇠구슬은 조금 움직이다 말았다. 이번에는 굴러오는 두 공을 손바닥으로 막아 보았다. 탁구공은 툭 하고 멈췄지만 쇠구슬은 손바닥을 묵직하게 밀었다.

차 교수 오전에 저울에 달아 본 것처럼 쇠구슬이 훨씬 무겁지. 쇠 원자의 원자핵에는 핵자가 50개 넘게 들어 있고, 원자도 촘촘히 쌓여 있어. 같은 크기 안에 핵자가 훨씬 많으니 출발시키기도, 멈추기도 어려운 거란다.

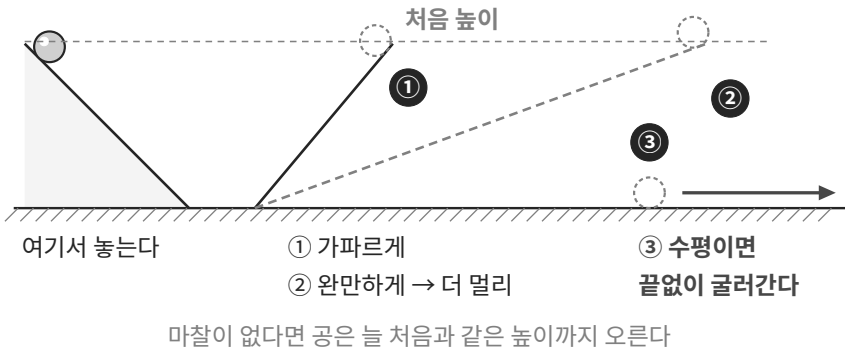
하린 그러니까 무거운 게 잘 안 움직이는 건 원자핵 속 알갱이가 많아서라는 거죠?

차 교수 그렇지. 한 걸음 더 들어가 볼까? 양성자 질량의 대부분은 속에 든 쿼크 세 개의 질량이 아니라 쿼크들을 묶어 두는 에너지에서 나온단다³. 아인슈타인은 물체의 관성이 그 속에 든 에너지에 달려 있다고 했지⁴. 우리 몸이 지닌 관성의 뿌리도 결국 핵자 속 쿼크를 묶는 에너지인 셈이야.

갈릴레이의 빗면 사고 실험

태오 그래도 공을 굴리면 결국 멈추잖아요. 계속 움직이게 하려면 계속 밀어야 하는 거 아니에요?

차 교수 2천 년 가까이 많은 사람이 그렇게 생각했단다. 오늘날 학생들도 “움직이려면 힘이 계속 필요하다”고 흔히 생각한다는 조사가 있어^{5,6}. 이 생각을 처음 깬 사람이 갈릴레이야. 그는 머릿속 실험, 곧 사고 실험을 했지⁷. 그림 35-1을 보렴.



[그림 35-1] 갈릴레이의 빗면 사고 실험 마찰이 없다면 공은 맞은편 빗면을 처음과 같은 높이까지 오른다. 맞은편을 완만하게 할수록 더 멀리 가고, 수평으로 누이면 멈출 까닭이 없어 끝없이 굴러간다(모식도)

차 교수 한쪽 빗면에서 공을 놓으면 맞은편 빗면을 거의 같은 높이까지 올라간단다. 맞은편을 완만하게 하면 같은 높이에 닿으려고 더 멀리 가지. 아예 수평으로 누이면 어떻게 될까?

하린 올라갈 높이에 영영 못 닿으니까... 계속 굴러가요!

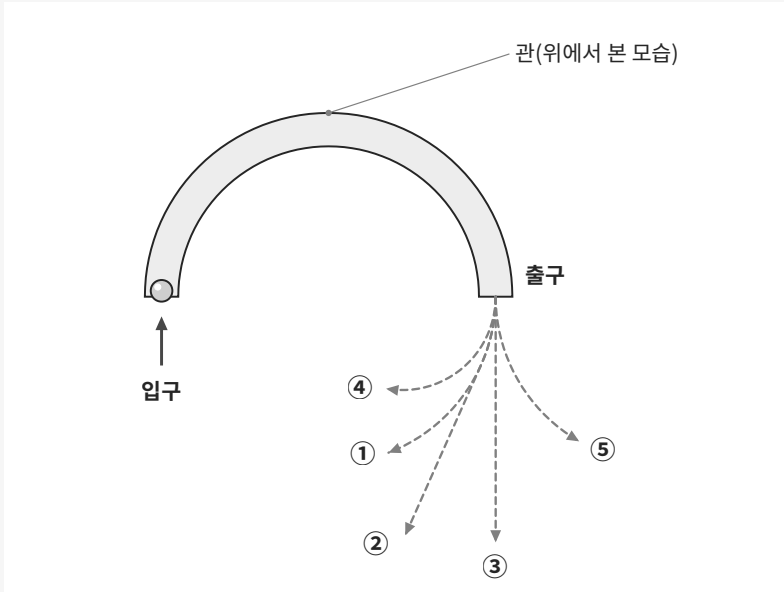
차 교수 그렇지. 실제 공이 멈추는 건 바닥과 공기가 붙잡기 때문이지, 힘이 떨어져서가 아니야^{7,8}. 뉴턴은 이 생각을 1687년 『프린키피아』의 첫째 법칙으로 적었다⁹. 물체에 작용하는 모든 힘을 더한 것을 **알짜힘**이라 하는데, **뉴턴 제1법칙**은 “알짜힘이 0이면 멈춘 물체는 계속 멈춰 있고, 움직이는 물체는 등속 직선 운동을 한다”는 것이야. 관성 법칙이라고도 하지.

태오 시험엔 “관성은 힘이다”가 틀린 보기로 자주 나와요.

차 교수 좋은 기억이구나. 관성은 물체의 성질이지 힘이 아니란다. 힘은 늘 다른 물체가 준다. 움직이는 물체가 계속 가는 데에는 앞으로 미는 힘이 필요 없어.

문제 35-1 휘어진 관을 빠져나온 공

그림 35-2는 수평한 탁자 위에 고정한 반원 모양 관을 위에서 본 모습이다. 쇠구슬을 관 입구로 빠르게 굴러 넣었더니 출구로 빠져나왔다. 출구를 나온 뒤 구슬이 지나가는 길로 가장 알맞은 것은? (마찰과 공기 저항은 무시한다.)



[그림 35-2] 문제 35-1의 그림 위에서 본 반원 모양 관과 출구 뒤의 길 다섯 가지

- ① 관을 따라 돌던 대로 계속 원을 그린다
- ② 처음에는 휘다가 점점 곧아진다
- ③ 출구에서 관이 향하던 방향으로 곧게 간다
- ④ 관의 중심 쪽으로 휘어 들어간다
- ⑤ 관의 바깥쪽으로 휘어 나간다

태오 관 속에서 계속 돌았으니까 도는 버릇이 남아서 ②일 것 같아요. 조금 휘다가 펴지는 거죠.

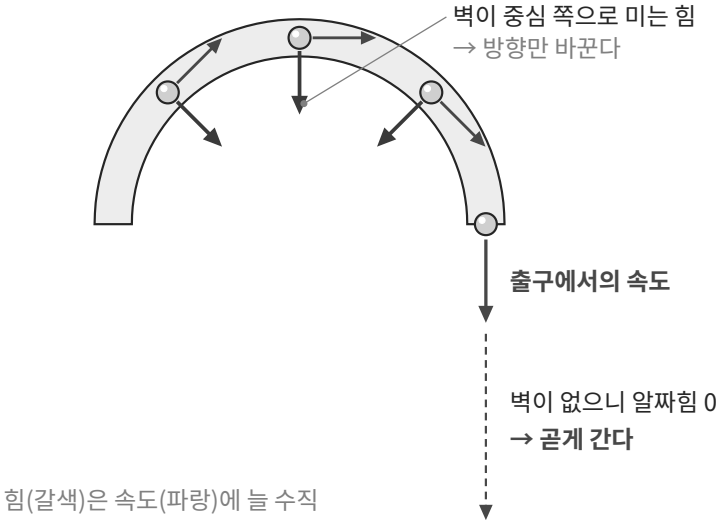
차 교수 그럴듯하구나. 이런 답을 하는 어른이 많다는 연구도 있단다¹⁰. 조건을 다시 읽어 보자. 관 안에서 구슬을 휘게 한 건 무엇이었지?

하린 관 벽이요. 벽이 구슬을 안쪽으로 밀어서 방향을 계속 바꿨어요.

차 교수 그럼 출구를 나온 뒤에도 그 벽이 있지?

하린 없어요. 탁자 위라 수평 방향으로로는 알짜힘이 0이에요.

차 교수 계획이 섰구나. 알짜힘이 0이면 제1법칙에 따라 그 순간의 빠르기와 방향을 그대로 지닌단다. 그림 35-3처럼 출구 순간의 속도는 원의 접선 방향이야.



[그림 35-3] 풀이 그림 관속에서는 벽이 중심 쪽으로 미는 힘이 방향을 바꾼다. 출구를 나오는 순간 그 힘이 사라지므로 구슬은 출구에서의 속도 방향(원의 접선)으로 곧게 간다

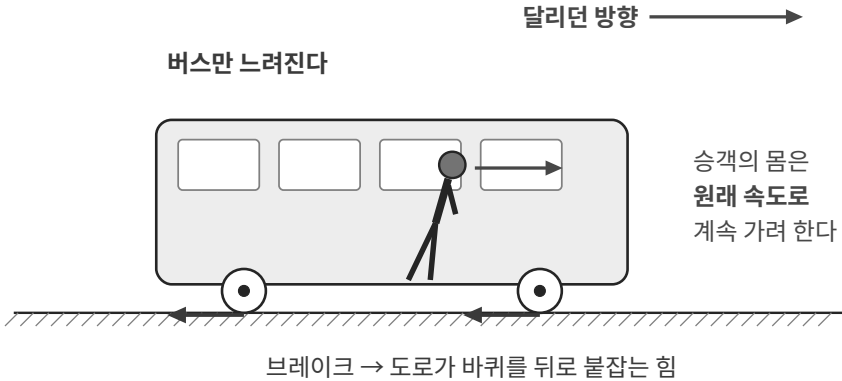
태오 휘는 버릇 같은 건 없는 거네요. 휘게 하는 힘이 없으면 곧게 가요.

차 교수 정답은 ③이란다. 되돌아보면, 관성은 지금 운동을 그대로 지키려는 성질이 지닌 운동을 기억하는 성질이 아니지.

미숙 김밥 말 때 발을 탁 놓으면 김밥이 옆으로 굴러가는 것도 그렇겠네요.

버스 안에서 쏘리는 몸

차 교수 이제 식탁보로 돌아가 보자꾸나. 컵의 핵자들은 멈춰 있었지. 천이 아주 짧은 시간만 컵 밑을 문지르고 지나가니, 컵의 운동 상태를 바꿀 틈이 거의 없었던 거란다. 버스도 마찬가지야. 그림 35-4를 보렴.



[그림 35-4] 급정거하는 버스 브레이크가 바퀴를 거쳐 버스를 뒤쪽으로 붙잡아 버스만 느려진다. 서 있는 승객의 몸은 앞으로 미는 힘이 없는데도 원래 속도로 계속 가려 하므로 버스 안에서 앞으로 쏠린다(모식도)

하린 앞으로 넘어지니까 앞으로 미는 힘이 생긴 줄 알았어요.

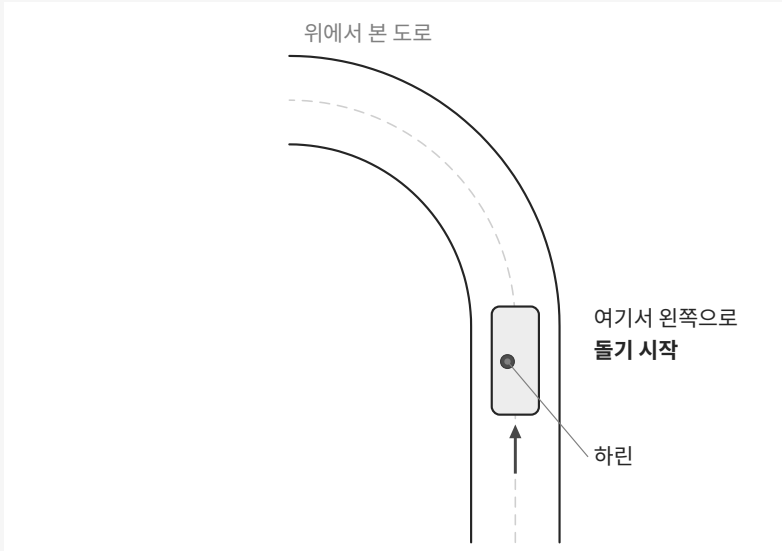
차 교수 그림에서 힘 화살표는 버스에만 있지? 느려진 것은 버스이고, 몸은 원래 빠르기를 지키려 할 뿐이란다. 그래서 손잡이를 잡아 몸에도 뒤쪽 힘을 줘야 하지. 자동차의 안전띠도 같은 일을 한단다. 48장에서 자세히 보자꾸나.

태오 우주 정거장처럼 몸이 둥둥 떠다니는 곳에서는 관성도 없어지나요?

차 교수 아니란다. 우주 정거장 안에서도 무거운 짐을 밀면 여전히 묵직하고, 날아오는 짐에 부딪히면 아프지. 둥둥 떠도 핵자의 양은 그대로이니 관성도 그대로야. 무게와 질량이 어떻게 다른지는 38장에서 자세히 따져 보자꾸나.

문제 35-2 왼쪽으로 도는 버스

그림 35-5처럼 똑바로 달리던 버스가 같은 빠르기로 왼쪽으로 크게 돌기 시작했다. 손잡이를 잡지 않고 서 있던 하린의 몸은 버스 안에서 어느 쪽으로 쏠리는지 쓰고, 그 까닭을 관성으로 설명하시오.



[그림 35-5] 문제 35-2의 그림 위에서 본 도로. 똑바로 달리던 버스가 왼쪽으로 돌기 시작하는 순간

태오 버스가 왼쪽으로 도니까 몸도 따라 왼쪽이요.

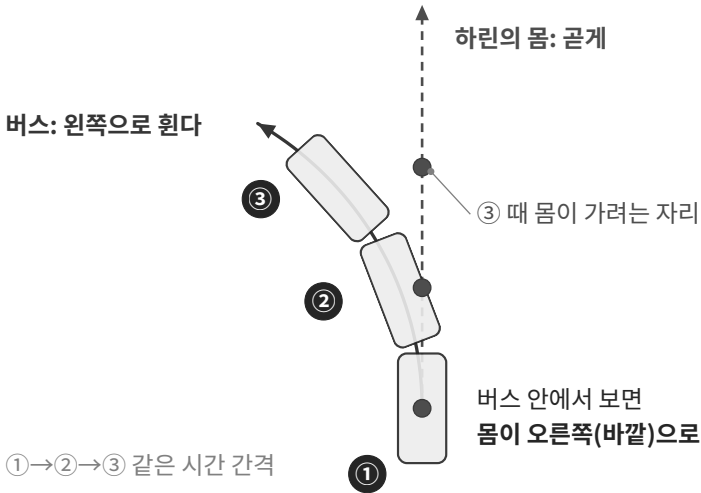
차 교수 되문자꾸나. 버스를 왼쪽으로 휘게 한 힘은 누가 누구에게 준 거지?

태오 도로가 바퀴에 쫓겼죠. 버스한테요.

차 교수 그럼 하린의 몸에도 그 힘이 바로 전해지니?

하린 아니요. 저는 손잡이를 안 잡았으니 제 몸엔 옆으로 미는 힘이 거의 없어요.

차 교수 계획을 세우자. 땅에서 보면 몸은 어떻게 가려 하지? 그림 35-6을 보렴.



[그림 35-6] 풀이 그림 땅에서 보면 하린의 몸은 도는 순간의 속도 방향으로 곧게 가려 하고, 버스는 왼쪽으로 휘어 간다. 그래서 버스 안에서 보면 몸이 오른쪽(바깥쪽)으로 쏠린다

하린 몸은 곧게 가려 하는데 버스가 왼쪽으로 빠져나가니, 버스 안에서 보면 제가 오른쪽으로 밀려나는 거예요.

차 교수 모범 답은 “오른쪽(도는 방향의 바깥쪽)으로 쏠린다. 몸은 관성 때문에 원래 방향으로 곧게 가려 하는데 버스만 왼쪽으로 휘기 때문이다”란다.

태오 오른쪽으로 미는 힘이 생긴 게 아니라, 제 몸이 곧게 가는 사이 버스가 돌아 나간 거네요.

미숙 그래서 배달 오토바이가 모퉁이에서 짐 상자를 꼭 묶는 거군요.

차 교수 그렇습니다. 풀이를 그림과 함께 따라가 보면 이런 생각이 오래 남는다는 연구도 있지요^{11,12}.

과학의 최전선 기본 입자의 질량은 어디서 올까

여기까지 밝혀졌다 — 관성의 크기는 질량이고, 아인슈타인은 물체의 관성이 그 속에 든 에너지에 달려 있음을 보였다⁴. 우리 몸 질량의 대부분은 핵자 속 쿼크를 묶는 에너지다³. 한편 전자와 쿼크 같은 기본 입자 자신의 질량은 30장에서 본 힉스 장에서 온다고 보는데, 2012년 힉스 입자가 발견되면서 이 생각이 뒷받침되었다^{13,14}. **아직 모른다** — 1998년 일본의 지하 검출기 슈퍼카미오칸데는 질량이 없다고 여겨 온 중성미자에도 아주 작은 질량이 있음을 밝혔다. 기본 입자와 힘을 설명해 온 이론(표준 모형)이 설명하지 못한 첫 증거였다¹⁵. 중성미자의 질량이 어디서 오는지, 왜 다른 입자보다 턱없이 작은지는 아직 모른다. **가설과 연구** — 중성미자가 다른 방식으로 질량을 얻는다는 가설이 여럿 나와 있고, 물리학자들은 그 가설이 예언하는 새 입자와 현상을 찾고 있다¹⁶.

오늘의 정리

- 물체의 질량은 원자핵 속 핵자의 양이고, 1 kg에는 핵자가 약 6×10^{26} 개 있다.
- **관성**은 운동 상태를 그대로 지키려는 성질이며, 질량(핵자의 양)이 클수록 크다.
- 뉴턴 제1법칙: 알짜힘이 0이면 멈춘 물체는 계속 멈춰 있고, 움직이는 물체는 등속 직선 운동을 한다.
- 관성은 힘이 아니다. 움직이는 물체가 계속 가는 데 앞으로 미는 힘은 필요 없다.

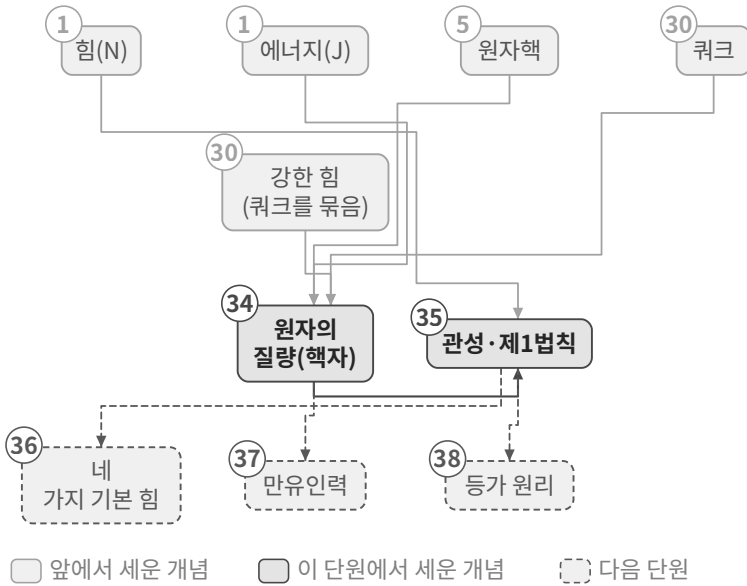
스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 관성에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 관성은 운동 방향으로 작용하는 힘이다.
 - ② 멈춘 물체에는 관성이 없다.
 - ③ 질량이 클수록 운동 상태를 바꾸기 어렵다.
 - ④ 알짜힘이 0이면 움직이던 물체는 곧 멈춘다.
 - ⑤ 우주 정거장 안처럼 둥둥 뜨는 곳에서는 관성도 없다.
2. 망치 자루 끝을 바닥에 세게 내리치면 헐거워진 쇠머리가 자루에 더 깊이 박힌다. 그 까닭을 관성으로 설명하시오.

이 장의 출처

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). *Fundamentals of physics* (11th ed.). Wiley.
- Hewitt, P. G. (2015). *Conceptual physics* (12th ed.). Pearson.
- Dürr, S., Fodor, Z., Frison, J., Hoelbling, C., Hoffmann, R., Katz, S. D., Krieg, S., Kurth, T., Lellouch, L., Lippert, T., Szabo, K. K., & Vulvert, G. (2008). Ab Initio Determination of Light Hadron Masses. *Science*, 322(5905), 1224–1227. <https://doi.org/10.1126/science.1163233>
- Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?. *Annalen der Physik*, 323(13), 639–641. <https://doi.org/10.1002/andp.19053231314>
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056–1065. <https://doi.org/10.1119/1.14031>
- Galilei, G. (1914). *Dialogues concerning two new sciences* (H. Crew & A. de Salvio, Trans.). Macmillan. (Original work published 1638)
- Heilbron, J. L. (2010). *Galileo*. Oxford University Press.
- Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical principles of natural philosophy* (I. B. Cohen & A. Whitman, Trans.). University of California Press. (Original work published 1687)
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Green, B. (1980). Curvilinear Motion in the Absence of External Forces: Naïve Beliefs About the Motion of Objects. *Science*, 210(4474), 1139–1141. <https://doi.org/10.1126/science.210.4474.1139>
- Sweller, J., & Cooper, G. A. (1985). The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra. *Cognition and Instruction*, 2(1), 59–89. https://doi.org/10.1207/s1532690xcio201_3
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_6
- Aad, G., Abajyan, T., Abbott, B., Abdallah, J., Abdel Khalek, S., Abdelalim, A., Abidinov, O., Aben, R., Abi, B., Abolins, M., AbouZeid, O., Abramowicz, H., Abreu, H., Acharya, B., Adamczyk, L., Adams, D., Addy, T., Adelman, J., Adomeit, S., . . . Zwalinski, L. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>
- Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A., Tumasyan, A., Adam, W., Aguilo, E., Bergauer, T., Dragicevic, M., Erö, J., Fabjan, C., Friedl, M., Frühwirth, R., Ghete, V., Hammer, J., Hoch, M., Hörmann, N., Hrubec, J., Jeitler, M., Kiesenhofer, W., . . . Wenman, D. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716(1), 30–61. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>
- Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E., Inoue, K., Ishihara, K., Ishino, H., Itow, Y., Kajita, T., Kameda, J., Kasuga, S., Kobayashi, K., Kobayashi, Y., Koshio, Y., Miura, M., Nakahata, M., Nakayama, S., Okada, A., Okumura, K., Sakurai, N., . . . Young, K. K. (1998). Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. *Physical Review Letters*, 81(8), 1562–1567. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562>
- Particle Data Group, Workman, R. L., Burkert, V. D., Crede, V., Klempt, E., Thoma, U., Tiator, L., Agashe, K., Aielli, G., Allanach, B. C., Amsler, C., Antonelli, M., Aschenauer, E. C., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, S., Barnett, R. M., Baudis, L., Bauer, C. W., . . . Zyla, P. A. (2022). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(8), 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>

제8부 정리 — 개념은 이렇게 이어진다



[제8부] 단원 마무리 — 지식 그래프 이 단원에서 세운 개념이 서로 어떻게 이어지고(파란 화살표), 다음 단원의 어떤 개념으로 넘어가는지(금색 점선) 보여 준다. 원 속 숫자는 그 개념을 세운 장이다

제8부 단원 마무리 — 수능형 문제

이 단원(34~35장)에서 배운 것으로 풀어 보자. 실제 수능 기출과 평가원 예시 문항을 바탕으로 상황·수치·그림·문장을 새로 쓴 문제다(출처는 바탕이 된 문항). 먼저 혼자 풀고, 다음 쪽 풀이에서 확인하자.

1. 출처: 2024학년도 대학수학능력시험 물리학 I 2번 변형

그림은 양성자, 중성자, 전자, 헬륨-4 원자핵 한 개의 질량을 원자 질량 단위(u)로 나타낸 것이다. 헬륨-4 원자핵은 양성자 2개와 중성자 2개로 되어 있고, 헬륨-4 원자는 이 원자핵과 전자 2개로 되어 있다.

양성자	중성자	전자	헬륨-4 원자핵
1.00728 u	1.00866 u	0.000549 u	4.00151 u

[문제 1] 입자 네 가지의 질량(원자 질량 단위 u)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보 기 >

- ㄱ. 헬륨-4 원자 한 개의 질량에서 전자 2개가 차지하는 비율은 1%보다 작다.
- ㄴ. 헬륨-4 원자핵의 질량은 양성자 2개와 중성자 2개의 질량을 더한 값과 같다.
- ㄷ. 양성자 한 개의 질량은 전자 한 개의 질량의 1000배보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

2. 출처: 2023학년도 대학수학능력시험 물리학 I 9번 변형

남한강 얼음판(마찰 없는 수평면)에 정지해 있던 썰매 A, B, C를 하린이 차례로 같은 크기의 힘으로 1초 동안 밀고 손을 떼었다. 표는 각 썰매의 민 직후 속력과 손을 떼 지 3초 뒤 속력을 적은 것이다.

썰매	민 직후 속도	손을 떼 지 3초 뒤 속도
A	3.0 m/s	3.0 m/s
B	1.5 m/s	1.5 m/s
C	1.0 m/s	1.0 m/s

[문제 2] 같은 힘으로 1초 동안 민 썰매 A, B, C의 속도

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 공기 저항은 무시한다.)

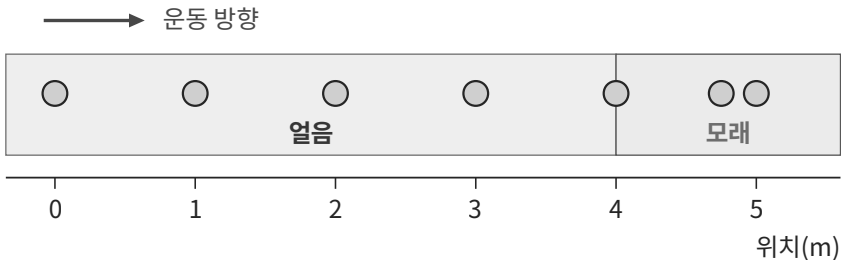
<보 기>

- ㄱ. 세 썰매 가운데 관성이 가장 큰 것은 C이다.
- ㄴ. 손을 떼 뒤에도 A가 3초 넘게 움직이는 것은 하린의 손이 준 힘이 A 속에 남아 계속 작용하기 때문이다.
- ㄷ. 손을 떼 뒤 B에 작용하는 알짜힘의 방향은 B의 운동 방향과 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

3. 출처: 2022학년도 대학수학능력시험 물리학 I 13번 변형

그림은 얼음판 위를 미끄러지던 썰매가 모래를 뿌려 둔 곳으로 들어가 멈출 때까지를 0.5초 간격의 섬광 사진으로 찍어, 썰매의 위치를 자 위에 옮겨 나타낸 것이다. 썰매의 위치 4 m에서 모래 구간으로 들어갔다.



[문제 3] 0.5초 간격으로 찍은 썰매의 위치(얼음 구간과 모래 구간)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 얼음판은 매끄럽고, 공기 저항은 생각하지 않는다.)

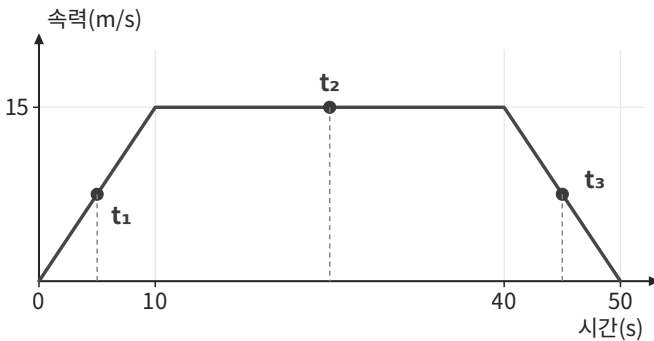
<보 기>

- ㄱ. 얼음 구간에서 펍에 작용하는 알짜힘의 방향은 펍의 운동 방향이다.
 ㄴ. 모래 구간에서 펍이 느려지는 것은 모래가 펍에 운동 방향과 반대 방향으로 힘을 작용하기 때문이다.
 ㄷ. 모래가 없어 얼음판이 계속 이어졌다면, 펍은 지니고 있던 관성이 조금씩 닳아 없어져 결국 멈춘다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

4. 출처: 2022학년도 대학수학능력시험 물리학 I 16번 변형

그래프는 하린이 탄 버스가 정류장을 떠나 곧은 도로를 달리다가 다음 정류장에 멈출 때까지 속력을 시간에 따라 나타낸 것이다. 하린은 천장 봉에 매달린 손잡이 옆에 서 있고, t_1 , t_2 , t_3 은 그래프 위에 표시한 세 순간이다.

[문제 4] 버스의 속력-시간 그래프와 세 순간 t_1 , t_2 , t_3

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

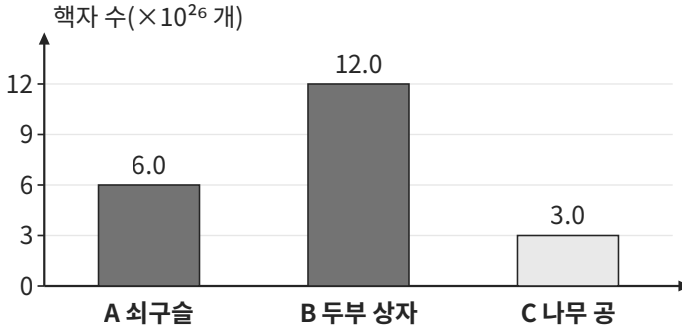
<보 기>

- ㄱ. t_2 일 때 버스에 작용하는 알짜힘은 0이다.
 ㄴ. t_3 일 때 손잡이는 버스의 앞쪽으로 기울어 있다.
 ㄷ. t_1 일 때 하린의 몸이 뒤로 쏠리는 것은 하린의 몸이 원래의 운동 상태를 지키려 하기 때문이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

5. 출처: 2026학년도 대학수학능력시험 물리학 I 12번 변형

그래프는 소백두부 가게에 있는 물체 A, B, C 속에 들어 있는 핵자(양성자와 중성자)의 수를 막대로 나타낸 것이다. 핵자 한 개의 질량은 1.67×10^{-27} kg이고, 전자의 질량은 무시한다.



[문제 5] 물체 A, B, C 속 핵자 수(막대그래프)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보 기 >

- ㄱ. 질량은 B가 C의 2배이다.
- ㄴ. 셋을 같은 크기의 힘으로 같은 시간 동안 밀 때 속도가 가장 적게 변하는 것은 B이다.
- ㄷ. A를 달에 가져가도 A의 핵자 수와 관성은 변하지 않는다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

제8부 수능형 문제 풀이 — 단위 내용으로 이해하기

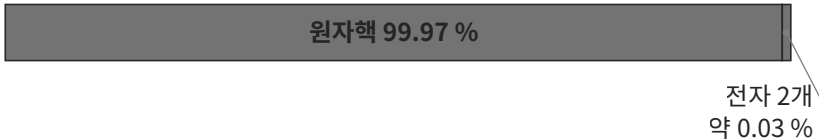
1 정답 ③

ㄱ은 옳다. 헬륨-4 원자의 질량은 원자핵 4.00151 u에 전자 2개 0.0011 u를 더한 값이다. 전자의 몫은 $0.0011 \div 4.0026$, 약 0.03 %로 1 %에 한참 못 미친다. 34장 그림 34-1에서 탄소 원자의 전자 몫이 0.03 %였던 것과 같은 크기다.

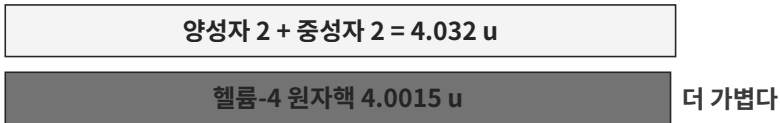
ㄴ은 옳지 않다. 낱알의 양성자 2개와 중성자 2개를 더하면 4.032 u인데, 뭉친 헬륨-4 원자핵은 4.0015 u로 오히려 가볍다. “부품 무게를 더하면 전체 무게”라는 생각은 원자핵에서는 맞지 않는다. 34장에서 양성자 질량의 대부분이 쿼크 자체가 아니라 쿼크를 묶는 에너지에서 나온다고 했던 것처럼, 질량과 묶는 에너지는 얽혀 있다. 줄어든 질량이 어디로 갔는지는 62장(질량 결손)에서 다시 만난다.

ㄷ은 옳다. $1.00728 \div 0.000549 \approx 1835$ 로, 34장의 “양성자는 전자보다 약 1836배 무겁다”와 같다.

(가) 헬륨-4 원자 하나의 질량



(나) 낱알의 핵자 4개 합과 뭉친 원자핵



[풀이 1] (가) 헬륨-4 원자 질량의 99.97 %는 원자핵에 있다 (나) 뭉친 원자핵은 낱알의 핵자 합보다 가볍다

태오 34장에서 제가 “부품 무게를 더하면 전체 무게”라고 했다가 틀렸던 게 여기 또 나오네요.

차 교수 그래서 수능이 좋아하는 함정이란다. 표의 숫자를 직접 더해 보면 바로 보이지.

미숙 두부도 콩 무게 다 더한 것보다 가벼운데, 그건 물이 빠져서고… 원자핵은 에너지가 빠져서 가볍군요.

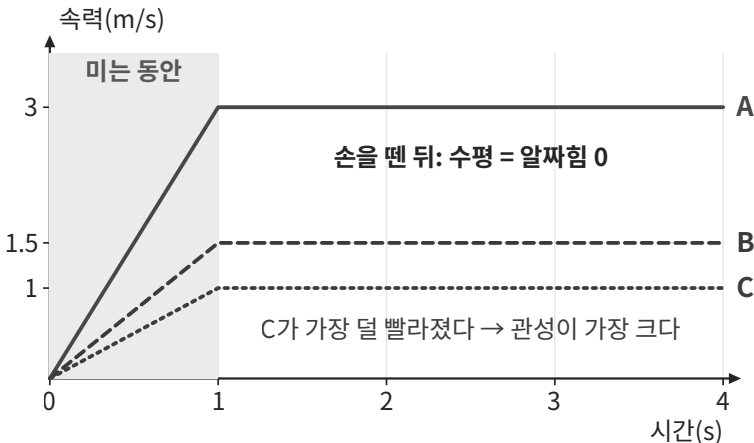
함정: 원자의 질량이 거의 다 원자핵에 있다는 것(ㄱ)과, 원자핵이 부품 합과 정확히 같다는 것(ㄴ)은 다른 말이다.

2 정답 ①

ㄱ은 옳다. 세 썰매는 같은 힘을 같은 1초 동안 받았다. 그런데 A는 3.0 m/s, B는 1.5 m/s, C는 1.0 m/s만큼만 빨라졌다. 같은 힘에 운동 상태가 가장 덜 바뀐 C가 “지금 상태를 지키려는 버팀”, 곧 관성이 가장 크다. 35장에서 관성은 물체 속 핵자의 양, 곧 질량이 클수록 크다고 했다. 44장의 $F = ma$ 로 따지면 질량비는 A : B : C = 1 : 2 : 3이다.

ㄴ은 옳지 않다. 손을 떼 뒤 3초 동안 속력이 그대로인 것이 바로 증거다. 힘이 남아 있다면 속력이 계속 변했을 것이다. 35장의 뉴턴 제1법칙대로, 수평 방향의 힘이 없으니 썰매는 손을 떼 순간의 속도를 그대로 지닌다. “움직이려면 힘이 계속 필요하다”는 생각은 35장에서 갈릴레이가 깬 옛 생각이다.

ㄷ은 옳지 않다. 손을 떼 뒤 B는 등속 직선 운동을 하므로 알짜힘은 0이고, 방향이라 할 것이 없다.



[풀이 2] 속력-시간 그래프 미는 1초 동안만 빨라지고, 손을 떼 뒤에는 세 썰매 모두 수평선(등속)이다

하린 제가 셋 다 똑같이 밀었는데 C만 굼뻤어요. C에 핵자가 제일 많은 거죠?

차 교수 그렇지. 같은 힘에 덜 바뀌는 쪽이 관성이 크단다.

미숙 빈 수레는 잘 나가고 두부 가득 실은 수레는 꿈쩍 않는 거랑 같네요.

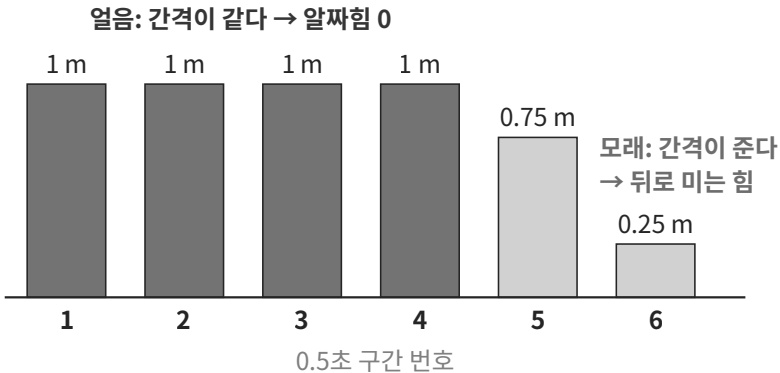
함정: “손을 떼도 힘이 남아서 간다”는 표현이 나오면 틀린 말이다. 남은 것은 힘이 아니라 속도다.

3 정답 ②

ㄱ은 옳지 않다. 얼음 구간에서 0.5초마다 간 거리는 1 m씩으로 모두 같다. 같은 시간에 같은 거리를 가니 등속 직선 운동이고, 35장의 뉴턴 제1법칙에 따라 알짜힘은 0이다. 앞으로 가는데 앞으로 미는 힘이 있어야 한다는 생각은 틀렸다.

ㄴ은 옳다. 모래 구간에서는 0.5초마다 간 거리가 0.75 m, 0.25 m로 줄다가 멈춘다. 운동 상태(속도)가 바뀌었으니 힘이 작용한 것이고, 느려졌으니 그 힘은 운동 방향의 반대쪽이다. 이 힘이 바로 40장에서 배울 마찰력이다.

ㄷ은 옳지 않다. 관성은 쓰면 닳는 연료가 아니라 물체 속 핵자의 양이 정하는 성질이다(35장). 얼음판이 끝없이 이어지고 마찰과 공기 저항이 없다면 펍은 2 m/s로 끝없이 간다. 35장 그림 35-1에서 갈릴레이가 떠올린, 수평으로 끝없이 굴러가는 공과 같다.



[풀이 3] 0.5초마다 간 거리 얼음에서는 1 m로 같고(알짜힘 0), 모래에서는 0.75 m, 0.25 m로 줄어든다(운동 반대 방향의 힘)

태오 섬광 사진은 점 사이 간격만 보면 되네요. 같으면 힘이 없고, 줄면 뒤에서 잡는 힘이 있고요.

차 교수 그렇지. 42장에서 이런 기록으로 속력과 가속도를 재는 법을 더 배운단다.

미숙 썰매가 눈밭에서 멈추는 것도 힘이 떨어져서가 아니라 눈이 붙잡아서군요.

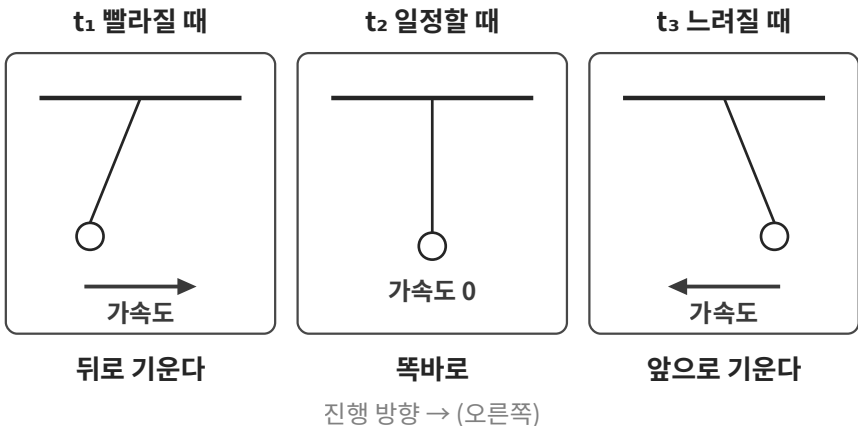
함정: “멈추는 것은 힘(또는 관성)이 다 떨어져서”라는 보기는 거의 늘 틀린 말이다. 멈추게 하는 것은 운동 반대 방향의 힘이다.

4 정답 ⑤

ㄱ은 옳다. t_2 는 그래프가 수평인 구간, 곧 버스가 일정한 속력으로 곧게 달리는 때다. 속도가 변하지 않으니 엔진이 바퀴를 거쳐 앞으로 미는 힘과 공기·노면의 저항이 비껴 알짜힘이 0이다(35장 제1법칙).

ㄴ은 옳다. t_3 은 속력이 줄어드는 구간이다. 버스는 브레이크로 붙잡히지만 손잡이와 하린의 몸은 원래 속도로 계속 가려 하므로 앞으로 기운다. 35장 그림 35-4의 급정거 버스와 같다.

ㄷ은 옳다. t_1 은 속력이 늘어나는 구간이다. 바닥이 발을 앞으로 끌고 가는데, 몸 윗부분은 원래 운동 상태(그 순간의 속도)를 지키려 해서 뒤에 남는다. 손잡이도 같은 까닭으로 뒤로 기운다.



[풀이 4] 세 순간의 손잡이 가속도가 앞이면 뒤로, 0이면 똑바로, 가속도가 뒤면 앞으로 기운다

미숙 배달 오토바이 뒤에 두부 상자를 묶을 때 출발할 땐 뒤로, 설 땐 앞으로 쏠리는 거랑 똑같네요.

하린 손잡이는 늘 가속도의 반대쪽으로 기우는 거예요. 그래프에서 기울기가 오르막이면 뒤로, 내리막이면 앞으로요.

차 교수 그래서 손잡이 하나로 버스의 가속도 방향을 알 수 있지. 44장에서 가속도와 알짜힘의 방향이 같다는 걸 배우면 더 분명해진다.

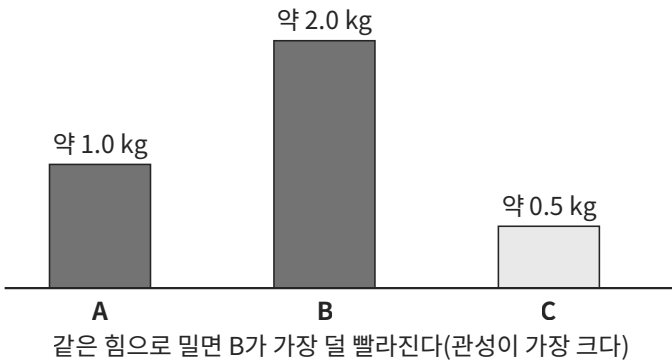
함정: “뒤로 쏠린다 = 뒤로 미는 힘이 있다”가 아니다. 쏠림은 힘이 아니라 관성 때문이다. 또 속력이 큰 t_2 가 아니라 속력이 변하는 t_1, t_3 에서 쏠린다.

5 정답 ④

ㄱ은 옳지 않다. 질량은 핵자 수 $\times$ 핵자 질량이다. A는 $6.0 \times 10^{26} \times 1.67 \times 10^{-27} \approx 1.0$ kg, B는 약 2.0 kg, C는 약 0.5 kg이다. 막대 높이도 12.0과 3.0이니 B는 C의 2배가 아니라 4배다. 34장 그림 34-6에서 물 1 kg이 핵자 6×10^{26} 개였던 것과 같은 셈이다.

ㄴ은 옳다. 35장에서 관성은 질량, 곧 핵자의 양이 클수록 크다고 했다. 같은 힘을 같은 시간 동안 주면 핵자가 가장 많은 B의 속도가 가장 적게 변한다.

ㄷ은 옳다. 달에 가도 물체 속 원자핵은 그대로이므로 핵자 수와 질량, 관성은 변하지 않는다. 바뀌는 것은 달이 당기는 힘, 곧 무게다(38장).



[풀이 5] 핵자 수로 구한 질량 핵자가 가장 많은 B가 관성이 가장 크다

하린 저울 눈금이 사실은 핵자 개수를 세는 거였죠.

태오 그럼 우주 정거장에서 둥둥 떠도 B는 여전히 밀기 힘들겠네요.

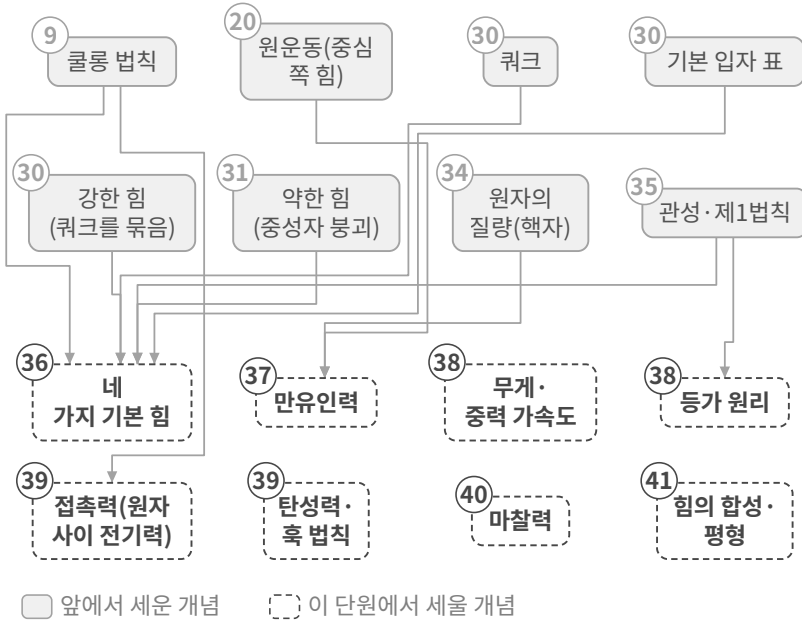
차 교수 그렇지. 35장에서 말했듯 둥둥 떠도 핵자의 양은 그대로이니 관성도 그대로란다.

함정: 막대 칸 수를 대충 보고 배수를 틀리기 쉽다. 축의 눈금($\times 10^{26}$)을 먼저 읽고 나누자. 또 질량(kg)과 무게(N)를 섞으면 ㄷ을 틀린다.

힘의 정체



제9부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



[제9부] 단위 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

네 가지 기본 힘 — 원자를 붙잡는 힘들

출발점 쿨롱 법칙 9장 · 쿼크 30장 · 기본 입자 표 30장 · 강한 힘(쿼크를 묶음) 30장 · 약한 힘(중성자 붕괴) 31장 · 관성·제1법칙 35장

새 개념 네 가지 기본 힘

이어질 만유인력 37장 · $E = mc^2$ · 질량 결손 62장

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	분자	원자끼리 전기력으로 묶여 이룬 알갱이.
2	전자기력	전기력과 자기력을 한 뿌리로 묶어 부르는 힘.
3	작용 거리	힘이 미치는 거리의 범위.
4	반중성미자	베타 붕괴 때 전자와 함께 튀어나오는, 중성미자의 반입자.
5	베타 붕괴	약한 힘으로 중성자가 양성자로 바뀌며 전자와 반중성미자가 나오는 현상.
6	중력	질량을 가진 모든 것이 서로 당기는, 네 기본 힘 가운데 가장 약한 힘.
7	기본 힘	자연의 모든 힘을 설명하는 강한 힘·전자기력·약한 힘·중력의 넷.
8	대통일 이론	강한 힘·전자기력·약한 힘을 더 큰 하나의 힘으로 묶으려는 가설.

8월 셋째 토요일 밤, 넷은 소백산 연화봉의 천문대 마당에 섰다. 한낮의 더위가 거짓말처럼 서늘한 바람이 불었고, 머리 위로 은하수가 강물처럼 흘렀다. 남쪽 하늘에는 목성이 유난히 밝게 떠 있었다. 망원경을 맞추던 차 교수가 돌아서며 손전등을 켰다.

하린 선생님, 저 별들도, 우리 몸도 다 원자로 되어 있잖아요. 그 원자는 누가 붙잡고 있어서 흩어지지 않아요?

차 교수 오늘 밤 딱 맞는 질문이구나. 원자에서 시작해 보자. 34장에서 원자 질량의 거의 전부가 원자핵에 있다고 했고, 9장에서는 같은 전하끼리 서로 민다는 쿨롱 법칙을 배웠지¹. 이 둘을 나란히 놓으면 이상한 점이 하나 보인단다.

원자핵은 왜 터지지 않을까

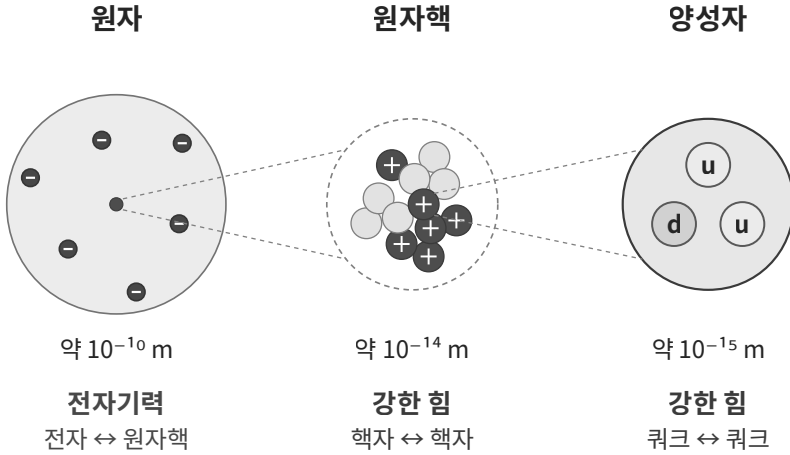
태오 원자핵에는 양성자가 여러 개 있으니까... 다 + 전하잖아요. 서로 엄청 밀어낼 텐데요.

차 교수 바로 그거란다. 원자핵은 원자의 약 10만분의 1 크기라 양성자들이 아주 가까이 붙어 있어². 쿨롱 법칙으로는 거리가 가까울수록 미는 힘이 커지지. 그런데도 원자핵은 멀쩡해. 그렇다면 전기력보다 더 센, 당기는 힘이 있어야 하지.

하린 그게 뭐예요?

차 교수 **강한 힘**이란다. 양성자·중성자 속에서 쿼크 세 개를 묶고, 그 힘이 새어나와 이웃한 핵자끼리도 붙잡지^{3,4}. 양성자 질량의 대부분이 이 묶는 에너지에서 나온다는 것도 34장에서 보았지⁵. 다만 강한 힘은 원자핵 크기, 곧 10^{-15} m쯤 안에서만 작용하고 조금만 멀어져도 사라진단다⁶.

차 교수 한 층 밖으로 나가 보자. 원자핵과 전자를 묶어 원자를 만들고, 원자끼리 묶어 분자를 만드는 힘은 전기력이야. 전류가 만드는 자기력과 전기력은 한 뿌리라서 둘을 합쳐 **전자기력**이라 부른단다⁷. 그림 36-1을 보렴. 원자를 겹겹이 들여다본 모습이야.



[그림 36-1] 원자를 붙잡는 힘들 원자 속 전자를 원자핵에 묶는 것은 전자기력, 원자핵 속 핵자끼리와 핵자 속 쿼크를 묶는 것은 강한 힘이다. 크기 비율은 실제와 다르다(모식도)

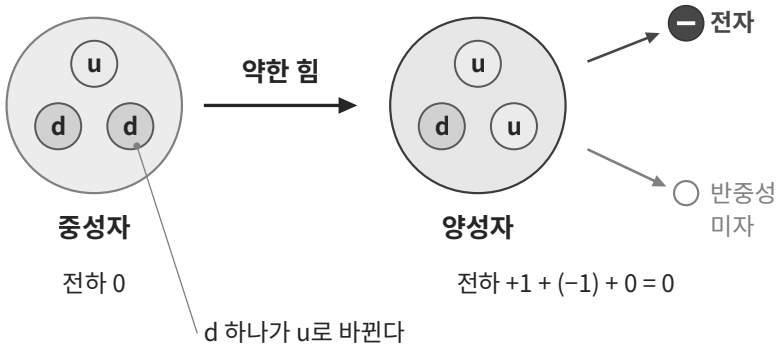
미숙 두부 만들 때 간수를 넣으면 콩물이 엉기잖아요. 그것도 전자기력이에요?

차 교수 그렇습니다. 분자끼리 엉기고 붙는 일은 거의 다 원자 속 전자가 주고받는 전자기력이지요. 부엌에서 보는 힘은 대부분 전자기력입니다. 맷돌을 손으로 미는 힘도, 두부 판이 미끄러지지 않게 붙잡는 마찰도 뿌리를 캐면 원자 속 전자끼리의 전자기력이에요. 그건 39장과 40장에서 자세히 보겠습니다.

하린 그러니까 원자 안쪽 깊은 곳은 강한 힘이, 원자 바깥 껍질은 전자기력이 맞는 거죠?

약한 힘과 중력

차 교수 맞았다. 그런데 원자핵에는 붙잡는 일 말고 다른 일을 하는 힘도 있단다. 셋째는 **약한 힘**이란다. 이름처럼 약하고 작용 거리도 원자핵보다 훨씬 짧아⁸. 이 힘은 붙잡는 대신 입자를 바꾼단다. 중성자 속 아래 쿼크 하나가 위 쿼크로 바뀌면 중성자가 양성자가 되고, 전자와 반중성미자가 튀어나오지. 이것이 **베타 붕괴**야. 그림 36-2를 보렴.



[그림 36-2] 베타 붕괴 약한 힘 때문에 중성자(udd)의 아래 쿼크 하나가 위 쿼크로 바뀌어 양성자(uud)가 되고, 전자와 반중성미자가 나온다. 전하의 합은 앞뒤 모두 0이다(모식도)

태오 전하가 0에서 +1이 되는데, 전자가 -1을 가져가니까 합은 그대로네요. 7장 전하량 보존이요!

차 교수 잘 있었구나. 태양도 약한 힘 덕에 빛난단다. 태양 중심에서 수소가 헬륨이 되려면 양성자 일부가 중성자로 바뀌어야 하거든^{6,9}. 그때 나온 중성미자를 땅속 검출기가 실제로 잡았지¹⁰.

차 교수 마지막이 **중력**이야. 질량을 가진 모든 것이 서로 당기는 힘이지. 이 넷을 **기본 힘**이라 하고, 자연의 모든 힘은 이 넷으로 설명된단다^{11,12}. 표 36-1에 모아 보자.

[표 36-1] 네 가지 기본 힘

힘	붙잡는 것	작용 거리	세기 순위
강한 힘	쿼크·핵자	약 10^{-15} m	1 (가장 셴)
전자기력	전하	멀리까지($1/r^2$)	2
약한 힘	쿼크·렙톤	10^{-15} m보다 짧음	3
중력	모든 질량	멀리까지($1/r^2$)	4 (가장 약함)

태오 네 가지를 한꺼번에 다 알게 된 거예요?

차 교수 아니란다. 중력과 전기·자기는 오래전부터 알았고, 24장에서 본 맥스웰이 전기와 자기를 하나로 묶었지. 강한 힘과 약한 힘은 원자핵을 들여다보고 나서야 알게 됐어. 러더퍼드가 1911년에 원자핵을 찾아냈고², 채드윅이 1932년에 중성자를 찾아냈지¹³. 원자핵 속을 알고 나서야 그 안을 묶는 힘이 따로 있다는 걸 깨달은 거란다.

하린 중력이 끌찌예요? 우리를 땅에 붙여 두고 달을 붙잡는 힘인데요?

차 교수는 대답 대신 가방에서 작은 냉장고 자석과 종이 클립을 꺼냈다. 클립을 탁자에 놓고 자석을 위에서 가까이 가져가자, 클립이 툭 튀어 올라 자석에 붙었다.

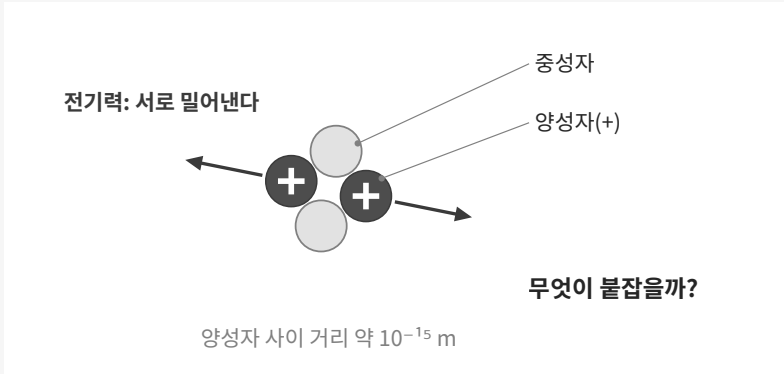
차 교수 방금 무슨 일이 일어났는지 생각해 보렴. 지구 전체의 원자가 클립을 아래로 당기고 있었지. 그런데 손톱만 한 자석 하나가 그 힘을 이기고 클립을 들어 올렸어. 자석의 힘도 원자 속 전자가 만드는 전자기력이란다(18장).

미숙 지구가 통째로 당기는데 자석 조각 하나한테 졌네요.

차 교수 얼마나 약한지 재 보면 더 놀랄 거란다. 문제로 따져 보자꾸나.

문제 36-1 헬륨 원자핵을 붙잡는 힘

그림 36-3은 헬륨 원자핵을 나타낸 것이다. 양성자 두 개는 약 10^{-15} m 거리에서 전기력으로 서로 밀어낸다. 그런데도 원자핵이 흩어지지 않게 붙잡는 힘으로 가장 알맞은 것은?



[그림 36-3] 문제 36-1의 그림 양성자 2개와 중성자 2개로 된 헬륨 원자핵과, 두 양성자가 서로 미는 전기력

- ① 중력
- ② 전기력
- ③ 자기력
- ④ 강한 힘
- ⑤ 약한 힘

태오 원자핵은 무거우니까 중력이 붙잡는 거 아니에요? ①이요.

차 교수 그럴듯하구나. 그런데 조금 뒤 문제 36-2에서 보겠지만 중력은 전기력보다 턱없이 약하단다. 조건을 다시 보자. 이겨야 할 상대가 무엇이지?

하린 양성자끼리 미는 전기력이요. 그러니까 전기력보다 센 힘이어야 해요.

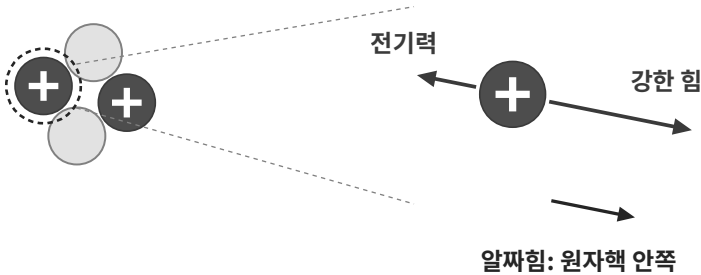
차 교수 그렇지. 계획을 세우자. 네 힘 가운데 전기력보다 센 것, 그리고 10^{-15} m 거리에서 작용하는 것을 표 36-1에서 찾으면 돼.

하린 강한 힘이에요. 원자핵 크기에서만 작용한대요.

차 교수 그림 36-4처럼 한 양성자가 받는 힘을 그려 보면 분명해진다.

(가) 원자핵 속 양성자

(나) 이 양성자가 받는 힘



강한 힘 > 전기력 (화살 길이는 크기 비교용 모식)

[그림 36-4] 풀이 그림 원자핵 속 한 양성자가 받는 힘. 다른 양성자가 미치는 전기력보다 이웃 핵자들이 당기는 강한 힘이 커서 알짜힘은 원자핵 안쪽을 향한다(화살 길이는 크기 비교용 모식)

미숙 중성자는 전하가 없으니 밀지는 않고 강한 힘으로 당기기만 하네요. 폴칠만 하는 셈이군요.

차 교수 좋은 비유입니다. 정답은 ④이지요. 중성자가 있어야 양성자 여럿이 한데 모일 수 있습니다⁶.

문제 36-2 전기력은 중력의 몇 배일까

수소 원자 속 전자와 양성자 사이에는 전기력과 중력이 함께 작용한다. $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$, 전자 질량 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 양성자 질량 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이다.

(1) 두 힘의 비(전기력 ÷ 중력) = $ke^2 \div (G \times \text{전자 질량} \times \text{양성자 질량})$ 을 어림하시오.

(2) 둘 사이 거리가 2배가 되면 두 힘은 각각 몇 배가 되고, 비는 어떻게 되는가?

태오 (1)은 계산기로 금방이죠. 위는 $9.0 \times 10^9 \times 2.56 \times 10^{-38}$ 이니까 약 2.3×10^{-28} 이에요.

차 교수 아래는?

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 물리편 1

미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 (원자에서 힘과 에너지까지)

원자의 질량과 관성, 네 가지 기본 힘과 만유인력, 접촉력과 마찰력, 힘의 합성과 평형, 그리고 운동의 법칙으로 이어집니다.

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



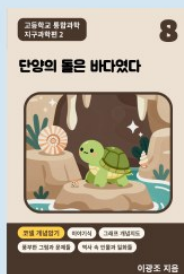
5 물리편 1 · 이 책
힘과 운동



6 물리편 2
전하와 전기력



7 지구과학편 1
공기·물·날씨



8 지구과학편 2
원소·암석·지구

과학과영성출판사

이광조 지음
값 22,000원

값 22000 원
53420



9 791123 065304
ISBN 979-11-23065-30-4

이어서 읽으시려면

05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 따뜻해질까 — 전체 460쪽

ssbook.kr/book/tonghap-05

판매가 **13,200원** (POD 정가 22,000원)

- 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

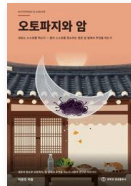


인삼의 임상연구
최신연구와 방법론
₩18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-clinical

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

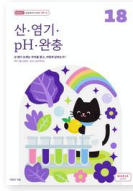
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-17



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