



대입 과학논술 24 — 기체

기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

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/nonsul-24

POD 정가 24,000원 → **14,400원** (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



기체

1부 기본개념

2부 기출 개념

3부 답안 패턴

4부 실전 풀이

기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

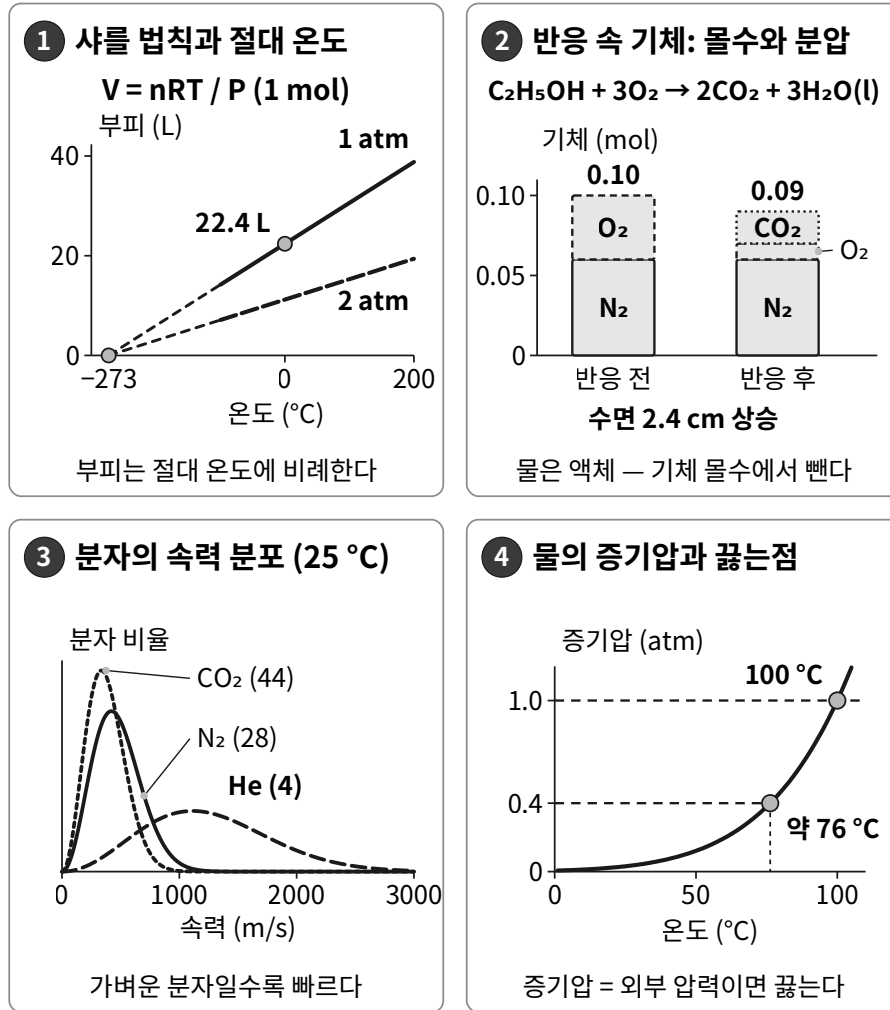
대학 기출 10문항 · 2009~2026학년도 · 이광조 지음

기체

1부 기본개념편 · 2부 기출문제와 기본개념 · 3부 논술답안작성 패턴분석 · 4부 실전기출문제와 풀이과정

기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = $PV = nRT \times$ 기체 몰수 보존 $\times$ 부분 압력(몰 분율) | 10문항 · 4개 대학 (2009~2026)



한 줄 요약: $PV = nRT$ 로 세고, 몰 분율로 나누고, 증기압으로 읽는다

그림 1. 기체 단원의 그림 요약. ① 샤를 법칙과 절대 온도(1 mol의 부피를 1 atm·2 atm에서 섭씨온도에 대해 그리면 두 직선이 모두 -273.15°C 에서 0으로 모인다), ② 밀폐 실린더 속 에탄올 연소(2.4 L, 1 atm, 27°C , 에탄올 0.46 g — 기체 0.10 mol이 0.09 mol로 줄고 수면이 2.4 cm 오른다), ③ 분자의 속력 분포(25°C 에서 He·N₂·CO₂의 맥스웰-볼츠만 분포), ④ 물의 증기압 곡선(1 atm에서 100°C , 0.40 atm에서 약 76°C). 모든 곡선과 수치는 계산해서 그렸다.

한 줄 요약: 기체는 $PV = nRT$ 로 세고, 섞이면 몰 분율로 나누고, 액체와 만나면 증기압으로 읽는다

연결 단원 → 화학양론·농도(25권) · 용액·총괄성·상평형(22권) · 화학 평형(21권) · 반응 속도(19권) · 분자 간 힘(16권)

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 기체인가	16
1.1 바퀴·풍선·숨 — 기체는 늘리고, 늘고, 섞이고, 녹는다	18
1.2 같은 물 1 mol의 세 얼굴	19
1.3 기체를 기술하는 네 변수	21
1.4 기체 법칙의 역사	22
1.5 이 책의 길	23
제 2장 기체의 압력: 분자가 벽을 두드리는 힘	25
2.1 압력은 단위 넓이에 작용하는 힘	27
2.2 토리첼리의 수은 기둥	28
2.3 압력 단위 바꾸기	30
2.4 수조 속 실린더 — 수면 높이로 압력 읽기	31
2.5 높이 올라갈수록 대기압은 낮아진다	33
제 3장 누르면 줄어든다: 보일 법칙	36
3.1 주사기 실험 — PV가 일정하다	38
3.2 보일의 J자관과 법칙의 조건	39
3.3 세 가지 그래프	40
3.4 일정하게 누를 때 부피는 어떻게 줄어드나	42
3.5 물속 10 m마다 1 atm	43
제 4장 데우면 늘어난다: 샤를 법칙과 절대 온도	46
4.1 열기구 시대의 샤를	48
4.2 부피-온도 그래프는 직선이다	49
4.3 직선을 늘이면 -273.15°C	49
4.4 섭씨온도로 비례식을 쓰면 틀린다	51
4.5 절대 영도에는 갈 수 없다	52
4.6 부피가 일정하면 압력이 온도에 비례한다	52
4.7 열기구는 얼마나 뜰까	53
제 5장 같은 부피, 같은 분자 수: 아보가드로 법칙	56
5.1 기체끼리의 반응은 부피가 정수비를 이룬다	58
5.2 원자설과 부딪힌 문제, 그리고 아보가드로	59
5.3 몰 부피 — 0°C , 1 atm에서 22.4 L	60
5.4 같은 조건이면 밀도비 = 분자량비	62
5.5 반응 계수는 부피비 — 남은 기체 계산	63
제 6장 세 법칙을 하나로: 이상 기체 방정식	66
6.1 세 법칙을 곱하면 $PV = nRT$	68
6.2 R의 값 고르기 — 단위를 맞추는 습관	69
6.3 상태가 바뀌는 문제 — 한 줄 식	70
6.4 휘발성 액체의 분자량 — 뒤마의 증기 밀도법	71
6.5 기체의 밀도 $d = PM/RT$	72
6.6 겨울 아침의 타이어	72
제 7장 반응 속의 기체: 몰수가 바뀌면 부피가 바뀐다	75

7.1 반응식의 계수를 기체 몰수로 읽는다	77
7.2 연료마다 다른 $\Delta n(\text{기체})$	78
7.3 같은 산소를 쓸 때 비교하기	78
7.4 수조 속 밀폐 실린더 — 수면이 움직인다	79
7.5 촛불을 덮은 컵 — 산소 소비만으로는 다 설명되지 않는다	82
제 8장 섞인 기체: 부분 압력과 몰 분율	85
8.1 돌턴의 부분 압력 법칙	87
8.2 몰 분율로 나누기	87
8.3 ppm은 두 가지다	89
8.4 높은 산의 산소	90
8.5 물 위에서 모은 기체	91
8.6 두 용기를 이으면	92
제 9장 기체 분자 운동론: 압력과 온도의 정체	95
9.1 분자 운동론의 다섯 가정	97
9.2 압력은 충돌이다	98
9.3 온도의 정체	99
9.4 온도가 같아진다는 것	100
9.5 세 법칙을 분자로 설명하기	101
제 10장 분자의 빠르기: 확산과 분출	105
10.1 가벼운 분자가 빠르다	107
10.2 rms 속력 $\sqrt{3RT/M}$	107
10.3 그레이엄 법칙: 확산과 분출	110
10.4 속력으로 분자량을 잴다	112
제 11장 실제 기체: 이상 기체에서 벗어날 때	115
11.1 압축 인자 Z	117
11.2 두 가지 원인: 분자 부피와 인력	118
11.3 언제 이상 기체에 가까운가	120
11.4 그래도 $PV = nRT$ 를 쓰는 까닭	122
11.5 인력이 이기면 액체가 된다	122
제 12장 증발과 응축: 증기압과 끓는점	125
12.1 증발과 응축의 동적 평형	127
12.2 증기압은 온도만의 함수	128
12.3 밀폐 용기 계산 3단계	129
12.4 증기압 곡선과 분자 간 힘	130
12.5 끓는점: 증기압 = 바깥 압력	131
제 13장 상평형 그림: 삼중점과 임계점	135
13.1 세 곡선과 세 영역	137
13.2 삼중점: 세 상이 함께	138
13.3 물의 융해 곡선은 왼쪽으로 기운다	139
13.4 CO_2 의 상평형 그림과 드라이아이스	140
13.5 임계점과 초임계 유체	141
제 14장 물에 녹는 기체, 몸속·지구의 기체, 그리고 2부로	144
14.1 헨리 법칙: 녹는 양은 부분 압력에 비례한다	146
14.2 온도, 극성, 반응	148
14.3 몸속의 기체: 잠수	149
14.4 지구의 기체: 바다와 CO_2	150
14.5 기본개념편을 마치며: 다섯 장면 다시 보기	150

부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	153
부록 B. 용어 풀이	156
기출문제와 기본개념.....	163
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	164
0. 이 장의 사용법	165
1. 출제 개념.....	166
1.1 압력과 세 기체 법칙 — C1 · C2 · C3 · C4.....	166
1.2 이상 기체 방정식과 분자량 — C5 · C6.....	167
1.3 반응 속 기체와 부분 압력 — C7 · C8	168
1.4 분자 운동론·확산·실제 기체 — C9 · C10 · C11.....	170
1.5 증기압과 상평형 — C12 · C13 · C14	170
1.6 기체의 용해와 응용 — C15 · A1 · A2 · A3 · A4 · A5.....	172
1.7 그래프 개념도 읽는 법	172
2. 출제 경향	175
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	177
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	177
2.3 학교별 성향	178
논술답안작성 패턴분석	180
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	181
3. 답안 작성법	183
3.1 계산형 답안의 틀	183
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀.....	184
3.3 표기와 수치 규칙	184
3.4 시간 배분과 자기 점검	185
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	185
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	187
실전기출문제와 풀이과정	193
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	194
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	196
5.1 한눈에 보는 기출 10문항	196
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	197
5.3 기본 개념 한눈에	198
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	199
6. 출제 문항 분석과 모범답안	201
〈기출문제 1 (경희대 2026년)〉	202
〈기출문제 2 (연세대 2024년)〉	212
〈기출문제 3 (연세대 2024년)〉	220
〈기출문제 4 (연세대 미래캠퍼스 2023년)〉	228
〈기출문제 5 (연세대 2021년)〉	239
〈기출문제 6 (고려대 2012년)〉	247
〈기출문제 7 (고려대 2012년)〉	258
〈기출문제 8 (연세대 2011년)〉	267
〈기출문제 9 (건국대 2010년)〉	276

〈기출문제 10 (건국대 2009년)〉	285
7. 변형·예상 문항	295
8. 강의 연결	302
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	303
8.2 강의 구성 시 유의점	303
9. 전체 문제 총평	305
9.1 숫자로 먼저 보기	305
9.2 다섯 가지 총평	305
9.3 대학별 한 줄 총평	307
9.4 이렇게 공부하자	307
10. 참고문헌	309

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 기체 논제의 네 장면	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1	17
그림 4. 물 1 mol의 세 상태 부피	19
그림 5. 고체·액체·기체의 입자 배열	20
그림 6. 기체 법칙의 연표	22
그림 7. 제 2장 개념도	25
그림 8. 생활 속 개념도 2	26
그림 9. 토리첼리 실험과 물기둥	29
그림 10. 수조 속 실린더와 수면	32
그림 11. 높이와 대기압	33
그림 12. 제 3장 개념도	36
그림 13. 생활 속 개념도 3	37
그림 14. 보일 법칙의 P-V 곡선	41
그림 15. P-1/V 그래프	41
그림 16. 가압 시간과 부피, 접선	43
그림 17. 제 4장 개념도	46
그림 18. 생활 속 개념도 4	47
그림 19. 부피-섭씨온도 직선과 외삽	50
그림 20. 절대 온도 눈금의 기준 온도	51
그림 21. 공기의 밀도와 온도	53
그림 22. 제 5장 개념도	56
그림 23. 생활 속 개념도 5	57
그림 24. 기체 반응의 부피비	59
그림 25. 물 부피와 온도	61
그림 26. 22.4 L당 질량	62
그림 27. 제 6장 개념도	66
그림 28. 생활 속 개념도 6	67
그림 29. $PV = nRT$ 의 세 단면	69
그림 30. 뒤마의 증기 밀도법	71
그림 31. 타이어 압력과 기온	73
그림 32. 제 7장 개념도	75
그림 33. 생활 속 개념도 7	76
그림 34. 산소 3 mol당 기체 몰수 변화	79
그림 35. 실린더 속 연소 전후의 수면	80
그림 36. 촛불 컵 실험의 두 가지 효과	82
그림 37. 제 8장 개념도	85
그림 38. 생활 속 개념도 8	86
그림 39. 공기 성분의 분압	88
그림 40. 고도와 산소 분압	90
그림 41. 두 용기를 이룰 때의 분압	93
그림 42. 제 9장 개념도	95
그림 43. 생활 속 개념도 9	96
그림 44. 분자 한 개의 벽 충돌	98
그림 45. 세 법칙의 분자 그림	101
그림 46. N_2 의 속력 분포	102
그림 47. 제 10장 개념도	105

그림 48. 생활 속 개념도 10	106
그림 49. 분자량과 rms 속력	109
그림 50. 세 기체의 속력 분포	109
그림 51. $\text{NH}_3\text{-HCl}$ 확산 실험	111
그림 52. 제 11장 개념도	115
그림 53. 생활 속 개념도 11	116
그림 54. 압력과 압축 인자 Z	118
그림 55. 분자 부피와 분자 간 인력	118
그림 56. 물질별 끓는점	123
그림 57. 제 12장 개념도	125
그림 58. 생활 속 개념도 12	126
그림 59. 증발·응축 속도와 동적 평형	128
그림 60. 세 액체의 증기압 곡선	131
그림 61. 고도와 물의 끓는점	132
그림 62. 제 13장 개념도	135
그림 63. 생활 속 개념도 13	136
그림 64. 물의 상평형 그림	137
그림 65. CO_2 의 상평형 그림	140
그림 66. 임계점 부근의 CO_2	142
그림 67. 제 14장 개념도	144
그림 68. 생활 속 개념도 14	145
그림 69. 분압과 기체의 용해도	147
그림 70. 탄산음료 개봉 전후	148
그림 71. 수심과 녹는 N_2	149
그림 72. 연소 실린더의 기체 몰수와 수면	169
그림 73. 전체 개념 그래프	173
그림 74. 개념별 출제 횟수	174
그림 75. 연도별 출제 문항 수	175
그림 76. 대학별 출제 문항 수	176
그림 77. 〈경희대 2026〉 개념 그래프	203
그림 78. 물의 상평형 그림과 문제의 두 조건(q259)	206
그림 79. $t_1 \cdot t_3$ 에서 용기 A·B(q259)	206
그림 80. 응축상 질량-시간 개형(q259)	208
그림 81. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	213
그림 82. 연소 실험 장치(기출 169)	214
그림 83. 연소 전후 몰수·분압과 수면(기출 169)	216
그림 84. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	221
그림 85. 연료 연소 실험 장치(q171)	223
그림 86. 세 실험의 기체 몰수와 수면 상승(q171)	224
그림 87. 〈연세대 미래캠퍼스 2023〉 개념 그래프	229
그림 88. 증기압 곡선과 끓는점(기출 179)	232
그림 89. CO_2 상평형 그림과 풍선 경로(기출 179)	234
그림 90. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	240
그림 91. 공기의 부피 조성과 질량 조성(q141)	243
그림 92. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	248
그림 93. 두 용기 실험 장치(기출 23)	250
그림 94. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	259
그림 95. 분자량과 상대 확산 속도(q030)	262
그림 96. 〈연세대 2011〉 개념 그래프	268

그림 97. CO ₂ 상태 곡선과 지각 깊이 경로(기출 29)	272
그림 98. 〈건국대 2010〉 개념 그래프	277
그림 99. 섭씨온도-부피 직선과 문제 2-3의 두 점(q281)	282
그림 100. 〈건국대 2009〉 개념 그래프	286
그림 101. 가압 중 부피 곡선과 접선(기출 273)	291

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	16
표 4. 고체·액체·기체의 비교.....	20
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	25
표 6. 압력 단위 환산.....	30
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 8. 주사기 실험 자료.....	38
표 9. $t = 2\text{ h}$ 를 가운데 두고 시간 간격을 좁히며 구한 평균 변화율.....	42
표 10. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	46
표 11. 같은 압력에서 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 1.....	49
표 12. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	56
표 13. 기체의 물질량과 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm 에서의 밀도(물질량 $\div 22$).....	62
표 14. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	66
표 15. 기체 상수 R 의 값과 단위.....	69
표 16. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	75
표 17. 연료별 완전 연소 반응식과 기체 몰수 변화(생성된 물은 액체).....	78
표 18. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	85
표 19. 공기의 조성(건조 공기).....	88
표 20. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	95
표 21. 기체 분자 운동론의 다섯 가정과 실제 기체에서 어긋나는 조건.....	97
표 22. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	105
표 23. $25\text{ }^{\circ}\text{C}(298)$	108
표 24. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	115
표 25. 반데르발스 상수와 1 atm 에서의 끓는점(교과 밖 심화).....	119
표 26. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	125
표 27. 물의 온도별 증기압.....	130
표 28. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	135
표 29. 세 물질의 삼중점과 임계점.....	141
표 30. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	144
표 31. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 물에 대한 헨리 상수.....	146
표 32. 이 책의 응용 장면 다섯.....	151
표 33. 2부 목차와 내용.....	164
표 34. 세 기체 법칙과 고정하는 변수.....	166
표 35. 기체 상수 R 의 값과 쓰는 곳.....	167
표 36. 연료별 완전 연소와 기체 몰수 변화(생성된 물은 액체).....	168
표 37. 세 법칙을 분자로 설명하기.....	170
표 38. 물과 CO_2 의 상평형 그림 비교(이 책의 고정값).....	171
표 39. 응용 소재와 쓰이는 개념.....	172
표 40. 이 책의 기출 문항 목록.....	176
표 41. 대학별 출제 문항.....	176
표 42. 문항별 개념과 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	177
표 43. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	178
표 44. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 기체 답안에서의 쓰는 순서.....	181
표 45. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	181
표 46. 상태표와 기체 몰수 표의 예(연세대 2024 문제 1, R_0	183
표 47. 서술형 답안의 문장 틀(열기구가 뜨는 원리, 건국대 2010 문제 2-1.....	184

표 48. 논술 기본 패턴 5가지(기체 답안)	185
표 49. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은	186
표 50. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는	194
표 51. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	196
표 52. 학년도별 문항 수와 답안 근거.....	196
표 53. 10문항의 소문항 25개에 적용한 주 답안 패턴(결합 패턴은 앞의 것을	197
표 54. 이 책의 개념과 기출에서 쓰인 횟수(많이 쓰인 순).....	198
표 55. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	199
표 56. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	203
표 57. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	205
표 58. [표 1] 27°C에서 혼합 기체의 몰 분율(%)	212
표 59. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	213
표 60. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	215
표 61. [표 1] 27°C에서 혼합 기체의 몰 분율(%) (원문 표).....	220
표 62. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	221
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	222
표 64. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	230
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	231
표 66. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	240
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	242
표 68. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	249
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	251
표 70. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	259
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	260
표 72. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	268
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	270
표 74. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	277
표 75. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	278
표 76. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	286
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	288
표 78. 인강 회차 구성(제안)	302
표 79. 10개 문항의 규모	305
표 80. 대학별 한 줄 총평(이 책의 자료 범위 안에서).....	307

제 1 부

기본개념편

이 단원의 개념을 처음부터 차근차근. 대화로 묻고 답하며, 숫자를 직접 넣어 계산한다.

기체

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 압력 → 세 기체 법칙 → 이상 기체 방정식 → 반응과 혼합 → 분자 운동 → 실제 기체 → 증기압과 상평형 → 용해의 순서로 이어집니다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 특히 6장의 $PV = nRT$ 와 8장의 부분 압력은 이 책의 거의 모든 계산이 올라서는 바닥입니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 기체와 압력	1~2장	기체가 거의 빈 공간이라는 데서 출발해 압력을 “분자가 벽을 두드리는 힘”으로 정의하고, 수은·물 기둥과 수면 높이로 압력을 읽는다.
B. 세 법칙과 $PV = nRT$	3~6장	누르면 줄고(보일), 데우면 늘고(샤를, 절대 온도), 같은 부피에 같은 분자 수(아보가드로)라는 세 법칙을 실험 자료에서 얻어 $PV = nRT$ 하나로 묶고, 분자량과 밀도를 잰다.
C. 반응하고 섞이는 기체	7~8장	반응식 속에서 기체 몰수가 바뀌면 부피·압력·수면이 바뀐다는 것을 연소 실험더로 익히고, 섞인 기체를 몰 분율로 나누어 부분 압력과 ppm을 계산한다.
D. 분자의 눈으로	9~11장	기체 분자 운동론으로 압력과 온도의 정체를 밝히고, 가벼운 분자일수록 빠르다는 그레이엄 법칙으로 분자량을 재며, 실제 기체가 이상 기체에서 벗어나는 조건을 본다.
E. 액체와 만나는 기체	12~14장	밀폐 용기 속 증발·응축의 동적 평형과 증기압, 상평형 그림의 삼중점·임계점, 물에 녹는 기체(헨리 법칙)를 배우고 탄산음료·잠수·대기 CO_2 로 정리한 뒤 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈생활 속 개념도〉 → 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 이 장의 참고문헌 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 해당 그림과 식으로 돌아가 한 번 더 시도하십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 기체인가	기체의 네 변수($P \cdot V \cdot T \cdot n$) · 기체는 거의 빈 공간 · 기체 법칙의 역사
기본개념편 제 2장 (25쪽)	기체의 압력: 분자가 벽을 두드리는 힘	압력 = 힘/넓이 · 대기압과 토리첼리 · 단위 환산 · 수면 높이로 압력 읽기
기본개념편 제 3장 (36쪽)	누르면 줄어든다: 보일 법칙	$PV = 일정$ · P - V 그래프 세 가지 · 부피의 순간 변화율
기본개념편 제 4장 (46쪽)	데우면 늘어난다: 샤를 법칙과 절대 온도	$V \propto T$ · 절대 온도와 $-273.15^\circ C$ · 외삽 · 게이뤼삭 법칙
기본개념편 제 5장 (56쪽)	같은 부피, 같은 분자 수: 아보가드로 법칙	기체 반응의 부피비 · 몰 부피 22.4 L · 기체 밀도와 분자량

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 6장 (66쪽)	세 법칙을 하나로: 이상 기체 방정식	$PV = nRT$ · R의 값과 단위 · 분자량 $M = mRT/PV$ · 밀도 $d = PM/RT$
기본개념편 제 7장 (75쪽)	반응 속의 기체: 몰수가 바뀌면 부피가 바뀐다	기체 몰수 변화 · 액체·고체는 빼고 센다 · 밀폐 실린더의 수면
기본개념편 제 8장 (85쪽)	섞인 기체: 부분 압력과 몰 분율	돌턴의 부분 압력 법칙 · 몰 분율 · 부피 ppm과 질량 ppm · 수상 치환
기본개념편 제 9장 (95쪽)	기체 분자 운동론: 압력과 온도의 정체	다섯 가정 · 압력 = 충돌 · 평균 운동 에너지 $\propto T$ · 속력 분포
기본개념편 제 10장 (105쪽)	분자의 빠르기: 확산과 분출	rms 속력 · 그레이엄 법칙 · 속력으로 분자량 재기
기본개념편 제 11장 (115쪽)	실제 기체: 이상 기체에서 벗어날 때	압축 인자 Z · 분자 부피와 인력 · 액화
기본개념편 제 12장 (125쪽)	증발과 응축: 증기압과 끓는점	동적 평형 · 증기압은 온도만의 함수 · 증기압 곡선 · 끓는점
기본개념편 제 13장 (135쪽)	상평형 그림: 삼중점과 임계점	세 곡선 · 삼중점 · 승화 · 임계점과 초임계 유체
기본개념편 제 14장 (144쪽)	물에 녹는 기체, 몸속·지구의 기체, 그리고 2부로	헨리 법칙 · 온도와 용해도 · 잠수병 · 바다의 CO_2

4. 이렇게 공부하자

- 계산 문제를 만나면 먼저 상태표($P \cdot V \cdot T \cdot n$ 을 처음과 나중으로 두 줄)를 쓰고, 온도는 반드시 K로 바꾼다.
- 반응이 끼면 반응식 아래에 기체 몰수만 따로 센다. 물·에탄올·포도당처럼 액체·고체인 것은 기체 몰수에서 뺀다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 장은 6장($PV = nRT$ 와 단위), 7장(기체 몰수 변화), 8장(몰 분율·ppm), 12장(밀폐 용기 증기압)이다. 이 구간은 두 번 읽는다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

기체는 중학교 과학에서 “누르면 줄고 데우면 늘어나는 것”으로 처음 만나고, 고등학교 화학 I 에서 물과 물 부피로, 화학 II 에서 이상 기체 방정식·부분 압력·증기압·상평형으로 넓어지며, 대학 논술에서는 밀폐 용기 속 반응과 상변화를 숫자로 끝까지 따라가는 계산과, 그 숫자가 왜 그렇게 나오는지 분자로 설명하는 서술이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(분자와 원자, 화학 반응식, 간단한 비례 계산)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 식을 먼저 주지 않고, 실험 자료에서 규칙을 찾은 다음 그 규칙이 분자의 움직임에서 어떻게 나오는지를 묻는다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다. 돌집 과학방에서 화학을 배운다. 궁금한 것은 바로 묻고, 태오는 계산을 서두르다 실수도 한다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 부엌과 가게에서 본 일상의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 충북 단양 ‘돌집 과학방’의 화학 선생님. 은퇴한 화학·생물 교수로, 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

첫 장면 — 토요일 아침, 마당의 자전거

이른 봄 토요일 아침, 돌집 과학방 마당에서 태오가 자전거 바퀴에 펌프로 공기를 넣고 있었다. 하린은 동네 행사에서 받은 헬륨 풍선을 손목에 묶고 들어왔고, 이모는 김이 오르는 두부 솥을 막 끄고 온 참이었다.

- 태오** 교수님, 어제 저녁에 바퀴를 꽉 채워 놔는데 아침에 보니까 좀 물렁해요. 바람이 샌 걸까요?
- 석 교수** 샐 수도 있지. 그런데 어젯밤 기온이 영하로 떨어졌잖아. 바퀴 속 공기가 차가워지기만 해도 압력이 내려간다. 샐는지 아닌지 숫자로 가려 볼 수 있어.
- 하린** 공기가 차가워지면 왜 압력이 내려가요? 공기는 그대로 들어 있는데요.
- 석 교수** 좋은 질문이다. 압력은 바퀴 안의 공기 분자들이 고무 벽을 두드리는 힘이야. 차가워지면 분자들이 느려져서 덜 세게, 덜 자주 두드리지.
- 이모** 그럼 우리 가게 두부 솥 뚜껑이 들썩이는 것도 같은 이야기예요? 김이 차면 뚜껑이 막 올라가잖아요.
- 석 교수** 네, 같은 줄기예요. 다만 솥에서는 물이 수증기로 바뀌면서 기체 분자 수 자체가 늘어나요. 물 18 g, 그러니까 1 mol은 액체로 18 mL인데, 100 °C 수증기가 되면 약 30 L가 됩니다.
- 하린** 30 L요? 1,700배나 커져요?
- 석 교수** 그래서 기체는 거의 빈 공간이라고 한다. 분자 사이가 분자 크기의 아홉 배쯤 떨어져 있어. 그러니 놀라서 줄일 수도 있고, 다른 기체와 섞을 수도 있지.
- 태오** 논술 기출을 보면 $PV = nRT$ 하나로 다 푸는 것 같던데, 그 식이 이 이야기들을 다 담고 있는 거예요?
- 석 교수** 담고 있다. P는 압력, V는 부피, T는 절대 온도, n은 몰수. 네 개 중 무엇을 고정하고 무엇을 바꾸느냐에 따라 보일 법칙도 되고 샤를 법칙도 된다. 그 식을 실험 자료에서 한 조각씩 만들어 볼 거야.
- 하린** 제 헬륨 풍선은요? 이젠 왜 똥똥 떠요?

석 교수 같은 부피면 기체 종류와 상관없이 분자 수가 같다. 그런데 헬륨 분자 하나는 공기 분자의 7분의 1쯤으로 가볍지. 그래서 풍선 전체가 바깥 공기보다 가볍다. 내일 아침이면 그 풍선이 쪼그라들어 있을 텐데, 그것도 헬륨이 가볍고 빨라서야.

이모 그럼 콜라 뚜껑을 뚫을 때 거품이 확 올라오는 것도 기체 이야기예요?

석 교수 네. 병 속에서 높은 압력으로 녹아 있던 이산화 탄소가, 뚜껑을 열어 압력이 낮아지자 빠져나오는 거예요. 기체가 물에 얼마나 녹는지도 압력이 정합니다. 그건 맨 마지막 장에서 잠수부 이야기와 함께 다룹니다.

태오 기체가 반응하는 문제도 많던데요. 실린더 안에서 연료를 태우고 수면이 얼마나 올라가는지 묻는 거요.

석 교수 그 문제의 열쇠는 하나다. 반응식에서 기체 분자가 몇 개 사라지고 몇 개 생기는지 세는 것. 물이 액체로 생기면 기체 수에서 빠진다. 7장에서 그 장치를 직접 그려 볼 거다.

하린 그럼 오늘은 어디서부터 해요?

석 교수 태오의 자전거 바퀴부터 하자. 바퀴를 누르는 손가락과 바퀴 안에서 고무를 미는 공기, 그 힘이 무엇인지 재는 데서 시작한다.

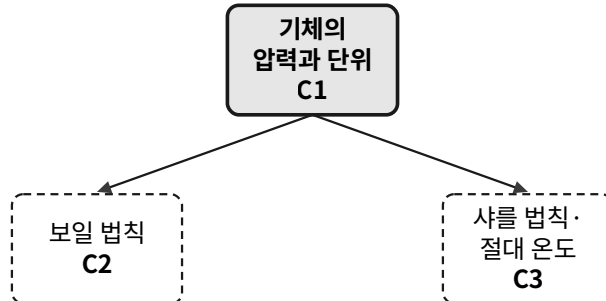
왜 기체인가? **기본개념편 제 1장** (16쪽)은 자전거 바퀴·풍선·숨이라는 세 장면에서 출발한다. 셋 다 기체가 눌리고, 데워지고, 들어가고 나오는 일이다. 이 장면들이 압력·부피·온도·몰수라는 네 변수로 정리되고, 세 법칙을 거쳐 $PV = nRT$ 라는 한 줄이 되며, 반응하고 섞이는 기체, 분자의 움직임, 액체와 만나는 기체로 차례로 넓어지는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 기체인가

새 개념 기체의 네 변수($P \cdot V \cdot T \cdot n$) · 기체는 거의 빈 공간 · 기체 법칙의 역사

이어짐 압력 2장 · 세 법칙 3~5장 · $PV = nRT$ 6장 · 증기압 12장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 기체의 압력과 단위)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 8 (연세대 2011년) (267쪽)	임계점 너머로 — 땅속 CO ₂ 의 깊이	C1 기체의 압력과 단위

아침 마당의 세 가지 기체 장치

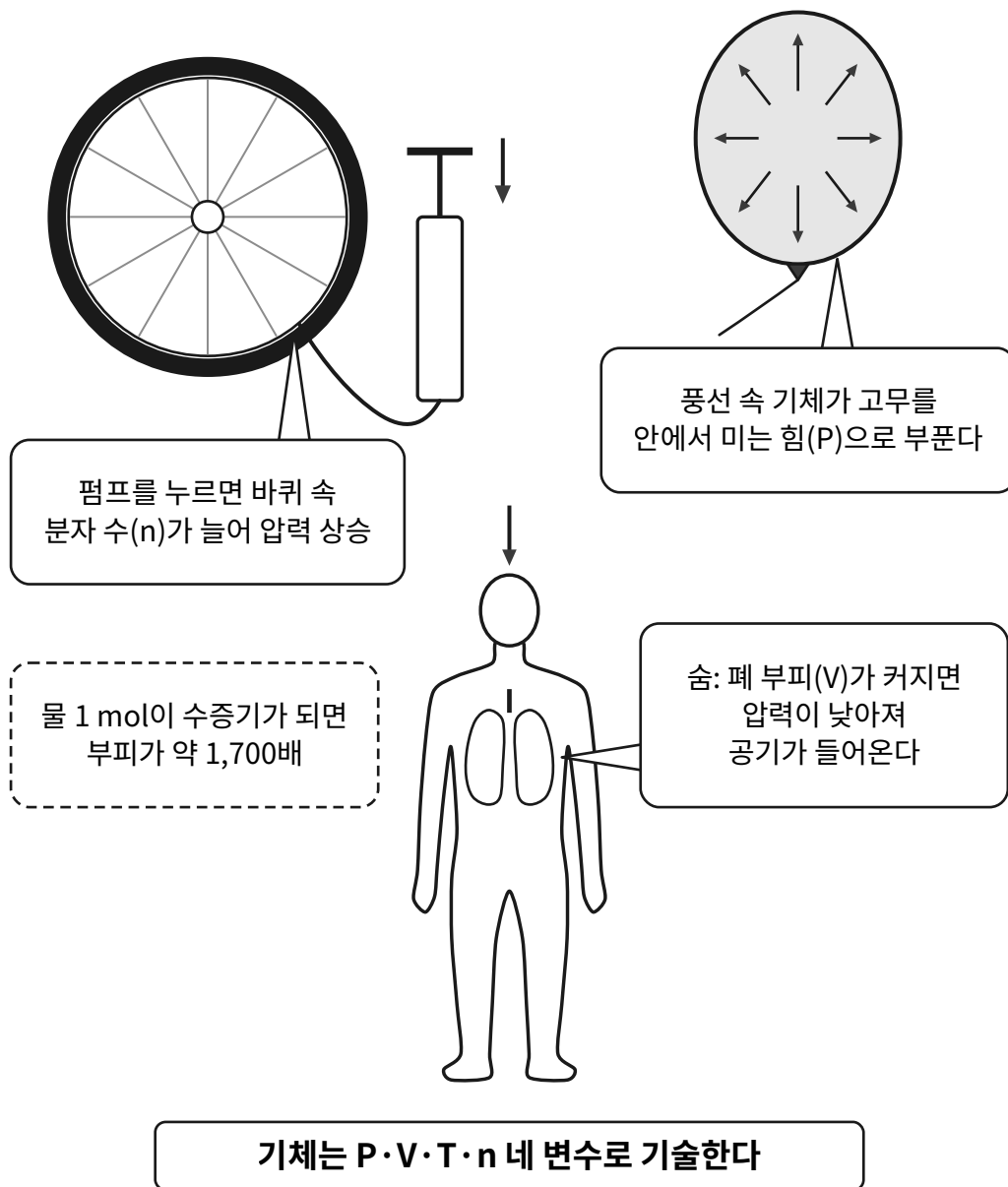


그림 3. 토요일 아침 돌집 마당 — 태오는 자전거 바퀴에 펌프로 공기를 넣고, 하린은 풍선을 불고, 이모는 마루에 앉아 깊게 숨을 쉰다. 바퀴·풍선·폐는 모두 기체가 담긴 그릇이고, 그 속 기체는 압력(P)·부피(V)·온도(T)·몰수(n) 네 변수로 기술된다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 펌프를 누를 때마다 바퀴 속 분자 수(n)가 늘어 압력이 오른다.
2. 풍선은 속 기체가 고무를 안에서 미는 압력으로 부풀다.
3. 숨을 들이쉬면 폐의 부피(V)가 커지고 압력이 낮아져 바깥 공기가 들어온다.

이 장의 출발점

이 책의 첫 장이다. 물질의 양을 몰(mol)로 센다는 것($1 \text{ mol} = 6.02 \times 10^{23}$ 개, 물 $18 \text{ g} = 1 \text{ mol}$), 물질에는 고체·액체·기체의 세 상태가 있다는 것, 그리고 온도가 높을수록 입자가 활발하게 움직인다는 정도만 알면 된다. 식은 이 장에서 맛만 보고 뒤의 장에서 하나씩 다시 세운다.

첫 토요일 아침, 돌집 과학방 마당에서 태오가 자전거 바퀴에 펌프질을 하고 있었다. 하린은 생일 장식용 풍선을 불다가 숨이 차서 마루에 주저앉았고, 이모는 커피를 들고 그 모습을 내려다보았다.

하린 교수님, 풍선 하나 부는데 왜 이렇게 숨이 차요? 고무가 저를 밀어내는 것 같아요.

석 교수 고무가 밀어내는 것도 맞고, 네 폐 속 공기가 고무를 안에서 밀어 줘야 풍선이 커지는 것도 맞다. 오늘부터 열네 번의 토요일 동안 그 “미는 힘”의 정체를 끝까지 따라가 볼 거다. 주인공은 기체다.

태오 논술 기출에서도 기체 문제가 꼭 나오던데요. 실린더에 연료를 태우고 수면이 몇 cm 오르는지 묻는 문제요.

석 교수 그 문제는 이 책의 7장 끝에서 직접 풀게 된다. 그 전에 오늘은 왜 하필 기체를 따로 한 권으로 배우는지부터 생각해 보자.

1.1 바퀴·풍선·숨 — 기체는 놀리고, 늘고, 섞이고, 녹는다

석 교수 마당에서 지금 벌어지는 일 세 가지를 보자. 태오는 바퀴에 공기를 밀어 넣고, 하린은 풍선을 불고, 이모는 숨을 쉬고 계신다.

이모 저는 그냥 커피 마시면서 숨만 쉬고 있는데요.

석 교수 그 숨이 제일 정교한 기체 장치예요. 가슴 아래 가로막이 내려가면 폐의 부피가 커지고, 부피가 커지면 폐 속 압력이 바깥보다 조금 낮아집니다. 그러면 공기가 저절로 들어와요. 내쉴 때는 반대고요. 3장에서 배울 보일 법칙이 바로 이 관계입니다.

태오 바퀴는 반대로 부피가 거의 그대로인데 공기를 자꾸 넣으니까 압력이 오르는 거죠?

석 교수 그렇다. 부피가 같은 그릇에 분자 수를 늘리면 압력이 오른다. 5장과 6장에서 이것을 식으로 쓴다. 하린의 풍선은 둘이 섞인 경우다. 분자를 넣으면서 부피도 커진다.

하린 그러면 기체는 압력, 부피, 분자 수가 서로 묶여 있는 거네요.

석 교수 하나가 더 있다. 온도. 여름 한낮에 자전거를 햇볕에 세워 두면 바퀴가 더 단단해지고, 겨울 아침에는 물렁해진다. 기체는 이렇게 놀리면 줄고, 데우면 늘고, 다른 기체와 아무 비율로나 섞이고, 물에 조금씩 녹는다. 이 네 가지 성질이 이 책의 줄거리다.

이모 액체나 고체도 데우면 조금 늘지 않나요? 기차 레일 사이를 띄워 놓는다고 들었어요.

석 교수 늘긴 합니다. 그런데 정도가 전혀 달라요. 철은 0°C 에서 100°C 까지 데워도 부피가 0.4 % 정도 늘고, 물은 4 % 남짓입니다. 기체는 같은 압력에서 0°C 에서 100°C 로 데우면 37 %가 늘어요. 게다가 철과 물은 종류마다 늘어나는 정도가 다른데, 기체는 수소든 질소든 이산화 탄소든 거의 같은 비율로 늘니다. 기체만 따로 한 권으로 배우는 이유가 여기 있어요. 종류와 상관없이 같은 법칙을 따르거든요.

1.2 같은 물 1 mol의 세 얼굴

- 석 교수** 왜 기체만 그렇게 순하게 같은 법칙을 따를까? 실험 하나로 시작하자. 물 1 mol, 곧 18 g 을 생각해 보자. 얼음, 물, 수증기일 때 부피가 각각 얼마일까?
- 태오** 물은 밀도가 1 g/mL니까 18 mL요.
- 하린** 얼음은 물에 뜨니까 그보다 조금 크겠조?
- 석 교수** 맞다. 얼음 밀도는 0.917 g/mL라서 $18.0 \div 0.917 = 19.6$ mL다. 그럼 100 °C, 1 atm 의 수증기는?
- 태오** 그건 아직 안 배웠는데요.
- 석 교수** 6장에서 배울 식을 미리 빌려 쓰자. 1 atm에서 기체 1 mol의 부피는 $0.082 \times$ (절대 온도)로 구한다. 100 °C는 절대 온도로 373 K이니 $0.082 \times 373 = 30.6$ L다. **그림 4**를 보렴.

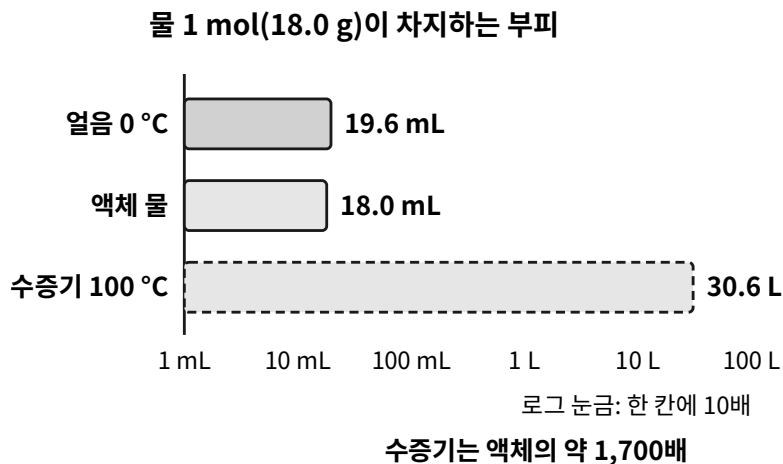


그림 4. 물 1 mol(18.0 g)의 상태별 부피를 로그 눈금으로 비교했다. 얼음(0 °C) 19.6 mL, 물(4 °C 부근) 18.0 mL, 수증기(100 °C, 1 atm) 30.6 L. 수증기는 액체 물의 약 1,700배를 차지한다(계산값).

- 하린** 18 mL가 30.6 L가 된다고요? $30.6 \div 0.018$ 하면... 1,700배요!
- 석 교수** 막대를 보통 눈금으로 그렸으면 물과 얼음은 바닥에 붙은 점으로밖에 안 보여서 로그 눈금을 썼다. 한 칸 올라갈 때마다 10배다. 같은 분자 6.02×10^{23} 개가 1,700배나 넓은 공간을 차지한다는 건 무슨 뜻일까?
- 태오** 분자가 커진 건 아닐 테고... 분자 사이가 멀어진 거죠.
- 석 교수** 그렇다. 분자 하나가 차지하는 평균 공간을 정육면체로 생각하고 한 변을 구하면 분자 사이 평균 거리가 나온다. 0 °C, 1 atm 기체라면 1 mol이 22.4 L이니, $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \div (6.02 \times 10^{23}) = 3.7 \times 10^{-26} \text{ m}^3$ 이고, 그 세제곱근이 $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$, 곧 3.3 nm다.
- 이모** 나노미터면 너무 작아서 감이 안 와요.
- 석 교수** 질소 분자 하나의 지름이 약 0.37 nm예요. 그러니 기체 속 분자들은 자기 지름의 약 9배 거리를 두고 떨어져 있습니다. 액체 물은 같은 계산으로 0.31 nm라서 분자들이 거의 맞닿아 있고요. **그림 5**에 세 상태를 나란히 그렸어요.

1.3 기체를 기술하는 네 변수

- 석 교수** 이제 기체를 숫자로 다루는 법을 정하자. 기체 한 덩어리의 상태는 네 개의 값으로 정해진다. 압력 P , 부피 V , 절대 온도 T , 몰수 n .
- 이모** 넷만 알면 된다는 게 신기하네요. 공기에는 질소, 산소, 이산화 탄소가 다 섞여 있잖아요.
- 석 교수** 섞인 기체도 전체 몰수만 알면 넷으로 충분해요. 성분마다 나누어 보는 법은 8장에서 배웁니다. 하나씩 볼까요. 압력은 기체가 단위 넓이의 벽을 미는 힘이고, 단위는 주로 atm(기압)과 mmHg를 써요. 2장에서 자세히 다룹니다.
- 하린** 부피는 L나 mL고요.
- 석 교수** 그렇다. 기체에는 정해진 부피가 없으니 기체의 부피는 곧 그릇의 부피다. 풍선처럼 그릇이 늘어나면 풍선의 부피가 기체의 부피다. 온도는 반드시 절대 온도 K 로 쓴다. 섭씨온도에 273을 더한다. 왜 그래야 하는지는 4장에서 실험 자료로 보일 거다. 몰수는 분자 수를 6.02×10^{23} 으로 나눈 값이다.
- 태오** 네 개 중 둘을 고정하고 나머지 둘의 관계를 본 게 보일 법칙, 샤를 법칙 그런 거죠?
- 석 교수** 잘 정리했다. 보일 법칙은 n 과 T 를 고정하고 P 와 V , 샤를 법칙은 n 과 P 를 고정하고 V 와 T , 아보가드로 법칙은 P 와 T 를 고정하고 V 와 n 의 관계다. 이 셋을 하나로 묶은 것이 $PV = nRT$, 이상 기체 방정식이다.

$$PV = nRT \quad (P: \text{압력}, V: \text{부피}, n: \text{몰수}, T: \text{절대 온도}, R: \text{기체 상수})$$

문제 1.2

0 °C, 1 atm에서 공기 1.0 L의 질량은 몇 g인가? 공기의 평균 물질량은 29 g/mol이고, 0 °C, 1 atm에서 기체 1 mol의 부피는 22.4 L이다.

- 하린** 1.0 L는 $1 \div 22.4 = 0.0446$ mol이에요. 여기에 29를 곱하면 1.29 g이에요.
- 이모** 공기 1 L가 1.3 g이나 된다니요. 공기는 무게가 없는 줄 알았어요.
- 석 교수** 정답은 1.29 g입니다. 이 방은 가로 5 m, 세로 4 m, 높이 2.5 m라 50 m^3 , 곧 50,000 L예요. 1.29를 곱하면 약 65 kg. 방 안 공기의 무게가 어른 한 사람만큼입니다. 공기는 가법지만 없지 않아요. 그 무게가 2장에서 배울 대기압을 만듭니다.
- 태오** 같은 1 L라도 더운 날이면 분자 사이가 더 벌어지니까 더 가볍겠네요.
- 석 교수** 그렇다. 4장 열기구가 정확히 그 이야기다.

기체의 양은 세 가지 방법으로 센다

- 하린** 그런데 기체는 눈에 안 보이잖아요. 몰수 n 을 어떻게 알아요? 저울에 올릴 수도 없고요.
- 석 교수** 좋은 질문이다. 기체의 양을 세는 길은 세 가지다. 첫째, 질량으로. 기체를 담은 통을 달고, 기체를 뺀 뒤 다시 달아 그 차이를 물질량으로 나눈다. 캠핑용 부탄가스 통을 쓰기 전후로 달아 보면 쓴 가스의 몰수가 나온다. 둘째, 부피로. 온도와 압력이 정해져 있으면 부피가 몰수에 비례하니, 0 °C, 1 atm에서 22.4 L가 1 mol이라는 기준으로 센다. 셋째, 압력으로. 부피와 온도가 정해진 통이라면 압력이 몰수에 비례하니 압력계 눈금으로 센다.
- 태오** 자동차 타이어에 압력계를 대는 게 셋째 방법이군요. 공기가 얼마나 들어 있는지를 압력으로 읽는 거고요.

석 교수 그렇다. 기출 문제도 이 세 가지를 자유롭게 오간다. 질량을 주고 부피를 묻거나, 부피 변화를 주고 몰수 변화를 묻거나, 압력 변화로 반응한 양을 묻는다. 어느 방향이든 다리는 몰수 n 하나다. 그래서 기체 문제를 풀 때는 주어진 값을 먼저 몰수로 바꾸고, 몰수로 계산한 뒤, 묻는 값으로 되돌리는 습관을 들이자.

이모 은행에서 원화, 달러, 엔화를 바꿀 때 기준 통화를 하나 정해 두는 것과 비슷하네요.

석 교수 딱 맞는 비유예요. 기체 계산의 기준 통화가 몰입니다.

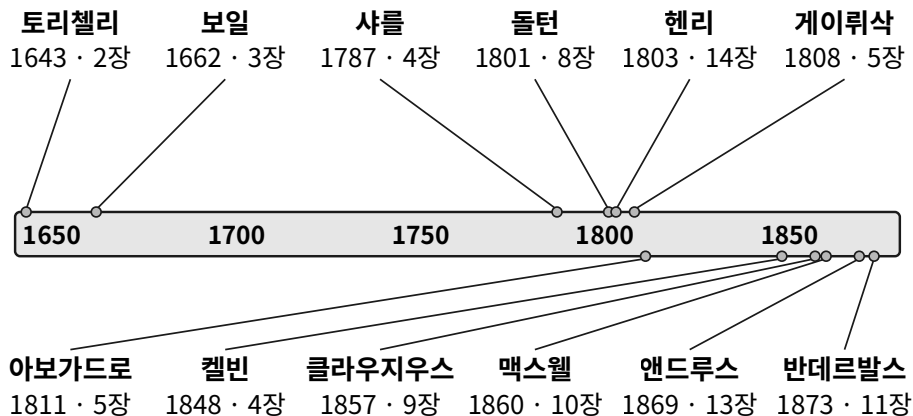
“1 mol = 22.4 L”는 언제나 맞는 말이 아니다

22.4 L는 0 °C, 1 atm에서의 값이다. 25 °C, 1 atm에서는 24.5 L, 27 °C에서는 24.6 L, 100 °C에서는 30.6 L로 커진다. 문제에 온도가 0 °C가 아니면 22.4를 그대로 쓰지 말고 $0.082 \times T$ 로 다시 구한다. 반대로 시험 문제가 “25 °C, 1 atm에서 22.4 L로 가정한다”처럼 조건을 따로 주면 그 가정을 따르고, 답안에 가정을 따랐다고 밝힌다.

1.4 기체 법칙의 역사

이모 이런 법칙은 누가 언제 알아낸 건가요? 학교 다닐 때 이름만 외웠던 것 같아요.

석 교수 이름만 외우면 금방 잊혀요. 누가 어떤 질문을 품었는지 순서대로 보면 법칙이 자연스럽게 이어집니다. **그림 6**의 연표를 보세요.



측정하고 비교한 시대(1643~1811) → 분자로 설명한 시대(1848~1873)

그림 6. 기체 법칙의 연표(1640~1880). 토리첼리의 수은 기둥(1643)에서 시작해 보일(1662), 샤를(1787), 돌턴(1801), 헨리(1803), 게이뤼삭(1808), 아보가드로(1811), 켈빈의 절대 온도(1848), 클라우지우스(1857)·맥스웰(1860)의 분자 운동론, 앤드루스의 임계점(1869), 반데르발스의 실제 기체 식(1873)으로 이어진다. 괄호는 이 책에서 다루는 장.

석 교수 1643년 이탈리아의 토리첼리가 수은을 채운 유리관을 거꾸로 세워 공기에 무게와 압력이 있다는 것을 보였다. 2장 이야기다. 그 소식을 들은 영국의 보일이 공기를 J자 관에 가두고 눌러 보았다. 1662년, 압력을 두 배로 하면 부피가 반이 된다는 보일 법칙이 나왔다.

하린 그다음이 샤를이죠? 이름이 비슷해서 늘 헷갈려요.

- 석 교수** 샤를은 프랑스 사람이고 열기구를 탄 과학자다. 1787년 무렵 데운 기체의 부피를 잰다. 그 뒤 1801년 돌턴은 섞인 기체의 압력은 성분 압력의 합이라는 것을, 1803년 헨리는 물에 녹는 기체의 양이 압력에 비례한다는 것을 보였다. 1808년 게이뤼삭은 기체끼리 반응할 때 부피가 간단한 정수비를 이룬다는 것을 찾았고, 1811년 아보가드로는 그것을 설명하려고 “같은 부피에는 같은 수의 분자”라는 가설을 세웠다.
- 태오** 절대 온도는 한참 뒤에 나오네요. 1848년.
- 석 교수** 켈빈이 열의 이론에서 절대 온도 눈금을 세운 해다. 그리고 1857년 클라우지우스, 1860년 맥스웰이 “기체는 빠르게 날아다니는 분자”라는 그림에서 압력과 온도를 설명했다. 9장과 10장의 분자 운동론이다. 마지막으로 1869년 앤드루스가 이산화 탄소를 31 °C 이상에서는 아무리 눌러도 액체로 만들 수 없다는 임계점을 발견했고, 1873년 반데르발스가 분자의 크기와 인력을 넣은 실제 기체의 식을 냈다. 11장과 13장이다.
- 하린** 보일은 공기가 왜 눌렀다가 다시 퍼진다고 생각했어요?
- 석 교수** 보일은 공기 알갱이가 양털이나 용수철처럼 눌리면 되밀어 낸다고 상상했다. 그래서 그의 책 제목에 “공기의 탄성(spring of the air)”이라는 말이 들어간다. 지금 우리는 그 되밀는 힘이 용수철이 아니라 분자들이 벽에 부딪히는 충돌에서 나온다는 것을 안다. 같은 현상을 보고도 설명은 백오십 년 뒤에야 바로잡혔다.
- 태오** 틀린 그림으로도 맞는 법칙을 찾을 수 있었네요.
- 석 교수** 측정이 정확하면 그렇다. 법칙은 자료에서 나오고, 그림은 나중에 고쳐진다. 논술에서도 자료를 정확히 읽는 것이 먼저다.
- 이모** 이백 년 넘게 걸렸네요. 측정이 먼저고, 설명이 나중이고요.
- 석 교수** 날카로운 관찰이에요. 처음 백오십 년은 재고 비교하는 시대, 다음 오십 년은 왜 그런지 분자로 설명하는 시대였습니다. 이 책도 그 순서를 따릅니다. 3~5장에서 실험 자료로 세 법칙을 얻고, 6장에서 하나로 묶고, 9장에서 분자로 설명하지요.

1.5 이 책의 길

- 태오** 전체 순서를 한 번에 보고 싶어요. 논술 준비하려면 어디에 힘을 줘야 하는지 알아야 하니까요.
- 석 교수** 좋다. 길은 이렇다. 먼저 압력이 무엇이고 어떻게 재는지(2장). 그다음 세 법칙을 하나씩(3~5장) 배우고 $PV = nRT$ 로 묶는다(6장). 여기까지가 뼈대다. 그 위에 반응식 속에서 기체 몰수가 바뀌는 문제(7장)와 섞인 기체의 부분 압력(8장)을 엮는다. 기출에서 가장 자주 나오는 부분이 6~8장이다.
- 하린** 그 뒤는요?
- 석 교수** 분자 운동론으로 압력과 온도의 정체를 밝히고(9장), 가벼운 분자가 빠르다는 것으로 분자량을 재고(10장), 실제 기체가 이상 기체에서 벗어나는 조건을 본다(11장). 그리고 기체가 액체와 만나는 이야기 — 증기압과 끓는점(12장), 상평형 그림(13장), 물에 녹는 기체(14장)로 끝난다.
- 이모** 아이들 시험에서는 그중에 어떤 게 어떻게 나오나요?
- 석 교수** 실린더 속에서 연료를 태워 기체 몰수가 바뀌는 문제, 대기 중 이산화 탄소의 ppm을 분압으로 바꾸는 문제, 밀폐 용기 속 물과 수증기의 양을 상평형 그림으로 읽는 문제가 최근의 큰 줄기예요. 모두 오늘 정한 네 변수 $P \cdot V \cdot T \cdot n$ 를 정확히 세는 데서 출발합니다.

핵심 기체 문제를 시작하는 4단계

1. 기체가 담긴 그릇을 정하고, 그 안의 $P \cdot V \cdot T \cdot n$ 네 값을 적는다(모르는 값은 빈칸으로).
2. 온도는 절대 온도로 바꾼다($T = t + 273$). 섭씨온도로는 비례식을 쓰지 않는다.
3. 단위를 맞춘다. 부피는 L, 압력은 atm이 기본이다(mL·mmHg는 바꾸어 쓴다).
4. 상태가 바뀌면 무엇이 고정되고(그릇, 온도, 몰수) 무엇이 바뀌는지를 먼저 말로 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 0 °C, 1 atm에서 기체 분자 사이 평균 거리가 3.3 nm일 때, 질소 분자 지름(0.37 nm)의 몇 배인가?
2. 물 36 g이 100 °C, 1 atm에서 모두 수증기가 되면 부피는 몇 L인가?
3. 0 °C, 1 atm에서 이산화 탄소(몰질량 44 g/mol) 2.24 L의 질량은 몇 g인가?
4. 같은 압력에서 0 °C의 기체를 100 °C로 데우면 부피가 약 몇 % 늘어나는가? 이 비율이 기체의 종류와 거의 상관없는 까닭을 한 문장으로 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 네 변수는 4부 기출의 출발점이다. **기출문제 10**(건국대 2009) (285쪽)은 제시문에서 기체를 “압력·부피·온도·몰수로 기술되는 물질”로 소개한 뒤, 기체 법칙들을 분자 운동론으로 설명하게 한다. **기출문제 9**(건국대 2010) (276쪽)은 샤를이 열기구를 타던 시절의 이야기로 시작해 섭씨온도와 절대 온도를 구별하게 하고, **기출문제 2**(연세대 2024) (212쪽)는 실린더 속 기체의 $P \cdot V \cdot T \cdot n$ 을 반응 전후로 정확히 세는 능력을 묻는다. 세 문제 모두 오늘의 핵심 4단계 가운데 첫 단계, “그릇 속 네 값을 적는 것”에서 실수하면 끝까지 틀린다. 4부의 문항 분석을 읽다가 길을 잃으면, 그 문제의 그릇이 무엇이고 그 안의 $P \cdot V \cdot T \cdot n$ 가운데 무엇이 고정되어 있는지를 이 장의 방식대로 다시 적어 보자.

이 장의 참고문헌

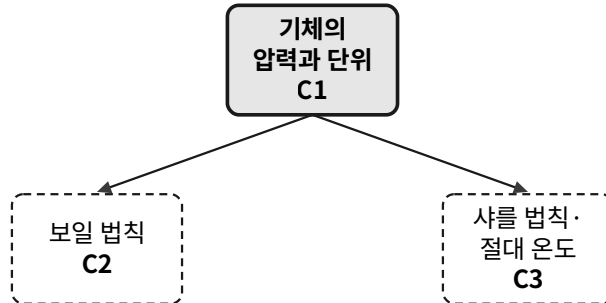
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Middleton, W. E. K. (1963). The place of Torricelli in the history of the barometer. *Isis*, 54(1), 11–28. <https://doi.org/10.1086/349662>
- West, J. B. (2005). Robert Boyle’s landmark book of 1660 with the first experiments on rarified air. *Journal of Applied Physiology*, 98(1), 31–39. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00759.2004>
- 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>

제 2장 기체의 압력: 분자가 벽을 두드리는 힘

새 개념 압력 = 힘/넓이 · 대기압과 토리첼리 · 압력 단위 환산 · 수면 높이로 압력 읽기

이어짐 보일 법칙 3장 · 밀폐 실린더 7장 · 분자 운동론 9장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

그림 7. 제 2장에서 배우는 개념(C1 기체의 압력과 단위)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 8 (연세대 2011년) (267쪽)	임계점 너머로 — 땅속 CO ₂ 의 깊이	C1 기체의 압력과 단위

빨대와 흡착판 — 미는 것은 바깥 공기

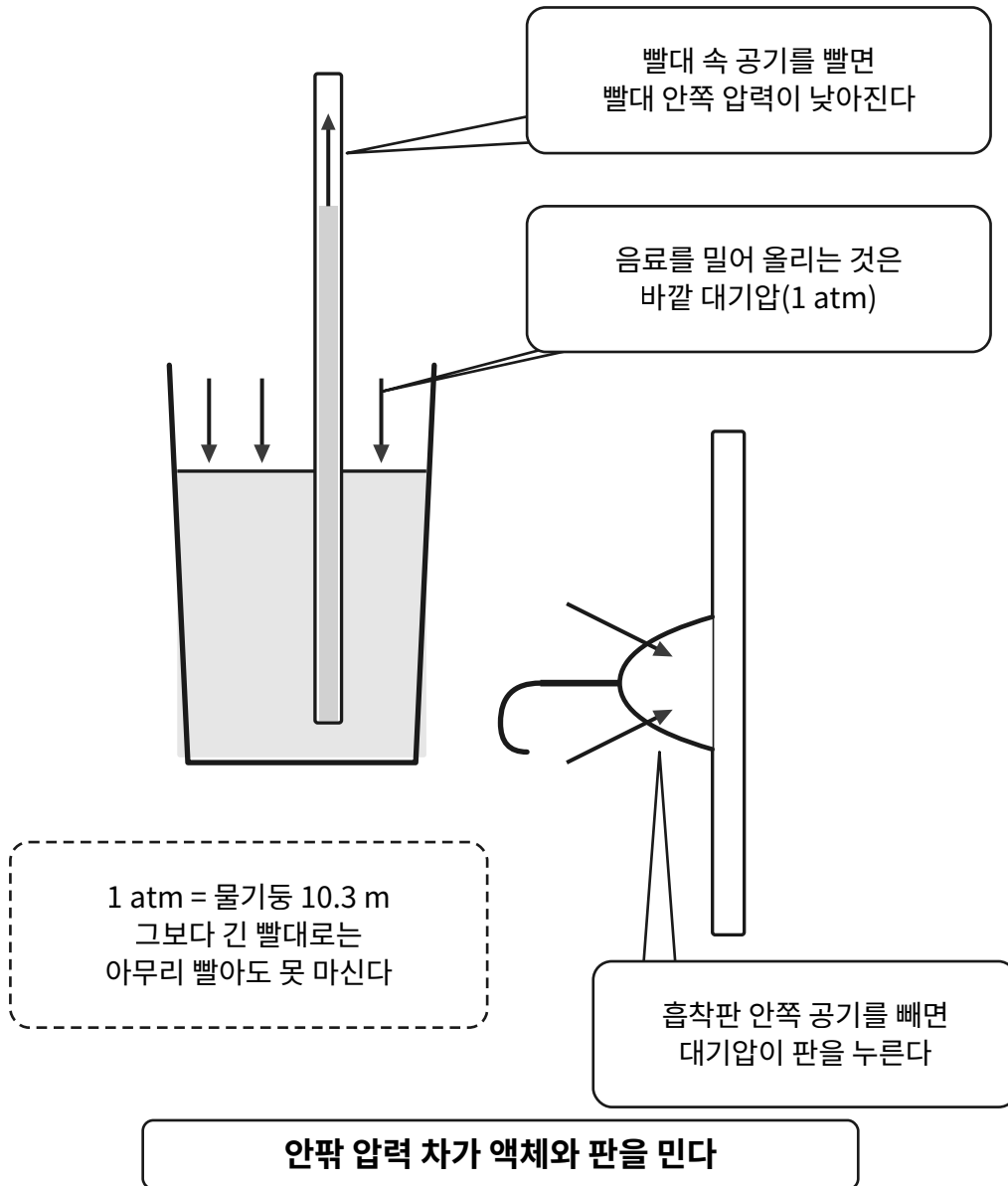


그림 8. 돌집 부엌 — 하린은 빨대로 매실차를 마시고, 유리창에는 흡착판 고리가 붙어 있다. 빨대 속 공기를 빨아내면 빨대 안의 압력이 낮아지고, 컵 위를 누르는 바깥 대기압이 음료를 빨대 위로 밀어 올린다. 흡착판도 안쪽 공기가 빠진 만큼 대기압이 판을 유리에 눌러 붙인다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 압력은 단위 넓이에 작용하는 힘이다.
2. 빨대와 흡착판은 안팎의 압력 차로 움직인다.
3. 대기압 1 atm은 물기둥 10.3 m를 떠받친다 — 그보다 긴 빨대로는 마실 수 없다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (16쪽)에서 기체를 $P \cdot V \cdot T \cdot n$ 네 변수로 기술한다고 했다. 이 장은 그 가운데 압력 P 를 다룬다. 힘의 단위 뉴턴(N, 1 kg의 물체가 받는 중력은 약 9.8 N), 넓이 단위 환산($1 \text{ m}^2 = 10,000 \text{ cm}^2$), 밀도 = 질량/부피만 알면 된다.

둘째 토요일, 수업 전에 이모가 매실차를 타 왔다. 하린은 빨대를 꽂아 한 번에 반 컵을 마시더니 빨대를 들여다보았다.

하린 교수님, 빨대로 마실 때 제가 음료를 빨아올리는 거죠? 입으로 당기는 거요.

석 교수 그렇게들 생각하는데, 사실은 네가 당기는 게 아니라 바깥 공기가 미는 거다. 오늘은 그 미는 힘, 압력을 정확히 정의하는 날이다.

태오 빨대에 무슨 힘이 있다는 거예요? 저는 그냥 입으로 빠는 느낌밖에 없는데요.

석 교수 그 느낌의 정체를 하나씩 풀어 보자. 끝나면 빨대가 얼마나 길어지면 아무리 세게 빨아도 못 마시는지까지 계산할 수 있을 거다.

2.1 압력은 단위 넓이에 작용하는 힘

석 교수 먼저 고체로 시작하자. 몸무게 50 kg인 사람이 운동화를 신고 설 때와 굽 끝이 1 cm^2 인 뽕족구두를 신고 한 굽에 체중을 다 실을 때, 바닥이 받는 힘은 어느 쪽이 크니?

하린 똑같죠. 몸무게가 같으니까요.

석 교수 맞다. 힘은 $50 \times 9.8 = 490 \text{ N}$ 으로 같다. 그런데 마룻바닥에 자국이 남는 건 구두 쪽이다. 같은 힘이 좁은 곳에 몰리기 때문이다. 그래서 힘을 넓이로 나눈 값, 압력을 정의한다.

$$\text{압력 } P = \text{힘 } F \div \text{넓이 } A \text{ (단위 } \text{N/m}^2 = \text{Pa, 파스칼)}$$

태오 운동화 바닥이 두 짝 합해서 300 cm^2 라고 하면 $490 \div 0.0300 = 1.63 \times 10^4 \text{ Pa}$ 이고, 굽은 $490 \div 0.0001 = 4.9 \times 10^6 \text{ Pa}$ 예요. 300배 차이네요.

석 교수 넓이가 300분의 1이니 압력은 300배다. 이제 기체로 가자. 기체는 어떻게 벽에 힘을 줄까?

이모 기체는 무게도 거의 없는데 어떻게 미나요?

석 교수 1장에서 기체 분자는 빈 공간을 빠르게 날아다닌다고 했지요. 그 분자들이 벽에 부딪혔다가 튀어나올 때마다 벽을 아주 조금씩 밀니다. 하나하나는 보잘것없지만 1 cm^2 의 벽에 1 초 동안 부딪히는 공기 분자가 약 3×10^{23} 개나 돼요. 그 충동을 모두 합친 것이 기체의 압력입니다. 9장에서 이 숫자를 직접 계산해요.

하린 그래서 풍선 안쪽 벽 어디를 봐도 똑같이 밀리는 거군요. 분자들이 모든 방향으로 날아다니니까요.

석 교수 그렇다. 기체의 압력은 방향이 없다. 위, 아래, 옆 어느 벽이든 같은 크기로 민다. 풍선이 공처럼 둥글게 부푸는 이유다.

태오 그런데 기체에도 무게가 있잖아요. 1장에서 공기 1 L가 1.29 g이라고 했으니까, 통 아래 쪽 벽이 더 세게 눌리지 않아요?

석 교수 날카롭다. 원리로는 그렇다. 높이 10 cm의 통이라면 위아래 압력 차는 공기 밀도 $1.29 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \times 0.10 \text{ m} = 1.3 \text{ Pa}$, 대기압의 10만분의 1쯤이다. 실험실 크기의 그릇에서는 무시해도 된다. 그릇 속 기체의 압력은 무게가 아니라 충돌이 만든다는 뜻이다. 반대로 수 km 높이의 대기 전체를 보면 그 무게가 쌓여 대기압이 된다. 같은 공기라도 어떤 크기를 보느냐에 따라 무엇이 중요한지가 달라진다.

이모 그럼 대기 전체의 공기를 바닥과 같은 밀도로 꼭 눌러 쌓으면 높이가 얼마나 될까요?

석 교수 재미있는 계산이에요. $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$ 를 밀도 1.29 kg/m^3 와 9.8로 나누면 약 8,000 m, 곧 8 km가 나와요. 실제 대기는 위로 갈수록 묽어지면서 훨씬 높이 퍼져 있지만, “바닥 밀도로 쌓은 두께”는 8 km입니다. 이 8 km가 이 장 끝에서 다시 나와요.

2.2 토리첼리의 수은 기둥

석 교수 우리는 공기라는 바다의 바닥에 산다. 머리 위로 수십 km 높이의 공기가 쌓여 있고, 그 무게가 만드는 압력이 대기압이다. 이것을 처음 켜 사람이 1643년 이탈리아의 토리첼리다.

태오 어떻게 잰어요? 공기를 저울에 달 수는 없잖아요.

석 교수 영리한 방법을 썼다. 길이 1 m쯤 되는 유리관에 수은을 가득 채우고, 입구를 손가락으로 막은 채 거꾸로 세워 수은 그릇에 담갔다. 손가락을 떼자 수은이 조금 흘러내리다가 그릇 수면에서 약 76 cm 높이에서 멈췄다. 관 위쪽에는 거의 진공인 빈 공간이 남았다.

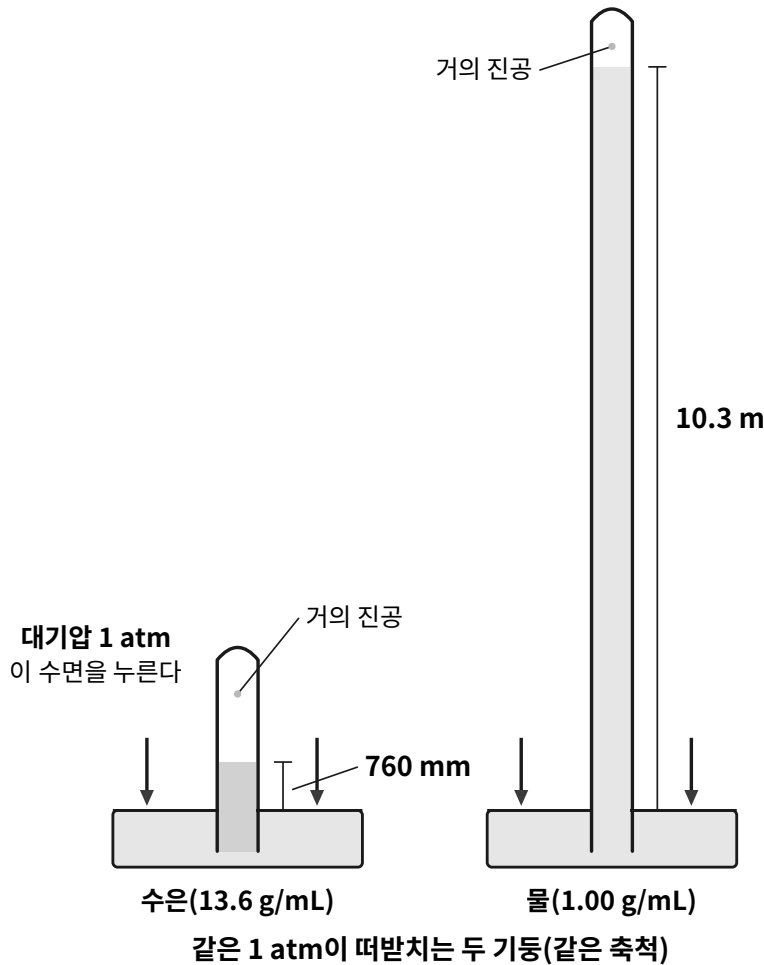


그림 9. 토리첼리 실험(1643). 수은 기둥 760 mm와 같은 압력을 버티는 물기둥 10.3 m를 같은 축척으로 나란히 그렸다. 바깥 대기압이 그릇 수면을 누르고, 그 힘이 관 속 액체 기둥의 무게와 맞선다($0.760 \text{ m} \times 13.6 = 10.3 \text{ m}$, 계산 값).

하린 왜 하필 76 cm에서 멈춰요?

석 교수 그림 9의 그릇 수면을 보렴. 관 밖의 수면은 대기가 누르고 있고, 관 속 수은은 위쪽이 진공이라 아무도 누르지 않는다. 그러니 관 속 수은 기둥의 무게가 만드는 압력이 바깥 대기압과 같아지는 높이에서 멈춘다. 그 높이가 760 mm다. 그래서 $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$ 라고 쓴다.

이모 날씨가 바뀌면 그 높이도 바뀌나요?

석 교수 바뀝니다. 그래서 이 장치가 기압계가 되었어요. 맑은 날 고기압에서는 조금 오르고, 태풍이 오면 내려갑니다. 일기 예보의 “1013 hPa”이 바로 760 mmHg에 해당하는 대기압이에요.

태오 수은 말고 물로 하면요?

석 교수 그것이 첫 번째 문제다.

문제 2.1

수은 대신 물로 토리첼리 실험을 하면, 1 atm에서 물기둥의 높이는 몇 m인가? 수은의 밀도는 13.6 g/mL, 물은 1.00 g/mL이다.

- 태오** 물은 수은보다 13.6배 가벼우니까... 기둥은 13.6배 낮아야 하나요? $760 \div 13.6 = 55.9 \text{ mm}$.
- 석 교수** 거꾸로 생각해 보자. 같은 압력을 만들려면 가벼운 액체는 기둥이 더 높아야 할까, 낮아야 할까?
- 태오** 아, 같은 무게를 만들려면 더 높이 쌓아야 하죠. $0.760 \text{ m} \times 13.6 = 10.3 \text{ m}$ 예요.
- 석 교수** 정답은 10.3 m다. 기둥 바닥의 압력은 밀도 $\times$ 중력 가속도 $\times$ 높이로 정해지니, 밀도가 13.6분의 1이면 높이가 13.6배가 되어야 같은 압력이다. 3층 건물 높이의 물기둥을 공기가 떠받치는 셈이다.
- 하린** 그럼 빨대가 10.3 m보다 길면 아무리 빨아도 음료가 안 올라와요?
- 석 교수** 입 안을 완전한 진공으로 만들어도 대기압이 밀어 올릴 수 있는 최대 높이가 10.3 m다. 그보다 긴 빨대로는 못 마신다. 실제로 사람의 입은 진공을 만들지 못하니 훨씬 짧은 높이에서 한계가 온다. 옛날 광산의 흡입 펌프가 깊이 10 m 남짓한 물을 끌어올리지 못해 고생한 것도 같은 이유다. 사실 토리첼리 실험은 그 수수께끼를 풀려다 나온 것이다.

말 열여섯 마리도 떼지 못한 반구

- 석 교수** 대기압이 얼마나 센지 보여 준 유명한 실험이 하나 더 있다. 1654년 독일 마그데부르크 시장 게리케가 지름 약 50 cm의 구리 반구 두 개를 맞대고 속의 공기를 펌프로 뺐다. 그리고 양쪽에 말을 여덟 마리씩 매어 당기게 했는데 떨어지지 않았다.
- 하린** 속이 비었는데 왜 안 떨어져요? 붙잡는 것도 없는데요.
- 석 교수** 붙잡는 게 아니라 바깥 공기가 양쪽에서 누르는 거다. 계산해 보자. 반구를 떼려면 맞면, 곧 반지름 0.25 m인 원의 넓이에 작용하는 대기압을 이겨야 한다. 넓이는 $3.14 \times 0.25^2 = 0.196 \text{ m}^2$ 이고, $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 를 곱하면 약 $2.0 \times 10^4 \text{ N}$ 이다.
- 태오** 9.8로 나누면 2,030 kg... 2톤짜리 물건을 들어 올리는 힘이네요.
- 석 교수** 그렇다. 안이 완전한 진공이 아니어서 실제 힘은 그보다 작았겠지만, 말들이 쉽게 떼지 못한 까닭은 충분히 설명된다. 그리고 밸브를 열어 공기를 넣자 손으로도 쉽게 떨어졌다. 안팎 압력이 같아졌기 때문이다. 우리 몸도 늘 1 cm^2 마다 약 1 kg의 물체가 누르는 만큼의 대기압을 받지만, 몸속 압력도 같아서 느끼지 못한다.
- 이모** 부엌 유리창에 붙은 흡착판 고리도 같은 원리겠네요.
- 석 교수** 맞아요. 흡착판을 누르면 안쪽 공기가 빠지고, 고무가 되돌아가려 하면서 안쪽이 바깥보다 낮은 압력이 됩니다. 그 차이만큼 대기압이 판을 유리에 눌러 줘요. 가장자리로 공기가 조금씩 새어 들어가면 어느 날 툭 떨어지지요.

2.3 압력 단위 바꾸기

- 석 교수** 압력 단위는 여러 가지라서 문제마다 다르게 나온다. 표 6에 한데 모았다.

표 6. 압력 단위 환산 — 모두 1 atm과 같은 크기

단위	1 atm에 해당하는 값	주로 쓰는 곳
atm(기압)	1	화학 계산의 기본($R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)
mmHg(= torr)	760	수은 기압계, 혈압, 증기압 표
Pa(= N/m ²)	1.013×10^5	SI 단위, 에너지 계산($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

단위	1 atm에 해당하는 값	주로 쓰는 곳
kPa / hPa	101.3 kPa / 1013 hPa	일기 예보(hPa), 공학
bar	1.013	타이어·잠수 장비
물기둥	10.3 m	수조·잠수 깊이(물 10 m마다 약 1 atm)

하린 단위가 너무 많아요. 다 외워야 해요?

석 교수 $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101.3 \text{ kPa} = \text{물기둥 } 10.3 \text{ m}$, 이 한 줄이면 된다. 나머지는 이 줄에서 비례로 바꾼다. 예를 들어 380 mmHg 는 760 의 절반이니 0.500 atm 이고, 101.3 kPa 의 절반인 50.7 kPa 다.

태오 물기둥 1 cm 는 몇 atm이에요? 실린더 문제에서 수면이 몇 cm 오르내린다고 하잖아요.

석 교수 $1 \div 1033 = 9.7 \times 10^{-4} \text{ atm}$ 이다. $1,000$ 분의 1 atm 쯤이라고 기억해 두면 편하다. 이 값이 다음 절에서 중요해진다.

이모 자동차 타이어 압력계는 어떤가요? 32라고 쓰여 있던데요.

석 교수 그건 psi라는 미국 단위예요. 1 atm 이 14.7 psi 입니다. 그리고 타이어 압력계는 대기압을 뺀 값, 곧 바깥보다 얼마나 더 미는지를 보여 줘요. 이것을 게이지 압력이라고 부르고, 대기압까지 더한 값을 절대 압력이라고 합니다. 기체 법칙에는 언제나 절대 압력을 넣어야 해요. 6장 타이어 문제에서 이 차이를 다시 봅시다.

하린 혈압 120 도 mmHg라고 들었어요. 그럼 혈관 속 압력이 120 mmHg 예요?

석 교수 혈압도 게이지 압력이다. 대기압보다 120 mmHg 높다는 뜻이니 절대 압력으로는 $760 + 120 = 880 \text{ mmHg}$ 쯤이다. 의사들이 지금도 mmHg를 쓰는 것은 옛날 혈압계가 수은 기둥이었기 때문이다.

2.4 수조 속 실린더 — 수면 높이로 압력 읽기

석 교수 이제 논술 기출에 직접 나오는 장치를 보자. 수조에 물을 받고, 아래가 뚫린 원통(실린더)을 거꾸로 세워 담근다. 실린더 안에는 기체가 갇혀 있고, 아래쪽은 수조 물과 이어져 있다. **그림 10**를 보렴.

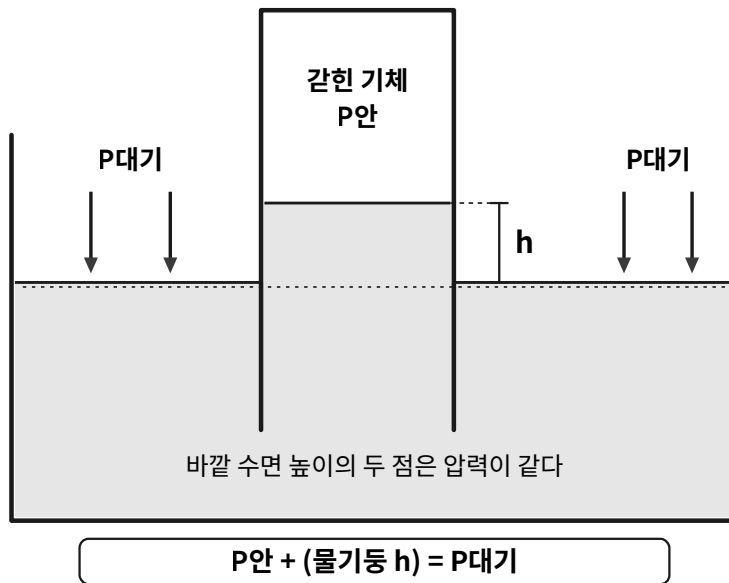


그림 10. 수조에 거꾸로 세운 실린더. 안쪽 수면이 바깥 수면보다 h 만큼 높으면 갇힌 기체의 압력은 대기압보다 물기둥 h 만큼 낮다($P_{\text{안}} = P_{\text{대기}} - h/10.3 \text{ m} \times 1 \text{ atm}$). 안쪽 수면이 바깥보다 낮으면 그만큼 높다. 두 수면이 같으면 안팎 압력이 같다.

하린 안쪽 물이 바깥보다 높이 올라가 있네요. 그건 왜 그래요?

석 교수 같은 높이에서는 물속 압력이 같아야 한다. 바깥 수면 높이의 물을 생각해 보자. 실린더 밖에서는 대기가 그 면을 1 atm으로 누른다. 실린더 안의 같은 높이에서는 안쪽 기체의 압력에 그 위로 솟은 물기둥 h 의 압력이 더해져 누른다. 둘이 같아야 하니 $P_{\text{안}} + (\text{물기둥 } h) = P_{\text{대기}}$ 다. 안쪽 기체 압력이 대기압보다 낮으면 물이 그만큼 올라온다.

태오 빨대랑 똑같네요. 빨대 안 압력이 낮으면 음료가 올라오는 것처럼요.

석 교수 원리가 같다. 반대로 안쪽 기체를 더 넣어 압력이 대기압보다 높아지면 안쪽 수면이 바깥보다 내려간다. 그러니 수면 높이 차를 재면 안쪽 기체의 압력을 읽을 수 있다. 이것이 마노미터(액주 압력계)의 원리다.

문제 2.2

수조에 거꾸로 세운 실린더 안의 수면이 바깥 수면보다 20.6 cm 높다. 대기압이 1.00 atm일 때 실린더 안 기체의 압력은 몇 atm인가?

하린 물기둥 10.3 m가 1 atm이니까, 20.6 cm = 0.206 m는 $0.206 \div 10.3 = 0.0200 \text{ atm}$ 이예요.

태오 안쪽이 높으니까 안 압력이 낮은 거죠. $1.00 - 0.0200 = 0.980 \text{ atm}$.

석 교수 정답은 0.980 atm이다. 부호를 정할 때는 “안쪽 수면이 높으면 안쪽 압력이 낮다”를 그림으로 확인하는 습관을 들이자. 더하기와 빼기를 거꾸로 하는 실수가 가장 흔하다.

이모 그런데 시험 문제에서는 수면이 2~3 cm쯤 오른다고 하던데, 그때도 이렇게 빼야 하나요?

석 교수 좋은 질문이에요. 2.4 cm라면 $0.024 \div 10.3 = 0.0023 \text{ atm}$, 대기압의 0.23 %입니다. 그래서 그런 문제는 보통 “수면 높이 차에 의한 압력 차는 무시한다”는 조건을 달아요. 그 조건이 있으면 안쪽 기체 압력을 언제나 1 atm으로 보고, 물수가 바뀌면 부피가 바뀌어 수면이 움직인다고 풀면 됩니다. 7장의 연소 실린더가 바로 그 문제예요. 조건이 왜 붙었는지 알고 쓰는 것과 모르고 쓰는 것은 답안의 설명에서 차이가 납니다.

수면을 맞추면 안쪽 압력은 대기압

태오 실험할 때 기체 부피를 1 atm에서 재고 싶으면 어떻게 해요? 수면이 자꾸 어긋날 텐데요.

석 교수 실린더를 위아래로 움직여 안팎 수면을 똑같이 맞춘 다음 눈금을 읽는다. 수면이 같으면 물기둥 차가 0이니 안쪽 압력이 정확히 대기압이다. 물 위에서 기체를 모으는 수상 치환 실험에서 쓰는 요령이다.

하린 그러면 그때 안쪽에는 모든 기체만 들어 있는 거예요?

석 교수 하나가 더 섞여 있다. 물 위에 모았으니 수증기가 조금 들어 있다. 25 °C라면 수증기가 약 24 mmHg를 차지하니, 모든 기체 자체의 압력은 $760 - 24 = 736 \text{ mmHg}$ 다. 섞인 기체의 압력을 나누는 법은 8장, 수증기의 압력은 12장에서 자세히 다룬다. 시험 문제가 “수증기압은 무시한다”고 하면 그 조건을 따르면 된다.

2.5 높이 올라갈수록 대기압은 낮아진다

석 교수 마지막으로 산에 올라가 보자. 우리가 공기 바다의 바닥에 산다면, 산 위에 올라가면 머리 위의 공기가 줄어든다. 대기압은 어떻게 될까?

하린 낮아지겠죠.

석 교수 1648년 파스칼의 처남 페리이가 수은 기압계를 들고 프랑스의 푸드돔 산에 올랐더니, 산 꼭대기에서 수은 기둥이 아래 마을보다 약 8 cm 낮았다. 공기의 무게가 압력을 만든다는 증거였다. **그림 11**에 높이에 따른 대기압을 그렸다.

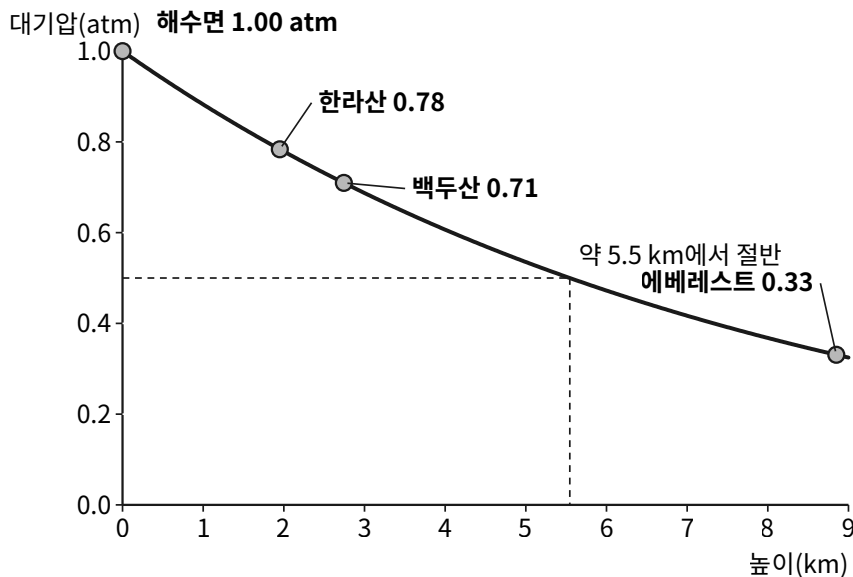


그림 11. 높이에 따른 대기압(근사식 $P = e^{-h/8.0 \text{ km}} \text{ atm}$ 으로 계산). 한라산(1,950 m) 0.78 atm, 백두산(2,744 m) 0.71 atm, 에베레스트(8,849 m) 0.33 atm. 높이 약 5.5 km에서 대기압은 해수면의 절반이 된다. 실제 대기압은 기온과 날씨에 따라 조금씩 다르다.

- 태오** 곡선이 직선이 아니라 점점 완만해지네요.
- 석 교수** 위로 갈수록 공기 자체가 덜 눌러 묶여지기 때문이다. 높이 8 km마다 대기압이 약 e분의 1, 곧 0.37배가 된다는 근사식을 썼다(교과 밖 심화 도구). 한라산 정상은 $e^{-1.95/8.0} = 0.78 \text{ atm}$ 이고, 에베레스트 정상은 0.33 atm으로 해수면의 3분의 1이다.
- 하린** 8 km라는 숫자가 아까 나왔던 거네요. 공기를 바닥 밀도로 쌓은 두께요.
- 석 교수** 잘 기억했다. 우연이 아니다. 온도가 일정한 대기라고 가정하고 식을 세우면, 압력이 e분의 1로 줄어드는 높이가 바로 “바닥 밀도로 쌓은 두께”와 같아진다. 증명은 교과 밖이니 두 숫자가 같다는 것만 알아 두자.
- 태오** 비행기는 10 km 높이로 날잖아요. 거기서 0.3 atm도 안 될 텐데 사람이 어떻게 버텨요?
- 석 교수** $e^{-10/8.0} = 0.29 \text{ atm}$ 이니 밖에서는 버티지 못한다. 그래서 여객기는 객실에 공기를 넣어 압력을 약 0.75~0.8 atm으로 유지한다. 높이 2,000 m 안팎의 산 위와 비슷한 압력이다. 비행기에서 과자 봉지가 뽕뽕하게 부풀고 귀가 먹먹해지는 것도, 객실 압력이 지상보다 낮기 때문이다. 다음 장에서 그 봉지의 부피를 계산한다.
- 이모** 그래서 높은 산에서 숨이 차는 거군요.
- 석 교수** 맞아요. 공기의 21 %가 산소이니 산소가 미는 압력도 같은 비율로 줄어요. 에베레스트에서는 $0.33 \times 0.21 = 0.069 \text{ atm}$ 밖에 안 됩니다. 이 계산은 8장 부분 압력에서 정식으로 해요. 그리고 대기압이 낮으면 물이 낮은 온도에서 끓어서 산에서 끓인 라면이 설익지요. 12장 이야기입니다.

핵심 압력 문제를 푸는 4단계

1. 누가 누구를 미는지 정한다 — 기체가 벽을, 대기가 수면을, 액체 기둥이 바닥을.
2. 같은 높이의 액체 속 두 점은 압력이 같다는 데서 등식을 세운다($P_{\text{안}} + \text{물기둥} = P_{\text{대기}}$).
3. 단위를 하나로 맞춘다: 1 atm = 760 mmHg = 101.3 kPa = 물기둥 10.3 m.
4. 부호를 그림으로 확인한다 — 안쪽 수면이 높으면 안쪽 기체 압력이 낮다. 기체 법칙에는 절대 압력을 넣는다.

스스로 풀어 보기

1. 380 mmHg를 atm과 kPa로 바꾸라.
2. 수조에 거꾸로 세운 실린더 안의 수면이 바깥보다 41.2 cm 낮다. 대기압이 1.00 atm일 때 안쪽 기체의 압력은?
3. 에베레스트 정상의 대기압 0.33 atm은 몇 mmHg인가?
4. 넓이 20 cm²인 흡착판 안쪽이 완전히 진공이라면, 1 atm($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)에서 판을 떼어 내는 데 필요한 최소 힘은 몇 N인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

압력을 수면 높이로 읽는 오늘의 방법은 4부 기출에 그대로 나온다. **기출문제 2**(연세대 2024) (212쪽)와 **기출문제 3**(연세대 2024) (220쪽)은 수조 속에 거꾸로 세운 실린더에서 연료를 태우고 수면 높이 변화를 묻는데, 두 문제 모두 “수면 높이 차에 의한 압력 차는 무시한다”는 단서가 붙어 있다. 문제 2.2처럼 그 차이를 계산해 보면 대기압의 0.2 % 남짓이라 무시해도 된다는 것을 답안에서 근거로 쓸 수 있다. **기출문제 10**(건국대 2009) (285쪽)은 제시문에서 압력을 “단위 넓이에 작용하는 힘”으로 정의하고 그

힘이 분자의 충돌에서 나온다는 설명을 요구하는데, 오늘 첫 절의 정의가 그 출발점이다. 답안에서 압력을 설명할 때는 “분자가 벽에 충돌하며 단위 넓이에 가하는 힘”이라는 한 문장과, 기체 압력에는 방향이 없다는 점을 함께 쓰면 3장의 보일 법칙과 9장의 분자 운동론으로 자연스럽게 이어진다. 수면 높이로 압력을 읽는 문제를 만나면 핵심 4단계의 둘째 단계, 곧 “같은 높이의 두 점은 압력이 같다”는 등식부터 세우자.

이 장의 참고문헌

Middleton, W. E. K. (1963). The place of Torricelli in the history of the barometer. *Isis*, 54(1), 11–28.

<https://doi.org/10.1086/349662>

West, J. B. (1996). Prediction of barometric pressures at high altitudes with the use of model atmospheres. *Journal of Applied Physiology*, 81(4), 1850–1854. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.4.1850>

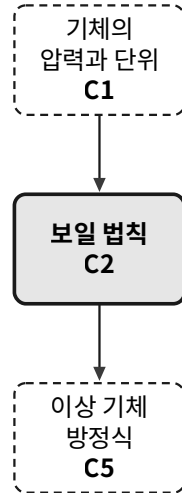
Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.

제 3장 누르면 줄어든다: 보일 법칙

새 개념 PV = 일정 · P-V 그래프 세 가지 · 부피의 순간 변화율

이어짐 이상 기체 방정식 6장 · 분자 운동론 9장 · 잠수 14장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

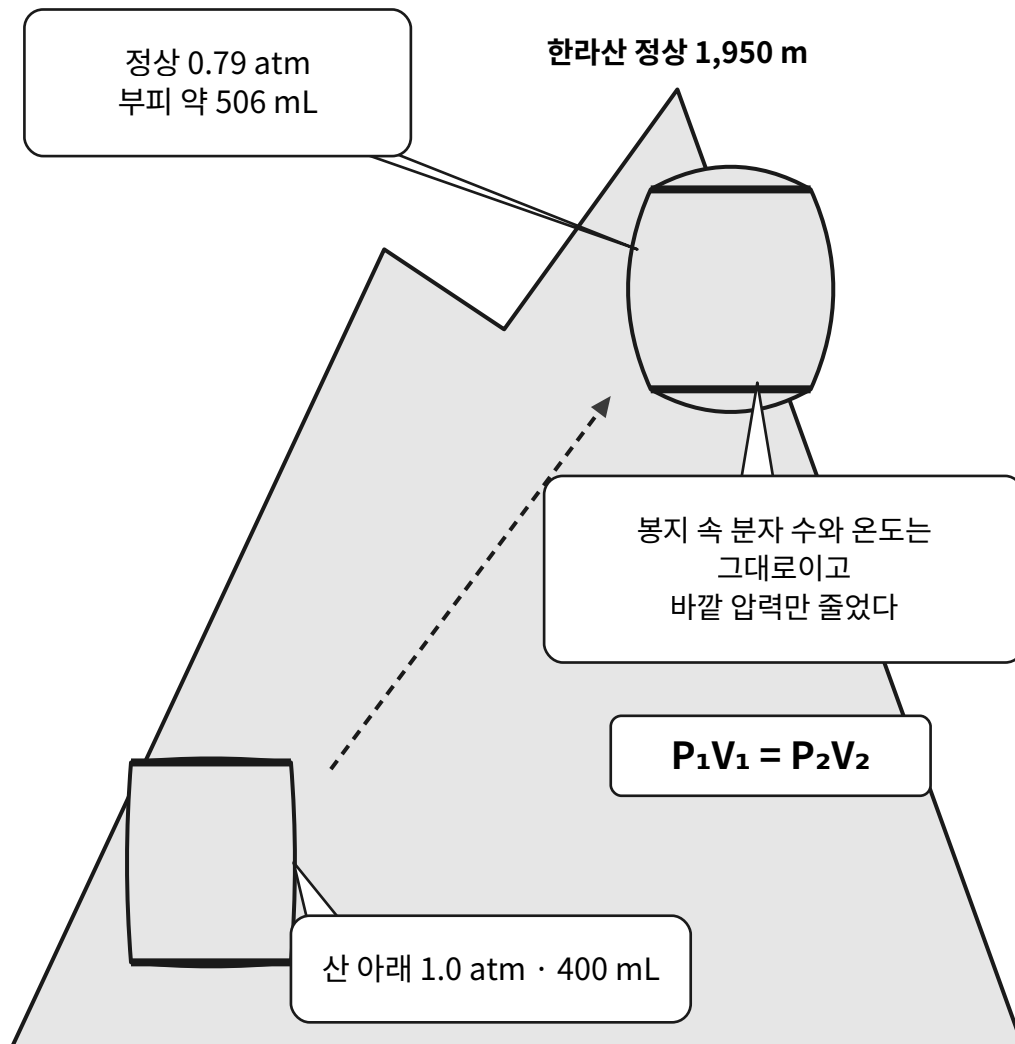
그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C2 보일 법칙)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 10 (건국대 2009년) (285쪽)	분자 운동론으로 세 법칙 설명하기	C2 보일 법칙

산을 오르면 부푸는 과자 봉지



$$1.0 \times 400 = 0.79 \times V_2 \rightarrow V_2 = 506 \text{ mL}$$

압력과 부피의 곱은 일정하다

그림 13. 한라산 정상의 과자 봉지 — 산 아래(1.0 atm)에서 400 mL였던 봉지가 정상(0.79 atm)에서는 뽕뽕하게 부풀어 약 506 mL가 된다. 봉지 속 분자 수와 온도는 그대로이고 바깥 압력만 줄었다(모식도, 봉지가 자유롭게 늘어난다고 가정)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 바깥 압력이 줄면 봉지 속 기체가 팽창한다.
2. 온도와 몰수가 같으면 압력과 부피의 곱은 일정하다.
3. 산을 내려오면 압력이 다시 커져 봉지가 원래 부피로 돌아온다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 2장 (25쪽)에서 압력의 단위($1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101.3 \text{ kPa}$)와 수면 높이로 압력을 읽는 법을 배웠다. 이 장에서는 반비례($y = k/x$)의 그래프가 쌍곡선이라는 것, 기울기 = (세로 변화량) ÷ (가로 변화량)이라는 것을 쓴다. 미분을 배운 학생은 마지막 절에서 그것을 써도 되고, 배우지 않았어도 표로 따라올 수 있다.

셋째 토요일, 하린이 지난 방학에 한라산에 갔던 사진을 가져왔다. 정상 표지석 옆에서 찍은 사진 속과 자 봉지가 공처럼 동그랗게 부풀어 있었다.

하린 교수님, 이 봉지 터질 것 같지 않아요? 산 아래에서는 납작했는데 올라갈수록 점점 부풀었어요.

석 교수 오늘 수업 재료를 직접 가져왔구나. 봉지 안에 누가 공기를 넣었니?

하린 아니요. 꼭 닫혀 있었어요.

석 교수 그럼 봉지 속 분자 수는 그대로다. 정상이 그렇게 덥지도 않았을 테니 온도도 비슷하고. 바뀐 건 하나, 바깥 압력이다. 2장에서 한라산 정상은 약 0.78 atm 이라고 했지. 오늘은 압력과 부피 사이의 규칙을 실험 자료에서 직접 찾아보자.

태오 보일 법칙이죠? $PV = \text{일정}$. 외우고는 있는데 왜 그런지는 잘 몰라요.

석 교수 외운 식은 조건을 빠뜨리기 쉽다. 오늘은 그 식이 어떤 자료에서 나오고, 어떤 조건에서만 맞는지까지 확인하자.

이모 저도 비행기에서 화장품 병 뚜껑을 열었다가 내용물이 튀어나온 적이 있어요. 그것도 같은 이야기인가요?

석 교수 같은 이야기예요. 병 속에 남은 공기는 지상의 1 atm 으로 갇혀 있는데, 객실 압력은 2장에서 말한 대로 0.8 atm 안팎이에요. 뚜껑을 여는 순간 안쪽 공기가 바깥 압력에 맞추어 부풀면서 내용물을 밀어냅니다. 오늘 배울 법칙으로 그 부피도 계산할 수 있어요.

3.1 주사기 실험 — PV가 일정하다

석 교수 과학방에 있는 50 mL 주사기로 실험을 하자. 끝을 고무마개로 막고 공기 30.0 mL를 가둔다. 손잡이 위에 추를 올려 압력을 바꾸면서 부피를 읽는다. 온도는 실내 온도 그대로 둔다. 결과가 표 8다.

표 8. 주사기 실험 자료 — 온도와 공기의 양을 일정하게 두고 압력을 바꾸었다(25°C)

압력 $P(\text{atm})$	부피 $V(\text{mL})$	$P \times V(\text{atm} \cdot \text{mL})$	$1/V(\text{mL}^{-1})$
1.00	30.0	30.0	0.0333
1.25	24.0	30.0	0.0417
1.50	20.0	30.0	0.0500
2.00	15.0	30.0	0.0667
2.50	12.0	30.0	0.0833

하린 압력이 두 배($1.00 \rightarrow 2.00$)가 되니까 부피가 반($30.0 \rightarrow 15.0$)이 됐어요.

태오 셋째 칸 $P \times V$ 가 전부 30.0이네요.

석 교수 그것이 보일 법칙이다. 일정한 온도에서 일정한 양의 기체는 압력과 부피의 곱이 일정하다. 식으로 쓰면 이렇다.

$$PV = k \text{ (일정) 또는 } P_1V_1 = P_2V_2 \text{ (n, T 일정)}$$

이모 실제로 재면 이렇게 딱 30.0으로 떨어지나요?

석 교수 학교 실험에서는 29.6, 30.3처럼 조금씩 흔들려요. 주사기 마찰도 있고, 눈금 읽기도 어긋나니까요. 그래서 자료를 보고 법칙을 말할 때는 “PV가 측정 오차 범위 안에서 일정하다”고 쓰는 것이 정확합니다. 이 표는 이해하기 쉽게 다듬은 값이에요.

하린 그럼 기체를 아주 세게 누르면 부피가 0이 될 때까지 줄어드어요?

석 교수 이 식대로라면 압력을 무한히 키워야 0이 된다. 그런데 실제 기체는 분자 자체에 부피가 있어서 그전에 덜 줄고, 분자끼리 가까워지면 서로 끌어당겨 액체가 되기도 한다. 그때부터 보일 법칙이 어긋난다. 11장 실제 기체에서 다룬다. 보통의 압력, 대략 몇 atm까지는 잘 맞는다.

3.2 보일의 J자관과 법칙의 조건

석 교수 보일은 1662년에 주사기 대신 J자 모양 유리관을 썼다. 짧은 쪽 끝을 막고 긴 쪽으로 수은을 부으면, 짧은 쪽에 공기가 갇힌다. 수은을 더 부을수록 양쪽 수은 높이 차가 커지고, 갇힌 공기는 그만큼 더 눌린다.

태오 2장에서 배운 거네요. 수은 높이 차가 h mm면 갇힌 공기의 압력은 대기압 + h mmHg예요.

석 교수 정확하다. 보일은 수은 높이 차를 재서 압력을, 갇힌 공기 기둥의 길이를 재서 부피를 얻었다. 높이 차가 760 mm일 때, 곧 압력이 2 atm일 때 공기 기둥이 처음의 절반이 되는 것을 확인했다.

이모 프랑스에서는 이 법칙을 다른 이름으로 부른다고 들었어요.

석 교수 맞아요. 프랑스의 마리오트가 1676년에 따로 같은 관계를 발표해서, 유럽 대륙에서는 “보일-마리오트 법칙”이라고 부르기도 합니다. 보일 쪽에서도 처음 반비례를 짐작한 사람은 그의 실험을 읽은 타운리와 파워였다고 해요. 보일은 그 짐작을 정밀한 수은 기둥 자료로 확인한 사람이고요. 과학 법칙에 붙은 이름은 대개 여러 사람의 일을 대표하는 이름입니다.

하린 1600년대에 그렇게 정밀하게 잴다는 게 신기해요.

석 교수 보일의 표에는 압력을 두 배, 세 배, 네 배로 늘린 값이 수십 줄 실려 있고, 측정값과 반비례로 계산한 값을 나란히 적어 비교했다. 측정값과 이론값을 나란히 놓고 차이를 보는 방식은 지금 논술 답안에서도 그대로 쓰인다.

석 교수 이제 조건을 보자. 보일 법칙이 맞으려면 두 가지가 고정되어야 한다. 첫째, 기체의 양 n. 새거나 더 들어가면 안 된다. 둘째, 온도 T.

이모 온도는 그냥 두면 그대로 아닌가요?

석 교수 빨리 누르면 그렇지 않아요. 자전거 펌프를 몇 번 세게 누르면 펌프 끝이 뜨거워지지요. 기체를 빠르게 압축하면 기체에 해 준 일이 열로 바뀌어 온도가 오릅니다. 그러면 PV가 일정하지 않고 더 커져요. 그래서 실험은 천천히 누르고, 한 번 누른 뒤 잠시 기다려 실내 온도로 돌아온 다음 눈금을 읽습니다. 온도가 일정한 변화를 **등온 변화**라고 불러요.

태오 과자 봉지는 천천히 올라가니까 등온이라고 봐도 되겠네요.

석 교수 그렇다. 등산은 몇 시간에 걸쳐 일어나니 봉지 속 공기는 늘 주위 온도와 같다. 다만 산 위가 더 추우면 그 효과는 4장에서 따로 계산해 더해 줘야 한다.

숨쉬기는 보일 법칙이다

석 교수 1장에서 숨쉬기를 잠깐 말했다. 이제 숫자로 보자. 숨을 들이쉬기 직전 폐 속 공기가 3.0 L, 압력은 바깥과 같은 1 atm이라 하자. 가로막이 내려가 폐가 3.006 L로 0.2 %만 커져도, 공기가 들어오기 전 그 순간의 압력은 $3.0 \div 3.006 = 0.998 \text{ atm}$ 이다.

태오 0.002 atm이면 760을 곱해서 1.5 mmHg 낮아진 거네요. 그 정도 차이로 공기가 들어와요?

석 교수 들어온다. 기도는 넓은 관이라 아주 작은 압력 차로도 공기가 쉽게 흐른다. 실제 숨쉬기에서 폐 속 압력은 바깥보다 1~3 mmHg쯤만 낮아진다. 내쉴 때는 거꾸로 폐가 작아져 압력이 조금 높아지고, 공기가 밀려 나간다.

이모 그러면 숨이 막힌다는 건 그 압력 차를 못 만드는 거군요.

석 교수 그렇게 볼 수 있어요. 가로막과 갈비뼈 사이 근육이 폐의 부피를 바꾸지 못하면 압력 차이가 생기지 않아 공기가 드나들지 못합니다. 인공호흡기는 반대로 바깥에서 압력을 높여 공기를 밀어 넣는 장치예요. 같은 보일 법칙을 거꾸로 쓰는 셈이지요.

문제 3.1

산 아래(1.0 atm)에서 부피가 400 mL인 과자 봉지를 한라산 정상(0.79 atm)으로 가져갔다. 온도는 같고, 봉지는 자유롭게 늘어날 수 있다고 할 때 정상에서 봉지의 부피는?

하린 $P_1V_1 = P_2V_2$ 니까 $1.0 \times 400 = 0.79 \times V_2$ 예요. $V_2 = 400 \div 0.79 = 506 \text{ mL}$.

석 교수 정답은 약 506 mL다. 압력이 21 % 줄었는데 부피는 27 % 늘었다. 반비례라서 두 비율이 같지 않다는 것도 눈여겨보자.

태오 실제 봉지는 506 mL까지 못 늘어나면 어떻게 돼요?

석 교수 좋은 질문이다. 봉지가 최대 450 mL까지만 늘어난다면 부피는 450 mL에서 멈추고, 그 대신 안쪽 압력이 바깥보다 높아진다. $1.0 \times 400 = P \times 450$ 에서 $P = 0.89 \text{ atm}$, 바깥보다 0.10 atm 높다. 그 압력 차를 봉지 비닐이 버텨야 한다. 버티지 못하면 이음매가 터진다. 문제의 “자유롭게 늘어난다”는 조건은 안팎 압력이 같다는 뜻이다.

3.3 세 가지 그래프

석 교수 같은 자료를 세 가지 방법으로 그릴 수 있다. 시험은 어느 그래프든 줄 수 있으니 셋을 다 알아 두자. 먼저 가장 흔한 P-V 그래프. **그림 14**를 보자.

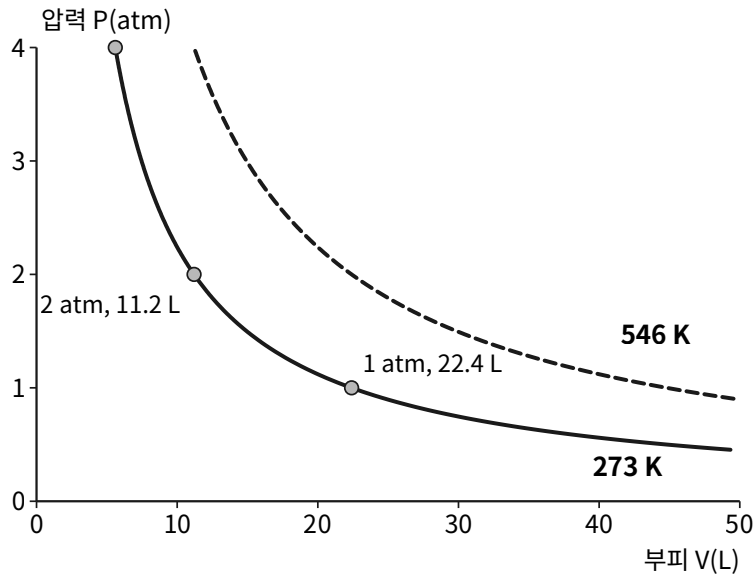


그림 14. 기체 1 mol의 P-V 그래프. 0 °C(273 K)와 273 °C(546 K)에서 각각 $V = 22.4 \times (T/273) \div P$ 로 계산했다. 같은 곡선 위의 모든 점은 PV가 같다(273 K: 22.4 atm·L, 546 K: 44.8 atm·L). 온도가 높은 곡선이 원점에서 더 멀다.

하린 직선이 아니라 휘어 있어요. 오른쪽 아래로 갈수록 점점 평평해지고요.

석 교수 반비례 그래프, 곧 쌍곡선이다. 곡선 위 아무 점이나 골라 가로·세로 값을 곱하면 언제나 같다. 1 atm에서 22.4 L, 2 atm에서 11.2 L, 4 atm에서 5.6 L. 모두 22.4다.

태오 두 곡선 중에 바깥쪽이 온도가 높은 거죠?

석 교수 그렇다. 같은 압력에서 온도가 두 배면 부피도 두 배다(4장의 샤를 법칙). 그래서 PV 값이 44.8로 커지고 곡선이 바깥으로 밀려난다. 이런 곡선 하나하나를 등온선이라고 부른다. 그런데 P-V 그래프만 봐서는 정말 반비례인지 확신하기 어렵다. 휘어진 곡선은 다 비슷해 보이거든. 그래서 둘째 그래프를 쓴다.

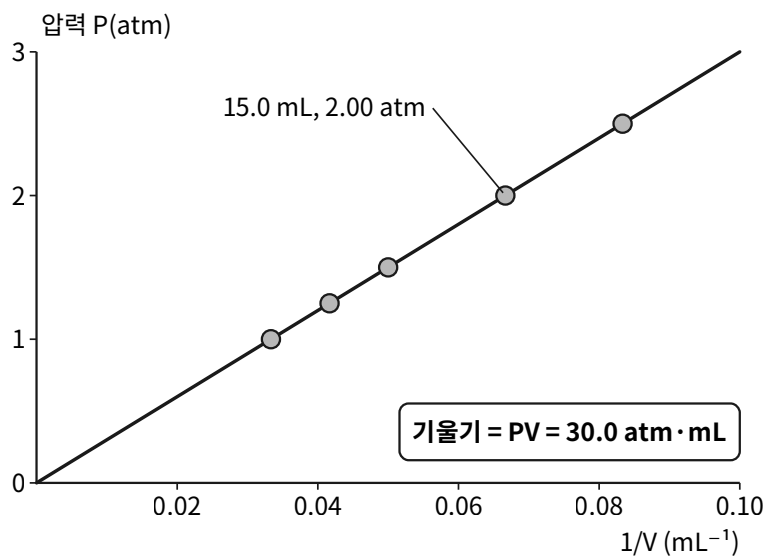


그림 15. 주사기 실험 자료로 그린 P-1/V 그래프. 다섯 점이 원점을 지나는 한 직선 위에 놓인다. 기울기는 $P \div (1/V) = PV = 30.0 \text{ atm} \cdot \text{mL}$ 이다.

- 석 교수** 가로축을 V 대신 $1/V$ 로 바꾸면 **그림 15**처럼 점들이 원점을 지나는 직선 위에 놓인다. $P = k \times (1/V)$ 이니 기울기가 바로 k , 곧 PV 다.
- 하린** 직선이면 자로 대 보기만 해도 알 수 있으니까 편하네요.
- 석 교수** 과학자들이 자료를 직선으로 바꾸어 그리는 이유가 그것이다. 마지막 셋째 그래프는 PV 를 세로축, P 를 가로축으로 그린 것이다. PV 가 일정하니 가로축과 나란한 수평선이 된다. 이 그래프는 11장에서 실제 기체가 수평선에서 얼마나 벗어나는지 볼 때 다시 쓴다.
- 태오** 그런데 PV 의 단위가 $\text{atm} \cdot \text{L}$ 잖아요. 이건 무슨 양이에요?
- 석 교수** 좋은 질문이다. 압력은 힘/넓이이고 부피는 넓이 $\times$ 길이니, 곱하면 힘 $\times$ 길이, 곧 에너지(일)의 단위가 된다. $1 \text{ atm} \cdot \text{L} = 101.3 \text{ J}$ 이다. 그래서 기체 상수 R 을 $0.082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 로도, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 로도 쓸 수 있다. 6장에서 R 의 두 값을 오갈 때 이 환산이 다리 역할을 한다.
- 이모** 같은 자료인데 그래프 모양이 셋이나 되니 헷갈리겠어요.
- 석 교수** 축 이름만 먼저 읽으면 헷갈리지 않아요. P 와 V 면 쌍곡선, P 와 $1/V$ 면 원점을 지나는 직선, PV 와 P 면 수평선. 이 세 줄을 기억해 두시면 됩니다.

3.4 일정하게 누를 때 부피는 어떻게 줄어드나

- 석 교수** 이제 논술 기출에 나온 질문을 하나 해 보자. 0°C , 1 atm 에서 22.4 L 인 기체를 온도와 양은 그대로 두고 압력을 한 시간에 0.5 atm 씩 일정하게 높인다. 부피는 일정하게 줄어드니까?
- 태오** 압력이 일정하게 오르니까 부피도 일정하게 줄지 않을까요?
- 석 교수** 식으로 확인하자. t 시간 뒤 압력은 $P = 1 + 0.5t \text{ atm}$ 이다. $PV = 22.4$ 이니 부피는 이렇게 된다.
- $$V(t) = 22.4 \div (1 + 0.5t) \text{ L (t: 시간, h)}$$
- 하린** $t = 0$ 이면 22.4 L , $t = 2$ 면 $22.4 \div 2 = 11.2 \text{ L}$, $t = 6$ 이면 $22.4 \div 4 = 5.6 \text{ L}$ 예요. 처음 두 시간에 11.2 L 나 줄었는데, 그다음 네 시간 동안은 5.6 L 밖에 안 줄어요.
- 석 교수** 그렇다. 처음에는 빨리 줄고 나중에는 천천히 준다. 같은 압력 증가라도 이미 많이 눌린 기체는 더 줄일 빈 공간이 적기 때문이다. 그럼 “2시간째 바로 그 순간”에 부피는 1시간 당 얼마의 빠르기로 줄고 있을까? 이것을 순간 변화율이라고 한다.
- 태오** 그 순간 하나만 보면 시간 간격이 0이라 계산이 안 되는데요.
- 석 교수** 그래서 간격을 점점 좁혀 본다. 표 9를 보자.

표 9. $t = 2 \text{ h}$ 를 가운데 두고 시간 간격을 좁히며 구한 평균 변화율

시간 구간(h)	처음 부피(L)	나중 부피(L)	평균 변화율(L/h)
1.00 ~ 3.00	14.933	8.960	-2.987
1.50 ~ 2.50	12.800	9.956	-2.844
1.90 ~ 2.10	11.487	10.927	-2.802
1.99 ~ 2.01	11.228	11.172	-2.800

- 하린** 간격을 좁힐수록 -2.8 로 다가가요.

석 교수 그 극한값 -2.8 L/h 가 $t = 2$ 에서의 순간 변화율이다. 미분을 배운 학생이라면 $V = 22.4(1 + 0.5t)^{-1}$ 을 t 로 미분해 $dV/dt = -22.4 \times 0.5 \div (1 + 0.5t)^2$ 을 얻고, $t = 2$ 를 넣어 $-11.2 \div 4 = -2.8 \text{ L/h}$ 를 바로 구한다. 미분은 수학 교과서의 도구이고, 이 장에서는 표로 같은 값을 확인한 것이다.

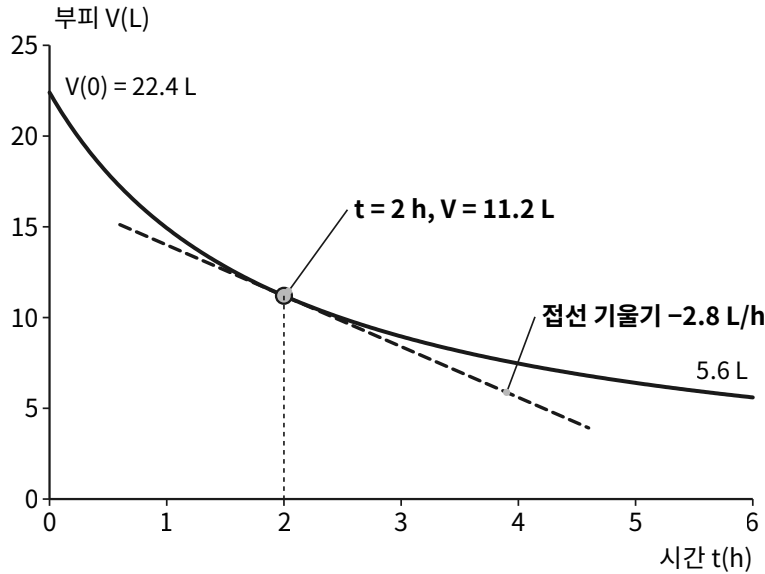


그림 16. 0°C , 1 atm , 22.4 L 의 기체를 0.5 atm/h 로 일정하게 가압할 때의 부피 $V(t) = 22.4/(1 + 0.5t)$. $t = 2 \text{ h}$ 에서 그 접선의 기울기가 순간 변화율 -2.8 L/h 이다. 곡선은 처음에 가파르고 점점 완만해진다.

문제 3.2

0°C , 1 atm 에서 22.4 L 인 이상 기체를 온도와 몰수를 일정하게 유지하면서 압력을 0.5 atm/h 의 속도로 일정하게 높인다. 2시간 뒤의 부피와, 그 순간 부피가 변하는 속도(순간 변화율)를 구하라.

태오 2시간 뒤 압력은 $1 + 0.5 \times 2 = 2.0 \text{ atm}$ 이고, 부피는 $22.4 \div 2.0 = 11.2 \text{ L}$ 예요. 변화율은 표에서 본 대로 -2.8 L/h .

하린 그런데 -는 무슨 뜻이에요?

석 교수 부피가 줄어든다는 뜻이다. 답안에는 “부피는 11.2 L 이고, 그 순간 1시간당 2.8 L 의 빠르기로 줄어든다($dV/dt = -2.8 \text{ L/h}$)”처럼 부호의 뜻을 말로도 함께 쓰자. **그림 16**에서 접선이 오른쪽 아래로 기울은 것이 바로 그 -다. 정답은 11.2 L , -2.8 L/h 이다.

3.5 물속 10 m마다 1 atm

석 교수 마지막으로 바닷속으로 가 보자. 2장에서 물기둥 10.3 m 가 1 atm 이라고 했다. 그러니 잠수하면 10 m 내려갈 때마다 압력이 약 1 atm 씩 늘어난다. 수면에서 1 atm , 수심 10 m 에서 2 atm , 30 m 에서 4 atm .

이모 그럼 잠수부의 몸속 공기도 늘리겠네요.

석 교수 맞아요. 숨을 참고 들어가는 해녀를 생각해 보세요. 수면에서 폐에 공기 6 L 를 채우고 10 m 로 내려가면 2 atm 이 되니 폐 속 공기는 3 L 로 줄어요. 30 m 면 1.5 L . 그래서 깊이 들어갈수록 몸이 가라앉기 쉬워집니다. 폐 속 공기가 줄어 부력이 작아지니까요.

태오 반대로 공기통을 멘 잠수부는요?

석 교수 거기서 보일 법칙이 생명 문제가 된다. 수심 30 m에서 공기통의 4 atm 공기로 폐를 6 L 채웠다고 하자. 그 상태로 숨을 참고 수면까지 올라오면 압력이 4분의 1로 줄어드니 폐 속 공기는 24 L로 늘어나려 한다. 폐는 그렇게 늘어날 수 없으니 터질 위험이 생긴다. 그래서 잠수 교육에서 가장 먼저 배우는 규칙이 “올라올 때는 절대 숨을 참지 말고 천천히 내쉬라”다.

하린 과자 봉지가 산 위에서 부푸는 것과 똑같은 일이 몸속에서 일어나는 거네요.

석 교수 정확하다. 과자 봉지는 바깥 압력이 1에서 0.79로 줄어 1.27배가 됐지만, 잠수부는 4에서 1로 줄어 4배가 된다. 물이 공기보다 훨씬 무거워서 압력 변화가 크다. 이 이야기는 14장에서 몸속 질소가 녹고 빠져나오는 문제와 함께 다시 만난다.

태오 잠수부가 내신 공기 방울이 올라가면서 점점 커지는 것도 같은 이유겠네요.

석 교수 그렇다. 수심 30 m에서 내신 지름 1 cm 방울은 수면에 닿을 때 부피가 4배, 지름은 4의 세제곱근인 약 1.6배가 된다. 부피와 지름을 헷갈리지 않는 것도 중요하다.

물속 압력은 대기압을 더한 절대 압력으로

수심 10 m의 압력을 “물기둥 1 atm”으로만 쓰면 틀린다. 수면 위의 대기압 1 atm이 함께 누르므로 절대 압력은 2 atm이다. 수심 h m의 압력은 $1 + h/10.3$ atm(어림으로 $1 + h/10$). 수면에서 수심 10 m로 갈 때는 압력이 2배가 되지만, 수심 10 m에서 20 m로 갈 때는 2 atm에서 3 atm으로 1.5배만 된다. 그래서 같은 10 m라도 얕은 곳에서 부피 변화가 더 크다.

핵심 보일 법칙 문제 4단계

1. 기체의 양(n)과 온도(T)가 정말 일정한지 확인한다. 빨리 압축하거나 기체가 새면 쓸 수 없다.
2. 처음 상태(P_1, V_1)와 나중 상태(P_2, V_2)를 표로 적는다. 압력은 같은 단위로, 물속이면 깊이 10 m마다 1 atm을 더한다.
3. $P_1V_1 = P_2V_2$ 로 모르는 값을 구한다.
4. 반비례인지 계산한다 — 압력이 커졌으면 부피가 줄었는지, 시간에 따라 변하면 변화율의 부호와 단위(L/h)를 말로 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 0 atm에서 5.0 L인 기체를 온도를 일정하게 두고 0.50 atm으로 바꾸면 부피는?
2. 수심 20 m에서 1.5 L인 공기 방울이 수면으로 올라오면 부피는 몇 L가 되는가? (수온은 일정, 물 10 m당 1 atm)
3. 온도와 몰수가 일정한 기체에서 세로축 PV, 가로축 P인 그래프는 어떤 모양인가?
4. 주사기 실험(표 8)에서 공기의 부피를 12.5 mL로 줄이려면 압력은 몇 atm이어야 하는가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

보일 법칙은 4부 기출 곳곳에 숨어 있다. **기출문제 10**(건국대 2009) (285쪽)의 문제 2-1은 기체 법칙들을 분자 운동론으로 설명하게 하는데, 보일 법칙은 “같은 분자 수가 좁은 공간에 갇히면 벽에 부딪히는 횟수가 늘어난다”로 설명한다(9장). 같은 문제의 2-3은 오늘 문제 3.2와 똑같이 압력을 일정한 속도

로 높일 때 부피의 순간 변화율을 묻는다. **기출문제 2**(연세대 2024) (212쪽)는 실린더 속 기체가 늘 1 atm으로 유지되는 장치에서 몰수만 바뀌는 상황인데, 그 해석의 바탕에는 “압력이 같으면 부피는 몰수에 비례한다”는 다음 장들의 관계가 있다. **기출문제 1**(경희대 2026) (202쪽)는 밸브로 연결된 두 강철 용기에서 기체가 퍼질 때 부피가 두 배가 되면 압력이 어떻게 되는지를 따지는 데서 출발한다. 셋 모두 “무엇이 고정되어 있는가”를 먼저 쓰는 핵심 1단계가 답안의 첫 문장이 된다. 특히 변화율을 묻는 문항은 계산이 맞아도 부호의 뜻과 단위를 빠뜨려 감점되는 일이 많으니, 문제 3.2의 답처럼 숫자와 말을 함께 쓰는 연습을 해 두자.

이 장의 참고문헌

West, J. B. (2005). Robert Boyle's landmark book of 1660 with the first experiments on rarified air.

Journal of Applied Physiology, 98(1), 31–39. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00759.2004>

Boyle, R. (1662). New experiments physico-mechanical, touching the spring of the air, and its effects (2nd ed.). H. Hall for T. Robinson.

Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.

제 4장 데우면 늘어난다: 샤를 법칙과 절대 온도

새 개념 $V \propto T$ · 절대 온도와 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ · 외삽 · 게이뤼삭 법칙($P \propto T$)

이어짐 이상 기체 방정식 6장 · 분자 운동론 9장 · 실제 기체 11장

이 장의 개념도

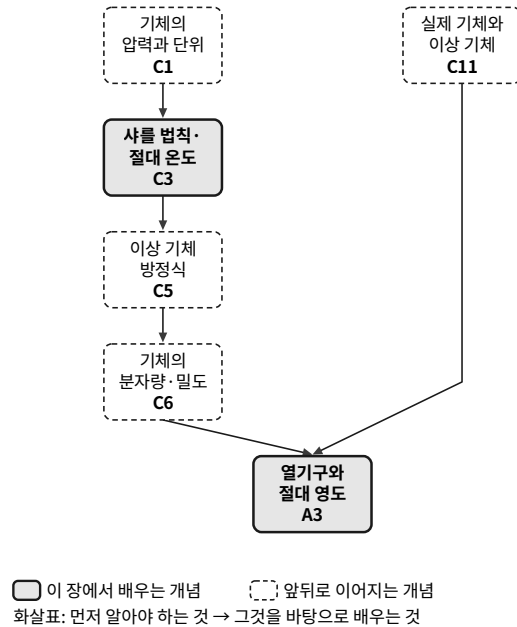


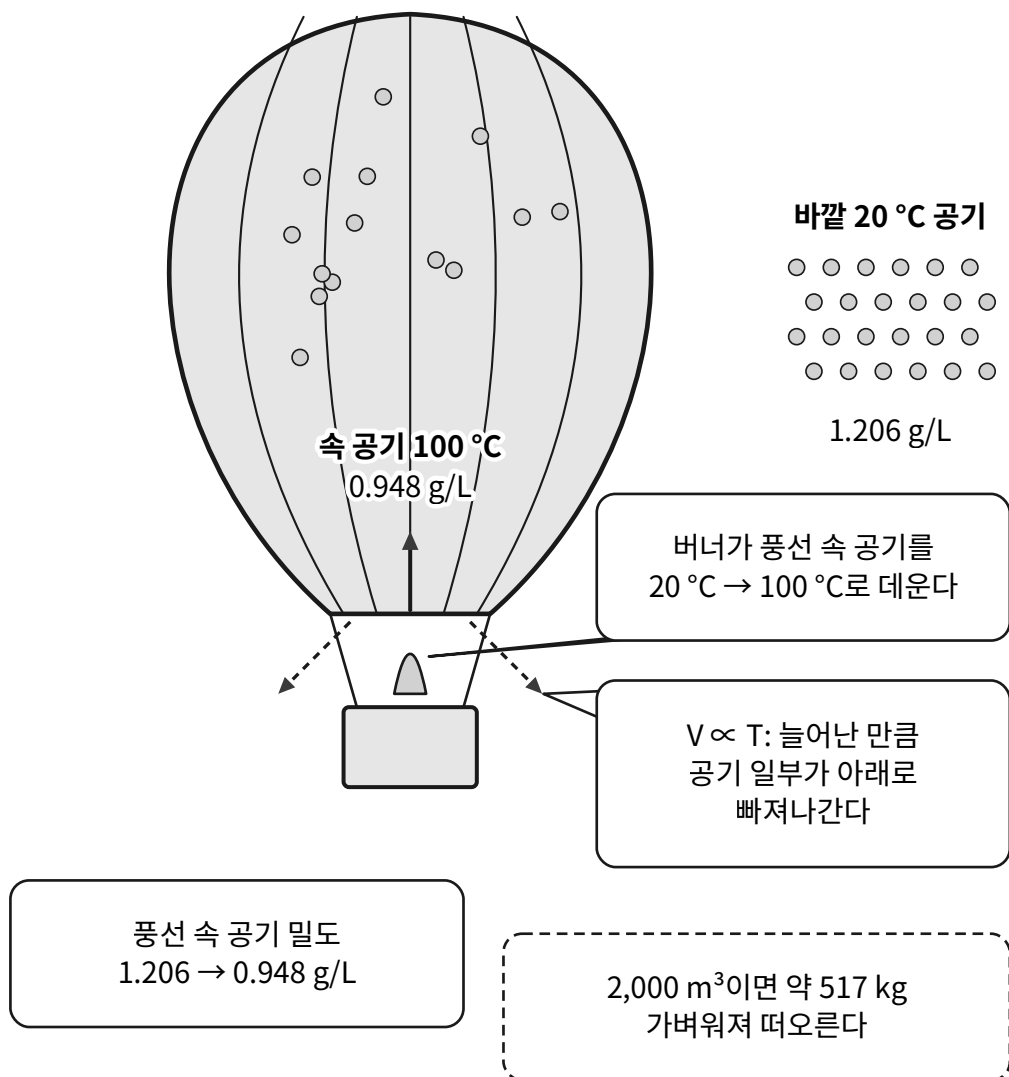
그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C3 샤를 법칙·절대 온도, A3 열기구와 절대 온도)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 10. 제 4장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 4 (연세대 미래캠퍼스 2023년) (228쪽)	중기압·드라이아이스 풍선·NO와 Ar의 압력	C3 샤를 법칙·절대 온도
기출 9 (건국대 2010년) (276쪽)	샤를 법칙·열기구·도달할 수 없는 0 K	C3 샤를 법칙·절대 온도; A3 열기구와 절대 온도
기출 10 (건국대 2009년) (285쪽)	분자 운동론으로 세 법칙 설명하기	C3 샤를 법칙·절대 온도

새벽 들판의 열기구



압력이 같으면 부피는 절대 온도에 비례

그림 18. 새벽 들판의 열기구 — 버너가 풍선 속 공기를 20 °C에서 100 °C로 데운다. 압력은 바깥과 같은 1 atm이므로 데운 공기는 부피가 늘어 일부가 아래 입구로 빠져나가고, 풍선 속 공기의 밀도는 1.206 g/L에서 0.948 g/L로 줄어든다. 부피 2,000 m³이면 가벼워진 공기가 약 517 kg이다(계산값, 모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 압력이 같을 때 기체의 부피는 절대 온도에 비례한다.
2. 데운 공기는 같은 부피에 분자가 적어 가볍다.
3. 바깥 찬 공기와의 밀도 차이가 풍선을 띄우는 부력을 만든다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 3장 (36쪽)에서 온도와 몰수가 일정할 때 $PV = \text{일정(보일 법칙)}$ 을 배웠다. 이 장에서는 압력과 몰수를 고정하고 온도를 바꾼다. 일차함수 $y = ax + b$ 의 그래프(기울기와 절편), 그리고 밀도 = 질량/부피를 쓴다.

넷째 토요일 새벽, 석 교수는 세 사람을 단양 강변으로 데려갔다. 강 건너 들판에서 열기구 하나가 버너 불꽃을 뿜으며 천천히 부풀어 오르고 있었다.

하린 와, 불을 뿜을 때마다 풍선이 더 팽팽해져요!

석 교수 오늘 수업은 저 풍선이다. 버너는 풍선 속 공기를 데우기만 한다. 공기를 더 넣지도 않고 다른 기체를 넣지도 않는다. 그런데 왜 떠오를까?

태오 뜨거운 공기는 위로 올라가니까요.

석 교수 맞는 말인데, 그건 결과를 말한 거다. 왜 뜨거운 공기가 위로 가는지, 얼마나 데우면 얼마나 뜨는지를 숫자로 말할 수 있어야 논술 답안이 된다. 그 열쇠가 샤를 법칙과 절대 온도다.

4.1 열기구 시대의 샤를

석 교수 1783년 프랑스에서는 열기구 열풍이 불었다. 몽골피에 형제가 데운 공기로 풍선을 띄웠고, 같은 해 물리학자 샤를은 수소를 채운 풍선을 타고 직접 하늘을 날았다. 기체가 데우면 얼마나 늘어나는지는 당시 사람들에게 아주 실용적인 질문이었다.

이모 샤를이 직접 탔다니 용감하네요.

석 교수 그 무렵 샤를은 여러 기체를 같은 압력에서 데우면 모두 거의 같은 비율로 늘어난다는 것을 확인했어요. 다만 논문으로 내지 않았지요. 1802년 게이뤼삭이 정밀하게 다시 재어 발표하면서 샤를의 이름을 붙여 주었습니다. 그래서 샤를 법칙을 “샤를-게이뤼삭 법칙”이라고도 불러요.

태오 샤를의 풍선은 데운 공기가 아니라 수소였네요. 수소 풍선은 왜 뜨는 거예요?

석 교수 수소 분자 하나는 공기 분자 평균보다 훨씬 가볍다. 같은 부피, 같은 온도, 같은 압력이면 분자 수가 같으니(5장의 아보가드로 법칙), 수소를 채운 풍선은 같은 부피의 공기보다 14분의 1 정도로 가볍다. 데운 공기 풍선은 분자 수를 줄여서 가벼워지고, 수소 풍선은 분자 하나를 가볍게 해서 가벼워진다. 방법은 달라도 “같은 부피의 바깥 공기보다 가볍게 만든다”는 원리는 같다.

이모 요즘 놀이공원 풍선이 헬륨인 것도 같은 이유겠네요. 수소는 불이 붙으니까요.

석 교수 맞아요. 헬륨은 공기의 7분의 1쯤 가볍고 타지 않지요.

하린 데우면 늘어나는 건 당연한 것 같은데, 무엇을 새로 알아낸 거예요?

석 교수 두 가지다. 하나는 늘어나는 비율이 수소, 산소, 질소, 공기 할 것 없이 거의 같다는 것. 1장에서 말한 기체의 특별함이다. 다른 하나는 그 비율이 “1 °C 올릴 때마다 0 °C 부피의 약 273분의 1”이라는 깔끔한 숫자라는 것이다.

4.2 부피-온도 그래프는 직선이다

석 교수 실험을 해 보자. 0 °C에서 부피가 1.00 L인 기체를 압력 1 atm으로 유지하며 데우고 식힌다. 결과가 표 11다.

표 11. 같은 압력에서 0 °C에 1.00 L인 기체의 부피 — 섭씨온도와 절대 온도로 나란히 보기

섭씨온도 t(°C)	절대 온도 T(K)	부피 V(L)	$V \div T$ (L/K)
-73	200	0.73	0.00366
0	273	1.00	0.00366
27	300	1.10	0.00366
100	373	1.37	0.00366
200	473	1.73	0.00366

하린 섭씨온도로 보면 0 °C에서 100 °C로 가면 1.00 L가 1.37 L가 돼요. 100 °C 올렸더니 0.37 L, 그러니까 1 °C에 0.0037 L씩 늘었어요.

태오 0.0037이면 1/273이랑 같네요. $1 \div 273 = 0.00366$ 이니깐요.

이모 이런 실험은 실제로 어떻게 하나요? 기체를 -73 °C까지 식히기는 쉽지 않을 텐데요.

석 교수 학교에서는 한쪽 끝을 막은 가는 유리관에 공기를 넣고, 수은이나 기름 한 방울로 입구를 막아요. 그 방울이 마개 겸 눈금 역할을 합니다. 관을 얼음물, 실온의 물, 끓는 물에 차례로 담고 그 방울의 위치로 공기 기둥의 길이를 재지요. 관의 굵기가 일정하니 길이가 곧 부피입니다. 영하는 드라이아이스와 알코올을 섞은 통에 담가 재고요. 방울은 위아래 대기압과 균형을 이루어 움직이지 않죠. 압력은 늘 대기압으로 일정합니다.

태오 그러면 자료를 몇 개만 얻어도 직선을 그릴 수 있겠네요.

석 교수 그렇다. 세 점만 있어도 직선인지 확인할 수 있다. 그 직선을 왼쪽으로 늘이는 것이 다음 절의 이야기다.

석 교수 섭씨온도와 부피는 직선 관계지만, 0 °C에서 부피가 0이 아니니 비례는 아니다. $y = ax + b$ 꼴이지. 그런데 둘째 칸, 절대 온도로 바꾼 값과 부피를 비교하면 $V \div T$ 가 모두 0.00366으로 같다. 절대 온도와는 정비례다.

$$V = kT \text{ 또는 } V_1/T_1 = V_2/T_2 \text{ (n, P 일정, T는 절대 온도)}$$

이모 섭씨로는 비례가 아니고 절대 온도로는 비례라니, 같은 온도를 다르게 쓴 것뿐인데 신기하네요.

석 교수 핵심은 출발점이에요. 섭씨온도의 0은 물이 어는 온도라서, 사람이 편하려고 정한 기준입니다. 기체의 부피에게는 아무 의미가 없는 점이에요. 기체에게 진짜 출발점이 어디인지 그래프를 그려 보면 알 수 있습니다.

4.3 직선을 늘이면 -273.15 °C

석 교수 그림 19는 기체 1 mol의 부피를 섭씨온도에 대해 그린 것이다. 압력 1 atm과 2 atm 두 경우를 그렸다.

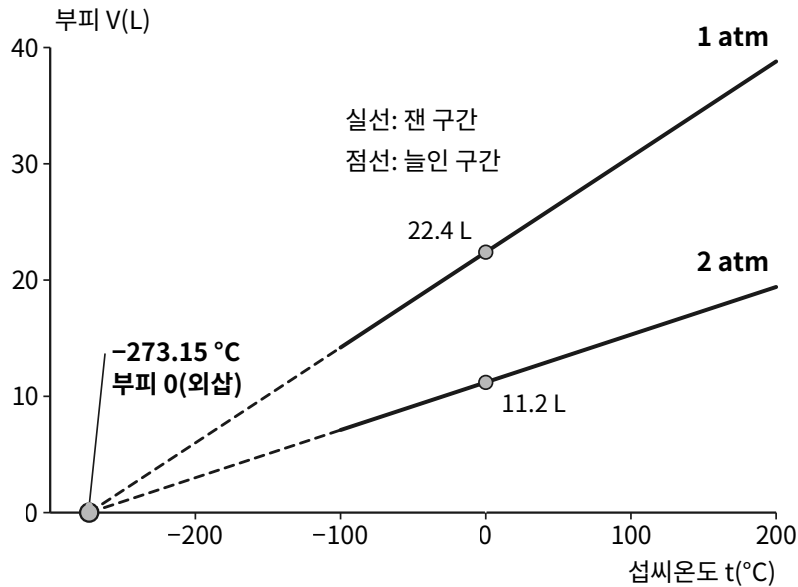


그림 19. 같은 압력에서 기체 1 mol의 부피와 섭씨온도(1 atm, 2 atm). $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상은 실선(실제로 잴 수 있는 구간), 그 아래는 점선(외삽)이다. 두 직선은 기울기가 다르지만 모두 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 부피 0으로 모인다. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 1 atm은 22.4 L, 2 atm은 11.2 L이다(계산값).

하린 두 직선이 왼쪽 아래 한 점에서 만나요!

석 교수 측정한 실선 부분을 자로 이어 왼쪽으로 쪽 늘이면, 어떤 압력에서 잔 직선이든 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 부피가 0이 된다. 잔 범위 밖으로 직선을 늘려 값을 짐작하는 것을 **외삽**이라고 한다. 기체의 종류를 바꾸어도 같은 점으로 모인다.

태오 그럼 그 온도를 0으로 하는 새 눈금을 만들면 부피가 온도에 그냥 비례하겠네요.

석 교수 그것이 절대 온도다. 1848년 켈빈이 열역학의 이론에서 물질의 종류와 상관없는 온도 눈금을 세웠고, 그 0점이 이 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 일치했다. 그래서 절대 온도의 단위를 켈빈(K)이라 하고, 눈금 한 칸의 크기는 섭씨와 같게 잡는다.

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \text{ (교과 계산에서는 흔히 } + 273)$$

하린 그런데 왜 하필 273이예요? 숫자가 너무 어중간해요.

석 교수 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서의 부피를 기준으로 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 내릴 때마다 273분의 1씩 줄어든다고 했지. 그러면 273번 내리면, 곧 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 273분의 273, 전부가 줄어든다. 273이라는 숫자는 물의 어는점을 0으로 잡은 섭씨 눈금 때문에 생긴 것이다. 정말하게 재면 273.15다. 자연이 정한 것은 절대 영도이고, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 는 사람이 정한 기준이라 그 사이 거리가 어중간한 숫자가 된 것이다.

이모 그럼 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 보다 더 낮은 온도는 없나요?

석 교수 없어요. 그 아래로 가면 부피가 음수가 되어야 하니까요. 그래서 0 K를 절대 영도라고 부릅니다. 9장에서 분자 운동론으로 보면 온도는 분자의 평균 운동 에너지에 비례하는 양이라서, 절대 영도는 분자 운동이 가장 낮은 상태라는 뜻이 돼요.

그림 20에 우리가 아는 온도를 절대 온도 눈금 위에 늘어놓았다.

기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

기체는 $PV = nRT$ 로 세고, 섞이면 몰 분율로 나누고, 액체와 만나면 증기압으로 읽는다

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

3부 논술답안작성 패턴분석

설명·비교·판별·계산·해결 5가지 답안 틀, 감점 답안과 우수 답안 비교

2부 기출문제와 기본개념

기출 10문항(2009~2026학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 4문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 기체인가
2. 기체의 압력: 분자가 벽을 두드리는 힘
3. 누르면 줄어든다: 보일 법칙
4. 데우면 늘어났다: 샤를 법칙과 절대 온도
5. 같은 부피, 같은 분자 수: 아보가드로 법칙
6. 세 법칙을 하나로: 이상 기체 방정식
7. 반응 속의 기체: 몰수가 바뀌면 부피가 바뀐다

8. 섞인 기체: 부분 압력과 몰 분율
9. 기체 분자 운동론: 압력과 온도의 정체
10. 분자의 빠르기: 확산과 분출
11. 실제 기체: 이상 기체에서 벗어날 때
12. 증발과 응축: 증기압과 끓는점
13. 상평형 그림: 삼중점과 임계점
14. 물에 녹는 기체, 몸속·지구의 기체, 그리고 2부로

한 단원씩 깊게, 25권으로 완성하는 고교 과학 논술 — 시리즈 전 25권 (테두리가 이 책)

논술 마스터 시리즈 · 생물 12권 (01~12)



논술 매니아 시리즈 · 화학 13권 (13~25)



함께 보면 좋은 권: 화학양론·농도(25권) · 용액·총괄성·상평형(22권) · 화학 평형(21권) · 반응 속도(19권) · 분자 간 힘(16권)



개념 → 기출 → 답안 → 실전, 한 단원을 끝까지.

대학 논술 원문과 공식 해설로 검증한 풀이, 생활 속 개념도와 개념 그래프로 읽는 고교 과학 논술 교재입니다.

값 24,000원

실린 기출 문항의 저작권은 각 대학에 있습니다.

값 24000 원

53430



이어서 읽으시려면

대입 과학논술 24 — 기체 — 전체 312쪽

ssbook.kr/book/nonsul-24

판매가 **14,400원** (POD 정가 24,000원)

- 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

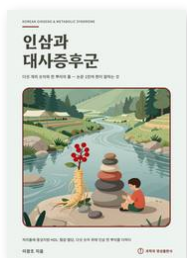
인삼 (6)



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 진료실까지, 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)



발끝의 강

피의 흐름에서 발바닥까지, 땅과 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

18,000원 → **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 전면 수록

18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/iamblichus



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지

요하의 흙인형 · 우하량의 여신 · 해명경 · 태을금 화종지 다섯 갈래를 한자리에 놓다

26,000원 → **15,600원**
ssbook.kr/book/hongsan

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역

대학 기출로 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 — 기출 22문항으로 읽는 유전

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-03



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학

제한 효소의 인식·절단 × 조각 길이로 위치 추론 × 재조합·판별 실험 설계

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-05



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송

인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-07



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설

감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩팥까지 항상성

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신

몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-09



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지 대사

포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-10



대입 과학논술 11 — 신경계·활동 전위
펌프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-11



대입 과학논술 12 — 생태·진화·생물 다양성

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 전지·전기 분해

화학 전지·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 — 뭇은 왜 녹슬까

결합에서 반응·산과 염기까지

18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까

분자에서 세포·효소·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 따뜻해질까

원자에서 힘과 에너지까지

22,000원 → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나뭇잎

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 영양학과 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

과학과 초월의 길목에서

과학과 영성이 만나는 자리

교보문고 판매

ssbook.kr/book/science-transcend

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/seogyong-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제1권 기초편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제1~7장)

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/geonames-1

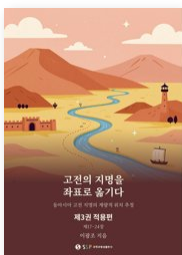


고전의 지명을 좌표로 옮기다 제2권 기법편

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