



대입 과학논술 17 — 화학양론·농도

몰 × 반응식 계수비 × 농도 환산으로 푸는 화학 계산

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-17

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

화학양론·농도

화학양론·농도 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 11문항 · 2012~2023학년도



화학양론·농도

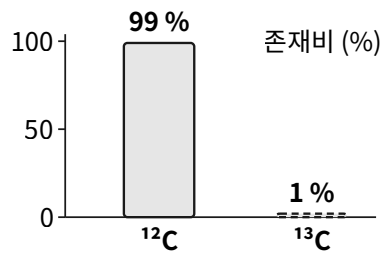
1부 기본개념편 · 2부 기출문제와 기본개념 · 3부 논술답안작성 패턴분석 · 4부 실전기출문제와 풀이과정

화학양론·농도 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 몰 × 반응식 계수비 × 농도 환산 | 11문항 · 4개 대학 (2012~2023)

① 원자를 세다

$$12 \text{ g} \div 1.99 \times 10^{-23} \text{ g} = 6.03 \times 10^{23} \text{ 개 (1 mol)}$$



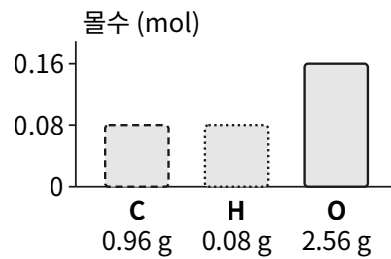
$$12 \times 0.99 + 13 \times 0.01 = 12.01$$

질량 → 개수, 평균 원자량 → 존재비

② 원소 분석 → 분자식

$$3.6 \text{ g} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ 3.52 g} + \text{H}_2\text{O} \text{ 0.72 g}$$

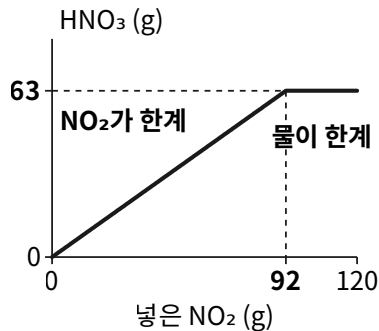
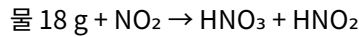
$$\text{C} : \text{H} : \text{O} = 1 : 1 : 2 \rightarrow \text{CHO}_2$$



$$\text{CHO}_2(45) \times 2 = \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4(90)$$

질량 → 몰 → 가장 간단한 정수비

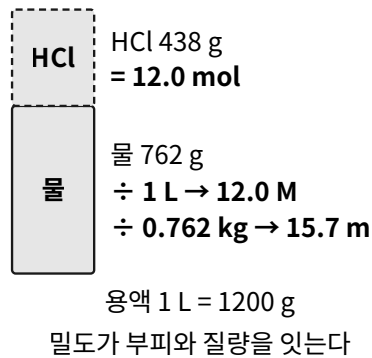
③ 한계 반응물



먼저 떨어지는 반응물이 양을 정한다

④ 농도 환산

36.5 % 염산, 밀도 1.20 g/mL



한 줄 요약: 질량을 몰로, 계수비로 건너서, 다시 질량·부피·농도로

그림 1. 화학양론·농도 단원의 그림 요약. ① 원자를 세다(탄소 원자 1개 $1.99 \times 10^{-23} \text{ g}$ 에서 아보가드로수 6.03×10^{23} , 평균 원자량 12.01에서 $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} = 99 : 1$), ② 원소 분석에서 분자식까지(화합물 $3.6 \text{ g} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ 3.52 g} \cdot \text{H}_2\text{O} \text{ 0.72 g} \rightarrow \text{C} : \text{H} : \text{O} = 1 : 1 : 2$, 실험식 CHO_2 , 분자량 $90 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), ③ 한계 반응물(물 18 g에 NO_2 를 넣을 때 HNO_3 는 NO_2 92 g까지 비례해 늘다가 63 g에서 멈춘다), ④ 농도 환산(36.5 % 염산 1 L = 1200 g → HCl 12.0 mol → 12.0 M, 물 762 g 기준 15.7 m). 수치는 모두 계산해서 그렸다.

한 줄 요약: 질량을 몰로, 계수비로 건너서, 다시 질량·부피·농도로

연결 단원 → 원자 구조(23권) · 기체(24권) · 용액·총괄성(22권) · 산화·환원(13권) · 열화학(17권)

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 화학양론인가	16
1.1 닫힌 병과 열린 병	18
1.2 일정 성분비 — 구리는 늘 4 : 1로 산소와 결합한다	19
1.3 원자설이 두 법칙을 설명한다	21
1.4 기체의 부피비와 아보가드로의 가설	22
1.5 원자를 세는 장부 — 이 책의 길	23
제 2장 원자의 무게: 원자량과 동위 원소	26
2.1 원자 한 개는 얼마나 가벼운가	28
2.2 상대 질량 — $^{12}\text{C} = 12$ 를 기준으로	29
2.3 질량수와 동위 원소	30
2.4 평균 원자량 = 질량 $\times$ 존재비의 합	31
2.5 질량 분석기로 존재비를 읽는다	33
제 3장 물: 원자를 세는 묶음	36
3.1 묶음 단위 — 다스, 언, 그리고 몰	38
3.2 1몰의 정의 — 왜 6.02×10^{23} 인가	39
3.3 아보가드로수를 직접 계산하기	40
3.4 질량 $\rightleftharpoons$ 몰 $\rightleftharpoons$ 개수	41
3.5 6.02×10^{23} 은 얼마나 큰가	43
제 4장 몰 질량과 기체의 몰 부피	46
4.1 화학식량과 몰 질량	48
4.2 아보가드로 법칙 — 같은 부피, 같은 개수	49
4.3 기체 1몰은 22.4 L	50
4.4 기체 밀도로 분자량을 구한다	52
4.5 몰 다리를 넓히다	53
제 5장 질량 백분율과 실험식	56
5.1 화학식에서 질량 백분율 구하기	58
5.2 거꾸로: 백분율에서 실험식으로	59
5.3 소수가 나오면 정수를 곱한다	61
5.4 실험식이 같은 서로 다른 물질	62
5.5 수화물 속의 물	63
제 6장 원소 분석과 분자식	66
6.1 리비히의 원소 분석 장치	68
6.2 C와 H는 생성물에서, O는 차이로	69
6.3 분자량을 재는 세 가지 방법	71
6.4 실험식 $\times n$ = 분자식	72
제 7장 화학 반응식 완성하기	76
7.1 반응식이 말하는 것	78
7.2 눈대중법 — 복잡한 분자를 1로 놓고 $\text{C} \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{O}$	79
7.3 미정계수법 — 연립방정식으로 푼다	81
7.4 이온 반응식은 전하도 맞춘다	82

7.5 산화·환원 반응식 — 전자 수를 먼저 맞춘다	83
제 8장 반응식으로 양을 계산하다.....	86
8.1 계수비는 몰비다	88
8.2 세 단계 풀이: 몰로 들어가서 몰로 나온다.....	89
8.3 액체 연료는 부피 → 질량 → 몰	92
8.4 기체끼리의 반응은 부피비로 바로	93
제 9장 먼저 떨어지는 반응물: 한계 반응물	96
9.1 샌드위치에서 몰 분자로.....	98
9.2 판정하는 두 가지 방법	99
9.3 생성량 그래프는 꺾인다.....	100
9.4 남는 양과 사용 비율	101
9.5 질량이 크다고 많은 것은 아니다.....	103
제 10장 불완전 연소·수득률·여러 단계 반응	105
10.1 산소가 모자라면 CO가 생긴다	107
10.2 불완전 연소 자료로 화학식 찾기.....	110
10.3 이론 수득량과 수득률.....	110
10.4 여러 단계로 이어지는 반응	111
제 11장 퍼센트 농도·ppm과 기체의 몰 분율	115
11.1 퍼센트 농도: 분모는 용액.....	117
11.2 ppm: 아주 묽은 것을 세는 단위	118
11.3 기체 혼합물: 몰 분율과 분압	119
11.4 질량 ppm과 몰 ppm 사이	121
11.5 몰속 ppm을 몰 농도로.....	122
제 12장 몰 농도·몰랄 농도와 농도 환산	125
12.1 몰 농도: 용액 1 L 속의 몰수	127
12.2 희석과 혼합: 몰수는 그대로	128
12.3 몰랄 농도: 용매 1 kg 속의 몰수.....	129
12.4 농도 환산의 열쇠: 밀도와 “용액 1 L 가정”	130
12.5 반응식과 농도를 함께	133
제 13장 열화학 반응식과 양적 관계: 연료의 값.....	135
13.1 ΔH는 몰에 비례한다.....	137
13.2 몇 g을 태우면 몇 kJ인가	137
13.3 연료를 비교하는 세 잣대.....	139
13.4 헤스 법칙으로 모르는 반응열 잇기	141
13.5 효율이 끼면	142
제 14장 연료·대기·공장의 화학양론, 그리고 2부로	145
14.1 휘발유 1 L의 이산화 탄소	147
14.2 하늘 전체의 장부	149
14.3 공장의 물질 수지: 비료와 질산	149
14.4 광합성의 장부	151
14.5 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	152
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	155
부록 B. 용어 풀이	158
기출문제와 기본개념.....	165
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	166

0. 이 장의 사용법	167
1. 출제 개념	168
1.1 원자량·몰·몰 질량·기체의 몰 부피 — C1 · C2 · C3 · C4 · C5	168
1.2 실험식과 분자식 — C6 · C7 · A4 · A5	169
1.3 반응식 완성과 양적 관계 — C8 · C9	171
1.4 한계 반응물·불완전 연소·수득률·다단계 반응 — C10 · C11 · A3	172
1.5 농도의 다섯 표현과 환산 — C12 · C13 · C14 · C15 · A2	172
1.6 열화학 반응식의 양적 관계 — C16 · A1	173
1.7 그래프 개념도 읽는 법	175
2. 출제 경향	178
2.1 문항 하나에 담긴 개념	179
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	180
2.3 학교별 성향	181
논술답안작성 패턴분석	182
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	183
3. 답안 작성법	185
3.1 계산형 답안의 틀	185
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀	186
3.3 표기와 수치 규칙	186
3.4 시간 배분과 자기 점검	187
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	187
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	189
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 11문항	196
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론	197
5.3 기본 개념 한눈에	197
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다	199
6. 출제 문항 분석과 모범답안	200
〈기출문제 1 (연세대 2023년)〉	201
〈기출문제 2 (연세대 2022년)〉	212
〈기출문제 3 (연세대 2021년)〉	222
〈기출문제 4 (연세대 2021년)〉	230
〈기출문제 5 (경희대 2020년)〉	238
〈기출문제 6 (경희대 2020년)〉	249
〈기출문제 7 (경희대 2020년)〉	258
〈기출문제 8 (연세대 2019년)〉	269
〈기출문제 9 (성균관대 2016년)〉	278
〈기출문제 10 (인하대 2015년)〉	286
〈기출문제 11 (연세대 2012년)〉	296
7. 변형·예상 문항	306
8. 강의 연결	311
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	312

8.2 강의 구성 시 유의점	312
9. 전체 문제 총평	314
9.1 숫자로 먼저 보기	314
9.2 다섯 가지 총평	314
9.3 대학별 한 줄 총평	315
9.4 이렇게 공부하자	315
10. 참고문헌	317

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 화학양론 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 구리 가열 실험	20
그림 5. 화학양론의 연표.....	23
그림 6. 물 다리 지도	24
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 9. 원자량 기준의 변화	29
그림 10. 평균 원자량의 시소	32
그림 11. 염소의 질량 스펙트럼	33
그림 12. 제 3장 개념도	36
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	37
그림 14. 묶음 단위의 크기.....	39
그림 15. 물 다리 1단계	41
그림 16. 1몰의 질량 비교	42
그림 17. 제 4장 개념도	46
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	47
그림 19. 기체 1몰의 부피	50
그림 20. CO ₂ 0.50 mol의 부피-온도.....	51
그림 21. 물 다리 2단계	54
그림 22. 제 5장 개념도	56
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	57
그림 24. 백분율에서 실험식으로	60
그림 25. 실험식이 같은 네 물질	62
그림 26. 수화물 가열 질량 변화	63
그림 27. 제 6장 개념도	66
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	67
그림 29. 원소 분석 장치	69
그림 30. 어는점 내림 직선.....	72
그림 31. CH ₂ O 사다리	73
그림 32. 제 7장 개념도	76
그림 33. 생활 속 개념도 7	77
그림 34. 프로페인 연소의 원자 수.....	79
그림 35. 분자 모형으로 본 반응	80
그림 36. 미정계수법의 순서	81
그림 37. 제 8장 개념도	86
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	87
그림 39. 베이킹소다 분해의 질량 막대	89
그림 40. 물 다리 3단계	90
그림 41. NaHCO ₃ 질량-CO ₂ 부피 직선	92
그림 42. 제 9장 개념도	96
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	97
그림 44. 분자로 본 한계 반응물	99
그림 45. 생성량-첨가량 꺾인 그래프.....	100
그림 46. 발포정 반응물의 사용 비율.....	102
그림 47. 제 10장 개념도	105

그림 48. 생활 속 개념도 10	106
그림 49. 산소량에 따른 CO와 CO ₂	109
그림 50. 이론 수득량과 실제 수득량.....	111
그림 51. 오스트발트 공정의 몰수 흐름	112
그림 52. 제 11장 개념도	115
그림 53. 생활 속 개념도 11	116
그림 54. ppm 자	119
그림 55. 공기 조성과 평균 물 질량	121
그림 56. 질량 ppm과 몰 ppm	122
그림 57. 제 12장 개념도	125
그림 58. 생활 속 개념도 12	126
그림 59. 희석 곡선.....	129
그림 60. 농도 환산 사다리.....	131
그림 61. 염산의 질량 %와 몰 농도·몰랄 농도.....	132
그림 62. 제 13장 개념도	135
그림 63. 생활 속 개념도 13	136
그림 64. 연료 1 g당 연소열	139
그림 65. CO ₂ 1 mol당 연소열	140
그림 66. 헤스 법칙으로 구한 불완전 연소열.....	142
그림 67. 제 14장 개념도	145
그림 68. 생활 속 개념도 14	146
그림 69. 휘발유 1 L의 물질 수지.....	148
그림 70. 질산 공장의 물질 수지	150
그림 71. 광합성의 물질 수지	151
그림 72. 기출의 몰 다리	169
그림 73. 기출에 나온 연료 비교	174
그림 74. 전체 개념 그래프.....	176
그림 75. 개념별 출제 횟수.....	177
그림 76. 연도별 출제 문항 수	178
그림 77. 대학별 출제 문항 수	178
그림 78. 계산형 풀이 절차.....	185
그림 79. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	202
그림 80. 증기압 곡선과 용액의 증기압(기출 179)	204
그림 81. CO ₂ 상평형 그림과 드라이아이스로 되돌리는 길(기출 179)	207
그림 82. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	213
그림 83. q176 몰 사슬과 염산 농도 환산	218
그림 84. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	223
그림 85. 질량 ppm과 몰 ppm, CO ₂ 1 mol당 열(기출 141).....	226
그림 86. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	231
그림 87. q148 CO ₂ 1 mol당 전기 에너지	234
그림 88. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	240
그림 89. 한계 반응물의 몰 장부(기출 214)	245
그림 90. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	250
그림 91. q221 인산의 구조식.....	253
그림 92. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	260
그림 93. 불완전 연소의 원소 장부(기출 232).....	263
그림 94. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	270
그림 95. q117 원소 분석 장치	274
그림 96. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	279

그림 97. 〈인하대 2015〉 개념 그래프	288
그림 98. q297 NO ₂ 첨가량과 HNO ₃ 생성량	292
그림 99. 〈연세대 2012〉 개념 그래프	298
그림 100. 지구의 탄소 고정 도식(기출 13)	299
그림 101. 두 광합성의 질량 장부(기출 13)	302

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 화학의 기본 법칙 네 가지.....	22
표 4. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 5. 주요 원소의 동위 원소와 존재비.....	30
표 6. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 7. 물 1몰(18 g)의 여러 얼굴.....	43
표 8. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	46
표 9. 자주 쓰는 화학식량.....	48
표 10. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	56
표 11. 생활 속 물질의 질량 백분율.....	59
표 12. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	66
표 13. 분자량(몰 질량)을 재는 세 가지 방법.....	71
표 14. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	76
표 15. 반응식 완성 체크리스트.....	84
표 16. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	86
표 17. 반응식 한 줄이 주는 정보.....	89
표 18. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	96
표 19. 한계 반응물 판정표.....	100
표 20. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	105
표 21. 원소별 장부.....	108
표 22. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	115
표 23. 농도를 나타내는 다섯 가지 방법.....	123
표 24. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	125
표 25. 몰 농도와 몰랄 농도의 비교.....	130
표 26. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	135
표 27. 연료 여섯 가지의 연소열 비교.....	139
표 28. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	145
표 29. 기본개념편 전체 정리.....	152
표 30. 2부 목차와 내용.....	166
표 31. 물을 가운데 두고 바꾸는 네 가지 양.....	168
표 32. 기출에 나온 원소 분석 네 가지.....	170
표 33. 반응식 완성의 세 방법과 기출.....	171
표 34. 한계 반응물 판정표.....	172
표 35. 농도 표현 다섯 가지.....	172
표 36. 이 책의 기출 문항 목록.....	178
표 37. 대학별 출제 문항.....	179
표 38. 문항별 핵심 개념과 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	180
표 39. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	181
표 40. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 화학양론 답안에서의 쓰는 순서.....	183
표 41. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	183
표 42. 서술형 답안의 문장 틀(화학양론 설명).....	186
표 43. 논술 기본 패턴 5가지(화학양론·농도 답안).....	187
표 44. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은).....	188
표 45. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는).....	194
표 46. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호).....	196
표 47. 학년도별 문항 수와 시험 종류.....	196

표 48. 소문항 29개에 적용한 주 답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주)	197
표 49. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순)	197
표 50. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적	199
표 51. 기출문제 1의 개념과 복습 위치	202
표 52. 소문항별 요구 사항과 난이도	204
표 53. 기출문제 2의 개념과 복습 위치	213
표 54. 소문항별 요구 사항과 난이도	214
표 55. 제시문 [나]의 열화학 반응식	222
표 56. 기출문제 3의 개념과 복습 위치	223
표 57. 소문항별 요구 사항과 난이도	224
표 58. 기출문제 4의 개념과 복습 위치	231
표 59. 소문항별 요구 사항과 난이도	232
표 60. 기출문제 5의 개념과 복습 위치	240
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도	241
표 62. 기출문제 6의 개념과 복습 위치	250
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도	252
표 64. 두 공정을 잇는 몰 장부(C_6H_{12} 1 mol 기준)	254
표 65. [문제 II-2]의 자료	259
표 66. 기출문제 7의 개념과 복습 위치	260
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도	261
표 68. 기출문제 8의 개념과 복습 위치	270
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도	271
표 70. 기출문제 9의 개념과 복습 위치	279
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도	280
표 72. 기출문제 10의 개념과 복습 위치	288
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도	290
표 74. 제시문 (가)의 표	296
표 75. 제시문 (나)의 표	297
표 76. 기출문제 11의 개념과 복습 위치	298
표 77. [2-1]의 요구 사항과 난이도	300
표 78. 두 탄소 고정 반응의 몰 장부와 에너지(행성 A의 ΔH 는 원문 표의 결합)	302
표 79. 인강 회차 구성(제안)	311
표 80. 11개 문항의 규모	314
표 81. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서)	315

제 1 부

기본개념편

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

화학양론·농도

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 원자의 질량 → 물 → 화학식 → 반응식 → 한계 반응물 → 농도 → 에너지의 순서로 이어집니다. 앞 장에서 만든 도구가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 특히 3~4장의 물과 8장의 “계수비 = 몰비”는 이 책의 모든 계산이 올라서는 바닥입니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 원자를 세는 법	1~4장	반응 전후 질량이 같다는 데서 출발해, 원자 한 개의 상대 질량(원자량)을 정하고, 6.02×10^{23} 개를 한 묶음으로 하는 몰을 만든다. 몰 질량과 기체의 몰 부피로 질량·개수·기체 부피를 서로 바꾼다.
B. 화학식을 찾는 법	5~6장	질량 백분율에서 실험식을, 연소 분석과 분자량 측정(기체 밀도·어는점 내림·삼투압)에서 분자식을 구한다.
C. 반응식과 양	7~10장	원자 수 보존으로 반응식을 완성하고, 계수비 = 몰비로 질량·부피를 계산한다. 먼저 떨어지는 한계 반응물, 산소가 모자란 연소, 수득률, 여러 단계로 이어지는 공업 반응까지 같은 장부로 정리한다.
D. 농도	11~12장	퍼센트·ppm·몰 분율·몰 농도·몰랄 농도 다섯 가지 표현을 익히고, 밀도를 열쇠로 서로 바꾸며, 희석과 혼합을 계산한다.
E. 에너지와 응용	13~14장	열화학 반응식의 반응열도 몰에 비례한다는 데서 연료 1 g당·CO ₂ 1 mol당 에너지를 비교하고, 휘발유·대기·질산 공장·광합성의 물질 수지로 앞의 개념을 모두 다시 쓴다. 이어서 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 “몰 다리” 그림으로 돌아가 질량 → 몰 → 계수비 → 몰 → 구하는 양의 칸을 하나씩 채워 보십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 화학양론인가	질량 보존 · 일정 성분비 · 원자를 세는 장부
기본개념편 제 2장 (26쪽)	원자의 무게: 원자량과 동위 원소	상대 질량 · ¹² C 기준 원자량 · 동위 원소와 평균 원자량
기본개념편 제 3장 (36쪽)	몰: 원자를 세는 묶음	몰 · 아보가드로수 · 질량과 개수 바꾸기
기본개념편 제 4장 (46쪽)	몰 질량과 기체의 몰 부피	화학식량 · 몰 질량 · 기체 1몰 22.4 L

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 5장 (56쪽)	질량 백분율과 실험식	성분 원소의 질량 백분율 · 실험식 · 수화물
기본개념편 제 6장 (66쪽)	원소 분석과 분자식	연소 분석(리비히) · 분자량 측정 · 실험식에서 분자식으로
기본개념편 제 7장 (76쪽)	화학 반응식 완성하기	원자 수 보존 · 계수 맞추기 · 미정계수법
기본개념편 제 8장 (86쪽)	반응식으로 양을 계산하다	계수비 = 몰비 · 질량·부피 관계 · 세 단계 풀이
기본개념편 제 9장 (96쪽)	먼저 떨어지는 반응물: 한계 반응물	한계 반응물 · 과잉 반응물 · 사용 비율과 생성량 그래프
기본개념편 제 10장 (105쪽)	불완전 연소·수득률·여러 단계 반응	산소가 모자란 연소 · 수득률 · 다단계 반응의 물질 수지
기본개념편 제 11장 (115쪽)	퍼센트 농도·ppm과 기체의 몰 분율	퍼센트 농도 · ppm · 몰 분율과 분압
기본개념편 제 12장 (125쪽)	몰 농도·몰랄 농도와 농도 환산	몰 농도 · 몰랄 농도 · 밀도로 농도 바꾸기 · 희석과 혼합
기본개념편 제 13장 (135쪽)	열화학 반응식과 양적 관계: 연료의 값	ΔH 는 몰에 비례 · 1 g당·CO ₂ 1몰당 에너지 · 헤스 법칙으로 반응열 잇기
기본개념편 제 14장 (145쪽)	연료·대기·공장의 화학양론, 그리고 2부로	휘발유 1 L의 CO ₂ · 질산 공장의 물질 수지 · 광합성의 장부

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 숫자가 나올 때마다 단위를 붙여 손으로 다시 계산한다 (8.4 g ÷ 84 g/mol = 0.10 mol).
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 장은 6장(원소 분석), 9장(한계 반응물), 12장(농도 환산)이다. 이 구간은 두 번 읽는다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

화학양론은 중학교 과학에서 “질량 보존 법칙”과 “일정 성분비 법칙”으로 처음 만나고, 고등학교 화학 I에서 몰과 화학 반응식의 양적 관계로, 화학 II에서 여러 가지 농도로 넓어지며, 대학 논술에서는 연소 분석·한계 반응물·농도 환산·연료의 에너지가 한 문항 안에 이어져 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 화학 반응식, 비례식)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 공식을 먼저 주지 않고, 왜 원자를 세야 하는가를 먼저 묻고 그다음에 세는 방법을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다. 돌집 과학 방에서 화학을 배운다. 궁금한 것은 바로 묻고, 태오는 계산을 서두르다 단위를 빠뜨리기도 한다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 콩을 불리고 간수를 맞추는 부엌과 가게의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 충북 단양 ‘돌집 과학방’의 화학 선생님. 은퇴한 화학·생물 교수로, 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

첫 장면 — 토요일 오후, 부엌 저울 앞에서

초겨울 토요일, 돌집 과학방의 큰 탁자 위에 부엌 저울 두 대가 놓여 있었다. 이모는 두부 간수를 맞추던 계량컵을 들고 들어오다가 저울을 보고 멈췄다.

- 이모** 교수님, 오늘은 저울을 두 개나 꺼내 놓으셨네요. 두부 간수도 저울로 재요. 콩 3 kg에 간수 몇 그램, 이렇게요. 그거랑 비슷한 걸 하시려는 거예요?
- 석 교수** 바로 그거예요. 이모님은 매일 화학양론을 하고 계신 겁니다. 콩물의 단백질과 간수의 마그네슘 이온이 알맞은 비율로 만나야 두부가 엉기잖아요.
- 하린** 화학양론이요? 이름이 어려워요.
- 석 교수** 그리스 말로 ‘원소’와 ‘재다’를 붙인 말이야. 반응에 들어가고 나오는 물질의 양을 재는 법이지. 하린아, 이 병에 식초를 붓고 베이킹소다를 넣은 다음 풍선을 씌워 볼래? 다른 컵은 뚜껑 없이 똑같이 하고.
- 하린** 와, 풍선이 부풀어요! 그런데 뚜껑 없는 컵 쪽 저울 숫자가 줄고 있어요. 152 g이었는데 150 g이 됐어요.
- 태오** 풍선 쪽은 그대로네요. 기체가 날아가서 그런 거죠? 그럼 줄어든 2 g이 이산화 탄소예요?
- 석 교수** 맞다. 닫힌 병에서는 원자가 하나도 빠져나가지 못하니까 질량이 그대로고, 열린 컵에서는 CO₂가 공기로 나간 만큼 가벼워진다. 이게 라부아지에가 18세기에 확인한 질량 보존 법칙이다.
- 태오** 그럼 2 g이 이산화 탄소면, 그게 몇 개인지도 알 수 있어요?
- 석 교수** 좋은 질문이다. 그게 이 책 전체의 질문이야. 질량은 저울로 재지만 화학 반응은 원자와 분자가 몇 개씩 만나느냐로 일어난다. 그래서 질량을 개수로 바꾸는 다리가 필요하다. 그 다리 이름이 ‘몰’이고.
- 하린** 몰이요? 두더지요?
- 석 교수** 하하, 철자는 같지만 다르다. 연필 열두 자루를 한 다스라고 하듯이, 원자 6.02×10^{23} 개를 한 몰이라고 한다. 이 숫자만 알면 이산화 탄소 2 g이 몇 개인지 셀 수 있지.

이모 그럼 우리 아들이 학원에서 “몇 퍼센트 염산이 몇 몰 농도냐” 이런 걸 푼다던데, 그것도 이 이야기에요?

석 교수 네, 같은 줄기예요. 용액이 얼마나 진한지도 결국 “1 L 속에 몇 몰이 들었냐”로 셉니다. 퍼센트를 몰 농도로 바꾸려면 밀도라는 다리를 하나 더 건너야 하고요.

태오 논술 기출 보니까 “화합물을 태웠더니 CO₂ 몇 g, 물 몇 g이 나왔다, 분자식을 구하라” 같은 것도 많던데요.

석 교수 그것도 같은 장부다. 나온 CO₂ 속 탄소 원자를 세고, 물 속 수소 원자를 세면 원래 화합물에 탄소와 수소가 몇 개씩 있었는지 알 수 있지. 원자는 반응 중에 생기지도 없어지지도 않으니까.

하린 그럼 오늘은 어디서부터 해요?

석 교수 방금 하린이가 본 저울 두 개에서 시작하자. 왜 닫힌 병은 가벼워지지 않는지, 그리고 구리를 태우면 왜 늘 똑같은 비율로 산소가 붙는지. 그 두 가지가 원자를 세는 첫걸음이다.

이모 저는 간수 비율을 왜 그렇게 맞춰야 하는지 오늘 꼭 알아 가야겠네요.

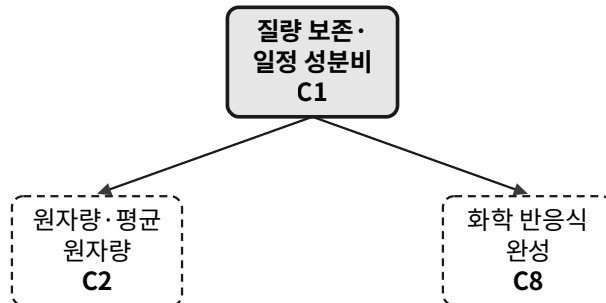
왜 화학양론인가? **기본개념편 제 1장** (16쪽)은 닫힌 병과 열린 컵이라는 두 장면에서 출발한다. 반응 전후 질량이 같다는 사실과, 원소가 늘 일정한 질량비로 결합한다는 사실이 원자설로 설명되고, 원자의 상대 질량과 몰이라는 묶음 단위가 만들어지며, 마침내 “질량 → 몰 → 계수비 → 몰 → 질량·부피·농도”라는 한 줄로 화학식·반응·용액·에너지의 양을 모두 계산하는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 화학양론인가

새 개념 질량 보존 · 일정 성분비 · 원자를 세는 장부

이어짐 원자량 2장 · 물 3장 · 반응식 완성 7장 · 양적 관계 8장

이 장의 개념도



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

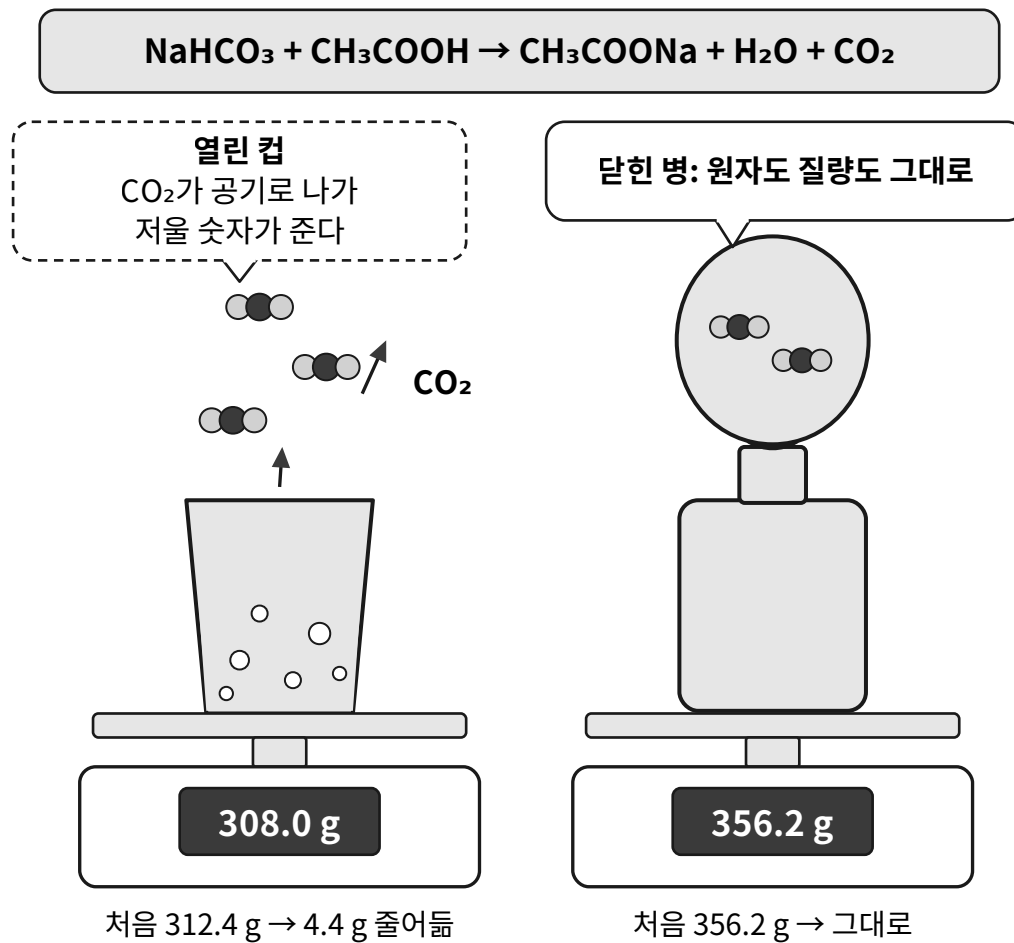
그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 질량 보존·일정 성분비)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

이 장의 개념은 기출에서 직접 묻기보다 다른 장의 개념을 받치는 바탕으로 쓰였다.

닫힌 병 속 베이킹소다와 식초

같은 반응, 다른 저울 눈금



원자 장부 — 화학 반응은 원자의 짝만 바꾼다

원소	Na	H	C	O
반응 전	1	5	3	5
반응 후	1	5	3	5

그림 3. 부엌 저울 위의 두 그릇 — 마개를 연 컵에서는 베이킹소다와 식초가 만든 CO₂가 빠져나가 눈금이 줄고, 풍선을 씌운 병에서는 눈금이 그대로이다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 닫힌 병에서는 반응 전후 질량이 같다.
2. 열린 컵의 질량이 준 만큼이 날아간 CO₂의 질량이다.
3. 원자는 생기지도 없어지지도 않으므로 원자를 세면 양을 계산할 수 있다.

이 장의 출발점

이 장은 거의 아무것도 전제하지 않는다. ① 물질은 원자로 되어 있고 원자는 원소 기호로 쓰다는 것(H, C, O, Cu), ② 화학식 H_2O 는 수소 원자 2개와 산소 원자 1개가 묶인 물 분자를 뜻한다는 것, ③ 저울로 질량을 g 단위로 잴다는 것만 알면 된다. 계산은 비례식 한 줄이면 충분하다.

충북 단양 돌집 과학방의 첫 토요일, 이모가 부엌 저울과 베이킹소다 봉지, 식초 한 병을 탁자 위에 올려놓았다. 석 교수는 유리병 하나에는 풍선을 씌우고, 컵 하나는 그대로 열어 두자고 했다. 하린은 풍선을 손에 쥐고 무엇이 부풀지 궁금해했고, 태오는 논술 기출 묶음을 펼쳐 놓고 “화학양론”이라는 단어에 밑줄을 그었다.

태오 교수님, 기출문제를 넘겨 보면 거의 모든 화학 문제에 “몇 g인가”, “몇 L인가”가 나와요. 이 단위 이름이 화학양론인데, 양론이 무슨 뜻이에요?

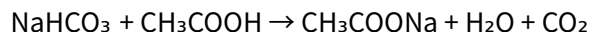
석 교수 화학양론은 영어로 stoichiometry라고 한다. 그리스 말로 원소를 뜻하는 stoicheion과 잴다는 뜻의 metron을 붙인 말이야. 반응에 들어가고 나오는 물질의 양을 재고 계산하는 일 전체를 가리킨다. 오늘은 왜 그런 계산이 가능한지, 그 밑바닥에 있는 두 법칙부터 보자.

이모 저울은 왜 꺼내 오라고 하셨어요? 베이킹소다랑 식초는 거품 나는 거 보려는 거죠?

석 교수 거품이 나는 동안 저울 숫자가 어떻게 되는지 보려는 거예요. 같은 양의 베이킹소다와 식초를 하나는 열린 컵에서, 하나는 풍선을 씌운 병에서 섞어 보지요.

1.1 닫힌 병과 열린 병

석 교수 먼저 반응식을 써 두자. 베이킹소다는 탄산수소 나트륨 $NaHCO_3$ 이고, 식초의 신맛을 내는 물질은 아세트산 CH_3COOH 다.



하린 열린 컵에 넣었더니 거품이 막 올라와요. 저울 숫자가 계속 줄어요! 처음 312.4 g이었는데 지금 308.0 g이에요.

석 교수 풍선 병은 어떠냐?

태오 풍선이 부풀었는데 숫자는 처음 그대로예요. 0.1 g도 안 변했어요.

석 교수 이게 오늘의 첫 번째 사실이다. 열린 컵에서 줄어든 4.4 g은 사라진 게 아니라 이산화탄소 기체가 되어 공기 속으로 나간 질량이다. 풍선 병에서는 그 기체가 풍선 안에 갇혀 있으니 저울 위에 그대로 있는 거지.

이모 그런데 풍선이 부풀면 공기의 부력이 커져서 숫자가 아주 조금 줄 수도 있지 않나요?

석 교수 날카로운 지적이에요. 풍선이 커지면 밀어낸 공기의 무게만큼 아주 조금 가벼워 보입니다. 정밀한 실험에서는 단단한 밀폐 용기를 써서 부피가 변하지 않게 하지요. 그렇게 하면 반응 전후 질량이 저울의 정밀도 안에서 똑같습니다.

석 교수 이 사실을 처음 정량적으로 정리한 사람이 프랑스의 라부아지에다. 그는 밀폐한 용기 속에서 주석을 가열하고 반응 전후 질량을 정밀하게 재서, 1789년 『화학 원론』에 “반응 전 물질의 총질량은 반응 후 물질의 총질량과 같다”고 썼다. 이것이 **질량 보존 법칙**이다.

하린 당연한 거 아니에요? 물건이 저절로 없어지지는 않잖아요.

석 교수 지금은 당연하지만, 그때는 아니었다. 나무를 태우면 재만 남아 가벼워지고, 쇠가 녹슬면 오히려 무거워진다. 사람들은 “불의 원소”가 빠져나가거나 들어온다고 생각했어. 라부아지에는 기체까지 모두 가둬서 재면 질량이 변하지 않는다는 것을 보여 주었지. 열린 컵과 닫힌 병의 차이가 바로 그것이다.

태오 그럼 열린 컵에서 줄어든 4.4 g이 이산화 탄소라는 건 어떻게 알아요?

석 교수 넣은 베이킹소다가 8.4 g이었다. 3장에서 배울 계산을 미리 쓰면, NaHCO_3 8.4 g은 0.10 mol이고 반응식에서 CO_2 도 0.10 mol, 곧 4.4 g이 생긴다. 저울이 쟈 값과 계산한 값이 같다는 것, 이게 화학양론이 하는 일이다. 지금은 숫자가 맞아떨어진다는 것만 보고 넘어가자.

반응식의 양쪽에서 원자를 세어 보기

석 교수 질량이 보존되는 까닭을 반응식에서 직접 확인해 보자. 왼쪽과 오른쪽에서 원소별로 원자 수를 세어 보라.

하린 왼쪽 NaHCO_3 에 Na 1, H 1, C 1, O 3이고, CH_3COOH 에 C 2, H 4, O 2예요. 합하면 Na 1, H 5, C 3, O 5요.

태오 오른쪽은 CH_3COONa 에 C 2, H 3, O 2, Na 1, 물에 H 2, O 1, CO_2 에 C 1, O 2예요. 합하면 Na 1, H 5, C 3, O 5. 똑같아요!

석 교수 원자가 하나도 새로 생기지 않고 하나도 없어지지 않았다. 원자들이 짝만 바꿨을 뿐이야. 원자 하나하나의 질량은 변하지 않으니, 원자 수가 같으면 총질량도 같을 수밖에 없다. 질량 보존 법칙은 결국 원자 수 보존을 저울로 본 모습이다.

이모 그럼 열린 컵에서는 탄소 원자 1개와 산소 원자 2개가 묶인 CO_2 가 컵 밖으로 나간 셈이네요. 원자가 없어진 게 아니라 장부의 칸이 바깥으로 옮겨 간 거고요.

석 교수 좋은 표현이에요. 장부를 컵 안만 보고 쓰면 맞지 않고, 공기 중으로 나간 것까지 적으면 맞습니다. 그래서 문제를 읽을 때 “밀폐 용기”인지 “열린 용기”인지를 먼저 확인해야 해요. 시험에서는 질량 감소를 주고 “발생한 기체의 질량은?”이라고 묻는 일이 많은데, 그 답이 곧 질량 차입니다.

열린 계와 닫힌 계를 먼저 구별한다

반응 전후 질량을 비교하는 문제에서는 기체가 드나들 수 있는지부터 본다. 닫힌 계라면 총질량은 변하지 않는다. 열린 계에서 질량이 줄면 그 차는 빠져나간 기체(CO_2 , H_2 , 수증기 등)의 질량이고, 질량이 늘면 그 차는 들어와 결합한 기체(주로 O_2)의 질량이다. 이 구별 없이 “질량 보존 법칙이 성립하지 않는다”고 쓰면 감점된다.

1.2 일정 성분비 — 구리는 늘 4 : 1로 산소와 결합한다

석 교수 두 번째 법칙은 화합물의 성분에 관한 것이다. 구리 가루를 도가니에 넣고 공기 중에서 충분히 가열하면 검은 산화 구리(II) CuO 가 된다. 구리 질량을 바꿔 가며 여러 번 해 보면 결과가 **그림 4**처럼 나온다.

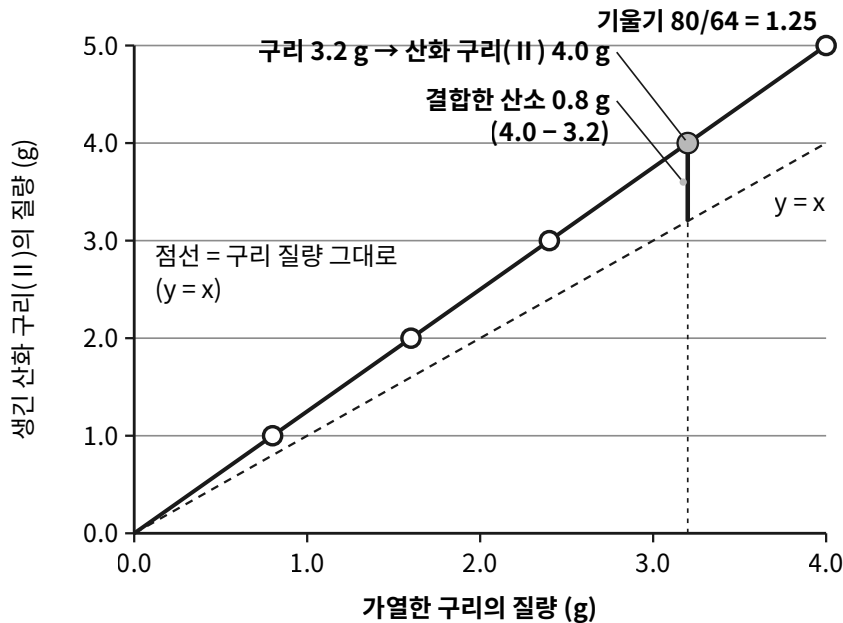


그림 4. 구리를 공기 중에서 완전히 가열할 때 구리 질량과 생긴 산화 구리(II) 질량 — 모든 점이 기울기 1.25(= 80/64)인 한 직선 위에 있다. 구리 3.2 g은 4.0 g이 되고, 그 차 0.8 g이 결합한 산소다(계산값).

하린 점들이 다 한 직선 위에 있어요. 구리가 두 배면 산화 구리도 두 배예요.

석 교수 직선의 기울기가 1.25다. 구리 1.0 g이 1.25 g이 되니 산소 0.25 g이 붙은 거지. 구리 대 산소의 질량비를 써 보자.

태오 1.0 : 0.25니까 4 : 1이에요. 구리가 3.2 g이면 산소는 0.8 g, 합해서 4.0 g이고요.

석 교수 맞다. 구리를 얼마나 넣든, 어느 나라 구리를 쓰든, 산화 구리(II) 속의 구리와 산소는 늘 4 : 1의 질량비로 들어 있다. 이것이 **일정 성분비 법칙**이다. 프랑스의 프루스트가 1799년 무렵 탄산 구리를 천연 광물과 실험실 합성품에서 비교해 성분비가 같다는 것을 보이며 주장했다.

이모 물도 그런가요? 수돗물이든 빗물이든 물은 다 같은 비율이에요?

석 교수 순수한 물이라면 어디서 얻든 수소와 산소의 질량비는 1 : 8이에요. 수돗물 맛이 다른 건 물에 녹은 다른 물질 때문이지 물 분자 자체가 다르기 때문이 아닙니다. 화합물은 성분비가 고정되어 있고, 혼합물은 섞는 양에 따라 성분비가 달라진다는 것, 이것이 둘을 가르는 기준이기도 해요.

태오 물 18 g을 전기 분해하면 수소 2 g과 산소 16 g이 나온다고 배웠어요. 2 : 16이니까 정말 1 : 8이네요.

석 교수 그렇다. 거꾸로 수소 1 g을 다 태우려면 산소가 8 g 필요하다는 것도 이 비에서 바로 나온다. 일정 성분비는 “얼마나 필요한가”를 계산하는 첫 도구다. 다만 성분비가 질량비라는 데 주의해라. 물 분자 속 원자 수의 비는 H : O = 2 : 1인데 질량비는 1 : 8이다. 원자 수의 비와 질량의 비를 잇는 다리가 원자량이고, 그것이 2장의 주제다.

하린 원자 수는 수소가 두 배인데 질량은 산소가 여덟 배라니, 산소 원자 하나가 수소 원자 하나보다 16배 무겁다는 거죠?

석 교수 계산이 정확하다. $2 \times 1 : 1 \times 16 = 2 : 16 = 1 : 8$ 이 되니까.

문제 1.1

구리 3.2 g을 공기 중에서 완전히 가열하였더니 검은 산화 구리(II) 4.0 g이 되었다. 결합한 산소의 질량과 산화 구리(II) 속 구리 : 산소의 질량비를 구하라.

하린 질량 보존이니까 $4.0 - 3.2 = 0.8$ g이 산소예요.

태오 질량비는 $3.2 : 0.8 = 4 : 1$ 이요.

석 교수 정답은 산소 0.8 g, 구리 : 산소 = 4 : 1이다. 두 법칙을 한 번에 썼구나. 줄어들지도 늘어나지도 않는다는 질량 보존으로 산소의 양을 구했고, 그 비가 늘 같다는 일정 성분비로 다른 실험을 예측할 수 있다.

문제 1.2

구리 8.0 g과 산소 1.0 g을 밀폐 용기에서 반응시켜 산화 구리(II)를 만들었다. 생기는 산화 구리(II)의 질량과, 반응하지 않고 남는 물질의 종류와 질량을 구하라.

태오 둘 다 더해서 9.0 g이 산화 구리(II)가 되는 거 아니에요?

석 교수 질량 보존만 쓰면 그렇게 생각하기 쉽다. 그런데 산화 구리(II)에서 구리와 산소는 4 : 1로만 결합한다. 산소 1.0 g과 결합할 수 있는 구리는 얼마나?

하린 4 : 1이니까 구리 4.0 g이요. 그럼 구리 8.0 g 중에 4.0 g만 반응하고 4.0 g이 남아요.

석 교수 그래서 정답은 산화 구리(II) 5.0 g이 생기고 구리 4.0 g이 남는다. 반응 전 9.0 g = 반응 후 $5.0 + 4.0$ g으로 질량 보존도 맞지. 이렇게 한쪽이 먼저 떨어져서 생성량을 정하는 것을 9장에서 “한계 반응물”이라고 부른다. 오늘은 산소가 먼저 떨어졌다는 것만 기억해 두자.

1.3 원자설이 두 법칙을 설명한다

이모 그런데 왜 꼭 4 : 1이어야 해요? 3.9 : 1이 되면 안 되는 이유가 있나요?

석 교수 그 질문에 처음 답한 사람이 영국의 돌턴이예요. 1803년부터 1808년 사이에 원자설을 내놓았지요. 요점은 네 가지입니다. 물질은 더 쪼갤 수 없는 원자로 되어 있다, 같은 원소의 원자는 질량이 같다, 화학 반응에서 원자는 새로 생기거나 없어지지 않고 짝만 바꾼다, 화합물은 서로 다른 원자가 간단한 정수 개씩 결합한 것이다.

태오 원자가 없어지지 않으니까 질량이 보존되고, 정수 개씩 결합하니까 질량비가 고정되는 거네요.

석 교수 정확하다. 산화 구리(II)는 구리 원자 1개와 산소 원자 1개가 짝을 이룬 것이고, 구리 원자 하나가 산소 원자 하나보다 4배 무거우니 질량비가 4 : 1이 된다. 원자의 상대적인 무게가 2장의 원자량이다. Cu 64, O 16, 그 비가 4 : 1이지.

하린 원자 하나가 4배 무거우면, 몇 개를 모아도 4배네요.

석 교수 그렇다. 돌턴은 여기서 한 걸음 더 나갔다. 두 원소가 두 가지 이상의 화합물을 만들 때를 보라. 탄소와 산소는 일산화 탄소 CO와 이산화 탄소 CO₂를 만든다. 탄소 12 g과 결합하는 산소가 CO에서는 16 g, CO₂에서는 32 g이다.

태오 $16 : 32 = 1 : 2$, 간단한 정수비예요.

석 교수 이것이 **배수 비례 법칙**이다. 원자가 반쪽으로 쪼개져 결합하는 일은 없으니, 한 원소의 고정된 양과 결합하는 다른 원소의 양은 정수배로만 달라진다. 이런 법칙들을 표 3에 모았다.

표 3. 화학의 기본 법칙 네 가지 — 원자설은 앞의 세 법칙을, 아보가드로 가설은 넷째 법칙을 설명한다

법칙	누가·언제	내용	원자·분자로 본 까닭
질량 보존	라부아지에, 1789	반응 전후 총질량이 같다	원자는 생기거나 없어지지 않는다
일정 성분비	프루스트, 1799년경	화합물의 성분 질량비는 일정하다(CuO에서 Cu : O = 4 : 1)	정해진 원자가 정해진 개수만큼 결합한다
배수 비례	돌턴, 1803~1808	C 12 g과 결합하는 O가 16 g, 32 g으로 정수배	원자는 쪼개지지 않고 정수 개씩 결합한다
기체 반응	게이뤼삭, 1808	같은 온도·압력에서 기체의 부피비는 간단한 정수비(수소 2 : 산소 1 : 수증기 2)	같은 부피에 같은 수의 분자가 있다(아보가드로, 1811)

1.4 기체의 부피비와 아보가드로의 가설

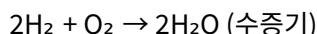
석 교수 넷째 줄을 보자. 프랑스의 게이뤼삭은 1808년, 기체끼리 반응할 때 같은 온도와 압력에서 부피가 간단한 정수비를 이룬다는 것을 발견했다. 수소 2부피와 산소 1부피가 수증기 2부피를 만든다.

하린 $2 + 1 = 3$ 인데 2가 돼요? 부피는 보존이 안 되네요.

석 교수 맞다. 질량은 보존되지만 부피는 보존되지 않는다. 그런데 이 결과가 돌턴에게 골칫거리였다. 돌턴은 수소와 산소가 원자 하나씩 결합해 물이 된다고 보았고, 기체 원소도 원자 하나로 떠다닌다고 생각했거든. 그러면 산소 1부피가 수증기 2부피를 만들려면 산소 원자가 반으로 쪼개져야 한다.

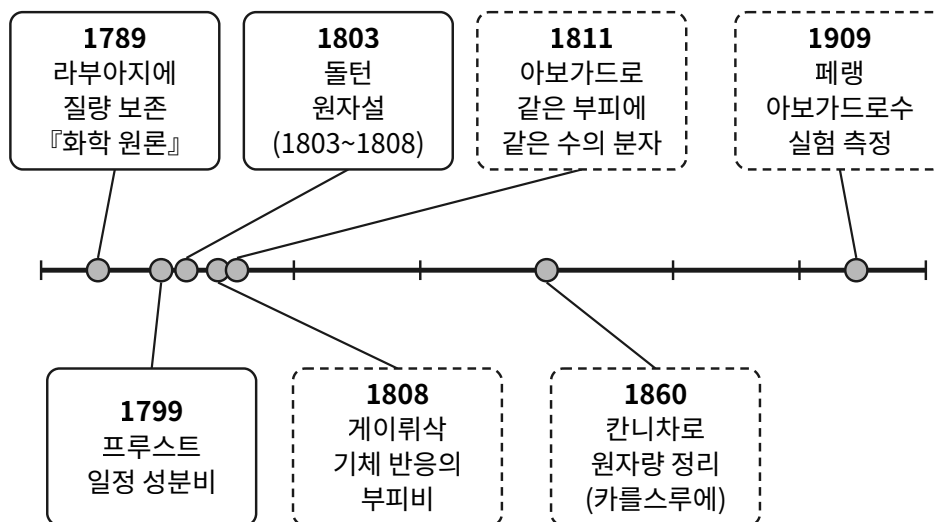
태오 원자는 쪼개지지 않는다고 했는데요.

석 교수 1811년 이탈리아의 아보가드로가 해결책을 냈다. 첫째, 같은 온도·압력에서 같은 부피의 기체에는 같은 수의 입자가 들어 있다. 둘째, 수소와 산소 기체의 입자는 원자 2개가 묶인 분자 H_2 , O_2 이다. 그러면 반응식이 이렇게 된다.



이모 분자 두 개 더하기 분자 한 개가 분자 두 개가 되니까, 부피도 2 : 1 : 2가 되는 거군요. 산소 분자가 둘로 갈라져서 원자 하나씩 물 분자에 들어가고요.

석 교수 네, 원자는 쪼개지지 않고 분자가 쪼개지는 거예요. 아쉽게도 이 생각은 거의 50년 동안 무시당했습니다. 1860년 독일 카를스루에 학회에서 이탈리아의 칸니차로가 아보가드로의 가설로 원자량을 일관되게 정리한 소책자를 나눠 주고 나서야 화학자들이 받아들였지요. 그 뒤 1909년 프랑스의 페랭은 물에 뜬 작은 입자들의 브라운 운동을 재서 아보가드로수를 실험으로 구했고, 원자가 실제로 존재한다는 것을 확인했어요.



실선 칸: 질량 법칙과 원자설 · 점선 칸: 기체 부피·분자·원자량

그림 5. 화학양론을 세운 발견의 연표(1789~1909) — 질량 보존과 일정 성분비가 원자설로 설명되고, 기체 반응의 부피비가 아보가드로 가설로 설명되어 원자량과 몰의 바탕이 되었다.

하린 연표를 보니까 120년이나 걸렸어요.

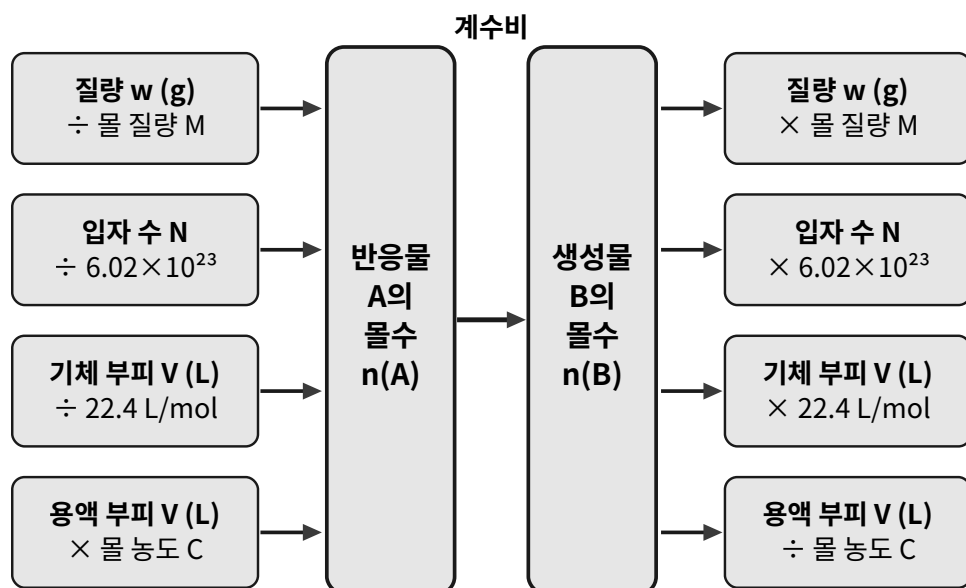
석 교수 원자를 직접 볼 수 없으니, 질량과 부피라는 눈에 보이는 양으로 원자의 존재를 추리해 간 120년이었지. 우리는 그 결론을 거꾸로 쓴다. 원자가 있다는 것을 알고, 원자의 상대적인 무게를 알고, 원자를 묶음으로 세는 법을 안다. 그러면 반응식 한 줄로 질량과 부피를 계산할 수 있다.

1.5 원자를 세는 장부 — 이 책의 길

태오 그럼 이 단원에서 배우는 계산은 결국 원자 세기예요?

석 교수 그렇다. 화학 반응을 장부라고 생각해 보라. 반응 전 원자의 개수를 원소별로 적고, 반응 후에도 같은 개수가 있어야 한다. 그런데 원자는 너무 작고 많아서 하나씩 셀 수 없다. 그래서 세 가지 도구를 만든다. 원자 하나의 상대적인 무게(원자량), 원자를 큰 묶음으로 세는 단위(몰), 그리고 원자가 어떤 비로 짝을 바꾸는지 보여 주는 반응식이다. **그림 6**가 이 책 전체의 지도다.

물 다리 — 모든 계산은 물을 지난다



반응식 $aA \rightarrow bB$ 에서 $n(B) = n(A) \times b/a$ (계수비 = 몰비)

왼쪽 상자 $\rightarrow$ 물: 상자 속 연산 $\cdot$ 물 $\rightarrow$ 오른쪽 상자: 상자 속 연산

그림 6. “물 다리” — 이 책 전체의 길잡이. 가운데 물 칸에서 질량($\div$ 몰 질량), 입자 수($\times$ 아보가드로수), 기체 부피($\div 22.4$ L), 용액 부피($\times$ 몰 농도)로 건너가고, 반응식의 계수비가 반응물의 몰과 생성물의 몰을 잇는다.

하린 가운데에 “물”이 있고 사방으로 다리가 놓였어요.

석 교수 어떤 문제든 주어진 양을 먼저 몰로 바꾸고, 계수비로 다리를 건너 다음, 구하는 양으로 다시 바꾼다. 2장에서 원자량, 3장에서 몰과 아보가드로수, 4장에서 몰 질량과 기체 부피, 5·6장에서 화학식 구하기, 7장에서 반응식 완성, 8~10장에서 계수비로 건너가기, 11·12장에서 용액의 농도, 13장에서 반응열까지 이 다리 위에서 한다.

이모 결국 시험 문제는 다리 몇 개를 건너느냐의 차이군요.

석 교수 네, 어려운 문제일수록 다리를 여러 번 건널 뿐이에요. 다리마다 곱하거나 나누는 수가 정해져 있으니, 단위를 끝까지 들고 가면 길을 잃지 않습니다.

질량 보존은 얼마나 정확한가

화학 반응에서도 에너지가 드나드는 만큼 질량이 아주 조금 변한다($E = mc^2$). 수소 2 g이 연소해 286 kJ을 내면 질량은 약 3×10^{-9} g 줄어드는데, 이는 저울로 잴 수 없는 크기다. 그래서 화학 반응에서는 질량 보존을 그대로 써도 된다. 질량 변화가 눈에 띄는 것은 핵반응이며, 이는 교과 밖 심화 내용이다.

태오 아까 풍선 병에서 저울이 안 변한 걸 이렇게 정밀하게 따지면 3×10^{-9} g쯤 변한다는 거네요.

석 교수 이론적으로는 그렇다. 하지만 시험에서 “질량 보존 법칙이 성립한다”고 쓰는 데 아무 문제가 없다. 오히려 열린 계와 닫힌 계를 구별하지 못하는 것이 흔한 감점 이유다. 기체가 나가거나 들어오는 반응이면 질량 변화가 곧 그 기체의 질량이라는 것, 이것 계산에 쓸 줄 알아야 한다.

이모 그럼 쇠뿔이 녹슬어서 무거워지는 건 공기 중 산소가 들어와 붙은 만큼이겠네요.

석 교수 맞아요. 녹슨 못이 늘어난 질량이 곧 결합한 산소의 질량입니다. 숯이 타서 가벼워지는 것은 이산화 탄소가 날아가서이고요. 두 현상이 반대처럼 보여도 같은 법칙입니다.

핵심 원자를 세는 장부의 세 원칙

1. 질량 보존: 닫힌 계에서 반응 전후 총질량은 같다. 열린 계에서 질량이 변하면 그 차는 드나든 기체의 질량이다.
2. 일정 성분비: 화합물의 성분 질량비는 일정하다(CuO 에서 $\text{Cu} : \text{O} = 4 : 1$, 물에서 $\text{H} : \text{O} = 1 : 8$).
3. 원자설: 원자는 생기지도 없어지지도 않고 정수 개씩 결합하므로, 반응 전후 원소별 원자 수가 같다.
4. 기체는 같은 온도·압력에서 같은 부피에 같은 수의 분자가 있다(아보가드로). 그래서 기체의 부피비가 분자 수의 비가 된다.

스스로 풀어 보기

1. 마그네슘 2.4 g을 공기 중에서 완전히 태웠더니 산화 마그네슘 4.0 g이 되었다. 결합한 산소의 질량과 $\text{Mg} : \text{O}$ 질량비는?
2. 같은 산화 마그네슘을 만들 때 마그네슘 6.0 g과 산소 3.0 g을 반응시키면 생기는 산화 마그네슘의 질량과 남는 물질은?
3. 열린 비커에서 대리석(CaCO_3) 10.0 g에 염산을 부었더니 반응 전후 전체 질량이 4.4 g 줄었다. 줄어든 질량은 무엇의 질량인가?
4. 같은 온도·압력에서 질소 1부피와 수소 3부피가 반응해 암모니아 2부피가 된다. 이 부피비를 아보가드로 가설로 설명하고 반응식을 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 두 법칙은 기출에서 “원자 수 보존”이라는 이름으로 계속 쓰인다. 4부의 **기출문제 7**(경희대 2020) (258쪽)는 제시문 [가]에서 반응 전후 원자의 종류와 수가 같다는 것을 주고, 연소 생성물 속 $\text{C} \cdot \text{H} \cdot \text{O}$ 원자를 세어 화합물의 화학식을 찾게 한다. **기출문제 5**(경희대 2020) (238쪽)의 제시문 [나]도 같은 원리로 연소 분석 결과를 해석하게 하며, **기출문제 8**(연세대 2019) (269쪽)의 문제 2는 탄산 칼슘과 염산의 반응식을 원자 수와 전하를 맞춰 쓰게 한다. 세 문제 모두 답안의 첫 줄은 “반응 전후 원소별 원자 수는 같다”이다. 이 문장 하나가 질량 계산과 반응식 완성의 근거가 된다는 것을 기억하고 2장으로 가자.

이 장의 참고문헌

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

Lavoisier, A.-L. (1789). Traité élémentaire de chimie. Cuchet.

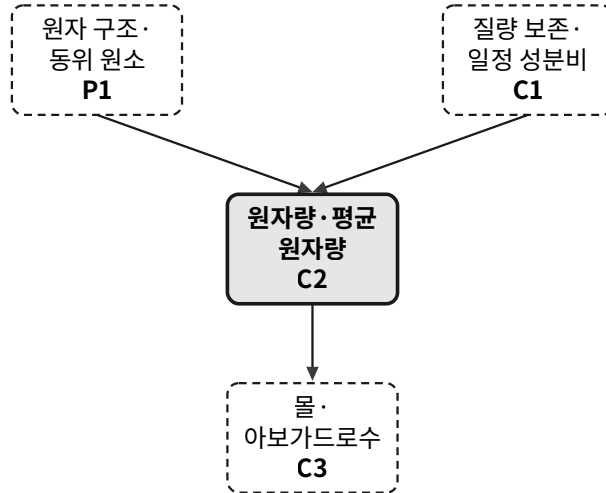
Smeaton, W. A. (1989). Monsieur and Madame Lavoisier in 1789: The chemical revolution and the French revolution. Ambix, 36(1), 1–4. <https://doi.org/10.1179/amb.1989.36.1.1>

제 2장 원자의 무게: 원자량과 동위 원소

새 개념 상대 질량 · ^{12}C 기준 원자량 · 동위 원소와 평균 원자량

이어짐 물 3장 · 물 질량 4장 · 원자 구조 23권

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(C2 원자량·평균 원자량)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 4. 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 4 (연세대 2021년) (230쪽)	아보가드로수·동위 원소와 CO_2 1몰의 전기	C2 원자량·평균 원자량

연필심 속 탄소-12와 탄소-13

탄소 원자 100개 중 ^{12}C 99개, ^{13}C 1개 (시험의 가정)

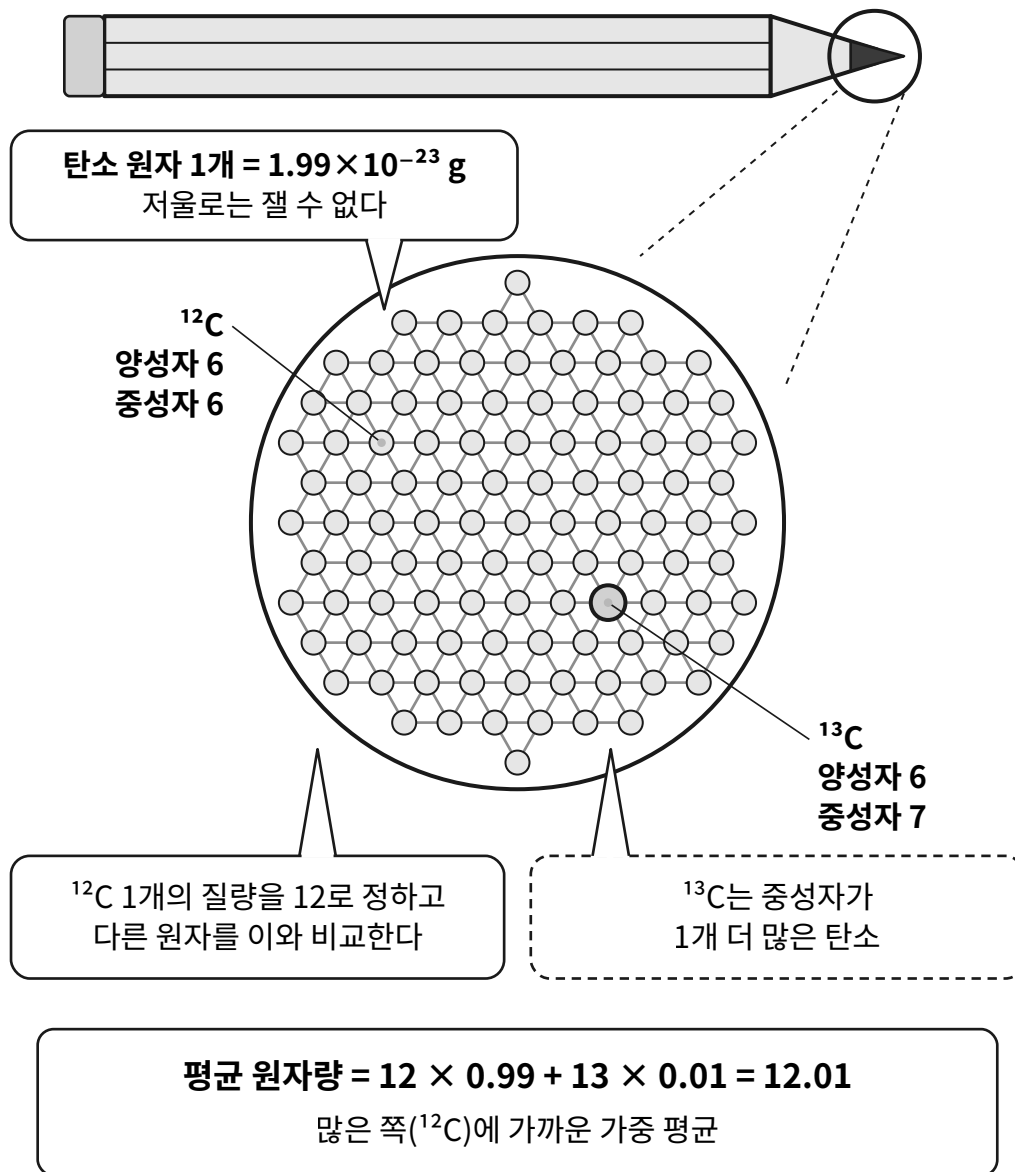


그림 8. 연필심 속 탄소 원자 — 흑연을 확대하면 탄소 원자 100개 가운데 ^{12}C 가 99개, ^{13}C 가 1개 섞여 있다(시험의 가정; 실제로는 98.93 : 1.07). 원자 1개의 질량은 저울로 잴 수 없어 ^{12}C 를 기준으로 비교한다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 원자량은 $^{12}\text{C} = 12$ 를 기준으로 한 상대 질량이다.
2. 같은 원소라도 중성자 수가 다른 동위 원소가 섞여 있다.
3. 주기율표의 원자량은 존재비로 가중 평균한 값이다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (16쪽)에서 본 질량 보존과 일정 성분비, 그리고 “원자는 정수 개씩 결합한다”는 원자설을 쓴다. 원자핵이 양성자와 중성자로 되어 있고 양성자 수가 원소를 정한다는 것(원자 구조, 23권)은 이 장에서 한 문단으로 요약한다. 계산은 곱셈과 덧셈, 그리고 x 에 관한 일차 방정식 하나면 된다.

다음 토요일, 하린은 필통에서 연필 한 자루를 꺼내 석 교수에게 내밀었다. 지난주 숙제가 “연필심 속 탄소 원자 하나의 무게를 상상해 오기”였기 때문이다. 태오는 연세대 기출문제 한 장을 들고 왔는데, 첫 줄에 “탄소 원자 1개의 질량은 1.99×10^{-23} g이다”라고 쓰여 있었다.

하린 교수님, 연필심 하나가 0.1 g쯤 되잖아요. 그 안에 탄소 원자가 몇 개나 있는지 생각해 봤는데, 너무 많아서 감이 안 와요.

석 교수 감이 안 오는 게 정상이다. 태오가 가져온 문제에 답이 있지. 탄소 원자 하나가 1.99×10^{-23} g이다. 소수점 아래로 0이 22개 붙는 수야.

태오 그럼 이 원자 하나의 질량을 처음에 누가 어떻게 잴어요? 저울에 원자 하나를 올릴 수는 없잖아요.

석 교수 그게 오늘의 출발점이다. 화학자들은 아주 오랫동안 원자 하나의 질량을 몰랐다. 그래도 원자량이라는 숫자로 반응을 정확히 계산했어. 비결은 절대 질량 대신 “상대 질량”을 쓴 것이다.

2.1 원자 한 개는 얼마나 가벼운가

석 교수 먼저 크기를 느껴 보자. 탄소 원자 1개 1.99×10^{-23} g, 수소 원자 1개 1.67×10^{-24} g이다. 가장 정밀한 화학 저울이 0.0001 g, 곧 10^{-4} g까지 잰다고 하면, 저울 눈금 한 칸을 움직이려면 탄소 원자가 몇 개 필요할까?

태오 $10^{-4} \div (1.99 \times 10^{-23}) = 5.03 \times 10^{18}$ 개예요. 오백만조 개요.

이모 그렇게 많이 모아야 겨우 저울 눈금 하나가 움직인다니, 원자 하나는 정말 잴 수가 없겠네요.

석 교수 네. 그래서 19세기 화학자들은 원자 하나의 질량을 재는 대신 “이 원자는 저 원자보다 몇 배 무거운가”를 잴어요. 1장의 물을 떠올려 보세요. 수소와 산소의 질량비가 1 : 8이고, 물 분자에 수소 원자가 2개, 산소 원자가 1개라면 산소 원자 하나는 수소 원자 하나보다 16배 무겁습니다. 원자 하나를 잴 필요 없이 화합물의 성분비만으로 원자들의 상대적인 무게를 알 수 있었지요.

하린 그럼 원자량은 “몇 배인가”를 적은 숫자예요?

석 교수 그렇다. 원자량은 단위가 없는 비율이다. 기준 원자 하나를 정해서 그 질량을 어떤 수로 약속하고, 나머지 원자는 그 기준과 비교한 값을 쓴다.

태오 그런데 물이 H_2O 라는 걸 모르면 16배라는 값도 못 구하잖아요. 돌턴은 물을 HO 라고 생각했다고 하셨는데요.

석 교수 바로 그 문제가 있었다. 돌턴처럼 HO로 보면 산소 원자는 수소의 8배가 되고, H₂O로 보면 16배가 된다. 화학식을 모르면 원자량이 정해지지 않고, 원자량을 모르면 화학식이 정해지지 않는 닭과 달걀 문제였지. 이 매듭을 푼 것이 1장의 아보가드로 가설이다. 같은 온도·압력에서 같은 부피에 같은 수의 분자가 있다면, 기체의 밀도 비가 곧 분자 하나의 질량 비다. 산소 기체는 같은 부피의 수소 기체보다 16배 무겁고, 둘 다 원자 2개짜리 분자이니 산소 원자는 수소 원자의 16배다.

하린 기체 무게를 비교해서 원자의 무게를 알아낸 거네요.

석 교수 칸니차로가 1860년에 이 방법으로 여러 원소의 원자량을 한 줄로 정리했다. 원자 하나를 저울에 올리진 않고도, 같은 수의 분자를 담은 기체 상자의 무게를 비교한 셈이야.

2.2 상대 질량 — ¹²C = 12를 기준으로

석 교수 기준은 몇 번 바뀌었다. 돌턴은 가장 가벼운 수소를 1로 놓았다. 그런데 산소와 결합한 화합물이 훨씬 많아서, 19세기 후반부터 화학자들은 산소를 16으로 놓는 기준을 썼다. 문제는 20세기에 들어 산소에도 무게가 다른 원자들이 섞여 있다는 것이 밝혀진 거야. 물리학자들은 그중 가장 많은 ¹⁶O 하나를 16으로 놓았고, 화학자들은 섞인 산소 전체의 평균을 16으로 놓아서 두 분야의 원자량 표가 조금씩 달랐다.

태오 같은 원소인데 표가 두 개면 계산할 때마다 헷갈렸겠어요.

석 교수 그래서 1961년 국제 협약으로 탄소-12, 곧 ¹²C 원자 하나의 질량을 정확히 12로 정했다. 이것이 지금의 기준이다. 이 기준으로 재면 수소는 1.008, 산소는 15.999다. **그림 9**가 그 변화를 보여 준다.

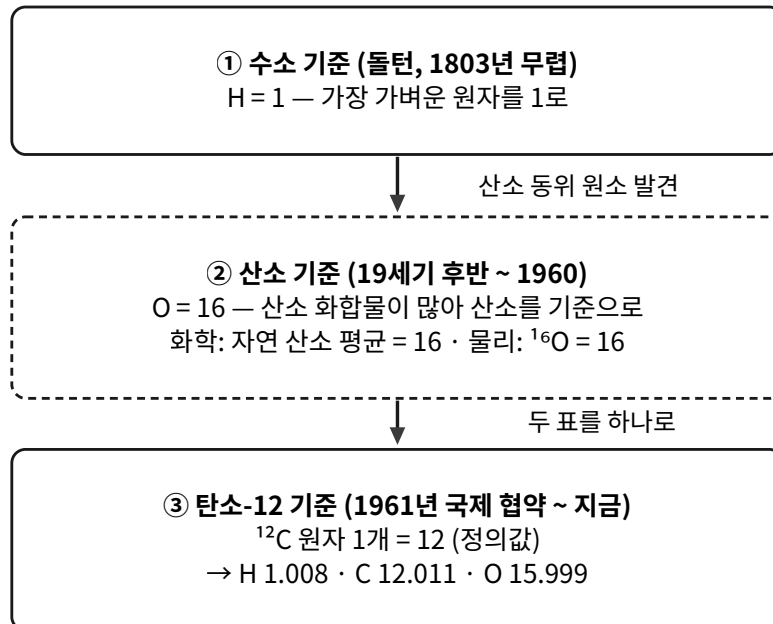


그림 9. 원자량 기준의 변화 — 수소 = 1(돌턴)에서 산소 = 16(19세기 후반~1960)을 거쳐 ¹²C = 12(1961년 국제 협약)로 정해졌다. 지금의 기준에서 수소는 1.008, 산소는 15.999이다.

이모 왜 하필 탄소예요?

석 교수 탄소-12는 질량 분석기에서 기준으로 쓰기 좋고, ¹²C = 12로 정하면 옛 산소 기준의 원자량 값이 거의 바뀌지 않았기 때문입니다. 표를 다 새로 고치지 않아도 되었지요. 그리고 ¹²C 원자 질량의 12분의 1을 “원자 질량 단위” u라고 부릅니다.

$$1\text{ u} = (^{12}\text{C 원자 1개의 질량}) \div 12 = 1.99 \times 10^{-23} \text{ g} \div 12 = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$$

태오 그럼 수소 원자 1개가 1.008 u니까 $1.008 \times 1.66 \times 10^{-24} = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$ 이네요. 아까 말씀하신 값이랑 같아요.

석 교수 정확하다. 원자량이 1이면 원자 하나가 약 $1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$ 이라는 뜻이다. 이 책은 계산을 쉽게 하려고 기출과 같이 H 1, C 12, N 14, O 16, Cl 35.5처럼 정수에 가까운 원자량을 쓴다.

하린 원자량이 상대값이면, 1장의 구리와 산소 4 : 1도 원자량으로 바로 나와요?

석 교수 해 보자. 산화 구리(II) CuO에는 구리 원자와 산소 원자가 1 : 1로 들어 있다. 원자 하나의 질량비가 $64 : 16 = 4 : 1$ 이니 몇 개를 모아도 질량비는 4 : 1이다. 소금 NaCl이라면?

태오 Na 23, Cl 35.5니까 23 : 35.5예요. 소금 58.5 g에 나트륨 23 g, 염소 35.5 g이 들어 있는 거죠.

석 교수 그렇다. 원자량을 알면 화학식만 보고 성분 질량비를 계산할 수 있다. 일정 성분비가 왜 그 값인지 원자량이 설명해 주는 거지. 5장에서 이 계산을 질량 백분율로 다시 한다.

원자량에는 단위가 없다

원자량은 ^{12}C 원자의 질량을 12로 했을 때의 상대값이므로 단위가 없다. “O의 원자량은 16 g”은 틀린 표현이다. g이 붙는 것은 4장의 물 질량(16 g/mol)이다. 원자 1개의 질량을 u로 쓰면 16 u라고 쓸 수 있지만, 이것도 원자량 16과는 다른 양(질량)이다.

2.3 질량수와 동위 원소

석 교수 산소에 “무게가 다른 원자들이 섞여 있다”고 했지? 원자 구조를 조금만 보자. 원자의 질량은 거의 다 원자핵에 있고, 원자핵은 양성자와 중성자로 되어 있다. 둘의 질량은 거의 같아서 각각 약 1 u다. 양성자 수와 중성자 수를 더한 것을 **질량수**라 하고 원소 기호 왼쪽 위에 쓴다.

하린 ^{12}C 는 질량수가 12인 탄소라는 뜻이네요. 탄소는 양성자가 6개니까 중성자도 6개고요.

석 교수 그렇다. 그런데 탄소 원자 가운데 약 1 %는 중성자가 7개다. 그게 ^{13}C 다. 양성자 수가 같으니 같은 탄소이고 화학적 성질도 거의 같지만, 질량이 조금 다르다. 이렇게 양성자 수는 같고 중성자 수가 다른 원자를 **동위 원소**라고 한다. 자세한 원자 구조는 23권에서 다르다.

이모 우리가 먹는 쌀이나 고기의 탄소도 99대 1로 섞여 있어요?

석 교수 네, 거의 그 비율이에요. 아주 정밀하게 재면 식물이 광합성하는 방식에 따라 ^{13}C 비율이 조금씩 달라서, 꿀에 설탕을 섞었는지 가려내는 검사에도 씁니다. 다만 그 차이는 1천분의 몇 수준이라 원자량 계산에는 영향이 거의 없어요.

석 교수 주요 원소의 동위 원소를 표 5에 정리했다. 실제 값이고, 원자량은 존재비로 평균한 값이다.

표 5. 주요 원소의 동위 원소와 존재비 — 원자량은 각 동위 원소 질량을 존재비로 가중 평균한 값이다(이 책의 계산은 정수 원자량을 쓴다)

원소	동위 원소(질량수)	자연 존재비(%)	원자량($^{12}\text{C} = 12$)	이 책의 값
수소 H	^1H , ^2H	99.99, 0.01	1.008	1

원소	동위 원소(질량수)	자연 존재비(%)	원자량($^{12}\text{C} = 12$)	이 책의 값
탄소 C	^{12}C , ^{13}C	98.93, 1.07	12.011	12
질소 N	^{14}N , ^{15}N	99.64, 0.36	14.007	14
산소 O	^{16}O , ^{17}O , ^{18}O	99.76, 0.04, 0.20	15.999	16
염소 Cl	^{35}Cl , ^{37}Cl	75.76, 24.24	35.45	35.5
구리 Cu	^{63}Cu , ^{65}Cu	69.15, 30.85	63.55	64

하린 수소에도 무거운 수소가 있네요. ^2H 는 뭐예요?

석 교수 중성자를 1개 가진 수소로, 중수소라고 부른다. 수소 원자 1만 개 가운데 1개 정도밖에 없어서 수소의 원자량은 1.008로 1에 아주 가깝다. 중수소 두 개가 산소와 결합한 물 D_2O 를 중수라고 하는데, 분자량이 20이라 보통 물(18)보다 약 11 % 무겁다. 원자력 발전소 일부에서 중성자의 속도를 줄이는 데 쓴다.

이모 박물관 유물 연대를 탄소로 잰다는 얘기도 들었어요. 그것도 동위 원소죠?

석 교수 네, 탄소-14예요. 중성자가 8개인 탄소로, 방사성이라 시간이 지나면 일정한 속도로 줄어듭니다. 그런데 대기 중 탄소 1조 개 가운데 1개 정도라서 원자량 계산에는 전혀 영향을 주지 않아요. 원자량을 계산할 때는 ^{12}C 와 ^{13}C 두 가지만 생각하면 충분합니다.

태오 염소가 35.5인 게 늘 이상했어요. 다른 원소는 거의 정수인데 염소만 0.5가 붙잖아요.

석 교수 동위 원소 두 개가 3 : 1 정도로 섞여 있어서다. 수소나 산소는 한 동위 원소가 99 % 넘게 차지하니 평균이 그 질량수에 가깝고, 염소는 두 동위 원소가 비슷하게 많으니 평균이 중간으로 간다.

2.4 평균 원자량 = 질량 × 존재비의 합

석 교수 평균 원자량은 각 동위 원소의 원자량에 존재비를 곱해 더한 값이다. 시험에서는 동위 원소의 원자량을 질량수와 같다고 가정하는 경우가 많다. 탄소로 해 보자. ^{12}C 99 %, ^{13}C 1 %라고 하면?

$$\text{평균 원자량} = \Sigma(\text{동위 원소의 원자량} \times \text{존재비}) = 12 \times 0.99 + 13 \times 0.01 = 12.01$$

하린 $11.88 + 0.13 = 12.01$. 시소처럼 무거운 쪽으로 조금 기울어진 값이에요.

석 교수 시소 비유가 좋구나. **그림 10**를 보면, ^{12}C 구슬 99개와 ^{13}C 구슬 1개를 올려놓았을 때 균형이 잡히는 받침점이 12.01이다. 구슬이 많은 쪽에 받침점이 바짝 붙는다.

$$12 \times 0.99 + 13 \times 0.01 = 12.01$$

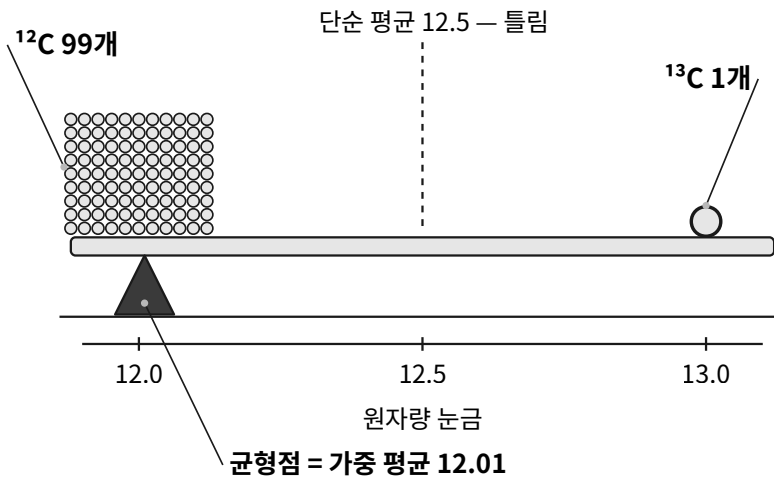


그림 10. 평균 원자량의 시소 — ^{12}C 원자 99개와 ^{13}C 원자 1개를 질량수 위치에 올려놓으면 균형점(가중 평균)은 12.01이다. 존재비가 큰 동위 원소 쪽으로 평균이 가깝다(계산값).

이모 그냥 12와 13을 더해서 둘로 나누면 12.5잖아요. 그건 왜 안 되나요?

석 교수 그건 ^{12}C 와 ^{13}C 가 반반씩 있을 때의 평균이에요. 실제로는 ^{12}C 가 99배나 많으니, 많은 쪽을 그만큼 더 쳐 줘야 합니다. 반 학생 100명의 평균 키를 구할 때 키가 다른 두 무리의 인원수를 곱해서 더하는 것과 같지요. 이런 평균을 가중 평균이라고 하고, 곱해 주는 비율이 존재비예요. 단순 평균 12.5를 쓰면 탄소 1몰의 질량이 0.5 g이나 틀려서, 뒤의 모든 계산이 4 % 넘게 어긋납니다.

태오 반대로 평균 원자량을 주고 존재비를 묻는 문제도 있겠네요.

석 교수 그게 더 자주 나온다. 미지수를 x로 놓고 일차방정식을 세우면 된다.

문제 2.1

염소는 ^{35}Cl 과 ^{37}Cl 두 동위 원소로만 되어 있고, 평균 원자량은 35.5이다. 각 동위 원소의 원자량은 질량수와 같다고 할 때, 두 동위 원소의 존재비를 구하라.

태오 ^{35}Cl 의 존재비를 x라고 하면 ^{37}Cl 은 $1 - x$ 예요. $35x + 37(1 - x) = 35.5$, $37 - 2x = 35.5$, $2x = 1.5$, $x = 0.75$.

하린 그럼 ^{35}Cl 75 %, ^{37}Cl 25 %예요. 3 : 1이요.

석 교수 정답이다. 검산도 하자. $35 \times 0.75 + 37 \times 0.25 = 26.25 + 9.25 = 35.5$. 실제 존재비 75.76 : 24.24와도 가깝다. 답을 쓸 때는 두 존재비의 합이 100 %가 되는지 꼭 확인해라.

문제 2.2

붕소(B)의 동위 원소는 ^{10}B 와 ^{11}B 이고 평균 원자량은 10.8이다. 원자량이 질량수와 같다고 할 때 ^{11}B 의 존재비는 몇 %인가?

하린 이번엔 제가 할게요. ^{11}B 를 y라고 하면 $10(1 - y) + 11y = 10.8$, $10 + y = 10.8$, $y = 0.8$ 이예요. ^{11}B 가 80 %예요.

석 교수 정답은 ^{11}B 80 %, ^{10}B 20 %다. 구하라는 동위 원소를 미지수로 놓으니 식이 더 짧아졌지. 이 방법은 2021학년도 연세대 문제의 둘째 부분과 똑같다. 그 문제는 “탄소의 평균 원자량이 12.01일 때 ^{12}C 와 ^{13}C 의 존재비를 구하라”였고, 답은 99 : 1이다.

2.5 질량 분석기로 존재비를 읽는다

이모 존재비는 어떻게 재요? 원자를 하나씩 셀 수도 없을 텐데요.

석 교수 질량 분석기라는 장치를 씁니다. 원자나 분자를 이온으로 만든 다음 전기장으로 가속해 자기장 속을 지나가게 하면, 가벼운 이온은 많이 휘고 무거운 이온은 덜 휩니다. 휘는 정도로 질량을 가르고, 각 자리에 도착한 이온의 수로 존재비를 재지요. 결과는 **그림 11** 같은 막대그래프로 나옵니다.

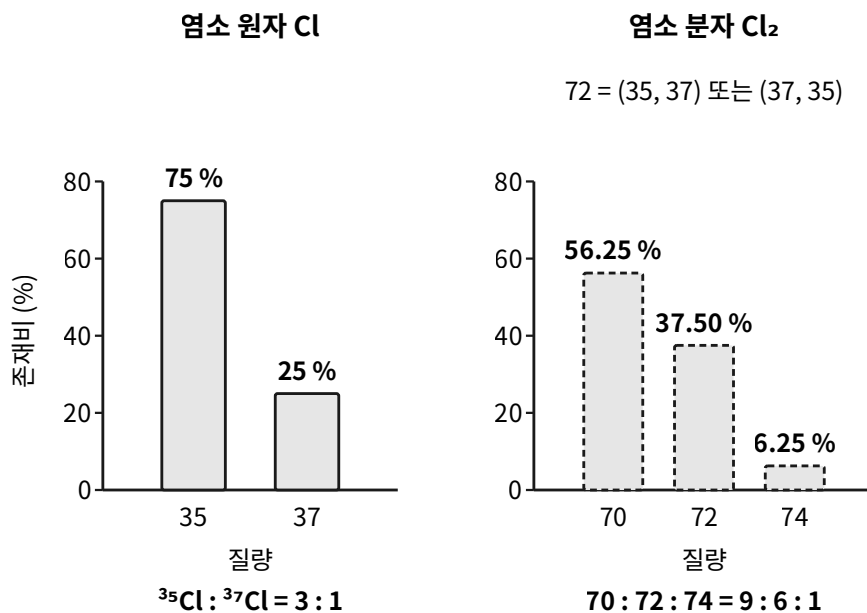


그림 11. 염소의 질량 스펙트럼 — 왼쪽은 염소 원자($^{35}\text{Cl} : ^{37}\text{Cl} = 75 : 25$), 오른쪽은 염소 분자 Cl_2 (질량 70 : 72 : 74 = 9 : 6 : 1). 분자의 막대 높이는 두 원자가 각각 어느 동위 원소인지의 확률을 곱해 계산했다.

태오 오른쪽 분자 그래프는 막대가 세 개예요. 70, 72, 74.

석 교수 Cl_2 는 원자 2개로 되어 있으니, 두 원자가 모두 ^{35}Cl 이면 70, 하나씩이면 72, 둘 다 ^{37}Cl 이면 74다. 확률을 곱해 보자. ^{35}Cl 이 나올 확률이 0.75, ^{37}Cl 이 0.25다.

태오 70은 $0.75 \times 0.75 = 0.5625$, 74는 $0.25 \times 0.25 = 0.0625$ 예요. 72는 0.75×0.25 인데……0.1875요.

석 교수 거기서 실수가 잦다. 72가 되는 경우는 (^{35}Cl , ^{37}Cl)과 (^{37}Cl , ^{35}Cl) 두 가지다. 그래서 $2 \times 0.75 \times 0.25 = 0.375$ 다. 세 값을 더하면 $0.5625 + 0.375 + 0.0625 = 1$ 이 되어야 하지.

하린 $0.5625 : 0.375 : 0.0625$ 를 0.0625로 나누면 9 : 6 : 1이에요.

석 교수 정답이다. 실제 질량 스펙트럼에서도 염소 분자의 막대는 거의 9 : 6 : 1로 나온다. 이 비율을 거꾸로 읽으면 ^{35}Cl 과 ^{37}Cl 의 존재비를 알 수 있지. 확률의 합이 1이 되는지 확인하는 습관이 바로 검산이다.

이모 분자의 평균 질량도 원자 평균의 두 배가 되나요?

석 교수 네. $70 \times 0.5625 + 72 \times 0.375 + 74 \times 0.0625 = 71.0$ 이고, 원자 평균 35.5의 두 배예요. 그래서 Cl_2 의 분자량을 71로 씁니다.

태오 탄소가 든 분자도 이렇게 막대가 여러 개 나와요? 이산화 탄소 같은 거요.

석 교수 그렇다. CO₂에서 탄소가 ¹²C이면 질량 44, ¹³C이면 45다. 산소 동위 원소는 거의 ¹⁶O이니 무시하면, 44와 45 막대의 높이 비가 약 99 : 1이 된다. 그래서 대기 CO₂의 질량 스펙트럼에서 45 막대를 정밀하게 재면 그 탄소가 화석 연료에서 왔는지, 바다에서 왔는지를 추적할 수 있다. 화석 연료의 탄소는 옛 식물에서 왔기 때문에 ¹³C가 아주 조금 적거든.

원자량이 질량수와 조금 다른 까닭(교과 밖 심화)

¹²C를 12로 정의했으므로 ¹²C의 원자량은 정확히 12이다. 그런데 ¹³C는 13이 아니라 13.003, ³⁵Cl은 35가 아니라 34.969이다. 양성자와 중성자의 질량이 정확히 1 u가 아니고, 핵이 만들어질 때 결합 에너지만큼 질량이 줄어들기(질량 결손) 때문이다. 이 차이는 0.1 % 이하라서 시험에서는 “원자량 = 질량수”로 가정하는 경우가 많다. 문제에 그 가정이 쓰여 있는지 확인하고 쓰자.

핵심 원자량을 다루는 네 단계

1. 원자량은 ¹²C 원자 1개의 질량을 12로 정한 상대 질량이다. 단위가 없고, 1 u = 1.66×10^{-24} g이다.
2. 동위 원소는 양성자 수는 같고 중성자 수가 다른 원자다. 질량수 = 양성자 수 + 중성자 수.
3. 평균 원자량 = $\Sigma(\text{동위 원소의 원자량} \times \text{존재비})$. 존재비를 모르면 x와 1 - x로 놓고 일차방정식을 푼다.
4. 존재비의 합이 1(100 %)인지, 분자 스펙트럼이면 확률의 합이 1인지로 계산한다.

스스로 풀어 보기

1. 구리는 ⁶³Cu와 ⁶⁵Cu로 되어 있고 평균 원자량이 63.6이다. 원자량이 질량수와 같다고 할 때 ⁶³Cu의 존재비는?
2. 네온은 ²⁰Ne 90 %, ²²Ne 10 %로 되어 있다고 하자. 평균 원자량은?
3. 마그네슘 원자(원자량 24) 1개의 질량은 ¹²C 원자 1개의 몇 배이며, 몇 g인가? (¹²C 1개 = 1.99×10^{-23} g)
4. ³⁵Cl : ³⁷Cl = 3 : 1일 때 HCl 분자(¹H만 있다고 가정)의 질량 스펙트럼에서 질량 36과 38 막대의 높이 비는?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 4**(연세대 2021) (230쪽)은 이 장을 그대로 시험으로 옮긴 문제다. 제시문 [가]에 탄소 원자 1개의 질량 1.99×10^{-23} g과 ¹²C, ¹³C 동위 원소를 주고, 문제 1에서 아보가드로수를 계산한 뒤 평균 원자량 12.01에서 두 동위 원소의 존재비를 구하게 한다. 앞부분은 3장의 몰 정의가 필요하고, 뒷부분은 문제 2.1과 같은 일차방정식이다. 답안에는 “¹²C의 존재비를 x라 하면 $12x + 13(1 - x) = 12.01$ ”처럼 미지수를 정의하는 문장과 계산 한 줄을 반드시 남기자. 계산 결과를 “¹²C 99 %, ¹³C 1 %”처럼 백분율로 쓰지 “99 : 1”처럼 비로 쓰지는 문제가 요구한 형식을 따르고, 두 값의 합이 100 %가 되는지 마지막에 확인하면 감점을 피할 수 있다. 원자 1개의 질량과 원자량을 잇는 다리가 다음 장의 물이다.

이 장의 참고문헌

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

Meija, J., Coplen, T. B., Berglund, M., Brand, W. A., De Bièvre, P., Gröning, M., Holden, N. E., Irrgeher, J., Loss, R. D., Walczyk, T., & Prohaska, T. (2016). Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 88(3), 265–291. <https://doi.org/10.1515/pac-2015-0305>

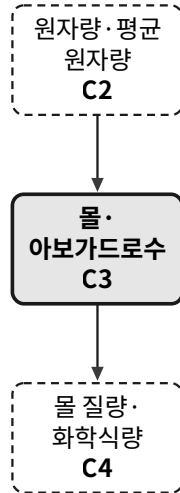
Meija, J., Coplen, T. B., Berglund, M., Brand, W. A., De Bièvre, P., Gröning, M., Holden, N. E., Irrgeher, J., Loss, R. D., Walczyk, T., & Prohaska, T. (2016). Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 88(3), 293–306. <https://doi.org/10.1515/pac-2015-0503>

제 3장 물: 원자를 세는 묶음

새 개념 물 · 아보가드로수 · 질량과 개수 바꾸기

이어짐 원자량 2장 · 물 질량 4장 · 반응식의 양적 관계 8장

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(C3 물·아보가드로수)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.

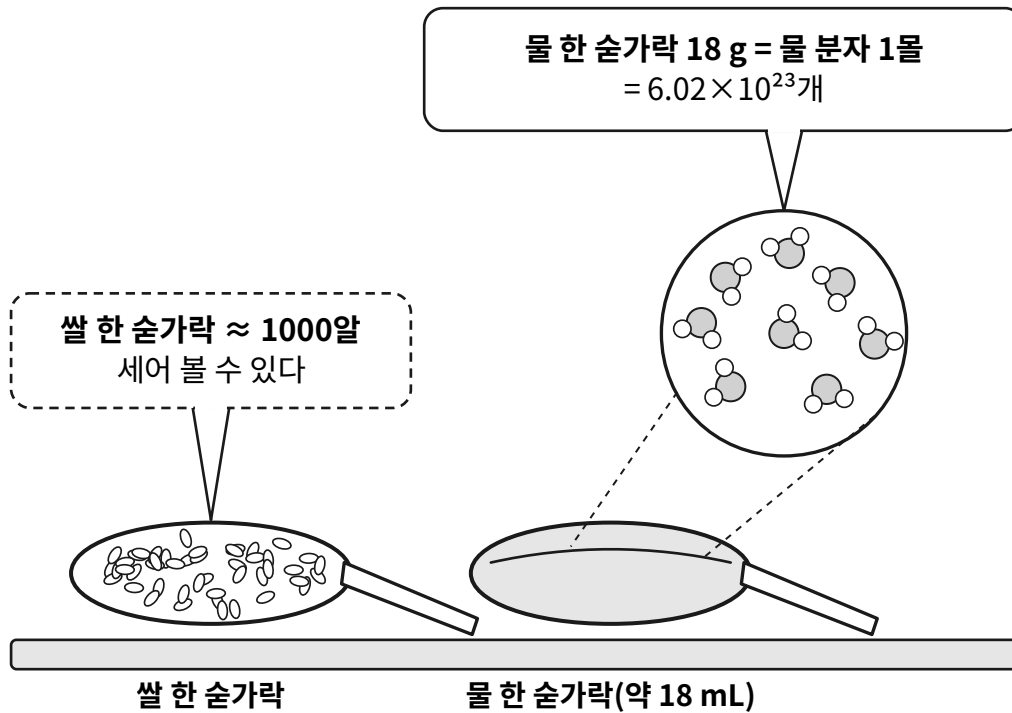
이 장의 개념이 쓰인 기출

표 6. 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 4 (연세대 2021년) (230쪽)	아보가드로수·동위 원소와 CO ₂ 1몰의 전기	C3 물·아보가드로수

물 한 숟가락 속 분자의 수

셀 수 있는 것과 셀 수 없는 것



1초에 1개씩 세면 1.9×10^{16} 년
우주 나이(1.38×10^{10} 년)의 약 140만 배

그래서 화학자는 개수 대신 몰로 센다

$$18 \text{ g} \div 18 \text{ g/mol} = 1 \text{ mol}$$

$$1 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} / \text{mol} = 6.02 \times 10^{23} \text{개}$$

그림 13. 식탁 위의 물 한 숟가락과 쌀 한 숟가락 — 쌀은 한 숟가락에 약 1000알이라 셀 수 있지만, 물 18 g(약 18 mL)에는 물 분자가 6.02×10^{23} 개 들어 있어 셀 수 없다. 그래서 화학자는 개수 대신 몰로 센다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 1몰은 6.02×10^{23} 개의 묶음이다.
2. 물 18 g이 물 분자 1몰이다.
3. 질량을 몰 질량으로 나누면 몰수, 몰수에 아보가드로수를 곱하면 개수가 된다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 2장 (26쪽)의 원자량($^{12}\text{C} = 12$ 를 기준으로 한 상대 질량)과 탄소 원자 1개의 질량 $1.99 \times 10^{-23} \text{ g}$ 을 쓴다. 지수 계산($10^{23} \times 10^{-23} = 1$, $10^4 \div 10^{-2} = 10^6$)과 유효숫자 세 자리 반올림을 할 줄 알면 된다. 화학식 H_2O 에서 아래 숫자가 원자 개수라는 것도 다시 쓴다.

셋째 토요일, 이모는 식탁에 물 한 숟가락과 쌀 한 숟가락을 나란히 올려놓았다. 하린은 쌀알을 세기 시작했고, 열 줄을 넘기자 지쳤다. 석 교수는 웃으며 쌀은 그래도 셀 수 있지만 옆의 물은 평생 세어도 끝이 안 난다고 했다. 태오는 지난주 기출의 “아보가드로수를 구하라”에 동그라미를 쳐 두었다.

하린 쌀 한 숟가락에 960알까지 셧어요. 대충 1000알이에요. 물 한 숟가락에는 물 분자가 몇 개예요?

석 교수 이 숟가락에 물이 18 g쯤 들었다. 물 분자는 6.02×10^{23} 개, 곧 6020해 개쯤이다. 1조의 1조 배에 가까운 수야.

이모 그런 수를 어떻게 매번 쓰고 계산해요? 장보기 영수증에 그런 수가 나오면 읽지도 못하겠어요.

석 교수 그래서 묶음 단위를 만들었어요. 연필을 12자루씩 묶어 1다스라고 하듯이, 원자나 분자를 6.02×10^{23} 개씩 묶어 1몰이라고 부릅니다. 오늘은 그 묶음이 왜 하필 그 수인지, 그리고 질량과 개수를 어떻게 오가는지 보지요.

3.1 묶음 단위 — 다스, 연, 그리고 몰

석 교수 생활에도 묶음 단위가 많다. 연필 1다스는 12자루, 달걀 1판은 30개, 종이 1연은 500장이다. 물건이 작고 많을수록 묶음이 크다. 종이 한 장의 두께는 0.1 mm쯤이니 한 장씩 세지 않고 연으로 사고팔지.

태오 원자는 엄청 작으니까 묶음이 엄청 커야겠네요.

석 교수 그렇다. **그림 14**에서 세로축을 보아라. 개수를 10의 몇 제곱인지로 그렸다. 다스는 10^1 , 연은 10^2 , 몰은 10^{23} 을 넘는다. 보통 눈금으로 그리면 몰 막대는 종이 밖으로 한없이 뻗어 나가서 그릴 수가 없다.

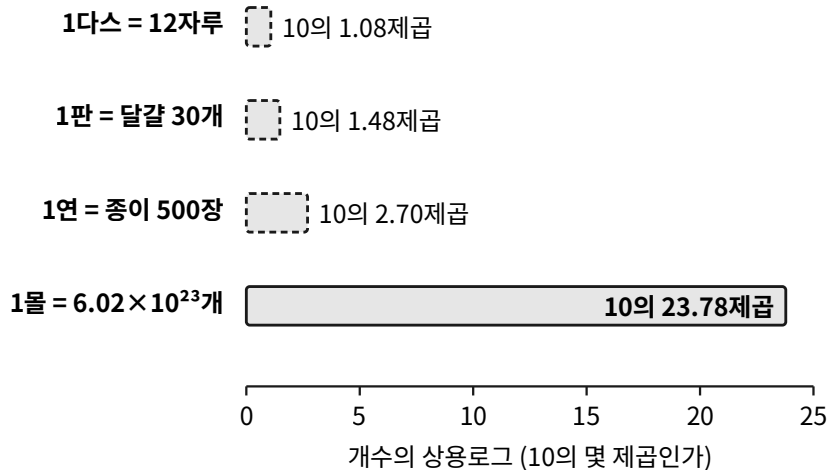


그림 14. 묶음 단위의 크기 비교 — 가로 막대의 길이는 묶음 속 개수의 상용로그(10의 몇 제곱인가)이다. 1다스(12개)는 $10^{1.08}$, 1연(500장)은 $10^{2.70}$, 1몰(6.02×10^{23} 개)은 $10^{23.78}$ 이다(계산값).

하린 로그로 그려도 몰 막대가 다른 것보다 열 배쯤 길어요.

석 교수 그만큼 차원이 다른 묶음이다. 하지만 원리는 다스와 같다. “연필 3다스는 몇 자루냐”는 질문에 $3 \times 12 = 36$ 을 하듯이, “원자 3몰은 몇 개냐”에 $3 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.81 \times 10^{24}$ 를 하면 된다. 몰은 단지 개수의 묶음일 뿐, 질량이나 부피의 단위가 아니라는 것을 먼저 분명히 해 두자.

3.2 1몰의 정의 — 왜 6.02×10^{23} 인가

태오 다스는 12라서 나누기 좋다는 이유라도 있잖아요. 몰은 왜 하필 6.02×10^{23} 이에요? 그냥 10^{23} 으로 하면 편할 텐데요.

석 교수 좋은 질문이다. 몰은 원자량과 그램을 잇기 위해 고른 수다. 정의는 이렇다. **^{12}C 12 g 속에 들어 있는 탄소 원자의 수를 1몰로 한다.** 원자량에 g을 붙인 질량 속의 원자 수가 바로 1몰이 되도록 묶음 크기를 정한 거지.

이모 그러면 수소 1 g, 산소 16 g에도 각각 1몰의 원자가 들어 있겠네요. 원자량이 상대 질량이니까요.

석 교수 맞아요. 수소 원자 하나는 탄소 원자 하나의 12분의 1 무게니까, 같은 개수를 모으면 질량도 12분의 1이 됩니다. 탄소 12 g이 1몰이면 수소는 1 g이 1몰이지요. 산소 원자는 16 g, 구리 원자는 64 g이 1몰입니다. 원자량을 g으로 읽기만 하면 1몰의 질량이 나와요. 이 편리함 때문에 묶음 크기를 10^{23} 같은 둥근 수가 아니라 6.02×10^{23} 으로 정한 겁니다.

하린 그럼 6.02×10^{23} 이라는 숫자는 누가 정한 게 아니라 재서 알아낸 거예요?

석 교수 오랫동안 그랬다. 정의는 “ ^{12}C 12 g 속 원자 수”였고, 그 수가 얼마인지는 실험으로 재야 했다. 1장의 페랭이 1909년에 브라운 운동으로 처음 재었고, 20세기 후반에는 X선으로 결정 속 원자 사이 거리를 재서 훨씬 정확히 구했다.

태오 아보가드로가 이 수를 쟀 게 아니었어요? 이름이 아보가드로수인데요.

석 교수 아보가드로는 1811년에 “같은 부피에 같은 수의 분자”라는 생각만 내놓았고, 그 수가 얼마인지는 몰랐다. 그 수를 재고 아보가드로의 이름을 붙이자고 한 사람이 페랭이다. 아이디어를 낸 사람에게 경의를 표한 이름이지.

원자 질량 단위와 물이 만나는 곳

- 석 교수** 2장에서 $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-24}\text{ g}$ 이라고 했다. 이 값에 아보가드로수를 곱해 보라.
- 하린** $1.66 \times 10^{-24} \times 6.02 \times 10^{23} = 0.999\cdots$, 거의 1 g 이에요!
- 석 교수** 그렇다. 원자 질량 단위 1 u 짜리 입자를 1 mol 모으면 1 g 이 된다. 그래서 원자 하나가 16 u 인 산소는 1 mol 이 16 g , 분자 하나가 18 u 인 물은 1 mol 이 18 g 이다. “원자량에 g 을 붙이면 1 mol 의 질량”이라는 규칙은 이 곱셈 하나에서 나온다. u 는 원자 하나의 세계, g 은 저울의 세계이고, 아보가드로수가 두 세계를 잇는 환율인 셈이다.

2019년부터 물은 수로 정의한다(교과 밖 심화)

2019년 5월 20일부터 국제단위계(SI)는 아보가드로수를 정확히 $6.022\,140\,76 \times 10^{23} / \text{mol}$ 로 고정하고, 이 개수를 1 mol 로 정의한다. 고정하기 전에 과학자들은 동위 원소 ^{28}Si 를 99.99 % 넘게 모은 규소 결정 공을 만들어 그 속 원자 수를 세는 방법으로 이 값을 매우 정밀하게 재었다. 새 정의에서 $^{12}\text{C}\ 12\text{ g}$ 속 원자 수는 $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 과 1억분의 1 이내로 같아서, 교과서와 시험의 계산은 달라지지 않는다.

3.3 아보가드로수를 직접 계산하기

- 석 교수** 이제 태오가 가져온 문제를 풀 수 있다. 탄소 원자 1개의 질량이 $1.99 \times 10^{-23}\text{ g}$ 이라면, $^{12}\text{C}\ 12\text{ g}$ 속에 원자가 몇 개 들어 있을까?
- 태오** 전체 질량을 원자 하나의 질량으로 나누면 개수가 나와요. $12\text{ g} \div 1.99 \times 10^{-23}\text{ g} = 6.03 \times 10^{23}$ 개예요.
- 석 교수** 그것이 아보가드로수다. 기호로 N_A 라고 쓴다. 문제에서 준 원자 1개의 질량이 세 자리 유효숫자였으니 답도 6.03×10^{23} 로 세 자리로 쓴다. 표준값 6.02×10^{23} 과 끝자리가 다른 것은 문제의 1.99를 반올림했기 때문이다.
- 하린** 단위는요? 개수니까 단위가 없어요?
- 석 교수** 엄밀히는 “ 1 mol 당 개수”라서 $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ 로 쓴다. $\text{g} \div \text{g}$ 으로 단위가 지워지고, 그 개수가 1 mol 에 해당한다는 뜻이다. 이 $/\text{mol}$ 이 다음 계산에서 물을 지워 주는 역할을 하니 꼭 붙여 두자.

문제 3.1

철 원자 1개의 질량이 $9.30 \times 10^{-23}\text{ g}$ 이라면 아보가드로수는 얼마인가? (Fe의 원자량 56)

- 하린** 철 1 mol 은 56 g 이니까, $56\text{ g} \div 9.30 \times 10^{-23}\text{ g}$ 을 하면 돼요. $56 \div 9.30 = 6.02$, 그리고 10^{23} 이 남으니까 $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ 이에요.
- 석 교수** 정답은 $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ 이다. 원소를 바꿔도 같은 수가 나온다는 것, 그게 원자량을 상대 질량으로 정의한 덕분이다. 거꾸로 아보가드로수를 알면 원자 하나의 질량을 구할 수 있다.
- 태오** 물 분자 하나는 $18\text{ g} \div 6.02 \times 10^{23} = 2.99 \times 10^{-23}\text{ g}$ 이에요. 탄소 원자 하나보다 1.5배 무거워요.
- 석 교수** $18 \div 12 = 1.5$, 원자량의 비 그대로다. 계산과 개념이 서로 맞물리는 것을 확인했구나.

교실에서 아보가드로수 어렵하기

- 이모** 학교에서도 아보가드로수를 재 볼 수 있어요? 비싼 장비가 있어야 할 것 같은데요.
- 석 교수** 고등학교 탐구 활동으로 하는 방법이 있어요. 물 위에 기름 성분인 스테아르산을 아주 조금 떨어뜨리면, 분자들이 한 층으로 뿔뿔하게 늘어서 얇은 막을 만듭니다. 막의 넓이를 재고 분자 하나가 차지하는 넓이로 나누면 분자 수가 나오고, 떨어뜨린 스테아르산의 몰수로 그 수를 나누면 아보가드로수가 됩니다.
- 태오** 예를 들어 주세요. 숫자를 넣어 볼게요.
- 석 교수** 스테아르산 $C_{18}H_{36}O_2$ (몰 질량 284 g/mol) 9.4×10^{-5} g이 넓이 400 cm^2 의 막을 만들었고, 분자 하나가 2.0×10^{-15} cm^2 를 차지한다고 하자. 이 값들은 탐구 활동의 예시 수치다.
- 태오** 분자 수는 $400 \div (2.0 \times 10^{-15}) = 2.0 \times 10^{17}$ 개예요. 몰수는 $9.4 \times 10^{-5} \div 284 = 3.31 \times 10^{-7}$ mol이고요. 나누면 $2.0 \times 10^{17} \div 3.31 \times 10^{-7} = 6.0 \times 10^{23}$ /mol이에요!
- 석 교수** 실제 교실 실험은 막의 넓이를 재는 오차가 커서 2배쯤 어긋나기도 하지만, 10^{23} 이라는 자릿수는 잘 나온다. 개수 $\div$ 몰수 = 아보가드로수라는 뼈대는 탄소 원자 질량으로 구할 때와 똑같다.

3.4 질량 $\rightleftharpoons$ 몰 $\rightleftharpoons$ 개수

- 석 교수** 이제 계산의 뼈대를 세우자. 질량에서 개수로 가려면 몰을 거쳐 간다. 1장에서 본 몰 다리의 첫 두 칸이다. **그림 15**를 보아라.

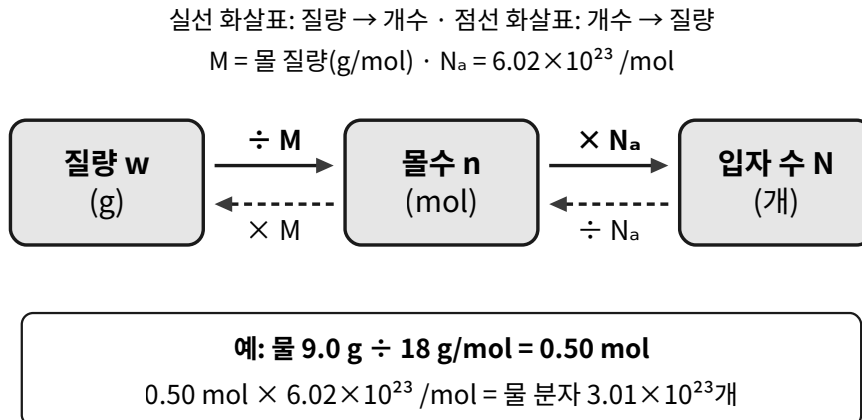


그림 15. 몰 다리 1단계 — 질량(g)을 몰 질량(g/mol)으로 나누면 몰수가 되고, 몰수에 아보가드로수를 곱하면 입자 수가 된다. 거꾸로 가려면 곱셈과 나눗셈을 바꾼다.

$$n(\text{몰수}) = w(\text{질량, g}) \div M(\text{몰 질량, g/mol}) \quad N(\text{입자 수}) = n \times N_A$$

- 이모** M이 몰 질량이라는 건 원자량에 g/mol을 붙인 거죠? 물은 18 g/mol이고요.
- 석 교수** 네. 분자는 원자량을 더한 값에 g/mol을 붙입니다. 물은 $1 \times 2 + 16 = 18$ g/mol이지요. 자세한 것은 4장에서 하고, 오늘은 물 한 가지로 연습해 봅시다. **그림 16**는 여러 물질 1몰의 질량을 비교한 거예요.

모두 6.02×10^{23} 개씩 — 개수는 같고 질량은 다르다

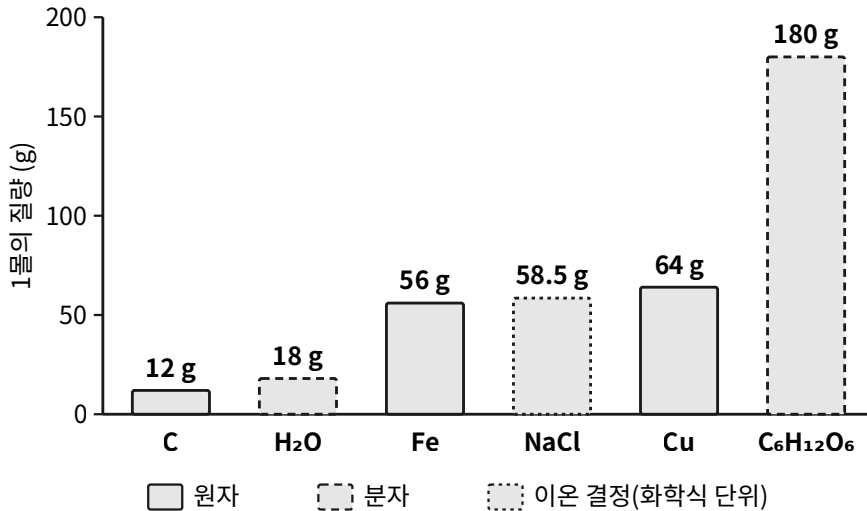


그림 16. 여러 물질 1몰의 질량 — 모두 같은 개수(6.02×10^{23} 개)의 원자·분자·화학식 단위를 담았지만 질량은 12 g에서 180 g까지 다르다. 1몰의 질량은 원자량·분자량에 g를 붙인 값이다.

하린 개수는 다 같은데 포도당은 180 g이고 탄소는 12 g이네요. 같은 1다스라도 연필 1다스와 수박 1다스의 무게가 다른 것처럼요.

석 교수 딱 맞는 비유다. NaCl은 분자가 아니라 Na^+ 와 Cl^- 가 1 : 1로 쌓인 이온 결정이라서, NaCl 1몰은 “화학식 단위 NaCl” 6.02×10^{23} 개를 뜻한다. 그 속에 Na^+ 1몰과 Cl^- 1몰, 이온은 모두 2몰이 들어 있지.

문제 3.2

물 9.0 g 속에 들어 있는 물 분자의 수와 수소 원자의 수를 구하라. (H 1, O 16, $N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$)

태오 물 1몰 질량 18 g/mol이니까 $9.0 \text{ g} \div 18 \text{ g/mol} = 0.50 \text{ mol}$. 분자 수는 $0.50 \times 6.02 \times 10^{23} = 3.01 \times 10^{23}$ 개예요.

하린 수소 원자는 물 분자 하나에 2개니까 $3.01 \times 10^{23} \times 2 = 6.02 \times 10^{23}$ 개요. 딱 1몰이네요!

석 교수 정답은 물 분자 3.01×10^{23} 개, 수소 원자 6.02×10^{23} 개다. 분자의 몰수에 화학식의 아래 숫자를 곱하면 원자의 몰수가 된다. 수소 원자 1.0 mol, 산소 원자 0.50 mol이지. 이 습관이 5장의 실험식과 6장의 원소 분석에서 그대로 쓰인다.

태오 그런데 저는 처음에 $9.0 \div 16$ 을 했어요. 산소 원자량으로 나눠 버렸어요.

석 교수 흔한 실수다. 나눌 때는 반드시 “무엇의 몰 질량인가”를 말로 해 보라. 물의 몰수를 구하려면 물의 몰 질량 18로, 산소 원자의 몰수를 구하려면 16으로 나눈다. 단위를 g/mol이 아니라 “g/mol H₂O”처럼 물질 이름까지 붙여 쓰면 실수가 줄어든다.

같은 질량, 다른 개수

이모 수소 기체 1 g과 산소 기체 1 g 중에 분자가 더 많은 쪽은 어디예요? 무게가 같으니 같은 것 같기도 하고요.

- 석 교수** 물로 바꿔 보면 바로 보여요. 수소 H_2 는 2 g/mol이니 1 g이 0.50 mol, 산소 O_2 는 32 g/mol이니 1 g이 0.031 mol입니다. 분자 수로는 수소가 16배 많아요.
- 하린** 가벼운 분자일수록 같은 질량에 개수가 많네요. 1 g씩 사면 수소는 3.01×10^{23} 개, 산소는 1.88×10^{22} 개예요.
- 석 교수** 그래서 반응을 비교할 때는 질량이 아니라 몰로 비교해야 한다. 9장에서 “질량이 큰 쪽이 많은 것이 아니다”라는 말을 다시 하게 될 거다. $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 에서 수소 1 g과 산소 1 g을 섞으면, 수소 0.50 mol이 다 반응하려면 산소가 0.25 mol, 곧 8 g이나 필요하다. 산소 1 g으로는 턱없이 모자라지.
- 태오** 무게만 보면 1 : 1인데, 몰로 보면 16 : 1이라 완전히 다른 그림이네요.

표 7에 물 1몰이 가진 여러 얼굴을 정리했다. 같은 물 한 숟가락을 질량으로도, 분자 수로도, 원자 수도, 부피로도 말할 수 있다.

표 7. 물 1몰(18 g)의 여러 얼굴 — 같은 양을 질량·분자 수·원자 수·부피로 말한 것이다

나타내는 방법	값	계산
질량	18 g	$1 \times 2 + 16 = 18 \text{ g/mol} \times 1 \text{ mol}$
물 분자 수	6.02×10^{23} 개	$1 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$
수소 원자 수	1.20×10^{24} 개 (2 mol)	분자 수 $\times 2$
산소 원자 수	6.02×10^{23} 개 (1 mol)	분자 수 $\times 1$
전체 원자 수	1.81×10^{24} 개 (3 mol)	분자 수 $\times 3$
부피(액체, 4 °C 부근)	약 18 mL	$18 \text{ g} \div 1.00 \text{ g/mL}$

3.5 6.02×10^{23} 은 얼마나 큰가

- 이모** 숫자로는 알겠는데 여전히 감이 안 와요. 얼마나 큰 수예요?
- 석 교수** 물 한 숟가락의 분자를 1초에 하나씩 센다고 해 보지요. 1년은 약 3.16×10^7 초니까, $6.02 \times 10^{23} \div 3.16 \times 10^7 = 1.9 \times 10^{16}$ 년이 걸려요. 우주의 나이가 약 1.38×10^{10} 년이니, 우주 나이의 약 140만 배 동안 세야 합니다.
- 하린** 지구 사람 80억 명이 다 같이 세면요?
- 태오** $1.9 \times 10^{16} \div 8.0 \times 10^9 = 2.4 \times 10^6$, 그래도 240만 년이에요.
- 석 교수** 쌀로 바꿔 보자. 쌀 한 알이 0.02 g쯤이니, 쌀 1몰은 $6.02 \times 10^{23} \times 0.02 \text{ g} = 1.2 \times 10^{22} \text{ g}$, 곧 $1.2 \times 10^{16} \text{ t}$ 이다. 지구 전체 질량의 약 50만분의 1이 쌀 1몰이야.
- 이모** 그런 수가 물 한 숟가락에 들어 있다니, 분자가 얼마나 작은지 이제야 느껴지네요. 바다에 물 한 컵을 붓고 잘 섞은 다음 다시 한 컵을 뜨면, 처음 컵의 분자가 몇 개쯤 들어 있다는 얘기도 들었어요.
- 석 교수** 그 계산도 같은 원리예요. 바닷물이 아무리 많아도 한 컵 속 분자 수가 워낙 커서, 골고루 섞이기만 하면 처음 분자 가운데 천 개 남짓이 다시 컵에 들어옵니다. 숫자 하나가 상식을 뒤집는 예지요.
- 석 교수** 하린이 지난주에 물은 연필심 0.1 g은 어떠냐?
- 하린** 탄소 $0.1 \text{ g} \div 12 \text{ g/mol} = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mol}$, 곱하기 $6.02 \times 10^{23} = 5.0 \times 10^{21}$ 개예요. 오 심해 개요.

석 교수 정답이다. 연필로 점 하나를 찍을 때마다 수십억의 수십억 개 원자가 종이에 묻는다. 그래서 화학자는 원자를 개수로 세지 않고 몰로 센다. 질량은 저울로 재고, 그것을 몰로 바꾸면 개수를 말한 것과 같다.

몰수와 개수, 분자와 원자를 섞지 않는다

“물 1 mol에 원자가 몇 개?”는 $3 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.81 \times 10^{24}$ 개이다. 분자의 몰수, 원자의 몰수, 이온의 몰수를 구별해 쓰고, 답에는 “분자 3.01×10^{23} 개”처럼 무엇이 개수인지 적는다. 아보가드로수를 곱하는 것을 잊고 “0.50개”라고 쓰거나, 몰수를 묻는데 개수로 답하는 실수가 흔하다.

핵심 질량과 개수를 오가는 네 단계

1. 1몰 = ^{12}C 12 g 속 원자 수 = 6.02×10^{23} 개(아보가드로수 $N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$).
2. 원자량·분자량에 g을 붙이면 그 물질 1몰의 질량(몰 질량, g/mol)이다.
3. 질량 → 몰: $n = w \div M$. 몰 → 개수: $N = n \times N_A$. 거꾸로는 곱셈과 나눗셈을 바꾼다.
4. 분자의 몰수 × 화학식의 아래 숫자 = 원자의 몰수. 답에는 무엇이 몰수·개수인지 적는다.

스스로 풀어 보기

1. 이산화 탄소 22 g 속 CO_2 분자 수와 산소 원자 수는? (C 12, O 16)
2. 원자 3.01×10^{23} 개로 된 마그네슘의 질량은? (Mg 24)
3. 산소 원자 1개의 질량은 몇 g인가? (O 16, $N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$)
4. NaCl 11.7 g 속에 있는 Na^+ 와 Cl^- 이온의 총 몰수는? (Na 23, Cl 35.5)

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 4**(연세대 2021) (230쪽) 문제 1은 이 장의 3절을 그대로 묻는다. 탄소 원자 1개의 질량 1.99×10^{-23} g에서 아보가드로수 $12 \div (1.99 \times 10^{-23}) = 6.03 \times 10^{23}$ 을 구하고, 2장의 방법으로 동위 원소 존재비를 이어서 구한다. **기출문제 1**(연세대 2023) (201쪽)의 문제 1-2는 드라이아이스 22 g을 몰수 0.50 mol로 바꾸는 데서 출발해 기체 부피로 건너간다. 두 문제 모두 첫 줄은 “질량 ÷ 몰 질량 = 몰수”이고, 이 한 줄을 단위와 함께 정확히 쓰는 것이 채점의 첫 관문이다. 특히 **기출문제 4**(연세대 2021) (230쪽)처럼 원자 1개의 질량이 주어지면 “1몰의 질량 ÷ 원자 1개의 질량 = 1몰 속 원자 수”라는 문장을 먼저 쓰고 숫자를 넣어야 한다. 숫자만 나열하면 무엇을 무엇으로 나누었는지 채점자가 알 수 없고, 유효숫자를 문제의 자릿수(세 자리)에 맞추지 않으면 6.030150...처럼 불필요한 자리가 붙는다. 다음 장에서는 몰 다리를 기체 부피 쪽으로 넓힌다.

이 장의 참고문헌

- Andreas, B., Azuma, Y., Bartl, G., Becker, P., Bettin, H., Borys, M., Busch, I., Fuchs, P., Fujii, K., Fujimoto, H., Kessler, E., Krumrey, M., Kuetgens, U., Kuramoto, N., Mana, G., Massa, E., Mizushima, S., Nicolaus, A., Picard, A., . . . Zakel, S. (2011). Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition. *Metrologia*, 48(2), S1–S13. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/2/S01>
- Hoyt, W. (1992). A mole of salt crystals—Or how big is the Avogadro number? *Journal of Chemical Education*, 69(6), 496. <https://doi.org/10.1021/ed069p496>
- Newell, D. B., Cabiati, F., Fischer, J., Fujii, K., Karshenboim, S. G., Margolis, H. S., de Mirandés, E., Mohr, P. J., Nez, F., Pachucki, K., Quinn, T. J., Taylor, B. N., Wang, M., Wood, B. M., & Zhang, Z.

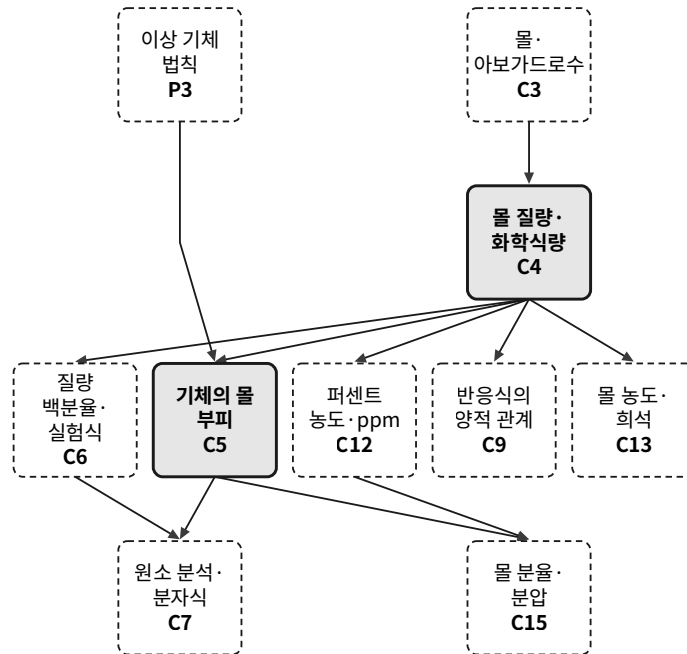
(2018). The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI. *Metrologia*, 55(1), L13–L16. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>

제 4장 물 질량과 기체의 몰 부피

새 개념 화학식량 · 몰 질량 · 기체 1몰 22.4 L

이어짐 몰 3장 · 원소 분석 6장 · 몰 분율·분압 11장 · 기체 24권

이 장의 개념도



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

그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C4 몰 질량·화학식량, C5 기체의 몰 부피)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 8. 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 1 (연세대 2023년) (201쪽)	드라이아이스 풍선과 암모니아수의 몰 장부	C5 기체의 몰 부피

드라이아이스와 부푸는 풍선

고체 22 g이 기체가 되면

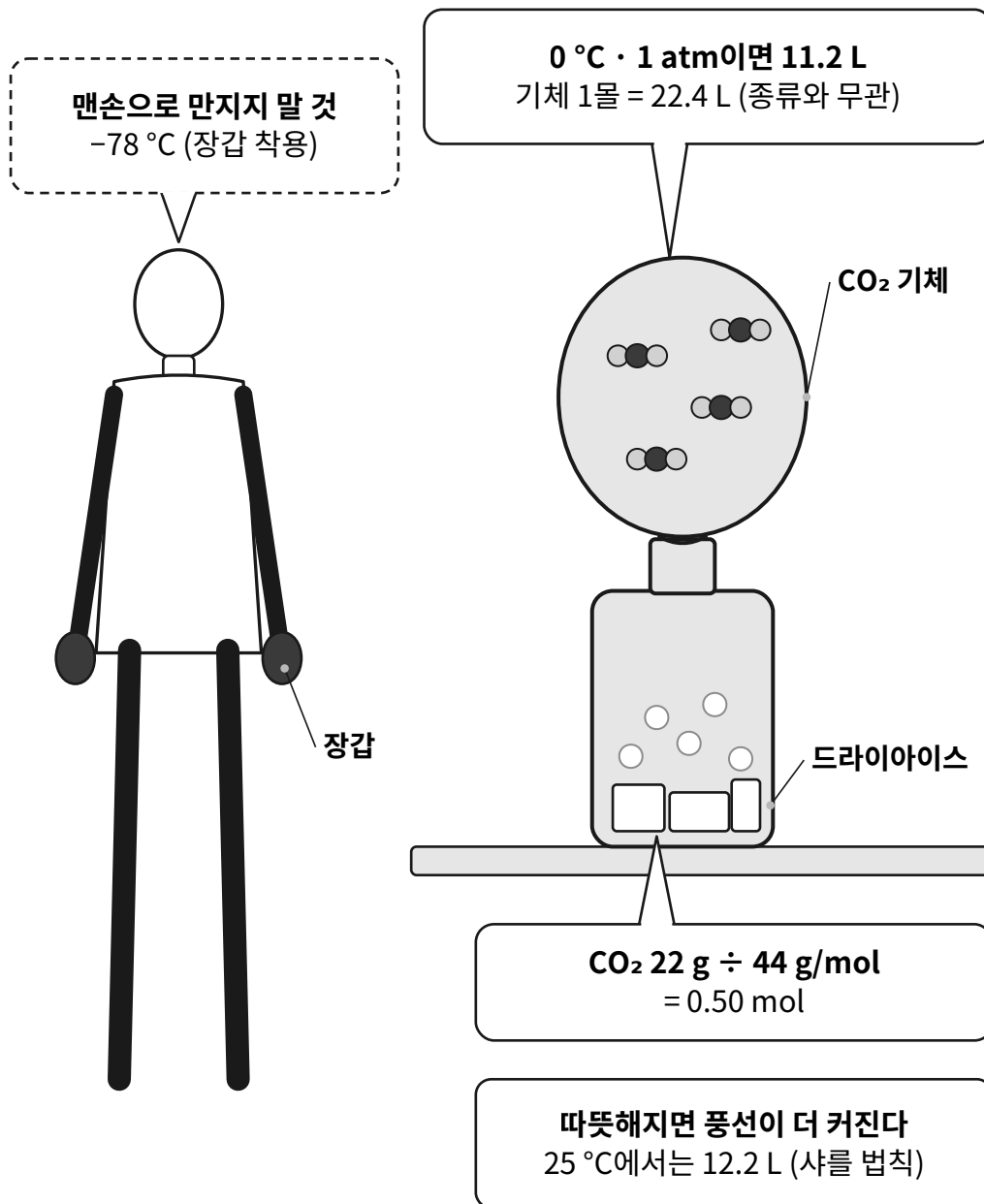


그림 18. 드라이아이스 조각을 넣은 병과 입구에 씌운 풍선 — CO₂ 22 g(0.50 mol)이 모두 기체가 되면 0 °C·1 atm에서 11.2 L, 실온 25 °C에서는 12.2 L가 된다. 드라이아이스는 -78 °C이므로 장갑을 끼고 다룬다(모식도, 사람은 얼굴 없는 윤곽)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 고체 22 g이 기체가 되면 10 L가 넘는 부피가 된다.
2. 같은 온도·압력에서 기체의 부피는 몰수에만 비례한다.
3. 질량 → 몰 → 부피의 두 단계로 계산한다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 3장 (36쪽)의 물(6.02×10^{23} 개 묶음)과 $n = w \div M$, 그리고 **기본개념편 제 1장** (16쪽)의 아보가드로 가설(같은 온도·압력, 같은 부피에 같은 수의 분자)을 쓴다. 기체의 압력·부피·온도 사이의 법칙(보일·샤를 법칙, $PV = nRT$)은 24권에서 자세히 다루고, 이 장에서는 한 문단으로 요약해 “기체 1몰은 몇 L인가”를 계산하는 데만 쓴다. 절대 온도 $T(K) = t(^{\circ}C) + 273$ 이다.

넷째 토요일, 이모는 아이스크림 가게에서 받아 온 드라이아이스를 아이스박스에 담아 왔다. 하린이 맨손으로 만지려 하자 석 교수가 장갑부터 끼라고 했다. 태오는 빈 페트병과 풍선을 준비했고, 저울 위에 드라이아이스 조각 하나를 올려 22 g이 되도록 잴었다.

하린 교수님, 드라이아이스는 녹지 않고 바로 연기가 돼요. 물이 안 생겨요.

석 교수 드라이아이스는 고체 이산화 탄소다. 1기압에서는 액체를 거치지 않고 $-78^{\circ}C$ 에서 바로 기체가 되지. 이걸 승화라고 한다. 오늘은 이 22 g이 기체가 되면 풍선이 얼마나 부풀지 계산하고, 실제로 확인해 볼 거다.

태오 3장대로 하면 CO_2 22 g을 몰 질량으로 나눠야 하는데, CO_2 의 몰 질량부터 구해야겠네요.

석 교수 그래서 오늘은 두 가지를 배운다. 분자 1몰의 질량을 화학식에서 구하는 법, 그리고 기체 1몰이 차지하는 부피다. 둘을 알면 질량과 부피를 자유롭게 오갈 수 있다.

4.1 화학식량과 몰 질량

석 교수 분자 하나의 상대 질량을 **분자량**이라고 한다. 화학식에 들어 있는 원자의 원자량을 모두 더하면 된다. 이산화 탄소 CO_2 는?

태오 C 12 하나, O 16 두 개니까 $12 + 16 \times 2 = 44$ 예요.

석 교수 그렇다. 물은 $1 \times 2 + 16 = 18$, 옥테인 C_8H_{18} 은 $12 \times 8 + 1 \times 18 = 114$ 다. 소금 NaCl 처럼 분자 없이 이온이 쌓인 물질은 화학식 단위의 원자량 합을 쓰는데, 이것 포함해 넓게 **화학식량**이라고 부른다. NaCl은 $23 + 35.5 = 58.5$ 다.

이모 황산 구리 결정에 붙은 “ $\cdot 5H_2O$ ”는 어떻게 계산해요? 실험실 병에 그렇게 쓰여 있던데요.

석 교수 결정 속에 물 분자가 5개씩 들어 있다는 뜻이에요. 이런 물질을 수화물이라고 하고, 몰의 질량까지 더합니다. $CuSO_4$ 는 $64 + 32 + 16 \times 4 = 160$ 이고, 물 5개가 $18 \times 5 = 90$ 이니 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 는 250이에요. 5장에서 이 물을 가열해 날려 보내는 실험을 합니다.

석 교수 화학식량에 g/mol을 붙이면 **몰 질량**이 된다. 3장에서 본 대로, 원자 질량 단위 1 u짜리 입자 1몰이 1 g이기 때문이다. CO_2 의 화학식량 44는 단위가 없고, 몰 질량은 44 g/mol 이다. 숫자는 같고 뜻이 다르다.

하린 그럼 드라이아이스 22 g은 $22 \div 44 = 0.50$ mol이에요.

석 교수 맞다. 이 책에서 자주 쓰는 화학식량을 표 9에 모아 두었다. 시험에서는 원자량만 주는 경우가 많으니 직접 더할 줄 알아야 하지만, 자주 나오는 값은 외워 두면 검산이 빨라진다.

표 9. 자주 쓰는 화학식량 — 원자량 H 1, C 12, N 14, O 16, Na 23, S 32, Cl 35.5, Ca 40, Cu 64로 계산했다

물질	화학식	계산	화학식량
물	H_2O	$1 \times 2 + 16$	18
일산화 탄소	CO	$12 + 16$	28

물질	화학식	계산	화학식량
이산화 탄소	CO ₂	12 + 16 × 2	44
산소	O ₂	16 × 2	32
질소	N ₂	14 × 2	28
암모니아	NH ₃	14 + 1 × 3	17
이산화 질소	NO ₂	14 + 16 × 2	46
질산	HNO ₃	1 + 14 + 16 × 3	63
염화 수소	HCl	1 + 35.5	36.5
황산	H ₂ SO ₄	1 × 2 + 32 + 16 × 4	98
염화 나트륨	NaCl	23 + 35.5	58.5
탄산수소 나트륨	NaHCO ₃	23 + 1 + 12 + 16 × 3	84
탄산 칼슘	CaCO ₃	40 + 12 + 16 × 3	100
메테인	CH ₄	12 + 1 × 4	16
포도당	C ₆ H ₁₂ O ₆	12 × 6 + 1 × 12 + 16 × 6	180

이모 수화물 25 g이 있으면 그 속의 물은 몇 g이에요?

석 교수 물로 바뀌서 보면 쉬워요. CuSO₄·5H₂O 25 g ÷ 250 g/mol = 0.10 mol이고, 화학식 하나에 물이 5개씩이니 물은 0.50 mol, 18 × 0.50 = 9.0 g입니다. 남은 CuSO₄는 0.10 mol × 160 = 16 g이고요. 16 + 9.0 = 25 g으로 맞지요.

하린 3장에서 물 분자 몰수에 아래 숫자 2를 곱해 수소 원자 몰수를 구한 것과 같은 방법이에요. 이번엔 화학식 앞의 5를 곱했어요.

석 교수 그렇다. 화학식에 붙은 숫자는 모두 “하나에 몇 개”를 뜻하니, 몰수에 곱하면 그 부분의 몰수가 된다. 이 계산이 5장에서 가열로 물을 날려 보내는 실험의 바탕이다.

태오 표를 보니까 CO와 N₂가 둘 다 28이에요. 분자량만으로는 구별이 안 되겠어요.

석 교수 잘 봤다. 나중에 문제 4.2에서 바로 그 점이 중요해진다. 분자량은 분자의 “무게 지문”이지만, 지문이 같은 서로 다른 분자가 있다는 것을 잊지 마라.

4.2 아보가드로 법칙 — 같은 부피, 같은 개수

석 교수 이제 기체의 부피로 가자. 1장의 아보가드로 가설을 지금은 **아보가드로 법칙**이라고 부른다. 같은 온도와 압력에서, 기체의 종류와 관계없이 같은 부피에는 같은 수의 분자가 들어 있다.

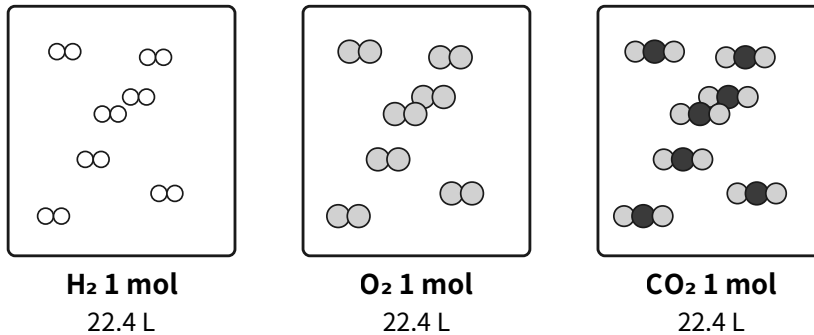
하린 수소 분자는 작고 이산화 탄소 분자는 큰데, 같은 부피에 같은 개수가 들어가요?

석 교수 좋은 의문이다. 기체에서 분자 자체의 크기는 전체 부피의 0.1 %도 안 된다. 분자들 사이가 텅 비어 있고, 분자들은 그 빈 공간을 빠르게 날아다니며 벽에 부딪친다. 그래서 부피를 정하는 것은 분자의 크기가 아니라 분자의 개수, 온도, 압력이다. 극장의 크기를 관객의 몸집이 아니라 관객 수와 그들이 뛰어다니는 기세가 정하는 것과 비슷하다.

이모 그럼 같은 크기의 풍선에 수소를 채우든 이산화 탄소를 채우든 분자 수는 같고, 무게만 다르겠네요.

석 교수 네, 그 생각을 그림으로 그린 것이 **그림 19**예요. 0 °C, 1 atm에서 세 기체 1몰은 모두 22.4 L 상자를 채웁니다. 상자 크기는 같고 질량만 2 g, 32 g, 44 g으로 다르지요.

0 °C · 1 atm에서 기체 1몰 = 6.02×10^{23} 개 = 22.4 L



같은 부피, 다른 질량

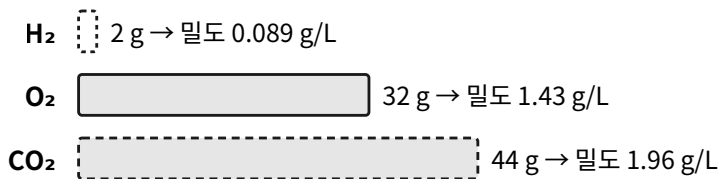


그림 19. 0 °C · 1 atm에서 기체 1몰의 부피 — H₂ · O₂ · CO₂ 1몰은 모두 6.02×10^{23} 개의 분자를 담고 같은 22.4 L 상자를 채우지만, 질량은 2 g, 32 g, 44 g으로 다르다. 그래서 기체의 밀도(g/L)는 분자량에 비례한다.

4.3 기체 1몰은 22.4 L

태오 22.4 L는 어디서 나온 숫자예요?

석 교수 이상 기체 상태 방정식에서 나온다. 24권에서 자세히 하지만 요점만 쓰면, 기체의 압력 P, 부피 V, 몰수 n, 절대 온도 T 사이에 다음 관계가 있다.

$$PV = nRT \quad (R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$$

석 교수 $n = 1 \text{ mol}$, $P = 1 \text{ atm}$, $T = 273 \text{ K}$ 를 넣어 보라.

태오 $V = 1 \times 0.082 \times 273 \div 1 = 22.4 \text{ L}$ 예요. 25 °C면 $T = 298 \text{ K}$ 니까 $0.082 \times 298 = 24.4 \text{ L}$ 고요.

석 교수 그렇다. 0 °C, 1 atm에서 기체 1몰은 22.4 L, 25 °C, 1 atm에서는 24.4 L다. 압력이 2 atm이면 같은 0 °C에서도 11.2 L로 반이 되지. 압력이 같다는 조건이 빠지면 22.4라는 숫자도 의미가 없다. 앞의 것을 표준 상태라고 부르는 교과서가 많다. 문제에 온도가 쓰여 있지 않으면 어느 조건인지 꼭 확인하고, 25 °C인데 22.4를 쓰는 실수를 하지 마라.

하린 온도가 높을수록 1몰의 부피가 커지는 거네요.

석 교수 그렇다. 압력이 같으면 부피는 절대 온도에 비례한다. 이것이 샤를 법칙이다. 0.50 mol의 CO₂를 1 atm에서 데우면 부피가 어떻게 되는지 **그림 20**에 계산해 그렸다.

화학양론·농도 문제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

질량을 몰로, 계수비로 건너서, 다시 질량·부피·농도로

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 11문항(2012~2023학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 10문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 화학양론인가
2. 원자의 무게: 원자량과 동위 원소
3. 몰: 원자를 세는 묶음
4. 몰 질량과 기체의 몰 부피
5. 질량 백분율과 실험식
6. 원소 분석과 분자식
7. 화학 반응식 완성하기

8. 반응식으로 양을 계산하다
9. 먼저 떨어지는 반응물: 한계 반응물
10. 불완전 연소·수득률·여러 단계 반응
11. 퍼센트 농도·ppm과 기체의 몰 분율
12. 몰 농도·몰랄 농도와 농도 환산
13. 열화학 반응식과 양적 관계: 연료의 값
14. 연료·대기·공장의 화학양론, 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: 원자 구조(23권) · 기체(24권) · 용액·총괄성(22권) · 산화·환원(13권) · 열화학(17권)



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



ISBN 979-11-23065-16-8

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 17 — 화학양론·농도 — 전체 320쪽

ssbook.kr/book/nonsul-17

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

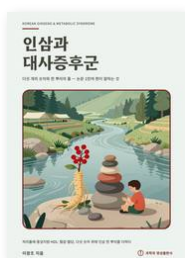


인삼과 당뇨

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

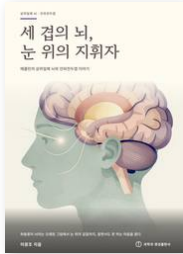
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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 · 혜명경 · 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 — 세포 호흡·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