



대입 과학논술 22 — 열화학 · 엔탈피 · 자유 에너지

열화학 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-22

POD 정가 25,000원 → **15,000원** (60%)

ssbook.kr 홈페이지 안내

- **시리즈별 서가** — 인삼 · 오토파지 · 식물성 저탄고지 · 단식 · 생물리학 · 독립영양인간 · 중고등학교 교재 · 채식 · 라이프스타일 · 고대사
- **책마다 고유 주소** — 링크를 보내면 누구나 표지 · 소개 · 무료 샘플을 볼 수 있습니다
- **구매** — 회원가입(이메일 인증) 후 카드 결제(쿠키페이) → 내 서재에서 전체 컬러 PDF 내려받기
- **가격** — 종이책 POD 가격의 60%, 전 페이지 컬러 PDF
- **이용 범위** — 개인 영구 소장 가능, 공개 배포 · 재판매 · 공유 금지(내려받은 파일에는 구매자 정보가 표시됩니다)
- **책 신청 게시판** — 회원은 자유게시판에서 원하는 책 내용을 신청할 수 있습니다

열화학· 엔탈피· 자유 에너지



열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 16문항 · 2010~2024학년도 · 이광조 지음

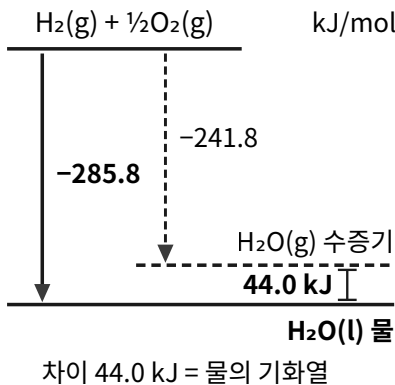
열화학·엔탈피·자유 에너지

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

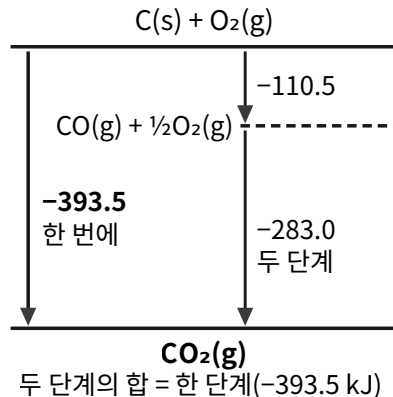
열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 열화학 반응식 × 헤스 법칙(경로 무관) × $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ | 16문항 · 5개 대학 (2010~2024)

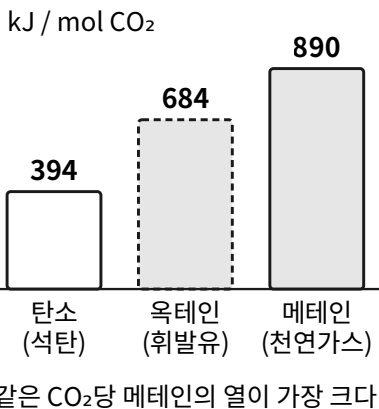
① 엔탈피 도표: 물 vs 수증기



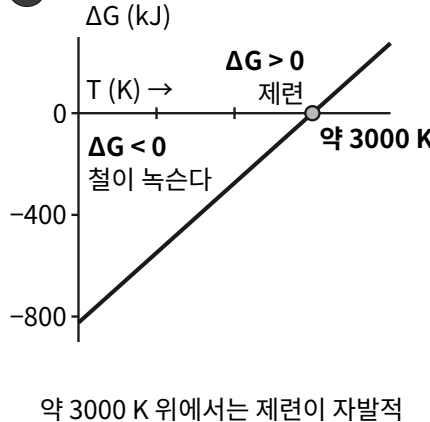
② 헤스 법칙: 경로와 무관



③ 연료: CO₂ 1 mol당 얻는 열



④ $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$: 녹과 제련



한 줄 요약

열은 출발과 도착만 본다(ΔH ·헤스) — 자발성은 ΔH 와 $T\Delta S$ 의 줄다리기(ΔG)

그림 1. 열화학·엔탈피·자유 에너지 단원의 그림 요약. ① 엔탈피 도표: 수소 1 mol이 물이 될 때(-285.8 kJ)와 수증기가 될 때(-241.8 kJ)의 차이가 44.0 kJ는 기화열이다. ② 헤스 법칙: C → CO → CO₂ 두 단계의 합(-110.5 + -283.0)이 한 단계(-393.5 kJ)와 같다. ③ 연료 비교: 같은 CO₂ 1 mol을 낼 때 얻는 열은 메테인 890 kJ, 옥테인 684 kJ, 탄소 394 kJ이다. ④ 철의 산화 $2\text{Fe} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 직선 ($\Delta H = -824.2 \text{ kJ}$, $\Delta S = -274.9 \text{ J/K}$): 약 3000 K(약 2700 °C) 위에서는 역반응(제련)이 자발적이다. 수치는 모두 표준 생성 엔탈피·표준 엔트로피로 계산했다.

한 줄 요약: 열은 출발점과 도착점만 본다(ΔH , 헤스) — 결합을 끊고 붙인 장부로 어렵하고, 자발성은 ΔH 와 $T\Delta S$ 의 줄다리기(ΔG)로 판정한다.

차례

기본개념편	12
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	13
기본개념편을 열며	15
제 1장 왜 열화학인가.....	17
1.1 손난로와 냉찜질 팩	19
1.2 계와 주위를 나누는 선	20
1.3 에너지는 사라지지 않는다	22
1.4 생명과 문명은 열의 장부다	24
제 2장 엔탈피: 일정한 압력에서 오가는 열	27
2.1 뚜껑 없는 냄비 — 대부분의 반응은 일정한 압력에서	29
2.2 엔탈피 $H = U + PV$	31
2.3 ΔH 와 ΔU 는 얼마나 다른가	32
2.4 엔탈피 도표 읽기	33
제 3장 열화학 반응식을 쓰는 규칙.....	37
3.1 반응식에 열을 붙여 쓰기.....	39
3.2 규칙 네 가지	40
3.3 문장을 반응식으로	42
3.4 질량과 열을 잇기	43
제 4장 열량계로 반응열을 잰다	46
4.1 비열과 열용량	48
4.2 커피컵 열량계 — 일정한 압력에서 ΔH 를 잰다	49
4.3 통열량계 — 부피가 일정할 때 ΔU 를 잰다	52
4.4 오차와 가정	54
제 5장 물과 수증기: 상태가 바뀌면 열이 오간다	56
5.1 같은 H_2O , 다른 엔탈피	58
5.2 가열 곡선 — 온도가 멈추는 구간.....	60
5.3 결합 에너지로 구한 값과 비교하기	62
5.4 땀과 찜통	63
제 6장 헤스 법칙: 길이 달라도 높이는 같다	65
6.1 길이와 무관한 양, 길에 따라 다른 양.....	67
6.2 $C \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ — 썰 수 없는 반응을 계산한다	68
6.3 반응식 조합의 네 단계	69
6.4 헤스 법칙은 기출에서 이런 모양으로 나온다	71
제 7장 반응열의 종류와 표준 생성 엔탈피	74
7.1 반응열에 이름표 붙이기.....	76
7.2 표준 상태와 기준점 0	77
7.3 공식 $\Delta H^\circ = \text{생성물 합} - \text{반응물 합}$	78
7.4 용광로 속 반응의 열	81
제 8장 결합 에너지로 ΔH 를 어렵한다	83
8.1 결합을 끊으려면 에너지가 든다.....	85
8.2 장부 쓰기: 끊는 합 - 만드는 합	87
8.3 메테인 연소로 시연하기.....	88
8.4 평균값의 한계	90

8.5 결합 에너지로 무엇을 읽는가	91
제 9장 활성화 에너지와 촉매: ΔH는 그대로다	93
9.1 열을 내는 반응도 저절로 빨리 일어나지는 않는다	95
9.2 촉매는 언덕만 낮춘다	97
9.3 반응 속도식 맛보기	98
9.4 폭발물: 언덕은 높고, 내리막은 깊고, 기체는 많다	99
제 10장 연료를 재는 세 개의 저울	103
10.1 같은 연료, 다른 순위	105
10.2 기출 1: 온실 효과에 비해 열이 큰 연료	108
10.3 기출 2: 1 g당 열	109
10.4 수소가 g당 1등인 이유와 숨은 비용	110
10.5 몸의 연료도 같은 저울로	111
제 11장 엔트로피: 흩어지는 쪽으로	113
11.1 발열만으로는 방향을 못 정한다	115
11.2 경우의 수로 본 엔트로피	116
11.3 부호 예측 규칙	117
11.4 숫자로 재는 엔트로피	119
제 12장 깃스 자유 에너지와 자발성	123
12.1 줄다리기의 심판: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$	125
12.2 네 가지 경우	126
12.3 전환 온도 $T = \Delta H \div \Delta S$	127
12.4 녹과 제련: 용광로는 왜 2700 °C가 아닌가	130
제 13장 자유 에너지, 평형, 그리고 용해	133
13.1 $\Delta G = 0$ 이면 평형	135
13.2 암모니아 합성과 온도	136
13.3 용해의 열역학: 결정 깨기와 수화	138
13.4 결빙 제거제: 한양대 2010의 표	139
제 14장 에너지 기술 속의 열화학, 그리고 2부로	143
14.1 연료 전지: 열을 거치지 않는 발전	145
14.2 기출: 연세대 2021의 두 발전소	147
14.3 광합성과 생체 분자의 에너지	148
14.4 녹색 화학: 열화학이 답을 고르는 기준	150
14.5 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	150
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	153
부록 B. 용어 풀이	156
기출문제와 기본개념	164
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	165
0. 이 장의 사용법	166
1. 출제 개념	167
1.1 계와 주위, 엔탈피, 열화학 반응식 — C1 · C2 · C3	167
1.2 열량 측정과 상태 변화의 엔탈피 — C4 · C9	168
1.3 ΔH 를 구하는 세 도구 — C5 · C6 · C7 · C8	168
1.4 활성화 에너지·촉매·폭발물 — C10 · A3	171
1.5 연료의 세 저울 — A1	171
1.6 엔트로피·자유 에너지·전환 온도 — C11 · C12 · C13 · A4	172

1.7 평형과 용해의 열역학 — C14 · C15	173
1.8 에너지 기술: 연료 전지·광합성·녹색 화학 — A2 · A5 · A6.....	174
1.9 그래프 개념도 읽는 법	174
2. 출제 경향	177
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	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	184
3.1 계산형 답안의 틀	184
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀.....	185
3.3 표기와 수치 규칙	185
3.4 시간 배분과 자기 점검	186
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	186
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	188
실전기출문제와 풀이과정	193
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	194
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념	195
5.1 한눈에 보는 기출 16문항	195
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	196
5.3 기본 개념 한눈에	196
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	198
6. 출제 문항 분석과 모범답안	199
〈기출문제 1 (경희대 2024년)〉	200
〈기출문제 2 (연세대 2023년)〉	209
〈기출문제 3 (경희대 2023년)〉	220
〈기출문제 4 (연세대 2021년)〉	231
〈기출문제 5 (연세대 2021년)〉	239
〈기출문제 6 (연세대 2021년)〉	247
〈기출문제 7 (연세대 2020년)〉	255
〈기출문제 8 (연세대 2020년)〉	263
〈기출문제 9 (경희대 2020년)〉	271
〈기출문제 10 (연세대 2020년)〉	280
〈기출문제 11 (연세대 2019년)〉	287
〈기출문제 12 (성균관대 2016년)〉	295
〈기출문제 13 (고려대 2013년)〉	305
〈기출문제 14 (연세대 2012년)〉	319
〈기출문제 15 (성균관대 2010년)〉	329
〈기출문제 16 (한양대 2010년)〉	339
7. 변형·예상 문항	349
8. 강의 연결.....	355
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	356
8.2 강의 구성 시 유의점	356

9. 전체 문제 총평	358
9.1 숫자로 먼저 보기	358
9.2 다섯 가지 총평.....	358
9.3 대학별 한 줄 총평	359
9.4 이렇게 공부하자	359
10. 참고문헌.....	361

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 열화학 논제의 네 장면	1
그림 2. 제 1장 개념도	17
그림 3. 생활 속 개념도 1	18
그림 4. 계·주위와 열의 부호	21
그림 5. 발열과 흡열의 에너지 높이	23
그림 6. 제 2장 개념도	27
그림 7. 생활 속 개념도 2	28
그림 8. 일정 압력 실린더와 부피 일	30
그림 9. 엔탈피 도표 두 가지	33
그림 10. 제 3장 개념도	37
그림 11. 생활 속 개념도 3	38
그림 12. 열화학 반응식의 네 규칙	40
그림 13. 메테인 질량과 연소열	43
그림 14. 제 4장 개념도	46
그림 15. 생활 속 개념도 4	47
그림 16. 커피컵 열량계	50
그림 17. 온도-시간 곡선과 외삽	51
그림 18. 통열량계	52
그림 19. 제 5장 개념도	56
그림 20. 생활 속 개념도 5	57
그림 21. 물과 수증기의 엔탈피 도표	59
그림 22. 물의 가열 곡선	60
그림 23. 제 6장 개념도	65
그림 24. 생활 속 개념도 6	66
그림 25. $C \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ 헤스 사이클	68
그림 26. 에테인 생성 헤스 사이클	70
그림 27. 제 7장 개념도	74
그림 28. 생활 속 개념도 7	75
그림 29. 홀원소 기준선과 생성 엔탈피	78
그림 30. 분해-조립 경로로 본 프로페인 연소	79
그림 31. 제 8장 개념도	83
그림 32. 생활 속 개념도 8	84
그림 33. 결합 차수와 결합 에너지	86
그림 34. 메테인 연소의 결합 장부	88
그림 35. 메테인 연소의 에너지 계단	89
그림 36. 제 9장 개념도	93
그림 37. 생활 속 개념도 9	94
그림 38. 촉매 유무의 에너지 도표	96
그림 39. 농도와 반응 속도의 관계	99
그림 40. 질산 암모늄 분해의 두 경로	100
그림 41. 제 10장 개념도	103
그림 42. 생활 속 개념도 10	104
그림 43. 연료를 다는 세 개의 저울	106
그림 44. 1 GJ당 CO_2 배출량	107
그림 45. H/C 비와 CO_2 1 mol당 열	108
그림 46. 제 11장 개념도	113
그림 47. 생활 속 개념도 11	114

그림 48. 분자 배치의 경우의 수	116
그림 49. 기체 몰수와 ΔS 부호	118
그림 50. 고체·액체·기체와 엔트로피	120
그림 51. 제 12장 개념도	123
그림 52. 생활 속 개념도 12	124
그림 53. ΔH	126
그림 54. 철의 산화 $\Delta G-T$	128
그림 55. N_2O_4 형성의 $\Delta G-T$	130
그림 56. 제 13장 개념도	133
그림 57. 생활 속 개념도 13	134
그림 58. 암모니아 합성의 반트호프 그림	136
그림 59. 용해의 두 단계 모식도	138
그림 60. KBr 의 용해도 곡선	140
그림 61. 제 14장 개념도	143
그림 62. 생활 속 개념도 14	144
그림 63. 수소 연료 전지의 구조	146
그림 64. 두 발전 방식의 에너지 흐름	148
그림 65. 연료 전지와 광합성의 $\Delta H \cdot \Delta G$	149
그림 66. 세 자료로 계산한 ΔH 비교	170
그림 67. 전환 온도 사다리	173
그림 68. 전체 개념 그래프	175
그림 69. 개념별 출제 횟수	176
그림 70. 연도별 출제 문항 수	177
그림 71. 대학별 출제 문항 수	177
그림 72. 계산형 풀이 절차	184
그림 73. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	201
그림 74. 에테인 생성 헤스 사이클	203
그림 75. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	210
그림 76. 질산 암모늄 분해의 결합 에너지 장부(q163)	212
그림 77. 질산 암모늄 분해의 에너지 도표(q163)	215
그림 78. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	222
그림 79. $NO + H_2$ 결합 장부(기출 246)	226
그림 80. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	232
그림 81. 세 화석 연료의 두 저울	233
그림 82. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	240
그림 83. CO_2 1 mol당 전기 에너지 비교(q150)	242
그림 84. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	248
그림 85. 수소를 얻는 세 갈래 길(q151)	249
그림 86. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	256
그림 87. 철의 제련 과정(기출 원문 그림 재구성)	257
그림 88. 철의 산화 $\Delta G-T$ 직선	259
그림 89. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	264
그림 90. 연료 1 g당 에너지(기출 135)	267
그림 91. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	272
그림 92. 아세틸렌의 삼량화(기출 233)	275
그림 93. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	281
그림 94. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	288
그림 95. 원소 분석 장치(기출 원문 그림 재구성)	289
그림 96. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	296

그림 97. NO 분해의 에너지 도표(q211).....	299
그림 98. 두 반응의 $\Delta G-T(q211)$	301
그림 99. 〈고려대 2013〉 개념 그래프	307
그림 100. 철의 녹과 자유 에너지(기출 원문 그림 재구성)	309
그림 101. 암모니아 합성 $\Delta G-T$ (기출 (a) 답 그래프).....	311
그림 102. 〈연세대 2012〉 개념 그래프	321
그림 103. 지구의 탄소 고정(기출 13 원문 그림)	322
그림 104. 두 행성의 탄소 고정 에너지(기출 13)	325
그림 105. 〈성균관대 2010〉 개념 그래프	330
그림 106. KBr의 온도별 용해도(q15)	331
그림 107. 〈한양대 2010〉 개념 그래프	340
그림 108. 두 염의 용해 $\Delta G-T$ (기출 277).....	344

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	13
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	13
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	17
표 4. 생활 속 발열·흡열 변화.....	21
표 5. 열·일·내부 에너지·엔탈피 비교.....	32
표 6. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	37
표 7. 열화학 반응식 점검표.....	41
표 8. 여러 물질의 비열(25 °C 부근).....	48
표 9. 커피컵 열량계와 통열량계 비교.....	53
표 10. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	56
표 11. 물의 상태 변화 엔탈피(1 mol = 18 g 기준).....	61
표 12. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	65
표 13. 반응식 조작과 ΔH 의 변화.....	69
표 14. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	74
표 15. 반응열의 종류.....	76
표 16. 표준 생성 엔탈피 ΔH°_f (kJ/mol, 25 °C).....	77
표 17. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	83
표 18. 평균 결합 에너지(kJ/mol, 기체 상태, 교과서 값).....	86
표 19. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	93
표 20. 촉매가 바꾸는 것과 바꾸지 않는 것.....	97
표 21. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	103
표 22. 다섯 연료의 세 가지 저울(25 °C, 생성물의 물은 액체).....	105
표 23. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	113
표 24. ΔS 의 부호 예측.....	117
표 25. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	123
표 26. ΔH · ΔS 의 부호와 자발성.....	127
표 27. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	133
표 28. 세 염의 용해 열역학(ΔH · ΔS 는 기출 자료와 표준값, ΔG 는 $\Delta H - T\Delta S$).....	139
표 29. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	143
표 30. 기본개념편 장과 2부 출제 개념의 대응.....	150
표 31. 2부 목차와 내용.....	165
표 32. 열화학 반응식의 네 규칙.....	167
표 33. 물의 상태와 엔탈피.....	168
표 34. ΔH 를 구하는 세 도구.....	169
표 35. 연료의 세 저울(연소열은 고정 수치, 물은 액체).....	171
표 36. ΔH · ΔS 의 부호와 자발성.....	172
표 37. 세 염의 용해 열역학(ΔG 는 $\Delta H - T\Delta S$ 로 계산, kJ/mol).....	174
표 38. 이 책의 기출 문항 목록.....	178
표 39. 대학별 출제 문항.....	178
표 40. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	179
표 41. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	181
표 42. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서.....	183
표 43. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	183
표 44. 서술형 답안의 문장 틀(열화학 설명).....	185
표 45. 논술 기본 패턴 5가지(열화학 답안).....	186
표 46. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은).....	187
표 47. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	194

표 48. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용.....	194
표 49. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	195
표 50. 학년도별 문항 수와 시험 종류.....	195
표 51. 소문항 29개에 적용한 주·답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주)	196
표 52. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순).....	197
표 53. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	198
표 54. <표 3> 원자 사이의 평균 결합 에너지 (단위 kJ/mol)	200
표 55. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	201
표 56. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	204
표 57. [표1] 원자 사이의 평균 결합 에너지 (단위: kJ/mol)	209
표 58. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	211
표 59. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	213
표 60. [표 1] 몇 가지 원자 사이의 평균 결합 에너지(단위: kJ/mol)	221
표 61. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	222
표 62. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	223
표 63. 농도 변화 실험 자료와 반응 차수 판정.....	227
표 64. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	232
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	234
표 66. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	240
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	243
표 68. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	248
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	250
표 70. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	256
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	258
표 72. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	264
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	266
표 74. 헤스 법칙 장부	267
표 75. 논제 II-2의 자료	271
표 76. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	273
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	273
표 78. 두 연료의 연소 계산.....	276
표 79. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	281
표 80. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	283
표 81. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	288
표 82. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	290
표 83. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	296
표 84. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	298
표 85. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	307
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	309
표 87. 제시문 (가)의 표	319
표 88. 제시문 (나)의 표	320
표 89. 기출문제 14의 개념과 복습 위치.....	321
표 90. [2-1]의 요구 사항과 난이도.....	323
표 91. 행성 A 반응 $12\text{CH}_4 + 6\text{N}_2 \rightarrow \text{C}_{12}\text{H}_{12} + 12\text{NH}_3$ 의 결합	325
표 92. 기출문제 15의 개념과 복습 위치.....	330
표 93. 소문항별 요구 사항과 난이도(배점은 대학 채점 기준의 10점 척도)	332
표 94. 자료 (a)	339
표 95. 기출문제 16의 개념과 복습 위치.....	340
표 96. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	341

표 97. 용해 엔트로피의 두 효과	345
표 98. 인강 회차 구성(제안)	355
표 99. 16개 문항의 규모	358
표 100. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	359

제 1 부

기본개념편

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

열화학·엔탈피·자유 에너지

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 열과 온도 → 엔탈피와 열화학 반응식 → 열을 재는 법 → 헤스 법칙과 생성 엔탈피 → 결합 에너지 → 활성화 에너지 → 엔트로피와 자유 에너지 → 에너지 기술의 순서로 이어집니다. 앞 장에서 만든 식과 숫자가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 열과 엔탈피	1~2장	계와 주위를 나누고 발열·흡열을 구분한다. 일정한 압력에서 오가는 열을 엔탈피 변화 ΔH 로 정의한다.
B. 반응열을 쓰고 쥔다	3~5장	열화학 반응식을 규칙대로 쓰고, 열량계로 반응열을 재며, 물과 수증기처럼 상태가 바뀔 때의 열을 다룬다.
C. 반응열을 계산한다	6~8장	헤스 법칙, 표준 생성 엔탈피, 결합 에너지라는 세 가지 계산 도구로 쥔 수 없는 반응의 ΔH 를 구한다.
D. 속도와 연료	9~10장	활성화 에너지와 촉매가 ΔH 를 바꾸지 않는다는 점을 확인하고, 연료를 $\text{kJ/mol} \cdot \text{kJ/g} \cdot \text{CO}_2$ 1 mol당 열의 세 저울로 비교한다.
E. 자발성과 응용	11~14장	엔트로피와 깁스 자유 에너지로 반응이 저절로 일어나는 방향과 온도를 판정하고, 평형·용해·연료 전지까지 넓힌다. 이어서 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 장의 끝에는 그 장의 개념이 일상에서 보이는 장면을 한 쪽 그림으로 정리한 〈생활 속 개념도〉가 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	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (17쪽)	왜 열화학인가	계와 주위 · 발열과 흡열 · 에너지 보존
기본개념편 제 2장 (27쪽)	엔탈피: 일정한 압력에서 오가는 열	엔탈피 H · 반응 엔탈피 ΔH · $\Delta H = q(\text{일정 압력})$
기본개념편 제 3장 (37쪽)	열화학 반응식을 쓰는 규칙	상태 표시 · 계수와 ΔH 의 비례 · 역반응의 부호
기본개념편 제 4장 (46쪽)	열량계로 반응열을 쥔다	비열 · $q = mc\Delta T$ · 커피컵 열량계 · 통열량계
기본개념편 제 5장 (56쪽)	물과 수증기: 상태가 바뀌면 열이 오간다	융해열 · 기화열 · 가열 곡선

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 6장 (65쪽)	헤스 법칙: 길이 달라도 높이는 같다	상태 함수 · 헤스 법칙 · 반응식 더하고 빼기
기본개념편 제 7장 (74쪽)	반응열의 종류와 표준 생성 엔탈피	연소열 · 생성열 · 중화열 · 용해열 · 표준 생성 엔탈피
기본개념편 제 8장 (83쪽)	결합 에너지로 ΔH 를 어렵한다	결합 에너지 · 끊는 에너지 - 만드는 에너지 · 평균값의 한계
기본개념편 제 9장 (93쪽)	활성화 에너지와 촉매: ΔH 는 그대로다	에너지 도표 · 활성화 에너지 · 촉매 · 반응 속도식 · 폭발물
기본개념편 제 10장 (103쪽)	연료를 재는 세 개의 저울	kJ/mol · kJ/g · CO_2 1 mol당 열
기본개념편 제 11장 (113쪽)	엔트로피: 흩어지는 쪽으로	엔트로피 S · 상태와 S · ΔS 부호 예측 · $\Delta S = q/T$
기본개념편 제 12장 (123쪽)	깁스 자유 에너지와 자발성	$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ · 네 가지 경우 · 전환 온도 · 녹과 제련
기본개념편 제 13장 (133쪽)	자유 에너지, 평형, 그리고 용해	$\Delta G^\circ = -RT \ln K$ · 온도와 K · 용해의 ΔH · ΔS · 수화
기본개념편 제 14장 (143쪽)	에너지 기술 속의 열화학, 그리고 2부로	연료 전지 · 발전 효율 · 광합성의 에너지 · 녹색 화학

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다. 부호 (+, -)를 빼먹지 않는 것이 이 단원의 절반이다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 구간은 6~8장(헤스 법칙·생성 엔탈피·결합 에너지)과 12~13장(자유 에너지)이다. 이 두 구간은 두 번 읽는다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

열화학은 중학교 과학의 “발열 반응·흡열 반응”에서 시작해 대학 논술에서는 계산과 서술이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 화학 반응식, 간단한 비례식)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 식을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 식을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 충북 단양 ‘돌집 과학방’에서 토요일마다 화학을 배운다. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 가마솥과 가스 불 앞에서 일하는 사람의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학 교수. 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

첫 토요일

11월 첫 토요일 아침, 돌집 과학방 난로 위에서 주전자가 끓고 있었다. 이모가 두부집에서 쓰던 가스통 하나와 손난로 한 봉지를 탁자에 내려놓았다.

이모 교수님, 오늘은 이것부터 여쭙볼게요. 이 손난로는 흔들기만 해도 뜨거워지고, 냉찜질 팩은 누르기만 해도 차가워지잖아요. 똑같이 봉지 안에서 무언가 섞이는 건데 왜 하나는 뜨겁고 하나는 차가워요?

석 교수 좋은 질문으로 시작하네. 손난로 안에서는 철가루가 공기 중의 산소와 만나 녹이 슬고, 냉찜질 팩 안에서는 질산 암모늄 같은 염이 물에 녹는다. 두 변화가 모두 열을 주고받는데, 방향이 반대야.

하린 녹이 스는 게 뜨거워요? 녹은 그냥 천천히 생기는 줄 알았어요.

석 교수 보통은 아주 천천히 생기니까 따뜻함을 못 느낄 뿐이야. 손난로는 철을 가루로 만들고 소금물과 솜을 섞어 녹이 빨리 슬게 만든 장치다. 같은 양의 열이 몇 달이 아니라 몇 시간에 나오니까 손이 따뜻해지는 거지.

태오 그럼 녹이 슬 때 나오는 열을 숫자로 잴 수 있어요? 논술 기출을 보니까 “반응 엔탈피를 구하시오”가 정말 많더라고요.

석 교수 잴 수 있고, 잴 수 없는 것은 계산할 수 있다. 오늘부터 열네 번의 토요일 동안 그 방법을 하나씩 만들 거야. 먼저 무엇이 열을 내놓고 무엇이 받는지, 경계선부터 긋자.

이모 경계선이요? 가마솥에 불을 때면 불이 열을 주고 콩물이 받는 거 아닌가요?

석 교수 바로 그 생각이 첫 장의 내용이다. 우리가 관심을 두는 부분을 ‘계’, 나머지를 ‘주위’라고 부른다. 콩물을 계로 잡으면 열이 계로 들어오고, 가스 불꽃을 계로 잡으면 열이 계에서 나간다. 같은 장면도 경계를 어디에 긋느냐에 따라 부호가 바뀐다.

하린 부호가 바뀐다니, 벌써 헷갈려요.

석 교수 그래서 약속을 하나만 정하자. 계가 열을 내놓으면 계의 에너지가 줄어드니까 마이너스, 계가 열을 받으면 플러스. 이 약속 하나로 이 책 끝까지 간다.

태오 그런데 교수님, 엔탈피, 엔트로피, 자유 에너지... 이름이 비슷해서 시험장에서 자꾸 섞여요.

- 석 교수** 이름보다 질문으로 기억해 보렴. 엔탈피는 “열이 얼마나 오가나”, 엔트로피는 “얼마나 흩어지나”, 자유 에너지는 “그래서 저절로 일어나나”를 묻는다. 앞의 둘이 줄다리기를 하고, 그 승패를 자유 에너지가 판정한다.
- 이모** 줄다리기가... 그럼 녹이 스는 쪽이 이긴 거고, 용광로에서 쇠를 다시 뽑는 건 진 쪽을 억지로 이기게 하는 거네요?
- 석 교수** 거의 정답이다. 용광로는 온도를 아주 높여서 줄다리기의 판을 뒤집는다. 그 온도가 몇 도쯤인지, 2020년 연세대 논술이 바로 그걸 물었다. 12장에서 우리가 직접 계산해 볼 거야.
- 하린** 저는 계산보다 그 가스통이 더 궁금해요. 가스 1 kg으로 두부 몇 판을 만들 수 있어요?
- 석 교수** 그 질문도 끝까지 들고 가자. 3장에서 열화학 반응식을 쓰고, 4장에서 열을 재고, 10장에서 연료끼리 비교하면 이모님 가게의 가스 값까지 계산할 수 있다.
- 태오** 기출을 보면 수소 연료 전지, 바이오 에탄올, 질산 암모늄 폭발, 도로에 뿌리는 염화 칼슘까지 나와요. 화학 단원 하나가 이렇게 넓어요?
- 석 교수** 넓어 보이지만 쓰는 도구는 몇 개 안 된다. 출발점과 도착점만 보는 헤스 법칙, 결합을 끊고 붙이는 장부, 그리고 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. 이 세 가지를 손에 익히면 소재가 바뀌어도 같은 길로 풀 수 있다.
- 이모** 그럼 오늘은 손난로부터 뜯어볼까요?
- 석 교수** 그러자. 하린이는 온도계를 가져오고, 태오는 저울을 켜 두렴. 첫 장의 질문은 이것이다 — 왜 열화학인가.

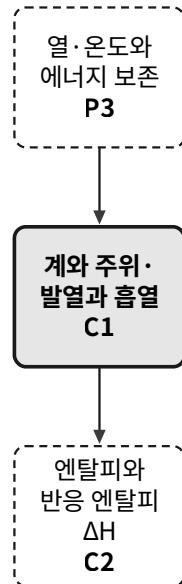
이 대화가 기본개념편의 줄거리다. 열이 오가는 방향을 정하고(**기본개념편 제 1장** (17쪽)·**기본개념편 제 2장** (27쪽)), 반응식에 열을 붙여 쓰고 재며(**기본개념편 제 3장** (37쪽)~**기본개념편 제 5장** (56쪽)), 짚 수 없는 반응의 열을 계산하고(**기본개념편 제 6장** (65쪽)~**기본개념편 제 8장** (83쪽)), 속도와 연료를 구분한 뒤(**기본개념편 제 9장** (93쪽)·**기본개념편 제 10장** (103쪽)), 마지막에 “저절로 일어나는가”를 판정한다(**기본개념편 제 11장** (113쪽)~**기본개념편 제 14장** (143쪽)).

제 1장 왜 열화학인가

새 개념 계와 주위 · 발열과 흡열 · 에너지 보존

이어짐 엔탈피 2장 · 열량 측정 4장 · 자발성 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 계와 주위·발열과 흡열)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 2 (연세대 2023년) (209쪽)	질산 암모늄 폭발과 결합 에너지	C1 계와 주위·발열과 흡열

봉지 두 개, 열은 반대 방향

손난로(발열)와 냉찜질 팩(흡열)

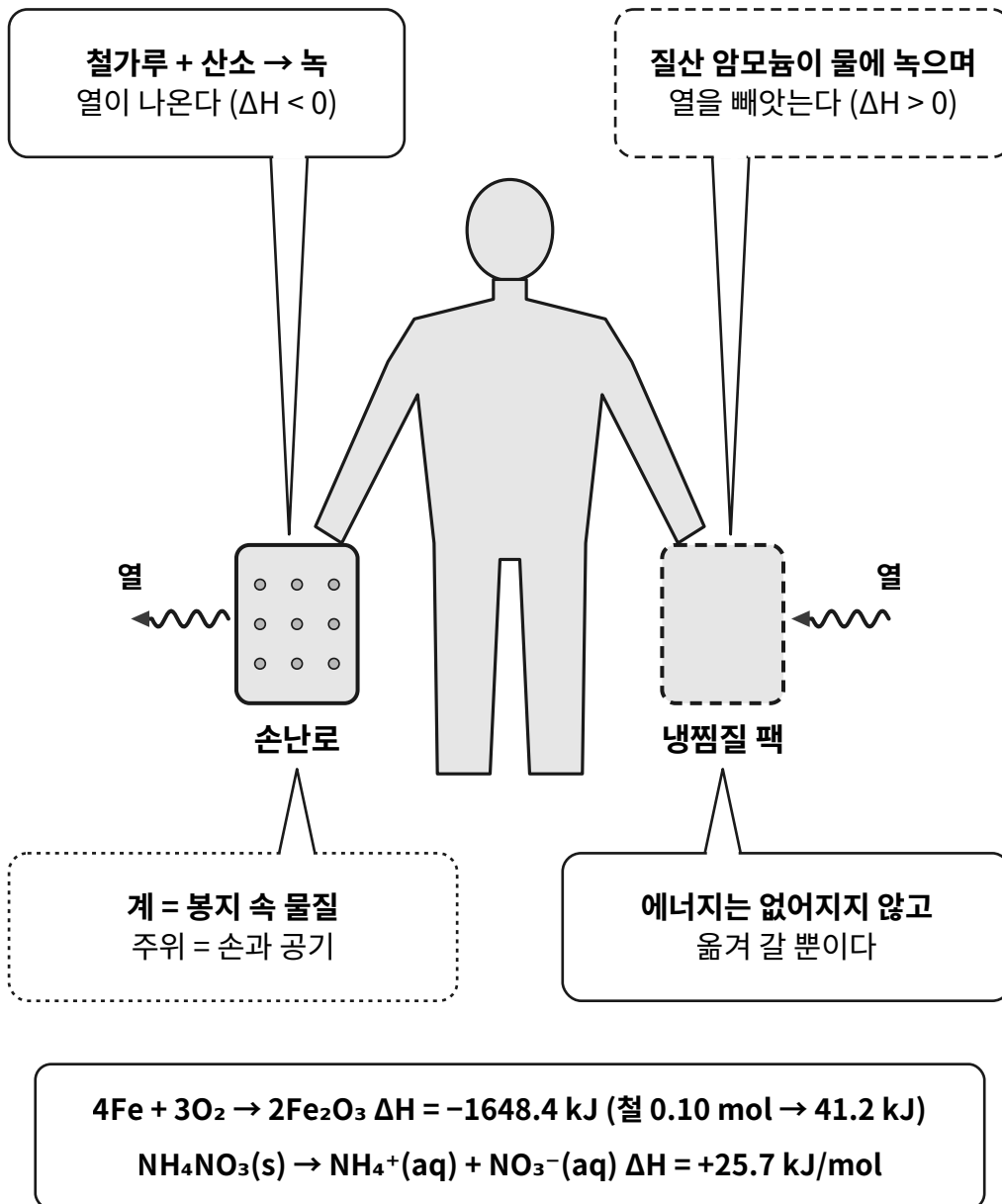


그림 3. 한 손에는 따뜻해지는 손난로, 다른 손에는 차가워지는 냉찜질 팩 — 봉지 속 물질(계)과 손(주위) 사이로 열이 반대 방향으로 오간다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 손난로는 발열, 냉찜질 팩은 흡열이다.
2. 계가 열을 내놓으면 ΔH 가 음수, 받으면 양수다.
3. 열은 계와 주위 사이를 옮겨 갈 뿐 총량은 보존된다.

이 장의 출발점

이 장은 세 가지만 알면 따라올 수 있다. ① 열은 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 옮겨 가는 에너지이고, 온도는 그 물체가 얼마나 뜨거운지를 나타내는 눈금이다. ② 몰은 입자 수를 세는 단위이고, 질량을 화학식량으로 나누면 몰수가 된다($\text{Fe } 56 \text{ g} = 1 \text{ mol}$). ③ 에너지는 모양을 바꿀 뿐 새로 생기거나 없어지지 않는다.

1월의 첫 토요일, 단양 돌집 과학방의 난로 위에서 주전자가 끓고 있었다. 미숙 이모는 장바구니에서 불이는 손난로 한 묶음과 운동선수용 냉찜질 팩 두 개를 꺼내 탁자에 올려놓았다. 하린은 손난로 봉지를 흔들며 보았고, 태오는 냉찜질 팩 뒷면의 성분표를 소리 내어 읽었다.

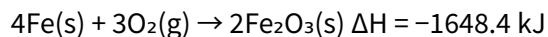
이모 교수님, 이 두 개가 둘 다 봉지에 든 가루인데 하나는 뜨거워지고 하나는 차가워져요. 똑같이 생긴 봉지가 왜 반대로 움직이는지 아이들한테 설명을 못 하겠더라고요.

석 교수 오늘 공부를 시작하기에 딱 좋은 물건을 가져오셨네요. 이 두 봉지에 열화학의 첫 질문이 다 들어 있어요. 열이 어디에서 어디로 가는가, 얼마나 가는가, 그리고 왜 그 방향으로 가는가.

태오 냉찜질 팩 성분표에는 질산 암모늄이랑 물이라고 써 있어요. 손난로는 철 가루, 물, 소금, 활성탄, 질석이요.

1.1 손난로와 냉찜질 팩

석 교수 손난로부터 보자. 봉지를 뜯으면 공기 속 산소가 들어가 철 가루와 만난다. 철이 녹스는 반응이 일어나는 거야. 소금물은 반응을 빠르게 하고, 활성탄은 공기를 머금어 산소를 철 가까이 데려오고, 질석은 열을 오래 품는 역할을 한다. 반응을 간단히 쓰면 이렇다.



하린 ΔH 가 뭐예요? 그리고 왜 마이너스예요? 열이 나오는데요.

석 교수 ΔH 는 **기본개념편 제 2장 (27쪽)**에서 제대로 정의할 텐데, 오늘은 “반응하는 물질이 열을 얼마나 주고받았는지 적는 장부 숫자”라고 생각하렴. 마이너스는 물질 쪽에서 열이 빠져 나갔다는 뜻이다. 물질이 열을 내놓으니 물질이 가진 에너지는 줄었고, 그래서 음수로 적는다. 대신 그 열을 받은 우리 손은 따뜻해지지.

태오 은행 통장 같네요. 내 통장에서 돈이 나가면 마이너스, 받는 사람 통장에는 플러스.

석 교수 좋은 비유다. 화학에서는 늘 반응하는 물질 쪽 통장을 기준으로 부호를 붙인다. 이 약속을 놓치면 열화학 답안의 절반이 틀린다. 이번에는 냉찜질 팩이다. 속 주머니를 터뜨리면 질산 암모늄이 물에 녹는다.



이모 이번엔 플러스네요. 그럼 물질이 열을 받았다는 거죠? 그 열은 어디서 받아요?

석 교수 팩을 쥔 손과 다친 발목에서 받아요. 녹는 데 열이 필요하니 주변에서 열을 빼앗고, 빼앗긴 쪽은 차가워지죠. 그래서 냉찜질 팩은 냉장고가 없어도 차가워져요. 열을 내놓는 변화를 **발열**, 열을 받아들이는 변화를 **흡열**이라고 합니다.

문제 1.1

손난로 속에서 $4\text{Fe(s)} + 3\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{(s)}$, $\Delta H = -1648.4 \text{ kJ}$ 인 반응이 일어난다. 철 가루 5.6 g이 모두 반응할 때 방출되는 열은 몇 kJ인가? (Fe 56)

하린 철 5.6 g은 $5.6 \div 56 = 0.10 \text{ mol}$ 이에요. 그런데 반응식의 1648.4 kJ은 철이 몇 mol일 때예요?

석 교수 반응식에 쓴 계수 그대로, 철 4 mol이 반응할 때의 값이다. 그러니 1 mol당은 4로 나누면 되지.

태오 $1648.4 \div 4 = 412.1 \text{ kJ}$ 이 철 1 mol당이고, 0.10 mol이면 $412.1 \times 0.10 = 41.2 \text{ kJ}$ 이에요. 한 번에 쓰면 $1648.4 \times 0.10 \div 4 = 41.2 \text{ kJ}$.

석 교수 정답은 41.2 kJ 방출이다. 답안에는 “방출”이라는 말이나 $\Delta H = -41.2 \text{ kJ}$ 처럼 부호를 꼭 붙이렴. 숫자만 쓰면 들어온 열인지 나간 열인지 읽는 사람이 알 수 없다.

이모 41 kJ이면 많은 거예요, 적은 거예요?

석 교수 물 1 kg의 온도를 10 °C쯤 올릴 수 있는 열이에요. 손난로 안의 철은 이보다 훨씬 많은데도 몇 시간 동안 따뜻한 건, 공기가 부직포를 통해 천천히 들어가서 반응이 천천히 일어나기 때문이죠. 같은 반응을 철솥에 불을 붙여 빠르게 일으키면 불꽃이 튀어요. 양은 반응식이 정하고, 빠르기는 다른 조건이 정한다는 것도 기억해 두세요.

1.2 계와 주위를 나누는 선

석 교수 이제 말을 정확하게 하자. 우리가 관심을 두는 부분을 **계(system)**라 하고, 그 바깥 나머지를 모두 **주위(surroundings)**라 한다. 계와 주위를 나누는 선이 경계다. 손난로에서는 봉지 속 물질이 계, 손과 공기가 주위다.

하린 경계는 마음대로 정해도 돼요?

석 교수 그렇다. 문제를 푸는 사람이 정한다. 다만 한 번 정하면 끝까지 바꾸지 않아야 한다. **그림 4**를 보자. 비커 속 반응물이 계이고, 비커 밖이 주위다. 경계를 넘어 무엇이 오갈 수 있는냐에 따라 계를 세 가지로 나눈다.

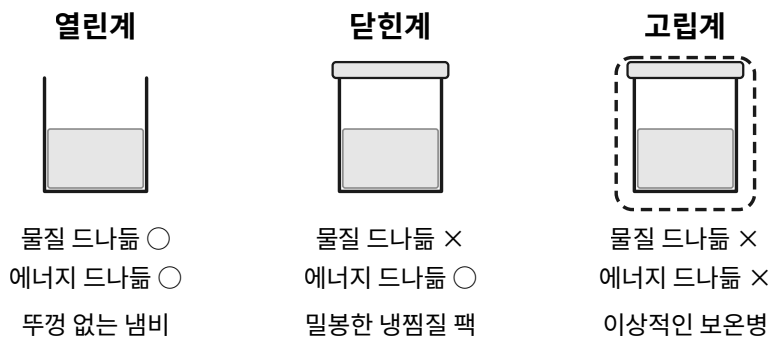
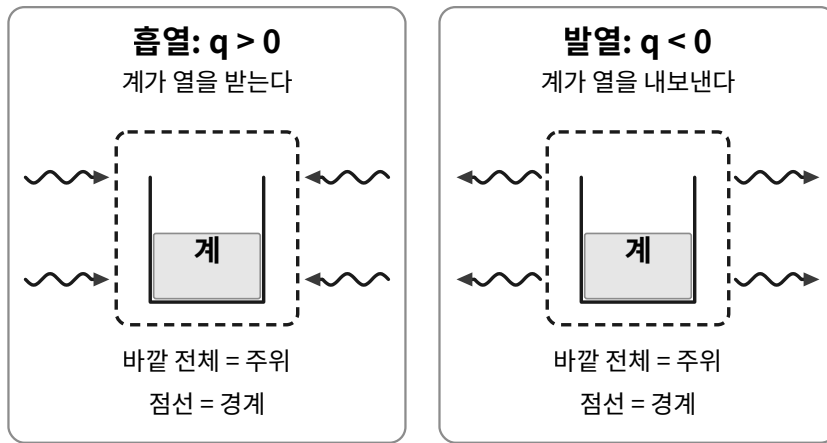


그림 4. 계와 주위의 경계와 열의 부호 — 계가 주위에서 열을 받으면 $q > 0$ (흡열), 주위로 열을 내보내면 $q < 0$ (발열)이다. 아래 줄은 경계를 넘는 것에 따른 열린계·닫힌계·고립계.

석 교수 물질과 에너지가 모두 드나들면 **열린계**, 에너지만 드나들고 물질은 못 드나들면 **닫힌계**, 둘 다 못 드나들면 **고립계**다. 뚜껑 없는 냄비의 물은 수증기가 빠져나가니 열린계, 밀봉된 냉찜질 팩은 닫힌계, 완벽한 보온병은 고립계에 가깝다.

태오 그러면 손난로는 공기가 들어가니까 열린계예요?

석 교수 맞다. 산소라는 물질이 경계를 넘어 들어오니 열린계다. 이제 경계를 넘는 열에 이름 q 를 붙이고 부호를 약속한다. 계가 열을 받으면 $q > 0$, 계가 열을 내보내면 $q < 0$. 일정한 압력에서는 이 q 가 바로 ΔH 가 된다. 그건 **기본개념편 제 2장** (27쪽)의 이야기다.

이모 결국 계 입장에서 들어오면 플러스, 나가면 마이너스네요. 그런데 주위에서 보면 거꾸로 겠고요.

석 교수 그렇죠. 계가 41.2 kJ을 내보내면 $q(\text{계}) = -41.2 \text{ kJ}$, $q(\text{주위}) = +41.2 \text{ kJ}$ 이에요. 두 값을 더하면 0이 됩니다. 이 0이 다음 절의 에너지 보존이에요.

표 4에 생활 속에서 보는 발열·흡열 변화 여덟 가지를 계와 부호로 정리했다.

표 4. 생활 속 발열·흡열 변화 — 계를 정하면 열의 방향과 부호가 정해진다

변화	계	열의 방향	부호
손난로(철의 산화)	철 가루와 산소	계 → 손	$\Delta H < 0$ (발열)
가스 불(메테인 연소)	메테인과 산소	계 → 냄비	$\Delta H < 0$ (발열)
산과 염기의 중화	섞인 두 용액의 이온	계 → 용액의 물	$\Delta H < 0$ (발열)
진한 황산을 물에 희석	황산과 물	계 → 비커	$\Delta H < 0$ (발열)

변화	계	열의 방향	부호
냉찜질 팩(질산 암모늄 용해)	질산 암모늄과 물	손 → 계	$\Delta H > 0$ (흡열)
얼음이 녹음	얼음	공기 → 계	$\Delta H > 0$ (흡열)
땀의 증발	피부 위의 물	몸 → 계	$\Delta H > 0$ (흡열)
광합성	CO_2 와 물	햇빛 → 계	$\Delta H > 0$ (흡열)

하린 땀이 마르는 게 흡열이네요? 땀은 몸에서 나오잖아요.

석 교수 계를 어디로 잡았는지 보렴. 표에서는 피부 위의 물을 계로 잡았다. 물이 수증기가 되려면 열이 필요하고, 그 열을 몸에서 가져가니 물 입장에서는 흡열이다. 몸 입장에서는 열을 빼앗겨 시원해지지. 같은 사건도 계를 바꾸면 부호가 바뀐다는 것을 이 줄이 보여 준다.

태오 진한 황산 희석이 위험하다는 것도 발열 때문이죠? 물을 황산에 부으면 끓어서 튈다고 들었어요.

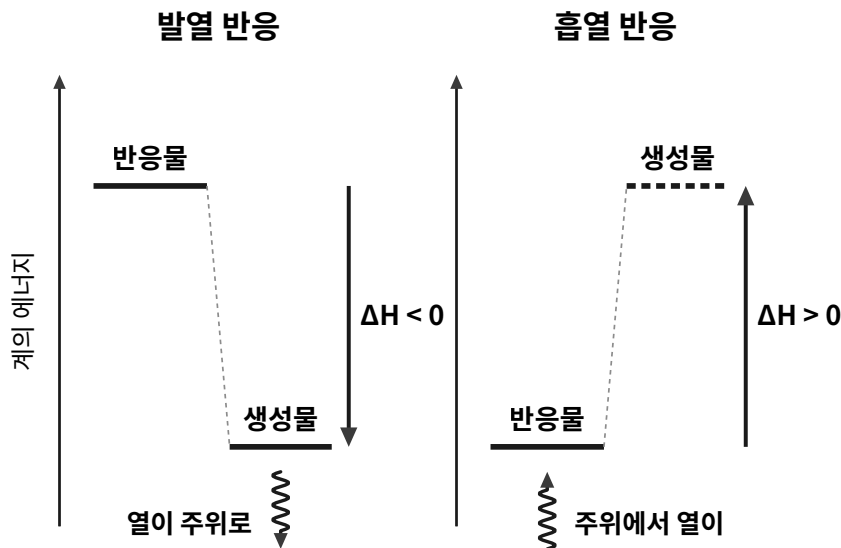
석 교수 그래서 반드시 산을 물에 조금씩 부어야 한다. 많은 물이 열을 나눠 받으니까 온도가 덜 오르지. 어떤 물질이 열을 얼마나 받아야 온도가 얼마나 오르는지는 **기본개념편 제 4장** (46 쪽)의 비열에서 계산한다.

1.3 에너지는 사라지지 않는다

석 교수 이번에는 에너지 쪽에서 보자. 계 안의 원자와 분자가 가진 에너지를 모두 더한 것을 **내부 에너지** U 라고 한다. 분자의 운동 에너지, 결합 속에 저장된 에너지, 분자 사이의 인력에서 오는 에너지가 다 들어 있다.

하린 그걸 다 더할 수 있어요?

석 교수 절댓값은 못 잰다. 하지만 변화량은 잴 수 있다. 계에 열 q 가 들어오고 일 w 가 들어오면, 계의 내부 에너지는 그만큼 늘어난다. 이것을 식으로 $\Delta U = q + w$ 라고 쓰고, **열역학 제1법칙**이라고 부른다. 오늘은 이름과 뜻만 알면 된다. 결국 “에너지는 새로 생기지도 없어지지도 않고, 계와 주위 사이를 옮겨 갈 뿐이다”라는 에너지 보존 법칙이다.



예: 손난로(철의 산화)는 발열, 냉찜질 팩(질산 암모늄 용해)은 흡열

그림 5. 발열과 흡열을 계의 에너지 높이로 그린 모식도 — 발열 반응은 생성물이 반응물보다 낮아 그 차이만큼 열이 주위로 나가고($\Delta H < 0$), 흡열 반응은 생성물이 높아 그만큼 열을 주위에서 받는다($\Delta H > 0$).

태오 그림 5를 보니까 발열은 계단을 내려가는 거고, 흡열은 올라가는 거네요.

석 교수 그렇다. 반응물이 높은 곳에 있고 생성물이 낮은 곳에 있으면, 내려온 높이만큼의 에너지가 열로 주위에 건네진다. 철과 산소는 녹(Fe_2O_3)보다 높은 곳에 있다. 거꾸로 질산 암모늄 결정은 녹아서 흩어진 이온보다 낮은 곳에 있어서, 녹으려면 주위에서 열을 받아 올라가야 한다.

이모 그럼 손난로에서 나온 41.2 kJ은 원래 철 가루 속에 있었던 거네요. 새로 생긴 게 아니군요.

석 교수 바로 그거예요. 철과 산소가 결합해 더 안정한 산화 철이 되면서, 결합 속에 있던 에너지 일부가 열로 빠져나온 거예요. 손이 받은 열과 철이 잃은 에너지는 정확히 같아요. 이 장부가 맞지 않은 실험은 지금까지 하나도 없었어요.

부호 약속은 “계의 통장” 기준

이 책은 고교 화학 교과서와 같이 계를 기준으로 부호를 붙인다. 계가 열을 받으면 $q > 0$, 계가 열을 내놓으면 $q < 0$ 이고, 계가 일을 받으면 $w > 0$, 계가 주위에 일을 하면 $w < 0$ 이다. 그래서 $\Delta U = q + w$ 로 쓴다. 일부 물리·공학 교재는 “계가 한 일”을 양수로 잡아 $\Delta U = q - w$ 로 쓰는데, 내용은 같고 약속만 다르다. 제시문이 어느 약속을 쓰는지 먼저 확인하고, 답안에서는 한 약속만 끝까지 쓴다.

태오 손난로가 공기를 빨아들이는 것도 일이에요? 봉지가 조금 납작해지던데요.

석 교수 눈썰미가 좋구나. 기체인 산소가 고체인 산화 철 속으로 들어가니 기체 부피가 줄고, 바깥 공기가 봉지를 누르며 계에 아주 작은 일을 한다. 하지만 그 크기는 반응열에 비하면 매우 작다. 얼마나 작은지는 **기본개념편 제 2장** (27쪽)에서 직접 계산해 보자.

열과 온도는 다르다

하린 그런데 교수님, 열이랑 온도는 같은 말 아니예요? 뜨거우면 열이 많은 거잖아요.

석 교수 많이들 헛갈린다. 온도는 물체 속 입자들이 평균적으로 얼마나 활발하게 움직이는지를 나타내는 눈금이고, 열은 온도 차이 때문에 한 물체에서 다른 물체로 옮겨 가는 에너지의 양이다. 온도는 °C나 K로, 열은 J이나 kJ로 잰다. 단위부터 다르지.

태오 예를 들면요?

석 교수 끓는 물 한 컵과 끓는 물 한 솥은 온도가 둘 다 100 °C다. 그런데 얼음을 녹이라고 하면 한 솥이 훨씬 많이 녹인다. 내줄 수 있는 열이 물의 양에 비례하기 때문이다. 반대로 불꽃 놀이 막대에서 튀는 불티는 1000 °C가 넘지만 손등에 떨어져도 크게 다치지 않는다. 온도는 높아도 질량이 아주 작아서 건네는 열이 적거든.

이모 아, 그래서 같은 손난로라도 큰 것이 더 오래 따뜻하군요. 철이 더 많으니 나오는 열이 많고요.

석 교수 그렇죠. 열화학 반응식에 적는 ΔH 는 온도가 아니라 열의 양이에요. 그래서 반응하는 물질의 양에 비례하고, 문제 1.1처럼 몰수로 나누거나 곱해서 써요. 온도 변화는 그 열을 받은 물질이 얼마나 많은지, 얼마나 쉽게 데워지는지에 따라 달라지고요. 둘을 이어 주는 식이 **기본개념편 제 4장** (46쪽)의 $q = mc\Delta T$ 예요.

태오 그럼 냉찜질 팩에서는 손이 잃은 열이 이온들 쪽으로 간 거고요. 그 열을 정확히 계산할 수 있어요?

석 교수 해 보자.

문제 1.2

냉찜질 팩 속 질산 암모늄 8.0 g(0.10 mol)이 물 100 g에 모두 녹는다. $\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{aq})$, $\Delta H = +25.7 \text{ kJ/mol}$ 이다. (가) 흡수하는 열은 몇 kJ인가? (나) 열이 모두 물에서만 빠져나간다고 할 때 물의 온도는 몇 °C 내려가는가? (물의 비열 $4.18 \text{ J/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$)

하린 (가)는 $25.7 \times 0.10 = 2.57 \text{ kJ}$ 이에요. 흡수니까 계 입장에서 +2.57 kJ.

태오 (나)는 물이 2.57 kJ = 2570 J을 잃었으니까 $2570 = 100 \times 4.18 \times \Delta T$, $\Delta T = 2570 \div 418 = 6.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 내려가요. 그런데 교수님, 녹은 질산 암모늄 8.0 g도 용액에 들어 있잖아요. 108 g으로 계산하면 $2570 \div (108 \times 4.18) = 5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 예요. 어느 게 맞아요?

석 교수 둘 다 맞을 수 있다. 무엇을 가정했느냐의 차이다. “열을 잃는 것은 물 100 g뿐”이라고 가정하면 6.1 °C, “용액 108 g 전체가 물과 같은 비열을 가진다”고 가정하면 5.7 °C. 실제 팩은 비닐과 공기도 열을 나누니 이보다 덜 내려간다. 논술에서는 답 앞에 가정을 한 줄 쓰는 것이 정답이다. 정답은 (가) 2.57 kJ 흡수, (나) 물 100 g 가정에서 약 6.1 °C 하강(용액 108 g 가정이면 5.7 °C)이다.

이모 가정을 쓰라는 말이 중요하네요. 아이들이 숫자만 쓰고 끝내거든요.

석 교수 네, 채점자는 그 숫자가 어떤 가정에서 나왔는지를 봐요. **기본개념편 제 4장** (46쪽)의 열량계 계산도 모두 이런 가정 위에 서 있어요.

1.4 생명과 문명은 열의 장부다

석 교수 오늘 본 두 봉지는 작은 예이고, 우리 생활 전체가 열의 장부 위에 있다. 우리 몸은 포도당을 산소로 천천히 태워 에너지를 얻는다. $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$, $\Delta H = -2803 \text{ kJ}$ 이다. 포도당 1 mol, 곧 180 g이 다 타면 2803 kJ이 나온다.

하린 그럼 그 포도당은 어디서 왔어요?

석 교수 식물이 만들었지. 광합성은 바로 그 반응의 역반응이다. $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$, $\Delta H = +2803 \text{ kJ}$. 반응을 거꾸로 쓰면 부호만 바뀐다. 식물은 햇빛 에너지를 받아 낮은 곳의 CO_2 와 물을 높은 곳의 포도당으로 끌어올리고, 우리는 그것을 다시 내려보내며 에너지를 쓴다.

태오 석탄이나 석유도 결국 옛날 식물이 저장한 햇빛이네요.

석 교수 그렇다. 수억 년 전 식물이 광합성으로 끌어올린 탄소 화합물이 땅속에 묻혀 석탄과 석유가 되었고, 우리는 그것을 태워 다시 CO_2 와 물로 내려보내며 그때의 햇빛 에너지를 꺼내 쓴다. 문제는 내려보내는 속도다. 수억 년 동안 모은 것을 이백 년 남짓한 사이에 태우니 대기 중 CO_2 가 빠르게 늘었다. 그래서 요즘 기출은 “열을 얼마나 얻는가”와 함께 “ CO_2 를 얼마나 내놓는가”를 같이 묻는다. 그 비교는 **기본개념편 제 10장** (103쪽)에서 세 개의 저울로 한다.

하린 그럼 열화학은 환경 문제랑도 연결되네요.

석 교수 불의 발견, 철의 제련, 비료를 만드는 암모니아 합성, 화석 연료 발전까지, 문명을 바꾼 반응은 거의 다 열을 얻거나 열을 들여 원하는 물질을 만드는 반응이었다. 그래서 대학들은 “문명과 화학 반응”이라는 큰 제시문 속에 열화학 계산을 하나씩 숨겨 둔다.

이모 교수님, 그런데 열이 나오는 반응만 저절로 일어나는 건 아니잖아요. 냉찜질 팩은 열을 빼앗는데도 저절로 녹았어요.

석 교수 아주 중요한 질문을 하셨어요. 이 책 전체를 세 개의 질문으로 정리하면 이렇습니다. 첫째, 열이 얼마나 오가는가(엔탈피, **기본개념편 제 2장** (27쪽)~**기본개념편 제 10장** (103쪽)). 둘째, 물질이 얼마나 흩어지는가(엔트로피, **기본개념편 제 11장** (113쪽)). 셋째, 그 둘을 합쳐 어느 쪽으로 저절로 가는가(자유 에너지, **기본개념편 제 12장** (123쪽)). 냉찜질 팩이 저절로 녹는 이유는 셋째 질문에서 풀려요. 오늘은 “발열이라고 해서 저절로 일어나는 것도 아니고, 흡열이라고 해서 저절로 안 일어나는 것도 아니다”라는 것만 마음에 담아 두세요.

하린 손난로도 봉지를 뜯기 전에는 반응을 안 했어요. 발열인데도요.

석 교수 산소가 없었으니까. 그리고 산소가 있어도 아주 느린 반응은 많다. 빠르기는 **기본개념편 제 9장** (93쪽)의 활성화 에너지가 다룬다. 정리하면, 열화학은 방향과 양을 말하고, 빠르기는 따로 따진다.

태오 그럼 다음 시간부터는 ΔH 를 정확히 정의하고, 그걸 재고, 계산하는 순서로 가는 거죠?

석 교수 그렇다. **기본개념편 제 2장** (27쪽)에서 ΔH 가 무엇인지, **기본개념편 제 3장** (37쪽)에서 반응식에 어떻게 적는지, **기본개념편 제 4장** (46쪽)에서 실험으로 어떻게 재는지 배운다. 그 다음 잴 수 없는 반응의 ΔH 를 계산하는 세 도구, 곧 헤스 법칙과 생성 엔탈피와 결합 에너지로 넘어간다. 기출의 대부분이 이 세 도구 가운데 하나 이상을 쓴다.

핵심 열의 장부를 쓰는 네 단계

1. 계를 정한다(반응하는 물질). 나머지는 모두 주위다.
2. 열이 계에서 나가면 발열($\Delta H < 0$), 계로 들어오면 흡열($\Delta H > 0$)로 부호를 붙인다.
3. 반응식의 ΔH 는 쓴 계수만큼 반응할 때의 값이다. 실제 양에 비례해 나눈다(철 $0.10 \text{ mol} \rightarrow 1648.4 \times 0.10/4 = 41.2 \text{ kJ}$).
4. 계가 잃은 열 = 주위가 얻은 열. 온도 변화를 계산할 때는 무엇이 열을 받는지 가정을 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 메테인이 타는 가스 불에서 계를 메테인과 산소로 잡을 때, 열의 방향과 ΔH 의 부호를 쓰라.
2. $4\text{Fe(s)} + 3\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{(s)}$, $\Delta H = -1648.4 \text{ kJ}$ 에서 철 11.2 g이 반응할 때 방출되는 열은? (Fe 56)
3. 얼음이 녹을 때 얼음을 계로 잡으면 q 의 부호는? 주위(공기)의 q 의 부호는?
4. 열린계·닫힌계·고립계 중 밀봉된 냉찜질 팩은 어느 것이고, 그 이유는?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

오늘의 두 봉지는 4부 기출에서 그대로 다시 나온다. **기출문제 2**(연세대 2023) (209쪽)은 냉찜질 팩의 재료인 질산 암모늄이 베이루트의 창고에서 폭발한 사건(2020년)을 제시문으로 주고, 그 분해 반응의 열을 계산하게 한다. 같은 물질이 물에 녹을 때는 흡열이지만 분해될 때는 큰 발열이라는 대비가 이 장의 계·부호 약속 위에서 읽힌다. **기출문제 7**(연세대 2020) (255쪽)은 손난로 속 반응인 철의 산화가 상온에서 저절로 일어나는 이유와 제련이 높은 온도를 필요로 하는 이유를 묻는데, 그 답은 발열·흡열만으로는 부족하고 **기본개념편 제 12장** (123쪽)의 자유 에너지까지 가야 완성된다. **기출문제 10**(연세대 2020) (280쪽)은 불·제련·비료·화석 연료처럼 문명을 바꾼 반응을 고르게 하는 문항으로, 반응마다 열이 나오는지 들어가는지를 한 줄씩 덧붙이면 열화학 답안이 된다.

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.

Joule, J. P. (1850). On the mechanical equivalent of heat. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 140, 61–82. <https://doi.org/10.1098/rstl.1850.0004>

노태희 외. (2018). 고등학교 화학 II. 천재교육.

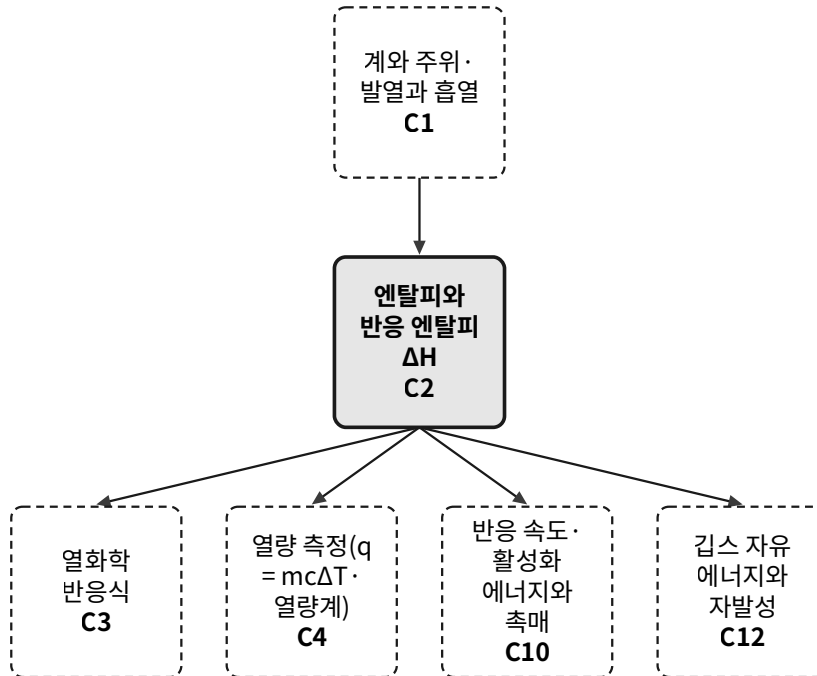
연세대학교 입학처. (2023). 2023학년도 수시모집 논술고사 문제 및 해설 [시험 자료].

제 2장 엔탈피: 일정한 압력에서 오가는 열

새 개념 엔탈피 H · 반응 엔탈피 ΔH · $\Delta H = q$ (일정 압력)

이어짐 계와 주위 1장 · 열화학 반응식 3장 · 자유 에너지 12장

이 장의 개념도



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

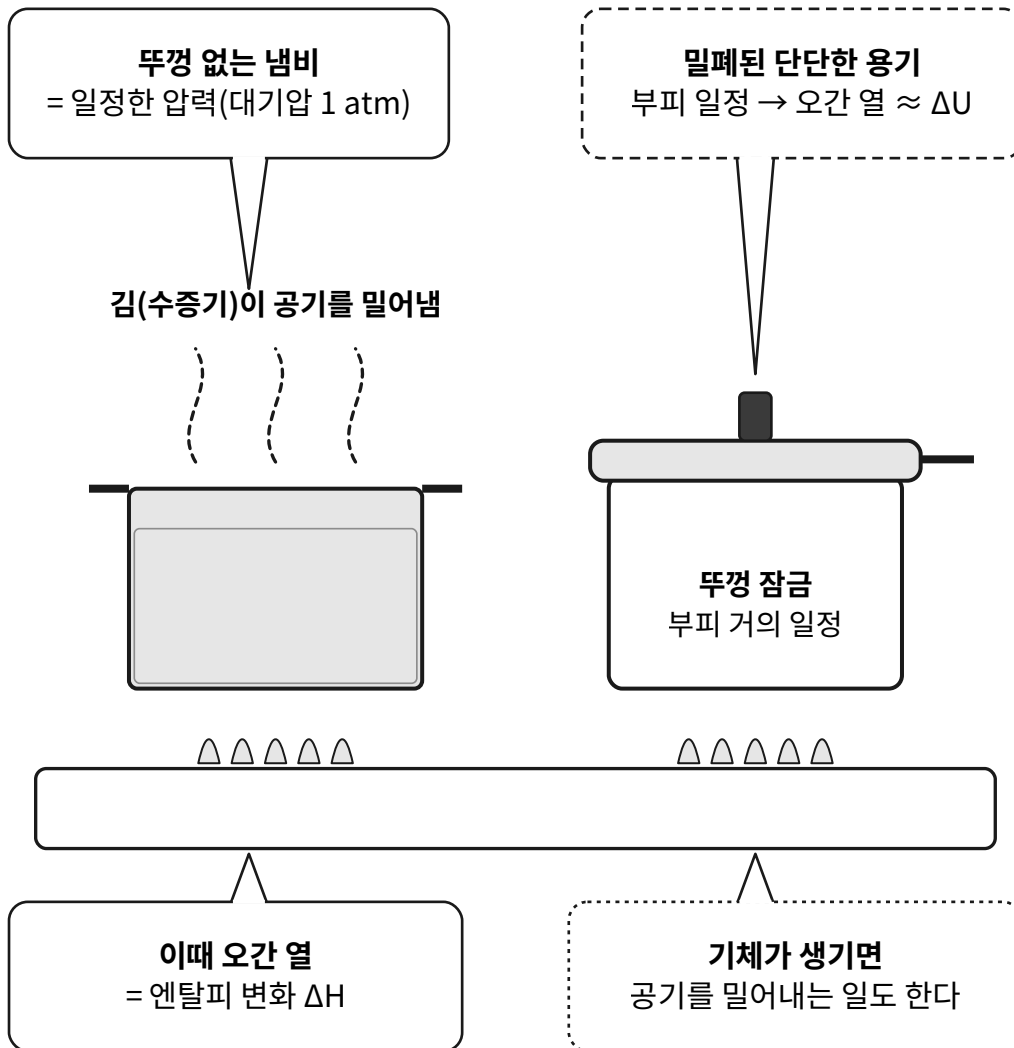
그림 6. 제 2장에서 배우는 개념(C2 엔탈피와 반응 엔탈피 ΔH)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

뚜껑 없는 냄비와 압력솥

열린 그릇의 열 = ΔH , 부피를 고정한 그릇의 열 $\approx \Delta U$



기체 1 mol이 생길 때 그 일 = $RT = 2.48 \text{ kJ (25 } ^\circ\text{C)}$

메테인 1 mol의 연소열 890 kJ에 비하면 1 %도 안 된다

그림 7. 가스 불 위의 뚜껑 없는 냄비와 밀폐된 압력솥 — 대기압이 일정한 냄비에서 오간 열은 ΔH 이고, 부피가 일정한 단단한 용기에서 오간 열은 ΔU 다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 일정한 압력에서 오간 열이 ΔH 다.
2. $\Delta H < 0$ 이면 발열, $\Delta H > 0$ 이면 흡열이다.
3. 기체 몰수 변화가 작으면 ΔH 와 ΔU 는 거의 같다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (17쪽)에서 정한 세 가지를 쓴다. ① 계와 주위, 그리고 계를 기준으로 붙이는 부호(계가 열을 받으면 +). ② 에너지 보존 $\Delta U = q + w$. ③ 기체 상태 방정식 $PV = nRT$ ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$). 압력과 부피를 곱하면 에너지 단위(J)가 된다는 것도 기억해 두자.

두 번째 토요일, 이모는 부엌에서 된장국을 끓이다가 냄비 뚜껑을 열어 둔 채 과학방으로 건너왔다. 하린은 뚜껑 없는 냄비 위로 김이 솟는 것을 보며 “저 김도 계에서 빠져나가는 거죠?”라고 물었다. 태오는 지난주 노트의 ΔH 옆에 물음표를 그려 놓고 있었다.

태오 교수님, 지난주에 ΔH 를 “열의 장부 숫자”라고 하셨잖아요. 그런데 교과서에는 “엔탈피 변화”라고 써 있어요. 엔탈피가 정확히 뭐예요? 그냥 열이라고 하면 안 돼요?

석 교수 오늘은 그 질문 하나에 답하는 날이다. 결론부터 말하면, 엔탈피 변화는 “압력이 일정할 때 오간 열”이다. 그런데 왜 굳이 압력이 일정하다는 조건이 붙는지, 그걸 알려면 냄비부터 봐야 해.

2.1 뚜껑 없는 냄비 — 대부분의 반응은 일정한 압력에서

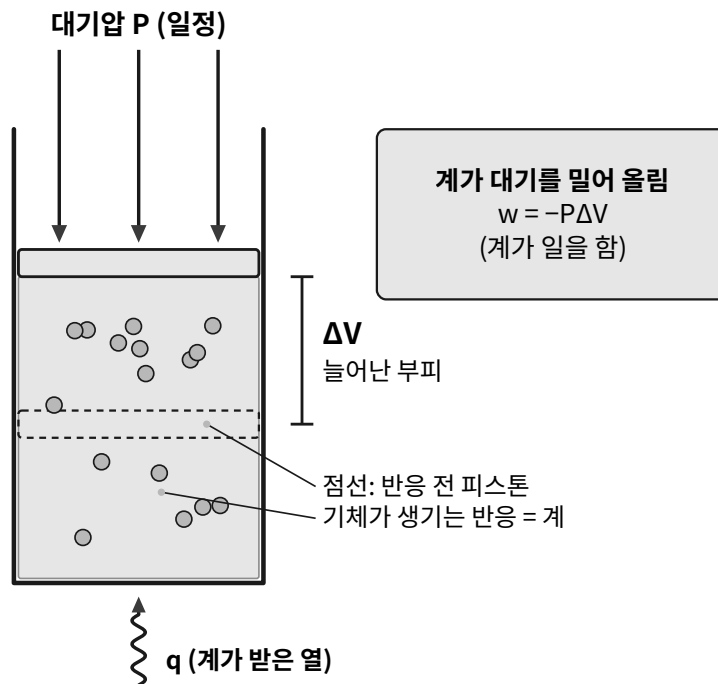
석 교수 이모님 냄비는 뚜껑이 열려 있지요? 그 냄비 속 국물 위에는 공기가 늘 누르고 있어요. 대기압, 약 1 atm이에요. 국물이 끓든 식든, 그 압력은 변하지 않아요.

이모 그러고 보니 실험실 비커도, 우리 몸속도, 손난로 봉지도 다 대기에 열려 있거나 대기압을 받고 있네요.

석 교수 맞아요. 우리가 보는 화학 반응은 거의 다 일정한 압력에서 일어나요. 그런데 압력이 일정하면 한 가지 일이 덩으로 생깁니다. 반응에서 기체가 생기면 그 기체가 자리를 차지하려고 바깥 공기를 밀어내요. 밀어낸다는 것은 일을 한다는 뜻이고요.

하린 일어요? 물건을 들어 올리는 것 같은 일어요?

석 교수 그렇다. **그림 8**처럼 피스톤이 달린 실린더 속에서 기체가 생긴다고 하자. 피스톤 위에는 대기가 누르고 있다. 기체가 늘어나 피스톤을 위로 밀어 올리면, 계는 주위에 일을 한 것이다. 그 크기는 압력 $\times$ 늘어난 부피, $P\Delta V$ 다. 계가 일을 했으니 계 기준으로는 $w = -P\Delta V$ 로 마이너스를 붙인다.



$$\Delta U = q + w \rightarrow \Delta H = \Delta U + P\Delta V = q \text{ (압력 일정)}$$

그림 8. 일정한 압력의 실린더 — 반응으로 기체가 생기면 늘어난 부피 ΔV 만큼 대기를 밀어 올리며 일($w = -P\Delta V$)을 한다. 그래서 계가 받은 열 q 중 일부는 일로 나가고 나머지만 내부 에너지 변화 ΔU 가 된다(모식도).

태오 그 일이 얼마나 커요? 지난주에 손난로에서 “아주 작다”고 하셨잖아요.

석 교수 직접 계산해 보자. 25 °C, 1 atm에서 기체 1 mol이 새로 생긴다면 늘어난 부피는 약 24.5 L이다. $P\Delta V = \Delta n \cdot RT$ 이니 $1 \times 8.314 \times 298 = 2478 \text{ J}$, 약 2.48 kJ이다.

$$P\Delta V = \Delta n(\text{기체}) \cdot RT = 1 \times 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \times 298 \text{ K} = 2.48 \text{ kJ}$$

이모 메테인 1 mol이 타면 890 kJ이 나온다고 했으니, 2.48 kJ은 1 %도 안 되네요.

석 교수 네. 그래서 대부분의 반응에서는 이 일을 무시해도 큰 차이가 없어요. 하지만 정의를 정확히 하려면 이 몫을 어디에 넣을지 정해야 하지요. 그 정리가 엔탈피입니다.

냄비와 압력솥

이모 그럼 압력솥은요? 뚜껑을 꼭 잠그면 안의 압력이 올라가잖아요. 그건 압력이 일정하지 않은 거죠?

석 교수 좋은 비교예요. 압력솥은 뚜껑을 잠가 부피를 거의 고정하고, 대신 안의 압력이 올라가게 됩니다. 부피가 변하지 않으니 안의 기체가 바깥을 밀어내는 일이 거의 없어요. 이런 그릇에서 오간 열은 엔탈피 변화가 아니라 내부 에너지 변화 ΔU 에 가깝습니다. 물론 진짜 압력솥은 추가 달린 밸브로 김을 조금씩 내보내니 완벽한 예는 아니예요. 실험실에서 부피를 정말로 고정하는 장치는 강철로 만든 통열량계인데, 그건 **기본개념편 제 4장** (46쪽)에서 봅니다.

태오 그럼 같은 반응이라도 냄비에서 재면 ΔH , 단단한 통에서 재면 ΔU 가 나오는 거네요.

석 교수 그렇다. 둘은 계가 일을 했느냐 안 했느냐만큼 다르다. 기체가 생기는 반응이라면 냄비 쪽에서는 그 기체가 대기를 밀어내느라 에너지 일부를 일로 쓰니, 열로 나오는 몫이 그만큼 줄어든다. 기체가 줄어드는 반응이면 반대로 대기가 계를 눌러 주니 열이 조금 더 나온다. 어느 쪽이든 차이는 $P\Delta V$ 하나다.

하린 고체나 액체만 있는 반응은요?

석 교수 부피 변화가 아주 작아서 $P\Delta V$ 가 거의 0이다. 그래서 ΔH 와 ΔU 가 사실상 같다. 차이를 따질 때는 기체만 보면 된다는 뜻이고, 그게 다음 절의 계산 규칙이 된다.

2.2 엔탈피 $H = U + PV$

석 교수 과학자들은 내부 에너지 U 에 PV 를 더한 양을 새로 정의하고 **엔탈피(enthalpy)** H 라고 불렀다. 그리스어로 “안에 든 열”이라는 뜻이고, 20세기 초 네덜란드의 물리학자 카메를링 오너스가 붙인 이름으로 알려져 있다.

하린 왜 하필 PV 를 더해요? 아무거나 더해도 되는 거예요?

석 교수 아무거나는 아니다. 대기가 누르고 있는 곳에 계가 자리를 차지하려면, 그 자리만큼의 공기를 밀어내야 한다. PV 는 “지금 차지한 자리를 만들기 위해 대기를 밀어낸 일”이라고 생각할 수 있다. U 만 보면 계 안의 에너지만 세지만, H 는 그 자리값까지 함께 센다. 그래서 대기에 열린 그릇에서 오간 열을 깔끔하게 장부에 적을 수 있다.

태오 집값에 자릿세를 포함해서 계산하는 거네요.

석 교수 비유가 재미있구나. 그 자릿세가 반응 동안 늘었다 줄었다 하는 몫이 $P\Delta V$ 이고, 엔탈피는 그것까지 품고 있다.

$$H = U + PV$$

석 교수 압력이 일정할 때 H 가 얼마나 변하는지 보자. $\Delta H = \Delta U + P\Delta V$ 다. 그런데 $\Delta U = q + w$ 이고, 일정 압력에서 $w = -P\Delta V$ 이니까 대입하면 $\Delta H = q - P\Delta V + P\Delta V = q$. 일 항이 정확히 지워진다.

$$\Delta H = q_p \text{ (일정한 압력에서 계가 주고받은 열)}$$

하린 와, 그래서 “엔탈피 변화 = 일정한 압력에서 오간 열”이군요. 복잡한 일 계산을 안 해도 되겠네요.

석 교수 그게 엔탈피를 만든 이유다. 열량계로 잰 열이 그대로 ΔH 가 되니까, 실험값을 바로 장부에 적을 수 있다. 여기서 한 가지 더. 우리는 H 자체의 크기는 모른다. U 를 모르니 H 도 모른다. 알 수 있는 것은 반응 전후의 차이 ΔH 뿐이다.

태오 그럼 반응 엔탈피는 생성물의 H 에서 반응물의 H 를 뺀 거예요?

석 교수 그렇다. $\Delta H = H(\text{생성물}) - H(\text{반응물})$ 로 정의하고, 이것을 **반응 엔탈피**라고 한다. 각 물질의 H 는 모르지만 그 차이는 열로 나타나니 잴 수 있다. 경희대 2024학년도 제시문도 똑같이 “각 물질이 가지는 엔탈피를 측정할 수는 없지만, 반응물과 생성물의 엔탈피 변화는 열 에너지 형태로 나타나므로 열의 출입을 측정하면 엔탈피 변화를 알 수 있다”고 썼다.

이모 산의 높이를 해수면에서 재는 것과 비슷하네요. 지구 중심에서 몇 km인지는 몰라도 두 산의 높이 차이는 정확히 알 수 있으니까요.

석 교수 좋은 비유예요. 기준점만 정하면 높이 차이로 모든 걸 말할 수 있어요. 그 기준점을 정하는 이야기가 **기본개념편 제 7장** (74쪽)의 표준 생성 엔탈피고요.

표 5에 오늘 나온 네 가지 양을 정리했다.

표 5. 열·일·내부 에너지·엔탈피 비교 — 기호, 뜻, 부호 약속, 측정 조건

양	기호	뜻	부호 약속(계 기준)	측정 조건
열	q	온도 차이로 경계를 넘는 에너지	계가 받으면 +	경로에 따라 다름
일	w	힘으로 경계를 넘는 에너지(기체 팽창 $-P\Delta V$)	계가 받으면 +	경로에 따라 다름
내부 에너지 변화	ΔU	계 속 입자 에너지 합의 변화	늘면 +	부피 일정일 때 q_v
엔탈피 변화	ΔH	$U + PV$ 의 변화	늘면 +(흡열)	압력 일정일 때 q_p

2.3 ΔH 와 ΔU 는 얼마나 다른가

태오 그러면 ΔH 와 ΔU 는 $P\Delta V$ 만큼 다른 거죠? 고체와 액체는 부피가 거의 안 변하니까, 기체만 세면 되겠네요.

석 교수 정확하다. 기체 몰수 변화를 $\Delta n(\text{기체})$ 라고 쓰면 $P\Delta V = \Delta n(\text{기체}) \cdot RT$ 이니 $\Delta H = \Delta U + \Delta n(\text{기체}) \cdot RT$. 고체와 액체는 세지 않는다.

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n(\text{기체}) \cdot RT$$

문제 2.1

$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\Delta H = -285.8 \text{ kJ}$ 이다. $25^\circ\text{C}(298 \text{ K})$ 에서 이 반응의 ΔU 는 몇 kJ인가? ΔH 와 ΔU 의 차이는 몇 %인가? ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

하린 기체 몰수 변화부터 세요. 반응물에는 H_2 1 mol과 O_2 0.5 mol, 합 1.5 mol이 기체예요. 생성물 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 는 액체라서 0이에요. $\Delta n = 0 - 1.5 = -1.5 \text{ mol}$.

태오 그럼 $\Delta U = \Delta H - \Delta nRT = -285.8 - (-1.5 \times 8.314 \times 298 \div 1000)$ 이에요. $1.5 \times 8.314 \times 298 = 3716 \text{ J} = 3.72 \text{ kJ}$ 이니까 $-285.8 + 3.72 = -282.1 \text{ kJ}$.

석 교수 정답은 $\Delta U = -282.1 \text{ kJ}$ 이다. 차이는 $3.72 \div 285.8 = 1.3 \%$ 다. 어느 쪽 절댓값이 더 큰지도 말로 설명해 볼까?

태오 기체가 줄어드니까 바깥 대기가 계를 눌러서 계에 일을 해 줘요. 그 일 3.72 kJ도 결국 열로 빠져나가니까, 압력이 일정할 때 나오는 열(285.8)이 부피가 일정할 때 나오는 열(282.1)보다 조금 커요.

석 교수 훌륭하다. 여기서 흔한 실수가 둘 있다. 첫째, R 을 8.314 J로 계산해 놓고 kJ인 ΔH 와 바로 더하는 것. 1000으로 나누는 단계를 반드시 보여라. 둘째, 액체 물을 기체로 세는 것. 상태 표시 (l)을 보고 기체 몰수에서 뺀다.

기체 몰수가 변하지 않으면

하린 기체 몰수가 그대로인 반응도 있어요?

석 교수 많다. 수소와 염소가 만나 염화 수소가 되는 $\text{H}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{HCl}(\text{g})$ 은 기체 2 mol이 기체 2 mol이 된다. 숯이 타는 $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ 도 기체 1 mol이 기체 1 mol이 된다. 탄소는 고체라 세지 않는다. 이런 반응은 $\Delta n(\text{기체}) = 0$ 이라 $\Delta H = \Delta U$ 다.

태오 메테인 연소 $\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 은 기체 3 mol이 1 mol로 줄어드니까 $\Delta n = -2$ 이고, 차이는 $2 \times 2.48 = 4.96 \text{ kJ}$ 이네요. 890.3에 비하면 0.6 %예요.

석 교수 잘 됐다. 그런데 물을 수증기 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 로 쓰면 기체가 3 mol에서 3 mol, $\Delta n = 0$ 이 된다. 같은 메테인 연소라도 물의 상태를 어떻게 쓰느냐에 따라 기체 몰수가 달라지고, 사실 ΔH 자체도 크게 달라진다. 상태 표시가 왜 중요한지는 **기본개념편 제 3장** (37쪽)과 **기본개념편 제 5장** (56쪽)에서 자세히 본다.

이모 단위를 맞추는 게 결국 제일 중요하네요. J과 kJ이 섞이면 답이 1000배 틀리니까요.

석 교수 그 단계는 **기본개념편 제 12장** (123쪽)의 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 에서 다시 나와요. ΔS 가 J 단위로 주어지거든요. 오늘 습관을 들여 두면 그때 편해요.

2.4 엔탈피 도표 읽기

석 교수 엔탈피의 크기는 모르지만 차이는 아니까, 높이로 그리면 반응이 한눈에 보인다. **그림 9**가 **엔탈피 도표**다. 세로축이 엔탈피이고, 반응물과 생성물을 가로 막대로 그린다. 두 막대의 높이 차이가 ΔH 다.

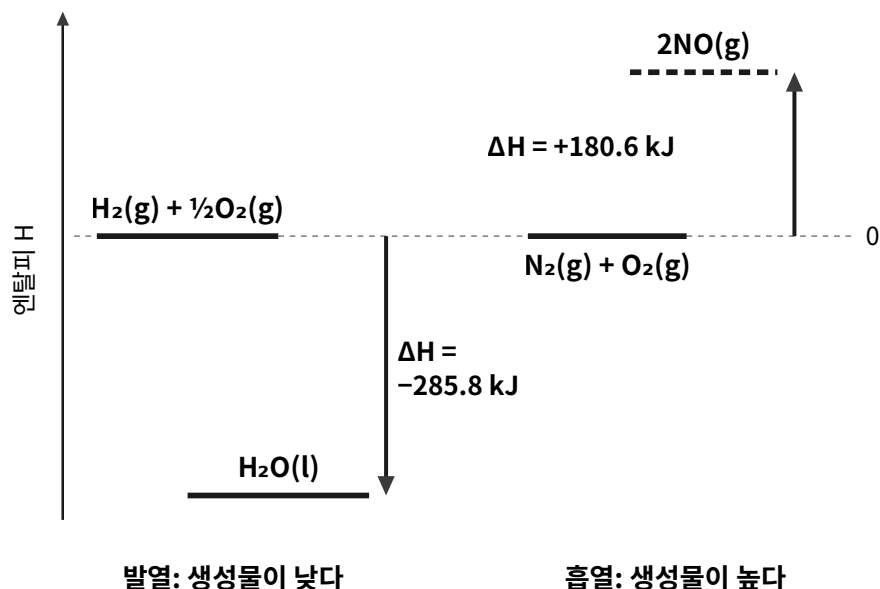


그림 9. 엔탈피 도표 두 개를 같은 축척으로 그렸다 — 수소 연소($\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$)는 생성물이 285.8 kJ 낮아 발열이고, 일산화 질소 생성($\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$)은 생성물이 180.6 kJ 높아 흡열이다. 막대 사이의 높이는 값에 비례하게 계산했다.

하린 왼쪽은 생성물이 아래에 있으니 화살표가 아래로 가요. 발열이고 $\Delta H < 0$. 오른쪽은 위로 올라가니까 흡열이고요.

석 교수 그렇다. 화살표가 아래면 발열, 위면 흡열. 이것 하나만 확실히 기억하면 도표 문제는 다 읽힌다. 오른쪽 반응은 자동차 엔진에서 실제로 일어난다. 공기 속 질소와 산소는 평소에 반응하지 않지만, 엔진 속 1000 °C가 넘는 온도에서는 흡열 반응인 $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$ 가 일어나 대기 오염 물질 NO가 생긴다.

태오 흡열 반응은 열을 계속 줘야 일어나니까, 뜨거운 곳에서만 생기는 거네요.

석 교수 맞는 감각이다. NO 1 mol당으로 나누면 $180.6 \div 2 = 90.3$ kJ이 든다. 다만 “흡열이면 높은 온도에서만 일어난다”를 정확히 증명하려면 **기본개념편 제 12장** (123쪽)의 자유 에너지가 필요하다. 지금은 엔진에서 NO가 생기고, 그것을 다시 N_2 와 O_2 로 되돌리는 장치가 **기본개념편 제 9장** (93쪽)에서 볼 촉매 변환기라는 것만 알아 두자.

이모 도표에서 높이 차이를 같은 축척으로 그렸다는 게 무슨 뜻이에요?

석 교수 285.8과 180.6의 비율대로 막대 사이 간격을 그렸다는 뜻이에요. 눈술 답안에서 엔탈피 도표를 그릴 때도, 정확한 눈금까지는 아니더라도 큰 값은 길게, 작은 값은 짧게 그려야 읽는 사람이 오해하지 않아요.

답안에 엔탈피 도표를 그리는 순서

① 세로축에 “엔탈피(H)”라고 쓰고 위쪽이 큰 값을 화살표로 표시한다. ② 반응물을 한 막대에 계수와 상태까지 적는다($H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g)$). ③ 생성물 막대를 ΔH 의 부호에 맞게 아래(발열)나 위(흡열)에 그린다. ④ 두 막대 사이에 반응물에서 생성물로 향하는 화살표를 긋고 ΔH 값을 단위와 함께 쓴다. ⑤ 활성화 에너지를 묻지 않았으면 언덕은 그리지 않는다. 언덕은 **기본개념편 제 9장** (93쪽)의 에너지 도표에서 따로 다룬다.

태오 화살표 방향을 반대로 그리면요? 생성물에서 반응물 쪽으로요.

석 교수 그러면 역반응의 ΔH 를 그린 셈이라 부호가 거꾸로 읽힌다. 화살표는 언제나 반응물에서 생성물로. 이 습관 하나가 도표 문항의 감점을 막는다.

열의 단위와 음식의 열량

이모 식품 포장지에는 kJ 말고 kcal로 써 있잖아요. 둘은 어떻게 바뀌요?

석 교수 1 cal는 물 1 g을 1 °C 올리는 데 드는 열로 정했고, 1 cal = 4.184 J입니다. 그러니 1 kcal = 4.184 kJ이에요. 식품의 “칼로리”는 사실 kcal를 줄여 부르는 말이고요.

문제 2.2

포도당의 연소 $C_6H_{12}O_6(s) + 6O_2(g) \rightarrow 6CO_2(g) + 6H_2O(l)$ 의 ΔH 는 -2803 kJ이다. 포도당 1 g이 완전히 연소할 때 나오는 열을 kJ과 kcal로 각각 구하라. ($C_6H_{12}O_6 = 180$, 1 kcal = 4.184 kJ)

하린 포도당 1 g은 $1 \div 180$ mol이니까 $2803 \div 180 = 15.6$ kJ이에요.

태오 kcal로는 $15.57 \div 4.184 = 3.72$ kcal예요. 영양 성분표에서 탄수화물은 1 g에 4 kcal라고 하던데 조금 다르네요.

석 교수 정답은 15.6 kJ/g, 3.72 kcal/g이다. 성분표의 4 kcal/g은 여러 탄수화물(녹말·설탕 등)을 평균해 반올림한 값이다. 녹말은 포도당끼리 물이 빠지며 이어진 것이라 1 g당 열이 포도당보다 조금 크지. 또 몸속 호흡은 천천히 여러 단계로 일어나지만 처음과 끝이 같으니 ΔH 도 같다. 이 “처음과 끝만 본다”는 성질이 **기본개념편 제 6장** (65쪽)의 헤스 법칙이다.

이모 몸속에서 천천히 태우나 불에 확 태우나 나오는 열은 같다니 신기하네요.

석 교수 엔탈피가 처음 상태와 나중 상태만으로 정해지는 양, 곧 상태 함수이기 때문이에요. 열 q와 일 w는 각각 경로에 따라 달라지지만, 일정한 압력이라는 조건을 붙이면 q가 ΔH 와 같아져서 경로와 상관없어져요.

상태 함수와 경로 함수

온도·압력·부피·내부 에너지·엔탈피처럼 지금 상태만 알면 값이 정해지는 양을 상태 함수라 한다. 서울에서 부산까지의 고도 차이는 어느 길로 가든 같은 것과 같다. 반대로 열과 일은 어떤 과정을 거쳤느냐에 따라 달라지는 경로 함수다. 같은 고도 차이를 내려가도 걷느냐 미끄럼틀을 타느냐에 따라 쓰는 힘이 다른 것과 같다. $\Delta H = q_p$ 는 “압력 일정, 부피 팽창 외의 일 없음”이라는 조건을 붙여 경로 함수인 열을 상태 함수의 변화와 같게 만든 식이다. 전지처럼 전기 일을 하는 반응에서는 q 가 ΔH 와 달라지는데, 그 이야기는 **기본개념편 제 14장** (143쪽)의 연료 전지에서 나온다.

하린 그럼 포도당을 몸에서 태우면 일부는 전기 일 같은 걸로 쓰여서 열이 덜 나와요?

석 교수 날카로운 질문이다. 몸속에서는 포도당의 에너지 일부가 ATP라는 분자에 저장되었다가 근육을 움직이는 일에 쓰인다. 그래서 어느 한순간에 나오는 열은 2803 kJ보다 적다. 하지만 그 일도 결국 마찰과 체온으로 바뀌니, 처음부터 끝까지 모두 합치면 같은 2803 kJ이다. ΔH 는 처음과 끝만 보고, 중간에 일로 갔다 열로 갔다 하는 뉘는 장부의 같은 칸에 결국 모인다.

이모 그래서 식품의 열량을 불에 태워서 재도 몸에서 얻는 열량과 같다고 하는 거군요.

석 교수 네. 다만 몸이 소화하지 못하는 식이 섬유처럼 불에는 타지만 흡수되지 않는 성분은 빼고 계산해요. 그건 화학이 아니라 영양학의 보정이에요.

핵심 엔탈피를 쓰는 네 가지 요점

1. 엔탈피 $H = U + PV$. 일정한 압력에서 $\Delta H = q_p$ (계가 주고받은 열)다.
2. H 의 절댓값은 모르고, 반응 엔탈피 $\Delta H = H(\text{생성물}) - H(\text{반응물})$ 만 잴다.
3. $\Delta H < 0$ 이면 발열(도표의 화살표가 아래), $\Delta H > 0$ 이면 흡열(위).
4. ΔH 와 ΔU 의 차이는 $\Delta n(\text{기체}) \cdot RT$ 이다. R 의 J 를 kJ 로 바꾸는 $\div 1000$ 을 반드시 보인다.

스스로 풀어 보기

1. 엔탈피 도표에서 생성물 막대가 반응물 막대보다 아래에 있다. 이 반응은 발열인가 흡열인가, ΔH 의 부호는?
2. $\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\Delta H = -890.3 \text{ kJ}$ 일 때 25°C 에서 ΔU 를 구하라.
3. 에탄올 1 g이 탈 때 29.7 kJ이 나온다. 몇 kcal인가?
4. 엔탈피의 절댓값을 잴 수 없는데도 반응 엔탈피를 알 수 있는 이유를 한 문장으로 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 정의는 4부 기출의 제시문에 거의 문장 그대로 나온다. **기출문제 1**(경희대 2024) (200쪽)의 제시문 [사]는 “각 물질이 가지는 엔탈피는 측정할 수 없지만 열의 출입으로 엔탈피 변화를 알 수 있다”는 오늘의 결론을 주고, 반응 엔탈피가 계수에 비례한다는 **기본개념편 제 3장** (37쪽)의 규칙으로 이어 간다. **기출문제 3**(경희대 2023) (220쪽)의 제시문 [다]도 “엔탈피의 절대량을 아는 것은 불가능하지만 엔탈피 변화는 열로 나타난다”고 설명한 뒤 결합 에너지 계산을 시킨다. **기출문제 12**(성균관대 2016) (295쪽)의 제시문 가는 반응 엔탈피를 생성물의 엔탈피 합에서 반응물의 엔탈피 합을 뺀 값으로 정의하고, 문제 2-이에서 촉매가 있어도 그 값이 그대로인지 묻는다. ΔH 가 처음과 끝의 높이 차이일 뿐이라는 이 장의 엔탈피 도표를 그려 두면 답이 저절로 보인다. 세 문항 모두 정의 문장을 제시문에 그대로

로 주므로, 답안 첫 줄에 “일정한 압력에서 반응 엔탈피는 생성물과 반응물의 엔탈피 차이이며 출입한 열과 같다”를 한 번 적고 계산을 시작하면 채점자가 개념을 확인할 수 있다. 정의를 쓰고, 부호를 정하고, 단위를 붙이는 세 동작이 열화학 답안의 뼈대이며, 이 셋은 다음 장의 열화학 반응식 규칙으로 그대로 이어진다.

이 장의 참고문헌

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). Atkins' physical chemistry (10th ed.). Oxford University Press.

Zumdahl, S. S., & Zumdahl, S. A. (2014). Chemistry (9th ed.). Cengage Learning.

경희대학교 입학처. (2024). 2024학년도 수시모집 논술고사 문제 및 해설 [시험 자료].

제 3장 열화학 반응식을 쓰는 규칙

새 개념 상태 표시 · 계수와 ΔH 의 비례 · 역반응의 부호

이어짐 엔탈피 2장 · 헤스 법칙 6장 · 반응열의 종류 7장

이 장의 개념도

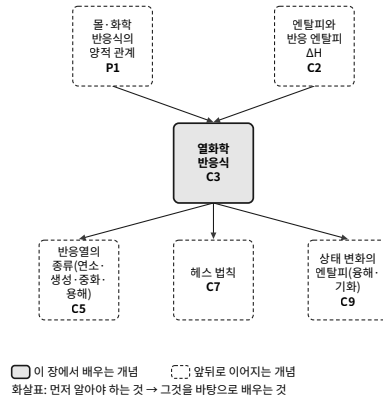


그림 10. 제 3장에서 배우는 개념(C3 열화학 반응식)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

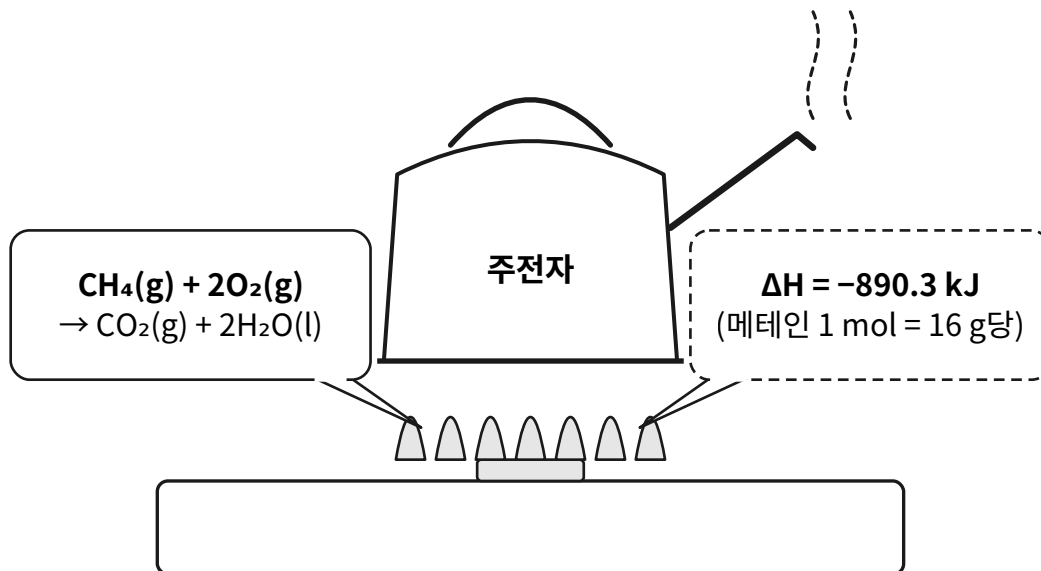
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 1 (경희대 2024년) (200쪽)	결합 에너지와 헤스 법칙으로 쓰는 열화학 반응식	C3 열화학 반응식
기출 2 (연세대 2023년) (209쪽)	질산 암모늄 폭발과 결합 에너지	C3 열화학 반응식
기출 3 (경희대 2023년) (220쪽)	결합 에너지로 본 NO 환원과 반응 속도식	C3 열화학 반응식
기출 4 (연세대 2021년) (231쪽)	헤스 법칙으로 비교하는 화석 연료의 온실 효과	C3 열화학 반응식
기출 5 (연세대 2021년) (239쪽)	화력 발전과 연료 전지의 전기 에너지	C3 열화학 반응식
기출 8 (연세대 2020년) (263쪽)	바이오 에탄올과 수소 연료 전지의 1 g당 에너지	C3 열화학 반응식
기출 9 (경희대 2020년) (271쪽)	아세틸렌과 벤젠, 생성 엔탈피로 잰 연료 가치	C3 열화학 반응식
기출 11 (연세대 2019년) (287쪽)	원소 분석과 헤스 법칙으로 쓰는 불완전 연소식	C3 열화학 반응식
기출 14 (연세대 2012년) (319쪽)	외계 행성의 광합성과 결합 에너지 장부	C3 열화학 반응식

가스레인지의 파란 불꽃

도시가스(메테인)가 완전 연소하는 열화학 반응식



두 배 태우면
열도 두 배 (-1780.6 kJ)

(g)·(l) 상태 표시가 없으면
답이 0점

파란 불꽃 = 산소가 충분한 완전 연소
노란 불꽃 = 그을음, 불완전 연소(CO 생성 위험)
메테인 8.0 g → 0.50 mol → 445 kJ
반응식을 뒤집으면 $\Delta H = +890.3 \text{ kJ}$

그림 11. 가스레인지의 파란 메테인 불꽃 위에서 끓는 주전자 — 메테인 1 mol(16 g)이 타면 890.3 kJ이 나오고, 두 배를 태우면 열도 두 배다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 열화학 반응식에는 상태와 ΔH 를 함께 쓴다.
2. 계수를 몇 배 하면 ΔH 도 같은 배수가 된다.
3. 반응을 뒤집으면 ΔH 의 부호가 바뀐다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 2장 (27쪽)의 결론 두 가지를 쓴다. ① 일정한 압력에서 ΔH 는 오간 열이고, $\Delta H < 0$ 이면 발열이다. ② ΔH 는 생성물과 반응물의 엔탈피 차이로, 처음과 끝만 본다. 여기에 화학 1의 몰 계산(질량 $\div$ 화학식량 = 몰수, 반응식 계수비 = 몰수비)을 더한다. $\text{CH}_4 = 16$, $\text{H}_2\text{O} = 18$, $\text{CO}_2 = 44$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 30$ 이다.

세 번째 토요일, 과학방 부엌의 가스레인지에서 주전자 물이 끓고 있었다. 하린은 불꽃이 왜 파란지 물었고, 태오는 경희대 기출 채점 기준을 출력해 와서 한 줄에 형광펜을 칠해 두었다. “화학 반응식에 상태 표시 없으면 0점. 단위 틀리면 0점.”

태오 교수님, 이거 보세요. 계산을 다 맞혀도 (g), (l)을 안 쓰면 0점이라요. 너무한 거 아니에요?

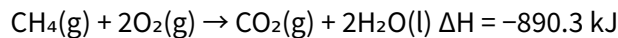
석 교수 너무한 게 아니라 당연한 거다. 오늘 그 이유를 보여 주마. 열화학 반응식은 화학 반응식에 열의 장부를 붙인 것이다. 장부에 붙는 숫자는 무엇이 어떤 상태로 몇 mol 반응했는지에 따라 달라진다. 그 조건 하나라도 빠지면 숫자가 무엇을 뜻하는지 알 수 없게 된다.

이모 영수증에 금액만 있고 무슨 물건을 몇 개 샀는지 없으면 쓸모가 없는 것과 같네요.

석 교수 딱 그 비유예요. 오늘은 그 영수증을 바르게 쓰는 규칙 네 가지를 배웁니다.

3.1 반응식에 열을 붙여 쓰기

석 교수 저 가스 불꽃에서 일어나는 반응을 써 보자. 도시가스의 주성분은 메테인이다.



석 교수 이것이 **열화학 반응식**이다. 보통 화학 반응식과 다른 점이 두 가지다. 첫째, 모든 물질 뒤에 상태를 괄호로 쓴다. 기체 (g), 액체 (l), 고체 (s), 수용액 (aq). 둘째, 반응식 옆에 ΔH 를 쓴다. 온도와 압력을 따로 쓰지 않으면 25 °C, 1 atm에서의 값으로 읽는다.

하린 $\Delta H = -890.3 \text{ kJ}$ 은 메테인 1 mol이 탈 때의 열이에요?

석 교수 정확히는 “이 반응식에 쓴 그대로, 메테인 1 mol과 산소 2 mol이 반응해 CO_2 1 mol과 액체 물 2 mol이 될 때”의 값이다. 반응식의 계수가 곧 몰수이고, ΔH 는 그 몰수 묶음 전체에 붙는 값이다. 그래서 단위를 kJ로 쓴다. “메테인 1 mol당”을 강조하고 싶으면 kJ/mol로 쓰는데, 이때는 무엇 1 mol당인지 말로 밝혀야 한다.

이모 25 °C, 1 atm이 아니면 값이 달라져요?

석 교수 조금 달라져요. 예를 들어 물이 수증기가 되는 열은 25 °C에서 1 mol당 44.0 kJ이지만, 끓는점인 100 °C에서는 40.7 kJ이에요. 온도가 높을수록 물 분자들이 이미 활발하게 움직이고 있어서 떼어 내는 데 드는 열이 조금 줄어들죠. 그래서 25 °C가 아닌 값을 쓸 때는 반응식 옆에 온도를 꼭 적어야 해요. 이 기준 조건을 표준 상태라고 부르는데, 정확한 정의는 **기본개념편 제 7장 (74쪽)**에서 다시 다룹니다.

하린 그러니까 상태, 양, 온도와 압력까지 다 적어야 ΔH 숫자가 무엇을 뜻하는지 정해지는 거네요.

석 교수 그렇다. 열화학 반응식 한 줄에는 “무엇이(물질), 어떤 모습으로(상태), 얼마나(계수), 어떤 조건에서(온도·압력) 반응해 열이 얼마나 오갔는지(ΔH)”가 다 들어 있다. 다섯 가지 중 하나라도 빠지면 장부가 성립하지 않는다.

태오 불꽃이 파란 건요?

석 교수 산소가 충분해서 완전 연소가 일어날 때의 색이다. 불꽃 속에서 들뜬 C_2 나 CH 같은 조각이 파란 빛을 낸다. 산소가 모자라 그을음(탄소 알갱이)이 생기면 그 알갱이가 달아올라 노란 빛을 낸다. 노란 불꽃이 보이면 불완전 연소라 일산화 탄소가 생길 수 있으니 공기 조절 장치를 손봐야 한다. 같은 메테인이라도 완전 연소냐 불완전 연소냐에 따라 생성물이 달라지고, 생성물이 다르면 ΔH 도 달라진다.

옛 표기와 헷갈리지 않기

예전 교재와 일부 학원 자료는 열을 반응식의 한 항처럼 “ $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 890.3 \text{ kJ}$ ”로 쓰기도 했다. 이 표기에서 생성물 쪽의 $+890.3 \text{ kJ}$ 은 “열이 나온다”는 뜻이므로 $\Delta H = -890.3 \text{ kJ}$ 과 같은 내용이다. 부호가 반대로 보이니 제시문이 어느 표기를 쓰는지 먼저 확인하고, 답안은 ΔH 표기로 통일한다.

3.2 규칙 네 가지

석 교수 이제 규칙을 정리하자. 그림 12에 같은 반응식을 네 가지로 바꿨을 때 ΔH 가 어떻게 바뀌는지 그려 두었다.

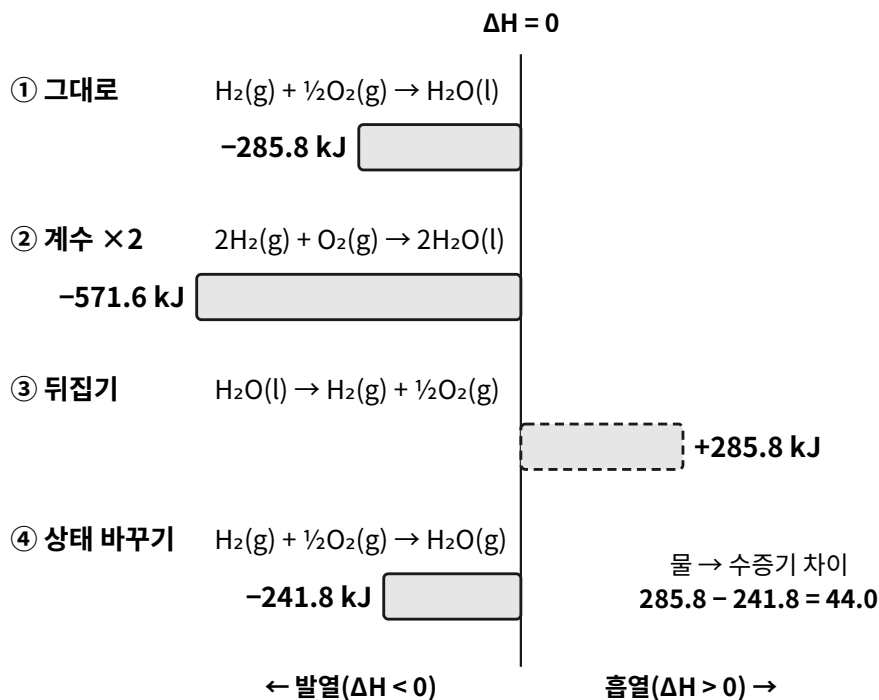


그림 12. 열화학 반응식의 네 가지 규칙 — 같은 수소 연소 반응을 ① 그대로 ② 계수 $\times 2$ ③ 뒤집기 ④ 생성물의 상태 바꾸기로 바꾸었을 때 ΔH 가 어떻게 달라지는지 보여 준다. 막대 길이는 ΔH 의 크기에 비례하게 계산했다.

석 교수 규칙 ①, 상태 표시는 반드시 쓴다. 같은 H_2O 라도 액체와 기체는 엔탈피가 다르다. 규칙 ②, 계수를 n 배 하면 ΔH 도 n 배다. 반응하는 양이 두 배면 열도 두 배니까. 규칙 ③, 반응을 뒤집으면 ΔH 의 크기는 같고 부호만 반대다. 내려온 만큼 올라가야 하니까. 규칙 ④, 분수 계수를 써도 된다. 연소열처럼 “연료 1 mol 기준”으로 쓰려면 산소가 $\frac{1}{2}$ 이나 $\frac{7}{2}$ 가 되기도 한다.

하린 ①번 그림에서 $H_2O(l)$ 과 $H_2O(g)$ 는 막대 길이가 달라요. 같은 물인데요.

석 교수 물이 수증기가 되려면 열이 든다. 그러니 수증기가 액체 물보다 엔탈피가 높다. 수소를 태워 수증기를 만들면 그 차이만큼 열이 덜 나온다. $2\text{H}_2\text{O}$ 로 보면 -571.6 과 -483.6 , 88.0 kJ 차이다. 물 1 mol당 44.0 kJ, 이게 25°C 물의 기화열이다. **기본개념편 제 5장** (56쪽)에서 자세히 본다.

태오 그래서 상태 표시가 없으면 0점이군요. 상태가 없으면 -571.6 인지 -483.6 인지 알 수가 없으니까요.

석 교수 바로 그거다. 채점 기준이 가혹한 게 아니라, 상태가 없는 열화학 반응식은 틀린 숫자일 가능성이 반이라는 뜻이다. 단위도 마찬가지로. kJ을 J로 쓰면 1000배 틀린 장부가 된다.

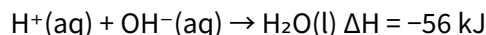
(s) 안에 들어가는 이름, 그리고 (aq)

하린 문제 답안에 C(s, 흑연)이라고 쓰던데, 그냥 C(s)라고 쓰면 안 돼요?

석 교수 탄소의 고체는 한 가지가 아니다. 연필심의 흑연과 반지의 다이아몬드가 둘 다 C(s)다. 둘은 엔탈피가 달라서, 다이아몬드가 흑연보다 1 mol당 1.9 kJ 높다. 그래서 다이아몬드를 태우면 흑연보다 1.9 kJ 더 많은 열이 나온다. 같은 원소의 고체가 여러 형태로 있을 때는 이름까지 써 주는 것이 정확하다. 이것을 동소체라고 부른다.

태오 황이나 인에도 동소체가 있었죠. 사방황, 단사황 같은 거요.

석 교수 그렇다. 고교 시험에서는 대부분 탄소만 나오니 “C(s, 흑연)”을 기억해 두면 충분하다. 다음은 (aq)다. 물에 녹아 이온으로 흩어진 상태를 뜻한다. 산과 염기의 중화를 이온으로 쓰면 이렇다.



이모 염산이든 질산이든 수산화 나트륨이든 수산화 칼륨이든 다 같은 반응이 되네요?

석 교수 네, 강산과 강염기는 물에서 거의 다 이온으로 나뉘어 있어서, 실제로 반응하는 것은 H^+ 와 OH^- 뿐이에요. 나머지 이온은 구경만 하죠. 그래서 강산과 강염기의 중화열은 종류와 상관없이 물 1 mol당 약 -56 kJ으로 거의 같아요. 이 값을 열량계로 직접 재는 실험이 **기본개념편 제 4장** (46쪽)에 나와요.

표 7은 답안을 내기 전에 확인할 다섯 항목이다.

표 7. 열화학 반응식 점검표 — 다섯 항목, 맞는 예와 틀린 예

항목	확인할 것	맞는 예	틀린 예
상태	모든 물질 뒤에 (s)(l)(g)(aq)	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$2\text{H}_2\text{O}$
계수	원자 수가 양쪽에서 같은가	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
부호	발열이면 -, 흡열이면 +	$\Delta H = -890.3 \text{ kJ}$	$\Delta H = 890.3 \text{ kJ}$ (발열인데 +)
단위	반응식 전체는 kJ, 1 mol당이면 kJ/mol과 기준 물질	-890.3 kJ	-890.3 J
조건	$25^\circ\text{C} \cdot 1 \text{ atm}$ 이 아니면 따로 적는다	(100°C 에서) $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 40.7 kJ	온도 없이 40.7 kJ

문제 3.1

$\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\Delta H = -890.3 \text{ kJ}$ 이다. (가) 메테인 2 mol 기준으로 열화학 반응식을 다시 쓰라. (나) 역반응의 열화학 반응식을 쓰라. (다) 메테인 8.0 g이 완전 연소할 때 나오는 열은 몇 kJ인가? ($\text{CH}_4 = 16$)

하린 (가)는 모든 계수에 2를 곱해요. $2\text{CH}_4(\text{g}) + 4\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\Delta H = 2 \times (-890.3) = -1780.6 \text{ kJ}$.

태오 (나)는 뒤집어서 $\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g})$, $\Delta H = +890.3 \text{ kJ}$ 이에요. (다)는 $8.0 \div 16 = 0.50 \text{ mol}$ 이니깐 $890.3 \times 0.50 = 445 \text{ kJ}$.

석 교수 셋 다 정답이다. (가) -1780.6 kJ , (나) $+890.3 \text{ kJ}$, (다) 445 kJ 방출. (다)의 답에는 “방출”을 붙이거나 $\Delta H = -445 \text{ kJ}$ 처럼 부호를 써라. 하나만 덧붙이지. (나)의 역반응은 실제로 저절로 일어나지는 않는다. 식물은 햇빛 에너지를 들여 CO_2 와 물로 포도당을 만들지만 메테인을 만들지는 않지. 열화학 반응식은 장부일 뿐, 그 반응이 실제로 쉽게 일어난다는 보장은 아니다.

이모 그래도 뒤집은 반응식을 쓰는 이유가 있겠죠?

석 교수 네. **기본개념편 제 6장** (65쪽)의 헤스 법칙에서 여러 반응식을 더하고 뺄 때, 원하는 물질을 반응물 쪽이나 생성물 쪽에 놓으려고 뒤집어요. 실제로 일어나느냐와 상관없이 장부 계산을 위해 뒤집는 거예요.

3.3 문장을 반응식으로

석 교수 논술에서는 반응식을 주지 않고 문장으로 주는 경우가 많다. 경희대 2024학년도 문제가 그랬다. “에테인(C_2H_6) 기체 1 mol이 완전 연소하면 이산화 탄소와 물이 생성되고 1560 kJ 열이 발생한다. 이 반응의 열화학 반응식을 제시하시오.”

태오 완전 연소니까 생성물은 CO_2 와 H_2O 이고, 계수를 맞추면 $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ 에서 산소 원자가 오른쪽에 $4 + 3 = 7$ 개예요. 그러니까 O_2 는 $7/2$.

하린 열이 발생하니까 ΔH 는 마이너스예요. $\text{C}_2\text{H}_6(\text{g}) + 7/2 \text{ O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\Delta H = -1560 \text{ kJ}$.

석 교수 잘했다. 이 문장을 반응식으로 옮기는 과정은 네 단계다. ① 반응물과 생성물을 고른다(완전 연소 $\rightarrow \text{CO}_2$, H_2O). ② 문제가 정한 물질 1 mol 기준으로 계수를 맞추다(에테인 1 mol이니 산소는 분수 $7/2$). ③ “열 발생”은 $-$, “열 흡수”는 $+$ 로 부호를 정한다. ④ 상태를 붙인다. 25°C 기준 연소열이면 물은 보통 액체 (l)로 쓴다.

이모 물을 (l)로 쓸지 (g)로 쓸지는 어떻게 정해요? 불꽃 속에서는 수증기잖아요.

석 교수 좋은 질문이에요. 연소열은 반응 뒤 생성물을 다시 25°C 로 식혔을 때를 기준으로 재요. 25°C 에서 물은 액체니까 (l)로 쓰는 게 표준이에요. 문제에 “수증기가 생성된다”고 쓰여 있으면 (g)로 쓰고요. 어느 쪽으로 쓰든 답안에 이유를 한 줄 붙이면 감점 위험이 줄어요.

태오 반대로 $2\text{C}_2\text{H}_6$ 로 계수를 맞추면 정수로 쓸 수 있잖아요. $2\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$. 그건 틀린 거예요?

석 교수 틀리지 않다. 다만 그때는 $\Delta H = -3120 \text{ kJ}$ 으로 두 배를 써야 한다. 문제가 “1 mol이 연소하면 1560 kJ”이라고 했으니 1 mol 기준으로 쓰는 쪽이 문장과 바로 맞물려서 채점자가 읽기 쉽다. 계수와 ΔH 가 짝을 이루기만 하면 어느 쪽도 맞다.

3.4 질량과 열을 잇기

석 교수 마지막으로 질량과 열을 잇자. 열화학 반응식의 ΔH 는 반응하는 양에 비례한다. 그래서 질량과 열은 직선 관계다. **그림 13**는 메테인을 0 g에서 32 g까지 태울 때 나오는 열을 계산해 그린 직선이다.

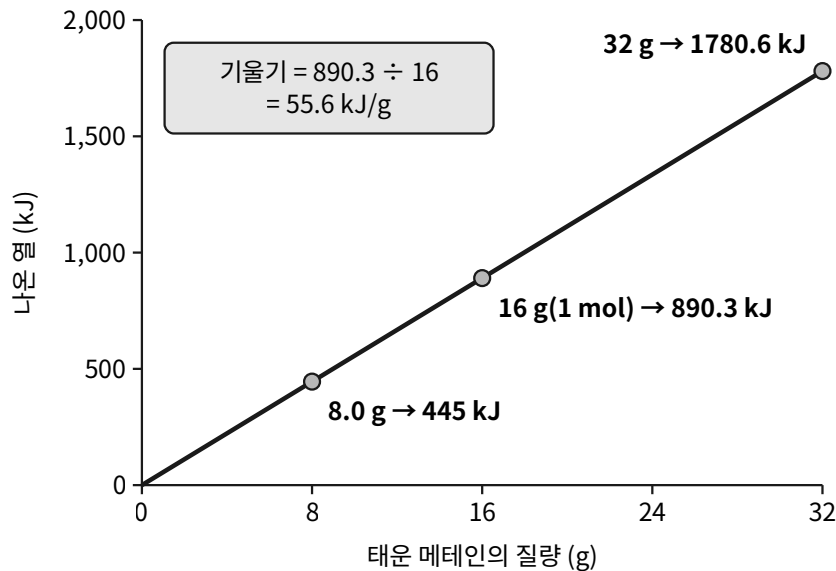


그림 13. 메테인 연소에서 태운 질량과 나온 열의 관계 — 기울기는 $890.3 \div 16 = 55.6 \text{ kJ/g}$ 인 원점을 지나는 직선이다. 16 g(1 mol)에서 890.3 kJ, 8.0 g에서 445 kJ, 32 g에서 1780.6 kJ(계산값).

하린 기울기 55.6 kJ/g은 메테인 1 g당 나오는 열이네요.

석 교수 그렇다. 이 값을 쓰면 몇 g이든 바로 곱하면 된다. 다만 시험 답안에서는 “몰수를 구하고 → 반응식의 몰수 비로 나눈다”는 과정을 보여야 점수를 받는다. 1 g당 값은 검산용으로 쓰렴.

태오 그럼 반대로, 열을 주고 질량을 구하는 문제도 되겠네요. 메테인을 태워 1000 kJ을 얻으려면 $1000 \div 890.3 = 1.12 \text{ mol}$, $1.12 \times 16 = 18.0 \text{ g}$ 이요.

석 교수 그렇다. 그런 역방향 계산이 연료 비교의 출발점이다. 어떤 연료가 같은 열을 낼 때 질량이 덜 드는지, CO_2 를 덜 내놓는지 비교하는 것이 **기본개념편 제 10장** (103쪽)의 세 저울이다.

산소가 모자라면 — 한계 반응물

이모 교수님, 메테인 16 g이 있어도 산소가 조금밖에 없으면 890.3 kJ이 다 나오지 않겠죠?

석 교수 맞아요. 반응식은 메테인 1 mol에 산소 2 mol이 필요하다고 말해요. 메테인 16 g(1 mol)과 산소 32 g(1 mol)을 섞어 태우면 산소가 먼저 바닥나요. 이렇게 먼저 떨어져 반응의 양을 정하는 물질을 한계 반응물이라고 하죠.

하린 산소 1 mol이면 메테인은 그 절반, 0.50 mol만 탈 수 있어요. 그럼 열은 $890.3 \times 0.50 = 445 \text{ kJ}$ 이에요.

석 교수 정답이다. 열은 언제나 실제로 반응한 양으로 계산한다. 넣은 양이 아니라 반응한 양이다. 화학 I 에서 배운 한계 반응물 계산이 열화학에서도 그대로 쓰인다. 다만 실제로 산소가 모자란 불꽃에서는 일부가 CO로 불완전 연소해서 계산이 더 복잡해진다. 시험 문제가 “완전 연소”라고 못 박는 이유가 그것이다.

태오 문제를 풀 때 순서를 정하면, 질량을 몰수로 바꾸고, 계수비로 한계 반응물을 찾고, 반응한 몰수에 ΔH 를 비례시키는 거네요.

석 교수 그 세 줄이 질량과 열을 잇는 모든 문제의 뼈대다. 답안에도 이 세 줄을 순서대로 적으면, 중간에 계산이 틀려도 과정 점수를 받을 수 있다.

문제 3.2

수소 2 mol이 산소와 반응해 수증기가 되는 열화학 반응식을 쓰라. 이 반응의 ΔH 와 수소 2 mol이 액체 물이 되는 반응의 ΔH 가 어떻게 다른지 말로 설명하라. ($H_2O(g)$ 의 $\Delta H^\circ_f = -241.8$, $H_2O(l)$ 의 $\Delta H^\circ_f = -285.8 \text{ kJ/mol}$)

태오 $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$, $\Delta H = 2 \times (-241.8) = -483.6 \text{ kJ}$ 이에요. 액체 물이면 $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$, $\Delta H = 2 \times (-285.8) = -571.6 \text{ kJ}$.

하린 차이는 $571.6 - 483.6 = 88.0 \text{ kJ}$ 이에요. 액체 물이 될 때 열이 더 많이 나와요. 수증기가 물로 바뀔 때 나오는 열까지 함께 나오니까요.

석 교수 정답이다. 수증기 생성 $\Delta H = -483.6 \text{ kJ}$, 액체 물 생성 -571.6 kJ , 같은 양의 수소에서 액체 물을 만들 때 88.0 kJ (물 1 mol당 44.0 kJ) 더 방출한다. 이 문제는 경희대 2024학년도 (1)과 똑같은 구조다. 그 문제는 결합 에너지 표로 수증기 쪽 값을 구하게 했는데, 그 방법은 **기본개념편 제 8장** (83쪽)에서 배운다.

이모 결국 상태 표시 하나가 88 kJ 의 차이를 만드는 거네요. 0점 기준이 이해가 돼요.

석 교수 네, 그래서 오늘 규칙 ①이 맨 앞에 있는 거예요.

반응식을 더하면 ΔH 도 더한다

석 교수 오늘 마지막으로 규칙 하나를 맛보자. 두 열화학 반응식을 더하면 ΔH 도 더한다. 문제 3.2의 두 반응식으로 해 보자. 수소가 액체 물이 되는 반응식에서, 수소가 수증기가 되는 반응식을 빼면 무엇이 남을까?

태오 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O(l)$ 에서 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O(g)$ 를 빼요. 빼는 건 뒤집어서 더하는 거니까 $2H_2O(g) \rightarrow 2H_2 + O_2$, $\Delta H = +483.6 \text{ kJ}$ 을 더해요. 그러면 $2H_2 + O_2$ 는 양쪽에서 지워지고 $2H_2O(g) \rightarrow 2H_2O(l)$ 이 남아요.

하린 ΔH 는 $-571.6 + 483.6 = -88.0 \text{ kJ}$ 이에요. 수증기 2 mol이 물로 응결할 때 88.0 kJ 이 나온다는 뜻이네요.

석 교수 훌륭하다. 직접 재지 않은 응결열을 두 반응식의 덧셈으로 구했다. 이 덧셈이 **기본개념편 제 6장** (65쪽)의 헤스 법칙이고, 썰 수 없는 반응의 ΔH 를 계산하는 첫 번째 도구다. 오늘 배운 규칙 ②와 ③, 곧 곱하기와 뒤집기가 그 덧셈의 재료다.

핵심 열화학 반응식 네 규칙

1. 모든 물질 뒤에 상태 (s)(l)(g)(aq)를 쓴다. 상태가 다르면 ΔH 가 다르다($2\text{H}_2\text{O(l)} -571.6$ vs $2\text{H}_2\text{O(g)} -483.6$ kJ).
2. 계수를 n 배 하면 ΔH 도 n 배 한다($2\text{CH}_4 \rightarrow -1780.6$ kJ).
3. 반응을 뒤집으면 ΔH 의 부호만 바꾼다(+890.3 kJ).
4. 문제가 정한 물질 1 mol 기준이면 분수 계수를 쓴다($\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2 \text{O}_2, -1560$ kJ). 질량 $\rightarrow$ 몰수 $\rightarrow$ 계수 비례로 열을 구한다.

스스로 풀어 보기

1. $\text{C(s, 흑연)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}), \Delta H = -393.5$ kJ. 탄소 36 g이 완전 연소할 때 나오는 열은? ($\text{C} = 12$)
2. “프로페인(C_3H_8) 기체 1 mol이 완전 연소하면 2219.9 kJ의 열이 발생한다”를 25°C 기준 열화학 반응식으로 쓰라.
3. $\text{N}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}), \Delta H = +180.6$ kJ이다. $2\text{NO}(\text{g}) \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ 와 $\text{NO}(\text{g}) \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$ 의 ΔH 는?
4. 상태 표시가 없는 열화학 반응식이 틀린 답이 되는 이유를 한 문장으로 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부에서는 이 장의 규칙이 채점 기준으로 직접 나온다. **기출문제 1**(경희대 2024) (200쪽)의 (2)는 오늘 연습한 에테인 문장을 열화학 반응식으로 옮기게 하고, 대학 채점 기준은 상태 표시나 단위가 틀리면 0 점이라고 못 박았다. **기출문제 11**(연세대 2019) (287쪽)은 화합물 23 g이 연소해 683 kJ을 내놓았다는 실험 자료를 주는데, 질량을 몰수로 바꿔 1 mol당 1366 kJ으로 환산하는 것이 오늘의 “질량과 열을 잇기”다. **기출문제 14**(연세대 2012) (319쪽)은 가상의 행성에서 일어나는 탄소 고정 반응을 반응식으로 세우고 그 에너지를 비교하게 하는 문항이라, 계수를 맞추고 상태를 붙이는 첫 단계를 정확히 해야 뒤의 결합 에너지 계산이 흔들리지 않는다. 세 문항 모두 답안의 첫 줄은 오늘의 점검표 다섯 항목을 통과한 열화학 반응식 한 줄이어야 하고, 그 한 줄이 맞으면 나머지 계산은 몰수 비례와 덧셈뿐이다.

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.

홍훈기 외. (2018). 고등학교 화학 II. 교학사.

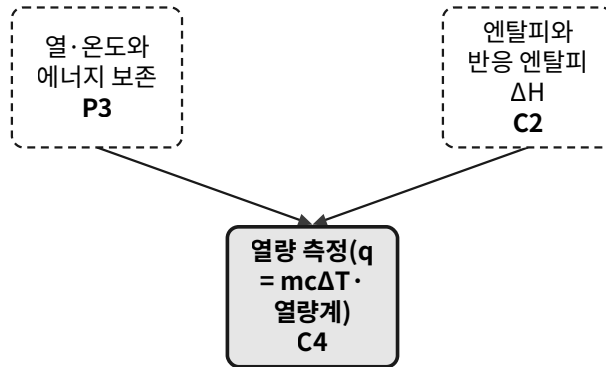
경희대학교 입학처. (2024). 2024학년도 수시모집 논술고사 문제 및 해설 [시험 자료].

제 4장 열량계로 반응열을 잰다

새 개념 비열 · $q = mc\Delta T$ · 커피컵 열량계 · 통열량계

이어짐 엔탈피 2장 · 반응열의 종류 7장

이 장의 개념도



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

그림 14. 제 4장에서 배우는 개념(C4 열량 측정($q = mc\Delta T$ · 열량계))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.

보온병으로 만든 열량계

묽은 염산 + 수산화 나트륨 수용액, 각 1.0 M 50.0 mL

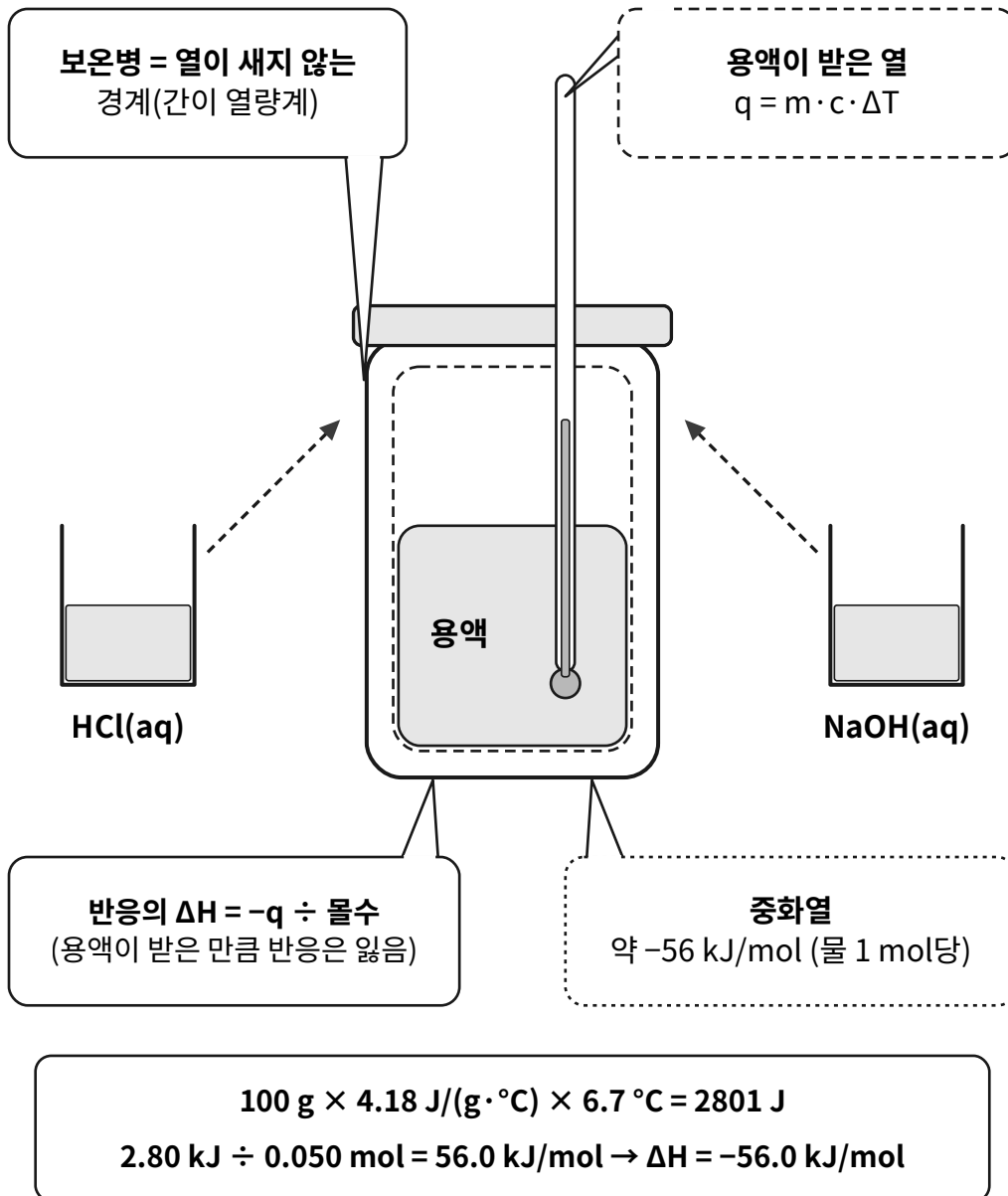


그림 15. 보온병에 묽은 염산과 수산화 나트륨 수용액을 부어 섞고 온도계로 온도 변화를 읽는 실험 — 보온병은 열이 새지 않는 경계, 곧 간이 열량계다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 열량계는 반응열을 용액의 온도 변화로 잰다.
2. 용액이 열을 받으면 반응의 ΔH 는 음수다.
3. 몰수로 나누어야 kJ/mol 이 된다.

이 장의 출발점

세 가지를 가지고 시작한다. ① **기본개념편 제 1장** (17쪽)의 계와 주위, 그리고 “계가 잃은 열 = 주위가 얻은 열”. ② **기본개념편 제 2장** (27쪽)의 결론 — 일정한 압력에서 오간 열은 ΔH , 부피가 일정할 때 오간 열은 ΔU . ③ 몰농도(M) $\times$ 부피(L) = 몰수. 1.0 M 용액 50.0 mL에는 0.050 mol 이 들어 있다.

네 번째 토요일, 과학방 탁자에 보온병 두 개와 온도계, 눈금 실린더, 보안경이 놓였다. 석 교수는 묶은 염산과 수산화 나트륨 수용액을 각각 병에 담아 두고, 오늘은 직접 반응열을 재 보자고 했다. 하린은 보안경을 쓰고 들떠 있었고, 이모는 보온병이 실험 기구가 될 수 있느냐며 웃었다.

이모 교수님, 지금까지는 ΔH 값을 표에서 받아 썼잖아요. 그 숫자들은 누가 어떻게 잰 거예요?

석 교수 오늘은 그걸 직접 해 보려고 해요. 반응열을 재는 장치를 열량계라고 하는데, 원리는 단순해요. 반응에서 나온 열을 물에 몽땅 받게 하고, 물의 온도가 몇 도 올랐는지 재는 거예요. 물이 열을 얼마나 받으면 몇 도 오르는지만 알면 거꾸로 열을 계산할 수 있지요.

태오 그럼 물의 온도 변화를 열로 바꾸는 식이 필요하겠네요.

석 교수 그것부터 하자.

4.1 비열과 열용량

석 교수 물질 1 g의 온도를 1 °C 올리는 데 드는 열을 **비열**(specific heat) c 라고 한다. 물의 비열은 4.18 J/(g·°C)다. 질량 m 인 물질의 온도가 ΔT 만큼 변하면, 오간 열은 이렇다.

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

하린 물 100 g을 10 °C 올리려면 $100 \times 4.18 \times 10 = 4180$ J, 4.18 kJ이에요.

석 교수 그렇다. 물질마다 비열이 다르다. 표 8를 보자.

표 8. 여러 물질의 비열(25 °C 부근) — 비열이 클수록 같은 열을 받아도 온도가 덜 오른다

물질	비열 J/(g·°C)	같은 열 1000 J을 100 g이 받을 때 ΔT
물(액체)	4.18	2.4 °C
얼음	2.09	4.8 °C
알루미늄	0.90	11.1 °C
철	0.45	22.2 °C
구리	0.38	26.3 °C

이모 물이 제일 커요. 그래서 여름 바닷가가 내륙보다 덜 덥군요. 같은 햇빛을 받아도 바닷물은 온도가 덜 오르니까요.

석 교수 네, 밤에는 반대로 바닷물이 천천히 식으니 해안의 밤이 덜 추워요. 물의 비열이 크다는 사실 하나가 해안 기후, 우리 체온 유지, 자동차 냉각수까지 설명해요. 프라이팬은 금속이라 비열이 작아서 금방 달궈지고요.

태오 열용량이라는 말도 있던데 비열이랑 달라요?

석 교수 비열은 1 g당이고, **열용량** C는 그 물체 전체가 1 °C 오르는 데 드는 열이다. 물 100 g의 열용량은 $100 \times 4.18 = 418 \text{ J/}^\circ\text{C}$ 다. 열량계처럼 물·용기·온도계가 한 덩어리가 된 장치는 전체 열용량 C 하나로 다루면 편하다. 그때는 $q = C \cdot \Delta T$ 로 쓴다.

하린 비열은 물질의 성질이고, 열용량은 물건의 성질이네요.

석 교수 정확히 그렇다. 쇠손가락과 쇠술은 비열이 같지만 열용량은 술이 훨씬 크다.

뜨거운 쇠구슬을 찬물에 넣으면

석 교수 $q = mc\Delta T$ 에 익숙해지려고 하나 풀어 보자. 100 °C로 데운 철 구슬 50 g을 20 °C 물 100 g에 넣는다. 열이 밖으로 새지 않는다면 둘은 결국 같은 온도 T가 된다. T는 몇 도일까?

태오 철이 잃은 열과 물이 얻은 열이 같아요. 철: $50 \times 0.45 \times (100 - T)$, 물: $100 \times 4.18 \times (T - 20)$. 둘을 같다고 놓으면 $22.5(100 - T) = 418(T - 20)$.

하린 $2250 - 22.5T = 418T - 8360$ 이니까 $440.5T = 10,610$, $T = 24.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 예요.

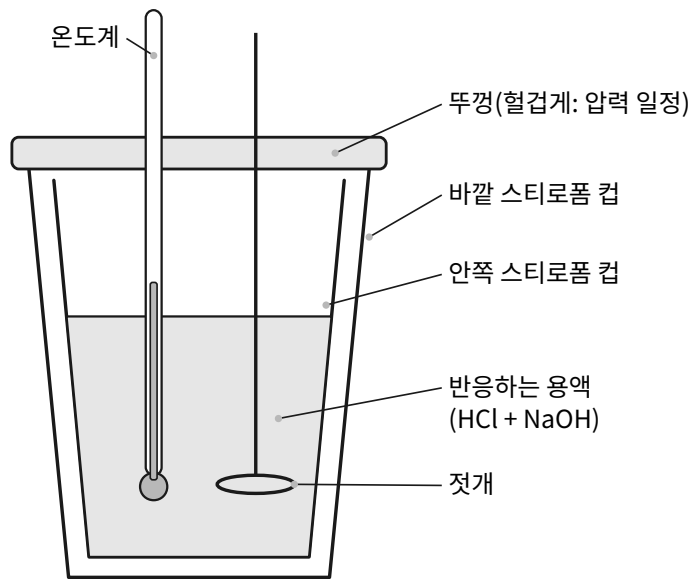
석 교수 정답이다. 철은 76 °C나 식었는데 물은 겨우 4 °C 올랐다. 철 50 g의 열용량은 22.5 J/°C, 물 100 g은 418 J/°C라 거의 19배 차이가 나기 때문이다. 이 계산이 열량계의 기본 원리다. “한쪽이 잃은 열 = 다른 쪽이 얻은 열”을 식으로 세우고, 온도가 변한 쪽의 m, c, ΔT 를 넣는다.

이모 그러니까 반응이 낸 열을 물이 다 받아 주면, 물의 온도 변화만 보고 반응열을 거꾸로 알 수 있는 거군요.

석 교수 네, 쇠구슬 자리에 반응을 놓으면 그게 열량계예요. 다만 반응은 온도 대신 화학 변화로 열을 내놓는다는 점만 달라요.

4.2 커피컵 열량계 — 일정한 압력에서 ΔH 를 잰다

석 교수 실험실에서 가장 간단한 열량계는 스티로폼 컵 두 개를 겹친 것이다. 커피를 담은 컵이라 **커피컵 열량계**라고 부른다. 그림 16를 보자.



컵 두 겹 사이의 공기층이 열 손실을 줄인다

그림 16. 커피컵 열량계의 단면 — 스티로폼 컵 두 겹이 열이 새는 것을 막고, 뚜껑의 구멍으로 온도계와 젓개를 넣는다. 뚜껑은 꽉 막지 않으므로 압력은 대기압으로 일정하다.

석 교수 스티로폼은 열을 잘 전하지 않으니 반응열이 거의 모두 용액에 남는다. 뚜껑은 꽉 막지 않아서 압력은 대기압 그대로다. **기본개념편 제 2장** (27쪽)에서 배웠지? 압력이 일정할 때 오간 열은 ΔH 다. 그래서 커피컵 열량계로 잰 열은 바로 반응 엔탈피가 된다.

태오 그럼 오늘 보온병도 같은 원리네요. 뚜껑을 살짝만 덮으면요.

석 교수 그렇다. 이제 실험을 하자. 1.0 M 염산 50.0 mL와 1.0 M 수산화 나트륨 수용액 50.0 mL를 따로 21.0 °C로 맞춰 두었다. 둘을 보온병에 붓고 저으면서 온도를 읽자.

하린 올라가요! 25, 26, 27..., 27.5에서 거의 멈췄어요. 그다음엔 아주 조금씩 내려가요.

석 교수 잘 봤다. 그런데 최고 온도 27.5 °C를 그대로 쓰면 안 된다. **그림 17**를 보자. 섞는 동안에도 열이 조금씩 새어 나가니, 최고점은 “열이 하나도 새지 않았다면” 도달했을 온도보다 낮다. 그래서 최고점 뒤의 천천히 내려가는 직선을 섞은 순간까지 거꾸로 연장해 온도를 읽는다. 이것을 외삽이라고 한다.

열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

열은 출발점과 도착점만 본다(ΔH , 헤스) — 결합을 끊고 붙인 장부로 어렵하고, 자발성은 ΔH 와 $T\Delta S$ 의 줄다리기로 판정한다.

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 16문항(2010~2024학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 13문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 열화학인가
2. 엔탈피: 일정한 압력에서 오가는 열
3. 열화학 반응식을 쓰는 규칙
4. 열량계로 반응열을 잰다
5. 물과 수증기: 상태가 바뀌면 열이 오간다
6. 헤스 법칙: 길이 달라도 높이는 같다
7. 반응열의 종류와 표준 생성 엔탈피
8. 결합 에너지로 ΔH 를 어렵한다
9. 활성화 에너지와 촉매: ΔH 는 그대로다
10. 연료를 재는 세 개의 저울
11. 엔트로피: 흩어지는 쪽으로
12. 깁스 자유 에너지와 자발성
13. 자유 에너지, 평형, 그리고 용해
14. 에너지 기술 속의 열화학, 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 · 반응 속도 · 화학 평형 · 용액 · 산화·환원과 전지



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 25,000원

실린 기출 문항의 저작권은 각 대학에 있습니다.

값 25000 원

53430



ISBN 979-11-23065-21-2

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 22 — 열화학·엔탈피·자유 에너지 — 전체 364쪽

ssbook.kr/book/nonsul-22

판매가 **15,000원** (POD-정가 25,000원)

- 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

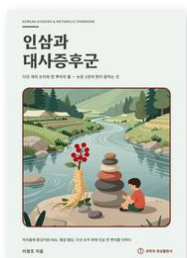
인삼 (6)



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

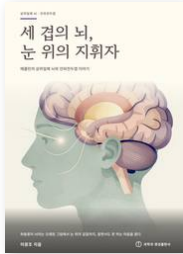
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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 — 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