



대입 과학논술 21 — 화학 평형

평형 상수 $K \times$ 반응 지수 $Q \times$ 르샤틀리에로 읽는 화학 평형

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.

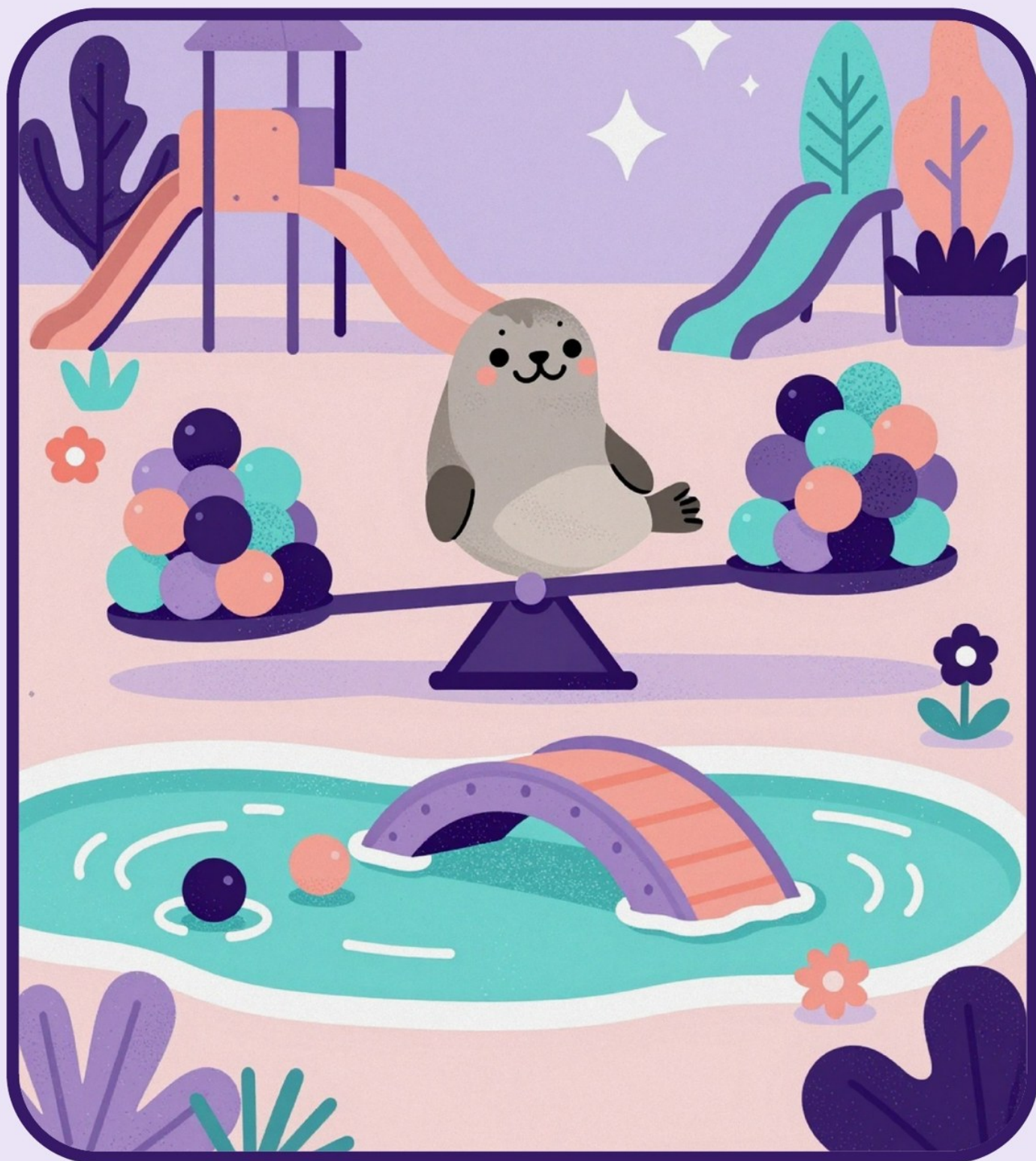
ssbook.kr/book/nonsul-21

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

화학 평형



화학 평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 13문항 · 2009~2025학년도 · 이광조 지음

화학 평형

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

화학 평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 평형 상수 $K \times$ 반응 지수 Q 비교 $\times$ 르샤트리에(농도·압력·온도) | 13문항 · 5개 대학 (2009-2025)

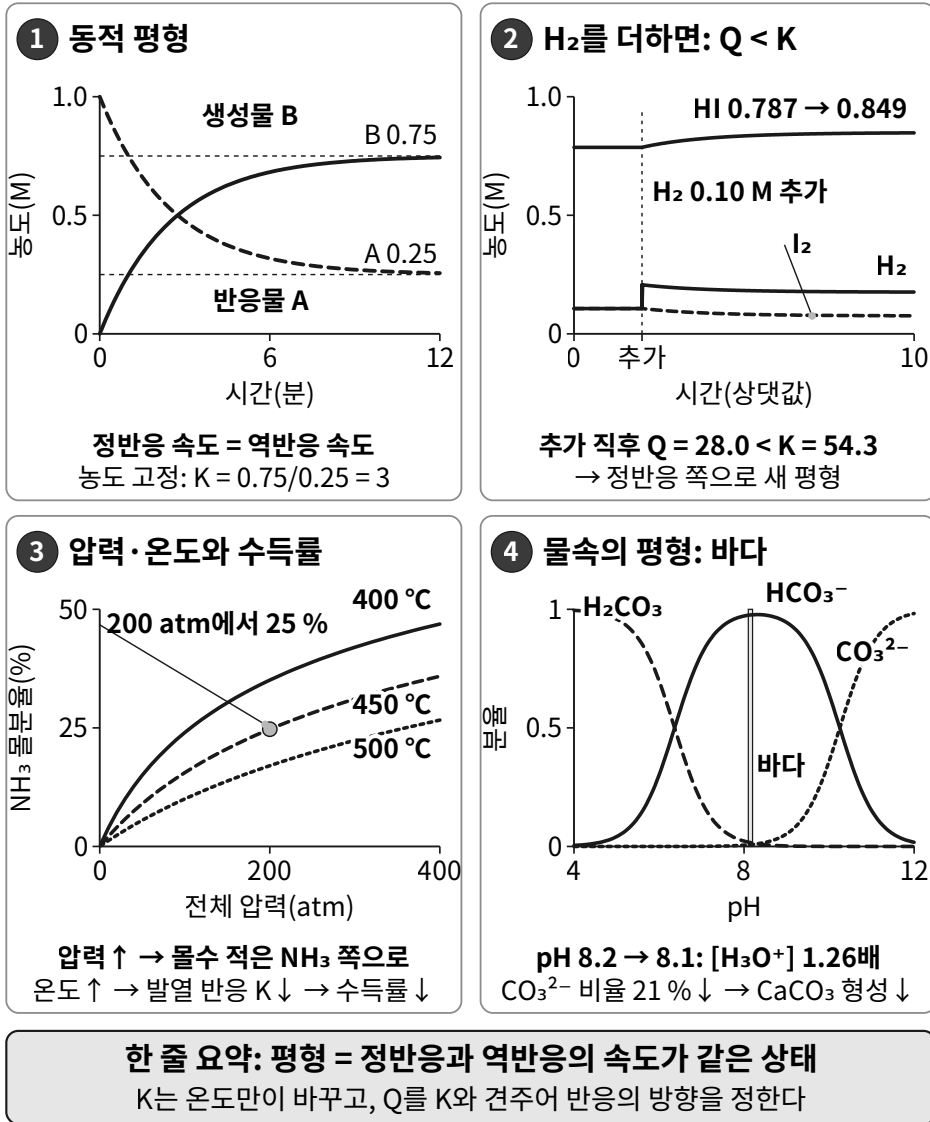


그림 1. 화학 평형 단원의 그림 요약. ① 가역 반응 $A \rightleftharpoons B$ 가 동적 평형에 이르는 농도 곡선(정반응·역반응 속도 상수 $0.30 \cdot 0.10 \text{ 분}^{-1}$ 로 계산, $K = 3$), ② 평형에 있는 $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ ($K = 54.3$)에 H_2 0.10 M 를 더했을 때 반응 지수 $Q = 28.0$ 이 K 보다 작아 정반응 쪽으로 새 평형을 찾는 과정(속도식으로 계산하고 평형식으로 검산), ③ 암모니아 합성($N_2 : H_2 = 1 : 3$)의 평형 NH_3 몰분율 — 압력이 높을수록, 온도가 낮을수록 커진다(교재의 K_p 값으로 계산, $450^\circ\text{C} \cdot 200 \text{ atm}$ 에서 약 25%), ④ 바닷물 pH에 따른 탄산 종의 분율과 해양 산성화(탄산의 이온화 상수 $K_{a1} = 4.3 \times 10^{-7}$, $K_{a2} = 5.6 \times 10^{-11}$ 로 계산).

한 줄 요약: 평형 = 정반응과 역반응의 속도가 같은 상태 — K 는 온도만이 바꾸고, Q 를 K 와 견주어 반응의 방향을 정한다

연결 단위 → 반응 속도 · 열화학 · 기체 · 산·염기·pH · 화학 전지

이광조 · v1

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 화학 평형인가	16
1.1 끝까지 가지 않는 반응	18
1.2 “멈춘 것 같다”와 “멈췄다”의 차이	20
1.3 기출은 무엇을 묻나	22
1.4 이 책의 길	24
제 2장 가역 반응과 동적 평형: 멈춘 듯 움직이는 상태	26
2.1 가역 반응의 화살표	28
2.2 속도가 같아질 때	29
2.3 물리적 평형: 증발과 응축, 녹음과 석출	32
2.4 평형에서도 반응이 계속된다는 증거	33
제 3장 평형 상수 K: 평형이 남기는 하나의 숫자	36
3.1 출발점이 달라도 같은 숫자	38
3.2 평형 상수식 쓰기	40
3.3 순수한 고체와 액체는 빠진다	41
3.4 K의 크기 읽기	41
제 4장 ICE 표로 평형 농도 구하기	45
4.1 세 줄 표 — ICE	47
4.2 완전제곱이 되는 경우	48
4.3 근의 공식이 필요한 경우	49
4.4 근사와 5 % 규칙	50
4.5 몰수로 쓰는 ICE 표	52
제 5장 평형 상수를 다루는 규칙: 뒤집고, 곱하고, 고체는 빼고	54
5.1 역반응: K는 역수가 된다	56
5.2 계수를 n배 하면 K는 n제곱	57
5.3 반응을 더하면 K를 곱한다	58
5.4 고체와 용매 물, 다시 보기	61
5.5 $K_a \times K_b = K_w$ 를 더하기 규칙으로	61
제 6장 기체의 평형: 부분 압력과 Kp	64
6.1 강철 용기 속 기체: 압력은 몰수에 비례한다	66
6.2 돌턴의 부분 압력 법칙과 몰분율	67
6.3 Kp: 압력으로 쓴 평형 상수	68
6.4 고체가 섞인 기체 평형	71
제 7장 반응 지수 Q: 어느 쪽으로 갈 것인가	73
7.1 Q는 “지금”의 값, K는 “도착”의 값	75
7.2 $Q < K$ 이면 정반응, $Q > K$ 이면 역반응	76
7.3 판정 다음의 계산: 새 평형까지	77
7.4 기출형 연습: 세 가지 처음 상태	79
제 8장 르샤틀리에 원리 ① 농도를 바꾸면	82
8.1 르샤틀리에의 말과 Q의 말	84
8.2 반응물을 더하면 — HI 평형에 H_2 를 넣는다	85

8.3 생성물을 빼면 — B를 절반 덜어 낸다	86
8.4 색으로 보는 이동 — 네 가지 경우	88
8.5 "K는 그대로"를 숫자로 확인하기	89
제 9장 르사틀리에 원리 ② 압력과 부피를 바꾸면	91
9.1 부피를 줄이면 모든 농도가 같은 배로	93
9.2 $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$ 압축 실험을 숫자로	94
9.3 $\Delta n = 0$ 이면 움직이지 않는다	95
9.4 압력과 해리도 — K_p 로 한 번 더	96
9.5 비활성 기체를 넣으면	96
9.6 용액을 묽히는 것도 부피 변화다	97
9.7 피스톤 문제 — 몰수와 부피로 K를 쓴다	97
제 10장 르사틀리에 원리 ③ 온도를 바꾸면 K가 바뀐다	101
10.1 온도만은 K를 바꾼다	103
10.2 두 K 값으로 흡열·발열을 판정한다	104
10.3 염화 코발트의 색 — 눈으로 보는 K의 이동	106
10.4 데우면 두 반응이 모두 빨라지는데 왜 한쪽으로 가나	107
10.5 교과 밖 심화: 반트호프 식으로 K를 계산한다	107
10.6 교과 밖 심화: K와 자유 에너지	108
제 11장 속도와 평형: 촉매는 무엇을 바꾸는가	111
11.1 평형은 도착점, 속도는 도착 시간	113
11.2 촉매는 정반응과 역반응을 같은 배수로	114
11.3 평형으로 보면 줄어야 하는데 — 배기구의 NO	116
11.4 1차 반응의 결과를 평형 문제로 잇기	117
11.5 단열 용기에서는 온도가 움직인다	119
제 12장 물속의 평형: 용해·이온화·가수분해	121
12.1 기체가 물에 녹는 평형	123
12.2 탄산의 두 단계 이온화	124
12.3 탄산 종의 분율과 pH	124
12.4 염의 가수분해: 중성 염이 늘 중성은 아니다	125
12.5 탄산칼슘과 CO_2 : 중유석이 자라는 까닭	127
제 13장 암모니아 합성: 평형과 속도의 타협	131
13.1 공기의 질소를 먹을 수 있게	133
13.2 평형으로 보면: 낮은 온도, 높은 압력	134
13.3 속도로 보면: 높은 온도와 철 촉매	135
13.4 암모니아를 식혀 빼내고 남은 기체를 되돌린다	136
13.5 반응 지수로 보는 공장 안 — 진행 방향 판정	138
13.6 비료로: 질소 함량과 녹는 성질	138
제 14장 바다·몸·자동차 속의 평형, 그리고 2부로	141
14.1 바다가 CO_2 를 마시면	143
14.2 여름 달걀의 껍데기는 왜 얇을까	145
14.3 우리 몸의 CO_2 평형	146
14.4 엔진과 배기구의 NO, 다시	147
14.5 이 권을 한 장으로 — 네 가지 질문	148
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	152
부록 B. 용어 풀이	155
기출문제와 기본개념	162

제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	163
0. 이 장의 사용법	164
1. 출제 개념	165
1.1 동적 평형과 평형 상수 — C1 · C2	165
1.2 ICE 표와 평형 농도 — C3	166
1.3 K의 조작과 기체 평형 — C4 · C5	166
1.4 반응 지수 Q — C6	167
1.5 르샤틀리에 원리: 농도와 압력 — C7 · C8	167
1.6 온도와 K — C9 · C13	169
1.7 촉매, 그리고 속도와 평형 — C10 · A5	169
1.8 물속의 평형 — C11 · C12	170
1.9 생활·산업·환경 응용 — A1 · A2 · A3 · A4	171
1.10 그래프 개념도 읽는 법	171
2. 출제 경향	174
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	176
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	176
2.3 학교별 성향	177
논술답안작성 패턴분석	179
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	180
3. 답안 작성법	181
3.1 계산형 답안의 틀	181
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀	181
3.3 표기와 수치 규칙	182
3.4 시간 배분과 자기 점검	182
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	183
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	185
실전기출문제와 풀이과정	191
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	192
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념	193
5.1 한눈에 보는 기출 13문항	193
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론	194
5.3 기본 개념 한눈에	195
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다	196
6. 출제 문항 분석과 모범답안	198
〈기출문제 1 (연세대 2025년)〉	199
〈기출문제 2 (연세대 2024년)〉	209
〈기출문제 3 (연세대 2023년)〉	218
〈기출문제 4 (연세대 2023년)〉	226
〈기출문제 5 (경희대 2023년)〉	235
〈기출문제 6 (연세대 2022년)〉	244
〈기출문제 7 (연세대 2021년)〉	252
〈기출문제 8 (경희대 2020년)〉	262
〈기출문제 9 (부산대 2015년)〉	270
〈기출문제 10 (연세대 2011년)〉	279
〈기출문제 11 (고려대 2011년)〉	290

〈기출문제 12 (성균관대 2009년)〉	299
〈기출문제 13 (성균관대 2009년)〉	309
7. 변형·예상 문항	323
8. 강의 연결.....	329
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	329
8.2 강의 구성 시 유의점	330
9. 전체 문제 총평	332
9.1 숫자로 먼저 보기	332
9.2 다섯 가지 총평.....	332
9.3 대학별 한 줄 총평	333
9.4 이렇게 공부하자	334
10. 참고문헌.....	335

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 화학 평형 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 닫힌 병과 연 병의 CO ₂ 출입.....	21
그림 5. 기출 13문항의 네 갈래	23
그림 6. 제 2장 개념도	26
그림 7. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 8. A ⇌ B의 농도-시간 곡선.....	29
그림 9. 정반응·역반응 속도-시간 곡선	30
그림 10. 닫힌 용기의 증발·응축 평형.....	32
그림 11. 제 3장 개념도	36
그림 12. 생활 속 개념도 3.....	37
그림 13. HI 세 실험의 평형 농도	39
그림 14. K의 크기와 반응의 정도.....	42
그림 15. 제 4장 개념도	45
그림 16. 생활 속 개념도 4.....	46
그림 17. ICE 표의 세 줄(HI 반응).....	49
그림 18. 이차식의 근과 근사값	50
그림 19. 제 5장 개념도	54
그림 20. 생활 속 개념도 5.....	55
그림 21. 탄산의 단계 이온화 사다리.....	59
그림 22. K를 다루는 세 규칙	60
그림 23. 제 6장 개념도	64
그림 24. 생활 속 개념도 6.....	65
그림 25. 강철 용기 속 부분 압력의 변화.....	67
그림 26. 물분율과 부분 압력	68
그림 27. 제 7장 개념도	73
그림 28. 생활 속 개념도 7.....	74
그림 29. Q-K 수직선	76
그림 30. Q = 25에서 새 평형으로.....	78
그림 31. 제 8장 개념도	82
그림 32. 생활 속 개념도 8.....	83
그림 33. HI 평형에 H ₂ 를 더했을 때.....	85
그림 34. B를 절반 제거한 뒤의 새 평형	87
그림 35. 제 9장 개념도	91
그림 36. 생활 속 개념도 9.....	92
그림 37. 주사기 압축과 N ₂ O ₄ ⇌ 2NO ₂	95
그림 38. 피스톤 실린더의 세 상태.....	98
그림 39. 제 10장 개념도	101
그림 40. 생활 속 개념도 10	102
그림 41. 온도와 K: 발열 반응과 흡열 반응	105
그림 42. 엔진과 배기구의 NO 평형 물분율	106
그림 43. N ₂ O ₄ ⇌ 2NO ₂ 의 Kp-온도 곡선	108
그림 44. 제 11장 개념도	111
그림 45. 생활 속 개념도 11	112
그림 46. 촉매가 있을 때와 없을 때의 농도-시간 곡선.....	114
그림 47. 촉매가 있을 때와 없을 때의 반응 경로	115

그림 48. N_2O_5 의 1차 분해 곡선	118
그림 49. 제 12장 개념도	121
그림 50. 생활 속 개념도 12	122
그림 51. 탄산 종의 분율-pH 곡선	125
그림 52. 염 수용액 세 가지의 pH	127
그림 53. CO_2 에서 $CaCO_3$ 까지의 평형 사슬	128
그림 54. 제 13장 개념도	131
그림 55. 생활 속 개념도 13	132
그림 56. NH_3 평형 물분율-압력 곡선	135
그림 57. 하버-보슈 공정의 흐름도	137
그림 58. 질소 비료의 질소 함량	139
그림 59. 제 14장 개념도	141
그림 60. 생활 속 개념도 14	142
그림 61. 바닷물 pH 8.2와 8.1의 탄산 종 비교	144
그림 62. 여름 닭의 헐떡임과 달걀 껍데기	146
그림 63. 이 권의 판정 흐름도	149
그림 64. 조건 변화 직후의 Q와 K	168
그림 65. 전체 개념 그래프	172
그림 66. 개념별 출제 횟수	173
그림 67. 연도별 출제 문항 수	174
그림 68. 대학별 출제 문항 수	174
그림 69. 피스톤 세 상태(q187 원문 재구성)	200
그림 70. 〈연세대 2025〉 개념 그래프	201
그림 71. 세 상태의 부피 비(q187)	204
그림 72. 연세 미래 2024 용기 그림	210
그림 73. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	210
그림 74. A의 물분율과 C의 부분 압력	214
그림 75. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	219
그림 76. 질소 비료의 질소 함량(q162)	220
그림 77. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	227
그림 78. 평형에 A·C 추가(q180)	230
그림 79. 경희 2023 몰수-시간 그래프	236
그림 80. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	237
그림 81. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	245
그림 82. 엔진·배기구 온도의 K와 평형 NO(q158)	247
그림 83. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	253
그림 84. 탄산 평형 사슬	258
그림 85. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	263
그림 86. SO_2Cl_2 평형의 부분 압력(q215)	266
그림 87. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	271
그림 88. N_2O_5 분해의 농도-시간 곡선(q202)	272
그림 89. 〈연세대 2011〉 개념 그래프	280
그림 90. CO_2 용해 평형의 온도 의존(q22)	282
그림 91. 〈고려대 2011〉 개념 그래프	291
그림 92. 에나멜 용해 평형과 산(q25)	294
그림 93. 성균관대 2009 코일과 막대자석	300
그림 94. 〈성균관대 2009〉 개념 그래프	301
그림 95. 유도 전류의 방향	305
그림 96. 〈성균관대 2009〉 개념 그래프	311

그림 97. 300기압의 수득률-온도(q28).....	314
그림 98. 생산량 최대 온도(q28 문제 2).....	319

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	16
표 4. 끝까지 가는 반응과 평형에 머무는 반응.....	18
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. 화학 평형·상평형·용해 평형.....	33
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 8. 430 °C에서 $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 의 세 실험.....	38
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	45
표 10. ICE 표 두 개.....	47
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	54
표 12. 반응식 조작과 평형 상수 변환 규칙.....	59
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	64
표 14. 부피 일정한 용기에서 $A(g) + B(g) \rightleftharpoons C(g)$ 의 ICE 표(단위).....	66
표 15. Δn 에 따른 K_p 와 K_c 의 관계.....	69
표 16. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	73
표 17. 가정 $K = 0$	79
표 18. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	82
표 19. $H_2 O$	86
표 20. 농도 변화의 네 경우.....	88
표 21. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	91
표 22. 압력을 바꾸는 세 가지 방법과 평형 이동(온도 일정, K 불변).....	97
표 23. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	101
표 24. 반응의 열 출입과 온도 변화에 따른 K 와 이동 방향.....	104
표 25. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	111
표 26. 조건 변화가 "속도"와 " K "에 각각 주는 영향.....	116
표 27. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	121
표 28. 염 세 가지의 액성 판정(25 °C, 0.....	126
표 29. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	131
표 30. 조건이 평형 수득률과 반응 속도에 주는 영향.....	135
표 31. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	141
표 32. 세 장면의 평형.....	148
표 33. 2부 목차와 내용.....	163
표 34. K 의 크기로 읽는 평형의 위치(25 °C 부근 교과서 값).....	165
표 35. 반응식을 바꿀 때 K 가 바뀌는 규칙.....	166
표 36. Q 와 K 의 비교로 정하는 진행 방향.....	167
표 37. $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ ($\Delta H = -92$	169
표 38. 속도와 평형을 구분하는 표.....	169
표 39. 염의 액성과 가수분해.....	170
표 40. 이 책의 기출 문항 목록.....	175
표 41. 대학별 출제 문항.....	175
표 42. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	176
표 43. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	177
표 44. 3부 목차와 내용.....	180
표 45. 서술형 답안의 문장 틀(평형 이동 설명).....	181
표 46. 논술 기본 패턴 5가지(화학 평형 답안).....	183
표 47. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은.....	183

표 48. 4부 목차와 내용	192
표 49. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	193
표 50. 학년도별 문항 수와 답안 근거(13문항 모두 원문 수록).....	193
표 51. 13문항의 요구 29개에 적용한 주 답안 패턴(결합 패턴은 앞의 것을 주)	194
표 52. 이 책의 개념과 기출에서 쓰인 횟수(많이 쓰인 순).....	195
표 53. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	196
표 54. <표준 환원 전위(25°C)>	199
표 55. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	201
표 56. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	203
표 57. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	210
표 58. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	212
표 59. 문제 1-2의 몰수 표(단위 mol).....	213
표 60. [표1] 원자 사이의 평균 결합 에너지 (단위: kJ/몰)	218
표 61. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	219
표 62. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	221
표 63. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	227
표 64. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	228
표 65. <표 3>(원문 표를 다시 조판함).....	235
표 66. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	237
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	238
표 68. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	245
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	246
표 70. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	253
표 71. 문제 4의 세 요구와 난이도	254
표 72. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	263
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	264
표 74. SO ₂ Cl ₂ 분해의 농도 변화(단위 M)	266
표 75. 【문항 3】의 표	270
표 76. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	271
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	273
표 78. 2NO ₂ ⇌ N ₂ O ₄ 의 농도 변화(단위 M)	276
표 79. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	281
표 80. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	283
표 81. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	291
표 82. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	292
표 83. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	301
표 84. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	302
표 85. [문제 1-1]의 표	310
표 86. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	311
표 87. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	313
표 88. 인강 회차 구성(제안)	329
표 89. 13개 문항의 규모	332
표 90. 대학별 한 줄 총평(이 책의 자료 범위 안에서).....	333

제 1 부

기본개념편

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

화학 평형

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 동적 평형 → 평형 상수 K 와 그 계산 → 반응 지수 Q 와 르사틀리에 원리 → 속도·촉매와 물속의 평형 → 암모니아 합성과 바다·몸·자동차의 순서로 이어진다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠르다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장 — 구간마다 무엇을 하는가

구간	장	무엇을 하는가
A. 평형이란 무엇인가	1~2장	탄산음료 병과 닫힌 물병에서 출발해, 멈춘 것처럼 보이는 평형 안에서 정반응과 역반응이 같은 속도로 계속 일어난다는 것을 확인한다.
B. K 를 계산하는 손기술	3~6장	평형 상수식 쓰기, ICE 표로 평형 농도 구하기, K 를 뒤집고 곱하는 규칙, 기체를 부분 압력으로 다루는 K_p 까지 계산 도구를 갖춘다.
C. 방향을 정하는 법	7~10장	반응 지수 Q 를 K 와 비교해 진행 방향을 정하고, 농도·압력·온도를 바꿀 때 평형이 어디로 가는지 르사틀리에 원리로 판정한다. 온도만이 K 를 바꾼다.
D. 속도와 물속의 평형	11~12장	촉매는 속도만 바꾸고 K 는 그대로임을 보고, 기체의 용해·탄산의 이온화·염의 가수분해를 평형으로 읽는다.
E. 응용과 종합	13~14장	암모니아 합성의 조건, 해양 산성화와 달걀 껍데기, 엔진의 NO를 평형과 속도로 함께 설명하고 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

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

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	가역 반응 · 동적 평형 · 닫힌계
기본개념편 제 2장 (26쪽)	정반응·역반응 속도 · 동적 평형 · 상평형·용해 평형
기본개념편 제 3장 (36쪽)	화학 평형 법칙 · 평형 상수식 · K 의 크기와 반응의 정도
기본개념편 제 4장 (45쪽)	ICE 표 · 이차방정식 풀이 · 근사와 5 % 규칙
기본개념편 제 5장 (54쪽)	역반응의 K · 계수배와 거듭제곱 · 반응을 더하면 K 를 곱한다
기본개념편 제 6장 (64쪽)	부분 압력 · 몰분율 · K_p · $K_p = K_c(RT)^{\Delta n}$
기본개념편 제 7장 (73쪽)	반응 지수 Q · Q 와 K 의 비교 · 새 평형 계산
기본개념편 제 8장 (82쪽)	르사틀리에 원리 · 농도 변화와 평형 이동
기본개념편 제 9장 (91쪽)	부피 감소와 기체 몰수 · 비활성 기체 추가 · 피스톤 문제
기본개념편 제 10장 (101쪽)	발열·흡열과 K 의 온도 변화 · 반트호프 식(심화) · 평형과 자유 에너지(심화)

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 11장 (111쪽)	촉매와 활성화 에너지 · 평형에 이르는 시간 · 1차 반응에서 평형으로
기본개념편 제 12장 (121쪽)	기체의 용해 평형 · 탄산의 단계 이온화 · 염의 가수분해
기본개념편 제 13장 (131쪽)	하버-보슈 공정 · 수득률과 반응 속도의 절충 · 질소 비료
기본개념편 제 14장 (141쪽)	해양 산성화와 탄산칼슘 · 혈액 속 CO ₂ 평형 · 엔진과 배기구의 NO

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림과 표에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 곳은 4장(ICE 표)과 6장(부분 압력), 판단이 막히는 곳은 7~10장(Q와 르샤틀리에)이다. 이 두 구간은 두 번 읽는다.
- “농도·압력은 Q를 바꾸고, 온도만 K를 바꾼다”, “촉매는 K를 바꾸지 않는다” — 이 두 문장은 끝까지 들고 다닌다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

화학 평형은 고등학교 화학 I 에서 “동적 평형”으로 처음 만나고, 화학 II 에서 평형 상수와 평형 이동으로 깊어진다. 대학 논술에서는 평형 상수 계산, 반응 방향 판정, 조건 변화의 설명이 한 문항 안에 함께 나온다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 농도의 뜻, 간단한 비율과 제곱근)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 식을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 식을 만든다.

등장인물

- 하린 — 중학교 2학년. 궁금한 것은 바로 묻는다.
- 태오 — 고등학교 2학년, 하린의 오빠. 논술을 준비하며 계산을 대입하다 가끔 실수한다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 생활과 부역의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학·생물 교수. 단양 ‘돌집 과학방’에서 토요일마다 수업한다.

첫 토요일

늦여름 토요일 오후, 돌집 과학방 탁자 위에 이모가 가져온 콜라 두 병이 놓였다. 한 병은 아직 뚜껑이 닫혀 있고, 다른 한 병은 점심 때 열어 반쯤 마신 것이다.

이모 교수님, 이걸 그냥 마시려고 가져왔는데요. 닫힌 병은 거품이 하나도 안 보이네요.

하린 따면 거품이 막 올라오잖아요. 그럼 닫혀 있을 때는 이산화 탄소가 가만히 있는 거예요?

석 교수 좋은 질문이다. 겉으로는 가만히 있지. 그런데 정말 가만히 있는지, 아니면 들어가는 만큼 나오고 있는지는 눈으로 구별이 안 된다.

태오 들어가는 만큼 나온다는 게 무슨 뜻이에요?

석 교수 병 윗부분의 기체 CO_2 분자가 액체로 녹아 들어가고, 액체에 녹아 있던 CO_2 는 다시 기체로 빠져나온다. 두 속도가 같으면 양이 변하지 않지. 이렇게 멈춘 듯 보이지만 양쪽으로 계속 일어나는 상태를 동적 평형이라고 한다.

하린 그럼 뚜껑을 열면 그 균형이 깨지는 거네요.

석 교수 그렇다. 열면 병 위쪽의 CO_2 압력이 공기 수준으로 떨어진다. 그러면 빠져나오는 쪽이 이기고, 우리가 보는 거품이 된다.

이모 김 빠진 콜라가 맛있는 이유가 그거였군요.

태오 논술에서는 이걸 어떻게 물어요? 거품 얘기가 나오진 않을 것 같은데요.

석 교수 나온다. 바닷물이 CO_2 를 마셔서 산호가 자라기 어렵다는 문제, 여름에 달걀 껍데기가 얇아지는 문제, 공장에서 암모니아를 더 많이 얻으려면 온도와 압력을 어떻게 해야 하느냐는 문제, 자동차 배기구의 산화 질소 문제가 모두 이 단원이다.

하린 콜라, 바다, 달걀, 자동차가 다 같은 이야기라고요?

석 교수 같은 질문 네 개로 풀린다. 평형 상수 K 는 얼마인가, 지금 상태의 Q 는 얼마인가, 무엇이 바뀌었는가, 그리고 속도는 충분히 빠르나.

태오 K 는 들어 봤는데 Q 는 처음 들어요.

석 교수 K 가 도착점이라면 Q 는 지금 서 있는 자리다. 둘을 비교하면 반응이 어느 쪽으로 갈지 알 수 있지. 그건 7장에서 한다.

이모 저는 계산이 겁나요. 숫자가 많이 나오나요?

석 교수 나온다. 대신 표 하나로 정리하는 방법을 4장에서 배운다. 처음, 변화, 평형 — 가계부 세 줄처럼 쓰면 된다.

하린 그럼 오늘은 뭐부터 해요?

석 교수 오늘은 이 달힌 병부터다. 1장에서 왜 평형을 배우는지 보고, 2장에서 “멈춘 것처럼 보이는 상태” 안에서 무엇이 움직이는지 숫자로 확인한다.

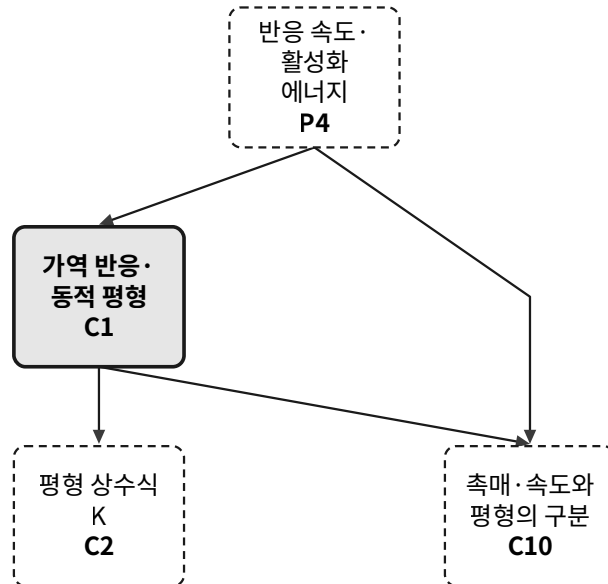
왜 화학 평형인가? 화학 반응은 대부분 끝까지 가지 않고, 정반응과 역반응이 맞서는 어느 지점에서 멈춘 것처럼 보인다. 그 지점이 어디인지(K), 지금 어느 쪽으로 가고 있는지(Q), 조건을 바꾸면 어디로 옮겨 가는지(르샤틀리에 원리), 그리고 거기까지 얼마나 빨리 가는지(속도와 촉매)를 차례로 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다. 첫 장은 **기본개념편 제 1장** (16쪽)에서 시작한다.

제 1장 왜 화학 평형인가

새 개념 가역 반응 · 동적 평형 · 닫힌계

이어집 평형 상수 3장 · 르샤틀리에 원리 8장 · 물속의 평형 12장

이 장의 개념도



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

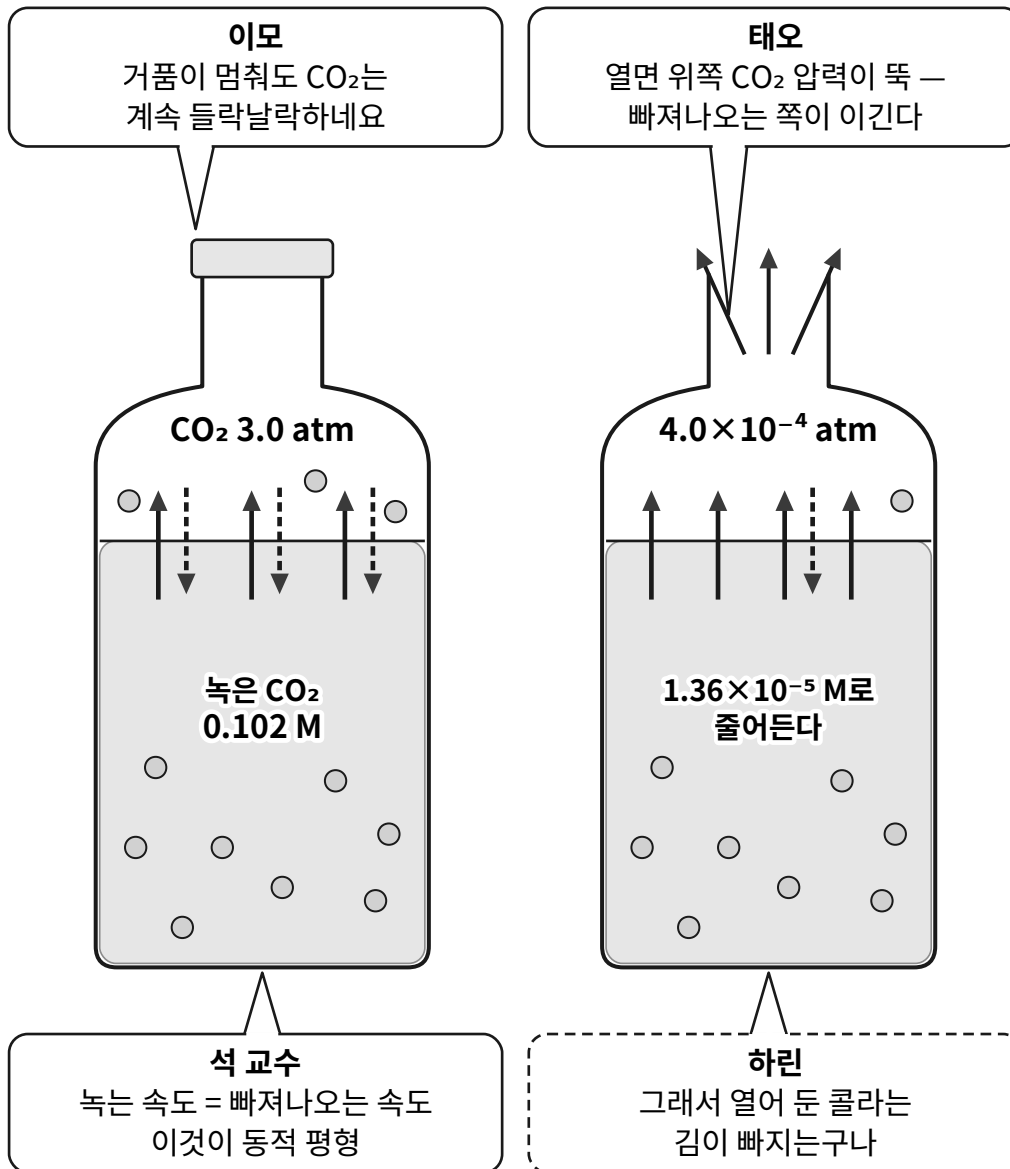
그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 가역 반응·동적 평형)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 12 (성균관대 2009년) (299쪽)	르샤틀리에 원리로 읽는 부탄가스통과 유도 전류	C1 가역 반응·동적 평형

콜라 병 두 개 — 닫힌 병과 연 병



실선 화살표 = 빠져나옴, 점선 화살표 = 녹아 들어감

두 농도의 비 = 압력의 비 = 7,500

그림 3. 닫힌 콜라 병과 연 콜라 병 — 닫힌 병에서는 CO₂가 녹아 들어가는 속도와 빠져나오는 속도가 같아 거품이 멈춘 것처럼 보이고, 뚜껑을 열면 위쪽 CO₂ 압력이 똑 떨어져 빠져나오는 쪽이 이긴다(모식도, 농도는 헨리 법칙으로 계산)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 닫힌 병에서는 CO₂가 녹는 속도와 빠져나오는 속도가 같아 양이 변하지 않는다.
2. 뚜껑을 열면 병 위쪽의 CO₂ 압력이 공기 수준으로 낮아져 평형이 깨진다.
3. 3.0 atm에서 0.10 M 녹아 있던 CO₂가 공기와 평형이 되면 7,500분의 1로 준다.

이 장의 출발점

이 장에서는 ① 분자와 몰, 몰 농도($M = \text{mol/L}$)의 뜻, ② 기체에도 압력이 있고 압력의 단위로 atm(기압)을 쓴다는 것, ③ 화학 반응식의 화살표는 “반응물 → 생성물”을 뜻한다는 것만 쓴다. 계산은 곱셈과 나눗셈, 그리고 10의 거듭제곱(10^{-5} 같은 수)을 읽을 줄 알면 충분하다.

첫 토요일 오후, 콜라 이야기가 길어지자 석 교수는 칠판 한쪽에 “끝까지 가는 반응”과 “중간에 머무는 반응”이라는 두 칸을 그렸다. 탁자 위에는 이모가 가져온 콜라 두 병이 그대로 놓여 있었다. 닫힌 병은 투명했고, 열린 병에서는 아직도 가는 거품 줄이 올라오고 있었다.

하린 교수님, 아까 “멈춘 듯 보이지만 양쪽으로 계속 일어난다”고 하셨잖아요. 그게 왜 중요한 거예요? 어차피 눈에 보이는 건 똑같은데요.

석 교수 눈에 보이는 건 똑같다. 그런데 무엇인가를 바꾸었을 때 어떻게 반응하는지는 전혀 다르다. 정말로 멈춘 것은 건드려도 그대로지만, 양쪽으로 오가는 것은 한쪽만 살짝 건드려도 전체가 움직인다. 뚜껑 하나 열었을 뿐인데 병 전체에서 거품이 솟는 게 그 증거다.

태오 그러니까 평형은 “균형을 이룬 채 움직이는 상태”라는 거죠?

석 교수 그렇다. 오늘은 세 가지를 하자. 첫째, 모든 반응이 끝까지 가지는 않는다는 것. 둘째, 평형은 닫힌 곳에서만 생긴다는 것. 셋째, 대학 논술에서 이 단원이 어떤 모습으로 나오는지 미리 보는 것.

1.1 끝까지 가지 않는 반응

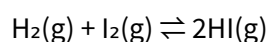
석 교수 먼저 끝까지 가는 반응부터 보자. 가스레인의 메테인이 타는 반응, 염산과 수산화 나트륨의 중화 반응. 반응물이 거의 남지 않을 때까지 간다. 이런 반응은 화살표를 한쪽으로만 쓴다.

이모 가스 불이 꺼진 뒤에 이산화 탄소가 저절로 다시 메테인으로 돌아가지는 않으니깐요.

석 교수 맞아요. 그런데 수소와 아이오딘 기체를 섞어 430 °C로 데우면 아이오딘화 수소 HI가 생기다가, 어느 순간 수소와 아이오딘이 아직 남아 있는데도 더 이상 HI가 늘지 않아요. 반대로 HI만 넣고 데워도 일부가 분해되어 수소와 아이오딘이 생기고, 같은 지점에서 멈춥니다. 양쪽에서 출발해 같은 곳에 도착하는 거예요.

하린 앞으로도 가고 뒤로도 가니까 화살표가 두 개 필요하겠네요.

석 교수 그래서 이렇게 쓴다.



석 교수 이런 반응을 **가역 반응**(reversible reaction)이라고 하고, 오른쪽으로 가는 것을 정반응, 왼쪽으로 가는 것을 역반응이라고 한다. 표 4에 두 종류의 반응을 나란히 정리해 두었다.

표 4. 끝까지 가는 반응과 평형에 머무는 반응 — 화살표 하나와 두 개의 차이

구분	반응식	끝났을 때의 모습	화살표
끝까지 가는 반응	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	반응물이 거의 남지 않는다	→
끝까지 가는 반응	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	한쪽 이온이 다 쓰일 때까지 간다	→
평형에 머무는 반응	$\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$	반응물과 생성물이 함께 남는다	⇌

구분	반응식	끝났을 때의 모습	화살표
평형에 머무는 반응	$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}_3\text{O}^+$	탄산은 일부만 이온이 된다	$\rightleftharpoons$
평형에 머무는 반응	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$	수소·질소가 남은 채 멈춘다	$\rightleftharpoons$

태오 그런데 엄밀히 말하면 연소도 아주 조금은 거꾸로 가지 않아요?

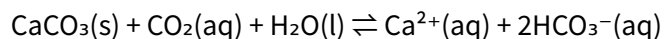
석 교수 좋은 질문이다. 원리로는 모든 반응이 가역이다. 다만 역반응 쪽이 너무 미미해서 반응물이 측정할 수 없을 만큼만 남으면 “끝까지 간다”고 말한다. 3장에서 평형 상수 K라는 숫자를 배우면, K가 아주 큰 반응이 바로 끝까지 가는 반응이라는 것을 알게 된다. 그러니까 두 칸은 딴 세상이 아니라 하나의 눈금 위 양 끝과 가운데다.

이모 탄산은 왜 평형 쪽이에요? 콜라 속에 든 그거죠?

석 교수 네. 이산화 탄소가 물에 녹으면 일부가 탄산 H_2CO_3 가 되고, 탄산은 수소 이온을 일부만 내놓는 약한 산이에요. 그래서 콜라가 시큼하지만 염산처럼 독하지는 않지요. 이 평형은 12장에서 바다와 빗물 이야기로 다시 나옵니다.

하린 평형에 머무는 반응이 또 어디 있어요? 실험실 말고요.

석 교수 단양에 많은 석회 동굴이 좋은 예다. 이산화 탄소가 녹은 빗물이 땅속으로 스며들면 석회암의 탄산칼슘을 조금씩 녹인다. 그 물이 동굴 천장에 맺히면 이번에는 물방울에서 CO_2 가 빠져나가고, 녹아 있던 탄산칼슘이 다시 고체로 쌓인다. 녹는 반응과 쌓이는 반응이 같은 식의 앞과 뒤다.



태오 땅속에서는 오른쪽으로, 동굴 천장에서는 왼쪽으로 가는 거네요. 같은 반응인데 장소에 따라 방향이 바뀌어요.

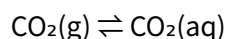
석 교수 바로 그거다. CO_2 가 많은 곳에서는 오른쪽, CO_2 가 빠져나가는 곳에서는 왼쪽. 종유석은 수천 년 동안 이 평형이 왼쪽으로 조금씩 밀려 생긴 기둥이다. 몸속에도 같은 일이 있다. 혈액의 헤모글로빈은 산소가 많은 폐에서는 산소와 결합하고, 산소가 모자란 근육에서는 산소를 내놓는다.

이모 같은 헤모글로빈이 장소마다 붙었다 떨어졌다 하는 거군요. 콜라, 동굴, 피가 다 한 가지 이야기네요.

석 교수 네. 셋 다 “어느 쪽으로든 갈 수 있는 반응이, 놓인 조건에 맞춰 방향을 정한다”는 이야기예요. 그 조건이 무엇이고 방향을 어떻게 판정하는지가 이 책 전체의 내용입니다.

콜라 병 속의 CO_2

석 교수 이제 콜라 병으로 돌아가자. 기체가 액체에 녹는 것도 가역적인 과정이다.



하린 (aq)는 뭐예요?

석 교수 물에 녹아 있다는 표시다. aqueous(수용액)의 앞 글자. (g)는 기체, (l)은 액체, (s)는 고체.

석 교수 1803년 영국의 헨리는 기체가 녹는 양이 그 기체의 압력에 비례한다는 것을 실험으로 보였다. 이것을 **헨리 법칙**이라 하고, 식으로는 이렇게 쓴다.

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] = K_H \times P_{\text{CO}_2}, 25^\circ\text{C에서 } K_H = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm}$$

석 교수 비례 상수 K_H 를 헨리 상수라고 부른다. 압력이 두 배면 녹는 양도 두 배다. 닫힌 콜라 병 위쪽 공간의 CO_2 압력이 대략 3기압이라고 하자. 녹은 CO_2 는 얼마일까?

K_H 는 헨리 상수. 기체마다, 온도마다 값이 다르다.

문제 1.1

25 °C에서 닫힌 콜라 병 위쪽 공간의 CO_2 압력이 3.0 atm이다. 헨리 상수 $K_H = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm}$ 일 때 콜라에 녹아 있는 CO_2 의 몰 농도와, 1 L에 녹은 CO_2 의 질량을 구하라. (CO_2 의 몰 질량 44 g/mol)

태오 곱하기만 하면 되네요. $3.4 \times 10^{-2} \times 3.0 = 0.102 \text{ M}$ 이요.

석 교수 단위도 확인해 보자. M/atm에 atm을 곱하면?

태오 atm이 지워지고 M만 남아요. 그러니까 0.102 mol/L.

하린 질량은 $0.102 \text{ mol} \times 44 \text{ g/mol} = 4.488 \text{ g}$ 이니까 1 L에 약 4.5 g이에요.

석 교수 정답은 0.10 M(0.102 M), 1 L에 약 4.5 g이다. 유효숫자를 두 자리로 쓰면 0.10 M이지. 각설탕 한 개가 3~4 g쯤이니, 각설탕 하나보다 조금 무거운 기체가 1 L 병에 녹아 있는 셈이다.

이모 기체가 그렇게 많이 녹아 있었다니 놀랍네요. 그래서 따면 그렇게 넘치는군요.

태오 그런데 미지근한 콜라를 따면 거품이 더 심하게 넘치던데요. 온도도 상관이 있어요?

석 교수 있다. 헨리 상수 K_H 는 온도마다 값이 다르고, CO_2 처럼 녹을 때 열을 내놓는 기체는 온도가 오를수록 K_H 가 작아진다. 같은 압력에서도 따뜻한 콜라에는 덜 녹아 있을 수 있다는 뜻이고, 그만큼 남은 CO_2 가 거품으로 빠져나온다. 온도가 평형 자체를 바꾸는 이 현상은 10장에서 “온도만 K를 바꾼다”는 문장으로 정리한다.

헨리 법칙이 잘 맞는 범위

헨리 법칙은 녹는 양이 적고, 녹은 기체가 물과 크게 반응하지 않을 때 잘 맞는다. CO_2 는 녹은 것의 극히 일부만 탄산으로 바뀌므로 콜라·탄산수 정도의 압력에서는 잘 맞는다. 반면 물과 강하게 반응하는 암모니아(NH_3)나 염화 수소(HCl)는 압력에 비례하는 것보다 훨씬 많이 녹아 헨리 법칙에서 크게 벗어난다.

1.2 “멈춘 것 같다”와 “멈췄다”의 차이

석 교수 그럼 이 질문을 해 보자. 닫힌 병의 콜라는 하루가 지나도, 한 달이 지나도 녹은 CO_2 농도가 0.10 M 그대로다. 이것은 CO_2 가 움직이지 않는다는 뜻일까?

하린 아까 말씀하신 대로라면 움직이고 있죠. 들어가는 분자 수와 나오는 분자 수가 같을 뿐이고요.

석 교수 그렇다. 그림 4의 왼쪽이 닫힌 병이다. 위쪽 공간에서 액체 표면에 부딪혀 녹아 들어가는 화살표와, 액체 속에서 표면으로 올라와 빠져나가는 화살표의 수가 같다. 오른쪽은 연 병이다.

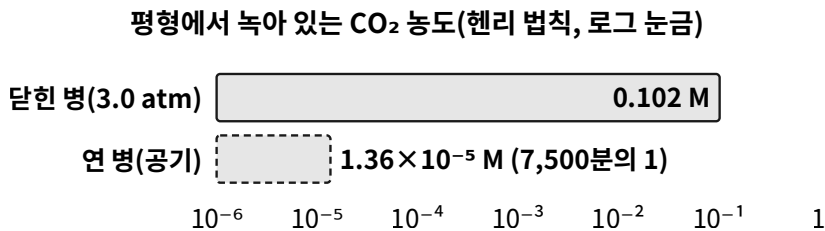
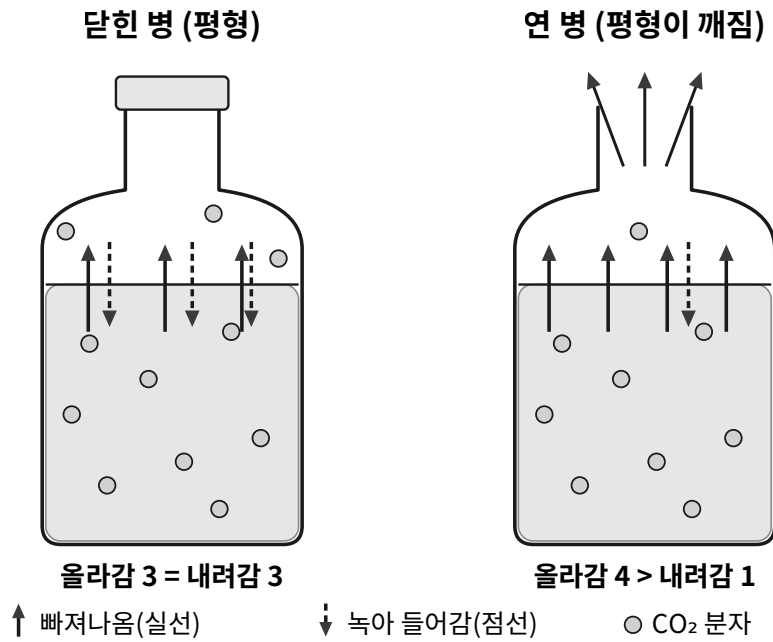


그림 4. 닫힌 병과 연 병의 CO₂ 출입 — 닫힌 병에서는 녹아 들어가는 수와 빠져나오는 수가 같다. 연 병에서는 위쪽의 CO₂가 공기 중으로 흩어져 빠져나오는 쪽이 우세하다. 아래 막대는 헨리 법칙으로 계산한 평형 농도(로그 눈금)이다.

태오 오른쪽 병은 화살표가 위로만 많아요. 들어가는 화살표는 하나뿐이고요.

석 교수 병을 열면 위쪽 공간의 CO₂가 공기 중으로 흩어진다. 공기 중 CO₂의 압력은 약 4.0×10^{-4} atm, 곧 0.04 % 정도다. 녹아 들어가는 속도는 기체 쪽 압력에 비례하니 거의 0으로 떨어지고, 빠져나오는 속도는 아직 녹아 있는 양에 비례하니 그대로다. 그래서 빠져나오는 쪽이 이긴다.

이모 그럼 열어 놓은 콜라는 언제까지 김이 빠지나요?

석 교수 공기와 새로운 평형을 이룰 때까지예요. 그때의 농도도 헨리 법칙으로 계산할 수 있어요.

문제 1.2

문제 1.1의 콜라를 뚜껑을 연 채 두어 공기 중 CO₂(압력 4.0×10^{-4} atm)와 평형이 되었다. 이 때 녹아 있는 CO₂의 몰 농도를 구하고, 처음 농도의 몇 분의 1인지 구하라.

하린 이번에도 곱하면 돼요. $3.4 \times 10^{-2} \times 4.0 \times 10^{-4} = 13.6 \times 10^{-6} = 1.36 \times 10^{-5}$ M이에요.

태오 처음이 0.102 M이니깐 $0.102 \div (1.36 \times 10^{-5}) = 7,500$. 7,500분의 1이에요.

석 교수 정답은 1.36×10^{-5} M, 처음의 7,500분의 1이다. 계산도 쉽다. 헨리 법칙에서는 농도가 압력에 비례하니, 압력 비 $3.0 \div (4.0 \times 10^{-4}) = 7,500$ 과 같아야 한다. 같다.

이모 7,500분의 1이면 거의 맹물이에요. 그래서 김 빠진 콜라는 단맛만 남는군요.

석 교수 이 계산에서 중요한 건 숫자보다 생각의 순서예요. 닫힌 병은 0.10 M에서 평형, 연 병은 1.36×10^{-5} M에서 평형. 평형은 하나가 아니라 조건마다 따로 있고, 조건을 바꾸면 계는 새 평형을 찾아갑니다. 이 “새 평형 찾기”가 8장부터 배우는 르샤틀리에 원리의 핵심이에요.

닫힌계와 열린계

태오 그럼 연 병은 평형이 아예 안 되는 거예요? 계속 빠져나가기만 하니까요.

석 교수 날카롭다. 병만 놓고 보면 위쪽이 뚫려 있어 기체가 계속 나간다. 이런 곳을 **열린계**라고 한다. 물질이 드나드는 곳이지. 반대로 뚜껑을 닫아 물질이 드나들지 못하는 곳을 **닫힌계**라고 한다. 화학 평형은 원칙적으로 닫힌계에서 생긴다.

하린 그런데 방금 연 병도 공기와 평형이 된다고 하셨잖아요.

석 교수 그건 병 위의 공기 전체를 하나의 거대한 닫힌계처럼 볼 수 있어서다. 대기 중 CO_2 압력은 콜라 몇 병이 김을 내놓아도 사실상 변하지 않는다. 그래서 콜라 쪽만 보면 “압력이 4.0×10^{-4} atm으로 고정된 상대”와 평형을 이루는 셈이다. 바다가 대기와 CO_2 를 주고받는 것도 같은 구조인데, 이 이야기는 14장에서 다시 한다.

이모 사람 몸은요? 숨을 계속 쉬니까 열린계겠네요.

석 교수 네, 몸은 대표적인 열린계예요. 몸속에서는 평형이 아니라 들어오는 양과 나가는 양이 맞춰진 “정상 상태”가 많아요. 다만 혈액 속 탄산이나 헤모글로빈과 산소처럼 빠르게 오가는 반응은 그 자리에서 평형에 가깝게 맞춰지기 때문에 평형으로 읽을 수 있습니다. 8장과 14장에서 다루요.

평형은 “양이 같아진 상태”가 아니다

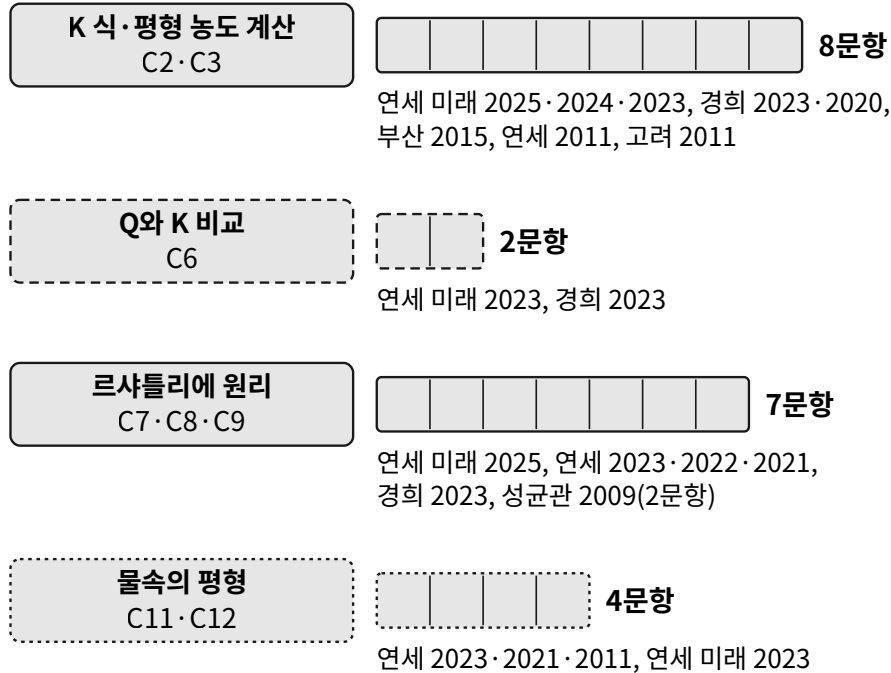
평형에서 같아지는 것은 정반응과 역반응의 **속도**이지, 반응물과 생성물의 **양**이 아니다. 닫힌 콜라 병의 평형에서도 기체 CO_2 와 녹은 CO_2 의 양은 서로 다르다. “평형 = 반반”이라고 쓰는 것은 논술에서 가장 흔한 감점 가운데 하나다.

1.3 기출은 무엇을 묻나

태오 교수님, 이제 시험 얘기 좀 해 주세요. 이 단원 기출이 몇 개나 돼요?

석 교수 이 책에서 다루는 기출은 열세 문항이다. 2009년부터 2025년까지 연세대(서울·미래캠퍼스), 경희대, 부산대, 고려대, 성균관대에서 나왔다. 이걸 묻는 것에 따라 네 갈래로 나눠 보면 **그림 5**와 같다.

기출 13문항 (2009-2025)



한 문항이 여러 갈래에 걸치므로 합(21)은 13보다 크다

그림 5. 기출 13문항의 네 갈래 — 한 문항이 여러 갈래에 걸치므로 합은 13보다 크다. K 식과 평형 농도 계산이 8문항으로 가장 많고, 르샤틀리에 원리 7문항, 물속의 평형 4문항, Q 비교 2문항이다.

- 하린** K 계산이 8개나 돼요. 제일 많네요.
- 석 교수** 평형 상수식을 쓰고, 표를 그려 평형 농도나 부분 압력을 구하는 문제다. 3·4·6장의 도구로 푼다. 연세대 미래캠퍼스는 해마다 이 계산을 냈고, 경희대 2020년과 2023년도 그렇다.
- 태오** 르샤틀리에가 7개. 이걸 서술이 많겠죠?
- 석 교수** “온도를 낮추면 어떻게 되는가, 그 이유는?” 같은 서술이 많다. 다만 2025년 연세대 미래캠퍼스처럼 피스톤이 달린 용기에서 부피가 몇 배가 되는지 계산하게 하는 문제도 있다. 8·9·10장에서 다룬다.
- 이모** 물속의 평형은 바다 이야기인가요?
- 석 교수** 네. 2021년 연세대의 해양 산성화와 달걀 껍데기 문제가 대표적이에요. 이산화 탄소가 녹고, 탄산이 이온이 되고, 탄산 이온이 칼슘과 만나 탄산칼슘이 되는 평형 세 개가 사슬처럼 이어져 있어요. 12장과 14장에서 푼다.
- 하린** Q 비교는 2개뿐이네요. 덜 중요한가요?
- 석 교수** 오히려 반대다. 숫자는 적지만 다른 갈래를 풀 때도 머릿속에서는 늘 Q를 쓰고 있다. 르샤틀리에 원리를 “왜 그런가”까지 설명하려면 Q를 꺼내야 하거든. 7장을 기점으로 계산과 서술이 하나로 묶인다.
- 태오** 그럼 제일 중요한 장은 몇 장이에요?

석 교수 계산으로는 4장, 판단으로는 7장이다. 그리고 한 문장을 끝까지 들고 가자. “농도와 압력은 Q 를 바꾸고, 온도만 K 를 바꾼다.” 이것만 정확히 써도 르샤틀리에 서술 문제의 절반은 맞는다.

1.4 이 책의 길

석 교수 마지막으로 앞으로 14장의 지도를 그려 보자. 2장에서는 멈춘 듯 보이는 상태에서 정반응과 역반응의 속도가 같아지는 과정을 숫자로 그린다. 3장에서 평형이 남기는 하나의 숫자 K 를 만나고, 4장에서 그 K 로 평형 농도를 구하는 표를 쓴다.

하린 5장, 6장은요?

석 교수 5장은 반응식을 뒤집거나 두 배로 하거나 두 반응을 더했을 때 K 가 어떻게 바뀌는지, 6장은 기체를 농도 대신 압력으로 다루는 법이다. 7장이 Q , 8·9·10장이 농도·압력·온도를 바꿀 때의 르샤틀리에 원리, 11장이 촉매와 속도, 12장이 물속의 평형이다.

태오 13장, 14장은 응용이고요.

석 교수 13장은 암모니아 합성이다. 공기 속 질소를 비료로 바꾼 이 공정은 평형과 속도가 서로 반대 방향을 원할 때 어떻게 타협하는지 보여 주는 가장 좋은 예다. 14장에서는 바다, 몸, 자동차를 한꺼번에 보고 2부로 넘어간다.

이모 결국 콜라 한 병에서 출발해서 비료 공장과 바다까지 가는 거네요.

석 교수 네. 그리고 그 사이에 쓰는 질문은 언제나 넷이에요. K 는 얼마인가, 지금 Q 는 얼마인가, 무엇이 바뀌었는가, 속도는 충분히 빠르나.

핵심 화학 평형을 읽는 첫 단계

1. 반응이 끝까지 가는지($\rightarrow$), 반응물과 생성물이 함께 남는지($\rightleftharpoons$)를 먼저 구분한다.
2. 평형에서 같아지는 것은 정반응과 역반응의 속도이다. 양이 같아지는 것이 아니다.
3. 평형은 닫힌계에서 생긴다. 조건(압력·농도·온도)이 바뀌면 계는 새 평형을 찾아간다.
4. 기체의 용해 평형에서는 녹은 농도가 기체의 압력에 비례한다(헨리 법칙, $[CO_2] = K_H \times P$).
5. 문제를 읽으면 네 질문을 차례로 한다: K 는? Q 는? 무엇이 바뀌었나? 속도는?

스스로 풀어 보기

1. 메테인의 연소와 $H_2 + I_2 \rightarrow 2HI$ 반응 가운데 어느 것을 $\rightleftharpoons$ 로 쓰는 것이 알맞은지 쓰고, 그 이유를 한 문장으로 쓰라.
2. 25 °C에서 위쪽 CO_2 압력이 2.0 atm인 탄산수 병에 녹아 있는 CO_2 의 몰 농도를 구하라($K_H = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm}$).
3. “평형 상태에서는 반응물과 생성물의 양이 같다”는 문장에서 틀린 곳을 찾아 고쳐 쓰라.
4. 닫힌 콜라 병의 거품이 멈춘 상태를 “정지 상태”가 아니라 “동적 평형”이라고 부르는 까닭을 두 문장으로 설명하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장에서 본 “녹아 들어가는 속도 = 빠져나오는 속도”와 “조건이 바뀌면 새 평형으로 간다”는 두 생각은 4부 기출의 출발점이다. **기출문제 7**(연세대 2021) (252쪽)는 대기 중 CO_2 가 늘어 바닷물에 더 많이 녹을 때 탄산칼슘 평형이 어느 쪽으로 가는지, 여름에 닭이 헐떡여 CO_2 를 많이 내보낼 때 달걀 껍데기

가 왜 얇아지는지를 묻는다. 콜라 병의 거품과 같은 구조다. **기출문제 3**(연세대 2023) (218쪽)는 공기의 질소를 암모니아로 바꾸는 하버의 공정에서 출발해 질소 비료를 설명하게 하고, **기출문제 5**(경희대 2023) (235쪽)은 같은 암모니아 합성 평형에서 평형 상수와 반응 지수를 계산한 뒤 수득률을 높이는 조건을 쓰게 한다. 지금은 문제를 풀지 않아도 된다. 다만 세 문항 모두 “달힌 계의 평형이 조건 변화에 어떻게 응답하는가”를 묻는다는 점을 기억하고 2장으로 가자.

이 장의 참고문헌

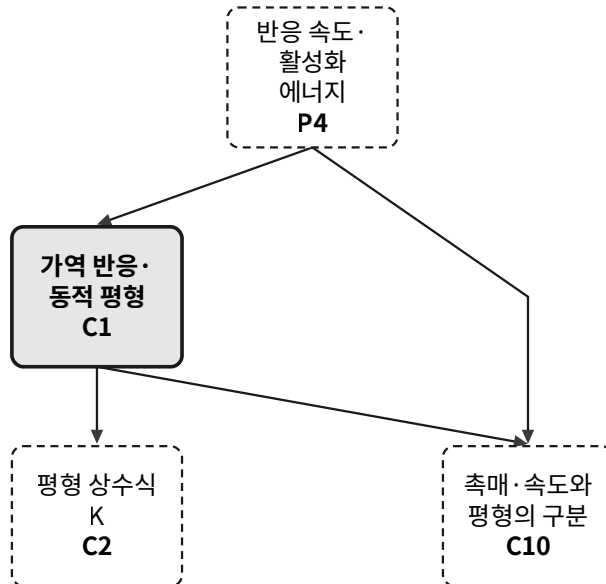
- Henry, W. (1803). Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 93, 29–274. <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>
- Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4399–4981. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>
- Banerjee, A. C. (1991). Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 13(4), 487–494. <https://doi.org/10.1080/0950069910130411>
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.

제 2장 가역 반응과 동적 평형: 멈춘 듯 움직이는 상태

새 개념 정반응·역반응 속도 · 동적 평형 · 상평형·용해 평형

이어집 평형 상수 3장 · 촉매 11장

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(C1 가역 반응·동적 평형)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 12 (성균관대 2009년) (299쪽)	르샤틀리에 원리로 읽는 부탄가스통과 유도 전류	C1 가역 반응·동적 평형

창가의 닫힌 물병 — 물 높이가 그대로인 까닭

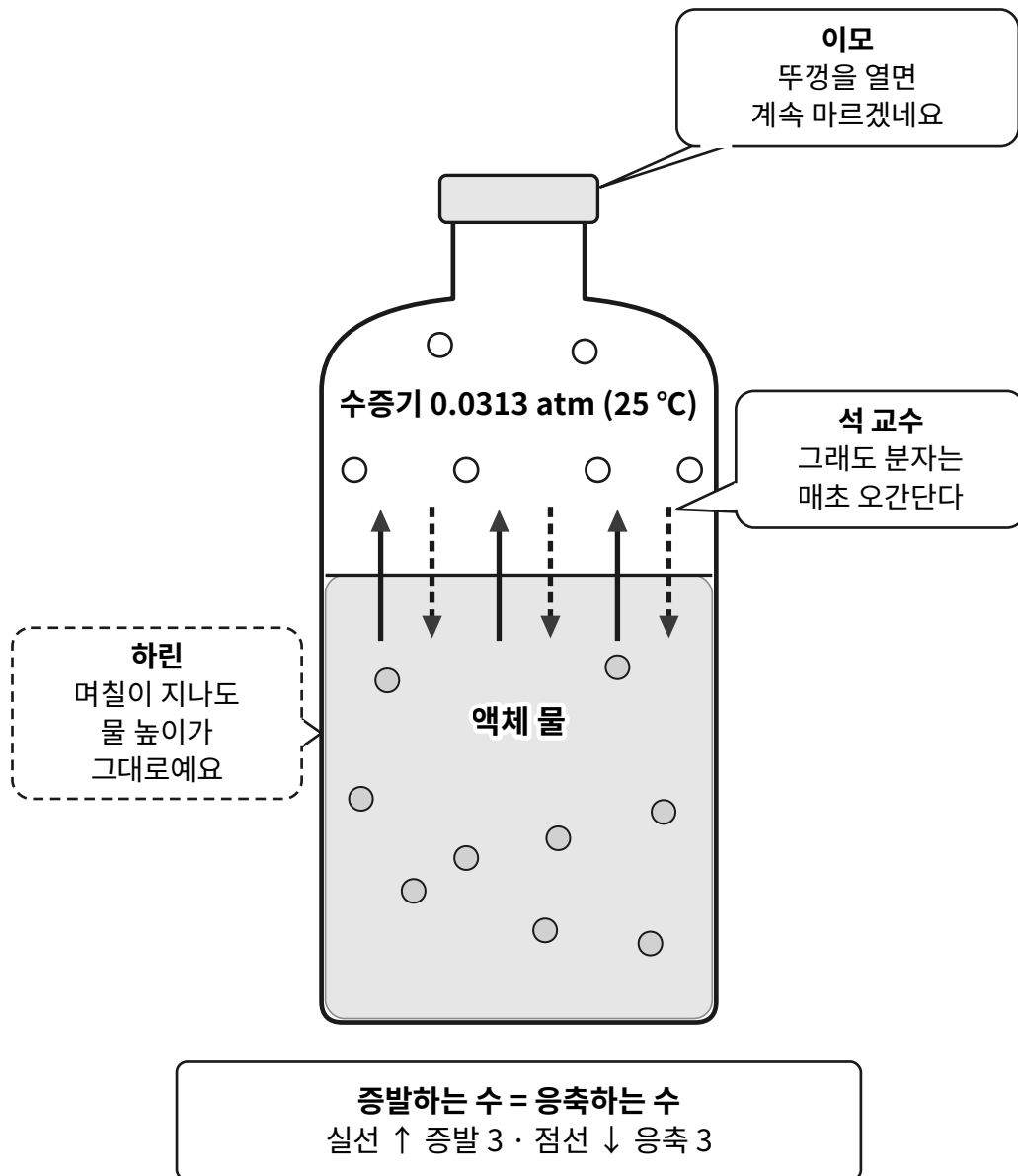


그림 7. 닫힌 물병의 단면 — 물 표면에서 증발하는 분자 수와 응축하는 분자 수가 같아지면 물 높이가 변하지 않는다. 뚜껑을 열면 수증기가 공기 중으로 흩어져 증발이 계속 이긴다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 닫힌 물병에서는 증발하는 분자 수와 응축하는 분자 수가 같아 물 높이가 그대로이다.
2. 그때 병 속 수증기의 압력이 그 온도의 증기압(25 °C에서 0.0313 atm)이다.
3. 뚜껑을 열면 수증기가 흩어져 응축이 줄고, 물은 계속 마른다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (16쪽)에서 본 세 가지를 쓴다. ① 가역 반응은 $\rightleftharpoons$ 로 쓰고, 오른쪽이 정반응, 왼쪽이 역반응이다. ② 평형은 닫힌계에서 생긴다. ③ 평형에서 같아지는 것은 양이 아니라 속도다. 여기에 반응 속도가 “단위 시간에 농도가 변하는 양(M/분)”이라는 뜻과, 농도가 클수록 반응이 빨라진다는 사실을 더한다.

둘째 토요일, 석 교수는 물을 반쯤 채운 투명한 물병의 뚜껑을 꼭 닫아 창가에 놓았다. 지난주 콜라 병에서 “들어가는 만큼 나온다”는 말을 들은 하린은, 그 말을 숫자로 보여 달라고 했다.

하린 교수님, 지난주에 평형에서는 정반응과 역반응의 속도가 같다고 하셨잖아요. 그런데 처음부터 같은 건 아니죠? 언제 같아지는 거예요?

석 교수 오늘은 그걸 숫자로 따라가 보자. 처음에는 정반응만 빠르고, 역반응은 0에서 시작한다. 시간이 지나면서 한쪽은 느려지고 한쪽은 빨라져서 어느 순간 둘이 같아진다. 그 순간부터가 평형이다.

태오 그럼 평형이 되면 반응이 멈추는 건 아니고요.

석 교수 멈추지 않는다. 오늘 마지막에 그 증거가 되는 실험도 하나 보여 주마.

2.1 가역 반응의 화살표

석 교수 먼저 간단한 반응을 하나 정하자. 물질 A가 B로 바뀌고, B도 A로 돌아갈 수 있는 가상의 반응이다.



석 교수 정반응 $A \rightarrow B$ 의 속도는 A의 농도에 비례하고, 역반응 $B \rightarrow A$ 의 속도는 B의 농도에 비례한다고 하자. 비례 상수를 속도 상수라고 부르고 k로 쓴다.

$$\text{정반응 속도 } v_1 = k_1[A], \text{ 역반응 속도 } v_2 = k_2[B]$$

하린 k_1 이랑 k_2 는 무슨 뜻이에요?

석 교수 1분에 얼마만큼의 비율이 바뀌느냐는 뜻이다. $k_1 = 0.30 \text{ 분}^{-1}$ 이면 A 가운데 1분에 약 30%의 비율로 B가 되려는 경향이 있다는 것이다. $k_2 = 0.10 \text{ 분}^{-1}$ 이면 B는 그보다 느리게, 약 10%의 비율로 A로 돌아간다. 이 반응에서는 정반응이 역반응보다 세 배 빠른 “성격”을 가진 셈이다.

대괄호 [A]는 A의 몰 농도(M)를 뜻한다.

⇌와 ↔는 다르다

가역 반응에는 반쪽 화살촉이 위아래로 엇갈린 $\rightleftharpoons$ 를 쓴다. 양쪽에 화살촉이 달린 $\leftrightarrow$ 는 공명 구조(한 분자를 두 가지 구조식으로 나타낼 때)에 쓰는 기호이므로 평형에 쓰면 안 된다. 답안에서는 $\rightarrow$ 와 $\rightleftharpoons$ 를 구분해 쓰고, 끝까지 가는 반응에 $\rightleftharpoons$ 를 쓰지 않는다.

태오 속도 상수가 다르면 평형에서 양도 다르겠네요.

석 교수 그렇다. 지금 그걸 계산해 보자. 처음에 A만 1.0 M 있고 B는 없다고 하자.

2.2 속도가 같아질 때

석 교수 시작하는 순간을 보자. $[A] = 1.0 \text{ M}$, $[B] = 0$ 이다. 두 속도는?

태오 정반응 속도는 $0.30 \times 1.0 = 0.30 \text{ M/분}$ 이고, 역반응 속도는 $0.10 \times 0 = 0$ 이에요.

석 교수 그래서 처음에는 A가 B로 바뀌기만 한다. 그런데 A가 줄면 정반응 속도가 줄고, B가 늘면 역반응 속도가 는다. 1분 뒤에는 $[A]$ 가 0.753 M , $[B]$ 가 0.247 M 쯤 된다. 그때 두 속도는?

하린 정반응은 $0.30 \times 0.753 = 0.226 \text{ M/분}$ 이고, 역반응은 $0.10 \times 0.247 = 0.0247 \text{ M/분}$ 이에요. 정반응이 아직 훨씬 빠르네요.

석 교수 5분 뒤에는 $[A]$ 0.352 M , $[B]$ 0.648 M 이다.

태오 정반응 $0.30 \times 0.352 = 0.106$, 역반응 $0.10 \times 0.648 = 0.0648$. 차이가 많이 줄었어요.

석 교수 이렇게 둘이 점점 다가가서 결국 같아진다. **그림 8**는 농도가, **그림 9**는 두 속도가 시간에 따라 어떻게 변하는지 계산해서 그린 것이다.

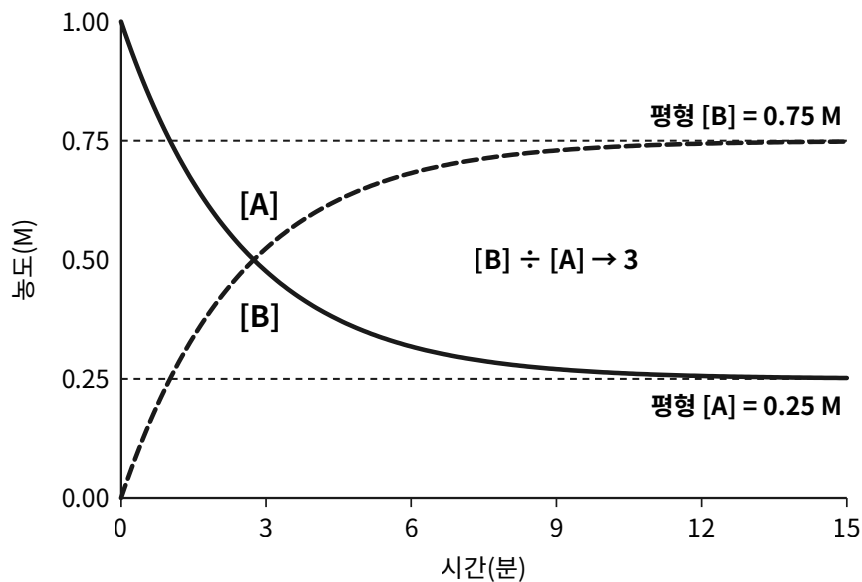


그림 8. $A \rightleftharpoons B$ (정반응 속도 상수 0.30 분^{-1} , 역반응 0.10 분^{-1} , 처음 $[A] = 1.0 \text{ M}$)의 농도 변화 — $[A]$ 는 1.0 M 에서 줄어 0.25 M 에, $[B]$ 는 0 에서 늘어 0.75 M 에 다가가간다. 점선은 평형 농도이다. 계산식 $[A] = 0.25 + 0.75e^{-0.40t}$.

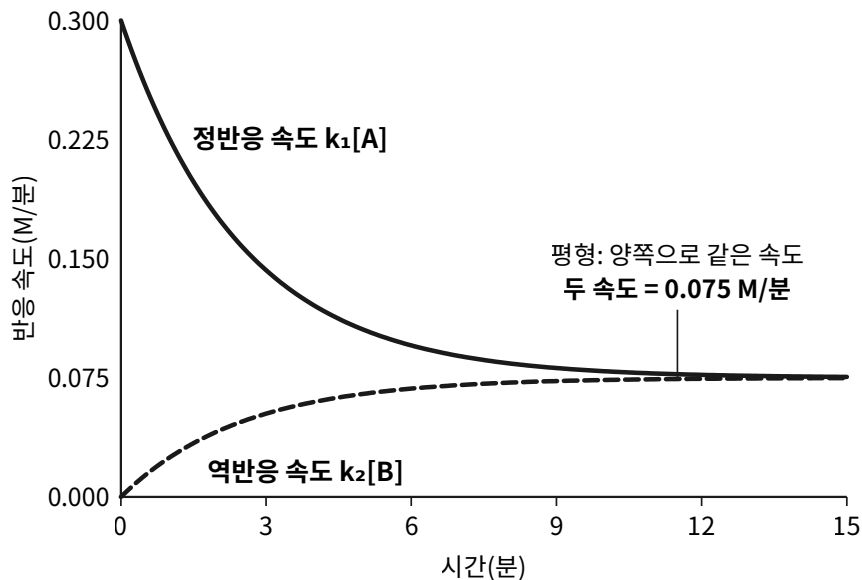


그림 9. 같은 반응의 정반응 속도 $k_1[A]$ 와 역반응 속도 $k_2[B]$ — 정반응 속도는 0.30 M/분에서 줄고, 역반응 속도는 0에서 늘어 둘 다 0.075 M/분에서 만난다. 만난 뒤에도 두 반응은 같은 속도로 계속 일어난다.

이모 두 곡선이 0.075에서 만나네요. 그 뒤로는 줄을 그은 것처럼 평평하고요.

석 교수 그 평평한 구간이 평형이에요. 농도 그래프에서도 [A]와 [B]가 각각 0.25 M과 0.75 M에서 더 이상 변하지 않지요. 하지만 속도 그래프를 보면 0이 아니라 0.075 M/분이에요. 1분마다 0.075 M의 A가 B로 바뀌고, 같은 0.075 M의 B가 A로 돌아가는 거예요.

하린 그래서 “동적” 평형이군요. 움직이는데 양은 그대로.

문제 2.1

A $\rightleftharpoons$ B 반응에서 정반응 속도 상수 $k_1 = 0.30 \text{ 분}^{-1}$, 역반응 속도 상수 $k_2 = 0.10 \text{ 분}^{-1}$ 이다. 처음에 A만 1.0 M 넣었을 때 평형에서 [A]와 [B]를 구하라. 또 평형에서 정반응 속도를 구하라.

태오 평형이니깐 반반, $[A] = [B] = 0.50 \text{ M}$ 아니에요?

하린 오빠, 지난주에 그게 제일 흔한 감점이라고 했잖아. 같아지는 건 양이 아니라 속도래.

태오 아, 맞다. 0.50 M씩이면 정반응 속도는 $0.30 \times 0.50 = 0.15$, 역반응은 $0.10 \times 0.50 = 0.05$ 로 같지 않네요. 다시 할게요.

태오 평형에서는 두 속도가 같으니까 $0.30[A] = 0.10[B]$ 예요. 그러면 $[B] = 3[A]$.

하린 그리고 A가 B로 바뀌기만 하니까 $[A] + [B]$ 는 처음의 1.0 M 그대로예요. $[A] + 3[A] = 1.0$, $[A] = 0.25 \text{ M}$, $[B] = 0.75 \text{ M}$!

석 교수 정답은 $[A] = 0.25 \text{ M}$, $[B] = 0.75 \text{ M}$ 이다. 평형에서 정반응 속도는?

태오 $0.30 \times 0.25 = 0.075 \text{ M/분}$ 이요. 역반응도 $0.10 \times 0.75 = 0.075 \text{ M/분}$ 으로 같아요.

석 교수 계산까지 완벽하다. 이 계산에서 하나를 더 보자. 평형에서 $[B] \div [A]$ 는?

하린 $0.75 \div 0.25 = 3$ 이요. $k_1 \div k_2 = 0.30 \div 0.10 = 3$ 이랑 같네요!

석 교수 우연이 아니다. 평형 조건 $k_1[A] = k_2[B]$ 를 정리하면 $[B]/[A] = k_1/k_2$ 가 된다. 처음 농도가 얼마든 이 비는 3으로 같다. 이 “평형에서의 농도 비”에 이름을 붙인 것이 다음 장의 평형 상수 K다.

이모 처음에 B만 넣고 시작하면요?

석 교수 그때는 역반응만 일어나다가 정반응이 따라붙어요. 그래도 도착점은 똑같이 $[B]/[A] = 3$ 입니다. B 1.0 M에서 출발하면 역시 $[A] 0.25 \text{ M}$, $[B] 0.75 \text{ M}$ 에서 멈추지요. 어느 쪽에서 출발해도 같은 곳에 도착한다는 것, 이것이 평형의 중요한 성질이에요.

평형까지 얼마나 걸리나

태오 그래프를 보면 15분쯤 지나야 거의 평평해지는데, 평형에 도착하는 시간도 계산할 수 있어요?

석 교수 이 반응에서는 평형까지 남은 거리가 1분마다 같은 비율로 줄어든다. 그 비율을 정하는 것은 $k_1 + k_2 = 0.40 \text{ 분}^{-1}$ 이다. 남은 거리가 절반이 되는 데 $\ln 2 \div 0.40 = 1.73 \text{ 분}$, 1 %만 남는 데 $\ln 100 \div 0.40 = 11.5 \text{ 분이 걸린다.}$

하린 그럼 속도 상수가 둘 다 열 배 빨라지면요?

석 교수 $k_1 + k_2$ 가 4.0 분^{-1} 이 되니 열 배 빨리 도착한다. 그런데 k_1/k_2 는 여전히 3이니 도착점은 그대로다. 이 사실이 11장에서 배울 촉매의 비밀이다. 촉매는 도착 시간을 줄이지만 도착점은 바꾸지 않는다.

이모 도착점은 그대로인데 가는 시간만 짧아진다니, 고속도로를 타도 목적지가 바뀌지 않는 것과 같네요.

석 교수 네, 이 책에서 계속 쓸 비유예요. 평형은 목적지, 속도는 도착 시간. 두 가지를 섞어 쓰면 논술 답안이 흔들립니다.

평형의 네 가지 표시

이모 그럼 어떤 상태를 보고 “이건 평형이다”라고 말할 수 있어요? 눈으로는 멈춘 것과 구별이 안 된다면서요.

석 교수 네 가지를 확인하면 돼요. 첫째, 닫힌계여야 해요. 물질이 드나들면 평형이 아니라 다른 상태지요. 둘째, 농도·압력·색깔 같은 걸로 보이는 성질이 시간이 지나도 변하지 않아요. 셋째, 반응물 쪽에서 출발해도, 생성물 쪽에서 출발해도 같은 상태에 도착해요. 넷째, 그 안에서는 정반응과 역반응이 같은 속도로 계속 일어나요.

태오 둘째만으로는 부족하겠네요. 반응이 너무 느려서 안 변하는 것일 수도 있으니까요.

석 교수 날카롭다. 수소와 산소를 섞어 상온에 두면 몇 년이 지나도 물이 거의 생기지 않는다. 걸 보기 성질이 변하지 않지만 평형이 아니다. 불꽃 하나만 대면 폭발하듯 반응하니까. 그래서 셋째 조건, 양쪽에서 출발해 같은 곳에 오는지를 보는 게 중요하다. 이 구분이 11장에서 “속도의 문제”와 “평형의 문제”를 나누는 출발점이 된다.

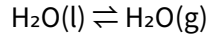
하린 걸로 멈춘 것 중에는 평형인 것도 있고, 그냥 느린 것도 있다는 거네요.

교과서의 그래프와 이 그래프

교과서에서는 반응물과 생성물 농도가 “어느 시점부터 수평이 된다”고 그린다. 실제로는 평형에 끝없이 다가가는 곡선이어서 정확히 어느 순간에 평형이 되었다고 말하기 어렵다. 실험에서는 측정 오차보다 변화가 작아지면 평형에 도달했다고 본다. 이 반응에서는 15분이면 남은 차이가 0.002 M 정도로 줄어든다.

2.3 물리적 평형: 증발과 응축, 녹음과 석출

석 교수 이제 창가의 물병을 보자. 화학 반응이 아니어도 같은 일이 일어난다. 물 분자는 표면에서 증발해 수증기가 되고, 수증기 분자는 표면에 부딪혀 다시 물이 된다.



하린 뚜껑을 닫아 놔두니까 증발한 수증기가 갈 곳이 없겠네요.

석 교수 처음 뚜껑을 닫았을 때는 병 속 공기에 수증기가 적어서 증발이 응축보다 많다. 수증기가 쌓일수록 응축이 늘어 결국 둘이 같아진다. 그때의 수증기 압력이 그 온도의 **증기압**이다. 25 °C의 물은 23.8 mmHg, 곧 $23.8 \div 760 = 0.0313 \text{ atm}$ 이다. **그림 10**가 그 과정이다.

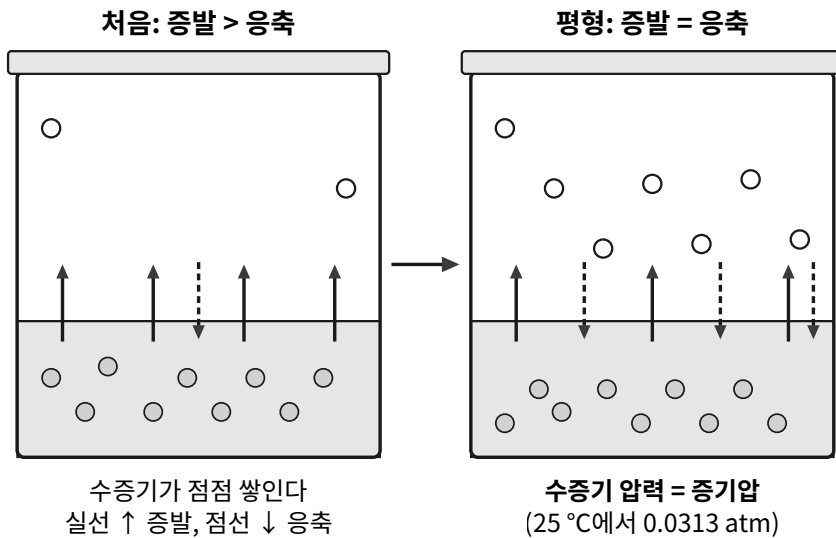


그림 10. 닫힌 용기의 증발과 응축 — 왼쪽(처음)은 증발하는 분자가 응축하는 분자보다 많고, 오른쪽(평형)은 두 수가 같다. 평형에서 위쪽 수증기의 압력이 그 온도의 증기압이다(25 °C에서 0.0313 atm).

문제 2.2

25 °C에서 물이 조금 들어 있고 위쪽에 1.0 L의 빈 공간이 있는 물병의 뚜껑을 닫아 두었다. 평형에서 위쪽 공간에 있는 수증기의 몰수와 질량을 구하라. (물의 증기압 0.0313 atm, $R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 물의 몰 질량 18 g/mol)

태오 이상 기체 상태 방정식 $PV = nRT$ 를 쓰면 되죠. $n = PV/RT = 0.0313 \times 1.0 \div (0.082 \times 298)$.

하린 $0.082 \times 298 = 24.4$ 니까 $0.0313 \div 24.4 = 0.00128 \text{ mol}$ 이에요.

태오 $1.28 \times 10^{-3} \text{ mol}$ 에 18 g/mol을 곱하면 0.023 g이요. 생각보다 엄청 적네요.

석 교수 정답은 $1.28 \times 10^{-3} \text{ mol}$, 0.023 g이다. 물 한 방울(약 0.05 g)의 절반쯤만 증발해도 1 L 공간이 포화되는 셈이지. 그래서 닫힌 물병의 물 높이는 눈으로 보아 변하지 않는다.

하린 뚜껑을 열어 두면요? 그럼 계속 마르겠죠?

석 교수 열린 병에서는 증발한 수증기가 방 안 공기로 흩어진다. 병 입구 근처의 수증기가 계속 빠져나가니 응축이 증발을 따라잡지 못하고, 물은 조금씩 줄어든다. 방 안 습도가 100 %라면, 곧 방 공기의 수증기 압력이 이미 증기압과 같다면 열어 두어도 거의 마르지 않는다. 장마철에 빨래가 안 마르는 까닭이다.

- 이모** 그런데 뚜껑을 닫으면 습기가 생겨서 병 안쪽에 물방울이 맺히던데요.
- 석 교수** 낮에 햇볕을 받아 따뜻해졌다가 밤에 식으면 그래요. 온도가 내려가면 증기압이 작아지니, 넘치는 수증기가 벽에서 물방울로 응축하는 거예요. 평형이 온도에 따라 옮겨 간다는 것을 보여 주는 장면이지요. 10장에서 온도와 평형을 다룰 때 다시 떠올리세요.
- 태오** 소금물의 포화 용액도 같은 거죠? 바닥에 소금이 남아 있으면 더 녹지 않는.
- 석 교수** 그렇다. 포화 용액에서는 소금 결정이 녹는 속도와 용액 속 이온이 결정으로 돌아가 붙는 속도가 같다. 이것을 **용해 평형**이라고 한다. 표 6에 세 가지 평형을 나란히 정리했다.

표 6. 화학 평형·상평형·용해 평형 — 무엇이 오가고 어떤 두 속도가 같아지나

종류	무엇이 오가나	같아지는 두 속도	일상의 예
화학 평형	반응물 $\rightleftharpoons$ 생성물	정반응 속도 = 역반응 속도	콜라 속 탄산의 이온화
상평형	액체 $\rightleftharpoons$ 기체	증발 속도 = 응축 속도	닫힌 물병 속 수증기
용해 평형	고체 $\rightleftharpoons$ 녹은 이온·분자	용해 속도 = 석출 속도	바닥에 소금이 남은 소금물

- 이모** 두부 만들 때 쓰는 간수도 바닷물을 줄여서 소금을 걸러 내고 남은 물이잖아요. 그것도 용해 평형과 관계가 있나요?
- 석 교수** 있어요. 바닷물을 줄이면 물이 줄어 소금(염화 나트륨)이 먼저 포화되고, 그때부터는 녹는 속도보다 석출 속도가 커져 결정이 쌓여요. 더 잘 녹는 염화 마그네슘 같은 성분은 아직 포화되지 않아 액체에 남지요. 그 남은 액체가 간수예요. 무엇이 먼저 결정이 되는지는 물질마다 포화 농도가 다르기 때문이고, 그 포화 농도가 바로 그 물질의 용해 평형이 정하는 값입니다.

2.4 평형에서도 반응이 계속된다는 증거

- 하린** 그런데 교수님, 평형에서 분자가 계속 오간다는 건 어떻게 알아요? 눈에 보이지 않잖아요.
- 석 교수** 좋은 의심이다. 화학자들은 꼬리표를 붙여서 확인했다. 방사성 동위 원소를 쓰는 거다. 나트륨에는 방사선을 내는 ^{22}Na 가 있는데, 화학적 성질은 보통 나트륨 ^{23}Na 와 같다.
- 태오** 같은 원소인데 질량만 다른 거죠? 중성자 수가 달라서.
- 석 교수** 그렇다. 실험은 이렇다. 먼저 보통 소금으로 포화 용액을 만들고 바닥에 결정이 남게 한다. 거기에 ^{22}Na 가 섞인 소금 결정을 조금 넣는다. 용액은 이미 포화되어 있으니 녹는 소금의 총량은 늘지 않는다. 그런데 시간이 지나면 용액에서 방사선이 검출된다.
- 이모** 더 녹을 수 없는데 방사성 나트륨이 용액에 나왔다면, 그만큼 다른 나트륨이 결정으로 돌아갔다는 뜻이네요.
- 석 교수** 정확해요. 녹는 것과 석출되는 것이 같은 속도로 계속 일어나고 있다는 직접 증거입니다. 정말 멈춘 상태였다면 방사성 나트륨은 결정 안에 갇혀 있어야 하지요. 기체 반응에서도 같은 생각으로, 평형 상태의 수소-아이오딘 혼합물 안에서 반응이 실제로 얼마나 빨리 일어나는지를 켜 연구가 있습니다.
- 하린** 기체 반응에서는 어떻게 꼬리표를 붙여요?

석 교수 수소 대신 무거운 수소, 곧 중수소 D_2 를 쓰는 방법을 생각해 보자. 중수소는 원자핵에 중성자가 하나 더 있을 뿐 화학적 성질은 수소와 거의 같다. H_2 , I_2 , HI가 평형을 이룬 용기에 D_2 를 조금 넣으면, 시간이 지나 DI와 HD 같은 분자가 나타난다. 평형이 정말 멈춘 상태라면 D 원자가 HI 속으로 들어갈 길이 없다. DI가 생겼다는 것은 HI가 계속 분해되고 다시 만들어지고 있다는 뜻이다.

이모 꼬리표가 섞여 들어가는 걸로 보이지 않는 움직임을 보는 거네요. 손님 몇 명에게만 빨간 모자를 씌우고 가게 안팎을 오가는지 보는 것처럼요.

석 교수 좋은 비유예요. 가게 안 손님 수는 그대로인데 빨간 모자가 바깥에서도 보이기 시작하면, 들어오고 나가는 손님이 있다는 증거지요.

태오 꼬리표가 퍼지는 속도가 바로 평형에서의 정반응 속도겠네요.

석 교수 그렇다. 우리 계산으로 치면 0.075 M/분을 직접 재는 셈이다. 평형은 “아무 일도 없는 상태”가 아니라 “같은 일이 양쪽으로 똑같이 일어나는 상태”라는 것, 오늘 이 문장 하나를 가져가자.

핵심 동적 평형을 숫자로 읽는 법

1. 정반응 속도와 역반응 속도를 농도로 쓴다($A \rightleftharpoons B$ 라면 $v_1 = k_1[A]$, $v_2 = k_2[B]$).
2. 처음에는 한쪽 속도만 크고, 시간이 지나며 두 속도가 가까워진다.
3. 평형 조건: $v_1 = v_2$. 여기에 물질의 양 보존($[A] + [B] = \text{처음 농도}$)을 더해 평형 농도를 구한다.
4. 평형에서 $[B]/[A] = k_1/k_2$ 는 출발점과 관계없이 같다. 이 비가 3장의 평형 상수 K 이다.
5. 증발-응축, 용해-석출도 같은 구조의 물리적 평형이다. 평형에서도 두 과정은 멈추지 않는다.

스스로 풀어 보기

1. $A \rightleftharpoons B$ 에서 $k_1 = 0.20 \text{ 분}^{-1}$, $k_2 = 0.05 \text{ 분}^{-1}$ 이고 처음에 A만 2.0 M 넣었다. 평형 농도 $[A]$, $[B]$ 와 평형에서의 정반응 속도를 구하라.
2. 문제 2.2의 물병에서 빈 공간이 2.0 L라면, 25 °C 평형에서 수증기의 몰수는 얼마인가? 압력은 달라지는가?
3. 포화 소금물에 ^{22}Na 가 섞인 소금 결정을 넣었더니 시간이 지나 용액에서 방사선이 검출되었다. 이 결과가 동적 평형의 증거가 되는 이유를 쓰라.
4. $A \rightleftharpoons B$ 의 정반응·역반응 속도 상수가 둘 다 두 배가 되면 평형 농도와 평형에 이르는 시간은 각각 어떻게 되는가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 4**(연세대 2023) (226쪽)은 제시문 (가)에서 “정반응 속도와 역반응 속도가 같아져 겉보기에 반응이 멈춘 것처럼 보이는 상태”를 동적 평형으로 정의하고 출발한다. 그 문제에서 평형 상태에 A와 C를 더한 뒤 농도가 시간에 따라 어떻게 변하는지 그래프를 그리게 하는데, 오늘 그린 **그림 8**의 곡선이 그 그래프의 바탕이다. **기출문제 5**(경희대 2023) (235쪽)의 제시문 [마]도 같은 정의로 시작해 암모니아 합성의 몰수-시간 그래프를 보여 준다. 원문이 남아 있지 않은 **기출문제 11**(고려대 2011) (290쪽)은 목차에 “반응 속도·평형”이 함께 적혀 있어, 속도가 같아지는 과정으로 평형을 설명하는 이 장의 내

용이 직접 쓰였을 것으로 보인다. 답안에 평형을 정의할 때는 “양이 같다”가 아니라 “정반응과 역반응의 속도가 같아 농도가 일정하게 유지된다”고 쓰자.

이 장의 참고문헌

- Guldberg, C. M., & Waage, P. (1986). Studies concerning affinity. *Journal of Chemical Education*, 63(12), 1044. <https://doi.org/10.1021/ed063p1044> (Original work published 1864)
- Sullivan, J. H. (1959). Rate of reaction of hydrogen with iodine at equilibrium. *The Journal of Chemical Physics*, 30(6), 1577–1580. <https://doi.org/10.1063/1.1730241>
- Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2018). *Atkins' physical chemistry* (11th ed.). Oxford University Press.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.

제 3장 평형 상수 K: 평형이 남기는 하나의 숫자

새 개념 화학 평형 법칙 · 평형 상수식 · K의 크기와 반응의 정도

이어짐 ICE 표 4장 · 반응 지수 7장 · 온도와 K 10장

이 장의 개념도

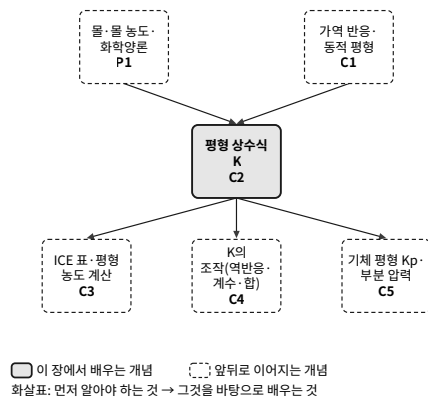


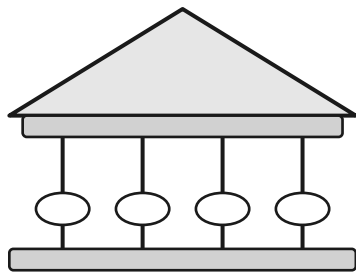
그림 11. 제 3장에서 배우는 개념(C2 평형 상수식 K)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

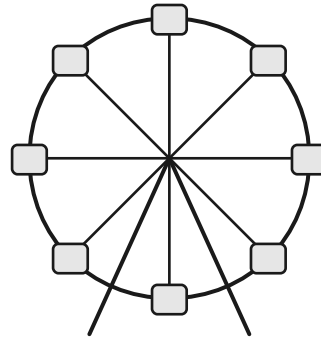
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 1 (연세대 2025년) (199 쪽)	피스톤 속 평형의 부피 비교와 염다리	C2 평형 상수식 K
기출 2 (연세대 2024년) (209 쪽)	강철 용기 속 평형의 부분 압력과 K, 완결 반응의 P-χ 그래프	C2 평형 상수식 K
기출 4 (연세대 2023년) (226 쪽)	물질 추가 뒤의 반응 지수와 염의 역성	C2 평형 상수식 K
기출 5 (경희대 2023년) (235 쪽)	암모니아 합성의 K와 Q, 수득률을 높이는 조건	C2 평형 상수식 K
기출 8 (경희대 2020년) (262 쪽)	SO ₂ Cl ₂ 분해 평형의 부분 압력	C2 평형 상수식 K
기출 9 (부산대 2015년) (270 쪽)	N ₂ O ₅ 분해 속도에서 NO ₂ 이합체 평형으로	C2 평형 상수식 K
기출 11 (고려대 2011년) (290 쪽)	총치와 과호흡, 평형 이동으로 읽기	C2 평형 상수식 K

두 놀이기구 사이를 오가는 사람들 (비유)

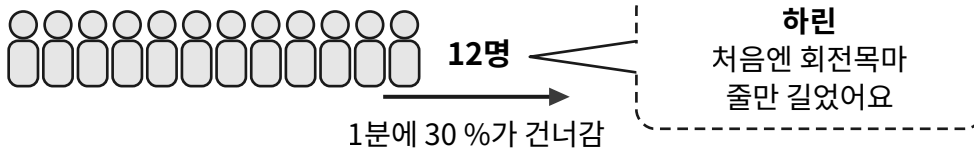


회전목마

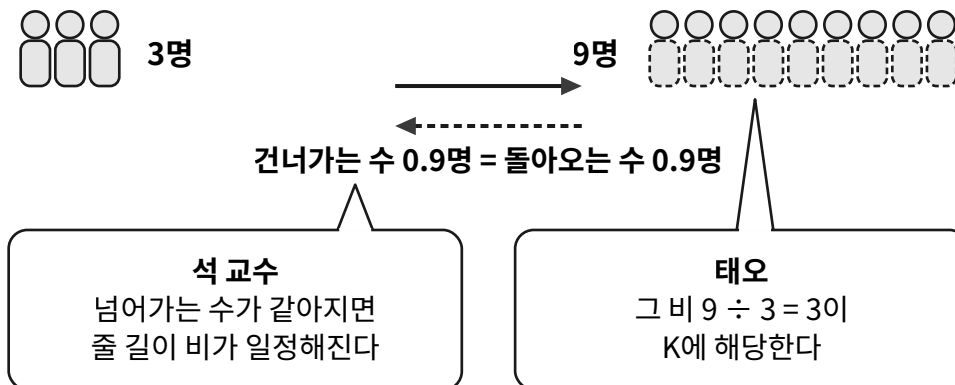


관람차

처음: 회전목마 줄 12명, 관람차 줄 0명



나중: 3명 : 9명에서 더 변하지 않는다



처음에 관람차 줄에만 12명이 있어도 같은 3 : 9에 도착한다

그림 12. 두 놀이기구 사이를 오가는 사람들(비유) — 줄이 긴 쪽에서 더 많은 사람이 넘어가므로, 넘어가는 사람 수가 양쪽에서 같아지면 두 줄의 길이 비가 일정해진다. 처음에 사람들이 어느 줄에 서 있었든 같은 비에 도착한다

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 처음에는 회전목마 줄만 길어 관람차 쪽으로 넘어가는 사람이 많다.
2. 양쪽으로 넘어가는 사람 수가 같아지면 두 줄의 길이 비가 더 변하지 않는다.
3. 이 일정한 비가 평형 상수 K에 해당한다(비유이며 실제 반응은 분자 수준에서 일어난다).

이 장의 출발점

기본개념편 제 2장 (26쪽)에서 $A \rightleftharpoons B$ 의 평형 조건 $k_1[A] = k_2[B]$ 로부터 $[B]/[A] = k_1/k_2 = 3$ 을 얻었다. 이 장에서는 이 “평형에서의 농도 비”를 계수가 있는 반응으로 넓힌다. 몰 농도, 거듭제곱 (x^2 은 $x \times x$), 반응식의 계수를 읽을 줄 알면 된다.

셋째 토요일, 석 교수는 칠판에 세 줄짜리 표를 그려 놓고 기다렸다. 표의 제목은 “430 °C의 아이오딘화 수소 실험 세 개”였다. 출발한 농도는 셋 다 달랐는데, 맨 오른쪽 칸은 아직 비어 있었다.

태오 교수님, 지난주에 $[B]/[A]$ 가 처음 농도와 관계없이 3이었잖아요. 그게 모든 반응에서 그래요?

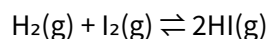
석 교수 비 자체는 반응마다 모양이 달라진다. 그래도 “평형에서는 어떤 식으로 계산한 값이 하나의 숫자로 고정된다”는 것은 모든 반응에서 같다. 오늘은 그 식을 찾고, 그 숫자를 평형 상수 K라고 부를 거다.

하린 식을 찾는다고요? 그냥 생성물 나누기 반응물 아니에요?

석 교수 거의 맞는데, 계수가 들어가면 조금 달라진다. 직접 확인해 보자.

3.1 출발점이 달라도 같은 숫자

석 교수 수소와 아이오딘이 아이오딘화 수소가 되는 반응이다.



석 교수 1 L 용기에서 세 가지로 출발해 430 °C에서 평형이 될 때까지 기다렸다. ① 수소와 아이오딘을 0.500 M씩, ② HI만 1.000 M, ③ 수소 0.300 M과 아이오딘 0.200 M. 평형 농도는 표 8과 같다.

표 8. 430 °C에서 $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$ 의 세 실험 — 출발 농도가 달라도 $[\text{HI}]^2/([\text{H}_2][\text{I}_2])$ 는 같다

실험	처음 농도(M)	평형 $[\text{H}_2]$	평형 $[\text{I}_2]$	평형 $[\text{HI}]$	$[\text{HI}]^2/([\text{H}_2][\text{I}_2])$
①	H_2 0.500, I_2 0.500	0.107	0.107	0.787	54.1
②	HI 1.000	0.107	0.107	0.787	54.1
③	H_2 0.300, I_2 0.200	0.120	0.0199	0.360	54.3

하린 ①이랑 ②가 똑같아요! 하나는 수소랑 아이오딘에서 출발했고, 하나는 HI에서 출발했는데요.

석 교수 ②의 HI 1.000 M은 원자 수로 따지면 ①의 수소 0.500 M과 아이오딘 0.500 M을 합친 것과 같다. 같은 재료를 양쪽 끝에서 출발시킨 셈이니 같은 곳에 도착한다. 2장에서 본 “어느 쪽에서 출발해도 같은 곳에 도착한다”가 실제 반응에서도 확인된 거지.

태오 ③은 평형 농도가 완전히 다르네요. 아이오딘이 0.0199 M밖에 안 남았어요.

석 교수 처음에 아이오딘이 모자랐으니까. 그런데 오른쪽 칸을 보자. 세 실험 모두에서 $[\text{HI}]^2/([\text{H}_2][\text{I}_2])$ 로 나눈 값이 54 근처다.

이모 ①과 ②는 54.1이고 ③은 54.3이에요. 0.2 차이는 뭔가요?

석 교수 반올림 때문이에요. 평형 농도를 세 자리로 잘라 적었기 때문에 생긴 차이지요. ①을 더 정밀하게 쓰면 $[H_2] = 0.1067\text{ M}$, $[HI] = 0.7865\text{ M}$ 이고, 이 값으로 계산하면 54.3이 나옵니다. 세 실험의 값은 실험 오차 안에서 모두 54.3이에요.

태오 그럼 단순히 $[HI]/([H_2][I_2])$ 로 나누면요?

석 교수 직접 해 보렴. ①과 ③만.

태오 ①은 $0.787 \div (0.107 \times 0.107) = 0.787 \div 0.01145 = 68.7$ 이고, ③은 $0.360 \div (0.120 \times 0.0199) = 0.360 \div 0.002388 = 151$ 이에요. 전혀 안 맞아요.

석 교수 그래서 HI의 계수 2가 지수로 올라가야 한다. 그림 13에 세 실험의 평형 농도를 막대로 그려 두었다. 막대 모양은 제각각인데, 계수를 지수로 쓴 비는 똑같이 54.3이다.

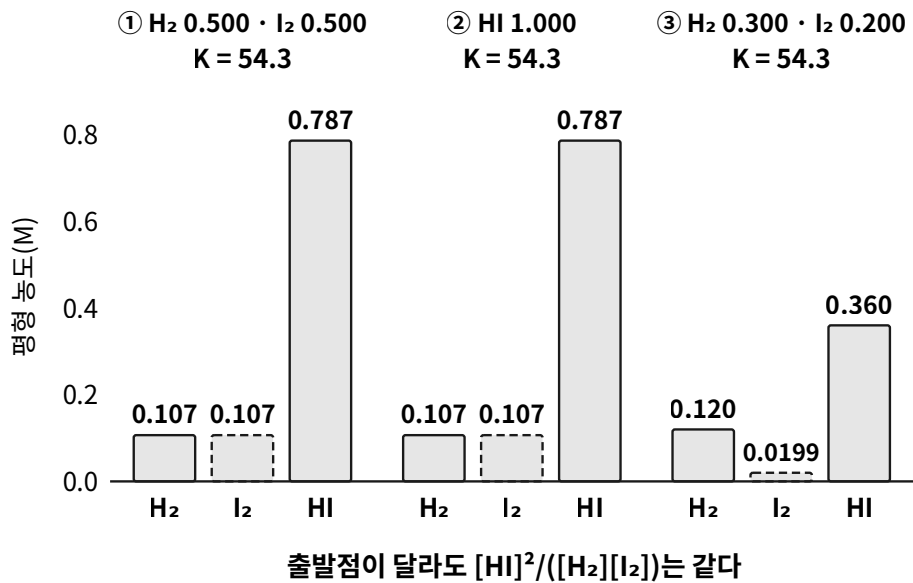


그림 13. $430\text{ }^\circ\text{C}$ $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 의 세 실험의 평형 농도 — 출발점(위 글자)이 달라 평형 농도 막대의 모양은 다르지만, $[HI]^2/([H_2][I_2])$ 는 모두 54.3이다(반올림 차이 범위 안).

문제 3.1

표 8의 실험 ③에서 평형 농도는 $[H_2] = 0.120\text{ M}$, $[I_2] = 0.0199\text{ M}$, $[HI] = 0.360\text{ M}$ 이다. 이 값으로 평형 상수 K 를 계산하라.

하린 $K = [HI]^2/([H_2][I_2])$ 니까 위는 $0.360^2 = 0.1296$ 이에요.

태오 아래는 $0.120 \times 0.0199 = 0.002388$. 그러니까 $0.1296 \div 0.002388 = 54.27$, 54.3이요.

석 교수 정답은 54.3이다. 0.002388처럼 작은 수로 나눌 때는 계산기에 넣기 전에 대략 어림을 해 보는 게 좋다. $0.13 \div 0.0024$ 는 $130 \div 2.4$ 니까 50 남짓이겠구나, 하고 확인하는 거지.

석 교수 K 를 알면 거꾸로도 쓸 수 있다. $430\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 평형에 있는 용기의 $[H_2]$ 가 0.200 M , $[I_2]$ 가 0.100 M 로 측정되었다면 $[HI]$ 는?

태오 K 식에 넣으면 $54.3 = [HI]^2/(0.200 \times 0.100)$ 이니까 $[HI]^2 = 54.3 \times 0.0200 = 1.086$ 이에요. 제곱근을 하면 $[HI] = 1.04\text{ M}$.

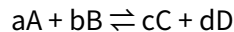
하린 오빠, 1.086을 그냥 [HI]라고 쓰면 안 되는 거지? 제곱이니까.

태오 응, 제곱근까지 해야 해. 지난번 모의고사에서 그걸 빠뜨렸어.

석 교수 좋은 반성이다. 평형 상수식에서 거듭제곱을 풀 때 제곱근을 빠뜨리는 실수가 의외로 많다. 답을 구하면 다시 K 식에 넣어 검산하자. $1.04^2 \div 0.0200 = 1.0816 \div 0.0200 = 54.1$, 반올림 범위 안에서 54.3과 맞는다.

3.2 평형 상수식 쓰기

석 교수 1864년 노르웨이의 굴베르와 보게는 여러 반응을 실험해서 이 규칙을 찾았다. 일반적인 반응을 이렇게 쓰자.



$$K = [C]^c [D]^d / ([A]^a [B]^b)$$

석 교수 생성물 농도를 계수만큼 거듭제곱해 곱하고, 반응물 농도를 계수만큼 거듭제곱해 곱한 것으로 나눈다. 일정한 온도에서 이 값이 하나로 정해진다는 것이 **화학 평형 법칙**이고, 그 값이 **평형 상수 K**다. 질량 작용의 법칙이라고도 부른다.

하린 계수가 지수로 올라가는 건 왜 그래요? 그냥 외워야 해요?

석 교수 2장의 생각으로 설명할 수 있다. $H_2 + I_2 \rightarrow 2HI$ 가 분자 하나씩 부딪쳐 일어난다면 정반응 속도는 $[H_2][I_2]$ 에 비례한다. 역반응 $2HI \rightarrow H_2 + I_2$ 는 HI 두 개가 만나야 하니 $[HI] \times [HI] = [HI]^2$ 에 비례하고. 평형에서 두 속도가 같으니까 $k_1[H_2][I_2] = k_2[HI]^2$, 정리하면 $[HI]^2/([H_2][I_2]) = k_1/k_2$ 가 된다.

태오 그래서 $K = k_1/k_2$ 군요. 지난주 $A \rightleftharpoons B$ 와 똑같은 모양이에요.

석 교수 다만 주의할 게 있다. 이 설명은 반응식대로 분자가 한 번에 부딪쳐 일어나는 “단일 단계 반응”에서만 그대로 성립한다. 여러 단계로 일어나는 반응도 많은데, 놀랍게도 그때에도 평형 상수식은 반응식의 계수로 쓴다. 이건 열역학으로 증명하는 사실이고, 10장 끝에서 맛보기로 보자.

이모 그럼 K는 반응마다 하나씩 정해진 “성격” 같은 거네요. 사람마다 키가 다르듯이요.

석 교수 비슷해요. 다만 키와 달리 K는 온도에 따라 바뀌어요. 같은 HI 반응이라도 430 °C의 K와 300 °C의 K는 다릅니다. 반대로 농도나 압력을 바꾸는 것으로는 K가 바뀌지 않아요. 그래서 K를 말할 때는 언제나 “몇 °C에서”를 함께 적어야 해요. 기출 문제에서도 K 값 옆에는 늘 온도가 붙어 있습니다.

태오 1장에서 말씀하신 “온도만 K를 바꾼다”가 여기서 나오는군요.

평형 상수식에서는 계수가 지수, 속도식에서는 아니다

평형 상수식의 지수는 언제나 균형 맞춘 반응식의 계수이다. 반면 반응 속도식의 지수는 실험으로 정한다. “평형 상수식처럼 속도식도 계수로 쓴다”는 것은 단일 단계 반응에서만 맞는 이야기이다.

석 교수 연습해 보자. 암모니아 합성 $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ 의 K 식은?

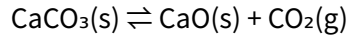
하린 생성물 NH_3 의 계수가 2니까 위에 $[NH_3]^2$. 아래는 $[N_2]$ 에 $[H_2]^3$ 이에요. $K = [NH_3]^2/([N_2][H_2]^3)$.

석 교수 맞다. 질소가 산소와 만나 일산화 질소가 되는 $N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO$ 는?

태오 $K = [NO]^2 / ([N_2][O_2])$ 요. 이걸 HI와 같은 모양이네요.

3.3 순수한 고체와 액체는 빠진다

석 교수 이제 함정 하나. 석회석을 세게 가열하면 생석회와 이산화 탄소가 된다.

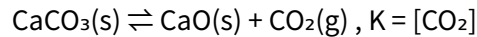


태오 그대로 쓰면 $K = [CaO][CO_2] / [CaCO_3]$ 이요.

석 교수 그렇게 쓰면 감점이다. 고체의 “농도”를 생각해 보렴. 탄산칼슘 덩어리를 반으로 쪼개면 1 L당 들어 있는 탄산칼슘의 양이 바뀌나?

하린 아니요. 덩어리가 작아져도 뽁뽁한 정도는 그대로예요. 밀도가 같으니까요.

석 교수 그렇다. 순수한 고체나 액체는 양이 늘든 줄든 단위 부피당 양이 일정하다. 그러니 K 식에 넣어도 늘 같은 상수일 뿐이라 K 안에 묶어 버린다. 그래서 이렇게 쓴다.



이모 그럼 석회석이 많은 적든, 일정한 온도에서는 용기 안 이산화 탄소 농도가 늘 같다는 거네요.

석 교수 네, 고체가 조금이라도 남아 있는 한 그래요. 석회 가마에서 이산화 탄소를 계속 빼내면 평형이 계속 오른쪽으로 가서 석회석이 모두 생석회로 바뀌는 것도 그 때문이에요. 이 “빼내면 그쪽으로 간다”는 생각은 8장에서 다시 봅시다.

태오 물에 녹아 있는 반응에서 물은요? 물도 액체잖아요.

석 교수 용매인 물도 빠진다. 묽은 수용액에서 물의 양은 반응해도 거의 변하지 않기 때문이다. 산·염기에서 K_a 를 쓸 때 물을 넣지 않았던 것도 같은 이유다. 다만 물이 용매가 아니라 기체 반응의 생성물로 나오면, 예를 들어 수증기 $H_2O(g)$ 이면 K 식에 넣는다.

하린 1장에서 본 석회 동굴 반응은요? 거기에도 고체랑 물이 같이 있었어요.

석 교수 좋은 연습이다. $CaCO_3(s) + CO_2(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons Ca^{2+}(aq) + 2HCO_3^-(aq)$. 고체 탄산칼슘과 용매 물을 빼면?

하린 남는 건 수용액에 녹은 것들뿐이에요. $K = [Ca^{2+}][HCO_3^-]^2 / [CO_2]$. 탄산수소 이온의 계수 2가 지수로 올라가고요.

석 교수 정확하다. 이 식을 보면 녹아 있는 CO_2 가 줄면 오른쪽 분자가 함께 줄어들어 K가 유지된다는 것, 곧 칼슘 이온과 탄산수소 이온이 탄산칼슘으로 돌아가 쌓여야 한다는 것을 읽을 수 있다. 증류석이 자라는 까닭을 식 하나로 말한 셈이다.

3.4 K의 크기 읽기

석 교수 K는 숫자이니 크기를 비교할 수 있다. $K = 54.3$ 이라는 건 무슨 뜻일까?

태오 분자가 생성물 쪽이니깐, K가 크면 생성물이 많다는 뜻이겠죠.

석 교수 대략 그렇다. 교과서에서는 K가 10^3 보다 크면 평형이 생성물 쪽으로 크게 치우쳐 반응이 거의 끝까지 간다고 보고, 10^{-3} 보다 작으면 거의 진행하지 않는다고 본다. 그 사이면 반응물과 생성물이 둘 다 상당히 남는다. 그림 14의 눈금에 반응 다섯 개를 올려 두었다.

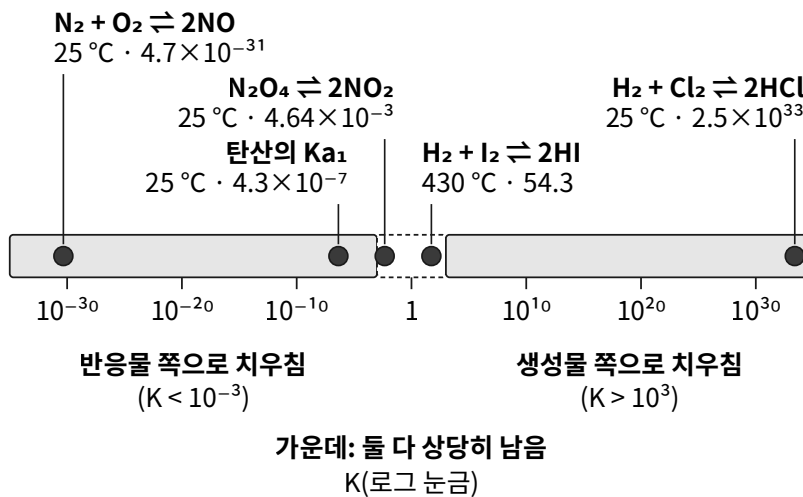


그림 14. 25 °C 또는 표시한 온도에서 K의 크기(로그 눈금) — 10^3 이상이면 생성물 쪽, 10^{-3} 이하이면 반응물 쪽으로 크게 치우친다. 질소와 산소의 NO 생성(4.7×10^{-31})과 수소와 염소의 HCl 생성(2.5×10^{33})은 표준 생성 자유 에너지로 계산한 값이다.

태오 K가 딱 1이면요? 그럼 반반인가요?

석 교수 $A \rightleftharpoons B$ 처럼 계수가 모두 1인 반응이라면 $K = 1$ 일 때 $[B] = [A]$ 다. 하지만 계수가 다르면 그렇지 않다. $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$ 에서 $K = 1$ 이라면 $[\text{NO}_2]^2 = [\text{N}_2\text{O}_4]$ 다. $[\text{N}_2\text{O}_4]$ 가 0.010 M이면 $[\text{NO}_2]$ 는 0.10 M로 열 배가 되고, $[\text{N}_2\text{O}_4]$ 가 4.0 M이면 $[\text{NO}_2]$ 는 2.0 M로 절반이 된다. 같은 $K = 1$ 인데도 농도에 따라 어느 쪽이 많은지가 바뀐다. 그러니 $K = 1$ 을 “반반”이라고 외우지 않는 게 좋다.

태오 계수 합이 양쪽에서 다르면 K만 보고 많고 적음을 바로 말하기 어렵겠네요.

석 교수 그렇다. K의 크기로 치우침을 말하는 기준(10^3 , 10^{-3})은 K가 아주 크거나 아주 작을 때 쓰는 대략적인 눈금이라고 생각하자. 그 사이에서는 반드시 농도를 계산해서 말해야 한다.

하린 질소랑 산소가 NO가 되는 반응은 10^{-31} 이에요! 0이 서른 개나 붙어요.

석 교수 그래서 우리가 마시는 공기의 질소와 산소는 상온에서 서로 반응하지 않고 그대로 있다. 그런데 이 K는 온도가 오르면 커진다. 자동차 엔진처럼 2000 °C 넘는 곳에서는 NO가 상당히 생긴다. 그 이야기가 10장과 14장의 주인공이다.

태오 수소와 염소에서 HCl이 생기는 반응은 10^{33} 이고요. 이건 끝까지 가는 반응이네요.

석 교수 1장에서 “끝까지 가는 반응”과 “평형에 머무는 반응”을 두 칸에 나눴지? 사실은 이 하나의 눈금 위 양 끝과 가운데다. 끝까지 가는 반응은 K가 아주 큰 반응일 뿐이다.

이모 탄산의 K는 4.3×10^{-7} 이니 아주 작네요. 그래서 탄산이 약한 산인 거고요.

석 교수 맞아요. 탄산 분자 대부분이 이온이 되지 않고 그대로 남아 있다는 뜻이에요. 같은 산이라도 염산은 K가 매우 커서 거의 모두 이온이 되지요. 산의 세기를 K로 비교하는 것도 결국 이 눈금을 읽는 일입니다.

K가 작다고 반응이 “안 일어나는” 것은 아니다

K는 평형에서의 양을 알려 줄 뿐, 반응이 얼마나 빠르지는 알려 주지 않는다. 또 K가 작아도 생성물을 계속 빼내면 반응은 계속 진행된다. K의 크기는 “도착점이 어디인가”에 대한 답이고, “얼마나 빨리 가는가”는 속도 상수와 활성화 에너지의 몫이다(11장).

K에는 단위가 있나

태오 $[HI]^2/([H_2][I_2])$ 는 단위가 M^2/M^2 해서 지워지는데, 암모니아는 M^2/M^4 라서 M^{-2} 이 남아요. K에 단위를 붙여야 해요?

석 교수 좋은 질문이다. 정밀하게는 각 농도를 표준 농도 1 M으로 나눈 값(활동도)으로 K를 정의하기 때문에 K는 단위가 없는 수다. 고등학교와 논술에서는 보통 단위 없이 쓴다. 다만 6장에서 압력으로 쓴 K_p 와 농도로 쓴 K_c 를 바꿀 때는 단위를 따져야 하는 순간이 있으니 그때 다시 보자.

문제 3.2

다음 반응의 평형 상수식을 쓰라. (가) $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$ (나) $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$ (다) $NH_4^+(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons NH_3(aq) + H_3O^+(aq)$

하린 (가)는 아까 한 거예요. $K = [NH_3]^2/([N_2][H_2]^3)$.

태오 (나)는 고체 두 개가 빠지니까 $K = [CO_2]$ 만 남아요.

하린 (다)는 물이 액체 용매라서 빠져요. $K = [NH_3][H_3O^+]/[NH_4^+]$.

석 교수 셋 다 정답이다. (다)는 암모늄 이온이 산으로 작용하는 반응이고, 그 K를 산 이온화 상수 K_a 라고 부른다. 12장에서 염화 암모늄 용액의 pH를 구할 때 이 식을 그대로 쓴다.

K로 할 수 있는 세 가지

하린 K를 구하면 그다음엔 뭘 해요? 숫자 하나 얻고 끝나는 건 아니죠?

석 교수 K로 하는 일은 크게 셋이다. 첫째, 처음 농도와 K를 알면 평형 농도를 계산할 수 있다. 다음 장의 ICE 표가 그 방법이다. 둘째, 지금 상태의 농도로 같은 식을 계산한 값(Q)을 K와 비교하면 반응이 어느 쪽으로 갈지 알 수 있다. 7장의 내용이다. 셋째, 서로 다른 반응의 K를 비교하면 어느 반응이 더 생성물 쪽으로 치우치는지 알 수 있다. 오늘 본 눈금 그림이 그 예다.

태오 기출에서는 첫째와 둘째가 많이 나오겠네요.

석 교수 그렇다. 그리고 셋째는 서술 문제에서 근거로 쓰인다. “K가 매우 작으므로 상온의 공기에서는 NO가 거의 생기지 않는다”처럼 말이다.

핵심 평형 상수식 쓰기 4단계

1. 반응식의 계수를 먼저 맞춘다(균형 맞춘 반응식).
2. 생성물 농도를 계수만큼 거듭제곱해 곱한 것을 분자에, 반응물 쪽을 분모에 쓴다.
3. 순수한 고체(s), 순수한 액체(l), 용매인 물은 식에서 뺀다. 기체(g)와 수용액(aq)만 남긴다.
4. 값을 넣고 어림으로 계산한다. K는 온도가 같으면 출발 농도와 관계없이 하나의 값이다. $K > 10^3$ 이면 생성물 쪽, $K < 10^{-3}$ 이면 반응물 쪽으로 크게 치우친다.

스스로 풀어 보기

1. $2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$ 의 평형 상수식을 쓰라.
2. 어떤 온도에서 $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 가 평형에 있을 때 $[H_2] = [I_2] = 0.20\text{ M}$, $[HI] = 1.0\text{ M}$ 이었다. K를 구하라.

3. $C(s) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + H_2(g)$ 의 평형 상수식을 쓰고, 탄소가 식에서 빠지는 이유를 쓰라.
4. 어떤 반응의 K 가 1.0×10^{-8} 이다. 이 반응이 평형에 있을 때 반응물과 생성물 가운데 어느 쪽이 많은지 쓰고, “이 반응은 일어나지 않는다”는 말이 왜 정확하지 않은지 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부 기출의 대부분은 평형 상수식을 쓰는 데서 출발한다. **기출문제 1**(연세대 2025) (199쪽)과 **기출문제 2**(연세대 2024) (209쪽)은 제시문에 $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ 와 $K = [C]^c[D]^d/([A]^a[B]^b)$ 를 그대로 주고, 각각 피스톤 용기의 부피와 강철 용기의 부분 압력을 계산하게 한다. **기출문제 4**(연세대 2023) (226쪽)은 평형 농도에서 $K = 1$ 을 구한 뒤 물질을 더했을 때의 방향을 묻고, **기출문제 5**(경희대 2023) (235쪽)은 물수를 500 mL 용기의 농도로 바꿔 K 를 구하게 한다. **기출문제 8**(경희대 2020) (262쪽)에서는 $K = 0.3$ 이 주어진 SO_2Cl_2 분해 평형에서 평형 농도를 거꾸로 구한다. 어느 문제든 첫 줄에 “ $K = \dots$ ”를 계수가 지수로 올라간 모양으로 정확히 쓰고, 고체나 물이 있으면 빼는 것이 첫 채점 포인트다. 그리고 K 를 구했으면 그 값을 쓴 온도를 함께 적고, 구한 농도를 다시 식에 넣어 K 가 되살아나는지 확인한 한 줄을 남기자. 계산 실수를 스스로 잡아내는 가장 빠른 방법이다.

이 장의 참고문헌

- Guldberg, C. M., & Waage, P. (1986). Studies concerning affinity. *Journal of Chemical Education*, 63(12), 1044. <https://doi.org/10.1021/ed063p1044> (Original work published 1864)
- Lund, E. W. (1965). Guldberg and Waage and the law of mass action. *Journal of Chemical Education*, 42(10), 548. <https://doi.org/10.1021/ed042p548>
- Laidler, K. J. (1990). Units of an equilibrium constant. *Journal of Chemical Education*, 67(1), 88. <https://doi.org/10.1021/ed067p88.1>
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.

제 4장 ICE 표로 평형 농도 구하기

새 개념 ICE 표 · 이차방정식 풀이 · 근사와 5 % 규칙

이어짐 기체 평형 6장 · 반응 지수 7장 · 물속의 평형 12장

이 장의 개념도

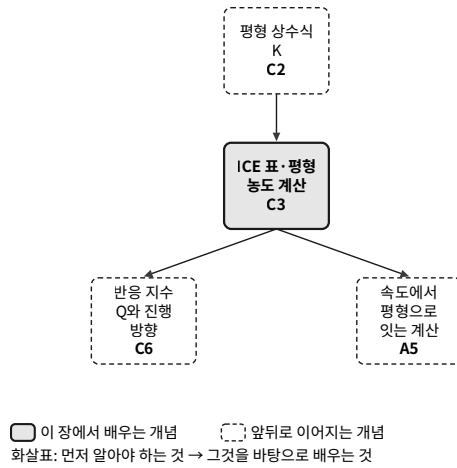


그림 15. 제 4장에서 배우는 개념(C3 ICE 표·평형 농도 계산)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 9. 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 2025년) (199 쪽)	피스톤 속 평형의 부피 비교와 염다리	C3 ICE 표·평형 농도 계산
기출 2 (연세대 2024년) (209 쪽)	강철 용기 속 평형의 부분 압력과 K, 완결 반응의 P-χ 그래프	C3 ICE 표·평형 농도 계산
기출 4 (연세대 2023년) (226 쪽)	물질 추가 뒤의 반응 지수와 염의 액성	C3 ICE 표·평형 농도 계산
기출 8 (경희대 2020년) (262 쪽)	SO ₂ Cl ₂ 분해 평형의 부분 압력	C3 ICE 표·평형 농도 계산
기출 9 (부산대 2015년) (270 쪽)	N ₂ O ₅ 분해 속도에서 NO ₂ 이합체 평형으로	C3 ICE 표·평형 농도 계산

가계부의 세 줄 = ICE 표의 세 줄

두부집 가계부 (이번 달)

줄	콩(kg)	두부(판)
처음 잔액	50	0
이번 달 변화	-20	+40
월말 잔액	30	40

이모
가계부랑
똑같네요

콩 1 kg이 줄 때마다 두부 2판

ICE 표 ($\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$)

줄	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
처음(I)	0.500	0.500	0
변화(C)	-x	-x	+2x
평형(E)	0.107	0.107	0.787

석 교수
변화 줄은
계수 비로만

태오
평형 줄을 K 식에
넣으면 끝

$$K = 54.3 \rightarrow x = 0.393$$

처음 + 변화 = 평형 (세 줄은 늘 이 관계)

변화 줄: $\text{H}_2 -x \cdot \text{I}_2 -x \cdot \text{HI} +2x$

그림 16. 가계부의 세 줄과 ICE 표 — 처음 잔액, 이번 달 변화, 월말 잔액을 적듯 처음 농도(I), 변화량(C), 평형 농도(E)를 적는다. 변화 줄은 반응식의 계수 비로만 움직이고, 평형 줄을 K 식에 넣으면 x 하나의 방정식이 된다(비유)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 가계부의 처음·변화·나중 세 줄처럼 ICE 표도 처음·변화·평형 세 줄로 쓴다.
2. 변화 줄은 반응식의 계수 비($\text{H}_2 -x$, $\text{I}_2 -x$, $\text{HI} +2x$)로만 움직인다.
3. 평형 줄을 K 식에 넣으면 미지수 x 하나의 방정식이 되어 평형 농도가 나온다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 3장 (36쪽)의 평형 상수식(계수는 지수, 고체·용매 물은 빼다)과 HI 반응의 $K = 54.3$ 을 쓴다. 수학으로는 제곱근과 이차방정식 $ax^2 + bx + c = 0$ 의 근의 공식 $x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) \div (2a)$ 가 필요하다. 근의 공식이 낯설면 “이런 식으로 x 를 구한다”는 흐름만 따라와도 이 장의 핵심은 잡을 수 있다.

넷째 토요일, 이모가 장부 한 권을 들고 왔다. 두부집 월말 정산을 하던 중이라고 했다. 석 교수는 장부를 펼쳐 보더니 “오늘 배울 게 바로 이 장부”라며 웃었다.

이모 교수님, 이건 그냥 가게 장부예요. 처음 잔액, 들어오고 나간 돈, 월말 잔액. 이게 화학이랑 무슨 상관이예요?

석 교수 평형 계산이 바로 이 세 줄로 해요. 처음에 얼마 있었는지, 반응하면서 얼마나 변했는지, 평형에서 얼마 남았는지. 장부와 다른 점은 딱 하나예요. 변화량을 모르니까 x 로 놓고, 평형 상수식으로 x 를 찾는다는 것.

태오 지난주에는 평형 농도가 주어지고 K 를 구했잖아요. 오늘은 반대로 K 가 주어지고 평형 농도를 구하는 거죠?

석 교수 그렇다. 기출 계산 문제의 대부분이 이 방향이다. 처음 농도와 K 를 주고 평형에서 각 물질이 얼마인지, 기체라면 부분 압력이 얼마인지를 묻는다.

4.1 세 줄 표 — ICE

석 교수 표의 이름부터 정하자. **ICE 표**(Initial, Change, Equilibrium — 처음·변화·평형)라고 부른다. 반응식을 맨 위에 쓰고, 그 아래 세 줄을 채운다. 3장의 HI 반응으로 시작하자. 1 L 용기에 H_2 와 I_2 를 0.500 M씩 넣고 430 °C로 데웠다.

표 10. ICE 표 두 개 — 위: $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ (430 °C, $K = 54.3$, 처음 각 0.500 M), 아래: $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$ (25 °C, $K = 4.64 \times 10^{-3}$, 처음 0.100 M)

반응	줄	반응물 ①	반응물 ② 또는 생성물	생성물
$H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$	처음(I)	$[H_2]$ 0.500	$[I_2]$ 0.500	$[HI]$ 0
$H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$	변화(C)	$-x$	$-x$	$+2x$
$H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$	평형(E)	$0.500 - x = 0.107$	$0.500 - x = 0.107$	$2x = 0.787$
$N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$	처음(I)	$[N_2O_4]$ 0.100	—	$[NO_2]$ 0
$N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$	변화(C)	$-x$	—	$+2x$
$N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$	평형(E)	$0.100 - x = 0.0898$	—	$2x = 0.0204$

하린 변화 줄에서 HI만 $+2x$ 예요. 다른 건 $-x$ 인데요.

석 교수 반응식 계수 때문이다. H_2 한 분자와 I_2 한 분자가 줄어들 때마다 HI는 두 분자가 생긴다. 그래서 변화 줄은 언제나 계수 비대로 움직인다. 이 장에서 가장 중요한 한 줄이다. 처음 줄은 문제에서 주는 값이고, 변화 줄은 계수로 정해지고, 평형 줄은 위 두 줄을 더한 것이다.

이모 장부로 치면 두부 한 판 만들 때 콩 몇 킬로가 줄어든다는 비율이 정해져 있는 거네요. 콩만 줄고 두부가 안 늘면 장부가 틀린 거고요.

석 교수 딱 그거예요. 원재료와 제품이 정해진 비율로만 바뀌지요.

4.2 완전제곱이 되는 경우

석 교수 이제 평형 줄을 K 식에 넣는다.

$$54.3 = (2x)^2 / ((0.500 - x)(0.500 - x)) = (2x)^2 / (0.500 - x)^2$$

태오 위도 제곱, 아래도 제곱이네요. 양변에 제곱근을 씌우면 되겠네요.

석 교수 좋다. 해 보렴.

태오 $\sqrt{54.3} = 7.369$. 그러니까 $2x \div (0.500 - x) = 7.369$. $2x = 7.369 \times 0.500 - 7.369x = 3.684 - 7.369x$. $9.369x = 3.684$, $x = 0.393$ 이요.

하린 그럼 평형에서 $[H_2] = [I_2] = 0.500 - 0.393 = 0.107$ M, $[HI] = 2 \times 0.393 = 0.787$ M이네요. 3장 표의 실험 ①과 똑같아요!

석 교수 그렇다. 3장의 표는 이렇게 계산한 값이다. 검산도 해 두자.

문제 4.1

430 °C에서 1.0 L 용기에 H_2 와 I_2 를 각각 0.500 mol 넣었다. $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 의 $K = 54.3$ 일 때 평형 농도 $[H_2]$, $[I_2]$, $[HI]$ 를 ICE 표로 구하고 K 식에 넣어 검산하라.

이모 표는 위에 있는 그대로예요. $x = 0.393$ 이니까 $[H_2] = [I_2] = 0.107$ M, $[HI] = 0.787$ M.

태오 검산은 $0.787^2 \div (0.107 \times 0.107) = 0.6194 \div 0.01145 = 54.1$. 54.3이랑 조금 달라요.

석 교수 3장에서 본 반올림 차이이다. x 를 더 정확하게 0.3933으로 두면 $[H_2] = 0.1067$, $[HI] = 0.7865$ 이고, $0.7865^2 \div 0.1067^2 = 54.3$ 이 나온다. 정답은 $[H_2] = [I_2] = 0.107$ M, $[HI] = 0.787$ M이다. 시험에서는 반올림한 값으로 검산해서 1 % 안쪽으로 맞으면 충분하다.

하린 처음 H_2 0.500 M 가운데 0.393 M가 반응했으니까 78.7 %가 HI로 바뀌었네요.

석 교수 그 비율을 반응률 또는 전환율이라고 부른다. 공장에서는 “원료를 얼마나 제품으로 바꿨나”라는 뜻으로 수득률이라는 말도 쓴다. 13장의 암모니아 합성에서는 이 수득률을 올리는 것이 온도와 압력을 정하는 이유가 된다. K가 54.3으로 꽤 크니까 대부분이 생성물로 갔지만, 끝까지 가지는 않았다. 그림 17가 세 줄을 막대로 그린 것이다.

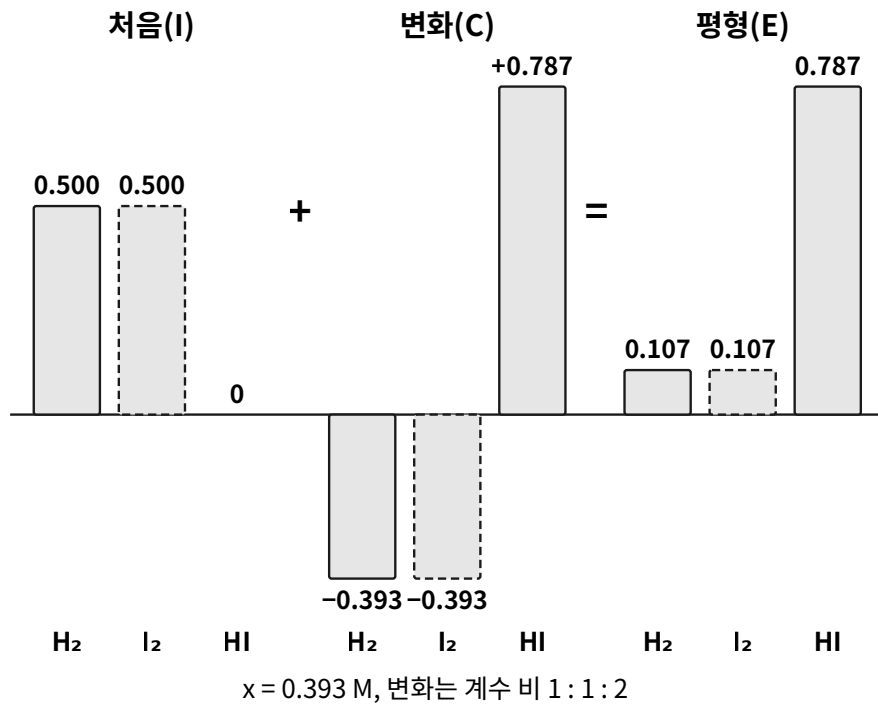


그림 17. $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$ (처음 각 0.500 M, $K = 54.3$)의 ICE 표를 막대로 — 처음(I)의 $\text{H}_2 \cdot \text{I}_2$ 막대에서 변화(C)만큼 줄고 HI가 그 두 배만큼 늘어 평형(E)의 0.107 · 0.107 · 0.787 M가 된다.

태오 K가 더 작았으면 덜 바뀌었겠죠? 얼마나 차이 나는지 감이 안 와요.

석 교수 해 보자. K가 열 배 작은 5.43이라면 $\sqrt{5.43} = 2.330$ 이다. $2x \div (0.500 - x) = 2.330$ 에서 $4.330x = 1.165$, $x = 0.269$. 전환율은 53.8 %다.

하린 K가 10분의 1이 됐는데 전환율은 78.7 %에서 53.8 %로밖에 안 줄었어요. 10분의 1이 되지는 않네요.

석 교수 K와 전환율은 비례하지 않는다. 이 반응에서는 K의 제곱근이 비에 들어가니 더 그렇다. K를 보고 “얼마나 남는가”를 말하려면 결국 ICE 표로 계산해야 하는 이유다.

4.3 근의 공식이 필요한 경우

석 교수 늘 완전제곱이 되면 좋겠지만, 그렇지 않은 경우가 더 많다. 가상의 반응 $\text{A} \rightleftharpoons \text{B} + \text{C}$ 를 보자. $K = 0.040$ 이고, 처음에 A만 0.50 M 넣었다.

하린 ICE 표부터 쓸게요. 처음 A 0.50, B 0, C 0. 변화 A $-x$, B $+x$, C $+x$. 평형 A $0.50 - x$, B x , C x .

석 교수 K 식에 넣으면?

하린 $0.040 = x \cdot x \div (0.50 - x) = x^2 \div (0.50 - x)$ 요. 이번에는 아래가 제곱이 아니라서 제곱근을 씹을 수 없어요.

석 교수 그래서 이차방정식으로 정리한다. 양변에 $(0.50 - x)$ 를 곱하자.

태오 $x^2 = 0.040 \times (0.50 - x) = 0.020 - 0.040x$. 한쪽으로 모으면 $x^2 + 0.040x - 0.020 = 0$.

석 교수 $a = 1$, $b = 0.040$, $c = -0.020$ 이다. 근의 공식에 넣자.

$$x = \frac{-(-0.040) + \sqrt{(-0.040)^2 + 4 \times 0.020}}{2} = \frac{(-0.040 + \sqrt{0.0816})}{2} = \frac{(-0.040 + 0.2857)}{2} = 0.123$$

하린 루트 안이 $0.0016 + 0.080 = 0.0816$ 이고, $\sqrt{0.0816} = 0.2857$ 이네요. 계산기 없이 하기는 어렵겠어요.

태오 근이 두 개일 텐데, 다른 하나는요?

석 교수 $(-0.040 - 0.2857) \div 2 = -0.163$ 이다. 농도가 음수가 될 수는 없으니 버린다. 또 x 는 처음 A의 0.50보다 클 수 없으니 0과 0.50 사이의 근만 의미가 있다. **그림 18**은 이 이차식을 그래프로 그린 것이다. 그래프가 가로축을 지나는 점이 0.123이다.

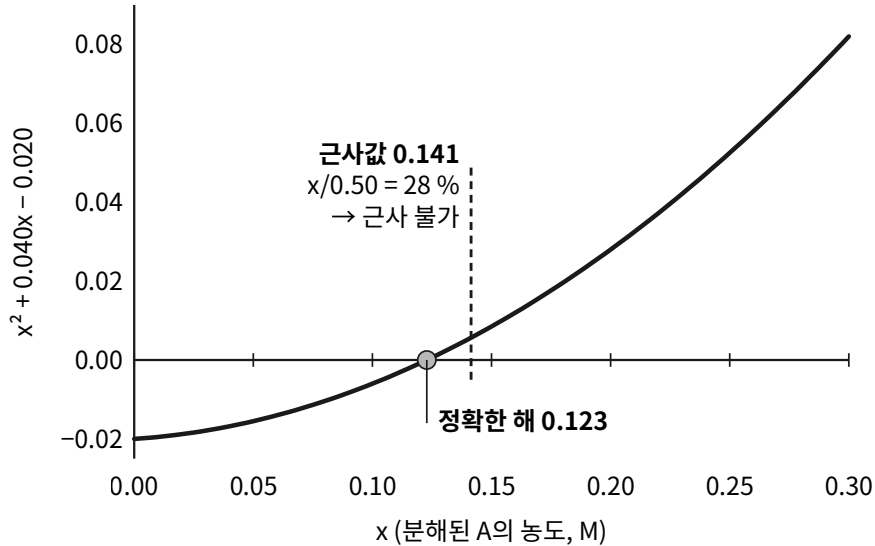


그림 18. $x^2 + 0.040x - 0.020 = 0$ 의 그래프 — 0과 0.50 사이에서 가로축과 만나는 점 $x = 0.123$ 이 평형의 해이다. 근사식으로 구한 0.141(점선)은 정확한 해보다 15 % 크다.

4.4 근사와 5 % 규칙

하린 근의 공식은 계산이 길어요. 더 빠른 방법은 없어요?

석 교수 산·염기에서 약산의 pH를 구할 때 쓰던 근사가 있다. x 가 처음 농도 0.50에 비해 아주 작다면 $0.50 - x \approx 0.50$ 으로 놓는 거다.

태오 그러면 $x^2 = 0.040 \times 0.50 = 0.020$, $x = \sqrt{0.020} = 0.141$ 이네요. 훨씬 빠르네요.

석 교수 빠르다. 그런데 근사가 맞는지 반드시 확인해야 한다. 확인하는 규칙이 **5 % 규칙**이다. 근사로 구한 x 가 처음 농도의 5 % 이하이면 근사를 믿고, 5 %를 넘으면 이차방정식을 푼다.

태오 $0.141 \div 0.50 = 0.282$, 28 %예요. 5 %를 훨씬 넘어요!

석 교수 그래서 이 경우 근사는 쓸 수 없다. 실제로 정확한 답 0.123과 근사값 0.141은 15 % 가까이 차이 난다. 정확한 답으로 보면 A의 24.6 %가 분해된 셈이다. 이렇게 K 가 크거나 처음 농도가 작아서 x 가 처음 농도에 비해 무시할 만큼 작지 않으면 근사가 틀린다.

문제 4.2

A $\rightleftharpoons$ B + C의 $K = 0.040$ 이다. 처음에 A만 0.50 M 넣었을 때 평형 농도를 구하라. 근사($0.50 - x \approx 0.50$)로 먼저 구하고 5 % 규칙으로 판정한 뒤, 필요하면 정확히 다시 구하라.

하린 근사로는 $x = \sqrt{(0.040 \times 0.50)} = \sqrt{0.020} = 0.141$ M이네요.

화학 평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

평형 = 정반응과 역반응의 속도가 같은 상태 — K는 온도만이 바꾸고, Q를 K와 견주어 반응의 방향을 정한다

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 13문항(2009~2025학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 11문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 화학 평형인가
2. 가역 반응과 동적 평형: 멈춘 듯 움직이는 상태
3. 평형 상수 K: 평형이 남기는 하나의 숫자
4. ICE 표로 평형 농도 구하기
5. 평형 상수를 다루는 규칙: 뒤집고, 곱하고, 고체는 빼고
6. 기체의 평형: 부분 압력과 Kp
7. 반응 지수 Q: 어느 쪽으로 갈 것인가

8. 르샤틀리에 원리 ① 농도를 바꾸면
9. 르샤틀리에 원리 ② 압력과 부피를 바꾸면
10. 르샤틀리에 원리 ③ 온도를 바꾸면 K가 바뀐다
11. 속도와 평형: 촉매는 무엇을 바꾸는가
12. 물속의 평형: 용해·이온화·가수분해
13. 암모니아 합성: 평형과 속도의 타협
14. 바다·몸·자동차 속의 평형, 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: 반응 속도 · 열화학 · 기체 · 산·염기·pH · 화학 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 24,000원

실린 기출 문항의 저작권은 각 대학에 있습니다.

값 24000 원

53430



ISBN 979-11-23065-20-5

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 21 — 화학 평형 — 전체 338쪽

ssbook.kr/book/nonsul-21

판매가 **14,400원** (POD 정가 24,000원)

- 전 페이지 컬러 PDF · 개인 영구 소장
- 카드 결제 즉시 내 서재에서 내려받기
- 공개 배포 · 재판매 금지

발간 도서 목록

다음 쪽부터 과학과영성출판사가 발간한 책 전체 목록(표지 · 가격 · 특징)을 안내합니다.

총 69종 · 판매가는 POD 정가의 60% · 컬러 PDF · 개인 영구 소장

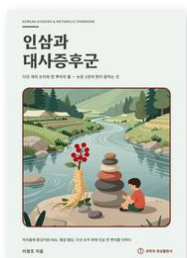
인삼 (6)



만병통치 인삼의 신경내분비시스템
하나의 인삼뿌리는 어떻게 온몸의 스위치를 건드리는가
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-neuroendo



인삼과 당뇨
공복혈당·당화혈색소·합병증을 개선하는 인삼
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-diabetes



인삼과 대사증후군
허리둘레·중성지방·HDL·혈압·혈당을 개선하는 인삼치유의 과학적 원리
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-metabolic



인삼과 아토피
금산 아토피 마을에서 어린이 임상시험 설계까지
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-atopy



인삼과 암치유
실험실에서 진료실까지, 1,300편의 논문이 말하는 것
18,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/ginseng-cancer



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

오토파지 (2)



스스로를 먹는 몸
오토파지, 자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/eating-self



오토파지와 암
세포는 스스로를 먹는다
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/autophagy-cancer

식물성 저탄고지 (11)



뇌신경 4+2축과 성격유형 그리고 식물성 저탄고지
도파민 · 세로토닌 · 노르에피네프린 · 아세틸콜린 + 글루타메이트 · 가바
20,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/brain-axes



당뇨를 개선하는 식물성 저탄고지
혈당·당화혈색소·체중을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-diabetes



고혈압을 개선하는 식물성 저탄고지
혈압·체중·혈관 건강을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-hypertension



비만을 개선하는 식물성 저탄고지
체중·허리둘레·체지방을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-obesity



뇌전증을 개선하는 식물성 저탄고지
뇌전증 환자와 보호자를 위한 논문 근거 기반 식물성 저탄고지 식단
23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-epilepsy



우울증을 개선하는 식물성 저탄고지
소화관과 장·뇌 축, 에너지 대사를 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-depression



자폐를 개선하는 식물성 저탄고지
일곱 갈래 기전이 한 점에서 만난다
23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-autism



아토피를 개선하는 식물성 저탄고지
피부 장벽과 면역, 장 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
19,000원 → **11,400원**
ssbook.kr/book/pkd-atopy



치매를 개선하는 식물성 저탄고지
뇌 에너지 대사와 인슐린 신호, 혈관 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/pkd-dementia



암을 개선하는 식물성 저탄고지
치료 중 체중 유지와 근육 보존, 영양 상태를 함께 살피는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-cancer



관절염을 개선하는 식물성 저탄고지
염증 신호와 체중 부하, 대사 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-arthritis

단식 (1)



40일간 굶는 몸의 시간표
카힐의 40일 연구, 혈당과 케톤과 자가포식을 중심으로
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/fasting-40days

생물리학 (4)



발끝의 강

피의 흐름에서 발바닥까지, 땅과 몸 사이에서 확인된 것과 아직 모르는 것

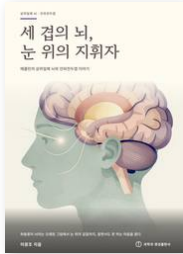
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일

부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의

17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/cupping99



세 겹의 뇌, 눈 위의 지휘자

매클린의 삼위일체 뇌와 안와전두엽 이야기

18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/triune-brain



광유전

빛으로 세포를 제어하는 기술 — 원리·실험·회로·치료

42,000원 → **25,200원**
ssbook.kr/book/optogenetics

독립영양인간 (2)



이암블리코스의 피타고라스적 삶에 관하여

그리스어 원전 완역 · 테일러 판 전면 수록

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



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지

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

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

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역

대학 기출로 완성하는 분자생물학의 중심원리

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-01



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도

분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 — 기출 22문항으로 읽는 유전

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



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학

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

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



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송

인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다

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



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설

감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩팥까지 항상성

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



대입 과학논술 09 — 면역·백신

몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지

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



대입 과학논술 10 — 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 전자·전기 분해

화학 전자·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/nonsul-25



01 통합과학 화학 1 — 소금과 별

원자에서 원소의 기원·주기율표까지

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/tonghap-01



02 통합과학 화학 2 — 꽃은 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