



대입 과학논술 20 — 반응 속도

넘어야 할 언덕 — 반감기에서 촉매, 반응 메커니즘까지

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-20

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

반응 속도



반응 속도 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 14문항 · 2008~2024학년도

이광조 지음

MANIA
논술 화학

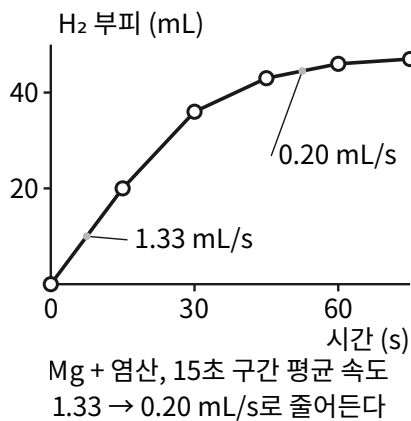
반응 속도

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

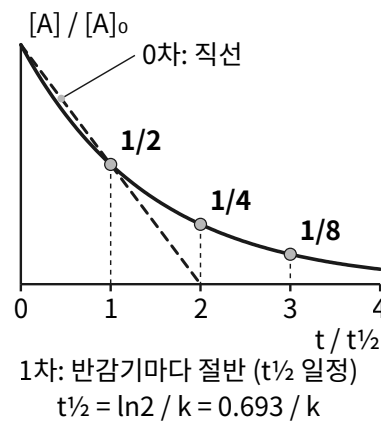
반응 속도 문제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 속도식(k ·차수) × 활성화 에너지(E_a) × 충돌 | 14문항 · 5개 대학 (2008~2024)

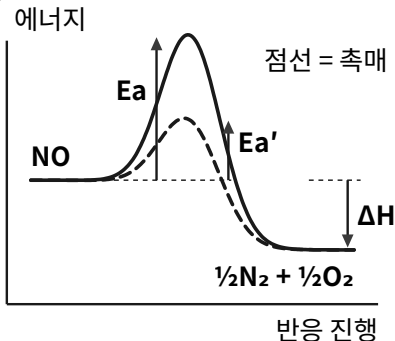
① 반응 속도 = 기울기



② 1차 반응과 반감기

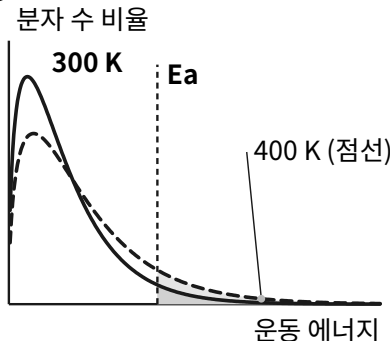


③ 활성화 에너지와 촉매



촉매는 언덕(E_a)만 낮춘다
 ΔH (-90 kJ)와 평형 상수는 그대로

④ 온도와 에너지 분포



온도 ↑ → E_a 를 넘는 분자 비율 ↑
300 K 4.6 % → 400 K 11.1 %

한 줄 요약: 속도는 기울기로 재고, 충돌과 언덕(E_a)으로 설명한다

그림 1. 반응 속도 단원의 그림 요약. ① 마그네슘과 염산의 수소 발생량과 15초 구간 평균 속도(1.33 → 1.07 → 0.47 → 0.20 mL/s, 연세대 2022 제시문 자료), ② 1차 반응의 지수 감소와 반감기(점선은 같은 첫 반감기를 갖는 0차 반응), ③ 활성화 에너지와 촉매($\text{NO} \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$, $\Delta H = -90 \text{ kJ}$ 는 촉매가 있어도 같다; 언덕 높이는 모식), ④ 300 K와 400 K의 분자 운동 에너지 분포와 E_a (10 kJ/mol, 모식 값) 이상 분율 4.6 %·11.1 %. 모든 곡선은 식으로 계산했다(1차 반응 $[A]/[A]_0 = (1/2)^{t/t_{1/2}}$, 맥스웰-볼츠만 에너지 분포).

한 줄 요약: 반응 속도 = 기울기로 재고, 충돌과 언덕(E_a)으로 설명한다 — 농도·압력·표면적은 충돌 수를, 온도·촉매는 k 를 바꾼다

연결 단원 → 화학 평형 · 열화학(반응 엔탈피) · 기체 · 효소(생명과학)

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 반응 속도인가	16
1.1 빠른 반응, 느린 반응	18
1.2 얼마나 많이, 얼마나 빨리	19
1.3 반응 속도의 뜻과 단위	20
1.4 무엇이 속도를 바꾸나	22
1.5 이 책의 길	23
제 2장 반응 속도를 재다: 평균 속도와 순간 속도	25
2.1 무엇으로 재나	27
2.2 평균 속도: 구간의 기울기	29
2.3 순간 속도: 접선의 기울기	30
2.4 왜 점점 느려지나	32
제 3장 계수로 맞추는 속도: 어느 물질로 재도 하나	35
3.1 물질마다 다른 변화량	37
3.2 계수로 나누면 하나의 속도	38
3.3 기체는 압력으로 잴다	40
3.4 정리: 부호·계수·단위	42
제 4장 농도가 속도를 정한다: 반응 속도식	45
4.1 농도를 두 배로 하면?	47
4.2 반응 속도식과 속도 상수 k	48
4.3 차수는 계수가 아니다	49
4.4 충돌 쌍으로 보는 차수	50
4.5 k 의 단위는 전체 차수가 정한다	51
4.6 다시 숫자로	52
제 5장 실험으로 차수를 정한다: 초기 속도법	55
5.1 왜 ‘처음’ 속도인가	57
5.2 한 번에 하나만 바꾼다	58
5.3 비로 차수 읽기	59
5.4 k 구하기와 검산	61
5.5 색소 실험으로 돌아가서	62
제 6장 1차 반응과 반감기	64
6.1 반감기마다 절반	66
6.2 식으로 쓰면	68
6.3 반감기와 k	69
6.4 n 번 반감기 뒤 — 남은 것과 생긴 것	70
제 7장 0차·2차 반응: 그래프로 차수 가리기	74
7.1 0차 반응: 속도가 농도와 무관하다	76
7.2 2차 반응 — 교과 밖 심화	77
7.3 어떤 그래프가 직선인가	79
7.4 효소가 꼭 차면 0차처럼 — 술 이야기	81
제 8장 충돌해야 반응한다: 농도·압력·표면적	83

8.1 충돌 없이는 반응도 없다.....	85
8.2 농도와 압력	87
8.3 표면적: 쪼갬수록 넓어진다	88
8.4 빠르기와 양은 다른 질문.....	89
제 9장 넘어야 할 언덕: 활성화 에너지	93
9.1 언덕이 있다: 전이 상태.....	96
9.2 에너지 도표 읽기	97
9.3 결합 에너지로 ΔH 구하기	98
9.4 언덕이 높으면 느리다	99
제 10장 온도를 올리면 왜 빨라질까: 에너지 분포와 아레니우스 식	102
10.1 분자들의 에너지는 제각각	104
10.2 온도가 오르면 꼬리가 두꺼워진다	105
10.3 아레니우스 식 (교과 밖 심화).....	106
10.4 10 °C에 두 배? 냉장고와 압력솔.....	108
제 11장 촉매: 언덕을 낮추는 다른 길	112
11.1 촉매는 다른 길을 연다	114
11.2 촉매가 바꾸지 않는 것	116
11.3 얼마나 빨라지나	117
11.4 표면 촉매와 효소	118
제 12장 반응은 여러 단계로: 메커니즘과 속도 결정 단계.....	122
12.1 한 번에 일어나지 않는다.....	124
12.2 가장 느린 단계가 전체를 정한다.....	125
12.3 중간체와 촉매	127
12.4 연쇄 반응: 염소 원자 하나가 오존 10만 개를.....	128
제 13장 빠른 것과 많이 생기는 것: 반응 속도와 화학 평형	132
13.1 평형은 멈춘 것이 아니다.....	134
13.2 온도는 속도와 평형을 다르게 움직인다.....	136
13.3 암모니아 합성의 절충	137
13.4 자발적이어도 느릴 수 있다	139
제 14장 몸속·지구·자동차의 반응 속도, 그리고 2부로	142
14.1 자동차: 2400 K의 NO와 1000 K의 배기구	144
14.2 성층권: 촉매 하나가 오존 10만 개를.....	146
14.3 몸속: 효소와 알코올	147
14.4 밀폐 실린더: 압력·부피·속도를 한 번에	147
14.5 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	150
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 반응 속도의 정의와 측정 — $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$	165
1.2 반응 속도식과 차수 — $C_4 \cdot C_5$	166
1.3 시간에 따른 농도: 0·1·2차 반응 — $C_6 \cdot C_7$	167
1.4 충돌 이론: 농도·압력·표면적 — C_8	168

1.5 활성화 에너지와 온도 — C9 · C10 · C11	168
1.6 촉매와 반응 메커니즘 — C12 · C13	169
1.7 반응 속도와 화학 평형 — C14 · A5.....	170
1.8 응용: 대기·자동차·공장·몸속 — A1 · A2 · A3 · A4	172
1.9 그래프 개념도 읽는 법	173
2. 출제 경향	175
2.1 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	177
2.2 학교별 성향	179
논술답안작성 패턴분석	180
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	181
3. 답안 작성법	183
3.1 계산형 답안의 4단 구조	183
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	183
3.3 표기와 수치 규칙	184
3.4 시간 배분과 자기 점검	185
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	185
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	187
실전기출문제와 풀이과정	193
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	194
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념	196
5.1 한눈에 보는 기출 14문항	196
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	197
5.3 기본 개념 한눈에	198
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	199
6. 출제 문항 분석과 모범답안	201
〈기출문제 1 (연세대 2024년)〉	202
〈기출문제 2 (경희대 2023년)〉	213
〈기출문제 3 (연세대 2022년)〉	222
〈기출문제 4 (연세대 2022년)〉	231
〈기출문제 5 (연세대 2020년)〉	241
〈기출문제 6 (연세대 2020년)〉	251
〈기출문제 7 (연세대 2019년)〉	259
〈기출문제 8 (성균관대 2016년)〉	268
〈기출문제 9 (부산대 2015년)〉	277
〈기출문제 10 (연세대 2011년)〉	287
〈기출문제 11 (고려대 2011년)〉	297
〈기출문제 12 (고려대 2011년)〉	308
〈기출문제 13 (고려대 2010년)〉	317
〈기출문제 14 (경희대 2008년)〉	326
7. 변형·예상 문항	335
8. 강의 연결	341
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	342
8.2 강의 구성 시 유의점	342
9. 전체 문제 총평	344

9.1 숫자로 먼저 보기	344
9.2 다섯 가지 총평.....	344
9.3 대학별 한 줄 총평	346
9.4 이렇게 공부하자	346
10. 참고문헌.....	348

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 반응 속도 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 반응의 시간 척도.....	18
그림 5. A → B의 농도-시간 그래프.....	21
그림 6. 제 2장 개념도	25
그림 7. 생활 속 개념도 2.....	26
그림 8. 반응 속도를 재는 두 장치.....	28
그림 9. 수소 부피와 구간 평균 속도.....	29
그림 10. 순간 반응 속도와 접선	31
그림 11. 제 3장 개념도	35
그림 12. 생활 속 개념도 3.....	36
그림 13. $2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$ 의 농도 변화.....	38
그림 14. 압력으로 재는 반응 속도.....	41
그림 15. 제 4장 개념도	45
그림 16. 생활 속 개념도 4.....	46
그림 17. 0·1·2차 반응의 농도-속도 관계.....	48
그림 18. 충돌 쌍과 반응 차수	51
그림 19. 제 5장 개념도	55
그림 20. 생활 속 개념도 5.....	56
그림 21. 초기 속도법의 세 실험	58
그림 22. 로그 그래프와 반응 차수.....	60
그림 23. 제 6장 개념도	64
그림 24. 생활 속 개념도 6.....	65
그림 25. 카페인의 1차 감소와 반감기.....	67
그림 26. 1차 반응의 $\ln[A]$ 직선	68
그림 27. 반감기와 반응물·생성물 비율	70
그림 28. 제 7장 개념도	74
그림 29. 생활 속 개념도 7.....	75
그림 30. 0·1·2차 반응의 농도 변화 비교.....	78
그림 31. 직선이 되는 그래프로 차수 가리기.....	79
그림 32. 제 8장 개념도	83
그림 33. 생활 속 개념도 8.....	84
그림 34. 유효 충돌과 비유효 충돌.....	86
그림 35. 쪼갬수록 넓어지는 표면적.....	88
그림 36. 큰 조각과 작은 조각에서 나온 CO_2 질량	90
그림 37. 제 9장 개념도	93
그림 38. 생활 속 개념도 9.....	94
그림 39. 결합이 끊어지고 생기는 과정	96
그림 40. 발열·흡열 반응의 에너지 도표	97
그림 41. 제 10장 개념도	102
그림 42. 생활 속 개념도 10.....	103
그림 43. 300 K와 400 K의 에너지 분포	105
그림 44. 아레니우스 그림	107
그림 45. 온도별 속도 배수.....	109
그림 46. 제 11장 개념도	112
그림 47. 생활 속 개념도 11.....	113

그림 48. 촉매 유무에 따른 에너지 도표	115
그림 49. 촉매가 낮춘 언덕과 넘는 분자의 비율	117
그림 50. 금속 표면 촉매의 네 단계	118
그림 51. 제 12장 개념도	122
그림 52. 생활 속 개념도 12	123
그림 53. 2단계 반응의 에너지 도표	126
그림 54. 염소 원자의 오존 파괴 순환	128
그림 55. 염소 원자가 고리에 남아 있을 확률	129
그림 56. 제 13장 개념도	132
그림 57. 생활 속 개념도 13	133
그림 58. 정반응·역반응 속도와 평형	135
그림 59. 온도에 따른 암모니아 수득률-시간	138
그림 60. 자발성과 속도의 구별	140
그림 61. 제 14장 개념도	142
그림 62. 생활 속 개념도 14	143
그림 63. 엔진과 배기구의 평형 NO 물분율	145
그림 64. 삼원 촉매 변환기의 단면	146
그림 65. 연세대 2024 장치의 기체 기동 높이	149
그림 66. 속도와 평형의 두 시계	171
그림 67. 전체 개념 그래프	173
그림 68. 개념별 출제 횟수	174
그림 69. 연도별 출제 문항 수	175
그림 70. 대학별 출제 문항 수	175
그림 71. 연세대 2024 연소 실험 장치(q170)	203
그림 72. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	204
그림 73. 1·2기압 수면 높이 비교(q170)	207
그림 74. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	214
그림 75. $\text{NO} + \text{H}_2$ 반응의 결합 에너지 사다리(q246)	218
그림 76. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	223
그림 77. 수소 부피와 구간 평균 속도(q155)	225
그림 78. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	232
그림 79. NO 생성·분해의 에너지 도표(q158)	236
그림 80. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	242
그림 81. 온도별 NH_3 생성 모식(q136)	247
그림 82. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	251
그림 83. 에탄올 1차 산화의 농도-시간(q137)	255
그림 84. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	260
그림 85. 덩어리와 분말의 겉넓이(q117)	263
그림 86. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	269
그림 87. NO 분해의 에너지 도표(q211)	270
그림 88. 1차·0차 반응의 농도-시간(q202 제시문)	278
그림 89. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	279
그림 90. 〈연세대 2011〉 개념 그래프	288
그림 91. 이산화탄소 포집의 두 길(q22)	290
그림 92. 원문 그림 5: B·C의 농도-시간(q24)	298
그림 93. 〈고려대 2011〉 개념 그래프	299
그림 94. $\text{B} \rightleftharpoons \text{A} \rightleftharpoons \text{C}$ 에너지경로도(q24)	302
그림 95. 〈고려대 2011〉 개념 그래프	309
그림 96. 에나멜의 용해 속도와 석출 속도(q25)	312

그림 97. 〈고려대 2010〉 개념 그래프	318
그림 98. Cl 원자의 오존 파괴 순환(q282)	321
그림 99. 〈경희대 2008〉 개념 그래프	327
그림 100. 탄산칼슘 조각 크기별 기체 발생량(q272)	331

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. 반응 속도를 바꾸는 네 요인.....	22
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	25
표 6. 구간별 평균 반응 속도.....	29
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	35
표 8. $\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{NO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 의 분압과 전체 압력(처음 압력 P_0).....	41
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	45
표 10. 전체 반응 차수와 속도 상수 k 의 단위(농도 M , 시간 s).....	51
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	55
표 12. $2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 의 초기 속도 자료(일정한 온도, ...)	58
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	64
표 14. 반감기 수와 반응물·생성물의 비율($A \rightarrow B$, 1차 반응).....	70
표 15. 0·1·2차 반응의 비교.....	79
표 16. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	83
표 17. 요인별로 바뀌는 것.....	87
표 18. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	93
표 19. 결합 에너지로 계산한 $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl}$ 의 반응 엔탈피.....	98
표 20. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	102
표 21. $E_a = 50 \text{ kJ/mol}$ 일 때 25°C 기준 속도 상수의 배수.....	108
표 22. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	112
표 23. 촉매가 바꾸는 것과 바꾸지 않는 것.....	116
표 24. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	122
표 25. $2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 의 메커니즘(교과서에서 흔히 쓰는)	125
표 26. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	132
표 27. 발열 반응($\Delta H < 0$)에서 조건을 바꿀 때 속도와 평형에 주는 영향.....	136
표 28. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	142
표 29. 이 장에서 본 네 장면.....	149
표 30. 기출문제와 기본개념(2부) 목차와 내용.....	163
표 31. 연세대 2022 [표 1]의 구간 평균 속도(수소 부피, 25°C).....	165
표 32. 전체 차수에 따른 속도 상수 k 의 단위(농도 M , 시간 s).....	166
표 33. 초기 속도법 예(가상 자료, $2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, 일.....)	166
표 34. 0·1·2차 반응의 비교(2차의 적분식은 교과 밖 심화).....	167
표 35. 요인별로 바뀌는 것과 바뀌지 않는 것(온도를 바꾸지 않는 요인은 k 가 그)	168
표 36. $E_a = 50 \text{ kJ/mol}$ 일 때 25°C 에 대한 속도 상수의 배수(아레니)	169
표 37. 촉매가 바꾸는 것과 바꾸지 않는 것.....	169
표 38. 발열 반응을 기준으로 본 조건 변화의 두 효과(속도와 평형).....	171
표 39. 이 책의 기출 문항 목록.....	176
표 40. 대학별 출제 문항.....	176
표 41. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	177
표 42. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	179
표 43. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서(반응 속도 단원).....	181
표 44. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	181
표 45. 서술형 답안의 문장 틀(반응 속도 요인 설명).....	184
표 46. 논술 기본 패턴 5가지(반응 속도 답안).....	185
표 47. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은)	186

표 48. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는	194
표 49. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용	195
표 50. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	196
표 51. 학년도별 문항 수와 원문 출처.....	196
표 52. 14문항의 요구 34개에 적용한 주 답안 패턴(결합 패턴은 앞의 것을 주	197
표 53. 이 책의 개념과 기출에서 쓰인 횟수(많이 쓰인 순).....	198
표 54. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	199
표 55. [표 1] 27°C에서 혼합 기체의 몰 분율(%)	202
표 56. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	204
표 57. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	206
표 58. [표 1] 몇 가지 원자 사이의 평균 결합 에너지(단위; kJ/mol)	214
표 59. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	215
표 60. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	216
표 61. [표 1] 반응 시간에 따른 수소 기체의 발생량(원문 표를 다시 조판)	222
표 62. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	223
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	224
표 64. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	232
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	233
표 66. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	242
표 67. 요구 사항과 난이도(단일 문항을 답안 단락으로 나눔)	244
표 68. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	252
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	253
표 70. 처음 에탄올 0.....	254
표 71. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	260
표 72. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	261
표 73. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	269
표 74. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	271
표 75. 【문항 3】의 표	278
표 76. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	279
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	280
표 78. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	288
표 79. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	291
표 80. 표 1 저해제 처리에 따른 효소활성 여부.....	298
표 81. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	299
표 82. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	301
표 83. (b)의 계산 예시	304
표 84. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	309
표 85. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	310
표 86. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	318
표 87. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	319
표 88. <표> 시간에 따른 발생 기체량(g)	326
표 89. 기출문제 14의 개념과 복습 위치.....	327
표 90. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	329
표 91. 원문 <표>에서 계산한 구간 평균 반응 속도(CO ₂ g/분)	330
표 92. 인강 회차 구성(제안)	341
표 93. 14개 문항의 규모	344
표 94. 대학별 한 줄 총평(이 책의 자료 범위 안에서).....	346

제 1 부

기본개념편

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

반응 속도

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 반응 속도의 뜻 → 재는 법 → 속도식과 시간 → 분자의 눈(충돌·활성화 에너지·온도) → 촉매와 단계 → 속도와 평형 → 응용의 순서로 이어집니다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

14개 장은 표 1처럼 다섯 구간으로 묶입니다. 구간 A·B는 “얼마나 빨리”를 숫자로 재고 계산하는 법, 구간 C·D는 “왜 그 빠르기인가”를 분자의 눈으로 설명하는 법, 구간 E는 속도와 평형을 한 문제 안에서 함께 다루는 법입니다.

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 속도를 재다	1~3장	빠른 반응과 느린 반응에서 출발해 반응 속도를 단위 시간당 농도 변화로 정의하고, 그래프의 기울기(평균·순간)와 계수비로 하나의 반응 속도를 구한다.
B. 속도식과 시간	4~7장	농도가 속도를 어떻게 정하는지 반응 속도식 $v = k[A]^m[B]^n$ 으로 쓰고, 초기 속도법으로 차수를 정한 뒤 1차 반응의 반감기와 0차·2차 반응을 계산한다.
C. 왜 빨라지나	8~10장	충돌 이론으로 농도·압력·표면적의 효과를, 활성화 에너지와 분자 에너지 분포로 온도의 효과를 설명한다.
D. 촉매와 단계	11~12장	촉매가 언덕을 낮추는 방식과 바꾸지 않는 것(ΔH ·평형 상수), 여러 단계로 일어나는 반응과 속도 결정 단계를 본다.
E. 속도와 평형, 응용	13~14장	정반응·역반응 속도가 같아진 상태로서의 평형, 온도가 속도와 평형을 다르게 움직이는 문제, 촉매 변환기·오존층·몸속 효소에 모두를 적용하고 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 이 장의 참고문헌 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도 1쪽과 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 장마다 생활 속 개념도 한 쪽이 있어 그 장의 개념이 부엌·자동차·몸속에서 어떻게 보이는지 그림 하나로 정리합니다. 〈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 2는 장마다 새로 배우는 개념입니다. 괄호 안의 C·A 번호는 2부와 4부에서 그대로 다시 나오는 개념 번호입니다.

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 반응 속도인가	반응 속도의 뜻 · 빠른 반응과 느린 반응 · 평형과 속도는 다른 질문 (C1)
기본개념편 제 2장 (25쪽)	반응 속도를 재다: 평균 속도와 순간 속도	평균 반응 속도 · 순간 반응 속도 · 그래프의 기울기 · 측정 방법 (C1 C2)

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 3장 (35쪽)	계수로 맞추는 속도: 어느 물질로 재도 하나	물질별 변화 속도 · 계수로 나눈 반응 속도 · 압력으로 재는 속도 (C3)
기본개념편 제 4장 (45쪽)	농도가 속도를 정한다: 반응 속도식	반응 속도식 · 속도 상수 k · 반응 차수 · k 의 단위 (C4)
기본개념편 제 5장 (55쪽)	실험으로 차수를 정한다: 초기 속도법	초기 속도 · 변인 통제 · 비로 차수 읽기 (C5)
기본개념편 제 6장 (64쪽)	1차 반응과 반감기	1차 반응 · 반감기 $t_{1/2} = 0.693/k$ · 남은 비율 $(1/2)^n$ (C6)
기본개념편 제 7장 (74쪽)	0차·2차 반응: 그래프로 차수 가리기	0차 반응 · 2차 반응 · 직선 그래프로 차수 판별 (C7)
기본개념편 제 8장 (83쪽)	충돌해야 반응한다: 농도·압력·표면적	충돌 이론 · 유효 충돌 · 압력과 기체 농도 · 표면적 (C8)
기본개념편 제 9장 (93쪽)	넘어야 할 언덕: 활성화 에너지	활성화 에너지 · 전이 상태 · 에너지 도표 (C9)
기본개념편 제 10장 (102쪽)	온도를 올리면 왜 빨라질까: 에너지 분포와 아레니우스 식	분자 에너지 분포 · E_a 이상 분율 · 아레니우스 식 (C10 C11)
기본개념편 제 11장 (112쪽)	촉매: 언덕을 낮추는 다른 길	정촉매·부촉매 · 촉매가 바꾸지 않는 것 · 표면 촉매 · 효소와 저해 (C12 A4)
기본개념편 제 12장 (122쪽)	반응은 여러 단계로: 메커니즘과 속도 결정 단계	반응 메커니즘 · 속도 결정 단계 · 중간체와 촉매 · 연쇄 반응 (C13 A1)
기본개념편 제 13장 (132쪽)	빠른 것과 많이 생기는 것: 반응 속도와 화학 평형	동적 평형 · k 와 K · 온도의 두 얼굴 · 자발성과 속도 (C14 A3 A5)
기본개념편 제 14장 (142쪽)	몸속·지구·자동차의 반응 속도, 그리고 2부로	촉매 변환기 · 오존층 · 효소와 체내 대사 · 밀폐 용기 속 기체 반응 (A1~A4)

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 장은 5~7장(초기 속도법·반감기)과 10장(에너지 분포·온도)이다. 이 두 구간은 두 번 읽는다.
- 서술이 막히는 장은 11장(촉매)과 13장(속도와 평형)이다. “무엇이 바뀌고 무엇이 그대로인가”를 표로 다시 정리해 본다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

반응 속도는 중학교 과학에서 “가루가 덩어리보다 빨리 녹는다”, “온도가 높으면 빨리 반응한다” 정도로 처음 만나고, 대학 논술에서는 그래프의 기울기 계산과 “왜 그런가”의 서술이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 농도의 뜻, 간단한 비율과 그래프 읽기)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 로그(ln)는 필요한 장에서 처음부터 다시 설명한다. 외울 것을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 식을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 충북 단양의 돌집 과학방에서 토요일마다 화학을 배운다. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 부엌과 가게의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학 교수, 과학방의 선생님. 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

첫 토요일

토요일 아침, 돌집 과학방의 나무 탁자 위에 물 두 컵이 놓여 있다. 하린이 발포 비타민 한 알을 통째로, 다른 한 알을 손가락으로 뺄아서 각각 넣었다.

하린 교수님, 이것 보세요! 뺄은 쪽은 거품이 한꺼번에 확 올라오고 금방 끝났는데, 통째로 넣은 쪽은 아직도 보글보글해요.

석 교수 좋은 걸 골랐구나. 두 컵에서 나올 기체의 양은 결국 같을까, 다를까?

하린 같은 알약 한 알씩이니깐 같겠죠. 다른 건 빠르기뿐이고요.

석 교수 바로 그거다. “얼마나 많이”와 “얼마나 빨리”는 다른 질문이야. 오늘부터 우리가 다룰 것은 두 번째 질문, 반응 속도다.

태오 마침 잘됐어요. 연세대 기출에 마그네슘을 염산에 넣고 15초마다 수소 부피를 잰 표가 나왔거든요. 구간마다 평균 반응 속도를 구하고, 왜 점점 느려지는지 쓰라고요.

석 교수 그 문제는 2장에서 표를 그래프로 그려 기울기로 바로 풀 수 있다. 숫자 네 개를 구하는 데 1분이면 충분해.

이모 저는 두부를 만들 때 간수를 넣으면 순두부가 금방 엉기는데, 겨울에는 한참 걸리더라고요. 그것도 반응 속도예요?

석 교수 그렇습니다. 온도가 낮으면 반응이 느려지지요. 왜 그런지는 10장에서 분자들의 에너지 분포를 그려 보면 숫자로 보입니다.

태오 그럼 촉매는요? 시험에 “촉매를 쓰면 반응 엔탈피가 어떻게 되는지 논하라”는 문제도 있던데요.

석 교수 촉매는 넘어야 할 언덕만 낮추고, 출발점과 도착점의 높이 차이인 엔탈피는 건드리지 않는다. 11장에서 에너지 도표로 확인하자.

하린 언덕이요? 반응에 언덕이 있어요?

석 교수 있다. 성냥을 가만히 두면 불이 붙지 않지만 한 번 그으면 붙지? 그 마찰이 언덕을 넘게 해 준 거다. 9장의 활성화 에너지가 그 언덕이야.

이모 자동차 배기관에 들어간다는 촉매 변환기도 같은 이야기인가요?

석 교수 맞습니다. 엔진 속 뜨거운 곳에서 생긴 일산화 질소가 식어서도 잘 없어지지 않는 까닭은 평형이 아니라 속도 때문이에요. 마지막 14장에서 그 이야기로 끝맺을 겁니다.

태오 그러니까 처음에는 속도를 재고, 다음에는 식을 세우고, 그다음에는 왜 그런지 분자로 설명하는 순서네요.

석 교수 그렇다. 재고 → 식으로 쓰고 → 분자로 설명하고 → 평형과 함께 본다. 이 네 걸음이 기본 개념편의 줄거리다.

하린 그럼 오늘은 첫 걸음, 재는 것부터요?

석 교수 아니, 오늘은 1장이다. 불꽃놀이와 녹슨 자전거를 나란히 놓고, 같은 산화 반응이 왜 이렇게 다른 빠르기로 일어나는지부터 묻자.

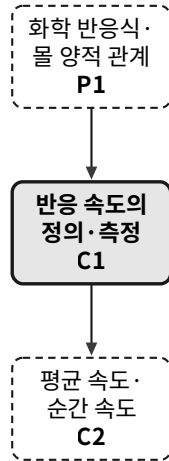
1장은 빠른 반응과 느린 반응을 나란히 놓고 반응 속도를 “단위 시간당 농도 변화”로 정의하는 데서 출발한다. 2~7장은 그 속도를 재고 식으로 쓰는 법, 8~12장은 분자의 충돌과 에너지 언덕으로 그 식을 설명하는 법, 13~14장은 속도와 평형을 함께 보는 법이다. 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 반응 속도인가

새 개념 반응 속도의 뜻 · 빠른 반응과 느린 반응 · 평형과 속도는 다른 질문

이어집 평균 속도 2장 · 충돌 이론 8장 · 속도와 평형 13장

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 반응 속도의 정의·측정)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

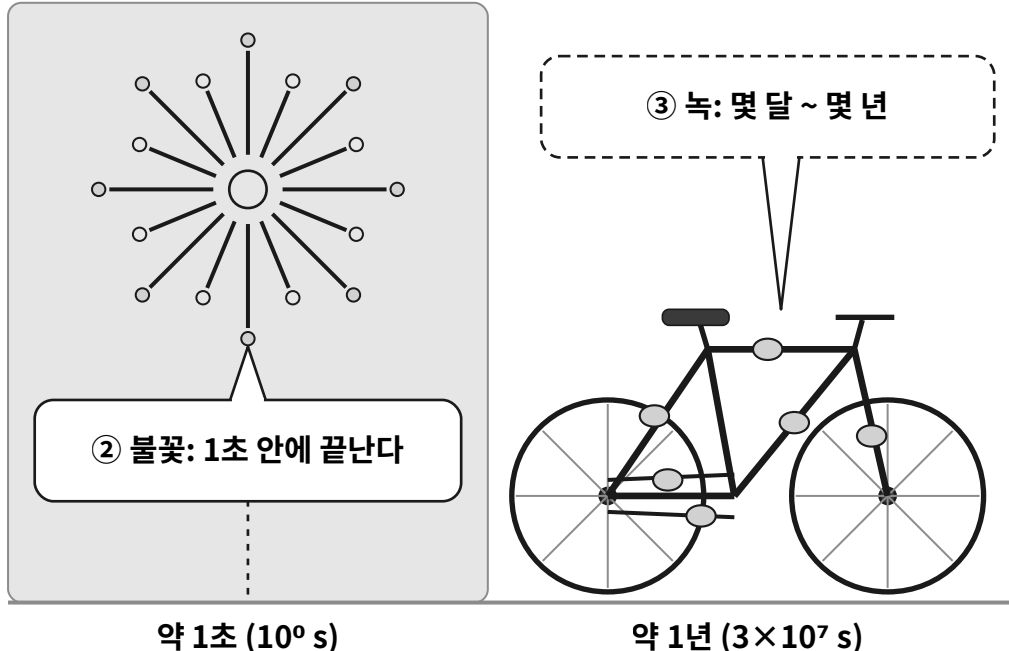
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 3 (연세대 2022년) (222쪽)	수소 발생 그래프와 구간 평균 속도	C1 반응 속도의 정의·측정
기출 13 (고려대 2010년) (317쪽)	프레온과 오존: 염소 원자 하나의 순환	C1 반응 속도의 정의·측정
기출 14 (경희대 2008년) (326쪽)	탄산칼슘 조각 크기와 기체 발생량 표 읽기	C1 반응 속도의 정의·측정

불꽃놀이와 녹슨 자전거

같은 산화 반응, 다른 빠르기

① 둘 다 금속이 산소와 만나는 산화 반응



④ 차이는 ‘얼마나 많이’가 아니라 ‘얼마나 빨리’

반응식은 같은 꼴, 속도는 천만 배 차이

불꽃: $2\text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MgO}$ (빛과 열)

녹: $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 + \text{물} \rightarrow \text{붉은 녹}(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O})$

반응 속도 = 단위 시간당 농도 변화 (M/s)

그림 3. 불꽃놀이와 녹슨 자전거 — 둘 다 금속이 산소와 결합하는 산화 반응이지만, 불꽃은 1초 안에 끝나고 자전거의 녹은 몇 달에서 몇 년에 걸쳐 생긴다(시간은 대략의 크기, 모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 같은 종류의 반응도 빠르기가 크게 다르다.
2. 반응 속도는 단위 시간당 농도 변화로 잴다.
3. 속도를 바꾸는 요인은 농도·표면적·온도·촉매다.

이 장의 출발점

- 화학 반응식과 계수, 몰과 몰 농도($M = \text{mol/L}$). 반응식의 계수는 반응하는 몰수의 비다.
- 그래프에서 두 점을 잇는 직선의 기울기 = (세로 변화량) ÷ (가로 변화량).
- 산화 반응의 뜻: 물질이 산소와 결합하거나 전자를 잃는 반응.

가을 축제가 끝난 다음 날, 돌집 과학방 마당에는 밤새 터진 불꽃놀이의 종이 껍데기가 흩어져 있었다. 하린은 그 옆에 세워 둔 자기 자전거의 체인과 바퀴살이 붉게 녹슨 것을 보고 한숨을 쉬었다.

하린 교수님, 어젯밤 불꽃은 하늘에서 1초 만에 반짝하고 사라졌는데, 제 자전거는 비 맞은 지 몇 달 만에 이렇게 녹이 슬었어요. 둘 다 산화라고 배웠는데 왜 이렇게 달라요?

석 교수 오늘 공부를 네 자전거가 시작해 주는구나. 불꽃의 반짝임은 마그네슘이나 알루미늄 같은 금속 가루가 산소와 결합하면서 내는 빛이다. 녹은 철이 산소와 물을 만나 산화 철이 되는 것이고. 둘 다 금속 + 산소 → 산화물이라는 같은 종류의 반응이야.

태오 그런데 하나는 1초, 하나는 몇 달이에요. 시간 차이가 천만 배쯤 되겠는데요.

석 교수 1년이 약 3.2×10^7 초이니, 1초와 몇 달을 비교하면 정말 그 정도다. 이 차이를 다루는 단원이 오늘부터 시작하는 **반응 속도**다. 지금까지 화학 반응식을 배울 때는 ‘무엇이 얼마나 생기나’만 물었지. 이제는 ‘얼마나 빨리 생기나’를 묻는다.

이모 그 질문이 왜 중요해요? 어차피 녹은 슬고, 불꽃은 터지잖아요.

석 교수 생활의 거의 모든 일이 빠르기의 문제란다. 음식이 상하는 빠르기를 늦추려고 냉장고를 쓰고, 공장은 같은 물건을 더 빨리 만들려고 촉매를 넣고, 약은 몸속에서 얼마나 빨리 없애지느냐에 따라 먹는 간격을 정한다. 모두 반응 속도의 문제야.

1.1 빠른 반응, 느린 반응

석 교수 반응이 끝나는 데 걸리는 시간을 한 줄에 늘어놓아 보자. **그림 4**는 가로축을 로그 눈금으로 잡았다. 눈금 하나가 10배다.



그림 4. 생활 속 반응의 시간 척도 — 가로축은 걸리는 시간(초)의 로그 눈금으로, 눈금 한 칸이 10배다. 불꽃 약 1초, 깎은 사과 갈변 약 10분, 김치가 익는 데 며칠, 철의 녹 약 1년, 종유석 1cm 자라는 데 약 100년(모두 대략의 크기)

하린 눈금 하나가 10배면 오른쪽 끝은 엄청나게 기네요.

- 석 교수** 불꽃은 10°초, 곧 1초 근처다. 짙은 사과가 갈색으로 변하는 데는 10분, 약 600초, 김치가 익는 데는 며칠, 약 10⁵초다. 철이 눈에 띄게 녹스는 데는 1년, 약 3×10⁷초. 동굴의 종유석이 1 cm 자라는 데는 대략 100년, 3×10⁹초가 걸린다. 물론 온도·습도·농도에 따라 크게 달라지니 대략의 크기로만 봐야 한다.
- 태오** 불꽃과 종유석은 열 자리 넘게 차이가 나네요. 둘 다 화학 반응인데요.
- 석 교수** 그래서 반응 속도를 한 가지 수로만 말할 수 없다. 앞으로 이 책에서는 반응마다 빠르기를 재고, 그 빠르기가 무엇에 따라 바뀌는지를 따진다.
- 이모** 빵 굽는 것도 화학 반응이죠? 오븐에 30분쯤 넣잖아요.
- 석 교수** 맞다. 빵 껍질이 갈색으로 변하는 것은 당과 단백질이 열을 받아 반응하는 마이야르 반응이다. 오븐 온도가 낮으면 한참 걸리고, 높으면 금방 탄다. 온도가 속도를 크게 바꾼다는 증거지. 이 이야기는 10장에서 자세히 한다.

1.2 얼마나 많이, 얼마나 빨리

- 석 교수** 이제 오늘의 가장 중요한 구분을 하자. 화학에는 두 가지 다른 질문이 있다. 하나는 ‘반응이 끝나면 얼마나 많이 생기나’, 다른 하나는 ‘얼마나 빨리 생기나’다. 앞의 것은 화학 평형과 열역학이, 뒤의 것은 반응 속도가 답한다.
- 태오** 많이 생기는 반응이 빨리 일어나는 거 아니에요?
- 석 교수** 그게 바로 흔한 착각이다. 예를 하나 들자. 다이아몬드와 흑연은 둘 다 탄소다. 상온·1기압에서는 흑연이 더 안정해서, 다이아몬드가 흑연으로 바뀌는 쪽이 저절로 일어나는 방향이다. 1몰당 에너지(깁스 에너지)로 약 2.9 kJ 내려간다.
- 하린** 그럼 제 이모 결혼반지 다이아몬드도 언젠가 연필심이 돼요?
- 이모** 어머, 그건 안 되는데요.
- 석 교수** 걱정 마세요. 방향은 그쪽이 맞지만, 탄소 원자들이 결합을 끊고 다시 배열하려면 넘어야 할 에너지 언덕이 아주 높아서 사람의 일생은 물론 수십억 년 동안에도 사실상 일어나지 않는다. ‘일어날 수 있다’와 ‘빨리 일어난다’는 전혀 다른 말이야.
- 태오** 그럼 반대로, 빨리 일어나지만 조금만 생기는 반응도 있겠네요.
- 석 교수** 있다. 13장에서 볼 암모니아 합성이 그렇다. 온도를 높이면 빨라지지만 평형에서 생기는 양은 줄어든다. 그래서 공장은 두 질문 사이에서 절충한다. 이 두 질문을 섞어 쓰는 것이 논술 답안에서 가장 자주 감점되는 실수다.
- 이모** 그럼 자전거 녹도 ‘녹이 생기는 방향’은 정해져 있고, ‘얼마나 빨리’만 조건에 따라 다른 거예요?
- 석 교수** 정확하다. 철이 공기 중에서 산화 철이 되는 것은 열역학적으로 정해진 방향이다. 그런데 비 맞은 자전거가 마른 실내 자전거보다 훨씬 빨리 녹스는 것은 물과 염분이 반응을 빠르게 하기 때문이야. 같은 방향, 다른 빠르기.
- 태오** 시험 제시문에도 이런 말이 나오던데요. ‘반응물과 생성물의 상대적인 양은 화학 평형뿐 아니라 반응 속도를 동시에 고려해야 한다’는 문장이요.
- 석 교수** 2022학년도 연세대 제시문의 한 문장이다. 이 문장이 바로 오늘의 구분을 요구한다. 평형은 ‘충분히 오래 기다렸을 때’의 양을 알려 주지만, 실제로 우리가 보는 것은 ‘정해진 시간 안에’ 생긴 양이다. 속도가 느리면 평형이 많이 생긴다고 말해도 정해진 시간 안에는 조금 밖에 생기지 않는다.

하린 그럼 시간이 무한히 많으면 평형만 생각하면 되고, 시간이 짧으면 속도도 생각해야 하는 거네요.

석 교수 아주 잘 정리했다. 자동차 배기관 문제가 그 예다. 배기관의 낮은 온도에서는 해로운 일산화 질소가 분해되는 쪽이 평형상 유리한데, 배기가스가 배기관을 지나가는 짧은 순간에는 그 분해가 너무 느려 거의 일어나지 않는다. 그래서 촉매 장치를 단다. 14장에서 다시 만난다.

1.3 반응 속도의 뜻과 단위

석 교수 이제 ‘빠르기’를 숫자로 정하자. 자동차의 속력은 단위 시간당 이동 거리다. 반응 속도는 단위 시간당 농도 변화다. 반응 $A \rightarrow B$ 에서 A는 줄고 B는 늘다.

$$\text{반응 속도 } v = -\Delta[A] / \Delta t = \Delta[B] / \Delta t$$

하린 앞에 왜 마이너스가 붙어요?

석 교수 A는 줄어드니까 $\Delta[A]$ 가 음수다. 속도는 양수로 쓰기로 약속했으니 반응물에는 마이너스를 붙여 뒤집는다. 생성물 B는 늘어나니 그대로 쓰고.

태오 단위는 농도 나누기 시간이니깐 $\text{mol/L} \div \text{s}$, 곧 $\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{s})$ 네요.

석 교수 그렇다. 물 농도 mol/L 를 M으로 쓰니 M/s라고도 한다. 시간 단위가 분이면 M/min, 기체 부피를 재면 mL/s, 질량을 재면 g/min처럼, 무엇을 무엇으로 재느냐에 따라 단위가 달라진다. 답안에 단위를 쓰지 않으면 숫자가 무엇인지 알 수 없으니 반드시 붙여야 한다.

하린 그런데 왜 몰수가 아니고 농도예요? 그냥 ‘1초에 몇 몰 없어졌나’로 재면 더 쉬울 것 같은데요.

석 교수 좋은 질문이다. 같은 용액을 1 L 비커와 10 L 통에 나눠 담았다고 해 보자. 두 그릇 속 분자들은 똑같이 붓비고 똑같이 부딪치니 반응의 빠르기도 같아야 한다. 그런데 몰수로 재면 10 L 통에서 1초에 없어지는 몰수가 열 배로 커진다. 그릇 크기 때문에 숫자가 달라지면 반응 자체의 빠르기를 비교할 수 없지.

태오 아, 그래서 부피로 나눈 농도로 재는 거군요. 농도로 재면 그릇 크기와 상관없이 같은 값이 나오니까요.

석 교수 그렇다. 자동차 연비를 ‘한 번 주유로 간 거리’가 아니라 ‘1 L로 간 거리’로 말하는 것과 같은 생각이다. 다만 시험에서는 기체 부피나 질량처럼 재기 쉬운 양을 그대로 쓰는 경우가 많다. 그때는 그릇과 조건이 같은 실험끼리만 비교하고, 필요하면 몰수나 농도로 바꿔 쓴다.

이모 기체 부피를 몰수로 바꾸려면 기체 법칙이 필요하겠네요.

석 교수 그렇다. 25 °C·1기압에서 기체 1몰은 약 24.5 L를 차지한다. 이 값을 쓰면 mL/s를 mol/s로 바꿀 수 있지. 2장에서 직접 해 본다.

이모 처음으로 이런 걸 켜 사람이 있었겠죠?

석 교수 1850년 독일의 빌헬름이 설탕물에 산을 넣고, 설탕이 포도당과 과당으로 쪼개지는 빠르기를 빛의 회전 각도로 잰다. 남은 설탕의 양이 시간에 따라 일정한 비율로 줄어든다는 것을 보였는데, 이것이 반응 속도를 수식으로 쓴 첫 연구로 꼽힌다. 그 비율이 6장의 1차 반응이다.

하린 빛의 회전 각도로 설탕을 어떻게 재요?

석 교수 설탕물은 그 속을 지나는 빛의 진동 방향을 오른쪽으로 조금 돌린다. 설탕이 쪼개져 생긴 포도당과 과당 혼합물은 반대로 왼쪽으로 돌리지. 그래서 돌아간 각도를 시간마다 읽으면 남은 설탕의 농도를 알 수 있다. 용액을 꺼내 무게를 달지 않고도 반응이 진행되는 모습을 계속 볼 수 있었던 거야.

태오 반응을 멈추지 않고 재는 게 중요하군요.

석 교수 그렇다. 반응 속도를 재는 방법은 대부분 이런 생각에서 나온다. 반응하는 동안 저절로 바뀌는 성질, 곧 색·기체 부피·질량·압력·빛의 회전을 골라 시간마다 읽는다. 2장에서 하나씩 본다.

석 교수 그래프로 보자. **그림 5**는 $A \rightarrow B$ 에서 $[A]$ 가 1.0 M에서 출발할 때 두 농도가 시간에 따라 어떻게 바뀌는지 계산한 것이다.

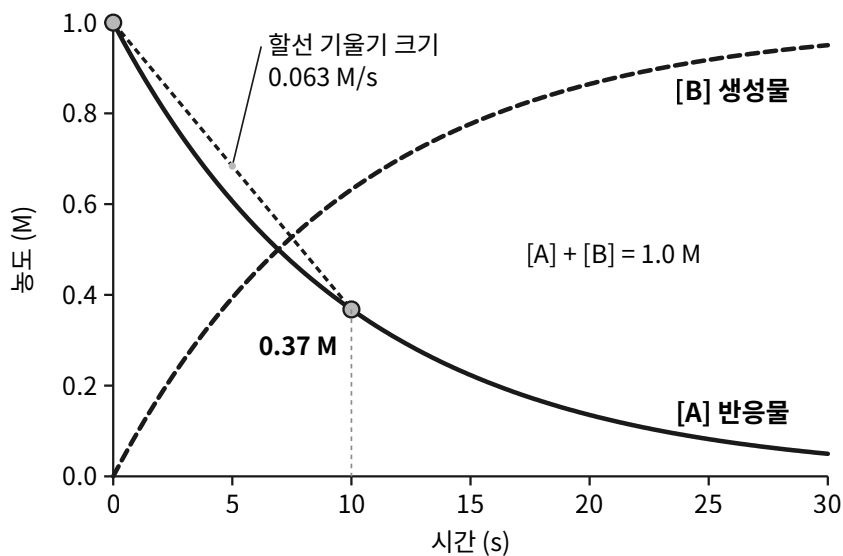


그림 5. $A \rightarrow B$ 의 농도-시간 그래프 — $[A]_0 = 1.0 \text{ M}$ 에서 $[A]$ 는 줄고 $[B]$ 는 늘며, 매 순간 $[A] + [B] = 1.0 \text{ M}$ 이다. 0~10초 구간의 평균 반응 속도는 두 점을 잇는 직선(할선)의 기울기 크기 0.063 M/s 다(1차 반응, $k = 0.10 \text{ s}^{-1}$ 로 계산)

하린 두 곡선이 X자로 엇갈려요. 하나가 줄어든 만큼 다른 하나가 늘어나니까요.

석 교수 그래서 $[A] + [B]$ 는 언제나 1.0 M이다. 0초에서 $[A] = 1.00 \text{ M}$, 10초에서 0.37 M이니 평균 속도는?

태오 $-(0.37 - 1.00) \div (10 - 0) = 0.063 \text{ M/s}$ 요. B로 재도 $(0.63 - 0) \div 10 = 0.063 \text{ M/s}$ 로 같고요.

석 교수 맞다. 그리고 곡선을 보면 처음에는 가파르고 갈수록 완만하지. 반응 속도가 시간에 따라 줄어든다는 뜻이다. 이 점이 2장의 주제다.

문제 1.1

반응 $A \rightarrow B$ 에서 반응 시작 후 10초 동안 $[A]$ 가 0.80 M에서 0.60 M으로 줄었다. 이 구간의 평균 반응 속도를 구하라. 같은 구간에서 $[B]$ 의 증가 속도는 얼마인가?

하린 줄어든 양은 $0.80 - 0.60 = 0.20 \text{ M}$ 이에요. 이걸 10초로 나누면 0.020이요.

석 교수 단위까지.

- 하린** 0.020 M/s, 곧 0.020 mol/(L·s)요.
- 태오** A 하나가 B 하나가 되니까 B도 10초 동안 0.20 M 늘어요. B의 증가 속도도 0.020 M/s에요.
- 석 교수** 정답이다. 정답: 평균 반응 속도 0.020 M/s, [B]의 증가 속도도 0.020 M/s. 계수가 1 : 1이라 같았지만, 계수가 다르면 물질마다 변화 속도가 달라진다. 그것은 3장에서 다룬다.

1.4 무엇이 속도를 바꾸나

이모 그럼 자전거 녹을 늦추려면 뭘 바꿔야 해요?

석 교수 반응 속도를 바꾸는 요인은 크게 넷이다. 표 4에 생활 예와 함께 정리했다.

표 4. 반응 속도를 바꾸는 네 요인 — 생활 예와 분자 수준의 이유, 이 책에서 다루는 장

요인	생활 예	분자 수준의 이유	장
농도(기체는 압력)	숯불에 부채질하면 불길이 세진다	단위 부피 안 분자 수가 늘어 충돌이 잦아진다	4·8장
표면적	가루 설탕이 각설탕보다 빨리 녹는다	고체 겉면에 드러난 입자가 많아 충돌 기회가 늘어난다	8장
온도	여름에 음식이 빨리 상한다	언덕(활성화 에너지)을 넘는 분자의 비율이 커진다	10장
촉매	효소가 소화를 돕는다	언덕이 낮은 다른 반응 경로를 연다	11장

하린 자전거는 물을 닦고 기름칠하면 되겠네요. 철 표면에 물과 산소가 닿지 않게요.

석 교수 맞다. 기름이 철 표면과 물·산소의 만남을 막는다. 표에서 농도와 표면적은 ‘얼마나 자주 만나나’, 온도와 촉매는 ‘만났을 때 얼마나 잘 반응하나’에 해당한다. 이 두 갈래가 8장부터 배울 충돌 이론의 뼈대다.

태오 불꽃놀이가 빠른 건 금속을 아주 고운 가루로 만들어서겠네요. 표면적이 엄청 크니까요.

석 교수 좋은 추론이다. 불꽃의 금속 가루는 표면적이 크고, 화약 속 산화제가 산소를 바로 옆에서 공급해 주고, 반응열이 온도를 올려 다시 반응을 빠르게 한다. 세 요인이 한꺼번에 작동하는 셈이야. 반대로 자전거 바퀴살은 덩어리 철이고, 공기 중 산소와 습기에만 기대느니라.

이모 덩어리 철도 가루로 만들면 불이 붙어요?

석 교수 아주 고운 철 가루는 공기 중에서 불꽃을 튀기며 탄다. 철솥에 불을 붙여 본 사람도 있을 거야. 같은 철인데 표면적만 바뀌도 몇 년 걸리던 반응이 몇 초로 줄어든다.

태오 반대로 속도를 늦추는 데 쓰는 예도 많겠네요.

석 교수 부엌이 그 예로 가득하다. 냉장고는 온도를 낮춰 음식이 상하는 반응과 미생물의 대사를 늦춘다. 과자 봉지에 질소를 채우는 것은 기름이 산화되는 반응에서 산소의 농도를 줄이는 거고, 깎은 사과에 레몬즙을 뿌리는 것은 갈변을 일으키는 효소가 잘 일하지 못하게 산성으로 만드는 것이다. 바닷가 자동차가 빨리 녹스는 것은 소금물이 녹스는 반응을 거드는 탓이니, 세차가 곧 속도 조절이다.

이모 제가 매일 하던 일이 다 반응 속도 조절이었군요.

석 교수 그렇다. 표의 네 요인을 알고 나면 생활의 많은 지혜가 한 줄로 정리된다. 만남의 횟수를 줄이거나, 만났을 때 반응하는 비율을 낮추거나.

문제 1.2

(1) 문제 1.1의 평균 반응 속도 0.020 M/s 를 M/min 단위로 바꾸어라. (2) 이 속도가 일정하게 유지된다고 가정하면, 0.60 M 남은 A가 모두 없어지는 데 몇 초가 더 걸리겠는가? (3) 실제로는 (2)보다 오래 걸린다. 그 까닭을 쓰라.

태오 (1)은 1분이 60초니까 $0.020 \times 60 = 1.2 \text{ M/min}$ 이요.

하린 (2)는 $0.60 \div 0.020 = 30$ 초예요.

석 교수 계산은 둘 다 맞다. 그럼 (3)은?

태오 아까 그래프처럼 반응물이 줄면 속도도 줄어드니까요. 0.020 M/s 로 계속 가지 못하고 점점 느려져서 30초보다 오래 걸려요.

석 교수 정답이다. 정답: (1) 1.2 M/min , (2) 30초, (3) 반응물 A의 농도가 줄어들수록 분자끼리의 충돌이 줄어 반응 속도가 작아지므로 30초 안에 다 없어지지 않는다. 일정한 속도를 가정한 것은 계산을 위한 것일 뿐이고, 실제 반응은 7장의 0차 반응 같은 특별한 경우가 아니면 끝으로 갈수록 느려진다.

이모 그럼 반응 속도는 ‘언제’의 속도인지를 꼭 말해야겠네요.

석 교수 그래서 2장에서 구간의 평균 속도와 한 순간의 순간 속도를 구별한다.

1.5 이 책의 길

석 교수 오늘 이야기를 앞으로의 길과 이어 두자. 2·3장에서는 속도를 재는 법을 익힌다. 구간 평균 속도와 순간 속도, 그리고 계수로 맞추는 하나의 반응 속도다. 4~7장에서는 농도와 속도의 관계를 식으로 쓴다. 반응 속도식과 차수, 초기 속도법, 반감기다.

하린 그다음은요?

석 교수 8~10장은 ‘왜’를 분자의 눈으로 본다. 분자들이 충돌해야 반응하고, 충돌해도 언덕을 넘을 만큼 에너지가 있어야 한다. 온도는 그 비율을 바꾼다. 11~12장은 촉매와 반응의 여러 단계, 13장은 오늘 말한 ‘많이’와 ‘빨리’를 한 문제 안에서 함께 다루고, 14장은 자동차·오존층·몸속에 모두 적용한다.

태오 논술에서는 어떤 식으로 나와요?

석 교수 표를 주고 구간별 평균 속도를 계산하게 한 뒤 그 변화를 설명하게 하는 문제가 가장 흔하다. 그다음이 ‘온도를 올리면 생성물이 더 많이 생기나, 더 빨리 생기나’를 가르는 문제다. 오늘 배운 두 질문의 구분을 답안 첫 줄에 분명히 쓰는 습관이 그래서 중요하다.

하린 저는 계산이 걱정이예요. 로그 같은 게 나오면 어떡해요?

석 교수 이 책의 계산은 대부분 나눗셈과 비례다. 로그가 필요한 곳은 6장의 반감기와 10장의 온도 효과 정도인데, 그때마다 표와 그림으로 먼저 보여 주고 식은 나중에 쓴다. 교과 과정 밖 내용은 ‘교과 밖 심화’라고 따로 표시할 테니, 처음 읽을 때는 건너뛰어도 흐름은 따라올 수 있다.

이모 저는 다음 주에 자전거 기름칠부터 해야겠어요.

석 교수 그것도 훌륭한 반응 속도 응용이다.

핵심 반응 속도 문제를 시작하는 네 단계

1. 묻는 것이 ‘얼마나 많이(평균·생성량)’인지 ‘얼마나 빨리(속도)’인지 먼저 가린다.
2. 무엇의 변화로 속도를 재는지 정한다: 반응물 농도 감소(마이너스 부호), 생성물 농도·기체 부피·질량 변화.
3. 평균 속도 = 변화량 ÷ 걸린 시간. 단위(M/s, mL/s, g/min)를 반드시 붙인다.
4. 속도가 바뀌는 이유는 농도·표면적(만남의 횟수), 온도·촉매(만났을 때 반응하는 비율)로 나누어 설명한다.

스스로 풀어 보기

1. 반응 $A \rightarrow 2C$ 에서 20초 동안 $[A]$ 가 0.50 M에서 0.30 M으로 줄었다. A의 평균 감소 속도를 M/s로 구하라.
2. 다이아몬드가 흑연으로 바뀌는 쪽이 자발적인데도 다이아몬드가 오래 보존되는 까닭을 ‘방향’과 ‘속도’라는 말을 써서 한 문장으로 쓰라.
3. 같은 질량의 각설탕과 가루 설탕을 같은 온도의 물에 넣었을 때 가루 설탕이 빨리 녹는 까닭을 반응 속도 요인과 연결해 쓰라.
4. 반응 속도 0.30 M/min을 M/s 단위로 바꾸어라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 두 질문과 평균 속도는 4부 기출 전체의 출발점이다. **기출문제 3**(연세대 2022) (222쪽)는 마그네슘과 염산에서 나오는 수소 부피 표로 구간별 평균 속도를 계산하고, 속도가 줄어드는 이유와 생활 속 예를 쓰게 한다. 이 장의 평균 속도 정의와 속도 요인 표가 답의 뼈대가 된다. **기출문제 14**(경희대 2008) (326쪽)는 큰 조각과 작은 조각의 탄산칼슘을 같은 염산에 넣은 실험 자료를 분석하게 하는데, 표면적이 속도는 바꾸지만 최종 생성량은 바꾸지 않는다는 점, 곧 ‘얼마나 빨리’와 ‘얼마나 많이’의 구분이 핵심이다. **기출문제 1**(연세대 2024) (202쪽)은 압력이 높아질 때 반응 속도·속도 상수·활성화 에너지가 각각 어떻게 되는지 묻는 문제로, 이 책의 길 전체를 한 문항 안에서 다시 걷게 한다.

이 장의 참고문헌

Wilhelmy, L. (1850). Ueber das Gesetz, nach welchem die Einwirkung der Säuren auf den Rohrzucker stattfindet. *Annalen der Physik und Chemie*, 81, 413–433.

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

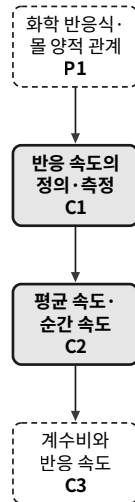
Laidler, K. J. (1984). The development of the Arrhenius equation. *Journal of Chemical Education*, 61(6), 494. <https://doi.org/10.1021/ed061p494>

제 2장 반응 속도를 재다: 평균 속도와 순간 속도

새 개념 평균 반응 속도 · 순간 반응 속도 · 그래프의 기울기 · 측정 방법(기체 부피·질량·압력·색)

이어짐 계수비 3장 · 속도식 4장 · 충돌 이론 8장

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 반응 속도의 정의·측정, C2 평균 속도·순간 속도)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.

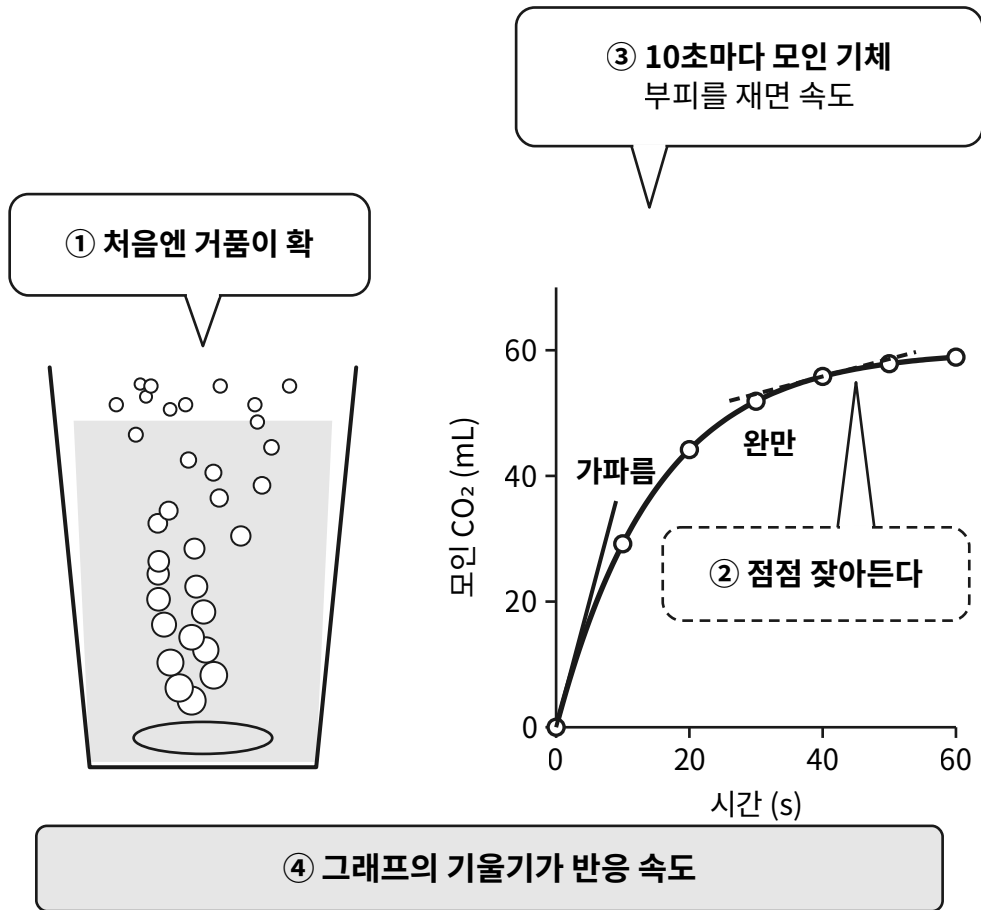
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 3 (연세대 2022년) (222 쪽)	수소 발생 그래프와 구간 평균 속도	C1 반응 속도의 정의·측정; C2 평균 속도·순간 속도
기출 13 (고려대 2010년) (317쪽)	프레온과 오존: 염소 원자 하나의 순환	C1 반응 속도의 정의·측정
기출 14 (경희대 2008년) (326쪽)	탄산칼슘 조각 크기와 기체 발생량 표 읽기	C1 반응 속도의 정의·측정; C2 평균 속도·순간 속도

물컵 속 발포 비타민

모인 기체의 부피로 재는 반응 속도



평균 속도와 순간 속도

평균 속도 = $\Delta V \div \Delta t$ (두 점을 잇는 선의 기울기)

순간 속도 = 그 순간 접선의 기울기

반응물이 줄면 기울기가 작아진다 (곡선은 모식 값)

그림 7. 물컵 속 발포 비타민 — 알약이 물에 녹으며 이산화 탄소 거품을 내고, 모인 기체의 부피를 10초마다 재어 그래프로 그리면 그 기울기가 반응 속도다(곡선은 설명용 모식 값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 반응 속도는 생성물(기체)이 늘어나는 빠르기로도 잴다.
2. 평균 속도는 구간의 기울기, 순간 속도는 접선의 기울기다.
3. 반응물이 줄수록 기울기가 작아진다.

이 장의 출발점

- 1장의 반응 속도: 단위 시간당 농도 변화, 반응물에는 마이너스 부호.
- 기울기 = (세로 변화량) ÷ (가로 변화량). 곡선 위 한 점의 접선은 그 점에서 곡선과 같은 방향으로 스치는 직선이다.
- 25 °C·1기압에서 기체 1몰의 부피는 약 24.5 L이다.

토요일 아침, 이모가 감기 기운이 있다며 물컵에 발포 비타민 한 알을 떨어뜨렸다. 쉬익 소리와 함께 거품이 솟구치다가 1분쯤 지나자 잦아들었다. 태오는 그 모습을 휴대 전화로 찍고 있었다.

태오 교수님, 이거 동영상으로 보니까 처음 10초가 제일 요란하고 점점 조용해져요. 반응 속도가 줄어드는 게 눈에 보여요.

석 교수 눈으로는 보이지만 숫자로 말하려면 무언가를 재야 한다. 거품의 정체가 뭔지부터 생각해 보자.

이모 알약에 탄산수소 나트륨 같은 게 들어 있다고 봤어요. 그게 시트르산이랑 만나서 이산화탄소가 나온다고요.

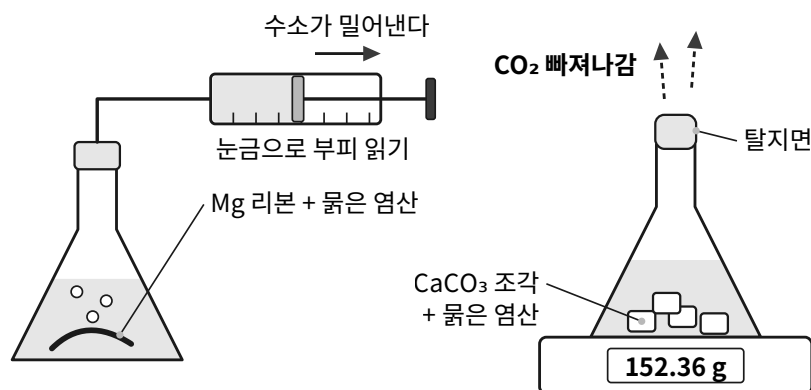
석 교수 맞습니다. 산과 탄산수소염이 물에 녹아 만나면 이산화 탄소 기체가 생긴다. 그러면 이 기체를 모아서 부피를 시간마다 재면 반응이 얼마나 빨리 진행되는지 알 수 있지. 1장에서 농도의 변화로 속도를 정했는데, 실험실에서는 농도를 직접 재기 어려운 경우가 많다. 그래서 반응하는 동안 저절로 바뀌는 다른 성질을 쟀다.

2.1 무엇으로 재나

석 교수 반응 속도를 재는 방법은 크게 넷이다. 무엇이 바뀌느냐에 따라 고른다.

1. **기체 부피**: 기체가 생기는 반응이면 주사기나 물을 채운 눈금 실린더(수상 치환)에 모아 부피를 읽는다.
2. **질량 감소**: 기체가 빠져나가는 반응이면 플라스크를 전자저울에 올려 놓고 줄어드는 질량을 읽는다. 줄어든 질량이 곧 빠져나간 기체의 질량이다.
3. **압력**: 밀폐된 용기에서 기체 분자 수가 바뀌는 반응이면 압력계를 읽는다. 3장에서 다룬다.
4. **색의 진하기**: 색이 있는 물질이 생기거나 없어지면 빛이 얼마나 흡수되는지 쟀다. 5장의 색소 실험이 그 예다.

하린 그림 8에 그 두 장치가 있네요.



① 기체 부피 (mL)

② 질량 감소 (g)

그림 8. 반응 속도를 재는 두 장치(모식도) — 왼쪽: 플라스크에서 생긴 기체를 주사기에 모아 부피를 시간마다 읽는다. 오른쪽: 탈지면으로 입구를 느슨하게 막은 플라스크를 전자저울에 올려, 빠져나간 이산화 탄소만큼 줄어드는 질량을 읽는다

석 교수 왼쪽은 마그네슘 리본을 묽은 염산에 넣고 생기는 수소를 주사기로 모으는 장치다. 오른쪽은 대리석(탄산 칼슘)을 염산에 넣고 저울에 올려 둔 거야. 입구의 탈지면은 액체 방울이 튀어 나가는 것은 막고 기체는 빠져나가게 한다.

태오 저울 쪽은 질량이 줄어드는 거니까 줄어든 질량을 시간으로 나누면 g/min이 되겠네요.

석 교수 그렇다. 탄산 칼슘과 염산의 반응식은 $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 다. 생긴 물질 가운데 기체로 빠져나가는 것은 이산화 탄소뿐이니, 줄어든 질량이 그대로 이산화 탄소의 질량이다.

이모 마그네슘 쪽은 $\text{Mg} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2$ 겠네요. 수소가 주사기를 밀어내고요.

하린 색으로 재는 건 어떻게 해요? 눈으로 보고 “조금 열어졌다”고 하면 숫자가 안 나오잖아요.

석 교수 그래서 분광 광도계라는 기계를 쓴다. 정해진 색의 빛을 용액에 비추고 빠져나온 빛의 세기를 잰다. 용액이 진할수록 빛을 많이 흡수하는데, 흡수하는 정도가 농도에 비례하니 흡광도를 읽으면 농도로 바꿀 수 있다. 학교에서는 기계 대신 같은 크기의 시험관 여러 개에 농도를 아는 용액을 만들어 놓고 색을 견주는 방법을 쓰기도 한다.

태오 그럼 압력은 기체 분자 수가 바뀌어야 쓸 수 있는 거죠? 분자 1개가 2개로 쪼개지는 반응처럼요.

석 교수 그렇다. 부피와 온도가 일정한 용기에서 압력은 기체 몰수에 비례하니, 몰수가 바뀌는 반응이면 압력이 바뀐다. 반대로 $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightarrow 2\text{HI}$ 처럼 반응 전후 기체 몰수가 같으면 압력으로는 진행을 알 수 없다. 측정 방법을 고를 때는 ‘이 반응에서 무엇이 바뀌나’를 먼저 묻는 것이다.

석 교수 두 장치 모두 반응이 진행되는 동안 반응을 멈추지 않고 계속 읽을 수 있다는 점이 좋다. 다만 하나 조심할 점이 있다. 기체 부피는 온도와 압력에 따라 달라지니, 비교하려면 온도와 압력이 같아야 한다. 그래서 시험 문제는 꼭 “발생한 기체의 온도와 압력은 일정하다”는 단서를 붙인다.

2.2 평균 속도: 구간의 기울기

석 교수 이제 실제 시험 자료를 보자. 2022학년도 연세대 제시문은 25 °C에서 마그네슘을 충분한 양의 묽은 염산에 넣고 수소 부피를 15초마다 쟈 표를 주었다. 0, 15, 30, 45, 60, 75 초에 수소 부피가 0, 20, 36, 43, 46, 47 mL였다. **그림 9**가 그 점들을 찍은 그래프다.

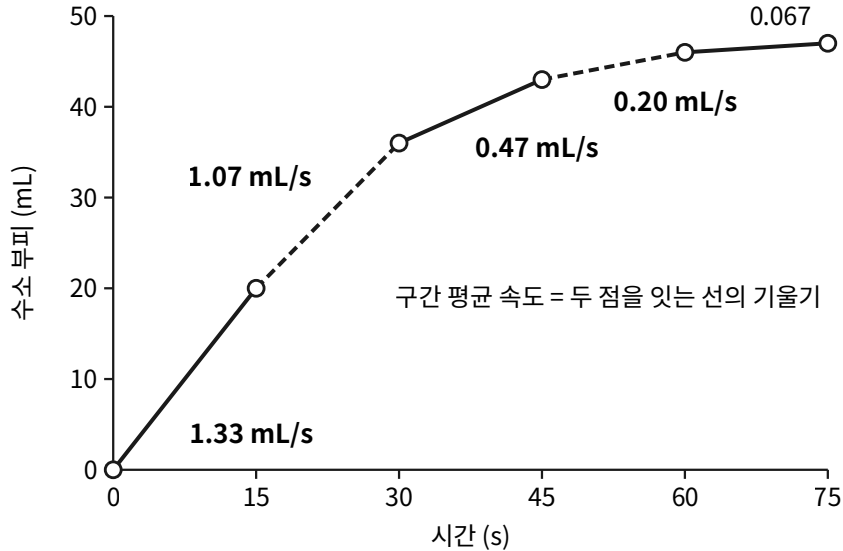


그림 9. 마그네슘과 묽은 염산에서 발생한 수소의 부피(2022학년도 연세대 제시문의 자료) — 15초 구간마다 두 점을 잇는 직선(할선)의 기울기가 그 구간의 평균 반응 속도이며, 1.33 → 1.07 → 0.47 → 0.20 mL/s로 줄어든다

하린 처음에는 가파르게 오르다가 나중에는 거의 평평해요.

석 교수 그래서 구간마다 기울기를 구한다. 평균 반응 속도는 (구간 끝 부피 - 구간 처음 부피) ÷ (구간 시간)이다. 0~15초 구간부터 해 보자.

$$\text{평균 속도} = \Delta V / \Delta t = (V_2 - V_1) / (t_2 - t_1)$$

하린 $(20 - 0) \div (15 - 0) = 1.33 \text{ mL/s}$ 예요.

태오 15~30초는 $(36 - 20) \div 15 = 1.07 \text{ mL/s}$, 30~45초는 $(43 - 36) \div 15 = 0.47 \text{ mL/s}$, 45~60초는 $(46 - 43) \div 15 = 0.20 \text{ mL/s}$ 요.

석 교수 모두 맞다. **표 6**에 정리했다. 마지막 60~75초도 넣어 두었다.

표 6. 구간별 평균 반응 속도 — 마그네슘과 묽은 염산의 수소 발생(2022학년도 연세대 제시문의 [표 1] 자료로 계산)

구간 (s)	처음 부피 (mL)	끝 부피 (mL)	늘어난 부피 (mL)	평균 속도 (mL/s)
0-15	0	20	20	1.33
15-30	20	36	16	1.07
30-45	36	43	7	0.47
45-60	43	46	3	0.20
60-75	46	47	1	0.067

이모 1.33에서 0.067까지, 스무 배쯤 줄었네요.

- 태오** 저는 처음에 15~30초 구간을 $36 \div 30 = 1.2$ 로 계산했어요. 0초부터 30초까지 모인 부피를 30초로 나눈 거죠.
- 석 교수** 그건 0~30초 전체의 평균 속도다. 계산 자체는 틀리지 않았지만 문제가 묻는 ‘15~30초 구간’의 평균은 아니야. 누적값을 누적 시간으로 나누면 앞 구간의 빠른 속도가 섞여 들어가 실제보다 크게 나온다. 눈속 채점에서도 이 혼동이 자주 감점된다. 구간 평균은 반드시 그 구간의 변화량을 그 구간의 시간으로 나눈다.
- 하린** mL/s를 1장에서 배운 몰로 바꿀 수도 있어요?
- 석 교수** 해 보자. 0~15초 동안 매초 1.33 mL, 곧 1.33×10^{-3} L씩 생겼다. 25 °C·1기압에서 기체 1몰이 24.5 L이니?
- 하린** $1.33 \times 10^{-3} \div 24.5 = 5.4 \times 10^{-5}$ mol/s요.
- 석 교수** 맞다. 그리고 전체 47 mL는 $47 \div 24,500 = 1.92 \times 10^{-3}$ mol이다. 반응식에서 Mg 1몰이 H₂ 1몰을 내니 마그네슘 1.92×10^{-3} mol, 곧 $1.92 \times 10^{-3} \times 24 = 0.046$ g이 모두 반응했다는 뜻이다. 염산이 충분했으니 마그네슘이 다 녹으면 반응이 끝난다.

문제 2.1

2022학년도 연세대 제시문의 수소 부피 자료(0, 15, 30, 45, 60초에 0, 20, 36, 43, 46 mL)로 0~15초, 15~30초, 30~45초, 45~60초 구간의 평균 반응 속도를 구하고, 그 변화 경향을 한 문장으로 쓰라. (단, 기체의 온도와 압력은 일정하다.)

- 하린** 아까 표대로 1.33, 1.07, 0.47, 0.20 mL/s예요.
- 태오** 경향은 “시간이 지날수록 평균 반응 속도가 줄어든다”요.
- 석 교수** 정답이다. 정답: 1.33 mL/s, 1.07 mL/s, 0.47 mL/s, 0.20 mL/s이며, 시간이 지날수록 구간 평균 속도가 점점 작아진다. 실제 시험은 여기에 ‘그 이유’와 ‘같은 이유로 설명되는 생활 예’를 더 물었다. 이유는 이 장 끝에서 정리하자.
- 하린** 그래프를 그리라는 문제도 있었죠? 그래프는 어떻게 그려야 점수를 받아요?
- 석 교수** 네 가지를 챙기면 된다. 첫째, 가로축에 시간(s), 세로축에 수소 부피(mL)를 단위와 함께 쓴다. 둘째, 눈금을 같은 간격으로 매기고 표의 점 여섯 개를 정확히 찍는다. 셋째, 점들을 꺾은선이 아니라 매끄러운 곡선으로 잇는다. 반응은 15초마다 갑자기 꺾이는 것이 아니라 연속으로 진행하기 때문이다. 넷째, 처음에 가파르고 점점 완만해져 47 mL 근처에서 수평에 가까워지는 모양이 드러나야 한다.
- 태오** 원점에서 출발하는 것도요. 0초에 0 mL니까요.
- 석 교수** 좋다. 그리고 곡선이 47 mL를 넘어 다시 올라가거나, 중간에 내려가게 그리면 안 된다. 모인 기체는 줄어들지 않으니 이 곡선은 계속 오르거나 평평해질 뿐이다. 그래프 하나에도 화학의 논리가 들어 있어야 한다.

2.3 순간 속도: 접선의 기울기

- 이모** 평균 속도는 구간마다 다르잖아요. 그럼 ‘딱 15초일 때’의 속도는 어떻게 말해요?
- 석 교수** 구간을 점점 좁히면 된다. 15~30초 대신 15~20초, 15~16초, 15~15.1초... 이렇게 줄이면 할선이 곡선에 점점 붙어 결국 그 점에서 곡선을 스치는 직선, 곧 **접선**이 된다. 접선의 기울기가 그 순간의 반응 속도, **순간 속도**다.

하린 자동차 계기판의 속력이 순간 속력이고, 서울에서 부산까지 걸린 시간으로 나눈 게 평균 속력인 거랑 같네요.

석 교수 정확한 비유다. **그림 10**는 같은 자료의 점들을 매끄러운 곡선으로 이은 뒤, 0초·15초·30초에서 접선을 그은 것이다.

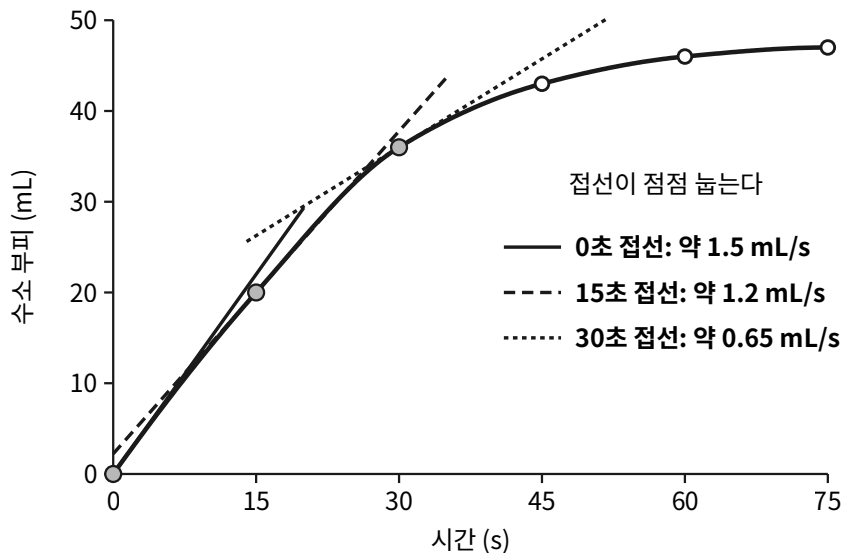


그림 10. 순간 반응 속도 — 수소 부피 자료(점)를 매끄러운 곡선으로 잇고 0·15·30초에서 그은 접선. 접선의 기울기 (약 1.5 → 1.2 → 0.65 mL/s)가 그 순간의 반응 속도이며, 처음 순간이 가장 크다(곡선은 자료점을 지나는 보간 곡선으로 계산)

태오 기울기가 1.5, 1.2, 0.65 mL/s로 줄어드네요. 그리고 0초의 접선이 제일 가팔라요.

석 교수 반응을 시작하는 순간의 속도를 **초기 속도**라고 한다. 반응물이 가장 많을 때이니 보통 가장 크다. 5장의 초기 속도법은 이 값을 쓴다.

이모 그런데 1.5라는 값은 표에 없잖아요. 어디서 나왔어요?

석 교수 자료점 여섯 개를 지나는 매끄러운 곡선을 계산으로 만들고, 그 곡선의 기울기를 구한 값이다. 그래서 ‘약’을 붙였다. 시험 답안에서 순간 속도를 물으면 보통 그래프에 접선을 직접 그어 두 점을 읽고 기울기를 계산한다. 눈으로 그은 접선이니 답에 어느 정도 폭이 있는 것은 자연스럽다.

태오 접선을 손으로 긋는 요령이 있어요?

석 교수 자를 곡선의 그 점에 대고, 자의 양쪽이 곡선과 같은 간격으로 떨어지도록 돌려 맞춘다. 한쪽으로만 곡선을 가르면 아직 접선이 아니다. 그다음 접선 위에서 멀리 떨어진 두 점을 골라 좌표를 읽어야 오차가 작다. 예를 들어 15초 접선이 (0초, 2 mL)와 (30초, 38 mL)를 지난다고 읽었다면 기울기는 $(38 - 2) \div 30 = 1.2$ mL/s다.

하린 가까운 두 점을 고르면요?

석 교수 눈금 한 칸만 잘못 읽어도 기울기가 크게 흔들린다. 15.0초와 15.5초처럼 가까운 두 점을 골랐는데 부피를 0.5 mL만 잘못 읽어도 기울기가 1 mL/s나 틀려진다. 멀리 떨어진 두 점을 고르는 것이 측정의 기본이다.

하린 평균 속도와 순간 속도는 어떤 관계예요?

석 교수 0~15초 평균 1.33은 0초 순간 속도 1.5와 15초 순간 속도 1.2 사이에 있다. 곡선이 매끄럽게 휘어 있으면 한 구간의 평균 속도는 양 끝 순간 속도 사이의 값이 된다. 검산에 쓸 만한 성질이다.

2.4 왜 점점 느려지나

석 교수 이제 가장 중요한 질문이다. 왜 속도가 줄어들까?

태오 반응물이 줄어서요. 마그네슘이 녹아 없어지니까요.

석 교수 조금 더 정확히 말해 보자. 이 실험에서 염산은 충분했고 마그네슘이 한계 반응물이었다. 마그네슘은 고체라서 농도라는 말이 잘 맞지 않아. 반응은 마그네슘 표면에서 일어나는데, 마그네슘이 녹을수록 리본이 가늘어지고 짧아져 산과 맞닿는 표면이 줄어든다. 그러면 1초 동안 표면에서 일어나는 충돌의 횟수가 줄어 반응 속도가 작아진다.

하린 염산은 충분하니까 거의 그대로고요?

석 교수 충분하다고 했으니 크게 줄지는 않지만 H^+ 도 조금씩 쓰이니 약간은 줄어든다. 두 효과 모두 ‘만나는 횟수’를 줄이는 쪽이다. 이 생각을 8장에서 충돌 이론으로 정리한다.

태오 그런데 이 반응은 열이 나잖아요. 용액이 따뜻해지면 오히려 빨라져야 하지 않아요?

석 교수 날카로운 지적이다. 마그네슘과 염산의 반응은 발열 반응이라 용액 온도가 조금 오른다. 온도가 오르면 빨라지는 효과가 있지만, 이 실험처럼 묽은 용액에 적은 양의 마그네슘을 넣으면 온도 변화가 작아 반응물 감소의 효과가 훨씬 크다. 그래서 시험은 25 °C처럼 온도를 정해 두고 다른 요인을 묻는다. 반응하려면 입자끼리 만나야 하고, 만나는 횟수는 농도나 표면적에 비례한다는 것이다.

이모 발포 비타민도 같은 이유겠네요. 알약이 녹아 작아지니 거품이 줄고요.

석 교수 그렇습니다. 반대로 같은 이유로 설명되는 생활 예를 들어 볼까? 반응물을 더 많이 공급하면 빨라지는 경우다.

태오 숯불에 부채질하면 산소가 많이 공급돼서 불이 세져요.

석 교수 좋다. 그 시험의 공식 해설도 산소를 많이 넣어 주는 고압 산소 치료와 숯불의 예를 들었다. ‘반응물이 많으면 충돌이 잦아 빠르고, 적어지면 느리다’는 같은 원리를 반대 방향에서 본 예들이다.

태오 그 시험의 다음 문제는 염산 대신 같은 농도의 아세트산에 마그네슘을 넣는 거였어요.

석 교수 그 문제는 산·염기 단원에서 자세히 다루지만 속도 쪽 결론만 말하면 이렇다. 0.10 M 염산과 0.10 M 아세트산에 같은 양의 마그네슘을 넣으면, 산의 몰수가 같으니 마지막에 생기는 수소의 양은 같다. 그런데 염산은 거의 다 이온화해 H^+ 농도가 0.10 M이고, 아세트산은 약산이라 H^+ 가 그보다 훨씬 적다. 마그네슘 표면에 부딪치는 H^+ 가 적으니 아세트산 쪽이 훨씬 느리다.

하린 마지막 양은 같은데 빠르기만 다르니까, 1장에서 말한 ‘얼마나 많이’와 ‘얼마나 빨리’가 또 나왔네요.

석 교수 이 단원에서는 이 구분이 거의 모든 문제에 숨어 있다.

이모 표의 마지막에서 46 mL, 47 mL로 거의 안 늘어나는 건 반응이 끝나 간다는 뜻이죠?

석 교수 그렇다. 기울기가 0에 가까워지면 반응이 거의 끝난 것이다. 그래프가 수평이 되는 높이가 최종 생성량이고, 그 높이는 한계 반응물의 양이 정한다. 기울기는 ‘얼마나 빨리’를, 수평선의 높이는 ‘얼마나 많이’를 보여 준다. 한 그래프에 두 질문의 답이 함께 들어 있는 셈이지.

문제 2.2

같은 농도·같은 부피의 묽은 염산이 든 플라스크 A와 B에 탄산 칼슘 5 g씩을 넣었다. A에는 큰 조각, B에는 작은 조각을 넣었다. 빠져나간 이산화 탄소의 질량은 1분에 A 0.40 g, B 0.85 g, 2분에 A 0.58 g, B 1.31 g이었다(2008학년도 경희대 제시문 자료의 일부). (1) B의 0~1분, 1~2분 평균 속도를 g/min으로 구하라. (2) B의 0~1분 평균 속도를 CO₂의 mol/min으로 바꾸어라(CO₂ = 44). (3) B가 A보다 빠른 까닭을 쓰라.

하린 (1) 0~1분은 $(0.85 - 0) \div 1 = 0.85 \text{ g/min}$, 1~2분은 $(1.31 - 0.85) \div 1 = 0.46 \text{ g/min}$ 이에요.

태오 (2)는 $0.85 \div 44 = 0.019 \text{ mol/min}$ 이요. $1.9 \times 10^{-2} \text{ mol/min}$.

석 교수 둘 다 맞다. (3)은?

이모 작은 조각이 표면적이 더 넓어서요. 염산이 닿는 면이 많으니까요.

석 교수 정답이다. 정답: (1) 0.85 g/min, 0.46 g/min, (2) $1.9 \times 10^{-2} \text{ mol/min}$, (3) 같은 질량이라도 작은 조각은 표면적이 넓어 염산과 탄산 칼슘 입자가 만나는(충돌하는) 횟수가 많기 때문이다. 같은 계산으로 A는 0.40 g/min, 0.18 g/min이다. 이 자료에서는 결국 A와 B 모두 1.60 g에서 멈추는데, 그 까닭은 8장에서 다진다. 표면적은 빠르기를 바꿀 뿐 마지막 양을 바꾸지 않는다는 1장의 구분이 여기서 다시 나온다.

핵심 표 자료에서 반응 속도를 구하는 다섯 단계

1. 무엇을 했는지(기체 부피·질량 감소·농도)와 단위를 확인하고, 온도·압력이 일정하다는 조건을 본다.
2. 시간-양 그래프를 그린다. 가로축 시간, 세로축 측정량, 점을 찍고 매끄럽게 잇는다.
3. 구간 평균 속도 = 그 구간의 변화량 ÷ 그 구간의 시간. 누적값을 누적 시간으로 나누지 않는다.
4. 순간 속도는 접선의 기울기, 처음 순간이 보통 가장 크다. 평균 속도는 양 끝 순간 속도 사이에 있다.
5. 속도가 줄어드는 까닭은 반응물(농도·표면적)이 줄어 충돌 횟수가 줄기 때문이라고 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 어떤 반응에서 생긴 기체의 부피가 0, 10, 20초에 0, 30, 50 mL였다. 0~10초와 10~20초의 평균 속도를 구하라.
2. 위 자료에서 0~20초 전체의 평균 속도를 구하고, 10~20초 구간 평균과 다른 까닭을 쓰라.
3. 4 mL/s를 25 °C·1기압에서 mol/s로 바꾸어라(기체 1몰 = 24.5 L).
4. 전자저울로 반응 속도를 잴 때 플라스크 입구를 마개로 꼭 막으면 안 되는 까닭을 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 구간 평균 속도는 4부의 여러 기출이 그대로 묻는다. **기출문제 3**(연세대 2022) (222쪽)는 바로 이 장의 수소 부피 표로 그래프를 그리고 네 구간의 평균 속도를 구한 뒤, 감소하는 이유와 생활 속 예를 쓰게 한다. 표 계산, 이유(반응물 감소로 충돌 감소), 생활 예의 세 단계가 이 장의 순서와 같다. **기출문제 14**(경희대 2008) (326쪽)는 큰 조각과 작은 조각의 탄산 칼슘에서 빠져나간 이산화 탄소 질량 표를 분석하게 하며, 문제 2.2의 평균 속도 계산에 더해 마지막 질량이 같은 까닭까지 설명해야 한다. **기출문제 9**(부산대 2015) (277쪽)는 기체의 압력과 산소 생성 속도가 담긴 표를 주고 같은 기울기 생각을 계수비와 함께 쓰게 하는데, 그 연결은 3장에서 마저 익힌다. 세 문항 모두 그래프의 기울기를 읽는 눈이 출발점이므로, 답안을 쓰기 전에 표를 그래프로 바꿔 보는 습관을 들이자.

이 장의 참고문헌

연세대학교 입학처. (2021). 2022학년도 수시모집 논술시험 자연계열(화학) 문제와 문항카드 [시험 자료].

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

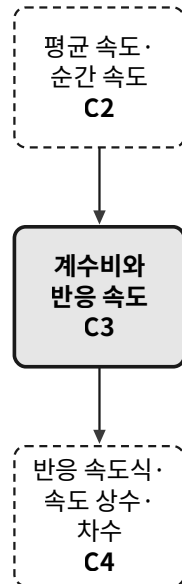
Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2018). Atkins' physical chemistry (11th ed.). Oxford University Press.

제 3장 계수로 맞추는 속도: 어느 물질로 재도 하나

새 개념 물질별 변화 속도 · 계수로 나눈 반응 속도 · 압력으로 재는 속도

이어짐 속도식 4장 · 1차 반응 6장 · 2부 C3

이 장의 개념도



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

그림 11. 제 3장에서 배우는 개념(C3 계수비와 반응 속도)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 9 (부산대 2015년) (277쪽)	N ₂ O ₅ 분해: 반감기·생성 속도·단열 용기	C3 계수비와 반응 속도

자동차 에어백

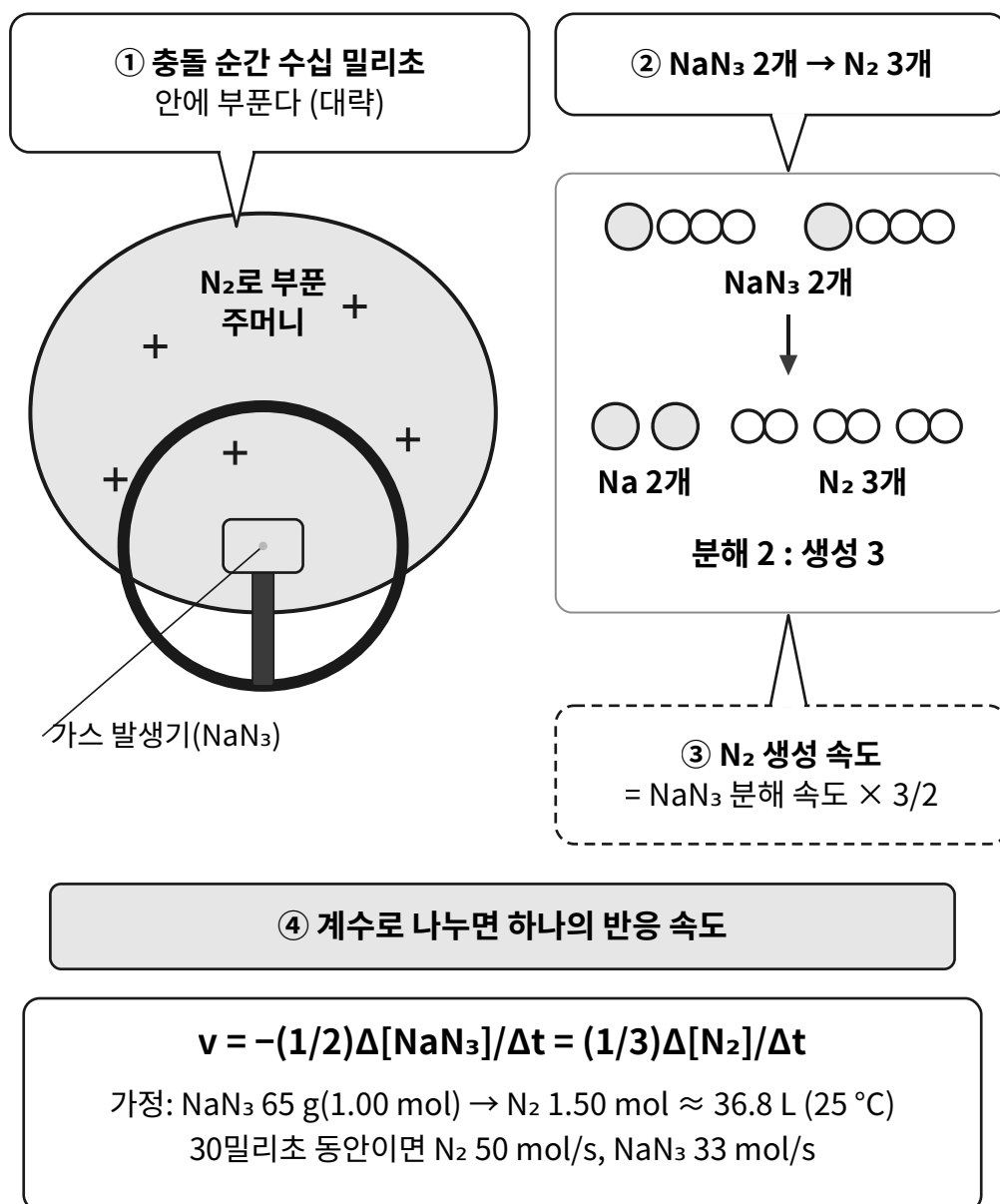
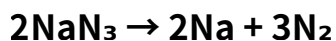


그림 12. 자동차 에어백 — 충돌을 감지하면 아자이드화 나트륨(NaN_3)이 순식간에 분해되어 질소 기체로 주머니를 부풀린다. NaN_3 2개가 깨질 때 N_2 3개가 생기므로 N_2 생성 속도는 NaN_3 분해 속도의 3/2배다(시간은 대략의 크기, 모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 물질마다 변화 속도는 계수에 비례한다.
2. 계수로 나누면 하나의 반응 속도가 된다.
3. 기체 반응은 압력 변화로도 속도를 잰다.

이 장의 출발점

- 2장의 평균 속도: 구간 변화량 ÷ 구간 시간, 반응물에는 마이너스 부호.
- 반응식의 계수는 반응하는 몰수의 비다($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 에서 H_2 2몰과 O_2 1몰이 반응).
- 부피와 온도가 일정한 용기에서 기체의 압력은 몰수에 비례한다($PV = nRT$).

태오가 자동차 학원 이론 교재를 들고 왔다. 안전장치 단원에 에어백 사진이 실려 있었다. 충돌하는 순간 운전대에서 하얀 주머니가 터져 나와 운전자의 얼굴을 받치는 장면이었다.

태오 교수님, 에어백은 충돌하고 나서 눈 깜짝할 새에 부풀다던데, 이것도 화학 반응이죠?

석 교수 그렇다. 여러 방식이 있지만 교과서에 자주 나오는 것은 아자이드화 나트륨, NaN_3 가 분해되는 반응이다. 충돌 센서가 신호를 보내면 전기 점화 장치가 NaN_3 를 가열하고, $2\text{NaN}_3 \rightarrow 2\text{Na} + 3\text{N}_2$ 반응이 일어나 질소 기체가 주머니를 채운다. 수십 밀리초, 그러니까 0.03초 남짓이면 다 부풀다고 알려져 있다.

하린 그럼 반응 속도를 NaN_3 로 재야 해요, 질소로 재야 해요?

석 교수 오늘 질문이 바로 그거다. NaN_3 2개가 깨질 때 N_2 가 3개 생긴다. 같은 시간 동안 NaN_3 가 2몰 줄면 N_2 는 3몰 늘지. 무엇으로 재느냐에 따라 숫자가 달라진다.

이모 그럼 반응 속도가 두 개라는 거예요? 헷갈리겠네요.

석 교수 그래서 약속을 하나 한다. 각 물질의 변화 속도를 계수로 나누어 하나의 값으로 맞추는 것이다. 이 장이 끝나면 어느 물질로 재든 같은 ‘반응 속도’ 하나를 말할 수 있게 된다.

3.1 물질마다 다른 변화량

석 교수 오산화 이질소, N_2O_5 라는 기체가 있다. 데우면 이산화 질소와 산소로 분해된다. 반응식은 $2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$ 다. 1921년 대니얼스와 존스톤이 이 반응의 빠르기를 압력으로 정밀하게 재서 유명해진 반응이기도 하다.

하린 NO_2 는 갈색 기체라고 배웠어요.

석 교수 맞다. 그래서 색으로도 진행을 볼 수 있다. **그림 13**는 $[\text{N}_2\text{O}_5]$ 가 0.020 M에서 출발할 때 세 물질의 농도가 시간에 따라 어떻게 바뀌는지 계산한 그래프다.

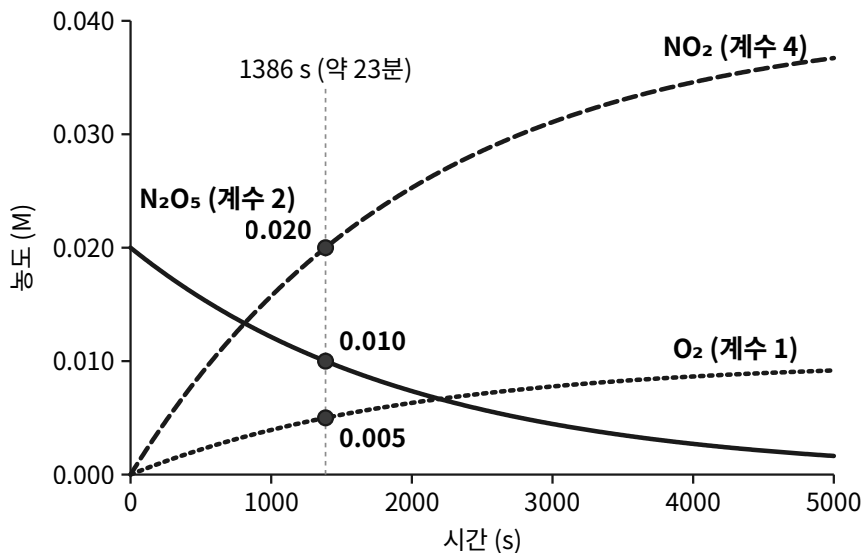


그림 13. $2N_2O_5 \rightarrow 4NO_2 + O_2$ 에서 세 물질의 농도 변화 — $[N_2O_5]_0 = 0.020\text{ M}$ 에서 N_2O_5 가 0.010 M 줄 때 NO_2 는 0.020 M , O_2 는 0.005 M 이다. 같은 시간 동안의 변화량이 계수비 $2 : 4 : 1$ 과 같다(N_2O_5 가 1차로 분해된다고 보고 $k = 5.0 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 로 계산한 가상 자료)

태오 23분쯤에서 N_2O_5 가 0.020 에서 0.010 M 으로 절반이 됐어요. 그때 NO_2 는 0.020 M , O_2 는 0.005 M 이고요.

석 교수 변화량을 나란히 써 보자. N_2O_5 는 0.010 M 줄고, NO_2 는 0.020 M , O_2 는 0.005 M 늘었다. 비는?

태오 $0.010 : 0.020 : 0.005$, 곧 $2 : 4 : 1$ 이에요. 반응식 계수랑 똑같아요.

석 교수 언제 재도 그렇다. 반응식의 계수는 반응하는 몰수의 비이고, 같은 부피의 용기 안에서 농도 변화의 비도 계수비와 같다. 그러니 NO_2 는 N_2O_5 가 줄어드는 빠르기의 두 배로 늘고, O_2 는 절반의 빠르기로 늘다.

이모 그럼 세 곡선 가운데 NO_2 가 가장 가파르게 올라가겠네요. 줄어드는 N_2O_5 보다도 빨리요.

석 교수 그래프에서도 NO_2 곡선이 가장 높고, 가장 가파르게 오른다. 그런데 이 셋이 서로 다른 반응 셋이 아니라 한 반응의 세 얼굴이라는 걸 놓치면 안 된다.

하린 그럼 갈색이 진해지는 빠르기로 재도 되겠네요. NO_2 만 색이 있으니까요.

석 교수 그렇다. 색의 진하기로 $[NO_2]$ 를 재면, 그 변화 속도를 2로 나눠 N_2O_5 가 줄어드는 속도를 알 수 있다. 하나만 재도 나머지 둘을 계산으로 되찾을 수 있다는 것, 이것이 계수비의 힘이다. 실험하는 사람은 가장 재기 쉬운 물질 하나를 골라 재면 된다.

태오 2장에서 마그네슘 반응을 수소 부피로 잰 것도 같은 생각이네요. 수소 1몰이 생기면 마그네슘 1몰이 녹았으니까요.

석 교수 바로 그렇다. 그때는 계수가 모두 1이라 따로 나눌 필요가 없었을 뿐이다. 탄산 칼슘 실험에서 이산화 탄소 1몰이 빠져나가면 염산은 2몰이 쓰였다는 것도 같은 계산이다.

3.2 계수로 나누면 하나의 속도

석 교수 이제 약속을 정하자. 반응 $aA + bB \rightarrow cC + dD$ 의 반응 속도는 각 물질의 변화 속도를 그 계수로 나눈 값이다. 반응물은 줄어드니 마이너스를 붙인다.

$$v = -(1/a) \cdot \Delta[A]/\Delta t = -(1/b) \cdot \Delta[B]/\Delta t = (1/c) \cdot \Delta[C]/\Delta t = (1/d) \cdot \Delta[D]/\Delta t$$

하린 $2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$ 에 넣으면 $v = -(1/2)\Delta[\text{N}_2\text{O}_5]/\Delta t = (1/4)\Delta[\text{NO}_2]/\Delta t = \Delta[\text{O}_2]/\Delta t$ 네요.

석 교수 그렇다. 아까 23분 동안의 변화량으로 확인해 볼까? 시간은 같으니 변화량만 계수로 나눠 보면 된다.

하린 N_2O_5 는 $0.010 \div 2 = 0.0050$, NO_2 는 $0.020 \div 4 = 0.0050$, O_2 는 $0.005 \div 1 = 0.0050$. 세 값이 같아요!

석 교수 이것이 계수로 나누는 이유다. 반응식 한 묶음, 곧 ‘ N_2O_5 2개가 NO_2 4개와 O_2 1개로 바뀌는 사건’이 1초에 몇 번(몇 몰) 일어나는지를 세는 것이 반응 속도다. 어느 물질로 세어도 그 횟수는 같지.

태오 그런데 시험에서는 그냥 ‘ NO_2 의 생성 속도’를 물을 때도 있던데요.

석 교수 그때는 계수로 나누지 않은, NO_2 자체의 변화 속도를 답하면 된다. 그래서 문제를 읽을 때 ‘반응 속도’를 묻는지 ‘ O_2 의 생성(소비) 속도’를 묻는지 꼭 가려야 한다. 단위는 둘 다 M/s지만 값이 다르다.

이모 숫자 하나로 정리하면 기억하기 쉽겠네요. 반응 속도가 1이면 N_2O_5 는 2로 줄고, NO_2 는 4로, O_2 는 1로 는다.

석 교수 아주 좋은 정리다. 반응 속도 v 에 계수를 곱하면 그 물질의 변화 속도가 된다. 나누면 반응 속도, 곱하면 물질별 속도다.

태오 처음 순간으로 계산해 봐도 되나요? 그래프를 만든 k 로요.

석 교수 해 보자. 처음 0.020 M 일 때 N_2O_5 가 줄어드는 속도는 $k \times [\text{N}_2\text{O}_5] = 5.0 \times 10^{-4} \times 0.020 = 1.0 \times 10^{-5} \text{ M/s}$ 다. 이 식은 6장에서 배우니 지금은 받아들이기만 하자.

태오 그럼 반응 속도는 그 절반인 $5.0 \times 10^{-6} \text{ M/s}$, NO_2 생성 속도는 두 배인 $2.0 \times 10^{-5} \text{ M/s}$, O_2 생성 속도는 반응 속도와 같은 $5.0 \times 10^{-6} \text{ M/s}$ 요.

석 교수 정확하다. 계수 1인 물질의 변화 속도가 곧 반응 속도라는 점도 기억해 두면 편하다.

문제 3.1

$2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$ 반응에서 어느 순간 N_2O_5 의 소비 속도가 $4.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 였다. 이 순간 NO_2 와 O_2 의 생성 속도, 그리고 반응 속도를 구하라.

태오 NO_2 는 계수가 4, N_2O_5 는 2니까 $4.0 \times 10^{-4} \times 4/2 = 8.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 요.

하린 O_2 는 계수 1이니까 $4.0 \times 10^{-4} \times 1/2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 예요.

석 교수 반응 속도는?

태오 음... $4.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 아니예요? N_2O_5 로 잰으니까요.

석 교수 그건 N_2O_5 의 소비 속도다. 반응 속도는 계수로 나눈다고 했지.

태오 아, $4.0 \times 10^{-4} \div 2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 요. O_2 생성 속도와 같네요.

석 교수 정답이다. 정답: NO_2 생성 $8.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$, O_2 생성 $2.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$, 반응 속도 $2.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$. 검산은 세 물질의 속도를 각 계수로 나누어 모두 2.0×10^{-4} 가 나오는지 보면 된다. $8.0 \times 10^{-4} \div 4$, $4.0 \times 10^{-4} \div 2$, $2.0 \times 10^{-4} \div 1$ 이 모두 같다.

- 이모** 혹시 부호를 빠뜨리면 어떻게 돼요? N_2O_5 의 $\Delta[\text{N}_2\text{O}_5]/\Delta t$ 를 그대로 쓰면 음수가 나오잖아요.
- 석 교수** 그러면 반응 속도가 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 처럼 음수로 나온다. 반응 속도가 음수라는 말은 반응이 거꾸로 간다는 뜻처럼 읽어서 채점자가 개념을 의심한다. 반응물의 농도 변화는 음수이고, 거기에 마이너스를 붙여 양수 속도로 만든다는 약속을 답안에 그대로 보여 주는 것이 좋다. “ N_2O_5 의 농도는 $4.0 \times 10^{-4} \text{ M/s}$ 로 감소한다”처럼 ‘감소’라는 말을 써도 된다.
- 하린** 소비 속도라고 하면 이미 줄어드는 걸 뜻하니까 양수로 쓰면 되는 거죠?
- 석 교수** 그렇다. ‘소비 속도’, ‘감소 속도’, ‘생성 속도’라는 말에는 방향이 이미 들어 있으니 값은 양수로 쓴다.

3.3 기체는 압력으로 잰다

- 석 교수** 기체 반응은 시료를 꺼내 농도를 재기 어렵다. 그래서 밀폐 용기의 압력을 잰다. 부피와 온도가 일정하면 압력은 기체 몰수에 비례하니까, 압력이 바뀌면 몰수가 바뀐 것이다.
- 하린** 그런데 압력계는 전체 압력만 보여 주잖아요. N_2O_5 가 얼마 남았는지는 어떻게 알아요?
- 석 교수** 좋은 질문이다. 반응식으로 거꾸로 계산한다. 2015학년도 부산대 문항은 반응식을 $\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{NO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 로 썼다. 계수를 반으로 줄였을 뿐 같은 반응이다. 처음 압력을 P_0 라 하고, N_2O_5 가 분해된 비율을 x 라 하자.
- 태오** ICE 표처럼 쓰면 되겠네요. N_2O_5 는 P_0 에서 $P_0(1-x)$ 로, NO_2 는 0에서 $2P_0x$ 로, O_2 는 0에서 $\frac{1}{2}P_0x$ 로요.
- 석 교수** 맞다. 그러면 전체 압력은?
- 태오** $P_0(1-x) + 2P_0x + \frac{1}{2}P_0x = P_0(1+1.5x)$ 요.
- 전체 압력 $P = P_0(1+1.5x)$, $x = \text{N}_2\text{O}_5$ 의 분해 비율
- 석 교수** 분자 1개가 깨져 2.5개가 되니 전체 몰수가 1.5배만큼 더 는다. 그래서 다 분해되면($x=1$) 전체 압력은 $2.5P_0$ 가 된다. **그림 14**가 그 모습이다.

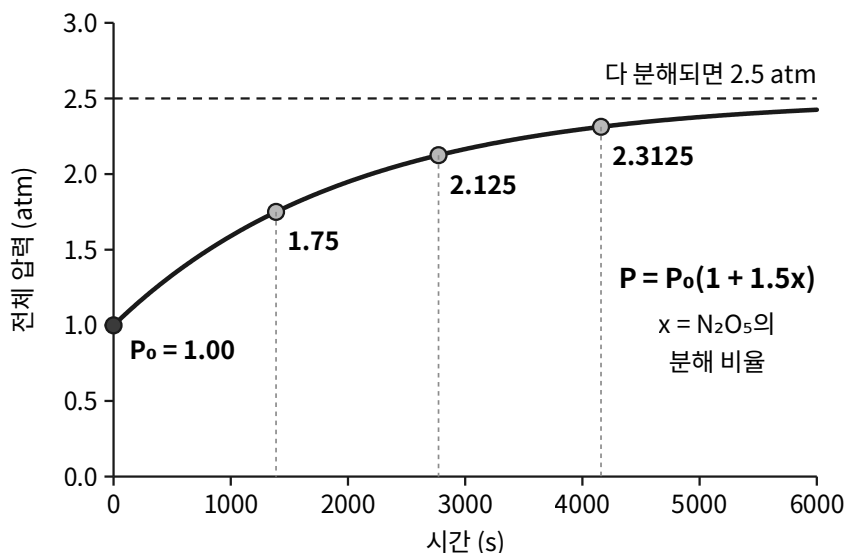


그림 14. $\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{NO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 의 전체 압력 변화 — 처음 압력 $P_0 = 1.00 \text{ atm}$ 이 반감기마다 1.75, 2.125, 2.3125 atm으로 오르며 2.5 atm(점선)에 다가간다. $P = P_0(1 + 1.5x)$ 로 분해 비율 x 를 되찾는다(1차 분해, $k = 5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 계산)

하린 압력이 줄지 않고 늘어나네요. 반응물이 줄어드는데요.

석 교수 반응물은 줄지만 기체 분자 수가 늘어나니 전체 압력은 오른다. 압력이 오르는 빠르기 $\Delta P/\Delta t$ 를 $1.5P_0$ 로 나누면 분해 비율의 빠르기가 나온다.

이모 압력으로 잔 속도를 농도로 바꿀 수도 있어요?

석 교수 이상 기체 방정식 $PV = nRT$ 에서 $n/V = P/RT$ 이니, 분압을 RT 로 나누면 몰 농도가 된다. 부산대 문항은 400 K, 1 L 강철 용기에 N_2O_5 1/500 mol, 곧 0.0020 mol을 넣었다. 처음 압력을 계산해 볼까?

태오 $P_0 = nRT/V = 0.0020 \times 0.082 \times 400 \div 1 = 0.066 \text{ atm}$ 이에요. 농도는 0.0020 M이고요.

석 교수 맞다. ‘강철 용기’라는 말은 부피가 변하지 않는다는 뜻이고, 온도도 일정하다고 해야 압력이 몰수에만 비례한다. 온도가 바뀌면 압력이 반응과 상관없이 바뀌어 버리니, 압력으로 속도를 재는 문제에서는 이 두 조건을 꼭 확인해야 한다.

석 교수 부산대 문항의 표를 이 식으로 다시 꾸민 것이 표 8이다. 시간을 반감기의 배수로 썼다.

표 8. $\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{NO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 의 분압과 전체 압력(처음 압력 P_0) — 2015학년도 부산대 문항의 표를 분압으로 다시 꾸밈

시간	N_2O_5 분압	NO_2 분압	O_2 분압	전체 압력
0	P_0	0	0	P_0
반감기 1번	$\frac{1}{2}P_0$	P_0	$\frac{1}{4}P_0$	$\frac{7}{4}P_0$
반감기 2번	$\frac{1}{4}P_0$	$\frac{3}{2}P_0$	$\frac{3}{8}P_0$	$\frac{17}{8}P_0$
반감기 3번	$\frac{1}{8}P_0$	$\frac{7}{4}P_0$	$\frac{7}{16}P_0$	$\frac{37}{16}P_0$

태오 반감기 1번이면 $x = \frac{1}{2}$ 이니까 $1 + 1.5 \times \frac{1}{2} = 1.75$. 2번이면 $x = \frac{3}{4}$ 이라 $1 + 1.125 = 2.125$. 3번이면 $x = \frac{7}{8}$ 이라 $1 + 1.3125 = 2.3125$. 표와 다 맞아요.

- 이모** 반감기는 아직 안 배웠는데요?
- 석 교수** 6장에서 배운다. 지금은 ‘일정한 시간마다 남은 N_2O_5 가 절반씩 된다’는 뜻으로만 알면 된다. 이 표에서 중요한 것은 전체 압력 하나만 재도 각 기체의 분압을 모두 되찾을 수 있다는 점이다.
- 하린** 분압 비도 계수비 그대로네요. 반감기 1번에서 줄어든 N_2O_5 $\frac{1}{2}P_0$: 생긴 NO_2 P_0 : 생긴 O_2 $\frac{1}{4}P_0 = 2 : 4 : 1$ 이요.
- 석 교수** 반응식을 $N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$ 로 쓰든 $2N_2O_5 \rightarrow 4NO_2 + O_2$ 로 쓰든 물질들 사이의 비는 같다. 다만 ‘반응 속도’의 값은 반응식을 어떻게 썼느냐에 따라 달라진다. 계수가 반이면 반응 속도는 두 배로 계산되지. 그래서 답안에는 반드시 기준이 된 반응식을 함께 써야 한다.

문제 3.2

(1) $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ 반응에서 NH_3 가 0.30 M/min의 속도로 생긴다. H_2 와 N_2 의 소비 속도를 구하라. (2) 강철 용기에서 $N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$ 반응이 일어난다. 처음 압력 1.00 atm이 일정한 온도에서 1.75 atm이 되었을 때 N_2O_5 의 분해 비율은 몇 %인가?

- 하린** (1) H_2 는 계수 3, NH_3 는 2니까 $0.30 \times 3/2 = 0.45$ M/min이에요. N_2 는 $0.30 \times 1/2 = 0.15$ M/min이고요.
- 태오** (2)는 $1.00 \times (1 + 1.5x) = 1.75$ 에서 $1.5x = 0.75$, $x = 0.50$. 50 %요.
- 석 교수** 둘 다 정답이다. 정답: (1) H_2 소비 0.45 M/min, N_2 소비 0.15 M/min(반응 속도는 0.15 M/min), (2) 50 %. (2)에서 혼한 실수는 늘어난 압력 0.75 atm을 그대로 분해된 N_2O_5 로 착각하는 것이다. 분해된 N_2O_5 1몰마다 압력이 1.5몰분 늘어나니 $0.75 \div 1.5 = 0.50$ atm이 분해된 양이다.
- 이모** 늘어난 압력은 ‘분해된 양’이 아니라 ‘분해된 양 $\times 1.5$ ’라는 거군요. 그럼 이때 NO_2 분압은 $2 \times 0.50 = 1.00$ atm, O_2 분압은 0.25 atm이겠네요.
- 석 교수** 그렇습니다. 반응 전후 기체 몰수가 얼마나 바뀌는지를 먼저 따지는 것이 압력 문제의 열쇠다.

3.4 정리: 부호·계수·단위

- 석 교수** 이 장의 내용은 세 낱말로 정리된다. 부호, 계수, 단위.
- 태오** 부호는 반응물에 마이너스를 붙여 속도를 양수로 만드는 것.
- 하린** 계수는 물질별 변화 속도를 계수로 나누면 하나의 반응 속도가 된다는 것.
- 이모** 단위는 M/s처럼 농도 나누기 시간, 압력으로 재면 atm/s처럼 쓰는 거고요.
- 석 교수** 셋 다 맞다. 계수로 나눈 하나의 반응 속도가 왜 중요한지는 4장에서 분명해진다. 4장에서는 반응 속도를 농도의 식, 곧 $v = k[A]^m$ 로 쓰는데, 왼쪽의 v 가 물질마다 다르면 식도 물질마다 따로 써야 한다. 계수로 나눈 v 하나로 맞춰 두어야 반응 하나에 속도식 하나, 속도 상수 하나가 대응한다. 하나 덧붙이면, 에어백처럼 기체를 만드는 장치를 설계할 때도 이 계산이 쓰인다. NaN_3 65 g은 1.00 mol이고, 다 분해되면 N_2 1.50 mol, 25 °C·1기압에서 $1.50 \times 24.5 = 36.8$ L가 생긴다. 이것이 30밀리초 동안 생긴다고 가정하면 평균 N_2 생성 속도는 $1.50 \div 0.030 = 50$ mol/s, NaN_3 분해 속도는 그 2/3인 33 mol/s다.

태오 실제 에어백은 남은 나트륨이 위험해서 다른 물질도 함께 넣는다고 들었어요.

석 교수 맞다. 나트륨은 물과 격렬하게 반응하니, 질산 칼륨과 이산화 규소 같은 물질을 함께 넣어 나트륨을 안정한 유리질 물질로 바꾼다. 계산에 쓴 65 g과 30밀리초는 설명을 위한 값이니 실제 제품의 수치와는 다를 수 있다.

이모 그렇게까지 빨라야 하는 이유가 있겠죠?

석 교수 시속 50 km로 달리던 차가 벽에 부딪치면, 사람의 몸은 안전띠에 묶여 있어도 0.1초 안 빠지면 운전대 쪽으로 쏠린다. 그보다 먼저 주머니가 다 부풀어 있어야 하니 반응이 수십 밀리초 안에 끝나야 한다. 반대로 너무 늦게 부풀면 오히려 얼굴을 친다. 여기서는 ‘얼마나 많이’, 곧 N_2 36.8 L도 중요하지만 ‘얼마나 빨리’가 생명을 지킨다.

하린 같은 양이라도 느리게 나오면 쓸모가 없는 거네요. 1장에서 배운 두 질문이 또 나와요.

석 교수 이 책 내내 그 두 질문이 함께 다닐 거다.

태오 다른 반응으로 한 번만 더 연습할게요. $2NO + 2H_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$ 에서 N_2 가 1.0×10^{-3} M/s로 생기면 NO는 2.0×10^{-3} M/s로 줄고, H_2O 는 2.0×10^{-3} M/s로 생기고, 반응 속도는 N_2 와 같은 1.0×10^{-3} M/s예요.

석 교수 깔끔하다. 이 반응은 4장의 속도식에서 다시 만난다.

핵심 물질별 속도와 반응 속도를 오가는 네 단계

1. 기준 반응식을 쓰고 계수를 확인한다(반응식을 반으로 줄이면 반응 속도 값이 바뀐다).
2. 반응 속도 $v = (\text{물질의 변화 속도}) \div (\text{그 물질의 계수})$. 반응물은 마이너스를 붙여 양수로.
3. 다른 물질의 속도 $= v \times \text{그 물질의 계수}$. 묻는 것이 ‘반응 속도’인지 ‘○○의 생성 속도’인지 가린다.
4. 기체 반응은 몰수 변화로 전체 압력식을 세운다($N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$; $P = P_0(1 + 1.5x)$). 늘어난 압력을 몰수 증가 계수로 나누어 반응한 양을 되찾는다.

스스로 풀어 보기

1. $2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$ 에서 O_2 가 3.0×10^{-3} M/s로 생긴다. H_2O_2 의 소비 속도와 반응 속도를 구하라.
2. $4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$ 에서 NH_3 소비 속도가 0.20 M/s일 때 H_2O 생성 속도를 구하라.
3. $N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$ 에서 처음 압력 0.80 atm이 1.40 atm이 되었다. N_2O_5 의 분해 비율과 이때의 NO_2 분압을 구하라.
4. 에어백에서 NaN_3 가 20 mol/s로 분해될 때 N_2 의 생성 속도를 구하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 계수비와 압력식은 4부 기출에서 계산의 첫 단계로 쓰인다. **기출문제 9**(부산대 2015) (277쪽)는 $N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$ 반응의 전체 압력과 O_2 생성 속도가 담긴 표를 주고, 특정 순간의 NO_2 생성 속도를 묻는다. O_2 생성 속도에 계수비 4를 곱하는 이 장의 방법과 6장의 반감기가 함께 쓰인다. **기출문제 2**(경희대 2023) (213쪽)은 $2NO + 2H_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$ 반응의 양적 관계와 속도식을 묻는데, 반응물 한 가지의 소비 속도로 다른 물질의 속도를 계산하는 감각이 4장의 속도식으로 이어진다. 두 문항 모

두 답안 첫 줄에 기준 반응식과 계수를 적어 두면, 어느 물질의 속도를 묻든 곱하고 나누는 방향을 헷갈리지 않는다.

이 장의 참고문헌

Daniels, F., & Johnston, E. H. (1921). The thermal decomposition of gaseous nitrogen pentoxide. A monomolecular reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 43(1), 53–71. <https://doi.org/10.1021/ja01434a007>

Madlung, A. (1996). The chemistry behind the air bag: High tech in first-year chemistry. *Journal of Chemical Education*, 73(4), 347. <https://doi.org/10.1021/ed073p347>

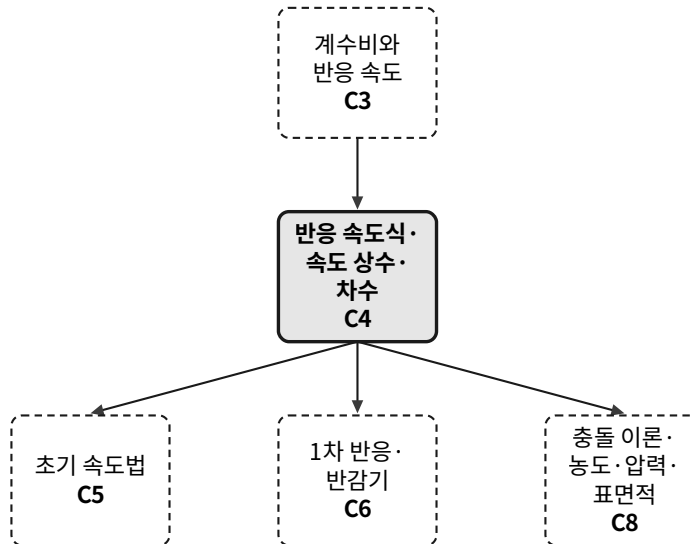
부산대학교 입학처. (2014). 2015학년도 수시모집 논술전형(AAT) 자연계 화학 문제와 모범답안 [시험 자료].

제 4장 농도가 속도를 정한다: 반응 속도식

새 개념 반응 속도식 · 속도 상수 k · 반응 차수 · k 의 단위

이어짐 초기 속도법 5장 · 1차 반응 6장 · 충돌 이론 8장

이 장의 개념도



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

그림 15. 제 4장에서 배우는 개념(C4 반응 속도식·속도 상수·차수)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 2024년) (202쪽)	2기압에서의 연소: 수면 높이와 속도· k · E_a	C4 반응 속도식·속도 상수·차수
기출 2 (경희대 2023년) (213쪽)	NO와 H ₂ : 결합 에너지와 속도식	C4 반응 속도식·속도 상수·차수

숯불에 부채질

산소 농도와 연소 속도

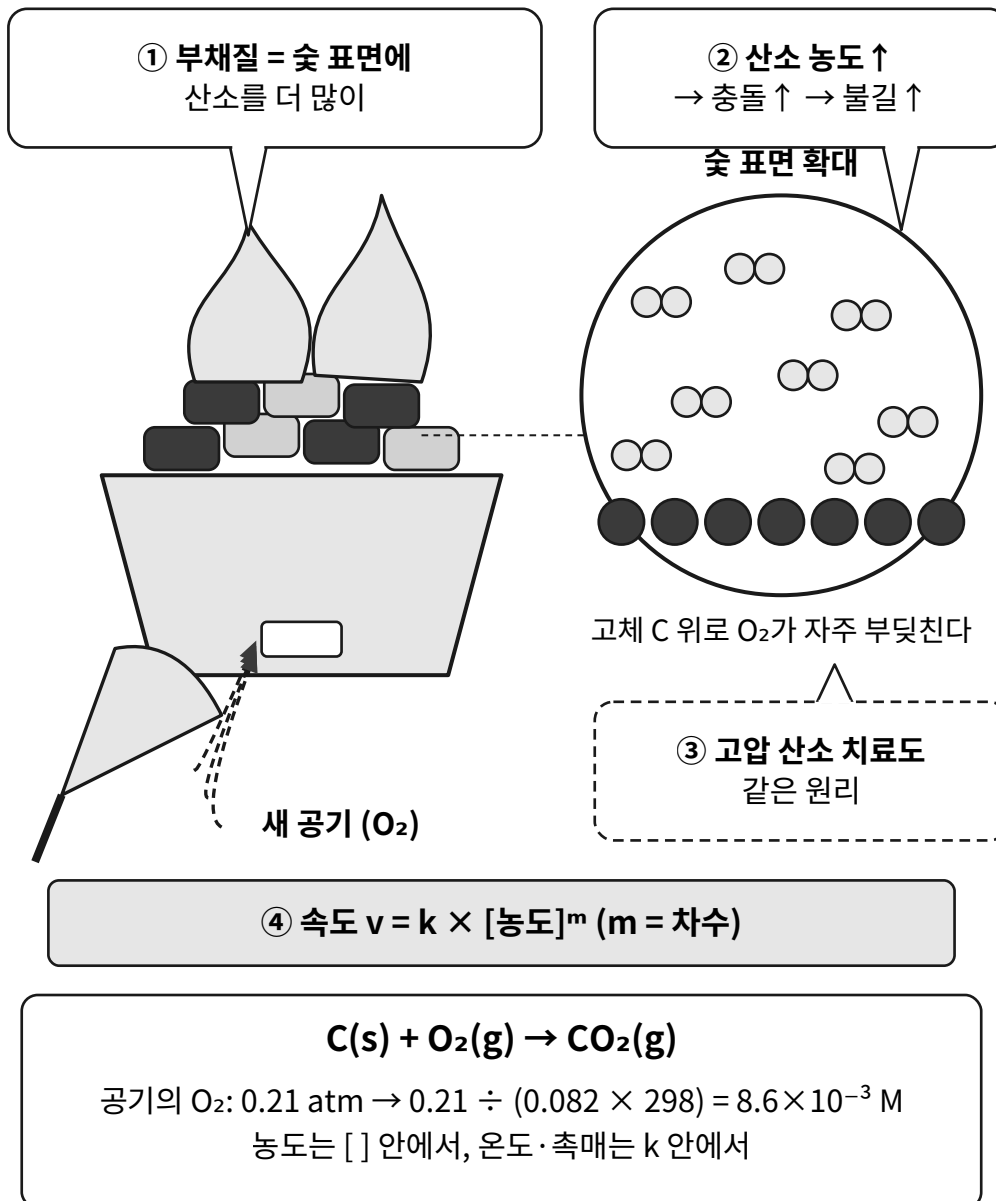


그림 16. 숯불에 부채질 — 부채가 숯 표면에 산소를 더 많이 보내면 산소와 탄소의 충돌이 잦아져 불길이 세진다. 반응물 농도가 속도를 바꾸는 정도는 차수가 정한다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 반응물 농도가 높을수록 속도가 크다.
2. 얼마나 커지는지는 차수가 정한다.
3. k는 온도가 같으면 농도와 관계없이 일정하다.

이 장의 출발점

- 2·3장의 반응 속도: 단위 시간당 농도 변화, 계수로 나누면 반응 하나에 속도 하나.
- 거듭제곱: x^2 은 x 를 두 번 곱한 것, $x^0 = 1$, $(2x)^2 = 4x^2$.
- 비례식: $y = ax$ 이면 x 가 3배일 때 y 도 3배다.

저녁이 되자 석 교수가 마당 화로에 숯을 피웠다. 숯이 벌겋게 달아오르기 시작하자 이모가 부채를 들고 화로 아래쪽 구멍에 바람을 보냈다. 숯불이 금세 환해지며 탁탁 소리를 냈다.

하린 부채질 몇 번 했을 뿐인데 불이 확 세졌어요. 숯이 늘어난 것도 아닌데요.

석 교수 늘어난 건 산소다. 숯의 탄소는 산소와 만나야 타는데, 부채질은 숯 표면 근처에 새 공기를 계속 보내 산소 농도를 높게 유지한다. 반응물의 농도가 높을수록 반응이 빠르다는 것을 이 화로가 보여 주는 거야.

태오 그건 1장 표에서 봤어요. 그런데 ‘얼마나’ 빨라지는지는 안 배웠잖아요. 산소가 두 배면 불도 두 배로 세지나요?

석 교수 그게 오늘의 질문이다. 두 배가 될 수도, 네 배가 될 수도, 전혀 안 바뀔 수도 있다. 그 답을 한 줄로 쓴 것이 **반응 속도식**이야.

이모 숯불은 너무 복잡하니 간단한 반응부터 차근차근 해 주세요.

석 교수 그러지요. 숯불은 이 장의 마지막에 다시 보자.

4.1 농도를 두 배로 하면?

석 교수 반응 $A \rightarrow$ 생성물을 생각하자. $[A]$ 를 두 배로 했더니 속도가 두 배가 되었다면, 속도는 $[A]$ 에 비례한다. 식으로 $v = k[A]$ 다. 그런데 어떤 반응은 $[A]$ 를 두 배로 하면 속도가 네 배가 된다. 그러면?

하린 2의 제곱이 4니까 $v = k[A]^2$ 이요?

석 교수 맞다. 또 어떤 반응은 $[A]$ 를 바꿔도 속도가 그대로다. 그러면 $v = k$, 곧 $v = k[A]^0$ 이다. 그림 17가 세 경우를 한 그래프에 그린 것이다.

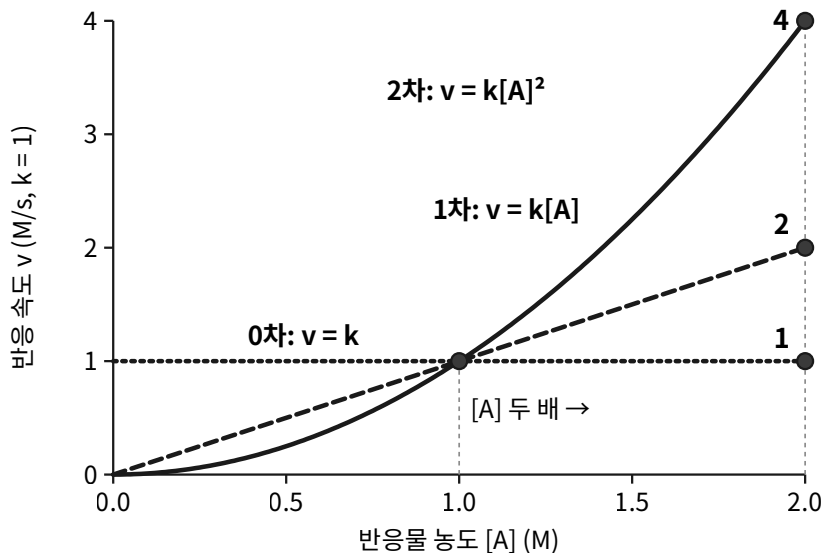


그림 17. 농도와 반응 속도의 관계 — 같은 $k(=1)$ 에서 0차($v=k$), 1차($v=k[A]$), 2차($v=k[A]^2$) 반응의 속도. $[A]$ 가 1 M에서 2 M으로 두 배가 될 때 속도는 각각 1배, 2배, 4배가 된다

태오 0차는 수평선, 1차는 직선, 2차는 포물선이네요. $[A] = 2$ 에서 1, 2, 4고요.

석 교수 그래서 ‘농도가 두 배면 속도가 몇 배인가’라는 질문의 답은 지수가 정한다. 이 지수를 그 물질에 대한 **반응 차수**라 한다. 0차, 1차, 2차라고 부르지.

이모 $[A]$ 가 1보다 작으면 어때요? 0.5 M이면요?

석 교수 좋은 질문이다. 0.5 M에서는 0차 1, 1차 0.5, 2차 0.25로 순서가 뒤집힌다. 그래프에서도 $[A]$ 가 1보다 작은 왼쪽에서는 2차 곡선이 가장 아래에 있지. 그러니 ‘2차 반응이 1차 반응 보다 빠르다’는 말은 의미가 없다. 차수는 빠르기의 크기가 아니라 농도에 얼마나 민감한가를 말한다.

4.2 반응 속도식과 속도 상수 k

석 교수 반응물이 둘 이상이면 각각에 대한 차수를 따로 쓴다.

$$v = k[A]^m[B]^n \quad (m, n = \text{반응 차수}, m + n = \text{전체 반응 차수})$$

하린 k 는 뭐예요?

석 교수 **속도 상수**다. 농도가 모두 1 M일 때의 반응 속도라고 생각하면 쉽다. $[A] = [B] = 1$ M이면 $v = k \times 1 \times 1 = k$ 이니까. k 는 반응마다 다르고, 같은 반응이라도 온도와 촉매에 따라 달라진다. 그러나 온도와 촉매가 같으면 농도를 어떻게 바꾸어도 k 는 변하지 않는다.

태오 농도가 바뀌면 속도는 바뀌는데 k 는 그대로라는 거죠?

석 교수 그렇다. 농도의 효과는 $[A]^m[B]^n$ 쪽이 모두 맡고, k 는 온도와 반응 경로의 성질만 담는다. 이 구분이 논술에서 정말 자주 나온다. 2024학년도 연세대 문항은 밀폐 실린더 안의 압력을 1기압에서 2기압으로 올렸을 때 반응 속도, 속도 상수, 활성화 에너지가 각각 어떻게 되는지 물었다.

하린 압력을 올리면 기체가 압축돼서 농도가 높아지니까 속도는 빨라지고요, 온도는 그대로니까 k 는 그대로예요.

- 석 교수** 정확하다. 활성화 에너지는 9장에서 배우는데, 반응 경로가 같으니 역시 그대로다. 많은 학생이 “속도가 빨라졌으니 k도 커졌다”고 쓰는데, 그러면 감점이다.
- 이모** 그럼 k를 바꾸려면 어떻게 해야 해요?
- 석 교수** 온도를 바꾸거나 촉매를 넣어야 한다. 10장과 11장의 주제다. 오늘은 ‘농도는 [] 안에서, 온도와 촉매는 k 안에서’라고 기억해 두자.
- 태오** k가 크다는 건 무슨 뜻이에요? 단위가 다르면 비교하기도 어렵겠는데요.
- 석 교수** 같은 차수의 반응끼리는 k가 클수록 같은 농도에서 빠르다. 예를 들어 1차 반응 두 개의 k가 0.10 s^{-1} 과 0.010 s^{-1} 이면, 같은 농도에서 앞의 것이 열 배 빠르다. 6장에서 보겠지만 1차 반응의 k는 반감기와 바로 이어져서, k가 열 배면 반감기는 10분의 1이 된다. 그러나 1차의 k와 2차의 k는 단위가 다르니 숫자만 비교하면 안 된다. 사과와 배를 무게로 비교하려면 같은 저울에 올려야 하는 것과 같다.
- 하린** 그럼 차수가 다른 반응끼리는 실제 농도를 넣어서 속도를 비교해야겠네요.
- 석 교수** 그렇다. 속도식에 실제 농도를 넣어 M/s로 나온 값끼리 비교하는 것이 정직한 방법이다.

4.3 차수는 계수가 아니다

- 태오** 그럼 차수는 반응식 계수에서 바로 알 수 있죠? $2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 면 $v = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]^2$ 이고요.
- 석 교수** 그게 이 단원의 가장 유명한 함정이다. 이 반응의 속도식은 실험해 보면 $v = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]$ 다. NO에 대해서는 2차, H₂에 대해서는 1차, 전체 3차지. H₂의 계수는 2인데 차수는 1이야.
- 하린** 왜 계수랑 달라요?
- 석 교수** 반응식은 처음과 끝만 보여 주는 장부이고, 실제 반응은 여러 단계를 거쳐 일어나기 때문이다. 이 반응은 NO 두 개와 H₂ 한 개가 만나는 느린 단계를 먼저 거치고, 남은 H₂는 그 뒤의 빠른 단계에서 쓰인다고 설명한다. 전체 빠르기는 가장 느린 단계가 정하니, 그 단계에 들어가는 분자들만 속도식에 나타난다. 이 이야기는 12장의 반응 메커니즘에서 자세히 한다.
- 이모** 계수랑 차수가 같은 반응도 있겠죠?
- 석 교수** 있다. 그러나 같은지 다른지는 반응식만 봐서는 알 수 없다. $2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$ 는 계수가 2인데 실험하면 $v = k[\text{N}_2\text{O}_5]$, 1차다. $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ 는 비교적 낮은 온도에서 $v = k[\text{NO}_2]^2$ 이고, CO는 아예 속도식에 없다. CO에 대해 0차라는 뜻이지. 차수가 분수인 반응도 있다. 수소와 브로민이 브로민화 수소가 되는 반응은 초기에 $v = k[\text{H}_2][\text{Br}_2]^{1/2}$ 로, 브로민에 대해 1/2차다. 반면 수소와 아이오딘의 반응은 오랫동안 $v = k[\text{H}_2][\text{I}_2]$ 로 계수와 같은 차수를 보여 교과서의 단골 예가 되었다.
- 하린** 1/2차라니, 분자 반 개가 부딪친다는 건 말이 안 되잖아요.
- 석 교수** 그래서 분수 차수가 나오면 그 반응이 한 번에 일어나지 않는다는 강한 증거가 된다. Br₂가 먼저 원자 두 개로 쪼개지는 단계가 끼어 있어서 그렇다. 차수는 반응이 실제로 어떤 길을 걷는지 엿보는 창문이기도 하다.
- 이모** 전체 차수는 각 차수를 더한 거죠? $v = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]$ 면 $2 + 1 = 3$ 차고요.
- 석 교수** 그렇습니다. 답안에는 ‘NO에 대해 2차, H₂에 대해 1차, 전체 3차’처럼 물질별 차수와 전체 차수를 함께 쓰는 것이 좋다. 문제가 어느 쪽을 묻는지 헷갈리지 않게 해 준다.

태오 그럼 차수는 어떻게 알아요?

석 교수 실험으로만 안다. 농도를 바꿔 가며 속도를 재는 것이다. 그 방법이 5장의 초기 속도법이다. 논술 문제는 보통 실험 자료를 주거나 속도식을 직접 주고, 그 속도식으로 계산하게 한다.

문제 4.1

$2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 의 속도식은 $v = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]$ 이다. 온도를 일정하게 하고 $[\text{NO}]$ 를 3배, $[\text{H}_2]$ 를 2배로 하면 반응 속도는 몇 배가 되는가? 이때 k 는 어떻게 되는가?

태오 계수로 하면 $3^2 \times 2^2 = 36$ 배인데... 아, 아니죠. 속도식을 써야 하니까 $3^2 \times 2^1 = 18$ 배요.

석 교수 이번엔 함정을 잘 피했다. 만약 두 농도를 모두 10배로 하면?

태오 $10^2 \times 10 = 1,000$ 배요. 계수대로 했으면 $10^2 \times 10^2 = 10,000$ 배라고 썼을 거예요.

석 교수 한 자리 차이가 나니 채점자 눈에 금방 띈다. 그럼 처음 문제로 돌아가 k 는?

하린 온도가 같으니까 그대로예요.

석 교수 정답이다. 정답: 반응 속도 $3^2 \times 2 = 18$ 배, k 는 변하지 않는다. 검산으로 숫자를 넣어 볼 수도 있다. $[\text{NO}] = 0.10$, $[\text{H}_2] = 0.10$ 에서 $[\text{NO}]^2[\text{H}_2] = 1.0 \times 10^{-3}$, $[\text{NO}] = 0.30$, $[\text{H}_2] = 0.20$ 에서 $0.09 \times 0.20 = 1.8 \times 10^{-2}$ 이니 비가 18이다.

이모 3배, 2배 했는데 18배라니 생각보다 많이 빨라지네요. 반대로 줄이면 그만큼 느려지겠고요.

석 교수 차수가 높은 물질일수록 농도의 효과가 크게 증폭된다. NO를 3배로 하는 것만으로 9배가 되니까. 반대로 NO를 절반으로 줄이면 속도는 4분의 1로 떨어진다.

4.4 충돌 쌍으로 보는 차수

하린 왜 2차면 제곱이 돼요? 그냥 그렇다고 외우기는 싫어요.

석 교수 분자의 눈으로 보자. A와 B가 부딪쳐야 반응한다고 하자. 상자 안에 A가 4개, B가 4개 있으면 A-B 짝은 몇 쌍이 가능할까?

태오 A 하나마다 B 4개와 짝을 지을 수 있으니까 $4 \times 4 = 16$ 쌍이요.

석 교수 A를 8개로 늘리면?

태오 $8 \times 4 = 32$ 쌍, 두 배요. 둘 다 8개면 64쌍, 네 배고요.

석 교수 그림 18가 그 상자들이다.

반응 속도 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

반응 속도 = 기율기로 재고, 충돌과 언덕(Ea)으로 설명한다 — 농도·압력·표면적은 충돌 수를, 온도·촉매는 k를 바꾼다

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 14문항(2008~2024학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

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

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 반응 속도인가
2. 반응 속도를 재다: 평균 속도와 순간 속도
3. 계수로 맞추는 속도: 어느 물질로 재도 하나
4. 농도가 속도를 정한다: 반응 속도식
5. 실험으로 차수를 정한다: 초기 속도법
6. 1차 반응과 반감기
7. 0차·2차 반응: 그래프로 차수 가리기

8. 충돌해야 반응한다: 농도·압력·표면적
9. 넘어야 할 언덕: 활성화 에너지
10. 온도를 올리면 왜 빨라질까: 에너지 분포와 아레니우스 식
11. 촉매: 언덕을 낮추는 다른 길
12. 반응은 여러 단계로: 메커니즘과 속도 결정 단계
13. 빠른 것과 많이 생기는 것: 반응 속도와 화학 평형
14. 몸속·지구·자동차의 반응 속도, 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: 화학 평형 · 열화학(반응 엔탈피) · 기체 · 효소(생명과학)



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 979-11-23065-19-9

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 20 — 반응 속도 — 전체 350쪽

ssbook.kr/book/nonsul-20

판매가 **14,400원** (POD 정가 24,000원)

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

발간 도서 목록

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

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

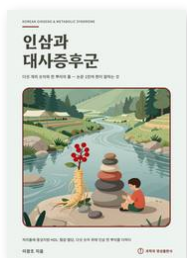
인삼 (6)



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



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



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



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



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



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

오토파지 (2)



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



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

식물성 저탄고지 (11)



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

단식 (1)



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

생물리학 (4)



발끝의 강

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

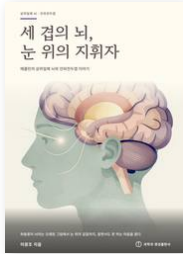
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일

부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의

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



세 겹의 뇌, 눈 위의 지휘자

매클린의 삼위일체 뇌와 안와전두엽 이야기

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



광유전

빛으로 세포를 제어하는 기술 — 원리·실험·회로·치료

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

독립영양인간 (2)



이암블리코스의 피타고라스적 삶에 관하여

그리스어 원전 완역 · 테일러 판 전면 수록

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



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지

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

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

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역

대학 기출로 완성하는 분자생물학의 중심원리

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



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도

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

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



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학

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

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



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송

인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다

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



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설

감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩팥까지 항상성

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



대입 과학논술 09 — 면역·백신

몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지

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



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지 대사

포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체

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



대입 과학논술 11 — 신경계·활동 전위
펄프가 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 — 뜻은 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