



대입 과학논술 15 — 분자 간 힘 · 수소 결합 · 계면

극성 × 분자 간 힘의 서열 × 계면 에너지로 읽는 물질

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-15

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

분자 간 힘. 수소 결합. 계면



분자 간 힘 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 11문항 · 2008~2026학년도

이광조 지음

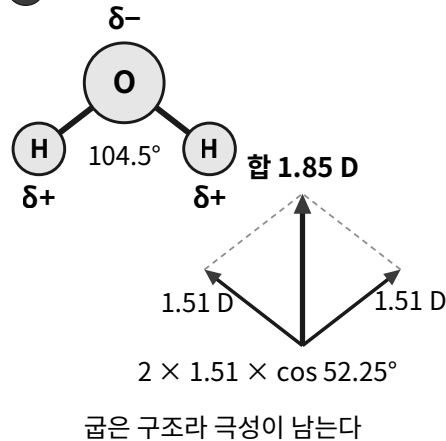
분자 간 힘·수소 결합·계면

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

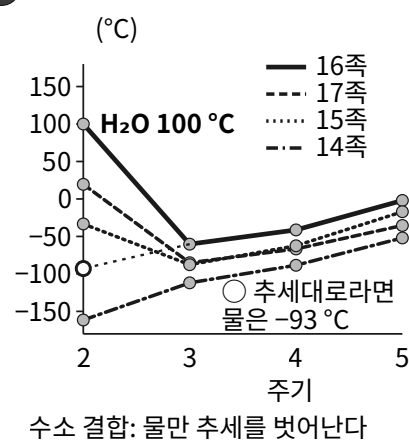
분자 간 힘 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 극성 × 분자 간 힘의 서열 × 계면 에너지 | 11문항 · 7개 대학 (2008~2026)

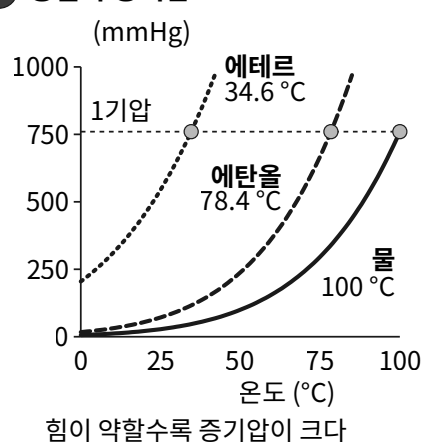
① 극성: 쌍극자의 벡터 합



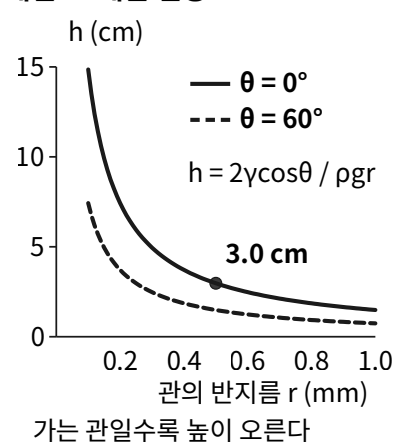
② 수소 결합과 끓는점



③ 증발과 증기압



④ 계면: 모세관 현상



한 줄 요약: 극성과 분자의 크기 → 분자 간 힘의 크기
→ 끓는점·증기압·표면장력·용해가 정해진다

그림 1. 분자 간 힘·수소 결합·계면 단원의 그림 요약. ① 물 분자의 쌍극자 모멘트(결합 쌍극자 1.51 D 두 개의 벡터 합 1.85 D), ② 14~16족 수소 화합물의 끓는점 — 3~5주기 추세를 이으면 물은 약 -93 °C에서 끓어야 하지만 실제로는 100 °C, ③ 물·에탄올·다이에틸 에테르의 증기압 곡선 (클라우지우스-클라페이롱 식으로 계산, 760 mmHg와 만나는 점이 기준 끓는점), ④ 유리관 속 물의 모세관 상승 높이 $h = 2\gamma \cos \theta / (\rho g r)$ ($\gamma = 0.0728 \text{ N/m}$, 접촉각 0°와 60°).

한 줄 요약: 극성과 분자의 크기가 분자 간 힘을 정하고, 분자 간 힘이 끓는점·증기압·표면장력·용해를 정한다

연결 단원 → 화학 결합과 분자 구조 · 용액의 총괄성 · 상평형과 기체 · 탄소 화합물 · 세포막

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 분자 간 힘인가	16
1.1 물이 끓을 때 무엇이 끊어지나	18
1.2 결합과 끌림은 세기부터 다르다	19
1.3 상태 변화는 끌림과 열운동의 줄다리기	21
1.4 분자량만으로는 안 된다	22
1.5 이 단원의 지도	23
제 2장 극성의 복습: 전기음성도에서 쌍극자 모멘트까지	25
2.1 전기음성도 차가 만드는 부분 전하	27
2.2 쌍극자 모멘트와 화살표 표기	28
2.3 분자 구조가 극성을 정한다	29
2.4 같은 원자 수, 다른 극성	31
2.5 극성의 실험 증거: 휘는 물줄기	32
제 3장 분산력: 모든 분자는 서로 끌린다	35
3.1 무극성 분자도 끌린다는 증거	37
3.2 순간 쌍극자와 유발 쌍극자	38
3.3 전자가 많을수록 출렁인다 — 편극성	39
3.4 같은 분자량이면 모양이 가른다	41
3.5 분산력은 거리에 아주 민감하다	42
제 4장 쌍극자·쌍극자 힘: 극성 분자끼리의 끌림	45
4.1 극성 분자는 머리-꼬리로 줄을 선다	47
4.2 분자량이 같을 때 극성이 승부를 가른다	48
4.3 분산력이 이기는 경우	51
4.4 극성 분자와 무극성 분자 사이	52
제 5장 수소 결합: F·O·N에 붙은 H의 특별한 끌림	55
5.1 물만 추세를 벗어난다	57
5.2 수소 결합의 조건	59
5.3 주개와 받개를 센다	60
5.4 “결합”이라는 이름의 함정	62
5.5 수소 결합이 있나 없나 — 판정 연습	62
제 6장 끓는점은 이렇게 비교한다	65
6.1 비교 순서도	67
6.2 연세대 2022형: 분자량이 같은 네 분자	69
6.3 연세대 2024형: 같은 32, 다른 끓는점	70
6.4 녹는점은 다르다 — 쌍임의 문제	72
6.5 경북대 2024형: 구조에서 극성으로, 극성에서 끓는점으로	72
제 7장 증발과 증기압: 액체 위의 동적 평형	75
7.1 밀폐 용기 속 증발과 응축	77
7.2 증기압은 온도만의 함수	78
7.3 분자 간 힘이 약할수록 증기압이 크다	79
7.4 끓음: 증기압이 바깥 압력과 같아질 때	80

7.5 증기압 곡선을 식으로 — 클라우지우스-클라페이롱 식	82
제 8장 물은 왜 특별한가	85
8.1 얼음은 왜 뜨나	87
8.2 4 °C에서 가장 무겁다	89
8.3 데우기 어렵고 식히기 어렵다	90
8.4 땀 한 컵의 냉각	92
8.5 물과 생명	92
제 9장 녹는다는 것: 수화와 극성	95
9.1 소금이 녹을 때: 이온·쌍극자 힘과 수화	97
9.2 녹을까 말까는 에너지 저울	99
9.3 비슷한 것이 비슷한 것을 녹인다	100
9.4 고체 소금과 소금물: 전류가 흐르는 까닭	102
9.5 비타민 C와 비타민 D: 구조로 판정하기	102
제 10장 표면장력: 표면의 분자는 손해를 본다	105
10.1 표면 분자는 이웃이 적다	107
10.2 표면장력의 두 얼굴: N/m와 J/m ²	108
10.3 물방울이 둥근 까닭	109
10.4 분자 간 힘이 클수록 표면장력이 크다	109
10.5 표면장력을 수소 결합으로 어렵하기	111
10.6 작은 방울일수록 안쪽 압력이 크다	112
제 11장 접촉각과 모세관 현상	115
11.1 응집력과 부착력	117
11.2 접촉각으로 잴다	118
11.3 세 계면장력의 줄다리기: 영의 식	119
11.4 모세관 상승: 얼마나 올라가나	120
11.5 수은은 내려간다	122
제 12장 물과 기름 사이: 친수성·소수성과 미셀	125
12.1 친수성과 소수성: 물이 기름을 밀어내는 까닭	127
12.2 한 분자에 두 성질: 양친매성 분자	128
12.3 표면에 먼저 선다: 표면장력과 임계 미셀 농도	129
12.4 미셀: 꼬리는 안, 머리는 밖	131
12.5 기름이 많은 곳에서는 거꾸로: 역미셀	132
12.6 센물에서는 비누가 침전한다	133
제 13장 증기압을 바꾸는 용질과 곡률: 물방울의 탄생	135
13.1 소금물은 덜 마른다: 라울 법칙	137
13.2 작은 방울은 더 잘 증발한다: 곡률과 켈빈 식	139
13.3 물방울이 생기려면 고개를 넘어야 한다	140
13.4 해염 입자가 고개를 낮춘다: 응결핵	141
13.5 배가 지나간 자리의 구름	142
제 14장 몸속·지구·기술 속의 분자 간 힘, 그리고 2부로	145
14.1 100 m 나무 꼭대기까지	147
14.2 숨 쉬는 폐: 폐포의 계면활성제	149
14.3 담즙산염: 한 면은 물, 한 면은 기름	150
14.4 비타민 C와 D, 넘치면 어디로 가나	151
14.5 소금쟁이와 연잎: 표면장력이 몸무게를 받친다	151
14.6 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	153
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	155

부록 B. 용어 풀이	158
기출문제와 기본개념.....	166
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	167
0. 이 장의 사용법	168
1. 출제 개념.....	169
1.1 극성과 쌍극자 모멘트 — P1 · P2 · C1.....	169
1.2 분자 간 힘의 세 종류 — C2 · C3 · C4.....	170
1.3 수소 결합 — C5.....	171
1.4 끓는점·녹는점 비교 — C6.....	172
1.5 증발·증기압과 상평형 — C7 · P3 · P4.....	173
1.6 물의 특성과 생명 — C8 · A1	174
1.7 용해와 수화 — C9 · A4.....	174
1.8 표면장력·접촉각·모세관 현상 — C10 · C11 · A5.....	175
1.9 친수성·소수성과 미셀 — C12 · C13 · A3.....	176
1.10 증기압 내림과 물방울 — C14 · A2.....	177
1.11 그래프 개념도 읽는 법	177
2. 출제 경향.....	180
2.1 반복되는 출제 패턴 다섯 가지	182
2.2 학교별 성향	183
논술답안작성 패턴분석	185
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	186
3. 답안 작성법	188
3.1 비교형 답안의 4단 구조	188
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	189
3.3 표기와 수치 규칙	189
3.4 시간 배분과 자기 점검	190
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	190
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	192
실전기출문제와 풀이과정	197
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	198
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	200
5.1 한눈에 보는 기출 11문항	200
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론.....	201
5.3 기본 개념 한눈에	202
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	203
6. 출제 문항 분석과 모범답안	204
〈기출문제 1 (경희대 2026년)〉	205
〈기출문제 2 (연세대 2024년)〉	219
〈기출문제 3 (경북대 2024년)〉	229
〈기출문제 4 (연세대 2022년)〉	238
〈기출문제 5 (경희대 2020년)〉	246
〈기출문제 6 (성균관대 2010년)〉	256
〈기출문제 7 (서울대 2009년)〉	265

〈기출문제 8 (고려대 2009년)〉	279
〈기출문제 9 (건국대 2009년)〉	289
〈기출문제 10 (연세대 2008년)〉	301
〈기출문제 11 (성균관대 2008년)〉	312
7. 변형·예상 문항	322
8. 강의 연결.....	329
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	330
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: 분자 간 힘 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 결합 에너지와 분자 간 힘의 크기	19
그림 5. 상태 변화에서 끊어지는 것과 그대로인 것.....	21
그림 6. 물 질량과 끓는점.....	22
그림 7. 제 2장 개념도	25
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	26
그림 9. 폴링 전기음성도.....	27
그림 10. 결합 쌍극자의 벡터 합	29
그림 11. 염화메테인류의 쌍극자 모멘트	31
그림 12. 제 3장 개념도	35
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	36
그림 14. 순간 쌍극자와 유발 쌍극자.....	38
그림 15. 물 질량과 끓는점: 비활성 기체와 할로젠	39
그림 16. 펜테인 이성질체의 모양과 끓는점.....	41
그림 17. 제 4장 개념도	45
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	46
그림 19. 극성 분자의 끌리는 배열과 밀리는 배열	47
그림 20. 물 질량이 비슷한 네 분자의 끓는점.....	49
그림 21. 염화메테인류: 극성과 끓는점이 반대로 간다	51
그림 22. 제 5장 개념도	55
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	56
그림 24. 14~17족 수소 화합물의 끓는점	58
그림 25. 물 분자 하나의 수소 결합 네 개	60
그림 26. $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{HF} \cdot \text{NH}_3$ 의 주개와 받개	61
그림 27. 제 6장 개념도	65
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	66
그림 29. 끓는점 비교 순서도	68
그림 30. 연세대 2022형 네 분자의 끓는점.....	69
그림 31. 연세대 2024형 네 분자의 끓는점.....	71
그림 32. 제 7장 개념도	75
그림 33. 생활 속 개념도 7.....	76
그림 34. 증발 속도와 응축 속도	78
그림 35. 세 액체의 증기압 곡선	81
그림 36. $\ln P$ 와 $1/T$ 의 직선 관계	82
그림 37. 제 8장 개념도	85
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	86
그림 39. 얼음의 육각 구조.....	88
그림 40. 물의 밀도와 온도.....	90
그림 41. 물질별 비열	91
그림 42. 제 9장 개념도	95
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	96
그림 44. 수화된 Na^+ 와 Cl^-	98
그림 45. 알코올의 탄소 수와 물 용해도	101
그림 46. 비타민 C와 D의 구조	103
그림 47. 제 10장 개념도	105

그림 48. 생활 속 개념도 10	106
그림 49. 표면 분자와 내부 분자	107
그림 50. 액체별 표면장력	110
그림 51. 표면장력 어림	112
그림 52. 제 11장 개념도	115
그림 53. 생활 속 개념도 11	116
그림 54. 접촉각의 세 경우.....	118
그림 55. 접촉선의 힘 균형.....	119
그림 56. 반지름과 모세관 높이	121
그림 57. 물과 수은의 메니스커스.....	123
그림 58. 제 12장 개념도	125
그림 59. 생활 속 개념도 12	126
그림 60. 미셀과 역미셀	129
그림 61. SDS 농도와 표면장력	130
그림 62. 세탁의 세 단계	131
그림 63. 제 13장 개념도	135
그림 64. 생활 속 개념도 13	136
그림 65. 라울 법칙.....	138
그림 66. 물방울 생성 에너지	140
그림 67. 순수한 방울과 소금 방울의 증기압.....	142
그림 68. 제 14장 개념도	145
그림 69. 생활 속 개념도 14	146
그림 70. 나무의 물 수송	148
그림 71. 폐포의 라플라스 압력	150
그림 72. 소금쟁이 다리의 힘 균형.....	152
그림 73. 최근 기출의 끓는점 비교 네 세트.....	172
그림 74. 전체 개념 그래프.....	178
그림 75. 개념별 출제 횟수.....	179
그림 76. 연도별 출제 문항 수	180
그림 77. 대학별 출제 문항 수	181
그림 78. 비교형 답안의 4단 구조	188
그림 79. 〈경희대 2026〉 개념 그래프	207
그림 80. 염화메테인 네 분자의 합 쌍극자(q258)	210
그림 81. 물의 상평형 그림(q258)	213
그림 82. 밸브로 연결된 용기 A·B(q258)	213
그림 83. $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 양-시간 개형(q258)	215
그림 84. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	221
그림 85. 네 물질의 끓는점과 분자 간 힘	224
그림 86. A의 물분율에 따른 C의 부분 압력.....	226
그림 87. 〈경북대 2024〉 개념 그래프	230
그림 88. $\text{CO}_2 \cdot \text{PCl}_3 \cdot \text{SiCl}_4$ 의 루이스 구조와 3차원 구조(q189).....	233
그림 89. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	239
그림 90. 끓는점 판정 순서도	242
그림 91. 네 유기 분자의 끓는점	243
그림 92. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	247
그림 93. 얼음 속 물 분자 하나와 이웃 넷(q238).....	250
그림 94. 수화된 $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ (q238).....	253
그림 95. 〈성균관대 2010〉 개념 그래프	257
그림 96. 제타포텐셜과 영김	260

그림 97. 충전 모형과 마이셀의 모양 변화	262
그림 98. 〈서울대 2009〉 개념 그래프	267
그림 99. 물방울 생성 에너지의 두 항.....	272
그림 100. 요일별 강수량과 작은 입자 농도	275
그림 101. 〈고려대 2009〉 개념 그래프	280
그림 102. 콜산 + 타우린 → 타우로콜산(q269).....	283
그림 103. 비커 A·B와 역미셀(q269)	285
그림 104. 〈건국대 2009〉 개념 그래프	291
그림 105. 두 비타민의 구조식과 친수 부위	294
그림 106. 아스코르브산의 산화와 가수분해.....	296
그림 107. 〈연세대 2008〉 개념 그래프	303
그림 108. 굽은 물과 선형 물의 수소 결합 구조(q1)	308
그림 109. 〈성균관대 2008〉 개념 그래프	313
그림 110. 접촉각과 계면장력 $a \cdot b \cdot c$ (q274).....	316
그림 111. 매미 날개 위 물방울과 비눗물방울(q274)	318

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념	12
표 3. 화학 결합과 분자 간 힘의 비교	20
표 4. 제 2장의 개념이 쓰인 기출	25
표 5. 자주 쓰는 분자의 구조와 쌍극자 모멘트	30
표 6. 제 3장의 개념이 쓰인 기출	35
표 7. 비활성 기체와 할로젠의 몰 질량·전자 수·기준 끓는점·25 °C 상태	39
표 8. 제 4장의 개념이 쓰인 기출	45
표 9. 몰 질량이 비슷한 짝의 비교	50
표 10. 제 5장의 개념이 쓰인 기출	55
표 11. 수소 결합 판정표	62
표 12. 제 6장의 개념이 쓰인 기출	65
표 13. 순서도 적용표	72
표 14. 제 7장의 개념이 쓰인 기출	75
표 15. 네 액체의 기화열·기준 끓는점·25 °C 증기압	79
표 16. 제 8장의 개념이 쓰인 기출	85
표 17. 물의 특성과 그 분자 수준 원인, 생명에 주는 의미	91
표 18. 제 9장의 개념이 쓰인 기출	95
표 19. 용매-용질 조합과 용해 여부	100
표 20. 제 10장의 개념이 쓰인 기출	105
표 21. 표면장력 어림	111
표 22. 제 11장의 개념이 쓰인 기출	115
표 23. 표면별 물의 접촉각 대표값	118
표 24. 제 12장의 개념이 쓰인 기출	125
표 25. 양친매성 분자의 예	128
표 26. 제 13장의 개념이 쓰인 기출	135
표 27. 반지름에 따른 물방울의 평형 증기압비(켈빈 식, 20 °C, $\gamma = 0$)	139
표 28. 제 14장의 개념이 쓰인 기출	145
표 29. 이 단원의 개념이 쓰이는 장면	153
표 30. 2부 목차와 내용	167
표 31. 분자 구조와 쌍극자 모멘트(기체 상태 실측값)	169
표 32. 분자 간 힘의 세 종류	170
표 33. 수소 결합 판정(분자끼리)	171
표 34. 최근 기출 네 세트에 순서도 적용	173
표 35. 물의 성질 → 분자 수준 원인 → 생명·지구 현상(경희대 2020 [논제	174
표 36. 미셀과 역미셀	176
표 37. 이 책의 기출 문항 목록	181
표 38. 대학별 출제 문항	181
표 39. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다)	182
표 40. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서)	183
표 41. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서	186
표 42. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용	186
표 43. 서술형 답안의 4문장 틀(분자 간 힘 설명)	189
표 44. 논술 기본 패턴 5가지(분자 간 힘·계면 답안)	190
표 45. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은	191
표 46. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(최근 시험부터, 쓰이는 개념과 답	198
표 47. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	200

표 48. 학년도별 문항 수와 시험 종류.....	200
표 49. 소문항 30개에 적용한 주 답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주)	201
표 50. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순).....	202
표 51. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	203
표 52. 논제 III-(2)에 주어진 분자 구조 및 쌍극자 모멘트(원문 표)	206
표 53. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	207
표 54. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	209
표 55. 문제 1-1의 표(원문 그대로).....	219
표 56. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	221
표 57. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	222
표 58. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	230
표 59. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	231
표 60. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	239
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	241
표 62. 네 분자의 비교표(이 책의 정리, 굵는점은 핸드북 값).....	242
표 63. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	247
표 64. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	249
표 65. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	257
표 66. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	258
표 67. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	268
표 68. 논제별 요구 사항과 난이도	269
표 69. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	280
표 70. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	281
표 71. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	291
표 72. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	293
표 73. 문제 2-3의 두 단계 분배 정리(처음 $X \cdot Y$ 각 n , 물·기름 부피 같)	297
표 74. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	303
표 75. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	304
표 76. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	313
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	314
표 78. 인강 회차 구성(제안)	329
표 79. 11개 문항의 규모	332
표 80. 대학별 한 줄 총평	333

제 1 부

기본개념편

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

분자 간 힘·수소 결합·계면

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 극성 → 분자 간 힘의 세 종류(분산력·쌍극자·쌍극자 힘·수소 결합) → 끓는점 비교 → 증기압과 물의 특성 → 용해 → 표면장력과 모세관 현상 → 계면활성제와 미셀 → 증기압 내림과 물방울 → 생명·지구 응용의 순서로 이어집니다. 앞 장에서 세운 비교 규칙이 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 분자의 극성과 구조는 앞 권(화학 결합과 분자 구조)에서 자세히 다루었으므로, 이 권에서는 제 2장에서 필요한 만큼만 짧게 복습합니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 왜 분자 간 힘인가	1~2장	물이 끓어도 H ₂ O 분자는 그대로라는 사실에서 출발해, 분자와 분자 사이의 끌림이 화학 결합과 다른 것임을 확인하고 극성(쌍극자 모멘트)을 복습한다.
B. 세 가지 힘	3~5장	분산력, 쌍극자·쌍극자 힘, 수소 결합을 하나씩 세운다. 각 힘이 어디서 오고 무엇에 따라 커지는지 숫자로 본다.
C. 힘이 정하는 성질	6~9장	끓는점을 비교하는 순서도를 만들고, 증기압·기화열, 물의 특이한 성질, 녹는다는 것(수화와 극성)을 차례로 설명한다.
D. 계면	10~12장	표면의 분자가 손해를 보는 까닭에서 표면장력을 세우고, 접촉각·모세관 현상, 친수성·소수성과 계면활성제·미셀로 넓힌다.
E. 확장과 응용	13~14장	용질과 물방울의 곡률이 증기압을 바꾸는 원리로 구름을 설명하고, 나무의 물 수송·폐·담즙·비타민 같은 생명과 기술의 장면을 모은 뒤 2부로 간다.

표 1의 구간은 4부 기출과도 맞물립니다. 끓는점 순서를 묻는 최근 문항은 B·C 구간, 물의 수소 결합과 생명 현상을 묻는 문항은 C 구간, 미셀·접촉각·물방울 문항은 D·E 구간에서 준비합니다.

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 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 장마다 한 쪽짜리 〈생활 속 개념도〉가 있어 개념이 일상에서 어떻게 보이는지 그림으로 먼저 잡습니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 해당 그림과 표로 돌아가 한 번 더 시도하십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
제 1장	왜 분자 간 힘인가	분자 간 힘과 화학 결합의 구별 · 세기의 크기 비교 · 상태 변화
제 2장	극성의 복습: 전기음성도에서 쌍극자 모멘트까지	전기음성도 차 · 부분 전하 · 쌍극자 모멘트의 벡터 합
제 3장	분산력: 모든 분자는 서로 끌린다	순간 쌍극자 · 유발 쌍극자 · 편극성 · 분자 모양과 표면적
제 4장	쌍극자·쌍극자 힘: 극성 분자끼리의 끌림	영구 쌍극자의 배열 · 분자량이 비슷할 때의 비교

장	제목	새로 배우는 개념
제 5장	수소 결합: F·O·N에 붙은 H의 특별한 끌림	수소 결합의 조건 · 주개와 받개 · 2주기 수소 화합물의 이상 끓는점
제 6장	끓는점은 이렇게 비교한다	끓는점 비교 순서도 · 녹는점과 끓는점의 차이 · 이성질체 비교
제 7장	증발과 증기압: 액체 위의 동적 평형	동적 평형 · 증기압 · 기화열 · 클라우지우스-클라페이롱 식 · 끓음
제 8장	물은 왜 특별한가	얼음의 육각 구조와 밀도 · 비열 · 기화열 · 4 °C의 최대 밀도
제 9장	녹는다는 것: 수화와 극성	이온·쌍극자 힘 · 수화 · 비슷한 것이 비슷한 것을 녹인다 · 전해질의 전도성
제 10장	표면장력: 표면의 분자는 손해를 본다	표면 에너지 · 표면장력의 단위 · 라플라스 압력
제 11장	접촉각과 모세관 현상	응집력과 부착력 · 접촉각과 영의 식 · 모세관 상승 높이
제 12장	물과 기름 사이: 친수성·소수성과 미셀	친수성·소수성 · 양친매성 분자 · 계면활성제 · 미셀과 역미셀 · 임계 미셀 농도
제 13장	증기압을 바꾸는 용질과 곡률: 물방울의 탄생	라울 법칙과 증기압 내림 · 작은 물방울의 증기압 · 응결핵
제 14장	몸속·지구·기술 속의 분자 간 힘, 그리고 2부로	나무의 물 수송 · 폐의 계면활성제 · 담즙산 · 비타민 · 발수 표면

표 2에서 계산이 많은 장은 제 2장(쌍극자 벡터 합), 제 7장(증기압), 제 10~11장(표면장력과 모세관 높이), 제 13장(증기압 내림)입니다. 서술이 많은 장은 제 5장, 제 8장, 제 12장입니다. 기출 논술은 계산보다 **이유를 순서 있게 쓰는 것을** 더 많이 묻기 때문에, 서술 장의 〈핵심〉 상자를 특히 소리 내어 읽어 보기를 권합니다.

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 끓는점 비교 문제는 제 6장의 순서도(수소 결합 → 극성 → 분자 크기·모양)를 늘 같은 순서로 적용한다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

분자 간 힘은 화학 I의 끝에서 처음 만나고, 화학 II의 액체·고체와 용액 단원에서 다시 만나는 개념이다. 대학 논술에서는 “끓는점이 높은 순서로 나열하고 이유를 쓰라”는 짧은 문항부터 물의 수소 결합으로 생명 현상을 설명하라는 긴 서술, 미셀과 접촉각, 구름 속 물방울까지 폭넓게 나온다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 전하의 끌림과 밀어냄, 간단한 비율과 지수)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 것을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 규칙을 만든다.

토요일 아침, 단양 돌집 과학방의 난로 위에서 주전자가 끓기 시작했다. 석 교수가 주전자 뚜껑을 살짝 열자 하얀 김이 피어올랐다.

하린 교수님, 물이 끓으면 물 분자가 쪼개져서 수소랑 산소가 되는 거예요?

석 교수 좋은 질문으로 시작하는구나. 그렇다면 저 김을 차가운 유리창에 대 보면 무엇이 맺힐까?

하린 물방울이요. 아, 그럼 쪼개진 게 아니네요. 다시 물이 됐으니까요.

석 교수 그래. 끓을 때 끊어지는 것은 분자 **안**의 O-H 결합이 아니라 분자와 분자 **사이**의 끌림이다. 오늘부터 우리가 배울 것이 바로 그 끌림, 분자 간 힘이야.

태오 논술 기출을 보면 “끓는점이 높은 순서로 나열하고 이유를 쓰시오”가 정말 자주 나와요. 저는 분자량이 크면 끓는점이 높다고만 외웠는데, 물은 분자량이 18밖에 안 되는데 100℃에서 끓잖아요.

석 교수 바로 그 어긋남이 이 단원의 출발점이다. 분자량이 34인 황화 수소는 -60℃에서 끓는데, 18인 물은 100℃에서 끓어. 무게만으로는 설명이 안 되지. 무엇이 다른지를 찾는 것이 1부의 줄거리다.

이모 저는 두부집을 하니까 물을 하루 종일 끓이는데요, 같은 불에서도 기름은 물보다 훨씬 뜨거워져도 끓지 않고, 소주는 금방 날아가요. 그것도 같은 이야기인가요?

석 교수 같은 이야기입니다. 식용유는 분자가 아주 커서 분산력이 크기 때문에 끓기 전에 먼저 연기가 날 만큼 높은 온도를 견디고, 에탄올은 물보다 수소 결합을 덜 만들어서 일찍 끓지요. 이모님이 매일 보시는 장면이 모두 분자 간 힘의 크기 비교입니다.

이모 그럼 설거지할 때 세제가 기름을 떼어 내는 것도요?

석 교수 그건 12장의 주인공입니다. 물과 기름 사이, 곧 **계면**에서 일어나는 일이에요. 한 분자 안에 물을 좋아하는 머리와 기름을 좋아하는 꼬리를 함께 가진 분자가 기름을 둘러싸지요.

태오 그런데 교수님, 계면이 왜 이 단원에 같이 들어 있어요? 끓는점하고는 다른 이야기 같은데요.

석 교수 표면에 있는 분자는 안쪽 분자보다 이웃이 적어서 끌림을 덜 받는다. 그 손해가 표면장력이고, 그래서 물방울이 둥글어지고, 가는 관에서 물이 올라간다. 결국 끓는점과 같은 끌림을 다른 자리에서 보는 거야.

하린 그럼 이 단원은 “끌림 하나로 다 설명하는 단원”이네요.

석 교수 그렇게 기억하면 된다. 다만 끌림의 종류가 셋이고, 그 크기를 비교하는 순서가 있다. 극성 → 분산력 → 쌍극자-쌍극자 힘 → 수소 결합 순서로 하나씩 세우고, 제 6장에서 비교 순서도를 완성할 거야.

태오 계산도 나와요?

석 교수 나온다. 물 분자의 쌍극자 모멘트를 벡터로 더해 보고, 높은 산에서 물이 몇 도에 끓는지 계산하고, 가는 유리관에서 물이 몇 cm 오르는지도 구한다. 숫자를 넣어 봐야 규칙이 머리에 남는다.

이모 저는 숫자보다 왜 그런지가 더 궁금해요. 겨울에 연못이 위에서부터 얼어서 물고기가 산다는 이야기도 들었는데, 그것도 나오나요?

석 교수 제 8장에서 다룹니다. 얼음의 육각형 구조가 빈틈을 만들어 얼음이 물보다 가벼워지는 이야기지요. 이 장면은 4부의 기출에서도 그대로 나옵니다.

하린 그럼 오늘은 주전자부터 시작하는 거예요?

석 교수 그래. 주전자 속에서 무엇이 끓어지고 무엇이 그대로인지, 그것부터 확인하자. 제 1장으로 가자.

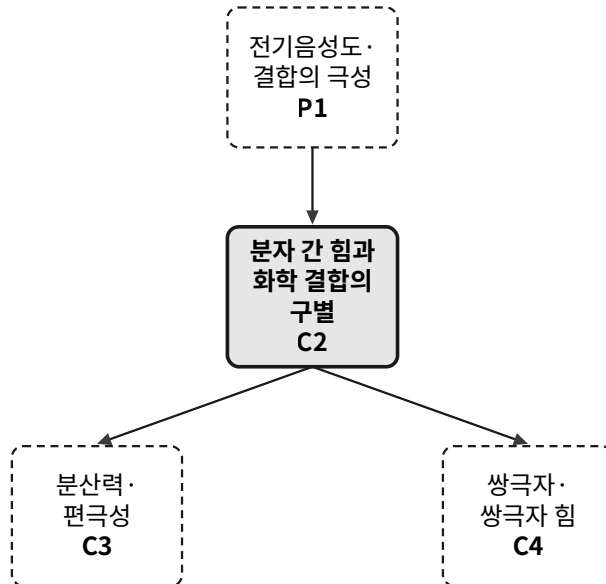
왜 분자 간 힘인가? 제 1장은 끓는 물에서 출발해, 분자 안의 결합과 분자 사이의 끌림이 크기부터 다르다는 것을 숫자로 보인다. 제 2장에서 극성을 복습한 뒤, 3~5장에서 세 가지 힘을 하나씩 세우고, 6~9장에서 그 힘이 끓는점·증기압·물의 성질·용해를 어떻게 정하는지 보며, 10~13장에서 계면과 물방울로 넓힌다. 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 분자 간 힘인가

새 개념 분자 간 힘과 화학 결합의 구별 · 세기의 크기 비교 · 상태 변화

이어짐 극성 2장 · 수소 결합 5장 · 끓는점 비교 6장 · 증기압 7장

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(C2 분자 간 힘과 화학 결합의 구별)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

물이 끓어도 H₂O는 그대로다

주전자의 김이 차가운 유리창에서 다시 물방울이 된다

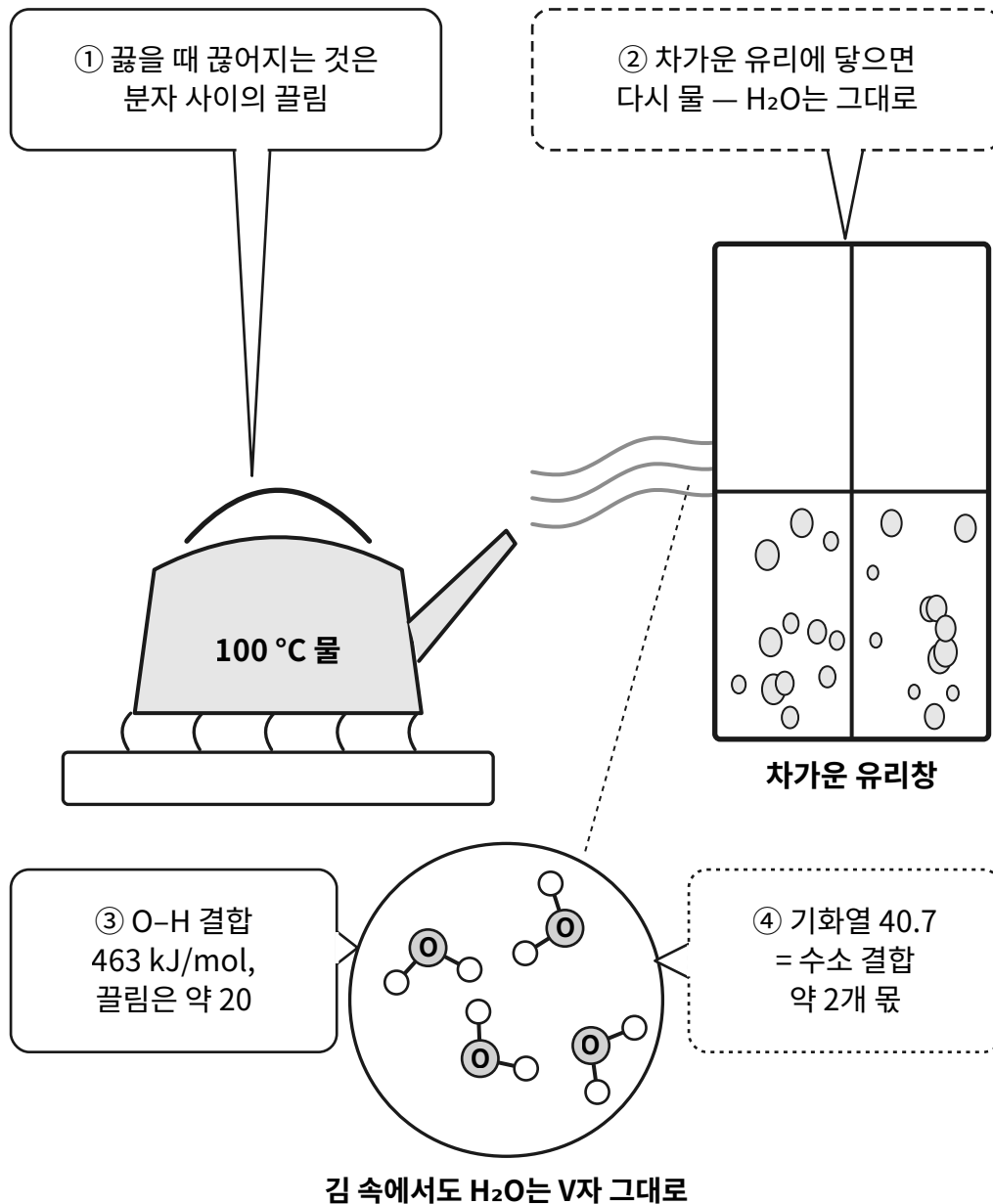


그림 3. 끓는 주전자와 김 서린 유리창 — 주전자에서 나온 수증기가 차가운 유리에 닿으면 다시 물방울이 된다. 끓을 때 끊어진 것은 분자 사이의 끌림이고, H₂O 분자는 그대로다(모식도, 에너지는 1 mol 기준)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 물이 끓을 때 끊어지는 것은 분자 사이의 끌림이며 분자 안의 O-H 결합은 끊어지지 않는다.
2. 분자 사이의 끌림(수소 결합 약 20 kJ/mol)은 O-H 공유 결합(463 kJ/mol)보다 약 20배 약하다.
3. 김이 차가운 유리에서 다시 물이 되는 것이 분자가 그대로라는 증거다.

이 장의 출발점

원자와 분자의 차이, 두 원자가 전자쌍을 나누어 갖는 공유 결합, 고체·액체·기체를 입자의 배열과 움직임으로 보는 입자 모형, 그리고 에너지를 1몰(6.02×10^{23} 개)당으로 세는 kJ/mol 단위를 쓴다. 공유 결합과 분자 모양은 앞 권(화학 결합과 분자 구조)에서 배웠으니 여기서는 필요한 만큼만 다시 짚는다.

토요일 아침, 돌집 과학방의 난로 위에서 주전자가 끓고 있었다. 창유리 아래쪽이 하얗게 흐려졌고, 하린이 손가락으로 유리를 문지르자 물방울이 주르륵 흘러내렸다.

하린 교수님, 주전자 물이 줄어드는데 그 물이 유리창에 붙은 거죠? 그럼 끓을 때 물이 산소랑 수소로 쪼개지는 건 아니에요?

석 교수 좋은 질문으로 시작하는구나. 쪼개진다면 유리에 붙는 것은 산소와 수소 기체여야 하는데, 유리에 맺힌 것은 다시 물이다. 끓는 동안 H_2O 라는 분자는 하나도 부서지지 않았다는 뜻이지.

태오 그럼 끓을 때는 뭐가 끊어지는 거예요? 열을 그렇게 많이 넣는데요.

석 교수 그게 이 책 전체의 질문이다. 끓을 때 끊어지는 것은 분자 **안**의 결합이 아니라 분자 **사이**의 끌림이다. 이 끌림을 **분자 간 힘**(intermolecular force)이라고 한다. 오늘은 이 힘이 무엇이고, 화학 결합과 얼마나 다른지부터 보자.

1.1 물이 끓을 때 무엇이 끊어지나

석 교수 물 분자 하나는 산소 원자 하나에 수소 원자 둘이 공유 결합으로 붙은 굵은 분자다. 이 O-H 결합이 분자 **안**의 힘, 곧 화학 결합이다. 그런데 컵 속의 물 분자들은 서로 따로 노는 것이 아니라 이웃 분자와 계속 끌어당기며 붙어 있다. 이것이 분자 **사이**의 힘이다.

이모 그러면 얼음이 녹거나 물이 끓는 건 그 이웃끼리의 손을 놓는 거군요.

석 교수 네, 바로 그거예요. 얼음에서는 이웃과 손을 꼭 잡고 제자리에서 떨기만 하고, 물에서는 손을 잡았다 놓았다 하면서 미끄러져 다니고, 수증기가 되면 손을 완전히 놓고 멀리 날아 갑니다. 어느 단계에서도 분자 자체는 H_2O 그대로예요.

태오 증거가 김 서린 유리 말고도 있어요?

석 교수 양으로 확인할 수 있다. 물 18 g, 곧 1 mol을 끓여 수증기로 만든 뒤 다시 식혀 모으면 18 g의 물이 그대로 돌아온다. 만약 O-H 결합이 끊어졌다면 수소 기체 2 g과 산소 기체 16 g이 생겼을 텐데, 수소 기체는 성냥불을 대면 팽 하고 탄다. 주전자 김에 성냥을 대도 아무 일도 없지.

하린 그럼 물을 진짜로 산소와 수소로 쪼개려면요?

석 교수 전기 분해처럼 분자 안의 결합을 끊는 화학 변화가 필요하다. 끓는 것은 물질의 종류가 바뀌지 않는 물리 변화, 전기 분해는 새 물질이 생기는 화학 변화다. 이 둘을 가르는 기준이 “분자 안의 결합이 끊어지느냐”이다.

이모 부엌에서도 구별이 되겠네요. 설탕을 물에 녹이면 물리 변화, 프라이팬에서 갈색 캐러멜이 되면 화학 변화인가요?

석 교수 네, 정확해요. 녹인 설탕물은 물을 날리면 다시 하얀 설탕이 나오지만, 캐러멜은 아무리 해도 설탕으로 돌아오지 않아요. 열을 받아 설탕 분자 안의 결합이 끊어지고 다른 분자가 생겼기 때문이지요. 확인하는 방법은 언제나 같습니다. “되돌렸을 때 처음 물질이 그대로 나오는가.”

태오 그런데 분자 사이의 끌림은 정체가 뭐예요? 결합처럼 전자를 나누는 것도 아니라면서요.

석 교수 전기적 인력이다. 분자 속 전자 구름이 한쪽으로 치우쳐 있거나 순간적으로 출렁이면, 분자의 한쪽 끝은 약간 음(-), 다른 쪽 끝은 약간 양(+)을 띤다. 이웃 분자의 반대 전하 끝과 끌어당기는 것이 분자 간 힘의 정체야. 전하가 온전한 +1, -1이 아니라 일부분이고, 거리가 멀어서 약한 거지. 어떻게 치우치는지가 2장과 3장의 이야기다.

1.2 결합과 끌림은 세기부터 다르다

석 교수 이제 두 힘의 세기를 숫자로 비교하자. 물 분자의 O-H 결합 1 mol을 끊는 데는 463 kJ이 든다. 이것이 O-H **결합 에너지**다. 한편 100 °C의 물 1 mol을 같은 온도의 수증기로 바꾸는 데는 40.7 kJ이 든다. 이것을 **기화열**이라고 한다.

태오 물 분자 하나에 O-H 결합이 두 개니까, 1 mol의 물에서 결합을 다 끊으려면 $2 \times 463 = 926$ kJ이네요.

석 교수 맞다. **그림 4**에 이 값들을 한 축 위에 막대로 세웠다. 분자 사이의 끌림 가운데 가장 센 수소 결합이 약 20 kJ/mol이고, 메테인(CH₄)처럼 아주 약하게 끌리는 분자는 기화열이 8.2 kJ/mol밖에 안 된다.

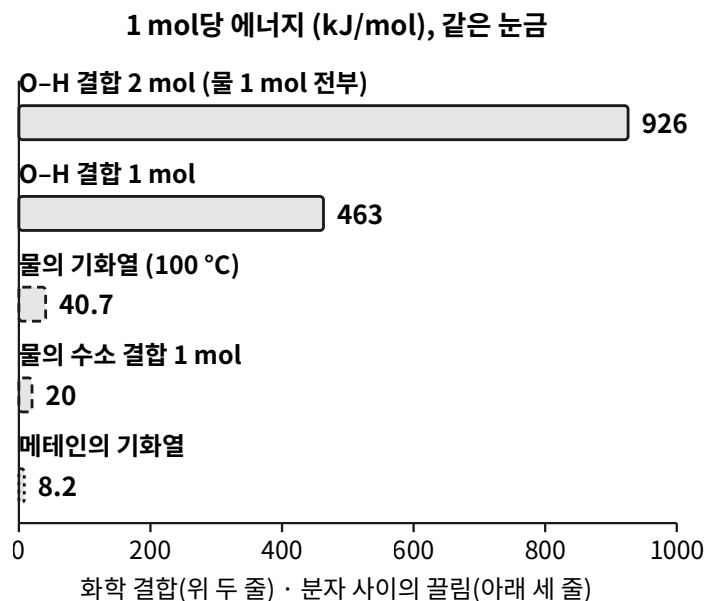


그림 4. 결합 에너지와 분자 사이 끌림의 크기 비교(kJ/mol) — O-H 결합 463, 물 분자 1 mol의 O-H 결합 전부 926, 물의 기화열 40.7(100 °C), 물의 수소 결합 하나 약 20, 메테인의 기화열 8.2. 같은 축에 그리면 분자 사이 끌림은 막대 바닥에 붙어 있을 만큼 작다.

하린 463짜리 막대 옆에 20짜리는 거의 안 보여요.

석 교수 그 “안 보임”이 핵심이다. 분자 사이의 끌림은 화학 결합보다 한 자릿수 이상 약하다. 그래서 물을 끓여도 결합은 멀쩡하고 끌림만 끊어지는 거야. 두 힘을 **표 3**에 견주어 두었다.

표 3. 화학 결합과 분자 간 힘의 비교 — 물을 예로 든 값(에너지는 1 mol 기준, 거리는 대표값)

구분	화학 결합(O-H 공유 결합)	분자 간 힘(물 분자 사이의 수소 결합)
무엇 사이	한 분자 안의 원자와 원자	이웃한 분자와 분자
에너지 크기	463 kJ/mol	약 20 kJ/mol
거리	약 96 pm(O-H)	약 180 pm(O...H), O...O 약 280 pm
끊어지면	새 물질이 생긴다(화학 변화)	상태만 바뀐다(물리 변화)
관련 성질	반응열, 반응성	녹는점·끓는점·증기압·표면장력·용해

이모 거리도 다르네요. 분자 사이는 두 배쯤 멀어요.

석 교수 네. 분자 안의 원자는 전자쌍을 나누어 가질 만큼 바짝 붙어 있고, 이웃 분자는 그보다 멀리서 전기적으로 끌어당길 뿐이에요. 거리가 멀고 나누는 전자도 없으니 약할 수밖에요.

문제 1.1

100 °C에서 물 1 mol을 기화하는 데 40.7 kJ이 든다. 물 1 mol의 O-H 결합을 모두 끊는 데 드는 에너지(O-H 결합 에너지 463 kJ/mol)는 기화열의 몇 배인가?

태오 물 1 mol에 O-H 결합이 2 mol이니깐 $2 \times 463 = 926$ kJ이에요. $926 \div 40.7 = 22.75$ 니까 약 22.8배요.

석 교수 정답이다. 약 22.8배. 숫자 하나 더 보탬가? 물 1 g으로 바꾸면 기화열은 $40.7 \text{ kJ} \div 18 \text{ g} = 2.26 \text{ kJ/g}$ 이다. 라면 물 500 g을 모두 날려 보내려면 약 1 130 kJ이 드는 셈이지. 이렇게 큰 에너지인데도 결합을 끊는 데 비하면 스무 분의 일에 불과하다.

하린 그런데 40.7 kJ도 작지는 않은데요. 왜 분자 사이 끌림 하나(20 kJ)보다 커요?

석 교수 날카롭구나. 그게 다음 문제다.

문제 1.2

물 분자 사이의 수소 결합 하나의 세기를 20 kJ/mol로 잡을 때, 물이 기화하면서 분자 하나가 평균 몇 개의 수소 결합을 끊는 셈인가? 액체 물에서 분자 하나가 평균 3~4개의 수소 결합에 참여한다는 사실과 견주어 보라.

태오 $40.7 \div 20 = 2.04$ 니까 약 2개요. 그런데 이웃이 3~4개라면서요? 왜 2개뿐이에요?

석 교수 수소 결합 하나는 분자 두 개가 나누어 가진다. 분자 하나가 4개의 수소 결합에 참여해도, 결합 하나를 둘이서 반씩 나누니 분자 하나의 몫은 $4 \div 2 = 2$ 개다. 3개에 참여하면 1.5개고. 그러니 “분자당 약 2개”라는 계산값은 액체 물의 실제 모습과 잘 맞는다.

이모 악수 한 번에 두 사람이 참여하는 것과 같네요. 네 사람과 악수한 사람이 자기 몫으로 셀 수 있는 악수는 반쪽짜리 넷, 그러니까 두 번 몫이고요.

석 교수 좋은 비유네요. 정답은 약 2.0개입니다. 이 셈법은 10장에서 표면장력을 어림할 때 다시 써요.

1.3 상태 변화는 끌림과 열운동의 줄다리기

석 교수 이제 녹는점과 끓는점이 무엇인지 분자 수준에서 보자. 분자는 온도가 있는 한 늘 움직인다. 이 무작위한 움직임을 **열운동**이라 한다. 열운동의 크기를 나타내는 눈금으로 RT 를 쓰는데, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서는 $8.314 \times 298 = 2.48\text{ kJ/mol}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서는 $8.314 \times 373 = 3.10\text{ kJ/mol}$ 이다.

태오 수소 결합 20 kJ/mol 보다 훨씬 작네요. 그런데 어떻게 끓어져요?

석 교수 평균이 작다는 거지 모든 분자가 그만큼 가진 건 아니다. 분자마다 에너지가 다르고, 운 좋게 큰 에너지를 얻은 분자가 표면에서 끌림을 이기고 빠져나간다. 그래서 물은 끓는 점보다 낮은 온도에서도 조금씩 증발한다. 이 이야기는 7장에서 증기압으로 자세히 한다. 여기서는 큰 그림만 잡자. **그림 5**를 보아라.

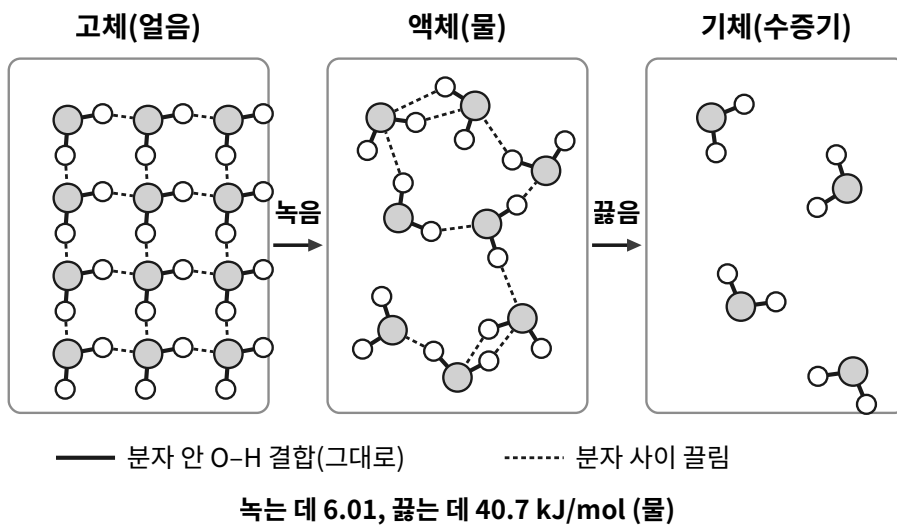


그림 5. 고체·액체·기체의 입자 모형 — 실선은 분자 안의 O-H 결합, 점선은 분자 사이의 끌림이다. 녹고 끓을 때 점선은 줄어들고 끊어지지만 실선은 세 상태 모두에서 그대로다(모식도, 분자 간 거리는 실제 비율이 아니다).

하린 고체에서는 점선이 촘촘하고, 액체에서는 군데군데, 기체에서는 하나도 없어요. 그런데 실선 V 모양은 셋 다 똑같네요.

석 교수 그렇다. 녹는다는 것은 끌림의 그물 일부가 풀려 분자가 자리를 바꿀 수 있게 되는 것이고, 끓는다는 것은 끌림을 거의 다 끊고 분자가 서로 멀리 떨어지는 것이다. 그래서 같은 물이라도 융해열(6.01 kJ/mol)보다 기화열(40.7 kJ/mol)이 약 6.8배 크다. 녹을 때는 끌림을 조금만 끊으면 되지만, 끓을 때는 거의 전부 끊어야 하니까.

태오 부피도 엄청 변화잖아요. 물 1 mol 이 수증기가 되면 얼마나 커져요?

석 교수 계산해 보렴. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm 에서 기체 1 mol 의 부피는?

태오 $V = nRT/P = 1 \times 0.082 \times 373 \div 1 = 30.6\text{ L}$ 요. 물 18 g 은 약 18 mL 니까 $30.6 \div 0.018 = 1\text{ }700$ 배예요.

석 교수 맞다. 약 $1\text{ }700$ 배. 기체가 되면 분자 사이가 그만큼 멀어져서 끌림이 사실상 0이 된다. 그래서 기체 법칙 $PV = nRT$ 는 분자 사이의 끌림을 무시한 식인데도 잘 맞는 거야. 반대로 끌림을 무시할 수 없는 고압·저온에서는 이 식이 어긋나기 시작한다.

하린 분자 하나로 따지면 얼마나 작은 에너지예요?

석 교수 1 mol당 값을 아보가드로 수로 나누면 된다. 수소 결합 하나는 $20\,000\text{ J} \div 6.02 \times 10^{23} = 3.3 \times 10^{-20}\text{ J}$ 이고, 25 °C에서 분자 하나의 열운동 눈금 kT (볼츠만 상수 $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$)는 $1.38 \times 10^{-23} \times 298 = 4.1 \times 10^{-21}\text{ J}$ 이다. 둘의 비는 약 8이다. 1 mol로 따진 $20 \div 2.48 = 8.1$ 과 같은 값이지.

태오 단위만 바꾼 거니까 비는 같아야 하네요. 시험에서는 어느 쪽으로 써야 해요?

석 교수 문제가 주는 단위를 따르면 된다. 서울대 기출처럼 표면장력을 J/m^2 로 어렵하라는 문제는 분자 하나당 에너지가 필요하고, 끓는점 비교나 기화열 문제는 kJ/mol 로 충분하다. 어느 쪽이든 아보가드로 수를 곱하거나 나누는 것 한 번이다.

이모 그러면 녹는점, 끓는점이 높다는 건 분자 사이의 끌림이 세다는 말이네요.

석 교수 네, 이 단원 전체를 꿰는 한 문장이예요. **끌림이 셀수록 녹는점·끓는점이 높고, 증발이 느리고, 표면장력이 크다.** 열운동이라는 “흩어지려는 힘”과 분자 간 힘이라는 “붙어 있으려는 힘”의 줄다리기에서, 끌림이 센 물질일수록 더 높은 온도가 되어야 줄이 넘어갑니다.

1.4 분자량만으로는 안 된다

석 교수 그러면 끌림의 세기는 무엇이 정할까? 가장 먼저 떠오르는 답은 “무거운 분자일수록 세게 끌린다”이다. **그림 6**를 보자. 작은 분자 여덟 개의 물 질량과 끓는점을 찍었다.

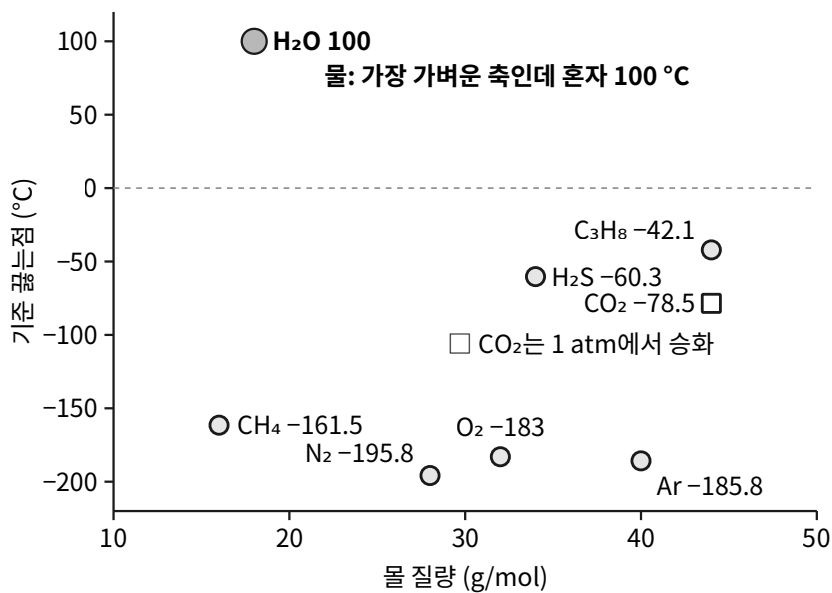


그림 6. 작은 분자의 몰 질량과 기준 끓는점 — N₂(28), O₂(32), Ar(40), CH₄(16), C₃H₈(44), CO₂(44, 1 atm에서 -78.5 °C에 승화), H₂S(34), H₂O(18). 대부분 몰 질량이 커질수록 끓는점이 올라가지만 물은 가장 가벼운 축인데도 혼자 100 °C로 튀어 오른다.

하린 오른쪽으로 갈수록 대체로 올라가요. 그런데 물만 왼쪽 위에 혼자 떨어져 있어요!

석 교수 그게 이 단원의 첫 번째 수수께끼다. 같은 16족 수소 화합물인 H₂S는 몰 질량이 34로 물(18)의 거의 두 배인데 끓는점은 -60.3 °C다. 물은 100 °C. 무거운 쪽이 160 °C 넘게 낮게 끓는 거야.

태오 그럼 물 분자 사이에는 뭔가 특별한 끌림이 있는 거네요. 아까 말씀하신 수소 결합이요?

- 석 교수** 그렇다. 하지만 서두르지 말자. 그 특별한 끌림을 이해하려면 먼저 분자 안에 전하가 어떻게 치우쳐 있는지, 곧 극성을 알아야 한다. 그게 2장이다. 그리고 극성이 없는 분자끼리도 끌린다는 사실(3장), 극성 분자끼리의 끌림(4장)을 차례로 세운 뒤 5장에서 수소 결합을 만난다.
- 이모** 질소(28)와 아르곤(40)은 몰 질량 차이가 큰데 끓는점은 비슷하네요. -195.8°C 와 -185.8°C 요.
- 석 교수** 잘 보셨어요. 몰 질량은 끌림을 정하는 여러 요인 가운데 하나일 뿐이라는 증거예요. 분자의 모양, 전자의 수, 전하의 치우침이 함께 작용합니다. 6장에서 이것을 “끓는점 비교 순서도”로 묶어요.
- 태오** 그러면 몰 질량이 아예 쓸모없는 건 아니죠? 그래프에서 메테인(16)보다 프로페인(44)이 훨씬 높게 끓잖아요. -161.5°C 와 -42.1°C 요.
- 석 교수** 물론 쓸모 있다. 메테인과 프로페인은 둘 다 탄소와 수소만 있는 비슷한 분자라서, 다른 조건이 같을 때는 큰 분자가 더 세게 끌린다. 탄소가 25개쯤 되는 양초의 파라핀은 상온에서 고체이고. 문제는 “다른 조건이 같을 때”라는 단서야. 물과 황화 수소처럼 조건이 다른 몰 질량 비교는 엉뚱한 답을 낸다.
- 하린** 비교하려면 먼저 같은 종류인지부터 봐야 하는 거네요.
- 석 교수** 바로 그거다. 기출 문제의 함정은 거의 언제나 여기에 있다. 몰 질량이 큰 순서대로 끓는점을 쓰라고 유혹하는 분자 넷을 주고, 그 안에 수소 결합을 하는 분자를 하나 숨겨 둔다. 그 분자를 찾아내는 눈이 이 단원에서 길러야 할 첫 번째 능력이다.

1.5 이 단원의 지도

- 석 교수** 오늘 배운 것을 바탕으로 앞으로의 길을 그려 두자. 분자 사이의 끌림에는 크게 세 가지가 있다. 모든 분자 사이에 있는 **분산력**, 극성 분자끼리의 **쌍극자-쌍극자 힘**, 그리고 $\text{F}\cdot\text{O}\cdot\text{N}$ 에 붙은 수소가 만드는 **수소 결합**이다. 이 셋을 합쳐 판데르발스 힘이라는 이름으로 부르기도 하는데, 교과서마다 수소 결합을 넣기도 하고 따로 떼기도 하니 답안에서는 세 가지 이름을 구체적으로 쓰는 편이 안전하다.

분자 간 힘의 이름들

교과서와 기출 제시문은 같은 힘을 여러 이름으로 부른다. 분산력은 런던 분산력, 순간 쌍극자-유발 쌍극자 힘이라고도 하고, 쌍극자-쌍극자 힘은 쌍극자-쌍극자 인력, 극성 분자 사이의 힘이라고도 한다. 판데르발스 힘은 분산력과 쌍극자-쌍극자 힘을 묶어 부르는 경우가 많다. 이 책은 “분산력 · 쌍극자-쌍극자 힘 · 수소 결합” 세 이름으로 통일하고, 제시문이 다른 이름을 쓰면 그 이름을 따라 쓴다.

- 태오** 그다음은요?
- 석 교수** 이 세 힘이 물질의 성질을 정한다. 끓는점과 녹는점(6장), 증기압과 기화열(7장), 물의 특이한 성질(8장), 무엇이 무엇에 녹는가(9장). 그리고 마지막으로 액체의 표면, 곧 **계면**으로 간다. 표면의 분자는 이웃이 적어 손해를 보고, 그 손해가 표면장력(10장), 모세관 현상(11장), 비누의 미셀(12장), 구름 방울의 탄생(13장)을 만든다.
- 하린** 결국 전부 “분자끼리 얼마나 세게 끌리나” 하나로 설명하는 거네요.

석 교수 그렇다. 시험에서도 끓는점 비교, 증기압 계산, 표면장력 추정, 미셀 설명이 따로따로 나오는 것 같지만, 답안의 첫 문장은 늘 같다. “이 분자들 사이에 작용하는 힘은 무엇이고 그 세기는 어떠한가.”

“수소 결합”과 “O-H 결합”을 섞어 쓰지 않는다

수소 결합은 한 분자의 H와 다른 분자의 O(또는 F, N) 사이의 끌림이다. 물이 끓을 때 “수소 결합이 끊어진다”는 맞지만 “O-H 결합이 끊어진다”는 틀린 답이다. 답안에서 ‘결합’이라는 낱말을 쓸 때는 분자 안인지 분자 사이인지를 반드시 밝힌다.

핵심 분자 간 힘을 화학 결합과 구별하는 4단계

1. 무엇과 무엇 사이의 힘인지 묻는다. 한 분자 안의 원자 사이면 화학 결합, 이웃 분자 사이면 분자 간 힘이다.
2. 세기를 비교한다. O-H 결합 463 kJ/mol, 물의 수소 결합 약 20 kJ/mol로 분자 간 힘이 약 20배 약하다.
3. 상태 변화(녹음·끓음·증발)에서 끊어지는 것은 분자 간 힘뿐이며 분자는 그대로다(물리 변화).
4. 끓는점·녹는점이 높을수록 분자 간 힘이 세다. 단, 몰 질량만으로는 정해지지 않는다(H_2O 18, 100 °C vs H_2S 34, -60.3 °C).

스스로 풀어 보기

1. 물의 융해열은 6.01 kJ/mol, 기화열은 40.7 kJ/mol이다. 기화열이 융해열의 몇 배인지 구하고, 그 차이를 분자 수준에서 한 문장으로 설명하라.
2. “드라이아이스가 승화하면 C=O 결합이 끊어진다.” 이 문장의 잘못을 고쳐 쓰라.
3. 25 °C에서 RT의 값을 kJ/mol 단위로 구하고, 물의 수소 결합 하나(약 20 kJ/mol)의 몇 분의 일인지 구하라. ($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)
4. 몰 질량이 28인 N_2 (-195.8 °C)와 40인 Ar(-185.8 °C)의 끓는점 차이는 몇 °C인가? 이 예가 “분자량이 클수록 끓는점이 높다”는 규칙에 대해 무엇을 말해 주는가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 구별은 4부의 거의 모든 문항에서 첫 문장이 된다. **기출문제 2**(연세대 2024) (219쪽)은 제시문(가)에서 분자 간 힘과 화학 결합을 구별한 뒤 $\text{O}_2 \cdot \text{CH}_3\text{OH} \cdot \text{PH}_3 \cdot \text{Cl}_2$ 의 끓는점을 비교하게 하고, **기출문제 1**(경희대 2026) (205쪽)은 같은 구별 위에서 $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{S} \cdot \text{NH}_3$ 의 끓는점 순서와 밀폐 용기 속 물의 증발을 묻는다. **기출문제 5**(경희대 2020) (246쪽)은 얼음 속 물 분자 하나가 맺는 수소 결합 수를 세게 하는데, 문제 1.2의 “결합 하나를 두 분자가 나눈다”는 셈법이 그대로 쓰인다.

이 장의 참고문헌

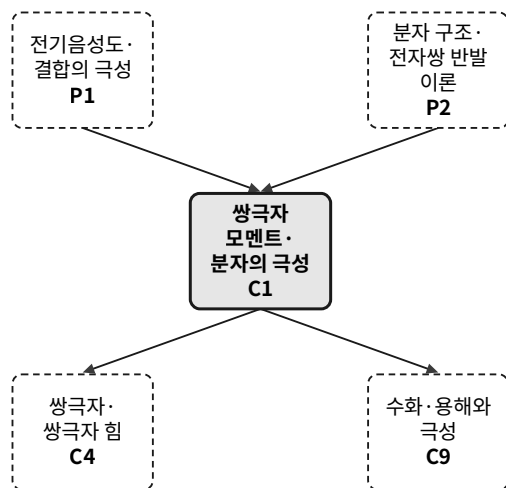
- Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2018). Atkins' physical chemistry (11th ed.). Oxford University Press.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., Stoltzfus, M. W., & Lufaso, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Israelachvili, J. N. (2011). Intermolecular and surface forces (3rd ed.). Academic Press.
- Rumble, J. R. (Ed.). (2019). CRC handbook of chemistry and physics (100th ed.). CRC Press.

제 2장 극성의 복습: 전기음성도에서 쌍극자 모멘트까지

새 개념 전기음성도 차 · 부분 전하 · 쌍극자 모멘트의 벡터 합

이어짐 쌍극자·쌍극자 힘 4장 · 수소 결합 5장 · 수화 9장

이 장의 개념도



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

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

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 4. 제 2장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 1 (경희대 2026년) (205쪽)	염화메테인의 극성·끓는점과 물의 상평형	C1 쌍극자 모멘트·분자의 극성
기출 3 (경북대 2024년) (229쪽)	CO_2 · PCl_3 · SiCl_4 의 구조·극성과 끓는점	C1 쌍극자 모멘트·분자의 극성
기출 10 (연세대 2008년) (301쪽)	물의 수소 결합과 생명, 선형 물의 사고 실험	C1 쌍극자 모멘트·분자의 극성

물줄기는 왜 빨대 쪽으로 휘까

털에 문지른 빨대(음전하)와 가는 수돗물 줄기

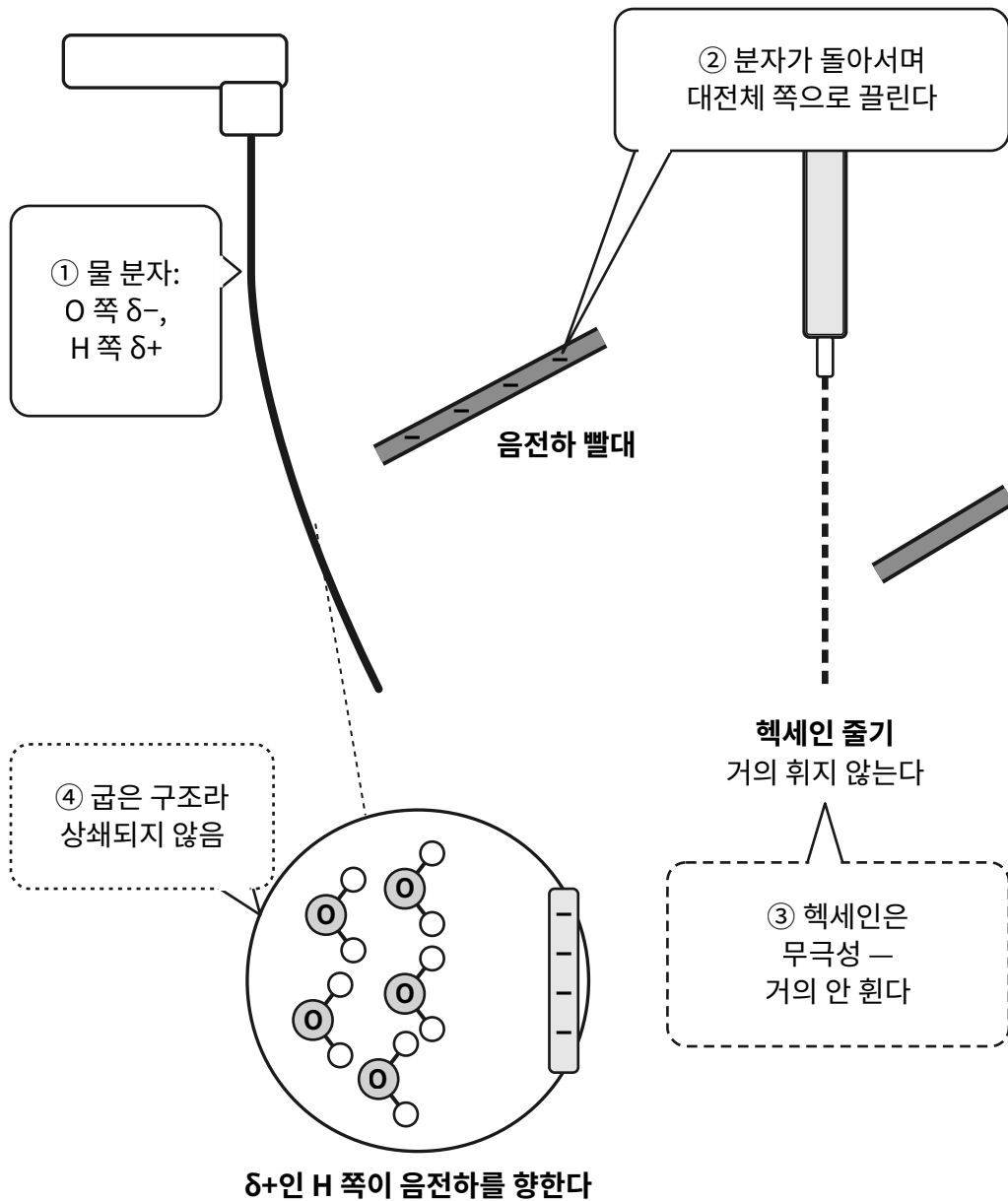


그림 8. 대전된 빨대 쪽으로 휘는 수돗물 줄기 — 털옷에 문지른 빨대를 가는 물줄기 옆에 대면 물줄기가 빨대 쪽으로 휘다. 같은 실험에서 헥세인 줄기는 거의 휘지 않는다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 물줄기가 휘는 것은 물 분자가 극성 분자이기 때문이다.
2. 극성은 결합의 극성과 분자의 모양을 함께 보아야 정해진다.
3. 쌍극자 화살표는 부분 (+)에서 부분 (-) 쪽으로 그린다.

이 장의 출발점

1장의 결론(폴링의 정체는 전기적 인력), 전기음성도(공유 전자쌍을 끌어당기는 정도), 루이스 구조, 그리고 전자쌍 반발 이론으로 정하는 분자 모양(직선형·굽은 형·삼각뿔형·정사면체형)을 쓴다. 모두 앞 권(화학 결합과 분자 구조)의 내용이라 이 장에서는 분자 간 힘에 필요한 부분만 빠르게 복습한다.

수도꼭지에서 가늘게 물이 흘러내렸다. 하린이 털 스웨터에 문지른 플라스틱 빨대를 물줄기 옆에 가져가자, 물줄기가 빨대 쪽으로 활처럼 휘었다.

하린 와, 물이 빨대를 따라와요! 물에 전기가 있어요?

석 교수 물 전체로는 전하가 0이다. 그런데 물 분자 하나하나를 보면 산소 쪽은 약간 음(-), 수소 쪽은 약간 양(+)을 띤다. 이렇게 한 분자 안에서 전하가 치우친 분자를 **극성 분자**라고 한다. 오늘은 그 치우침이 어디서 오는지, 얼마나 큰지를 숫자로 확인한다.

태오 작년에 배웠던 거네요. 전기음성도 차이, 쌍극자 모멘트, 분자 모양. 그런데 늘 헷갈려요.

석 교수 그래서 복습하는 거다. 4장의 쌍극자·쌍극자 힘, 5장의 수소 결합, 9장의 용해가 모두 이 장 위에서 있으니 빈틈없이 다지고 가자.

2.1 전기음성도 차가 만드는 부분 전하

석 교수 두 원자가 전자쌍을 나누어 가질 때, 공유 전자쌍을 자기 쪽으로 끌어당기는 정도를 **전기 음성도**라고 한다. 폴링이 결합 에너지에서 값을 뽑아냈고, 가장 큰 플루오린을 4.0으로 둔다. **그림 9**에 이 책에서 쓸 값을 모았다.

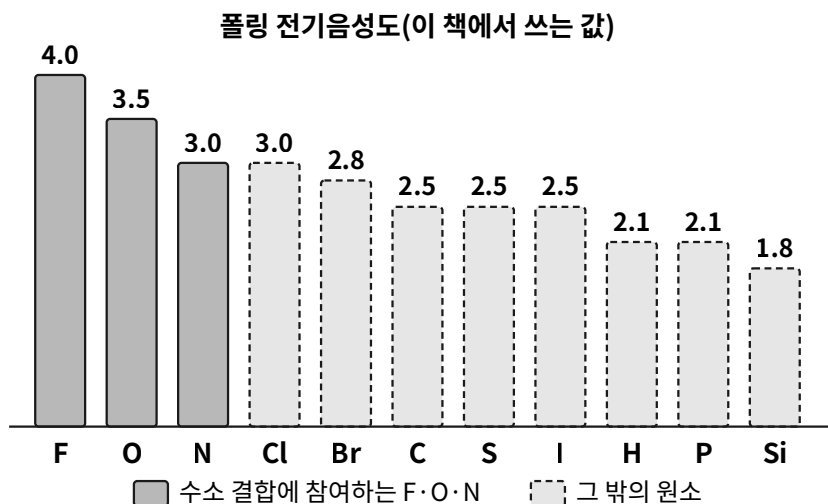


그림 9. 이 책에서 쓰는 폴링 전기음성도 — F 4.0, O 3.5, N 3.0, Cl 3.0, Br 2.8, C 2.5, S 2.5, I 2.5, H 2.1, P 2.1, Si 1.8. 수소 결합에 참여하는 F·O·N(진한 막대)이 맨 위 세 자리를 차지한다.

하린 F, O, N이 제일 커요. 그리고 H는 2.1로 꽤 작네요.

석 교수 이 순서를 외워 두면 5장이 쉬워진다. 이제 HCl을 보자. Cl이 3.0, H가 2.1이니 차이가 0.9다. 공유 전자쌍이 Cl 쪽으로 쏠려서 Cl은 약간 음전하, H는 약간 양전하를 띤다. 이것을 그리스 문자 δ (델타)를 써서 δ^- , δ^+ 로 나타내고 **부분 전하**라고 부른다.

태오 약간이라는 게 얼마나요? 전자 하나의 반쯤이예요?

석 교수 측정한 쌍극자 모멘트에서 거꾸로 계산할 수 있다. 그 전에 쌍극자 모멘트부터 정의하자.

2.2 쌍극자 모멘트와 화살표 표기

석 교수 크기가 같고 부호가 반대인 두 전하 +q와 -q가 거리 r만큼 떨어져 있는 것을 **쌍극자**라고 한다. 그 세기를 나타내는 양이 **쌍극자 모멘트(dipole moment)**이고,

$$\mu = q \times r$$

로 정의한다. 단위로는 디바이(D)를 쓰는데, $1 \text{ D} = 3.336 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ 다. 쌍극자 모멘트는 크기와 방향을 함께 가진 양, 곧 벡터다.

이모 방향이 있다면 화살표로 그리나요? 어느 쪽으로 그려요?

석 교수 좋은 질문이에요. 화학 교과서와 2026년 경희대 기출 제시문은 **부분 양전하(δ^+)에서 부분 음전하(δ^-) 쪽으로** 화살표를 그리고, 꼬리 쪽에 작은 십자(+)를 붙여 표시합니다. 이 책도 그렇게 그려요. 물리학에서는 반대로 -에서 +로 그리기도 하니, 시험에서는 제시문 이 정한 방향을 따르면 됩니다.

문제 2.1

HCl의 쌍극자 모멘트는 1.08 D이고 결합 길이는 127 pm이다. H와 Cl의 부분 전하 δ 는 전자 전하($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)의 몇 %인가? ($1 \text{ D} = 3.336 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$)

태오 $\mu = q \times r$ 이니까 $q = \mu \div r$ 이에요. $\mu = 1.08 \times 3.336 \times 10^{-30} = 3.60 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ 이고, $r = 127 \times 10^{-12} \text{ m}$ 니까 $q = 3.60 \times 10^{-30} \div 1.27 \times 10^{-10} = 2.84 \times 10^{-20} \text{ C}$ 요.

석 교수 좋다. 이제 e로 나누면?

태오 $2.84 \times 10^{-20} \div 1.602 \times 10^{-19} = 0.177$. 약 18 %요.

석 교수 정답이다. HCl의 부분 전하는 약 0.18e, 곧 전자 전하의 약 18 %다. 만약 전자 하나가 완전히 넘어간 이온 결합이었다면 $\mu = 1.602 \times 10^{-19} \times 1.27 \times 10^{-10} = 2.03 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m} = 6.10 \text{ D}$ 가 되었을 거야. 실제 1.08 D는 그 18 %인 셈이지.

하린 그러니까 극성 공유 결합은 전자를 완전히 뺏는 게 아니라 조금 더 가까이 끌어당기는 거네요.

석 교수 그렇다. 전기음성도 차가 0이면 무극성 공유 결합, 차가 커질수록 극성이 커지고, 아주 크면(Na-Cl처럼 2.1) 이온 결합에 가까워진다. 그 사이는 끊어진 계단이 아니라 이어진 비탈이다.

태오 그럼 NaCl도 같은 계산을 해 볼 수 있어요?

석 교수 고체 소금은 이온이 끝없이 늘어난 결정이라 분자 하나를 떼어 볼 수 없지만, 아주 높은 온도의 기체에는 Na-Cl 짝 분자가 있다. 그 쌍극자 모멘트가 약 9.0 D, 결합 길이가 236 pm이다. 전자 하나가 완전히 넘어갔다면 몇 D일지 계산해 보렴.

태오 $1.602 \times 10^{-19} \times 2.36 \times 10^{-10} = 3.78 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$ 이고, 3.336×10^{-30} 으로 나누면 11.3 D요. $9.0 \div 11.3 = 0.79$, 약 79 %네요.

석 교수 그렇다. HCl은 18 %, 기체 NaCl은 79 %. 이 비율을 흔히 “이온성”이라고 부른다. 전기음성도 차가 0.9에서 2.1로 커지면 이온성이 크게 된다는 것이 숫자로 보이지.

이모 그러니까 이온 결합과 공유 결합 사이에 금을 딱 긋기는 어렵겠네요.

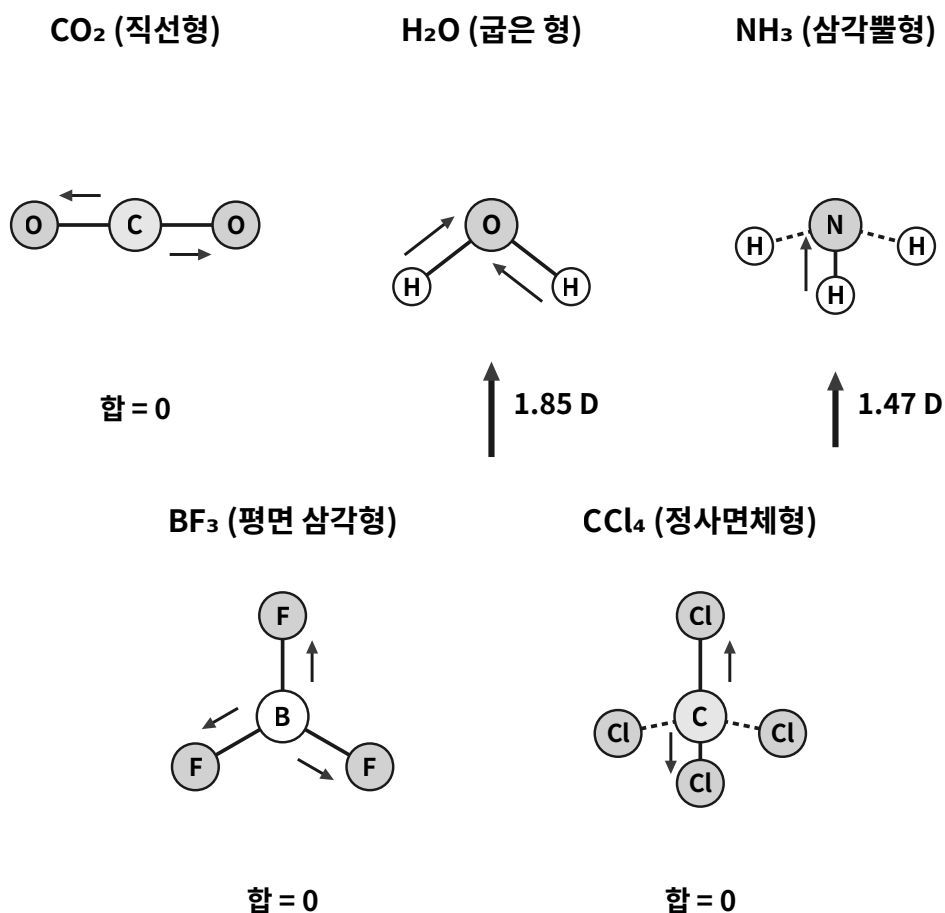
석 교수 네. 교과서는 편의상 금속과 비금속 사이를 이온 결합, 비금속끼리를 공유 결합으로 나누지만, 실제로는 이온성이 0 %에서 100 % 가까이까지 이어져 있어요. 이 책에서 다루는 분자들은 대부분 그 비탈의 아래쪽, 곧 극성 공유 결합 쪽에 있습니다.

2.3 분자 구조가 극성을 정한다

석 교수 이제 중요한 단계다. 결합이 극성이어도 분자가 극성이라는 보장은 없다. CO_2 를 보자. $\text{C}=\text{O}$ 결합은 전기음성도 차가 1.00이나 되는 극성 결합이야. 그런데 CO_2 의 쌍극자 모멘트는 0이다.

태오 직선형이라서요. $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ 에서 양쪽 $\text{C}=\text{O}$ 쌍극자가 크기는 같고 방향이 정반대라 더하면 0이 돼요.

석 교수 맞다. 분자의 쌍극자 모멘트는 결합 쌍극자들의 **벡터 합**이다. **그림 10**에 다섯 분자의 벡터 합을 실제로 계산해 그렸다.



얇은 화살표: 결합 쌍극자($\delta+ \rightarrow \delta-$, 앞뒤로 향한 결합은 생략)
 굵은 화살표: 분자 전체의 쌍극자(길이는 D에 비례)

그림 10. 결합 쌍극자의 벡터 합 — 결합 쌍극자(얇은 화살표, $\delta+ \rightarrow \delta-$)를 머리-꼬리로 이어 더한 결과(굵은 화살표). $\text{CO}_2 \cdot \text{CCl}_4 \cdot \text{BF}_3$ 는 대칭이라 0, H_2O 는 1.51 D 두 개가 104.5° 로 만나 1.85 D, NH_3 는 1.32 D 세 개가 삼각뿔로 모여 1.47 D가 된다(화살표 길이는 D에 비례).

하린 물은 굽어 있어서 두 화살표가 위쪽으로 같이 향하니까 다 지워지지 않는 거죠?

석 교수 그렇다. 반대로 물이 CO₂처럼 직선이었다면 쌍극자 모멘트가 0이 되어, 대전된 빨대에 물 줄기가 휘지 않았을 거다. 그 경우 물의 성질이 얼마나 달라질지는 4부 기출에서 사고 실험으로 다룬다.

문제 2.2

H₂O의 쌍극자 모멘트는 1.85 D, H-O-H 결합각은 104.5°이다. O-H 결합 하나의 쌍극자 모멘트를 구하라.

태오 두 결합 쌍극자가 104.5°로 벌어져 있으니깐 $1.85 = 2 \times \mu(\text{O-H})$... 아, 아니다. 그냥 더하면 안 되죠?

석 교수 그렇다. 벡터니까 이등분선 방향 성분만 더해진다. 각 화살표가 이등분선과 이루는 각은?

태오 $104.5 \div 2 = 52.25^\circ$ 요. 그 방향 성분은 $\mu(\text{O-H}) \times \cos 52.25^\circ$ 니까 $1.85 = 2 \times \mu(\text{O-H}) \times \cos 52.25^\circ$. $\cos 52.25^\circ = 0.612$ 이니깐 $\mu(\text{O-H}) = 1.85 \div (2 \times 0.612) = 1.51$ D 예요.

석 교수 정답이다. 1.51 D. 가로 성분은 서로 반대라 지워지고 세로 성분 0.925 D 두 개가 더해져 1.85 D가 된다. 같은 방법으로 NH₃를 풀면 N-H 하나가 1.32 D다. 삼각뿔의 세 결합이 대칭축과 이루는 각의 코사인인 0.372 라서 $3 \times 1.32 \times 0.372 = 1.47$ D가 되지.

이모 그럼 정리하면, 극성 분자가 되려면 극성 결합이 있어야 하고, 모양이 비대칭이어야 하는 거네요.

석 교수 네, 두 조건을 모두 만족해야 해요. 표 5에 이 책에서 자주 쓰는 분자들을 모아 두었습니다.

태오 비공유 전자쌍은요? NH₃에는 질소 위에 비공유 전자쌍이 하나 있잖아요. 그것도 쌍극자에 영향을 줘요?

석 교수 준다. 비공유 전자쌍은 질소 위쪽에 전자 구름을 만들어 그 자체로 쌍극자에 보탠다. 위에서 구한 N-H 1.32 D는 사실 그 효과까지 섞인 “유효값”이야. 재미있는 비교가 NF₃다. 모양은 NH₃와 같은 삼각뿔인데 쌍극자 모멘트는 0.23 D밖에 안 된다. N-F 결합에서는 전자가 F 쪽, 곧 아래로 끌려가는데 비공유 전자쌍은 위쪽에 있어서 둘이 서로 상쇄하기 때문이다. NH₃에서는 N-H 쌍극자도 위쪽(N 쪽)을 향하니 비공유 전자쌍과 같은 방향으로 더해지고. 이것은 교과 밖 심화이니 “모양이 같아도 결합의 방향에 따라 극성 크기가 크게 다를 수 있다” 정도로 기억하면 된다.

표 5. 자주 쓰는 분자의 구조와 쌍극자 모멘트 — 기체 상태 측정값(D), 결합각은 실측값

분자	분자 구조	결합각	쌍극자 모멘트(D)	극성
H ₂ O	굽은 형	104.5°	1.85	극성
NH ₃	삼각뿔형	107°	1.47	극성
H ₂ S	굽은 형	92.1°	0.95	극성
HCl	직선형(이원자)	—	1.08	극성
PCl ₃	삼각뿔형	100.3°	0.56	극성
CH ₃ Cl	사면체형	약 109.5°	1.87	극성
CH ₂ Cl ₂	사면체형	약 109.5°	1.60	극성
CHCl ₃	사면체형	약 109.5°	1.04	극성

분자	분자 구조	결합각	쌍극자 모멘트(D)	극성
CO ₂	직선형	180°	0	무극성
BF ₃	평면 삼각형	120°	0	무극성
CH ₄	정사면체형	109.5°	0	무극성
CCl ₄	정사면체형	109.5°	0	무극성

하린 H₂S는 물이랑 모양이 같은데 쌍극자 모멘트가 절반쯤이네요.

석 교수 S-H 결합의 전기음성도 차가 $2.5 - 2.1 = 0.4$ 로 O-H(1.4)보다 훨씬 작기 때문이다. 결합 각도 92.1°로 더 좁지만, 각이 좁으면 오히려 성분이 커지는 쪽이니 차이의 주된 원인은 결합의 극성이다. 2026년 경희대 기출이 바로 이 표의 값을 주고 H₂O·H₂S·NH₃의 끓는점 순서를 묻는다.

이모 표에서 HCl(1.08 D)과 H₂S(0.95 D)는 비슷하고, H₂O와 CH₃Cl은 둘 다 1.8 D 남짓이네요. 그런데도 끓는점은 100 °C와 -24.2 °C로 전혀 다르구요.

석 교수 바로 그 차이를 만드는 것이 5장의 수소 결합이에요. 쌍극자 모멘트가 비슷해도 F·O·N에 직접 붙은 수소가 있느냐 없느냐가 끌림의 세기를 크게 갈라놓습니다.

2.4 같은 원자 수, 다른 극성

석 교수 이제 시험이 좋아하는 비교로 가 보자. 메테인의 수소를 염소로 하나씩 바꾼 네 분자 CH₃Cl, CH₂Cl₂, CHCl₃, CCl₄다. **그림 11**를 보자.

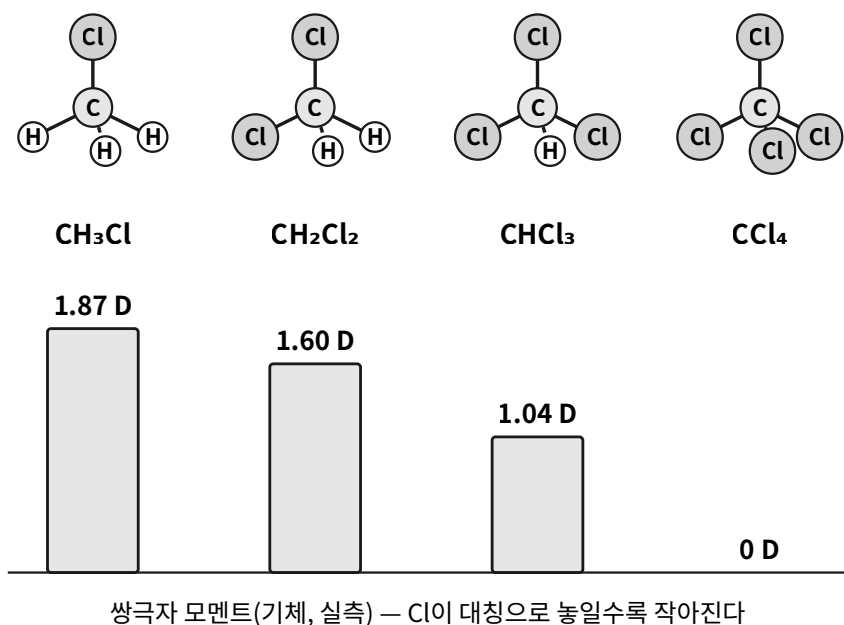


그림 11. 염화메테인 네 분자의 입체 구조와 실측 쌍극자 모멘트 — CH₃Cl 1.87 D, CH₂Cl₂ 1.60 D, CHCl₃ 1.04 D, CCl₄ 0 D. 염소가 대칭으로 놓일수록 C-Cl 쌍극자들이 서로 상쇄된다.

태오 염소가 많아질수록 극성이 작아지네요? 극성 결합이 많아지는데요.

석 교수 그게 함정이다. CCl_4 는 C-Cl 결합이 넷이나 있지만 정사면체의 네 꼭짓점을 향하니 벡터 합이 0이다. 염소 셋이면 넷째 자리 하나만 비고, 염소 하나면 셋이 빈다. 대칭에서 얼마나 벗어났는지가 극성을 정하는 거야. 해설식으로 쓰면 “Cl이 대칭으로 놓일수록 쌍극자의 상쇄가 커진다.”

단순한 벡터 합만으로는 순서가 다 맞지 않는다(교과 밖 심화)

C-H 쌍극자를 0으로 두고 C-Cl 쌍극자 m 만 정사면체 방향으로 더하면 CH_3Cl 은 1.00 m , CH_2Cl_2 는 $2 \times \cos 54.7^\circ = 1.15 m$, CHCl_3 는 1.00 m , CCl_4 는 0이 되어 CH_2Cl_2 가 가장 크게 나온다. 실측 순서 $\text{CH}_3\text{Cl}(1.87) > \text{CH}_2\text{Cl}_2(1.60) > \text{CHCl}_3(1.04) > \text{CCl}_4(0)$ 는 C-H 결합의 작은 쌍극자와, 한 결합의 쌍극자가 이웃 결합의 전자를 편극시키는 효과까지 더해진 결과다. 시험에서는 실측값이나 제시문 해설의 논리(대칭으로 놓일수록 상쇄)를 따른다.

이모 같은 원자 수인데 모양만 다른 경우도 있나요?

석 교수 1,2-다이클로로에텐이 좋은 예예요. 탄소 이중 결합 양쪽에 Cl이 하나씩 붙는데, 같은 쪽에 있으면 cis, 반대쪽이면 trans라고 해요. cis형은 두 C-Cl 쌍극자가 같은 쪽을 향해 1.90 D, trans형은 정반대라 0 D입니다. 그래서 끓는점도 cis 60.3 °C, trans 47.5 °C로 극성인 cis가 높아요. 분자식이 $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ 로 똑같은데도요.

태오 분자식만 보고는 극성을 판단할 수 없다는 증거네요.

하린 cis형에서 두 C-Cl 쌍극자는 같은 쪽을 향하지만 나란하지는 않잖아요. 그럼 1.90 D는 어떻게 나와요?

석 교수 이중 결합 탄소의 결합각이 약 120°라서 두 C-Cl 결합은 서로 약 60° 벌어진 채 같은 쪽을 향한다. 결합 쌍극자가 m 이면 합은 $2m \times \cos 30^\circ = 1.73m$ 이다. trans형은 두 화살표가 한 직선 위에서 정반대라 0이고. 여기서도 C-H의 작은 쌍극자와 편극 효과가 끼어들어 실측값과 정확히 맞추기는 어렵지만, “cis는 극성, trans는 무극성”이라는 결론은 벡터 합만으로 충분하다.

태오 결국 판정 순서는 루이스 구조를 그리고, 분자 모양을 정하고, 결합 쌍극자를 벡터로 더하는 거네요. 분자식만 보고 건너뛰면 cis와 trans를 구별할 수 없고요.

석 교수 그렇다. 극성 판정은 언제나 “루이스 구조 → 분자 모양 → 결합 쌍극자의 벡터 합” 순서다. 셋 중 하나라도 건너뛰면 답안에서 근거가 빠진다. 2024년 경북대 기출이 $\text{CO}_2 \cdot \text{PCl}_3 \cdot \text{SiCl}_4$ 로 정확히 이 순서를 밝게 한다.

2.5 극성의 실험 증거: 휘는 물줄기

하린 그럼 처음 실험으로 돌아가서, 물줄기는 왜 휘어요? 빨대가 음전하든 양전하든 다 끌려와요?

석 교수 좋은 관찰이다. 빨대를 털에 문지르면 대개 음전하를 띤다. 그러면 물 분자들이 δ^+ 인 수소 쪽을 빨대로 돌리고 끌려온다. 반대로 양전하를 띤 유리 막대를 대면 δ^- 인 산소 쪽을 돌리고 끌려온다. 어느 쪽이든 분자가 몸을 돌려 반대 전하를 가까이 향하니 끌림이 된다.

태오 그럼 헥세인 같은 무극성 액체는 안 휘겠네요.

석 교수 거의 휘지 않는다. 헥세인(C_6H_{14})은 C-H 결합의 극성이 아주 작고 모양도 대칭에 가까워 쌍극자 모멘트가 거의 0이야. 다만 아주 센 대전체를 대면 전자 구름이 살짝 쏠리는 효과로 미세하게 끌리는데, 이 “쏠림”이 3장의 주제인 편극이다.

- 이모** 집에서 해 봐도 되겠네요. 플라스틱 자를 머리카락에 문질러서요.
- 석 교수** 네, 건조한 날에 잘 됩니다. 물줄기는 가늘수록 잘 휘어요. 무게에 비해 끌리는 분자 수가 상대적으로 많기 때문이지요.
- 하린** 그런데 분자가 몸을 돌리면 $\delta+$ 쪽은 끌리고 $\delta-$ 쪽은 밀리잖아요. 둘이 비기면 안 끌려야 하는 것 아니에요?
- 석 교수** 아주 좋은 질문이다. 빨대에 가까운 끝이 받는 끌림이, 조금 더 먼 끝이 받는 밀림보다 크기 때문에 알짜로는 끌린다. 전기력은 거리가 가까울수록 세지니까. 균일한 전기장 속에서는 쌍극자가 돌기만 하고 끌려가지는 않는데, 빨대 근처처럼 가까워질수록 세지는 전기장 속에서는 돌고 나서 끌려온다. 4장에서 극성 분자 둘이 서로 끌리는 것도 같은 원리다. 한 분자의 $\delta+$ 끝이 이웃의 $\delta-$ 끝과 가까이 마주 보도록 배열하면 끌림이 밀림보다 커진다.
- 태오** 그럼 극성이 크면 끓는점도 높겠네요. 오늘 표에서 CH_3Cl 이 1.87 D로 제일 크니까 끓는점도 제일 높겠고요.
- 석 교수** 거기서 멈추자. 그 예상은 4장에서 정면으로 깨진다. 실제로는 CH_3Cl 이 -24.2°C , CCl_4 가 76.7°C 로 극성이 0인 CCl_4 가 100°C 넘게 높게 끓는다. 쌍극자 모멘트는 분자 간 힘의 한 요인일 뿐이고, 분자가 클 때는 3장의 분산력이 훨씬 크게 작용하기 때문이다. 극성은 오늘 배웠지만, 극성 하나로 끓는점을 판단하면 안 된다는 것을 미리 적어 두자.

핵심 분자의 극성을 판정하는 4단계

1. 결합하는 두 원자의 전기음성도 차를 구한다. 차이가 있으면 극성 결합이고, 전자가 많이 끌리는 쪽이 $\delta-$ 이다.
2. 루이스 구조와 전자쌍 반발 이론으로 분자 모양(직선형·굽은 형·평면 삼각형·삼각뿔형·사면체형)을 정한다.
3. 결합 쌍극자($\delta+ \rightarrow \delta-$ 화살표)를 벡터로 더한다. 대칭이면 0(무극성), 비대칭이면 0이 아니다(극성).
4. 수치가 필요하면 $\mu = q \times r$, 굽은 분자는 $\mu = 2\mu_{\text{결합}} \cos(\theta/2)$ 로 계산한다.

스스로 풀어 보기

1. H-F, O-H, N-H, C-H 결합을 전기음성도 차이가 큰 순서로 나열하라. (H 2.1, C 2.5, N 3.0, O 3.5, F 4.0)
2. BF_3 와 NH_3 는 모두 중심 원자에 원자 세 개가 붙어 있다. 하나는 무극성, 하나는 극성인 까닭을 분자 모양으로 설명하라.
3. H_2S 의 쌍극자 모멘트는 0.95 D, 결합각은 92.1° 이다. S-H 결합 하나의 쌍극자 모멘트를 구하라.
4. 결합 길이 92 pm인 HF의 쌍극자 모멘트가 1.82 D일 때, 부분 전하는 전자 전하의 몇 %인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 벡터 합은 4부에서 그대로 답안의 뼈대가 된다. **기출문제 1**(경희대 2026) (205쪽)의 논제 III-(1)은 $\text{CH}_3\text{Cl} \cdot \text{CH}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{CHCl}_3 \cdot \text{CCl}_4$ 를 분자 구조를 고려한 쌍극자 모멘트 순서로 나열하게 하고 화살표 표기를 제시문에 직접 정의한다. **기출문제 3**(경북대 2024) (229쪽)의 3-1은 $\text{CO}_2 \cdot \text{PCl}_3 \cdot \text{SiCl}_4$ 의 루이스

구조와 3차원 구조에서 극성을 판정하게 하며, **기출문제 5**(경희대 2020) (246쪽)은 물 분자의 굽은 구조와 극성에서 출발해 얼음과 생명 현상까지 설명하게 한다.

이 장의 참고문헌

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

Pauling, L. (1932). The nature of the chemical bond. IV. The energy of single bonds and the relative electronegativity of atoms. Journal of the American Chemical Society, 54(9), 3570–3582. <https://doi.org/10.1021/ja01348a011>

Rumble, J. R. (Ed.). (2019). CRC handbook of chemistry and physics (100th ed.). CRC Press.

제 3장 분산력: 모든 분자는 서로 끌린다

새 개념 순간 쌍극자 · 유발 쌍극자 · 편극성 · 분자 모양과 표면적

이어짐 끓는점 비교 6장 · 소수성 12장

이 장의 개념도



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

그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C3 분산력·편극성)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 6. 제 3장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2024년) (219쪽)	네 물질의 끓는점 비교와 기체 평형의 부분 압력	C3 분산력·편극성
기출 3 (경북대 2024년) (229쪽)	$\text{CO}_2 \cdot \text{PCl}_3 \cdot \text{SiCl}_4$ 의 구조·극성과 끓는점	C3 분산력·편극성
기출 4 (연세대 2022년) (238쪽)	분자량이 같은 네 유기 분자의 끓는점 순서	C3 분산력·편극성
기출 6 (성균관대 2010년) (256쪽)	두부의 영김과 전해질이 바꾸는 마이셀의 모양	C3 분산력·편극성

같은 탄화수소, 다른 상태

라이터 속 부탄(C_4H_{10})과 양초의 파라핀(C_{25} 안팎)

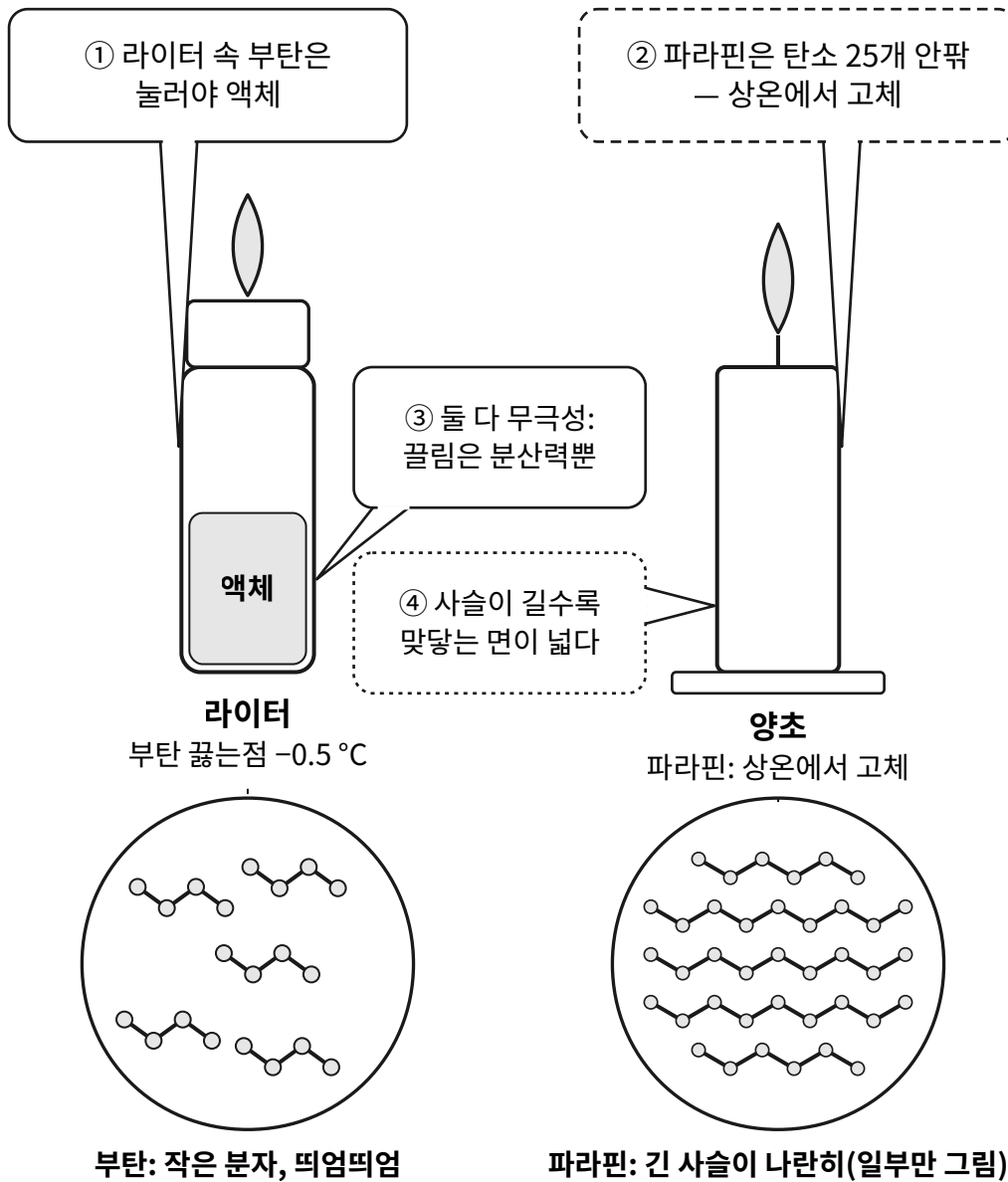


그림 13. 라이터 속 부탄과 양초의 파라핀 — 둘 다 탄소와 수소만으로 된 무극성 분자인데, 탄소 4개인 부탄은 눌러 담아야 액체이고 탄소 25개 안팎인 파라핀은 상온에서 고체다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 무극성 분자 사이에도 분산력이 작용한다.
2. 분자가 크고 전자가 많을수록 분산력이 커진다.
3. 같은 분자식이면 길쭉한 분자가 둥근 분자보다 끓는점이 높다.

이 장의 출발점

1장의 결론(상태 변화는 분자 간 힘과 열운동의 줄다리기), 2장의 쌍극자 모멘트와 무극성 분자의 판정(CO_2 , CH_4 , CCl_4 는 쌍극자 모멘트 0), 그리고 원자 속 전자가 원자핵 둘레에 구름처럼 퍼져 있다는 그림을 쓴다. 탄소 화합물의 이름(뷰테인, 펜테인 등)은 탄소 수만 알면 충분하다. 메테인 1, 에테인 2, 프로페인 3, 뷰테인 4, 펜테인 5, 헥세인 6, 옥테인 8, 데케인 10이다. 이름 앞의 n-은 가지 없이 곧은 사슬이라는 뜻이다.

석 교수가 탁자 위에 투명한 일회용 라이터와 양초 하나를 나란히 놓았다. 라이터 안에서 액체가 찰랑거렸다.

이모 라이터 가스는 액체로 보이는데 누르면 기체로 나오잖아요. 양초는 단단한 고체고요. 둘 다 기름 같은 거라고 들었는데 왜 이렇게 달라요?

석 교수 둘 다 탄소와 수소만으로 된 분자예요. 라이터 속 부탄은 C_4H_{10} 이고, 양초의 파라핀은 탄소가 25개 안팎인 긴 사슬이지요. 2장에서 본 대로 탄소와 수소의 전기음성도 차는 0.4밖에 안 되고 모양도 대칭에 가까워 둘 다 무극성입니다.

태오 무극성이면 쌍극자가 없으니까 서로 안 끌려야 하잖아요. 그런데 파라핀은 고체예요.

석 교수 바로 그 모순이 오늘의 출발점이다. 극성이 없어도 분자는 서로 끌린다. 그 끌림을 **분산력**이라고 한다.

3.1 무극성 분자도 끌린다는 증거

석 교수 가장 극단적인 예부터 보자. 헬륨은 전자 두 개짜리 원자 하나가 전부인 기체다. 극성도 없고 결합도 없다. 그런데 -268.9°C , 곧 4.2 K까지 식히면 액체가 된다.

하린 액체가 된다는 건 원자끼리 붙어 있다는 거죠? 아무 전하도 없는데요.

석 교수 그렇다. 아주 약하지만 끌림이 있다는 증거다. 다른 예도 많다. 질소 N_2 는 -195.8°C 에서 액체가 되고, 아이오딘 I_2 는 무극성 분자인데도 상온에서 보라색 고체다. 184.3°C 까지 올려야 끓는다.

태오 무극성인데 물보다도 높게 끓네요?

석 교수 그렇다. 무극성이라고 끌림이 약하다는 보장은 전혀 없다는 뜻이다. 1930년대에 런던이 양자역학으로 이 끌림을 설명했고, 그래서 **런던 분산력**이라는 이름이 붙었다.

이모 아이스크림 가게에서 하얀 김을 뿜는 액체 질소를 본 적이 있어요. 그것도 무극성 분자가 모인 액체군요.

석 교수 네, N_2 는 $\text{N}\equiv\text{N}$ 삼중 결합으로 묶인 대칭 분자라 쌍극자 모멘트가 0이에요. 그런데도 -195.8°C , 곧 77 K 아래에서는 액체로 모여 있지요. 공기를 압축하고 식혀서 액체로 만든 뒤 끓는점 차이로 질소와 산소를 나누어 얻습니다. 헬륨은 가장 늦게 액체가 된 기체인데, 1908년 네덜란드의 카메를링 오너스가 처음 성공했어요. 그만큼 헬륨 원자 사이의 끌림이 약하다는 뜻이고요.

하린 헬륨이 가장 약하게 끌린다면, 그 까닭도 이 장에서 나오겠네요.

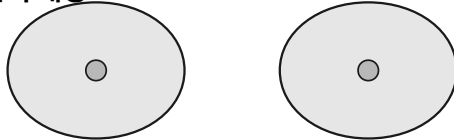
3.2 순간 쌍극자와 유발 쌍극자

석 교수 원자 속 전자는 원자핵 둘레에 구름처럼 퍼져 있지만, 가만히 있지 않고 끊임없이 움직인다. 평균을 내면 전자 구름은 원자핵을 중심으로 대칭이지만, 어느 한순간을 사진 찍듯 보면 전자가 한쪽에 조금 더 몰려 있을 수 있다. 그 순간 원자에는 한쪽이 δ^- , 반대쪽이 δ^+ 인 쌍극자가 생긴다. 이것이 **순간 쌍극자**다.

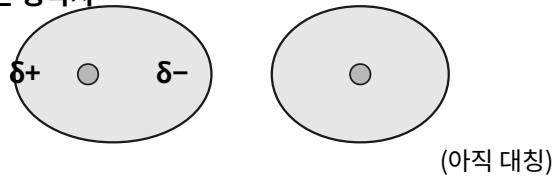
하린 그 순간 쌍극자는 금방 없어지잖아요.

석 교수 금방 없어지고 또 다른 방향으로 생긴다. 중요한 건 그다음이다. **그림 14**를 보자.

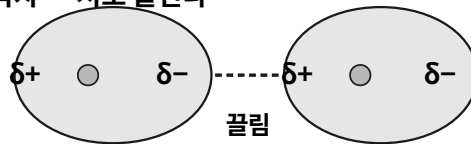
① **평균: 전자 구름이 대칭**



② **왼쪽 원자에 순간 쌍극자**



③ **이웃에 유발 쌍극자 — 서로 끌린다**



원 안의 점 = 원자핵, 파란 구름 = 전자 구름(솔림은 과장)

그림 14. 분산력이 생기는 세 순간 — ① 평균으로는 대칭인 두 원자 ② 왼쪽 원자에 순간 쌍극자가 생긴다(전자 구름이 오른쪽으로 솔림) ③ 그 δ^- 가 이웃 원자의 전자 구름을 밀어내 반대 방향의 유발 쌍극자가 생기고 δ^- 와 δ^+ 가 마주 보며 끌린다(모식도, 솔림은 과장했다).

석 교수 왼쪽 원자에 순간 쌍극자가 생겨 오른쪽 끝이 δ^- 가 되면, 그 음전하가 바로 옆 원자의 전자 구름을 밀어낸다. 이웃 원자는 왼쪽이 δ^+ , 오른쪽이 δ^- 가 되지. 이렇게 이웃에게 떠밀려 생긴 쌍극자를 **유발 쌍극자**라고 한다.

태오 그럼 δ^- 와 δ^+ 가 마주 보니까 끌리는 거네요. 그리고 순간 쌍극자 방향이 바뀌면 유발 쌍극자도 같이 바뀌고요.

석 교수 정확하다. 두 쌍극자가 춤추듯 함께 방향을 바꾸면서 늘 끌리는 배치를 유지한다. 그래서 평균을 내도 끌림이 남는다. 2024년 연세대 미래캠퍼스 기출과 2022년 기출의 제시문이 바로 이 “순간 쌍극자-유발 쌍극자” 표현을 쓴다. 답안에서도 그 용어를 그대로 쓰는 게 좋다.

이모 그러면 분산력은 모든 분자 사이에 있겠네요. 극성 분자든 무극성 분자든 전자는 다 있으니까요.

석 교수 네, 그게 핵심이에요. 분산력은 **모든 분자 사이에** 작용합니다. 극성 분자 사이에는 분산력에 더해 쌍극자-쌍극자 힘이 있는 것이고요. 무극성 분자에게는 분산력이 유일한 끌림일 뿐입니다.

3.3 전자가 많을수록 출렁인다 — 편극성

석 교수 이제 분산력의 크기를 정하는 것을 보자. 전자 구름이 바깥 전하에 의해 얼마나 쉽게 쏠리는지를 **편극성**이라고 한다. 전자가 많고, 원자핵에서 멀리 퍼져 있을수록 전자 구름은 출렁이기 쉽다.

하린 큰 원자일수록 바깥 전자가 원자핵에서 멀어서 잘 쏠리겠네요.

석 교수 그렇다. 18족 비활성 기체와 17족 할로젠으로 확인하자. 표 7와 그림 15를 함께 보아라.

표 7. 비활성 기체와 할로젠의 몰 질량·전자 수·기준 끓는점·25 °C 상태

물질	몰 질량(g/mol)	전자 수	끓는점(°C)	25 °C 상태
He	4.0	2	-268.9	기체
Ne	20.2	10	-246.0	기체
Ar	39.9	18	-185.8	기체
Kr	83.8	36	-153.4	기체
Xe	131.3	54	-108.1	기체
F ₂	38.0	18	-188.1	기체
Cl ₂	70.9	34	-34.0	기체
Br ₂	159.8	70	58.8	액체
I ₂	253.8	106	184.3	고체

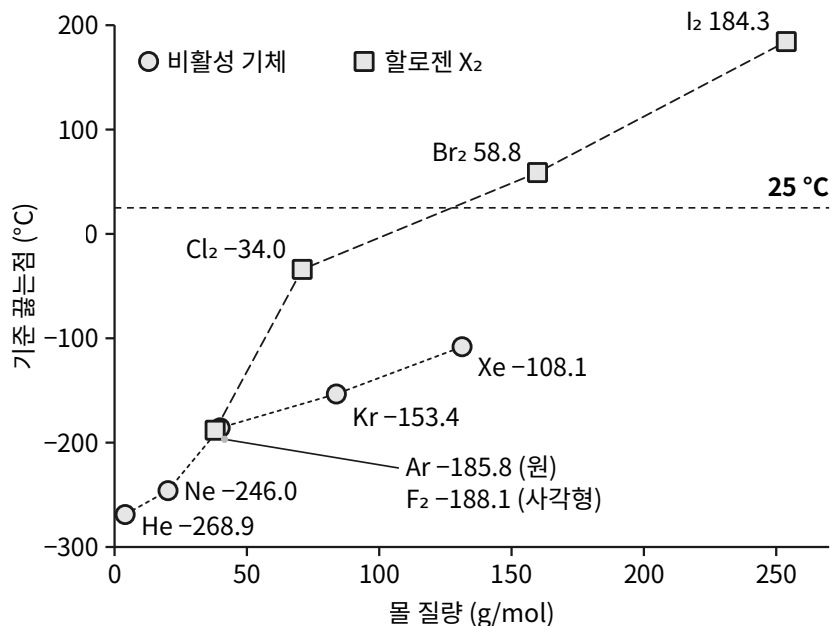


그림 15. 비활성 기체(원)와 할로젠(사각형)의 몰 질량과 기준 끓는점 — 두 계열 모두 전자가 많아질수록 끓는점이 올라간다. 25 °C(점선) 위에 있는 Br₂와 I₂만 상온에서 기체가 아니다(실측값, 직선 맞춤은 하지 않았다).

이모 편극성을 숫자로 잴 수도 있나요?

- 석 교수** 네. 전기장을 걸었을 때 전자 구름이 얼마나 쏠리는지를 재서, 그 크기를 부피 단위로 나타낸 값이 있어요. 비활성 기체는 He 0.21, Ne 0.40, Ar 1.64, Kr 2.48, Xe 4.04 Å³(옹스트롬 세제곱, 1 Å = 10⁻¹⁰ m)입니다. 헬륨에서 크세논으로 가면 약 20배가 되지요. 끓는점이 올라가는 순서와 똑같아요.
- 태오** Ne에서 Ar로 갈 때 4배 넘게 확 커지네요. 끓는점도 -246.0에서 -185.8로 60 °C나 뛰고요.
- 석 교수** 잘 짚었다. 껍질이 하나 늘어 바깥 전자가 원자핵에서 훨씬 멀어지기 때문이다. 멀리 있는 전자일수록 원자핵에 덜 붙잡혀 쉽게 쏠린다.
- 하린** 아까 궁금했던 헬륨이 답이 나왔어요. 전자가 두 개뿐이고 그 두 개가 원자핵 바로 옆 첫 껍질에 딱 붙잡혀 있으니까 거의 쏠리지 않는 거죠. 그래서 순간 쌍극자도 작고, 끌림도 제일 약하고요.
- 석 교수** 그렇다. 헬륨의 편극성이 모든 원자 가운데 가장 작고, 그래서 끓는점도 모든 물질 가운데 가장 낮다. 한 가지 덧붙이면, 헬륨은 1기압에서는 절대 0도 가까이 식혀도 고체가 되지 않는다. 끌림이 너무 약해서 양자역학적인 떨림만으로도 결정이 무너지기 때문인데, 이건 교과 밖 이야기다.

답안에 쓰는 분산력 문장

“두 분자는 모두 무극성 분자이므로 분자 사이에는 분산력만 작용한다. 분산력은 순간 쌍극자와 유발 쌍극자 사이의 인력으로, 전자 수가 많아 편극성이 클수록(또는 분자의 접촉 면적이 넓을수록) 크다. 따라서 ○○의 분산력이 더 커서 끓는점이 더 높다.” — 무극성 판정, 힘의 이름, 크기를 정하는 요인, 끓는점과의 연결 네 가지가 모두 들어 있다.

- 태오** 두 줄 다 오른쪽 위로 올라가요. He에서 Xe까지 160 °C 넘게, F₂에서 I₂까지는 372 °C나 올라가요.
- 석 교수** 계산이 빠르구나. 184.3 - (-188.1) = 372.4 °C. 할로젠은 원자 두 개짜리 분자라 전자 수가 같은 주기의 비활성 기체의 두 배쯤 되고, 분자도 길쭉해서 상승 폭이 더 크다. 흥미로운 짝이 하나 있다. Ar과 F₂를 보렴.
- 하린** 둘 다 전자가 18개예요. 몰 질량도 39.9와 38.0으로 비슷하고, 끓는점도 -185.8 °C와 -188.1 °C로 거의 같아요!
- 석 교수** 그렇다. 무극성 분자끼리 비교할 때 전자 수가 같으면 끓는점도 비슷하다는 좋은 증거다. 교과서가 “분자량이 클수록 분산력이 크다”고 쓰는 것은 분자량이 클수록 대개 전자 수가 많기 때문이다. 더 정확히 말하면 분산력을 정하는 것은 분자량 자체가 아니라 전자 구름의 크기와 편극성이다.

문제 3.1

F₂, Cl₂, Br₂, I₂의 25 °C에서의 상태를 쓰고, 기준 끓는점이 높은 순서와 그 까닭을 분자 간 힘으로 설명하라. (끓는점: F₂ -188.1, Cl₂ -34.0, Br₂ 58.8, I₂ 184.3 °C)

- 하린** 25 °C보다 끓는점이 낮으면 기체예요. F₂와 Cl₂는 기체. Br₂는 58.8 °C에 끓으니까 25 °C에서는 액체. I₂는 184.3 °C에 끓으니까... 액체인지 고체인지는 녹는점을 알아야 하지 않아요?
- 석 교수** 날카롭다. I₂의 녹는점은 113.7 °C라서 25 °C에서는 고체다. 그럼 순서와 이유는?

태오 끓는점은 $I_2 > Br_2 > Cl_2 > F_2$ 예요. 넷 다 같은 원자 둘로 된 무극성 분자라서 분자 사이에는 분산력만 작용해요. 아래 주기로 갈수록 전자 수가 18, 34, 70, 106으로 많아지고 전자 구름이 커서 편극성이 크니까, 순간 쌍극자와 유발 쌍극자가 크게 생겨 분산력이 세져요.

석 교수 정답이다. 상태는 기체·기체·액체·고체, 끓는점은 $F_2 < Cl_2 < Br_2 < I_2$. 색도 연노랑(F_2), 황록색(Cl_2), 적갈색(Br_2), 흑자색(I_2)으로 짙어져서 실험실에서 한눈에 구별된다. 답안에서는 “무극성 → 분산력만 → 전자 수(편극성) 증가”의 세 단계를 빠뜨리지 않으면 된다.

3.4 같은 분자량이면 모양이 가른다

석 교수 이제 시험이 좋아하는 미묘한 경우다. 분자식이 C_5H_{12} 로 똑같은 펜테인 세 가지를 보자. 탄소 다섯 개가 일렬로 늘어선 n-펜테인, 가지가 하나 있는 아이소펜테인, 가운데 탄소에 네 개가 붙어 공처럼 둥근 네오펜테인이다. **그림 16**을 보아라.

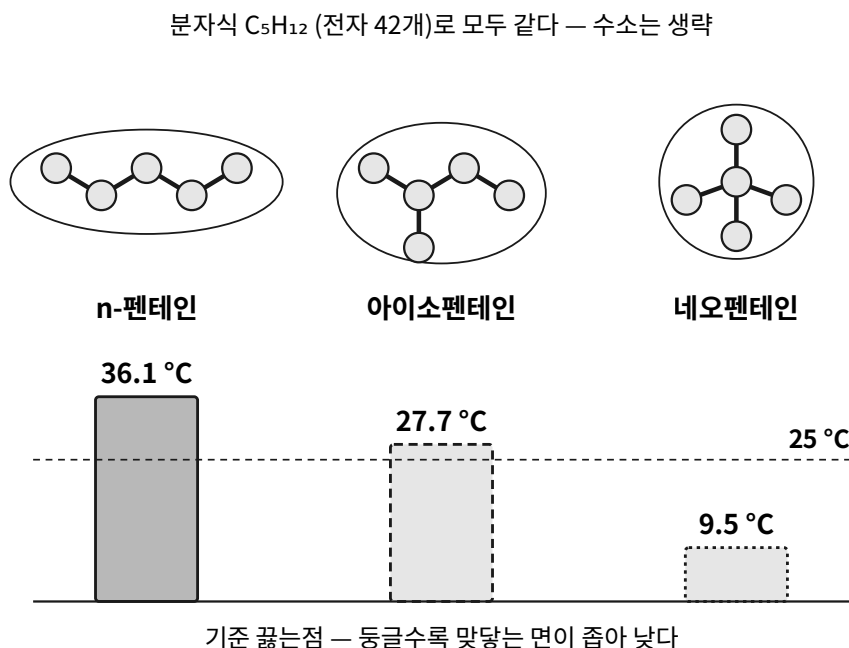


그림 16. 분자식이 같은 펜테인 세 이성질체의 모양과 기준 끓는점 — 길쭉한 n-펜테인 36.1 °C, 가지 하나인 아이소펜테인 27.7 °C, 공 모양의 네오펜테인 9.5 °C. 전자 수(42개)가 같아도 이웃과 맞닿는 면적이 넓을수록 분산력이 크다 (탄소 골격만 그린 모식도).

이모 전자 수도 같고 분자량도 72로 같은데 끓는점이 다르네요. 모양 때문이에요?

석 교수 네. 분산력은 분자가 서로 가까이 닿을수록 커집니다. 길쭉한 n-펜테인은 이웃과 나란히 누워 넓은 면으로 닿을 수 있는데, 공 같은 네오펜테인은 이웃과 점으로만 닿아요. 연필 다발과 구슬 주머니를 떠올려 보세요. 연필은 서로 길게 맞닿지만 구슬은 한 점에서만 닿지요.

태오 그러면 분자가 서로 “맞닿는 면적”을 직접 잴 수도 있어요?

석 교수 컴퓨터로 분자 표면적을 계산할 수는 있지만, 시험에서는 구조식만 보고 판단하면 된다. 가지가 많을수록, 분자가 공 모양에 가까울수록 같은 부피에 대한 겉넓이가 작아진다. 구가 같은 부피에서 겉넓이가 가장 작은 도형이라는 수학 사실과 같은 이야기야. 이 “겉넓이를 줄이려는 성질”은 10장의 물방울에서 또 만난다.

문제 3.2

n-펜테인(36.1 °C)과 네오펜테인(9.5 °C)의 기준 끓는점 차이를 구하고, 분자식이 같은데도 차이가 나는 까닭을 설명하라. 25 °C, 1 atm에서 두 물질은 어떤 상태인가?

태오 36.1 - 9.5 = 26.6 °C 차이예요. 둘 다 C₅H₁₂로 무극성이고 전자 수도 42개로 같아요. 그런데 n-펜테인은 막대 모양이라 이웃 분자와 접촉 면적이 넓어 분산력이 크고, 네오펜테인은 구형이라 접촉 면적이 좁아 분산력이 작아요.

하린 25 °C에서는 n-펜테인은 36.1 °C보다 낮으니까 액체, 네오펜테인은 9.5 °C보다 높으니까 기체예요.

석 교수 둘 다 정답이다. 26.6 °C 차이, 그리고 상온에서 하나는 액체, 하나는 기체. 같은 분자식인데 상태가 달라진다는 점이 이 비교의 극적인 부분이다. 한 가지 주의할 점은 녹는점은 정 반대라는 것이다. 네오펜테인은 -16.6 °C에 녹고 n-펜테인은 -129.8 °C에 녹는다. 공 모양은 결정 속에 차곡차곡 잘 쌓이기 때문인데, 이건 6장에서 다시 다룬다.

태오 라이터와 양초도 같은 이야기겠네요. 탄소 사슬이 길어질수록 맞닿는 면도 넓어지고 전자도 많아지니까요.

이모 라이터는 그럼 어떻게 부탄을 액체로 담아 두는 거예요? 끓는점이 -0.5 °C면 방 안에서는 기체여야 하잖아요.

석 교수 눌러 담아서 그래요. 상온에서 부탄의 증기압은 약 2기압이라, 그보다 높은 압력으로 가두면 액체로 남습니다. 버튼을 누르면 압력이 풀린 부분부터 기체가 되어 나오지요. 증기압은 7장의 주제이니 그때 다시 볼게요.

석 교수 그렇다. 사슬 모양 탄화수소의 끓는점은 메테인 -161.5, 에테인 -88.6, 프로페인 -42.1, 뷰테인 -0.5, 펜테인 36.1 °C로 탄소 하나가 늘 때마다 수십 °C씩 올라간다. 탄소 다섯 개에서 상온의 액체가 되고, 휘발유·등유·경유를 지나 탄소 20개를 넘으면 상온에서 고체인 파라핀이 된다. 원유를 끓는점 차이로 나누는 분별 증류가 바로 이 사실을 이용한다.

3.5 분산력은 거리에 아주 민감하다

석 교수 마지막으로 교과 밖 심화를 하나 보자. 분산력에 의한 퍼텐셜 에너지는 거리의 6제곱에 반비례한다. 거리가 두 배가 되면 에너지는 2⁶ = 64분의 1로 줄어든다.

하린 64분의 1이요? 조금만 떨어져도 거의 사라지겠네요.

석 교수 그래서 분산력은 분자가 서로 바짝 닿아 있을 때만 의미가 있다. 액체와 고체에서는 크고, 분자 사이가 먼 기체에서는 거의 0이다. 모양에 따라 끓는점이 달라지는 것도 같은 이유다. 맞닿은 부분의 거리는 가깝고 나머지 부분은 멀어서, 가까운 면적이 얼마나 넓은지가 승부를 가른다.

이모 도마뱀붙이가 유리 벽을 기어오르는 것도 이 힘이라던데요.

석 교수 네, 잘 아시네요. 도마뱀붙이 발바닥에는 아주 가는 털이 수십만 개 있고, 각 털 끝이 다시 수백 갈래로 갈라져 벽에 바짝 닿아요. 하나하나의 약한 분산력이지만 맞닿는 면적이 엄청나게 커서 몸무게를 받칠 수 있다는 것이 실험으로 확인되었습니다. 끈끈한 물질 없이 분자 간 힘만으로 붙는 거예요.

분산력은 결코 약한 힘이 아니다

태오 그래도 분산력은 수소 결합보다는 약한 거죠?

석 교수 분자 하나하나의 접점에서는 그렇지만, 분자가 커지면 합계가 엄청나다. 기화열로 보자. 메테인 8.2, 부테인 22.4, 헥세인 28.9, 옥테인 34.4, 데케인 38.8 kJ/mol이다. 모두 끓는점에서 꽤 값이고, 이 분자들 사이에는 분산력밖에 없다.

하린 데케인이 38.8이면 물의 40.7과 거의 같아요!

석 교수 그렇다. 탄소 열 개짜리 무극성 분자가 분산력만으로 물과 맞먹는 기화열을 갖는다. 교과 밖 계산이지만, 염화 수소처럼 극성인 작은 분자도 분자 사이 끌림 가운데 가장 큰 몫은 분산력이라고 알려져 있다. “극성 분자 = 쌍극자 힘이 주인공”이라고 단정하면 안 되는 이유다. 이 점은 4장에서 염화메테인류로 확인한다.

“무극성 분자는 분자 간 힘이 없다”는 틀린 답이다

무극성 분자 사이에는 쌍극자-쌍극자 힘이 없을 뿐 분산력은 있다. 그리고 분산력은 분자가 크면 매우 커질 수 있어서, 큰 무극성 분자(I_2 , 파라핀)가 작은 극성 분자보다 높게 끓는 일이 흔하다. 답안에서는 “무극성 → 분산력만 작용”이라고 쓴다.

핵심 분산력의 크기를 비교하는 4단계

1. 비교할 분자가 무극성인지 확인한다(무극성이면 분산력만 작용, 극성이면 분산력 + 쌍극자-쌍극자 힘).
2. 전자 수(대개 몰 질량)를 비교한다. 전자가 많고 전자 구름이 클수록 편극성이 커서 분산력이 크다.
3. 전자 수가 같으면 모양을 본다. 길쭉하여 접촉 면적이 넓을수록 분산력이 크고 끓는점이 높다.
4. 결론은 “분산력이 클수록 끓는점이 높다”로 끓는점 순서와 연결해 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. He, Ne, Ar, Kr, Xe를 끓는점이 낮은 순서로 쓰고, 그 까닭을 한 문장으로 설명하라.
2. CH_4 ($-161.5^\circ C$)와 CCl_4 ($76.7^\circ C$)는 둘 다 정사면체형 무극성 분자이다. 끓는점 차이를 구하고 그 까닭을 설명하라.
3. 분산력에 의한 퍼텐셜 에너지가 거리의 6제곱에 반비례할 때, 분자 사이 거리가 1.5배가 되면 에너지는 처음의 몇 분의 일이 되는가?
4. 아이소펜테인($27.7^\circ C$)의 끓는점이 n-펜테인과 네오펜테인 사이에 있는 까닭을 분자 모양으로 설명하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

분산력은 4부에서 비교 문제의 마지막 판정 기준으로 거듭 나온다. **기출문제 2**(연세대 2024) (219쪽)의 1-1은 무극성인 O_2 와 Cl_2 의 끓는점을 분산력으로 비교하게 하고, **기출문제 4**(연세대 2022) (238쪽)는 분자량이 58~60으로 거의 같은 네 분자를 주어 “분산력은 비슷하다고 놓고” 다른 힘으로 순서를 가르게 한다. **기출문제 3**(경북대 2024) (229쪽)의 3-1에서는 무극성인 $SiCl_4$ 가 극성인 PCl_3 보다 무겁다는 점이 분산력의 반론으로 남는다. 어느 문항이든 “분산력은 모든 분자에 있다”는 문장을 먼저 깔고, 그 위

에 극성과 수소 결합을 엮어 비교하는 순서로 쓰면 논리의 빈틈이 생기지 않는다. 6장의 끓는점 비교 순서도가 바로 이 순서를 정리한 것이다.

이 장의 참고문헌

- Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. N., & Full, R. J. (2002). Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(19), 12252–12256. <https://doi.org/10.1073/pnas.192252799>
- Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces* (3rd ed.). Academic Press.
- London, F. (1937). The general theory of molecular forces. *Transactions of the Faraday Society*, 33, 8–26. <https://doi.org/10.1039/tf937330008b>
- Rumble, J. R. (Ed.). (2019). *CRC handbook of chemistry and physics* (100th ed.). CRC Press.

제 4장 쌍극자·쌍극자 힘: 극성 분자끼리의 끌림

새 개념 영구 쌍극자의 배열 · 분자량이 비슷할 때의 비교

이어짐 수소 결합 5장 · 끓는점 비교 6장

이 장의 개념도

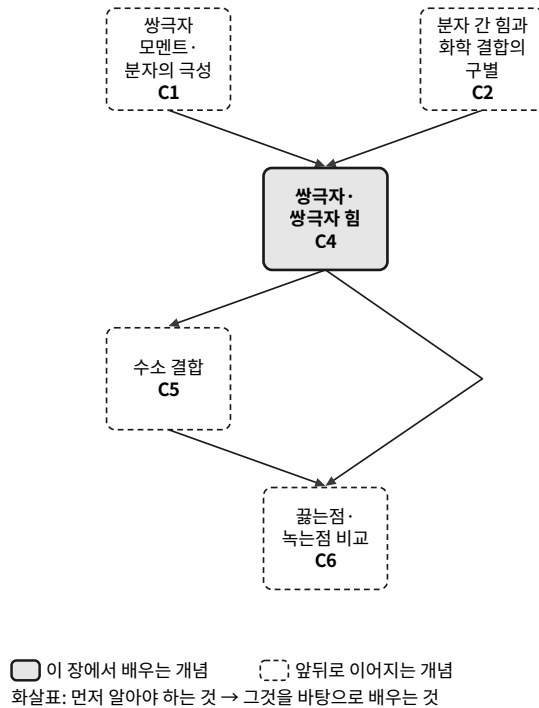


그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C4 쌍극자·쌍극자 힘)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 8. 제 4장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2024년) (219쪽)	네 물질의 끓는점 비교와 기체 평형의 부분 압력	C4 쌍극자·쌍극자 힘
기출 4 (연세대 2022년) (238쪽)	분자량이 같은 네 유기 분자의 끓는점 순서	C4 쌍극자·쌍극자 힘

분자량 58, 끓는점은 56 °C 차이

라이터 가스(부탄)와 매니큐어 리무버(아세톤)

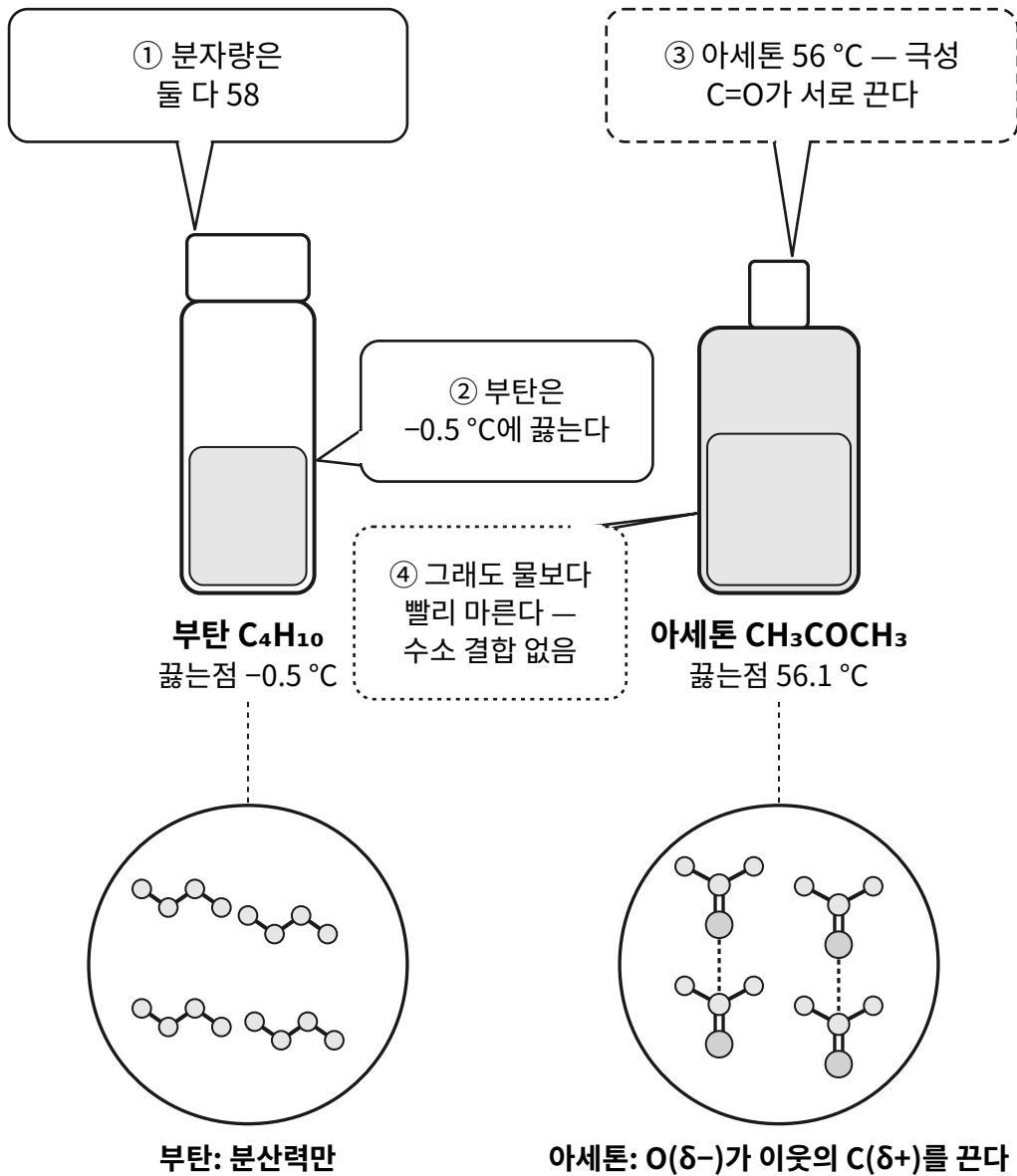


그림 18. 라이터 가스와 매니큐어 리무버 — 부탄(C_4H_{10})과 아세톤(CH_3COCH_3)은 몰 질량이 58로 같지만 부탄은 -0.5 °C, 아세톤은 56.1 °C에서 끓는다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 분자량이 같으면 극성 분자의 끓는점이 높다.
2. 분자량 차이가 크면 분산력이 극성을 이길 수 있다.
3. 아세톤은 수소 결합이 없어 물보다 빨리 마른다.

이 장의 출발점

2장의 쌍극자 모멘트($\delta+ \rightarrow \delta-$ 화살표, 분자 모양에 따른 벡터 합)와 3장의 분산력(모든 분자 사이에 작용하고 전자 수와 접촉 면적이 클수록 크다)을 쓴다. 아세톤의 C=O처럼 탄소와 산소가 이중 결합한 부분을 카보닐기라고 부른다는 것도 알아 두자. 알데하이드(-CHO)와 케톤(아세톤처럼 C=O 양쪽에 탄소)이 모두 카보닐기를 가지며, 이 장의 아세트알데하이드는 알데하이드다.

이모가 매니큐어를 지우던 솜을 탁자에 올려 두었다. 솜은 몇 분 만에 바싹 말랐고, 달콤한 냄새가 방 안에 퍼졌다. 태오가 그 옆에 라이터를 내려놓았다.

태오 교수님, 아까 라이터 가스가 부탄이라고 하셨잖아요. 그런데 매니큐어 리무버의 아세톤도 분자량이 58이래요. 똑같은데 부탄은 기체고 아세톤은 액체예요.

석 교수 좋은 짝을 찾았구나. 부탄 C_4H_{10} 은 $12 \times 4 + 1 \times 10 = 58$, 아세톤 C_3H_6O 는 $12 \times 3 + 1 \times 6 + 16 = 58$. 몰 질량이 정확히 같다. 전자 수도 34개와 32개로 비슷하니 분산력은 거의 같다고 볼 수 있지. 그런데 끓는점은 $-0.5^\circ C$ 와 $56.1^\circ C$, $56.6^\circ C$ 나 차이 난다.

하린 그럼 아세톤에는 분산력 말고 다른 끌림이 더 있는 거네요.

석 교수 그렇다. 아세톤은 극성 분자다. C=O 결합에서 산소 쪽이 $\delta-$, 탄소 쪽이 $\delta+$ 이고 쌍극자 모멘트가 2.88 D나 된다. 극성 분자들 사이에는 분산력에 더해 **쌍극자·쌍극자 힘**이 작용한다. 오늘은 이 힘이 언제 승부를 가르고, 언제 분산력에 지는지를 본다.

4.1 극성 분자는 머리-꼬리로 줄을 선다

석 교수 극성 분자는 늘 쌍극자를 지니고 있다. 3장의 순간 쌍극자와 구별해서 **영구 쌍극자**라고 부른다. 영구 쌍극자를 가진 분자들이 모이면, 한 분자의 $\delta+$ 끝이 이웃의 $\delta-$ 끝을 향하도록 배열하려 한다. **그림 19**를 보자.

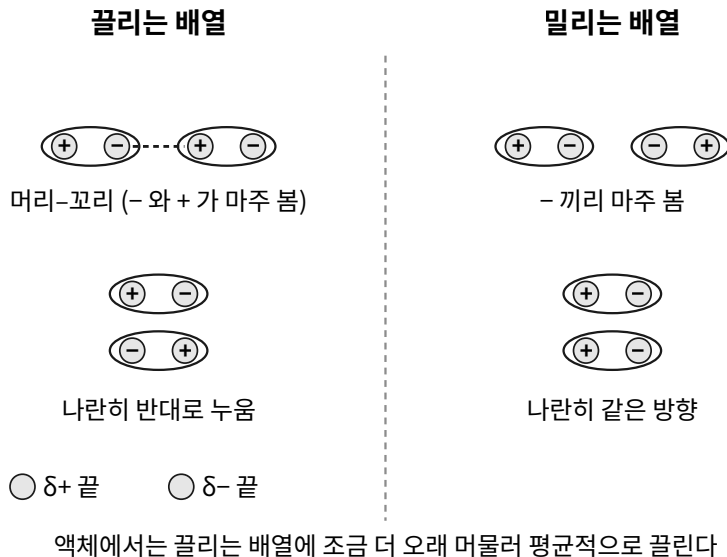


그림 19. 극성 분자의 배열 — 왼쪽: 한 분자의 $\delta+$ 끝이 이웃의 $\delta-$ 끝과 마주 보는 머리-꼬리 배열과 나란히 반대로 누운 배열은 끌린다. 오른쪽: 같은 전하 끝끼리 마주 보면 밀린다. 액체 속 분자는 열운동으로 계속 돌지만 끌리는 배열에 머무는 시간이 조금 더 길어 평균적으로 끌림이 남는다(모식도).

하린 자석 여러 개를 섞어 놓으면 N극과 S극이 붙는 것처럼요?

- 석 교수** 비슷하다. 다만 분자는 자석보다 훨씬 약하고, 액체에서는 열운동 때문에 끊임없이 돈다. 그래서 완벽하게 줄을 서지는 못하고, 끌리는 배열에 조금 더 오래 머무는 정도다. 그 “조금 더”가 평균적인 끌림을 만든다.
- 태오** 그럼 온도가 높아지면 쌍극자·쌍극자 힘은 약해지겠네요. 더 많이 돌아다니니까요.
- 석 교수** 맞다. 교과 밖 심화로 덧붙이면, 분자가 자유롭게 도는 기체나 액체에서 평균한 쌍극자·쌍극자 끌림 에너지는 온도가 높을수록 작아지고, 거리의 6제곱에 반비례한다. 분산력과 같은 6제곱이라 둘 다 바짝 붙었을 때만 크다. 시험에서는 “쌍극자 모멘트가 클수록 쌍극자·쌍극자 힘이 크다”만 쓰면 충분하다.
- 하린** 쌍극자·쌍극자 힘이 얼마나 보태지는지 숫자로 볼 수는 없어요?
- 석 교수** 기화열로 어림할 수 있다. 끓는점에서 켜 기화열이 부탄은 22.4 kJ/mol, 아세톤은 29.1 kJ/mol이다. 둘은 분산력이 비슷하니, 그 차이 $29.1 - 22.4 = 6.7$ kJ/mol 정도를 아세톤의 극성이 보탬 몫으로 볼 수 있지. 엄밀한 분리는 아니지만 크기 감각을 잡기에는 충분하다.
- 태오** 6.7이면 1장에서 본 수소 결합 하나(약 20 kJ/mol)의 3분의 1쯤이네요. 전체 끌림 29.1에서 보면 분산력이 여전히 대부분이고요.
- 석 교수** 그렇다. 극성 분자라도 분산력이 바닥에 깔려 있고, 극성은 그 위에 얹힌 층이라고 생각하면 정확하다.
- 이모** 그러면 극성 분자 사이에는 두 가지 힘이 같이 있는 거네요. 분산력과 쌍극자·쌍극자 힘이에요.
- 석 교수** 네, 꼭 그렇게 쓰셔야 해요. “극성 분자 사이에는 쌍극자·쌍극자 힘이 작용한다”라고만 쓰면 분산력을 빼먹은 답이 됩니다. 정확히는 “분산력에 더하여 쌍극자·쌍극자 힘이 작용한다”예요.

4.2 분자량이 같을 때 극성이 승부를 가른다

- 석 교수** 가장 깨끗한 비교는 몰 질량이 똑같은 두 분자다. N_2 와 CO를 보자. 둘 다 28이고 전자도 14개로 같다. N_2 는 무극성, CO는 쌍극자 모멘트가 0.11 D로 아주 작지만 극성이다.
- 이모** 일산화 탄소는 연탄가스의 그 독성 기체지요? 질소와 그렇게 닮았어요?
- 석 교수** 네, 둘 다 원자 두 개가 삼중 결합으로 묶인 분자이고 전자 수까지 같아서 화학자들이 “쌍둥이 분자”로 자주 비교해요. 다른 점은 두 원자가 같으나 다르냐뿐이지요. 탄소와 산소의 전기음성도가 달라서 CO에 아주 약한 극성이 생깁니다.
- 태오** 끓는점은 N_2 가 $-195.8^\circ C$, CO가 $-191.5^\circ C$ 니까 CO가 $4.3^\circ C$ 높아요. 차이가 작네요.
- 석 교수** 쌍극자 모멘트가 작으니 차이도 작은 거다. 쌍극자 모멘트가 큰 짝일수록 차이가 커진다. 부탄과 아세톤은 $56.6^\circ C$ 였지. 시험에 자주 나오는 네 분자로 확인하자. 몰 질량이 44~46으로 비슷한 프로페인, 다이메틸 에테르, 아세트알데하이드, 에탄올이다. **그림 20**를 보아라.

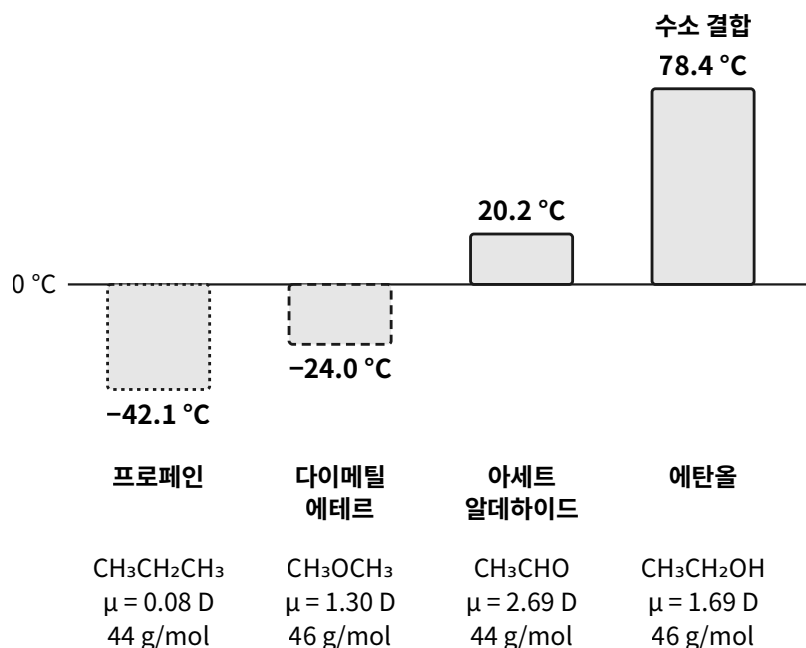


그림 20. 물 질량이 44~46으로 비슷한 네 분자의 기준 끓는점과 쌍극자 모멘트 — 프로페인 -42.1 °C(0.08 D), 다이메틸 에테르 -24.0 °C(1.30 D), 아세트알데하이드 20.2 °C(2.69 D), 에탄올 78.4 °C(1.69 D). 앞의 셋은 쌍극자 모멘트 순서대로 끓는점이 오르지만, 에탄올은 쌍극자 모멘트가 더 작은데도 혼자 높다.

하린 앞의 세 개는 쌍극자 모멘트가 클수록 끓는점이 높아요. 0.08, 1.30, 2.69 D 순서로 -42.1, -24.0, 20.2 °C. 그런데 에탄올은 1.69 D인데 78.4 °C예요. 순서가 깨져요.

석 교수 잘 보았다. 에탄올에는 O-H가 있어서 5장의 수소 결합이 작용한다. 쌍극자·쌍극자 힘보다 한 단계 센 끌림이지. 오늘은 앞의 세 분자까지를 쌍극자·쌍극자 힘으로 설명하고, 에탄올은 다음 장으로 넘기자.

태오 그런데 시험에서는 쌍극자 모멘트 값을 안 주는 경우도 있잖아요. 그럴 땐 어떻게 극성의 크기를 비교해요?

석 교수 작용기로 어렵한다. 아래 상자를 보렴.

쌍극자 모멘트 값이 없을 때의 어림

탄소 화합물에서는 작용기가 극성을 정한다. C-H만 있는 탄화수소는 거의 무극성(프로페인 0.08 D), C-O-C의 에테르는 굽은 C-O 결합 두 개가 일부만 상쇄되어 중간(다이메틸 에테르 1.30 D), C=O의 카보닐기는 산소가 이중 결합으로 전자를 강하게 끌어 크다(아세트알데하이드 2.69 D, 아세톤 2.88 D). 같은 탄소 수라면 “탄화수소 < 에테르 < 알데하이드·케톤” 순서로 극성이 커진다고 쓰면 된다. 단, O-H나 N-H가 있으면 극성보다 수소 결합이 먼저다.

하린 2022년 연세대 문제의 뷰테인과 메톡시에테인도 그렇게 보면 되겠네요. 메톡시에테인은 에테르니까 뷰테인보다 극성이 크고요.

석 교수 그렇다. 물 질량이 58과 60으로 거의 같으니 분산력은 비슷하고, 에테르의 극성만큼 메톡시에테인이 높게 끓는다. 실제로 -0.5 °C와 7.4 °C, 7.9 °C 차이다. 아세톤(56.1 °C)과 견주면 차이가 훨씬 작는데, 에테르의 극성이 카보닐보다 약하기 때문이다.

문제 4.1

프로페인($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$, 44), 다이메틸 에테르(CH_3OCH_3 , 46), 아세트알데하이드(CH_3CHO , 44), 에탄올($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, 46)을 끓는점이 낮은 것부터 나열하고, 각 단계의 근거를 분자 간 힘으로 쓰라. 괄호 안은 몰 질량이다.

태오 몰 질량이 44~46으로 비슷하니까 분산력은 거의 같다고 놓아요. 프로페인은 탄소와 수소 뿐이라 무극성에 가까워서 분산력만 있어요. 다이메틸 에테르는 C-O-C가 굽어 있어서 극성이고, 쌍극자·쌍극자 힘이 더해져요. 아세트알데하이드는 C=O가 있어서 쌍극자 모멘트가 2.69 D로 더 크니까 쌍극자·쌍극자 힘이 더 세요.

하린 에탄올은 O에 H가 직접 붙어 있어서 수소 결합을 해요. 그래서 제일 높아요.

석 교수 정답이다. 프로페인 < 다이메틸 에테르 < 아세트알데하이드 < 에탄올($-42.1 < -24.0 < 20.2 < 78.4$ °C). 한 가지 함정만 짚자. 다이메틸 에테르에도 산소가 있지만 산소에 붙은 것은 탄소뿐이라 분자끼리 수소 결합을 하지 못한다. “O가 있으니 수소 결합”이라고 쓰면 틀린다. 2022년 연세대 미래캠퍼스 기출에서 메톡시에테인이 바로 이 함정이었다.

이모 이렇게 비슷한 크기의 분자를 고르는 데도 이유가 있군요.

석 교수 네. 분자량을 맞춰 두어야 분산력의 차이를 지우고 극성의 효과만 볼 수 있어요. 실험에서 다른 조건을 같게 두고 하나만 바꾸는 대조 실험과 같은 생각이지요. 기출의 분자 넷이 늘 몰 질량이 비슷한 것은 우연이 아닙니다. 표 9에 이런 짝들을 모았어요.

표 9. 몰 질량이 비슷한 짝의 비교 — 쌍극자 모멘트는 기체 측정값, 끓는점은 기준 끓는점

짝	몰 질량(g/mol)	쌍극자 모멘트(D)	끓는점(°C)	가르는 힘
N_2 / CO	28 / 28	0 / 0.11	-195.8 / -191.5	극성(작은 차이)
뷰테인 / 아세톤	58 / 58	0 / 2.88	-0.5 / 56.1	극성(큰 차이)
SiH_4 / PH_3 / H_2S	32 / 34 / 34	0 / 0.57 / 0.95	-111.9 / -87.7 / -60.3	극성이 클수록 높다
F_2 / HCl	38 / 36.5	0 / 1.08	-188.1 / -85.1	극성(무극성 F_2 가 103 °C 낮다)

태오 마지막 짝이 재밌네요. F_2 와 HCl은 몰 질량이 거의 같은데 HCl이 103 °C나 높아요.

석 교수 $-85.1 - (-188.1) = 103.0$ °C. HCl은 1.08 D의 극성 분자이고 F_2 는 무극성이니 그 차이가 그대로 끓는점에 나타난다. 3주기 수소 화합물 SiH_4 , PH_3 , H_2S 도 몰 질량이 32~34로 비슷한데 쌍극자 모멘트가 0, 0.57, 0.95 D로 커지면서 끓는점이 -111.9, -87.7, -60.3 °C로 올라간다.

이모 2장에서 본 cis와 trans 다이클로로에텐도 이 표에 넣을 수 있겠네요. 분자식이 아예 같으니깐요.

석 교수 네, 가장 깨끗한 짝이에요. 몰 질량 97로 같고, cis는 1.90 D, trans는 0 D입니다. 끓는점은 cis 60.3 °C, trans 47.5 °C로 12.8 °C 차이가 나지요. 분자식이 같아 분산력이 거의 같으니 이 차이는 극성이 만든 것이라고 말할 수 있어요.

분자 간 힘 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

극성과 분자의 크기가 분자 간 힘을 정하고, 분자 간 힘이 끓는점·증기압·표면장력·용해를 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 11문항(2008~2026학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 7문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 분자 간 힘인가
2. 극성의 복습: 전기음성도에서 쌍극자 모멘트까지
3. 분산력: 모든 분자는 서로 끌린다
4. 쌍극자-쌍극자 힘: 극성 분자끼리의 끌림
5. 수소 결합: F·O·N에 붙은 H의 특별한 끌림
6. 끓는점은 이렇게 비교한다
7. 증발과 증기압: 액체 위의 동적 평형

8. 물은 왜 특별한가
9. 녹는다는 것: 수화와 극성
10. 표면장력: 표면의 분자는 손해를 본다
11. 접촉각과 모세관 현상
12. 물과 기름 사이: 친수성·소수성과 미셀
13. 증기압을 바꾸는 용질과 곡률: 물방울의 탄생
14. 몸속·지구·기술 속의 분자 간 힘, 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 결합과 분자 구조 · 용액의 총괄성 · 상평형과 기체 · 탄소 화합물 · 세포막



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



9 791123 065144
ISBN 979-11-23065-14-4



이어서 읽으시려면

대입 과학논술 15 — 분자 간 힘·수소 결합·계면 — 전체 338쪽

ssbook.kr/book/nonsul-15

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

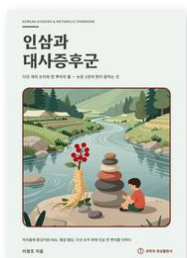
인삼 (6)



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 전지·전기 분해
화학 전지·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-25



01 통합과학 화학 1 — 소금과 별
원자에서 원소의 기원·주기율표까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-01



02 통합과학 화학 2 — 뭇은 왜 녹슬까
결합에서 반응·산과 염기까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까
분자에서 세포·효소·에너지까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-03



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자
유전 정보에서 진화·생태계까지
18,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/tonghap-04



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 따뜻해질까
원자에서 힘과 에너지까지
22,000원 → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나뭇잎
원자에서 전자기파까지
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/tonghap-06



07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까
대기·기압·복사 에너지로 읽는 날씨
21,000원 → **12,600원**
ssbook.kr/book/tonghap-07



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다
원자에서 암석·판·지구의 역사까지
20,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/tonghap-08

채식 (5)



사상체질과 채식
이제마의 사상·권도원의 팔체질·황제내경을 영양학과 분자생물학으로 다시 읽다
21,000원 → **12,600원**
ssbook.kr/book/sasang-veg



체질과 심리신경내분비
사상·팔체질·황제내경과 Big5·MBTI를 몸의 언어로 다시 읽다
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/constitution-neuro

역사 속의 채식인

채식의 역사를 사람들의 이야기로 읽다
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-history

채식이야기

채식에 관한 이야기
교보문고 판매
ssbook.kr/book/veg-story

우리 몸은 채식을 원한다

몸이 채식을 원하는 이유

교보문고 판매

ssbook.kr/book/body-wants-veg

라이프스타일 (3)



아주 쉬운 회춘의 원리

노화의 12가지 특징과 식이를 통한 회춘

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/rejuvenation



피부는 안에서 만들어진다

콜라겐·아쿠아포린·자가포식과 식물성 케톤식

18,400원 → **11,000원**

ssbook.kr/book/skin-inside

과학과 초월의 길목에서

과학과 영성이 만나는 자리

교보문고 판매

ssbook.kr/book/science-transcend

고대사 (5)



동아시아 1만 년의 기후와 땅

한반도에서 본 홀로세의 기후와 지형 변화

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/climate-ea-1



고려 서경(西京)의 위치를 추정하다 1권 방법편

여덟 가지 방법으로 동아시아 고전 지명을 좌표로 옮기기

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/seogyong-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제1권 기초편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제1~7장)

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/geonames-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제2권 기법편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제8~16장)

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/geonames-2



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제3권 적용편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (적용 사례)

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/geonames-3