



대입 과학논술 14 — 화학 결합·분자 구조·극성

원자가 전자 세기 × 전자쌍 반발 × 쌍극자 벡터 합

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-14

POD 정가 24,000원 → **14,400원** (60%)

ssbook.kr 홈페이지 안내

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

화학 결합· 분자 구조· 극성

화학 결합·분자 구조 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 7문항 · 2012~2024학년도



화학 결합·분자 구조·극성

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

화학 결합·분자 구조 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 원자가 전자 세기 × 전자쌍 반발 × 쌍극자 벡터 합 | 7문항 · 5개 대학 (2012~2024)

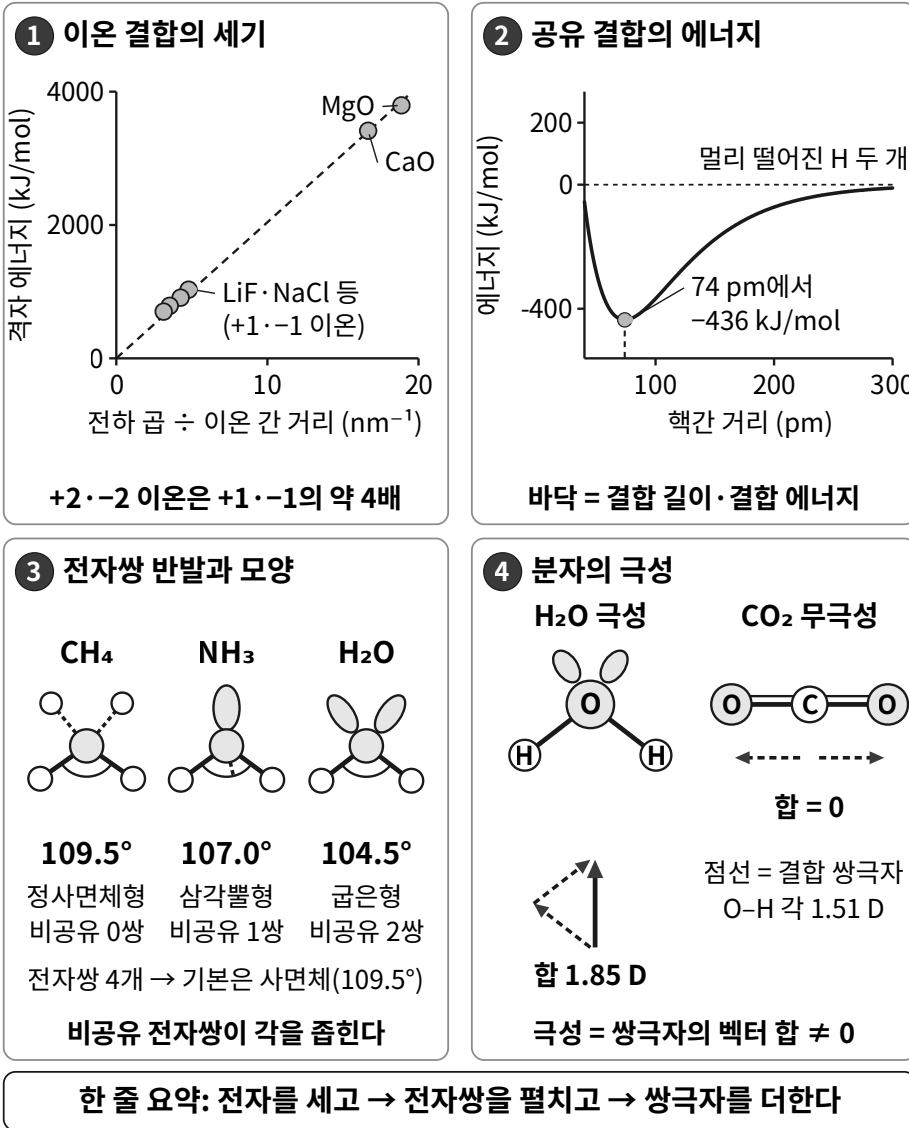


그림 1. 화학 결합·분자 구조·극성 단원의 그림 요약. ① 이온 결합의 세기(격자 에너지는 전하 곱 ÷ 이온 간 거리에 비례), ② 공유 결합의 에너지 (H₂ 퍼텐셜 에너지 곡선의 바닥이 결합 길이 74 pm · 결합 에너지 436 kJ/mol), ③ 전자쌍 반발과 모양(CH₄ 109.5°, NH₃ 107°, H₂O 104.5°), ④ 분자의 극성(결합 쌍극자의 벡터 합 - H₂O 1.85 D, CO₂ 0). 격자 에너지는 실측값, 이온 반지름은 6배위 값, H₂ 곡선은 모스 함수로 계산했다.

한 줄 요약: 전자를 세고(루이스) → 전자쌍을 펼치고(모양) → 쌍극자를 더한다(극성)

연결 단원 → 원자 구조·주기성 · 분자 간 힘·수소 결합 · 산화·환원 · 화학양론

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 화학 결합과 분자 구조인가	16
1.1 같은 흰 결정, 다른 녹는점	18
1.2 원자 두 개가 다가갈 때	19
1.3 바닥의 깊이 = 결합 에너지	21
1.4 결합을 만드는 세 가지 방법	22
1.5 이 책의 길: 전자 세기 → 모양 → 극성 → 기출	24
제 2장 원자가 전자와 옥텟 규칙	26
2.1 바깥 껍질의 전자만 손을 내민다	28
2.2 비활성 기체는 왜 반응하지 않나	29
2.3 옥텟 규칙: 잃거나, 얻거나, 나누거나	30
2.4 원소 기호 둘레에 점 찍기	32
2.5 필요한 결합 수 = 8 - 원자가 전자	33
제 3장 이온 결합: 주고받은 전자, 끌어당기는 전하	36
3.1 금속은 잃고 비금속은 얻는다	38
3.2 이온 결정: 번갈아 쌓인 양이온과 음이온	39
3.3 격자 에너지: 전하의 곱 ÷ 거리	40
3.4 녹는점 비교의 두 단계: 먼저 전하, 다음 거리	41
3.5 이온 결합 물질의 성질: 단단하지만 쪼개진다	43
제 4장 공유 결합: 전자쌍을 나누어 갖기	45
4.1 비금속끼리는 왜 주고받지 않고 나누나	47
4.2 공유 전자쌍이 하나, 둘, 셋	49
4.3 결합이 많을수록 짧고 강하다	49
4.4 결합 에너지로 반응열 어렵하기	51
4.5 공유 결합과 분자 물질	52
제 5장 금속 결합, 그리고 세 가지 결합 비교	54
5.1 전자 바다 모형	56
5.2 자유 전자로 설명하는 금속의 성질	57
5.3 자유 전자 수와 녹는점	58
5.4 네 가지 물질을 한 표로	60
5.5 성질로 결합 판별하기	62
제 6장 루이스 전자점식과 구조식 그리기	64
6.1 전자점식과 구조식의 약속	66
6.2 다섯 단계로 그리기	67
6.3 수소 화합물 네 개 연습	68
6.4 다중 결합이 필요한 분자	69
6.5 계산: 그린 전자 = 센 전자	71
제 7장 옥텟을 벗어나는 분자와 형식 전하	74
7.1 홀수 전자 분자: NO ₂ 는 왜 옥텟을 채울 수 없나	76
7.2 전자 부족: BF ₃ 의 붕소는 6개로 만족한다	77
7.3 확장된 옥텟: 3주기 원소는 8개를 넘을 수 있다	78

7.4 형식 전하: 전자의 뭉치를 따지는 장부	79
7.5 공명: 하나의 그림으로 그릴 수 없는 분자	80
7.6 질소 산화물과 산성비 — 반응식으로 한 걸음	82
제 8장 전자쌍 반발 이론: 분자의 기본 모양	84
8.1 전자쌍은 서로 밀어낸다	86
8.2 영역 2·3·4개: 180°, 120°, 109.5°	87
8.3 영역 5·6개: 삼각쌍뿔과 정팔면체	89
8.4 전자쌍 배치와 분자 모양은 다르다	90
8.5 입체 그림을 읽는 법	91
제 9장 비공유 전자쌍과 결합각	93
9.1 비공유 전자쌍은 더 넓게 퍼진다	95
9.2 CH ₄ 109.5° → NH ₃ 107° → H ₂ O 104.5°	96
9.3 다중 결합도 더 세게 민다	98
9.4 분자 모양에 이름 붙이기	100
9.5 모양을 답안에 쓰는 법	100
제 10장 전기 음성도: 전자쌍을 끌어당기는 힘	102
10.1 공유 전자쌍 줄다리기	104
10.2 폴링 값과 주기율표의 경향	105
10.3 전기 음성도 차와 결합의 성격	108
10.4 전자쌍이 치우치는 방향	109
10.5 헛갈리기 쉬운 세 가지	109
제 11장 결합의 극성과 쌍극자 모멘트	112
11.1 부분 전하 δ ⁺ ·δ ⁻	114
11.2 쌍극자 모멘트: μ = q × r	114
11.3 이온성 백분율	116
11.4 결합 쌍극자는 벡터다	118
11.5 쌍극자 모멘트는 어떻게 재나	119
제 12장 분자의 극성: 쌍극자를 더하면	121
12.1 벡터 더하기 복습	123
12.2 대칭이면 상쇄된다	123
12.3 비대칭이면 남는다	125
12.4 극성 판별 순서도	126
12.5 극성의 증거: 물줄기와 전자레인지	128
제 13장 자료로 원소를 찾고 분자를 세운다	131
13.1 단서 사전	133
13.2 순차 이온화 에너지의 급증	134
13.3 원자 반지름과 이온화 에너지 표	136
13.4 풀이 순서: 확정 → 소거 → 모순 검사	137
13.5 원소에서 분자로, 그리고 분류 흐름도	138
제 14장 몸속·지구·기술 속의 분자 구조, 그리고 2부로	141
14.1 핵산의 뼈대와 인산	143
14.2 대기 속의 질소 산화물	145
14.3 온실 기체와 분자의 모양	147
14.4 끓는점 비교의 입구	147
14.5 기본개념편을 마치며	149
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	151

부록 B. 용어 풀이	154
기출문제와 기본개념.....	161
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	162
0. 이 장의 사용법	163
1. 출제 개념.....	164
1.1 화학 결합과 원자가 전자·옥텟 규칙 — C1 · C2	164
1.2 이온 결합과 격자 에너지 — C3 · C4	165
1.3 공유 결합·금속 결합과 결합별 성질 — C5 · C6	165
1.4 루이스 전자점식·구조식 — C7	166
1.5 옥텟 규칙의 예외·형식 전하·공명 — C8 · C9	167
1.6 전자쌍 반발 이론과 결합각 — C10 · C11	167
1.7 전기 음성도와 결합의 극성 — C12 · C13	169
1.8 분자의 극성 판별 — C14	169
1.9 자료로 원소 판별하기·분류 흐름도 — C15 · A2	171
1.10 생체·대기 응용과 끓는점의 입구 — A1 · A3 · A4 · A5	171
1.11 그래프 개념도 읽는 법	172
2. 출제 경향.....	175
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	176
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	177
2.3 학교별 성향	178
논술답안작성 패턴분석	179
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	180
3. 답안 작성법	181
3.1 판별형·계산형 답안의 틀.....	181
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀.....	182
3.3 표기와 수치 규칙	182
3.4 시간 배분과 자기 점검	183
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	183
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	185
실전기출문제와 풀이과정	191
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	192
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	194
5.1 한눈에 보는 기출 7문항	194
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론.....	195
5.3 기본 개념 한눈에	195
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	197
6. 출제 문항 분석과 모범답안	198
〈기출문제 1 (경희대 2024년)〉	199
〈기출문제 2 (경희대 2024년)〉	209
〈기출문제 3 (연세대 2020년)〉	219
〈기출문제 4 (부산대 2015년)〉	228
〈기출문제 5 (인하대 2015년)〉	238
〈기출문제 6 (고려대 2012년)〉	250

〈기출문제 7 (고려대 2012년)〉	261
7. 변형·예상 문항	274
8. 강의 연결	278
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	279
8.2 강의 구성 시 유의점	279
9. 전체 문제 총평	280
9.1 숫자로 먼저 보기	280
9.2 다섯 가지 총평	280
9.3 대학별 한 줄 총평	281
9.4 이렇게 공부하자	282
10. 참고문헌	283

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 화학 결합·분자 구조 논제의 네 장면	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1	17
그림 4. 네 물질의 녹는점	18
그림 5. H ₂ 의 퍼텐셜 에너지 곡선	20
그림 6. Na ⁺ -Cl ⁻ 이온쌍의 쿨롱 에너지	23
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2	27
그림 9. 원자 번호와 원자가 전자 수	29
그림 10. Na ⁺ 와 Cl ⁻ 의 형성	31
그림 11. 2주기 원소의 전자점식	33
그림 12. 제 3장 개념도	36
그림 13. 생활 속 개념도 3	37
그림 14. NaCl 결정의 단위 구조	39
그림 15. 격자 에너지와 전하·거리	41
그림 16. 이온 결정이 쪼개지는 까닭	43
그림 17. 제 4장 개념도	45
그림 18. 생활 속 개념도 4	46
그림 19. 수소 분자의 공유 결합	48
그림 20. N ₂ 의 전자점식과 구조식	49
그림 21. 결합 차수와 결합 길이·에너지	50
그림 22. 제 5장 개념도	54
그림 23. 생활 속 개념도 5	55
그림 24. 금속 결합의 전자 바다 모형	57
그림 25. 결합 종류별 녹는점	61
그림 26. 결합 종류 판별 흐름도	61
그림 27. 제 6장 개념도	64
그림 28. 생활 속 개념도 6	65
그림 29. 루이스 구조식 다섯 단계	67
그림 30. 수소 화합물 네 개의 루이스 구조	68
그림 31. HCN·HCHO·CO ₂ 의 루이스 구조식	70
그림 32. 제 7장 개념도	74
그림 33. 생활 속 개념도 7	75
그림 34. NO ₂ 의 두 구조와 홀전자	76
그림 35. 중심 원자 주위 전자 수 6·10·12	78
그림 36. H ₃ PO ₄ 의 두 표기와 형식 전하	80
그림 37. O ₃ 의 공명과 결합 길이	81
그림 38. 제 8장 개념도	84
그림 39. 생활 속 개념도 8	85
그림 40. 다섯 가지 기본 구조	87
그림 41. 정사면체 각의 계산	88
그림 42. 평면 십자와 정사면체의 비교	89
그림 43. 제 9장 개념도	93
그림 44. 생활 속 개념도 9	94
그림 45. 비공유 전자쌍 수와 결합각	96
그림 46. NH ₃ 의 전자쌍 배치와 분자 모양	97
그림 47. HCHO와 HNO ₂ 의 결합각	98

그림 48. 제 10장 개념도	102
그림 49. 생활 속 개념도 10	103
그림 50. 1~3주기 전기 음성도	106
그림 51. 2·3주기 전기 음성도의 변화	106
그림 52. 전기 음성도 차와 결합의 성격	108
그림 53. 제 11장 개념도	112
그림 54. 생활 속 개념도 11	113
그림 55. 부분 전하와 쌍극자 화살표	115
그림 56. ΔEN 과 이온성 백분율	117
그림 57. 전기장 속 극성 분자의 정렬	119
그림 58. 제 12장 개념도	121
그림 59. 생활 속 개념도 12	122
그림 60. 여섯 분자의 결합 쌍극자와 합	124
그림 61. 분자의 극성 판별 순서도	126
그림 62. 대전 막대에 휘는 물줄기	128
그림 63. 제 13장 개념도	131
그림 64. 생활 속 개념도 13	132
그림 65. 2주기 원자의 보어 모형	134
그림 66. C와 Si의 순차 이온화 에너지	135
그림 67. 원자 반지름과 제1 이온화 에너지	136
그림 68. 기준별 분류 흐름도	139
그림 69. 제 14장 개념도	141
그림 70. 생활 속 개념도 14	142
그림 71. hexan의 당-인산 뼈대	144
그림 72. 가한 NO_2 의 질량과 생성된 HNO_3 의 질량	146
그림 73. 14·16족 수소 화합물의 끓는점	148
그림 74. 기본 결합각에서 벗어난 정도	168
그림 75. ΔEN 과 분자의 쌍극자 모멘트	170
그림 76. 전체 개념 그래프	173
그림 77. 개념별 출제 횟수	174
그림 78. 연도별 출제 문항 수	175
그림 79. 대학별 출제 문항 수	175
그림 80. 판별형 답안의 사슬	181
그림 81. 보어 모형 A~E(q250)	200
그림 82. 분류 흐름도 재구성(q250)	201
그림 83. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	202
그림 84. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	211
그림 85. $CH_4 \cdot NH_3 \cdot H_2O$ 의 구조식과 모양(q254)	214
그림 86. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	220
그림 87. 인산의 두 가지 루이스 구조식(q128)	223
그림 88. hexan의 당-인산 뼈대(q128)	225
그림 89. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	229
그림 90. A~G의 반지름-제1 이온화 에너지(q201)	232
그림 91. BF_3 와 NF_3 의 루이스 구조식(q201)	232
그림 92. 〈인하대 2015〉 개념 그래프	240
그림 93. $NO_2 \cdot HNO_2$ 의 전자점식(q297)	243
그림 94. NO_2 질량- HNO_3 질량 그래프(q297)	246
그림 95. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	252
그림 96. 결합 쌍극자의 벡터 합(q002)	255

그림 97. 피스톤 용기 실험 장치(q002).....	257
그림 98. 14·17족 수소 화합물의 끓는점(q3)	262
그림 99. 2주기 수소 화합물의 끓는점-전기 음성도(q3)	263
그림 100. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	264

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 세 가지 화학 결합 미리 보기.....	22
표 4. 2주기 원자의 원자가 전자·홀전자·결합 수.....	33
표 5. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 6. 이온 결합 물질의 이온 간 거리·전하·격자 에너지·녹는점.....	40
표 7. 결합 차수에 따른 결합 길이와 결합 에너지.....	50
표 8. 결합 종류별 물질의 성질 비교.....	60
표 9. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	64
표 10. 분자별 총 원자가 전자와 전자쌍 수.....	71
표 11. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	74
표 12. 옥텟 규칙 예외의 세 유형.....	81
표 13. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	84
표 14. 전자쌍 영역 수와 기본 구조.....	90
표 15. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	93
표 16. 전자쌍 영역 수·비공유 전자쌍 수와 분자 모양.....	100
표 17. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	102
표 18. 2·3주기 원소의 전기 음성도.....	107
표 19. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	112
표 20. 할로젠화 수소의 결합 길이·쌍극자 모멘트·이온성 백분율.....	116
표 21. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	121
표 22. 분자의 모양·쌍극자 모멘트·극성.....	127
표 23. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	131
표 24. 원소 판별 단서 사전.....	133
표 25. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	141
표 26. 이 책의 개념이 쓰인 생체·환경 장면.....	149
표 27. 2부 목차와 내용.....	162
표 28. 2주기 원자의 원자가 전자·홀전자·공유 결합 수.....	164
표 29. 이온 결합 물질의 거리·전하·격자 에너지·녹는점(이온 반지름은 6배위 값).....	165
표 30. 결합 차수와 결합 길이·결합 에너지.....	165
표 31. 분자별 총 원자가 전자·공유 전자쌍·비공유 전자쌍.....	166
표 32. 옥텟 규칙 예외의 세 유형.....	167
표 33. 전자쌍 영역 수·비공유 전자쌍 수와 분자 모양.....	168
표 34. 분자의 모양·쌍극자 모멘트·극성.....	170
표 35. 원소 판별 단서 사전.....	171
표 36. 이 책의 기출 문항 목록.....	176
표 37. 대학별 출제 문항.....	176
표 38. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	176
표 39. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	178
표 40. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 이 단원에서의 쓰는 순서.....	180
표 41. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	180
표 42. 서술형 답안의 문장 틀(분자 구조 설명).....	182
표 43. 논술 기본 패턴 5가지(화학 결합·분자 구조 답안).....	183
표 44. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은).....	184
표 45. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는).....	192
표 46. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용.....	192
표 47. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호).....	194

표 48. 학년도별 문항 수와 원문 사정.....	194
표 49. 소문항 17개에 적용한 주 답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주)	195
표 50. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순).....	196
표 51. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	197
표 52. <표 2> 분류 기준 (ㄱ)~(ㄹ)	200
표 53. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	202
표 54. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	203
표 55. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	212
표 56. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	213
표 57. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	220
표 58. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	221
표 59. 2, 3주기 원소 A~G의 성질(원문 표를 다시 조판).....	228
표 60. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	229
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	230
표 62. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	240
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	241
표 64. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	252
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	254
표 66. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	264
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	266
표 68. 인강 회차 구성(제안)	278
표 69. 7개 문항의 규모	280
표 70. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	281

제 1 부

기본개념편

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

화학 결합·분자 구조·극성

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 원자의 바깥 전자 → 결합의 세 종류(이온·공유·금속) → 루이스 구조 → 분자의 모양 → 전기 음성도와 극성 → 자료로 원소를 찾아 분자를 세우는 추론의 순서로 이어집니다. 앞 장에서 센 전자 수가 다음 장의 모양이 되고, 그 모양이 다시 극성을 정하므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 분자 사이에 작용하는 힘(분산력·쌍극자 힘·수소 결합)과 끓는점은 같은 시리즈의 다음 권 《분자 간 힘·수소 결합·계면》이 본격적으로 다루고, 이 책은 그 입구까지 안내합니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 결합은 왜 생기나	1~2장	원자가 서로 붙으면 에너지가 낮아진다는 데서 출발해, 바깥 껍질 전자(원자가 전자)와 옥텟 규칙을 세운다. 이후 모든 장의 바닥이 된다.
B. 결합의 세 종류	3~5장	전자를 주고받는 이온 결합(격자 에너지와 녹는점), 전자쌍을 나누는 공유 결합(결합 차수·길이·에너지), 전자 바다의 금속 결합을 비교한다.
C. 전자를 세어 구조를 그린다	6~7장	루이스 전자점식과 구조식을 다섯 단계로 그리고, 옥텟을 벗어나는 분자(NO_2 , BF_3 , H_3PO_4)와 형식 전하·공명을 다룬다.
D. 모양과 극성	8~12장	전자쌍 반발 이론으로 기본 모양을 정하고, 비공유 전자쌍이 결합각을 좁히는 까닭을 본다. 전기 음성도로 결합의 극성을, 쌍극자의 벡터 합으로 분자의 극성을 판별한다.
E. 추론과 응용	13~14장	전자 배치·이온화 에너지 자료로 원소를 찾아 분자를 세우는 기출형 추론을 연습하고, 핵산의 인산·대기의 질소 산화물·온실 기체로 넓힌 뒤 2부로 간다.

표 1의 구간은 기출이 묻는 순서와 같다. 기출 문항은 거의 언제나 “원소를 찾는다 → 루이스 구조를 그린다 → 모양을 말한다 → 극성이나 성질을 판단한다”의 사슬로 되어 있다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 참고문헌의 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있고, 바로 뒤에 그 장의 개념이 일상에서 보이는 장면을 한 쪽 그림으로 담은 〈생활 속 개념도〉가 있습니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 그림과 표로 돌아가 전자 수를 한 번 더 세어 보십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 화학 결합과 분자 구조인가	결합 에너지의 뜻 · 전기적 인력 · 세 가지 결합의 첫인상
기본개념편 제 2장 (26쪽)	원자가 전자와 옥텟 규칙	원자가 전자 · 전자점 · 옥텟 규칙 · 비활성 기체 배치
기본개념편 제 3장 (36쪽)	이온 결합: 주고받은 전자, 끌어당기는 전하	이온의 형성 · 이온 결정 · 격자 에너지 · 녹는점 비교

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 4장 (45쪽)	공유 결합: 전자쌍을 나누어 갖기	공유 전자쌍 · 단일·이중·삼중 결합 · 결합 길이 · 결합 에너지
기본개념편 제 5장 (54쪽)	금속 결합, 그리고 세 가지 결합 비교	자유 전자 · 금속의 성질 · 결합별 물질 성질 비교
기본개념편 제 6장 (64쪽)	루이스 전자점식과 구조식 그리기	총 원자가 전자 · 중심 원자 · 다섯 단계 그리기 · 비공유 전자쌍
기본개념편 제 7장 (74쪽)	옥텟을 벗어나는 분자와 형식 전하	홀전자 분자 · 전자 부족 · 확장된 옥텟 · 형식 전하 · 공명
기본개념편 제 8장 (84쪽)	전자쌍 반발 이론: 분자의 기본 모양	전자쌍 영역 · 직선형 · 평면 삼각형 · 정사면체 · 삼각쌍뿔 · 정팔면체
기본개념편 제 9장 (93쪽)	비공유 전자쌍과 결합각	반발의 세기 순서 · 삼각뿔형 · 굽은형 · 다중 결합의 효과
기본개념편 제 10장 (102쪽)	전기 음성도: 전자쌍을 끌어당기는 힘	폴링 척도 · 주기적 경향 · 전기 음성도 차와 결합의 성격
기본개념편 제 11장 (112쪽)	결합의 극성과 쌍극자 모멘트	부분 전하 $\delta+$ · $\delta-$ · 쌍극자 모멘트 $\mu = q \cdot r$ · 이온성 백분율
기본개념편 제 12장 (121쪽)	분자의 극성: 쌍극자를 더하면	벡터 합 · 대칭과 무극성 · 극성 판별 순서도
기본개념편 제 13장 (131쪽)	자료로 원소를 찾고 분자를 세운다	전자 배치 단서 · 순차 이온화 에너지의 급증 · 원자 반지름 · 분류 흐름도
기본개념편 제 14장 (141쪽)	몸속·지구·기술 속의 분자 구조, 그리고 2부로	핵산 뼈대의 인산 · 질소 산화물 · 온실 기체 · 끓는점 비교의 입구

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 루이스 구조는 반드시 손으로 점을 찍어 그려 본다. 점의 개수를 세는 습관이 이 단원 점수의 절반이다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 막히는 곳은 대개 7장(옥텟의 예외·형식 전하)과 12장(벡터 합으로 극성 판별)이다. 이 두 장은 두 번 읽는다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

화학 결합과 분자 구조는 중학교 과학에서 원자 모형과 함께 처음 만나고, 대학 논술에서는 원소를 추리하고 구조를 그리고 성질을 설명하는 긴 사슬로 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자는 원자핵과 전자로 되어 있다, 같은 전하는 밀고 다른 전하는 당긴다)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 것을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 규칙을 만든다.

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 고등학교 2학년으로 논술을 준비한다. 돌집 과학 방에서 화학을 배운다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 부엌과 시장의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학 교수. 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

토요일 아침, 충북 단양 돌집 과학방. 난롯가 탁자 위에 이모가 가져온 굵은소금 한 줌, 각설탕 두 개, 그리고 얼음 몇 조각이 접시에 놓여 있다.

이모 교수님, 오늘 두부 간수 만들다가 궁금해서 가져왔어요. 소금이랑 설탕이랑 얼음, 셋 다 하얗고 반짝이는 알갱이인데 성질은 영 판판이더라고요.

석 교수 좋은 재료를 가져오셨네요. 이 셋을 어떻게 구별하시겠어요?

이모 맛을 보면 되죠. 짜고, 달고, 아무 맛도 없고.

하린 불에 올려 보면 어때요? 설탕은 금방 녹아서 캐러멜이 되고, 소금은 프라이팬에서 볶아도 그대로잖아요.

석 교수 바로 그거다. 얼음은 0 °C면 녹고, 설탕은 약 186 °C에서 녹기 시작하는데, 소금은 801 °C가 되어야 녹는다. 같은 하얀 결정인데 녹는점이 수백 도씩 차이 나지.

태오 소금은 이온 결합이고 설탕은 공유 결합 분자라서요. 시험에 나오는 말이에요.

석 교수 이름은 맞혔다. 그런데 태오야, 소금을 녹으려면 무엇을 끓여야 하고, 얼음을 녹으려면 무엇을 끓여야 하지?

태오 어…… 소금은 Na⁺와 Cl⁻ 사이의 결합이고, 얼음은 H와 O 사이의 결합 아닌가요?

석 교수 얼음이 녹아 물이 되어도 물 분자 H₂O는 그대로다. O-H 결합을 끊는 게 아니라 분자와 분자 사이를 떼어 놓는 거야. 이 차이를 말로 정확히 쓰는 것, 그게 이 단원의 첫 번째 시험이다.

하린 그럼 분자 안의 결합과 분자 사이의 힘이 따로 있는 거네요?

석 교수 그렇다. 이 책은 분자 안의 결합 — 원자들이 왜 붙고, 몇 개씩 붙고, 어떤 모양으로 붙는지 — 를 끝까지 따라간다. 분자 사이의 힘은 그 다음 이야기고.

이모 모양이요? 분자에도 모양이 있어요?

석 교수 있지요. 물 분자는 V자로 104.5°만큼 굽어 있고, 이산화 탄소는 일직선입니다. 그 모양 하나 때문에 물은 전자레인지에서 데워지고, 접시에 쏟으면 둥글게 맺히고, 소금을 녹입니다.

태오 기출을 보니까 “원소를 찾아서 루이스 구조식을 그리고 분자 구조와 극성을 서술하라”가 계속 나와요. 2024년 경희대도 그렇고요.

석 교수 그 한 문장에 이 책 열네 장이 다 들어 있다. 원소를 찾으려면 전자 배치를 읽어야 하고, 루이스 구조를 그리려면 전자를 셀 줄 알아야 하고, 모양은 전자쌍끼리의 반발로, 극성은 전기 음성도와 벡터 합으로 정한다.

하린 전자를 세는 거면 저도 할 수 있을 것 같아요.

석 교수 할 수 있다. 이 단원의 계산은 덧셈과 뺄셈, 그리고 각도 몇 개면 충분하다. 다만 한 개라도 잘못 세면 구조가 통째로 틀린다. 그러니 오늘부터 점 하나하나를 손으로 찍자.

이모 그럼 첫 질문은 뭘로 할까요?

석 교수 가장 근본적인 것으로 하지요. 원자는 왜 혼자 있지 않고 서로 붙을까요?

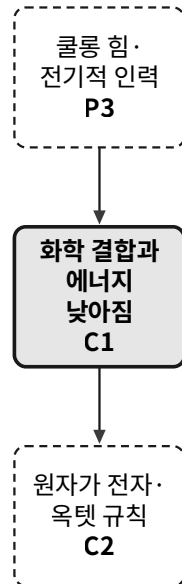
왜 화학 결합과 분자 구조인가? 1장은 원자 두 개가 다가갈 때 에너지가 어떻게 변하는지에서 출발한다. 전자와 원자핵 사이의 전기적 인력이 반발보다 커지는 거리에서 에너지가 가장 낮아지고, 그 깊이만큼 결합 에너지다. 그 낮아짐을 이루는 방법이 전자를 주고받는 이온 결합, 전자쌍을 나누는 공유 결합, 전자를 함께 쓰는 금속 결합이다. 전자를 세어 구조를 그리고, 전자쌍을 펼쳐 모양을 정하고, 쌍극자를 더해 극성을 판단하는 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 화학 결합과 분자 구조인가

새 개념 결합 에너지의 뜻 · 전기적 인력 · 세 가지 결합의 첫인상

이어짐 옥텟 규칙 2장 · 이온 결합 3장 · 공유 결합 4장 · 분자의 극성 12장

이 장의 개념도



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

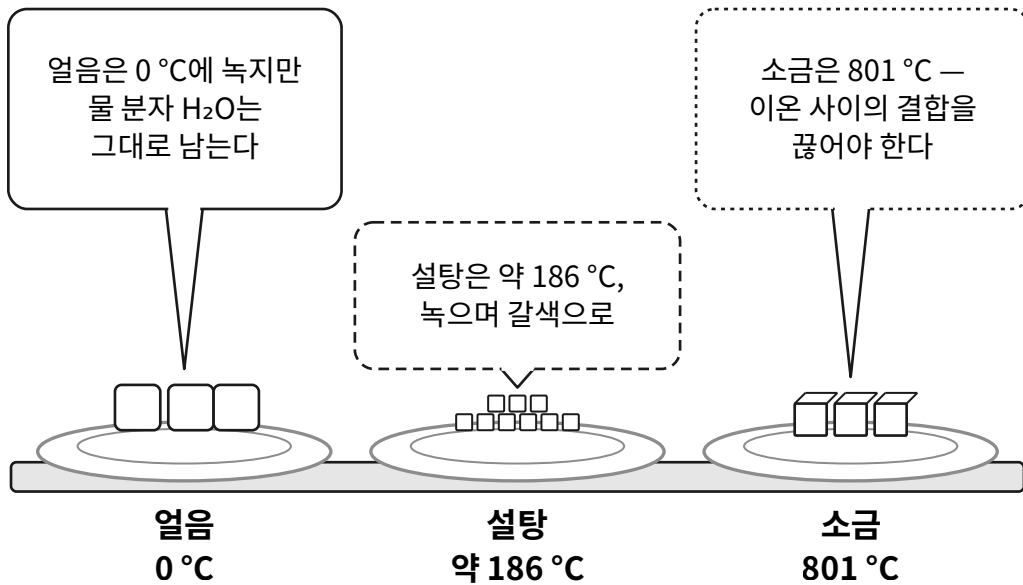
그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 화학 결합과 에너지 낮아짐)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

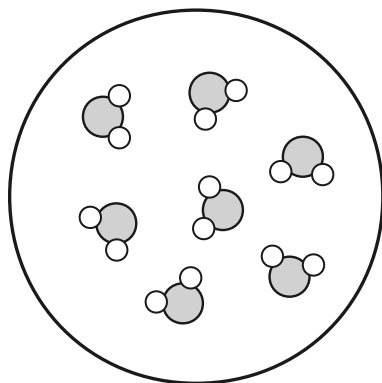
이 장의 개념은 기출에서 직접 묻기보다 다른 장의 개념을 받치는 바탕으로 쓰였다.

같은 흰 결정, 다른 녹는점

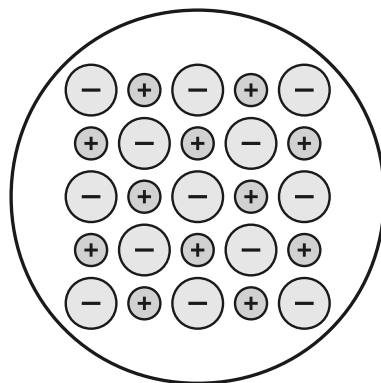
부엌 접시 위의 소금·설탕·얼음



확대해 보면



얼음: H₂O 분자가 모인 결정
분자 사이의 끌림만 끊으면 녹는다



소금: Na⁺(작은 원)와 Cl⁻(큰 원)
이온 사이의 결합을 끊어야 녹는다

그림 3. 부엌 접시 위의 소금·설탕·얼음 — 모두 흰 결정이지만 녹을 때 끊어지는 것이 다르다(모식도, 녹는점은 1기압 값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 녹는점 차이는 녹일 때 끊어야 하는 것의 차이이다.
2. 얼음이 녹아도 H₂O 분자 안의 O-H 결합은 끊어지지 않는다.
3. 소금은 Na⁺와 Cl⁻ 사이의 강한 전기적 인력을 끊어야 해서 801 °C에서야 녹는다.

이 장의 출발점

이 장은 다음 세 가지만 알면 읽을 수 있다. ① 원자는 양전하를 띤 원자핵과 음전하를 띤 전자로 이루어져 있다. ② 반대 전하는 서로 끌어당기고 같은 전하는 서로 밀어낸다. 그 힘의 크기는 두 전하의 곱에 비례하고 거리의 제곱에 반비례한다(쿨롱 법칙, $F = kq_1q_2/r^2$). ③ 1몰은 입자 6.022×10^{23} 개이고, 에너지는 보통 1몰당 킬로줄(kJ/mol)로 적는다.

초가를 토요일 아침, 단양 돌집 과학방 탁자 위에 흰 접시 세 개가 놓여 있었다. 하나에는 굵은소금, 하나에는 백설탕, 하나에는 냉동실에서 막 꺼낸 얼음 조각. 석 교수는 세 접시를 나란히 밀어 놓고 아이들이 들어오기를 기다렸다.

하린 교수님, 오늘은 요리 수업이에요? 소금, 설탕, 얼음이네요.

석 교수 오늘부터 화학 결합과 분자 구조를 공부한다. 그 첫 질문을 이 접시 세 개로 던지려고 한다. 셋 다 하얗고, 셋 다 작은 결정이지. 그런데 셋을 프라이팬에 올려 데우면 어떻게 될까?

태오 얼음은 금방 녹고요, 설탕은 한참 있다가 녹으면서 갈색 캐러멜이 되고, 소금은... 프라이팬으로는 안 녹을 것 같은데요.

석 교수 그렇다. 겉모습은 비슷한데 녹는 온도가 전혀 다르다. 오늘 수업은 “왜 다를까”라는 질문 하나로 끝까지 간다.

1.1 같은 흰 결정, 다른 녹는점

석 교수 먼저 숫자를 보자. 그림 4에 1기압에서의 녹는점을 막대로 그렸다. 얼음은 0 °C, 설탕은 약 186 °C, 소금은 801 °C, 철은 1538 °C이다.

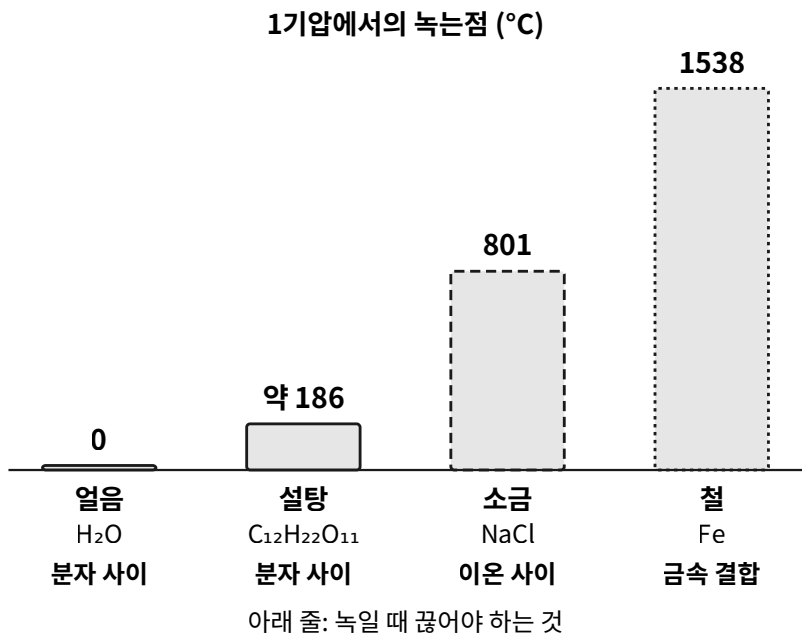


그림 4. 네 물질의 녹는점(1기압) — 얼음 0 °C, 설탕(수크로스) 약 186 °C(녹으면서 분해가 시작된다), 소금(NaCl) 801 °C, 철 1538 °C. 막대 아래에 녹일 때 끊어야 하는 것을 적었다.

이모 소금이 801 °C라니요. 가스 불은 몇 도쯤 되나요?

- 석 교수** 가스레인지 불꽃의 가장 뜨거운 곳은 1000 °C를 넘지만, 프라이팬 바닥은 보통 200~300 °C 정도예요. 그래서 설탕은 녹는데 소금은 그대로 남는 거지요.
- 하린** 그럼 녹는다는 건 정확히 뭐예요? 그냥 물렁해지는 거예요?
- 석 교수** 고체에서는 입자들이 제자리에 묶여 진동만 한다. 녹는다는 건 그 입자들이 자리를 벗어나 서로 미끄러질 수 있게 된다는 뜻이야. 입자를 붙잡고 있던 끈을 끊거나 느슨하게 해야 하지. 녹는점이 높다는 것은 그 끈이 강하다는 뜻이다.
- 태오** 그러면 얼음의 끈이 제일 약한 거네요. 그런데 물 분자 H_2O 의 O-H 결합은 꽤 세다고 배웠는데요?
- 석 교수** 좋은 질문이다. 여기서 이 책 전체를 꿰는 구별이 나온다. 얼음이 녹을 때 끊어지는 것은 물 분자 **안**의 O-H 결합이 아니라, 물 분자와 물 분자 **사이**의 끌림이다. 얼음이 녹은 물도 여전히 H_2O 이지? 분자 자체는 멀쩡하다.
- 하린** 아, 녹은 물을 다시 얼리면 또 얼음이 되니까 분자는 그대로겠네요.
- 석 교수** 그렇다. 반면에 소금은 Na^+ 와 Cl^- 라는 이온이 번갈아 쌓인 결정이다. “소금 분자”라는 독립된 덩어리가 따로 없어서, 녹으려면 이온과 이온 사이의 결합 자체를 흔들어 풀어야 해. 그 결합이 강하니 801 °C까지 올라가야 한다.
- 이모** 설탕은요? 설탕도 분자라면서요. 그런데 왜 얼음보다는 훨씬 높아요?
- 석 교수** 설탕 분자 $C_{12}H_{22}O_{11}$ 은 물 분자보다 훨씬 크고 -OH가 여덟 개나 있어서 분자 사이의 끌림이 큼니다. 그래도 녹을 때 끊는 것은 분자 사이의 끌림이에요. 다만 186 °C 근처에서는 분자 안의 결합도 일부 끊어지기 시작해서 캐러멜 색이 나지요. 분자 사이의 끌림이 어떤 힘인지는 이 책 다음 권에서 자세히 다룹니다.

분자 안의 결합과 분자 사이의 힘

이 책이 다루는 “화학 결합”은 원자와 원자를 묶는 힘이다. 공유 결합(분자 안), 이온 결합(이온 사이), 금속 결합(금속 원자 사이)이 여기에 속한다. 분자와 분자 사이의 끌림(분자 간 힘)은 화학 결합보다 훨씬 약하며, 물질의 끓는점·녹는점을 비교할 때 중요하다. 이 책은 분자 간 힘을 판단하는 데 필요한 분자 구조(모양·극성)까지 다루고, 힘의 종류 자체는 다음 권으로 넘긴다.

1.2 원자 두 개가 다가갈 때

- 석 교수** 그럼 결합이란 정확히 무엇일까. 가장 단순한 분자인 수소 분자 H_2 로 생각해 보자. 수소 원자 두 개가 아주 멀리 떨어져 있다가 천천히 다가온다고 하자.
- 하린** 원자는 전체적으로 중성이잖아요. 그럼 서로 아무 힘도 안 받지 않아요?
- 석 교수** 멀리 있으면 그렇다. 그런데 가까워지면 한 원자의 전자가 상대 원자의 원자핵에도 끌리기 시작한다. 전자 하나가 원자핵 둘에 동시에 끌리는 셈이지. 그 인력이 두 원자를 끌어당긴다. 대신 너무 가까워지면 원자핵과 원자핵, 전자와 전자가 서로 밀어낸다.
- 태오** 끌어당기는 힘과 밀어내는 힘이 다 있으니까, 둘이 균형을 이루는 거리가 있겠네요.
- 석 교수** 그 거리를 에너지로 보면 더 분명하다. **그림 5**는 두 수소 원자 사이 거리에 따른 에너지를 계산해 그린 것이다. 멀리 떨어진 상태를 에너지 0으로 잡았다.

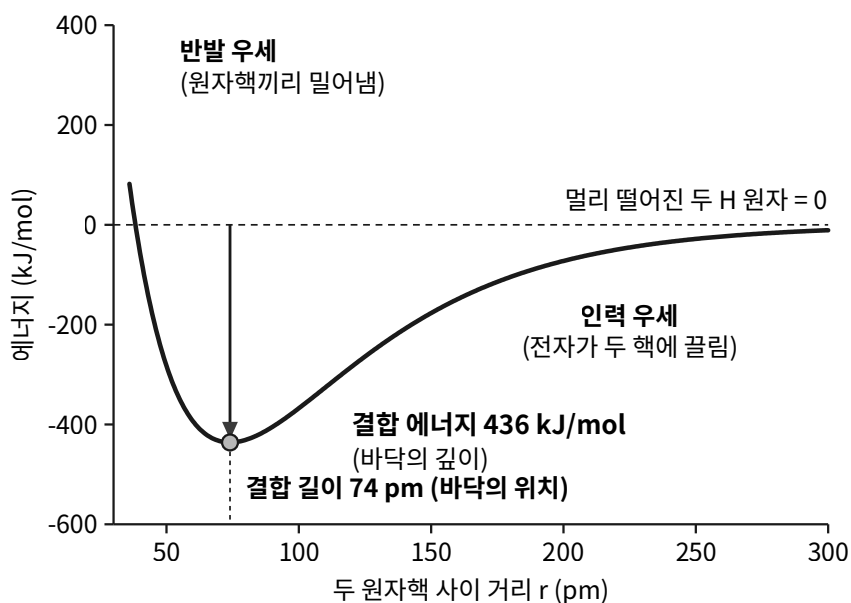


그림 5. 수소 분자의 퍼텐셜 에너지 곡선 — 두 수소 원자 사이 거리 r 에 따른 에너지. 모스 함수 $V(r) = D_e[(1 - e^{-a(r-r_e)})^2 - 1]$ 에 $D_e = 436 \text{ kJ/mol}$, $r_e = 74 \text{ pm}$, $a = 0.0194 \text{ pm}^{-1}$ 을 넣어 계산했다. 바닥의 위치가 결합 길이, 바닥의 깊이가 결합 에너지이다.

석 교수 오른쪽 끝에서 왼쪽으로, 곧 원자가 다가오는 방향으로 읽어 보자. 에너지가 점점 내려가다가 74 pm에서 가장 낮은 바닥에 닿고, 더 다가가면 가파르게 올라간다.

하린 에너지가 내려간다는 게 좋은 거예요?

석 교수 공을 생각해 보라. 비탈에 놓인 공은 더 낮은 곳으로 굴러간다. 원자도 에너지가 낮아지는 쪽으로 움직이고, 가장 낮은 바닥에서 멈춘다. 그 바닥에 머문 상태가 바로 결합한 상태다. 결합은 “에너지가 낮아진 상태”라고 정의해도 된다.

태오 그러면 바닥의 위치 74 pm이 H-H 결합 길이이고, 바닥의 깊이 436 kJ/mol이 결합 에너지인 거네요.

석 교수 정확하다. 74 pm은 $74 \times 10^{-12} \text{ m}$, 곧 0.074 nm이다. 수소 원자 두 개가 그 거리에서 가장 편안하다는 뜻이지.

이모 바닥보다 더 가까이 붙으면 왜 에너지가 그렇게 빨리 올라가요?

석 교수 두 원자핵이 모두 양전하라서 가까울수록 세게 밀어내요. 쿨롱 힘은 거리의 제곱에 반비례하니까 조금만 더 다가가도 반발이 급격히 커집니다. 그래서 곡선 왼쪽 벽이 거의 수직으로 서 있지요.

결합 에너지의 부호

그래프의 바닥은 -436 kJ/mol 이다. 결합이 생기면 에너지가 436 kJ/mol만큼 낮아지고(그만큼 열로 나온다), 결합을 끊으려면 436 kJ/mol을 넣어 주어야 한다. 교과서와 기출에서 “결합 에너지 436 kJ/mol”이라고 할 때는 **끊는 데 드는 에너지**를 양수로 적은 것이다. 답안에서는 “결합이 형성될 때 방출, 끊을 때 흡수”를 한 번 밝혀 두면 부호 혼동이 없다.

결합이라는 생각의 내력

태오 원자끼리 붙는 이유를 사람들이 언제부터 이렇게 설명했어요?

석 교수 오래되지 않았다. 19세기 화학자들은 원자마다 “손”이 몇 개 있다고 생각했어. 수소는 손이 하나, 산소는 둘, 탄소는 넷. 이것을 원자가라고 불렀지. 그런데 그 손이 무엇인지는 아무도 몰랐다. 1897년에 전자가 발견되고 나서야 손의 정체를 전자로 설명할 수 있게 됐다.

하린 그럼 손이 전자예요?

석 교수 1916년 미국의 루이스가 “두 원자가 전자 두 개를 함께 가지면 결합이 된다”는 생각을 내놓았다. 같은 해 독일의 코셀은 “한 원자가 전자를 내주고 다른 원자가 받아 생긴 이온이 서로 끌어당긴다”고 이온 결합을 설명했고. 2장에서 볼 옥텟 규칙이 이 두 사람의 생각에서 나왔다.

태오 그런데 전자 두 개를 나눠 가진다고 왜 에너지가 낮아지는지는 아직 설명이 안 됐잖아요.

석 교수 날카롭다. 그 답은 1927년 하이틀러와 런던이 양자 역학으로 수소 분자의 에너지를 계산하면서 나왔다. 전자가 두 원자핵 사이 공간에 머물 확률이 커지면 두 원자핵 모두에 끌려 에너지가 낮아진다는 것을 수식으로 보였지. 그 계산 결과가 지금 본 곡선과 같은 모양이다. 계산 방법 자체는 교과 밖 심화이니, 우리는 “전자가 두 원자핵 사이에 모여 양쪽을 다 끌어당긴다”는 그림만 가져가자.

이모 백 년 남짓 된 생각이군요. 소금이나 설탕은 수천 년을 써 왔는데요.

석 교수 네, 물질은 오래 써 왔지만 왜 그런 성질을 갖는지 설명할 수 있게 된 건 최근이에요. 그래서 이 단원 기출에는 “왜 그런지 설명하라”는 서술형이 많습니다. 결합의 원리를 전기적 인력과 에너지로 설명할 수 있으면 그 질문에 답할 수 있어요.

1.3 바닥의 깊이 = 결합 에너지

석 교수 436 kJ/mol은 수소 분자 1몰, 곧 6.022×10^{23} 개의 결합을 한꺼번에 끊는 에너지다. 분자 하나만 보면 얼마일까?

문제 1.1

H-H 결합 에너지는 436 kJ/mol이다. 수소 분자 한 개의 결합을 끊는 데 필요한 에너지는 몇 J인가? (아보가드로 수 $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

하린 436을 6.022×10^{23} 으로 나누면 되죠? $436 \div 6.022 \times 10^{23} = 7.24 \times 10^{-22}$ 요.

석 교수 단위를 붙여 보자. 무엇을 나눴지?

하린 아, 436은 킬로줄이에요. 줄로 바꾸면 436000 J이니까 $436000 \div 6.022 \times 10^{23} = 7.24 \times 10^{-19}$ J이네요. 천 배 차이가 나요.

석 교수 맞다. 정답은 분자 한 개당 7.24×10^{-19} J이다. kJ를 J로 바꾸는 단계를 빠뜨리면 답이 천 배 틀린다. 계산을 마치면 단위가 J/분자 하나인지 kJ/mol인지 꼭 다시 읽자.

태오 10^{-19} J이면 엄청 작은 것 같은데, 그게 센 결합이에요?

석 교수 분자 하나의 세계에서는 큰 에너지다. 실온(25 °C)에서 분자 하나가 가진 열에너지의 척도는 약 4×10^{-21} J라서, H-H 결합은 그보다 약 180배 깊은 바닥이다. 그래서 수소 기체는 상온에서 저절로 원자로 쪼개지지 않는다.

이모 그 바닥 깊이가 물질마다 다르겠네요. 소금이 잘 안 녹는 것도 바닥이 깊어서고요.

- 석 교수** 네, 바로 그 생각이 이 책의 출발점이에요. 결합마다 바닥의 깊이와 위치가 다르고, 그 차이가 녹는점, 반응성, 모양, 극성까지 이어집니다.
- 태오** 다른 결합은 얼마나 깊어요?
- 석 교수** 몇 개만 보자. H-F는 567 kJ/mol, H-Cl은 431 kJ/mol, F-F는 155 kJ/mol이다. 결합 길이는 각각 92, 127, 142 pm이고. 플루오린 기체 F₂가 거의 모든 물질과 격렬하게 반응하는 까닭 하나가 여기 있다. F-F의 바닥이 얕아서 쉽게 끊어지고, 끊어진 F가 H와 만나면 훨씬 깊은 H-F 바닥으로 떨어지면서 큰 에너지를 내놓지.
- 하린** 얕은 바닥에서 깊은 바닥으로 옮겨 가는 게 반응이네요.
- 석 교수** 그렇게 보면 화학 반응 대부분이 설명된다. 반응열을 결합 에너지로 어림하는 방법은 4장에서 한 번 맛보고, 자세한 계산은 열화학 단원으로 넘긴다.

1.4 결합을 만드는 세 가지 방법

- 석 교수** 원자가 에너지 바닥을 만드는 방법은 크게 셋이다. 표 3을 보자.

표 3. 세 가지 화학 결합 미리 보기 — 전자를 다루는 방식과 대표 물질

결합	전자는 어떻게	예	대표 성질	자세히
이온 결합	금속 원자가 전자를 잃고 비금속 원자가 얻어 생긴 양이온·음이온이 끌어당김	NaCl, MgO	녹는점이 높고 단단하나 쪼개짐, 녹이면 전기가 통함	3장
공유 결합	비금속 원자가끼리 전자쌍을 나누어 가짐	H ₂ , H ₂ O, CH ₄	분자를 이룸(다이아몬드처럼 거대한 그물도 있음)	4장
금속 결합	금속 양이온 사이를 자유 전자가 채움	Na, Fe, Cu	전기·열이 잘 통하고 잘 퍼짐	5장

- 하린** 세 가지 다 결국 전자가 하는 일이네요.
- 석 교수** 그렇다. 화학 결합은 모두 전자와 원자핵 사이의 전기적 인력에서 나온다. 차이는 전자를 어디에 두느냐야. 한쪽에 몰아주면 이온 결합, 둘 사이에 나누어 두면 공유 결합, 모두가 함께 쓰면 금속 결합이다.
- 태오** 이온 결합은 그냥 +와 -가 당기는 거니까 계산이 쉽겠네요.
- 석 교수** 그래서 이온 결합으로 먼저 계산 연습을 해 보자. Na⁺와 Cl⁻ 이온 한 쌍이 거리 r만큼 떨어져 있으면 에너지는 $E = -kq_1q_2/r$ 이다. 음의 부호는 끌어당겨서 에너지가 낮아진다는 뜻이고. 그림 6가 그 곡선이다.

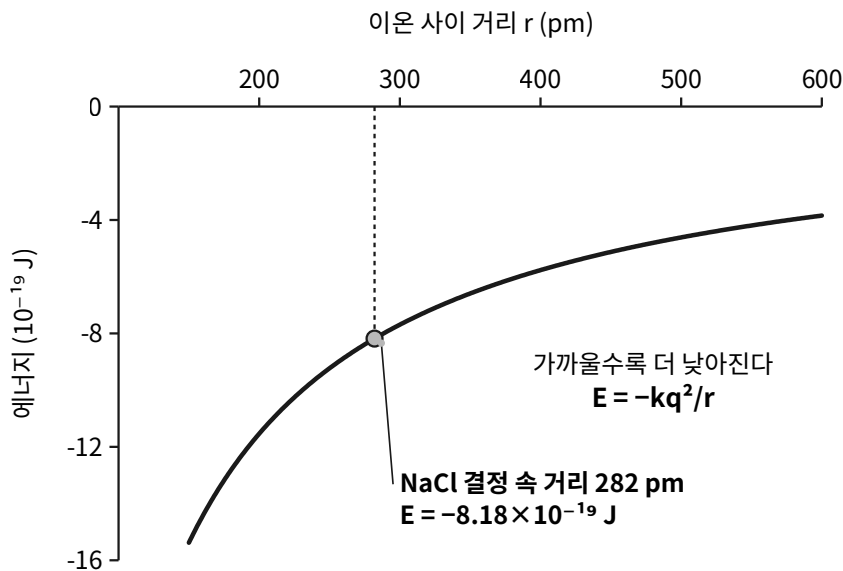


그림 6. Na^+-Cl^- 이온 한 쌍의 쿨롱 에너지 $E = -kq^2/r$ — 거리 150~600 pm에서 계산한 곡선. 고체 NaCl 속 이온 간 거리 282 pm에서 -8.18×10^{-19} J이다(반발 항은 넣지 않았다).

문제 1.2

Na^+ 와 Cl^- 사이 거리가 282 pm일 때 이온쌍 하나의 쿨롱 에너지의 크기를 구하고, 이를 1몰당 값(kJ/mol)으로 바꿔라. ($k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $N_a = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

태오 $E = kq^2/r$ 에 넣을게요. $8.99 \times 10^9 \times (1.602 \times 10^{-19})^2 \div 282 \dots$ 그러면 8.18×10^{-10} 이요.

석 교수 거리 단위를 확인하자. 쿨롱 상수는 미터 단위인데 282를 그대로 넣었지?

태오 아, 282 pm은 $2.82 \times 10^{-10} \text{ m}$ 예요. 다시 하면 $(1.602 \times 10^{-19})^2 = 2.566 \times 10^{-38}$, 곱하기 $8.99 \times 10^9 = 2.307 \times 10^{-28}$, 나누기 $2.82 \times 10^{-10} = 8.18 \times 10^{-19} \text{ J}$ 이에요.

하린 1몰이면 6.022×10^{23} 을 곱해서 $8.18 \times 10^{-19} \times 6.022 \times 10^{23} = 4.93 \times 10^5 \text{ J}$, 곧 493 kJ/mol이에요.

석 교수 둘 다 맞다. 정답은 이온쌍 하나 $8.18 \times 10^{-19} \text{ J}$, 1몰 493 kJ/mol이다. 그런데 실제로 고체 NaCl 1몰을 기체 이온으로 완전히 풀어 놓는 데 드는 에너지, 곧 격자 에너지를 재면 788 kJ/mol이다. 왜 더 클까?

이모 결정 안에서는 Na^+ 하나 옆에 Cl^- 가 하나만 있는 게 아니라서요?

석 교수 정확합니다. 결정 속 Na^+ 하나는 가장 가까운 Cl^- 여섯 개에 둘러싸여 있고, 그 너머에도 이온이 계속 있어요. 그 모든 끌림과 밀어냄을 더하면 이온쌍 하나일 때보다 결합이 더 단단해집니다. 이 이야기는 3장에서 격자 에너지로 다시 계산하지요.

하린 이온 결합이 공유 결합인 H-H 436 kJ/mol보다 더 센 거예요?

석 교수 이렇게 단순 비교하기는 어렵다. 격자 에너지는 이온이 기체 상태로 흩어지는 에너지이고, 결합 에너지는 중성 원자로 나뉘는 에너지라서 기준점이 다르거든. 다만 “전하가 크고 거리가 가까울수록 바닥이 깊다”는 원리는 어느 결합에나 통한다.

1.5 이 책의 길: 전자 세기 → 모양 → 극성 → 기출

석 교수 이제 이 책이 어디로 가는지 지도를 펴 보자. 2장에서는 원자의 가장 바깥 껍질 전자, 곧 원자가 전자를 세는 법과 옥텟 규칙을 배운다. 3~5장에서 이온·공유·금속 결합을 하나씩 보고, 6·7장에서 분자 속 전자를 점과 선으로 그리는 루이스 구조를 익힌다.

태오 그다음이 모양이네요?

석 교수 그렇다. 8·9장에서 전자쌍끼리 밀어내는 원리로 분자의 모양과 결합각을 정하고, 10~12장에서 전기 음성도, 결합의 극성, 분자의 극성으로 간다. 13장에서는 기출처럼 자료를 주고 원소를 찾는 연습을 하고, 14장에서 생명·환경 속의 분자로 마무리한다.

이모 논술에서는 그중 어디가 제일 많이 나와요?

석 교수 루이스 구조식을 그리고(6장), 전자쌍 반발로 모양을 정하는(8·9장) 문제가 거의 모든 기출에 들어 있어요. 그 앞에서 “이 원소가 무엇인가”를 자료로 판별하게 하고, 뒤에서 “그래서 극성인가, 끓는점은 어떤가”를 묻는 사슬이 전형입니다. 사슬의 첫 고리가 오늘 본 “결합은 에너지가 낮아진 상태”라는 생각이네요.

하린 그럼 오늘 소금, 설탕, 얼음은 다 설명된 거예요?

석 교수 첫 단계까지는 설명됐다. 소금은 이온 결합을 끊어야 해서 높고, 얼음과 설탕은 분자 사이의 끌림만 끊으면 돼서 낮다. 설탕이 얼음보다 높은 이유는 분자가 크고 서로 더 많이 끌어당기기 때문이고. 그 “서로 끌어당기는 정도”가 분자의 모양과 극성에서 나온다는 것까지 가면, 이 책을 다 읽은 것이다.

핵심 오늘 가져갈 네 가지

1. 두 원자가 다가가면 전자-원자핵 인력으로 에너지가 낮아지고, 너무 가까우면 원자핵끼리의 반발로 다시 높아진다. 에너지가 가장 낮은 바닥이 결합한 상태다.
2. 바닥의 위치가 결합 길이(H-H 74 pm), 바닥의 깊이가 결합 에너지(H-H 436 kJ/mol, 분자 하나 7.24×10^{-19} J)다.
3. 결합에는 이온 결합(전자를 주고받음), 공유 결합(전자쌍을 나눔), 금속 결합(자유 전자를 함께 씀)이 있고, 모두 전기적 인력에서 나온다.
4. 녹는점을 비교할 때는 “무엇을 끊는가”를 먼저 묻는다. 분자 물질은 분자 사이의 끌림, 이온 결정은 이온 사이의 결합을 끊는다.

스스로 풀어 보기

1. O=O 결합 에너지 495 kJ/mol을 산소 분자 한 개당 J로 바꿔라.
2. N≡N 결합 에너지는 941 kJ/mol이다. 질소 분자 한 개의 결합을 끊는 데 드는 에너지를 구하고, H-H 결합의 몇 배인지 구하라.
3. 얼음이 녹을 때와 물을 전기 분해해 수소와 산소를 얻을 때 끊어지는 것은 각각 무엇인지 한 문장씩 쓰라.
4. Na⁺와 Cl⁻ 사이 거리가 282 pm의 두 배인 564 pm이 되면 이온쌍 하나의 쿨롱 에너지 크기는 몇 J인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

오늘 본 “무엇을 끓는가”라는 질문은 4부에서 여러 번 다시 나온다. **기출문제 4**(부산대 2015) (228쪽)은 이온 결합 물질 LiF와 MgO 중 녹는점이 높은 쪽을 이온의 전하와 거리로 판단하게 하고, **기출문제 2**(경희대 2024) (209쪽)는 수소 화합물의 끓는점을 같은 족 물질과 비교하게 하는데, 이때 끓어지는 것은 분자 안의 결합이 아니라 분자 사이의 끌림이다. **기출문제 1**(경희대 2024) (199쪽)은 원소를 찾은 뒤 그 수소 화합물의 모양과 극성을 묻는다. 세 문제 모두 이 장의 에너지 바닥 그림에서 시작한다.

이 장의 참고문헌

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

Heitler, W., & London, F. (1927). Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik. Zeitschrift für Physik, 44(6-7), 455-472. <https://doi.org/10.1007/BF01397394>

Lewis, G. N. (1916). The atom and the molecule. Journal of the American Chemical Society, 38(4), 762-785. <https://doi.org/10.1021/ja02261a002>

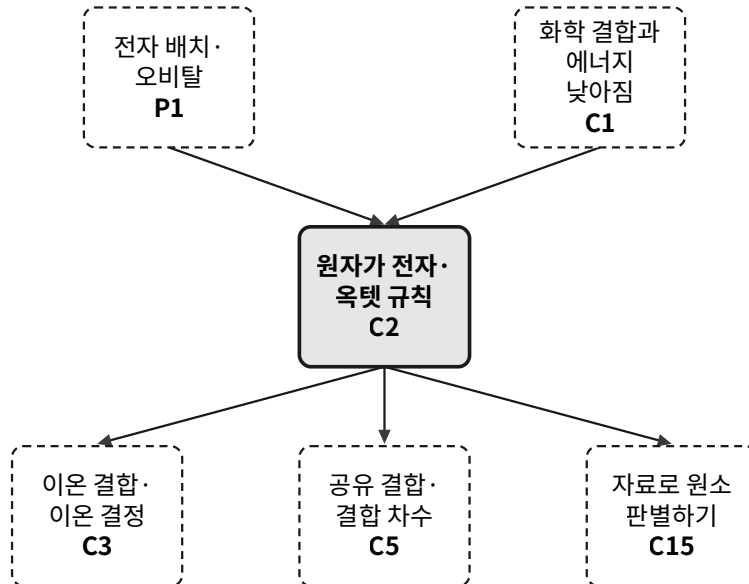
Morse, P. M. (1929). Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels. Physical Review, 34(1), 57-64. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.34.57>

제 2장 원자가 전자와 옥텟 규칙

새 개념 원자가 전자 · 전자점 · 옥텟 규칙 · 비활성 기체 배치

이어짐 이온 결합 3장 · 공유 결합 4장 · 루이스 구조 6장 · 원소 판별 13장

이 장의 개념도



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

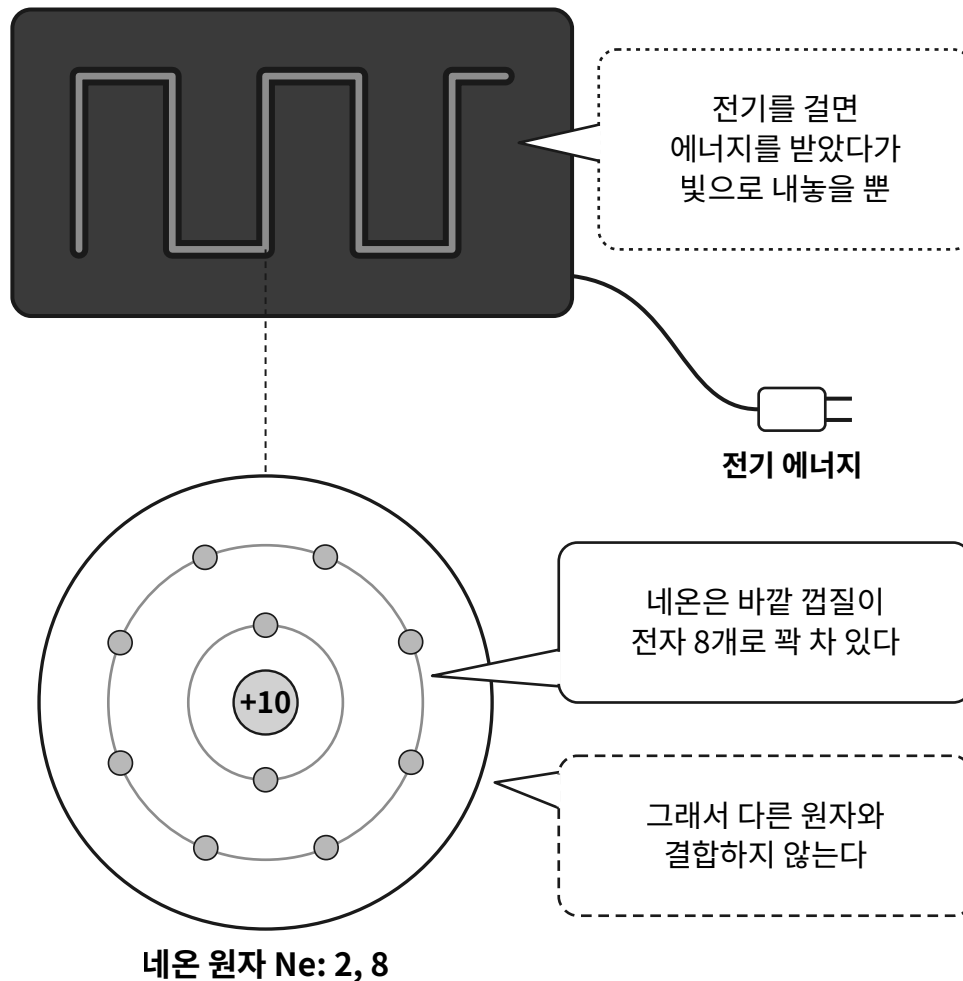
그림 7. 제 2장에서 배우는 개념(C2 원자가 전자·옥텟 규칙)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기술

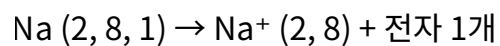
이 장의 개념은 기술에서 직접 묻기보다 다른 장의 개념을 받치는 바탕으로 쓰였다.

네온사인 속 반응하지 않는 기체

유리관 속 네온 원자는 수십 년을 켜도 그대로 네온



나트륨은 전자 1개를 내주면 네온과 같은 배치



다른 원자는 잃거나·얻거나·나누어 8개를 만든다

그림 8. 네온사인 유리관 속 네온 원자 — 바깥 껍질이 전자 8개로 가득 차 있어 다른 원자와 결합하지 않고, 전기 에너지를 받아 빛만 낸다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 네온 원자는 바깥 껍질 전자가 8개로 꽉 찬 안정한 배치다.
2. 그래서 네온은 다른 원자와 결합하지 않고 기체 원자로 떠다닌다.
3. 나트륨은 전자 1개를 내주면 네온과 같은 2, 8 배치가 된다.

이 장의 출발점

1장에서 본 “결합은 에너지가 낮아진 상태”라는 생각과, 원자 번호 = 양성자 수 = 중성 원자의 전자 수라는 사실을 쓴다. 전자는 원자핵에 가까운 껍질부터 2개, 8개, 8개 순서로 채워진다고 보면 된다(원자 번호 20번까지). 오비탈과 전자 배치($1s^2 2s^2 2p^6 \dots$)는 23권 범위이며, 이 장에서는 필요한 만큼만 쓴다.

과학방 창가에 낡은 네온사인 하나가 걸려 있었다. 석 교수가 예전 연구실에서 가져온 “실험 중” 간판이다. 플러그를 꽂자 유리관이 주황빛으로 켜졌고, 하린이 가까이 다가가 들여다보았다.

하린 교수님, 이 안에 뭐가 들어 있어요? 불이 타는 건 아니죠?

석 교수 네온이라는 기체가 아주 낮은 압력으로 들어 있다. 전기를 걸면 네온 원자가 에너지를 받았다가 그 에너지를 빛으로 내놓는 거야. 불처럼 무언가와 반응하는 게 아니다. 수십 년을 켜도 네온은 그대로 네온이지.

태오 네온은 다른 원소랑 아예 결합을 안 하잖아요. 그게 오늘 주제예요?

석 교수 그렇다. 오늘은 “왜 어떤 원자는 결합하지 않고, 어떤 원자는 꼭 결합하려 하는가”를 본다. 답의 열쇠는 원자의 가장 바깥 껍질에 있는 전자다.

2.1 바깥 껍질의 전자만 손을 내민다

석 교수 원자 번호 11번 나트륨을 보자. 전자가 11개 있지. 가장 안쪽 껍질에 2개, 그다음 껍질에 8개, 맨 바깥 껍질에 1개가 들어 있다. 2, 8, 1이라고 적는다.

하린 안쪽 전자 10개는 뭐 해요?

석 교수 원자핵 가까이에서 단단히 붙잡혀 있다. 다른 원자와 만날 때 실제로 상대와 닿는 것은 바깥 껍질의 전자뿐이야. 그래서 바깥 껍질의 전자를 따로 **원자가 전자**(valence electron)라고 부른다. 화학 결합에 참여하는 전자라는 뜻이지.

태오 그럼 원자가 전자 수는 족 번호랑 같죠? 1족은 1개, 2족은 2개, 13족은 3개….

석 교수 1·2족은 족 번호와 같고, 13~17족은 족 번호의 일의 자리와 같다. 18족은 바깥 껍질이 가득 찼지만 결합에 참여하지 않으니 원자가 전자를 0개로 센다. 헬륨은 전자가 2개뿐인데 그것으로 껍질이 가득 찬 경우다. **그림 9**에 원자 번호 1번부터 20번까지의 원자가 전자 수를 그렸다.

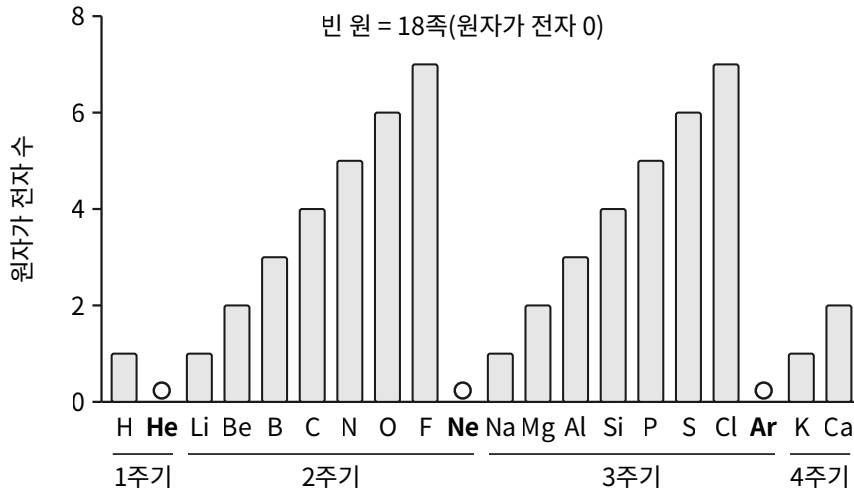


그림 9. 원자 번호 1~20 원소의 원자가 전자 수 — 껍질을 2, 8, 8개 순서로 채워 계산했다. 주기마다 1에서 7까지 늘어났다가 18족(He, Ne, Ar)에서 0으로 떨어진다(18족은 바깥 껍질 전자가 2 또는 8개이지만 원자가 전자는 0으로 센다).

하린 톱니 모양이네요. 1, 2, 3, ... 7까지 올라가다 0으로 떨어지고, 다시 1부터요.

석 교수 이 반복이 주기율표의 뼈대다. 같은 세로줄, 곧 같은 족의 원소는 원자가 전자 수가 같아서 화학적 성질이 비슷하다. 리튬, 나트륨, 칼륨이 모두 물과 격렬하게 반응하는 것도, 플루오린과 염소가 모두 전자를 하나 얻으려 하는 것도 그 때문이야.

태오 3주기도 해 볼게요. 규소 14번은 2, 8, 4라서 4개, 인 15번은 2, 8, 5라서 5개, 황 16번은 2, 8, 6, 염소 17번은 2, 8, 7이네요. 칼륨 19번은 2, 8, 8, 1이고 칼슘 20번은 2, 8, 8, 2요.

석 교수 잘했다. 칼륨에서 네 번째 껍질이 시작된다는 것까지 맞다. 한 가지만 확인하자. 원자가 전자는 “바깥 껍질의 전자 수”이지 “전체 전자 수”가 아니다. 기출의 보어 모형 그림은 전체 전자를 다 그려 놓고 원자가 전자를 세게 하니, 맨 바깥 원 위의 전자만 센다는 것을 잊지 말자.

하린 그림에서 바깥 원 위의 점만 세면 되는 거네요.

이모 그러면 원자가 전자 수만 알면 그 원소가 어떻게 행동할지 대충 짐작할 수 있겠네요.

석 교수 네, 그게 이 장의 결론이기도 해요. 원자가 전자 수가 결합 수를 정하고, 결합 수가 분자의 화학식을 정합니다.

2.2 비활성 기체는 왜 반응하지 않나

석 교수 이제 네온 차례다. 네온은 원자 번호 10번, 껍질에 2, 8개. 바깥 껍질에 전자 8개가 딱 차 있다. 헬륨은 2개로 첫 껍질이 딱 찼고, 아르곤은 2, 8, 8이다.

태오 딱 차 있으면 왜 안정해요?

석 교수 증거부터 보자. 원자에서 전자 하나를 떼어 내는 데 드는 에너지를 이온화 에너지라고 한다. 네온은 2081 kJ/mol, 아르곤은 1521 kJ/mol로 같은 주기에서 가장 크다. 바로 다음 원소인 나트륨은 496 kJ/mol밖에 안 된다.

하린 네온 다음이 나트륨인데 네 배 넘게 차이 나네요. $2081 \div 496 = 4.2$ 배요.

- 태오** 헬륨은요? 전자가 2개뿐이니까 더 쉽게 떨어질 것 같은데요.
- 석 교수** 반대다. 헬륨은 2372 kJ/mol로 모든 원소 중에서 가장 크다. 전자 두 개가 원자핵 바로 옆 첫 껍질에 있어서 붙잡는 힘이 아주 세지. 전자 수가 적다고 잃기 쉬운 것이 아니라, 껍질이 가득 찼는지와 원자핵에서 얼마나 가까운지가 중요하다.
- 석 교수** 그렇다. 네온은 전자를 내주기 싫어하고, 전자를 하나 더 받아들일 자리도 없다. 줄 것도 받을 것도 없으니 결합할 이유가 없지. 반면 나트륨의 바깥 전자 하나는 원자핵에서 멀리, 안쪽 전자 10개에 가려진 채 있어서 쉽게 떨어진다.
- 이모** 그래서 네온사인 기체로 쓰는군요. 수십 년을 켜도 다른 것으로 안 바뀌니까요.
- 석 교수** 네, 그리고 아르곤은 전구 안이나 용접할 때 공기를 밀어내는 보호 기체로 씁니다. 반응하지 않는다는 성질이 그대로 쓸모가 되는 거지요.
- 태오** 그런데 비활성 기체도 화합물을 만든다는 얘기를 들은 것 같아요.
- 석 교수** 맞다. 1962년 바틀렛이 크세논(Xe)의 화합물을 처음 만들었고, 지금은 XeF_2 , XeF_4 같은 화합물이 알려져 있다. 크세논처럼 무겁고 큰 원자는 바깥 전자가 원자핵에서 멀어 플루오린처럼 아주 강하게 전자를 끄는 원자에게는 전자를 내줄 수 있다. 이것은 교과 밖 심화이고, 원자 번호 20번까지의 세계에서는 “18족은 결합하지 않는다”고 보면 된다.

2.3 옥텟 규칙: 잃거나, 얻거나, 나누거나

- 석 교수** 비활성 기체가 그렇게 안정하다면, 다른 원자들도 비활성 기체와 같은 전자 배치가 되면 안정해지지 않을까? 1916년 무렵 루이스와 코셀이 이 생각을 정리했다. 원자들이 화학 결합을 통해 바깥 껍질 전자 8개를 갖추려 한다는 규칙, 곧 **옥텟 규칙(octet rule)**이다. 옥텟은 “여덟 개 한 묶음”이라는 뜻이야.
- 하린** 8개를 만드는 방법이 여러 가지예요?
- 석 교수** 세 가지다. **그림 10**를 보자. 첫째, 나트륨처럼 원자가 전자가 적은 원자는 전자를 잃는다. $\text{Na}(2, 8, 1)$ 가 전자 하나를 잃으면 $\text{Na}^+(2, 8)$ 가 되는데, 이것은 네온과 같은 배치다.

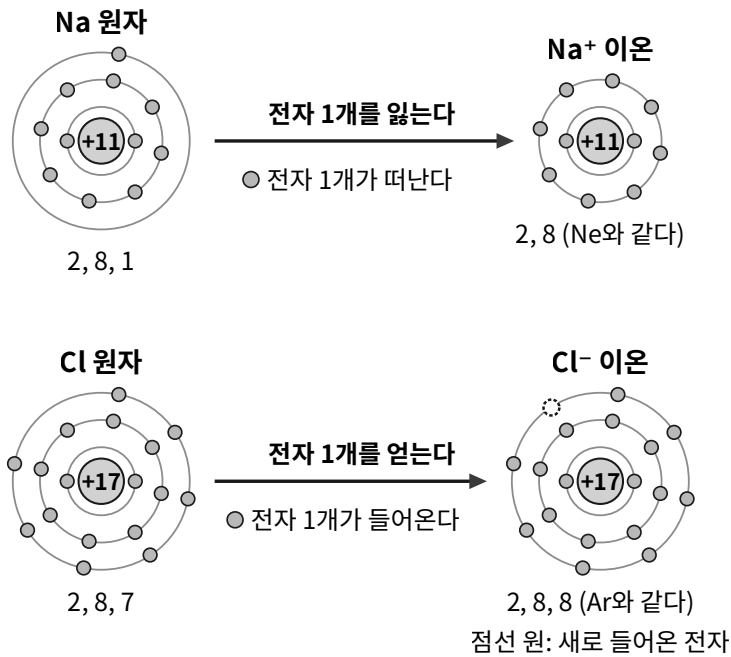


그림 10. 보어 모형으로 본 이온의 형성 — 나트륨 원자(2, 8, 1)가 전자 1개를 잃어 Na⁺(2, 8, 네온과 같은 배치)가 되고, 염소 원자(2, 8, 7)가 전자 1개를 얻어 Cl⁻(2, 8, 8, 아르곤과 같은 배치)가 된다(모식도 — 껍질의 크기와 전자 위치는 실제 비례가 아니다).

태오 둘째는 염소처럼 7개 가진 원자가 하나를 얻는 거고요. Cl(2, 8, 7)이 전자를 하나 얻으면 Cl⁻(2, 8, 8), 아르곤이랑 같아요.

석 교수 그렇다. 셋째는 4장에서 볼 공유다. 두 원자가 전자를 하나씩 내놓아 한 쌍을 함께 쓰면, 그 쌍이 양쪽 원자의 바깥 껍질에 모두 세어진다. 염소 원자 두 개가 한 쌍을 함께 쓰면 각자 7 + 1 = 8개가 되지.

일곱 개를 얻을까, 한 개를 잃을까

하린 나트륨은 전자 7개를 얻어도 8개가 되잖아요. 왜 꼭 1개를 잃어요?

석 교수 에너지로 따져 보자. 리튬으로 보면 숫자가 분명하다. 리튬(2, 1)의 첫 번째 전자를 떼어 내는 데는 520 kJ/mol이 든다. 그런데 두 번째 전자를 떼어 내려면 7300 kJ/mol이 든다.

태오 7300 ÷ 520 = 14배요. 엄청 뛰네요.

석 교수 첫 번째 전자는 바깥 껍질에 홀로 있었고, 두 번째 전자는 원자핵 바로 옆 안쪽 껍질에 있기 때문이다. 하나를 잃어 헬륨과 같은 배치가 되고 나면 그 배치를 깨기가 매우 어렵다는 증거이기도 하지. 거꾸로 리튬이 전자 7개를 받아들여려면, 음전하가 쌓일수록 다음 전자를 밀어내는 힘이 커져서 불가능에 가깝다.

이모 결국 가장 적게 움직여서 8개를 만드는 쪽을 택하는 거네요.

석 교수 네, 그렇게 기억하면 돼요. 원자가 전자가 1~3개면 잃고, 5~7개면 얻거나 나눕니다. 4개인 탄소와 규소는 잃기도 얻기도 어려워 주로 나누지요. 순차 이온화 에너지가 갑자기 뛰는 자리를 보면 원자가 전자가 몇 개인지 알 수 있다는 점은 13장에서 원소를 찾는 단서로 다시 씁니다.

태오 산소도 2개를 얻으면 O²⁻가 된다고 했는데, 전자를 받을 때도 에너지가 나와요?

석 교수 염소는 전자 하나를 받으면 에너지를 내놓는다. 산소가 두 번째 전자를 받을 때는 이미 음전하를 띤 O^- 가 전자를 밀어내니 오히려 에너지가 든다. 그런데도 MgO 같은 결정에서 O^{2-} 가 존재하는 것은, 3장에서 볼 이온 사이의 강한 인력이 그 비용을 갚고도 남기 때문이야. 이온 결합은 이온 하나가 아니라 결정 전체의 에너지로 따져야 한다는 점을 기억해 두자.

이모 수소는요? 수소는 전자가 하나뿐인데 8개를 만들 수는 없잖아요.

석 교수 좋은 질문이에요. 수소의 첫 껍질은 2개로 가득 찹니다. 그래서 수소는 헬륨과 같은 2개를 목표로 해요. 이것을 듀엣 규칙이라고도 부르지요. 수소는 전자 한 쌍을 공유하면 끝이라 결합을 하나밖에 만들지 못합니다.

옥텟 규칙은 “경향”이다

옥텟 규칙은 2주기 원소(C, N, O, F)의 화합물을 아주 잘 설명하지만 법칙은 아니다. BF_3 의 붕소는 전자 6개로 안정하고, NO_2 는 전자 수가 홀수라 모든 원자가 8개를 가질 수 없으며, PCl_5 의 인은 10개를 가진다. 이런 예외는 7장에서 따로 다룬다. 답안에서 “옥텟 규칙에 따라”라고 쓸 때는 그것이 2주기 원소와 수소에 대한 규칙임을 기억하자.

문제 2.1

Mg^{2+} 이온과 O^{2-} 이온의 전자 수를 각각 구하고, 각 이온과 같은 전자 배치를 가진 비활성 기체를 쓰라. (원자 번호 O 8, Ne 10, Mg 12)

하린 Mg는 원자 번호 12니까 전자 12개, $2+$ 이온은 2개를 잃었으니 10개요. O는 8개인데 $2-$ 이온은 2개를 얻었으니 10개예요.

태오 둘 다 10개면 네온이네요. 껍질로 쓰면 둘 다 2, 8이고요.

석 교수 정답이다. Mg^{2+} 와 O^{2-} 는 모두 전자 10개로 네온과 같은 배치다. 원자 번호는 12와 8로 다르지만 전자 배치는 같다. 이렇게 전자 수가 같은 이온들을 묶어 비교하는 문제가 3장 격자 에너지에서 나온다. 한 가지 덧붙이면, 전하는 “잃으면 +, 얻으면 -”다. 전자는 음전하이니 잃은 만큼 양전하가 남는다.

이모 마그네슘은 왜 2개를 잃어요? 하나만 잃으면 안 되나요?

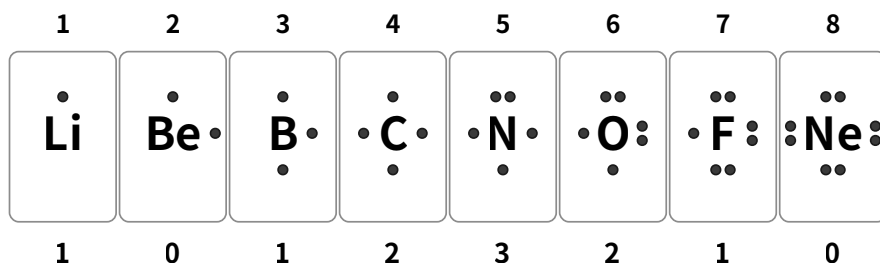
석 교수 Mg는 2, 8, 2라서 하나만 잃으면 2, 8, 1이 되어 아직 비활성 기체 배치가 아니예요. 두 개를 다 잃어야 2, 8이 됩니다. 실제로 마그네슘의 두 번째 이온화 에너지는 1450 kJ/mol 이지만 세 번째는 그보다 훨씬 커요. 안쪽 껍질에서 떼어 내야 하기 때문이지요. 이 급증을 보고 원소를 찾는 문제가 13장에 나옵니다.

2.4 원소 기호 둘레에 점 찍기

석 교수 원자가 전자를 매번 껍질 그림으로 그리기는 번거롭다. 그래서 루이스가 고안한 간단한 표기를 쓴다. 원소 기호를 쓰고, 그 둘레 위·오른쪽·아래·왼쪽 네 방향에 원자가 전자를 점으로 찍는다. 이것이 **루이스 전자점식**이다.

하린 점 찍는 순서가 있어요?

석 교수 네 방향에 먼저 하나씩 찍고, 다섯 번째부터 짝을 지어 준다. 그러면 탄소는 네 방향에 하나씩 4개, 질소는 한 곳에 짝 하나와 나머지 세 방향에 하나씩, 산소는 짝 둘과 홀로 있는 점 둘, 플루오린은 짝 셋과 홀로 있는 점 하나가 된다. **그림 11**에 2주기 원소를 모두 그렸다.



위 숫자: 원자가 전자 수 · 아래 숫자: 홀전자 수(바닥상태)

Be·B·C의 점은 결합할 때의 모습대로 따로 찍었다

그림 11. 2주기 원소의 루이스 전자점식 — 원자가 전자를 원소 기호의 네 방향에 하나씩 찍고, 다섯 번째부터 짝을 지었다. 아래 숫자는 짝을 이루지 않은 점(홀전자)의 수다.

태오 짝 안 지은 점이 결합에 쓰이는 거죠? 탄소 4개, 질소 3개, 산소 2개, 플루오린 1개.

석 교수 그렇다. 짝 없는 점 하나가 상대 원자의 짝 없는 점 하나와 만나 공유 전자쌍 하나, 곧 결합 하나가 된다. 원래 짝을 이루고 있던 점들은 결합에 쓰이지 않고 남는데, 이것을 **비공유 전자쌍**이라고 부른다. 6장에서 분자의 루이스 구조를 그릴 때 이 비공유 전자쌍까지 빠짐없이 그리는 것이 기출의 핵심 요구다.

전자점식의 점과 실제 오비탈

2주기 원소의 홀전자 수(B 1, C 2, N 3, O 2, F 1)는 전자 배치(오비탈)로 따진 값이다. 탄소는 바닥상태에서 홀전자가 2개이지만 메테인 CH₄에서 결합을 4개 만든다. 루이스 전자점식은 결합할 때의 모습을 나타내는 약속이라 탄소의 점 4개를 모두 따로 찍는다. 이 차이를 설명하는 혼성 오비탈은 교과 밖 심화다. 기출에서 “홀전자 수”를 물으면 오비탈 기준(바닥상태)인지 확인해야 한다.

2.5 필요한 결합 수 = 8 - 원자가 전자

석 교수 이제 하나의 식으로 정리하자. 비금속 원자가 공유 결합으로 옥텟을 채우려면 몇 개의 결합이 필요할까?

하린 8개가 목표고 이미 원자가 전자를 가지고 있으니, 모자란 만큼이요. 8 빼기 원자가 전자.

석 교수 맞다. 결합 하나마다 상대 원자의 전자가 하나씩 들어오니깐. 탄소는 $8 - 4 = 4$, 질소는 $8 - 5 = 3$, 산소는 $8 - 6 = 2$, 플루오린은 $8 - 7 = 1$. **표 4**에 2주기 원자를 정리했다.

표 4. 2주기 원자의 원자가 전자·홀전자·결합 수 — 홀전자는 바닥상태 전자 배치 기준, 결합 수는 수소와 만드는 화합물 기준

원자	원자가 전자	홀전자(바닥상태)	보통 만드는 결합 수	수소 화합물
Li	1	1	1(주위 Li ⁺ 이온)	LiH(이온성)
Be	2	0	2	BeH ₂

원자	원자가 전자	홀전자(바닥상태)	보통 만드는 결합 수	수소 화합물
B	3	1	3(옥텟 미달, 7장)	BH ₃ (실제로는 B ₂ H ₆)
C	4	2	4	CH ₄
N	5	3	3	NH ₃
O	6	2	2	H ₂ O
F	7	1	1	HF
Ne	8	0	0	없음

이모 리튬, 베릴륨, 붕소는 8 빼기 규칙이 안 맞네요.

석 교수 네, 원자가 전자가 적은 원자는 8개를 채우려면 너무 많은 전자를 받아야 해서, 차라리 원자가 전자를 내주거나 그 수만큼만 결합해요. 그래서 “8 - 원자가 전자”는 14~17족 비금속에 쓰는 식입니다.

문제 2.2

C, N, O, F가 각각 수소와 결합하여 모든 원자가 옥텟(수소는 전자 2개)을 만족하는 가장 간단한 화합물의 화학식을 쓰고, 중심 원자가 만드는 결합 수를 밝혀라.

태오 탄소는 결합 4개니까 수소 4개, CH₄. 질소는 3개라 NH₃, 산소는 2개라 H₂O, 플루오린은 1개라 HF예요.

석 교수 검산하자. CH₄에서 탄소 주위 전자는?

태오 탄소 자기 전자 4개에 수소 4개가 하나씩 보태서 8개요. 수소는 자기 1개에 탄소에서 1개 받아 2개고요.

하린 NH₃는 질소 5개에 수소 3개 더해서 8개. 그런데 결합에 안 쓴 짝이 하나 남아요.

석 교수 잘 봤다. 정답은 CH₄(결합 4), NH₃(결합 3), H₂O(결합 2), HF(결합 1)이다. 남은 비공유 전자쌍 수는 CH₄ 0쌍, NH₃ 1쌍, H₂O 2쌍, HF 3쌍이고. 이 비공유 전자쌍 수가 8·9장에서 분자 모양을 바꾸는 주인공이 된다. 오늘 만든 네 분자를 기억해 두자. 이 책 끝까지 계속 나온다.

이모 같은 2주기 원소인데 수소와 만나서 생기는 분자의 모양이 다 다르다니 신기하네요.

태오 3주기도 똑같이 되겠네요. 같은 족이면 원자가 전자 수가 같으니까 SiH₄, PH₃, H₂S, HCl이요.

석 교수 그렇다. 규소는 탄소와, 인은 질소와, 황은 산소와, 염소는 플루오린과 같은 족이니 화학식의 모양이 똑같다. 비공유 전자쌍 수도 0, 1, 2, 3쌍으로 같고. 그래서 기출은 2주기 원소로 한 문제를 풀게 한 뒤 “같은 족의 3주기 원소라면?”이라고 이어 묻는 경우가 많다.

석 교수 원자가 전자 수 하나에서 결합 수, 비공유 전자쌍 수, 모양, 극성이 줄줄이 정해지는 셈이에요. 그래서 기출은 “원자가 전자 수를 알려 주는 단서”를 주고 끝에 가서 “극성인가”를 묻습니다.

핵심 원자가 전자로 결합 수를 정하는 4단계

1. 원자 번호에서 전자 수를 얻고 껍질에 2, 8, 8 순서로 채워 바깥 껍질 전자, 곧 원자가 전자 수를 센다(18족은 0으로 셈).
2. 금속(1~2족)은 원자가 전자를 잃어 양이온, 비금속(16~17족)은 전자를 얻어 음이온이 되며, 이때 비활성 기체와 같은 배치가 된다.
3. 비금속끼리는 전자를 나누어 옥텟을 채우며, 필요한 결합 수 = 8 - 원자가 전자(수소는 1)이다.
4. 남은 원자가 전자는 비공유 전자쌍으로 남는다. 결합 수와 비공유 전자쌍 수를 함께 적는다.

스스로 풀어 보기

1. 황(S, 원자 번호 16)의 원자가 전자 수와, 수소와 결합하여 옥텟을 만족하는 화합물의 화학식을 쓰라.
2. Al^{3+} 이온과 Cl^- 이온은 각각 어느 비활성 기체와 같은 전자 배치를 가지는가? (원자 번호 Al 13, Cl 17)
3. 원자 번호 15번 인(P)의 껍질별 전자 수를 쓰고, 인이 수소와 만드는 가장 간단한 화합물의 화학식과 비공유 전자쌍 수를 구하라.
4. 네온의 제1 이온화 에너지(2081 kJ/mol)가 나트륨(496 kJ/mol)보다 훨씬 큰 까닭을 전자 배치로 한두 문장에 설명하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

원자가 전자를 세는 일은 4부의 거의 모든 문항이 맨 처음 요구하는 단계다. **기출문제 1**(경희대 2024) (199쪽)은 보어 모형 그림에서 바깥 전자 수를 세어 원소를 찾게 하고, **기출문제 2**(경희대 2024) (209쪽)은 홀전자와 s·p 전자 수 조건으로 원소를 찾은 뒤 수소와 옥텟을 만족하는 화합물을 그리게 한다. **기출문제 5**(인하대 2015) (238쪽)은 옥텟 규칙을 제시문으로 주고 NO_2 가 왜 옥텟을 만족할 수 없는지 증명하게 하며, **기출문제 4**(부산대 2015) (228쪽)은 이온이 비활성 기체 배치를 갖는다는 제시문에서 LiF와 MgO를 세우게 한다.

이 장의 참고문헌

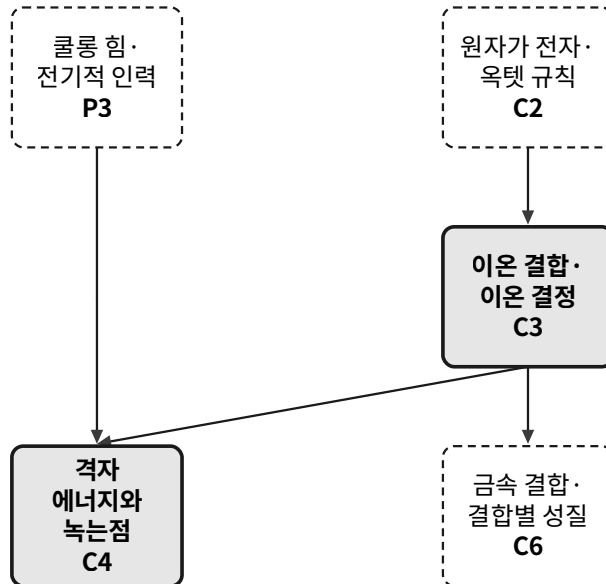
- Bartlett, N. (1962). Xenon hexafluoroplatinate(V) $\text{Xe}^+[\text{PtF}_6]^-$. *Proceedings of the Chemical Society*, 218.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.
- Kossel, W. (1916). Über Molekülbildung als Frage des Atombaus. *Annalen der Physik*, 354(3), 229–362. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540302>
- Langmuir, I. (1919). The arrangement of electrons in atoms and molecules. *Journal of the American Chemical Society*, 41(6), 868–934. <https://doi.org/10.1021/ja02227a002>
- Lewis, G. N. (1916). The atom and the molecule. *Journal of the American Chemical Society*, 38(4), 762–785. <https://doi.org/10.1021/ja02261a002>

제 3장 이온 결합: 주고받은 전자, 끌어당기는 전하

새 개념 이온의 형성 · 이온 결정 · 격자 에너지 · 녹는점 비교

이어짐 쿨롱 힘(선수) · 결합 비교 5장 · 2부 C4

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 이온 결합·이온 결정, C4 격자 에너지와 녹는점)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.

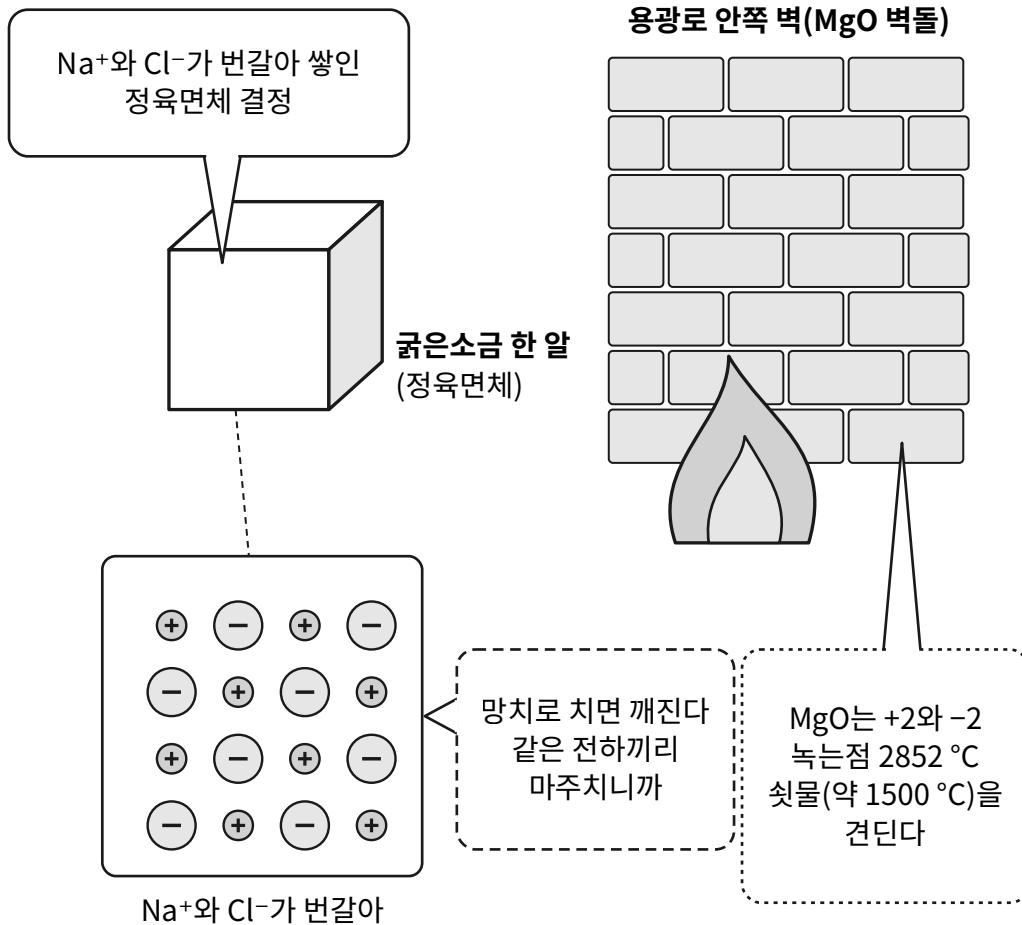
이 장의 개념이 쓰인 기출

표 5. 제 3장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

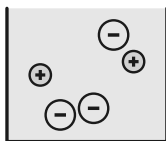
기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 4 (부산대 2015년) (228쪽)	원소 성질 표로 찾은 원소의 분자·이온 결합	C4 격자 에너지와 녹는점

소금 결정과 내화 벽돌

둘 다 이온 결정 — 전하가 두 배면 녹는점이 훨씬 높다



소금물은 전기가 통한다



고체: 이온이 제자리에 묶여 전기가 통하지 않는다
물에 녹이면: 이온이 움직여 전기가 통한다

그림 13. 김장용 굵은소금 결정과 용광로의 내화 벽돌(MgO) — 둘 다 양이온과 음이온이 번갈아 쌓인 이온 결정이지만, 이온의 전하가 두 배인 MgO는 2800 °C를 넘어야 녹는다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 이온 결정은 반대 전하를 띤 이온이 번갈아 쌓인 구조다.
2. 이온의 전하가 크고 이온 사이 거리가 짧을수록 결합이 강해 녹는점이 높다.
3. 고체는 전기가 통하지 않지만, 녹이거나 물에 녹이면 이온이 움직여 전기가 통한다.

이 장의 출발점

2장의 원자가 전자와 옥텟 규칙($\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+$, $\text{Cl} \rightarrow \text{Cl}^-$), 1장의 이온쌍 쿨롱 에너지 $E = -kq_1q_2/r$ (282 pm에서 493 kJ/mol), 그리고 이온의 전하 표기(Mg^{2+} , O^{2-})를 쓴다. 비례식 $A \propto B/C$ 를 “B가 크고 C가 작을수록 A가 크다”로 읽을 수 있으면 된다.

김장철을 앞둔 토요일, 이모가 장독대에서 쓰던 굵은소금 한 줌을 종이에 싸 왔다. 석 교수는 돌보기를 꺼내 소금 알갱이를 하린에게 건넸다. 탁자 한쪽에는 제철소에 다니는 옛 제자가 보내 준 회색 벽돌 조각이 놓여 있었다.

하린 교수님, 소금 알갱이가 다 네모나요. 주사위처럼 모서리가 반듯해요.

석 교수 잘 봤다. 소금 결정은 크든 작든 정육면체 모양으로 자란다. 안쪽 이온들이 정육면체 격자로 쌓여 있어서 겉모양도 그렇게 되는 거야. 오늘은 그 격자를 만드는 힘, 이온 결합을 본다.

이모 이 벽돌은 뭐예요? 무척 무겁네요.

석 교수 용광로 안쪽에 붙이는 내화 벽돌이에요. 주성분이 산화 마그네슘 MgO 입니다. 소금처럼 이온 결정인데, 녹는점이 2852 °C나 돼요. 소금은 801 °C이고요. 같은 이온 결정인데 왜 이렇게 다른지가 오늘의 질문입니다.

3.1 금속은 잃고 비금속은 얻는다

석 교수 2장에서 나트륨은 전자를 잃고 염소는 얻는다고 했다. 이번에는 에너지로 따져 보자. 기체 나트륨 원자에서 전자 하나를 떼어 내는 데 496 kJ/mol이 든다. 기체 염소 원자가 전자 하나를 받으면 349 kJ/mol이 나온다.

태오 그럼 나트륨에서 떼어 염소에 주면 $496 - 349 = 147$ kJ/mol만큼 손해네요. 그런데 왜 반응이 일어나요?

석 교수 거기서 끝나지 않으니까. 1장에서 계산했지? 생긴 Na^+ 와 Cl^- 가 282 pm까지 다가가면 이온쌍 하나에 493 kJ/mol의 에너지가 나온다. 147을 내고 493을 받으니 이온쌍만으로도 약 346 kJ/mol 이득이야. 결정을 이루면 이득은 더 커진다.

하린 전자를 주고받는 것 자체는 손해인데, 그다음에 서로 끌어당기면서 크게 이득을 보는 거네요.

석 교수 그게 이온 결합의 본질이다. 이온 결합은 전자를 주고받아 생긴 양이온과 음이온 사이의 정전기적 인력이야. 이온화 에너지가 작은 금속, 그리고 전자를 받으면 에너지를 내놓는 비금속 사이에서 잘 생긴다.

왜 Mg^+ 가 아니라 Mg^{2+} 인가

태오 그런데 마그네슘은 전자 두 개를 떼어 내야 하잖아요. 하나만 떼는 것보다 손해가 훨씬 클 텐데, 왜 굳이 Mg^{2+} 가 돼요?

석 교수 숫자로 보자. 마그네슘의 첫 번째 이온화 에너지는 738 kJ/mol, 두 번째는 1450 kJ/mol이다. 둘을 떼어 내면 $738 + 1450 = 2188$ kJ/mol이 든다. 만만치 않지?

하린 그만큼 들고고도 이득이 있으려면 나중에 엄청 끌어당겨야겠네요.

석 교수 그게 MgO의 격자 에너지 3795 kJ/mol이다. Mg⁺와 O⁻로 결정을 만들면 전하의 곱이 1이라 격자 에너지가 대략 4분의 1로 줄어든다. 두 번째 전자를 떼는 비용보다 전하가 두 배가 되어 얻는 인력이 훨씬 크니, 결과적으로 Mg²⁺와 O²⁻가 된다.

태오 그럼 세 개를 떼면 Mg³⁺로 더 세게 끌어당길 수 있잖아요.

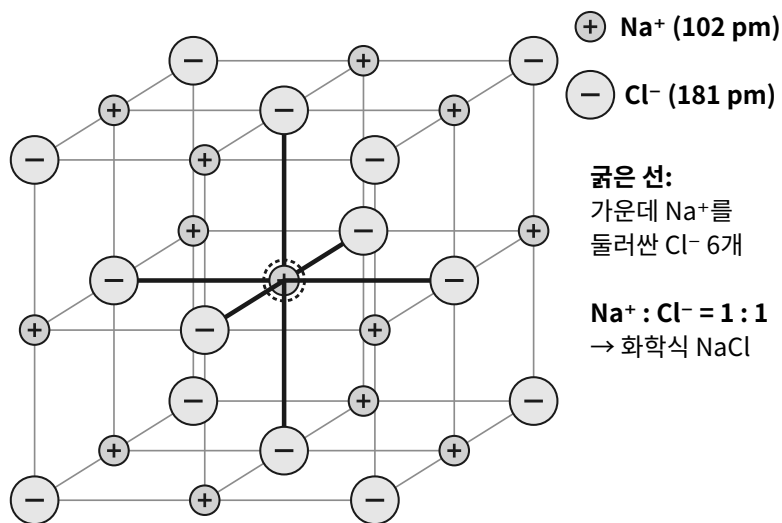
석 교수 세 번째 전자는 안쪽 껍질(2, 8의 8)에 있어서 떼는 데 7733 kJ/mol이 든다. 앞의 둘을 합한 것의 세 배가 넘지. 이 비용은 어떤 인력으로도 갚을 수 없다. 그래서 마그네슘 이온은 언제나 Mg²⁺이고, 이것이 2장에서 본 “비활성 기체 배치에서 멈춘다”는 규칙의 에너지 쪽 설명이다.

이모 그래서 이온 결합 물질은 대부분 금속과 비금속이 만나서 생기는군요. 소금은 나트륨과 염소, 이 벽돌은 마그네슘과 산소.

석 교수 네, 그렇게 기억하면 대부분 맞아요. 1·2족 금속과 16·17족 비금속의 화합물이 대표적인 이온 결합 물질입니다.

3.2 이온 결정: 번갈아 쌓인 양이온과 음이온

석 교수 이온 결합 물질에는 “분자”가 없다. Na⁺ 하나가 Cl⁻ 하나와만 짝을 이루지 않고, 둘레의 모든 반대 전하 이온과 끌어당기기 때문이야. **그림 14**는 염화 나트륨 결정의 단위 구조를 그린 것이다.



원 크기는 이온 반지름의 비를 대략 따랐다(모식도)

그림 14. 염화 나트륨 결정의 단위 구조 - 3×3×3 격자점에 Na⁺(작은 원)와 Cl⁻(큰 원)을 번갈아 놓고 사선 투영으로 그렸다. 가운데 Na⁺ 하나를 가장 가까운 Cl⁻ 여섯 개가 위·아래·앞·뒤·왼쪽·오른쪽에서 둘러싼다(굵은 선).

하린 가운데 작은 원 하나를 큰 원 여섯 개가 둘러싸고 있네요. 큰 원 하나도 작은 원 여섯 개에 둘러싸여 있겠고요.

석 교수 그렇다. Na⁺와 Cl⁻의 개수 비는 1 : 1이다. 그래서 화학식을 NaCl로 쓴다. 이 화학식은 분자 하나를 뜻하는 게 아니라 이온의 개수 비를 가장 간단한 정수로 나타낸 것이야.

태오 MgO도 Mg^{2+} 와 O^{2-} 가 1 : 1이니까 MgO고요. 그럼 $MgCl_2$ 는 Mg^{2+} 하나에 Cl^- 두 개라서 그렇게 쓰는 거죠? 전하를 합쳐 0이 되게.

석 교수 맞다. 결정 전체는 전기적으로 중성이어야 하니, 양전하 총량과 음전하 총량이 같아지는 개수 비가 화학식이다. Mg^{2+} 하나의 +2를 Cl^- 두 개의 -1, -1이 상쇄하지.

결정은 이온쌍보다 단단하다

하린 1장에서 이온쌍 하나로 계산하면 493 kJ/mol이었는데 실제 격자 에너지는 788 kJ/mol이라고 했잖아요. 그 차이가 이 여섯 개 때문이에요?

석 교수 그렇다. 가운데 Na^+ 는 282 pm 거리의 Cl^- 여섯 개에게 끌리고, 조금 더 먼 거리의 Na^+ 열두 개에게는 밀리고, 그 너머의 Cl^- 여덟 개에게 다시 끌린다. 이 끌림과 밀림을 결정 끝까지 모두 더하면 이온쌍 하나의 1.748배가 된다는 계산이 있다. 이 수를 마델룽 상수라고 부르는데, 교과 밖 심화다.

태오 $493 \times 1.748 = 862$ 예요. 788보다 크네요.

석 교수 이온이 너무 가까워지면 전자 구름끼리 밀어내는 반발이 있어서 그만큼 깎인다. 1930년대 보른과 메이어가 그 반발까지 넣어 계산했는데, 반발 몫을 대략 8분의 1로 잡으면 $862 \times (1 - 1/8) = 754$ kJ/mol로 실측 788에 꽤 가까워진다. 우리가 가져갈 결론은 하나다. 결정 속에서는 이온 하나가 여러 이웃과 동시에 끌어당기므로 이온쌍보다 훨씬 단단하다.

이모 이 격자 모양을 사람이 어떻게 알아냈어요? 눈으로는 안 보일 텐데요.

석 교수 1913년 영국의 브래그 부자가 소금 결정에 X선을 쬔어 나오는 회절 무늬를 분석해서 알아냈어요. 원자 배열을 실험으로 처음 확인한 사례 중 하나지요. 그 덕분에 이온 사이 거리 282 pm 같은 숫자를 우리가 쓸 수 있습니다.

3.3 격자 에너지: 전하의 곱 ÷ 거리

석 교수 이온 결합의 세기는 **격자 에너지**로 잰다. 고체 이온 결정 1몰을 기체 상태의 양이온과 음이온으로 완전히 떼어 놓는 데 필요한 에너지야. NaCl은 788 kJ/mol이다.

태오 이온 결합도 결국 쿨롱 힘이니까, 1장 식처럼 전하의 곱에 비례하고 거리에 반비례하겠네요.

석 교수 그렇다. 정확한 값은 결정 구조와 이온 사이 반발까지 따져야 하지만, 비교에는 이 비례식이면 충분하다.

$$\text{격자 에너지} \propto q_1 \times q_2 \div (r_+ + r_-)$$

석 교수 q_1, q_2 는 양이온과 음이온 전하의 크기, $r_+ + r_-$ 는 두 이온의 반지름 합, 곧 이온 사이 거리다. 정말 그런지 실측값으로 확인해 보자. 표 6에 여섯 물질을 모았다.

표 6. 이온 결합 물질의 이온 간 거리·전하·격자 에너지·녹는점 — 이온 반지름은 6배위 값(Shannon, 1976), 격자 에너지는 실측값(Brown 외, 2018)

화합물	이온 전하	$r_+ + r_-$ (pm)	$q_1 q_2 / r$ (nm ⁻¹)	격자 에너지 (kJ/mol)	녹는점 (°C)
LiF	+1, -1	76 + 133 = 209	4.78	1030	845
NaF	+1, -1	102 + 133 = 235	4.26	910	993
NaCl	+1, -1	102 + 181 = 283	3.53	788	801

화합물	이온 전하	$r_+ + r_-$ (pm)	q_1q_2/r (nm ⁻¹)	격자 에너지 (kJ/mol)	녹는점 (°C)
KCl	+1, -1	138 + 181 = 319	3.13	701	770
MgO	+2, -2	72 + 140 = 212	18.87	3795	2852
CaO	+2, -2	100 + 140 = 240	16.67	3414	2613

하린 q_1q_2/r 을 어떻게 계산했어요? NaCl은 $1 \times 1 \div 283$ 하면 0.00353인데요.

석 교수 거리를 nm로 바꾸면 보기 편하다. 283 pm = 0.283 nm이니 $1 \div 0.283 = 3.53 \text{ nm}^{-1}$. MgO는 $2 \times 2 \div 0.212 = 18.87 \text{ nm}^{-1}$ 이다. 이 값을 가로축에, 격자 에너지를 세로축에 놓은 것이 **그림 15**다.

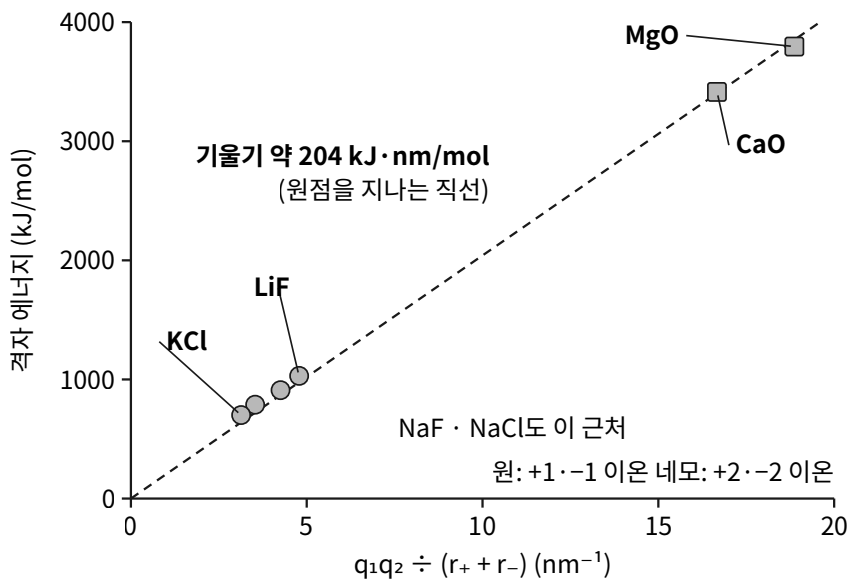


그림 15. 격자 에너지와 $q_1q_2/(r_+ + r_-)$ 의 관계 — 위 표의 여섯 물질과, 원점을 지나는 최소제곱 직선(기울기 약 204 kJ·nm/mol). +2·-2 이온(MgO, CaO)은 +1·-1 이온보다 오른쪽 위에 멀리 떨어져 있다.

태오 거의 한 직선 위에 있네요! MgO, CaO가 오른쪽 위에 따로 떨어져 있고요.

석 교수 비례 관계가 실측으로도 잘 맞는다는 증거다. 그리고 MgO가 멀리 떨어진 이유가 전하라는 것도 보이지. 전하가 +1·-1에서 +2·-2로 바뀌면 곱이 1에서 4로 네 배가 된다. 거리가 조금 바뀌는 것보다 훨씬 큰 효과야.

3.4 녹는점 비교의 두 단계: 먼저 전하, 다음 거리

석 교수 이제 오늘의 질문에 답할 차례다. 기출에서 자주 나오는 비교를 문제로 풀어 보자.

문제 3.1

LiF와 MgO의 이온 사이 거리는 각각 209 pm, 212 pm이다. 격자 에너지가 q_1q_2/r 에 비례한다고 할 때 MgO와 LiF의 쿨롱 비(MgO/LiF)를 구하고, 실측 격자 에너지(MgO 3795, LiF 1030 kJ/mol)의 비와 비교하라. 녹는점이 더 높은 물질은 무엇인가?

태오 MgO는 $4 \div 212$, LiF는 $1 \div 209$. 비는 $(4 \div 212) \div (1 \div 209) = 4 \times 209 \div 212 = 3.94$ 예요.

하린 실측은 $3795 \div 1030 = 3.68$ 이에요. 4배에 조금 못 미치네요.

석 교수 둘 다 정확하다. 정답은 쿨롱 비 3.94, 실측 비 3.68, 녹는점은 MgO(2852 °C)가 LiF(845 °C)보다 높다. 거리는 209와 212로 거의 같으니 차이는 전하에서 나온 것이다. 실측 비가 4보다 조금 작은 것은 결정 구조와 이온 사이 반발 같은 요인이 있어서인데, 비교의 결론을 바꾸지는 않는다.

이모 그래서 MgO가 용광로 벽돌이 되는 거군요. 쇳물이 1500 °C 정도라던데 2852 °C면 넉넉하네요.

석 교수 네, 그리고 답안에서는 “핵간 거리가 비슷하므로 전하의 곱이 4배인 MgO의 격자 에너지가 더 크다”처럼 거리 조건을 먼저 확인했다고 밝혀야 해요. 거리가 크게 다르면 전하만으로 결론을 내릴 수 없으니까요.

문제 3.2

NaF와 NaCl 중 녹는점이 더 높을 것으로 예상되는 물질을 고르고, 이온의 전하와 이온 사이 거리(235 pm, 283 pm)로 근거를 쓰라. 쿨롱 비와 실측 격자 에너지 비(910, 788 kJ/mol)도 구하라.

하린 둘 다 +1, -1이라 전하는 같아요. 그럼 거리가 짧은 NaF가 더 세요. 쿨롱 비는 $283 \div 235 = 1.20$ 이에요.

태오 실측은 $910 \div 788 = 1.15$ 예요. 녹는점도 NaF 993 °C, NaCl 801 °C로 NaF가 높아요.

석 교수 정답이다. NaF가 높다. F⁻(133 pm)가 Cl⁻(181 pm)보다 작아서 이온 사이 거리가 짧기 때문이다. 정리하면 비교는 두 단계다. 먼저 전하의 곱을 보고, 전하가 같으면 거리를 본다.

녹는점 비교의 함정

격자 에너지 순서와 녹는점 순서가 늘 같지는 않다. 표 6에서 LiF는 격자 에너지(1030)가 NaF(910)보다 크지만 녹는점은 845 °C로 NaF(993 °C)보다 낮다. 녹는점은 고체와 액체의 안정성 차이에 따라 정해져서 격자 에너지만으로 완전히 설명되지 않는다. 기출은 보통 “전하가 다른 두 물질”이나 “거리 차이가 뚜렷한 두 물질”을 비교하게 하므로 두 단계 판단으로 충분하지만, 답안에 “격자 에너지가 크므로 녹는점이 높을 것으로 예상된다”처럼 예상임을 밝히는 편이 안전하다.

여섯 물질 줄 세우기

석 교수 두 단계 판단을 표 전체에 써 보자. 표 6의 여섯 물질을 격자 에너지가 큰 순서로 표를 보지 말고 예상해 보라.

태오 먼저 전하로 나누면 MgO, CaO가 위 그룹이고 나머지 넷이 아래 그룹이에요. 위 그룹에서는 Mg²⁺가 Ca²⁺보다 작으니까 MgO > CaO. 아래 그룹은 다 +1, -1이니까 거리만 보면 LiF(209) > NaF(235) > NaCl(283) > KCl(319)요.

하린 표랑 맞춰 보면 $3795 > 3414 > 1030 > 910 > 788 > 701$ 로 순서가 완전히 같아요.

석 교수 거리만 알면 표를 외우지 않아도 순서를 낼 수 있다는 뜻이다. 거리는 다시 이온 반지름에서 나온다. 같은 족에서 아래로 갈수록 껍질이 하나씩 늘어 이온이 커지니 Li⁺ < Na⁺ < K⁺, F⁻ < Cl⁻이다. 이 경향은 13장에서 원소를 판별하는 단서로도 쓴다.

이모 그런데 거리 차이와 전하 차이 중에 어느 쪽이 더 중요한지 헷갈릴 때가 있을 것 같아요.

석 교수 비례식에 숫자를 넣어 보면 됩니다. 거리는 표의 범위에서 209에서 319 pm까지, 많이 달라도 1.5배 정도예요. 전하의 곱은 1에서 4로 네 배가 뛰지요. 그래서 전하가 다른 거의 언제나 전하가 이깁니다. 그래도 답안에는 두 값을 모두 적어 “거리의 차이(209 pm와 212 pm, 약 1 %)보다 전하 곱의 차이(4배)가 훨씬 크다”처럼 크기를 비교해 보이는 것이 좋습니다.

3.5 이온 결합 물질의 성질: 단단하지만 쪼개진다

석 교수 이온 결정의 성질 세 가지를 보자. 첫째, 녹는점이 높고 단단하다. 이건 방금 본 강한 인력 때문이다. 둘째, 망치로 치면 부서진다. **그림 16**를 보자.

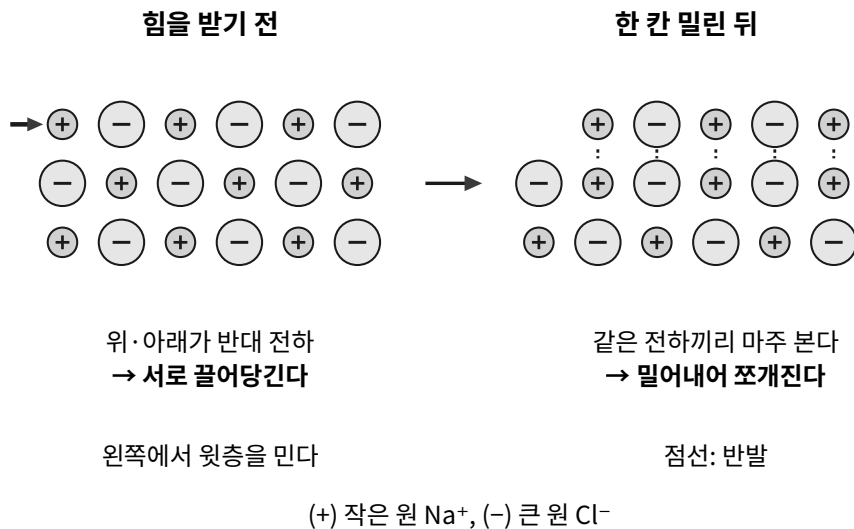


그림 16. 이온 결정이 쪼개지는 까닭 — 왼쪽: 양이온과 음이온이 번갈아 있어 위아래 층이 서로 끌어당긴다. 오른쪽: 힘을 받아 윗층이 이온 하나만큼 밀리면 같은 전하끼리 마주 보아 반발하고, 그 면을 따라 결정이 쪼개진다.

태오 층이 하나만 밀려도 +와 +, -와 -가 마주치네요. 그럼 서로 밀어내서 갈라지고요.

석 교수 그렇다. 소금 결정을 칼날로 눌러 보면 반듯한 면을 따라 쪼개진다. 금속은 두드리면 퍼지는데 이온 결정은 깨지는 이유가 이것이다. 금속이 왜 다른지는 5장에서 본다.

하린 셋째는요?

석 교수 전기 전도성이다. 고체 소금은 전기가 통하지 않는다. 이온은 있지만 제자리에 붙잡혀 움직이지 못하니까. 그런데 녹여서 액체로 만들거나 물에 녹이면 이온이 자유롭게 움직여 전류를 나른다.

이모 그래서 김치국물 같은 소금물은 전기가 통하는 거네요. 젖은 손으로 콘센트를 만지면 위험하다는 말도 그래서고요.

석 교수 맞아요. 땀에 녹아 있는 이온 때문에 젖은 피부는 전류가 더 잘 흐릅니다. 이 “고체는 부도체, 액체·수용액은 도체”라는 성질이 시험에서 이온 결합 물질을 알아보는 가장 확실한 단서예요.

하린 부엌에 소금 말고 다른 이온 결합 물질도 있어요?

석 교수 두부를 굳히는 간수의 주성분이 염화 마그네슘 $MgCl_2$ 이고, 달걀 껍데기와 조개껍데기의 주성분인 탄산 칼슘 $CaCO_3$ 도 Ca^{2+} 와 CO_3^{2-} 가 만든 이온 결정이다. CO_3^{2-} 처럼 여러 원자가 공유 결합으로 묶인 채 전체가 전하를 띠는 이온을 다원자 이온이라고 하는데, 그 안의 결합은 6·7장에서 루이스 구조로 그려 본다.

태오 그러니까 이온 결합 물질 안에도 공유 결합이 들어 있을 수 있네요.

석 교수 그렇다. 탄산 칼슘에서 Ca^{2+} 와 CO_3^{2-} 사이는 이온 결합, CO_3^{2-} 안의 C와 O 사이는 공유 결합이다. 결합의 이름은 물질 전체가 아니라 두 입자 사이의 관계에 붙인다는 것을 기억하자.

핵심 이온 결합 물질 비교 4단계

1. 금속 원자는 원자가 전자를 잃어 양이온, 비금속 원자는 전자를 얻어 음이온이 되고, 둘이 정전기적 인력으로 결합한다.
2. 화학식은 결정이 전기적으로 중성이 되는 이온의 가장 간단한 개수 비다($NaCl$, MgO , $MgCl_2$).
3. 격자 에너지 $\propto q_1q_2/(r_+ + r_-)$. 먼저 전하의 곱을 비교하고(MgO 는 LiF 의 약 4배), 전하가 같으면 이온 사이 거리를 비교한다($NaF > NaCl$).
4. 이온 결정은 녹는점이 높고 단단하지만 쪼개지며, 고체는 전기가 통하지 않고 액체·수용액은 통한다.

스스로 풀어 보기

1. $KCl(r_+ + r_- = 319 \text{ pm})$ 과 $NaCl(283 \text{ pm})$ 중 격자 에너지가 큰 쪽을 고르고, 쿨롱 비($NaCl/KCl$)와 실측 비($788, 701 \text{ kJ/mol}$)를 구하라.
2. $MgO(212 \text{ pm})$ 와 $CaO(240 \text{ pm})$ 중 녹는점이 높을 것으로 예상되는 물질과 그 근거를 쓰라.
3. Al^{3+} 와 O^{2-} 로 이루어진 이온 결정의 화학식을 쓰고, 그렇게 쓰는 까닭을 전하로 설명하라.
4. 고체 염화 나트륨은 전기가 통하지 않지만 녹인 염화 나트륨은 전기가 통하는 까닭을 한 문장으로 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 4**(부산대 2015) (228쪽)은 이 장의 계산을 그대로 묻는다. 표에서 찾은 원소로 LiF 와 MgO 를 세우고, 핵간 거리가 비슷할 때 어느 쪽의 녹는점이 높은지 쓰게 한다. 답의 열쇠는 문제 3.1의 두 단계, 곧 “거리가 비슷한지 확인 → 전하의 곱 비교”다.

이 장의 참고문헌

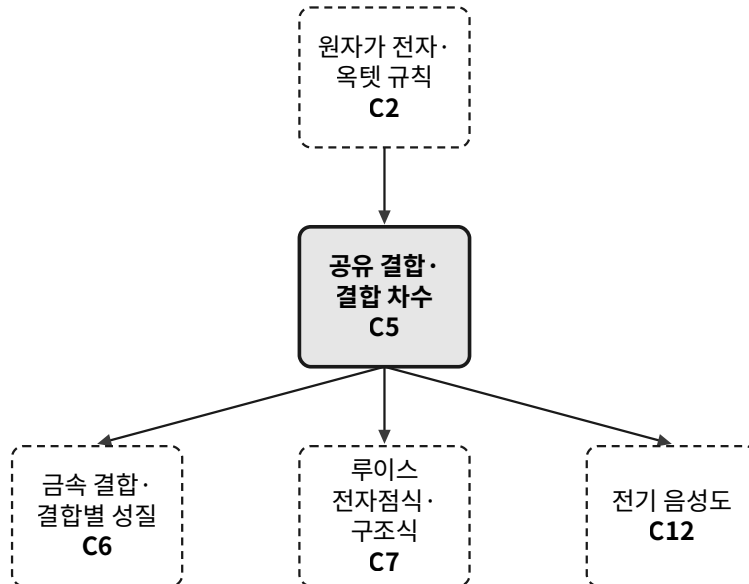
- Born, M., & Mayer, J. E. (1932). Zur Gittertheorie der Ionenkristalle. Zeitschrift für Physik, 75(1-2), 1-18. <https://doi.org/10.1007/BF01340511>
- Bragg, W. L. (1913). The structure of some crystals as indicated by their diffraction of X-rays. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 89(610), 248-277. <https://doi.org/10.1098/rspa.1913.0083>
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. Acta Crystallographica Section A, 32(5), 751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>

제 4장 공유 결합: 전자쌍을 나누어 갖기

새 개념 공유 전자쌍 · 단일·이중·삼중 결합 · 결합 길이 · 결합 에너지

이어짐 루이스 구조 6장 · 전기 음성도 10장 · 2부 C5

이 장의 개념도



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

그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C5 공유 결합·결합 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

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

과자 봉지 속 질소 N_2

왜 질소는 잘 반응하지 않을까

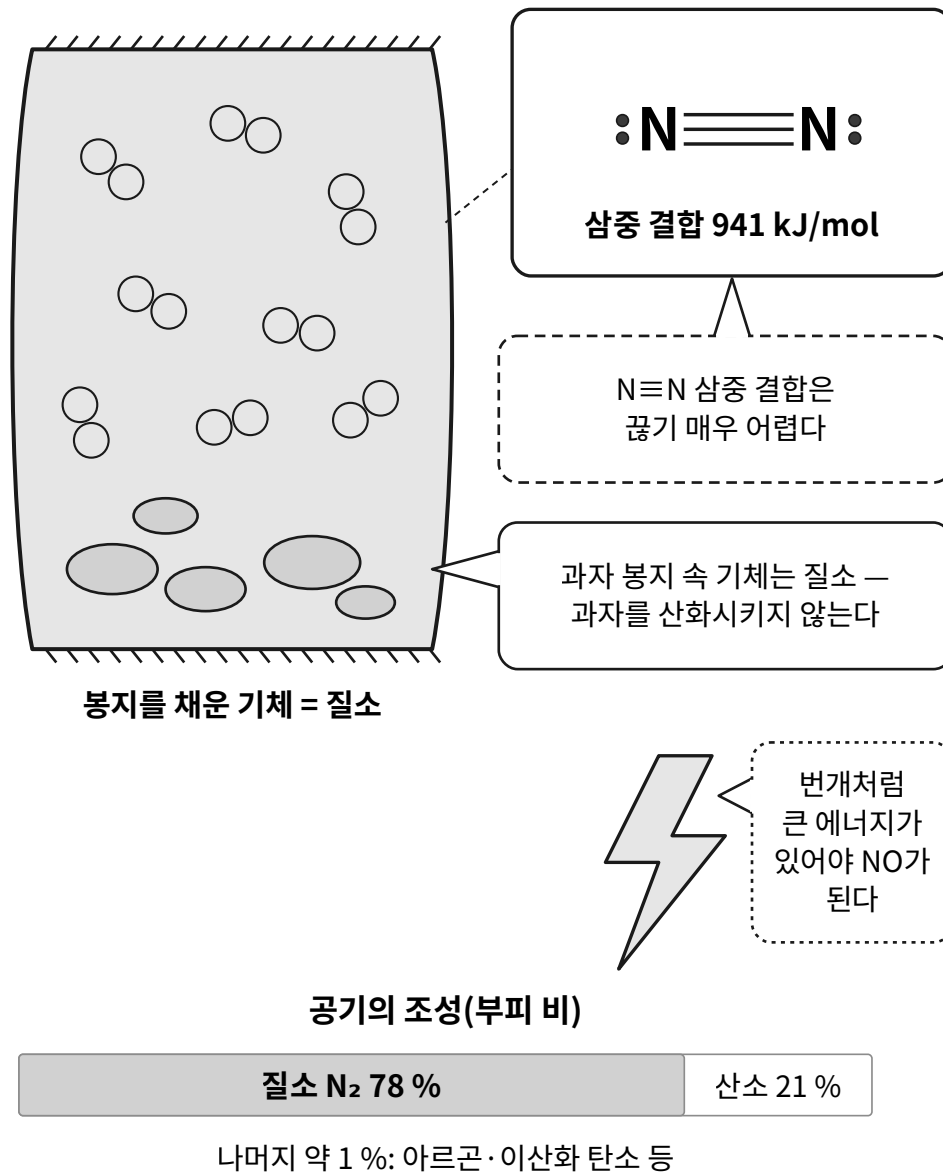


그림 18. 과자 봉지를 채운 질소 기체 — 공기의 78 %를 차지하는 N_2 는 삼중 결합(941 kJ/mol)이 매우 강해 잘 반응하지 않으므로, 과자가 산소와 만나 녹거나 산패하는 것을 막는 데 쓴다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 공유 결합은 두 원자가 전자쌍을 나누어 갖는 결합이다.
2. 공유 전자쌍이 많을수록 결합이 짧고 강하다($N-N$ 163 → $N \equiv N$ 941 kJ/mol).
3. 질소 기체가 잘 반응하지 않는 것은 $N \equiv N$ 삼중 결합이 매우 강하기 때문이다.

이 장의 출발점

2장의 원자가 전자와 전자점식(C 4개, N 5개, O 6개, F 7개), 필요한 결합 수 = 8 - 원자가 전자, 1장의 퍼텐셜 에너지 곡선(바닥의 위치 = 결합 길이, 바닥의 깊이 = 결합 에너지)을 쓴다.

하린이 과자 봉지 하나를 들고 과학방에 들어왔다. 봉지는 뽕뽕하게 부풀어 있었는데, 뜯어 보니 과자는 봉지의 반도 채우지 못했다. 하린은 투덜거리며 봉지를 탁자에 내려놓았다.

하린 교수님, 과자 봉지에 공기가 반이예요. 이거 과대 포장 아니예요?

석 교수 봉지 속 기체가 공기가 아니라는 걸 알면 조금 덜 억울할 거다. 대부분 질소 기체 N_2 를 채운다. 공기 속 산소가 과자의 기름과 만나면 산패해서 맛이 변하는데, 질소는 그런 반응을 거의 하지 않거든. 과자가 부서지지 않게 쿠션 역할도 하고.

태오 질소가 반응을 안 한다고요? 그럼 비활성 기체처럼 옥텟이 꽉 찬 거예요?

석 교수 질소 원자는 원자가 전자가 5개라 딱 차 있지 않다. 그런데 질소 원자 두 개가 만나 N_2 분자가 되면 아주 강한 결합으로 묶여서 다시 떼어 내기가 어렵다. 오늘은 그 결합, 곧 전자쌍을 나누어 갖는 공유 결합을 본다.

4.1 비금속끼리는 왜 주고받지 않고 나누나

석 교수 3장에서 금속과 비금속은 전자를 주고받는다고 했다. 그럼 염소 원자 두 개가 만나면 어떻게 될까? 한쪽이 전자를 내주고 Cl^+ 와 Cl^- 가 될까?

하린 둘 다 전자를 받고 싶어 하니까 아무도 안 내줄 것 같아요.

석 교수 바로 그거다. 염소의 이온화 에너지는 1251 kJ/mol로 나트륨(496)의 2.5배다. 전자를 떼어 내기가 너무 어렵지. 둘 다 전자를 끌어당기는 힘이 비슷하니 한쪽이 다 가져갈 수 없다. 대신 각자 전자를 하나씩 내놓아 한 쌍을 만들고 그 쌍을 둘이 함께 쓴다. 그 쌍이 두 원자핵 사이에 머물며 양쪽 원자핵을 모두 끌어당기는 것이 **공유 결합**이다.

태오 1장 수소 분자에서 본 그림이네요. 전자가 두 원자핵 사이에 모여서 양쪽을 다 끌어당긴다는 거요.

석 교수 그렇다. **그림 19**가 그 모습이다. 수소 원자 두 개의 전자 구름이 겹치면서 겹친 영역에 전자쌍이 자리 잡는다.

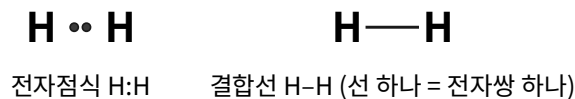
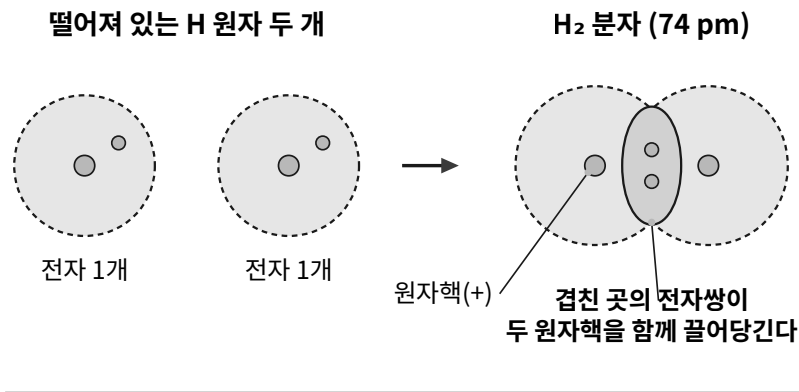


그림 19. 수소 분자의 공유 결합 모식도 — 왼쪽: 떨어져 있는 수소 원자 두 개(각각 전자 1개). 오른쪽: 두 원자가 74 pm까지 다가가 전자 구름이 겹치고, 겹친 영역의 전자쌍이 두 원자핵을 함께 끌어당긴다. 아래는 같은 결합을 전자점식(H:H)과 결합선(H-H)으로 적은 것이다.

- 하린** 그럼 수소 원자 두 개가 전자 2개를 같이 쓰니까, 둘 다 헬륨처럼 전자 2개를 가진 셈이네요.
- 석 교수** 맞다. 공유한 전자쌍은 양쪽 원자의 껍질에 모두 세어진다. 그래서 공유 결합으로 두 원자가 동시에 비활성 기체 배치를 얻을 수 있지. 함께 쓰는 전자쌍을 **공유 전자쌍**, 결합에 참여하지 않고 한 원자에만 속한 전자쌍을 **비공유 전자쌍**이라고 한다.
- 태오** 수소는 원자가 전자가 1개라 나트륨처럼 앓을 것 같은데, HCl은 왜 이온 결합이 아니에요?
- 석 교수** 수소의 이온화 에너지를 보면 답이 나온다. 1312 kJ/mol로 나트륨의 2.6배이고 염소(1251)보다도 크다. 원자핵 바로 옆 첫 껍질의 전자라 떼어 내기 어렵지. 그래서 수소는 비금속처럼 행동하고, 염소와 만나면 전자쌍을 나누어 HCl 분자를 만든다. 염화 수소가 상온에서 기체인 것도 날개의 분자로 이루어져 있기 때문이야. 물에 녹이면 H⁺와 Cl⁻로 나뉘어 염산이 되지만, 그것은 물 분자가 끼어들어 일어나는 일이고 기체 HCl 자체는 공유 결합 분자다.
- 하린** 1족에 있다고 다 금속은 아니네요.
- 이모** 공유라는 말이 딱 맞네요. 차 한 대를 두 집이 같이 쓰면 두 집 다 차가 있는 셈이니깐요.
- 석 교수** 좋은 비유예요. 다만 두 집의 힘이 다르면 차가 한쪽 집 앞에 더 오래 서 있겠지요. 원자도 전자쌍을 끌어당기는 힘이 다르면 전자쌍이 한쪽으로 치우칩니다. 그 이야기가 10장의 전기 음성도예요.
- 태오** “공유 결합”이라는 이름은 누가 붙였어요?
- 석 교수** 1916년 루이스가 “두 원자가 전자쌍을 함께 가진다”는 생각을 내놓았고, 3년 뒤 미국의 랭뮤어가 그 생각을 넓혀 정리하면서 covalence라는 말을 썼다. co는 “함께”, valence는 “원자가”라는 뜻이니 우리말 “공유”와 같은 뜻이지. 랭뮤어는 옥텟이라는 말도 널리 퍼뜨렸다. 이 두 사람 덕분에 우리가 점과 선으로 분자를 그릴 수 있게 됐다.
- 하린** 점과 선으로 그리는 게 그렇게 대단한 거예요?

석 교수 대단하다. 그 전에는 물이 왜 H_2O 이고 H_3O 가 아닌지, 메테인이 왜 CH_4 인지 설명할 수 없었다. 전자쌍을 세는 규칙 하나로 수만 가지 분자의 화학식이 설명되니, 화학자들이 지금도 매일 그 그림을 그린다.

4.2 공유 전자쌍이 하나, 둘, 셋

석 교수 원자에 따라 공유하는 전자쌍의 수가 달라진다. 2장의 “필요한 결합 수 = 8 - 원자가 전자”를 떠올려 보라. 플루오린은 1개, 산소는 2개, 질소는 3개가 모자라지.

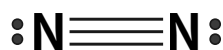
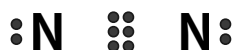
태오 F_2 는 플루오린 원자가 서로 하나씩 내놓아 한 쌍을 공유하면 둘 다 8개가 돼요. 각자 비공유 전자쌍 3쌍씩 남고요.

하린 산소는 2개가 모자라니까 두 쌍을 공유해야겠네요. O_2 는 공유 전자쌍이 2쌍.

석 교수 그렇다. 두 원자 사이 공유 전자쌍이 1쌍이면 단일 결합, 2쌍이면 이중 결합, 3쌍이면 삼중 결합이다. 공유 전자쌍의 수를 **결합 차수**라고 부른다. $F-F$ 는 1, $O=O$ 는 2, $N\equiv N$ 은 3이다. 결합선 하나가 전자쌍 하나를 뜻한다. **그림 20**에 N_2 를 두 가지 방식으로 그렸다.

전자점식

구조식(루이스 구조식)



공유 3쌍(6개) + 비공유 2쌍(4개)

결합선 3개 = 공유 전자쌍 3쌍

각 N 주위: $6 + 2 = 8$ 개(옥텟) · 그린 전자 모두 10 개 = $5 + 5$

그림 20. 질소 분자 N_2 의 공유 결합 — 왼쪽: 전자점식(두 원자 사이 공유 전자쌍 3쌍, 각 원자에 비공유 전자쌍 1쌍). 오른쪽: 결합선으로 쓴 구조식 $:N\equiv N:$. 각 질소 원자 주위 전자는 6(공유) + 2(비공유) = 8개, 그린 전자는 모두 10개다.

이모 전자점식은 점이 많아서 헷갈리고, 결합선은 깔끔하네요.

석 교수 그래서 보통은 공유 전자쌍은 선으로, 비공유 전자쌍은 점 두 개로 섞어 쓴다. 이것을 루이스 구조식이라고 하고 6장에서 그리는 법을 익힌다. 지금은 “전자 총수는 질소 원자 둘의 원자가 전자 $5 + 5 = 10$ 개, 그림 속 점과 선의 전자도 10개”라는 계산만 기억하자.

태오 결합선 3개면 전자 6개, 양쪽 비공유 전자쌍 2쌍이 4개, 합쳐서 10개. 맞네요.

O_2 는 교과 밖에서 조금 다르다

루이스 구조로 그린 $O=O$ 는 모든 전자가 짝을 이루지만, 실제 산소 분자는 짝을 이루지 않은 전자 2개를 가져 자석에 약하게 끌린다(액체 산소를 자석 사이에 부으면 붙잡힌다). 이것은 분자 오비탈 이론으로 설명하며 교과 밖 심화다. 고교 교과와 기출에서는 O_2 를 이중 결합 $O=O$ 로 쓰면 된다.

4.3 결합이 많을수록 짧고 강하다

석 교수 공유 전자쌍이 많아지면 두 원자핵 사이에 전자가 더 많이 모여서 더 세게 끌어당긴다. 그 결과 두 원자가 더 가까워지고, 떼어 내기도 더 어려워진다. **표 7**로 확인하자.

표 7. 결합 차수에 따른 결합 길이와 결합 에너지 — 평균 결합 에너지(Brown 외, 2018)

결합	결합 차수	결합 길이 (pm)	결합 에너지 (kJ/mol)
C-C	1	154	348
C=C	2	134	614
C≡C	3	120	839
N-N	1	145	163
N=N	2	125	418
N≡N	3	110	941
C-O	1	143	358
C=O	2	123	799

하린 차수가 1에서 3으로 올라갈수록 길이는 줄고 에너지는 커지네요. 예외가 하나도 없어요.
석 교수 그림 21에 그래프로 그렸다. 탄소-탄소와 질소-질소 두 줄이 같은 방향으로 움직인다.

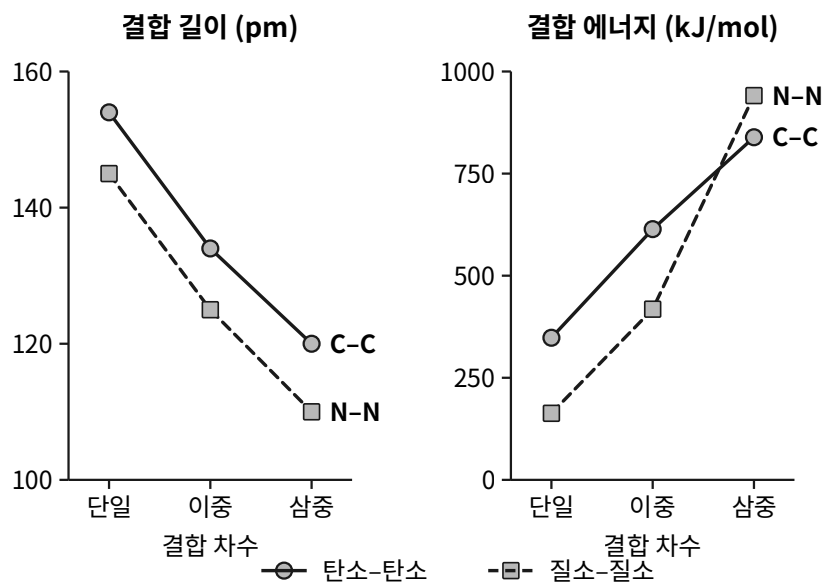


그림 21. 결합 차수와 결합 길이-결합 에너지 — 탄소-탄소(실선)와 질소-질소(점선) 결합. 차수가 1 → 2 → 3으로 늘면 결합 길이는 줄고(왼쪽) 결합 에너지는 커진다(오른쪽). 값은 위 표에서 가져왔다.

태오 그런데 이중 결합이 단일 결합의 딱 두 배는 아니네요. C-C 348의 두 배는 696인데 C=C는 614예요.

석 교수 날카로운 관찰이다. 두 번째, 세 번째 전자쌍은 첫 번째와 공간 배치가 달라 덜 효과적으로 끌어당긴다. 그래서 탄소의 이중 결합은 두 배보다 약하다. 그런데 질소는 반대로 $N \equiv N$ 941이 $N-N$ 163의 세 배인 489보다 훨씬 크지?

하린 $941 \div 163 = 5.8$ 배요! 질소는 단일 결합이 유난히 약한 거네요.

석 교수 질소 원자는 작고 비공유 전자쌍을 하나씩 가져서, 단일 결합으로 가까이 붙으면 비공유 전자쌍끼리 밀어내 단일 결합이 약해진다. 대신 삼중 결합은 매우 강하지. 이 대비 때문에 질소는 N_2 상태로 있으려는 경향이 아주 강하다.

화학 결합·분자 구조 문제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

전자를 세고(루이스) → 전자쌍을 펼치고(모양) → 쌍극자를 더한다(극성)

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

2부 기출문제와 기본개념

기출 7문항(2012~2024학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

3부 논술답안작성 패턴분석

설명·비교·판별·계산·해결 5가지 답안 틀, 감점 답안과 우수 답안 비교

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 6문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 화학 결합과 분자 구조인가
2. 원자가 전자와 옥텟 규칙
3. 이온 결합: 주고받은 전자, 끌어당기는 전하
4. 공유 결합: 전자쌍을 나누어 갖기
5. 금속 결합, 그리고 세 가지 결합 비교
6. 루이스 전자점식과 구조식 그리기
7. 옥텟을 벗어나는 분자와 형식 전하

8. 전자쌍 반발 이론: 분자의 기본 모양
9. 비공유 전자쌍과 결합각
10. 전기 음성도: 전자쌍을 끌어당기는 힘
11. 결합의 극성과 쌍극자 모멘트
12. 분자의 극성: 쌍극자를 더하면
13. 자료로 원소를 찾고 분자를 세운다
14. 몸속·지구·기술 속의 분자 구조, 그리고 2부로

한 단원씩 깊게, 25권으로 완성하는 고교 과학 논술 — 시리즈 전 25권 (테두리가 이 책)

논술 마스터 시리즈 · 생물 12권 (01-12)



논술 매니아 시리즈 · 화학 13권 (13-25)



함께 보면 좋은 권: 원자 구조·주기성 · 분자 간 힘·수소 결합 · 산화·환원 · 화학양론



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 979-11-23065-13-7

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 14 — 화학 결합·분자 구조·극성 — 전체 286쪽

ssbook.kr/book/nonsul-14

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

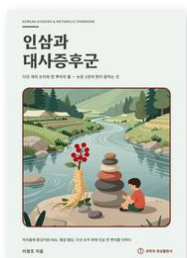
인삼 (6)



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

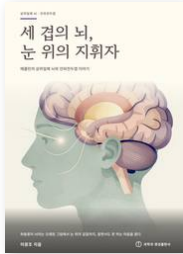
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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