



대입 과학논술 25 — 화학 전지·전기 분해

화학 전지·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

컬러 PDF · 개인 영구 소장

이 PDF는 무료 샘플입니다

이 책의 앞표지와 앞 50쪽, 뒤표지를 읽어 보실 수 있습니다. 51쪽부터는 ssbook.kr에서 구매하시면 전체를 보실 수 있습니다.

ssbook.kr/book/nonsul-25

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 전지· 전기 분해

1부 기본개념

2부 기술 개념

3부 답안 패턴

4부 실전 풀이

화학 전지·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 15문항 · 2009~2025학년도 · 이광조 지음

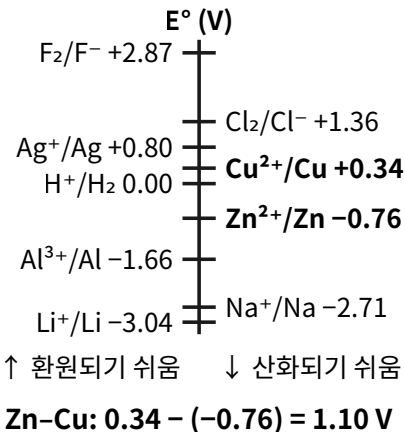
화학 전지·전기 분해

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

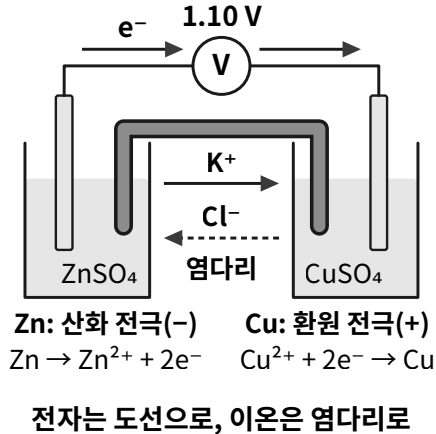
화학 전지·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 반쪽 반응 × 표준 환원 전위의 차 × 전하량(F) | 15문항 · 7개 대학 (2009~2025)

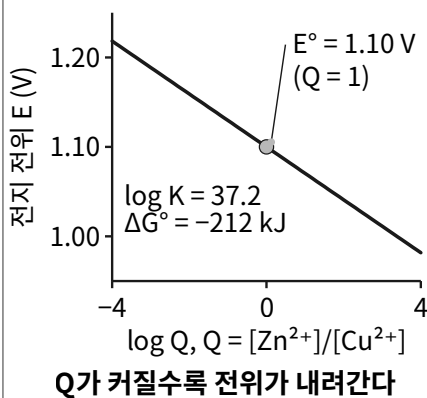
① 표준 환원 전위 사다리



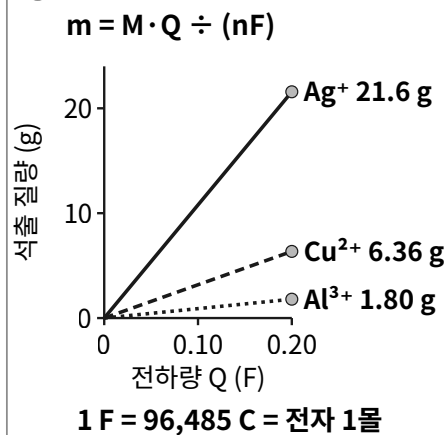
② 다니엘 전지와 염다리



③ 농도와 전위: 네른스트 식



④ 전기 분해: 패러데이 법칙



한 줄 요약: 전지는 E° 차로 전자를 흘려 일을 시키고, 전기 분해는 전자를 밀어 넣는다 — 양은 언제나 전하량 ÷ F

그림 1. 화학 전지·전기 분해 단원의 그림 요약. ① 표준 환원 전위 사다리(Li^+/Li -3.04 V에서 F_2/F^- +2.87 V까지; 아래쪽 금속일수록 산화되기 쉽다), ② 다니엘 전지(Zn 산화 전극에서 Cu 환원 전극으로 전자가 도선을 따라 흐르고, 염다리의 K^+ 는 구리 쪽, Cl^- 는 아연 쪽으로 이동; $E^\circ = 0.34 - (-0.76) = 1.10$ V), ③ 다니엘 전지의 네른스트 직선($E = 1.10 - 0.0296 \log Q$; $E = 0$ 이 되는 $\log K = 37.2$, $\Delta G^\circ = -nFE^\circ = -212$ kJ), ④ 패러데이 법칙(석출 질량 $m = M \cdot Q / (nF)$: 0.20 F에서 Ag 21.6 g, Cu 6.36 g, Al 1.80 g). 모든 값은 25 °C 표준 환원 전위와 $F = 96,485$ C/mol로 계산했다.

한 줄 요약: 전지는 전위가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 전자를 도선으로 보내 일을 시키고, 전기 분해는 그 흐름을 거꾸로 밀어 넣는다 — 양은 언제나 전하량 ÷ F

연결 단원 → 산화·환원 · 화학 평형 · 열화학 · 산·염기 · 세포막과 신경

이광조 · v1

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 화학 전지인가	16
1.1 전지는 어디에나 있다	18
1.2 같은 반응, 다른 길	19
1.3 전지의 세 부품	21
1.4 거꾸로도 된다	23
제 2장 산화·환원 다시 보기와 금속의 이온화 경향	26
2.1 산화수 5분 복습	28
2.2 금속을 이온 용액에 넣어 보자	29
2.3 이온화 경향의 순서	30
2.4 양적 관계 맞보기 — 은 나무	33
제 3장 볼타 전지: 두 금속과 도선 하나	36
3.1 볼타의 전퇴	38
3.2 산화 전극과 환원 전극	39
3.3 반쪽 반응을 더해 전지 반응식 만들기	41
3.4 묶은 황산 속 볼타 전지와 분극	42
3.5 레몬 전지 다시 보기	43
제 4장 다니엘 전지와 염다리	46
4.1 왜 둘로 나누었나	48
4.2 염다리가 없으면 곧 멈춘다	49
4.3 염다리 속 이온은 어디로 가나	50
4.4 전극 질량과 이온 농도의 변화	51
제 5장 표준 환원 전위: 전자를 끄는 힘의 순위표	56
5.1 전위는 차이만 잴 수 있다	58
5.2 표준 수소 전극	58
5.3 표준 환원 전위 표 읽기	60
5.4 물도 줄에 선다	63
제 6장 전지 전위 계산과 반응의 양적 관계	66
6.1 두 E° 의 차가 전지 전위다	68
6.2 계수를 곱해도 전위는 곱하지 않는다	70
6.3 미지 금속의 전위를 추론하기	71
6.4 반응은 언제 멈추나 — 전지 반응의 양적 관계	72
제 7장 자발성의 언어: 전위·자유 에너지·평형 상수	76
7.1 전위의 부호가 자발성을 말한다	78
7.2 전기 일과 자유 에너지: $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$	79
7.3 평형 상수와 다리	80
7.4 다 쓴 전지는 평형에 이른 전지	82
제 8장 농도가 전위를 바꾼다: 네른스트 식	85
8.1 르샤틀리에로 먼저 보기	87
8.2 네른스트 식: 농도로 전위를 고친다	88
8.3 같은 금속, 다른 농도: 농도차 전지	89

8.4 몸속의 농도차 전지: 막전위	91
제 9장 일상의 전지: 1차 전지와 2차 전지.....	95
9.1 망가니즈 건전지와 알칼리 전지.....	97
9.2 납축전지: 충전되는 전지의 원형.....	99
9.3 리튬 이온 전지: 이온이 오가는 흔들의자.....	102
9.4 전지를 고르는 기준	104
제 10장 연료 전지: 연료를 계속 넣는 전지	106
10.1 반응물이 밖에서 들어오는 전지.....	108
10.2 수소 연료 전지의 두 전극.....	108
10.3 효율: 연료 전지는 왜 엔진보다 나은가	110
10.4 연료 1 g에 담긴 에너지	111
10.5 수소는 어디서 오나 — 녹색 화학의 질문	113
제 11장 전기 분해: 전기로 반응을 거꾸로 돌린다	116
11.1 전지와 전기 분해: 같은 이름, 다른 부호	118
11.2 녹인 소금: 물이 없을 때	119
11.3 소금물에서는 물이 경쟁한다	119
11.4 누가 먼저 반응하나: 판별 사다리.....	121
11.5 염화 구리 수용액: 금속과 기체가 함께	123
11.6 필요한 최소 전압	125
제 12장 수용액 전기 분해와 pH 변화.....	127
12.1 순수한 물은 왜 잘 분해되지 않나.....	129
12.2 묽은 황산의 전기 분해: 2 : 1의 비밀	130
12.3 전극 주변의 pH가 갈리는 이유	132
12.4 소금물의 전기 분해: 용액 전체가 염기성이 된다.....	133
12.5 황산 구리 수용액: 용액 전체가 산성이 된다	135
제 13장 패러데이 법칙: 전하량으로 물질을 센다.....	137
13.1 패러데이의 실험과 두 법칙	139
13.2 1 F는 전자 1몰의 전하	140
13.3 계산 사슬 네 단계	140
13.4 직렬 전해조: 같은 전하, 다른 몰수.....	142
13.5 석출 질량은 전하량에 정비례한다	143
13.6 전지에서도 같은 계산	145
제 14장 도금·제련·부식, 그리고 2부로	147
14.1 전기 도금: 두께를 계산한다	149
14.2 구리 정련과 알루미늄 제련	150
14.3 부식은 작은 전지다	151
14.4 전지 설계와 진단: 기출이 좋아하는 질문.....	154
14.5 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	155
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	157
부록 B. 용어 풀이	161
기출문제와 기본개념.....	168
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	169
0. 이 장의 사용법	170
1. 출제 개념.....	171
1.1 산화·환원과 금속의 이온화 경향 — $P1 \cdot C1$	171

1.2 화학 전지의 구조와 반쪽 반응 — C2 · C3	172
1.3 염다리와 이온의 이동 — C4	172
1.4 표준 환원 전위와 전지 전위 — C5 · C6.....	173
1.5 전지 반응의 양적 관계 — C7	175
1.6 자발성과 네른스트 식 — C8 · C9 · A1.....	175
1.7 실용 전지와 연료 전지 — C10 · C11 · A4.....	176
1.8 전기 분해와 pH — C12 · C13	177
1.9 패러데이 법칙과 응용 — C14 · A2 · A3 · A5.....	177
1.10 그래프 개념도 읽는 법.....	178
2. 출제 경향.....	181
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	183
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	184
2.3 학교별 성향	184
논술답안작성 패턴분석	186
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	187
3. 답안 작성법.....	188
3.1 계산형 답안의 틀	189
3.2 서술형 답안의 네 문장 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.....	199
5.1 한눈에 보는 기출 15문항	199
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	200
5.3 기본 개념 한눈에	200
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	202
6. 출제 문항 분석과 모범답안	203
〈기출문제 1 (연세대 2025년)〉	204
〈기출문제 2 (연세대 2024년)〉	214
〈기출문제 3 (연세대 2024년)〉	222
〈기출문제 4 (경희대 2024년)〉	233
〈기출문제 5 (연세대 2023년)〉	241
〈기출문제 6 (연세대 2022년)〉	249
〈기출문제 7 (연세대 2022년)〉	258
〈기출문제 8 (연세대 2020년)〉	266
〈기출문제 9 (연세대 2019년)〉	274
〈기출문제 10 (성균관대 2016년)〉	282
〈기출문제 11 (부산대 2015년)〉	292
〈기출문제 12 (고려대 2011년)〉	302
〈기출문제 13 (성균관대 2011년)〉	311
〈기출문제 14 (연세대 2010년)〉	320
〈기출문제 15 (서울시립대 2009년)〉	330

7. 변형·예상 문항	341
8. 강의 연결.....	349
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	350
8.2 강의 구성 시 유의점	350
9. 전체 문제 총평	351
9.1 숫자로 먼저 보기	351
9.2 다섯 가지 총평.....	351
9.3 대학별 한 줄 총평	352
9.4 이렇게 공부하자	353
10. 참고문헌.....	354

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 화학 전지·전기 분해 논제의 네 장면	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1	17
그림 4. 직접 반응과 분리 반응	19
그림 5. 직접 반응과 전지의 에너지	20
그림 6. 레몬 전지 직렬 연결과 전압	22
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2	27
그림 9. 금속-이온 반응 격자	29
그림 10. 이온화 경향 계단	31
그림 11. 구리와 은 이온의 2 : 1 반응	33
그림 12. 제 3장 개념도	36
그림 13. 생활 속 개념도 3	37
그림 14. 볼타 전지	39
그림 15. 반쪽 반응 더하기	41
그림 16. 볼타 전지의 분극	43
그림 17. 제 4장 개념도	46
그림 18. 생활 속 개념도 4	47
그림 19. 다니엘 전지와 염다리	49
그림 20. 다니엘 전지의 전하 장부	53
그림 21. 다니엘 전지의 농도 변화	53
그림 22. 제 5장 개념도	56
그림 23. 생활 속 개념도 5	57
그림 24. 표준 수소 전극과 아연 반쪽 전지	59
그림 25. 표준 환원 전위 사다리	61
그림 26. 기준을 바꾸어도 차이는 같다	64
그림 27. 제 6장 개념도	66
그림 28. 생활 속 개념도 6	67
그림 29. 두 E° 사이의 거리	69
그림 30. 미지 금속의 전위 사다리	72
그림 31. 전지 반응의 몰수 장부	73
그림 32. 제 7장 개념도	76
그림 33. 생활 속 개념도 7	77
그림 34. $E^\circ \cdot \Delta G^\circ \cdot K$ 의 삼각형	81
그림 35. E° 와 평형 상수	82
그림 36. 다 쓴 전지는 평형 상태	83
그림 37. 제 8장 개념도	85
그림 38. 생활 속 개념도 8	86
그림 39. 다니엘 전지의 네른스트 직선	88
그림 40. 구리 농도차 전지	90
그림 41. K^+ 평형 전위와 세포막	92
그림 42. 제 9장 개념도	95
그림 43. 생활 속 개념도 9	96
그림 44. 알칼리 전지의 단면	98
그림 45. 납축전지의 방전과 충전	100
그림 46. 납축전지 방전과 질량 변화	102
그림 47. 제 10장 개념도	106

그림 48. 생활 속 개념도 10	107
그림 49. 수소 연료 전지	109
그림 50. 수소 연료 전지의 에너지 장부	111
그림 51. 연료 1 g당 에너지	112
그림 52. 제 11장 개념도	116
그림 53. 생활 속 개념도 11	117
그림 54. 용융 NaCl과 NaCl 수용액	120
그림 55. 수용액 전기 분해의 판별 사다리	122
그림 56. 염화 구리(II) 수용액의 전기 분해	124
그림 57. 제 12장 개념도	127
그림 58. 생활 속 개념도 12	128
그림 59. 호프만 장치와 기체 부피비	131
그림 60. 전극 주변의 pH와 BTB의 색	132
그림 61. 소금물 전기 분해와 pH	134
그림 62. 제 13장 개념도	137
그림 63. 생활 속 개념도 13	138
그림 64. 패러데이 법칙의 계산 사슬	141
그림 65. 직렬로 연결한 두 전해조	142
그림 66. 석출 질량-전하량 직선	144
그림 67. 제 14장 개념도	147
그림 68. 생활 속 개념도 14	148
그림 69. 구리의 전해 정련	150
그림 70. 물방울 속 철의 부식	152
그림 71. 함석과 양철의 흡집	153
그림 72. 기출에 나온 전지의 전위	174
그림 73. 전체 개념 그래프	179
그림 74. 개념별 출제 횟수	180
그림 75. 연도별 출제 문항 수	181
그림 76. 대학별 출제 문항 수	181
그림 77. 전기 화학 장치 답안의 순서	188
그림 78. 〈연세대 2025〉 개념 그래프	205
그림 79. 다니엘 전지 염다리의 양이온(q_{187})	207
그림 80. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	215
그림 81. 레몬 전지의 전극 반응	218
그림 82. 연세대(미래) 2024 연료 전지 모형	223
그림 83. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	224
그림 84. 수소 연료 전지의 전극 반응	228
그림 85. NaCl(l)과 NaCl(aq) 전기 분해	230
그림 86. 경희대 2024 모의 전기 분해 장치	234
그림 87. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	234
그림 88. 소금물 전기 분해와 OH^- 증가	238
그림 89. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	242
그림 90. 납축전지의 방전	245
그림 91. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	250
그림 92. [문제 3]의 다니엘 전지(q_{157} 재구성)	252
그림 93. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	259
그림 94. Zn-Ag 전지 모형	262
그림 95. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	267
그림 96. 헤스 법칙 엔탈피 도표	270

그림 97. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	275
그림 98. 다니엘 전지와 염다리	278
그림 99. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	283
그림 100. Fe-Ag 전지(q212 재구성)	284
그림 101. 표준 환원 전위 사다리(q212).....	285
그림 102. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	293
그림 103. 금속판 X·Y 화학 전지	294
그림 104. 상대 환원 전위 사다리	297
그림 105. 〈고려대 2011〉 개념 그래프	303
그림 106. 구리의 전해 정련(q19)	305
그림 107. 두 실험의 전류-시간 그래프(q19).....	305
그림 108. 〈성균관대 2011〉 개념 그래프.....	312
그림 109. Ca의 산화와 전도성 변화.....	314
그림 110. 〈연세대 2010〉 개념 그래프	321
그림 111. K ⁺ 평형 전위와 측정 막전위(q16).....	322
그림 112. 〈서울시립대 2009〉 개념 그래프.....	331
그림 113. 비수계 전해질	335
그림 114. 용매에 따른 Zn-Cu 전지	336

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	16
표 4. 전지의 세 부품.....	21
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. 금속을 이온 수용액이나 묽은 산에 넣었을 때의 변화.....	30
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 8. 전극 이름 정리.....	40
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	46
표 10. 다니엘 전지의 두 반쪽 비교.....	52
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	56
표 12. 표준 환원 전위(25 °C, 1 M, 1 atm).....	60
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	66
표 14. 문제 6.....	73
표 15. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	76
표 16. E° , ΔG° , K 의 부호와 자발성.....	81
표 17. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	85
표 18. 몸속 주요 이온의 농도와 평형 전위(37 °C, 대표값).....	92
표 19. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	95
표 20. 실용 전지 비교.....	104
표 21. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	106
표 22. 보통 전지와 연료 전지의 비교.....	114
표 23. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	116
표 24. 수용액 전기 분해의 생성물 판별(비활성 전극, 진한 수용액).....	123
표 25. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	127
표 26. 비활성 전극으로 전기 분해한 뒤 용액의 변화.....	135
표 27. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	137
표 28. 1 F(전자 1 mol)로 얻는 물질의 양.....	143
표 29. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	147
표 30. 이 권에서 배운 전기 화학 장치 한눈에.....	155
표 31. 2부 목차와 내용.....	169
표 32. 금속과 금속 이온 용액의 반응.....	171
표 33. 전극 이름 정리.....	172
표 34. 이 책의 기출에 나오는 표준 환원 전위(25 °C, V).....	173
표 35. 연세대 2022 유형의 물 장부($Zn = 65$, $Cu = 64$, $Ag =$	175
표 36. 기출에 나온 실용 전지(전압은 표준 전위에서 계산하거나 대표값).....	176
표 37. 수용액 전기 분해의 생성물(비활성 전극).....	177
표 38. 이 책의 기출 문항 목록.....	182
표 39. 대학별 출제 문항.....	182
표 40. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	183
표 41. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	184
표 42. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서.....	187
표 43. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	187
표 44. 서술형 답안의 문장 틀(화학 전지 설명).....	189
표 45. 논술 기본 패턴 5가지(화학 전지·전기 분해 답안).....	190
표 46. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은).....	191
표 47. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용.....	198

표 48. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	199
표 49. 학년도별 문항 수와 원문 사정.....	199
표 50. 소문항 28개에 적용한 주 답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주)	200
표 51. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순).....	201
표 52. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	202
표 53. <표준 환원 전위(25°C)>	204
표 54. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	205
표 55. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	208
표 56. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	215
표 57. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	216
표 58. 레몬 전지에서 1 mA를 1시간 흘릴 때의 양적 관계(이 책이 덧붙인 계)	219
표 59. 아연-구리 전지 세 가지의 비교(이 책의 정리).....	220
표 60. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	224
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	226
표 62. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	234
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	236
표 64. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	242
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	243
표 66. 납축전지 방전 때 전자 1몰당 변화(이 책의 정리, 원자량 Pb 207)	246
표 67. 방전 전후 납의 산화수(이 책의 정리)	246
표 68. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	250
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	253
표 70. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	259
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	261
표 72. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	267
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	268
표 74. 두 연료의 비교	271
표 75. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	275
표 76. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	276
표 77. 전자 0.....	279
표 78. 제시문 <라>의 표	282
표 79. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	283
표 80. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	286
표 81. 【문항 1】의 표(원문 표를 다시 조판)	292
표 82. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	293
표 83. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	295
표 84. A~D로 만들 수 있는 전지 여섯 개(이 책이 계산, $A = 0\text{ V}$ 기준)	299
표 85. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	303
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	306
표 87. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	312
표 88. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	313
표 89. 기출문제 14의 개념과 복습 위치.....	321
표 90. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	323
표 91. 기출문제 15의 개념과 복습 위치.....	332
표 92. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	333
표 93. 2주기 원소와 관련된 표준 환원 전위(25 °C, 대학 일반화학 교재의 표)	335
표 94. 인강 회차 구성(제안)	349
표 95. 15개 문항의 규모	351
표 96. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	352

제 1 부

기본개념편

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

화학 전자·전기 분해

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 이온화 경향 → 화학 전지의 구조 → 표준 환원 전위와 전지 전위 → 자발성과 농도 → 실용 전지·연료 전지 → 전기 분해와 패러데이 법칙 → 도금·제련·부식의 순서로 이어집니다. 산화수와 산화·환원 반응식 맞추기는 13권 《산화·환원》에서 자세히 다루었으므로 여기서는 **기본개념편 제 2장** (26쪽)에서 짧게 복습하고 곧바로 전지로 들어갑니다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장 — 전지를 만들고, 재고, 쓰고, 거꾸로 돌린다

구간	장	무엇을 하는가
A. 전자를 도선으로	1~4장	산화·환원을 다시 보고, 금속의 이온화 경향 차이로 볼타 전지와 다니엘 전지를 만든다. 전극·전해질·도선·염다리가 각각 무슨 일을 하는지 본다.
B. 전위를 숫자로	5~6장	표준 수소 전극을 0V로 놓고 표준 환원 전위 표를 만든 뒤, 두 반쪽 전지의 전위 차로 전지 전위를 계산한다. 전극 질량·이온 농도 변화도 몰로 센다.
C. 자발성과 농도	7~8장	전위 E° , 자유 에너지 ΔG° , 평형 상수 K 를 한 줄로 잇고, 농도가 바뀌면 전위가 어떻게 바뀌는지 네른스트 식으로 계산한다(교과 밖 심화 포함).
D. 쓰는 전지	9~10장	망가니즈·알칼리 전지, 납축전지, 리튬 이온 전지, 수소 연료 전지의 전극 반응과 장단점을 정리한다.
E. 거꾸로 돌리기	11~14장	전기 분해로 용융 염과 수용액을 분해하고 pH 변화를 읽는다. 패러데이 법칙으로 전하량에서 물질의 양을 구하고, 도금·제련·부식 방지로 마무리한 뒤 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈생활 속 개념도〉 → 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 참고문헌 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도 1쪽과 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장안의 해당 그림과 식으로 돌아가 한 번 더 시도하십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 화학 전지인가	화학 에너지와 전기 에너지 · 전자의 길과 이온의 길 · 전지의 세 부품
기본개념편 제 2장 (26쪽)	산화·환원 다시 보기와 금속의 이온화 경향	산화수 복습 · 금속의 이온화 경향 · 금속과 금속 이온의 반응
기본개념편 제 3장 (36쪽)	볼타 전지: 두 금속과 도선 하나	산화 전극(-극)과 환원 전극(+극) · 반쪽 반응 · 전지 반응식 · 볼타 전지의 분극
기본개념편 제 4장 (46쪽)	다니엘 전지와 염다리	다니엘 전지 · 염다리의 역할 · 이온 농도와 전극 질량의 변화
기본개념편 제 5장 (56쪽)	표준 환원 전위: 전자를 끄는 힘의 순위표	표준 수소 전극 · 표준 환원 전위 · 산화제와 환원제의 세기

장	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 6장 (66쪽)	전지 전위 계산과 반응의 양적 관계	표준 전지 전위 $E^\circ_{\text{전지}} = E^\circ_{\text{환원}} - E^\circ_{\text{산화}}$ · 세기 성질 · 전지 반응의 양적 관계
기본개념편 제 7장 (76쪽)	자발성의 언어: 전위·자유 에너지·평형 상수	자발성 · $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$ · E° 와 평형 상수 K
기본개념편 제 8장 (85쪽)	농도가 전위를 바꾼다: 네른스트 식	네른스트 식 · 농도차 전지 · 막전위(교과 밖 심화)
기본개념편 제 9장 (95쪽)	일상의 전지: 1차 전지와 2차 전지	1차 전지 · 2차 전지 · 납축전지 · 리튬 이온 전지
기본개념편 제 10장 (106쪽)	연료 전지: 연료를 계속 넣는 전지	수소 연료 전지 · 연료 전지의 효율 · 수소 에너지
기본개념편 제 11장 (116쪽)	전기 분해: 전기로 반응을 거꾸로 돌린다	전기 분해 · 용융 염과 수용액 · 경쟁하는 전극 반응
기본개념편 제 12장 (127쪽)	수용액 전기 분해와 pH 변화	물·황산·염화 나트륨 수용액의 전기 분해 · 기체 부피비 · pH 변화
기본개념편 제 13장 (137쪽)	패러데이 법칙: 전하량으로 물질을 센다	전하량 $Q = It$ · $1 F = 96,485 C$ · 패러데이 법칙
기본개념편 제 14장 (147쪽)	도금·제련·부식, 그리고 2부로	전기 도금 · 구리 정련 · 알루미늄 제련 · 부식과 희생 양극 · 전지 설계

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 전지 그림을 볼 때마다 세 가지를 손가락으로 짚는다. 전자는 어느 전극에서 나와 도선을 따라 어디로 가는가, 염다리의 양이온과 음이온은 각각 어느 쪽으로 가는가, 어느 전극이 가벼워지고 어느 전극이 무거워지는가.
- 계산이 막히는 장은 6장(전지 전위와 양적 관계)과 13장(패러데이 법칙)이다. 두 장은 두 번 읽는다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다. 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다.

기본개념편을 열며

화학 전지와 전기 분해는 고등학교 화학 I의 산화·환원 단원 끝에서 처음 만나고, 화학 II에서 표준 환원 전위·전기 분해·패러데이 법칙으로 넓어진다. 대학 논술에서는 “어느 전극에서 무엇이 일어나는가”를 반응식으로 쓰게 하고, 거기에 전위 계산이나 질량·기체 부피 계산을 한 줄 더 엮는다. 이 기본개념편은 원자·이온·물의 뜻만 알면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다.

충북 단양 ‘돌집 과학방’의 토요일 오후. 탁자 위에 레몬 두 개, 아연판과 구리판, 집게 달린 전선, 작은 디지털 시계가 놓여 있다.

이모 교수님, 오늘은 과일 가게라도 차리시는 거예요? 레몬이 왜 여기 있어요?

석 교수 오늘부터 몇 주 동안은 전지를 만들 거다. 레몬은 그 첫 번째 재료지.

하린 레몬으로 전지를 만들어요? 레몬 안에 전기가 들어 있어요?

석 교수 레몬 안에 전기가 들어 있는 건 아니야. 레몬즙 속의 이온, 그리고 아연과 구리라는 서로 다른 두 금속이 만나면 전자가 한쪽에서 다른 쪽으로 가고 싶어 한다. 그 길을 도선으로 열어 주면 전류가 흐르지.

태오 13권에서 배운 산화·환원이네요. 전자를 잃으면 산화, 얻으면 환원이요.

석 교수 그렇다. 지난번에는 산화수를 세고 반응식을 맞추는 데까지 갔지. 이번에는 그 전자를 한 비커 안에서 그냥 주고받게 두지 않고, 바깥 도선으로 돌려서 일을 시키는 이야기다. 그게 화학 전지야.

이모 그럼 반대로, 전기를 넣어서 뭘 만드는 것도 있어요? 우리 가게 소독수 기계가 소금물에 전기를 흘려서 소독수를 만든다고 하던데요.

석 교수 좋은 질문입니다. 그게 전기 분해예요. 전지에서 저절로 흐르던 전자를, 바깥에서 전원으로 거꾸로 밀어 넣으면 저절로는 일어나지 않는 반응이 일어납니다. 이 책의 뒤쪽 절반이 그 이야기예요.

하린 그런데 레몬 하나로 시계가 켜져요?

태오 내가 해 볼게. 아연판, 구리판을 레몬에 꽂고... 어, 숫자가 안 나오네.

석 교수 전압계로 재 보자. 0.9 V쯤 나오지? 이 시계는 1.5 V 정도가 필요하다. 레몬 두 개를 이어 보렴. 첫 레몬의 구리판을 둘째 레몬의 아연판에 연결하는 거다.

태오 이번엔 켜졌어요! 1.8 V 정도 나와요.

이모 신기하네요. 그런데 왜 꼭 아연하고 구리예요? 구리판 두 개를 꽂으면 안 돼요?

석 교수 바로 그 질문이 이 단원 전체를 끌고 가는 질문이에요. 같은 금속 두 개면 전자가 어느 쪽으로 갈 이유가 없어서 전압이 0입니다. 금속마다 전자를 내놓으려는 정도가 다르고, 그 차이가 전압이 됩니다. 그 차이를 숫자로 적은 것이 표준 환원 전위고요.

하린 그럼 그 숫자만 알면 어떤 금속끼리 전지를 만들 때 몇 볼트가 나올지 미리 알 수 있어요?

석 교수 그렇다. 그리고 전자가 몇 몰 흘렸는지 알면, 아연이 몇 그램 녹고 구리가 몇 그램 붙는지도 계산할 수 있지. 논술 문제는 거의 모두 이 두 가지를 묻는다. 어느 쪽으로 가는가, 그리고 얼마나 가는가.

태오 기출문제도 그래요? 연세대에서 레몬 전지가 나왔다고 들었어요.

석 교수 2024학년도에 나왔다. pH 2인 레몬즙에 아연과 구리를 꽂은 전지에서 산화 전극과 환원 전극을 쓰라는 문제였지. 그 문제를 끝까지 풀려면 구리 전극에서 실제로 무엇이 환원되는지를 알아야 한다. 구리 이온이 거의 없는 레몬즙에서 말이야.

하린 구리 이온이 없으면 뭐가 환원돼요?

석 교수 그건 3장에서 같이 찾아보자. 오늘은 순서만 정해 두자. 먼저 금속끼리 전자를 주고받는 모습을 보고, 그 전자를 도선으로 돌리고, 전위를 숫자로 재고, 실제 전지를 뜯어보고, 마지막으로 전기를 거꾸로 넣어 본다.

이모 열네 번이면 우리 집 소독수 기계 원리까지 알게 되겠네요.

석 교수 그럼요. 배 밑바닥에 아연 덩어리를 붙여 두는 이유까지 알게 되실 거예요.

이 책의 기본개념편은 그 순서를 그대로 따른다. 1장은 왜 화학 전지인가를 묻고, 레몬 전지 하나로 전지의 세 부품(두 전극, 전해질, 도선)을 찾는다. 2장부터는 한 장에 한 걸음씩, 이온화 경향에서 패러데이 법칙까지 간다. 장마다 문제를 직접 풀고, 숫자는 모두 손으로 계산해 본다.

제 1장 왜 화학 전지인가

새 개념 화학 에너지와 전기 에너지 · 전자의 길(도선)과 이온의 길(용액) · 전지의 세 부품

이어짐 이온화 경향 2장 · 볼타 전지 3장 · 전기 분해 11장

이 장의 개념도

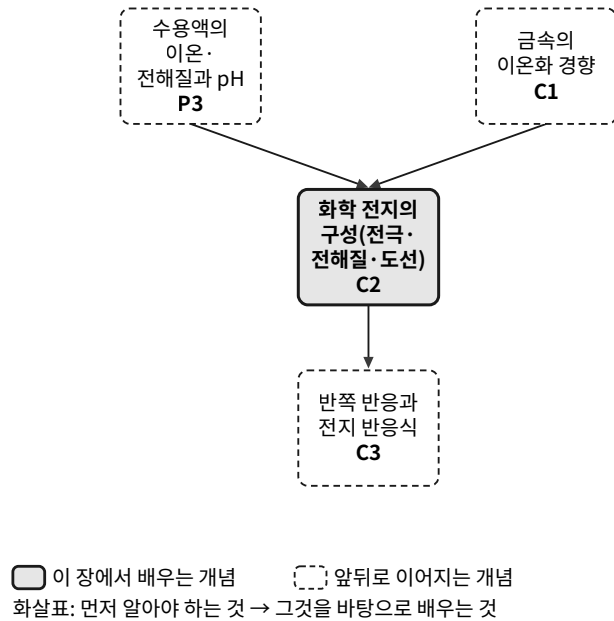


그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C2 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선))과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

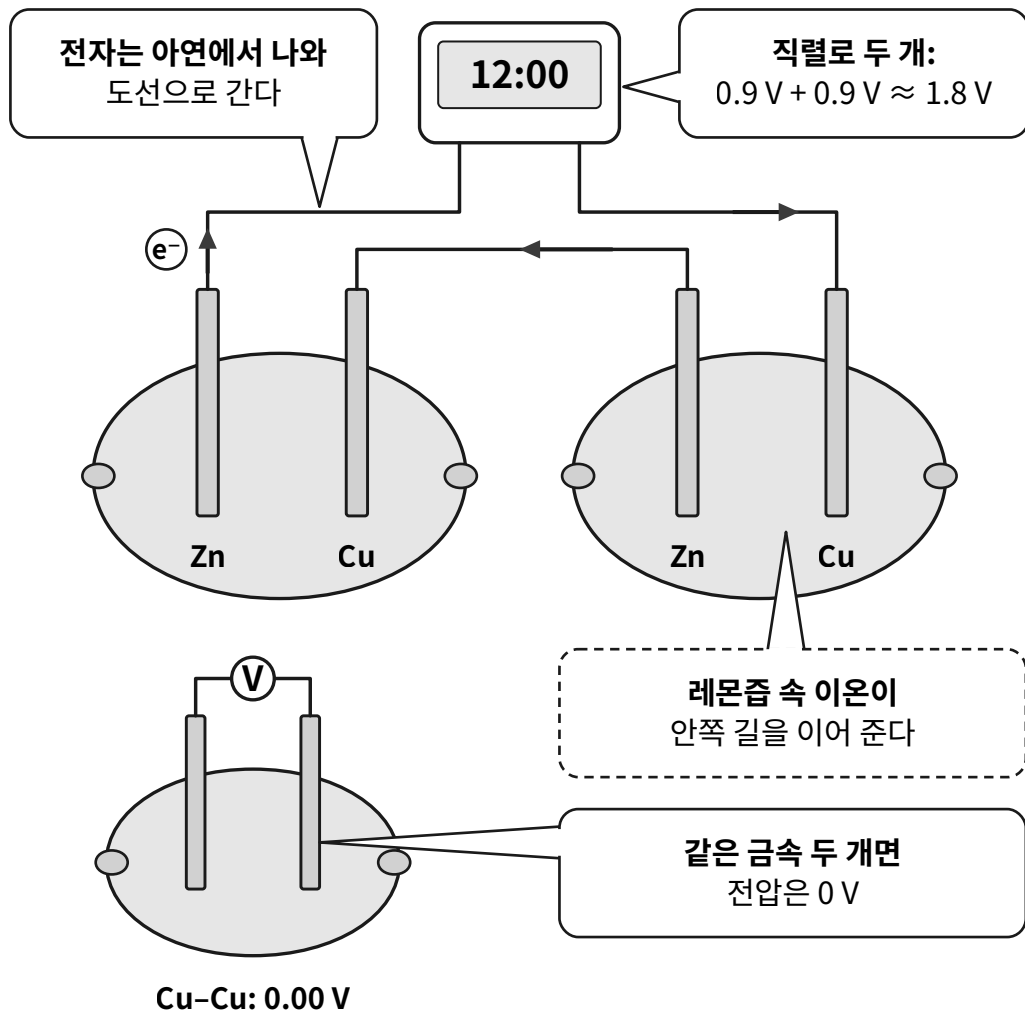
이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2024년) (214 쪽)	레몬 전지의 산화 전극과 환원 전극	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선)
기출 7 (연세대 2022년) (258 쪽)	아연과 은으로 화학 전지 고안하기	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선)
기출 9 (연세대 2019년) (274 쪽)	다니엘 전지의 질량·농도 변화와 염다리	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선)

레몬 전지로 켜는 디지털 시계

레몬 두 개 · 아연판 · 구리판 · 집게 전선



아연판(산화 전극): $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

구리판 표면(환원 전극): $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

구리는 반응하지 않고 전자를 건네는 자리가 된다

그림 3. 레몬 전지로 켜는 디지털 시계 — 아연판과 구리판을 꽂은 레몬 두 개를 직렬로 이어 시계를 켜다. 전자는 도선으로, 이온은 레몬즙 속으로 움직인다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 서로 다른 두 금속과 전해질, 도선이 있으면 전지가 된다.
2. 전자는 도선으로, 이온은 레몬즙 속으로 움직인다.
3. 레몬 하나는 약 0.9 V이고, 직렬로 이으면 전압이 더해진다.

이 장의 출발점

이 장은 다음 세 가지를 알면 읽을 수 있다. ① 전자를 잃는 것이 산화, 얻는 것이 환원이며 둘은 언제나 짝으로 일어난다(13권). ② 몰(mol)은 입자를 6.022×10^{23} 개씩 묶어 세는 단위이고, 원자량으로 질량과 몰을 바꾼다. ③ 물에 녹아 이온으로 나뉘는 물질(전해질)의 수용액은 전기가 통한다.

탁자 위의 레몬 두 개에는 아연판과 구리판이 하나씩 꽂혀 있었다. 석 교수가 집게 전선으로 레몬 하나의 아연판과 다른 레몬의 구리판을 잇고, 남은 두 금속판을 디지털 시계의 단자에 물리자 회색 화면에 숫자 12:00이 떠올랐다.

하린 와, 켈렸어요! 진짜 레몬으로 시계가 가요. 레몬에 전기가 들어 있었던 거예요?

석 교수 레몬 속에 전기가 저장되어 있던 건 아니다. 아연판의 아연 원자가 전자를 내놓고 이온이 되어 레몬즙으로 녹아 나가고, 그 전자가 도선을 타고 시계를 지나 구리판 쪽으로 간다. 구리판 표면에서는 레몬즙 속의 수소 이온이 그 전자를 받아 수소 기체가 되지. 전자를 내놓는 반응과 받는 반응이 따로 떨어진 두 곳에서 일어나고, 그 사이를 도선이 이어 주는 것, 그게 전지다.

태오 아연이 전자를 잃으니까 산화, 수소 이온이 전자를 얻으니까 환원이네요. 13권에서 한 산화·환원이 그대로 나와요.

석 교수 그래. 이 권은 13권의 산화·환원 반응을 “도선 위로 끌어내는” 이야기다. 전자가 한 원자에서 바로 옆 원자로 건너뛰면 열이 날 뿐이지만, 전자가 먼 길을 돌아가게 만들면 그 길 위에서 일을 시킬 수 있다.

1.1 전지는 어디에나 있다

이모 생각해 보니 집에 전지가 정말 많아요. 리모컨, 체중계, 자동차, 휴대 전화…. 다 같은 원리인가요?

석 교수 네, 모양과 재료는 달라도 모두 산화·환원 반응의 화학 에너지를 전기 에너지로 바꾸는 장치예요. 리모컨의 알칼리 전지는 아연과 이산화 망가니즈, 자동차 배터리는 납과 이산화 납, 휴대 전화는 리튬 이온이 흑연과 금속 산화물 사이를 오가는 반응을 써요. 심장 박동기에는 리튬과 아이오딘의 반응을 쓰는 전지가 들어가는데, 한 번 넣으면 여러 해를 갑니다.

하린 그럼 전지가 “화학”이예요? 저는 전지가 물리인 줄 알았어요.

석 교수 전류와 전압은 물리의 말이고, 그 전류를 만들어 내는 반응은 화학의 말이다. 이 권에서는 두 말을 함께 쓴다. 미리 단어 몇 개만 정리하자. 전류는 1초 동안 지나가는 전하의 양이고 단위는 암페어(A), 전하량의 단위는 쿨롬(C), $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 다. 전압은 전하 1 C이 지나가며 하는 일의 양이고 단위는 볼트(V), $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 이다.

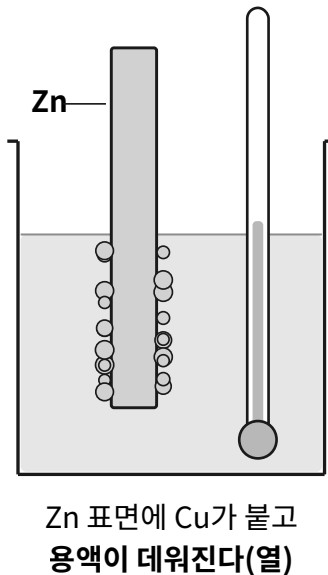
태오 그러면 전압 $\times$ 전하량 = 일이네요. 1.5 V 전지에서 1 C이 흘러 나오면 1.5 J의 일을 할 수 있다는 거고요.

석 교수 그 식, 전기 일 = 전압 $\times$ 전하량은 **기본개념편 제 7장** (76쪽)에서 자유 에너지를 계산할 때 다시 쓴다. 꼭 기억해 뒀.

1.2 같은 반응, 다른 길

석 교수 이제 오늘의 핵심 실험이다. **그림 4**의 왼쪽처럼 푸른 황산 구리(II) 수용액에 아연판을 그냥 담가 보자.

① 한 비커에서 직접



② 두 비커로 나누어(전지)

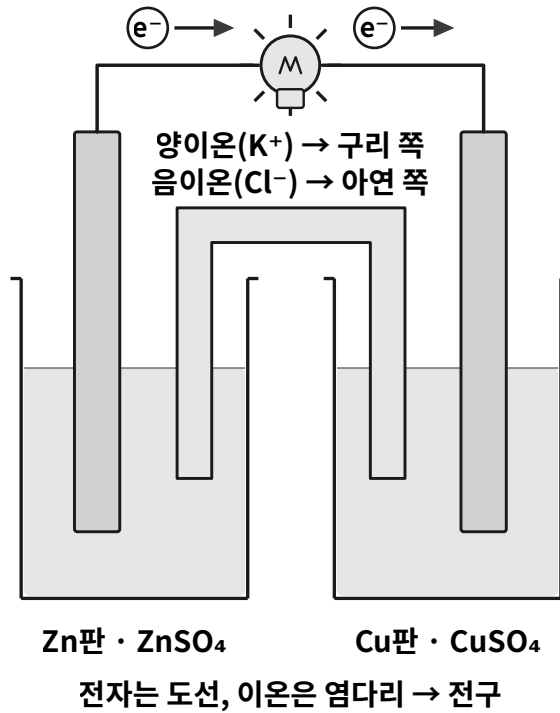
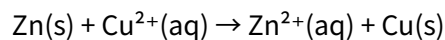


그림 4. 같은 반응 $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$ 를 두 가지 길로 일으킨다. 왼쪽은 한 비커에서 전자가 직접 건너가 열만 나고, 오른쪽은 두 비커를 도선과 염다리로 이어 전자가 도선을 돌아가며 전구를 켜다(모식도).

하린 아연판 표면이 붉은 갈색으로 변해요. 용액의 파란색도 조금씩 없어지고요.

석 교수 붉은 갈색 가루는 구리다. 용액의 구리(II) 이온 Cu^{2+} 가 아연 표면에 와서 전자 두 개를 받아 구리 원자가 되어 붙은 거야. 그 전자는 아연 원자가 내놓은 것이고, 아연은 Zn^{2+} 가 되어 용액으로 녹아 나간다.



태오 온도계 눈금도 올라가요. 열이 나는 반응이네요.

석 교수 이 반응은 아연 1 mol이 반응할 때 218.7 kJ의 열을 낸다. 표준 생성 엔탈피로 계산한 값이야. $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$ 가 -153.9 kJ/mol, $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ 가 +64.8 kJ/mol이고 금속은 0이니까, $\Delta H = (-153.9) - (+64.8) = -218.7$ kJ이다. 이렇게 한 비커에서 일어나면 전자는 아연 원자에서 바로 옆 구리 이온으로 0.3 nm쯤 건너뛰고 끝난다. 에너지는 전부 용액을 데우는 열이 되지.

이모 그 열도 에너지이긴 한데, 시계를 켤 수는 없겠네요.

석 교수 맞아요. 이제 오른쪽처럼 길을 나눠 봅시다. 아연판은 황산 아연 수용액에, 구리판은 황산 구리(II) 수용액에 따로 담가요. 두 금속판을 도선으로 잇고, 두 용액은 소금물을 머금은 관, 곧 염다리로 이어요. 그러면 아연 원자는 Cu^{2+} 를 직접 만날 수 없으니, 내놓은 전자를 도선으로 보낼 수밖에 없지요. 전자는 도선을 지나 구리판에 도착하고, 거기서 Cu^{2+} 가 그 전자를 받아요.

하린 반응은 똑같은데 전자가 지나가는 길만 길어졌네요. 그 길에 전구를 달면 불이 켜지고요.

석 교수 그게 화학 전지의 정의다. 산화·환원 반응의 산화 쪽과 환원 쪽을 공간적으로 떼어 놓고, 전자는 도선으로, 이온은 용액으로 다니게 해서 화학 에너지를 전기 에너지로 바꾸는 장치. 이 둘째 장치를 다니엘 전지라고 하고, **기본개념편 제 4장** (46쪽)에서 자세히 본다.

태오 그럼 218.7 kJ가 다 전기로 바뀌어요?

석 교수 좋은 질문이다. **그림 5**를 보자.

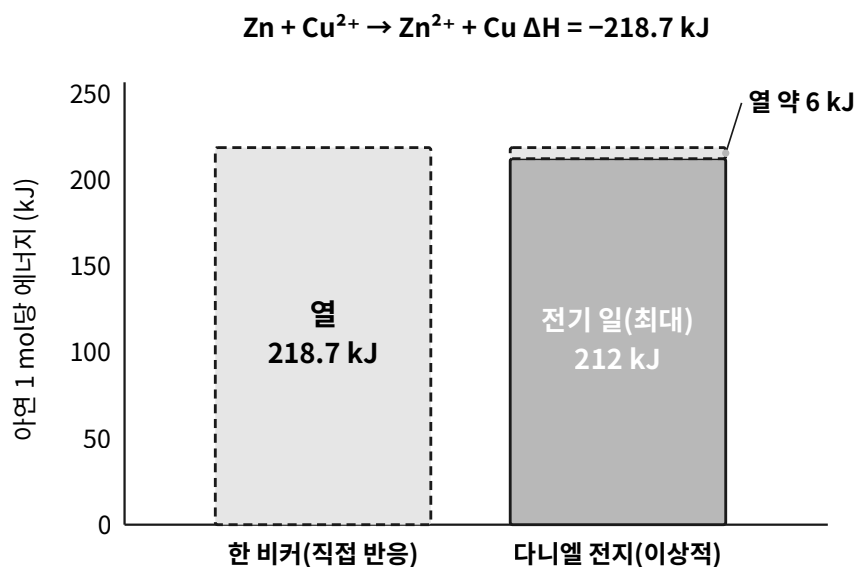


그림 5. 아연 1 mol이 Cu^{2+} 와 반응할 때의 에너지. 한 비커에서 직접 반응하면 218.7 kJ이 모두 열이 되고, 전지로 반응시키면 최대 212 kJ을 전기 일로 꺼낼 수 있다(표준 상태 계산값, 나머지 약 6 kJ은 반드시 열로 나간다).

석 교수 전지로 꺼낼 수 있는 전기 일의 최댓값은 212 kJ이다. 다니엘 전지의 표준 전압이 1.10 V이고, 아연 1 mol이 반응하면 전자 2 mol, 곧 $2 \times 96,485 \text{ C}$ 이 도선을 지나가니까 일 = $1.10 \text{ V} \times 2 \times 96,485 \text{ C} = 2.12 \times 10^5 \text{ J} = 212 \text{ kJ}$ 이야. 96,485는 전자 1 mol이 가진 전하량인데 **기본개념편 제 13장** (137쪽)에서 자세히 다룬다.

태오 더 정확히 $2 \times 96,485 \times 1.10 = 212.3 \text{ kJ}$ 이니까 $218.7 - 212.3 = 6.4 \text{ kJ}$ 이 남아요. 그 6 kJ쯤은 어디 가요?

석 교수 그만큼은 아무리 잘 만든 전지라도 열로 나간다. 반응하면서 이온들이 물 분자와 맺는 배열이 바뀌는 뉘인데, 이 이야기는 **기본개념편 제 7장** (76쪽)의 자유 에너지에서 다시 하자. 지금은 “전지로 반응시키면 같은 반응에서 대부분의 에너지를 일로 꺼낼 수 있다”는 것, 그리고 “전류를 많이 끌어 쓸수록 전지 안의 저항 때문에 열이 더 나서 실제 일은 이 최댓값보다 작다”는 것만 기억하자.

이모 난로에서 석탄을 태워 증기를 만들고 그걸로 발전기를 돌리는 것보다 낫겠네요?

석 교수 열을 거쳐 일을 얻는 열기관은 온도 차 때문에 효율에 한계가 있어서, 화력 발전소는 연료 에너지의 40 % 안팎만 전기로 바꿉니다. 전지는 열을 거치지 않고 화학 에너지를 바로 전기로 바꾸기 때문에 이론적으로 훨씬 높은 효율을 낼 수 있어요. **기본개념편 제 10장** (106쪽)의 연료 전지가 바로 이 장점을 노린 장치입니다.

1.3 전지의 세 부품

석 교수 이제 레몬 전지로 돌아가 부품을 하나씩 짚어 보자. 무엇무엇이 있었지?

하린 아연판, 구리판, 레몬, 그리고 전선이요.

석 교수 그 넷을 세 가지 역할로 묶을 수 있다. **표 4**을 보렴.

표 4. 전지의 세 부품 — 어느 전지든 전자가 다니는 길과 이온이 다니는 길이 함께 있어야 한다

부품	하는 일	레몬 전지에서는	다니엘 전지에서는
두 전극	산화(전자를 내놓음)와 환원(전자를 받음)이 일어나는 자리	아연판(산화), 구리판(환원 자리)	아연판(산화), 구리판(환원)
전해질	이온이 움직이는 길, 전극 반응의 재료 공급	레몬즙(구연산의 H^+ , 여러 이온)	$ZnSO_4 \cdot CuSO_4$ 수용액과 염다리(KCl)
도선	전자가 움직이는 길, 그 길 위에서 일을 함	집게 전선과 시계	도선과 전구

태오 전자의 길과 이온의 길이 따로 있다는 게 핵심이네요. 전자는 용액으로 못 다니나요?

석 교수 물속에서 전자는 혼자 돌아다니지 못한다. 그래서 용액 속에서 전하를 나르는 건 이온의 몫이야. 반대로 금속 도선 속에서는 이온이 움직이지 못하고 전자만 흐른다. 회로 한 바퀴를 돌면서 금속 구간은 전자가, 용액 구간은 이온이 전하를 나르고, 전극 표면에서 그 둘이 반응으로 바통을 넘겨준다. 회로 어디 하나가 끊기면 전류가 멈춘다.

전류의 방향과 전자의 방향은 반대다

전류의 방향은 전자가 발견되기 전에 “양전하가 흐르는 방향”으로 정해졌다. 그래서 도선 속에서 전류는 (+)극에서 (-)극으로 흐른다고 쓰지만, 실제로 움직이는 전자는 그 반대로 (-)극에서 (+)극으로 간다. 레몬 전지에서 전자는 아연판(-)에서 나와 시계를 지나 구리판(+)으로 가고, 전류는 구리판에서 아연판 쪽으로 흐른다고 말한다. 논술 답안에서는 “전자가 ○○에서 ○○로 이동한다”처럼 전자를 주어로 쓰면 헛갈리지 않는다.

하린 그럼 레몬 대신 설탕물을 쓰면요?

석 교수 설탕은 물에 녹아도 이온으로 나뉘지 않는 비전해질이다. 이온의 길이 없으니 전류가 거의 흐르지 않아. 레몬즙에는 구연산이 내놓은 H^+ 와 칼륨 같은 여러 이온이 있어서 길이 된다. 식초나 소금물로도 전지가 되는 이유다.

이모 아연판 대신 구리판을 두 개 꽂으면 어떻게 돼요?

석 교수 직접 해 봐요.

이모 (구리판 두 개를 꽂고 전압계를 대 보며) 0.00 V예요. 아무것도 안 나오네요.

석 교수 두 전극이 같으면 양쪽이 전자를 내놓으려는 경향도 같아서 전자가 한쪽으로 몰려갈 이유가 없어요. 전지가 되려면 서로 다른 두 금속, 정확히는 전자를 내놓으려는 경향이 서로 다른 두 전극이 필요합니다. 그 경향의 순위가 **기본개념편 제 2장** (26쪽)의 이온화 경향이고, 그 크기를 숫자로 낸 것이 **기본개념편 제 5장** (56쪽)의 표준 환원 전위예요.

태오 레몬 하나를 전압계에 대면 얼마예요?

석 교수 재 보렴.

태오 0.91 V요. 그런데 시계에는 1.5 V라고 쓰여 있어요. 아까는 두 개를 이어서 켜고요.

석 교수 그럼 문제로 정리하자.

문제 1.1

레몬 전지 하나의 전압은 0.90 V이고, 디지털 시계는 1.5 V 이상이 있어야 작동한다. 레몬 전지를 최소 몇 개, 어떻게 연결해야 하는가? 병렬로 연결하면 어떻게 되는가?

태오 $1.5 \div 0.90 = 1.67$ 이니까 두 개가 필요해요. 두 개를 이으면 $0.90 + 0.90 = 1.80$ V.

석 교수 어떻게 이었는지가 중요하다. 하린, 아까 내가 어떻게 이었지?

하린 첫 번째 레몬의 구리판을 두 번째 레몬의 아연판에 이으셨어요. 그리고 남은 아연판 하나와 구리판 하나를 시계에 물리셨고요.

석 교수 그렇게 서로 다른 극끼리 줄줄이 잇는 것을 직렬 연결이라고 한다. 첫 레몬에서 전압만큼 밀려 올라간 전자가 둘째 레몬에서 한 번 더 밀려 올라가니 전압이 더해진다. 같은 극끼리 나란히 묶는 병렬 연결은?

태오 병렬이면 전압은 0.90 V 그대로예요. 대신 두 레몬이 전류를 나눠 내니까 오래가거나 전류를 더 낼 수 있고요.

석 교수 정답은 **직렬로 최소 2개, 1.80 V**이고, 병렬은 0.90 V라서 시계가 켜지지 않는다. **그림 6**에 레몬 수에 따른 전압을 막대로 그렸다.

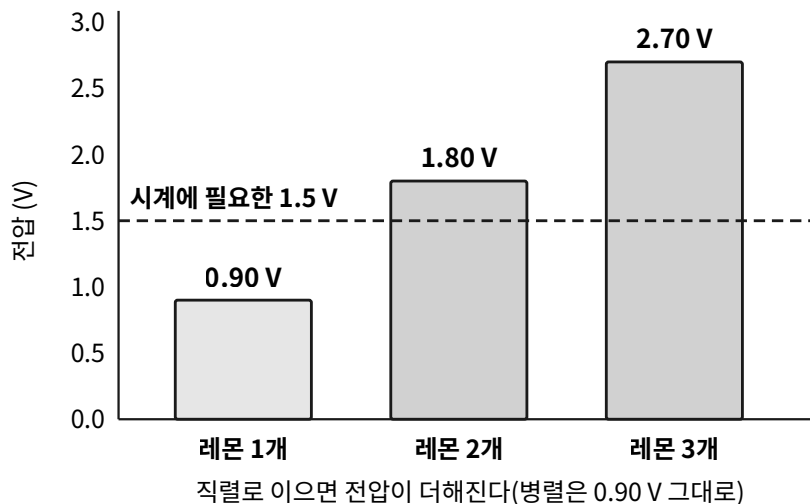


그림 6. 레몬 전지의 직렬 연결 수와 전압. 하나가 0.90 V일 때 1개, 2개, 3개를 직렬로 이으면 0.90, 1.80, 2.70 V가 된다. 점선은 디지털 시계가 필요한 1.5 V이다.

이모 그럼 레몬 열 개를 이으면 9 V니까 꼬마전구도 켤 수 있겠네요?

석 교수 전압은 넉넉하지만 전구는 잘 안 켜져요. 레몬 전지는 전자를 내놓는 속도, 곧 전류가 아주 작아서 1 mA 안팎밖에 못 냅니다. 금속판 면적이 작고 레몬즙 속 이온의 이동도 느리기 때문이지요. 디지털 시계는 아주 작은 전류로도 가니까 레몬으로 충분하지만, 수십 mA 이상이 드는 전구에는 모자라요. 전압과 전류는 다른 문제라는 것도 함께 기억해 두세요.

석 교수 이번엔 양을 세어 보자. 전지 안에서 녹아 나가는 아연의 양과 도선을 지나가는 전자의 양은 정확히 비례한다.

문제 1.2

레몬 전지의 아연판에서 아연 0.65 g이 모두 산화되었다($Zn = 65$). 이때 도선을 지나간 전자는 몇 mol이고, 전하량은 몇 C인가? (전자 1 mol의 전하량 = 96,485 C)

하린 아연 0.65 g을 65로 나누면 0.010 mol이에요.

태오 아연 원자 하나가 Zn^{2+} 가 되면서 전자 두 개를 내놓으니까, 전자는 $0.010 \times 2 = 0.020$ mol이에요. 전하량은 $0.020 \times 96,485 = 1,929.7$ C, 약 1.93×10^3 C.

석 교수 정답이다. **전자 0.020 mol, 1.93×10^3 C.** 반쪽 반응 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ 의 계수 1 : 2가 바로 “아연 몰수 : 전자 몰수”를 정해 준다. 이 1.93×10^3 C이 1 mA로 흐른다면 얼마나 걸릴까?

태오 1 mA = 0.001 A니까 $1,929.7 \div 0.001 = 1.93 \times 10^6$ s, 하루가 86,400 s니까 약 22일이요.

석 교수 레몬 하나에 꽂은 아연판이 시계를 3주 넘게 돌릴 만큼의 전자를 품고 있는 셈이다. 실제로는 그 전에 레몬이 마르거나 구리판 표면이 수소 거품으로 덮여 전압이 떨어지지만, 계산의 사슬 “질량 $\rightarrow$ 몰 $\rightarrow$ 전자 몰 $\rightarrow$ 전하량 $\rightarrow$ 시간”은 이 권 끝까지 계속 쓴다.

이모 그럼 전지가 “다 됐다”는 건 아연이 다 녹았다는 뜻이에요?

석 교수 경우에 따라 달라요. 아연이 먼저 다 떨어질 수도 있고, 전자를 받아 줄 쪽, 레몬이라면 수소 이온이 모자라질 수도 있어요. 둘 중 하나라도 떨어지면 반응이 멈추고 전압도 떨어집니다. 반응물 중 먼저 떨어지는 쪽이 전지의 수명을 정한다는 것, 곧 화학 반응식의 한계 반응물 이야기를 **기본개념편 제 6장** (66쪽)에서 숫자로 해 볼 거예요. **기본개념편 제 7장** (76쪽)에서는 반응물이 남아 있어도 반응이 평형에 이르면 전압이 0이 된다는 것까지 봅니다.

태오 같은 아연판이라도 레몬을 크게 하거나 판을 넓게 하면 전압이 올라가요?

석 교수 전압은 그대로다. 전압은 어떤 물질이 반응하느냐로 정해지고, 크기로는 정해지지 않아. 판을 넓히면 한꺼번에 반응할 수 있는 원자가 많아져 전류를 더 낼 수 있고, 아연을 많이 넣으면 더 오래간다. 전압은 “종류”, 전류와 수명은 “양”이라고 기억하렴.

1.4 거꾸로도 된다

이모 교수님, 전지는 반응이 저절로 일어나면서 전기를 만드는 거잖아요. 그럼 거꾸로 전기를 넣어서 반응을 일으킬 수도 있어요? 요즘 소금물로 소독수를 만드는 기계를 파는데, 그게 그런 건가요?

석 교수 정확히 그거예요. 소금물에 전극 두 개를 넣고 바깥 전원으로 전자를 한쪽 전극에 억지로 밀어 넣으면, 저절로는 일어나지 않는 반응이 일어나요. 염화 이온이 전자를 빼앗겨 염소가 되고, 다른 전극에서는 물이 전자를 받아 수소와 수산화 이온이 되지요. 이 염소와 수산화 이온이 만나 소독 성분인 차아염소산 이온이 생깁니다. 이렇게 전기 에너지로 비자발적인 산화·환원 반응을 일으키는 것을 **전기 분해**라고 해요. **기본개념편 제 11장** (116쪽)부터 다룹니다.

태오 휴대 전화를 충전하는 것도 그거예요?

석 교수 그렇다. 방전할 때 저절로 일어났던 반응을 충전기가 전자를 밀어 넣어서 거꾸로 돌리는 거지. 그래서 충전은 일종의 전기 분해다. 전지와 전기 분해는 같은 산화·환원 반응의 앞면과 뒷면이야.

하린 그럼 이 책에서는 어떤 순서로 배워요?

석 교수 먼저 전자를 잘 내놓는 금속과 못 내놓는 금속의 순서를 정하고(**기본개념편 제 2장** (26쪽)), 두 금속으로 볼타 전지와 다니엘 전지를 만든다(**기본개념편 제 3장** (36쪽), **기본개념편 제 4장** (46쪽)). 다음엔 전자를 내놓는 경향을 숫자로 잴 표준 환원 전위로 전지 전압을 계산하고(**기본개념편 제 5장** (56쪽), **기본개념편 제 6장** (66쪽)), 그 전압이 반응의 자발성·평형과 어떻게 이어지는지 본다(**기본개념편 제 7장** (76쪽), **기본개념편 제 8장** (85쪽)). 그리고 우리가 쓰는 실제 전지와 연료 전지를 본 뒤(**기본개념편 제 9장** (95쪽), **기본개념편 제 10장** (106쪽)), 반응을 거꾸로 돌리는 전기 분해와 패러데이 법칙(**기본개념편 제 11장** (116쪽)~**기본개념편 제 13장** (137쪽)), 도금·제련·부식(**기본개념편 제 14장** (147쪽))으로 끝난다.

산화 전극·환원 전극이라는 이름

교과서와 대학 시험에 따라 전지의 전극을 ‘(-)극·(+)극’, ‘양극·음극’, ‘산화 전극·환원 전극’ 등 여러 이름으로 부른다. 이 책은 반응을 기준으로 **전자를 내놓는 산화가 일어나는 전극 = 산화 전극**, **전자를 받는 환원이 일어나는 전극 = 환원 전극**으로 부른다. 화학 전지에서 산화 전극은 (-)극, 환원 전극은 (+)극이다. 전기 분해에서는 부호가 바뀌므로 **기본개념편 제 3장** (36쪽)과 **기본개념편 제 11장** (116쪽)에서 다시 정리한다.

핵심 화학 전지를 알아보는 4단계

1. 산화·환원 반응을 찾는다. 누가 전자를 내놓고(산화) 누가 받는가(환원)?
2. 산화가 일어나는 곳과 환원이 일어나는 곳이 떨어져 있는지 본다. 떨어져 있으면 전지, 한 곳에서 섞여 일어나면 열만 난다.
3. 세 부품을 짚는다. 두 전극(서로 달라야 한다), 전해질(이온의 길), 도선(전자의 길).
4. 양을 센다. 반쪽 반응의 계수로 “물질 몰수 → 전자 몰수 → 전하량($\times 96,485 \text{ C/mol}$)”을 잇는다. 전압은 직렬로 이으면 더해지고, 병렬로 이으면 그대로다.

스스로 풀어 보기

1. 같은 $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+}$ 반응을 한 비커에서 일으킬 때와 전지로 일으킬 때, 에너지가 어떻게 다르게 나타나는지 쓰라.
2. 레몬에 구리판 두 개를 꽂으면 전압이 0 V인 이유를 쓰라.
3. 레몬 전지에서 전자의 길과 이온의 길은 각각 무엇인가?

4. 90 V 레몬 전지 4개를 직렬로 이은 전압과, 2개씩 직렬로 묶은 것 두 묶음을 병렬로 이은 전압은 각각 얼마인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 2**(연세대 2024) (214쪽)는 자동차 점화 장치를 흉내 낸 실험 장면 속에서 레몬에 아연판과 구리판을 꽂은 전지를 제시하고, 어느 전극이 산화 전극인지와 각 전극의 반쪽 반응을 쓰게 한다. 오늘 본 “전자를 내놓는 쪽과 받는 쪽, 그리고 레몬즙 속에서 실제로 전자를 받는 것은 무엇인가”가 바로 그 문제의 출발점이다. **기출문제 8**(연세대 2020) (266쪽)는 에탄올과 수소의 연소열을 비교해 연료 1 g 당 에너지를 계산하고 수소 연료 전지의 장단점을 논하게 하는데, 화학 에너지를 열이 아니라 전기로 꺼낸다는 오늘의 생각이 그 논의의 바탕이 된다.

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.
- Swartling, D. J., & Morgan, C. (1998). Lemon cells revisited — The lemon-powered calculator. *Journal of Chemical Education*, 75(2), 181. <https://doi.org/10.1021/ed075p181>
- Daniell, J. F. (1836). On voltaic combinations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 126, 107–124. <https://doi.org/10.1098/rstl.1836.0012>

제 2장 산화·환원 다시 보기와 금속의 이온화 경향

새 개념 산화수 복습 · 금속의 이온화 경향 · 금속과 금속 이온의 반응

이어짐 산화·환원과 산화수 13권 · 볼타 전지 3장 · 표준 환원 전위 5장

이 장의 개념도

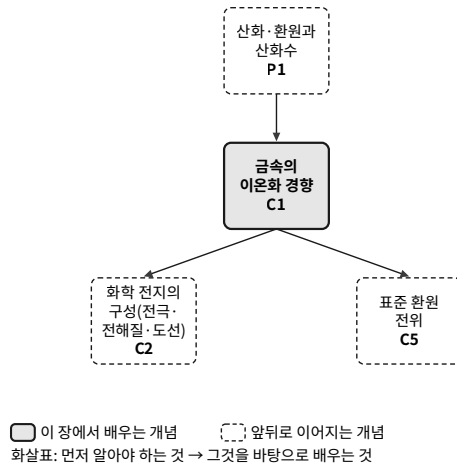


그림 7. 제 2장에서 배우는 개념(C1 금속의 이온화 경향)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2024년) (214쪽)	레몬 전지의 산화 전극과 환원 전극	C1 금속의 이온화 경향
기출 6 (연세대 2022년) (249쪽)	은 석출 뒤 다니엘 전지의 양적 관계	C1 금속의 이온화 경향
기출 7 (연세대 2022년) (258쪽)	아연과 은으로 화학 전지 고안하기	C1 금속의 이온화 경향
기출 12 (고려대 2011년) (302쪽)	황동광의 전해 정련과 직류 만들기	C1 금속의 이온화 경향
기출 13 (성균관대 2011년) (311쪽)	칼슘의 공기 산화와 전기 전도성	C1 금속의 이온화 경향

질산은 용액 속 구리선에 자라는 은 나무

하루쯤 두면 은빛 가지가 자라고 용액이 푸르게 변한다

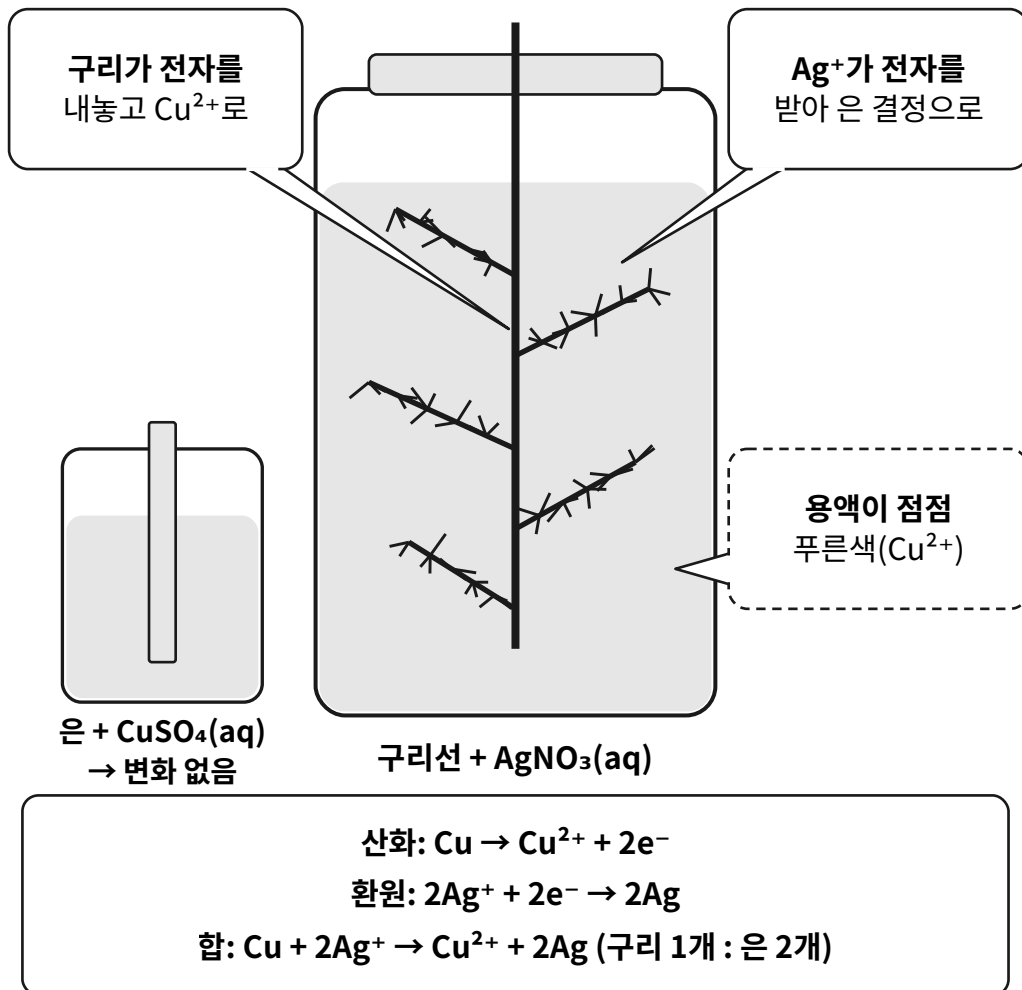


그림 8. 질산은 용액 속 구리선에 자라는 은 나무 — 구리선을 질산은 수용액에 넣으면 구리가 녹아 용액이 푸르게 변하고, 구리선 둘레에 반짝이는 은 결정이 가지처럼 자란다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 이온화 경향이 큰 구리가 이온화 경향이 작은 은의 이온에게 전자를 준다.
2. 구리 원자 1개가 녹을 때 은 원자 2개가 석출된다(전자 2개).
3. 용액이 푸르게 변하는 것은 Cu^{2+} 가 생기기 때문이다.

이 장의 출발점

13권에서 배운 세 가지를 쓴다. ① 산화수: 원자가 가진 전하를 장부처럼 적은 수(홀원소 0, 단원자 이온은 그 전하). ② 산화는 산화수 증가(전자를 잃음), 환원은 산화수 감소(전자를 얻음)이며, 잃은 전자 수 = 얻은 전자 수. ③ 산화제는 남을 산화시키고 자신은 환원되는 물질, 환원제는 그 반대.

둘째 토요일, 석 교수는 시험관 열두 개를 꽃은 시험관대를 탁자에 올려놓았다. 시험관마다 무색이거나 푸르거나 연한 녹색인 용액이 들어 있었고, 옆 접시에는 아연 조각, 철못, 구리선, 은박 조각이 놓여 있었다.

하린 오늘은 실험을 엄청 많이 하나 봐요. 시험관이 열두 개예요.

석 교수 지난주에 레몬에 구리판을 두 개 꽃았더니 0 V였지? 전지가 되려면 전자를 내놓으려는 경향이 서로 다른 두 금속이 필요하다고 했다. 오늘은 그 경향의 순서를 직접 정해 볼 거다. 그 전에 13권에서 배운 산화·환원을 5분만 다시 보자.

2.1 산화수 5분 복습

석 교수 아연 조각을 황산 구리(II) 수용액에 넣는 반응을 산화수로 적어 보렴.

태오 $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$. 아연은 0에서 +2로 산화수가 늘었으니 산화, 구리는 +2에서 0으로 줄었으니 환원이예요.

하린 황산 이온 SO_4^{2-} 는 반응식에서 빠졌어요?

석 교수 반응 전후에 아무 변화 없이 용액 속에 그대로 떠 있는 이온이라서 뺐다. 이런 이온을 구경꾼 이온이라고 하고, 구경꾼을 뺀 반응식을 알짜 이온 반응식이라고 한다. 전지와 전기 분해에서는 거의 언제나 알짜 이온 반응식으로 쓴다.

석 교수 그럼 이 반응에서 산화제와 환원제는?

태오 아연이 구리 이온을 환원시켰으니 아연이 환원제, 구리 이온이 아연을 산화시켰으니 Cu^{2+} 가 산화제예요. 환원제는 자기가 산화되고, 산화제는 자기가 환원돼요.

석 교수 하나 더. 나트륨 조각을 물에 넣으면 $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$ 가 일어난다. 무엇이 산화되고 무엇이 환원되었지?

하린 나트륨은 0에서 NaOH 속 +1로 올라갔으니 산화예요. 수소는 물에서 +1이었는데 H_2 에서 0이 됐으니 환원이고요. 산소는 -2 그대로예요.

석 교수 잘했다. 물 분자의 수소도 전자를 받을 수 있다는 것, 이게 **기본개념편 제 11장** (116쪽)의 전기 분해에서 “물이 대신 환원된다”는 이야기의 씨앗이다. 나트륨처럼 이온화 경향이 아주 큰 금속은 산이 없어도 물의 수소에게 전자를 준다.

석 교수 13권의 결론 하나만 덧붙이자. 산화와 환원은 따로 일어나지 않는다. 아연이 잃은 전자 2개를 구리 이온이 그대로 받는다. 이 “전자 수 맞추기”가 **기본개념편 제 3장** (36쪽)의 반쪽 반응에서 그대로 쓰인다.

반쪽 반응으로 나누어 보기

$\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$ 는 두 줄로 나눌 수 있다. 산화: $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ / 환원: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$. 두 줄을 더하면 전자 2e^- 가 양쪽에서 지워져 전체 반응식이 된다. 한 비커에서는 두 줄이 같은 자리에서 일어나고, 전지에서는 서로 다른 전극에서 일어난다.

2.2 금속을 이온 용액에 넣어 보자

- 석 교수** 이제 실험이다. 시험관 열두 개는 네 줄로 되어 있다. 첫 줄은 아연 조각, 둘째 줄은 철못, 셋째 줄은 구리선, 넷째 줄은 은박이고, 각 줄에 자기 이온을 뺀 나머지 세 가지 용액, 곧 황산 아연, 황산 철(II), 황산 구리(II), 질산 은 수용액이 들어 있어.
- 하린** 아연 줄부터 볼게요. 황산 철(II)에 넣은 아연 표면이 검게 변했어요. 황산 구리(II)에서는 붉은 갈색 가루가 붙었고, 질산 은에서는 회색 솜털 같은 게 붙었어요. 셋 다 반응했어요!
- 태오** 철못 줄은 황산 아연에서는 아무 변화가 없고, 황산 구리(II)에서는 붉게 변했고, 질산 은에서는 회색이 붙었어요.
- 이모** 구리선 줄은 황산 아연, 황산 철(II)에서는 그대로예요. 질산 은에 넣은 것만 은빛 털이 자라고 용액이 파래지네요.
- 하린** 은박 줄은 세 용액 모두 아무 변화가 없어요.
- 석 교수** 결과를 그림 9처럼 격자에 정리해 보자. 금속을 왼쪽에, 용액을 위쪽에 같은 순서로 놓으면 무늬가 보인다.

넣은 용액(금속 이온)					
넣은 금속		Zn^{2+}	Fe^{2+}	Cu^{2+}	Ag^+
Zn			반응 Fe 석출	반응 Cu 석출	반응 Ag 석출
Fe	변화 없음			반응 Cu 석출	반응 Ag 석출
Cu	변화 없음	변화 없음			반응 Ag 석출
Ag	변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음	

대각선 위 = 반응(넣은 금속이 녹는다), 아래 = 반응 없음
이온화 경향: $\text{Zn} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Ag}$

그림 9. 네 금속(Zn, Fe, Cu, Ag)을 네 가지 금속 이온 수용액에 넣은 결과. 색칠한 칸은 넣은 금속이 녹고 용액의 금속 이온이 석출된 경우, 빈칸은 변화가 없는 경우이다. 대각선 위쪽이 모두 반응하고 아래쪽은 모두 반응하지 않는다.

태오 대각선을 기준으로 위쪽 삼각형은 다 반응하고 아래쪽은 하나도 반응하지 않아요. 순서를 Zn, Fe, Cu, Ag로 놓으니까 깔끔하게 갈려요.

석 교수 그 순서가 바로 금속의 **이온화 경향**, 곧 금속이 전자를 잃고 양이온이 되려는 경향의 순서다. 아연은 철 이온, 구리 이온, 은 이온 모두에게 전자를 줄 수 있다. 은은 누구에게도 전자를 주지 못한다. 규칙은 하나야. **이온화 경향이 큰 금속은 그보다 작은 금속의 이온에게 전자를 주고 자신은 이온이 되어 녹는다. 거꾸로는 일어나지 않는다.**

하린 구리선을 황산 아연에 넣으면 왜 아무 일도 안 일어나요? 구리도 금속이잖아요.

석 교수 구리가 전자를 내주려는 경향보다 Zn^{2+} 가 전자를 받으려는 경향이 약하기 때문이야. 아연은 전자를 내놓으려는 경향이 커서, 아연 이온은 반대로 전자를 다시 받으려는 경향이 작다. 그래서 $Cu + Zn^{2+}$ 쪽으로는 반응이 가지 않아. 이 “내놓으려는 경향”과 “받으려는 경향”이 한 저울의 양쪽이라는 생각이 **기본개념편 제 5장 (56쪽)**의 표준 환원 전위로 이어진다.

표 6에 대표적인 반응을 정리했다.

표 6. 금속을 이온 수용액이나 묽은 산에 넣었을 때의 변화 — 이온화 경향이 큰 금속이 작은 금속의 이온(또는 H^+)에게 전자를 준다

금속	넣은 용액	변화	알짜 이온 반응식
Zn	$CuSO_4(aq)$	Zn이 녹고 붉은 Cu가 석출, 푸른색이 얼어짐	$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu$
Fe	$CuSO_4(aq)$	철못 표면이 붉게 변함	$Fe + Cu^{2+} \rightarrow Fe^{2+} + Cu$
Cu	$AgNO_3(aq)$	은 결정이 자라고 용액이 푸르게 변함	$Cu + 2Ag^+ \rightarrow Cu^{2+} + 2Ag$
Cu	$ZnSO_4(aq)$	변화 없음	반응하지 않음
Mg	$HCl(aq)$	기포(H_2)가 생기며 Mg이 녹음	$Mg + 2H^+ \rightarrow Mg^{2+} + H_2$
Cu	$HCl(aq)$	변화 없음	반응하지 않음

2.3 이온화 경향의 순서

태오 교과서에는 더 긴 순서가 있잖아요. “칼카나마알아철니주납수구수은백금”이요.

석 교수 그래. 하나씩 풀어 보자. 칼륨 K, 칼슘 Ca, 나트륨 Na, 마그네슘 Mg, 알루미늄 Al, 아연 Zn, 철 Fe, 니켈 Ni, 주석 Sn, 납 Pb, (수소 H), 구리 Cu, 수은 Hg, 은 Ag, 백금 Pt, 금 Au. 왼쪽으로 갈수록 이온이 되기 쉽고, 오른쪽으로 갈수록 금속 그대로 남으려 한다. **그림 10**의 계단에서 길이가 그 경향의 크기를 나타낸다.

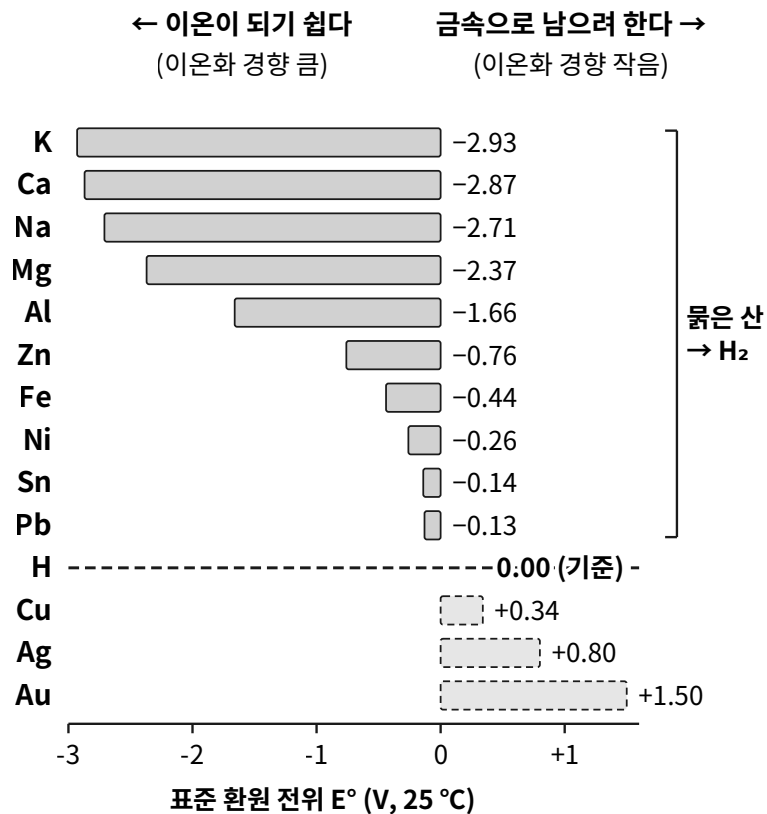


그림 10. 금속의 이온화 경향 계단. 막대의 길이는 표준 환원 전위의 크기로 정했다(왼쪽 아래로 길수록 전자를 내놓기 쉽다). 수소(0 V)를 기준선으로, 왼쪽 금속은 묽은 산에서 수소 기체를 내고 오른쪽 금속은 내지 않는다(25 °C 표준 값).

하린 금속 사이에 수소가 끼어 있어요. 수소는 금속이 아니잖아요?

석 교수 수소는 금속이 아니지만 H⁺라는 양이온을 만드니까 같은 줄에 세울 수 있다. 이 자리가 아주 쓸모 있다. 수소보다 왼쪽에 있는 금속은 묽은 염산이나 묽은 황산의 H⁺에게 전자를 주어 수소 기체를 낸다. 마그네슘 리본을 묽은 염산에 넣으면 거품이 나는 게 그거야. 수소보다 오른쪽에 있는 구리·은·금은 묽은 산에 넣어도 녹지 않는다.

태오 마그네슘 0.24 g을 묽은 염산에 다 녹이면 수소는 얼마나 나와요? $Mg + 2H^+ \rightarrow Mg^{2+} + H_2$ 니까 Mg 1 mol에 H₂ 1 mol이고, $0.24 \div 24 = 0.010$ mol이에요.

석 교수 25 °C, 1 atm이면 부피는?

태오 $V = nRT/P = 0.010 \times 0.0821 \times 298 \div 1 = 0.245$ L, 약 245 mL요. 손톱만 한 리본에서 컵 하나 분량의 기체가 나오네요.

석 교수 맞다. 이 계산은 **기본개념편 제 3장** (36쪽)의 볼타 전지에서 구리판에 생기는 수소 기체를 셀 때 그대로 다시 쓴다. 반응식의 계수가 “금속 몰수 : 수소 몰수”를 정하고, 기체 1 mol은 25 °C, 1 atm에서 24.5 L라는 것만 기억하면 된다.

이모 금반지가 땀이나 식초에 닿아도 변하지 않는 게 그래서군요. 은수저는 시간이 지나면 거뭇해지던데요?

석 교수 은은 산소와는 거의 반응하지 않지만 달걀이나 공기 속의 황 화합물과 만나면 검은 황화 은 Ag₂S를 만들어요. 그건 산의 H⁺와 반응한 게 아니라 다른 산화제와 반응한 거예요. 금은 그런 것과도 잘 반응하지 않아서 오래된 금불이가 반짝이지요.

태오 그런데 구리는 질산에는 녹는다고 들었어요. 구리가 수소보다 오른쪽인데요?

석 교수 좋은 질문이다. 질산에서 구리를 산화시키는 것은 H^+ 가 아니라 질산 이온 NO_3^- 야. 질산 이온의 질소(+5)가 전자를 받아 $NO(+2)$ 나 $NO_2(+4)$ 로 환원되면서 구리를 산화시킨다. 그래서 질산은 산화력이 있는 산이라고 따로 부른다. 이온화 경향 표로 판단하는 것은 “ H^+ 가 산화제일 때”뿐이라는 점을 기억하렴.

이온화 경향 순서를 쓸 때의 주의

① 이온화 경향은 수용액 속에서 금속이 양이온이 되려는 경향의 순서이다. 기체 원자에서 전자를 떼는 데 드는 에너지인 이온화 에너지의 순서와 다르다. 예를 들어 리튬은 이온화 에너지가 나트륨보다 크지만 수용액에서는 가장 이온이 되기 쉬운 금속 쪽에 속한다. 물 분자가 작은 Li^+ 를 아주 강하게 둘러싸 안정하게 만들기 때문이다. ② 알루미늄·납은 표면에 얇은 산화물 막이나 녹지 않는 염($PbSO_4$, $PbCl_2$)이 생기면 실제 반응이 느려진다. 순서는 “될 수 있느냐”를 말할 뿐, 얼마나 빨리 일어나느냐는 따로 따진다.

이모 금속마다 이온이 되려는 정도가 왜 이렇게 달라요? 다 같은 금속인데요.

석 교수 금속이 수용액 속 이온이 되는 길을 세 걸음으로 쪼개 보면 이해가 돼요. 첫째, 금속 덩어리에서 원자 하나를 떼어 내는 데 에너지가 들어요. 둘째, 그 원자에서 전자를 떼어 내는 데 또 에너지가 들고요. 셋째, 생긴 양이온을 물 분자들이 둘러싸면서 에너지가 나와요. 앞의 두 걸음이 쉽고 셋째 걸음에서 많이 나오는 금속일수록 이온이 되기 쉽지요. 칼륨이나 나트륨은 원자끼리 약하게 묶여 있고 전자 하나를 쉽게 내놓아서 맨 앞에 서요. 금은 원자끼리 단단히 묶여 있고 전자를 떼기도 어려워 맨 뒤에 서고요.

태오 그럼 이온화 경향은 금속 하나만의 성질이 아니라, 물속이라는 환경까지 포함한 성질이에요.

석 교수 바로 그거다. 그래서 물이 아닌 용매에서는 순서가 조금 달라질 수도 있다. 이 책은 언제나 25 °C의 수용액을 기준으로 한다.

하린 순서를 알면 전지를 만들 때 어떤 금속을 고를지도 알 수 있어요?

석 교수 그렇다. 지난주 레몬 전지에서 아연과 구리를 썼지. 이온화 경향이 큰 아연이 전자를 내놓는 쪽, 작은 구리가 전자를 받는 자리가 된다. 두 금속이 계단에서 멀리 떨어져 있을수록 전자가 더 세게 밀려가니 전압이 커진다. 마그네슘과 구리를 쓰면 아연과 구리보다 전압이 더 높게 나와. 거꾸로 철과 니켈처럼 가까이 붙어 있는 금속으로는 전압이 작은 전지밖에 못 만든다. 이 “얼마나 떨어져 있는가”를 볼트 단위의 숫자로 만든 것이 **기본개념편 제 5장** (56쪽)의 표준 환원 전위고, 두 숫자의 차로 전압을 계산하는 것이 **기본개념편 제 6장** (66쪽)이다.

이모 그럼 계단 그림의 막대 길이 차이가 곧 전압이에요?

석 교수 네, **그림 10**의 막대 길이는 실제로 표준 환원 전위 값으로 그렸어요. 아연 막대 끝(-0.76 V)과 구리 막대 끝(+0.34 V)의 차이 1.10 V가 다니엘 전지의 표준 전압입니다. 레몬 전지는 구리 이온 대신 레몬즙의 수소 이온이 전자를 받아서 이보다 작게 나와요. 그 이야기는 다음 장에서 하지요.

석 교수 이제 실험 결과만으로 순서를 추론하는 연습을 해 보자. 논술에서도 낯선 금속 A, B, C를 주고 자주 묻는다.

문제 2.1

금속 A를 B^{2+} 수용액에 넣으면 B가 석출되고, 금속 B를 C^{+} 수용액에 넣으면 C가 석출된다. 금속 C를 A^{2+} 수용액에 넣으면 아무 변화가 없다. A, B, C의 이온화 경향 순서를 쓰라.

하린 A가 B^{2+} 에게 전자를 줬으니 A가 B보다 이온화 경향이 커요. $A > B$.

태오 B가 C^{+} 에게 전자를 줬으니 $B > C$. 그러면 $A > B > C$ 예요.

석 교수 셋째 실험은 무슨 뜻이지?

태오 C가 A^{2+} 에게 전자를 못 줬으니 $C < A$. 앞의 결론과 맞아요. 검산용이네요.

석 교수 정답은 $A > B > C$. 셋째 실험은 앞의 두 결과와 모순이 없는지 확인하는 역할이다. 실제 시험에서는 이런 확인 실험이 “어긋나는 자료”로 들어 있어서 실험 조건의 오류를 찾게 하기도 하니, 결론을 낸 뒤 반드시 모든 자료와 맞춰 보자.

2.4 양적 관계 맞보기 — 은 나무

석 교수 이제 구리선과 질산 은으로 돌아가자. 그림 11를 보렴.

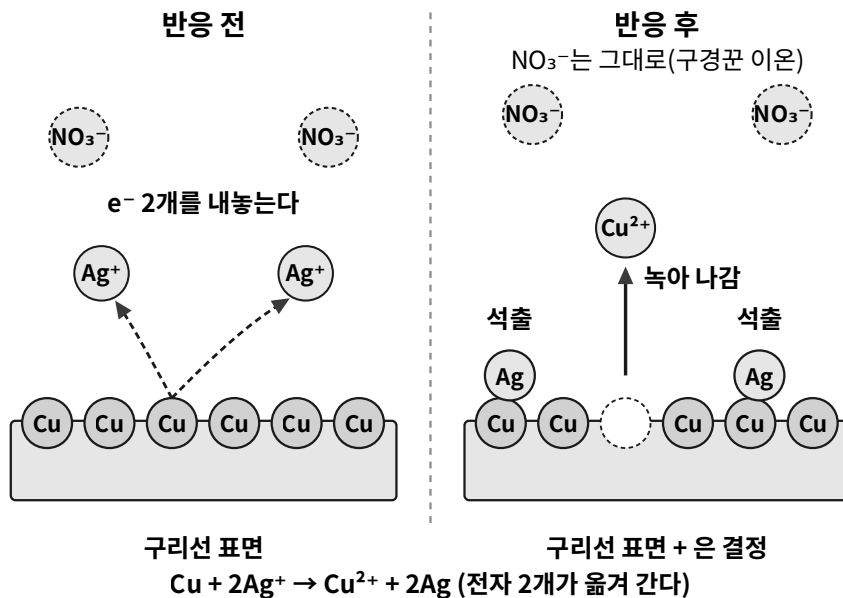
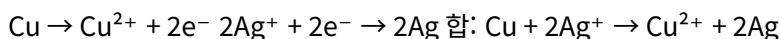


그림 11. 구리선 표면에서 일어나는 일(입자 모형). 구리 원자 1개가 전자 2개를 내놓고 Cu^{2+} 가 되어 녹아 나가면, 은 이온 2개가 그 전자를 하나씩 받아 은 원자가 되어 붙는다. 질산 이온은 구경꾼 이온이다.

하린 구리 원자 하나가 나갈 때 은 원자 둘이 붙어요. 왜 둘이예요?

석 교수 구리는 Cu^{2+} 가 되면서 전자 2개를 내놓고, 은 이온 Ag^{+} 는 전자를 1개만 받으면 은 원자가 되니까. 전자 수를 맞추려면 은 이온이 둘 필요하다. 반쪽 반응으로 쓰면 이렇다.



이모 그러면 구리선 무게는 줄고 은 무게는 늘겠네요. 전체 고체 무게는 어떻게 돼요?

석 교수 직접 계산해 보세요. 구리 1 mol(약 64 g)이 녹으면 은 2 mol(약 216 g)이 붙어요.

이모 64 g이 빠지고 216 g이 붙으니 고체가 152 g 늘어나네요. 은 나무가 무거워지는 거군요.

석 교수 맞아요. 이 계산이 4부의 **기출문제 6**(연세대 2022) (249쪽)에서 그대로 쓰여요. 숫자로 연습해 보지요.

문제 2.2

0.10 M 질산 은 수용액 100 mL에 구리선을 충분히 넣어 반응이 끝날 때까지 두었다. 석출된 은의 질량, 녹은 구리의 질량, 반응 후 용액 속 Cu^{2+} 의 농도를 구하라. ($\text{Ag} = 108$, $\text{Cu} = 64$, 용액 부피는 변하지 않는다고 가정한다.)

태오 Ag^+ 는 $0.10 \text{ M} \times 0.100 \text{ L} = 0.010 \text{ mol}$ 이에요. 구리가 충분하니까 Ag^+ 가 다 반응하고, 은도 0.010 mol 석출돼요. $0.010 \times 108 = 1.08 \text{ g}$.

하린 구리는 은의 절반이니까 0.0050 mol, $0.0050 \times 64 = 0.32 \text{ g}$ 이 녹았어요.

태오 Cu^{2+} 는 0.0050 mol이 0.100 L에 있으니까 0.050 M이요.

석 교수 셋 다 맞다. 은 1.08 g 석출, 구리 0.32 g 용해, $[\text{Cu}^{2+}] = 0.050 \text{ M}$. 원자량을 정밀값 $\text{Ag } 107.87$, $\text{Cu } 63.55$ 로 쓰면 1.079 g과 0.318 g이 된다. 시험에서는 문제에 주어진 원자량을 그대로 쓰면 된다.

태오 처음에 0.10 M이던 은 이온이 다 없어졌는데 구리 이온 농도는 0.050 M이네요. 양이온 몰수가 반으로 줄었어요. 그럼 전하가 안 맞는 거 아니에요?

석 교수 이온의 몰수 대신 전하의 몰수를 세어 보렴. Ag^+ 0.010 mol은 양전하 0.010 mol이고, Cu^{2+} 0.0050 mol은 양전하 $0.0050 \times 2 = 0.010 \text{ mol}$ 이야. 전하는 그대로다. 질산 이온 0.010 mol이 처음부터 끝까지 그 음전하를 맞춰 주고 있지. 전하 보존 감각은 **기본개념편 제 4장** (46쪽)의 염다리에서 아주 중요해진다.

이모 반응이 끝난 걸 눈으로 어떻게 알아요? 은이 더 안 자라면 끝난 건가요?

석 교수 은 결정이 더 이상 자라지 않고, 용액의 파란색이 더 짙어지지 않으면 끝난 거예요. 확실히 하려면 용액을 조금 덜어 소금물을 떨어뜨려 보면 돼요. Ag^+ 가 남아 있으면 흰 앙금 AgCl 이 생기고, 다 없어졌으면 맑게 남지요. 반응이 끝났는지를 확인하는 실험을 하나 더 넣는 습관은 논술 답안에서도 점수가 됩니다.

핵심 금속과 금속 이온의 반응 판단 4단계

1. 알짜 이온 반응식으로 쓴다(구경꾼 이온 SO_4^{2-} , NO_3^- 등은 뺀다).
2. 넣은 금속이 용액 속 금속 이온보다 이온화 경향이 크면 반응한다($\text{K} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Ni} > \text{Sn} > \text{Pb} > (\text{H}) > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Ag} > \text{Pt} > \text{Au}$). 수소보다 큰 금속은 묽은 산의 H^+ 와 반응해 H_2 를 낸다.
3. 반쪽 반응으로 나누어 전자 수를 맞춘다($\text{Cu } 1\text{개} \leftrightarrow \text{Ag}^+ 2\text{개}$).
4. 계수비로 몰수를 구하고 질량·농도로 바꾼 뒤, 전하의 총량이 보존되는지 검사한다.

스스로 풀어 보기

1. 철못을 질산 은 수용액에 넣을 때와 황산 아연 수용액에 넣을 때 각각 반응이 일어나는지 판단하고, 일어나면 알짜 이온 반응식을 쓰라(철은 Fe^{2+} 가 된다).
2. 니켈은 묽은 염산과 반응하여 수소 기체를 내는가? 이온화 경향 순서로 설명하라.
3. 아연 6.5 g을 충분한 양의 황산 구리(II) 수용액에 넣어 모두 반응시켰다. 석출되는 구리의 질량과 고체 질량의 변화를 구하라($\text{Zn} = 65$, $\text{Cu} = 64$).
4. 구리는 묽은 염산에는 녹지 않지만 묽은 질산에는 녹는다. 그 까닭을 산화제가 무엇인지로 설명하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 6**(연세대 2022) (249쪽)은 질산 은 수용액에 구리를 넣어 생긴 Cu^{2+} 용액을 다니엘 전지의 구리 쪽에 쓰는 문제인데, 오늘 계산한 “ $\text{Ag}^+ 2 \text{ mol} : \text{Cu}^{2+} 1 \text{ mol}$ ”을 놓치면 남은 아연의 양이 두 배로 틀린다. **기출문제 12**(고려대 2011) (302쪽)는 황동광에서 구리를 전해 정련할 때 구리보다 이온화 경향이 큰 금속은 이온으로 용액에 남고 작은 금속은 가라앉는 장치를 다루고, **기출문제 1**(연세대 2025) (204쪽)은 표준 환원 전위 표에 Li, K, Na, Al, Zn, Cu, Ag를 나란히 주고 염다리에 은 염을 쓰면 안 되는 이유를 묻는다. 셋 모두 “누가 누구에게 전자를 줄 수 있는가”를 먼저 판단하는 데서 시작한다. 답안의 첫 문장을 “이온화 경향이 $\text{OO} > \text{OO}$ 이므로 OO 이 전자를 잃어 산화되고 OO 이온이 전자를 얻어 환원된다”로 쓰는 습관을 들이면, 그 뒤의 반응식과 계산은 그 문장을 따라 저절로 이어진다.

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.

Carmody, W. R., & Wiersma, J. H. (1967). A study of the silver tree experiment. Journal of Chemical Education, 44(7), 417. <https://doi.org/10.1021/ed044p417>

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). Chemistry of the elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

제 3장 볼타 전지: 두 금속과 도선 하나

새 개념 산화 전극(-극)과 환원 전극(+극) · 반쪽 반응 · 전지 반응식 · 볼타 전지의 분극

이어집 이온화 경향 2장 · 다니엘 전지 4장 · 표준 환원 전위 5장

이 장의 개념도

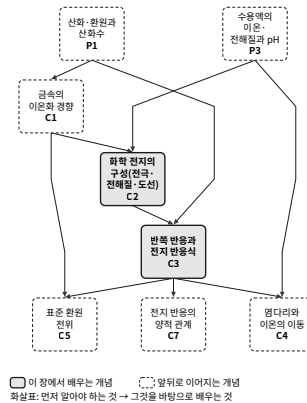


그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C2 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선), C3 반쪽 반응과 전지 반응식)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 1 (연세대 2025년) (204 쪽)	염다리의 염 고르기와 알칼리 전지	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 2 (연세대 2024년) (214 쪽)	레몬 전지의 산화 전극과 환원 전극	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선); (C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 3 (연세대 2024년) (222 쪽)	구리와 황산, 연료 전지, 소금의 전기 분해	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 5 (연세대 2023년) (241 쪽)	납축전지의 전극 반응과 전체 반응	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 6 (연세대 2022년) (249 쪽)	은 석출 뒤 다니엘 전지의 양적 관계	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 7 (연세대 2022년) (258 쪽)	아연과 은으로 화학 전지 고안하기	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선); (C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 9 (연세대 2019년) (274 쪽)	다니엘 전지의 질량·농도 변화와 염다리	(C2) 화학 전지의 구성(전극·전해질·도선); (C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 10 (성균관대 2016년) (282쪽)	Fe-Ag 전지와 패러데이 법칙, 전극을 바꾸면	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 11 (부산대 2015년) (292쪽)	표준 전지 전위의 조합과 전기 분해량	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식
기출 15 (서울시립대 2009년) (330쪽)	반쪽 반응·최대 기전력·용매에 따른 전지	(C3) 반쪽 반응과 전지 반응식

은박지를 깨물면 찌릿한 까닭

알루미늄 호일 · 금속 충전재(아말감) · 침

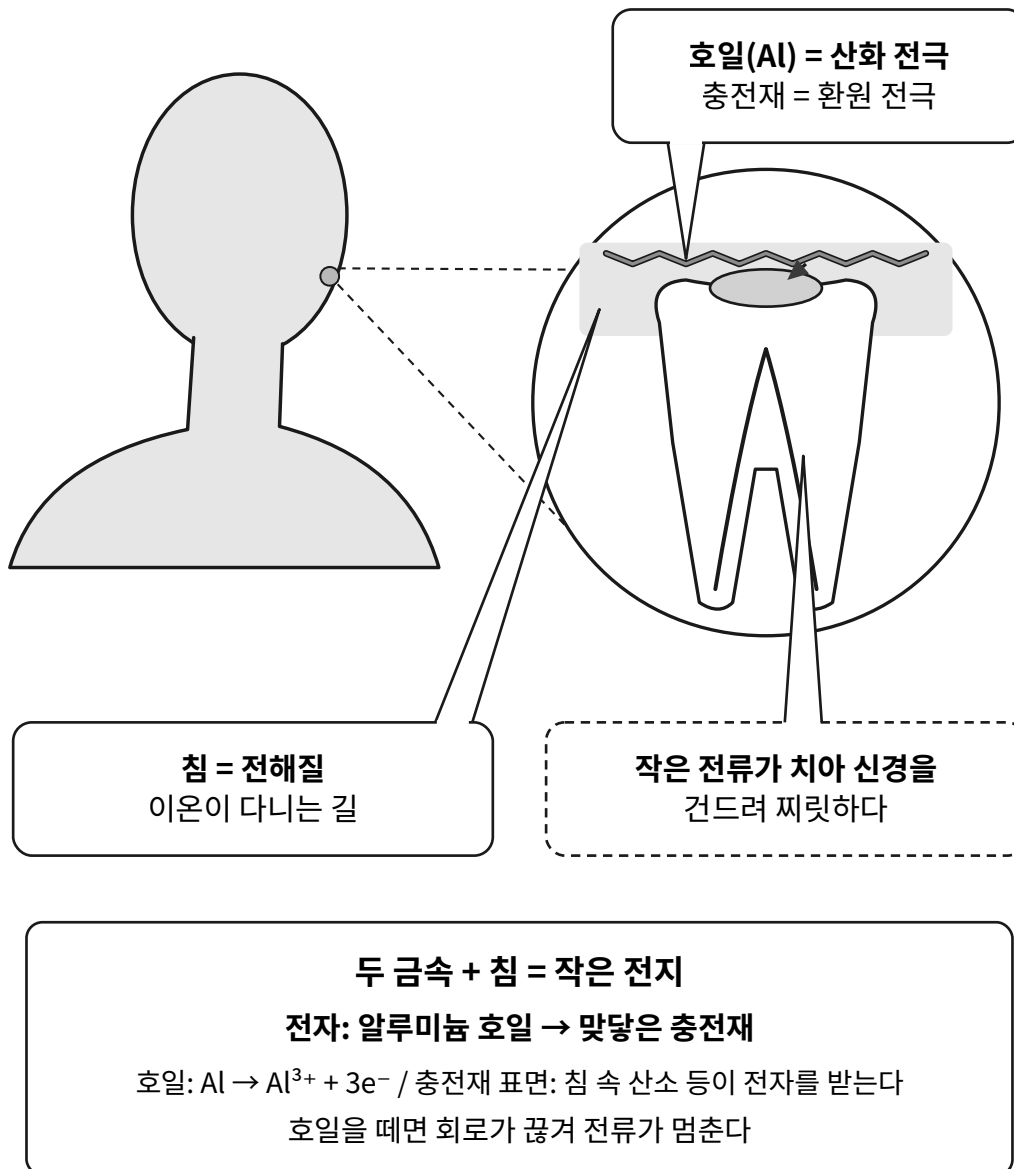


그림 13. 은박지를 깨물면 찌릿한 까닭 — 치아의 금속 충전재와 알루미늄 호일이 침을 사이에 두고 만나면 작은 전지가 되어, 흐르는 전류가 치아 신경을 자극한다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 서로 다른 금속 두 개가 침이라는 전해질에 닿으면 작은 전지가 된다.
2. 이온화 경향이 큰 알루미늄 쪽에서 전자가 나온다.
3. 찌릿함은 그 전류가 치아 신경을 자극하기 때문이다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (16쪽)의 전지의 세 부품(두 전극·전해질·도선)과 **기본개념편 제 2장** (26쪽)의 이온화 경향 순서($\text{Zn} > \text{Fe} > \dots > (\text{H}) > \text{Cu} > \text{Ag}$)를 쓴다. 묶은 황산은 물에 H^+ 와 SO_4^{2-} 가 녹아 있는 용액이고, 기체의 부피는 $PV = nRT$ ($R = 0.0821 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)로 구한다.

셋째 토요일, 이모가 김밥을 싸 왔다. 하린이 은박지를 벗기다가 실수로 은박지 귀퉁이를 함께 깨물고는 얼굴을 찡그렸다.

하린 앗, 이가 찌릿해요! 어금니에 충전한 데가 있는데, 거기가 전기 오른 것처럼 아파요.

석 교수 방금 하린이 입안에서 전지를 하나 만든 거다. 은박지라고 부르지만 사실은 알루미늄 호일이고, 어금니의 은색 충전재는 수은에 은·주석·구리를 섞어 굳힌 합금, 곧 아말감이야. 서로 다른 두 금속이 침이라는 전해질을 사이에 두고 닿았으니, 지난주에 본 조건이 다 갖춰진 거지.

태오 알루미늄이 이온화 경향이 더 크니까 알루미늄이 전자를 내놓고, 그 전자가 충전재 쪽으로 흘러가요. 그 전류가 신경을 건드린 거고요.

이모 그럼 그 짧은 순간에 충전재가 상하거나 녹지는 않나요? 걱정되네요.

석 교수 이 전지에서 녹는 쪽은 이온화 경향이 큰 알루미늄 호일이에요. 충전재는 전자를 받는 환원 전극이라 오히려 보호받는 쪽이지요. 그리고 호일을 입에서 떼는 순간 회로가 끊겨 전류도 멈춥니다. 다만 입안에 서로 다른 금속 보철물이 늘 맞닿아 있으면 이런 작은 전류가 계속 흐를 수 있어서, 치과에서는 금속 종류를 맞추어 쓰려고 신경을 써요.

석 교수 정확하다. 오늘은 이렇게 두 금속을 한 전해질에 꽂아 만든 가장 오래된 전지, 볼타 전지를 본다. 그리고 전지 문제를 풀 때 쓰는 말, 산화 전극·환원 전극·반쪽 반응을 정리하자.

3.1 볼타의 전퇴

석 교수 1800년, 이탈리아의 볼타는 아연 원판과 은(또는 구리) 원판 사이에 소금물을 적신 천을 끼워 여러 층으로 쌓아 올렸다. 위아래 끝을 손으로 만지면 찌릿한 충격이 계속 느껴졌지. 쌓아 올린 더미라서 전퇴(電堆)라고 불러. 사람이 처음으로 끊이지 않는 전류를 얻은 순간이다.

태오 볼타는 그걸 어떻게 생각해 냈어요?

석 교수 그보다 앞서 갈바니라는 해부학자가 개구리 다리를 구리 갈고리에 걸어 철 난간에 매달았더니 다리가 움찔거리는 걸 보았다. 갈바니는 그게 개구리 몸속의 “동물 전기” 때문이라고 생각했지. 볼타는 생각이 달랐어. 전기를 만든 것은 개구리가 아니라 서로 다른 두 금속이고, 개구리의 축축한 몸은 그 사이를 이어 준 젖은 길일 뿐이라고 보았다. 그걸 증명하려고 개구리 대신 소금물 적신 천을 넣은 게 전퇴다.

하린 개구리 다리가 오늘 제 이랑 똑같네요. 두 금속 사이에 젖은 게 끼어 있고, 신경이 찌릿한 거요.

석 교수 그래. 하린의 어금니는 이백몇십 년 전 갈바니의 개구리 다리와 같은 실험을 한 셈이다.

이모 그 전에는 전기가 없었어요?

석 교수 마찰로 모은 정전기는 있었어요. 하지만 그건 한 번 번쩍하고 끝나지요. 볼타의 전위는 반응물이 남아 있는 동안 계속 전류를 냈어요. 이 전위 덕분에 몇 년 뒤 데이비는 전기 분해로 칼륨과 나트륨을 처음 얻었고, 전압의 단위 볼트(V)도 볼타의 이름에서 왔습니다.

하린 층을 여러 개 쌓은 건 레몬을 여러 개 이은 거랑 같아요?

석 교수 같다. 한 층이 한 칸의 전지이고, 층을 쌓는 것이 직렬 연결이다. 층이 많을수록 전압이 커졌지. 오늘은 그중 한 칸만 떼어서 **그림 14**처럼 비커 하나로 만들어 보자.

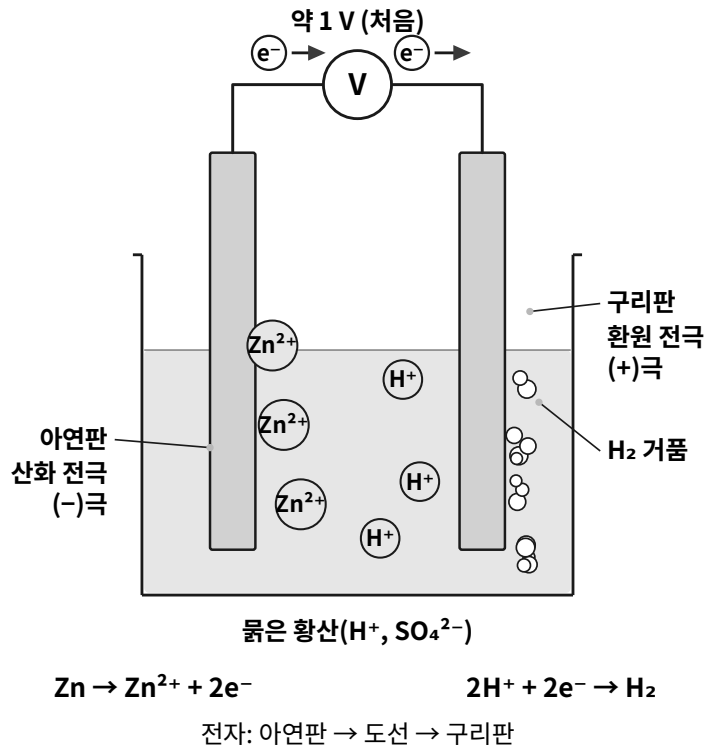


그림 14. 볼타 전지. 묽은 황산에 아연판과 구리판을 꽂고 도선으로 잇는다. 아연이 산화되어 Zn^{2+} 로 녹고, 전자는 도선을 따라 구리판으로 가서 구리판 표면에서 H^+ 를 H_2 로 환원시킨다(모식도).

3.2 산화 전극과 환원 전극

석 교수 묽은 황산에 아연판과 구리판을 꽂고 도선으로 이었다. 전압계를 대면 처음에 약 1 V가 나온다. 어느 판에서 무슨 일이 일어날까?

태오 아연이 이온화 경향이 크니까 아연판에서 아연이 Zn^{2+} 가 되어 녹아요. $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$.

하린 그럼 구리판에서는 Cu^{2+} 가 전자를 받아 구리가 돼요? $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$.

석 교수 거기가 첫째 함정이다. 용액에 구리 이온이 있었니?

하린 아, 묽은 황산이니까 H^+ 랑 SO_4^{2-} 밖에 없어요. Cu^{2+} 는 처음부터 없어요.

석 교수 그러니 구리판에 온 전자를 받을 수 있는 건 H^+ 뿐이다. 구리판 표면에서 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 가 일어나 수소 거품이 생긴다. 구리판은 전자를 건네주는 자리일 뿐 자신은 변하지 않아. 실제로 실험하면 거품은 구리판에서 올라온다.

태오 구리판이 반응을 안 하면 구리 대신 다른 금속을 써도 돼요?

석 교수 아연보다 이온화 경향이 작고 전기가 잘 통하는 물질이면 된다. 백금이나 흑연 막대를 써도 비슷한 전지가 된다. 이렇게 자신은 반응하지 않고 전자를 주고받는 자리만 내주는 전극을 비활성 전극이라고 해.

석 교수 이제 이름을 붙이자. 산화가 일어나는 전극을 **산화 전극**, 환원이 일어나는 전극을 **환원 전극**이라 한다. 볼타 전지에서는 아연판이 산화 전극, 구리판이 환원 전극이다. 전자는 산화 전극에서 나와 도선을 지나 환원 전극으로 간다. 전자가 나오는 쪽은 전자가 남아도는 쪽이니 (-)극, 전자가 들어가는 쪽은 (+)극이다.

이모 교과서마다 이름이 다르다고 하셨잖아요. 우리 애 학원 교재에는 “음극”, “양극”이라고 쓰여 있던데요.

석 교수 그게 둘째 함정이예요. 표 8을 보세요.

표 8. 전극 이름 정리 — 산화 전극·환원 전극은 언제나 반응으로 정하고, (+)·(-) 부호는 전지와 전기 분해에서 서로 바뀐다

장치	산화가 일어나는 전극	환원이 일어나는 전극	전자가 도는 방향
화학 전지(볼타·다니엘)	산화 전극 = (-)극	환원 전극 = (+)극	산화 전극 → 도선 → 환원 전극
전기 분해	산화 전극 = 전원의 (+)극에 연결	환원 전극 = 전원의 (-)극에 연결	전원 (-)극 → 환원 전극, 산화 전극 → 전원 (+)극
영어 이름	anode(애노드)	cathode(캐소드)	장치와 관계없이 반응으로 정함

석 교수 영어의 anode는 언제나 산화가 일어나는 전극이에요. 그런데 화학 전지에서 anode는 (-)극이고, 전기 분해에서 anode는 전원의 (+)극에 연결되지요. 그래서 anode를 “양극”으로 옮기면 전지에서 헷갈리고, “음극”으로 옮기면 전기 분해에서 헷갈려요. 이 책은 언제나 반응으로 정하는 이름, 산화 전극과 환원 전극을 씁니다.

태오 그럼 시험에서 “양극”이라고 쓰여 있으면 어떻게 해요?

석 교수 문제가 그 말을 어떤 뜻으로 쓰는지 먼저 확인하고, 답안에는 “아연판(산화 전극, (-)극)”처럼 두 이름을 함께 쓰면 오해가 없다. 기출 중에도 납축전지의 두 판을 “양극에 납 판과 이산화 납 판”처럼 부른 문제가 있다. **기본개념편 제 9장** (95쪽)에서 다시 보자.

전극 부호와 이온의 움직임

“(-)극이니까 양이온이 몰려간다”는 생각은 화학 전지에서 틀리기 쉽다. 전지 안 용액에서 이온의 움직임을 정하는 것은 전극 부호가 아니라 전극 반응이다. 산화 전극 주변에서는 양이온(Zn^{2+})이 새로 생기고, 환원 전극 주변에서는 양이온(H^+ , Cu^{2+})이 사라진다. 그래서 용액 속 양이온은 환원 전극 쪽으로, 음이온은 산화 전극 쪽으로 이동한다. **기본개념편 제 4장** (46쪽)의 염다리에서 이 규칙을 다시 쓴다.

하린 볼타 전지는 비커가 하나니까 이온들이 그냥 섞여 있잖아요. 그래도 이온이 움직여요?

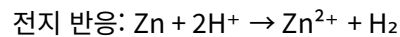
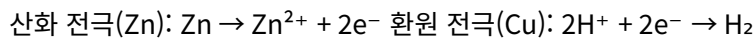
석 교수 움직인다. 아연판 둘레에는 Zn^{2+} 가 계속 새로 생겨 양전하가 남아돌고, 구리판 둘레에서는 H^+ 가 계속 없어져 양전하가 모자라게 된다. 그 차이를 메우려고 용액 속 양이온(H^+ , Zn^{2+})은 구리판 쪽으로 조금씩 밀려가고, 음이온 SO_4^{2-} 는 아연판 쪽으로 끌려간다. 용액 안의 이 느린 이온의 흐름과 도선 속 전자의 흐름이 이어져서 회로 한 바퀴가 완성되는 거야.

태오 그럼 전지 전체로 보면 전하는 어디에도 쌓이지 않네요. 도선으로 나간 음전하만큼 용액 속에서 음이온이 아연 쪽으로 오니까요.

석 교수 그렇다. 전지는 전하를 만들어 내는 장치가 아니라 전하를 한 바퀴 돌리는 펌프다. 이 “어디에도 전하가 쌓이지 않는다”는 원리가 다음 장에서 염다리가 왜 꼭 필요한지를 설명해 준다.

3.3 반쪽 반응을 더해 전지 반응식 만들기

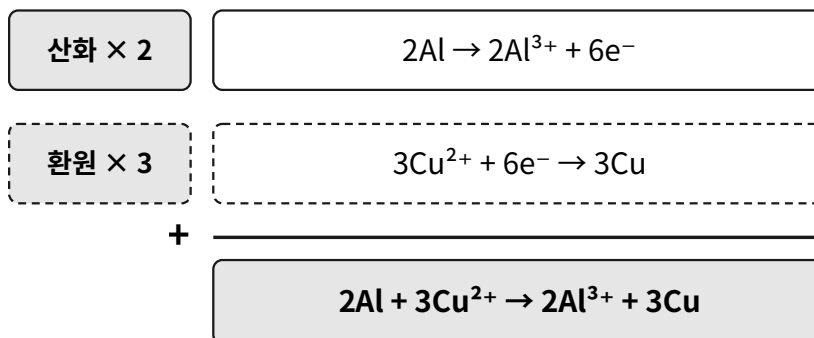
석 교수 볼타 전지의 두 반응을 나란히 쓰자. 산화 전극의 반응과 환원 전극의 반응을 따로 쓴 것을 **반쪽 반응**이라고 한다. 두 반쪽 반응을 더하면 전지 전체에서 일어나는 반응, 곧 전지 반응식이 된다.



하린 전자가 양쪽에 2개씩 있으니까 더하면 지워지네요.

석 교수 늘 그렇게 되도록 계수를 맞춰야 한다. 전자는 도선 속을 지나갈 뿐, 반응이 끝난 뒤 어디에도 쌓이지 않아. 산화 전극이 내놓은 전자 수와 환원 전극이 받은 전자 수가 같아야 한다. **그림 15**는 전자 수가 서로 다른 경우를 맞추는 방법이다.

전자 수를 최소 공배수(6)로 맞춘다



양쪽의 6e⁻가 지워진다 → 전체 반응식에는 전자가 없다

검산: 전하 $3 \times (+2) = 2 \times (+3) = +6$, 원자 Al 2 · Cu 3
(전압은 곱하지 않는다 — 6장)

그림 15. 반쪽 반응을 더해 전지 반응식을 만드는 방법(알루미늄-구리 전지). 산화 반쪽(전자 3개)에 2를, 환원 반쪽(전자 2개)에 3을 곱해 전자를 6개로 맞춘 뒤 더하면 전자가 지워진다.

석 교수 전지를 매번 그림으로 그리기 번거로우니 한 줄로 적는 약속도 있다. 왼쪽에 산화 전극, 오른쪽에 환원 전극을 쓰고, 고체와 용액처럼 상이 바뀌는 경계는 세로선 하나로 나눈다. 볼타 전지는 이렇게 쓴다.



태오 다니엘 전지처럼 용액이 둘이면요?

석 교수 두 용액 사이에 염다리가 있으면 세로선 두 개(||)로 표시한다. $\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) \parallel \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) \mid \text{Cu}$ 처럼. 이 표기만 보고도 “왼쪽 아연이 산화, 오른쪽에서 Cu^{2+} 가 환원, 전자는 왼쪽에서 오른쪽으로”를 읽어 낼 수 있어야 한다. 기출 문제의 제시문이 이 표기로 전지를 주는 일이 많다.

이모 왼쪽, 오른쪽을 바꿔 쓰면 틀린 거예요?

석 교수 약속을 어긴 거라 감점될 수 있어요. 산화 전극이 왼쪽이라는 약속을 지키면, 오른쪽 전극의 전위에서 왼쪽 전극의 전위를 빼는 계산과도 순서가 맞아 편합니다. 그 계산은 **기본개념편 제 6장** (66쪽)에서 하지요.

문제 3.1

알루미늄판을 Al^{3+} 수용액에, 구리판을 Cu^{2+} 수용액에 넣어 만든 전지의 두 반쪽 반응과 전체 반응식을 쓰고, 한 번의 반응식에서 옮겨 가는 전자의 수를 구하라.

태오 알루미늄이 이온화 경향이 크니까 산화 전극이에요. $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$. 구리는 환원 전극, $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$. 더하면 $\text{Al} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{Cu}$.

석 교수 전하를 세어 보렴.

태오 왼쪽은 +2, 오른쪽은 +3이에요. 안 맞아요. 전자가 3개 나가고 2개만 들어왔으니까요.

하린 3과 2의 최소 공배수가 6이니까, 알루미늄 쪽에 2를 곱하고 구리 쪽에 3을 곱해요. $2\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + 6\text{e}^-$, $3\text{Cu}^{2+} + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{Cu}$. 더하면 $2\text{Al} + 3\text{Cu}^{2+} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + 3\text{Cu}$ 예요.

석 교수 정답이다. **$2\text{Al} + 3\text{Cu}^{2+} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + 3\text{Cu}$, 전자 6개.** 검산은 전하로 한다. 왼쪽 $3 \times (+2) = +6$, 오른쪽 $2 \times (+3) = +6$, 맞다. 원자 수도 Al 2개, Cu 3개로 양쪽이 같지.

이모 반응식 계수에 3을 곱했으니까 전압도 3배가 돼요?

석 교수 좋은 의심이에요. 아니요, 전압은 곱하지 않아요. 전압은 전자 하나가 얼마나 세게 밀리는지를 나타내는 값이라, 전자를 몇 개 보내든 한 개당 세기는 같습니다. 이것이 **기본개념편 제 6장** (66쪽)에서 가장 많이 틀리는 지점이라 그때 다시 강조할게요.

3.4 묶은 황산 속 볼타 전지와 분극

석 교수 이번엔 볼타 전지에서 양을 세어 보자.

문제 3.2

묶은 황산에 아연판과 구리판을 꽂은 볼타 전지에서 아연 0.010 mol이 녹았다. 두 전극의 반쪽 반응을 쓰고, 구리판에서 발생한 수소 기체의 부피를 25 °C, 1 atm에서 구하라. ($R = 0.0821 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

하린 산화 전극 $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$, 환원 전극 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 예요. 아연 1 mol이 전자 2 mol을 내놓고, 전자 2 mol이 수소 1 mol을 만드니까 아연 0.010 mol이면 수소도 0.010 mol이에요.

태오 $V = nRT/P = 0.010 \times 0.0821 \times 298 \div 1 = 0.2447 \text{ L}$, 약 0.245 L예요.

석 교수 정답이다. **H_2 0.010 mol, 0.245 L(약 245 mL).** 25 °C, 1 atm에서 기체 1 mol이 24.5 L라는 걸 외워 두면 $0.010 \times 24.5 = 0.245 \text{ L}$ 로 바로 나온다. 그런데 이 수소가 문제를 일으킨다. 볼타 전지의 전압을 오래 재 보면 **그림 16**처럼 된다.

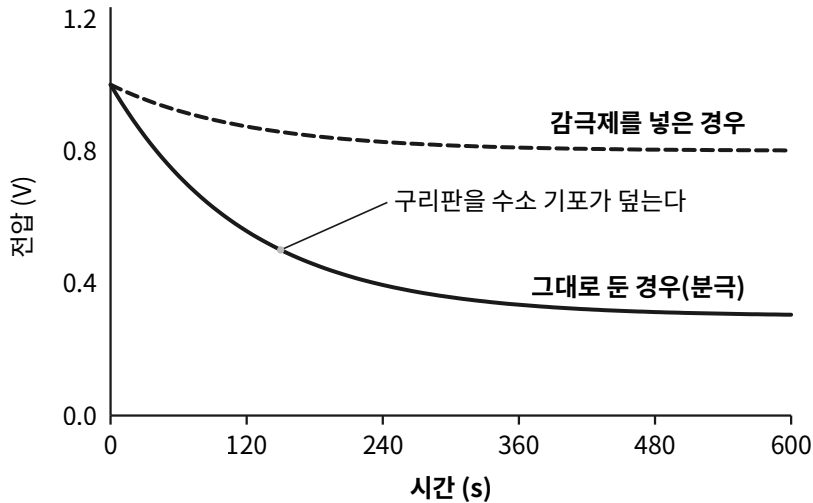


그림 16. 볼타 전지 전압이 시간에 따라 떨어지는 모습(분극 모식도). 구리판 표면을 수소 기포가 덮으면 H^+ 가 전자를 받기 어려워져 전압이 빠르게 떨어진다. 감극제를 넣으면 수소가 물로 산화되어 전압이 덜 떨어진다(곡선은 경향을 보이기 위한 가정값).

하린 처음엔 1 V 가까이 나오다가 몇 분 만에 절반 아래로 떨어져요. 왜 그래요?

석 교수 구리판 표면에 수소 거품이 달라붙어 판을 덮어 버리기 때문이야. 거품이 덮은 자리에는 H^+ 가 닿지 못하니 전자를 받을 자리가 줄어든다. 게다가 표면에 붙은 수소가 거품으로 전자를 내놓으려는 경향까지 생겨서 전압을 깎아 먹지. 이렇게 전극 반응의 생성물 때문에 전압이 떨어지는 현상을 **분극**이라고 한다.

태오 그럼 거품을 없애면 되겠네요.

석 교수 그래서 수소를 물로 바꿔 버리는 산화제를 넣는다. 과산화 수소나 이산화 망가니즈 같은 것들인데, 이런 물질을 감극제라고 한다. 감극제를 넣은 곡선이 점선이다. 하지만 더 근본적인 해결책은 처음부터 수소가 생기지 않게 만드는 것이었고, 그게 다음 장의 다니엘 전지다. 구리판을 Cu^{2+} 용액에 담가 두면 H^+ 대신 Cu^{2+} 가 전자를 받아 구리판 위에 구리가 쌓일 뿐 기체가 생기지 않거든.

이모 아연판은 어떻게 돼요? 아연이 계속 녹기만 해요?

석 교수 좋은 지적이에요. 볼타 전지의 아연판은 도선으로 연결하지 않아도 붉은 황산과 직접 반응해서 아연판 표면에서도 수소가 조금씩 나와요. 아연 표면에서 전자가 바로 옆의 H^+ 로 건너가 버리는 거지요. 그만큼 전기를 만들지 못하고 아연만 닳아요. 이것을 자가 방전이라고 해요. **기본개념편 제 1장 (16쪽)**의 “한 비커에서 직접 반응하면 열만 난다”가 전지 안에서도 일어나는 셈입니다.

3.5 레몬 전지 다시 보기

석 교수 첫 장의 레몬 전지로 돌아가자. 레몬즙은 pH가 2쯤이다. $[H^+]$ 는?

태오 $pH = -\log[H^+]$ 이니까 $[H^+] = 10^{-2} = 0.01$ M이요.

석 교수 레몬즙에 구리 이온은?

하린 없어요! 레몬즙은 구리를 녹인 용액이 아니니까요. 그럼 레몬 전지의 구리판에서도 H^+ 가 전자를 받아요. $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$.

석 교수 맞다. 레몬 전지는 묽은 황산 대신 레몬즙을 쓴 볼타 전지다. 구리판 쪽 반응을 $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ 로 쓰거나, 구리가 산화된다고 $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ 로 쓰는 답이 아주 흔한 오답이야. 앞의 것은 레몬즙에 없는 이온을 끌어왔고, 뒤의 것은 이온화 경향을 거꾸로 본 것이지.

태오 레몬즙의 H^+ 농도가 0.01 M이면 1 M일 때보다 전압이 작아지나요?

석 교수 농도가 작으면 H^+ 가 전자를 받으려는 힘이 조금 약해진다. 얼마나 약해지는지 계산하는 식이 **기본개념편 제 8장** (85쪽)의 네른스트 식인데, 교과 밖 심화라서 그때 보자. 실제 레몬 전지에서는 용액에 녹아 있는 산소도 구리판에서 일부 전자를 받는 등 여러 반응이 섞인다. 시험 답안에서는 “레몬즙 속 H^+ 가 구리판 표면에서 환원되어 수소 기체가 된다”를 중심으로 쓰면 된다.

핵심 볼타형 전지 분석 4단계

1. 두 전극 중 이온화 경향이 큰 금속이 산화 전극((-)극), 작은 쪽이 환원 전극(+)극이다.
2. 환원 전극에서 전자를 받는 것은 “용액에 실제로 있는” 산화제다. 묽은 산·레몬즙이면 $\text{H}^+(\rightarrow \text{H}_2)$, Cu^{2+} 용액이면 $\text{Cu}^{2+}(\rightarrow \text{Cu})$.
3. 두 반쪽 반응의 전자 수를 최소 공배수로 맞춰 더한다. 전하와 원자 수로 검산한다(전압은 곱하지 않는다).
4. 계수비로 양을 센다. 금속 몰수 $\rightarrow$ 전자 몰수 $\rightarrow$ 생성물 몰수 $\rightarrow$ 질량·기체 부피(25 °C, 1 atm에서 24.5 L/mol).

스스로 풀어 보기

1. 마그네슘판과 구리판을 묽은 염산에 꽂아 도선으로 이었다. 산화 전극, 환원 전극과 각 반쪽 반응, 전체 반응식을 쓰라.
2. 니켈(Ni^{2+})과 은(Ag^+)으로 만든 전지의 전체 반응식을 반쪽 반응에서 완성하라.
3. 볼타 전지에서 시간이 지나면 전압이 떨어지는 까닭과, 그것을 줄이는 방법을 쓰라.
4. 레몬 전지의 구리판 반응을 $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ 로 쓰면 왜 틀리는가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 2**(연세대 2024) (214쪽)는 레몬즙(pH 2)에 꽂은 아연판과 구리판에서 산화 전극과 환원 전극, 각 반쪽 반응을 쓰게 하는데, 오늘의 “레몬즙에 Cu^{2+} 는 없다”가 채점의 핵심이다. **기출문제 7**(연세대 2022) (258쪽)는 아연과 은으로 전지 모형을 직접 설계하게 하고, **기출문제 15**(서울시립대 2009) (330쪽)은 주어진 산화·환원 반응을 두 반쪽 반응으로 나누는 방법을 서술하게 하며, **기출문제 13**(성균관대 2011) (311쪽)은 칼슘이 공기 중에서 산화되어 표면의 전기 전도성을 잃는 반응을 반응식으로 쓰고, 금속에서는 전자가, 수용액에서는 이온이 전류를 나른다는 이 장의 구분을 확인하게 한다. 앞의 세 문제는 “산화 전극 $\rightarrow$ 반쪽 반응 $\rightarrow$ 전자 수 맞추기 $\rightarrow$ 전체 반응식”의 순서를 답안에 그대로 드러내면 된다. 특히 환원 전극에서 전자를 받는 물질을 고를 때는 “그 용액에 실제로 들어 있는 이온이 무엇인가”를 먼저 적어 두는 것이, 레몬즙의 H^+ 와 구리 이온을 헷갈리는 실수를 막는 가장 확실한 방법이다.

이 장의 참고문헌

Volta, A. (1800). On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 403–431. <https://doi.org/10.1098/rstl.1800.0018>

- Sanger, M. J., & Greenbowe, T. J. (1999). An analysis of college chemistry textbooks as sources of misconceptions and errors in electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 76(6), 853.
<https://doi.org/10.1021/ed076p853>
- 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.

제 4장 다니엘 전지와 염다리

새 개념 다니엘 전지 · 염다리의 역할 · 이온 농도와 전극 질량의 변화

이어집 반쪽 반응 3장 · 전지 전위 6장 · 실용 전지 9장

이 장의 개념도

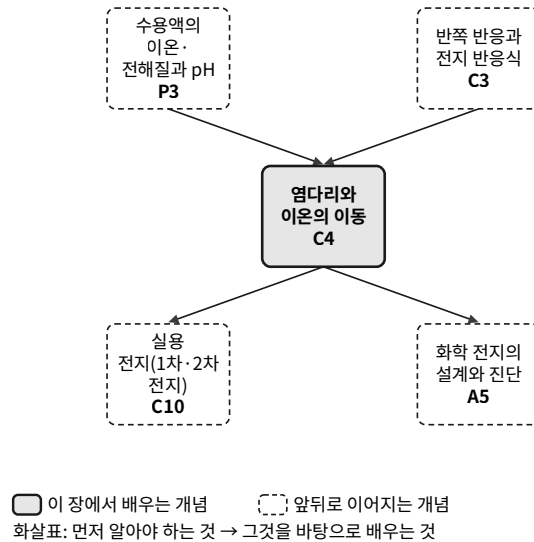


그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C4 염다리와 이온의 이동)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 1 (연세대 2025년) (204쪽)	염다리의 염 고르기와 알칼리 전지	C4 염다리와 이온의 이동
기출 6 (연세대 2022년) (249쪽)	은 석출 뒤 다니엘 전지의 양적 관계	C4 염다리와 이온의 이동
기출 7 (연세대 2022년) (258쪽)	아연과 은으로 화학 전지 고안하기	C4 염다리와 이온의 이동
기출 9 (연세대 2019년) (274쪽)	다니엘 전지의 질량·농도 변화와 염다리	C4 염다리와 이온의 이동

한천과 소금물로 만드는 염다리

빨대 속 한천 + 소금물(NaCl)이 두 컵을 잇는다

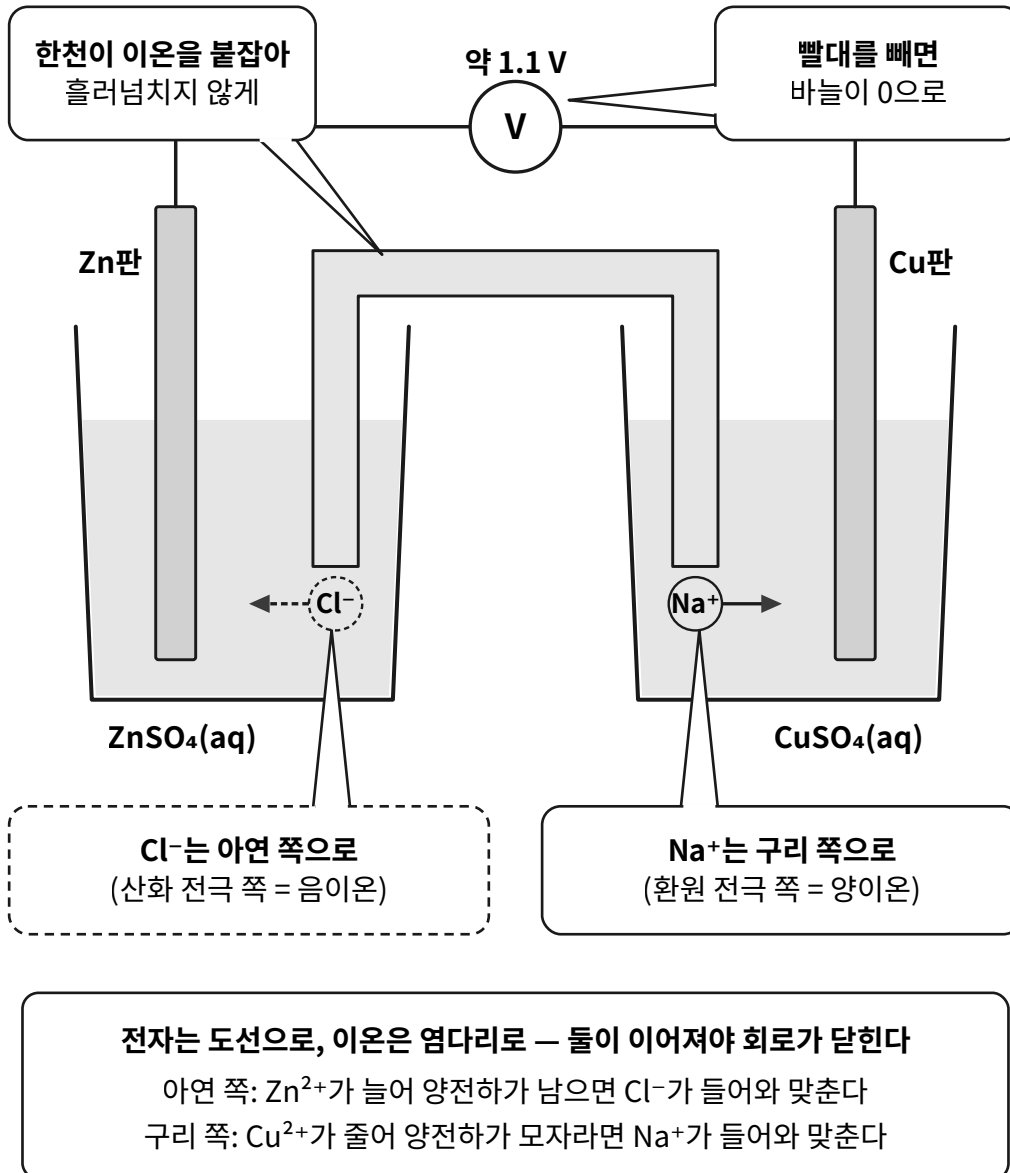


그림 18. 한천과 소금물로 만드는 염다리 — 황산 아연 용액(아연판)과 황산 구리(II) 용액(구리판)을 담은 두 컵을, 소금물에 갠 한천을 채운 U자 빨대로 잇는다. 빨대를 빼면 전압계 바늘이 0으로 떨어진다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 염다리는 두 용액의 전하 균형을 맞춰 전류가 계속 흐르게 한다.
2. 양이온은 환원 전극(구리) 쪽, 음이온은 산화 전극(아연) 쪽으로 간다.
3. 염다리를 빼면 회로가 끊겨 전류가 멈춘다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 3장 (36쪽)의 산화 전극·환원 전극과 반쪽 반응, 그리고 “용액 속 양이온은 환원 전극 쪽, 음이온은 산화 전극 쪽으로 움직인다”는 규칙을 쓴다. 몰 농도(M) = 용질의 몰수 ÷ 용액의 부피(L)이고, 원자량은 Zn 65, Cu 64로 계산한다.

넷째 토요일, 이모가 부엌에서 우무목을 썰다 남은 한천 가루를 들고 왔다. 석 교수는 그것을 소금물에 풀어 끓인 다음 굵은 빨대 두 개에 부어 굳히고 있었다.

하린 교수님, 오늘은 요리 수업이에요? 묵을 빨대에 넣으세요?

석 교수 오늘의 주인공, 염다리를 만드는 중이다. 지난주 볼타 전지가 몇 분 만에 전압이 떨어졌지? 구리판을 수소 거품이 덮여서였다. 1836년 영국의 다니엘은 이 문제를 아주 단순하게 풀었다. 구리판 쪽에 H^+ 대신 Cu^{2+} 를 주면 된다고.

4.1 왜 둘로 나누었나

태오 구리판을 황산 구리(II) 수용액에 담그면 Cu^{2+} 가 전자를 받아서 구리가 쌓이니까 기체가 안 생기네요.

석 교수 그렇다. 그런데 문제가 하나 생긴다. 아연판도 같은 황산 구리(II) 용액에 있으면?

하린 1장에서 봤어요. 아연판에 구리가 바로 붙고 열만 나요. 전자가 도선을 안 거치고 직접 건너가 버려요.

석 교수 그래서 다니엘은 두 용액을 떼어 놓았다. 아연판은 황산 아연 수용액에, 구리판은 황산 구리(II) 수용액에. 각각을 반쪽 전지라고 부른다. 다니엘이 처음 만든 전지는 구리 그릇 안에 동물의 막으로 만든 주머니를 넣고 그 안에 아연과 아연 용액을 넣은 모양이었다. 막이 두 용액이 섞이는 것은 막고, 이온은 천천히 지나가게 해 준 거지. 오늘날 교실에서는 두 비커를 염다리로 잇는다. **그림 19**를 보자.

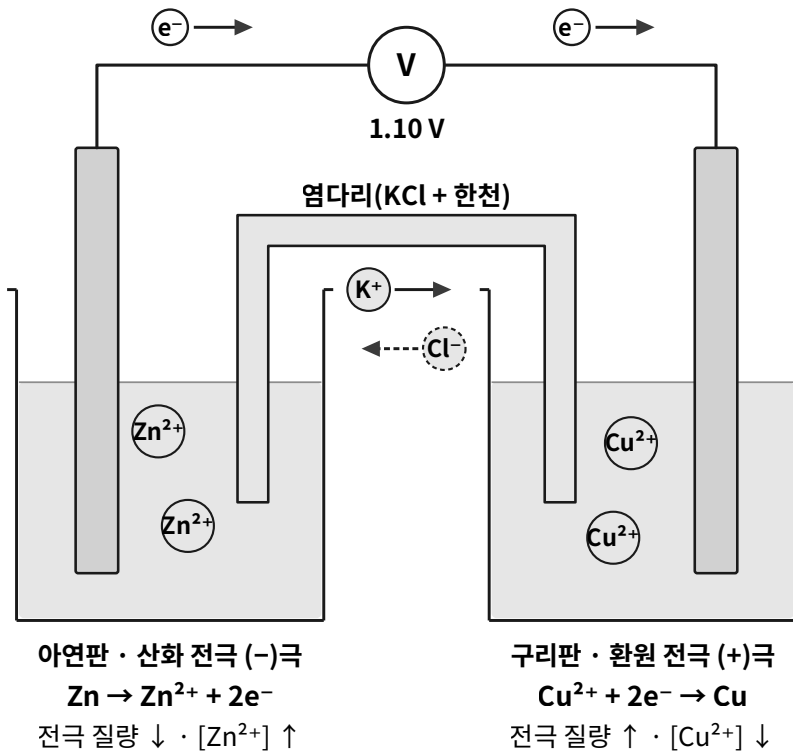
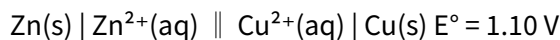


그림 19. 다니엘 전지. 산화 전극(아연판)에서 Zn이 Zn^{2+} 로 녹고, 전자는 도선을 따라 환원 전극(구리판)으로 가서 Cu^{2+} 를 Cu로 환원시킨다. 염다리(KCl)의 K^+ 는 구리 쪽 비커로, Cl^- 는 아연 쪽 비커로 이동한다(모식도).



석 교수 산화 전극에서 $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$, 환원 전극에서 $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$, 전체 $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$. 반응은 1장의 한 비커 반응과 똑같지만, 전자가 반드시 도선을 지나야만 반응이 진행된다. 표준 상태(1 M, 25 °C)에서 전압은 1.10 V이고, 볼타 전지와 달리 오랫동안 거의 일정하게 유지된다. 19세기 중반 전신(電信)이 퍼질 때 다니엘 전지가 널리 쓰인 이유다.

이모 전신이면 모스 부호로 소식을 보내던 그 전신이요?

석 교수 네. 먼 거리에 신호를 보내려면 전압이 들쭉날쭉하지 않고 몇 시간이고 일정해야 했어요. 볼타 전지는 몇 분 만에 전압이 떨어졌지만 다니엘 전지는 그 조건을 맞췄지요. 기체가 생기지 않는 반응을 고른 것, 그게 다니엘의 해법이었습니다.

4.2 염다리가 없으면 곧 멈춘다

이모 그럼 염다리는 왜 꼭 있어야 해요? 도선으로 이었으면 전자는 가잖아요.

석 교수 직접 해 봐요. 염다리 없이 두 비커를 도선으로만 이으면 전압계가 어떻게 되나요?

이모 (전압계를 보며) 0이에요. 아무것도 안 나와요.

석 교수 염다리가 없으면 첫 전자 몇 개가 넘어가자마자 반응이 멈춰요. 아연 쪽 비커를 보세요. 아연판에서 Zn^{2+} 가 녹아 나오는데 그만큼 음이온은 늘지 않으니 용액에 양전하가 남아돌아요. 구리 쪽 비커는 Cu^{2+} 가 빠져나가는데 SO_4^{2-} 는 그대로 남으니 음전하가 남아돌아요. 양전하가 쌓인 아연 쪽은 새 Zn^{2+} 를 밀어내고, 음전하가 쌓인 구리 쪽은 전자가 들어오는 걸 밀어내요. 그 밀어냄이 1.10 V를 금방 상쇄해 버리니 전류가 멈추는 거예요.

태오 그럼 아주 조금만 반응해도 멈춰요?

석 교수 그렇다. 비커 하나를 반지름 5 cm쯤의 공으로 보고 어림하면, 전하가 겨우 1조분의 1 mol(10^{-12} mol, 약 10^{-7} C)만 한쪽에 쌓여도 그 전위가 1만 볼트를 넘는다(교과 밖 어림 계산). 1.10 V를 상쇄하는 데는 그보다 훨씬 적은 양으로 충분하다. 용액은 언제나 거의 정확히 전기적으로 중성이어야 한다. 이게 핵심이다. 그래서 두 용액 사이로 이온이 오가며 이 불균형을 실시간으로 메워 주는 길이 필요하다. 그 길이 염다리다.

4.3 염다리 속 이온은 어디로 가나

석 교수 염다리는 KCl이나 KNO_3 같은 염의 진한 용액을 한천에 섞어 굳힌 U자 관이다. 한천은 용액이 쏟아지거나 두 비커의 용액이 섞이지 않게 붙잡아 주고, 이온은 그 안을 지나갈 수 있다. 그럼 K^+ 와 Cl^- 는 각각 어느 쪽으로 갈까?

하린 아연 쪽이 양전하가 남으니까 음이온이 가야 해요. Cl^- 는 아연 쪽으로요.

태오 구리 쪽은 양전하가 모자라니까 K^+ 가 구리 쪽으로 가요. 3장에서 배운 규칙이랑 같네요. 양이온은 환원 전극 쪽, 음이온은 산화 전극 쪽.

석 교수 정확하다. 이제 전하가 회로 전체를 한 바퀴 도는 길을 따라가 보자. 아연판에서 나온 전자가 도선을 지나 구리판으로 간다. 구리 쪽 용액에서는 Cu^{2+} 가 그 전자를 받아 사라지고, 염다리의 K^+ 가 들어와 빈자리를 채운다. 염다리 안에서는 양이온이 구리 쪽으로, 음이온이 아연 쪽으로 움직이고, 아연 쪽 용액에서는 Cl^- 가 새로 생긴 Zn^{2+} 의 짝이 된다. 금속 속은 전자, 용액 속은 이온이 나르는 이어달리기다.

전자는 염다리를 지나가지 않는다

“전자가 염다리를 통해 되돌아온다”는 답은 틀린다. 전자는 금속 도선 속에서만 움직이고, 염다리와 용액에서는 이온만 움직인다. 회로가 닫히는 것은 전자가 한 바퀴 돌아서가 아니라, 도선의 전자 흐름과 염다리의 이온 흐름이 전극 표면의 반응으로 이어져 있기 때문이다.

이모 아무 소금이나 쓰면 되나요? 저희 집 맛소금도 돼요?

석 교수 소금물(NaCl)로도 잘 돼요. 다만 조건이 세 가지 있어요. 첫째, 물에 잘 녹아 이온이 많아야 해요. 둘째, 그 이온이 전극 반응에 끼여들지 않아야 해요. 셋째, 두 용액의 이온과 양금을 만들지 않아야 하고요. 맛소금에는 조미료 성분이 섞여 있으니 순수한 소금이 낫지요.

태오 둘째 조건이 무슨 뜻이에요?

석 교수 염다리의 양이온은 구리 쪽 비커로 들어간다. 거기서는 전자가 계속 들어오고 있지. 만약 그 양이온이 Cu^{2+} 보다 전자를 더 잘 받는 이온이라면?

문제 4.1

다니엘 전지의 염다리에 KCl 대신 질산 은(AgNO_3) 수용액을 쓰면 어떤 일이 일어나는가? 반면 KNO_3 나 NaNO_3 를 쓰면 문제가 없는 까닭은 무엇인가? (E° : $\text{Ag}^+/\text{Ag} +0.80$ V, $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu} +0.34$ V, $\text{K}^+/\text{K} -2.93$ V, $\text{Na}^+/\text{Na} -2.71$ V)

하린 Ag^+ 는 양이온이니까 구리 쪽으로 가요. 그런데 2장 표에서 은은 구리보다 이온화 경향이 작았어요. 그러니까 Ag^+ 가 Cu^{2+} 보다 전자를 더 잘 받아요.

화학 전자·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

전지는 전위가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 전자를 도선으로 보내 일을 시키고, 전기 분해는 그 흐름을 거꾸로 밀어 넣는다 — 양은 언제나 전하량 ÷ F

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

2부 기출문제와 기본개념

기출 15문항(2009~2025학년도)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 12문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 화학 전자인가
2. 산화·환원 다시 보기와 금속의 이온화 경향
3. 볼타 전지: 두 금속과 도선 하나
4. 다니엘 전지와 염다리
5. 표준 환원 전위: 전자를 끄는 힘의 순위표
6. 전지 전위 계산과 반응의 양적 관계
7. 자발성의 언어: 전위·자유 에너지·평형 상수

8. 농도가 전위를 바꾼다: 네른스트 식
9. 일상의 전지: 1차 전지와 2차 전지
10. 연료 전지: 연료를 계속 넣는 전지
11. 전기 분해: 전기로 반응을 거꾸로 돌린다
12. 수용액 전기 분해와 pH 변화
13. 패러데이 법칙: 전하량으로 물질을 센다
14. 도금·제련·부식, 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: 산화·환원 · 화학 평형 · 열화학 · 산·염기 · 세포막과 신경



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 065250
ISBN 979-11-23065-25-0

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 25 — 화학 전지·전기 분해 — 전체 358쪽

ssbook.kr/book/nonsul-25

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

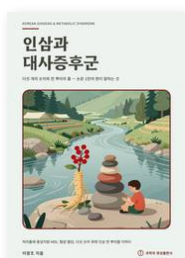


인삼과 당뇨

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

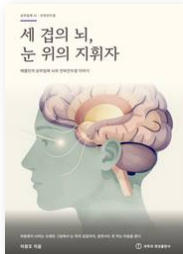
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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