



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지 대사

포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체

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-10

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

세포호흡· 광합성· 에너지 대사

04

MASTER



세포호흡·광합성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 13문항 · 2008~2026학년도

이광조 지음

MASTER
논술 생물

세포호흡·광합성·에너지 대사

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

세포호흡·광합성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 산화·환원 × H^+ 농도 기울기 × ATP 수치 | 13문항 · 6개 대학 (2008~2026)

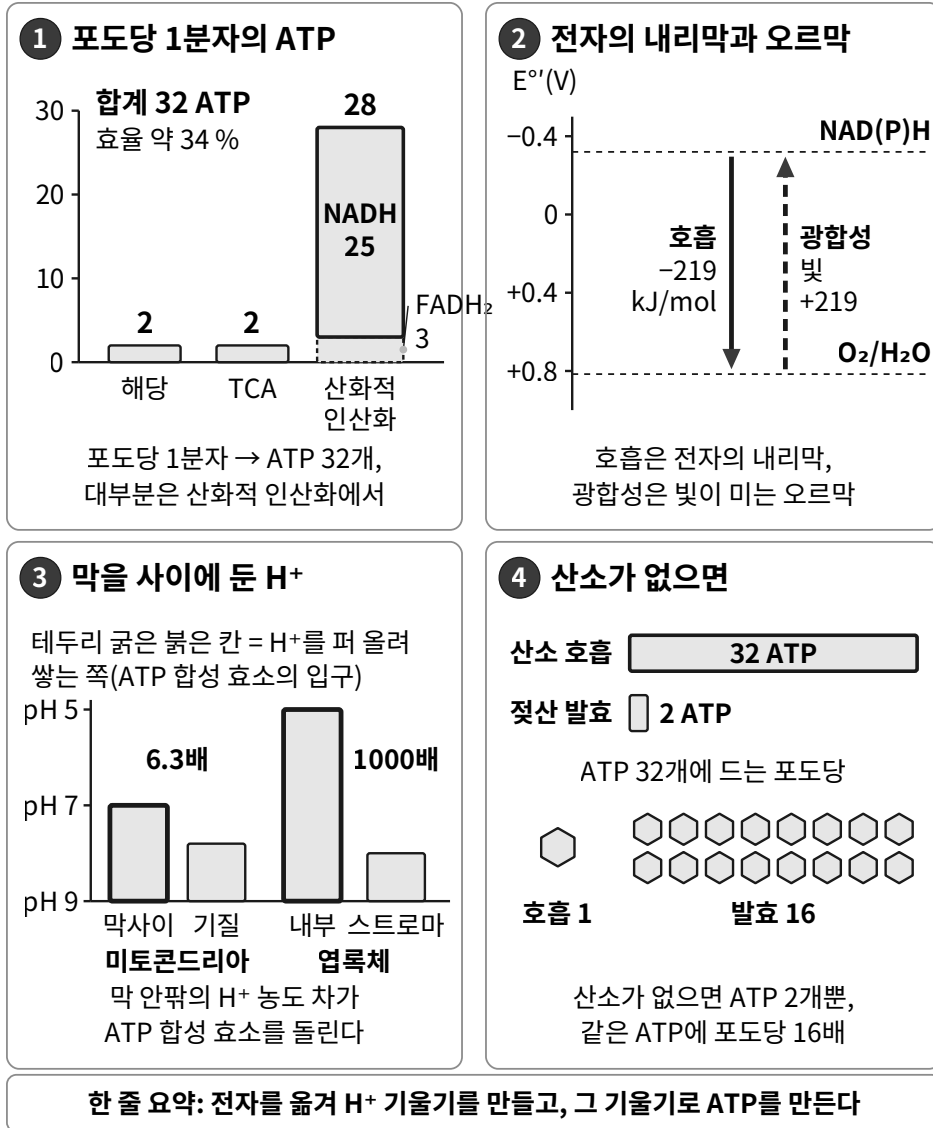


그림 1. 세포호흡·광합성·에너지 대사 단원의 그림 요약. ① 포도당 1분자의 ATP 수치(해당 과정 2, TCA 회로 2, 산화적 인산화 28 — NADH 2.5, FADH₂ 1.5 ATP 기준), ② 전자의 내리막과 오르막: 호흡에서 NADH → O₂ ($\Delta E^{\circ'} = 1.14 \text{ V}$, $\Delta G^{\circ'} = -219 \text{ kJ/mol}$), 광합성에서 H₂O → NADP⁺는 빛이 거꾸로 밀어 올린다, ③ 막을 사이에 둔 H^+ 농도 기울기(미토콘드리아 막 사이 공간 pH 7.0·기질 7.8, 엽록체 틸라코이드 내부 pH 5·스트로마 8), ④ 산소 유무에 따른 ATP 수(산소 호흡 32, 발효 2 — 같은 ATP를 얻으려면 포도당 16배). 수치는 생명과학 II · 대학 생화학 교재의 표준값으로 계산했다.

한 줄 요약: 에너지 대사 = 전자를 옮겨 H^+ 기울기를 만들고, 그 기울기로 ATP를 만든다

연결 단원 → 효소 · 세포막과 물질 수송 · 산화·환원 · 열화학 · 생태계와 물질 순환

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 세포호흡인가.....	16
1.1 먹은 밥은 어디로 가나	18
1.2 동화와 이화 — 판정 기준 두 가지	19
1.3 몸 전체의 에너지 장부	21
1.4 장부가 어긋나면	23
제 2장 ATP: 세포의 에너지 화폐.....	26
2.1 왜 포도당을 바로 쓰지 않나 — 큰돈과 잔돈	28
2.2 ATP의 생김새와 ‘고에너지 인산 결합’	29
2.3 ATP-ADP 순환과 하루 회전량	30
2.4 ATP가 근육을 움직인다는 증거	32
2.5 짝지음 반응 — 오르막을 내리막으로	32
제 3장 산화와 환원: 전자를 나르는 NAD ⁺	35
3.1 산화는 전자를 잃는 것	37
3.2 전자를 실어 나르는 손님 — NAD ⁺ 와 FAD	38
3.3 모닥불과 세포호흡 — 한꺼번에와 계단식	40
3.4 운반체는 다시 써야 한다.....	42
제 4장 두 발전소: 미토콘드리아와 엽록체	44
4.1 세포 지도 — 반응에는 자리가 있다	46
4.2 미토콘드리아 — 막 두 장과 칸 두 개	48
4.3 엽록체 — 막 세 겹과 칸 세 개	50
4.4 두 발전소의 닮은 점	51
제 5장 해당 과정: 포도당을 반으로 쪼개다	54
5.1 포도당이 세포로 들어가기까지.....	56
5.2 투자기 — ATP 2개를 먼저 쓴다	57
5.3 회수기 — 전자를 떼고 ATP를 돌려받는다.....	57
5.4 기질 수준 인산화와 산화적 인산화	59
5.5 해당 과정의 장부와 남은 에너지.....	60
제 6장 피루브산 산화와 TCA 회로.....	63
6.1 피루브산이 미토콘드리아로	65
6.2 TCA 회로 한 바퀴	66
6.3 내쉬는 CO ₂ 는 어디서 오나.....	68
6.4 회로이기 때문에 생기는 일	70
제 7장 전자 전달계: 산소는 마지막 전자 받개.....	72
7.1 NADH가 내막에 전자를 넘긴다.....	74
7.2 전자는 내리막으로 — 환원 전위의 사다리	76
7.3 내려오며 H ⁺ 를 퍼 올린다	78
7.4 산소가 없으면 — 계단 끝이 막힐 때	78
제 8장 화학 삼투: H ⁺ 저수지로 돌리는 발전기	82
8.1 삼투에서 화학 삼투로	84
8.2 H ⁺ 기울기는 얼마나 큰가	85

8.3 ATP 합성 효소: 회전하는 분자 모터	87
8.4 증거 실험: 산을 담갔다 옮기면 어둠에서도 ATP	87
8.5 짝폴림: 저수지에 구멍을 내면	89
제 9장 포도당 한 분자의 ATP 장부	92
9.1 장부 쓰기 — 단계별로 들어오고 나가는 것	94
9.2 왜 교과서마다 다른가 — 38, 36, 32, 30	95
9.3 효율과 열 — 나머지 3분의 2는 어디로	97
9.4 다른 연료 — 지방은 왜 더 많은 ATP를 주나	98
제 10장 산소가 없을 때: 발효와 저산소	101
10.1 산소가 끊기면 무엇이 먼저 멈추나	103
10.2 발효는 NAD ⁺ 를 돌려받는 장치	105
10.3 같은 ATP를 얻으려면 포도당이 16배	106
10.4 저산소의 몸 — 낫 모양 적혈구 빈혈증	107
10.5 근육의 두 얼굴 — 단거리와 마라톤	108
제 11장 명반응: 빛으로 물을 쪼개다	111
11.1 산소는 어디서 오나 — 두 실험	113
11.2 엽록소와 빛 — 어떤 빛을 쓰나	114
11.3 물을 쪼개는 어려움	115
11.4 Z 도식 — 전자를 두 번 밀어 올린다	116
11.5 비순환과 순환 전자 흐름	119
제 12장 탄소 고정 반응: 캘빈 회로	121
12.1 캘빈의 실험 — 탄소는 어디로 먼저 가나	123
12.2 세 단계 — 고정, 환원, 재생	124
12.3 장부 — 포도당 하나에 ATP 18, NADPH 12	125
12.4 회로이기 때문에 생기는 일 — 빛을 끄면	126
제 13장 호흡과 광합성, 그리고 두 소기관의 기원	130
13.1 거울처럼 닮은 두 과정	132
13.2 생산자와 소비자	134
13.3 세포내 공생설 — 두 발전소는 어디서 왔나	136
13.4 가장 오래된 ATP 합성 방식	138
제 14장 몸속·지구·기술 속의 에너지 대사, 그리고 2부로	140
14.1 몸속 — 인슐린과 대사성 질환	142
14.2 지구 — 탄소 순환과 바이오에너지	144
14.3 기술 — 질소 고정 공학과 태양 전지	145
14.4 기본개념편을 마치며 — 2부로	147
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	149
부록 B. 용어 풀이	152
기출문제와 기본개념	161
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	162
0. 이 장의 사용법	163
1. 출제 개념	164
1.1 물질대사와 에너지 대사 균형 — C1 · C14 · P1	164
1.2 ATP와 전자 운반체 — C2 · C3	165
1.3 두 발전소의 구조와 반응의 자리 — C4 · P3	165
1.4 해당 과정 · 피루브산 산화 · TCA 회로 — C5 · C6	166

1.5 전자 전달계와 화학 삼투 — C7 · C8	167
1.6 포도당 1분자의 ATP 장부 — C9 · P2.....	167
1.7 산소가 없을 때: 발효와 NAD ⁺ 재생 — C10 · A2 · A4.....	168
1.8 명반응과 캘빈 회로 — C11 · C12.....	170
1.9 비교 · 기원 · 응용 — C13 · A1 · A3 · A5 · A6.....	171
1.10 그래프 개념도 읽는 법	171
2. 출제 경향.....	174
2.1 개념의 깊이로 본 문항	176
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	176
2.3 학교별 성향	177
논술답안작성 패턴분석	179
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	180
3. 답안 작성법	182
3.1 자료 해석형 답안의 4단 구조	182
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	183
3.3 표기와 수치 규칙	183
3.4 시간 배분과 자기 점검	184
3.5 제시문 인용과 그림으로 답하기.....	184
3.6 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	184
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	186
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 13문항.....	194
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	194
5.3 기본 개념 한눈에	195
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	196
6. 출제 문항 분석과 모범답안	198
〈기출문제 1 (경희대 2026년)〉	199
〈기출문제 2 (연세대 2023년)〉	208
〈기출문제 3 (경희대 2023년)〉	218
〈기출문제 4 (연세대 2022년)〉	227
〈기출문제 5 (연세대 2022년)〉	236
〈기출문제 6 (연세대 2021년)〉	246
〈기출문제 7 (연세대 2021년)〉	253
〈기출문제 8 (연세대 2021년)〉	260
〈기출문제 9 (연세대 2020년)〉	268
〈기출문제 10 (고려대 2013년)〉	276
〈기출문제 11 (서울대 2009년)〉	286
〈기출문제 12 (인하대 2009년)〉	297
〈기출문제 13 (동국대 2008년)〉	305
7. 변형·예상 문항	313
8. 강의 연결.....	319
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	319
8.2 강의 구성 시 유의점	320

9. 전체 문제 총평 321

9.1 숫자로 먼저 보기 321

9.2 다섯 가지 총평.....321

9.3 대학별 한 줄 총평 322

9.4 이렇게 공부하자 323

10. 참고문헌..... 324

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 세포호흡·광합성 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 동화와 이화의 에너지 준위.....	20
그림 5. 나이·성별 기초 대사량	22
그림 6. 하루 에너지 장부.....	23
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 9. ATP의 구조.....	29
그림 10. ATP-ADP 순환	30
그림 11. 짝지음 반응의 에너지	33
그림 12. 제 3장 개념도	35
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	36
그림 14. 모닥불과 세포호흡의 에너지 계단.....	40
그림 15. $\text{NAD}^+ \rightleftharpoons \text{NADH}$ 순환	42
그림 16. 제 4장 개념도	44
그림 17. 생활 속 개념도 4.....	45
그림 18. 미토콘드리아의 단면	48
그림 19. 엽록체의 단면	50
그림 20. 두 발전소의 반응 자리	51
그림 21. 제 5장 개념도	54
그림 22. 생활 속 개념도 5.....	55
그림 23. 해당 과정 요약	57
그림 24. 기질 수준 인산화와 산화적 인산화.....	59
그림 25. 제 6장 개념도	63
그림 26. 생활 속 개념도 6.....	64
그림 27. TCA 회로 한 바퀴	66
그림 28. 포도당 탄소의 행방	68
그림 29. 제 7장 개념도	72
그림 30. 생활 속 개념도 7.....	73
그림 31. 내막의 전자 전달계	75
그림 32. 전자 전달계의 에너지 사다리	76
그림 33. 산소 종단 때 NADH와 NAD^+	79
그림 34. 제 8장 개념도	82
그림 35. 생활 속 개념도 8.....	83
그림 36. 내막의 화학 삼투.....	85
그림 37. ΔpH 와 H^+ 1몰의 자유 에너지.....	86
그림 38. 산-염기 전이 실험.....	88
그림 39. 제 9장 개념도	92
그림 40. 생활 속 개념도 9.....	93
그림 41. 포도당 1분자의 ATP 장부	95
그림 42. 포도당 에너지의 흐름	97
그림 43. 제 10장 개념도	101
그림 44. 생활 속 개념도 10	102
그림 45. 피루브산의 세 갈래	104
그림 46. 같은 ATP를 얻는 데 드는 포도당	107
그림 47. 지근과 속근	109

그림 48. 제 11장 개념도	111
그림 49. 생활 속 개념도 11	112
그림 50. 엽록소의 흡수 스펙트럼	115
그림 51. 명반응의 Z 도식	117
그림 52. 틸라코이드 막의 명반응	118
그림 53. 제 12장 개념도	121
그림 54. 생활 속 개념도 12	122
그림 55. 캘빈 회로	124
그림 56. 빛을 끈 뒤의 3PG와 RuBP	126
그림 57. CO ₂ 를 낮춘 뒤의 3PG와 RuBP	128
그림 58. 제 13장 개념도	130
그림 59. 생활 속 개념도 13	131
그림 60. 두 전자 전달계의 비교	133
그림 61. 빛의 세기와 순광합성	135
그림 62. 세포내 공생의 순서	137
그림 63. 제 14장 개념도	140
그림 64. 생활 속 개념도 14	141
그림 65. 포도당 부하 뒤 혈당 곡선	143
그림 66. 탄소 순환의 두 고리	144
그림 67. 질소 고정 효소를 둘 곳	146
그림 68. 산소가 끊기면 멈추는 순서	169
그림 69. 전체 개념 그래프	172
그림 70. 개념별 출제 횟수	173
그림 71. 연도별 출제 문항 수	175
그림 72. 대학별 출제 문항 수	175
그림 73. 자료 해석형 풀이 절차	182
그림 74. 〈경희대 2026〉 개념 그래프	200
그림 75. 기초 대사량 꺾은선(기출 260)	204
그림 76. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	209
그림 77. 문제 2 표의 계산 정리	211
그림 78. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	219
그림 79. 〈경희대 2023〉 가계도 재구성	222
그림 80. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	228
그림 81. 질소 고정 뒤 캘빈 회로 변화(기출 154)	232
그림 82. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	237
그림 83. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	247
그림 84. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	254
그림 85. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	261
그림 86. 산소 중단의 연쇄	262
그림 87. 〈연세대 2020〉 개념 그래프	269
그림 88. 내막의 화학 삼투(기출 125)	272
그림 89. 〈고려대 2013〉 개념 그래프	277
그림 90. 두 양성자 펌프 비교	282
그림 91. 〈서울대 2009〉 개념 그래프	288
그림 92. Z 도식(명반응)	291
그림 93. 엽록소·실리콘 흡수 범위	293
그림 94. 〈인하대 2009〉 개념 그래프	298
그림 95. 〈동국대 2008〉 개념 그래프	307

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. 동화·이화 판정표.....	20
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. ATP를 쓰는 세 가지 일.....	31
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	35
표 8. 세 전자 운반체의 비교.....	39
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	44
표 10. 반응 자리 지도.....	47
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	54
표 12. 해당 과정의 입출력 장부.....	58
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	63
표 14. 포도당 1분자 기준 미토콘드리아 안의 산물.....	67
표 15. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	72
표 16. 전자 전달계의 주요 높이와 다음 높이로 넘길 때의 자유 에너지 변화(전자.....	76
표 17. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	82
표 18. 미토콘드리아와 엽록체의 화학 삼투 비교.....	86
표 19. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	92
표 20. 환산 계수와 왕복 장치에 따른 포도당 1분자의 ATP 장부.....	96
표 21. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	101
표 22. 산소 호흡·젖산 발효·알코올 발효의 비교.....	105
표 23. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	111
표 24. ^{18}O 표지 실험의 설계와 결과.....	114
표 25. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	121
표 26. 조건 변화 직후 캘빈 회로 중간 물질의 변화.....	128
표 27. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	130
표 28. 세포호흡과 광합성의 비교.....	133
표 29. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	140
표 30. 바이오에너지와 화석 연료의 비교.....	145
표 31. 2부 목차와 내용.....	162
표 32. 동화·이화 판정의 두 기준.....	164
표 33. 세 전자 운반체.....	165
표 34. 반응의 자리 지도.....	165
표 35. 포도당 1분자 기준 단계별 산물.....	166
표 36. 교과서마다 ATP 수가 다른 이유.....	168
표 37. 산소 호흡과 두 발효의 비교.....	169
표 38. 조건 변화 직후 $3\text{PG} \cdot \text{RuBP}$ 의 변화.....	170
표 39. 세포호흡과 광합성의 비교.....	171
표 40. 이 책의 기출 문항 목록.....	174
표 41. 대학별 출제 문항.....	175
표 42. 문항별 요구 개념 수와 최대 층.....	176
표 43. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	177
표 44. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서.....	180
표 45. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	180
표 46. 서술형 답안의 문장 틀(원인 → 과정 → 결과 → 조건·한계).....	183
표 47. 논술 기본 패턴 5가지.....	184

표 48. 문항별 소문항에 적용한 패턴(기호는 위 표).....	185
표 49. 실천기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(최근 시험부터, 출제 내용, 쓰이	192
표 50. 실천기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용	193
표 51. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	194
표 52. 학년도별 문항 수	194
표 53. 소문항에 적용한 답안 패턴의 분포(22개 소문항, 둘이 결합된 소문항은	195
표 54. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 기출 = 그 개념을 쓴 문항 수).....	195
표 55. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	196
표 56. <표 1> 하루 평균 기초 대사량(kcal/day).....	199
표 57. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	200
표 58. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	201
표 59. 제시문 [나]의 표	208
표 60. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	209
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	212
표 62. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	219
표 63. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	220
표 64. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	228
표 65. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	229
표 66. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	237
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	238
표 68. 포도당 1분자가 잃는 전자 24개의 장부	240
표 69. 단거리 선수와 마라톤 선수 근육의 비교(제시문 (나)~(라)에 근거한 추	242
표 70. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	247
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	248
표 72. ATP 합성 방식 두 가지의 비교	249
표 73. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	254
표 74. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	255
표 75. 생산자와 소비자의 에너지 전환 비교.....	256
표 76. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	261
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	263
표 78. 포도당 1분자를 분해할 때 전자 운반체가 필요한 단계.....	264
표 79. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	269
표 80. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	270
표 81. 답안 문장과 제시문 근거 대응표	273
표 82. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	277
표 83. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	278
표 84. 세 가지 세포 연구 방법과 알아낼 수 있는 정보.....	279
표 85. ATP를 만드는 양성자 펌프와 위를 산성화하는 양성자 펌프의 비교	282
표 86. <표 1> 전자기파의 종류 (과학 교과서)	286
표 87. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	288
표 88. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	289
표 89. 명반응과 실리콘 태양광 전지의 대응(이 책이 정리한 비교).....	293
표 90. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	298
표 91. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	299
표 92. 사과 500 g의 탄수화물 에너지 장부.....	301
표 93. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	307
표 94. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	308
표 95. 화석 연료와 바이오매스의 탄소 비교.....	309
표 96. 인강 회차 구성(제안)	319

표 97. 13개 문항의 규모	321
표 98. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	322

제 1 부

기본개념편

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

세포호흡·광합성·에너지 대사

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 물질대사 → ATP와 전자 운반체 → 두 발전소(미토콘드리아·엽록체) → 세포호흡의 네 단계 → ATP 장부와 발효 → 광합성의 두 단계 → 비교·기원·응용의 순서로 이어진다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠르다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 에너지의 말	1~3장	몸이 먹은 만큼 쓰는 장부(물질대사·기초 대사량)에서 출발해, 세포가 쓰는 에너지 화폐 ATP와 전자를 나르는 NAD^+ ·FAD를 익힌다. 이후 모든 장의 바닥이 된다.
B. 두 발전소	4장	미토콘드리아와 엽록체의 막 구조를 보고, 어느 반응이 어느 칸에서 일어나는지 지도를 만든다.
C. 세포호흡	5~8장	해당 과정 → 피루브산 산화·TCA 회로 → 전자 전달계 → 화학 삼투의 순서로 포도당의 전자가 산소까지 가는 길을 따라간다.
D. 장부와 예외	9~10장	포도당 한 분자에서 ATP가 몇 개 나오는지 계산하고, 산소가 없을 때(발효·저산소) 무엇이 멈추는지 추론한다.
E. 광합성과 종합	11~14장	명반응과 캘빈 회로를 배우고, 호흡과 비교한 뒤 세포내 공생설·대사성 질환·생태계·기술 응용으로 넓힌다. 이어서 2부로 간다.

표 1의 다섯 구간 가운데 계산과 추론이 가장 많이 막히는 곳은 C(특히 7~8장의 전자 전달계와 화학 삼투)와 D(9장의 ATP 장부)다. 기출의 절반 이상이 이 두 구간을 지나간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 참고문헌 순서다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있다. 장마다 한 쪽짜리 〈생활 속 개념도〉가 있어, 밥 한 공기·김치·창가 수초처럼 일상에서 그 개념이 보이는 장면을 그림으로 정리한다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모았다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 해당 그림과 식으로 돌아가 한 번 더 시도한다.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
제 1장	왜 세포호흡인가	물질대사 · 동화와 이화 · 기초 대사량 · 에너지 대사 균형
제 2장	ATP: 세포의 에너지 화폐	ATP 구조 · 가수분해 에너지 · ATP-ADP 순환 · 짝지음 반응
제 3장	산화와 환원: 전자를 나르는 NAD^+	산화·환원 · 전자 운반체 NAD^+ ·FAD· NADP^+ · 단계적 산화
제 4장	두 발전소: 미토콘드리아와 엽록체	외막·내막·막 사이 공간·기질 · 틸라코이드·스트로마 · 반응의 자리
제 5장	해당 과정: 포도당을 반으로 쪼개다	해당 과정 10단계 요약 · 투자기와 회수기 · 기질 수준 인산화
제 6장	피루브산 산화와 TCA 회로	아세틸 CoA · TCA 회로 · CO_2 방출 · NADH · FADH_2 생성

장	제목	새로 배우는 개념
제 7장	전자 전달계: 산소는 마지막 전자 받개	전자 전달 복합체 · 환원 전위 · 최종 전자 수용체 O_2 · H^+ 퍼올리기
제 8장	화학 삼투: H^+ 저수지로 돌리는 발전기	H^+ 농도 기울기 · ATP 합성 효소 · 산화적 인산화 · 짝폴림
제 9장	포도당 한 분자의 ATP 장부	ATP 수치 · NADH 2.5와 $FADH_2$ 1.5 · 에너지 효율 · 열
제 10장	산소가 없을 때: 발효와 저산소	젖산 발효 · 알코올 발효 · NAD^+ 재생 · 저산소와 근육
제 11장	명반응: 빛으로 물을 쪼개다	광계 II · I · 물의 광분해 · 비순환·순환 전자 흐름 · 광인산화
제 12장	탄소 고정 반응: 캘빈 회로	탄소 고정·환원·재생 · 3PG·G3P·RuBP · ATP 18과 NADPH 12
제 13장	호흡과 광합성, 그리고 두 소기관의 기원	두 전자 전달계 비교 · 생산자와 소비자 · 세포내 공생설
제 14장	몸속·지구·기술 속의 에너지 대사, 그리고 2부로	대사성 질환과 인슐린 · 탄소 순환·바이오에너지 · 질소 고정 공학·태양 전지

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 막히는 장은 7~8장(전자 전달계·화학 삼투)과 9장(ATP 장부)이다. 이 구간은 두 번 읽는다.
- “산소가 없으면?”, “ H^+ 기울기가 줄면?”, “빛을 끄면?”처럼 한 가지를 바꾸고 무엇이 먼저 멈추는지 묻는 연습을 한다. 기출은 거의 모두 이 질문의 변형이다(표 2의 7·8·10·12장).
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

세포호흡과 광합성은 중학교 과학에서 “포도당 + 산소 → 이산화 탄소 + 물 + 에너지”라는 한 줄로 처음 만나고, 대학 논술에서는 그 한 줄을 열어 “어느 단계가, 어느 막에서, 무엇이 모자라면 멈추는가”를 묻는다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 분자, 세포의 생김새, 간단한 비율 계산)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 돌집 과학방에서 과학을 배운다. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 일상의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학·생물 교수. 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

11월의 토요일 아침, 단양 돌집 과학방의 난로 위에서 보리차가 끓고 있었다. 이모가 두부를 굳히고 남은 콩물을 한 대접 들고 들어왔다.

- 이모** 교수님, 새벽 네 시부터 콩을 갈았더니 배가 고파서 밥을 두 공기나 먹었어요. 그런데 먹은 밥은 다 어디로 가는 거예요?
- 석 교수** 좋은 질문으로 시작하네요. 오늘부터 몇 주 동안 바로 그 질문, 밥이 어디로 가는지를 끝까지 따라가 볼 거예요.
- 하린** 소화돼서 피로 가잖아요. 그다음은요?
- 석 교수** 피를 타고 세포 하나하나까지 간다. 세포 안에서 포도당은 불에 타는 것처럼 산소와 만나 이산화 탄소와 물이 돼. 그런데 불처럼 한꺼번에 타지는 않는다.
- 태오** 한꺼번에 타면 어떻게 되는데요?
- 석 교수** 포도당 1몰(180 g)이 다 타면 약 2,870 kJ, 686 kcal쯤이 나온다. 그게 한순간에 열로 나오면 세포가 익어 버리지. 그래서 세포는 이 에너지를 수십 단계로 잘게 나눠서, 일부를 ATP라는 작은 꾸러미에 담는다.
- 하린** 꾸러미요? 택배 상자 같은 거예요?
- 석 교수** 비슷해. 세포 안에서 쓰는 돈이라고 해서 ‘에너지 화폐’라고도 불러. 포도당이라는 큰돈을 ATP라는 잔돈으로 바꾸는 과정이 세포호흡이다.
- 태오** 그럼 광합성은 그 반대예요? 시험에서는 둘을 꼭 같이 내던데요.
- 석 교수** 정확히 반대는 아니지만, 거울처럼 닮았다. 호흡은 포도당의 전자를 산소로 떨어뜨리면서 에너지를 얻고, 광합성은 빛의 힘으로 물의 전자를 거꾸로 끌어올려 포도당을 만든다. 두 경우 모두 전자가 막 위를 지나가며 H⁺를 한쪽으로 퍼 올리고, 그 H⁺가 되돌아올 때 ATP가 생긴다.
- 이모** H⁺라면 산성 애기할 때 나오던 그거요?
- 석 교수** 맞아요. 수소 이온이요. 이번 단원의 주인공은 사실 전자와 H⁺, 이 둘이에요. 포도당이나 산소는 전자를 내주고 받는 손님이고요.
- 하린** 그럼 숨을 쉬는 것도 그거랑 관계가 있어요?

석 교수 아주 많다. 우리가 숨으로 들이마신 산소는 세포 속에서 전자를 마지막으로 받는 자리에 앉는다. 산소가 없으면 전자가 갈 곳이 없어서 줄줄이 막혀 버리지. 기출 문제의 절반이 바로 그 ‘막히는 장면’을 묻는다.

태오 연세대 기출에 “산소 공급이 중단되면 TCA 회로가 어떻게 되는가”가 있었어요. 저는 TCA 회로는 산소를 직접 안 쓰니까 상관없다고 썼다가 틀렸어요.

석 교수 그 답이 왜 틀렸는지, 10장쯤 가면 네가 직접 설명할 수 있을 거다. 오늘은 그보다 훨씬 앞, 이모님 밥 두 공기의 장부부터 시작하자.

이모 장부라면 제가 자신 있죠. 들어온 돈, 나간 돈.

석 교수 바로 그거예요. 먹은 에너지와 쓴 에너지를 맞추는 장부, 그리고 그 장부를 맞추려고 세포가 매일 벌이는 일. 그게 이 책의 처음과 끝입니다.

하린 그럼 끝에는 뭐가 나와요?

석 교수 끝에는 옥수수로 만든 연료, 지붕 위의 태양 전지, 그리고 질소 비료를 덜 쓰려고 식물에 세균의 효소를 넣는 실험까지 나온다. 모두 오늘 배울 전자와 H^+ 이야기의 응용이야.

장마다 같은 순서로 구성했다. 각 장은 〈이 장의 출발점〉에서 필요한 선수 지식을 확인하고, 본문 대화에서 실험·일상 예로 개념을 만든 뒤, 〈문제〉를 바로 풀어 보고, 〈핵심〉 상자로 절차를 정리한다. 장 끝의 〈스스로 풀어 보기〉 정답은 부록 A에 있다.

왜 세포호흡인가? **기본개념편 제 1장** (16쪽)은 먹은 만큼 쓰는 몸의 장부에서 출발한다. 세포는 큰 분자를 쪼개며(이화) 얻은 에너지를 ATP에 담고, 그 ATP로 큰 분자를 만든다(동화). 쪼갤 때 나오는 전자는 NAD^+ 에 실려 미토콘드리아 내막으로 가고, 그곳에서 산소로 떨어지며 H^+ 를 퍼 올린다. 엽록체는 같은 장치를 빛으로 거꾸로 돌린다. 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 즐거이다.

제 1장 왜 세포호흡인가

새 개념 물질대사 · 동화와 이화 · 기초 대사량 · 에너지 대사 균형

이어짐 ATP 2장 · 전자 운반체 3장 · ATP 장부 9장 · 대사성 질환 14장

이 장의 개념도

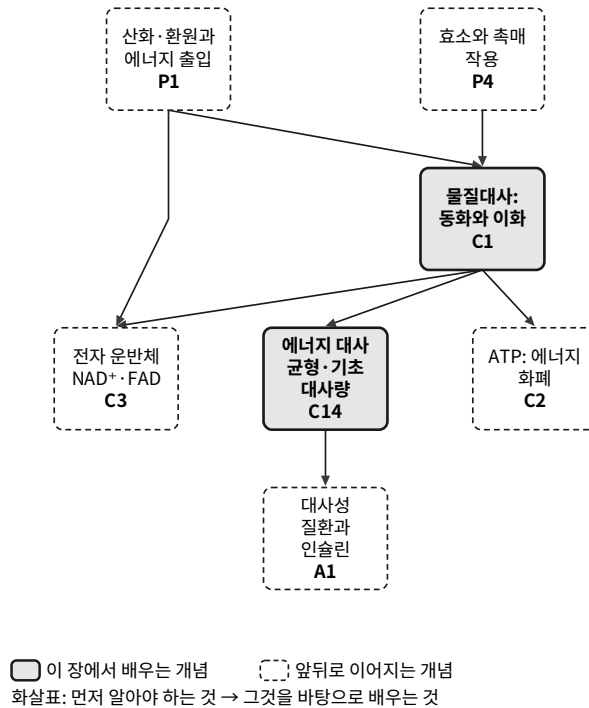


그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 물질대사: 동화와 이화, C14 에너지 대사 균형·기초 대사량)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

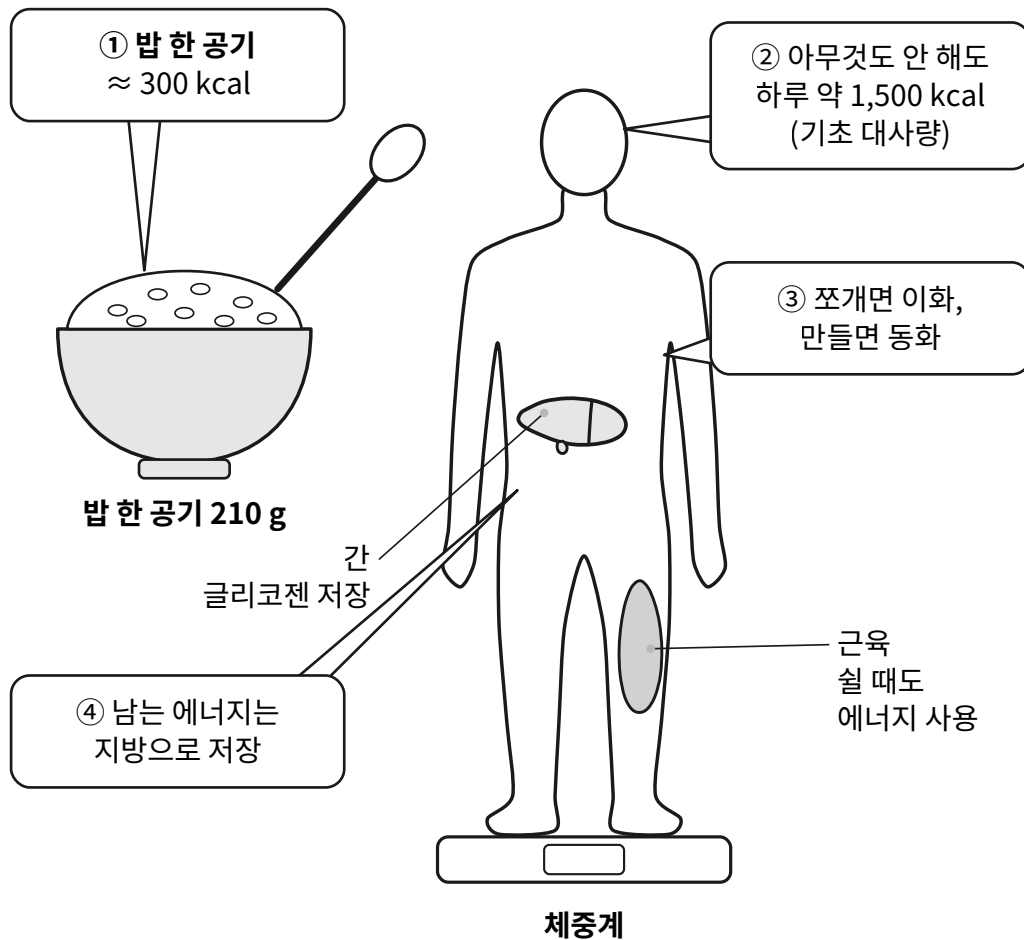
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 1 (경희대 2026년) (199쪽)	동화·이화 판정과 기초 대사량 표 해석	(C1) 물질대사: 동화와 이화; (C14) 에너지 대사 균형·기초 대사량
기출 12 (인하대 2009년) (297쪽)	사과 한 개의 열 장부와 ATP 1몰의 에너지	(C1) 물질대사: 동화와 이화

밥 한 공기와 하루 대사량

먹은 에너지는 어디로 가나



하루 소비 2,440 kcal의 나눗

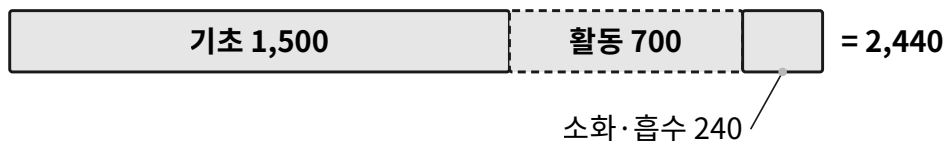


그림 3. 밥 한 공기와 하루 대사량 — 먹은 에너지가 기초 대사·활동·소화로 나뉘어 쓰이는 장면(모식도, 수치는 어렵 값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 먹은 에너지는 기초 대사, 활동, 소화·흡수의 세 갈래로 나뉘어 쓰인다.
2. 큰 분자를 작게 쪄개는 이화에서 에너지가 나오고, 그 에너지가 작은 분자로 큰 분자를 만드는 동화에 쓰인다.
3. 섭취와 소비가 어긋나면 남는 에너지가 지방으로 쌓이거나 저장된 지방이 꺼내 쓰여 체중이 변한다.

이 장의 출발점

- 탄수화물·단백질·지방이 영양소라는 것, 녹말이 소화되면 포도당이 된다는 것(중학교 과학).
- 화학 반응에서 에너지가 나오거나(발열) 들어간다(흡열)는 것.
- 물과 분자량: 포도당 $C_6H_{12}O_6$ 1몰은 180 g이다($6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16$).
- 효소가 생물 속 반응을 빠르게 한다는 것. 효소의 자세한 작동은 몰라도 된다.

토요일 아침, 단양 돌집 과학방의 탁자 위에 김이 나는 밥 한 공기가 놓여 있다. 미숙 이모가 점심 대신 가져온 것이다. 석 교수는 손가락을 들기 전에 밥공기를 가운데로 밀어 놓았다.

이모 교수님, 요즘 건강 검진표에 ‘기초 대사량’이라는 칸이 있더라고요. 저는 그게 뭔지도 모르고 숫자만 봤어요. 그리고 이 밥 한 공기를 먹으면 이게 다 어디로 가는 거예요?

석 교수 오늘 질문으로 딱 좋다. 이 권 전체가 그 질문 하나에 대한 답이야. 밥이 몸속에서 무엇으로 바뀌고, 그 속의 에너지가 어떤 길을 거쳐 우리가 쓰는 에너지가 되는지를 열네 장에 걸쳐 따라갈 거다.

하린 에너지가 밥 속에 들어 있다는 게 잘 상상이 안 돼요. 밥은 그냥 하얀 알갱이잖아요.

석 교수 그 하얀 알갱이의 대부분이 녹말이고, 녹말은 포도당이 수천 개 이어진 사슬이다. 에너지는 포도당 분자를 이루는 원자들 사이의 결합 배치에 들어 있어. 그 배치를 바꾸면, 곧 화학 반응을 일으키면 에너지가 나온다.

1.1 먹은 밥은 어디로 가나

석 교수 먼저 길을 그려 보자. 입에서 침 속 아밀레이스가 녹말을 조금 자르고, 작은창자에서 이자액과 장 효소가 마저 잘라 포도당으로 만든다. 포도당은 작은창자 융털에서 흡수돼 혈액을 타고 온몸의 세포로 간다.

태오 그다음은 세포가 포도당을 태우는 거죠? 숨으로 들이마신 산소로요.

석 교수 ‘태운다’는 말은 반만 맞다. 반응식만 보면 연소와 같아.



석 교수 포도당 1몰, 곧 180 g이 산소와 반응해 이산화 탄소와 물이 되면 686 kcal의 에너지가 나온다. 그런데 이걸 세포 안에서 한꺼번에 일으키면 어떻게 될까?

하린 세포가 뜨거워지겠조. 불이 나는 거잖아요.

석 교수 그래. 한꺼번에 나온 686 kcal은 거의 다 열이 되고, 세포가 쓸 수 있는 형태로 불잡을 틈이 없다. 그래서 세포는 이 반응을 수십 단계로 잘게 나뉘, 단계마다 나오는 에너지를 조금씩 불잡는다. 그 잘게 나눈 산화 과정 전체를 **세포호흡**이라고 해. 불잡은 에너지를 담는 그릇이 다음 장의 ATP다.

이모 숨 쉬는 게 타는 거랑 같다는 생각은 언제부터 한 거예요?

석 교수 18세기 끝 무렵 프랑스의 라부아지에가 처음 실험으로 보였다. 얼음으로 둘러싼 통에 기니피그를 넣고 몇 시간 동안 녹은 얼음의 양과 내신 이산화 탄소의 양을 잴어. 그리고 숯을 태워 같은 양의 이산화 탄소가 나올 때 녹은 얼음의 양과 견주었더니 둘이 비슷했다. 그래서 “호흡은 느린 연소”라고 결론지었지.

- 하린** 대조군이 숫이었네요. 같은 이산화 탄소를 내놓을 때 나오는 열이 같은지 비교한 거니까요.
- 석 교수** 잘 봤다. 변인은 열을 내는 쪽이 동물이나 숫이나 하나이고, 비교의 기준은 내놓은 이산화 탄소의 양이다. 다만 라부아지에는 ‘얼마나 느리게, 어떤 단계로’ 타는지는 몰랐다. 그 단계가 이 권의 5장부터 8장까지다.
- 태오** 1 g당으로 바꾸면 $686 \div 180 = 3.81$ kcal네요. 영양 성분표에서 탄수화물을 4 kcal/g으로 계산하는 것과 거의 같아요.
- 석 교수** 잘 맞췄다. 성분표의 4 kcal/g은 여러 탄수화물을 평균해 반올림한 값이라, 포도당 하나로 계산한 3.81과 조금 다르다. 이 권의 계산 문제에서는 문제가 4 kcal/g을 주면 그 값을 그대로 쓴다.
- 이모** 그럼 밥으로 먹은 포도당은 다 바로 쓰이나요?
- 석 교수** 숫자로 따져 보자. 혈액 속 포도당 농도는 공복일 때 약 100 mg/dL이고 어른의 혈액은 약 5 L, 곧 50 dL이다. 혈액 전체에 녹아 있는 포도당은 얼마일까?
- 하린** $100 \text{ mg} \times 50 = 5,000 \text{ mg}$, 그러니까 5 g이에요. 생각보다 적어요.
- 석 교수** 그런데 밥 한 공기(약 210 g)에는 탄수화물이 약 65 g 들어 있다. 혈액 속 포도당의 열 배가 넘는 양이 한 시간 남짓 사이에 들어오는 셈이지. 그대로 혈액에 머물면 혈당이 치솟을 테니 몸은 그것을 서둘러 세포 속으로 들여보내 쓰거나 저장한다. 이 ‘들여보내는’ 일을 재촉하는 호르몬이 인슐린이고, 5장과 14장에서 다시 만난다.
- 이모** 그럼 쓰고 남은 건 어디에 저장해요?
- 석 교수** 당장 쓰고 남은 포도당은 간과 근육에서 글리코젠으로 이어 붙여 저장하고, 그것도 넘치면 지방으로 바뀌 지방 조직에 쌓인다. 이렇게 몸속에서 일어나는 모든 화학 반응을 통틀어 **물질대사**라고 한다. 물질대사는 반드시 에너지의 출입을 함께 데리고 다녀서, 그 에너지 쪽 면을 따로 **에너지 대사**라고 부른다.

1.2 동화와 이화 — 판정 기준 두 가지

- 석 교수** 물질대사는 방향에 따라 두 갈래로 나뉜다. 작은 분자로 큰 분자를 만드는 쪽이 **동화 작용**, 큰 분자를 작은 분자로 쪼개는 쪽이 **이화 작용**이다.
- 하린** 만들면 동화, 쪼개면 이화. 외우기는 쉬운데요.
- 석 교수** 판정할 때는 두 가지 기준을 같이 본다. 하나는 분자의 크기, 다른 하나는 에너지의 출입이다. 동화는 에너지를 흡수해서 생성물의 에너지가 반응물보다 높아지고, 이화는 에너지를 방출해서 생성물의 에너지가 낮아진다. **그림 4**가 그 두 기준을 한 그림에 담은 것이다.

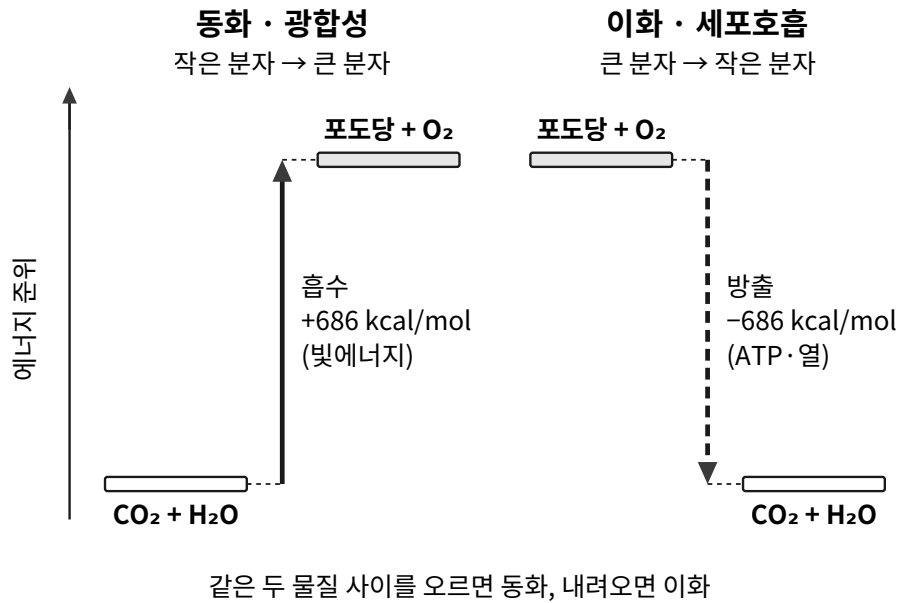


그림 4. 동화와 이화의 에너지 준위 — 광합성(동화)은 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 에서 포도당으로 에너지 준위가 686 kcal/mol 올라가고, 세포호흡(이화)은 같은 폭만큼 내려간다(모식도)

- 태오** 광합성은 이산화 탄소와 물이라는 작은 분자로 포도당이라는 큰 분자를 만들고, 빛에너지를 흡수하니까 동화. 세포호흡은 거꾸로라 이화. 두 기준이 같은 쪽을 가리키네요.
- 석 교수** 대부분은 그렇다. 그래서 문제에서 둘 중 하나만 보여 줘도 판정할 수 있다. 예를 들어 “생성물의 에너지 준위가 반응물보다 높아진다”는 문장만 있으면 분자 이름이 없어도 동화다.
- 이모** 간에서 글리코젠이 포도당으로 바뀌는 건요? 호르몬이 시켜서 일어나는 일이라고 들었는데, 몸이 뭔가를 만들어 내는 것 같기도 하고요.
- 석 교수** 거기서 많이들 틀린다. 누가 시켰는지는 판정 기준이 아니다. 글리코젠은 포도당 수천 개가 이어진 큰 분자고, 그게 포도당 날개로 풀리니 큰 분자에서 작은 분자로 가는 이화다. 혈액으로 포도당을 내보내는 ‘목적’이 있다고 해서 동화가 되지는 않아.
- 하린** ATP가 ADP와 인산으로 나뉘는 것도 이화예요?
- 석 교수** 그렇다. 한 분자가 둘로 나뉘고 에너지가 나오니 이화다. ATP는 다음 장에서 자세히 본다. 지금까지 나온 예를 표로 모으면 **표 4**과 같다.

표 4. 동화·이화 판정표 — 분자 크기와 에너지 출입 두 기준으로 판정한다

생명 현상	분자 크기	에너지	판정
엽록체에서 CO_2 와 H_2O 로 포도당을 만든다	작은 → 큰	흡수(빛)	동화
리보솜에서 아미노산을 이어 단백질을 만든다	작은 → 큰	흡수	동화
세포가 포도당·지방을 분해해 에너지를 얻는다	큰 → 작은	방출	이화
ATP가 ADP와 무기 인산으로 나뉜다	큰 → 작은	방출	이화
간에서 글리코젠이 포도당으로 풀려 혈액으로 나간다	큰 → 작은	방출	이화
반응 뒤 생성물의 에너지 준위가 반응물보다 높다	(주어지지 않음)	흡수	동화

- 태오** 그럼 동화와 이화는 따로 노는 게 아니라 서로 에너지를 주고받는 거네요. 이화에서 나온 에너지로 동화를 하니깐요.
- 석 교수** 바로 그거다. 몸속에서는 이화로 나온 에너지가 ATP에 담겼다가 동화, 근육 운동, 물질 수송에 쓰인다. 그리고 동화는 이화된 체온 근처에서 빠르게 일어나려면 효소가 필요하다. 효소가 없으면 포도당은 몇 년을 두어도 저절로 타지 않아.
- 태오** 그럼 거꾸로 ADP와 인산이 붙어 ATP가 되는 건 동화겠네요. 작은 두 분자가 하나가 되고 에너지를 흡수하니깐요.
- 석 교수** 그렇다. 같은 물질이라도 어느 방향으로 가느냐로 판정한다. 시험에서 'ATP'라는 단어만 보고 이화라고 쓰면 틀린다. 반응식의 화살표 방향을 먼저 보는 습관을 들여라.
- 하린** 소화도 이화예요? 녹말이 포도당이 되는 거니깐요.
- 석 교수** 분자 크기 기준으로 보면 이화다. 다만 소화에서 나오는 에너지는 아주 작고 대부분 열로 흩어지며, 세포가 ATP로 붙잡는 에너지는 세포 안의 세포호흡에서 나온다. 그래서 교과서는 소화를 이화의 예로 들면서도, 에너지를 '얻는' 이화의 대표로는 세포호흡을 든다.

1.3 몸 전체의 에너지 장부

- 이모** 이제 건강 검진표의 기초 대사량 얘기를 해 주세요.
- 석 교수** 하루에 쓰는 에너지 전체를 **1일 대사량**이라 하고, 세 덩어리로 나눈다.
- 1일 대사량 = 기초 대사량 + 활동 대사량 + 음식물의 소화·흡수에 쓰이는 에너지
- 석 교수** **기초 대사량**은 아무 일도 하지 않고 편히 누워 있어도 생명을 유지하는 데 드는 최소한의 에너지다. 심장 박동, 호흡 근육, 체온 유지, 뇌의 활동, 세포막 너머로 이온을 퍼내는 일 같은 것들이야. 그래서 아침 공복에, 알맞은 실내 온도에서, 편히 누운 상태로 잤다. **활동 대사량**은 걷고, 공부하고, 일하는 데 더 쓰는 에너지고, 마지막 덩어리는 먹은 음식을 소화하고 흡수하는 데 드는 에너지로, 대략 섭취량의 10 % 안팎이다.
- 하린** 가만히 있어도 에너지를 쓴다니 신기해요. 자는 동안에도요?
- 석 교수** 그렇다. 성인은 대개 하루 에너지의 절반 이상이 기초 대사량이다.

기초 대사량은 어떻게 재나

- 태오** 그런데 몸이 쓰는 에너지를 직접 잴 수는 없잖아요. 사람을 얼음통에 넣을 수도 없고요.
- 석 교수** 그래서 산소 소비량을 잤다. 마스크를 쓰고 누워 있게 한 뒤 들이쉬는 공기와 내쉬는 공기의 산소 농도 차로 1분에 쓴 산소의 부피를 구하는 거야. 포도당만 태운다면 산소 6몰로 686 kcal가 나오니, 0 °C·1기압에서 산소 1 L당 $686 \div (6 \times 22.4) = 5.10$ kcal다. 지방과 단백질이 섞인 실제 식사에서는 산소 1 L당 약 4.8 kcal로 계산한다.
- 하린** 그럼 누운 어른이 1분에 산소를 0.21 L 쓴다면요?
- 태오** 하루는 1,440분이니까 $0.21 \times 1,440 = 302$ L, 여기에 4.8을 곱하면 1,452 kcal. 표의 기초 대사량과 거의 같은 크기네요.
- 석 교수** 그래서 산소 소비량은 세포호흡이 실제로 일어나고 있다는 가장 직접적인 증거다. 산소를 쓰는 곳이 바로 세포 속 미토콘드리아이고, 그 이유는 7장에서 본다. 내쉬는 이산화탄소와 쓴 산소의 부피비를 호흡률이라고 하는데, 포도당은 $6\text{CO}_2 \div 6\text{O}_2 = 1.0$, 지방은 약 0.7이라서 무엇을 주로 태우는지도 짐작할 수 있다. 이제 표 하나를 읽어 보자. 한국인의 나이·성별 하루 평균 기초 대사량이다. 숫자를 그대로 찍은 그래프가 **그림 5**다.

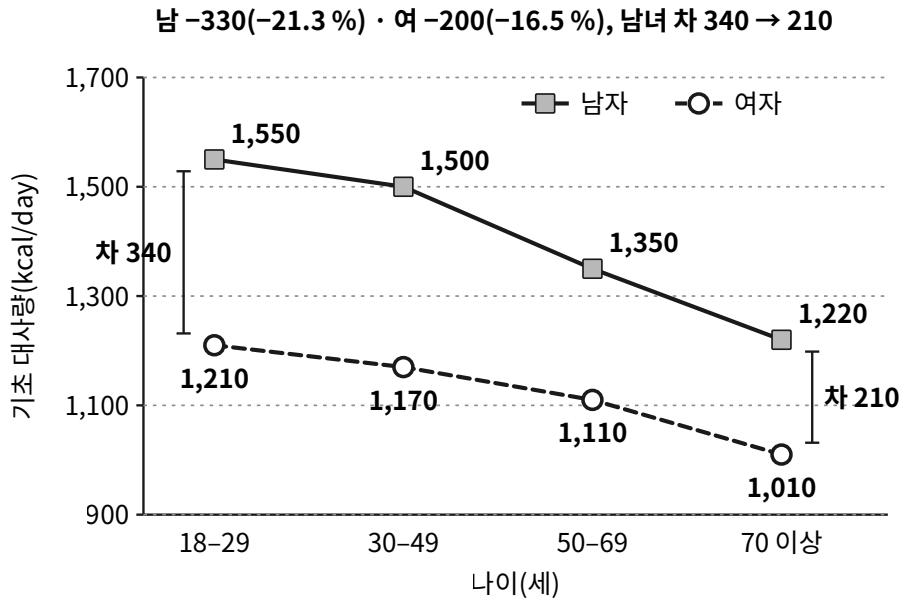


그림 5. 나이·성별 하루 평균 기초 대사량 — 남녀 모두 나이가 들수록 줄고, 남녀 차는 18-29세 340 kcal에서 70세 이상 210 kcal로 좁아진다(경희대 2026 모의논술 표 1의 값)

문제 1.1

하루 평균 기초 대사량(kcal/day)이 남자 1,550·1,500·1,350·1,220, 여자 1,210·1,170·1,110·1,010(나이 18-29, 30-49, 50-69, 70세 이상)이다. (1) 18-29세에서 70세 이상까지의 감소량과 감소율을 남녀별로 구하라. (2) 남녀 차는 어떻게 변하는가?

태오 남자는 $1,550 - 1,220 = 330$ kcal 줄었고, 감소율은 $330 \div 1,220 = 27.0\%$ 예요.

석 교수 잠깐. 감소율의 분모는 무엇이어야 하지?

태오 아, 처음 값이요. $330 \div 1,550 = 0.213$, 그러니까 21.3 %예요. 줄어든 뒤의 값으로 나누면 안 되네요.

하린 여자는 $1,210 - 1,010 = 200$ kcal, $200 \div 1,210 = 0.165$ 라서 16.5 %예요.

석 교수 둘 다 맞다. (2)는 각 나이대에서 남자 값에서 여자 값을 빼 보면 된다.

이모 $1,550 - 1,210 = 340$, $1,500 - 1,170 = 330$, $1,350 - 1,110 = 240$, $1,220 - 1,010 = 210$ 이에요. 차이가 340에서 210으로 줄어요.

석 교수 그래서 정답은 이렇다. 감소량·감소율은 남자 330 kcal(21.3 %), 여자 200 kcal(16.5 %)이고, 남녀 차는 340 kcal에서 210 kcal로 좁아진다. 비율로 보면 여자 값이 남자 값의 0.78배에서 0.83배로 다가간다.

태오 왜 남자가 더 많이 줄어요?

석 교수 표 자체는 ‘왜’를 말해 주지 않으니 근거를 붙여 해석해야 한다. 근육은 쉬는 동안에도 에너지를 꽤 쓰는 조직이고, 남자는 대체로 근육량이 많아 기초 대사량이 크다. 나이가 들면 근육량이 줄어드는데, 처음 근육이 많던 쪽이 줄어드는 폭도 크다는 해석이 자연스럽다. 논술 답안에서는 “표에서 ~이다”와 “그 까닭은 ~로 해석된다”를 문장으로 나눠 쓰는 게 안전하다.

1.4 장부가 어긋나면

석 교수 이제 장부를 맞춰 보자. 장부가 맞지 않으면 남는 에너지는 지방으로 쌓이고, 모자라는 에너지는 저장된 글리코젠과 지방을 꺼내 채운다. 지방 조직 1 kg에는 대략 7,700 kcal가 들어 있다고 보면 된다.

문제 1.2

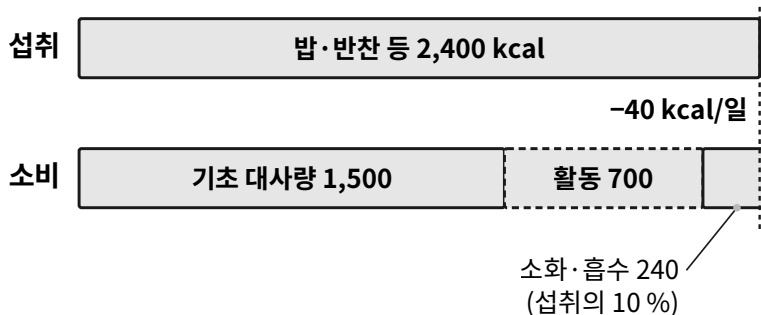
하루 섭취 2,400 kcal, 기초 대사량 1,500 kcal, 활동 대사량 700 kcal이고, 소화·흡수에 섭취량의 10 %가 쓰인다. 하루 에너지 장부를 쓰고, 이 상태가 30일 이어질 때 체지방 변화를 구하라 (지방 1 kg = 7,700 kcal).

하린 소화·흡수는 2,400의 10 %니까 240 kcal. 쓰는 쪽은 $1,500 + 700 + 240 = 2,440$ kcal 예요.

태오 들어온 게 2,400이니까 $2,400 - 2,440 = -40$ kcal, 하루 40 kcal 모자라요. 30일이면 $40 \times 30 = 1,200$ kcal.

이모 $1,200 \div 7,700 = 0.156$ 이니까 약 0.16 kg 빠지는 거네요. 한 달에 겨우 160 g이네요?

석 교수 맞다. 정답은 하루 소비 2,440 kcal, 하루 40 kcal 적자, 30일 동안 1,200 kcal → 체지방 약 0.16 kg 감소다. 작아 보이지만 1년이면 $40 \times 365 = 14,600$ kcal, 약 1.9 kg이다. 거꾸로 하루 40 kcal씩 남으면 그만큼 쌓이고. **그림 6**에 이 장부를 막대로 그렸다.



30일이면 $-1,200$ kcal $\approx$ 체지방 0.16 kg 감소(1 kg = 7,700 kcal)

그림 6. 하루 에너지 장부 — 섭취 2,400 kcal과 소비 2,440 kcal(기초 1,500 + 활동 700 + 소화·흡수 240)을 나란히 놓으면 하루 40 kcal가 모자란다

하린 40 kcal이면 밥으로 얼마나 돼요?

석 교수 밥 한 공기를 약 300 kcal로 보고, 한 공기를 열다섯 손가락에 먹는다고 하면 한 손가락이 20 kcal이다. 하루 두 손가락이지. 장부의 차이는 이렇게 눈에 잘 띄지 않는 크기로 생각하고, 시간이 그것을 키운다.

태오 그럼 나이가 들어 기초 대사량이 330 kcal 줄었는데 젊을 때처럼 먹으면, 매일 330 kcal가 남겠네요.

석 교수 다른 조건이 같다면 그렇다. 그래서 나이가 들수록 섭취량을 줄이거나, 활동 대사량을 늘려 줄어든 기초 대사량을 메워야 한다. 특히 근력 운동으로 근육량을 지키면 기초 대사량이 덜 줄어든다. 남자는 감소 폭이 더 크니 같은 나이에서 조절해야 할 폭도 더 크다는 것까지 표에서 읽어 낼 수 있다.

이모 장부가 오래 어긋나면 살만 찌는 게 아니죠? 혈당이나 혈압 얘기도 나오던데요.

석 교수 그렇다. 남은 에너지가 지방으로 쌓이는 상태가 길어지면 근육과 간이 인슐린에 잘 반응하지 않게 되고, 혈당 조절이 흐트러질 수 있다. 이것이 대사성 질환이고, 14장에서 세포 속 장면까지 내려가 다시 본다. 오늘은 큰 장부만 세웠고, 다음 장부터는 세포 하나의 장부로 들어간다.

하린 결국 밥 한 공기의 에너지가 세포 안에서 어떻게 쪼개지는지를 앞으로 배우는 거네요.

석 교수 그래. 몸 전체의 장부는 세포 수십조 개의 장부를 더한 것이다. 세포 하나의 장부를 알면 왜 산소가 필요한지, 왜 숨을 내쉬면 이산화 탄소가 나오는지, 왜 운동하면 몸이 더워지는지가 한 줄로 이어진다.

핵심 동화·이화 판정과 에너지 장부 풀이

1. 동화·이화는 분자 크기(작은 → 크이면 동화)와 에너지 출입(흡수면 동화)의 두 기준으로 판정한다. 누가 시켰는지(호르몬)나 목적은 기준이 아니다.
2. 포도당 1몰(180 g)의 완전 산화 에너지는 686 kcal(약 3.8 kcal/g)이고, 세포는 이를 여러 단계로 나눠 ATP에 담는다.
3. 1일 대사량 = 기초 대사량 + 활동 대사량 + 소화·흡수 에너지(섭취의 약 10 %)로 장부를 쓴다.
4. 표에서 감소율은 처음 값을 분모로 하고, 표가 보여 주는 사실과 그 해석(근육량 등)을 문장으로 나눈다.
5. 섭취 - 소비가 남으면 지방으로 쌓이고(1 kg $\approx$ 7,700 kcal), 모자라면 저장 에너지를 꺼내 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 다음 네 현상을 동화와 이화로 판정하라. (가) 아미노산이 이어져 단백질이 된다 (나) 녹말이 엿당으로 분해된다 (다) ATP가 ADP와 무기 인산으로 나뉜다 (라) 근육에서 포도당이 글리코젠으로 저장된다
2. 포도당 90 g이 완전히 산화될 때 나오는 에너지는 몇 kcal인가? (포도당 180 g/mol, 686 kcal/mol)
3. 50-69세 여성의 기초 대사량이 1,110 kcal, 활동 대사량이 600 kcal이고 소화·흡수에 섭취량의 10 %가 쓰인다. 에너지 장부가 정확히 맞으려면 하루 섭취량은 얼마여야 하는가?
4. 하루 100 kcal씩 소비보다 더 먹는 상태가 1년(365일) 이어지면 체지방은 약 몇 kg 늘어나는가? (지방 1 kg = 7,700 kcal)

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 두 도구, 곧 동화·이화의 두 판정 기준과 하루 에너지 장부는 4부의 **기출문제 1**(경희대 2026) (199쪽)에서 그대로 쓰인다. 보기 ㉠~㉣을 동화와 이화로 가르는 소문항과, 나이·성별 기초 대사량 표를 읽고 섭취량과 활동 대사량의 조절 방향을 쓰는 소문항이다. 또 **기출문제 12**(인하대 2009) (297쪽)은 사과의 탄수화물 열량을 출발점으로 삼아 체온 유지에 쓰이는 열을 계산하는데, 그 계산의 첫 단계가 이 장의 “g → kcal” 환산이다. 장부가 어긋날 때 세포 속에서 벌어지는 일은 **기본개념편 제 14장** (140쪽)에서 인슐린과 함께 다시 본다.

이 장의 참고문헌

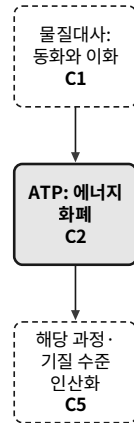
- Harris, J. A., & Benedict, F. G. (1918). A biometric study of human basal metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 4(12), 370–373. <https://doi.org/10.1073/pnas.4.12.370>
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). Macmillan Learning.
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.
- 경희대학교 입학처. (2025). 2026학년도 모의논술고사 문제 및 해설(의·약학계-생명과학) [시험 자료].

제 2장 ATP: 세포의 에너지 화폐

새 개념 ATP 구조 · 가수분해 에너지 · ATP-ADP 순환 · 짝지음 반응

이어짐 물질대사 1장 · 해당 과정 5장 · 화학 삼투 8장 · ATP 장부 9장

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 ATP: 에너지 화폐)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 1 (경희대 2026년) (199쪽)	동화·이화 판정과 기초 대사량 표 해석	C2 ATP: 에너지 화폐
기출 7 (연세대 2021년) (253쪽)	생산자와 소비자의 에너지 전환 비교	C2 ATP: 에너지 화폐
기출 10 (고려대 2013년) (276쪽)	두 양성자 펌프와 세포 연구 방법	C2 ATP: 에너지 화폐
기출 12 (인하대 2009년) (297쪽)	사과 한 개의 열 장부와 ATP 1몰의 에너지	C2 ATP: 에너지 화폐

100 m 출발선의 근육 속 ATP

근육은 ATP를 쓰고, 쓰는 즉시 다시 채운다

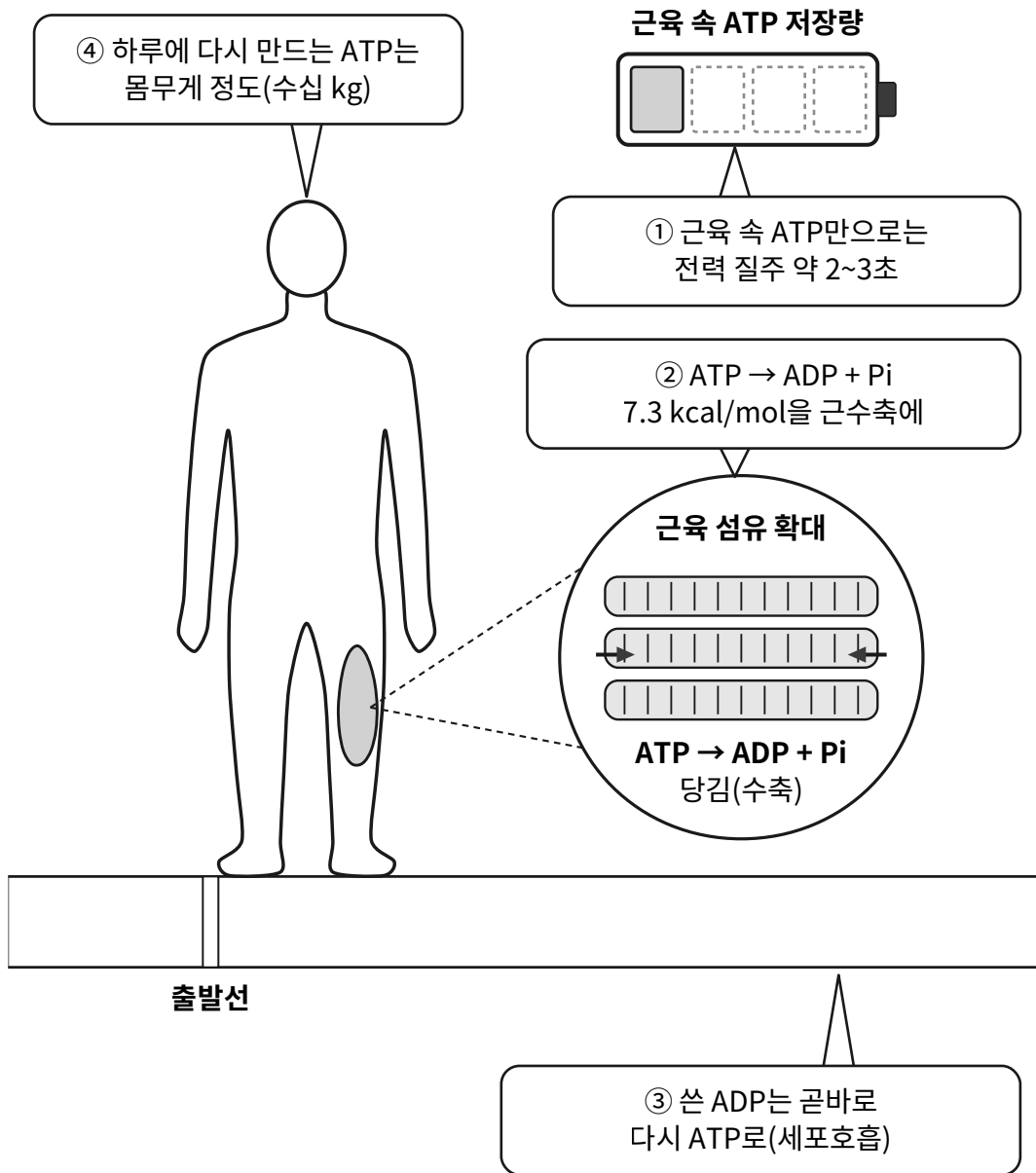


그림 8. 100 m 출발선의 근육 속 ATP — 근육이 쓰는 ATP는 쓰는 즉시 ADP에서 다시 만들어진다(모식도, 수치는 어림값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. ATP는 쌓아 두는 저금이 아니라 쓰는 즉시 다시 채우는 잔돈이다.
2. ATP가 ADP와 무기 인산으로 나뉠 때 나오는 에너지가 근수축 같은 일에 짜지어 쓰인다.
3. 몸속 ATP는 50 g 남짓이지만 하루에 몸무게만큼(수십 kg) 다시 만들어진다.

이 장의 출발점

- **기본개념편 제 1장** (16쪽)의 동화와 이화: 이화에서 나온 에너지가 동화에 쓰인다.
- 포도당 1몰의 완전 산화 에너지 686 kcal.
- 자유 에너지 변화 ΔG 가 음수이면 반응이 저절로(자발적으로) 일어날 수 있고, 양수이면 에너지를 넣어 주어야 한다는 것. ΔG° 은 생물 표준 조건(pH 7)에서의 값이다.

다음 주 학교 체육 대회에서 하린이 100 m 달리기에 나간다. 과학방에 들어서자마자 하린은 출발 자세를 흉내 내며 물었다.

하린 교수님, 달리기 직전에 사탕을 먹으면 바로 힘이 나요? 포도당이 에너지라면서요.

석 교수 사탕의 포도당이 혈액에 들어오는 데만 해도 몇 분은 걸린다. 그보다 중요한 건, 근육은 포도당을 직접 쓰지 못한다는 거야. 근육 단백질이 움직일 때 쓰는 에너지는 오직 한 가지 분자에서 나온다. ATP다.

태오 생명과학 시간에 ‘에너지 화폐’라고 배웠어요. 그런데 왜 화폐인지는 잘 모르겠어요.

석 교수 오늘 그 이유를 세 가지로 보자. 크기가 알맞다는 것, 어디서나 통한다는 것, 그리고 아주 빨리 돌고 돈다는 것.

2.1 왜 포도당을 바로 쓰지 않나 — 큰돈과 잔돈

석 교수 포도당 한 분자를 완전히 산화하면 686 kcal/mol, ATP 한 분자를 ADP와 무기 인산으로 나누면 7.3 kcal/mol이 나온다. 몇 배 차이이지?

태오 $686 \div 7.3 = 94$ 배요.

석 교수 세포 속의 일들은 대부분 한 번에 아주 작은 에너지를 쓴다. 아미노산 하나를 사슬에 붙이거나, 이온 하나를 막 너머로 퍼내거나, 근육 단백질이 한 걸음 당기는 일 같은 거지. 이런 일에 포도당 한 분자를 통째로 쓰면, 오만 원짜리 지폐로 백 원짜리 사탕을 사고 거스름돈을 받을 수 없는 꼴이 된다. 남은 에너지는 열로 흩어지고 말아.

이모 그래서 큰돈을 잔돈으로 바꿔 두는 거군요.

석 교수 그렇다. 포도당을 산화해 나오는 에너지를 ATP라는 잔돈 수십 개로 바꿔 두고, 일마다 필요한 만큼 ATP를 쓴다. 포도당 한 분자에서 ATP가 몇 개 생기는지는 9장에서 장부를 맞춰 볼 텐데, 미리 말하면 약 32개다.

하린 94개가 아니라 32개면, 바꾸는 동안 꽤 많이 잃어버리네요.

석 교수 잘 짚었다. $32 \times 7.3 = 233.6$ kcal이고, 686 kcal의 약 34 %다. 나머지는 열이 되어 체온을 지킨다. 환전 수수료가 꽤 비싼 셈이지만, 그 수수료도 우리 몸에서는 버려지지 않고 쓰인다.

이모 34 %면 많은 거예요, 적은 거예요?

석 교수 휘발유 자동차 엔진이 연료 에너지의 30 % 안팎을 바퀴를 굴리는 일로 바꾸니, 세포는 체온 37 °C에서 그와 비슷하거나 조금 나은 효율을 낸다. 불꽃도 고온도 없이 그만큼 해낸다는 점이 놀라운 거지.

태오 ‘어디서나 통한다’는 건요?

석 교수 세균, 효모, 시금치, 사람 할 것 없이 모든 생물이 ATP를 같은 방식으로 쓴다. 효소들이 ATP를 알아보고 붙잡는 자리를 가지고 있어. 그래서 ATP는 생물이 아주 오래전부터 써 온 공통 화폐라고 본다. 13장에서 ATP를 만드는 가장 오래된 방법을 추론할 때 이 사실이 단서가 된다.

2.2 ATP의 생김새와 ‘고에너지 인산 결합’

석 교수 ATP는 아데노신 3인산(adenosine triphosphate)의 줄임말이다. 염기인 아데닌에 5탄당인 리보스가 붙은 것이 아데노신이고, 리보스에 인산기 세 개가 줄줄이 붙어 있다. **그림 9**를 보자.

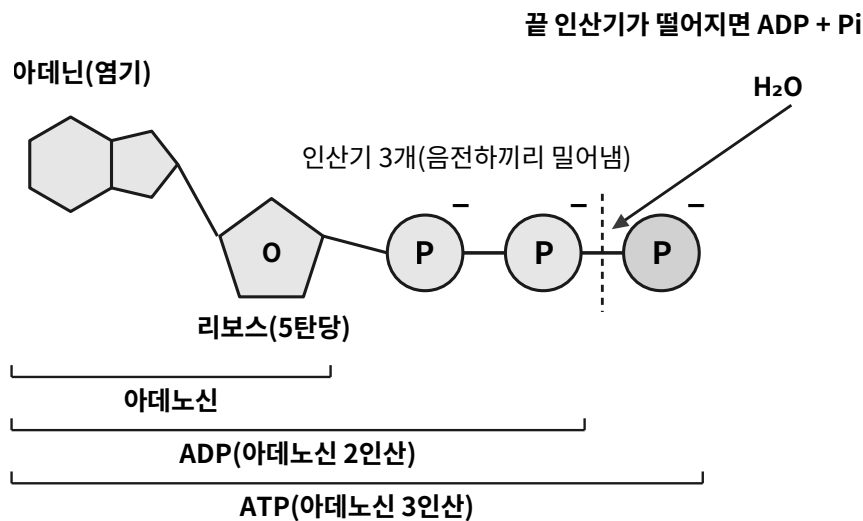
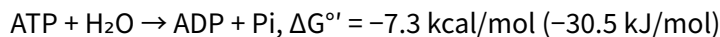


그림 9. ATP의 구조 — 아데닌·리보스(합쳐서 아데노신)에 인산기 세 개가 이어져 있고, 끝 인산기가 물과 반응해 떨어지면 ADP와 무기 인산(Pi)이 된다(모식도)

하린 RNA에서 본 리보스랑 아데닌이네요.

석 교수 그래. ATP는 RNA를 만드는 재료이기도 하다. 아데닌을 가진 이 뼈대는 세포 곳곳에서 되풀이해 쓰이는데, 다음 장의 전자 운반체 NAD⁺와 FAD에도 같은 아데노신 조각이 들어 있다. 염기가 구아닌인 GTP도 몇몇 반응에서 ATP와 같은 구실을 하고, 6장의 TCA 회로에서 한 번 등장한다. 끝의 인산기 하나가 물과 반응해 떨어지면 ADP(아데노신 2인산)와 무기 인산 Pi가 된다.



태오 교과서에는 인산과 인산 사이를 ‘고에너지 인산 결합’이라고 하고, 그 결합 속에 에너지가 저장돼 있다고 하던데요.

석 교수 그 말은 조심해서 읽어야 한다. 화학에서 결합을 끊는 데는 언제나 에너지가 든다. 결합 하나를 끊는다고 에너지가 튀어나오지 않아. 에너지가 나오는 까닭은 반응 전체에 있다. ATP와 물이라는 출발 상태보다 ADP와 Pi라는 도착 상태가 더 안정하기 때문이야.

하린 왜 도착 쪽이 더 안정해요?

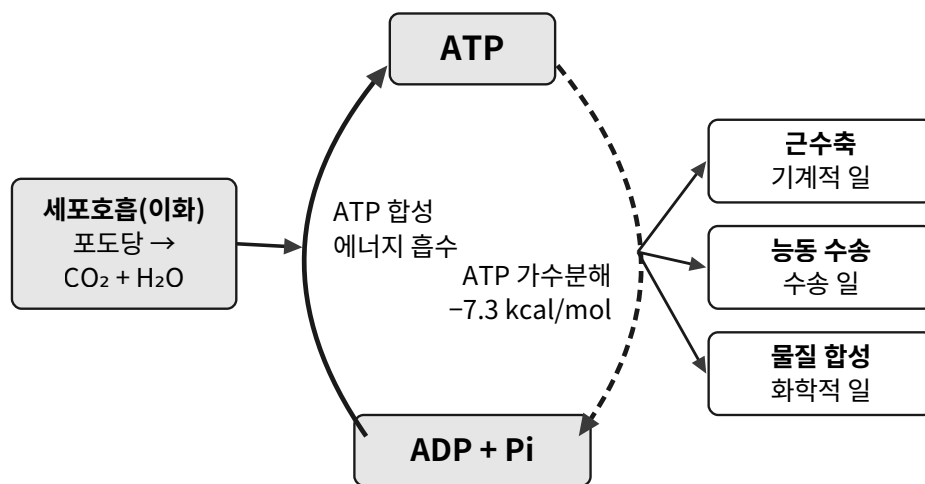
석 교수 세 가지로 설명한다. 첫째, 인산기들은 모두 음전하를 띠어서 셋이 붙어 있으면 서로 밀어낸다. 하나가 떨어지면 그 반발이 줄어든다. 둘째, 떨어져 나온 P_i 는 전자를 여러 모양으로 고루 나눠 가질 수 있어 안정하다. 셋째, 나뉜 두 조각은 물 분자에 더 잘 둘러싸인다. 그래서 ‘고에너지 결합’은 “이 결합이 물과 반응해 끊어지는 반응의 ΔG 가 크게 음수다”라는 뜻의 줄임말로 받아들이면 된다.

태오 그럼 논술에서 “인산 결합 속의 에너지가 방출된다”라고 쓰면 감점이에요?

석 교수 교과서 표현을 그대로 쓰면 대개 감점까지는 아니다. 다만 “ATP가 ADP와 무기 인산으로 가수분해될 때 에너지가 방출된다”처럼 반응 전체를 주어로 쓰는 편이 정확하다. 참고로 세포 안에서는 ATP가 ADP보다 훨씬 많이 유지되기 때문에 실제 ΔG 는 약 -12 kcal/mol 까지 커진다. 이것은 교과 밖 심화이고, 계산 문제는 문제에 주어진 값, 보통 7.3 kcal/mol 을 쓴다.

2.3 ATP-ADP 순환과 하루 회전량

석 교수 이제 ‘돌고 돈다’는 세 번째 이유다. ATP는 쓰면 ADP가 되고, ADP는 이화에서 나온 에너지로 다시 인산기를 받아 ATP가 된다. **그림 10**의 고리다.



ATP는 쓰는 즉시 ADP에서 다시 만들어진다

그림 10. ATP-ADP 순환 — 세포호흡(이화)에서 나온 에너지로 $ADP + P_i \rightarrow ATP$ 를 만들고, ATP가 가수분해될 때 나온 에너지는 근수축·능동 수송·물질 합성에 쓰인다(모식도)

이모 은행에서 돈을 찾아 쓰고, 월급이 들어오면 다시 채우는 거네요.

석 교수 다만 이 통장은 잔고가 아주 적다. 사람 몸 전체에 들어 있는 ATP는 50 g 남짓이야. 그런데 하루에 쓰는 양은 어마어마하다. 계산해 보자.

문제 2.1

하루 섭취 에너지 2,000 kcal 중 40 %가 ATP에 담긴다고 하자. ATP 가수분해 에너지가 7.3 kcal/mol , ATP 물질량이 507 g/mol 일 때 (1) 하루에 만드는 ATP는 몇 몰이고 몇 kg인가? (2) 몸속 ATP가 약 50 g이라면 ATP 한 분자는 하루에 평균 몇 번 다시 만들어지는가?

태오 (1)부터요. $2,000 \times 0.40 = 800 \text{ kcal}$ 이 ATP에 담기니까 $800 \div 7.3 = 110 \text{ mol}$ 이에요.

- 하린** $110 \times 507 = 55,770$ g이니까 약 56 kg이네요? 제 몸무게보다 많아요!
- 석 교수** 반올림을 조심하자. $800 \div 7.3 = 109.6$ mol이고, $109.6 \times 507 = 55,560$ g, 약 56 kg이다. 하린이가 110으로 반올림한 뒤 곱해서 55,770 g이 나왔는데, 답의 유효숫자 두 자리로는 둘 다 56 kg이니 결론은 같다. 다만 중간에서 반올림하면 끝자리가 흔들린다는 건 기억해 뒀.
- 이모** (2)는 56 kg을 50 g으로 나누면 되나요? $55,560 \div 50 = 1,111$ 이니까 약 1,100번이네요.
- 석 교수** 맞다. 정답은 (1) 약 110 mol, 약 56 kg, (2) 하루 약 1,100번이다. 이 숫자는 하루 에너지 2,000 kcal와 40 %라는 가정에서 나온 개략치라서, 사람마다 활동량에 따라 달라진다. 그래도 ‘적게 가지고 빨리 돌린다’는 그림은 변하지 않는다.
- 태오** 1,100번이면 1분에 한 번 가까이 다시 만들어지는 거네요. 1,440분에 1,100번이니깐요.
- 석 교수** 그래. 그래서 ATP를 만드는 공장이 잠깐만 멈춰도 세포는 곧바로 곤란해진다. 산소가 끊기면 몇 분 안에 뇌세포가 위험해지는 까닭이 여기 있고, 10장의 주제다.
- 이모** 그렇게 빨리 쓰고 채우면, 세포는 언제 더 만들어야 하는지 어떻게 알아요?
- 석 교수** ATP를 쓰면 ADP와 Pi가 늘어난다. 늘어난 ADP가 바로 신호야. ATP를 만드는 효소들은 ADP가 많을수록 빨리 일하고, ATP가 넘치면 느려지도록 조절된다. 그래서 달리기 시작하면 근육 세포의 산소 소비가 곧바로 늘어나고, 쉬면 다시 줄어든다. 8장에서 ATP 합성 효소를 막는 약물을 넣으면 산소 소비까지 줄어드는 실험을 보게 되는데, 그것도 같은 원리다.
- 태오** 수요가 공급을 끌고 가는 구조네요. 공장이 주문서를 보고 생산량을 정하는 것처럼요.
- 석 교수** 좋은 비유다. 그래서 건강한 세포에서 ATP 농도는 활동량이 크게 바뀌어도 거의 일정하게 유지된다. 바뀌는 건 ATP의 양이 아니라 회전 속도다.
- 하린** 근육 속 ATP만으로는 몇 초나 달릴 수 있어요?
- 석 교수** 전력 질주라면 근육에 들어 있는 ATP만으로는 2~3초 정도라고 본다. 근육에는 크레아틴 인산이라는 예비 저장고가 있어서 ADP에 인산을 재빨리 건네주며 몇 초를 더 버티게 한다. 그 뒤로는 해당 과정과 세포호흡이 ATP를 다시 채워야 한다. 100 m를 달리는 10여 초 동안에도 ATP는 쉬지 않고 다시 만들어지고 있는 거야.

ATP가 하는 일은 크게 세 가지로 나눈다(표 6).

표 6. ATP를 쓰는 세 가지 일 — 기계적 일·수송 일·화학적 일

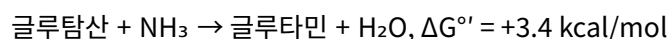
일의 종류	예	ATP가 하는 역할
기계적 일	근육 수축, 섬모·편모 운동, 염색체 이동	운동 단백질의 모양을 바꿔 한 걸음씩 당기게 한다
수송 일	Na^+ - K^+ 펌프, 능동 수송	막 단백질에 인산을 붙여 농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 물질을 퍼낸다
화학적 일	단백질·핵산·글리코젠 합성(동화)	오르막 반응을 ATP 가수분해와 짝지어 내리막으로 만든다

2.4 ATP가 근육을 움직인다는 증거

- 태오** 그런데 근육이 포도당이 아니라 ATP를 직접 쓴다는 건 어떻게 알았어요? 몸속에서는 둘 다 있으니 구별하기 어려울 것 같은데요.
- 석 교수** 좋은 질문이다. 1940년대에 헝가리의 센트죄르지 연구진이 한 실험이 있다. 토끼 근육을 가늘게 찢어 글리세린 용액에 오래 담가 두면 세포막이 망가지고 세포 속의 작은 분자들, 곧 포도당·ATP·효소 일부가 다 빠져나간다. 근육을 움직이는 단백질 실만 남은 ‘빈 근육 섬유’가 되는 거야.
- 하린** 그 빈 섬유에 무엇을 넣어 보는 거죠?
- 석 교수** 그렇지. 섬유를 몇 묶음으로 나눠 각각 다른 용액에 넣고 길이를 잰다. 실험 설계를 표처럼 정리해 보자. 묶음 A에는 염류 용액만, 묶음 B에는 염류 용액에 포도당, 묶음 C에는 염류 용액에 ATP를 넣는다.
- 태오** 결과는 C만 줄어들었겠네요.
- 석 교수** 그렇다. ATP를 넣은 섬유만 눈에 띄게 짧아졌고, 염류 용액만 넣은 섬유와 포도당을 넣은 섬유는 길이가 변하지 않았다. 이 결과에서 무엇을 결론 내릴 수 있지?
- 이모** 근육 단백질은 ATP만 있으면 움직이고, 포도당만으로는 못 움직인다는 거요.
- 석 교수** 거기에 한 가지를 덧붙여야 정확하다. 포도당을 넣은 섬유가 움직이지 않은 건, 포도당이 쓸모없어서가 아니라 포도당을 ATP로 바꾸는 효소들과 미토콘드리아가 이미 빠져나갔기 때문이다. 그래서 결론은 “근수축에 직접 쓰이는 에너지원은 ATP이고, 포도당은 ATP를 거쳐서만 근수축에 쓰인다”가 된다.
- 하린** 묶음 A는 왜 넣었어요? 아무 일도 안 일어날 걸 아는데요.
- 석 교수** 그게 대조군이다. 섬유가 용액에 담기기만 해도 줄어드는지, 염류 때문에 줄어드는지를 먼저 걸러야 C의 수축을 ATP 덕분이라고 말할 수 있어. 변인은 ‘넣은 물질’ 하나이고, 나머지 조건, 곧 온도·염류 농도·섬유의 출처는 모두 같게 둔다. 논술에서 실험을 해석할 때 대조군이 무엇을 걸러 내는지를 한 문장으로 쓰면 답안이 단단해진다.
- 태오** ATP 양을 직접 재는 방법도 있어요?
- 석 교수** 반딧불이를 쓴다. 반딧불이의 빛은 루시페린이라는 물질을 루시페레이스라는 효소가 산화시킬 때 나오는데, 이 반응에 ATP가 반드시 필요하다. 그래서 시료에 루시페린과 루시페레이스를 넣으면 시료 속 ATP가 많을수록 빛이 밝다. 빛의 세기로 ATP 양을 재는 이 방법은 지금도 식품 위생 검사에서 표면에 남은 세포의 흔적을 찾는 데 쓰인다.
- 이모** 도마를 닦은 면봉을 기계에 넣는 거 TV에서 봤어요. 그게 ATP를 재는 거였군요.
- 석 교수** 그래. 살아 있었던 세포에는 어디든 ATP가 있으니, ATP는 ‘생명이 있었다’는 표시로도 쓰이는 거다.

2.5 짝지음 반응 — 오르막을 내리막으로

- 석 교수** 세 번째 줄, 화학적 일을 자세히 보자. 동화 반응은 에너지를 흡수하는 오르막이라 혼자서는 일어나지 않는다. 예를 들어 글루탐산에 암모니아를 붙여 글루타민을 만드는 반응은 이렇다.



- 태오** ΔG 가 양수니까 저절로는 안 일어나는 반응이요.

석 교수 그런데 세포는 이 반응을 ATP 가수분해와 한 덩어리로 묶는다. 두 반응을 더하면 전체의 ΔG 도 더해진다.

문제 2.2

글루탐산 + $\text{NH}_3 \rightarrow$ 글루타민($\Delta G^\circ = +3.4 \text{ kcal/mol}$)을 ATP 가수분해($\Delta G^\circ = -7.3 \text{ kcal/mol}$)와 짝지었을 때 전체 반응식과 ΔG° 를 구하고, 반응이 자발적으로 진행할 수 있는지 판정하라.

하린 두 식을 더하면 글루탐산 + NH_3 + ATP $\rightarrow$ 글루타민 + ADP + P_i 예요. 물은 한쪽에서 생기고 한쪽에서 쓰여서 지워지고요.

태오 ΔG 는 $+3.4 + (-7.3) = -3.9 \text{ kcal/mol}$. 음수니까 자발적이에요.

석 교수 정답이다. 전체 $\Delta G^\circ = -3.9 \text{ kcal/mol}$ 로 자발적으로 진행할 수 있다. **그림 11**에 막대로 그렸다. 위로 3.4 올라가는 반응과 아래로 7.3 내려가는 반응을 이어 붙이니 끝이 출발점보다 3.9 낮아지지.

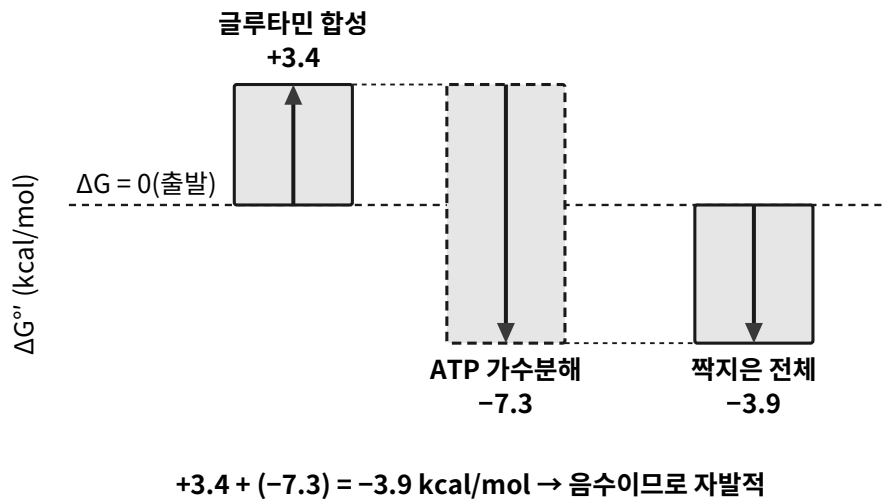


그림 11. 짝지은 반응의 에너지 막대 — 글루타민 합성(+3.4 kcal/mol)에 ATP 가수분해(-7.3 kcal/mol)를 짝지으면 전체는 -3.9 kcal/mol이 되어 자발적으로 진행한다

이모 그런데 두 반응을 더하기만 하면 되는 거면, 그냥 같은 그릇에 넣어 두면 되나요?

석 교수 아니다. 그게 중요한 점이야. 같은 그릇에 둘이 따로 있으면 ATP는 ATP대로 가수분해되어 열만 내고, 글루탐산은 그대로 남는다. 효소가 두 반응을 실제로 엮어야 해. 이 반응에서는 효소가 ATP의 끝 인산을 먼저 글루탐산에 붙여 인산이 붙은 중간 물질을 만들고, 거기에 암모니아가 들어와 인산을 밀어내며 글루타민이 된다. 인산을 건네받은 중간 물질은 반응하기 쉬운 상태라서 오르막 반응이 내리막으로 바뀌지.

태오 그럼 ATP 한 개로 모자라는 반응도 있겠네요. ΔG 가 +10 kcal/mol이면요?

석 교수 $+10 - 7.3 = +2.7$ 로 여전히 양수니 ATP 하나로는 안 된다. 그런 반응은 ATP 두 개 묶의 에너지를 쓰거나, 여러 단계로 쪼개 단계마다 짝짓는다. 단백질을 만들 때 아미노산 하나를 붙이는 데 ATP 여러 개 묶이 드는 것도 그 때문이다.

하린 결국 몸속의 모든 오르막에는 ATP라는 동전이 하나씩 들어가는 거네요.

석 교수 그렇게 보면 된다. 수송 일도 같은 짝지음이다. Na^+ - K^+ 펌프는 ATP 한 분자를 가수분해 할 때마다 Na^+ 3개를 세포 밖으로 내보내고 K^+ 2개를 안으로 들인다. 둘 다 농도가 높은 쪽으로 퍼 올리는 오르막인데, 펌프 단백질에 인산이 붙었다 떨어지며 모양이 바뀌는 동안 ATP의 내리막과 엮인다. 쉬고 있는 사람의 기초 대사량 가운데 꽤 큰 몫이 이 펌프를 돌리는 데 들어간다.

태오 1장에서 기초 대사량에 ‘이온을 퍼내는 일’이 들어 있다고 하신 게 이거였군요.

석 교수 그래. 남은 질문은 하나다. 그 동전은 어디서, 어떻게 찍어 내나? 포도당이 산화될 때 나오는 에너지를 어떻게 $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$ 라는 오르막으로 옮기느냐. 답은 두 가지 방식인데, 하나는 5장의 기질 수준 인산화이고 다른 하나는 8장의 화학 삼투다. 그 사이에서 전자를 실어 나르는 운반체가 다음 장의 주인공이다.

핵심 ATP를 다루는 네 가지 계산과 서술

1. $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_i$, $\Delta G^\circ = -7.3 \text{ kcal/mol} (-30.5 \text{ kJ/mol})$. 에너지는 ‘결합 속’이 아니라 반응 전후 상태의 차이에서 나온다고 쓴다.
2. 포도당(686 kcal/mol)은 큰돈, ATP는 잔돈이다. 포도당 1분자 $\rightarrow$ ATP 약 32개, 효율 약 34 %, 나머지는 열.
3. 회전량 계산: 저장 에너지(kcal) $\div 7.3 = \text{ATP 몰수}$, $\times 507 \text{ g/mol} = \text{질량}$, $\div \text{몸속 ATP 양} = \text{재생 횟수}$. 중간 반올림에 주의한다.
4. 짝지음: 두 반응을 더하면 ΔG 도 더한다. 합이 음수면 진행하며, 효소가 인산 중간 물질로 두 반응을 실제로 엮는다.

스스로 풀어 보기

1. 포도당 1몰의 완전 산화 에너지 686 kcal을 모두 ATP로 담을 수 있다면 ATP는 이론상 몇 몰 만들어지는가? (ATP 7.3 kcal/mol)
2. ATP와 ADP의 구조 차이를 구성 성분으로 설명하라.
3. $\Delta G^\circ = +5.0 \text{ kcal/mol}$ 인 반응을 ATP 1개의 가수분해와 짝지으면 전체 ΔG° 은? 또 $\Delta G^\circ = +9.0 \text{ kcal/mol}$ 인 반응은 ATP 몇 개와 짝지어야 진행할 수 있는가?
4. 몸속 ATP 50 g은 몇 몰이며, 이것이 모두 가수분해될 때 나오는 에너지는 몇 kcal인가? (ATP 507 g/mol, 7.3 kcal/mol)

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 ATP는 4부의 여러 기출에서 바탕이 된다. **기출문제 1**(경희대 2026) (199쪽)의 보기 ㉔ “ATP가 ADP와 무기 인산으로 분해되면서 에너지가 방출됨”은 이 장의 가수분해를 이화로 판정하는 문제이고, **기출문제 12**(인하대 2009) (297쪽)은 포도당이 만든 ATP의 개수와 효율로부터 ATP 1몰의 에너지를 거꾸로 계산하게 한다. **기출문제 7**(연세대 2021) (253쪽)의 생산자·소비자 비교도 ATP가 모든 생물의 공통 화폐라는 데서 출발한다.

이 장의 참고문헌

Lipmann, F. (1941). Metabolic generation and utilization of phosphate bond energy. *Advances in Enzymology and Related Areas of Molecular Biology*, 1, 99–162. <https://doi.org/10.1002/9780470122464.ch4>

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). Macmillan Learning.

제 3장 산화와 환원: 전자를 나르는 NAD⁺

새 개념 산화·환원 · 전자 운반체 NAD⁺·FAD·NADP⁺ · 단계적 산화

이어짐 해당 과정 5장 · TCA 회로 6장 · 전자 전달계 7장 · 명반응 11장

이 장의 개념도

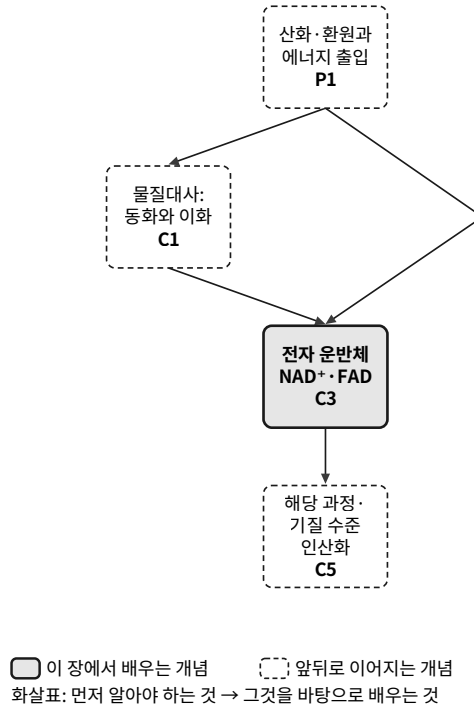


그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C3 전자 운반체 NAD⁺·FAD)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 5 (연세대 2022년) (236쪽)	세포호흡의 산화·환원과 근육의 진화적 해석	C3 전자 운반체 NAD ⁺ ·FAD
기출 11 (서울대 2009년) (286쪽)	물의 광분해와 태양광 전지	C3 전자 운반체 NAD ⁺ ·FAD

모닥불과 세포호흡

같은 산화, 다른 속도

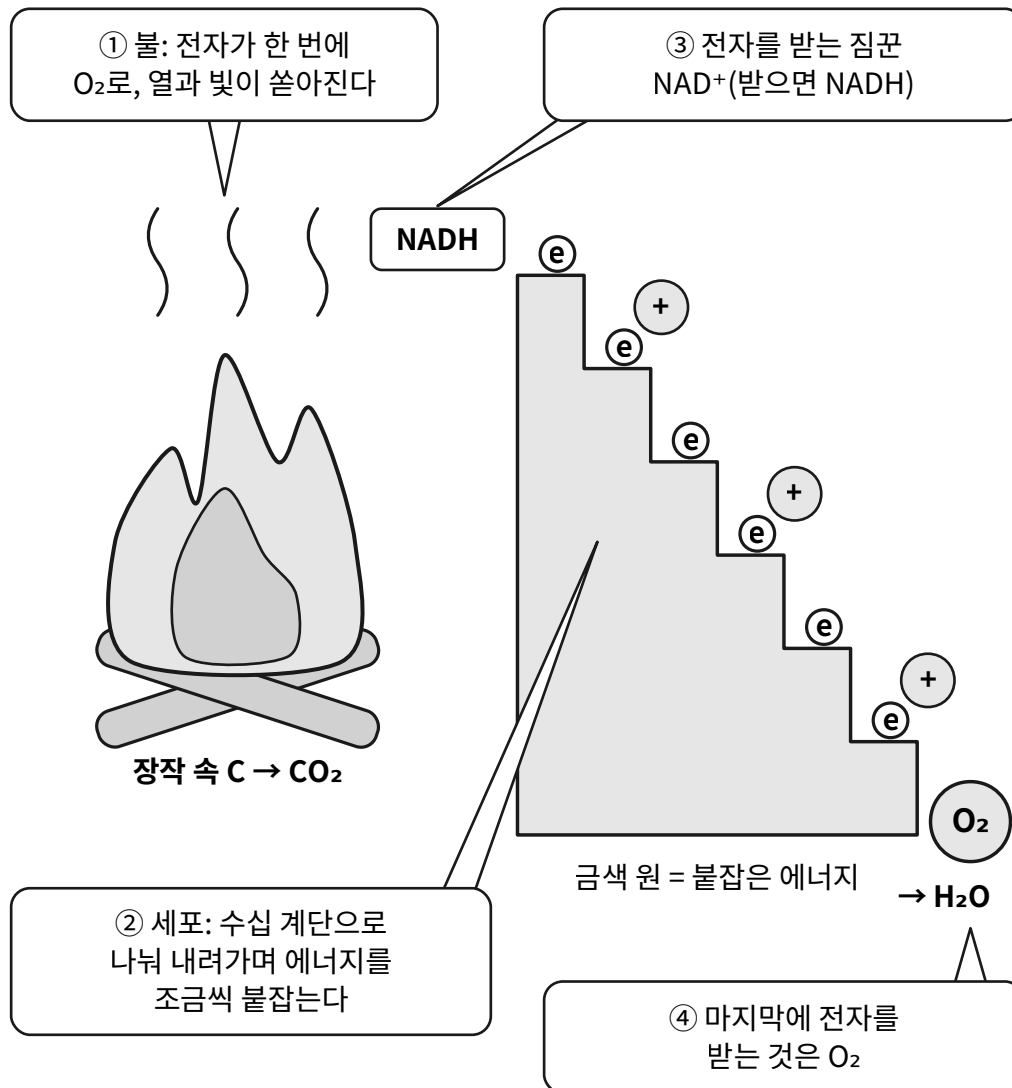


그림 13. 모닥불과 세포호흡 — 같은 산화 반응이 불꽃에서는 한 번에, 세포에서는 계단을 따라 일어나는 장면(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 장작이 타는 연소와 세포호흡은 탄소가 전자를 잃고 산소가 전자를 얻는 같은 산화·환원 반응이다.
2. 세포는 전자를 NAD^+ 같은 운반체에 실어 여러 계단으로 나눠 옮기며 에너지를 조금씩 붙잡는다.
3. NAD^+ 는 받은 전자를 다음 계단에 넘겨주어야 다시 빈 운반체가 되어 일할 수 있다.

이 장의 출발점

- 원자는 양성자와 전자로 이루어지고, 전자를 잃으면 양이온, 얻으면 음이온이 된다는 것(중학교 과학).
- **기본개념편 제 1장** (16쪽)의 세포호흡 반응식 $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ 와 **기본개념편 제 2장** (26쪽)의 ATP.
- 화학 I 의 산화수: 화합물에서 H는 보통 +1, O는 보통 -2, 분자 전체의 산화수 합은 0이다. 처음 보면 이 장의 첫 절에서 다시 설명한다.

과학방 마당 한쪽에서 이모가 겨울 동안 모아 둔 장작으로 작은 모닥불을 피웠다. 태오는 불 앞에서 화학 숙제를 펼쳐 놓고 산화수 문제를 풀다가 막혀 있었다.

태오 교수님, 화학에서는 산화를 ‘산소를 얻는 것’이라고도 하고 ‘전자를 잃는 것’이라고도 해요. 생명과학에서는 또 ‘수소를 잃는 것’이래요. 정의가 세 개나 되니 헷갈려요.

석 교수 셋 다 같은 일을 다른 쪽에서 본 것이다. 오늘은 그 셋을 하나로 묶고, 세포가 왜 이 모닥불처럼 타지 않는지를 보자. 저 불도, 우리 세포도 같은 반응을 하고 있거든.

하린 불이랑 세포가 같은 반응을 한다고요? 세포는 뜨겁지 않잖아요.

석 교수 반응의 처음과 끝은 같은데, 가는 길이 다르다. 그 길을 결정하는 것이 오늘 배울 전자 운반체다.

3.1 산화는 전자를 잃는 것

석 교수 가장 근본적인 정의는 전자다. 어떤 물질이 전자를 잃으면 **산화**, 전자를 얻으면 **환원**이라고 한다. 전자는 사라지지 않으니까, 한 물질이 전자를 잃으면 반드시 다른 물질이 그 전자를 얻는다. 그래서 산화와 환원은 언제나 함께 일어나고, 둘을 묶어 산화-환원 반응이라고 부른다.

이모 그럼 산소를 얻는 건 왜 산화예요?

석 교수 산소는 전자를 아주 세게 끌어당기는 원자다. 탄소가 산소와 결합하면 둘이 함께 쓰는 전자가 산소 쪽으로 쏠려서, 탄소는 전자를 반쯤 빼앗긴 상태가 된다. 그래서 산소를 얻는 것은 사실상 전자를 잃는 것이다. 수소를 잃는 것도 마찬가지야. 수소 원자는 양성자 하나와 전자 하나로 되어 있으니, 수소를 떼어 내면 전자도 함께 떠난다.

하린 아, 세 정의가 모두 ‘전자가 떠난다’로 모이네요.

석 교수 그렇다. 세포 속에서는 특히 세 번째, 수소를 떼어 내는 방식이 많다. 수소를 떼어 내는 효소를 **탈수소 효소**라고 부르는데, 5장과 6장에서 계속 나온다.

태오 그럼 포도당이 산화된다는 걸 숫자로 보일 수 있어요?

석 교수 산화수로 보이면 된다. 포도당 $C_6H_{12}O_6$ 에서 수소 12개는 +1씩, 산소 6개는 -2씩이라고 놓아라. 분자 전체의 합은 0이어야 한다.

태오 수소가 +12, 산소가 -12니까 탄소 여섯 개의 합은 0. 탄소 하나의 평균 산화수는 0이에요.

석 교수 이산화 탄소 CO_2 에서는?

- 태오** 산소 두 개가 -4니까 탄소는 +4요. 그러니까 탄소 하나가 0에서 +4가 되면서 전자를 4개씩 잃어요.
- 석 교수** 좋다. 그럼 산소 쪽은?
- 하린** O₂에서 산소는 홑원소 물질이라 0이고, 물 H₂O에서는 -2예요. 산소 원자 하나가 전자를 2개씩 얻어요.
- 이모** 그럼 지방이 탄수화물보다 열량이 높다는 것도 산화수로 설명돼요? 지방은 1 g에 9 kcal 라던데요.
- 석 교수** 된다. 지방을 이루는 지방산 가운데 흔한 팔미트산 C₁₆H₃₂O₂를 보자. 수소 32개가 +32, 산소 2개가 -4니까 탄소 16개의 합은 -28, 평균 -1.75다. 포도당의 탄소는 평균 0이었지.
- 태오** 그럼 팔미트산의 탄소는 -1.75에서 +4까지 가니까 하나당 5.75개, 포도당 탄소는 4개씩 전자를 잃어요. 지방 쪽 탄소가 내줄 전자가 더 많네요.
- 석 교수** 그래. 지방은 이미 산소를 거의 갖고 있지 않은, 더 많이 환원된 연료라서 산화될 때 내놓는 전자가 많고 그만큼 에너지도 크다. 팔미트산 전체로는 $16 \times 5.75 = 92$ 개의 전자를 내놓고, 이것을 받으려면 O₂가 $92 \div 4 = 23$ 분자 필요하다. 9장에서 팔미트산 한 분자가 ATP를 106개나 만드는 까닭이 여기 있다.
- 석 교수** 다시 포도당으로 돌아가면, 세포호흡에서는 포도당이 산화되고 산소가 환원된다. 전자를 내주는 포도당이 환원제, 전자를 받는 산소가 산화제다. 이 관계를 숫자로 확인하는 문제를 풀어 보자.

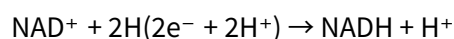
문제 3.1

포도당 1분자가 완전히 산화되어 CO₂ 6분자가 될 때 잃는 전자는 모두 몇 개인가? 세포에서 전자 2개를 한 쌍으로 실어 나르는 운반체가 NADH와 FADH₂라면, 운반체는 모두 몇 개 필요한가? 실제로 포도당 1분자에서 NADH가 10개 생긴다면 FADH₂는 몇 개인가?

- 태오** 탄소 하나가 4개씩 잃으니까 $6 \times 4 = 24$ 개요.
- 하린** 운반체 하나가 2개씩 나르니까 $24 \div 2 = 12$ 개예요.
- 태오** NADH가 10개면 나머지 $12 - 10 = 2$ 개가 FADH₂겠네요.
- 석 교수** 정답이다. 전자 24개, 운반체 12개, 그중 NADH 10개와 FADH₂ 2개다. 이 숫자, NADH 10과 FADH₂ 2는 이 권 내내 되풀이해 나온다. 5장의 해당 과정에서 NADH 2개, 6장의 피루브산 산화에서 2개, TCA 회로에서 6개, 그리고 FADH₂ 2개가 나와서 합이 맞아떨어진다. 지금 전자 수로 미리 맞춰 둔 장부를 그 장들에서 하나씩 확인하게 될 거야.

3.2 전자를 실어 나르는 손님 — NAD⁺와 FAD

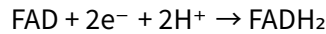
- 이모** 포도당에서 떨어진 전자가 바로 산소로 가는 게 아니군요. 운반체라는 게 따로 있단ियो.
- 석 교수** 전자는 혼자 세포 속을 떠다닐 수 없다. 반드시 어떤 분자에 실려 다녀야 해. 그 짐꾼이 **NAD⁺**다. 니코틴아마이드 아데닌 다이뉴클레오타이드(nicotinamide adenine dinucleotide)의 줄임말인데, 2장에서 본 아데노신 조각에 니코틴아마이드라는 고리가 붙어 있다. 이 니코틴아마이드 고리가 전자를 받는 자리야.



석 교수 탈수소 효소가 기질에서 수소 원자 두 개, 곧 전자 2개와 H⁺ 2개를 떼어 낸다. NAD⁺는 전자 2개와 H⁺ 1개를 받아 NADH가 되고, 남은 H⁺ 1개는 용액으로 나간다. 그래서 교과서에서는 NADH와 H⁺를 함께 써서 ‘NADH + H⁺’라고 하기도 해.

태오 FAD는요?

석 교수 플라빈 아데닌 다이뉴클레오타이드(flavin adenine dinucleotide)다. 전자 2개와 H⁺ 2개를 모두 받아 FADH₂가 된다.



하린 니코틴아마이드랑 플라빈은 처음 들어요.

석 교수 비타민 이름으로는 익숙할 거다. 니코틴아마이드는 비타민 B₃(나이아신)에서, 플라빈은 비타민 B₂(리보플라빈)에서 온다. 사람은 이 고리들을 스스로 충분히 만들지 못해 음식으로 먹어야 해. 나이아신이 오래 모자라면 펠라그라라는 병이 생기는데, 피부염·설사·신경 증상이 나타난다. 세포호흡의 짐꾼이 모자라는 병이라고 보면 된다.

이모 비타민이 에너지를 준다는 광고가 그 뜻이었군요. 비타민 자체가 에너지가 아니라 짐꾼의 재료라는 거죠?

석 교수 정확하다. 비타민 B군은 열량이 거의 없고, 에너지를 꺼내는 일을 돕는 도구의 재료다. 그리고 광합성에는 NAD⁺와 거의 같은 짐꾼이 하나 더 있다. NAD⁺에 인산기가 하나 더 붙은 **NADP⁺**다. NADPH는 주로 동화, 곧 무언가를 만드는 쪽에 전자를 대 준다. 세 운반체를 표 8에 비교했다.

표 8. 세 전자 운반체의 비교 — 받는 전자와 H⁺, 환원형, 주로 일하는 곳

운반체	받는 것	환원형	주로 일하는 곳	하는 일
NAD ⁺	전자 2개 + H ⁺ 1개	NADH	세포질(해당 과정), 미토콘드리아 기질(TCA 회로)	이화에서 전자를 받아 전자 전달계로 넘김
FAD	전자 2개 + H ⁺ 2개	FADH ₂	미토콘드리아(숙신산 탈수소 효소에 붙어 있음)	TCA 회로의 한 단계에서 전자를 받아 전자 전달계로 넘김
NADP ⁺	전자 2개 + H ⁺ 1개	NADPH	엽록체 스트로마 쪽(명반응 끝)	빛으로 끌어올린 전자를 캘빈 회로 같은 동화에 공급

운반체가 전자를 받는 것을 눈으로 보는 실험

태오 전자가 운반체로 옮겨 가는 걸 직접 볼 수도 있어요?

석 교수 색이 바뀌는 물질을 쓰면 된다. 메틸렌 블루는 산화된 상태에서는 파랑고, 전자를 받아 환원되면 무색이 된다. 이걸 인공 전자 운반체로 쓰는 고전 실험이 있다. 시험관 세 개를 준비하자. A에는 효모와 포도당과 메틸렌 블루, B에는 끓여서 식힌 효모와 포도당과 메틸렌 블루, C에는 효모와 메틸렌 블루만 넣는다. 공기가 들어가지 않게 위를 기름으로 덮고 따뜻한 물에 담가 둔다.

하린 결과를 예상해 볼게요. A는 효모가 포도당을 산화시키면서 떼어 낸 전자가 메틸렌 블루로 가니까 색이 빠질 것 같아요.

석 교수 맞다. 실제로 A는 몇십 분 안에 파란색이 빠진다. B와 C는?

태오 B는 끓여서 효소가 망가졌으니 그대로 파랑고, C는 포도당이 없으니… 역시 파랑거나, 아주 천천히 빠지겠네요. 효모 속에 원래 남아 있던 양분이 조금 있을 테니까요.

석 교수 아주 좋은 예상이다. C에서 색이 조금 빠진다면 그건 효모가 몸속에 갖고 있던 양분을 쓴 것이고, 그래서 C가 필요한 거야. B는 ‘효소가 있어야 한다’를, C는 ‘포도당이 전자의 출처다’를 보여 주는 대조군이다. 그리고 하나 더, 색이 빠진 A를 흔들어 공기를 넣으면 다시 파래진다.

이모 왜요? 다시 산화된 거예요?

석 교수 그렇다. 환원된 메틸렌 블루가 공기 중 산소에 전자를 넘겨주고 다시 파란 산화형으로 돌아온다. 이 한 실험에 오늘의 이야기가 다 들어 있다. 포도당에서 전자가 나오고, 운반체가 그 전자를 받아 환원되고, 산소가 있으면 운반체가 전자를 넘겨주고 다시 빈 운반체가 된다. 세포 속 진짜 운반체인 NAD^+ 도 이와 똑같이 행동해.

3.3 모닥불과 세포호흡 — 한꺼번에와 계단식

석 교수 이제 불 이야기로 돌아가자. 모닥불에서 나무 속 탄소의 전자는 산소에게 곧바로 넘어간다. 그 사이에 아무 단계도 없으니 에너지가 한 번에 열과 빛으로 쏟아진다. 세포에서는 전자가 먼저 NAD^+ 로, 그다음 여러 단백질을 거쳐, 마지막에야 산소로 간다. **그림 14**가 두 길을 나란히 그린 것이다.

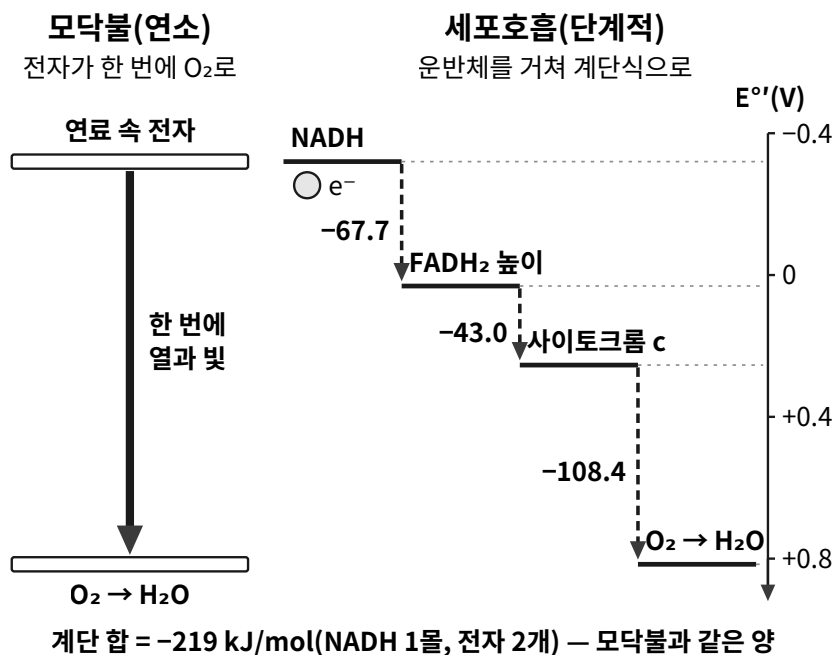


그림 14. 모닥불과 세포호흡의 에너지 계단 — 연소에서는 전자가 한 번에 산소로 떨어지고, 세포에서는 $NADH(-0.32 \text{ V})$ 에서 $O_2(+0.82 \text{ V})$ 까지 표준 환원 전위의 계단을 여러 번 나눠 내려간다(전위 값은 pH 7 표준값, 계단 수는 줄여서 그림)

이모 그런데 설탕 봉지를 공기 중에 두어도 불이 붙지는 않잖아요. 산소가 있는데 왜 저절로 안 타요?

석 교수 반응이 시작되려면 넘어야 하는 문턱, 활성화 에너지가 있기 때문이다. 모닥불은 성냥의 높은 온도로 그 문턱을 한꺼번에 넘기고, 그다음은 스스로 내는 열로 계속 넘는다. 세포는 온도를 올리는 대신 효소로 문턱을 낮추고, 그 낮은 문턱을 여러 개 만들어 한 칸씩 내려가게 한다. 그래서 37°C 에서도 반응이 빠르게, 그러나 통제된 채로 일어난다.

하린 계단 옆의 V는 뭐예요? 전지에 쓰는 볼트요?

- 석 교수** 그래, 전압 단위다. 이 값을 **표준 환원 전위** E° 라고 하는데, 어떤 물질이 전자를 얼마나 세게 끌어당기는지를 나타낸다. 값이 클수록, 곧 양수 쪽일수록 전자를 세게 당긴다. 전자는 언제나 E° 이 낮은 쪽에서 높은 쪽으로, 그림에서는 위에서 아래로 흐른다. NADH는 -0.32 V 로 전자를 잘 내놓는 쪽이고, 산소는 $+0.82\text{ V}$ 로 전자를 가장 세게 끌어당긴다.
- 태오** 그럼 전위 차이로 에너지를 계산할 수 있겠네요. 화학 시간에 $\Delta G = -nFE$ 를 배웠어요.
- 석 교수** 바로 그 식이다. n 은 옮기는 전자 몰수, F 는 패러데이 상수 $96,485\text{ C/mol}$, ΔE° 은 받는 쪽과 주는 쪽의 전위 차이다. NADH에서 O_2 로 전자 2개가 옮겨 갈 때를 계산해 보라. 산소의 전위는 정말하게는 $+0.816\text{ V}$ 다.
- 태오** $\Delta E^{\circ} = 0.816 - (-0.32) = 1.136\text{ V}$. $\Delta G^{\circ} = -2 \times 96,485 \times 1.136 = -219,200\text{ J/mol}$, 그러니까 -219 kJ/mol 이에요.
- 이모** kcal로요?
- 태오** $1\text{ kcal} = 4.184\text{ kJ}$ 니까 $219 \div 4.184 = 52.4\text{ kcal/mol}$ 이요.
- 석 교수** 맞다. NADH 한 분자가 산소에 전자를 넘길 때 52.4 kcal/mol , ATP 가수분해 7.3 kcal/mol 의 7배쯤 되는 에너지가 나온다. 이걸 한 번에 쓰려면 ATP 하나 만들고 나머지는 열이 되겠지. 그런데 계단을 셋으로 나누면 어떨까? 그림의 계단은 NADH -0.32 V , FADH_2 가 들어오는 높이 $+0.03\text{ V}$, 사이토크롬 c $+0.25\text{ V}$, 산소 $+0.82\text{ V}$ 다.
- 하린** 첫 계단은 0.35 V , 둘째는 0.22 V , 셋째는 0.57 V 예요.
- 태오** 각각 $-2 \times 96,485 \times 0.351 = -67.7\text{ kJ}$, $-2 \times 96,485 \times 0.223 = -43.0\text{ kJ}$, $-2 \times 96,485 \times 0.562 = -108.4\text{ kJ}$ 이에요. 더하면 -219 kJ 로 같아요.
- 석 교수** 그래. 계단을 나눠도 전체 에너지는 같고, 계단 하나하나가 ATP 한 분자를 만드는 데 드는 30.5 kJ/mol 보다 크다. 그래서 단계마다 에너지를 붙잡아 쓸 수 있다. 실제로 세포는 이 계단에서 ATP를 바로 만들지 않고, H^+ 를 막 너머로 퍼 올리는 데 쓴다. 그 이야기는 7장과 8장의 몫이다.

문제 3.2

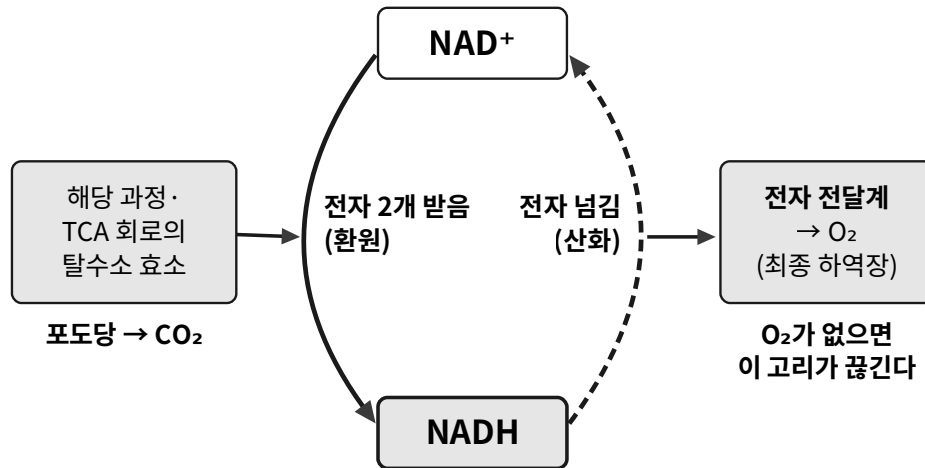
문제 3.1의 전자 24개를 마지막에 받는 것은 O_2 이다. 산소 원자 하나는 전자 2개를 받아 -2 가 된다. 전자 24개를 받으려면 O_2 분자가 몇 개 필요한가? 이 수를 세포호흡 반응식의 계수와 비교하라.

- 하린** 산소 원자 하나가 전자 2개니까 O_2 분자 하나는 4개를 받아요. $24 \div 4 = 6$ 분자예요.
- 태오** 반응식의 6O_2 와 똑같네요! 그리고 받은 전자는 H^+ 와 만나서 물이 되니까 $6\text{O}_2 + 24\text{e}^- + 24\text{H}^+ \rightarrow 12\text{H}_2\text{O}$ 예요.
- 석 교수** 정답이다. O_2 6분자이고, 반응식의 계수 6과 일치한다. 그런데 태오가 쓴 식에서는 물이 12분자 생기는데, 1장의 반응식에는 $6\text{H}_2\text{O}$ 라고 되어 있었지. 왜 다를까?
- 태오** 음... 반응식이 틀린 건 아닐 테고요.
- 석 교수** 반응식의 양변에 물이 6분자씩 숨어 있다. 세포호흡 도중에 TCA 회로 같은 단계에서 물 6분자가 반응물로 쓰이고, 산소가 환원되며 물 12분자가 생긴다. 양변에서 6분자씩 지우면 1장의 식이 된다. 정말하게 쓰면 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ 이다. 이 사실이 6장 문제 6.2의 ^{18}O 추적 실험에서 다시 중요해진다.

3.4 운반체는 다시 써야 한다

이모 그럼 NADH는 전자를 받아서 어디로 가져가요?

석 교수 미토콘드리아 내막에 있는 전자 전달계로 가져가서 넘겨준다. 넘겨주고 나면 다시 빈 운반체 NAD^+ 가 되어 포도당 쪽으로 돌아온다. **그림 15**의 고리다.



빈 운반체(NAD^+)가 돌아와야 다시 전자를 받을 수 있다

그림 15. $\text{NAD}^+ \rightleftharpoons \text{NADH}$ 순환 — 해당 과정·TCA 회로의 탈수소 효소에서 전자를 받아 NADH가 되고, 전자 전달계에 전자를 넘겨 다시 NAD^+ 가 된다. 산소가 없으면 오른쪽 고리가 끊긴다(모식도)

하린 ATP-ADP 순환이랑 모양이 똑같아요.

석 교수 그렇다. 2장에서 ATP는 잔고가 적고 빨리 돈다고 했지. NAD^+ 도 마찬가지로 세포 속에 아주 적은 양만 있다. 그래서 받은 전자를 내려놓지 못하면 금방 모든 NAD^+ 가 NADH로 바뀌어 버리고, 빈 짐꾼이 없어진다.

태오 빈 짐꾼이 없으면 포도당에서 전자를 떼어 낼 수 없으니까, 포도당 산화가 멈추겠네요.

석 교수 그게 바로 산소가 없을 때 벌어지는 일이다. 산소가 없으면 전자 전달계의 끝이 막혀 NADH가 전자를 내려놓지 못하고, NAD^+ 가 바닥나서 NAD^+ 가 필요한 반응이 줄줄이 멈춘다. 그래서 세포는 비상수단으로 피루브산에 전자를 떠넘겨 NAD^+ 를 되찾는다. 그게 10장의 발효야. 오늘은 “운반체는 받은 만큼 내려놓아야 다시 쓸 수 있다”는 문장 하나만 확실히 가져가자.

이모 택배 기사님이 짐을 내려놓지 못하면 다음 짐을 못 싣는 거랑 같네요.

석 교수 그렇다. 그리고 그 택배 기사가 마지막에 짐을 내려놓는 곳이 산소다. 우리가 숨을 쉬어야 하는 진짜 이유는 이것이다. 산소는 연료가 아니라 전자의 마지막 하역장이다.

핵심 세포호흡을 산화·환원으로 읽는 4단계

1. 산화 = 전자를 잃음(산소를 얻음, 수소를 잃음), 환원 = 전자를 얻음. 둘은 언제나 함께 일어난다.
2. 산화수로 확인한다: 포도당의 탄소 0 → CO₂의 탄소 +4(탄소당 전자 4개, 포도당당 24개), O₂의 산소 0 → H₂O의 산소 -2.
3. 전자는 NAD⁺(→ NADH)와 FAD(→ FADH₂)에 2개씩 실려 옮겨진다: NADH 10 + FADH₂ 2 = 12쌍.
4. 전자는 E°이 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 계단식으로 내려가고, $\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ$ 로 계산한다 (NADH → O₂: -219 kJ/mol).
5. 운반체는 전자를 내려놓아야 다시 쓰인다. 최종 하역장은 O₂이고, O₂가 없으면 NAD⁺가 바닥난다.

스스로 풀어 보기

1. 다음 두 반응에서 산화되는 물질과 환원되는 물질을 쓰라. (가) $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ (나) 피루브산 + NADH + H⁺ → 젖산 + NAD⁺
2. 에탄올 C₂H₅OH에서 탄소의 평균 산화수를 구하고, 에탄올 1분자가 CO₂로 완전히 산화될 때 잃는 전자 수와 필요한 O₂ 분자 수를 구하라.
3. FADH₂의 전자가 들어오는 높이(+0.03 V)에서 O₂(+0.816 V)까지 전자 2개가 내려갈 때 ΔG° 를 구하고, NADH의 경우(-219 kJ/mol)와 비교하라. (F = 96,485 C/mol)
4. 메틸렌 블루 실험에서 끓인 효모를 넣은 시험관과 포도당을 넣지 않은 시험관은 각각 무엇을 확인하기 위한 대조군인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 산화·환원 읽기는 4부의 **기출문제 5**(연세대 2022) (236쪽)에서 가장 직접 쓰인다. 그 문제의 1-2는 해당 과정·피루브산 산화·TCA 회로·전자 전달계의 각 단계를 “무엇이 산화되고 무엇이 환원되는가”로 서술하게 하는데, 이 장의 산화수 계산과 NAD⁺·FAD의 반응식이 답안의 뼈대가 된다. **기출문제 8**(연세대 2021) (260쪽)의 핵심인 “산소가 없으면 NAD⁺가 재생되지 않는다”는 논리는 이 장의 마지막 절에서 시작되고, **기출문제 11**(서울대 2009) (286쪽)의 물의 광분해는 이 장의 계단을 빛이 거꾸로 밀어 올리는 장면으로 **기본개념편 제 11장** (111쪽)에서 다시 다룬다.

이 장의 참고문헌

Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., Jr., & Stryer, L. (2019). Biochemistry (9th ed.). W. H. Freeman.
Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). Lehninger principles of biochemistry (8th ed.). Macmillan Learning.
Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). Campbell biology (12th ed.). Pearson.

제 4장 두 발전소: 미토콘드리아와 엽록체

새 개념 외막·내막·막 사이 공간·기질 · 틸라코이드·스트로마 · 반응의 자리

이어짐 세포막 수송(선수) · TCA 회로 6장 · 화학 삼투 8장 · 명반응 11장 · 세포내 공생설 13장

이 장의 개념도

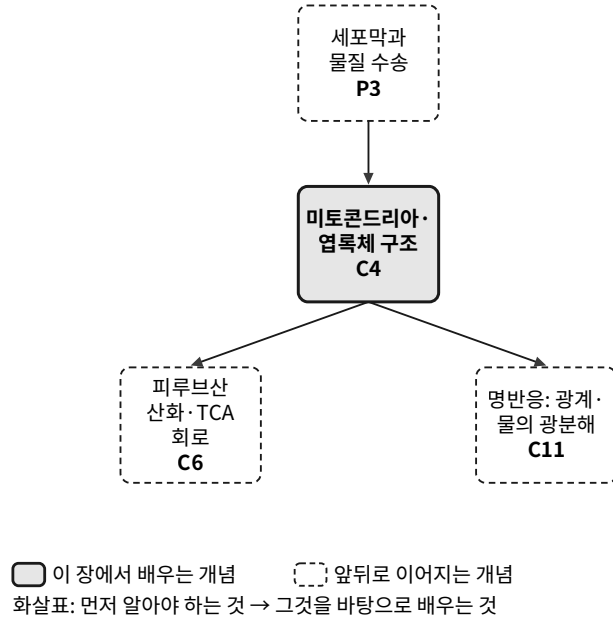


그림 16. 제 4장에서 배우는 개념(C4 미토콘드리아·엽록체 구조)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 6 (연세대 2021년) (246쪽)	가장 오래되고 보편적인 ATP 합성 방식	C4 미토콘드리아·엽록체 구조
기출 9 (연세대 2020년) (268쪽)	막 수송으로 설명하는 화학 삼투	C4 미토콘드리아·엽록체 구조
기출 10 (고려대 2013년) (276쪽)	두 양성자 펌프와 세포 연구 방법	C4 미토콘드리아·엽록체 구조

시금치 잎 한 장 속의 두 발전소

잎 → 잎살 세포 → 엽록체와 미토콘드리아

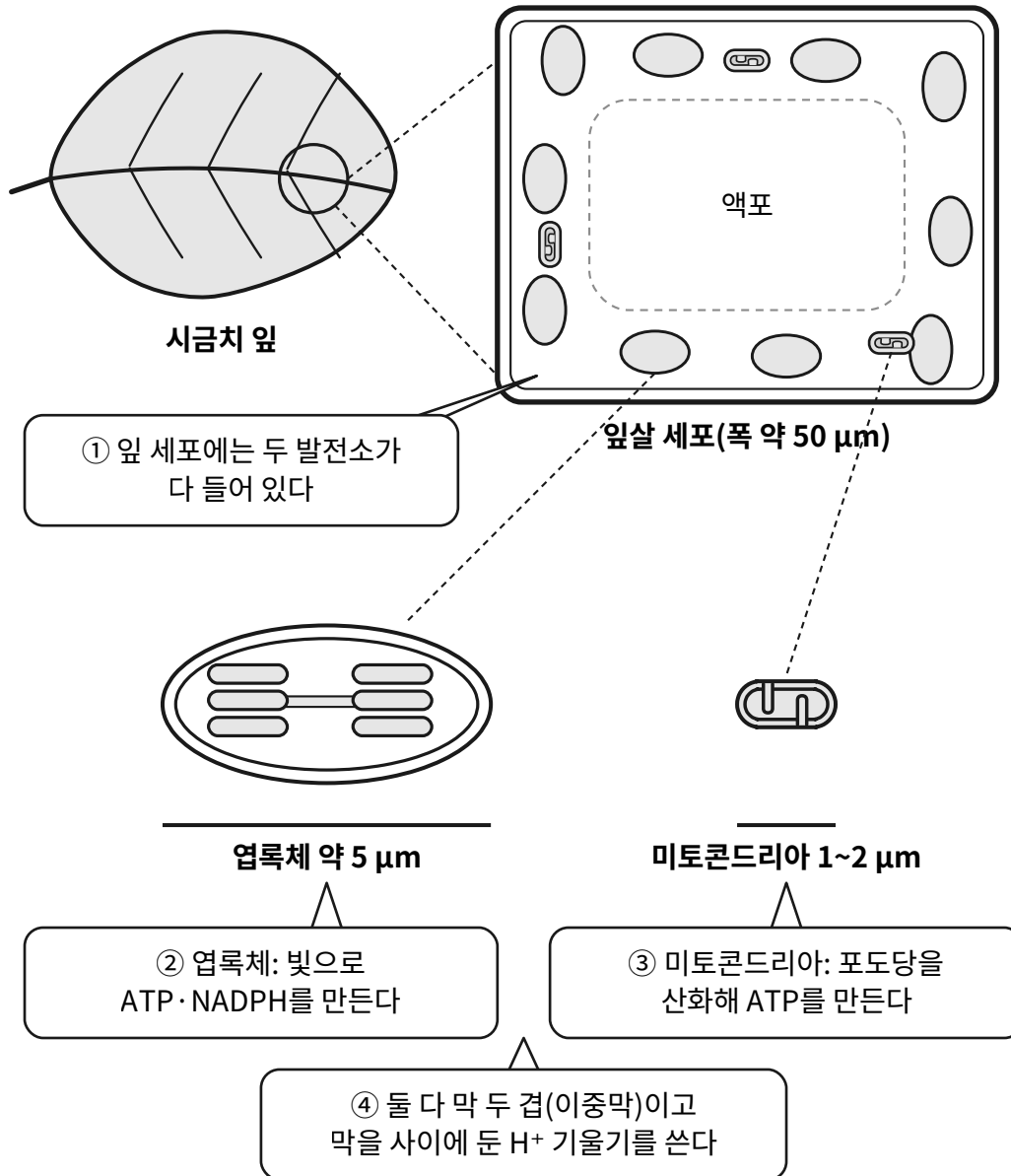


그림 17. 시금치 잎 한 장 속의 두 발전소 — 잎에서 잎살 세포로, 세포에서 엽록체와 미토콘드리아로 확대해 들어가는 장면(모식도, 크기는 어림값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 식물의 잎살 세포는 엽록체와 미토콘드리아를 함께 가진다.
2. 두 소기관은 막으로 칸이 나뉘어 있어 반응마다 일어나는 자리가 정해진다.
3. 두 소기관 모두 막을 사이에 둔 H⁺ 농도 기울기로 ATP를 만든다.

이 장의 출발점

- 세포막은 인지질 이중층이고, 산소·이산화 탄소처럼 작고 전하가 없는 분자는 잘 통과하지만 이온은 통과하기 어렵다는 것.
- 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 가는 확산과, 에너지를 써서 거꾸로 퍼 올리는 능동 수송.
- 동물 세포와 식물 세포의 소기관 이름(핵, 미토콘드리아, 엽록체, 세포벽, 액포) — 중학교 과학 수준.
- **기본개념편 제 3장 (35쪽)의 NAD⁺와 전자 운반.**

이모가 시장에서 사 온 시금치 한 단을 탁자에 내려놓았다. 석 교수는 그중 잎 하나를 떼어 얇게 벗긴 껍질과 잎살 조각을 현미경 받침유리에 올렸다.

이모 교수님, 시금치는 광합성을 하니까 엽록체만 있는 거죠? 미토콘드리아는 동물 세포에 있는 거고요.

석 교수 중학교 그림에서 그렇게 기억하는 사람이 많다. 그런데 식물 세포에도 미토콘드리아가 있다. 식물도 밤에는 빛이 없으니 낮에 만든 당을 태워 ATP를 얻어야 하고, 낮에도 뿌리나 줄기처럼 빛이 닿지 않는 세포는 미토콘드리아로만 살아간다.

하린 그럼 잎 세포 하나에는 발전소가 두 종류 다 있는 거예요?

석 교수 그렇다. 오늘은 그 두 발전소의 건물 구조를 볼 거다. 3장에서 전자가 계단을 내려간다고 했는데, 그 계단은 허공에 있는 게 아니라 막 위에 붙어 있다. 막이 어디에 있고 그 막이 무엇과 무엇을 가르는지를 알아야, 5장부터 나오는 모든 반응을 ‘어디서’ 일어나는지와 함께 기억할 수 있어.

4.1 세포 지도 — 반응에는 자리가 있다

석 교수 세포를 지도로 보자. 세포막 안쪽은 크게 세포질이라는 액체와, 그 속에 떠 있는 막으로 싸인 소기관들로 나뉜다. 포도당이 세포에 들어와 처음 쪼개지는 해당 과정은 세포질에서 일어난다. 그다음 단계들은 미토콘드리아 안으로 들어가서 일어나고, 광합성은 엽록체 안에서 일어난다.

태오 왜 굳이 나뉘요? 한 그릇에서 다 하면 편할 것 같은데요.

석 교수 이유가 세 가지 있다. 첫째, 한 반응에 필요한 효소들을 좁은 칸에 모아 두면 반응이 빨라진다. 둘째, 서로 반대 방향의 반응, 예를 들어 당을 만드는 반응과 당을 분해하는 반응을 다른 칸에 두면 서로 방해하지 않는다. 셋째, 가장 중요한 이유인데, 막으로 칸을 나뉘야 막 양쪽에 농도 차이를 만들 수 있다. 8장에서 보겠지만, 그 농도 차이가 ATP를 만드는 원동력이다.

하린 그럼 미토콘드리아가 없는 세균은 어떻게 해요? 세균도 산소로 숨을 쉬는 종류가 있잖아요.

석 교수 좋은 질문이다. 세균에는 막으로 싸인 소기관이 없지만, 산소로 호흡하는 세균은 자기 세포막에 전자 전달계와 ATP 합성 효소를 박아 두고 H⁺를 세포 바깥으로 퍼낸다. 세포막 자체가 미토콘드리아 내막 노릇을 하는 거지. 해당 과정은 세균에서도 세포질에서 일어난다. 이 사실이 13장에서 미토콘드리아의 기원을 추론할 때 중요한 단서가 된다.

태오 결국 ‘막 하나를 사이에 두고 H⁺를 퍼 올린다’는 건 세균이든 사람이든 같은 거네요.

석 교수 그래. 막의 이름만 다를 뿐 원리는 하나다.

하린 그럼 반응마다 주소가 있는 거네요.

석 교수 그렇다. 이 권의 반응들의 주소를 표 10에 미리 모아 두었다. 지금은 다 외우지 않아도 되고, 장을 지날 때마다 이 표로 돌아와 확인하면 된다.

표 10. 반응 자리 지도 — 이 권에서 다루는 여섯 과정의 장소와 들어가는 것·나오는 것

과정	장소	들어가는 것	나오는 것	다루는 장
해당 과정	세포질	포도당, ATP 2, NAD ⁺	피루브산 2, ATP 4, NADH 2	5장
피루브산 산화	미토콘드리아 기질	피루브산, NAD ⁺ , 조효소 A	아세틸 CoA, CO ₂ , NADH	6장
TCA 회로	미토콘드리아 기질	아세틸 CoA, NAD ⁺ , FAD, ADP	CO ₂ , NADH, FADH ₂ , ATP	6장
산화적 인산화	미토콘드리아 내막	NADH, FADH ₂ , O ₂ , ADP + Pi	NAD ⁺ , FAD, H ₂ O, ATP	7·8장
명반응	엽록체 틸라코이드 막	빛, H ₂ O, NADP ⁺ , ADP + Pi	O ₂ , NADPH, ATP	11장
캘빈 회로	엽록체 스트로마	CO ₂ , ATP, NADPH	포도당(G3P), ADP, NADP ⁺	12장

문제 4.1

다음 여섯 반응이 일어나는 장소를 쓰라. (1) 해당 과정 (2) 피루브산 산화 (3) TCA 회로 (4) 전자 전달 (5) 물의 광분해 (6) CO₂ 고정

하린 표를 보면서 쓸게요. (1) 세포질, (2) 미토콘드리아 기질, (3) 기질, (4) 미토콘드리아 내막 이에요.

태오 (5) 물의 광분해는 명반응이니까 틸라코이드 막이고, (6) CO₂ 고정은 캘빈 회로니까 스트로마예요.

석 교수 맞다. 하나만 덧붙이자. 물의 광분해는 틸라코이드 막에 박힌 광계 II가 하는데, 물을 쪼개는 자리는 막의 안쪽, 곧 틸라코이드 내부를 향하고 있다. 그래서 물에서 나온 H⁺와 O₂는 틸라코이드 내부에 생긴다. 정답은 (1) 세포질 (2) 미토콘드리아 기질 (3) 기질 (4) 내막 (5) 틸라코이드 막(내부 쪽) (6) 스트로마다. (5)의 ‘내부 쪽’은 11장과 4부의 질소 고정 문제에서 결정적인 단서가 된다.

반응의 자리를 실험으로 찾다

태오 그런데 이런 주소는 어떻게 알아냈어요? 현미경으로 보면 효소가 보이지는 않을 텐데요.

석 교수 세포를 부셔서 무게대로 나누는 실험으로 알아냈다. 세포 분획법이라고 해. 쥐의 간을 갈아 세포를 부순 뒤 원심 분리기에 넣고 돌리는 속도를 차례로 높이면, 무겁고 큰 것부터 바닥에 가라앉는다. 핵이 먼저, 그다음 미토콘드리아, 그다음 더 작은 막 조각들이 가라앉고, 끝까지 위에 남는 맑은 액체가 세포질의 액체 부분이다.

하린 그다음엔 칸마다 따로 실험하는 거예요?

- 석 교수** 그래. 1940년대 말 실험의 줄거리를 단순하게 정리하면 이렇다. 미토콘드리아 칸에 포도당을 넣으면 산소를 거의 쓰지 않는데, 피루브산이나 숙신산 같은 중간 물질을 넣으면 산소를 많이 쓰고 ATP를 만든다. 반대로 맑은 액체 칸에 포도당을 넣으면 산소 없이도 포도당이 피루브산과 젖산으로 바뀐다.
- 태오** 그럼 포도당을 피루브산까지 쪼개는 효소는 세포질에, 피루브산을 끝까지 산화하고 산소를 쓰는 효소는 미토콘드리아에 있다는 결론이네요.
- 석 교수** 정확하다. 이 실험에서 무엇을 대조로 두어야 할까?
- 이모** 아무것도 넣지 않은 미토콘드리아 칸이요. 넣은 물질 때문에 산소를 쓰는 건지, 원래 산소를 쓰는 건지 알아야 하니까요.
- 석 교수** 아주 좋다. 기질을 넣지 않은 칸을 대조로 두고, 넣은 물질만 바꿔 가며 산소 소비를 비교한다. 이렇게 ‘어디에 무엇을 넣었을 때 무엇이 일어나는가’를 표로 읽는 것이 반응의 자리를 묻는 논술 문제의 기본 틀이다.

4.2 미토콘드리아 — 막 두 장과 칸 두 개

- 석 교수** 이제 첫 번째 발전소다. **그림 18**를 보자. 미토콘드리아는 길쭉한 콩 모양으로, 대개 지름 0.5~1 μm , 길이 1~2 μm 정도다. 막이 두 장, 바깥의 외막과 안쪽의 내막이 있고, 두 막 사이의 좁은 틈이 **막 사이 공간**, 내막 안쪽을 채운 진한 액체가 **기질**이다.

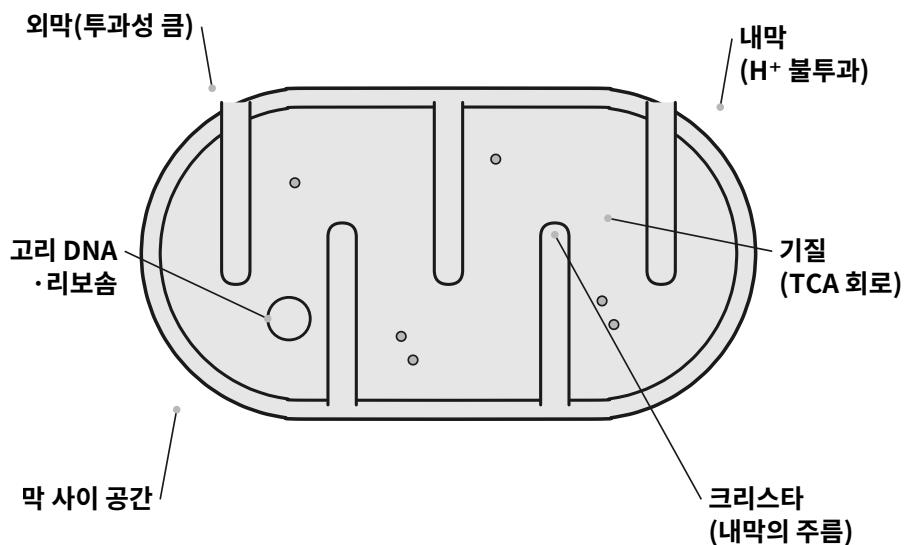


그림 18. 미토콘드리아의 단면 — 투과성이 큰 외막과 H^+ 가 통과하지 못하는 내막, 내막이 접혀 들어간 크리스타, 두 막 사이의 막 사이 공간과 내막 안쪽의 기질(모식도)

- 하린** 안쪽 막이 꼬불꼬불 접혀 있네요.
- 석 교수** 그 주름을 **크리스타**라고 한다. 1950년대에 전자 현미경으로 미토콘드리아를 얇게 잘라 보면서 처음 분명히 보였다. 두 막은 성질이 아주 다르다. 외막에는 구멍 뚫린 단백질이 많아서 작은 분자와 이온은 대부분 지나간다. 그래서 막 사이 공간의 작은 분자 조성은 세포질과 비슷해. 반면 내막은 아주 까다롭다. 특히 H^+ 같은 이온은 내막의 인지질 이중층을 거의 지나가지 못한다.
- 태오** 이온은 왜 인지질을 못 지나가요?

석 교수 인지질 이중층의 가운데는 지방산 꼬리가 모인 기름층이다. 전하를 띤 이온은 물 분자에 둘러싸여 있어야 안정한데, 기름층 속으로 들어가려면 그 물 껍질을 벗어야 하니 에너지가 많이 든다. 그래서 H^+ 는 막을 그냥 지나지 못하고, 막에 박힌 특정한 단백질을 통해서만 오갈 수 있다. 이게 8장 화학 삼투의 첫 번째 전제다.

이모 내막은 그냥 벽이 아니라 단백질이 많이 박힌 벽이겠네요.

석 교수 그렇다. 내막에는 7장의 전자 전달계 단백질과 8장의 ATP 합성 효소가 뽕뽕이 박혀 있고, 단백질의 비율이 다른 생체막보다 훨씬 높다. 기질에는 6장의 TCA 회로 효소들과 미토콘드리아 자신의 DNA, 리보솜이 있다.

하린 그런데 내막은 왜 저렇게 주름져 있어요?

석 교수 그건 계산으로 보자.

문제 4.2

미토콘드리아를 지름 $0.5\ \mu\text{m}$, 길이 $2.0\ \mu\text{m}$ 인 원통으로 본다. (1) 외막의 면적(옆면 + 양 끝면)을 구하라. (2) 크리스타 때문에 내막 면적이 외막의 5배라면 내막 면적은? (3) 이 결과가 전자 전달계와 ATP 합성 효소에 대해 뜻하는 바를 한 문장으로 쓰라.

태오 원통 옆면은 둘레 $\times$ 길이니까 $\pi \times 0.5 \times 2.0 = 3.14\ \mu\text{m}^2$ 예요. 끝면은 반지름 0.25 니까 $\pi \times 0.25^2 = 0.196$, 두 개면 $0.39\ \mu\text{m}^2$. 합하면 $3.53\ \mu\text{m}^2$ 요.

하린 내막은 5배니까 $3.53 \times 5 = 17.7\ \mu\text{m}^2$ 예요.

석 교수 둘 다 맞다. (3)은?

태오 내막 면적이 넓을수록 전자 전달계와 ATP 합성 효소를 더 많이 박을 수 있으니까, 같은 부피의 미토콘드리아가 ATP를 더 많이 만들 수 있어요.

석 교수 정답이다. 외막 $3.53\ \mu\text{m}^2$, 내막 $17.7\ \mu\text{m}^2$ 이고, 주름은 같은 부피 안에 막 면적을 늘려 전자 전달계와 ATP 합성 효소가 놓일 자리를 늘린다. 4부의 **기출문제 9**(연세대 2020) (268 쪽) 제시문 [마]도 “내막 구조가 생긴 이유는 전자 전달계가 작용하기 위한 넓은 면적의 막이 필요하기 때문”이라고 이 점을 짚는다. 실제로 심장 근육처럼 ATP를 많이 쓰는 세포의 미토콘드리아는 크리스타가 더 촘촘하다.

이모 세포 하나에 미토콘드리아는 몇 개나 있어요?

석 교수 세포마다 크게 다르다. 간세포 하나에는 1,000개 안팎이 들어 있다고 알려져 있고, 에너지를 많이 쓰는 근육·신경 세포에도 많다. 반면 사람의 적혈구에는 미토콘드리아가 아예 없어서 해당 과정만으로 ATP를 얻는다. 적혈구가 나르는 산소를 자기가 써 버리지 않게 된 셈이지.

현미경으로 두 발전소 찾기

하린 지금 현미경으로 보면 미토콘드리아도 보여요?

석 교수 시금치 잎살 세포를 광학 현미경으로 보면 초록색 알갱이, 곧 엽록체는 수십 개씩 뚜렷이 보인다. 엽록소가 스스로 색을 띠고 있고 크기도 $5\ \mu\text{m}$ 남짓으로 크니까. 그런데 미토콘드리아는 $1\ \mu\text{m}$ 안팎이라 광학 현미경의 한계에 가깝고, 색도 없어서 그냥은 잘 안 보인다.

태오 그럼 염색해야겠네요.

석 교수 야누스 그린 B라는 염색약이 오래 쓰였다. 살아 있는 세포에 넣으면 세포질에서는 환원되어 색이 빠지는데, 미토콘드리아 안에서는 전자 전달계의 효소가 이 염색약을 산화된 상태로 붙잡아 두어서 청록색 점으로 남는다. 3장의 메틸렌 블루처럼 색으로 산화·환원을 보는 원리를, 이번에는 소기관의 위치를 찾는 데 쓴 거지.

이모 염색약 하나에도 오늘 배운 게 다 들어 있네요. 효소가 있는 곳만 색이 남는다니까요.

석 교수 그렇다. 다만 내막·크리스타 같은 내부 구조는 광학 현미경으로는 볼 수 없고, 빛 대신 전자선을 쓰는 전자 현미경으로 얇게 자른 단면을 봐야 보인다. 오늘 그림들이 바로 그 전자 현미경 사진들을 바탕으로 그린 모식도다.

4.3 엽록체 — 막 세 겹과 칸 세 개

석 교수 두 번째 발전소는 엽록체다. **그림 19**를 보자. 크기는 대개 길이 5 μm 남짓으로 미토콘드리아보다 크다. 미토콘드리아처럼 바깥에 이중막이 있는데, 그 안에 막이 한 겹 더 있다. 납작한 동전 주머니처럼 생긴 **틸라코이드**다.

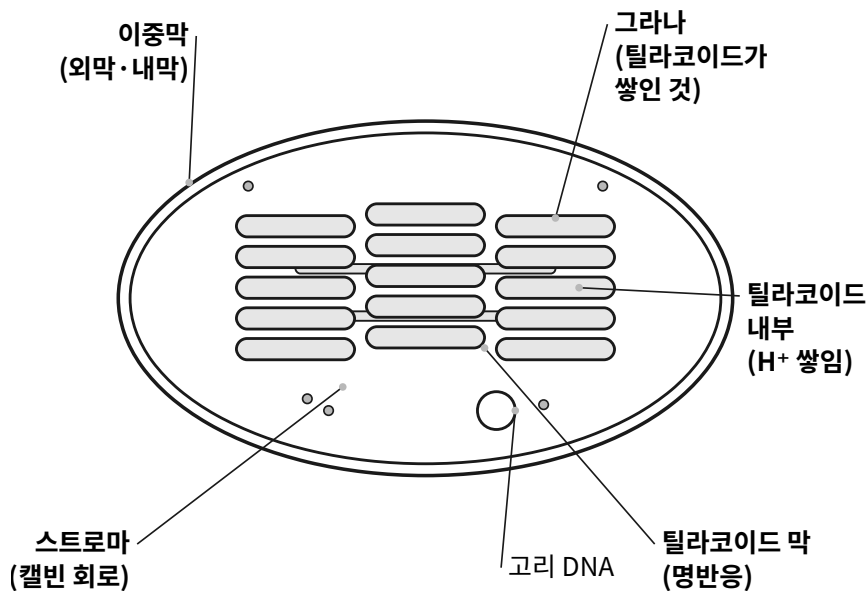


그림 19. 엽록체의 단면 — 이중막 안에 틸라코이드 주머니가 동전처럼 쌓인 그라나와 그것을 잇는 막이 있고, 틸라코이드 바깥을 채운 액체가 스트로마, 주머니 안쪽이 틸라코이드 내부다(모식도)

하린 동전을 쌓아 놓은 것 같은 덩어리가 보여요.

석 교수 틸라코이드가 쌓인 덩어리를 **그라나**라고 한다(하나는 그라눔). 틸라코이드 막에는 빛을 흡수하는 엽록소와 광계, 전자 전달계, ATP 합성 효소가 박혀 있다. 틸라코이드 바깥, 이중막 안쪽을 채운 액체가 **스트로마**이고, 캘빈 회로의 효소들이 여기 있다. 그리고 틸라코이드 주머니의 안쪽 공간을 **틸라코이드 내부**라고 부른다.

태오 그럼 엽록체에는 칸이 세 개네요. 막 사이 공간, 스트로마, 틸라코이드 내부.

석 교수 그렇다. 그중 광합성의 H^+ 가 쌓이는 곳이 어디일 것 같아?

태오 미토콘드리아에서 막 사이 공간에 쌓인다고 하셨으니까, 엽록체도 바깥 이중막 사이요?

세포호흡·광합성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

에너지 대사 = 전자를 옮겨 H^+ 기울기를 만들고, 그 기울기로 ATP를 만든다

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

3부 논술답안작성 패턴분석

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

2부 기출문제와 기본개념

기출 13문항(2008~2026학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

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

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 세포호흡인가
2. ATP: 세포의 에너지 화폐
3. 산화와 환원: 전자를 나르는 NAD^+
4. 두 발전소: 미토콘드리아와 엽록체
5. 해당 과정: 포도당을 반으로 쪼개다
6. 피루브산 산화와 TCA 회로
7. 전자 전달계: 산소는 마지막 전자 받개

8. 화학 삼투: H^+ 저수지로 돌리는 발전기
9. 포도당 한 분자의 ATP 장부
10. 산소가 없을 때: 발효와 저산소
11. 명반응: 빛으로 물을 쪼개다
12. 탄소 고정 반응: 캘빈 회로
13. 호흡과 광합성, 그리고 두 소기관의 기원
14. 몸속·지구·기술 속의 에너지 대사, 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: 효소 · 세포막과 물질 수송 · 산화·환원 · 열화학 · 생태계와 물질 순환



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

53470



ISBN 979-11-23065-09-0

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지 대사 — 전체 326쪽

ssbook.kr/book/nonsul-10

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

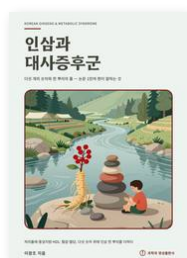
인삼 (6)



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



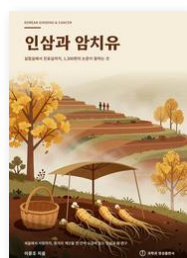
인삼과 당뇨
공복혈당·당화혈색소·합병증을 개선하는 인삼
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-diabetes



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

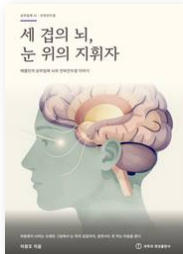
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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 — 세포호흡·광합성·에너지 대사

포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체

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



대입 과학논술 11 — 신경계·활동 전위
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