



대입 과학논술 11 — 신경계 · 활동 전위

펄프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다

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-11

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

신경계· 활동 전위



신경계·활동 전위 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 11문항 · 2009~2024학년도 · 이광조 지음

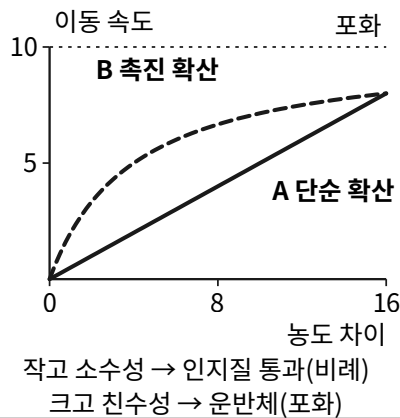
신경계·활동 전위

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

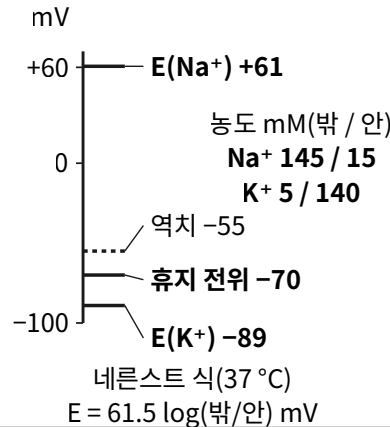
신경계·활동 전위 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 이온 기울기 × 이온 통로 개폐 × 시냅스 전달 | 11문항 · 7개 대학 (2009~2024)

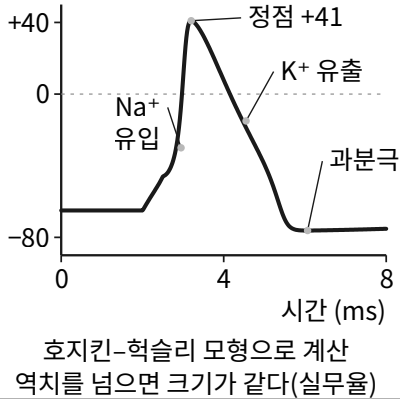
① 막을 건너는 길: 수송



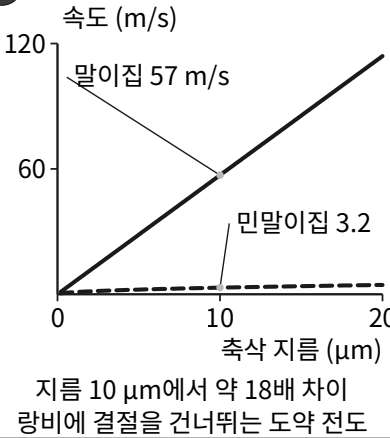
② 이온 기울기와 막전위



③ 활동 전위: 1000분의 1초 막전위 (mV)



④ 전도 속도와 말이집



한 줄 요약: 펌프가 이온 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생기고, 말이집과 시냅스가 그 신호를 나른다

그림 1. 신경계·활동 전위 단원의 그림 요약. ① 막 수송: 단순 확산은 농도 차이에 비례하고 촉진 확산은 운반체가 포화된다, ② 이온 기울기와 평형 전위(네른스트 식, 37 °C에서 $E(\text{K}^+) = -89 \text{ mV}$, $E(\text{Na}^+) = +61 \text{ mV}$), ③ 활동 전위(호지킨-헉슬리 모형으로 계산, 정점 약 +41 mV), ④ 축삭 지름과 전도 속도(말이집 약 5.7 m/s·μm, 민말이집 약 $\sqrt{d}$ — 근사 규칙). 모든 곡선은 식으로 계산했다.

한 줄 요약: 펌프가 이온 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생기고, 말이집과 시냅스가 그 신호를 나른다

연결 단원 → 세포막·물질 수송 · 호르몬·항상성 · 세포 호흡(ATP) · 화학 전지(네른스트 식)

이광조 · v1

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 신경계인가 — 자극에서 반응까지.....	16
1.1 0.04초의 반사	18
1.2 신경계의 지도	20
1.3 반응 시간을 재 보자	22
1.4 신호는 전자가 아니라 이온이다.....	23
제 2장 뉴런: 신호를 나르는 세포.....	26
2.1 세포 하나가 1미터	28
2.2 말이집과 랑비에 결절.....	30
2.3 뉴런의 세 종류.....	32
2.4 뉴런을 처음 본 사람들	33
제 3장 세포막을 건너는 세 가지 길.....	35
3.1 인지질 2층층 — 기름으로 된 벽	37
3.2 작고 소수성이면 그냥 지나간다 — 단순 확산	38
3.3 크고 친수성이면 문이 필요하다 — 촉진 확산	39
3.4 기울기를 거스르는 능동 수송	41
제 4장 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 공동 수송	45
4.1 펌프 한 바퀴	47
4.2 펌프가 남기는 것 — 기울기	49
4.3 기울기를 빌려 쓰는 수송 — 공동 수송	51
제 5장 휴지 전위: 세포는 작은 전지.....	55
5.1 막전위를 재는 법	57
5.2 K^+ 가 새어 나가면 안이 음(-)이 된다	58
5.3 몇 개가 움직였나	61
5.4 Na^+ 도 조금 샌다 — 휴지 전위가 -89가 아닌 까닭	62
제 6장 평형 전위와 네른스트 식.....	65
6.1 농도의 힘과 전기의 힘이 맞설 때.....	67
6.2 네른스트 식	68
6.3 이온마다 계산해 보자	69
6.4 바깥 K^+ 가 바뀌면 — 실험과 검사지	70
제 7장 활동 전위: 문이 열리고 닫히는 1000분의 1초.....	75
7.1 그래프부터 읽자	77
7.2 첫 번째 문 — 전압 개폐 Na^+ 통로.....	79
7.3 두 번째 문 — K^+ 통로, 그리고 닫혀 잠기는 Na^+ 통로	79
7.4 호지킨과 헉슬리의 오징어	82
7.5 펌프는 활동 전위 중에 일하지 않는다	82
제 8장 역치·실무울·불응기.....	85
8.1 문턱을 넘어야 열린다 — 국소 전위와 활동 전위.....	87
8.2 크기는 같고 개수가 다르다 — 실무울과 발생 빈도	89
8.3 바로 다시는 못 한다 — 절대 불응기와 상대 불응기	91
8.4 실험으로 역치 찾기	93

제 9장 흥분의 전도: 굼기와 말이집.....	96
9.1 옆으로 번지는 전류 — 국소 전류.....	98
9.2 굼을수록 빠르다 — 축삭 지름.....	100
9.3 말이집은 건너뛰게 한다 — 도약 전도.....	101
9.4 속도를 재는 실험.....	102
9.5 전도 순서 판정 연습.....	104
제 10장 시냅스: 틈을 건너는 화학 신호.....	106
10.1 축삭 끝에서 일어나는 일 — 여섯 단계.....	108
10.2 왜 한 방향인가.....	110
10.3 0.5 ms의 지연.....	111
10.4 더하기와 빼기 — 흥분성·억제성 시냅스.....	112
10.5 신경 전달 물질과 약물.....	113
제 11장 근육을 움직이는 신호: 신경근 접합부와 근수축.....	116
11.1 운동 뉴런 끝과 근육 사이 — 신경근 접합부.....	118
11.2 Ca^{2+} 가 방아쇠 — 흥분에서 수축으로.....	120
11.3 미끄러지는 필라멘트 — 마디가 짧아진다.....	121
11.4 ATP는 어디에 쓰이나.....	123
11.5 큐라레로 보는 접합부 — 실험으로 위치 찾기.....	124
제 12장 자율 신경계: 교감과 부교감.....	127
12.1 의지로 못 움직이는 근육 — 두 갈래의 길항.....	129
12.2 두 개의 뉴런과 두 가지 물질.....	130
12.3 미주 신경 물질 — 뱀의 개구리 심장.....	132
12.4 같은 아세틸콜린, 다른 수용체 — 큐라레와 아트로핀.....	134
제 13장 감각 수용기: 역치·베버 법칙·순응.....	138
13.1 수용기는 변환기.....	140
13.2 처음 자극의 몇 %? — 베버 법칙.....	141
13.3 계속되면 무뎌진다 — 감각의 순응.....	143
13.4 통증의 두 길.....	144
13.5 역치를 제대로 재려면 — 실험 설계.....	144
제 14장 신경과 호르몬, 독과 약, 그리고 2부로.....	148
14.1 빠르고 좁게, 느리고 넓게 — 신경계와 내분비계.....	150
14.2 문을 두드리는 신호, 안으로 들어가는 신호.....	151
14.3 문 하나를 막는 독 — 테트로도톡신.....	152
14.4 바깥 Na^+ 가 줄면 — 알도스테론과 이온 항상성.....	154
14.5 막전위로 여닫는 인공세포.....	155
14.6 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길.....	156
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설.....	158
부록 B. 용어 풀이.....	162
기출문제와 기본개념.....	170
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서.....	171
0. 이 장의 사용법.....	172
1. 출제 개념.....	173
1.1 신경계의 구성과 뉴런 — C1 · C2.....	173
1.2 막을 건너는 세 가지 길 — C3 · P1.....	173
1.3 Na^+ - K^+ 펌프와 공동 수송 — C4 · C5 · P3.....	174

1.4 휴지 전위와 네른스트 식 — C6 · C7 · P4	175
1.5 활동 전위와 이온 통로 — C8 · C9	176
1.6 흥분의 전도 — C10.....	177
1.7 시냅스와 근수축 — C11 · C12.....	178
1.8 자율 신경계와 약물 — C13 · A2.....	178
1.9 감각 수용기 — C14 · A4 · A6.....	179
1.10 신경과 호르몬, 독과 이온 항상성 — C15 · A1 · A3 · A5 · P5.....	180
1.11 그래프 개념도 읽는 법	180
2. 출제 경향.....	183
2.1 개념의 깊이로 본 문항	185
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	185
2.3 학교별 성향	186
논술답안작성 패턴분석	188
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	189
3. 답안 작성법.....	191
3.1 자료 해석형 답안의 4단 구조	191
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	192
3.3 표기와 수치 규칙	192
3.4 시간 배분과 자기 점검	193
3.5 제시문 인용과 그림으로 답하기.....	193
3.6 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	193
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	195
실전기출문제와 풀이과정	201
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	202
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	204
5.1 한눈에 보는 기출 11문항	204
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	204
5.3 기본 개념 한눈에	205
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	206
6. 출제 문항 분석과 모범답안	208
〈기출문제 1 (경희대 2024년)〉	209
〈기출문제 2 (연세대 2022년)〉	219
〈기출문제 3 (연세대 2022년)〉	227
〈기출문제 4 (건국대 2015년)〉	238
〈기출문제 5 (부산대 2015년)〉	248
〈기출문제 6 (성균관대 2013년)〉	258
〈기출문제 7 (성균관대 2013년)〉	269
〈기출문제 8 (고려대 2012년)〉	277
〈기출문제 9 (성균관대 2011년)〉	289
〈기출문제 10 (연세대 2010년)〉	298
〈기출문제 11 (한양대 2009년)〉	308
7. 변형·예상 문항	316
8. 강의 연결.....	322
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	322
8.2 강의 구성 시 유의점	323

9. 전체 문제 총평	324
9.1 숫자로 먼저 보기	324
9.2 다섯 가지 총평.....	324
9.3 대학별 한 줄 총평	325
9.4 이렇게 공부하자	326
10. 참고문헌.....	327

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 신경계·활동 전위 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 움츠림 반사의 반사궁	19
그림 5. 신경계의 구분	21
그림 6. 자 잡기 거리-시간 곡선	22
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 9. 운동 뉴런의 구조.....	28
그림 10. 뉴런 각 부분의 크기(로그 눈금).....	31
그림 11. 감각·연합·운동 뉴런의 모양 비교	32
그림 12. 제 3장 개념도	35
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	36
그림 14. 세포막을 건너는 세 가지 길.....	38
그림 15. 농도 차이와 수송 속도	40
그림 16. 신경 세포 안팎의 이온 농도.....	42
그림 17. 제 4장 개념도	45
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	46
그림 19. Na^+ - K^+ 펌프의 한 바퀴.....	48
그림 20. 펌프의 이온·전하 장부	49
그림 21. 소장 상피 세포의 포도당 흡수	51
그림 22. 제 5장 개념도	55
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	56
그림 24. 미세 전극으로 잰 막전위	58
그림 25. K^+ 누출로 휴지 전위가 생기는 세 단계	59
그림 26. 막 축전기와 전하 분리 계산.....	61
그림 27. 제 6장 개념도	65
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	66
그림 29. 평형 전위의 저울.....	67
그림 30. 막전위의 수직선.....	70
그림 31. 바깥 K^+ 와 막전위.....	71
그림 32. 제 7장 개념도	75
그림 33. 생활 속 개념도 7.....	76
그림 34. 활동 전위와 Na^+ · K^+ 전도도(HH 모형)	78
그림 35. 전압 개폐 통로의 세 상태.....	80
그림 36. 활동 전위 구간별 이온 이동.....	81
그림 37. 제 8장 개념도	85
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	86
그림 39. 자극 세기와 막전위(HH 계산)	88
그림 40. 자극 세기와 발생 빈도(HH 계산)	90
그림 41. 두 번째 자극과 불응기(HH 계산)	92
그림 42. 제 9장 개념도	96
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	97
그림 44. 연속 전도와 도약 전도	99
그림 45. 지름-속도 곡선(근사)	100
그림 46. 전도 속도 측정 자료	103
그림 47. 제 10장 개념도	106

그림 48. 생활 속 개념도 10	107
그림 49. 시냅스 전달 여섯 단계	109
그림 50. 시냅스 지연 기록(모식)	111
그림 51. EPSP·IPSP의 합(계산)	112
그림 52. 제 11장 개념도	116
그림 53. 생활 속 개념도 11	117
그림 54. 신경근 접합부와 큐라레	119
그림 55. 흥분-수축의 시간 순서(모식)	121
그림 56. 근육 원섬유 마디의 이완과 수축	122
그림 57. 제 12장 개념도	127
그림 58. 생활 속 개념도 12	128
그림 59. 체성·교감·부교감 경로	131
그림 60. 뱀비의 개구리 심장 실험(모식)	133
그림 61. 동공 조임근과 산대근	135
그림 62. 제 13장 개념도	138
그림 63. 생활 속 개념도 13	139
그림 64. 베버 법칙 직선(계산)	142
그림 65. 빠른 순응과 느린 순응(모식)	143
그림 66. 단맛 역치 실험의 설계와 개선	145
그림 67. 제 14장 개념도	148
그림 68. 생활 속 개념도 14	149
그림 69. 신경과 내분비 신호 경로	150
그림 70. 막 수용체와 세포 안 수용체	152
그림 71. 테트로도톡신과 활동 전위(HH 계산)	153
그림 72. 세포 밖 Na^+ 와 활동 전위(HH 계산)	155
그림 73. 펌프와 통로의 세 장면	176
그림 74. 전체 개념 그래프	181
그림 75. 개념별 출제 횟수	182
그림 76. 연도별 출제 문항 수	184
그림 77. 대학별 출제 문항 수	184
그림 78. 자료 해석형 풀이 절차	191
그림 79. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	210
그림 80. 경희대 2024 (1) 그래프	214
그림 81. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	220
그림 82. 연세대 2022 인공세포(원문 그림 재작도)	228
그림 83. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	229
그림 84. 막전위 스위치와 Y 이동(모식)	234
그림 85. 〈건국대 2015〉 개념 그래프	239
그림 86. 큐라레와 아트로핀의 작용 위치	241
그림 87. 세포 밖 Na^+ 와 활동 전위 정점(HH 계산)	244
그림 88. 부산대 2015 1-1 뉴런 A~D	249
그림 89. 부산대 2015 1-2 막전위	249
그림 90. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	250
그림 91. 〈성균관대 2013〉 개념 그래프	259
그림 92. 분해 효소 억제와 틈의 아세틸콜린(모식)	263
그림 93. 같은 아세틸콜린, 다른 수용체	265
그림 94. 〈성균관대 2013〉 개념 그래프	270
그림 95. 성균관대 2013 독소와 활동 전위(HH 계산)	273
그림 96. 고려대 2012 그림 5-1·5-2	278

그림 97. 고려대 2012 (b) 막전위 기록.....	279
그림 98. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	280
그림 99. 〈성균관대 2011〉 개념 그래프	290
그림 100. 선충 돌연변이체 A·B의 결함 자리.....	292
그림 101. 〈연세대 2010〉 개념 그래프	299
그림 102. 뿌리 세포의 E(K ⁺)와 측정 막전위.....	301
그림 103. 〈한양대 2009〉 개념 그래프	309
그림 104. 한양대 2009 설탕 용액 계열	313

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. 신경계의 구분과 하는 일.....	21
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. 뉴런 세 종류의 비교.....	32
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	35
표 8. 두 물질 A, B의 농도 차이에 따른 수송 속도(가상 실험 자료, 단위는.....	40
표 9. 막 수송 세 가지의 비교.....	42
표 10. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	45
표 11. 1차 능동 수송과 2차 능동 수송(공동 수송)의 비교.....	52
표 12. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	55
표 13. 휴지 상태 신경 세포막의 이온 사정.....	60
표 14. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	65
표 15. 이온별 평형 전위 계산표(37 °C, 2.....	69
표 16. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	75
표 17. 활동 전위의 구간별 통로 상태와 이온 이동.....	81
표 18. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	85
표 19. 절대 불응기와 상대 불응기 비교.....	92
표 20. 역치 찾기 실험 자료.....	93
표 21. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	96
표 22. 신경 섬유의 분류.....	102
표 23. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	106
표 24. 주요 신경 전달 물질.....	113
표 25. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	116
표 26. 수축할 때 근육 원섬유 마디 각 부분의 길이 변화(μm).....	122
표 27. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	127
표 28. 교감 신경과 부교감 신경의 효과 비교.....	129
표 29. 큐라레와 아트로핀 비교.....	134
표 30. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	138
표 31. 감각별 베버 상수의 대표값.....	141
표 32. 감각 역치 측정 실험 점검표.....	145
표 33. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	148
표 34. 신경계와 내분비계의 조절 비교.....	151
표 35. 2부 목차와 내용.....	171
표 36. 뉴런의 세 종류와 반사 경로에서의 자리.....	173
표 37. 막 수송 세 가지의 판정 기준.....	174
표 38. 농도 차이에 따른 이동 속도(기본개념편 의 계산값, 상대.....	174
표 39. 평형 전위 계산(37 °C, 2.....	175
표 40. 활동 전위 구간별 통로와 이온 이동.....	176
표 41. 전도 속도 근사 규칙(대표값.....	177
표 42. 시냅스 전달 여섯 단계와 막하면 생기는 일.....	178
표 43. 교감 신경과 부교감 신경.....	179
표 44. 신경계와 내분비계의 조절 비교.....	180
표 45. 이 책의 기출 문항 목록.....	183
표 46. 대학별 출제 문항.....	184
표 47. 문항별 요구 개념 수와 최대 층.....	185

표 48. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서)	186
표 49. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서(생물 권)	189
표 50. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용	189
표 51. 서술형 답안의 문장 틀(구조 → 이동 → 원인 → 결과)	192
표 52. 논술 기본 패턴 5가지	193
표 53. 문항별 소문항에 적용한 패턴(기호는 위 표)	194
표 54. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는	202
표 55. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	204
표 56. 학년도별 문항 수	204
표 57. 소문항에 적용한 답안 패턴의 분포(24개 소문항, 둘이 결합된 소문항은	205
표 58. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 기출 = 그 개념을 쓴 문항 수)	205
표 59. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적	207
표 60. [논제 II-1] (1)의 물질 A·B 특성표(원문 표를 다시 조판)	209
표 61. 기출문제 1의 개념과 복습 위치	210
표 62. 소문항별 요구 사항과 난이도	212
표 63. 휴지 상태의 펌프와 활동 전위 때의 통로 비교(모범답안 정리용)	215
표 64. 기출문제 2의 개념과 복습 위치	220
표 65. 요구 사항과 난이도	221
표 66. 신경 전달 물질과 티록신의 작용 비교(답안 정리용)	222
표 67. 기출문제 3의 개념과 복습 위치	229
표 68. 소문항별 요구 사항과 난이도	231
표 69. 기출문제 4의 개념과 복습 위치	239
표 70. 소문항별 요구 사항과 난이도	241
표 71. 기출문제 5의 개념과 복습 위치	250
표 72. 소문항별 요구 사항과 난이도	251
표 73. 기출문제 6의 개념과 복습 위치	259
표 74. 소문항별 요구 사항과 난이도	260
표 75. 기출문제 7의 개념과 복습 위치	270
표 76. 소문항별 요구 사항과 난이도	271
표 77. 기출문제 8의 개념과 복습 위치	280
표 78. 소문항별 요구 사항과 난이도	281
표 79. 피부 감각을 나르는 축색의 비교(대표값, 교재마다 범위가 다름)	285
표 80. 기출문제 9의 개념과 복습 위치	290
표 81. 소문항별 요구 사항과 난이도	292
표 82. 가정 모형으로 본 운동성(반응 = $f \times E \div (E + 1)$, 야생형	293
표 83. 기출문제 10의 개념과 복습 위치	299
표 84. 소문항별 요구 사항과 난이도	301
표 85. 기출문제 11의 개념과 복습 위치	309
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도	310
표 87. 인강 회차 구성(제안)	322
표 88. 11개 문항의 규모	324
표 89. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서)	325

제 1 부

기본개념편

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

신경계·활동 전위

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 신경계의 지도 → 뉴런 → 세포막을 건너는 길 → 펌프가 만드는 이온 기울기 → 휴지 전위와 평형 전위 → 활동 전위 → 전도 → 시냅스와 근육 → 자율 신경과 감각 → 호르몬·독·약과의 종합 순서로 이어진다. 앞 장에서 얻은 숫자(이온 농도, 평형 전위, 역치)가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠르다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장 — 구간마다 무엇을 하는가

구간	장	무엇을 하는가
A. 신경계와 뉴런	1~2장	자극이 반응으로 바뀌는 길(감각 → 중추 → 운동)을 그리고, 그 길을 이루는 세포인 뉴런의 모양과 종류를 익힌다.
B. 막과 이온	3~6장	세포막을 건너는 세 가지 길(단순 확산·촉진 확산·능동 수송), Na^+ - K^+ 펌프와 공동 수송, 휴지 전위, 네른스트 식으로 막전위를 숫자로 만든다.
C. 신호 만들기과 나르기	7~9장	전압 개폐 통로가 열리고 닫히며 생기는 활동 전위, 역치·실무울·불응기, 축삭 지름과 말이집이 정하는 전도 속도를 다룬다.
D. 신호 건네기	10~12장	시냅스에서 화학 신호로 바뀌는 과정, 신경근 접합부와 근수축, 교감·부교감 신경과 약물의 작용을 본다.
E. 감각과 종합	13~14장	감각 수용기의 역치·베버 법칙·순응을 실험으로 확인하고, 신경과 호르몬·신경독·이온 항상성을 묶은 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 순서다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있다. 생물 단위라 계산만 하지 않는다. 실험을 설계하고(무엇을 바꾸고 무엇을 같게 두었나), 자료를 읽고(그래프의 어느 구간이 무엇을 뜻하나), 결론을 쓰는 흐름을 장마다 한 번 이상 밟는다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었다.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16 쪽)	자극 → 감각 → 중추 → 운동 → 반응 · 중추·말초 신경계 · 체성·자율 신경계 · 반사
기본개념편 제 2장 (26 쪽)	신경 세포체·가지 돌기·축삭 돌기 · 말이집과 랑비에 결절 · 감각·연합·운동 뉴런
기본개념편 제 3장 (35 쪽)	인지질 2중층 · 단순 확산 · 촉진 확산(운반체·통로) · 포화 · 능동 수송
기본개념편 제 4장 (45 쪽)	Na^+ - K^+ 펌프(3 Na^+ 밖, 2 K^+ 안, ATP 1개) · 이온 농도 기울기 · 공동 수송
기본개념편 제 5장 (55 쪽)	휴지 전위 -70 mV · K^+ 누출 통로 · 전하 분리 · 막 축전기

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 6장 (65쪽)	평형 전위 · 네른스트 식 $E = 61.5 \log(\text{밖/안}) \text{ mV}$ · 골드만 식(교과 밖 심화)
기본개념편 제 7장 (75쪽)	전압 개폐 Na^+ · K^+ 통로 · 탈분극 · 재분극 · 과분극 · 통로의 비활성화
기본개념편 제 8장 (85쪽)	역치 · 실무울 · 자극 세기와 발생 빈도 · 절대·상대 불응기
기본개념편 제 9장 (96쪽)	국소 전류 · 축삭 지름과 속도 · 도약 전도 · 전도 속도 측정
기본개념편 제 10장 (106쪽)	시냅스 소포 · 신경 전달 물질 · 수용체 · 흥분 전달의 방향 · 시냅스 지연 · 흥분성·억제성 시냅스
기본개념편 제 11장 (116쪽)	신경근 접합부 · 아세틸콜린 · Ca^{2+} · 액틴·마이오신 활주 · 근육 원섬유 마디
기본개념편 제 12장 (127쪽)	교감·부교감 신경 · 신경절 이전·이후 뉴런 · 아세틸콜린과 노르에피네프린 · 큐라레·아트로핀
기본개념편 제 13장 (138쪽)	감각 수용기의 역치 · 베버 법칙 · 순응 · 통각 · 역치 측정 실험 설계
기본개념편 제 14장 (148쪽)	신경계와 내분비계 비교 · 세포막 수용체와 세포 안 수용체 · 테트로도톡신 · 알도스테론과 Na^+ · 인공세포

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 숫자(이온 농도, 막전위, 속도)를 손으로 한 번 계산해 본다.
- 이온이 어느 쪽으로 움직이는지는 반드시 두 가지로 따진다. 농도 기울기는 어느 쪽인가, 전기적 끌림은 어느 쪽인가.
- 막히는 구간은 5~7장(휴지 전위·네른스트 식·활동 전위)이다. 이 구간은 두 번 읽는다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다. 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다.

기본개념편을 열며

신경계와 활동 전위는 중학교 과학의 ‘자극과 반응’에서 처음 만나고, 고등학교 생명과학 I의 ‘항상성과 몸의 조절’, 생명과학 II의 ‘세포막을 통한 물질 출입’에서 본격적으로 다룬다. 대학 논술은 이 두 과목을 엮는다. 세포막 수송을 묻다가 활동 전위로 넘어가고, 활동 전위를 묻다가 호르몬과 약물로 넘어간다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(세포, 원자와 이온, 농도의 뜻, 간단한 비율과 로그)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다.

등장인물

- 하린 — 중학교 2학년. 돌집 과학방에서 과학을 배운다. 궁금한 것은 바로 묻는다.
- 태오 — 고등학교 2학년, 하린의 오빠. 논술을 준비한다. 숫자를 빨리 넣고, 가끔 부호를 틀린다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 장보기와 병원 검사지 같은 일상의 눈으로 묻는다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학·생물 교수. 설명보다 질문으로 길을 안내한다.

첫 토요일

충북 단양의 돌집 과학방. 난로 위 주전자가 끓고, 이모가 두부 한 판을 들고 들어온다. 탁자 위에는 석 교수가 가져온 오래된 축전지와 전선 한 묶음이 놓여 있다.

이모 교수님, 아까 두부 틀을 옮기다가 뜨거운 술에 손등이 닿았어요. 생각하기도 전에 손이 먼저 빠지더라고요.

석 교수 그게 오늘 공부의 첫 장면입니다. ‘뜨겁다’는 생각보다 손이 먼저 움직였지요. 신호가 어디를 거쳐 갔기에 그렇게 빨랐을까요?

하린 뇌까지 갔다 오면 늦으니까, 중간 어딘가에서 바로 돌아온 거 아니에요?

석 교수 좋은 짐작이다. 피부에서 출발한 신호가 척수까지 갔다가 근육으로 바로 돌아왔어. 이걸 반사라고 한다. 길이를 재 보면 손등에서 척수까지, 척수에서 팔 근육까지 각각 1미터 남짓이야.

태오 신호 속도가 초속 50미터라면 1미터에 0.02초, 갔다 오면 0.04초네요.

석 교수 맞다. 그런데 태오야, 그 신호는 전선 속 전류처럼 전자가 흐르는 걸까?

태오 신경 신호는 전기라고 배웠으니까... 전자가 흐르는 거 아닌가요?

석 교수 여기서 많은 학생이 틀린다. 신경 신호는 전자가 아니라 이온이 막을 건너면서 생긴다. 나트륨 이온(Na^+)과 칼륨 이온(K^+)이 세포막의 작은 문을 지나 안팎으로 움직이는 일이야. 그래서 구리 전선 속 전기 신호보다 수백만 배 느리지만, 대신 아무리 먼 길을 가도 신호가 약해지지 않는다.

하린 이온이 문을 지나간다고요? 그럼 그 문은 누가 열어요?

석 교수 그게 이 책의 줄거리다. 먼저 세포는 펌프로 Na^+ 는 밖으로, K^+ 는 안으로 퍼 올려 기울기를 만든다. 그 기울기 때문에 세포 안은 밖보다 약 70 mV 낮은, 작은 전지가 된다. 자극이 그 전압을 문턱 위로 밀어 올리면 Na^+ 문이 한꺼번에 열리고, 1000분의 1초쯤 지나 K^+ 문이 열리며 원래대로 돌아온다.

이모 펌프를 돌리려면 힘이 들겠네요. 우리 가게 지하수 펌프도 전기를 엄청 먹는데.

석 교수 정확합니다. 뇌는 몸무게의 2 % 정도인데 쉬는 동안 쓰는 에너지의 약 20 %를 씁니다. 그 큰 몫이 이 이온 펌프를 돌리는 데 들어가요. 그래서 혈당이 떨어지면 머리가 먼저 멍해집니다.

태오 논술에서는 이걸 어떻게 물어요?

석 교수 크게 네 가지다. 막을 건너는 방식(확산·촉진 확산·능동 수송)을 구별하게 하고, 활동 전위의 각 구간에서 어떤 통로가 열리는지 묻고, 전도 속도가 왜 다른지 비교하게 하고, 마치 막으로 독이나 약, 호르몬이 이 과정을 어떻게 바꾸는지 추론하게 한다. 복어 독, 사냥용 화살 독, 알도스테론이 실제로 나왔다.

하린 복어 독이요? 무섭다.

석 교수 무섭지만 원리는 단순하다. 문 하나를 막는 거야. 어느 문을 막는지 알면 어떤 증상이 생길지 추론할 수 있지. 그게 바로 논술이 원하는 능력이다.

이모 그럼 오늘은 어디서부터 시작해요?

석 교수 손을 댄 그 0.04초를 지도로 그리는 데서부터요. 자극에서 반응까지 신호가 지나는 길을 먼저 그리고, 다음 주부터 그 길 위의 세포를 하나씩 확대해 보겠습니다.

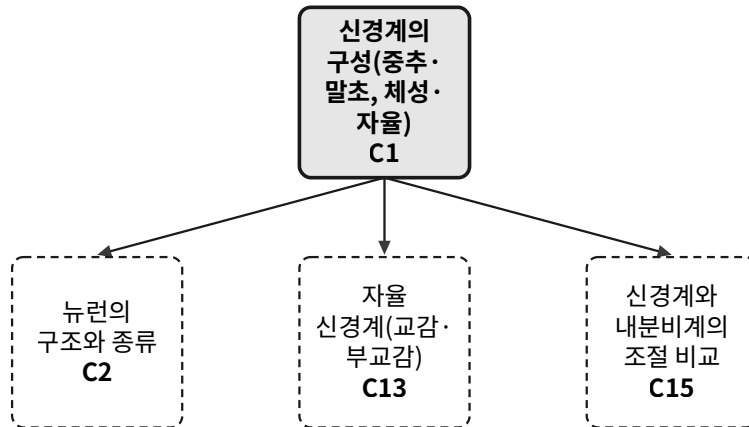
1장은 반사 하나에서 출발한다. 자극이 감각 뉴런을 타고 중추로 가고, 중추가 운동 뉴런으로 명령을 내리는 길을 그린 뒤, 그 길을 이루는 뉴런(2장), 뉴런의 막을 건너는 이온(3~6장), 막전위가 뒤집히는 활동 전위(7~8장)와 그 전도(9장), 시냅스와 근육(10~11장), 자율 신경과 감각(12~13장)을 차례로 확대한다. 마지막 14장에서 신경과 호르몬, 독과 약을 한데 모아 기출로 가는 다리를 놓는다.

제 1장 왜 신경계인가 — 자극에서 반응까지

새 개념 자극과 반응 · 중추·말초 신경계 · 체성·자율 신경계 · 반사

이어짐 뉴런 2장 · 시냅스 10장 · 자율 신경 12장 · 신경과 호르몬 14장

이 장의 개념도



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

그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 신경계의 구성(중추·말초, 체성·자율))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.

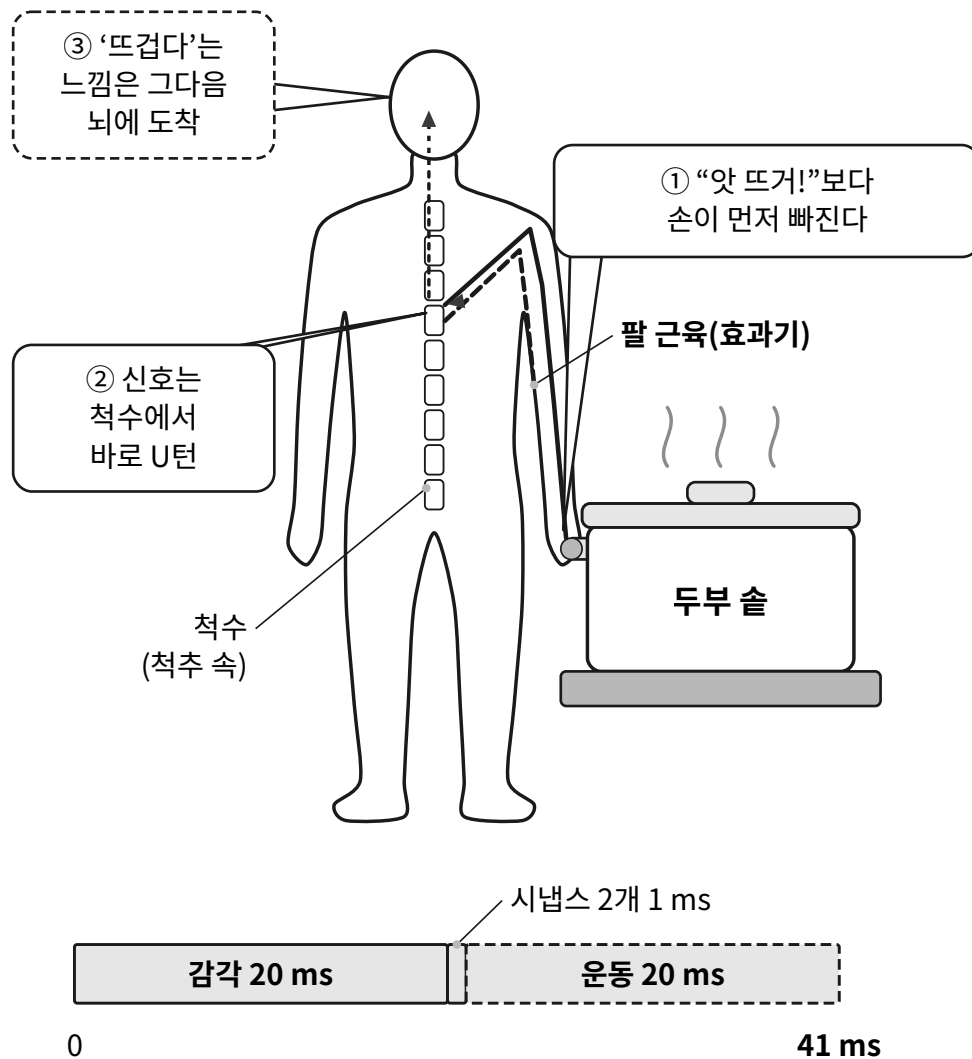
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 2022년) (219 쪽)	신경계와 내분비계, 티록신의 작용 방식	C1 신경계의 구성(중추·말초, 체성·자율)

뜨거운 냄비에서 손을 떼는 0.04초

생각보다 손이 먼저 움직이는 까닭



④ 왕복 약 2 m ÷ 50 m/s + 시냅스 = 약 0.04초

그림 3. 뜨거운 냄비에서 손을 떼는 0.04초 — 손등의 열 자극이 척수에서 곧바로 팔 근육으로 돌아오는 반사의 길과, 그보다 늦게 뇌에 도착하는 ‘뜨겁다’는 느낌(모식도, 길이와 시간은 어림값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 손을 떼는 반사는 척수에서 처리되어 뇌가 ‘뜨겁다’고 느끼기 전에 끝난다.
2. 신호는 피부의 감각 뉴런 → 척수의 연합 뉴런 → 운동 뉴런 → 팔 근육 순서로 간다.
3. 왕복 약 2 m를 초속 50 m로 가고 시냅스 두 곳을 지나면 약 0.04초가 걸린다.

이 장의 출발점

- 우리 몸은 세포로 이루어지고, 비슷한 세포가 모여 조직과 기관을 만든다는 것(중학교 과학).
- 자극과 반응: 눈·귀·피부 같은 감각 기관이 자극을 받아들이고, 근육이 움직여 반응한다는 것.
- 속력 = 거리 ÷ 시간, 그리고 물체가 떨어진 거리 $d = \frac{1}{2}gt^2$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$). 낙하 식이 낫설면 3절의 계산은 결과만 따라와도 된다.

첫 토요일 오후, 두부 한 판을 다 나눠 먹은 뒤 석 교수가 30 cm 플라스틱 자 하나를 탁자 위에 올려놓았다. 이모의 손등에는 아침에 솔에 덴 자리가 아직 붉게 남아 있었다.

이모 교수님, 아침 일을 다시 생각해 보니 이상해요. 손을 뺀 다음에야 ‘앗, 뜨거!’ 하는 생각이 났거든요. 생각보다 손이 먼저였어요.

석 교수 그 순서가 오늘 이야기의 전부다. 손은 뇌가 명령하기 전에 이미 움직였다. 그렇다면 손을 움직이라는 명령은 어디서 나왔을까?

하린 아까 오전에 척수에서 바로 돌아온다고 하셨잖아요. 그런데 척수가 정확히 어디예요?

석 교수 등뼈, 곧 척추뼈 속 굴을 따라 뇌에서 허리까지 내려오는 굵은 신경 다발이다. 사람에게서 길이가 40 cm 남짓이고 굵기는 새끼손가락 정도야. 뇌와 몸 사이를 오가는 신호는 대부분 이 척수를 지나간다.

태오 그럼 척수는 신호가 지나가는 길이기만 한 게 아니라 직접 판단도 하는 거네요.

석 교수 간단한 판단은 한다. 오늘은 그 길을 지도로 그려 보자. 자극에서 반응까지, 그리고 그 지도의 각 부분이 이 책의 어느 장에서 다시 확대되는지까지.

1.1 0.04초의 반사

석 교수 먼저 손등에서 일어난 일을 순서대로 늘어놓자. 하린이가 말해 볼래?

하린 솔이 뜨거웠고, 손등 피부가 그걸 느꼈고, 신호가 척수로 갔다가, 다시 팔로 와서 손을 뺐어요.

석 교수 잘했다. 이제 한 칸씩 이름을 붙이자. 뜨거운 솔은 **자극**, 손등 피부의 열·통증 감각 신경 끝은 **수용기**, 거기서 척수까지 신호를 나르는 세포는 **감각 뉴런**이다. 척수 안에서 감각 뉴런은 **연합 뉴런**에 신호를 넘기고, 연합 뉴런은 **운동 뉴런**에 넘긴다. 운동 뉴런은 척수에서 팔 근육까지 가서 근육을 수축시킨다. 근육이 **효과기**이고, 손을 빼는 움직임이 **반응**이다. **그림 4**가 그 길을 그린 것이다.

움츠림 반사: 피부 → 척수 → 팔 근육

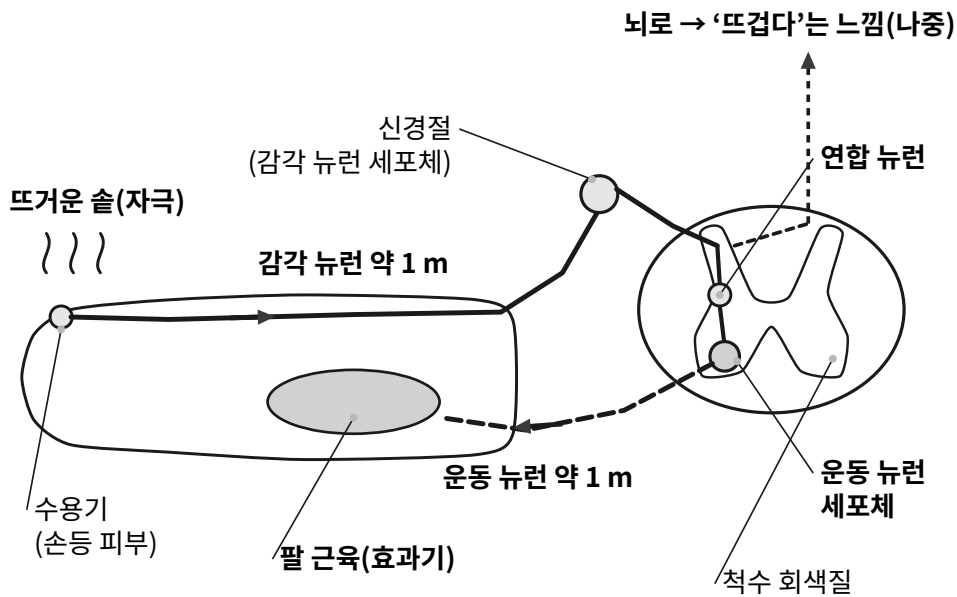


그림 4. 움츠림 반사의 반사궁 — 손등의 수용기에서 출발한 신호가 감각 뉴런 → 척수 회색질의 연합 뉴런 → 운동 뉴런 → 팔 근육으로 가고, 한 갈래는 척수를 따라 뇌로 올라간다(모식도, 경로 길이는 어림값)

이모 신호가 척수에서 U턴을 하는 거네요.

석 교수 그래서 이 고리 모양 길을 **반사궁**이라고 한다. ‘궁’은 활처럼 휜 길이라는 뜻이다. 반사궁을 따라 일어나는 반응, 곧 의지와 상관없이 자극에 대해 자동으로 일어나는 빠른 반응이 **반사**다.

태오 그림을 보면 척수에서 위로 올라가는 갈래도 있네요. 이게 ‘뜨겁다’는 느낌이에요?

석 교수 맞다. 같은 감각 신호가 척수에서 갈라져 한 갈래는 반사궁으로, 다른 갈래는 척수를 따라 뇌로 올라간다. 뇌의 대뇌 겉질에 도착해야 비로소 ‘뜨겁다, 아프다’는 느낌이 생긴다. 뇌까지 가는 길이 더 길고, 중간에 거치는 시냅스도 많아서 느낌은 손이 빠진 뒤에 온다.

하린 시냅스가 뭐예요?

석 교수 뉴런과 뉴런이 맞닿는 곳이다. 맞닿는다고 했지만 실제로는 20 nm쯤 되는 아주 좁은 틈이 있어서, 신호가 화학 물질로 바뀌어 그 틈을 건넌다. 10장에서 자세히 보겠지만, 오늘은 시냅스 하나를 건너는 데 약 0.5 ms, 곧 0.0005초가 걸린다는 것만 기억해 뒀.

태오 그럼 반사 시간을 계산할 수 있겠어요. 거리와 속도, 시냅스 개수만 알면 되니까요.

석 교수 그래서 문제로 만들어 봤다.

문제 1.1

손등에서 척수까지 감각 뉴런의 길이가 1.0 m, 척수에서 팔 근육까지 운동 뉴런의 길이가 1.0 m 라고 하자(어림값). 두 뉴런의 신호 전달 속도는 모두 50 m/s이고, 척수 안에서 시냅스를 2개(각각 → 연합, 연합 → 운동) 건너며 하나에 0.5 ms가 걸린다. 자극에서 근육에 신호가 닿기까지 걸리는 시간은 몇 ms인가? 근육이 수축을 시작하는 데 걸리는 시간은 넣지 않는다.

- 태오** 감각 뉴런 $1.0 \text{ m} \div 50 \text{ m/s} = 0.020 \text{ s}$, 곧 20 ms요. 운동 뉴런도 20 ms. 둘을 더하면 40 ms.
- 하린** 시냅스도 넣어야죠. 0.5 ms가 두 번이니깐 1 ms. 그래서 41 ms예요.
- 석 교수** 정답이다. $20 + 20 + 1 = 41 \text{ ms}$, 약 0.04초. 이모가 아침에 겪은 일이 바로 이 0.04초였다. 여기서 숫자 하나를 더 읽어 보자. 41 ms 가운데 시냅스가 차지하는 몫은?
- 태오** $1 \div 41$ 이니깐 2.4 %쯤이요. 거의 다 축삭을 따라가는 시간이네요.
- 석 교수** 반사궁이 짧고 시냅스가 둘뿐이라 그렇다. 시냅스가 수십 개 늘어선 길이라면 이야기가 달라진다. 이 차이는 4부 **기출문제 5**(부산대 2015) (248쪽)의 전도 속도 비교에서 다시 쓴다.
- 이모** 그런데 왜 우리 몸은 이렇게 뇌를 거치지 않는 길을 따로 만들어 둔 거예요?
- 석 교수** 위험한 자극은 생각할 틈 없이 피해야 하니깐다. 뜨거운 술에 손이 닿아 있는 시간이 0.04초냐 0.2초냐에 따라 덴 정도가 크게 달라진다. 반사는 몸을 지키는 지름길이다. 무릎 아래를 고무망치로 툭 치면 다리가 올라가는 무릎 반사, 코가 간지러우면 나오는 재채기, 갑자기 밝아지면 동공이 작아지는 동공 반사도 모두 반사다.
- 태오** 그런데 그것들은 다 척수에서 처리되나요?
- 석 교수** 아니다. 반사를 처리하는 중추는 반사마다 다르다. 무릎 반사와 움츠림 반사는 척수, 기침·재채기·침 분비는 연수, 동공 반사는 중간뇌가 맡는다. 공통점은 대뇌 겉질의 판단을 거치지 않는다는 것이다. 참고로 무릎 반사는 연합 뉴런 없이 감각 뉴런이 운동 뉴런에 직접 신호를 넘기는, 시냅스가 하나뿐인 반사로 알려져 있다(교과 밖 심화).

1.2 신경계의 지도

- 석 교수** 이제 지도를 넓히자. 반사궁에 나온 부분들을 크게 둘로 나누면 무엇과 무엇이 될까?
- 하린** 척수 안에 있는 부분과, 척수 밖에서 몸 곳곳으로 뻗은 부분이요.
- 석 교수** 그렇다. 뇌와 척수를 묶어 **중추 신경계**라고 하고, 중추와 몸 곳곳을 잇는 신경을 **말초 신경계**라고 한다. 중추는 정보를 모아 판단하고 명령을 내리는 곳, 말초는 정보와 명령을 실어 나르는 길이다. 말초 신경은 뇌에서 바로 나오는 뇌신경 12쌍과 척수에서 나오는 척수신경 31쌍으로 이루어진다. **그림 5**의 나무 그림을 보자.

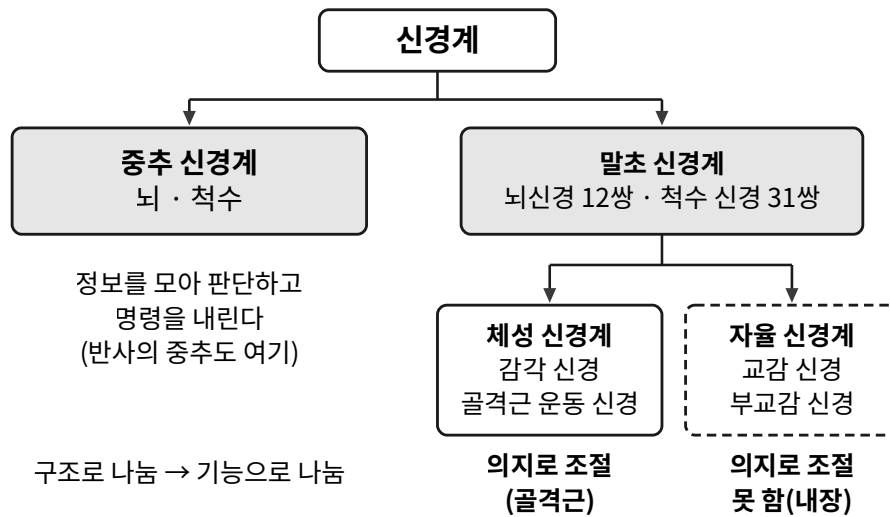


그림 5. 신경계의 구분 — 구조로는 중추(뇌·척수)와 말초(뇌신경 12쌍·척수 신경 31쌍)로, 말초는 다시 기능으로 체성 신경계와 자율 신경계로 나눈다(모식도)

태오 말초 신경계가 다시 체성과 자율로 나뉘네요. 차이가 뭐예요?

석 교수 조절하는 대상과, 의지로 조절할 수 있느냐다. **체성 신경계**는 피부·눈·귀 같은 감각 기관에서 오는 감각 신경과 골격근을 움직이는 운동 신경으로 이루어진다. 팔을 들고 싶으면 들 수 있지. **자율 신경계**는 심장, 소화관, 혈관, 분비샘 같은 내장 기관을 조절하고, 우리의 의지와 상관없이 일한다. 심장을 멈추라고 명령할 수는 없잖나?

이모 그건 다행이네요. 잠자는 동안에도 심장이 뛰어야 하니까요.

석 교수 자율 신경계는 다시 **교감 신경**과 **부교감 신경**으로 나뉜다. 교감 신경은 위급할 때 심장을 빨리 뛰게 하고, 부교감 신경은 쉴 때 심장을 느리게 하고 소화를 돕는다. 한 기관에 두 신경이 함께 와서 서로 반대로 작용하는데, 이걸 12장에서 자세히 본다.

태오 교과서마다 나누는 방식이 조금 달라요. 어떤 책은 말초 신경계를 감각 신경(구심성)과 운동 신경(원심성)으로 먼저 나누고, 운동 신경을 체성과 자율로 나누던데요.

석 교수 좋은 지적이다. 신호의 방향으로 나누면 중추로 들어오는 것이 **구심성**, 중추에서 나가는 것이 **원심성**이다. 이 방식으로는 자율 신경을 원심성 신경의 한 갈래로 본다. 어느 방식이든 같은 신경을 다른 각도에서 나눈 것이니, 시험지의 제시문이 쓰는 분류를 그대로 따라가면 된다. 4부 **기출문제 4**(건국대 2015) (238쪽)의 제시문 (가)도 체성 신경과 자율 신경을 이렇게 구분해 놓고 시작한다. 지금까지를 표 4에 정리했다.

표 4. 신경계의 구분과 하는 일 — 구성, 조절 대상, 의지로 조절할 수 있는가

구분	구성	하는 일·조절 대상	의지로 조절?
중추 신경계	뇌, 척수	감각 정보를 모아 판단하고 명령을 내림, 반사의 중추	대뇌의 판단은 의식적, 반사는 무의식적
말초 · 체성 신경계	감각 신경, 골격근의 운동 신경	감각 기관의 정보를 중추로, 중추의 명령을 골격근으로	운동은 의지로 조절함
말초 · 자율 신경계	교감 신경, 부교감 신경	심장, 소화관, 혈관, 분비샘, 동공 등 내장 기관	의지로 조절하지 못함

하린 그럼 아침에 손을 뻗 건 체성 신경계예요, 자율 신경계예요?

석 교수 손을 뻗 근육은 팔의 골격근이니 체성 신경계의 운동 뉴런이 움직인 것이다. 다만 그 명령을 내린 곳이 대뇌가 아니라 척수라서 의지와 상관없이 일어났을 뿐이야. ‘체성 = 의지로 조절’이라고 외우면 반사에서 헛갈리니, 체성은 골격근과 감각 기관을 맡는 신경, 반사는 그 신경을 쓰되 대뇌를 거치지 않는 지름길이라고 구분해 두자.

이모 신경계 말고 호르몬도 몸을 조절한다고 들었어요. 둘은 어떻게 달라요?

석 교수 신경은 정해진 길로 특정 세포에만 빠르게 신호를 보내고, 호르몬은 혈액을 타고 온몸으로 퍼져 수용체가 있는 세포에만 작용한다. 그래서 신경은 빠르고 좁고 짧게, 호르몬은 느리고 넓고 오래 작용해. 이 비교는 14장의 주제이고, 4부 **기출문제 2**(연세대 2022) (219쪽)이 정확히 이것을 묻는다.

1.3 반응 시간을 재 보자

석 교수 이제 반사가 아닌, 생각해서 하는 반응은 얼마나 걸리는지 재 보자. 이 자로 실험을 한다. 태오가 자의 위쪽 끝을 잡고 늘어뜨리면, 하린이는 자의 0 눈금 높이에 엄지와 검지를 벌리고 기다린다. 태오가 예고 없이 자를 놓으면 하린이가 최대한 빨리 잡는다.

하린 잡은 곳의 눈금을 읽으면 자가 떨어진 거리가 나오겠네요.

석 교수 그렇다. 자는 처음에 멈춰 있다가 중력으로 떨어지니 떨어진 거리 d 와 시간 t 사이에 $d = \frac{1}{2}gt^2$ 가 성립한다. 거꾸로 풀면 $t = \sqrt{2d/g}$ 이다. 거리를 재면 반응 시간이 나오는 거지. **그림 6**가 이 관계를 그린 그래프다.

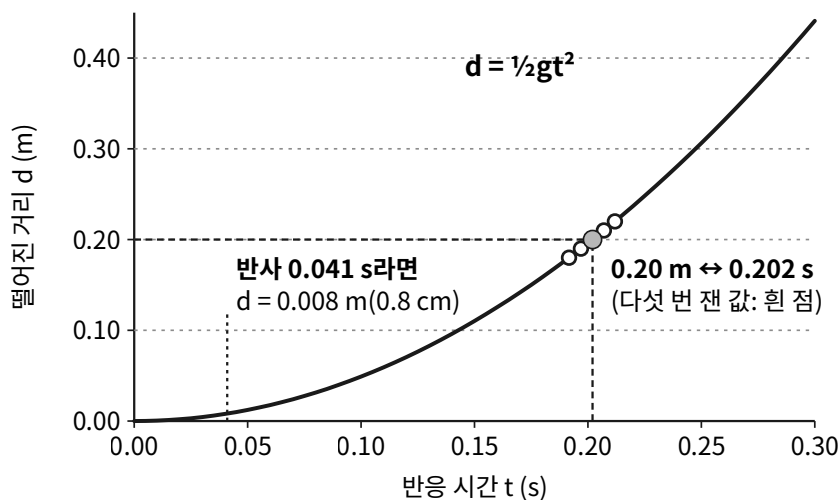


그림 6. 자 잡기 실험의 거리-시간 관계 — $d = \frac{1}{2}gt^2$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)로 계산한 곡선, 0.20 m는 0.202 s에 해당한다(계산값)

태오 직선이 아니라 휘어 있네요. 시간이 두 배가 되면 거리는 네 배가 되니까요.

석 교수 그래서 눈금 간격을 시간으로 바로 바꿀 수 없다. 꼭 식에 넣어야 해. 실제로 하린이가 다섯 번 잡았더니 이런 값이 나왔다.

문제 1.2

자 잡기 실험에서 하린이가 자를 잡은 위치는 놓은 점 아래 0.18, 0.21, 0.20, 0.22, 0.19 m였다. (가) 0.20 m에 해당하는 반응 시간을 구하라. (나) 다섯 번의 평균 반응 시간을 구하라. (다) 이 반응 시간을 문제 1.1의 반사 시간과 비교하고, 차이가 생기는 까닭을 신경 경로로 설명하라. ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

태오 (가)는 $t = \sqrt{2 \times 0.20 \div 9.8} = \sqrt{0.04082} = 0.202 \text{ s}$ 예요.

하린 (나)는 거리 평균부터 낼게요. $0.18 + 0.21 + 0.20 + 0.22 + 0.19 = 1.00$, 다섯으로 나누면 0.20 m. 그러니까 평균 반응 시간도 0.202 s예요.

석 교수 엄밀히 하면 다섯 거리를 각각 시간으로 바꾼 뒤 평균을 내야 한다. 곡선이 휘어 있으니 두 방법이 꼭 같지는 않아. 태오가 확인해 볼래?

태오 0.192, 0.207, 0.202, 0.212, 0.197 s. 더하면 1.010, 평균 0.202 s. 차이가 0.001 s도 안 나네요.

석 교수 값이 평균 근처에 모여 있어서 차이가 작다. 값이 넓게 흩어지면 차이가 커지니, 원칙은 ‘각각 바꾼 뒤 평균’이다. 그럼 (다)는?

하린 $0.202 \div 0.041 = 4.9$ 니까 반응 시간이 반사 시간의 약 다섯 배예요. 자를 잡을 때는 눈에서 신호가 뇌로 가고, 대뇌가 ‘떨어진다’고 판단해서 손가락 근육에 명령을 내려야 하니까 길이 길고 시냅스도 훨씬 많아요.

석 교수 정답이다. (가) 0.202 s, (나) 0.202 s, (다) 약 다섯 배, 경로가 길고 대뇌를 거치며 시냅스가 많기 때문이다. 하나 덧붙이면, 거리만 따지면 눈에서 뇌, 뇌에서 손가락까지 다 합쳐도 2 m가 안 된다. 그러니 0.2초의 대부분은 축삭을 달리는 시간이 아니라 뇌 안에서 많은 시냅스를 거치며 판단하는 시간이야.

실험을 믿을 만하게 만드는 법

이모 그런데 하린이가 몇 번 하다 보니 태오가 언제 놓을지 눈치채는 것 같던데요.

석 교수 날카로운 관찰이다. 놓는 순간을 예측하면 반응 시간이 아니라 예측 실력을 재게 된다. 그래서 놓기 전 기다리는 시간을 매번 다르게, 무작위로 정해야 해. 그 밖에 무엇을 같게 두어야 할까?

태오 손가락을 벌린 폭, 자를 잡는 손(오른손·왼손), 자의 처음 높이요. 그리고 한 번만 재면 우연이 섞이니까 여러 번 재서 평균을 내야 하고요.

하린 연습하면 빨라질 수도 있으니까 처음 몇 번은 연습으로 빼는 게 좋겠어요.

석 교수 셋 다 맞다. 이렇게 바꾸는 것 하나(변인)만 남기고 나머지를 같게 두는 것이 변인 통제다. 만약 ‘소리 신호와 빛 신호 중 어느 쪽에 더 빨리 반응하나’를 알고 싶다면 바꾸는 것은 신호의 종류 하나이고, 나머지 조건은 모두 같게 두어야 한다. 비교의 기준이 되는 조건을 대조군이라고 부르고, 4부 **기출문제 11**(한양대 2009) (308쪽)은 바로 이런 감각 실험의 설계가 타당한지를 따지는 문제다.

1.4 신호는 전자가 아니라 이온이다

태오 교수님, 오전에 말씀하신 것 다시 여쭙볼게요. 신경 신호가 전기라면 전자가 흐르는 게 맞지 않아요? 전기 신호니까 빛만큼 빨라야 할 것 같은데요.

- 석 교수** 숫자로 확인해 보자. 구리 전선에서 전기 신호는 빛의 속도의 상당한 비율, 초속 수억 미터로 퍼진다. 신경 신호는 빠른 것이 초속 100 m 남짓이다.
- 태오** 3억 m/s의 절반만 잡아도 $1.5 \times 10^8 \div 100 = 1.5 \times 10^6$ 이니까 백만 배 넘게 느리네요.
- 석 교수** 그 엄청난 차이가 신경 신호가 전자의 흐름이 아니라는 증거다. 신경 신호는 세포막 안팎의 이온, 주로 Na^+ 와 K^+ 가 막에 난 작은 문을 지나 움직이며 생기는 전압 변화가 축삭을 따라 차례로 옮겨 가는 것이다. 문을 열고 이온이 들어오고, 그 옆의 문이 열리고... 이런 식으로 한 칸씩 다시 만들어지며 가니 느리지만, 대신 1 m를 가도 신호의 크기가 줄지 않는다.
- 하린** 전선은 길어지면 전기가 약해진다고 들었어요.
- 석 교수** 그래. 축삭은 전선으로 치면 아주 나쁜 전선이다. 속은 찐물이라 저항이 크고, 피복인 세포막은 얇아서 전기가 샌다. 그래서 몸은 신호를 그냥 흘려보내지 않고 가는 길마다 다시 만들어 낸다. 그 ‘다시 만드는 신호’가 7장의 **활동 전위**다.
- 이모** 신경 신호의 속도는 누가 처음 잰어요?
- 석 교수** 19세기 중엽 독일의 헬름홀츠가 개구리 다리 근육과 신경으로 잰다. 신경의 두 지점을 자극해 근육이 수축하기까지의 시간 차이를 재고, 두 지점 사이 거리를 그 시간 차이로 나눴지. 결과는 초속 수십 미터였다. 그때까지 많은 사람이 신경 신호는 너무 빨라 잴 수 없다고 생각했는데, 생각보다 훨씬 느린 값이 나와서 신호가 단순한 전기의 흐름이 아니라 생명 현상이라는 것을 보여 주었다.
- 태오** 두 지점을 자극해서 시간 차이를 재면 근육이 수축하는 데 걸리는 시간이 빠지니까 깔끔하네요.
- 석 교수** 바로 그게 실험 설계의 묘미다. 우리가 모르는 부분(근육이 반응하는 데 걸리는 시간)을 두 측정에 똑같이 넣어 두고 차이를 빼서 없앤 거야. 9장에서 이 방법으로 전도 속도를 다시 계산한다.
- 석 교수** 오늘 그린 지도를 이 책의 장들과 이어 보자. 반사궁의 뉴런 하나를 확대하면 2장, 그 뉴런의 막을 확대하면 3~6장, 막에서 신호가 생기는 순간이 7~8장, 신호가 축삭을 달리는 것이 9장, 뉴런과 뉴런·근육 사이가 10~11장, 내장을 맡는 자율 신경이 12장, 출발점인 수용기가 13장이다.
- 하린** 오늘 그린 그림 한 장이 책 전체의 목차네요.

핵심 자극에서 반응까지 신경계를 읽는 4단계

1. 길을 순서대로 쓴다: 자극 → 수용기 → 감각 뉴런 → 중추(연합 뉴런) → 운동 뉴런 → 효과기 → 반응.
2. 중추가 어디인지 본다: 대뇌를 거치면 의식적 반응, 척수·연수·중간뇌에서 처리하면 반사다. 반사는 경로가 짧고 시냅스가 적어 빠르다.
3. 말초 신경을 나눈다: 골격근과 감각 기관은 체성 신경계, 내장 기관은 자율 신경계(교감·부교감)다.
4. 시간을 계산한다: 전도 시간 = 거리 ÷ 속도, 여기에 시냅스 수 × 0.5 ms를 더한다(문제 1.1: $20 + 20 + 1 = 41 \text{ ms}$).

스스로 풀어 보기

1. 자 잡기 실험에서 자를 잡은 위치가 놓은 점 아래 0.15 m였다. 반응 시간은 몇 초인가? ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)
2. 키가 큰 사람에서 감각 뉴런과 운동 뉴런의 길이가 각각 1.2 m라면, 문제 1.1과 같은 조건에서 반사 시간은 몇 ms인가?
3. 다음을 조절하는 신경을 체성 신경계와 자율 신경계로 구분하라. (가) 밝은 곳에서 동공이 작아짐 (나) 공을 던지려고 팔을 뒤로 젖힘 (다) 놀랐을 때 심장 박동이 빨라짐
4. 움츠림 반사가 대뇌가 판단하는 반응보다 빠른 까닭을 신경 경로의 두 가지 차이로 설명하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 지도는 4부의 여러 기출에서 첫 문장이 된다. **기출문제 4**(건국대 2015) (238쪽)은 제시문 (가)에서 체성 신경과 자율 신경을 나눈 뒤, 골격근을 막는 독과 동공 근육을 막는 독이 사냥에 어떤 차이를 낳는지 묻는다. 그 답은 이 장의 표 4에서 시작한다. **기출문제 2**(연세대 2022) (219쪽)은 신경계와 내분비계의 조절 방식 차이를 비교하게 하는데, 신경이 정해진 길로 빠르게 신호를 보낸다는 이 장의 설명이 그 비교의 한쪽 축이다. **기출문제 5**(부산대 2015) (248쪽)의 전도 속도 비교에서는 문제 1.1처럼 거리와 시냅스 수를 함께 따져야 한다.

이 장의 참고문헌

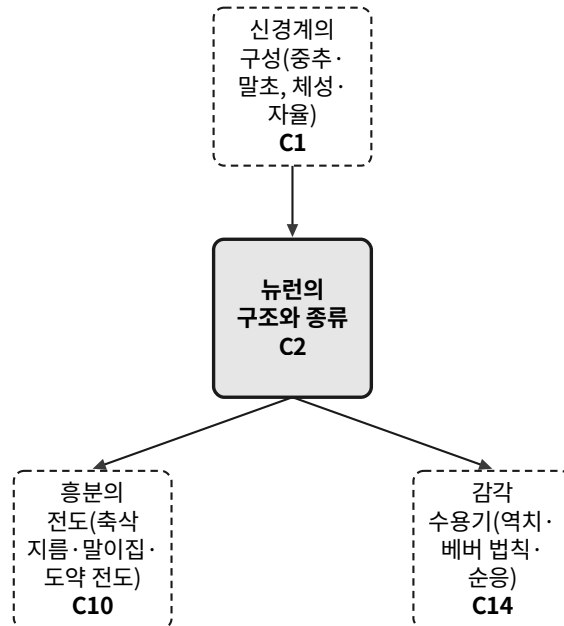
- Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H., & Siegelbaum, S. A. (Eds.). (2021). Principles of neural science (6th ed.). McGraw Hill.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., Mooney, R. D., Platt, M. L., & White, L. E. (Eds.). (2018). Neuroscience (6th ed.). Oxford University Press.
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). Campbell biology (12th ed.). Pearson.

제 2장 뉴런: 신호를 나르는 세포

새 개념 신경 세포체 · 가지 돌기 · 축삭 돌기 · 말이집과 랑비에 결절 · 감각·연합·운동 뉴런

이어짐 신경계 1장 · 전도 9장 · 시냅스 10장

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 뉴런의 구조와 종류)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 5 (부산대 2015년) (248쪽)	흥분 전도 속도와 복어 독	C2 뉴런의 구조와 종류

발끝까지 1미터, 세포 하나의 전선

허리의 척수에서 엄지발가락 근육까지 뻗은 운동 뉴런

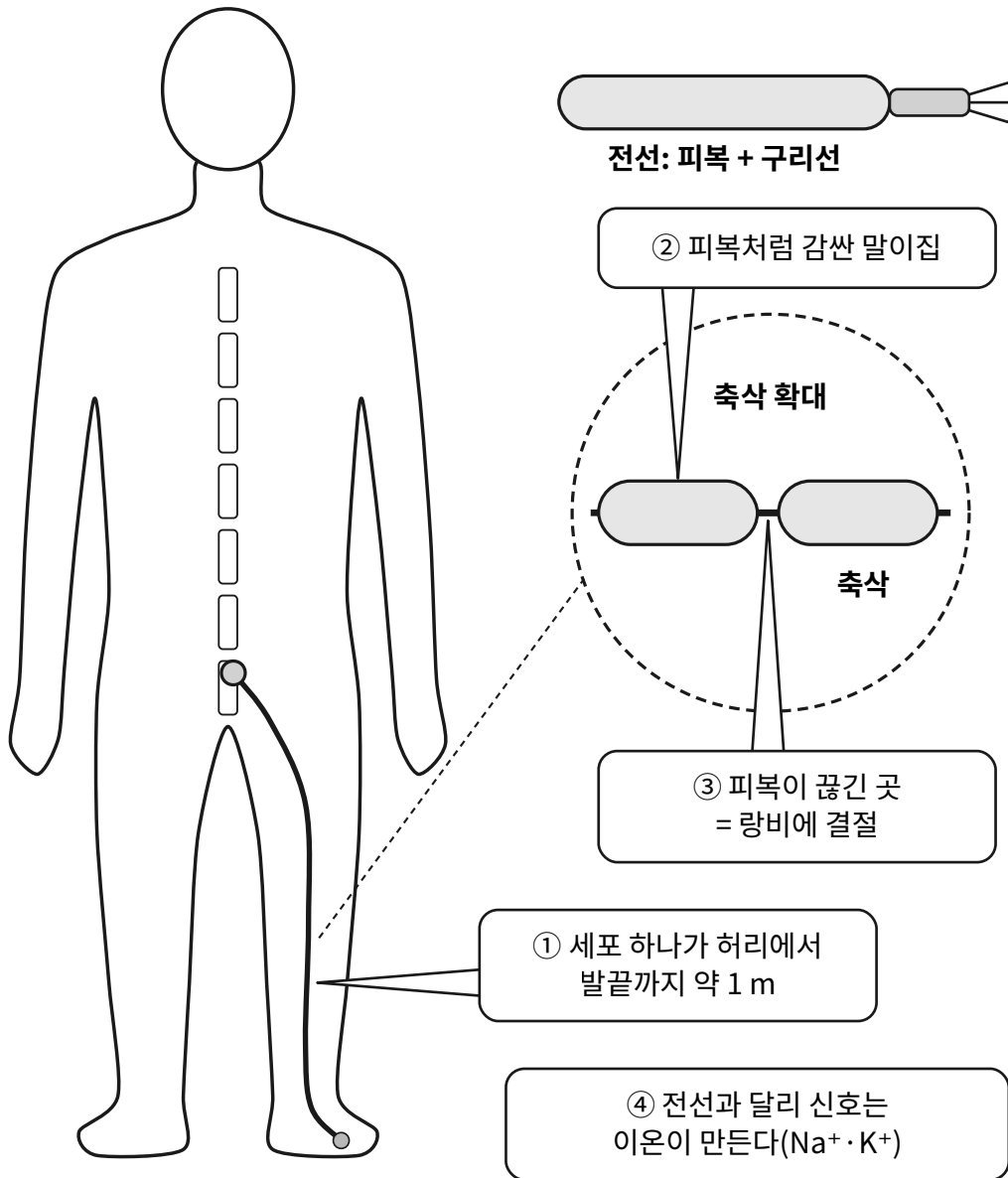


그림 8. 발끝까지 1미터, 세포 하나의 전선 — 허리의 척수에서 엄지발가락 근육까지 뻗은 운동 뉴런 하나를 전선 묶음에 견주어 본 장면(모식도, 길이는 어림값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 엄지발가락을 움직이는 운동 뉴런은 세포 하나가 척수에서 발끝까지 약 1 m 뻗어 있다.
2. 전선의 피복처럼 축삭을 감싼 말이집이 있고, 피복이 끊긴 마디가 랑비에 결절이다.
3. 전선과 달리 축삭 속 신호는 전자가 아니라 막을 건너는 이온이 만든다.

이 장의 출발점

- **기본개념편 제 1장** (16쪽)의 반사궁: 수용기 → 감각 뉴런 → 연합 뉴런 → 운동 뉴런 → 효과기.
- 세포의 기본 구조: 세포막, 세포질, 핵, 미토콘드리아(중학교 과학·통합과학).
- 길이 단위: $1\text{ m} = 1000\text{ mm} = 10^6\text{ }\mu\text{m}$ (마이크로미터), $1\text{ }\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$ (나노미터).

두 번째 토요일, 석 교수는 과학방 창고에서 낡은 전선 한 묶음을 꺼내 왔다. 피복을 벗겨 낸 끝에서 가는 구리선 여러 가닥이 빠져나와 있었다. 이모는 그 옆에서 발목을 주무르고 있었다. 지난주에 오래 쪼그려 앉아 일한 뒤로 종아리에서 발끝까지 저린다고 했다.

이모 교수님, 허리를 오래 구부리고 있으면 발끝이 저려요. 의사 선생님은 허리에서 나온 신경이 눌러서 그렇대요. 허리 신경이 어떻게 발끝까지 가요?

석 교수 오늘 이야기가 바로 그거다. 허리의 척수에서 발끝까지 가는 신경은 세포 여러 개가 줄줄이 이어진 게 아니라, 세포 하나가 길게 뻗은 것이야.

하린 세포 하나가 1 m나 돼요? 세포는 현미경으로 봐야 보이는 거잖아요.

석 교수 세포의 몸통은 현미경으로 봐야 한다. 그런데 거기서 뻗은 가지 하나가 1 m까지 간다. 이 특별한 세포가 **뉴런**, 곧 신경 세포다. 오늘은 뉴런의 생김새와 종류를 보자.

2.1 세포 하나가 1미터

석 교수 그림 9는 척수에서 근육으로 가는 운동 뉴런이다. 부분마다 이름이 있다.

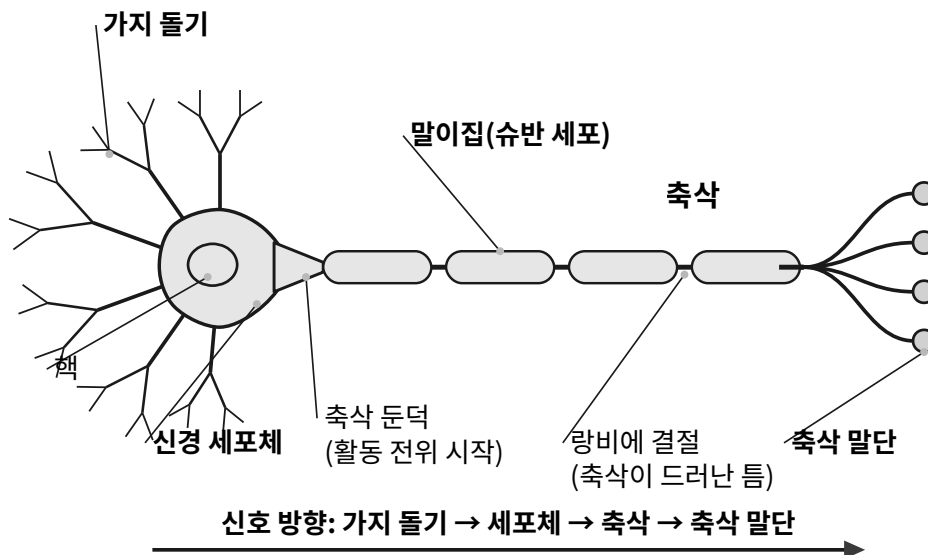


그림 9. 운동 뉴런의 구조 — 신경 세포체에서 가지 돌기가 여러 갈래로 뻗고, 축삭 돌기에서 시작한 축삭 하나가 말이 집에 싸여 축삭 말단까지 간다. 신호는 가지 돌기 → 세포체 → 축삭 → 축삭 말단 방향으로 흐른다(모식도, 길이 비율은 줄여서 그림)

석 교수 핵이 있는 둥근 부분이 **신경 세포체**다. 단백질을 만들고 세포 전체를 먹여 살리는 본부야. 세포체에서 나뭇가지처럼 짧게 여러 갈래로 뻗은 것이 **가지 돌기**, 다른 뉴런이 보낸 신호를 받는 안테나다. 그리고 세포체에서 하나만 길게 뻗은 것이 **축삭 돌기**, 줄여서 축삭인데, 신호를 멀리 보내는 전선이다. 축삭 끝은 여러 갈래로 갈라져 **축삭 말단**이 되고, 거기서 다음 세포에 신호를 넘긴다.

태오 그러니까 신호는 가지 돌기로 들어와서 세포체를 지나 축삭으로 나가는 거네요. 방향이 정해져 있어요.

석 교수 그렇다. 이 방향이 시냅스에서 신호가 한쪽으로만 가는 이유와 이어진다. 10장에서 다시 본다. 하나 더, 세포체와 축삭이 만나는 언덕 같은 부분을 **축삭 둔덕**이라고 하는데, 여기서 활동 전위가 처음 만들어진다. 가지 돌기로 들어온 여러 신호가 이곳에서 합쳐져 ‘보낼까 말까’가 결정되는 셈이야.

하린 세포체에 비해 축삭이 엄청 길게 그려져 있어요.

석 교수 실제로는 그림보다 훨씬 더 길다. 숫자로 확인해 보자.

문제 2.1

키 170 cm인 사람의 엄지발가락을 움직이는 운동 뉴런의 축삭은 허리 부근 척수에서 발까지 약 1.0 m이고, 지름은 약 $10\ \mu\text{m}$ 이다. (가) 축삭의 길이 : 지름의 비를 구하라. (나) 이 축삭의 지름을 1 mm로 키운 모형을 만든다면 모형 축삭의 길이는 몇 m인가? (다) 세포체를 지름 $20\ \mu\text{m}$ 의 공으로 보면, 축삭의 부피는 세포체 부피의 몇 배인가? (원주율 3.14)

태오 (가)는 1.0 m를 μm 로 바꾸면 $1.0 \times 10^6\ \mu\text{m}$, 지름이 $10\ \mu\text{m}$ 니까 $1.0 \times 10^6 \div 10 = 1.0 \times 10^5$. 길이 : 지름 = $1.0 \times 10^5 : 1$ 이에요.

하린 (나)는 지름이 $10\ \mu\text{m}$ 에서 1 mm, 곧 $1000\ \mu\text{m}$ 로 100배 커지니까 길이도 100배, $1.0\ \text{m} \times 100 = 100\ \text{m}$ 예요. 지름 1 mm 실이 100 m나 되는 거네요.

석 교수 맞다. 운동장 트랙 반 바퀴쯤 되는 실이다. (다)는?

태오 축삭은 원기둥이니까 부피는 $3.14 \times (5\ \mu\text{m})^2 \times 1.0 \times 10^6\ \mu\text{m} = 3.14 \times 25 \times 10^6 = 7.85 \times 10^7\ \mu\text{m}^3$. 세포체는 공이니까 $\frac{4}{3} \times 3.14 \times (10\ \mu\text{m})^3 = 4.19 \times 10^3\ \mu\text{m}^3$. 나누면 $7.85 \times 10^7 \div 4.19 \times 10^3 = 1.9 \times 10^4$. 약 1만 9천 배예요.

석 교수 정답이다. (가) $1.0 \times 10^5 : 1$, (나) 100 m, (다) 약 1.9×10^4 배. 세포질의 거의 전부가 축삭 속에 있는 셈이지. 그런데 단백질을 만드는 리보솜과 핵은 대부분 세포체에 있다. 그러면 무슨 문제가 생길까?

이모 본사에서 만든 물건을 1 m 떨어진 지점까지 날라야겠네요.

석 교수 그래서 축삭 안에는 미세 소관이라는 단백질 레일이 깔려 있고, 운반 단백질이 그 레일을 따라 물건을 실어 나른다. 빠른 것은 하루에 수백 mm를 간다고 알려져 있으니, 발끝까지는 며칠이 걸리는 거야(교과 밖 심화). 이 의존 관계를 보여 주는 오래된 실험이 있다.

축삭을 자르면 — 왈러의 실험

석 교수 1850년 영국의 왈러는 개구리 허로 가는 신경을 자르고 며칠 동안 관찰했다. 잘린 축삭은 두 토막이 된다. 세포체와 이어진 쪽, 그리고 세포체에서 떨어져 나간 쪽.

하린 떨어져 나간 쪽이 죽었을 것 같아요.

- 석 교수** 맞다. 세포체에서 떨어진 쪽 축삭은 며칠 사이에 부서져 사라지고, 세포체와 이어진 쪽은 살아남았다. 대조로 자르지 않은 반대쪽 신경은 그대로였어.
- 태오** 결론은 ‘축삭은 세포체 없이는 살 수 없다’, 그러니까 축삭은 세포체가 먹여 살리는 세포의 일부라는 거네요.
- 석 교수** 잘 정리했다. 실험, 결과, 결론을 한 줄씩 쓰면 그렇게 된다. 그리고 이 결과는 ‘축삭이 별개의 관이 아니라 세포에 딸린 가지’라는 생각, 이 장 끝에서 볼 뉴런설을 받쳐 주는 증거가 되었다. 말초 신경은 세포체 쪽 토막이 다시 자라 나가기도 하는데, 하루에 1 mm 안팎이라고 알려져 있다(교과 밖 심화).
- 이모** 그럼 허리에서 눌린 신경이 회복되는 데 오래 걸리는 것도 그래서요?
- 석 교수** 눌린 정도에 따라 다르지만, 축삭 자체가 상했다면 발끝까지 다시 자라는 데 몇 달이 걸릴 수 있다. 1 m를 하루 1 mm로 가면 1000일이니까.

2.2 말이집과 랭비에 결절

- 태오** 그림에서 축삭을 감싼 소시지 같은 마디들은 뭐예요?
- 석 교수** **말이집**이다. 다른 세포가 축삭을 둘둘 감아 만든 절연층이야. 말초 신경에서는 **슈반 세포**가, 뇌와 척수에서는 **히소 돌기 아교 세포**라는 세포가 이 일을 한다(히소 돌기 아교 세포는 교과 밖 심화). 슈반 세포 하나가 자기 세포막을 축삭에 여러 겹, 많게는 수십 겹 감는다. 세포막은 기름 성분인 인지질이 주성분이라 전기가 잘 통하지 않는다.
- 하린** 전선 피복이네요!
- 석 교수** 그렇다. 이 낡은 전선의 피복처럼. 그런데 축삭의 피복은 군데군데 끊겨 있다. 말이집과 말이집 사이, 축삭이 그대로 드러난 짧은 틈을 **랑비에 결절**이라고 한다. 결절 사이의 간격은 굵은 축삭에서 약 1 mm이고, 결절 하나의 폭은 1 μ m 안팎이다.
- 하린** 그럼 1 m짜리 축삭 하나를 감싸려면 슈반 세포가 몇 개나 필요해요?
- 태오** 말초 신경에서는 슈반 세포 하나가 결절과 결절 사이 한 칸을 맡는다고 하셨으니까, $1 \text{ m} \div 1 \text{ mm} = 1000$ 칸. 슈반 세포 약 1000개가 줄지어 감고 있는 거네요.
- 석 교수** 맞다. 축삭 하나에 다른 세포 천 개가 매달려 피복을 대 주는 셈이다. 그 천 개 사이의 이음매가 하나하나 랭비에 결절이고, 결절 폭이 1 μ m쯤이니 1000개를 다 합쳐도 1 mm, 곧 축삭 길이의 1000분의 1만 드러나 있다.
- 태오** 피복을 일부러 끊어 놓았다고요? 왜요?
- 석 교수** 9장의 핵심 질문이다. 미리 말하면, 말이집으로 덮인 곳에서는 이온이 막을 건너지 못하니 활동 전위는 결절에서만 생기고, 신호는 결절에서 결절로 건너뛰듯 간다. 이것을 **도약 전도**라고 하고, 그래서 말이집 축삭은 같은 굵기의 민말이집 축삭보다 훨씬 빠르다. 오늘은 ‘말이집은 절연, 결절은 이온이 드나드는 창’이라는 것만 기억하자.
- 이모** 전선 피복이 벗겨지면 합선이 되잖아요. 말이집이 망가지는 병도 있어요?
- 석 교수** 있다. 면역 세포가 말이집을 공격하는 병이 있는데, 그러면 신호가 느려지거나 끊겨서 저림, 근력 약화, 시력 이상 같은 증상이 나타난다. 뇌와 척수의 말이집이 상하는 다발 경화증, 말초 신경의 말이집이 상하는 길랭-바레 증후군이 그 예다. 말이집 하나가 전도에 얼마나 중요한지를 거꾸로 보여 주는 병이지.

신경 한 가닥과 뉴런 하나는 다르다

- 이모** 그런데 교수님, 의사 선생님이 ‘좌골 신경’이라고 할 때 그건 뉴런 하나예요?
- 석 교수** 아니다. 많은 학생이 헛갈리는 곳이다. 해부할 때 눈에 보이는 하얀 끈 같은 **신경**은 수천에서 수만 개의 축삭이 결합 조직에 싸여 다발을 이룬 것이다. 좌골 신경은 굵기가 어른 손가락만 하고, 그 안에 감각 뉴런의 축삭과 운동 뉴런의 축삭이 함께 들어 있다.
- 태오** 그러면 신경 하나에 신호가 양쪽 방향으로 다 지나가겠네요. 감각 신호는 척수 쪽으로, 운동 명령은 발 쪽으로요.
- 석 교수** 그렇다. 축삭 하나하나는 한 방향으로만 신호를 보내지만, 다발 전체로는 양방향 길이다. 그래서 허리에서 신경이 늘리면 저림 같은 감각 이상과 근력 약화 같은 운동 이상이 함께 나타날 수 있다. 이모의 발끝 저림은 감각 축삭 쪽 신호가 흐트러진 것이고.
- 하린** 뇌에는 뉴런이 몇 개나 있어요?
- 석 교수** 사람의 뇌에는 약 860억 개의 뉴런이 있다고 추정한다. 그리고 그 사이사이에 뉴런을 받치고 영양을 대고 말미집을 만드는 신경 아교 세포가 비슷한 수만큼 있다. 슈반 세포도 신경 아교 세포의 한 종류야. 뉴런이 신호를 나르는 주인공이라면, 신경 아교 세포는 무대를 꾸리는 사람들이다.
- 이모** 그 많은 세포가 다 펌프를 돌린다니 뇌가 에너지를 많이 쓸 만하네요.
- 석 교수** 맞다. 그 이야기는 4장에서 펌프를 볼 때 숫자로 확인하자.

크기를 한 줄에 놓아 보자

- 석 교수** 뉴런의 여러 부분은 크기 차이가 너무 커서 한 그림에 같은 비율로 그릴 수가 없다. 그래서 **그림 10**처럼 눈금 하나가 10배씩 커지는 로그 눈금에 늘어놓았다.

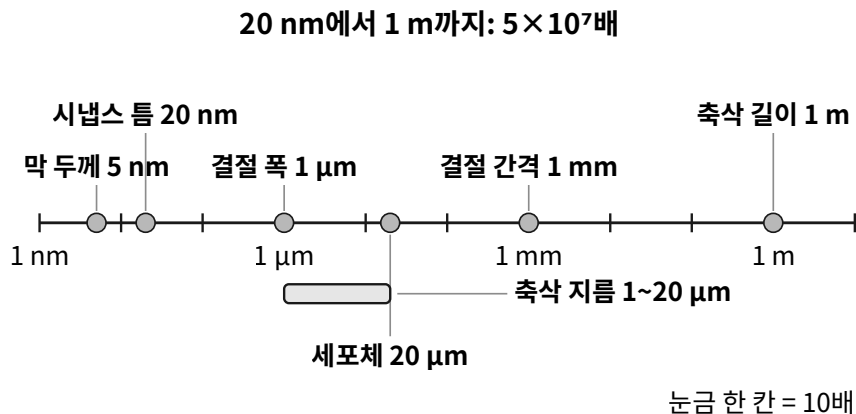


그림 10. 뉴런 각 부분의 크기를 로그 눈금 한 줄에 놓은 것 — 막 두께 5 nm, 시냅스 틈 20 nm, 결절 폭 1 μm, 축삭 지름 1~20 μm, 세포체 20 μm, 결절 간격 1 mm, 축삭 길이 1 m(대표값)

- 하린** 시냅스 틈부터 축삭 길이까지가 20 nm에서 1 m니까... 눈금이 일곱 칸 넘게 차이 나요.
- 태오** $1 \text{ m} \div 20 \text{ nm} = 1 \div (2 \times 10^{-8}) = 5 \times 10^7$ 배예요. 오천만 배요.
- 석 교수** 그 넓은 범위를 세포 하나가 다 품고 있다. 그래서 뉴런을 공부할 때는 지금 어느 눈금을 보고 있는지 늘 확인해야 해. 3~8장은 막 두께 수 nm의 세계, 9장은 mm와 m의 세계다.

2.3 뉴런의 세 종류

석 교수 1장의 반사궁에는 세 종류의 뉴런이 나왔다. 감각 뉴런, 연합 뉴런, 운동 뉴런. 모양으로도 구별할 수 있다. **그림 11**를 보자.

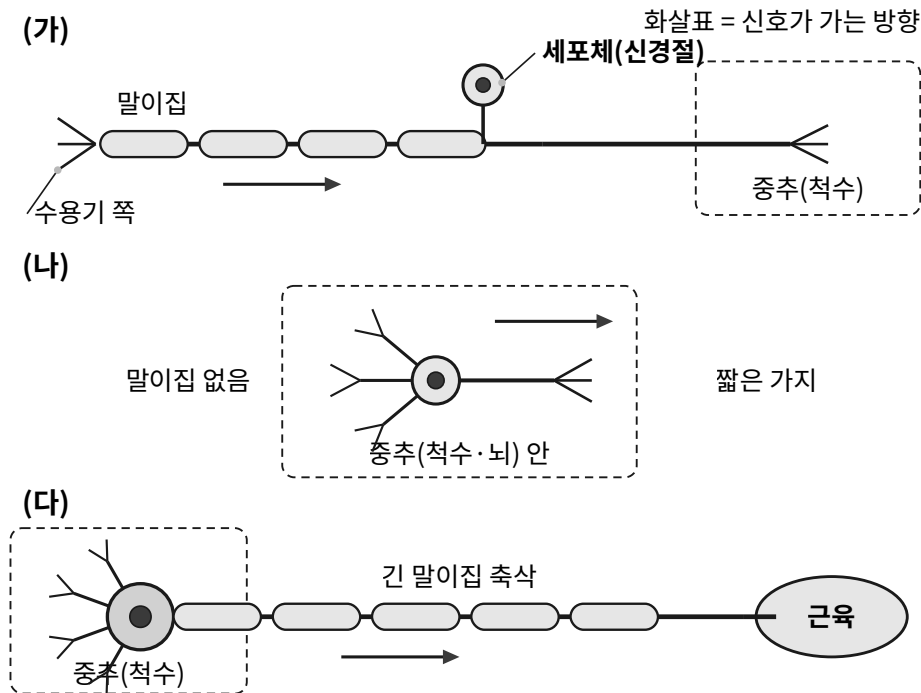


그림 11. 감각·연합·운동 뉴런의 모양 비교 — 감각 뉴런은 세포체가 축삭 중간 끝에 붙어 있고, 연합 뉴런은 중추 안에 서 짧은 가지를 뻗으며, 운동 뉴런은 중추 안의 큰 세포체에서 긴 말아집 축삭이 나간다. 화살표는 신호 방향(모식도)

하린 감각 뉴런은 세포체가 옆으로 비껴나 있어요. 길 한가운데 있지 않아요.

석 교수 잘 봤다. 감각 뉴런은 피부 같은 수용기에서 시작한 긴 가지가 척수 바로 옆의 신경절에 있는 세포체 결을 지나 척수 안으로 들어간다. 세포체가 신호가 지나가는 길 옆에 짧은 줄기로 매달린 꼴이야. 신호는 중추 쪽으로 들어가니 **구심성** 뉴런이라고도 한다.

태오 연합 뉴런은 작고 가지가 많아요. 말아집도 없고요.

석 교수 연합 뉴런은 뇌와 척수 안에 있으면서 감각 뉴런의 신호를 받아 판단하고 운동 뉴런에 넘긴다. 사람의 뉴런 대부분이 연합 뉴런이다. 교과서는 연합 뉴런을 대개 말아집이 없는 모양으로 그리는데, 실제로는 중추 안에도 말아집이 있는 긴 연합 뉴런이 많다. 뇌의 흰색 부분, 백색질이 흰 까닭이 말아집의 기름 성분 때문이니까(교과 밖 심화).

이모 운동 뉴런은 1장 그림의 그 길고 굵은 것이죠?

석 교수 그렇다. 세포체가 척수나 뇌 안에 있고, 가지 돌기가 잘 발달해 있으며, 긴 말아집 축삭이 근육까지 간다. 신호가 중추에서 밖으로 나가니 **원심성** 뉴런이다. 세 뉴런을 **표 6**에 비교했다.

표 6. 뉴런 세 종류의 비교 — 위치, 신호 방향, 세포체의 위치, 예

구분	위치	신호 방향	세포체의 위치·모양	예
감각 뉴런	수용기 ~ 중추	수용기 → 중추(구심성)	중추 밖 신경절, 축삭 중간 끝에 붙음	피부의 열·통증·촉각, 근육의 길이 감지

구분	위치	신호 방향	세포체의 위치·모양	예
연합 뉴런	뇌·척수 안	감각 뉴런 → 운동 뉴런	중추 안, 짧은 가지가 많음	척수 반사의 중간 뉴런, 대뇌의 뉴런
운동 뉴런	중추 ~ 효과기	중추 → 근육·분비샘 (원심성)	중추 안, 크고 가지 돌기 발달, 긴 말아집 축삭	팔·다리 골격근을 움직이는 뉴런

문제 2.2

그림 11의 (가)~(다)는 반사궁을 이루는 세 뉴런을 그린 것이다. (가)는 세포체가 척수 옆 신경절에 있고 축삭의 중간 결에 붙어 있으며, (나)는 척수 안에 있고 말아집이 없는 짧은 가지를 가졌으며, (다)는 척수 안의 큰 세포체에서 긴 말아집 축삭이 근육으로 뻗어 있다. 각 뉴런의 종류를 판정하고, 무릎을 굽히는 움츠림 반사에서 신호가 지나는 순서를 기호로 쓰라.

하린 (가)는 세포체가 옆에 붙어 있으니 감각 뉴런, (나)는 척수 안의 짧은 뉴런이니 연합 뉴런, (다)는 근육으로 가니 운동 뉴런이에요.

태오 순서는 수용기에서 출발하니까 (가) → (나) → (다)예요.

석 교수 정답이다. 감각 (가) → 연합 (나) → 운동 (다). 판정 근거를 쓸 때는 ‘세포체의 위치’와 ‘신호가 가는 곳’ 두 가지를 함께 쓰는 것이 좋다. 그림만 보고 ‘길어서 운동 뉴런’이라고 쓰면, 감각 뉴런도 1 m 가까이 길기 때문에 근거가 되지 않아.

태오 아, 감각 뉴런도 손끝에서 척수까지 가니까 길겠네요.

석 교수 그래서 모양을 볼 때는 길이보다 세포체가 어디에 어떻게 붙어 있는지, 그리고 축삭 말단이 어디에 닿는지를 본다. 4부 **기출문제 5**(부산대 2015) (248쪽)의 1-1은 뉴런 그림 네 개를 주고 전도 속도를 비교하게 하는데, 그때도 말아집이 있는지, 시냅스를 몇 번 건너는지를 그림에서 읽어 내야 한다.

2.4 뉴런을 처음 본 사람들

이모 이렇게 가늘고 긴 세포를 옛날 사람들은 어떻게 봤어요? 현미경으로 봐도 뒤엉켜 있었을 것 같은데요.

석 교수 실제로 19세기 중반까지 신경 조직은 현미경으로 봐도 뿌연 덩어리였다. 세포가 너무 뾰뾰하게 얹혀 있어서 하나하나를 구별할 수 없었거든. 1873년 이탈리아의 골지가 질산은을 쓰는 염색법을 찾아냈다. 신기하게도 이 방법은 뉴런 백 개 가운데 몇 개만 골라 새까맣게 물들이고 나머지는 투명하게 남겨 둔다.

하린 숲에서 나무 몇 그루만 까맣게 칠한 것 같겠네요. 그러면 한 그루가 어디서 어디까지인지 보이구요.

석 교수 바로 그거다. 그런데 같은 그림을 보고도 해석이 같았다. 골지는 신경 조직이 그물처럼 서로 이어진 하나의 덩어리라고 보았다. 스페인의 카할은 골지의 염색법을 개량해 수많은 뇌 부위를 그린 뒤, 뉴런 하나 하나는 서로 이어지지 않은 독립된 세포이고 서로 맞닿아 신호를 주고받는다고 주장했다. 이것이 **뉴런설**이다. 카할은 또 수많은 그림을 견주어 신호가 가지 돌기와 세포체로 들어와 축삭으로 나간다는, 이 장 첫머리의 그 방향 규칙도 제안했다. 살아 있는 신호를 재 보지 않고 모양만 보고 방향을 추론한 것이다.

태오 누가 맞았어요?

석 교수 1906년 두 사람은 노벨 생리·의학상을 함께 받았는데, 시상식 강연에서도 서로 다른 주장을 했다. 결론은 20세기 중반 전자 현미경이 내렸다. 뉴런과 뉴런 사이에 수십 nm의 틈, 곧 시냅스 틈이 실제로 있다는 것이 보였거든. 카할이 옳았던 거다. 다만 뉴런 사이가 전기적으로 직접 이어진 전기 시냅스도 일부 있다는 것이 뒤에 밝혀져, 골지의 생각에도 한 조각의 진실이 있었다고 말하기도 한다(교과 밖 심화).

이모 같은 것을 보고 다르게 해석하는 일이 과학에도 있군요.

석 교수 자주 있다. 그래서 논술에서도 자료를 보고 결론을 쓸 때 ‘이 자료가 무엇까지 보여 주고, 무엇이 보여 주지 못하는가’를 함께 쓰면 좋은 답안이 된다. 골지의 그림은 뉴런의 모양을 보여 주었지만, 뉴런이 이어져 있는지 떨어져 있는지는 그 해상도로는 판정할 수 없었던 거야.

핵심 뉴런을 읽는 4단계

1. 부분의 이름과 일: 가지 돌기(신호 받기) → 신경 세포체(핵, 단백질 합성) → 축삭 둔덕(활동 전위 시작) → 축삭(멀리 보내기) → 축삭 말단(다음 세포에 넘기기).
2. 말이집은 슈반 세포 등이 감은 절연층이고, 그 사이의 틈이 랑비에 결절이다. 활동 전위는 결절에서만 생긴다(9장 도약 전도).
3. 종류는 세포체의 위치와 신호 방향으로 판정한다: 감각(신경절, 축삭 결, 구심성) · 연합(중추 안) · 운동(중추 안, 긴 말이집 축삭, 원심성).
4. 크기 감각을 잡는다: 지름 10 μm , 길이 1 m(길이 : 지름 = $10^5 : 1$), 축삭 부피가 세포체의 약 2만 배라 세포체가 축삭을 먹여 살린다.

스스로 풀어 보기

1. 지름 2 μm , 길이 0.50 m인 감각 뉴런 축삭의 길이 : 지름의 비를 구하라.
2. 결절 간격이 1.0 mm인 말이집 축삭 1.0 m에는 랑비에 결절이 약 몇 개 있는가?
3. 연합 뉴런과 운동 뉴런을 세포체의 위치, 신호를 보내는 곳, 말이집의 유무(교과서 그림 기준)로 비교하라.
4. 월러의 실험에서 ‘자르지 않은 반대쪽 신경’은 어떤 역할을 하며, 이 실험에서 얻을 수 있는 결론은 무엇인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 뉴런 그림은 4부 **기출문제 5**(부산대 2015) (248쪽)의 제시문 (가)와 거의 같다. 그 문제는 말이집과 랑비에 결절, 시냅스를 설명한 뒤 네 가지 뉴런 배열에서 흥분이 전달되는 속도를 비교하게 하는데, 이 장에서 익힌 ‘말이집이 있는가, 시냅스를 몇 번 건너는가’를 그림에서 읽는 일이 첫걸음이다. **기출문제 4**(건국대 2015) (238쪽)에서는 감각 신경과 운동 신경, 그리고 골격근에 닿는 운동 뉴런의 축삭 말단이 문제의 무대가 된다.

이 장의 참고문헌

Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H., & Siegelbaum, S. A. (Eds.). (2021). Principles of neural science (6th ed.). McGraw Hill.

Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2016). Neuroscience: Exploring the brain (4th ed.). Wolters Kluwer.

Hursh, J. B. (1939). Conduction velocity and diameter of nerve fibers. American Journal of Physiology, 127(1), 131–139. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1939.127.1.131>

제 3장 세포막을 건너는 세 가지 길

새 개념 인지질 2중층 · 단순 확산 · 촉진 확산 · 운반체 포화 · 능동 수송

이어짐 Na^+ - K^+ 펌프 4장 · 휴지 전위 5장 · 활동 전위 7장

이 장의 개념도

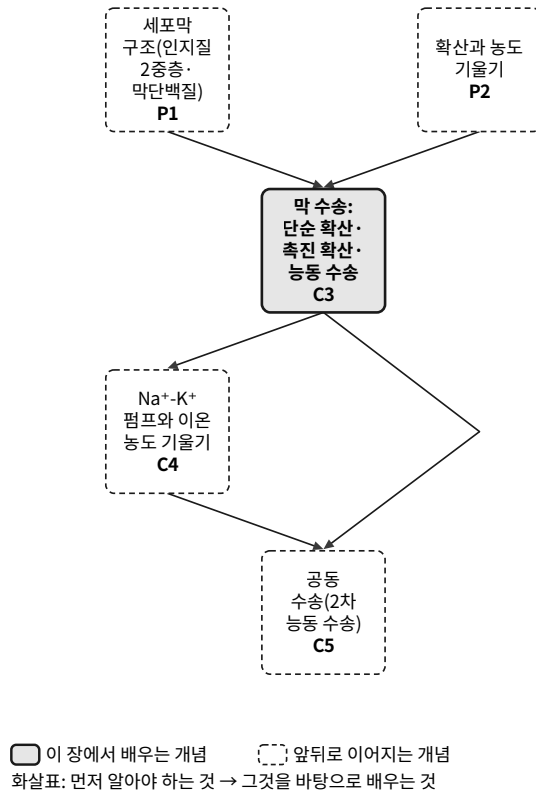


그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C3 막 수송: 단순 확산·촉진 확산·능동 수송)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 (경희대 2024년) (209 쪽)	막 수송 속도와 뉴런의 Na^+ · K^+ 이동	C3 막 수송: 단순 확산·촉진 확산·능동 수송

향수 냄새와 놀이공원 회전문

막을 건너는 세 가지 길을 놀이공원에서 보면

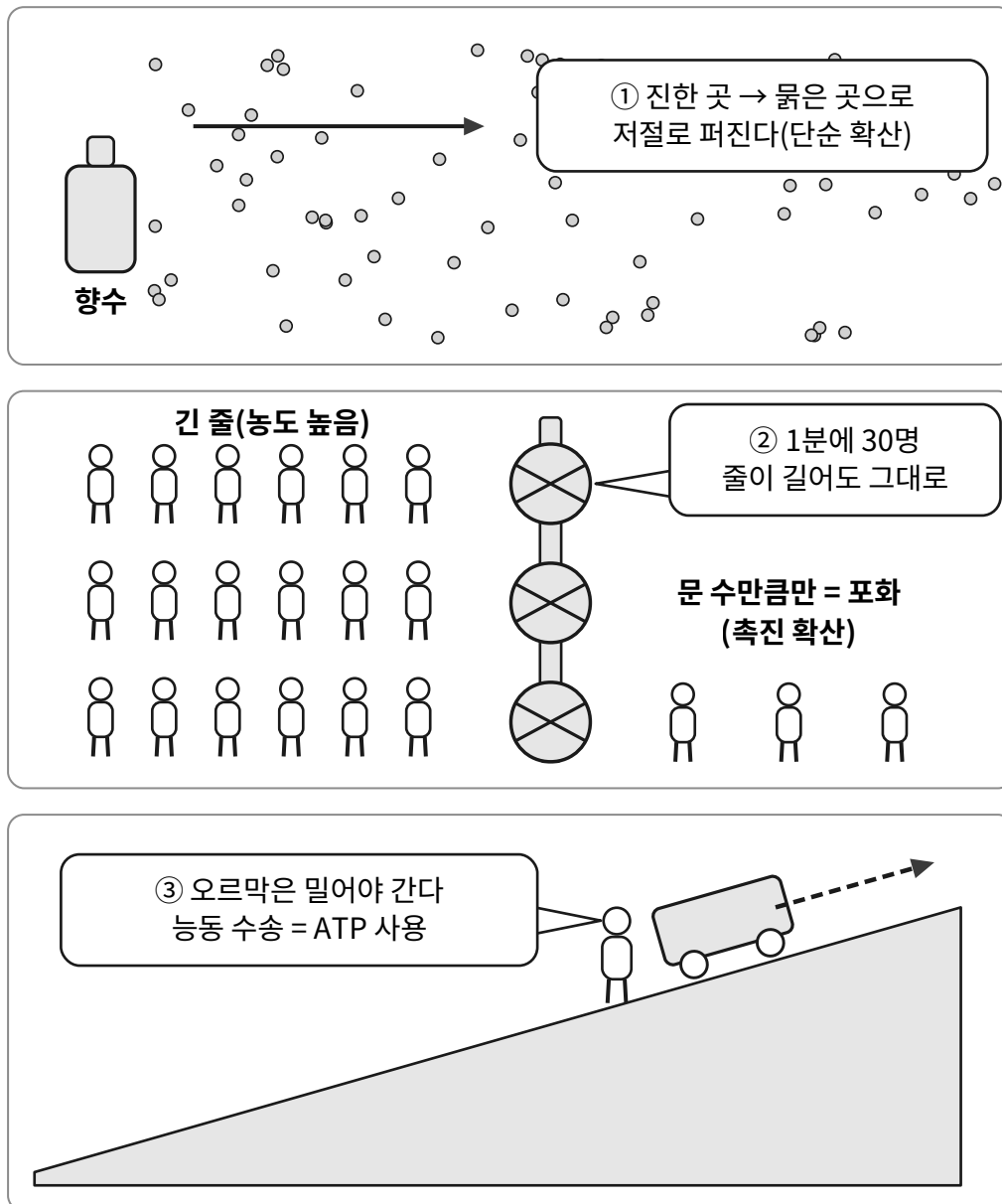


그림 13. 향수 냄새와 놀이공원 회전문 — 광장으로 저절로 퍼지는 향기(단순 확산), 줄이 아무리 길어도 시간당 통과 인원이 정해진 회전문(촉진 확산의 포화), 사람이 밀어 올리는 언덕길 수레(능동 수송)를 막 수송에 견준 장면(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 단순 확산은 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 저절로 퍼지며, 농도 차이가 클수록 빨라진다.
2. 촉진 확산은 막단백질이라는 문을 지나야 해서, 문이 모두 바쁘면 농도 차이를 더 키워도 빨라지지 않는다(포화).
3. 능동 수송은 에너지(ATP)를 써서 농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 물질을 밀어 올린다.

이 장의 출발점

- **확산:** 잉크 한 방울이 물 전체로 퍼지듯, 입자는 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 저절로 퍼진다(중학교 과학).
- **기본개념편 제 2장 (26쪽)**의 뉴런과 말이집: 말이집이 절연층인 까닭은 세포막의 주성분이 기름 성분(인지질)이기 때문이다.
- **ATP:** 세포가 쓰는 에너지 화폐로, 세포 호흡으로 만든다(통합과학·생명과학 I).

세 번째 토요일 아침, 이모는 새로 산 향수를 과학방 문간에서 한 번 뿌렸다. 몇 분 뒤 방 안쪽 책상에 앉아 있던 하린이 고개를 들었다.

하린 이모, 향수 뿌렸어요? 여기까지 냄새가 와요.

이모 문 앞에서 한 번 뿌렸을 뿐인데 벌써 거기까지 갔어? 바람도 없는데.

석 교수 그게 확산이다. 향수 분자들이 제멋대로 움직이다 보면, 많은 곳에서 적은 곳으로 퍼져 나가게 된다. 오늘은 이 확산이 세포막 앞에서 어떻게 되는지를 본다. 뉴런이 신호를 만드는 재료가 이온인데, 그 이온이 막을 어떻게 건너는지 알아야 5장의 휴지 전위도, 7장의 활동 전위도 이해할 수 있거든.

태오 세포막은 그냥 얇은 막이니까 작은 건 다 지나가고 큰 건 못 지나가는 거 아니에요? 체처럼요.

석 교수 체라면 크기만 따지겠지. 세포막은 크기와 함께 ‘기름에 녹느냐’를 따진다. 그 이유를 막의 구조에서부터 보자.

3.1 인지질 2중층 — 기름으로 된 벽

석 교수 세포막의 주성분은 **인지질**이다. 인지질 한 분자는 물을 좋아하는 머리, 곧 **친수성** 머리 하나와 물을 싫어하는 **소수성** 꼬리 두 가닥으로 되어 있다. 이런 분자를 물에 넣으면 어떻게 될까?

하린 꼬리가 물을 싫어하니까... 꼬리끼리 모여서 물을 피할 것 같아요.

석 교수 정확하다. 꼬리끼리 안쪽으로 마주 보고, 머리는 바깥의 물 쪽을 향해 두 겹으로 늘어선다. 이것이 **인지질 2중층**이다. 두께는 약 5 nm, 그 가운데 3~4 nm가 꼬리들이 모인 기름층이야. 이 기름층 군데군데 막단백질이 박혀 있고, 막단백질과 인지질은 고정되지 않고 옆으로 움직인다. 그래서 막을 물결치는 바다에 단백질 섬이 떠 있는 모자이크라고 보는 것이 **유동 모자이크 모델**이다.

태오 막이 두 겹이라는 건 어떻게 알았어요? 5 nm면 현미경으로도 안 보일 텐데요.

석 교수 두 가지 실험이 차례로 답을 냈다. 먼저 19세기 말 오버턴은 수백 가지 물질이 식물 세포와 동물 세포로 들어가는 빠르기를 비교했다. 그랬더니 기름에 잘 녹는 물질일수록 세포 안으로 빨리 들어갔다. 그래서 세포의 겉은 기름 같은 물질로 싸여 있다고 추론했지.

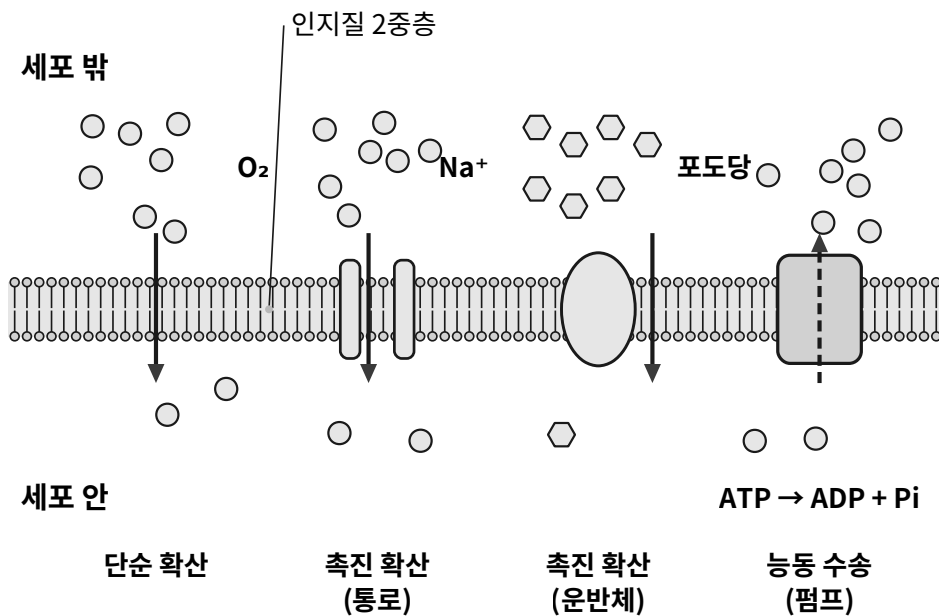
하린 실험 결과는 ‘기름에 잘 녹을수록 빨리 들어간다’이고, 결론은 ‘막이 기름 성분이다’네요.

석 교수 그렇다. 그다음 1925년 고터와 그렌델은 적혈구에서 지질을 모두 뽑아 물 위에 얇게 한 층으로 펼쳤다. 기름 분자는 물 위에서 한 겹의 얇은 막으로 퍼지거든. 그 넓이를 재어 보니 적혈구 겹넓이의 약 2배였다.

- 태오** 아, 막을 다 펼쳤더니 걸넓이의 두 배가 나왔다면, 원래는 두 겹으로 겹쳐 있었다는 뜻이네요.
- 석 교수** 바로 그 추론이 인지질 2중층의 첫 증거다. 뒤에 측정에 오차가 있었다는 것이 밝혀졌지만, 두 오차가 서로 상쇄되어 결론은 옳았다. 자료에서 비율 하나를 읽어 구조를 추론하는 것, 논술에서 그대로 쓰는 생각이다.
- 이모** 그럼 세포막 한가운데는 기름이네요. 기름에 물이 안 섞이듯, 물에 녹는 것은 지나가기 어렵겠어요.
- 석 교수** 그 한 문장이 이 장의 출발점이다. 기름층을 녹아서 지나갈 수 있는 분자, 곧 작고 소수성인 분자는 그냥 지나간다. 물에 잘 녹는 크고 친수성인 분자나 전하를 띤 이온은 기름층에 녹지 못하니 따로 문이 필요하다. 4부 **기출문제 1**(경희대 2024) (209쪽)의 제시문 [가]가 바로 이 인지질 2중층 설명으로 시작한다.

3.2 작고 소수성이면 그냥 지나간다 — 단순 확산

- 석 교수** 그림 14의 왼쪽 첫 번째 길이 **단순 확산**이다. 산소 O_2 , 이산화 탄소 CO_2 , 스테로이드 호르몬처럼 작거나 기름에 잘 녹는 분자는 인지질 사이를 녹아서 그대로 지나간다. 에너지도, 막단백질도 필요 없다.



실선 화살표: 농도 높은 쪽 → 낮은 쪽(확산) · 점선: 낮은 쪽 → 높은 쪽(ATP 사용)

그림 14. 세포막을 건너는 세 가지 길 — 단순 확산(인지질 사이로), 촉진 확산(통로 단백질·운반체 단백질), 능동 수송(펌프, ATP 사용). 화살표는 실제 이동 방향으로, 확산은 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로, 능동 수송만 그 반대로 간다(모식도)

- 태오** 방향은 항상 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽이고요.
- 석 교수** 그렇다. 그리고 속도는 막 양쪽의 농도 차이에 비례한다. 농도 차이가 두 배면 속도도 두 배. 막 바깥 산소가 많고 세포 안 산소가 적을수록 산소가 빨리 들어오는 거지. 향수가 처음에는 빨리 퍼지다가, 방 전체에 고르게 퍼지면 더 이상 한쪽으로 몰려가지 않는 것과 같다.
- 하린** 고르게 퍼지면 분자들이 멈추는 거예요?

- 석 교수** 아니다. 분자들은 계속 움직이지만, 왼쪽에서 오른쪽으로 가는 수와 오른쪽에서 왼쪽으로 가는 수가 같아져서 겉으로 보기에 이동이 멈춘 것처럼 보인다. 이것을 동적 평형이라고 한다. 6장의 평형 전위도 같은 생각에서 나온다. 이온이 계속 드나들지만 들어가는 수와 나오는 수가 같아지는 전압이야.
- 이모** 그럼 세포 안에서 만들어진 이산화 탄소가 밖으로 나가는 것도 단순 확산이겠네요. 세포 안이 더 많으니까요.
- 석 교수** 그렇다. 세포 호흡으로 CO_2 가 계속 생기니 안이 늘 더 진하고, 그래서 늘 밖으로 나간다. 같은 막을 O_2 는 들어오고 CO_2 는 나가는 것은 각자 자기 농도 차이를 따르기 때문이다.
- 태오** 물은요? 물은 친수성인데 세포막을 잘 지나가잖아요. 삼투도 배웠고요.
- 석 교수** 좋은 질문이다. 물 분자는 아주 작아서 인지질 사이로 조금씩 지나가기도 하지만, 많은 세포는 물만 통과시키는 통로 단백질인 아쿠아포린을 따로 가지고 있다. 콩팥 세관 세포는 이 통로의 수를 늘리고 줄여서 물의 재흡수를 조절한다. 아쿠아포린은 다음 절의 ‘통로’에 해당한다.

3.3 크고 친수성이면 문이 필요하다 — 촉진 확산

- 석 교수** 포도당처럼 크고 친수성인 분자, Na^+ 나 K^+ 같은 이온은 기름층을 지나가지 못한다. 이온은 주위에 물 분자를 옷처럼 두르고 있어서 기름 속으로 들어가려면 그 옷을 벗어야 하는데, 거기에 드는 에너지가 너무 크거든. 그래서 막을 관통하는 단백질의 도움을 받는다. 농도 차이를 따라 내려가는 것은 단순 확산과 같지만 단백질의 도움을 받으므로 **촉진 확산**이라고 한다.
- 이모** 단백질 문이 두 가지로 그려져 있네요.
- 석 교수** 그래. **통로 단백질**은 막에 뚫린 좁은 구멍으로, 특정 이온만 골라 지나가게 한다. K^+ 통로는 K^+ 만, Na^+ 통로는 Na^+ 만 통과시킨다. 열리면 1초에 이온이 수백만 개에서 천만 개 넘게 지나갈 만큼 빠르다. **운반체 단백질**은 물질이 붙으면 모양이 바뀌어 반대쪽으로 내어주는 회전문 같은 단백질이다. 포도당 운반체가 대표적이고, 한 번에 하나씩 모양을 바꿔야 하니 1초에 수백에서 수천 개 정도로 통로보다 훨씬 느리다.
- 태오** 1초에 천만 개와 천 개면 $10^7 \div 10^3 = 10^4$, 통로가 운반체보다 만 배쯤 빠르네요.
- 석 교수** 그래서 1000분의 1초 만에 막전위를 뒤집어야 하는 활동 전위는 통로가 맡는다. 운반체로는 그렇게 빨리 이온을 옮길 수 없어.
- 하린** 그런데 K^+ 통로가 K^+ 만 골라낸다는 게 신기해요. Na^+ 가 K^+ 보다 작다면서요? 작은 게 큰 구멍을 못 지나간다니요.
- 석 교수** 날카로운 질문이다. 구멍의 가장 좁은 부분에 산소 원자들이 줄지어 있는데, 그 간격이 물 옷을 벗은 K^+ 에 꼭 맞는다. K^+ 는 물옷을 벗는 대신 그 산소들에 감싸여 편안하게 지나가지만, 더 작은 Na^+ 는 산소들과 꼭 맞지 않아 물옷을 벗는 손해를 메우지 못한다. 그래서 K^+ 통로는 Na^+ 를 거의 통과시키지 않는다. 이 구조를 원자 수준에서 밝힌 연구가 2003년 노벨 화학상을 받았다(교과 밖 심화).
- 태오** 문이 있으니까 그 문의 개수가 문제가 되겠네요. 문이 다 바쁘면 아무리 농도 차이를 키워도 더 빠리는 못 지나가잖아요.

석 교수 바로 그것이 촉진 확산의 핵심 성질, **포화**다. 놀이공원 회전문을 생각해 보라. 입구 앞 줄이 열 명이든 백 명이든, 회전문 세 개가 1분에 들여보낼 수 있는 사람 수는 정해져 있다. 단순 확산은 넓은 광장이라 사람이 많을수록 더 많이 지나가지만, 촉진 확산은 문 개수만 큼에서 막힌다. 이 차이를 그래프로 보면 **그림 15**처럼 된다.

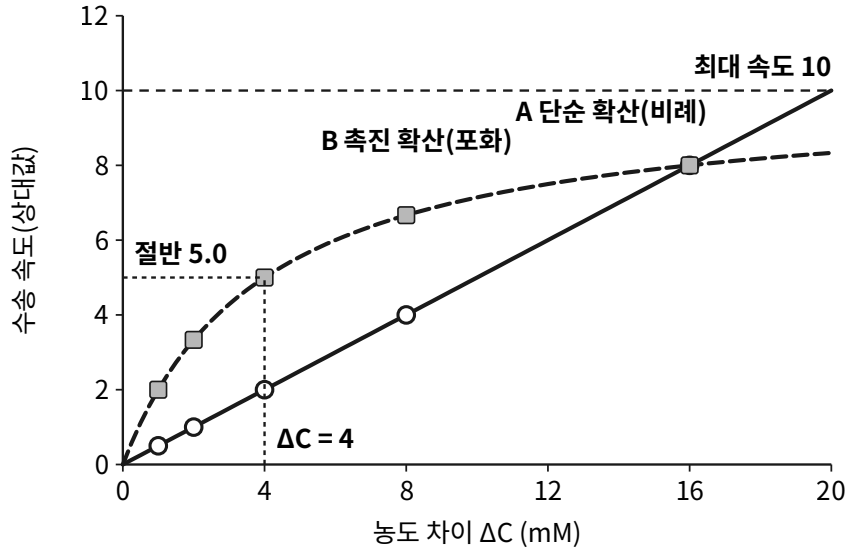


그림 15. 농도 차이(ΔC)와 수송 속도 — A는 단순 확산(속도 = $0.5 \times \Delta C$, 직선), B는 촉진 확산(속도 = $10 \times \Delta C \div (4 + \Delta C)$, 포화 곡선). B는 최대 속도 10에 다가가고, $\Delta C = 4$ mM에서 그 절반인 5.0이 된다(가상 자료를 계산한 값)

하린 A는 곧은 직선이고, B는 처음엔 가파르다가 점점 늡네요.

석 교수 B의 처음이 가파른 까닭은 운반체가 물질을 골라 붙잡아 주기 때문이다. 농도가 낮을 때는 단순 확산보다 훨씬 빠르다. 그러다 농도가 높아져 모든 운반체가 쉴 새 없이 일하게 되면 그 이상은 빨라지지 않는다. 그 한계를 **최대 속도**라고 한다. 이 곡선의 식은 효소 반응 속도의 식과 같은 꼴인데, 교과 과정에서는 식보다 모양과 이유를 묻는다(식은 교과 밖 심화).

실험으로 구별하기

석 교수 이제 실험을 설계해 보자. 어떤 물질이 세포막을 어떤 방식으로 건너는지 알고 싶다. 무엇을 바꾸고 무엇을 재야 할까?

태오 막 바깥의 농도를 여러 단계로 바꿔 가면서, 같은 시간 동안 세포 안으로 들어온 양을 재면 돼요. 바꾸는 것은 농도 차이, 재는 것은 수송 속도.

석 교수 같게 두어야 할 것은?

하린 온도, 세포의 종류와 양, 재는 시간이에요. 그리고 세포 안 농도도 처음엔 0으로 맞춰야 농도 차이가 바깥 농도와 같아지겠네요.

석 교수 훌륭하다. 그렇게 해서 얻은 자료가 **표 8**다.

표 8. 두 물질 A, B의 농도 차이에 따른 수송 속도(가상 실험 자료, 단위는 상대값)

농도 차이 ΔC (mM)	1	2	4	8	16
A의 수송 속도	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
B의 수송 속도	2.0	3.33	5.0	6.67	8.0

문제 3.1

표 8의 자료를 보고 (가) A와 B의 수송 방식을 판정하고 근거를 쓰라. (나) B의 수송 속도가 다가 가는 최대 속도는 얼마인가? (다) 두 물질이 각각 ‘작고 소수성인 분자’와 ‘크고 친수성인 분자’ 가운데 어느 쪽일지 추론하라.

태오 (가) A는 농도 차이가 2배가 될 때마다 속도도 2배예요. 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0. 속도가 농도 차이에 비례하니까 단순 확산이에요. B는 농도 차이를 16배로 늘렸는데 속도는 2.0에서 8.0으로 4배밖에 안 늘어요. 늘어나는 폭이 점점 줄어드니까 포화, 그러니까 촉진 확산이에요.

석 교수 근거가 정확하다. 하나만 덧붙이면, 비례인지 아닌지는 ‘속도 ÷ 농도 차이’를 계산해 보면 바로 보인다.

하린 A는 $0.5 \div 1, 1.0 \div 2, \dots$ 모두 0.5로 일정하고, B는 2.0, 1.67, 1.25, 0.83, 0.5로 계속 줄어요.

석 교수 그렇다. (나)는?

태오 식에서 ΔC 가 아주 커지면 $10 \times \Delta C \div (4 + \Delta C)$ 가 10에 가까워져요. 그리고 $\Delta C = 4 \text{ mM}$ 일 때 5.0이 최대의 절반이고요.

석 교수 정답이다. 최대 속도는 10, 절반 속도에 이르는 농도 차이는 4 mM이다. 실제 실험에서는 식을 모르고 점만 얻으니, 점들이 다가가는 높이를 그래프에서 읽어 ‘약 10’이라고 쓰면 된다. (다)는?

하린 A는 막단백질 없이 지나가니까 작고 소수성인 분자, B는 운반체가 필요하니까 크고 친수성인 분자예요.

석 교수 맞다. (가) A 단순 확산(비례), B 촉진 확산(포화), (나) 10, (다) A 작고 소수성, B 크고 친수성. 4부 기출문제 1(경희대 2024) (209쪽)의 (1)이 이 문제와 같은 구조인데, 채점 기준에서 가장 큰 점수가 ‘수송 단백질의 수가 한정되어 포화된다’는 이유에 걸려 있다. 그래프 모양만 그리고 이유를 빼면 점수의 절반을 잃는다.

이모 다른 방법으로도 구별할 수 있어요? 그래프 하나로만 판단하기엔 좀 불안한데요.

석 교수 좋은 감각이다. B와 모양이 비슷한 다른 물질을 함께 넣어 보면 된다. B가 운반체를 쓴다면 비슷한 물질이 운반체 자리를 빼앗아 B의 속도가 떨어진다. 단순 확산인 A는 영향을 받지 않고, 또 세포 호흡을 막는 약물로 ATP를 줄였을 때 속도가 변하지 않으면 확산이고, 속도가 크게 떨어지면 다음 절의 능동 수송이다. 증거를 두 가지 이상 겹치면 결론이 단단해진다.

3.4 기울기를 거스르는 능동 수송

석 교수 이제 세 번째 길이다. 지금까지의 두 길은 모두 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로, 곧 내리막을 따라갔다. 그런데 신경 세포의 안팎을 보면 이상한 일이 있다. 그림 16를 보자.

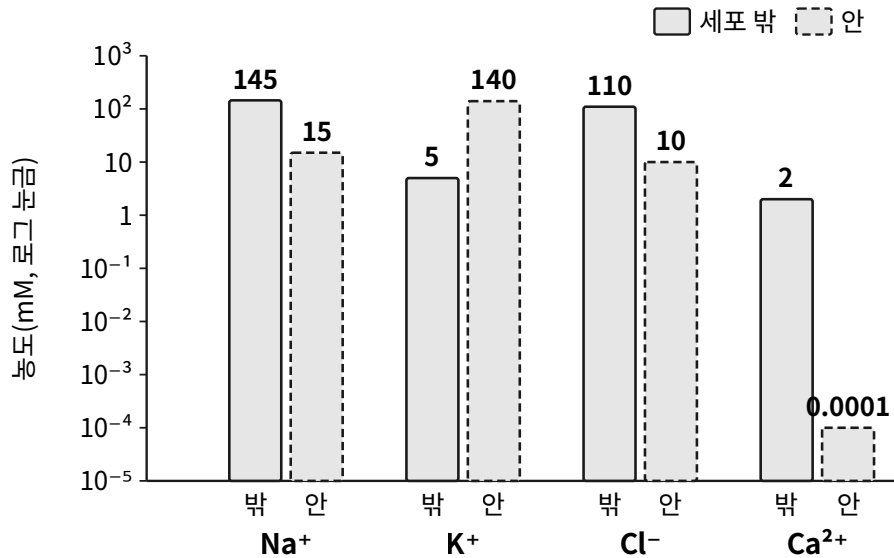


그림 16. 포유류 신경 세포 안팎의 이온 농도(로그 눈금) — Na⁺ 밖 145 · 안 15, K⁺ 밖 5 · 안 140, Cl⁻ 밖 110 · 안 10, Ca²⁺ 밖 2 · 안 0.0001 mM(교재 대표값)

하린 Na⁺는 밖에 훨씬 많고, K⁺는 안에 훨씬 많아요. 눈금이 이상해요. 한 칸마다 10배씩이에요?

석 교수 그렇다. Ca²⁺는 안이 0.0001 mM이라 보통 눈금으로는 0에 붙어 버리니 로그 눈금을 썼다. K⁺는 안이 밖의 140 ÷ 5 = 28배, Na⁺는 밖이 안의 145 ÷ 15 = 9.7배다. Ca²⁺는 밖이 안의 2 ÷ 0.0001 = 2만 배나 된다. 이 엄청난 Ca²⁺ 차이는 10장에서는 축삭 말단이 신경 전달 물질을 내보내는 방아쇠로, 11장에서는 근육을 수축시키는 방아쇠로 쓰인다. 통로가 잠깐만 열려도 안의 Ca²⁺ 농도가 몇 배로 뛰기 때문이다. 막에 K⁺와 Na⁺가 지나가는 통로가 있는데도 이렇게 큰 차이가 유지된다는 건 무엇을 뜻할까?

태오 통로로 K⁺는 계속 새어 나가고 Na⁺는 계속 새어 들어올 테니까, 누군가가 다시 퍼 올리고 있다는 거죠.

석 교수 그 누군가가 **능동 수송**이다. 막단백질이 ATP의 에너지를 써서 물질을 농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로, 곧 오르막으로 밀어 올린다. 언덕 위로 수레를 밀어 올리는 데 힘이 드는 것처럼 에너지가 들고, 이 일을 하는 단백질을 펌프라고 부른다. 신경 세포에서 가장 중요한 펌프가 Na⁺를 밖으로, K⁺를 안으로 퍼 올리는 Na⁺-K⁺ 펌프이고, 다음 장의 주인공이다. 세 길을 표 9에 비교했다.

표 9. 막 수송 세 가지의 비교 — 에너지, 방향, 막단백질, 포화, 예

구분	에너지(ATP)	이동 방향	막단백질	포화	예
단순 확산	쓰지 않음	농도 높은 쪽 → 낮은 쪽	필요 없음	없음(농도 차이에 비례)	O ₂ , CO ₂ , 스테로이드 호르몬
촉진 확산	쓰지 않음	농도 높은 쪽 → 낮은 쪽	통로 또는 운반체	있음(단백질 수 한정)	이온 통로의 Na ⁺ ·K ⁺ , 포도당 운반체
능동 수송	씀	농도 낮은 쪽 → 높은 쪽	펌프(운반체의 일종)	있음	Na ⁺ -K ⁺ 펌프, Ca ²⁺ 펌프

문제 3.2

신경 세포 안의 K^+ 농도는 140 mM, 밖은 5 mM이다. (가) K^+ 를 세포 밖에서 안으로 옮기는 수송은 어떤 방식이어야 하는가? (나) K^+ 가 세포 안에서 밖으로 새어 나가는 경우는 어떤 방식인가? (다) 세포 호흡을 막는 약물을 넣었을 때 (가)와 (나) 가운데 먼저 멈추는 것은 무엇인가?

하린 (가)는 5 mM에서 140 mM로, 적은 곳에서 많은 곳으로 가니까 오르막이에요. 능동 수송이어야 해요.

태오 (나)는 많은 곳에서 적은 곳으로 내려가니까 확산인데, 이온이라 기름층은 못 지나가니까 K^+ 통로를 통한 촉진 확산이에요.

석 교수 (다)는?

태오 세포 호흡을 막으면 ATP가 줄어드니까 ATP를 쓰는 (가)가 멈춰요. (나)는 ATP가 필요 없으니 계속되고요. 그러면 K^+ 가 새어 나가기만 하고 들어오지는 않으니까... 안팎 농도 차이가 점점 줄어들겠네요.

석 교수 정답이다. (가) 능동 수송, (나) K^+ 통로를 통한 촉진 확산, (다) 능동 수송이 먼저 멈추고 기울기가 서서히 무너진다. ‘서서히’에 주의해라. 4장에서 보겠지만, 펌프가 멈춘다고 기울기가 바로 사라지지는 않는다. 새는 속도가 느리고 세포 안에 쌓인 K^+ 의 양이 많기 때문이다.

이모 오르막과 내리막이 짝을 이루고 있네요. 펌프로 올려 두면, 통로로 흘러내리면서 일을 하는 거죠?

석 교수 이모가 이 책의 다음 세 장을 한 문장으로 요약했다. 펌프가 기울기를 만들고(4장), 통로로 새어 나가는 K^+ 가 전압을 만들고(5장), 통로가 열리고 닫히면서 신호를 만든다(7장). 물레방아에 물을 퍼 올려 두고 내려오는 물로 방아를 찧는 것과 같다.

핵심 막 수송 방식을 판정하는 4단계

1. 물질의 성질을 본다: 작고 소수성이면 인지질 사이로(단순 확산), 크고 친수성이거나 이온이면 막단백질이 필요하다.
2. 방향을 본다: 농도가 높은 쪽 → 낮은 쪽이면 확산(에너지 불필요), 낮은 쪽 → 높은 쪽이면 능동 수송(ATP 필요).
3. 그래프 모양을 본다: 속도가 농도 차이에 비례(속도 ÷ ΔC 일정)하면 단순 확산, 최대 속도에 다가가며 포화하면 막단백질을 쓰는 수송이다.
4. 증거를 겹친다: 비슷한 물질의 경쟁(운반체 여부), ATP를 줄이는 처리(능동 수송 여부)로 판정을 확인한다.

스스로 풀어 보기

1. 단순 확산으로 들어오는 물질의 수송 속도가 농도 차이 3 mM에서 1.2였다. 농도 차이가 7.5 mM이면 속도는 얼마인가?
2. 문제 3.1의 B에서 농도 차이가 12 mM일 때 수송 속도를 구하라. 이것은 최대 속도의 몇 %인가?
3. 적혈구의 포도당 흡수 속도가 바깥 포도당 농도를 높여도 일정한 값 이상으로 커지지 않는다. 이 결과에서 추론할 수 있는 수송 방식과 그 근거를 쓰라.

4. Ca^{2+} 는 세포 밖이 2 mM, 안이 0.0001 mM이다. Ca^{2+} 통로가 열리면 Ca^{2+} 는 어느 방향으로 움직이는가? 세포 안 Ca^{2+} 를 낮게 유지하는 수송은 어떤 방식인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장은 4부 **기출문제 1**(경희대 2024) (209쪽)의 (1)과 거의 같은 문제를 미리 푼 것이다. 그 문제는 작고 소수성인 물질과 크고 친수성인 물질의 농도 차이-이동 속도 그래프를 그리고 이유를 쓰게 하며, (2)에서는 이 장의 마지막 절인 능동 수송과 통로를 통한 확산을 뉴런의 휴지 상태와 활동 전위에 적용하게 한다. **기출문제 3**(연세대 2022) (227쪽)의 2-1은 인공세포에서 운반체를 통한 이동이 어느 쪽 농도 차이를 필요로 하는지 묻고, **기출문제 4**(건국대 2015) (238쪽)의 (2)는 ATP와 펌프의 관계를 추론하게 한다.

이 장의 참고문헌

Singer, S. J., & Nicolson, G. L. (1972). The fluid mosaic model of the structure of cell membranes.

Science, 175(4023), 720–731. <https://doi.org/10.1126/science.175.4023.720>

Alberts, B., Heald, R., Johnson, A., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2022). Molecular biology of the cell (7th ed.). W. W. Norton.

Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). Campbell biology (12th ed.). Pearson.

제 4장 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 공동 수송

새 개념 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프 · ATP 1개에 3 Na^+ 와 2 K^+ · 이온 농도 기울기 · 공동 수송(2차 능동 수송)

이어짐 막 수송 3장 · 휴지 전위 5장 · 인공세포 14장

이 장의 개념도

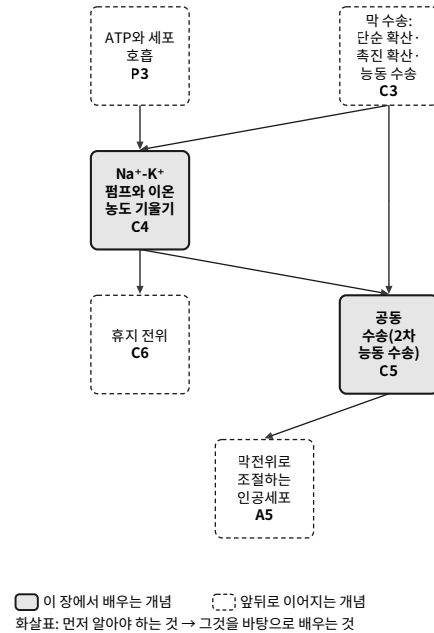


그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C4 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 이온 농도 기울기, C5 공동 수송(2차 능동 수송))과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 10. 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 (경희대 2024년) (209쪽)	막 수송 속도와 뉴런의 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 이동	C4 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 이온 농도 기울기
기출 3 (연세대 2022년) (227쪽)	인공세포의 공동 수송과 Na^+ 통로 스위치	C4 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 이온 농도 기울기; C5 공동 수송(2차 능동 수송)
기출 10 (연세대 2010년) (298쪽)	뿌리 세포의 막전위와 네른스트 식	C4 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ 펌프와 이온 농도 기울기

설사할 때 마시는 경구 수액

소금과 포도당을 함께 녹이는 까닭

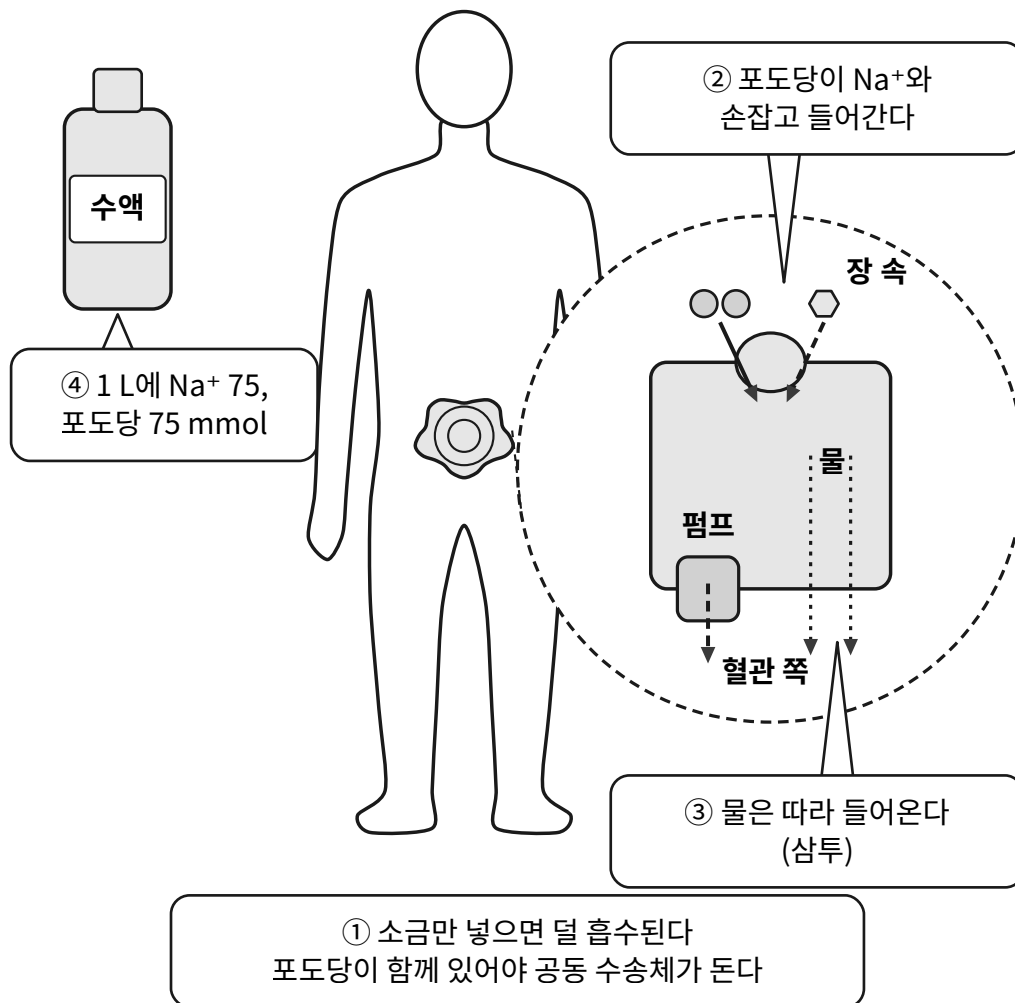


그림 18. 설사할 때 마시는 경구 수액 — 소금과 포도당을 함께 녹인 수액이 소장 상피 세포에서 Na^+ -포도당 공동 수송으로 흡수되고, 물이 삼투로 따라 들어가는 장면(모식도, 농도는 WHO 저삼투 경구 수액 기준)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 공동 수송체는 Na^+ 가 농도 기울기를 따라 들어가는 힘으로 포도당을 함께 끌어들이는다.
2. 그 Na^+ 기울기는 세포 반대편 기저막의 Na^+ - K^+ 펌프가 ATP를 써서 유지한다.
3. 그래서 소금과 포도당을 함께 마셔야 Na^+ 와 물이 잘 흡수된다.

이 장의 출발점

- **기본개념편 제 3장 (35쪽)**의 세 가지 길: 확산은 내리막(높은 농도 → 낮은 농도), 능동 수송은 ATP를 쓰는 오르막.
- 신경 세포 안팎의 이온 농도: Na^+ 밖 145 · 안 15 mM, K^+ 밖 5 · 안 140 mM.
- $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi}$ (인산) 반응에서 에너지가 나온다.

네 번째 토요일, 하린이 감기 끝에 배탈이 나서 이틀을 앓고 왔다. 이모는 약국에서 사 온 가루 봉지를 물에 타 하린에게 건넸다. 봉지 뒷면에는 ‘염화 나트륨, 포도당, 염화 칼륨, 시트르산 나트륨’이라고 적혀 있었다.

하린 이모, 이거 맛이 짭짤하고 살짝 달아요. 그냥 물 마시면 안 돼요?

이모 약사님이 설사할 때는 물만 마시면 흡수가 잘 안 되고, 꼭 이걸 마시라고 하시던데요. 교수님, 왜 소금이랑 설탕을 섞어요?

석 교수 그 봉지 하나에 오늘 배울 두 가지가 다 들어 있다. Na^+ - K^+ 펌프와 공동 수송. 그런데 순서가 있으니, 먼저 지난주 끝에 남겨 둔 질문부터 풀자. 신경 세포는 K^+ 가 계속 새어 나가는데도 안의 K^+ 를 140 mM로 유지한다고 했지. 누가 다시 퍼 올리는 걸까?

태오 능동 수송, 펌프요.

석 교수 그 펌프를 처음 찾아낸 이야기부터 하자.

4.1 펌프 한 바퀴

석 교수 1957년 덴마크의 스코우는 게의 신경에서 ATP를 분해하는 효소를 뽑아내 연구하고 있었다. 이상하게도 이 효소는 Na^+ 만 넣으면 조금 일하고, K^+ 만 넣어도 조금 일하는데, Na^+ 와 K^+ 를 함께 넣으면 훨씬 활발하게 ATP를 분해했다.

하린 두 이온이 다 있어야 잘 일하는 효소라니, 이상하네요.

석 교수 스코우는 그 이상함에서 답을 읽었다. 세포 안의 Na^+ 와 바깥의 K^+ 를 함께 붙잡아 맞바꾸는 일을 하니까 둘 다 있어야 일한다는 거지. 이 효소가 바로 Na^+ 를 밖으로, K^+ 를 안으로 옮기는 펌프였다. 스코우는 이 발견으로 40년 뒤 노벨 화학상을 받았다. 펌프가 한 바퀴 도는 과정을 **그림 19**에 네 단계로 그렸다.

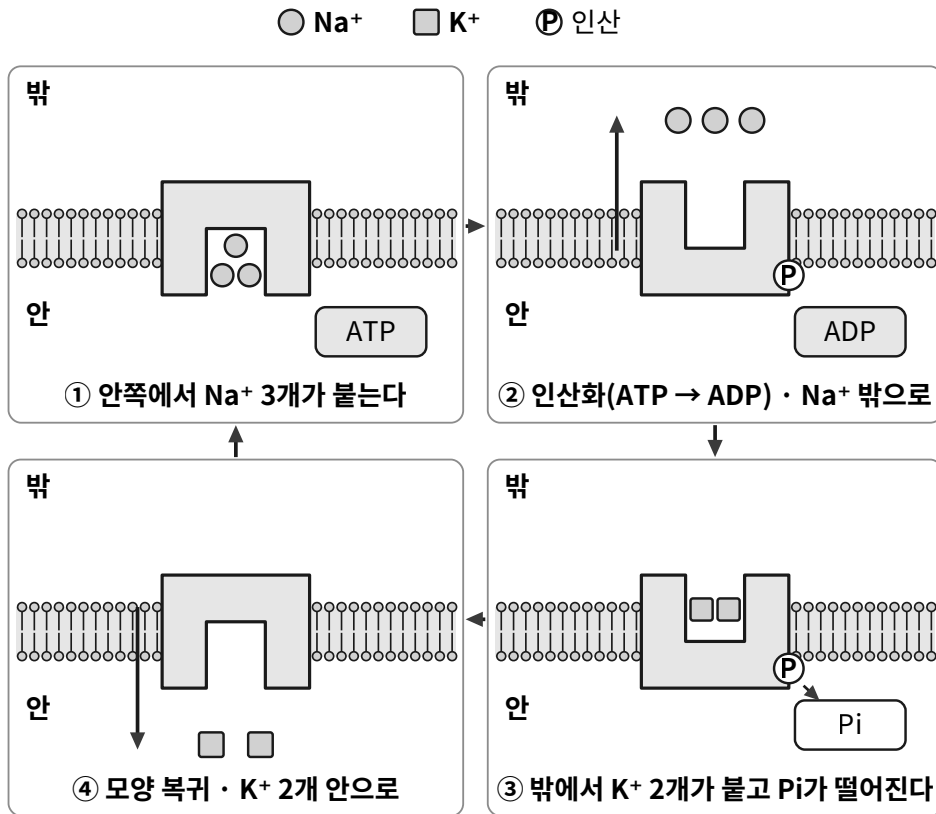


그림 19. Na^+ - K^+ 펌프의 한 바퀴 — ① 안쪽에서 Na^+ 3개가 붙는다 ② ATP가 인산을 넘겨주고($\text{ATP} \rightarrow \text{ADP}$) 펌프의 모양이 바뀌어 Na^+ 3개가 밖으로 나간다 ③ 밖에서 K^+ 2개가 붙고 인산(Pi)이 떨어진다 ④ 모양이 되돌아가 K^+ 2개가 안으로 들어간다(모식도)

석 교수 ① 펌프의 입이 세포 안쪽으로 열려 있을 때 Na^+ 3개가 붙는다. ② ATP가 펌프에 인산 하나를 붙여 주고 ADP가 된다. 인산이 붙으면 펌프의 모양이 바뀌어 입이 바깥쪽으로 열리고, Na^+ 3개를 밖에 내놓는다. ③ 바깥쪽으로 열린 입에 K^+ 2개가 붙으면 붙어 있던 인산이 떨어져 나간다. ④ 인산이 떨어지면 모양이 처음대로 돌아가 입이 안쪽으로 열리고, K^+ 2개를 안에 내놓는다.

태오 결국 ATP 하나에 Na^+ 3개 밖으로, K^+ 2개 안으로. 3장에서 말한 오르막이 두 이온 모두에 해당하네요. Na^+ 는 많은 바깥으로, K^+ 는 많은 안으로 가니까요.

석 교수 그렇다. 한 번의 ATP로 두 개의 오르막을 동시에 오르는 셈이다. 그런데 개수가 3 대 2로 다르다는 점이 중요하다. 무엇이 남지?

하린 양전하요. 양이온 3개가 나가고 2개가 들어오니깐 한 바퀴마다 양전하 1개가 밖으로 나가요.

석 교수 맞다. 그래서 이 펌프는 돌 때마다 막 바깥을 조금 더 양(+)으로 만든다. 다만 이 효과는 휴지 전위 -70 mV 가운데 몇 mV 밖에 되지 않는다. 휴지 전위의 대부분은 다음 장의 K^+ 누출에서 나온다. 이 점을 혼동하는 학생이 많으니, 5장에서 다시 짚자.

문제 4.1

신경 세포 하나의 Na^+ - K^+ 펌프들이 1초 동안 ATP 1000개를 썼다. (가) 세포 밖으로 나간 Na^+ 는 몇 개인가? (나) 세포 안으로 들어온 K^+ 는 몇 개인가? (다) 막을 건넌 순 전하는 어느 방향으로 몇 개(기본 전하 단위)인가?

- 태오** (가)는 $3 \times 1000 = 3000$ 개, (나)는 $2 \times 1000 = 2000$ 개요.
- 하린** (다)는 $3000 - 2000 = 1000$ 개가 밖으로예요. 둘 다 +1가 이온이니깐 양전하 1000개가 밖으로 나간 거죠.
- 석 교수** 정답이다. Na^+ 3000개, K^+ 2000개, 순 전하 +1000이 밖으로. **그림 20**가 이 장부를 막대로 그린 것이다.

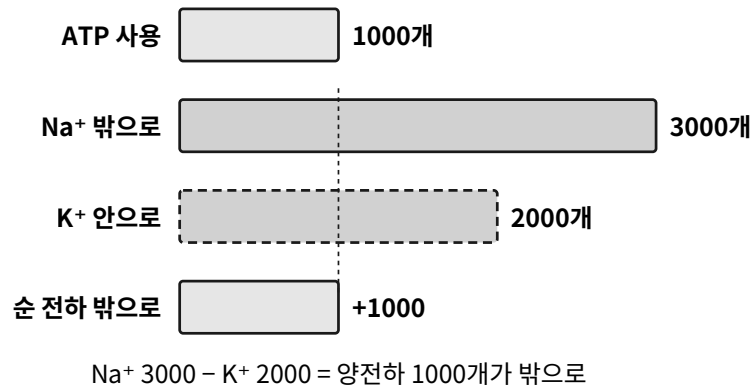


그림 20. ATP 1000개를 쓸 때 펌프의 장부 — Na^+ 3000개가 밖으로, K^+ 2000개가 안으로 가서 순 전하 +1000이 밖으로 옮겨진다(계산값)

- 태오** 그런데 교수님, 이온의 수만 보면 세포 안의 이온이 1000개 줄어들어요. 그럼 세포 안 농도가 점점 묽어지나요?
- 석 교수** 좋은 의문이다. 실제로는 그만큼 Na^+ 가 통로로 새어 들어오고 K^+ 가 새어 나가서, 펌프가 옮기는 양과 새는 양이 맞먹을 때 농도가 일정하게 유지된다. 펌프는 물이 새는 양동이에 물을 붓는 것과 같다. 붓는 양과 새는 양이 같으면 수위가 그대로인 거지. 이것을 정상 상태라고 한다.

4.2 펌프가 남기는 것 — 기울기

- 이모** 그럼 펌프가 하는 일은 결국 Na^+ 는 밖에, K^+ 는 안에 쌓아 두는 거네요. 그게 왜 그렇게 중요해요?
- 석 교수** 쌓아 둔 기울기는 그 자체로 에너지 저장고이기 때문이다. 높은 곳에 물을 퍼 올려 둔 저수지와 같아. 그 물이 내려오는 길에 물레방아를 달면 일을 시킬 수 있지. 세포는 Na^+ 와 K^+ 의 기울기를 세 가지 일에 쓴다. 첫째, K^+ 가 새어 나가며 휴지 전위를 만든다(5장). 둘째, 통로가 열릴 때 Na^+ 가 쏟아져 들어오며 활동 전위를 만든다(7장). 셋째, Na^+ 가 들어오는 힘으로 다른 물질을 함께 끌어들이는 거지. 이것이 오늘의 두 번째 주제, 공동 수송이다.
- 태오** 그러면 펌프가 활동 전위를 직접 만드는 건 아니네요. 기울기만 만들어 두고요.
- 석 교수** 정확하다. 이 구분은 4부 **기출문제 1**(경희대 2024) (209쪽)의 (2)에서 채점의 경계가 된다. 휴지 상태에서 펌프는 ATP를 써서 기울기를 유지하고, 활동 전위 때 이온은 ATP 없이 통로로 기울기를 따라 움직인다. 이 둘을 섞어 ‘활동 전위 때 펌프가 Na^+ 를 넣는다’고 쓰면 감점이다.
- 이모** 펌프를 멈추면 어떻게 돼요?

석 교수 그걸 보는 실험이 여럿 있다. 펌프에 달라붙어 일을 막는 물질로 우아바인이라는 식물 독이 있다. 굵은 신경을 우아바인 용액에 담그면, 바로 신호가 멎지는 않는다. 활동 전위가 한동안 정상으로 나오다가 수천, 수만 번 거듭되면서 점점 작아지고 결국 멈춘다. 온도를 낮춰 펌프를 느리게 하거나, 세포 호흡을 막아 ATP를 고갈시켜도 결과는 같다.

이모 독이라니 무섭네요. 그런 걸 어디에 써요?

석 교수 아프리카에서는 우아바인이 든 식물 즙을 화살촉에 발라 사냥했다고 한다. 그런데 독과 약은 양의 차이인 경우가 많다. 우아바인과 비슷하게 펌프에 붙는 디기탈리스 계열 약은 아주 적은 양으로 심장 근육의 수축을 돕는 데 오래 쓰여 왔다. 펌프가 조금 느려지면 심장 근육 세포 안에 Na^+ 가 늘고, 그 결과 Ca^{2+} 가 덜 빠져나가 수축이 세지기 때문이다. 이 연결 고리는 아래의 ‘같은 방향, 반대 방향’에서 다시 나온다(교과 밖 심화).

태오 펌프를 막았는데 한동안 정상이라는 건, 쌓아 둔 기울기가 크고 한 번에 쓰는 양이 아주 적다는 뜻이겠네요.

석 교수 그렇게 결론 내리면 된다. 저수지가 크면 펌프가 멈춰도 한동안 물레방아가 돈다. 7장에서 활동 전위 한 번에 드나드는 Na^+ 가 축삭 안 Na^+ 의 100만 분의 몇에 불과하다는 것을 계산으로 확인한다. 생활 속 예도 있다. 헌혈한 피를 냉장 보관하면 적혈구의 펌프가 느려져서 날이 갈수록 적혈구 안의 K^+ 가 혈장으로 새어 나온다. 그래서 오래 보관한 혈액은 혈장의 K^+ 농도가 높아진다.

방사성 Na^+ 로 펌프를 엿보다

석 교수 펌프가 정말 ATP로 Na^+ 를 퍼낸다는 것은 어떻게 확인했을까? 1950년대 영국의 호지킨과 케인스는 오징어의 굵은 축삭 안에 방사성 Na^+ 를 넣어 두고, 바깥 용액으로 새어 나오는 방사능을 시간에 따라 잴다. 방사성 Na^+ 가 밖에서 검출되면 그만큼 Na^+ 가 퍼내진 것이다.

태오 그다음에 조건을 바꿨겠네요. 세포 호흡을 막는 약을 넣는다든지요.

석 교수 그렇다. 세포 호흡을 방해하는 약물을 바깥 용액에 넣자 Na^+ 가 나오는 속도가 크게 줄었고, 약물을 씻어 내자 다시 회복되었다. 또 바깥 용액에서 K^+ 를 빼도 Na^+ 가 나오는 속도가 크게 줄었다. 뒤이은 실험에서는 호흡을 막아 멈춘 축삭 안에 ATP를 직접 넣어 주자 Na^+ 배출이 되살아났다.

하린 결과가 세 개네요. 호흡을 막으면 줄고, 바깥 K^+ 를 빼도 줄고, ATP를 넣으면 살아나요.

석 교수 각각에서 결론을 하나씩 뽑아 봐라.

태오 첫째, Na^+ 배출에는 세포 호흡이 만드는 무언가가 필요하다. 셋째에서 그게 ATP라는 걸 알 수 있고요. 둘째, Na^+ 를 내보내는 일이 바깥의 K^+ 를 들이는 일과 묶여 있다. 그러니까 Na^+ 와 K^+ 를 맞바꾸는 ATP 펌프라는 결론이에요.

석 교수 훌륭하다. 약물을 씻어 내자 회복된 것도 중요한데, 그 덕분에 약물이 축삭을 아예 죽인 것이 아니라 에너지 공급만 막았다는 것을 확인할 수 있다. 스코우의 효소 실험과 이 실험이 서로 다른 방향에서 같은 결론에 닿은 거야. 4부의 자료 해석 문제도 이렇게 ‘조건 하나를 바꿨을 때 무엇이 변했나 → 그래서 무엇이 필요하다’는 순서로 쓰면 된다.

하린 펌프가 그렇게 바쁘면 에너지도 많이 들겠어요.

신경계·활동 전위 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

펌프가 이온 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생기고, 말이집과 시냅스가 그 신호를 나른다

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

2부 기출문제와 기본개념

기출 11문항(2009~2024학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

3부 논술답안작성 패턴분석

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

4부 실전기출문제와 풀이과정

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

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 신경계인가 — 자극에서 반응까지
2. 뉴런: 신호를 나르는 세포
3. 세포막을 건너는 세 가지 길
4. Na^+ - K^+ 펌프와 공동 수송
5. 휴지 전위: 세포는 작은 전지
6. 평형 전위와 네른스트 식
7. 활동 전위: 문이 열리고 닫히는 1000분의 1초

8. 역치·실무울·불응기
9. 흥분의 전도: 굽기와 말이집
10. 시냅스: 틈을 건너는 화학 신호
11. 근육을 움직이는 신호: 신경근 접합부와 근수축
12. 자율 신경계: 교감과 부교감
13. 감각 수용기: 역치·베버 법칙·순응
14. 신경과 호르몬, 독과 약, 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: 세포막·물질 수송 · 호르몬·항상성 · 세포 호흡(ATP) · 화학 전지(네른스트 식)



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



9 791123 065106
ISBN 979-11-23065-10-6

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 11 — 신경계·활동 전위 — 전체 330쪽

ssbook.kr/book/nonsul-11

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

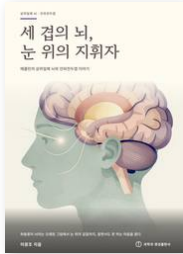
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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 전자·전기 분해

화학 전자·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 — 꽃은 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