



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도

분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 — 기출 22문항으로 읽는 유전

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-03

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

멘델 유전. 감수분열. 가계도

유전 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 22문항 · 2008~2025학년도



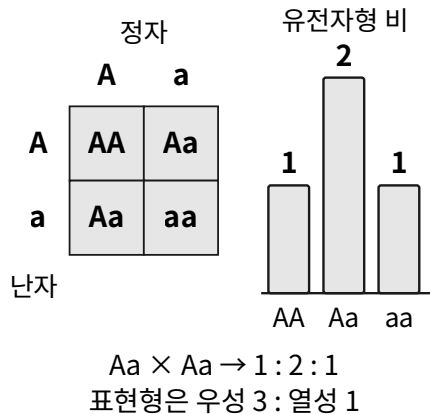
멘델 유전·감수분열·가계도

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

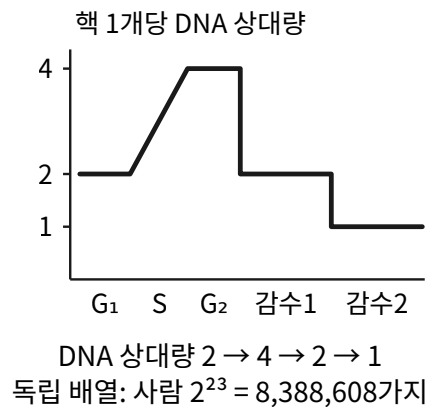
유전 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 | 22문항 · 7개 대학 (2008~2025)

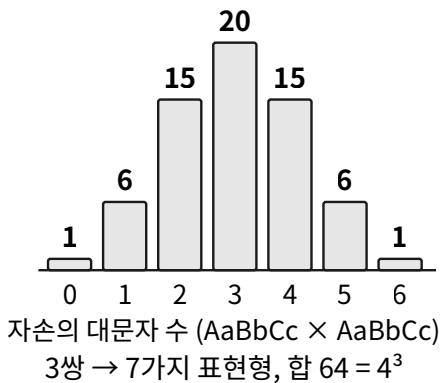
① 분리의 법칙



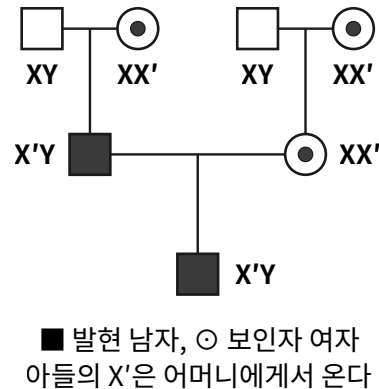
② 감수 분열



③ 다인자 유전



④ X 염색체 열성 유전



한 줄 요약: 감수 분열에서 갈라진 대립유전자가 확률의 곱으로 다시 만난다

그림 1. 멘델 유전·감수분열·가계도 단원의 그림 요약. ① 분리의 법칙: $Aa \times Aa$ 교배의 유전자형 1:2:1과 표현형 3:1, ② 감수 분열 중 핵 1개당 DNA 상대량($2 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$)과 독립 배열에 따른 생식세포 2^n 가지(사람 $2^{23} = 8,388,608$), ③ 다인자 유전: 대립유전자 3쌍($AaBbCc \times AaBbCc$)일 때 대문자 수 분포 1:6:15:20:15:6:1, ④ X 염색체 열성 유전(적록 색맹) 가계도. 모든 비율은 확률의 곱으로 계산했다.

한 줄 요약: 감수 분열에서 갈라진 대립유전자가 확률의 곱으로 다시 만난다

연결 단원 $\rightarrow$ 세포와 세포 분열 · DNA와 유전자 발현 · 생명공학 · 진화와 생물 다양성

기본개념편	12
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	13
기본개념편을 열며	15
제 1장 왜 유전인가: 닮음과 다름의 규칙	17
1.1 닮음과 다름 — 형질과 대립 형질.....	19
1.2 보이는 것과 가진 것 — 유전자형과 표현형	20
1.3 섞이는가, 입자로 남는가.....	21
1.4 확률의 곱과 덧셈	22
1.5 앞으로의 길 — 이 책의 지도	25
제 2장 유전자는 어디에 있나: 염색체와 핵형.....	27
2.1 DNA에서 염색체까지 — 감고, 또 감는다	29
2.2 복제된 염색체 — 염색 분체와 동원체	30
2.3 상동 염색체와 유전자 자리	31
2.4 핵형 — 사람의 $2n = 46$	32
2.5 세는 연습 — 염색체·염색 분체·쌍.....	34
제 3장 세포는 어떻게 나뉘나: 체세포 분열과 감수 분열	37
3.1 세포 주기와 체세포 분열.....	39
3.2 감수 1분열 — 상동 염색체가 갈라진다	40
3.3 감수 2분열 — 염색 분체가 갈라진다	42
3.4 DNA 상대량 그래프 읽기	42
3.5 체세포 분열과 감수 분열 비교, 그리고 동원체 세기	44
제 4장 멘델의 완두: 우열과 분리의 법칙	48
4.1 왜 하필 완두였나	50
4.2 $P \rightarrow F_1 \rightarrow F_2$, 그리고 3 : 1	51
4.3 멘델의 가정 — 쌍으로 있다가 하나씩 간다	52
4.4 퍼넷 사각형과 1 : 2 : 1.....	53
4.5 검정 교배와 F_2 의 검증	54
제 5장 두 형질을 함께 보면: 독립의 법칙	58
5.1 둥근 황색 × 주름진 녹색 — 315 : 108 : 101 : 32	60
5.2 생식세포 네 가지 — 감수 1분열 중기의 두 가지 배열	61
5.3 16칸 퍼넷 사각형 대신 곱셈.....	63
5.4 세 쌍이면? 2^n 과 곱셈	65
5.5 독립의 조건 — 서로 다른 염색체.....	65
제 6장 감수 분열이 만드는 다양성.....	68
6.1 쌍마다 둘 중 하나 — 2^n	70
6.2 수정까지 — $2^{23} \times 2^{23} = 2^{46}$	72
6.3 교차가 더하는 다양성.....	73
6.4 유성 생식과 무성 생식	73
6.5 근친도 — 어머니와 나, 형제와 나.....	74
제 7장 함께 다니는 유전자: 연관과 교차	78
7.1 독립이 깨질 때 — 모건의 초파리.....	80
7.2 완전 연관 — 상인과 상반.....	81
7.3 교차와 재조합 빈도	82

7.4 성균관대 2010 자료 읽기	83
7.5 거리와 지도 — 교과 밖 심화	85
제 8장 우열이 분명하지 않을 때: 중간 유전과 ABO식 혈액형	88
8.1 분꽃: 잡종이 중간 형질을 보일 때	90
8.2 공동 우성: 둘 다 드러날 때	92
8.3 복대립: 대립유전자가 셋일 때	92
8.4 우열이 섞인 두 유전자: 비율을 보고 관계를 읽기	95
제 9장 유전자가 유전자를 가릴 때: 상위	98
9.1 래브라도의 털색: 열성 상위 9 : 3 : 4	100
9.2 우성 상위: 호박의 12 : 3 : 1	102
9.3 9 : 3 : 3 : 1의 칸을 합치는 여러 방법	102
9.4 봄베이 혈액형: O형 부모에게서 A형 자녀	104
9.5 비율을 보고 관계를 거꾸로 읽는 순서	106
제 10장 여러 유전자가 하나의 형질을: 다인자 유전	108
10.1 대립유전자가 더해질 때	110
10.2 분포를 세는 법: 1 : 4 : 6 : 4 : 1과 1 : 6 : 15 : 20 : 15 : 6 : 1	111
10.3 부모가 다를 때: 대문자 수 분포를 합성하기	113
10.4 비율로 유전자 수를 거꾸로 찾기	114
10.5 자연 선택과 다인자 형질	115
제 11장 X 염색체 위의 유전자: 성염색체와 반성 유전	119
11.1 XX와 XY: 성염색체는 어떻게 전해지나	121
11.2 적록 색맹: X'Y, X'X', XX'	122
11.3 네 가지 교배의 결과	123
11.4 남자에게 더 많은 이유: 빈도로 보기	124
11.5 모건의 흰 눈 초파리: 유전자가 염색체 위에 있다는 증거	125
11.6 X 연관 우성과 Y 연관(한성) 유전	127
제 12장 가계도 읽기: 우열·위치·확률	129
12.1 가계도 기호와 읽는 순서	131
12.2 우열 판별: 없던 형질이 나오면 열성	131
12.3 위치 판별: 반례 하나로 지운다	133
12.4 확률: 정상 형제가 보인자일 확률 2/3	134
12.5 두 형질과 성별: 조건부 확률을 구분하기	136
제 13장 염색체가 잘못 나뉠 때: 비분리와 구조 이상	139
13.1 감수 1분열 비분리: 네 개 모두 이상	141
13.2 감수 2분열 비분리: 두 개만 이상	142
13.3 성염색체의 비분리: 어느 부모의 몇 분열인가	143
13.4 염색체 구조 이상: 결실·중복·역위·전좌	145
13.5 핵형 분석으로 진단하기	147
제 14장 집단 속의 유전자와 유전병, 그리고 2부로	150
14.1 개체가 아니라 집단이 진화한다: 대립유전자 빈도	152
14.2 하디-바인베르크 평형: $p^2 + 2pq + q^2$	152
14.3 X 연관 형질의 빈도: 남자 q, 여자 q^2	154
14.4 유전자 돌연변이와 PKU: 유전자 → 효소 → 형질	155
14.5 대립유전자 빈도를 바꾸는 다섯 가지 요인	157
14.6 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	158
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	160

부록 B. 용어 풀이	163
기출문제와 기본개념.....	171
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	172
0. 이 장의 사용법	173
1. 출제 개념.....	174
1.1 대립유전자·우열·분리의 법칙 — C1 · C2	175
1.2 독립의 법칙과 확률의 곱 — C3 · P1	176
1.3 염색체·감수 분열·DNA 상대량 — C4 · C5	177
1.4 독립 배열과 유전적 다양성 — C6 · A1	177
1.5 연관과 교차 — C7.....	178
1.6 중간 유전·복대립·상위 — C8 · C9 · C10	179
1.7 다인자 유전과 자연 선택 — C11 · A3	179
1.8 반성 유전과 가계도 — C12 · C13 · A2.....	180
1.9 비분리와 구조 이상 — C14 · C15.....	181
1.10 집단 유전과 유전병 — C16 · A4 · A5.....	181
1.11 그래프 개념도 읽는 법	182
2. 출제 경향.....	185
2.1 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	188
2.2 학교별 성향	189
논술답안작성 패턴분석	191
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	192
3. 답안 작성법	194
3.1 자료 해석형 답안의 4단 구조	194
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	196
3.3 표기와 기호 규칙	197
3.4 시간 배분과 자기 점검	197
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	198
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	200
실전기출문제와 풀이과정	205
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	206
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	208
5.1 한눈에 보는 기출 22문항	208
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진다 — 개론.....	208
5.3 기본 개념 한눈에	209
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	210
6. 출제 문항 분석과 모범답안	212
〈기출문제 1 (연세대 2025년)〉	213
〈기출문제 2 (경북대 2025년)〉	222
〈기출문제 3 (연세대 2024년)〉	229
〈기출문제 4 (연세대 2024년)〉	239
〈기출문제 5 (연세대 2024년)〉	248
〈기출문제 6 (경북대 2024년)〉	257
〈기출문제 7 (경북대 2024년)〉	265

〈기출문제 8 (경희대 2024년)〉	274
〈기출문제 9 (연세대 2023년)〉	284
〈기출문제 10 (경희대 2023년)〉	292
〈기출문제 11 (경희대 2020년)〉	301
〈기출문제 12 (경희대 2020년)〉	310
〈기출문제 13 (연세대 2019년)〉	318
〈기출문제 14 (연세대 2019년)〉	325
〈기출문제 15 (부산대 2015년)〉	333
〈기출문제 16 (인하대 2015년)〉	343
〈기출문제 17 (서울시립대 2012년)〉	353
〈기출문제 18 (성균관대 2010년)〉	365
〈기출문제 19 (성균관대 2009년)〉	375
〈기출문제 20 (인하대 2009년)〉	385
〈기출문제 21 (성균관대 2008년)〉	394
〈기출문제 22 (성균관대 2008년)〉	404
7. 변형·예상 문항	413
8. 강의 연결	420
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	421
8.2 강의 구성 시 유의점	421
9. 전체 문제 총평	423
9.1 숫자로 먼저 보기	423
9.2 다섯 가지 총평	423
9.3 대학별 한 줄 총평	424
9.4 이렇게 공부하자	425
10. 참고문헌	426

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 멘델 유전 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	17
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	18
그림 4. 섞임설과 입자설.....	21
그림 5. 동전 두 개 1,000번 던지기	23
그림 6. 확률 나무(자녀 세 명).....	24
그림 7. 제 2장 개념도	27
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	28
그림 9. DNA에서 염색체까지.....	30
그림 10. 상동 염색체와 대립유전자.....	31
그림 11. 사람의 핵형(남자)	32
그림 12. 제 3장 개념도	37
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	38
그림 14. 감수 분열 과정($2n = 4$).....	41
그림 15. DNA 상대량 그래프	43
그림 16. 후기의 동원체 세기	45
그림 17. 제 4장 개념도	48
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	49
그림 19. 멘델의 단성 잡종 실험.....	51
그림 20. 분리의 법칙과 퍼넷 사각형.....	53
그림 21. 검정 교배.....	55
그림 22. 제 5장 개념도	58
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	59
그림 24. 양성 잡종 F_2 의 관찰값과 기댓값.....	61
그림 25. 감수 1분열 중기의 두 배열	62
그림 26. 확률 나무(양성 잡종)	63
그림 27. 제 6장 개념도	68
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	69
그림 29. 3쌍의 배열과 생식세포 8종.....	71
그림 30. 쌍의 수와 생식세포 조합 수 2^n	71
그림 31. 형제자매의 근친도 계산.....	75
그림 32. 제 7장 개념도	78
그림 33. 생활 속 개념도 7.....	79
그림 34. 독립·연관과 생식세포	81
그림 35. 검정 교배와 재조합 빈도.....	82
그림 36. 몸 색과 털 길이의 F_2 자료.....	84
그림 37. 제 8장 개념도	88
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	89
그림 39. 분꽃의 중간 유전.....	91
그림 40. ABO 유전자형과 표현형	93
그림 41. 여섯 칸이 다섯 등급으로.....	96
그림 42. 제 9장 개념도	98
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	99
그림 44. 래브라도 털색의 9 : 3 : 4.....	101
그림 45. 9 : 3 : 3 : 1의 칸 합치기	102
그림 46. ABO 항원 합성 경로와 봄베이 형.....	105
그림 47. 제 10장 개념도	108

그림 48. 생활 속 개념도 10	109
그림 49. 쌍 수에 따른 대문자 수 분포	112
그림 50. $AaBb \times AaBB$ 의 분포	114
그림 51. 다인자 형질에 작용하는 선택	116
그림 52. 제 11장 개념도	119
그림 53. 생활 속 개념도 11	120
그림 54. 반성 유전의 네 가지 교배	123
그림 55. 남녀 발현 빈도와 q	125
그림 56. 모건의 흰 눈 초파리 교배	126
그림 57. 제 12장 개념도	129
그림 58. 생활 속 개념도 12	130
그림 59. 가계도 판별 흐름도	132
그림 60. 세 가지 연습 가계도	133
그림 61. 정상 형제가 보인자일 확률	135
그림 62. 제 13장 개념도	139
그림 63. 생활 속 개념도 13	140
그림 64. 비분리 시기에 따른 생식세포	142
그림 65. 성염색체 비분리와 정자	144
그림 66. 염색체 구조 이상	146
그림 67. 유전자 개수 그래프로 비분리 읽기	147
그림 68. 제 14장 개념도	150
그림 69. 생활 속 개념도 14	151
그림 70. 하디-바인베르크 유전자형 빈도	153
그림 71. 남녀 발현 빈도의 비	155
그림 72. 페닐알라닌 대사와 PKU	156
그림 73. 분리비 지도	175
그림 74. 전체 개념 그래프	183
그림 75. 개념별 출제 횟수	184
그림 76. 연도별 출제 문항 수	186
그림 77. 대학별 출제 문항 수	187
그림 78. 자료 해석형 풀이 절차	194
그림 79. 〈연세대 2025〉 개념 그래프	214
그림 80. 부리 크기별 F_2 개체 수	217
그림 81. 〈경북대 2025〉 개념 그래프	223
그림 82. $AaBb \times AaBB$ 퍼넷 사각형과 확률	224
그림 83. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	230
그림 84. 근친도 계산 모식	234
그림 85. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	240
그림 86. 연세대 미래 2024 무게 등급	243
그림 87. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	249
그림 88. 문제 2의 그래프 ①~④	250
그림 89. 결실·전좌와 비분리 모식도	252
그림 90. 〈경북대 2024〉 개념 그래프	258
그림 91. 정자 $2^{23} \times$ 난자 2^{23}	262
그림 92. 경북대 2024 모의 가계도	266
그림 93. 〈경북대 2024〉 개념 그래프	267
그림 94. 경희대 2024 모의 세포 ㉠	275
그림 95. 〈경희대 2024〉 개념 그래프	276
그림 96. $K \times J$ 자녀의 발병 확률	279

그림 97. 연세대 2023 가계도	284
그림 98. 〈연세대 2023〉 개념 그래프	285
그림 99. X 연관 열성 유전자형과 보인자	289
그림 100. 경희대 2023 가계도	293
그림 101. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	294
그림 102. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	302
그림 103. X'X'Y 아들의 세 경로	305
그림 104. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	311
그림 105. 적록 색맹 가족의 가계도	314
그림 106. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	319
그림 107. 멘델의 가정과 3 : 1	320
그림 108. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	326
그림 109. 감수 1분열 중기의 두 배열	329
그림 110. 부산대 2015 색맹 가계도	334
그림 111. 부산대 2015 M 세포 염색체	334
그림 112. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	335
그림 113. 〈인하대 2015〉 개념 그래프	344
그림 114. 호박 색 퍼넷 사각형	347
그림 115. H 기질과 봄베이 가족	349
그림 116. 서울시립대 2012 모세포	354
그림 117. 〈서울시립대 2012〉 개념 그래프	355
그림 118. (b) 배우자세포 그림 답안	359
그림 119. 〈성균관대 2010〉 개념 그래프	366
그림 120. 성균관대 2010 F ₂ 재정리	371
그림 121. 〈성균관대 2009〉 개념 그래프	376
그림 122. cis-AB/O 아이의 기대 수	379
그림 123. 〈인하대 2009〉 개념 그래프	386
그림 124. 아들 색맹 확률 나무	389
그림 125. 〈성균관대 2008〉 개념 그래프	395
그림 126. 페닐알라닌 대사와 PKU	396
그림 127. 치사 열성 대립유전자의 감소	400
그림 128. 〈성균관대 2008〉 개념 그래프	405
그림 129. 4쌍 → 16가지 생식세포	408

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	13
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	13
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	17
표 4. 유전의 기본 낱말.....	20
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	27
표 6. $2n=4$ 인 세포의 단계별 개수.....	31
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	37
표 8. 체세포 분열과 감수 분열의 비교.....	44
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	48
표 10. 멘델의 일곱 형질과 F_2 의 실제 수.....	50
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	58
표 12. 양성 잡종($RrYy \times RrYy$) F_2 의 유전자형 9가지와 표현형.....	63
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	68
표 14. 무성 생식과 유성 생식의 비교.....	74
표 15. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	78
표 16. 독립과 연관의 비교.....	85
표 17. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	88
표 18. ABO식 혈액형의 유전자형·표현형·적혈구 항원·혈장 항체.....	93
표 19. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	98
표 20. 변형 분리비와 유전자 관계.....	103
표 21. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	108
표 22. n 쌍 더하기형 다인자 유전의 요약.....	112
표 23. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	119
표 24. X 연관 열성 형질의 교배별 자녀.....	123
표 25. 상염색체 유전과 반성 유전의 비교.....	127
표 26. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	129
표 27. 유전 방식별 가계도 단서.....	133
표 28. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	139
표 29. 염색체 이상의 정리.....	143
표 30. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	150
표 31. 진화 요인 다섯 가지.....	157
표 32. 2부 목차와 내용.....	172
표 33. 단성 잡종에서 나오는 세 가지 비율과 그 뜻.....	176
표 34. $2n=4$ 세포의 단계별 수.....	177
표 35. 무성 생식과 유성 생식의 비교.....	178
표 36. 독립과 연관을 가르는 단서.....	178
표 37. $9:3:3:1$ 의 칸 합치기와 유전자 관계(교과 밖 심화 포함).....	179
표 38. 유전 방식별 가계도 단서.....	180
표 39. 염색체 구조 이상 네 가지.....	181
표 40. 이 책의 기출 문항 목록.....	185
표 41. 대학별 출제 문항.....	187
표 42. 문항별 요구 개념 수와 최대 층.....	187
표 43. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	189
표 44. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 쓰는 순서.....	192
표 45. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	192
표 46. 자료의 모양과 그 모양이 뜻하는 것.....	195
표 47. 서술형 답안의 문장 틀(원리 설명).....	196

표 48. 판별형 답안의 문장 틀	196
표 49. 시간 배분의 예	198
표 50. 논술 기본 패턴 5가지.....	198
표 51. 문항별 소문항에 적용한 패턴.....	198
표 52. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차	206
표 53. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용	207
표 54. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(번호는 4부의 기출문제 번호).....	208
표 55. 학년도별 문항 수	208
표 56. 소문항에 적용한 답안 패턴의 분포(47개 소문항, 두 패턴을 결합한 소문.....	209
표 57. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순)	209
표 58. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	210
표 59. 일반 환경과 가뭄 환경에 풀어놓은 개체 수와 살아남은 개체 수(원문 표	213
표 60. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	214
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	215
표 62. A 생존 개체(큰 대립유전자 4개)의 생식세포 비율	218
표 63. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	223
표 64. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	225
표 65. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	230
표 66. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	231
표 67. 제시문 (가)의 표(원문 표를 다시 조판함).....	239
표 68. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	240
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	241
표 70. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	249
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	251
표 72. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	258
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	259
표 74. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	267
표 75. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	268
표 76. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	276
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	277
표 78. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	285
표 79. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	286
표 80. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	294
표 81. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	295
표 82. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	302
표 83. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	303
표 84. 난자와 정자의 성염색체 조합으로 본 자녀(이 책이 정리한 표)	305
표 85. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	311
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	312
표 87. 일곱 명의 X 염색체는 어디서 왔고 어디로 갔나	314
표 88. 기출문제 13의 개념과 복습 위치.....	319
표 89. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	320
표 90. 기출문제 14의 개념과 복습 위치.....	326
표 91. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	327
표 92. 감수 분열 단계별 염색체 행동과 독립의 법칙.....	329
표 93. 기출문제 15의 개념과 복습 위치.....	335
표 94. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	336
표 95. 원문 그림 1을 표로 옮김	343
표 96. 기출문제 16의 개념과 복습 위치.....	344

표 97. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	345
표 98. O형 부모에게서 A형 자녀가 나올 수 있는 조합(이 책이 모두 나열함)	349
표 99. 기출문제 17의 개념과 복습 위치.....	355
표 100. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	356
표 101. [문제 1-ii]의 개체 수 표(원문 표를 다시 조판).....	365
표 102. 기출문제 18의 개념과 복습 위치.....	366
표 103. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	367
표 104. 털 길이가 몸 색과 연관(상반, 교차 없음)되고 털 개수와는 독립일 때	371
표 105. 기출문제 19의 개념과 복습 위치.....	376
표 106. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	377
표 107. 배우자 유전자형별로 기대되는 cis-AB/O 아이 수(이 책의 계산)	378
표 108. 기출문제 20의 개념과 복습 위치.....	386
표 109. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	387
표 110. 기출문제 21의 개념과 복습 위치.....	395
표 111. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	397
표 112. 기출문제 22의 개념과 복습 위치.....	405
표 113. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	406
표 114. 인강 회차 구성(제안)	420
표 115. 22개 문항의 규모	423
표 116. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	424

제 1 부

기본개념편

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

멘델 유전·감수분열·가계도

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 닳음의 규칙 → 유전자가 놓인 자리(염색체) → 염색체가 나뉘는 방식(감수 분열) → 멘델의 법칙 → 법칙이 바뀌는 경우들 → 사람의 유전과 가계도 → 염색체 이상 → 집단의 유전 순서로 이어집니다. 앞 장에서 그린 염색체 그림이 다음 장의 설명 도구가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1은 열네 장을 다섯 구간으로 묶은 지도입니다. 구간마다 “무엇을 보고, 무엇을 계산하는가”가 다릅니다.

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장 — 구간마다 배우는 것

구간	장	무엇을 하는가
A. 유전자와 염색체	1~3장	닳음과 다름을 확률로 쓰는 법을 익히고, 유전자가 염색체 위에 있다는 것과 체세포 분열·감수 분열에서 염색체와 DNA 상대량이 어떻게 변하는지 그린다.
B. 멘델의 법칙	4~7장	우열·분리·독립의 법칙을 감수 분열의 염색체 행동으로 설명하고, 독립 배열이 만드는 다양성 2 ⁿ 과 독립이 깨지는 연관·교차를 본다.
C. 3:1이 바뀔 때	8~10장	중간 유전·복대립(ABO), 상위, 다인자 유전에서 분리비가 어떻게 바뀌는지 보고, 비율에서 유전자 수와 관계를 거꾸로 추론한다.
D. 사람의 유전	11~12장	X 염색체 위의 유전자(반성 유전)와 가계도 판별 규칙을 익히고, 성별에 따른 자손 확률을 계산한다.
E. 이상과 집단	13~14장	비분리와 구조 이상으로 생기는 염색체 이상, 하디-바인베르크 평형과 유전병, 진화 요인을 다룬다. 이어서 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 이 장의 참고문헌 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 장마다 한 쪽짜리 〈생활 속 개념도〉가 있어 그 장의 개념이 일상에서 어떻게 보이는지 한 장면으로 보여 줍니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 퍼넷 사각형이나 염색체 그림으로 돌아가 한 번 더 그려 보십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	제목	새로 배우는 개념
1	기본개념편 제 1장 (17쪽)	형질과 대립 형질 · 유전자형과 표현형 · 확률의 곱과 덧셈
2	기본개념편 제 2장 (27쪽)	염색사와 염색체 · 염색 분체와 동원체 · 상동 염색체 · 핵형
3	기본개념편 제 3장 (37쪽)	세포 주기 · 감수 1분열과 2분열 · 2가 염색체 · DNA 상대량
4	기본개념편 제 4장 (48쪽)	순종과 잡종 · 우열의 원리 · 분리의 법칙 · 퍼넷 사각형 · 검정 교배
5	기본개념편 제 5장 (58쪽)	양성 잡종 · 9:3:3:1 · 확률의 곱으로 비율 만들기
6	기본개념편 제 6장 (68쪽)	독립 배열과 2 ⁿ · 무작위 수정 · 유성 생식의 의미 · 근친도

장	제목	새로 배우는 개념
7	기본개념편 제 7장 (78쪽)	연관 · 교차와 재조합 빈도(교과 밖 심화)
8	기본개념편 제 8장 (88쪽)	중간 유전 · 공동 우성 · 복대립 유전 · ABO식 혈액형
9	기본개념편 제 9장 (98쪽)	유전자 상호 작용 · 9:3:4 · 12:3:1 · 봄베이 혈액형(교과 밖 심화)
10	기본개념편 제 10장 (108쪽)	다인자 유전 · 이항 분포 · 비율로 유전자 수 추론 · 자연 선택
11	기본개념편 제 11장 (119쪽)	성 결정 · 반성 유전 · X 연관 열성 · 보인자
12	기본개념편 제 12장 (129쪽)	가계도 기호 · 우열과 위치 판별 · 조건부 확률
13	기본개념편 제 13장 (139쪽)	비분리 · 이수성 · 결실·중복·역위·전좌
14	기본개념편 제 14장 (150쪽)	대립유전자 빈도 · 하디-바인베르크 평형 · 유전자 돌연변이와 유전병 · 진화 요인

표 2의 장 번호는 2부의 개념 번호(C1~C16)와 4부 문항 분석의 〈막히면 여기로 돌아가세요〉 상에서 그대로 다시 나옵니다.

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 퍼넷 사각형과 확률 나무는 손으로 한 번 그려 본다.
- 모든 비율은 “생식세포마다 확률 → 곱한다 → 같은 표현형끼리 더한다”의 세 걸음으로 만든다. 외운 비율을 쓰기 전에 이 세 걸음으로 다시 만들어 본다.
- 막히기 쉬운 곳은 3장(DNA 상대량 그래프), 10장(다인자 비율 역추론), 12장(가계도 판별), 13장(비분리 시기)이다. 이 네 장은 두 번 읽는다.
- 장 첫머리의 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

유전은 중학교 과학에서 처음 만나고, 대학 논술에서는 확률 계산과 염색체 그림, 가계도 판별이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(세포와 핵, 분수와 확률의 기초)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 비율을 먼저 주지 않고, 그 비율이 어디서 나오는지 를 먼저 묻고 그다음에 식을 만든다.

등장인물은 네 사람이다.

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다. 궁금한 것은 바로 묻고, 태오는 계산을 서두르다 가끔 틀린다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 일상과 가족의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학·생물 교수. 단양 ‘돌집 과학방’에서 토요일마다 수업을 연다. 답 대신 질문으로 길을 안내한다.

장마다 〈이 장의 출발점〉(읽기 전에 알아야 할 것), 본문 대화, 〈문제〉와 풀이, 〈핵심〉(풀이 절차), 〈스스로 풀어 보기〉(정답은 부록 A), 참고문헌이 있다.

첫 수업이 있던 토요일, 이모는 가족사진 한 장을 들고 왔다.

이모 교수님, 이것 좀 보세요. 하린이는 눈매가 영락없이 제 언니, 그러니까 엄마를 닮았는데 태오는 아빠 판박이예요. 한 부모에게서 났는데 왜 이렇게 다를까요?

하린 저도 그게 늘 궁금했어요. 엄마 반, 아빠 반 섞었으면 둘 다 중간쯤이어야 하잖아요.

석 교수 좋은 질문으로 시작하는구나. “섞인다”는 생각, 그게 바로 150년 전 사람들 대부분이 믿던 설명이었다. 물감처럼 섞인다고 말이야.

태오 물감처럼 섞이면 계속 섞일수록 다 회색이 되겠네요.

석 교수 그렇지. 그런데 실제로는 할아버지에게 있던 형질이 아버지 대에는 안 보이다가 손자에게서 다시 나타나기도 한다. 섞었다면 다시 나타날 수가 없지.

하린 그럼 섞이는 게 아니라 뭔가 알갱이 같은 게 그대로 전해진다는 거예요?

석 교수 그 알갱이를 오늘날 유전자라고 부른다. 그리고 부모는 유전자를 쌍으로 갖고 있다가 자식에게는 한 쌍에서 하나씩만 준다. 어느 쪽을 줄지는 동전 던지기와 같아.

태오 그러면 하린이랑 저는 동전을 다르게 던진 결과인 셈이네요.

석 교수 맞다. 사람은 염색체가 23쌍이니, 동전을 스물세 번 던지는 셈이야. 2를 스물세 번 곱하면 얼마일까?

태오 2^{23} 이면…… 8,388,608이요. 엄마 쪽에서도 그만큼이니깐 둘을 곱하면 70조가 넘어요.

이모 70조요? 그러니 형제가 똑같은 수가 없겠네요.

석 교수 그런데 놀라운 건, 이렇게 우연처럼 보이는 일에도 정확한 비율이 있다는 거다. 수도원 정원에서 완두를 기르던 멘델이 그 비율을 처음 썼어. 둥근 완두 5,474개, 주름진 완두 1,850개.

하린 나누면…… 약 3 대 1이네요!

석 교수 그 3 대 1이 어디서 나오는지, 그리고 왜 가끔은 3 대 1이 아니고 9 대 7이나 1 : 6 : 15 : 20 : 15 : 6 : 1 같은 낯선 비율이 나오는지가 이 책의 줄거리다.

태오 논술 기출을 보니까 가계도 문제랑 비분리 문제가 많던데요. 그것도 같은 줄기예요?

석 교수 같은 줄기다. 가계도는 동전 던지기를 여러 세대에 걸쳐 거꾸로 추적하는 일이고, 비분리는 동전을 던질 때 염색체가 잘못 나뉘는 사고다. 그러니 먼저 유전자가 어디에 있고 염색체가 어떻게 나뉘는지부터 보자.

이모 그럼 오늘 숙제는 동전 던지기인가요?

석 교수 그것부터 하자. 동전 두 개를 백 번 던져서 앞앞, 앞뒤, 뒤앞, 뒤뒤가 몇 번씩 나오는지 세어 오렴. 그게 **기본개념편 제 1장** (17쪽)의 출발점이다.

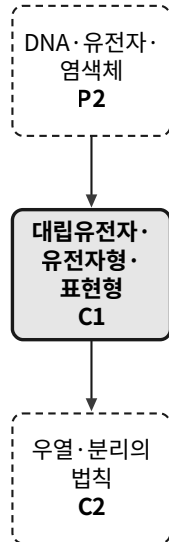
왜 유전인가? 1장은 닮음과 다름에도 확률로 쓸 수 있는 규칙이 있다는 데서 출발한다. 2~3장에서 유전자가 놓인 염색체와 그 염색체가 나뉘는 감수 분열을 그리고, 4~7장에서 멘델의 법칙을 그 염색체 그림으로 다시 읽는다. 8~10장은 3 : 1이 바뀌는 경우를, 11~12장은 사람의 유전과 가계도를, 13~14장은 염색체 이상과 집단의 유전을 다룬다. “생식세포마다 확률을 매기고, 곱하고, 같은 것끼리 더한다” — 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 유전인가: 닮음과 다름의 규칙

새 개념 형질과 대립 형질 · 유전자형과 표현형 · 확률의 곱과 덧셈

이어짐 염색체 2장 · 우열·분리 4장 · 가계도 12장

이 장의 개념도



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

그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 대립유전자·유전자형·표현형)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 (경북대 2025년) (222쪽)	두 쌍 다인자 눈색의 표현형 수와 확률	C1 대립유전자·유전자형·표현형
기출 13 (연세대 2019년) (318쪽)	멘델이 필요로 한 가정 — 분리의 법칙	C1 대립유전자·유전자형·표현형

한배에서 난 강아지 다섯 마리

같은 어미와 아비, 서로 다른 털색

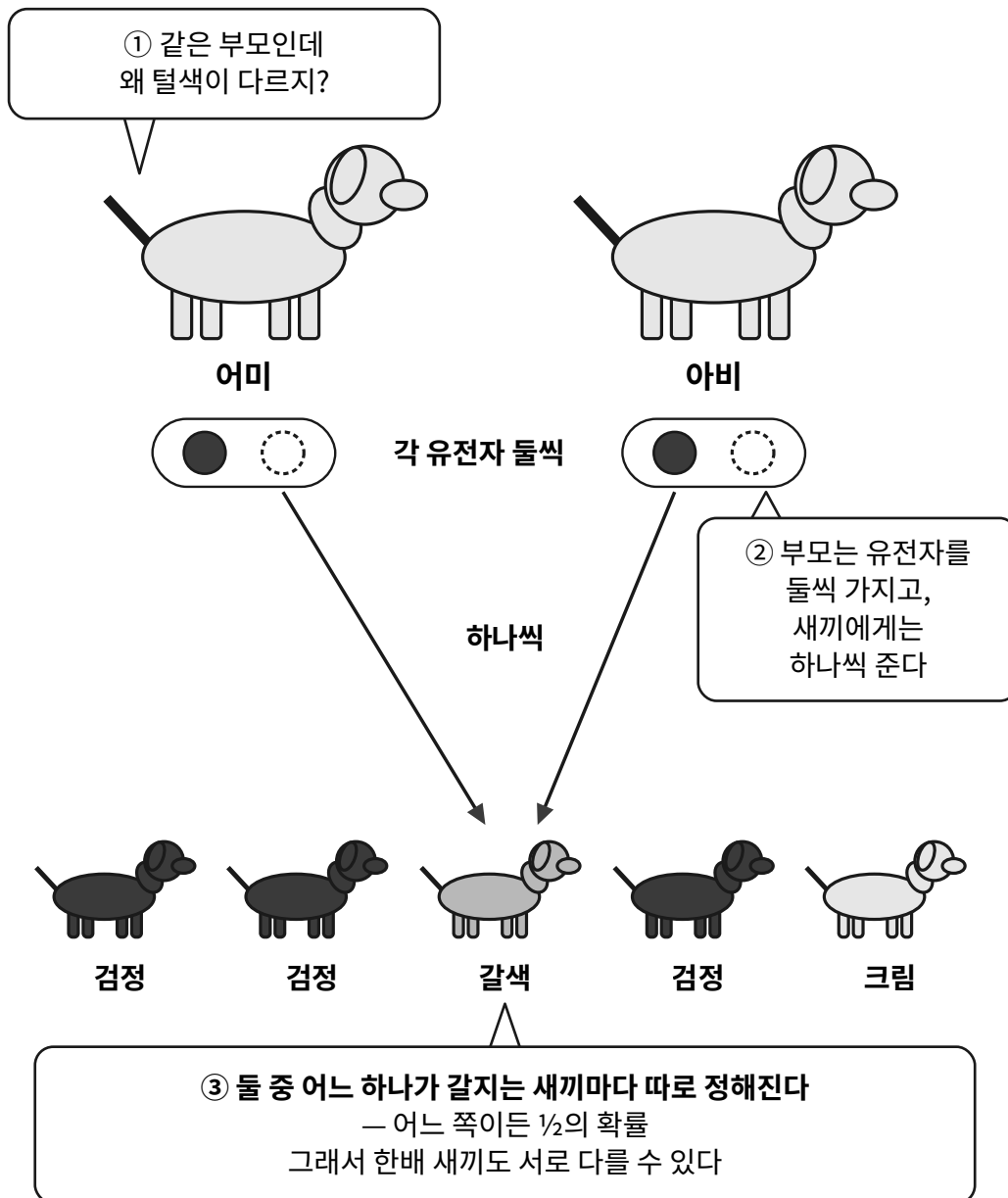


그림 3. 한배에서 난 강아지 다섯 마리 — 같은 어미와 아비에게서 났어도 털색이 서로 다르다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 같은 부모에게서 난 자손이라도 형질이 서로 다를 수 있다.
2. 부모는 한 형질의 유전자를 둘씩 가지고 있다가 자손에게는 그중 하나만 준다.
3. 둘 중 어느 쪽이 전달될지는 자손마다 따로 정해지며, 각각 1/2의 확률이다.

이 장의 출발점

- 분수의 곱셈과 덧셈, 그리고 확률을 분수로 쓰는 법(동전 앞면이 나올 확률 $\frac{1}{2}$).
- 몸은 세포로 이루어지고, 세포의 핵 속에 DNA가 들어 있다는 것.
- 중학교 과학의 ‘생식과 유전’에서 들어 본 멘델과 완두라는 이름 정도.

봄비가 그친 토요일 오후, 돌집 과학방 마루에는 이모가 가져온 가족 사진첩이 펼쳐져 있었다. 하린은 사진 속 어린 엄마와 자기 얼굴을 번갈아 보더니 고개를 갸웃했다.

하린 교수님, 저는 엄마를 닮았다는 말을 듣고 오빠는 아빠를 닮았다는 말을 들어요. 같은 엄마 아빠한테서 태어났는데 왜 이렇게 달라요?

석 교수 오늘 공부를 시작하기에 딱 좋은 질문이다. 닮는 것도 유전이고, 다른 것도 유전이야. 둘 다 같은 규칙에서 나온다는 게 이 책 전체의 줄거리다.

태오 같은 규칙에서 닮음과 다름이 둘 다 나온다고요? 반대 같은데요.

석 교수 그 규칙이 ‘확률’이기 때문이다. 부모는 자기가 가진 것의 절반을 자식에게 주는데, 어느 절반을 줄지는 자식마다 새로 정해진다. 그래서 형제는 닮으면서도 다르다. 오늘은 그 말을 정확한 낱말과 숫자로 바꾸는 날이다.

이모 저희 집 강아지도 지난달에 새끼를 다섯 마리 낳았는데, 검정이 셋이고 갈색이 하나, 크림색이 하나예요. 그것도 같은 이야기인가요?

석 교수 같은 이야기다. 생활 속 개념도에 그 장면을 그려 두었다. 오늘 끝날 때쯤이면 “같은 부모인데 왜 털색이 다르지?”라는 질문에 세 문장으로 답할 수 있을 거야.

1.1 닮음과 다름 — 형질과 대립 형질

석 교수 먼저 낱말부터 정하자. 생물이 가진 모양이나 성질 하나하나를 **형질**이라고 한다. 완두의 씨 모양, 꽃 색, 사람의 ABO식 혈액형 같은 것이다.

하린 키나 눈 색도 형질이에요?

석 교수 그렇다. 그런데 형질 가운데 어떤 것은 몇 가지로 뚜렷이 나뉘고, 어떤 것은 키처럼 연속으로 퍼져 있다. 오늘은 뚜렷이 나뉘는 쪽부터 본다. 완두의 씨 모양은 ‘둥근’과 ‘주름진’ 두 가지로 뚜렷이 나뉜다. 이렇게 한 형질 안에서 서로 대비되는 두 모습을 **대립 형질**이라고 한다.

태오 둥근 씨와 주름진 씨가 대립 형질이고, 노란 떡잎과 초록 떡잎도 대립 형질이죠.

석 교수 맞다. 대립 형질이 뚜렷하면 세기가 쉽다. 자손 1,000개체를 늘어놓고 “둥근 것 몇 개, 주름진 것 몇 개” 하고 셀 수 있지. 숫자로 셀 수 있어야 규칙을 찾을 수 있다. 멘델이 완두를 고른 이유 가운데 하나가 그거야. 4장에서 다시 보자.

이모 그런데 형질이 다 유전되는 건 아니잖아요. 저는 햇볕에 그을려서 까만데, 그건 애들한테 안 가겠죠?

석 교수 좋은 구분이다. 부모에게서 자손으로 전해지는 형질을 **유전 형질**이라고 하고, 살면서 환경 때문에 생긴 변화는 유전되지 않는다. 피부를 그을린 것이나 운동으로 커진 근육은 생식세포의 DNA를 바꾸지 않으니까 자식에게 가지 않아. 다만 실제 형질은 유전과 환경이 함께 만드는 경우가 많다. 키가 좋은 예인데, 10장에서 따로 다룬다.

1.2 보이는 것과 가진 것 — 유전자형과 표현형

- 석 교수** 형질을 정하는 유전 정보의 단위가 **유전자**다. 2장에서 보겠지만 유전자는 DNA의 한 구간이고, 염색체 위의 정해진 자리에 놓여 있다. 그 자리를 **유전자 자리**라고 한다.
- 하린** 그럼 씨 모양 유전자는 하나인데 어떻게 둥근 것과 주름진 것 두 가지가 나와요?
- 석 교수** 같은 유전자 자리에 들어갈 수 있는 유전자가 여러 버전이기 때문이다. 둥근 씨를 만드는 버전을 R, 주름진 씨를 만드는 버전을 r이라 하자. 이렇게 같은 자리에 오는 서로 다른 버전을 **대립유전자**라고 해.
- 태오** 그리고 완두나 사람은 그 자리를 두 개씩 가지고 있죠. 하나는 아빠, 하나는 엄마에게서 받은 거라서요.
- 석 교수** 그렇다. 그래서 한 개체가 가진 조합은 RR, Rr, rr 셋 중 하나다. 이 조합을 **유전자형**이라고 하고, 실제로 겉으로 드러난 모습, 곧 둥근지 주름졌는지를 **표현형**이라고 한다. 같은 대립유전자 두 개를 가진 RR, rr을 **동형 접합**, 서로 다른 둘을 가진 Rr을 **이형 접합**이라고 한다.
- 하린** Rr은 둥근 거예요, 주름진 거예요?
- 석 교수** 완두에서는 둥글다. R이 있으면 r의 효과가 겉으로 드러나지 않아. 이때 R을 **우성**, r을 **열성**이라고 하는데, 이 관계는 4장에서 자세히 본다. 오늘 기억할 것은 하나다. RR과 Rr은 표현형이 같지만 유전자형이 다르다. 보이는 것과 가진 것은 다를 수 있다.
- 이모** 그럼 겉모습만 보고는 속을 모르는 거네요. 우리 강아지 검정 셋도 속은 서로 다를 수 있겠어요.
- 석 교수** 정확하다. 그 차이가 다음 세대에서 드러난다. 같은 검정이라도 어떤 녀석은 갈색 새끼를 낳을 수 있고 어떤 녀석은 못 낳는다. 오늘 나온 낱말을 표 4에 모았다.

표 4. 유전의 기본 낱말 — 뜻과 완두·사람의 예

낱말	뜻	예
형질	생물이 가진 모양·성질 하나하나	완두 씨 모양, ABO식 혈액형
대립 형질	한 형질 안에서 서로 대비되는 모습	둥근 씨와 주름진 씨
유전자	형질을 정하는 유전 정보의 단위(DNA의 한 구간)	씨 모양 유전자
대립유전자	같은 유전자 자리에 올 수 있는 서로 다른 유전자	R과 r
유전자형	한 개체가 가진 대립유전자의 조합	RR, Rr, rr
표현형	겉으로 드러난 형질	둥근 씨, 주름진 씨
동형 접합	같은 대립유전자 두 개를 가진 상태	RR, rr
이형 접합	서로 다른 대립유전자를 가진 상태	Rr

- 태오** 시험에서는 이 낱말을 섞어 써서 감점되는 경우가 많았던데요.
- 석 교수** 그래서 표로 묶었다. 특히 ‘유전자’와 ‘대립유전자’를 헷갈리지 말자. “씨 모양 유전자에는 R과 r이라는 두 대립유전자가 있다”가 바른 문장이다. “R 유전자와 r 유전자는 서로 다른 유전자다”라고 쓰면, 서로 다른 자리에 있는 다른 유전자처럼 읽혀서 틀린 문장이 된다.

1.3 섞이는가, 입자로 남는가

석 교수 이제 오늘의 핵심 질문이다. 부모의 형질은 자식에게서 어떻게 합쳐질까? 19세기 중반까지만 많은 사람은 물감처럼 섞인다고 생각했다. 이것을 **섞임설**이라고 한다.

하린 빨간 물감이랑 흰 물감을 섞으면 분홍이 되는 것처럼요?

석 교수 그래. 그런데 섞임설에는 큰 문제가 있다. 분홍 물감끼리 다시 섞으면 뭐가 나오지?

하린 계속 분홍이죠. 빨강이나 흰색으로는 절대 다시 안 돌아가요.

석 교수 바로 그거야. 섞임설이 맞다면 세대가 지날수록 모든 개체가 중간색으로 비슷해지고, 한번 섞인 형질은 다시 나타날 수 없다. 그런데 실제 관찰은 달랐다. 멘델이 보라 꽃 완두와 흰 꽃 완두를 교배하자 자손은 모두 보라 꽃이었다. 흰색이 사라진 것처럼 보였지. 그런데 그 자손끼리 다시 교배하자 다음 세대에서 흰 꽃이 다시 나왔다. 보라 705 그루, 흰색 224 그루였다.

태오 사라졌던 흰색이 손자 세대에서 돌아왔네요. 물감이었다면 불가능한 일이고요.

석 교수 그래서 멘델은 형질을 정하는 것이 섞이지 않는 **입자**라고 생각했다. 입자 둘이 한 몸에 들어 있어도 서로 녹아 섞이지 않고, 다음 세대로 갈 때 다시 갈라져 나온다는 거지. 이것을 **입자설**이라 부른다. **그림 4**에 두 생각을 나란히 그렸다.

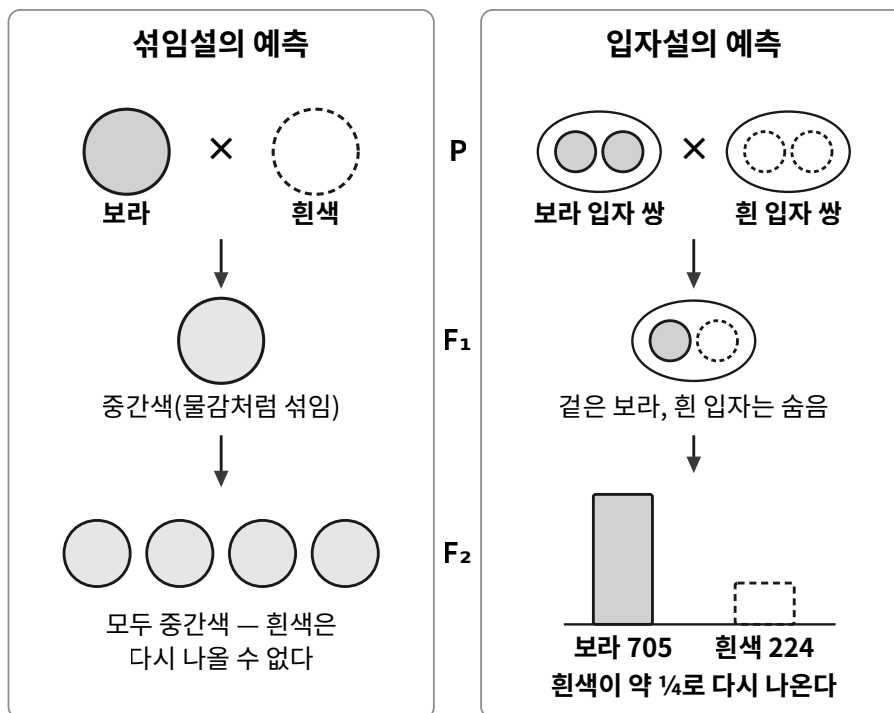


그림 4. 섞임설과 입자설의 예측 비교 — 섞임설에서는 자손이 중간색으로 굳어 흰색이 다시 나오지 않지만, 입자설에서는 F₁에서 숨었던 흰색이 F₂에서 약 1/4 비율로 다시 나온다(F₂ 막대는 멘델의 꽃 색 자료 705 : 224)

이모 그림의 구슬이 입자군요. 보라 구슬과 흰 구슬이 한 주머니에 같이 있다가, 다음 세대에 다시 하나씩 꺼내지는 거고요.

석 교수 아주 좋은 읽기다. 이 구슬이 오늘날 우리가 말하는 대립유전자다. 멘델은 1866년 논문에서 이것을 ‘요소’라고 불렀고, 유전자라는 낱말은 1909년에야 생겼다. 멘델은 유전자의 정체가 DNA라는 것도, 그것이 염색체 위에 있다는 것도 몰랐다. 그런데도 수만 개의 완두를 세어 숫자의 규칙에서 입자의 존재를 추론해 냈다.

- 태오** 705 : 224면 3.15 : 1이네요. 거의 3 : 1이요.
- 석 교수** 계산이 빠르다. $705 \div 224 = 3.15$ 이다. 왜 하필 3 : 1인지는 4장의 주제고, 거기에 쓰이는 도구가 바로 다음 절의 확률이다.
- 하린** 그런데 사람 피부색은 섞이는 것 같은데요? 부모 중간쯤 되는 경우가 많잖아요.
- 석 교수** 날카로운 반문이다. 피부색이나 키는 유전자 여러 개가 조금씩 더해 만드는 형질이라 겉으로는 섞이는 것처럼 보인다. 하지만 그 하나하나의 유전자는 여전히 섞이지 않는 입자로 전달된다. 10장에서 이 겉보기 섞임이 입자들의 합으로 어떻게 설명되는지 계산해 볼 거다.

1.4 확률의 곱과 덧셈

- 석 교수** 부모가 자식에게 대립유전자 둘 중 하나를 줄 때 어느 쪽이 갈지는 $\frac{1}{2}$ 의 확률이다. 동전 던지기와 같아. 그래서 유전 문제는 결국 확률 문제가 된다. 먼저 동전 두 개로 연습하자. 동전 두 개를 던지면 나올 수 있는 결과가 뭐지?
- 하린** 앞앞, 앞뒤, 뒤앞, 뒤뒤 네 가지요.
- 석 교수** 각각의 확률은?
- 태오** 첫 동전이 앞일 확률 $\frac{1}{2}$, 둘째도 앞일 확률 $\frac{1}{2}$ 이니까 앞앞은 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ 이에요. 넷 다 $\frac{1}{4}$ 씩이고요.
- 석 교수** 그게 **곱셈 규칙**이다. 한 사건이 다른 사건의 결과에 영향을 주지 않을 때, 곧 두 사건이 **독립**일 때, 둘이 함께 일어날 확률은 각 확률의 곱이다. 그럼 “앞 하나, 뒤 하나”가 나올 확률은?
- 하린** 앞뒤 $\frac{1}{4}$ 에 뒤앞 $\frac{1}{4}$ 을 더해서 $\frac{1}{2}$ 이요.
- 석 교수** 그게 **덧셈 규칙**이다. 두 경우가 동시에 일어날 수 없을 때, 곧 서로 **배타적**일 때 둘 중 하나가 일어날 확률은 각 확률의 합이다. 앞뒤와 뒤앞은 한 번 던질 때 동시에 나올 수 없으니 더해도 된다.
- 이모** 정말 그렇게 나오는지 궁금하네요. 실제로 던지면 딱 $\frac{1}{4}$ 씩 나와요?
- 석 교수** 딱 맞지는 않는다. 그래서 컴퓨터로 동전 두 개를 1,000번 던져 보았다. **그림 5**를 보자. 앞앞 236번, 앞뒤 260번, 뒤앞 242번, 뒤뒤 262번이 나왔다. 이론값 250번 근처에서 흔들린다.

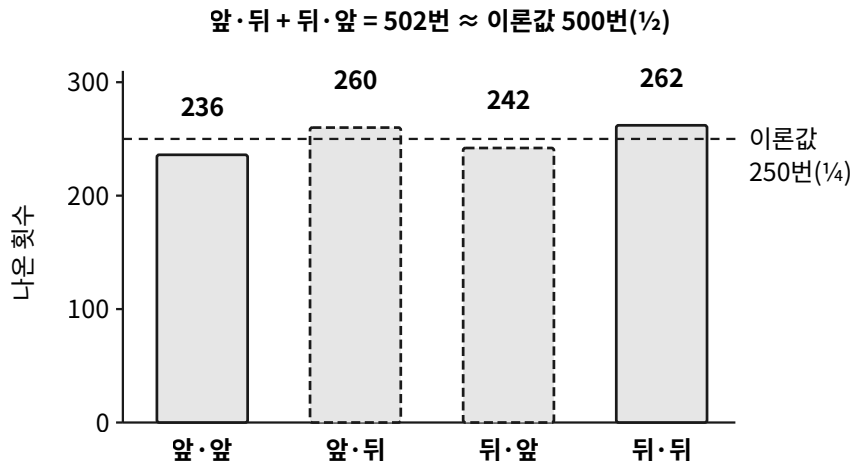


그림 5. 동전 두 개를 1,000번 던진 모의 실험 결과 — 네 결과의 횟수는 이론값 250번(확률 $\frac{1}{4}$, 점선) 근처에서 흔들리고, ‘하나는 앞·하나는 뒤’는 $260 + 242 = 502$ 번으로 이론값 500번($\frac{1}{2}$)에 가깝다

태오 앞 하나 뒤 하나는 $260 + 242 = 502$ 번이니까 0.502예요. $\frac{1}{2}$ 에 아주 가깝네요.

석 교수 이 흔들림이 중요하다. 실제 교배 결과는 언제나 이론 비에서 조금씩 어긋난다. 멘델의 705 : 224가 정확히 3 : 1이 아닌 이유도 같아. 수가 많을수록 관찰 비는 이론 비에 가까워진다. 그래서 유전 실험은 많이 세어야 한다.

태오 그럼 강아지 다섯 마리처럼 적은 수로는 비율을 말하기 어렵겠네요.

석 교수 그렇다. 동전 두 개를 네 번만 던지면 앞앞이 한 번도 안 나오는 일이 흔하다. 그 확률이 $(\frac{3}{4})^4 = 81/256$, 약 32 %나 되거든. 한배 새끼 다섯 마리나 한 집안 형제 셋에서 이론 비가 안 맞는다고 규칙이 틀렸다고 말하면 안 된다. 논술에서 “표본 수가 적어 이론 비와 차이가 날 수 있다”는 한 문장이 채점 포인트가 되는 경우도 있다.

하린 그럼 유전에서는 동전 대신 뭘 던지는 거예요?

석 교수 부모 각자가 대립유전자 동전을 하나씩 던진다고 생각하면 된다. 아빠가 Aa라면 A를 줄 확률 $\frac{1}{2}$, a를 줄 확률 $\frac{1}{2}$. 엄마도 Aa라면 똑같다. 그러면 자식이 aa일 확률은?

태오 아빠가 a를 줄 확률 $\frac{1}{2}$, 엄마가 a를 줄 확률 $\frac{1}{2}$, 둘은 서로 독립이니까 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ 이에요.

석 교수 맞다. 이제 이걸 자녀 여러 명으로 넓혀 보자.

문제 1.1

부모가 모두 Aa이다. 자녀를 셋 낳을 때 세 명 모두 aa일 확률을 구하라. 자녀 한 명 한 명의 유전자형은 서로 독립이라고 한다.

하린 한 명이 aa일 확률이 $\frac{1}{4}$ 이고 세 명이 다 그래야 하니까 $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = 1/64$ 이에요.

석 교수 맞다. 왜 곱해도 되는지 한 문장으로 말해 볼래?

하린 첫째가 aa로 태어났다고 둘째가 aa로 태어날 확률이 바뀌지 않으니까요. 자녀마다 부모가 동전을 새로 던져요.

석 교수 완벽하다. 정답은 $(\frac{1}{4})^3 = 1/64$, 소수로 0.0156, 약 1.6 %이다. **그림 6**의 확률 나무에서 맨 위 가지 하나만 따라가면 이 값이 나온다.

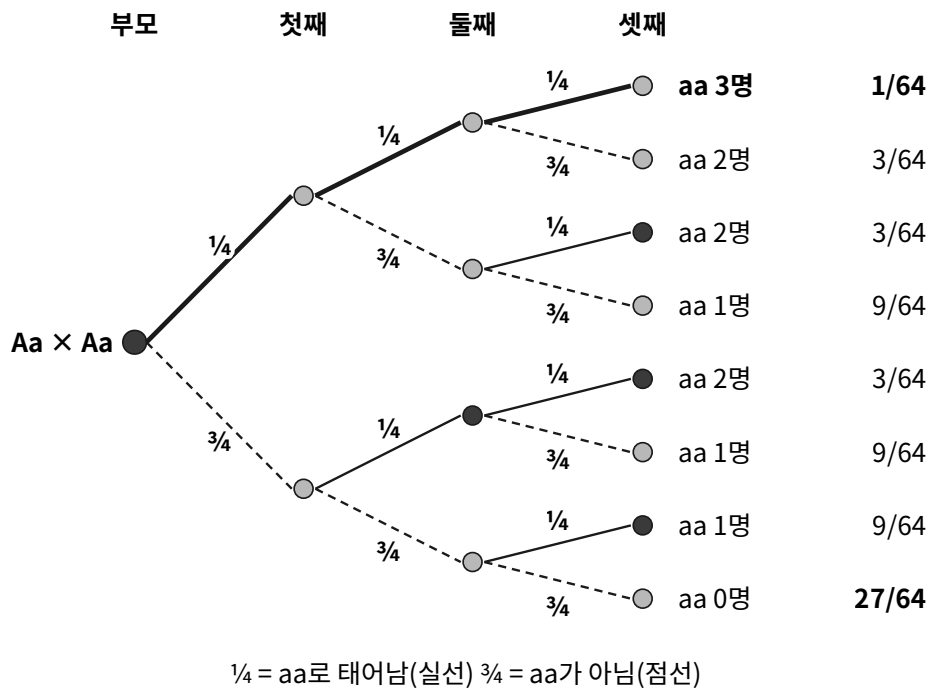


그림 6. 확률 나무: 부모가 모두 Aa일 때 자녀 세 명이 차례로 aa(확률 $\frac{1}{4}$)인지 아닌지($\frac{3}{4}$)로 갈라지는 가지 — 세 명 모두 aa인 길은 하나뿐이고 확률은 $(\frac{1}{4})^3 = 1/64$ 이며, 한 명도 aa가 아닌 길은 $(\frac{3}{4})^3 = 27/64$ 이다

이모 1.6 %면 아주 드무네요. 그런데 저는 오히려 “셋 중 하나라도 aa가 나올 확률”이 더 궁금해요. 부모 입장에서서는 그게 걱정이니깐요.

문제 1.2

문제 1.1의 부모에게서 자녀 셋 중 적어도 한 명이 aa일 확률을 구하라.

태오 한 명이 aa일 확률이 $\frac{1}{4}$ 이니깐 세 명이면 $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$ 이요.

석 교수 잠깐. 그 방법대로라면 자녀가 넷일 때는 $\frac{1}{4} \times 4 = 1$, 다섯이면 1보다 커진다. 확률이 1을 넘을 수 있나?

태오 아, 안 되죠. 어디가 틀렸어요?

석 교수 덧셈 규칙은 서로 배타적인 사건에만 쓴다. “첫째가 aa”와 “둘째가 aa”는 동시에 일어날 수 있으니 배타적이지 않아. 그냥 더하면 둘 다 aa인 경우를 두 번 세게 된다. 이럴 때는 반대 사건을 쓰는 게 편하다. “적어도 한 명이 aa”의 반대는 뭐지?

하린 “한 명도 aa가 아니다”요. 세 명 모두 aa가 아닐 확률은 $\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} \times \frac{3}{4} = 27/64$ 이에요.

태오 그러면 $1 - 27/64 = 37/64$ 이네요. 소수로는 0.578이고요.

석 교수 정답이다. 적어도 한 명이 aa일 확률은 $37/64$, 약 0.578, 곧 57.8 %이다. 태오가 얻은 $\frac{3}{4} = 0.75$ 와 비교하면 꽤 차이가 난다. 확률 나무로 계산해 볼까? 정확히 한 명이 aa인 길이 세 갈래, 각각 $\frac{1}{4} \times \frac{3}{4} \times \frac{3}{4} = 9/64$ 이니 $27/64$. 정확히 두 명인 길이 세 갈래, 각각 $3/64$ 이니 $9/64$. 세 명 모두가 $1/64$. 더하면?

이모 $27 + 9 + 1 = 37$, 그래서 $37/64$ 예요. 이번에는 갈래들이 서로 겹치지 않으니까 더해도 되는 거군요.

석 교수 그렇다. 곱셈은 “그리고”, 덧셈은 겹치지 않는 “또는”. 이 두 줄이 이 책 마지막 장까지 쓰는 도구 전부라고 해도 과장이 아니다.

하린 그러면 이모네 강아지가 검정 셋, 갈색 하나, 크림 하나로 나온 것도 이렇게 확률로 계산할 수 있어요?

석 교수 할 수 있다. 다만 개의 털색은 유전자 두 개 이상이 함께 정하기 때문에 계산은 9장에서 하자. 오늘은 원리만 보자. 부모는 각 유전자를 둘씩 가지고, 새끼에게는 하나씩 준다. 어떤 것을 줄지는 새끼마다 새로 던지는 동전이 정한다. 그래서 한배 새끼들도 털색이 다를 수 있는 거야.

1.5 앞으로의 길 — 이 책의 지도

석 교수 오늘 배운 것을 한 줄로 줄이면 이렇다. 형질은 섞이지 않는 대립유전자 쌍이 정하고, 부모는 그 쌍 가운데 하나를 확률 $\frac{1}{2}$ 로 준다. 그런데 이 문장에는 아직 답하지 않은 질문이 둘 있다.

태오 대립유전자가 몸 어디에 있는지, 그리고 왜 하필 하나씩만 주는지요?

석 교수 그렇다. 첫째 질문은 2장 염색체에서, 둘째 질문은 3장 감수 분열에서 답한다. 그 바탕 위에 4장과 5장에서 멘델의 두 법칙을 세우고, 6장과 7장에서는 감수 분열이 다양성을 만드는 방식과 그것이 깨지는 경우를 본다. 8장부터 10장까지는 3 : 1이 다른 비로 바뀌는 경우들이고, 11장과 12장은 사람의 성염색체와 가계도, 13장은 염색체가 잘못 나뉠 때, 14장은 집단 전체의 유전자 빈도다.

하린 열네 장이냐요? 그래도 결국은 동전 던지기를 여러 번 하는 거죠?

석 교수 그렇게 말해도 크게 틀리지 않다. 다만 동전이 염색체 위에 실려 있어서 함께 던져지기도 하고(7장), 동전 하나가 다른 동전을 가리기도 하고(9장), 남녀에 따라 동전의 수가 다르기도 하다(11장). 그 사정을 하나씩 배워 가는 거야.

이모 저처럼 아이를 키우는 사람한테는 12장 가계도가 제일 궁금하겠네요.

석 교수 가계도도 결국 오늘의 곱셈과 덧셈으로 푼다. 오늘 문제 1.2에서 태오가 한 실수, 곧 배타적이지 않은 사건을 그냥 더하는 실수는 가계도 문제에서도 가장 흔한 감점 이유다.

핵심 유전 문제를 확률로 푸는 네 단계

1. 형질과 대립유전자를 정하고 기호를 붙인다(우성 대문자, 열성 소문자). 유전자형과 표현형을 구별해서 쓴다.
2. 부모 각자가 어떤 대립유전자를 어떤 확률로 주는지 적는다. 이형 접합 부모는 각각 $\frac{1}{2}$ 이다.
3. 서로 독립인 사건이 함께 일어날 확률은 곱한다. 자녀 여러 명, 부모 두 사람, 서로 다른 유전자가 모두 이 경우다.
4. 서로 배타적인 경우만 더한다. “적어도 하나”는 $1 - (\text{하나도 없을 확률})$ 로 구하고, 확률 나무의 갈래 합으로 계산한다.

스스로 풀어 보기

1. 완두의 씨 모양에서 RR, Rr, rr 가운데 표현형이 같은 것끼리 묶고, 각각을 동형 접합과 이형 접합으로 분류하라. (R이 우성)
2. 섞임설이 맞다면 보라 꽃 × 흰 꽃의 자손끼리 교배한 다음 세대에서 어떤 결과가 예상되는지 쓰고, 실제 관찰(보라 705 : 흰색 224)이 섞임설을 반박하는 이유를 설명하라.
3. 부모가 모두 Aa일 때 자녀 둘 가운데 정확히 한 명만 aa일 확률을 구하라.

4. 주사위 한 개와 동전 한 개를 함께 던질 때 ‘6이 나오고 동전이 앞면’일 확률과 ‘6이 나오거나 동전이 앞면’일 확률을 구하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 낱말과 확률 규칙은 4부의 여러 기출에서 첫 단추가 된다. **기출문제 13**(연세대 2019) (318쪽)은 멘델의 실험 결과를 설명하려면 어떤 가정이 필요했는지를 묻는데, 이 장의 입자설과 ‘쌍으로 있다가 하나씩 전해진다’는 생각이 그 답의 뼈대다. **기출문제 2**(경북대 2025) (222쪽)은 두 쌍의 대립유전자를 가진 부모에게서 자녀의 눈색 표현형과 확률을 구하게 하며, 부모 각자의 대립유전자 확률을 곱하고 겹치지 않는 경우를 더하는 이 장의 두 규칙을 그대로 쓴다. **기출문제 8**(경희대 2024) (274쪽)은 남자아가 태어났을 때 유전병이 나타날 확률을 묻는데, 확률을 어떤 조건 아래에서 세는지가 답을 가르는 문제라서 이 장의 확률 나무로 경우를 나눠 보는 연습이 도움이 된다.

이 장의 참고문헌

Fisher, R. A. (1936). Has Mendel's work been rediscovered? *Annals of Science*, 1(2), 115–137. <https://doi.org/10.1080/00033793600200111>

Mendel, G. (1866). Versuche über Pflanzen-Hybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, 4, 3–47.

Griffiths, A. J. F., Doebley, J., Peichel, C., & Wasserman, D. A. (2020). *Introduction to genetic analysis* (12th ed.). W. H. Freeman.

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

제 2장 유전자는 어디에 있나: 염색체와 핵형

새 개념 염색사와 염색체 · 염색 분체와 동원체 · 상동 염색체 · 핵형과 $2n \cdot n$

이어짐 감수 분열 3장 · 독립 배열 6장 · 비분리 13장

이 장의 개념도

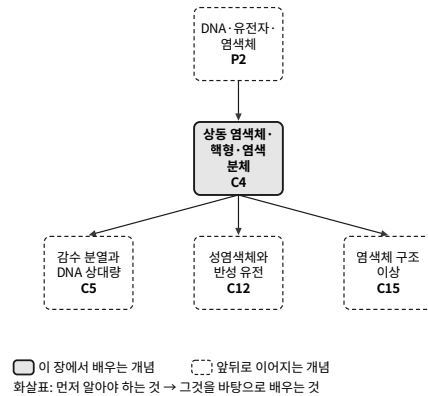


그림 7. 제 2장에서 배우는 개념(C4 상동 염색체·핵형·염색 분체)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 (연세대 2024년) (248쪽)	DNA 상대량·유전자 수 그래프로 결실·전좌·비분리 추론	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체
기출 11 (경희대 2020년) (301쪽)	색맹 클라인펠터 아들의 비분리 경로	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체
기출 13 (연세대 2019년) (318쪽)	멘델이 필요로 한 가정 — 분리의 법칙	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체
기출 14 (연세대 2019년) (325쪽)	독립의 법칙을 감수 분열 염색체 행동으로	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체
기출 15 (부산대 2015년) (333쪽)	색맹 어머니의 정상 아들과 염색체 세기	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체
기출 17 (서울시립대 2012년) (353쪽)	감수 1·2분열 비분리와 다운·XYY	C4 상동 염색체·핵형·염색 분체

실타래와 실패

긴 실은 감아 두어야 엉키지 않는다 — 세포 속 DNA도 마찬가지

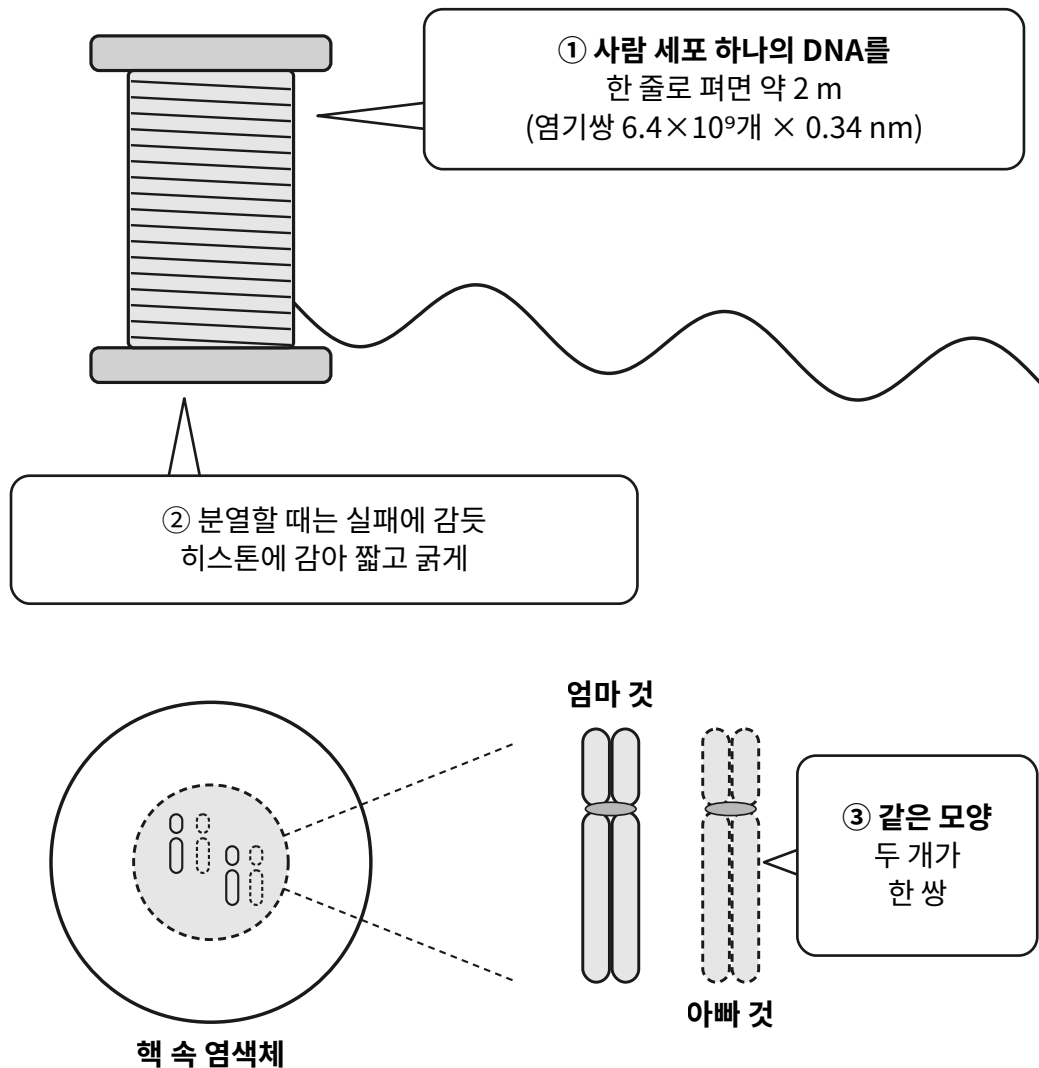


그림 8. 실타래와 실패 — 길고 가는 실을 실타래에 감아 보관하듯 세포는 약 2 m의 DNA를 히스톤 단백질에 감아 짧고 굵은 염색체로 만든다(모식도, 길이는 어림값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 사람 세포 하나의 DNA를 한 줄로 펴면 약 2 m이다.
2. 세포가 분열할 때 DNA는 실타래에 감기듯 단백질에 겹겹이 감겨 짧고 굵은 염색체가 된다.
3. 모양과 크기가 같은 염색체 두 개가 한 쌍을 이루며, 하나는 어머니에게서, 하나는 아버지에게서 왔다.

이 장의 출발점

- 1장의 유전자형과 표현형, 대립유전자 R과 r이 같은 유전자 자리에 온다는 것.
- DNA는 뉴클레오타이드가 길게 이어진 이중 나선 분자이고, 그 일부 구간이 유전자라는 것.
- 진핵세포에는 핵이 있고, DNA는 핵 속에 들어 있다는 것.

토요일 아침, 이모는 바느질 바구니를 들고 과학방에 들어왔다. 엉킨 실타래를 풀다 지친 이모가 실을 실패에 감기 시작하자, 석 교수가 그 실패를 집어 들었다.

석 교수 오늘 수업 재료를 이모가 들고 오셨네. 지난주에 남은 질문이 뭐였지?

태오 대립유전자가 몸 어디에 있느냐, 그리고 왜 부모가 둘 중 하나만 주느냐였어요.

석 교수 오늘은 첫째 질문이다. 답부터 말하면 대립유전자는 염색체 위에 있다. 그런데 그 염색체가 무엇인지 정확히 알아야 3장의 감수 분열을 따라갈 수 있다. 이 실패가 좋은 출발점이야.

이모 실패요? 그냥 실을 안 엉키게 감아 두는 건데요.

석 교수 세포도 똑같은 고민을 한다. 사람 세포 하나에 들어 있는 DNA를 한 줄로 이어 퍼면 약 2 m나 된다. 그걸 지름이 몇 마이크로미터(μm , 1 mm의 1,000분의 1)밖에 안 되는 핵 속에 넣어야 하지.

하린 2 m면 제 키보다 길어요. 그런 게 세포마다 하나씩 들어 있다고요?

석 교수 적혈구처럼 핵이 없는 세포를 빼면 거의 모든 체세포에 들어 있다. 그 길이를 어떻게 접어 넣는지가 오늘 첫 번째 이야기다.

2.1 DNA에서 염색체까지 — 감고, 또 감는다

석 교수 먼저 숫자를 확인하자. 사람의 DNA는 한 벌에 염기쌍이 약 3.2×10^9 개 있고, 체세포에는 두 벌이 있으니 약 6.4×10^9 개다. 이중 나선에서 염기쌍 하나가 차지하는 길이는 약 0.34 nm(나노미터, 10^{-9} m)야. 곱해 볼래?

태오 $6.4 \times 10^9 \times 0.34 \times 10^{-9} \text{ m} = 2.18 \text{ m}$. 정말 2 m가 넘네요.

석 교수 맞다. 핵의 지름을 약 $6 \mu\text{m}$ 라고 하면, 2 m는 그 지름의 약 36만 배다. 지름 6.5 cm 테니스공에 20 km가 넘는 실을 넣는 셈이야.

하린 그걸 어떻게 넣어요? 다 엉킬 것 같아요.

석 교수 그래서 감는다. 첫 단계에서 DNA는 **히스톤**이라는 단백질 8개가 모인 덩어리에 약 두 바퀴 감긴다. 이 한 단위를 **뉴클레오솜**이라고 한다. 현미경으로 보면 실에 구슬을 꿰 것처럼 보이지. 뉴클레오솜이 줄줄이 이어진 가는 실이 더 감기고 접혀서 **염색사**가 된다. 세포가 분열하지 않을 때 핵 속의 DNA는 이 염색사 상태로 풀어져 퍼져 있다.

이모 평소에는 실을 풀어 놓고 쓰다가, 이사 갈 때만 실패에 감는 거네요.

석 교수 아주 좋은 비유다. 평소에는 유전자를 읽어 단백질을 만들어야 하니 풀어 두는 편이 편하다. 그런데 세포가 분열할 때는 DNA를 두 딸세포로 정확히 나눠 보내야 하니, 엉키지 않게 바짝 감아 짧고 굵게 만든다. 그렇게 응축되어 광학 현미경으로 보이는 막대 모양 구조가 **염색체**다. **그림 9**에 단계를 그렸다.

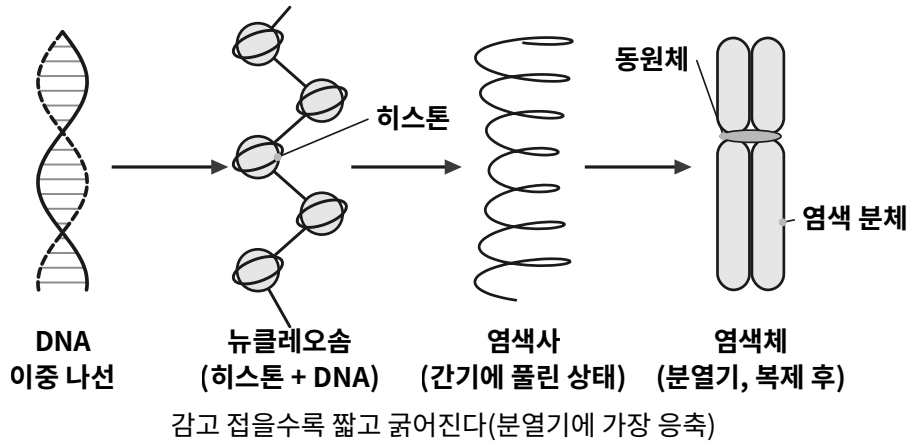


그림 9. DNA에서 염색체까지 — DNA 이중 나선이 히스톤 단백질에 감겨 뉴클레오솜을 이루고, 뉴클레오솜 실이 감기고 접혀 염색사가 되며, 분열기에는 더 응축되어 염색 분체 두 개가 동원체에서 붙은 염색체로 보인다(모식도, 크기 비율은 실제와 다름)

하린 염색사와 염색체가 다른 물질이예요?

석 교수 같은 물질이다. DNA와 단백질로 된 같은 실이 풀려 있으면 염색사, 응축되어 있으면 염색체라고 부를 뿐이야. 논술에서 “염색사가 응축하여 염색체가 된다”라고 쓰면 정확하다. “염색사가 염색체로 바뀐다”라고 하면 다른 물질로 변하는 것처럼 읽히니 조심하자.

2.2 복제된 염색체 — 염색 분체와 동원체

석 교수 그림의 맨 오른쪽 염색체를 다시 보자. X자처럼 생겼지. 이건 DNA가 이미 복제된 뒤의 모습이다.

태오 그래서 두 가닥이 붙어 있는 거죠? 한쪽이 원본이고 한쪽이 복사본이고요.

석 교수 반만 맞다. 3장에서 다시 보겠지만 DNA 복제는 이중 나선의 두 가닥이 각각 틀이 되어 새 가닥을 만들기 때문에, 복제된 두 DNA는 각각 한 가닥 하나와 새 가닥 하나로 되어 있다. 어느 쪽이 원본이라고 할 수 없어. 둘은 염기 서열이 같은 쌍둥이고, 그래서 같은 대립 유전자를 가진다. 이 두 가닥 하나하나를 **염색 분체**라 하고, 둘이 붙어 있는 잘록한 부분을 **동원체**라고 한다.

하린 그럼 X자 하나는 염색체가 두 개예요, 한 개예요?

석 교수 시험에서 가장 많이 틀리는 질문이다. X자 하나는 염색체 1개다. 염색 분체가 2개일 뿐이야. 셀 때 쓰는 규칙이 하나 있다. **염색체 수는 동원체 수와 같다**. 동원체가 하나면 염색 분체가 몇 개 붙어 있는 염색체 하나다.

태오 그럼 체세포 분열 후기에 염색 분체가 갈라져서 양쪽으로 끌려가면요?

석 교수 그때는 각 염색 분체가 자기 동원체를 하나씩 가지고 떨어지니, 각자가 염색체 하나가 된다. 그래서 그 순간 세포 안의 염색체 수가 두 배로 보인다. 3장의 DNA 상대량 그래프에서 이 규칙을 계속 쓸 거야.

이모 DNA 분자 개수로 세면 더 헷갈리지 않아요?

석 교수 그 방법도 좋다. 염색 분체 하나에 DNA 이중 나선이 하나 들어 있다. 그러니 복제 전 염색체 하나에는 DNA 분자 1개, 복제된 염색체 하나에는 DNA 분자 2개다. 표 6은 염색체 4개를 가진 세포($2n=4$)가 지나는 단계마다 이 숫자들을 정리한 것이다.

표 6. $2n = 4$ 인 세포의 단계별 개수 — 염색체 수(= 동원체 수), 염색 분체 수, DNA 분자 수, 핵 1개당 DNA 상대량 (G_1 기 = 2)

단계	염색체 수	염색 분체 수	DNA 분자 수	DNA 상대량
G_1 기(복제 전)	4	없음(복제 전)	4	2
G_2 기(복제 후)	4	8	8	4
체세포 분열 후기(세포 하나 전체)	8	없음(분리됨)	8	4
체세포 분열 직후 딸세포	4	없음	4	2
감수 1분열 직후 딸세포	2	4	4	2
감수 2분열 직후 딸세포	2	없음	2	1

하린 표에서 G_2 기는 염색체가 4개인데 DNA 분자는 8개네요.

석 교수 그렇다. 복제가 끝나도 동원체가 갈라지지 않았으니 염색체는 여전히 4개다. 그런데 DNA는 두 배가 되었지. “복제하면 염색체 수가 두 배가 된다”는 오답이 여기서 나온다. 복제로 두 배가 되는 것은 DNA 양이지 염색체 수가 아니다.

2.3 상동 염색체와 유전자 자리

석 교수 이제 오늘의 진짜 주인공이다. 사람의 체세포를 분열기에 멈춰 염색체를 늘어놓으면 모양과 크기가 똑같은 것끼리 두 개씩 짝을 지을 수 있다. 이런 짝을 **상동 염색체**라고 한다.

하린 똑같은 두 개면 하나는 복사본인가요?

석 교수 아니다. 아까 본 염색 분체와 헷갈리기 쉬운데, 상동 염색체는 복사본이 아니라 출신이 다른 두 염색체다. 하나는 어머니의 난자에서, 하나는 아버지의 정자에서 왔다. 모양과 크기가 같고, 같은 유전자들이 같은 순서로 같은 자리에 놓여 있지만, 그 자리에 든 대립유전자는 다를 수 있어. **그림 10**를 보자.

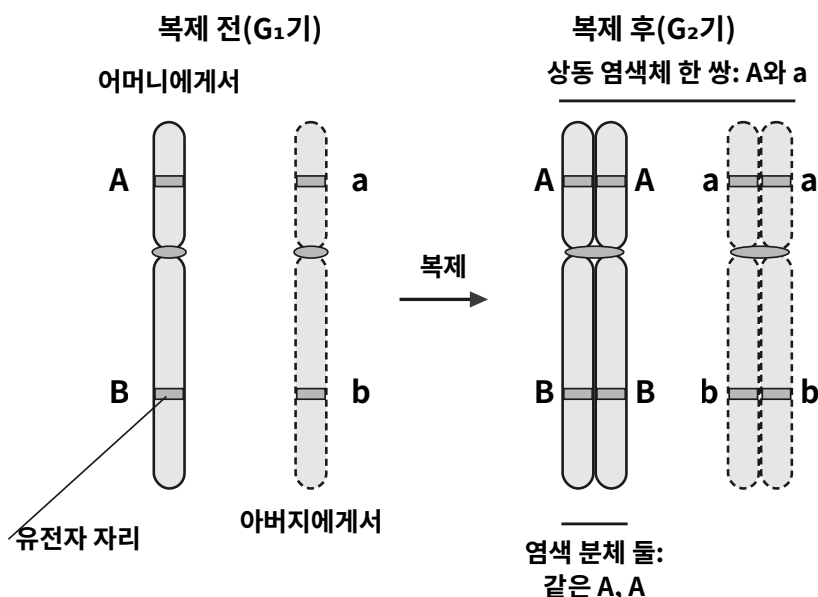


그림 10. 상동 염색체 한 쌍과 대립유전자 — 어머니에게서 온 염색체와 아버지에게서 온 염색체의 같은 유전자 자리에 A와 a, B와 b가 놓인다. 복제 뒤에는 한 염색체의 두 염색 분체가 같은 대립유전자(A와 A)를 가진다(모식도)

태오 어머니 쪽 염색체의 이 자리에 A, 아버지 쪽 같은 자리에 a. 그러면 이 사람은 Aa예요.

석 교수 그렇다. 1장에서 “유전자형은 대립유전자 두 개의 조합”이라고 했지? 그 두 개가 바로 상동 염색체 한 쌍의 같은 자리에 하나씩 놓인 것이다. 1장의 R과 r도, 같은 쌍의 같은 자리에 들어간 두 버전이야.

이모 그럼 같은 염색체에 있는 B는 A랑 항상 같이 다녀요?

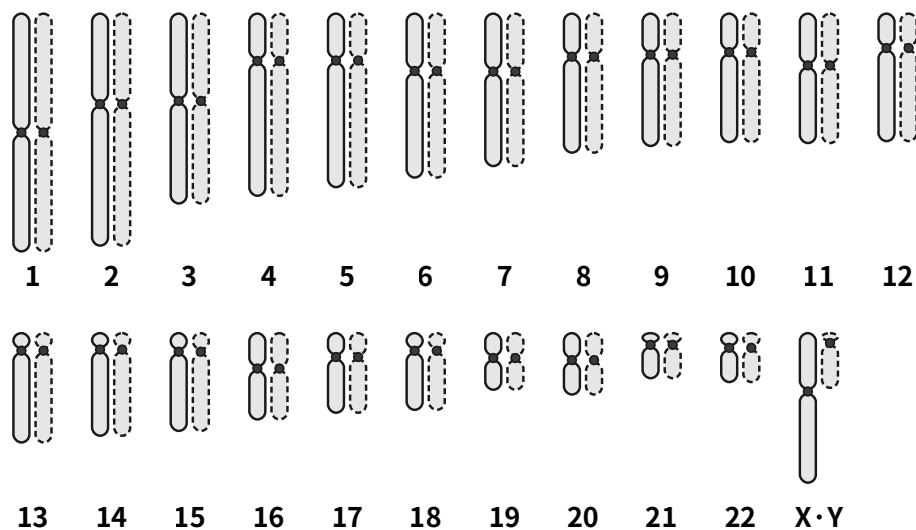
석 교수 좋은 질문인데 7장의 주제다. 같은 염색체에 있는 유전자들은 함께 움직이는 경향이 있다. 반대로 서로 다른 상동 염색체 쌍에 있는 유전자들은 따로따로 움직이지. 5장의 독립의 법칙은 바로 이 “다른 쌍”에 해당하는 이야기다.

하린 그림에서 복제된 염색체의 두 염색 분체는 A, A로 똑같고, 상동 염색체끼리는 A, a로 다르네요.

석 교수 그 대비가 이 장의 핵심이다. 정리하면, 염색 분체 둘은 복제로 생긴 쌍둥이라 같은 대립유전자를 갖고, 상동 염색체 둘은 부모에게서 하나씩 온 것이라 다른 대립유전자를 가질 수 있다. 감수 1분열에서는 상동 염색체가, 감수 2분열에서는 염색 분체가 갈라진다. 3장에서 그 장면을 보자.

2.4 핵형 — 사람의 $2n = 46$

석 교수 한 생물의 염색체를 크기와 모양 순서로 늘어놓은 것을 **핵형**이라 한다. **그림 11**는 사람 남자의 핵형을 모식으로 그린 것이다.



상염색체 22쌍(1~22번) + 성염색체 XY = 46개

각 쌍의 왼쪽(실선) = 어머니에게서, 오른쪽(점선) = 아버지에게서

그림 11. 사람 남자의 핵형 모식도 — 상염색체 22쌍(1~22번)과 성염색체 XY. 막대 길이는 각 염색체의 상대 길이(1번이 가장 길다)를 어림값으로 나타냈고, 점은 동원체 위치다(모식도)

하린 22번까지는 짝이 딱 맞는데 마지막 X랑 Y는 모양이 달라요.

석 교수 잘 봤다. 1번부터 22번까지 남녀가 똑같이 가진 것을 **상염색체**, 성을 결정하는 마지막 한 쌍을 **성염색체**라 한다. 여자는 XX로 모양이 같은 한 쌍이고, 남자는 XY로 모양이 다르다. 그래서 사람 체세포의 염색체는 상염색체 44개(22쌍)에 성염색체 2개, 모두 46개다. 이것을 $2n = 46$ 이라고 쓴다.

- 태오** n은 한 벌의 수죠? 그럼 $n = 23$.
- 석 교수** 그래. n은 상동 염색체 쌍마다 하나씩만 가진 한 벌의 염색체 수다. 정자와 난자는 $n = 23$ 개, 곧 한 벌만 가진다. 체세포처럼 두 벌을 가진 상태를 $2n$ 이라 하고, n개만 가진 상태와 구별한다.
- 하린** 번호는 어떻게 붙인 거예요? 1번이 제일 길어 보여요.
- 석 교수** 대체로 큰 것부터 번호를 붙였다. 1번이 가장 길고 번호가 커질수록 짧아진다. 그런데 그림을 자세히 보면 21번이 22번보다 조금 짧지? 처음 번호를 붙일 때 현미경으로 본 크기가 실제와 조금 달랐던 흔적이다. 번호는 이미 널리 쓰이고 있어서 고치지 않고 그대로 둔다.
- 태오** 염색체 하나에 유전자는 몇 개나 있어요?
- 석 교수** 사람의 단백질 유전자는 모두 2만 개 남짓으로 본다. 그것이 23종류의 염색체에 나뉘어 있으니 염색체 하나에 평균 수백 개에서 천여 개다. 긴 1번에는 2,000개 가까이, 짧은 Y에는 수십 개 정도만 있다. 그러니 상동 염색체 한 쌍을 물려받는다는 건 유전자 수백 개를 한 묶음으로 물려받는다는 뜻이고, 이 사실이 7장 연관의 바탕이 된다.
- 이모** 핵형을 보면 뭘 알 수 있어요?
- 석 교수** 염색체 개수와 큰 구조가 정상인지 알 수 있다. 21번이 세 개면 다운 증후군이고, 성염색체가 XXY면 클라인펠터 증후군이다. 13장에서 이런 경우가 왜 생기는지 다룬다. 반대로 핵형으로는 작은 유전자 하나의 변화, 예를 들어 1장의 R이 r로 바뀐 것 같은 차이는 볼 수 없어.
- 하린** 염색체가 많을수록 더 복잡한 생물이예요?
- 석 교수** 그렇지 않다. 교과서에 나오는 값을 보면 초파리 $2n = 8$, 완두 $2n = 14$, 옥수수 $2n = 20$, 사람 $2n = 46$, 침팬지 $2n = 48$, 개 $2n = 78$ 이다. 개가 사람보다 많지? 염색체 수는 생물마다 정해진 값이지만 복잡함과 상관이 없다. 다만 같은 종이면 염색체 수와 모양이 같다는 점이 중요하다.
- 태오** 사람 염색체가 46개라는 건 언제 알았어요? 아주 옛날부터 알았을 것 같은데요.
- 석 교수** 의외로 늦다. 1920년대부터 30년 넘게 교과서에는 사람 $2n = 48$ 이라고 적혀 있었다. 염색체가 서로 겹쳐 보여서 정확히 세기 어려웠거든. 1956년에 티오와 레반이 세포를 저장액(물이 더 많은 묽은 용액)에 담가 부풀려 염색체를 흩어 놓는 방법으로 세어 46개임을 확인했다. 잘 세는 방법이 생기자 오래된 숫자가 바뀐 거야.
- 하린** 세는 방법이 바뀌니까 답이 바뀌었네요. 과학책에 나온 숫자도 틀릴 수 있는 거군요.
- 석 교수** 그렇다. 그래서 숫자 뒤에 있는 측정 방법을 함께 보는 습관이 중요하다. 그보다 훨씬 앞선 1903년에는 서턴이 메뚜기의 감수 분열을 관찰하고 놀라운 주장을 했다. 염색체가 움직이는 방식이 멘델의 ‘요소’가 움직이는 방식과 꼭 닮았다는 거야. 염색체도 쌍으로 있고, 생식세포를 만들 때 쌍이 갈라져 하나씩 들어가고, 수정으로 다시 쌍이 된다. 그래서 멘델의 요소, 곧 유전자는 염색체 위에 있을 것이라고 보았다. 이것을 **염색체설**이라고 한다.
- 이모** 증거가 아니라 닮았다는 것만으로 주장한 거예요?

석 교수 처음에는 그랬다. 결정적인 증거는 몇 년 뒤 초파리 연구에서 나왔다. 특정 형질이 X 염색체의 행동과 정확히 같이 움직인다는 것을 보인 모건의 실험이 그것이고, 7장과 11장에서 다시 만난다. 오늘 기억할 것은, 1장의 확률 규칙과 이 장의 염색체가 서턴의 생각에서 처음 하나로 이어졌다는 점이다.

2.5 세는 연습 — 염색체·염색 분체·쌍

문제 2.1

사람의 체세포가 G_2 기에 있다. 이 세포의 (1) 염색체 수, (2) 염색 분체 수, (3) 상동 염색체 쌍의 수, (4) DNA 분자 수를 구하라.

하린 G_2 기면 복제가 끝났으니 염색체가 두 배, 92개요.

석 교수 방금 표에서 본 함정에 빠졌다. 동원체가 몇 개지?

하린 아, 동원체는 아직 그대로 46개예요. 그러니까 염색체도 46개요. 염색 분체가 각각 2개씩이니 92개고요.

태오 상동 염색체 쌍은 23쌍, DNA 분자는 염색 분체 수랑 같으니까 92개예요.

석 교수 정답이다. (1) 46, (2) 92, (3) 23쌍, (4) 92. 복제는 염색체 수를 바꾸지 않고 염색 분체와 DNA 분자 수를 두 배로 만든다. 이 문장 하나로 이 문제의 함정이 모두 풀린다.

태오 그럼 같은 세포가 체세포 분열 후기로 가면 염색체가 92개가 되는 거죠? 동원체가 갈라졌으니까요.

석 교수 그렇다. 후기에는 동원체가 갈라져 92개의 염색체가 양쪽으로 46개씩 끌려간다. 그리고 세포질이 나뉘면 딸세포 하나에 다시 46개다. 같은 92라는 숫자가 G_2 기에는 염색 분체 수이고 후기에는 염색체 수라는 점, 시험에서는 이 차이를 노린다. 숫자를 쓸 때 “무엇의 개수인가”를 꼭 함께 적어라.

이모 그런데 남자의 X와 Y도 한 쌍으로 세요? 모양이 다르잖아요.

석 교수 좋은 지적이다. X와 Y는 모양과 크기는 다르지만 감수 분열 때 서로 짝을 지어 갈라지는 한 쌍으로 다룬다. 그래서 남자도 23쌍이라고 센다. 다만 X와 Y에 놓인 유전자는 대부분 서로 달라서, X에 있는 유전자의 짝이 Y에는 없는 경우가 많다. 이 사실이 11장 반성 유전의 출발점이다.

문제 2.2

서로 다른 두 종의 세포 $M(2n = 8)$ 과 $N(2n = 10)$ 을 융합해 핵이 하나인 융합 세포를 만들었다. 이 세포에서 상동 염색체는 몇 쌍인가? M과 N의 염색체끼리는 서로 상동이 아니다.

태오 $8 + 10 = 18$ 개니까 9쌍이요.

석 교수 숫자는 맞는데 이유가 중요하다. 18을 2로 나눴다면 운이 좋았던 거야. 만약 M이 $2n = 8$ 이고 N이 $n = 5$, 곧 염색체 5개짜리 생식세포였다면 어떻게 될까?

태오 그럼 13개니까... 2로 나누면 6.5쌍이 돼서 이상해요.

석 교수 그래서 쌍은 종마다 따로 센다. M은 4쌍, N은 5쌍이고, M의 염색체와 N의 염색체는 서로 짝이 아니니 $4 + 5 = 9$ 쌍이다. N이 생식세포였다면 N의 5개는 짝 없이 홀로 있으니 상동 염색체 쌍은 M의 4쌍뿐이다.

하린 그러니까 상동인지 아닌지를 먼저 따지고, 개수는 그다음이네요.

석 교수 맞다. 정답은 9쌍이다. 상동 염색체는 ‘같은 종에서, 같은 유전자 자리를 가진 두 염색체’라는 정의를 떠올리면 실수하지 않는다.

이모 오늘 실패 하나로 정말 많이 배웠네요. 실 = DNA, 실패에 감은 것 = 염색체, 똑같은 실패 두 개 = 상동 염색체.

석 교수 하나만 덧붙이자. 실패 하나에 실을 복사해서 두 줄로 감아 놓은 것이 염색 분체 둘이다. 그 두 줄은 같은 실이고, 짝이 되는 다른 실패의 실은 색이 조금 다를 수 있다. 이 그림을 머리에 넣고 3장으로 가자.

핵심 염색체를 세는 네 가지 규칙

1. DNA가 히스톤에 감겨 뉴클레오솜 → 염색사 → (분열기 응축) 염색체가 된다. 염색사와 염색체는 같은 물질의 다른 응축 상태다.
2. 염색체 수 = 동원체 수. 복제는 염색체 수를 바꾸지 않고 염색 분체 수와 DNA 양을 두 배로 만든다.
3. 염색 분체 둘은 복제로 생긴 쌍둥이(같은 대립유전자), 상동 염색체 둘은 부모에게서 하나씩 온 짝(다른 대립유전자일 수 있음)이다.
4. 사람 $2n = 46 = \text{상염색체 } 44(22\text{쌍}) + \text{성염색체 } 2(\text{XX 또는 XY})$, $n = 23$. 쌍은 같은 종 안에서만 센다.

스스로 풀어 보기

1. DNA가 염색체로 응축되는 과정을 히스톤, 뉴클레오솜, 염색사라는 낱말을 넣어 두 문장으로 설명하라.
2. 초파리($2n = 8$)의 G₁기 세포와 G₂기 세포에서 염색체 수, 염색 분체 수, DNA 분자 수를 각각 구하라.
3. 염색 분체 두 개와 상동 염색체 두 개의 차이를 ‘어디서 왔는가’와 ‘대립유전자가 같은가’로 비교하라.
4. 사람 여자의 체세포와 난자에 들어 있는 상염색체 수와 X 염색체 수를 각각 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 세는 규칙은 4부에서 숫자로 바로 확인된다. **기출문제 15**(부산대 2015) (333쪽)의 2-2는 서로 다른 생물의 세포를 융합한 뒤 상동 염색체가 몇 쌍인지 묻는 문제로, 문제 2.2처럼 ‘쌍은 종마다 센다’는 규칙이 답을 가르킨다. 같은 문항의 2-3은 동원체 수를 세게 하는데, 이 장의 ‘염색체 수 = 동원체 수’ 규칙을 3장의 분열 단계와 함께 쓴다. **기출문제 17**(서울시립대 2012) (353쪽)의 (a)는 감수 2분열 직후 세포와 복제가 끝난 세포의 염색체 수와 DNA양을 비교하게 하며, **표 6**의 줄들을 그대로 맞대면 답이 나온다. **기출문제 5**(연세대 2024) (248쪽)는 염색체 일부가 떨어져 나가거나 다른 염색체로 옮겨 간 경우를 DNA 상대량 그래프로 판별하게 하는데, 상동 염색체와 염색 분체를 정확히 구별해야 그래프의 어느 지점이 이상한지 읽을 수 있다.

이 장의 참고문헌

Luger, K., Mäder, A. W., Richmond, R. K., Sargent, D. F., & Richmond, T. J. (1997). Crystal structure of the nucleosome core particle at 2.8 Å resolution. *Nature*, 389(6648), 251–260. <https://doi.org/10.1038/38444>

- Tjio, J. H., & Levan, A. (1956). The chromosome number of man. *Hereditas*, 42(1-2), 1-6. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1956.tb03010.x>
- Sutton, W. S. (1903). The chromosomes in heredity. *The Biological Bulletin*, 4(5), 231-250. <https://doi.org/10.2307/1535741>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.

제 3장 세포는 어떻게 나뉜다: 체세포 분열과 감수 분열

새 개념 세포 주기 · 감수 1분열과 2분열 · 2가 염색체 · DNA 상대량 그래프

이어짐 분리의 법칙 4장 · 다양성 6장 · 비분리 13장

이 장의 개념도

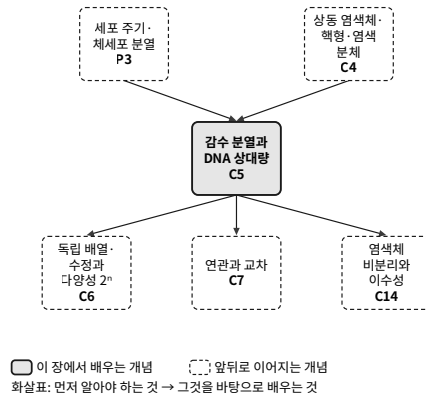


그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C5 감수 분열과 DNA 상대량)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

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 3 (연세대 2024년) (229쪽)	무성 번식의 위험과 근친도	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 5 (연세대 2024년) (248쪽)	DNA 상대량·유전자 수 그래프로 결실·전좌·비분리 추론	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 6 (경북대 2024년) (257쪽)	유성 생식의 장점과 2 ⁴⁶ 까지 조합	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 11 (경희대 2020년) (301쪽)	색맹 클라인펠터 아들의 비분리 경로	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 14 (연세대 2019년) (325쪽)	독립의 법칙을 감수 분열 염색체 행동으로	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 15 (부산대 2015년) (333쪽)	색맹 어머니의 정상 아들과 염색체 세기	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 17 (서울시립대 2012년) (353쪽)	감수 1·2분열 비분리와 다운·XYY	C5 감수 분열과 DNA 상대량
기출 22 (성균관대 2008년) (404쪽)	4쌍의 염색체가 만드는 16가지 생식세포	C5 감수 분열과 DNA 상대량

아무는 무릎 상처와 꽃가루

같은 세포 분열, 다른 결과

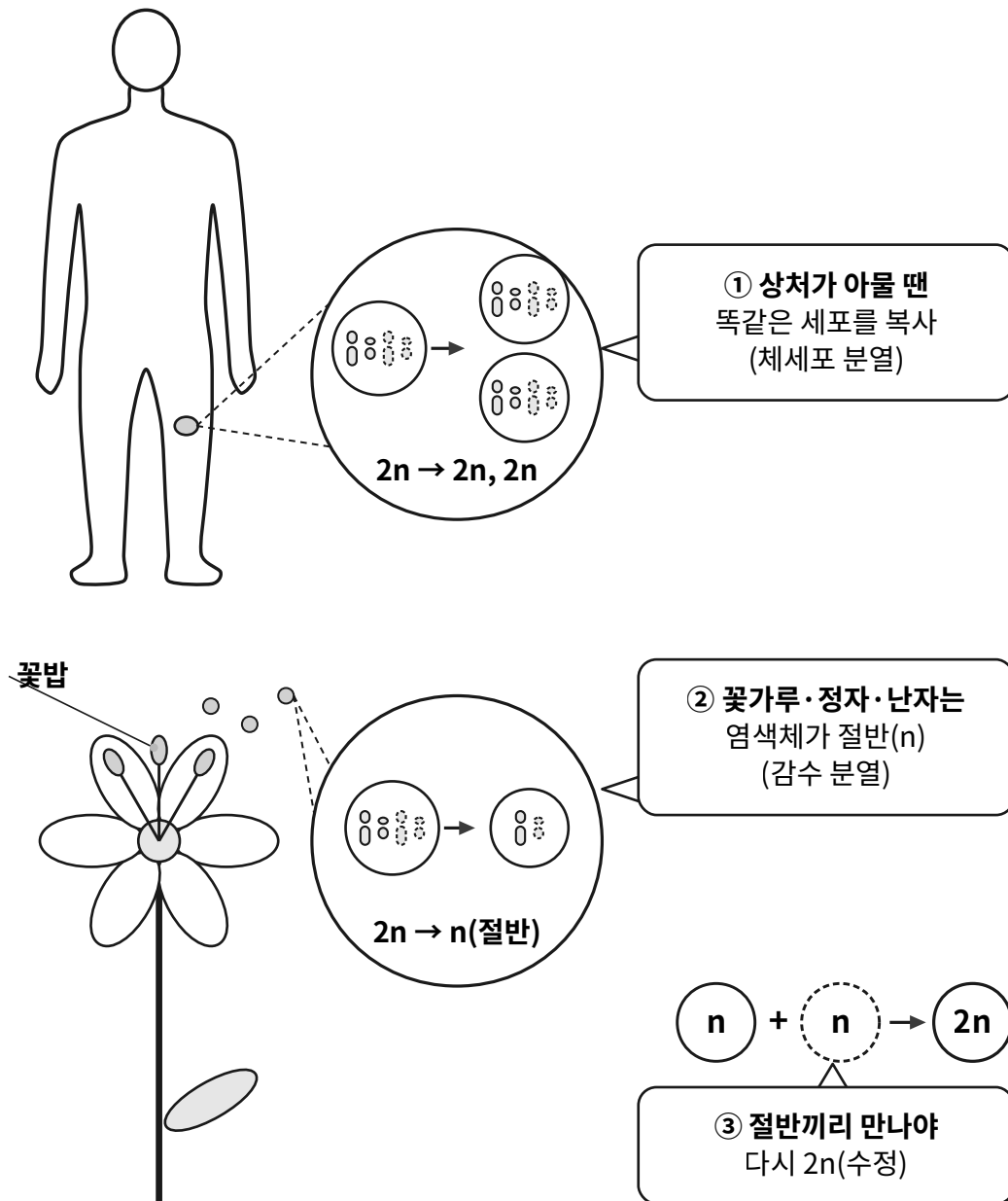


그림 13. 아무는 무릎 상처와 꽃가루 — 상처가 아물 때는 체세포 분열로 똑같은 세포(2n)가 늘어나고, 꽃가루·정자·난자는 감수 분열로 염색체가 절반(n)인 세포가 된다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 상처가 아물 때 피부 세포는 체세포 분열로 염색체 수가 같은 세포를 복사하듯 만든다.
2. 꽃가루·정자·난자 같은 생식세포는 감수 분열로 만들어져 염색체 수가 체세포의 절반이다.
3. 염색체가 절반인 생식세포 둘이 수정으로 만나야 다시 체세포와 같은 2n이 된다.

이 장의 출발점

- 2장의 염색체·염색 분체·동원체, 그리고 ‘염색체 수 = 동원체 수’ 규칙.
- 2장의 상동 염색체: 모양과 크기가 같고 부모에게서 하나씩 온 염색체 쌍.
- 사람 $2n = 46$, $n = 23$. DNA는 복제되면 양이 두 배가 된다는 것.

하린은 지난주 자전거를 타다 넘어져 무릎에 상처가 났다. 딱지가 앉은 무릎을 내려다보던 하린이 물었다. 마당에는 이모가 키우는 백합이 노란 꽃가루를 날리고 있었다.

하린 교수님, 상처가 아무는 건 새 세포가 생겨서죠? 그 세포는 어디서 와요?

석 교수 상처 둘레의 살아 있는 세포가 나뉘어서 생긴다. 세포 하나가 둘이 되고, 둘이 넷이 되면서 빈자리를 채우지. 이때 새로 생긴 세포는 원래 세포와 염색체가 똑같아야 해. 피부 세포가 갑자기 염색체 23개짜리가 되면 곤란하니까.

이모 그럼 저 백합 꽃가루는요? 꽃가루도 세포라면서요.

석 교수 꽃가루 속의 생식세포는 다르게 만들어진다. 염색체 수가 체세포의 절반이야. 오늘은 같은 ‘세포 분열’이라는 이름 아래 전혀 다른 두 과정, 곧 **체세포 분열**과 **감수 분열**을 나란히 놓고 비교한다. 1장에서 남긴 둘째 질문, “왜 부모는 대립유전자 둘 중 하나만 주는가”의 답이 감수 분열 속에 있다.

태오 시험에서는 DNA 상대량 그래프가 꼭 나와요. 그것도 오늘 해요?

석 교수 오늘의 마지막이 바로 그 그래프다. 그래프는 외우는 게 아니라 염색체 그림을 숫자로 바꾼 것이라는 걸 보여 주마.

3.1 세포 주기와 체세포 분열

석 교수 세포가 한 번 나뉘고 나서 다음에 나뉠 때까지를 **세포 주기**라고 한다. 크게 분열을 준비하는 **간기**와 실제로 나뉘는 **분열기(M기)**로 나눈다. 간기는 다시 G_1 기, S기, G_2 기로 나눈다.

하린 G랑 S는 무슨 뜻이에요?

석 교수 G는 gap, 곧 ‘틈’이라는 뜻이고 S는 synthesis, 곧 DNA를 ‘합성’하는 시기라는 뜻이다. G_1 기에 세포가 자라고, S기에 DNA를 복제하고, G_2 기에 분열을 준비한다. 사람 세포를 배양하면 한 주기가 대략 하루쯤 걸리는데, 그중 분열기는 한 시간 남짓이고 나머지 대부분이 간기다.

태오 그럼 2장의 표에서 G_1 기 DNA 상대량이 2, G_2 기가 4였던 건 S기에 복제했기 때문이죠.

석 교수 그렇다. 핵 하나에 든 DNA 양을 G_1 기에 2라고 놓으면, S기를 지나며 2에서 4로 늘고 G_2 기에 4가 된다. 이제 분열기를 보자. 체세포 분열은 핵분열이 전기·중기·후기·말기로 진행된 뒤 세포질이 나뉜다. 핵심 장면은 둘이다. 중기에 복제된 염색체들이 세포 가운데 판, 곧 **적도판**에 한 줄로 늘어서고, 후기에 각 염색체의 두 염색 분체가 갈라져 양쪽 끝으로 끌려간다.

태오 전기와 말기에는 뭐가 일어나요?

- 석 교수** 전기에는 염색사가 응축해 염색체가 보이기 시작하고, 핵막이 사라지며, 세포 양쪽 끝에서 **방추사**라는 단백질 실이 뻗어 나와 동원체에 붙는다. 말기에는 양쪽 끝에 도착한 염색체가 다시 풀려 염색사가 되고 핵막이 다시 생긴다. 그다음 세포질이 나뉜다. 동물 세포는 세포막이 바깥에서 안쪽으로 잘록하게 조여 들어가 나뉘고, 식물 세포는 단단한 세포벽 때문에 조일 수 없어서 가운데에 세포판을 만들어 안에서 바깥쪽으로 칸을 친다.
- 이모** 세포판이라는 건 벽을 새로 쌓는 거네요. 집을 반으로 나눌 때 가운데 칸막이를 세우는 것처럼요.
- 석 교수** 그렇다. 양파 뿌리 끝을 염색해 현미경으로 보면 이 단계들이 한 시야에 섞여 보인다. 그중 간기 세포가 압도적으로 많은데, 세포 주기의 대부분이 간기이기 때문이다. 단계별 세포 수의 비율로 각 단계에 걸리는 시간의 비율을 어림하는 실험이 교과서에 나온다.
- 하린** 두 염색 분체는 같은 쌍둥이었으니까, 양쪽에 똑같은 세트가 가는 거네요.
- 석 교수** 정확하다. 그래서 체세포 분열의 결과는 염색체 수와 유전 정보가 모세포와 똑같은 딸세포 2개다. $2n$ 에서 $2n$ 이 된다. 상처가 아물 때, 아이가 자랄 때, 뿌리 끝이 길어질 때 일어나는 분열이 이것이다.
- 이모** 그럼 DNA 상대량은 4였다가 둘로 나뉘니 다시 2가 되겠네요.
- 석 교수** 그렇다. 체세포 분열은 “ $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ”로 한 바퀴를 돈다. 이 리듬을 기억해 두고 감수 분열로 넘어가자. 감수 분열은 이 리듬에 계단이 하나 더 붙은 모양이다.

3.2 감수 1분열 — 상동 염색체가 갈라진다

- 석 교수** 감수 분열은 생식세포를 만드는 분열이다. 동물에서는 정소와 난소, 식물에서는 꽃밥과 밑씨 속에서 일어난다. DNA 복제는 한 번만 하고 분열은 연달아 두 번 한다. 그래서 염색체 수가 절반이 되지. 두 분열을 차례로 **감수 1분열**, **감수 2분열**이라고 한다. **그림 14**는 $2n = 4$ 인 세포가 감수 분열하는 과정을 그린 것이다. 어머니에게서 온 염색체는 실선, 아버지에게서 온 염색체는 점선으로 구별했다.

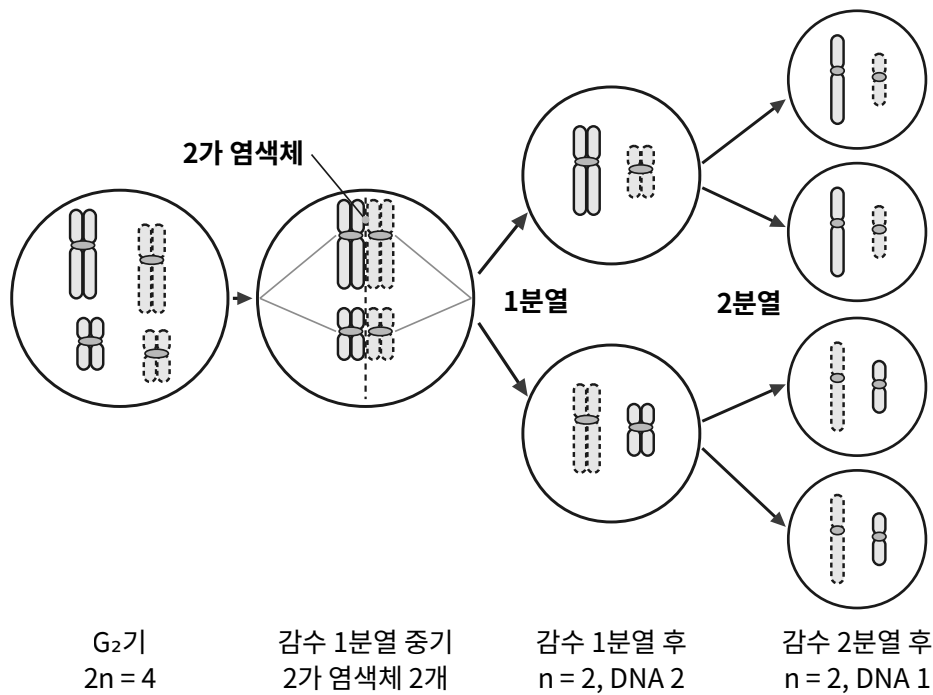


그림 14. $2n=4$ 인 세포의 감수 분열 — G_2 기에 복제된 염색체 4개가 감수 1분열 전기에 상동 염색체끼리 붙어 2가 염색체 2개를 이루고, 중기에 적도판에 늘어선 뒤 상동 염색체가 갈라져 $n=2$ 인 세포 2개가 된다. 감수 2분열에서 염색 분체가 갈라져 $n=2$ 인 세포 4개가 된다(실선 = 어머니에게서, 점선 = 아버지에게서 온 염색체, 모식도)

태오 감수 1분열 전기에 긴 염색체 두 개가 딱 붙어 있네요. 짧은 것끼리도요.

석 교수 그게 체세포 분열에 없는 장면이다. 감수 1분열 전기에 상동 염색체끼리 나란히 붙는 것을 **접합**이라 하고, 붙은 한 덩어리를 **2가 염색체**라 한다. 복제된 염색체 두 개가 붙었으니 염색 분체가 네 개라서 4분 염색체라고도 부른다.

하린 왜 붙어요? 체세포 분열에서는 안 붙었잖아요.

석 교수 짝을 확인하고 정확히 갈라 보내기 위해서다. 중기에 2가 염색체는 짝을 이룬 채로 적도판에 늘어선고, 후기에는 붙어 있던 상동 염색체가 서로 반대쪽으로 끌려간다. 이때 염색 분체는 갈라지지 않는다. 이것이 체세포 분열 후기와 가장 크게 다른 점이야.

이모 그럼 감수 1분열이 끝난 세포에는 긴 것 하나, 짧은 것 하나만 있겠네요.

석 교수 그렇다. 상동 염색체 쌍마다 하나씩만 들어가니 염색체 수가 4에서 2로, 곧 $2n$ 에서 n 으로 줄었다. 다만 각 염색체는 아직 염색 분체 두 개를 가진 복제된 상태라 DNA 상대량은 2다. 염색체 수가 실제로 절반이 되는 곳은 감수 1분열이라는 점을 꼭 기억해라.

태오 그럼 1장의 “부모가 둘 중 하나만 준다”가 바로 여기서 일어나는 거네요. Aa인 사람의 A가 있는 염색체와 a가 있는 염색체가 감수 1분열에서 갈라지니까요.

석 교수 그게 오늘의 가장 중요한 연결이다. 멘델이 숫자로 추론한 ‘대립유전자의 분리’는 감수 1분열의 ‘상동 염색체의 분리’다. 4장에서 이 문장을 법칙의 이름으로 다시 만난다.

하린 그런데 붙어 있는 동안 서로 조각을 바꾸기도 한다던데요?

석 교수 맞다. 2가 염색체 상태에서 상동 염색체의 염색 분체끼리 일부를 맞바꾸는 일이 일어날 수 있다. 이것을 **교차**라고 한다. 6장과 7장의 주제이니 오늘은 이름만 기억하자. 그림에서는 교차를 그리지 않았다.

3.3 감수 2분열 — 염색 분체가 갈라진다

- 석 교수** 감수 1분열이 끝나면 DNA 복제 없이 곧바로 감수 2분열로 들어간다. 감수 2분열은 체세포 분열과 꼭 같은 방식이다. 염색체들이 적도판에 한 줄로 늘어서고, 각 염색체의 염색 분체가 갈라져 양쪽으로 간다.
- 하린** 염색 분체가 갈라지면 염색체 수는 그대로예요?
- 석 교수** 세포 하나를 놓고 보면 그대로다. $n = 2$ 인 세포가 갈라져 $n = 2$ 인 세포 두 개가 된다. 바뀌는 건 DNA 양이야. 염색 분체 두 개짜리 염색체가 하나짜리가 되니 DNA 상대량이 2에서 1로 준다. 결국 모세포 하나에서 n 인 세포 4개가 생기고, 각각의 DNA 상대량은 1이다.
- 태오** 그러니까 감수 1분열은 염색체 수를 반으로, 감수 2분열은 DNA 양을 반으로 만드는 거네요.
- 석 교수** 아주 좋은 요약이다. 감수 1분열: $2n \rightarrow n$, 상동 염색체 분리. 감수 2분열: $n \rightarrow n$, 염색 분체 분리. 이 두 줄을 13장의 비분리에서 그대로 쓴다. 상동 염색체가 안 갈라지면 감수 1분열 비분리, 염색 분체가 안 갈라지면 감수 2분열 비분리다.
- 하린** 그런데 왜 꼭 절반을 만들어야 해요? 그냥 체세포 분열로 정자와 난자를 만들면 안 돼요?
- 석 교수** 계산해 보면 바로 안다. 정자와 난자가 둘 다 46개짜리라면 수정란은 몇 개를 가지지?
- 하린** $46 + 46 = 92$ 개요. 그다음 세대는 184개, 그다음은 368개... 세대마다 두 배가 돼요.
- 석 교수** 그렇다. 열 세대만 지나도 $46 \times 2^{10} = 47,104$ 개가 된다. 감수 분열이 염색체 수를 절반으로 줄여 두기 때문에 수정으로 합쳐도 46개가 유지된다. 감수 분열과 수정은 한 짝이야. 하나는 반으로 나누고, 하나는 다시 합친다. 그래서 종마다 염색체 수가 세대를 거듭해도 일정하게 유지된다.
- 태오** 그럼 절반으로 줄일 때 아무 23개나 고르면 안 되겠네요. 1번이 두 개 들어가고 2번이 없으면 곤란하니까요.
- 석 교수** 바로 그래서 상동 염색체끼리 먼저 짝을 짓는 거다. 짝을 지어 놓고 쌍마다 하나씩 갈라 보내면 어느 딸세포에나 1번부터 23번까지 한 벌이 빠짐없이 들어간다. 2가 염색체는 ‘정확히 한 벌씩 나누기’를 위한 장치라고 보면 된다. 이 장치가 고장 나 쌍이 갈라지지 않는 경우가 13장의 비분리다.
- 이모** 사람 몸에서는 정자랑 난자가 똑같이 네 개씩 생겨요?
- 석 교수** 정자는 그렇다. 정소에서는 감수 분열로 생긴 4개가 모두 정자가 된다. 난자는 다르다. 세포질이 한쪽으로 크게 몰리면서 큰 세포 하나만 난자가 되고 나머지 작은 세포들, 곧 극체는 퇴화한다. 수정 뒤 배아가 쓸 영양분을 한 세포에 모아 두는 방식이지. 염색체가 나뉘는 규칙은 같다.

3.4 DNA 상대량 그래프 읽기

- 석 교수** 이제 그래프다. 그림 15의 위는 체세포 분열, 아래는 감수 분열에서 핵 1개당 DNA 상대량이 어떻게 변하는지 그린 것이다.

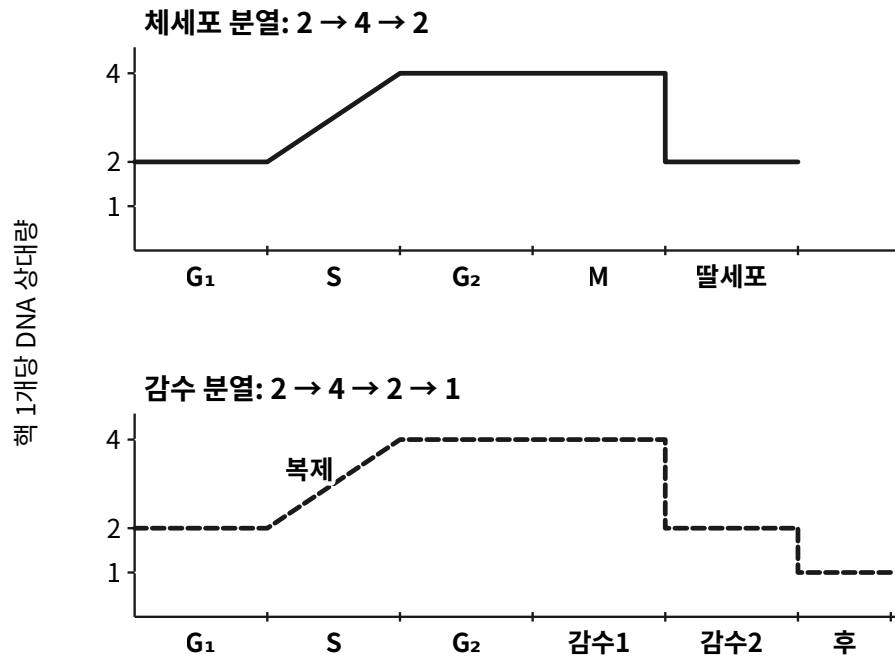


그림 15. 핵 1개당 DNA 상대량의 변화(G_1 기 = 2) — 체세포 분열은 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, 감수 분열은 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 로 바뀐다. S기에 복제로 늘고, 분열이 끝날 때마다 계단처럼 줄어든다(모식 그래프)

하린 S기에서는 비스듬히 올라가고, 분열이 끝날 때는 똑 떨어지네요.

석 교수 복제는 몇 시간에 걸쳐 조금씩 일어나니 비스듬하게, 분열은 핵이 둘로 갈라지는 순간 반으로 나뉘니 계단처럼 그린다. 여기서 중요한 낱말이 ‘핵 1개당’이야. 세포 하나에 핵이 둘 생긴 순간부터는 핵 하나씩 세니까 값이 반이 되는 거다.

태오 그럼 ‘세포 1개당’으로 그리면 달라져요?

석 교수 핵분열이 끝났는데 아직 세포질이 안 나뉜 짧은 순간에는 다르다. 그래서 시험 문제는 반드시 “핵 1개당” 또는 “세포 1개당”을 밝힌다. 그 낱말부터 동그라미 치고 그래프를 읽으라.

하린 감수 1분열과 2분열 사이에는 비스듬한 오르막이 없네요.

석 교수 잘 봤다. 두 분열 사이에는 S기가 없다. 그래서 2에서 곧바로 1로 내려간다. 그래프에서 오르막이 몇 번 나오는지 세어 보면 복제가 몇 번 일어났는지 알 수 있고, 내리막이 몇 번인지 세면 분열이 몇 번인지 알 수 있다. 오르막 한 번에 내리막 한 번이면 체세포 분열, 오르막 한 번에 내리막 두 번이면 감수 분열이다. 오르막 없이 2에서 1로 내려가는 구간을 보고 “감수 2분열 앞에도 복제가 있다”고 쓰는 답안은 그래프를 거꾸로 읽은 것이다.

문제 3.1

$2n = 4$ 인 동물의 생식 기관에서 감수 분열하는 세포를 관찰했다. G_1 기 세포의 핵 1개당 DNA 상대량을 2라 할 때 (1) G_2 기, (2) 감수 1분열이 끝난 직후, (3) 감수 2분열이 끝난 직후 세포의 DNA 상대량과 염색체 수를 각각 구하라.

하린 G_2 기는 복제가 끝났으니 DNA 상대량 4, 염색체는 동원체 수대로 4개예요.

태오 감수 1분열 직후는 상동 염색체가 갈라졌으니 염색체 2개, DNA 상대량은 4의 반이니까 2요.

이모 감수 2분열 직후는 염색 분체가 갈라졌으니 DNA 상대량 1이고, 염색체는... 2개요?

석 교수 셋 다 정답이다. (1) DNA 4, 염색체 4, (2) DNA 2, 염색체 2, (3) DNA 1, 염색체 2. 그런데 (2)와 (3)은 염색체 수가 같고 DNA 양만 다르다는 점을 눈여겨봐라. 그래서 염색체 수만 보고 감수 1분열 후와 2분열 후를 구별할 수는 없다. DNA 양이나 염색 분체가 있는지를 함께 봐야 한다.

태오 그럼 G₁기 세포와 감수 1분열 직후 세포는 DNA 상대량이 둘 다 2인데요?

석 교수 좋은 함정 찾기다. 둘은 DNA 양이 같지만 염색체 수가 4와 2로 다르다. 앞의 세포는 상동 염색체를 쌍으로 가진 2n이고, 뒤의 세포는 쌍마다 하나만 가진 n이지만 각 염색체가 복제된 상태라서 양이 같아진 거야. DNA 양만 보고도 구별할 수 없다. 그래서 논술 답안에서는 두 지표를 함께 쓴다.

3.5 체세포 분열과 감수 분열 비교, 그리고 동원체 세기

석 교수 지금까지를 표 8로 정리하자.

표 8. 체세포 분열과 감수 분열의 비교

구분	체세포 분열	감수 분열
분열 횟수	1회	연속 2회(DNA 복제는 1회)
2가 염색체	만들지 않는다	감수 1분열 전기에 만든다(교차 가능)
갈라지는 것	염색 분체	1분열: 상동 염색체, 2분열: 염색 분체
딸세포 수	2개	4개
염색체 수 변화	$2n \rightarrow 2n$	$2n \rightarrow n$
DNA 상대량	$2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$	$2 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$
딸세포의 유전 정보	모세포와 같다	서로 다를 수 있다
일어나는 곳	몸 곳곳(생장·재생)	생식 기관(생식세포 형성)

석 교수 마지막으로 동원체 세기다. 방추사는 동원체에 붙어서 염색체를 끌어당긴다. 그러니 방추사가 붙은 동원체 수를 세면 끌려가는 염색체 수를 알 수 있다. 그림 16를 보자.

실선 = 어머니에게서, 점선 = 아버지에게서 온 염색체

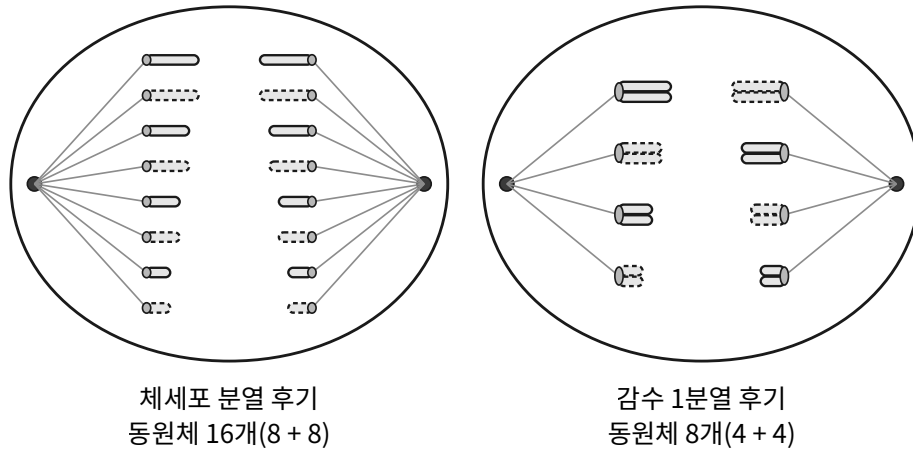


그림 16. 후기의 동원체 세기($2n = 8$) — 체세포 분열 후기에는 염색 분체가 갈라져 염색체 16개(동원체 16개)가 양쪽으로 8개씩 끌려가고, 감수 1분열 후기에는 복제된 염색체 8개(동원체 8개)가 상동 염색체끼리 갈라져 양쪽으로 4개씩 끌려간다(모식도)

문제 3.2

$2n = 8$ 인 세포에서 (1) 체세포 분열 후기 세포 하나에 있는 동원체 수와 (2) 감수 1분열 후기 세포 하나에서 방추사가 붙은 동원체 수를 구하고, 둘의 합을 구하라.

태오 체세포 분열 후기는 염색 분체가 다 갈라졌으니 $8 \times 2 = 16$ 개. 감수 1분열 후기도 같은 원리로 16개, 합이 32개요.

석 교수 (1)은 맞다. 그런데 (2)에서 감수 1분열 후기에 갈라지는 게 뭐였지?

태오 아, 상동 염색체요. 염색 분체는 붙어 있으니 동원체가 아직 갈라지지 않았어요. 그럼 동원체는 염색체 수대로 8개예요.

석 교수 맞다. 정답은 (1) 16, (2) 8, 합 24다. 그림에서 오른쪽 세포의 염색체는 X자 모양 그대로 끌려가고 있지. 감수 1분열 후기의 염색체를 체세포 분열 후기처럼 막대 하나로 그리는 실수가 답안 그림에서 자주 나온다.

이모 시험에는 세포 그림만 하나 주고 어느 단계냐고 묻는 문제도 나오겠네요.

석 교수 자주 나온다. 연습해 보자. 어떤 세포에 X자 모양 염색체 3개가 적도판에 한 줄로 서 있고, 셋의 모양과 크기가 모두 다르다. 이 생물의 체세포 염색체 수는 6이다. 어느 단계일까?

태오 모양이 다 다르니 상동 염색체 쌍이 없어요. 그러면 n 이고, 복제된 염색체가 적도판에 서 있으니 감수 2분열 중기예요.

석 교수 맞다. 그럼 같은 생물에서 X자 6개가 짝을 지어 두 개씩 붙은 채 적도판에 서 있다면?

하린 짝을 지어 붙어 있는 건 2가 염색체니까 감수 1분열 중기요.

석 교수 그렇다. 마지막으로 X자 6개가 짝 없이 한 줄로 따로따로 서 있다면?

이모 상동 염색체가 다 들어 있는데 붙지는 않았으니... 체세포 분열 중기요.

석 교수 셋 다 정답이다. 판별의 순서는 언제나 같다. 상동 염색체 쌍이 있는가, 그 쌍이 붙어 있는가, 염색체가 복제된 상태인가. 이 세 질문에 답하면 대부분의 세포 그림은 판별된다. 아래 핵심 상자에 이 순서를 적어 두었다.

하린 오늘 배운 걸 한 문장으로 하면, 체세포 분열은 복사, 감수 분열은 절반 만들기네요.

석 교수 그리고 그 절반이 둘 만나 다시 $2n$ 이 되는 게 수정이다. 하린이 무릎의 새 살은 복사로, 하린이 자신은 절반 둘의 만남으로 생겼다.

태오 그럼 저와 하린이가 서로 다른 것도 감수 분열 때문이에요? 같은 엄마 아빠의 절반을 받았는데요.

석 교수 그렇다. 엄마의 23쌍이 감수 1분열에서 갈라질 때 쌍마다 어느 쪽이 어느 세포로 갈지가 따로 정해진다. 그래서 엄마가 만드는 난자마다 들어 있는 한 벌의 조합이 다르다. 그 조합이 몇 가지나 되는지는 6장에서 계산하자. 답은 수백만 가지다.

핵심 분열 단계를 판별하는 네 가지 질문

1. 2가 염색체(상동 염색체가 붙은 덩어리)가 보이는가? 보이면 감수 1분열 전기~중기다.
2. 후기에 갈라지는 것이 상동 염색체인가, 염색 분체인가? 상동 염색체면 감수 1분열, 염색 분체면 체세포 분열 또는 감수 2분열이다.
3. 세포 안에 상동 염색체 쌍이 있는가? 있으면 $2n$ (체세포 분열 또는 감수 1분열 전), 없으면 n (감수 1분열 후)이다.
4. DNA 상대량(핵 1개당, $G_1 = 2$)과 염색체 수를 함께 적는다: 체세포 분열 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, 감수 분열 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. 염색체 수 = 동원체 수.

스스로 풀어 보기

1. 사람의 감수 1분열 중기 세포에 있는 2가 염색체 수와 염색 분체 수를 구하라.
2. 체세포 분열 중기 세포와 감수 2분열 중기 세포를 $2n = 6$ 인 생물에서 비교할 때, 염색체 수와 DNA 상대량($G_1 = 2$)을 각각 쓰라.
3. 감수 1분열에서 염색체 수가 절반이 되는 까닭을 상동 염색체라는 낱말을 넣어 한 문장으로 설명하라.
4. $2n = 10$ 인 세포의 감수 2분열 후기 세포 하나에서 동원체 수를 구하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 분열 단계 판별은 4부의 여러 기출에서 바로 쓰인다. **기출문제 5**(연세대 2024) (248쪽)는 감수 분열 중 DNA 상대량 그래프가 정상과 다르게 변하는 까닭을 묻는데, $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 이라는 정상 리듬을 정확히 알아야 어긋난 지점을 짚을 수 있다. **기출문제 17**(서울시립대 2012) (353쪽)의 (a)는 감수 2분열 직후 세포와 S기를 마친 세포의 염색체 수와 DNA양을 비교하게 하는 문제로, 문제 3.1의 표를 그대로 쓴다. **기출문제 15**(부산대 2015) (333쪽)의 2-3은 문제 3.2처럼 체세포 분열 후기와 감수 1분열 후기의 동원체를 세게 하고, **기출문제 14**(연세대 2019) (325쪽)는 감수 1분열에서 상동 염색체가 갈라지는 방식으로 멘델의 독립의 법칙을 설명하게 한다. 그 설명은 5장에서 이어진다.

이 장의 참고문헌

Page, S. L., & Hawley, R. S. (2003). Chromosome choreography: The meiotic ballet. Science, 301(5634), 785–789. <https://doi.org/10.1126/science.1086605>

- Sutton, W. S. (1903). The chromosomes in heredity. *The Biological Bulletin*, 4(5), 231–250. <https://doi.org/10.2307/1535741>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.

제 4장 멘델의 완두: 우열과 분리의 법칙

새 개념 순종과 잡종 · 우열의 원리 · 분리의 법칙 · 퍼넷 사각형 · 검정 교배

이어짐 감수 분열 3장 · 독립 5장 · 가계도 12장

이 장의 개념도

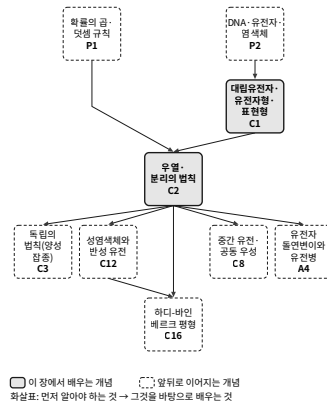


그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C1 대립유전자·유전자형·표현형, C2 우열·분리의 법칙)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 1 (연세대 2025년) (213쪽)	부리 크기 생존 수로 3쌍 다인자 유전 추론	C2 우열·분리의 법칙
기출 2 (경북대 2025년) (222쪽)	두 쌍 다인자 눈색의 표현형 수와 확률	C1 대립유전자·유전자형·표현형
기출 4 (연세대 2024년) (239쪽)	무게 분리비 3 : 6 : 4 : 2 : 1과 두 유전자	C2 우열·분리의 법칙
기출 7 (경북대 2024년) (265쪽)	D 질환 가계도와 ABO식 혈액형 판별	C2 우열·분리의 법칙
기출 10 (경희대 2023년) (292쪽)	두 유전병 가계도 — X 연관 우성과 상염색체 열성	C2 우열·분리의 법칙
기출 12 (경희대 2020년) (310쪽)	적록 색맹 가족 7명의 유전자형 결정	C2 우열·분리의 법칙
기출 13 (연세대 2019년) (318쪽)	멘델이 필요로 한 가정 — 분리의 법칙	C2 우열·분리의 법칙; C1 대립유전자·유전자형·표현형
기출 18 (성균관대 2010년) (365쪽)	털 길이 유전자의 염색체 찾기	C2 우열·분리의 법칙
기출 19 (성균관대 2009년) (375쪽)	cis-AB/O 혈액형과 ABO·Rh의 독립 유전	C2 우열·분리의 법칙
기출 21 (성균관대 2008년) (394쪽)	페닐케톤뇨증 집단의 보인자 비율과 치사 열성의 감소	C2 우열·분리의 법칙

찰옥수수 한 자루

보라 알 잡종끼리 교배해 얻은 F₂ 자루

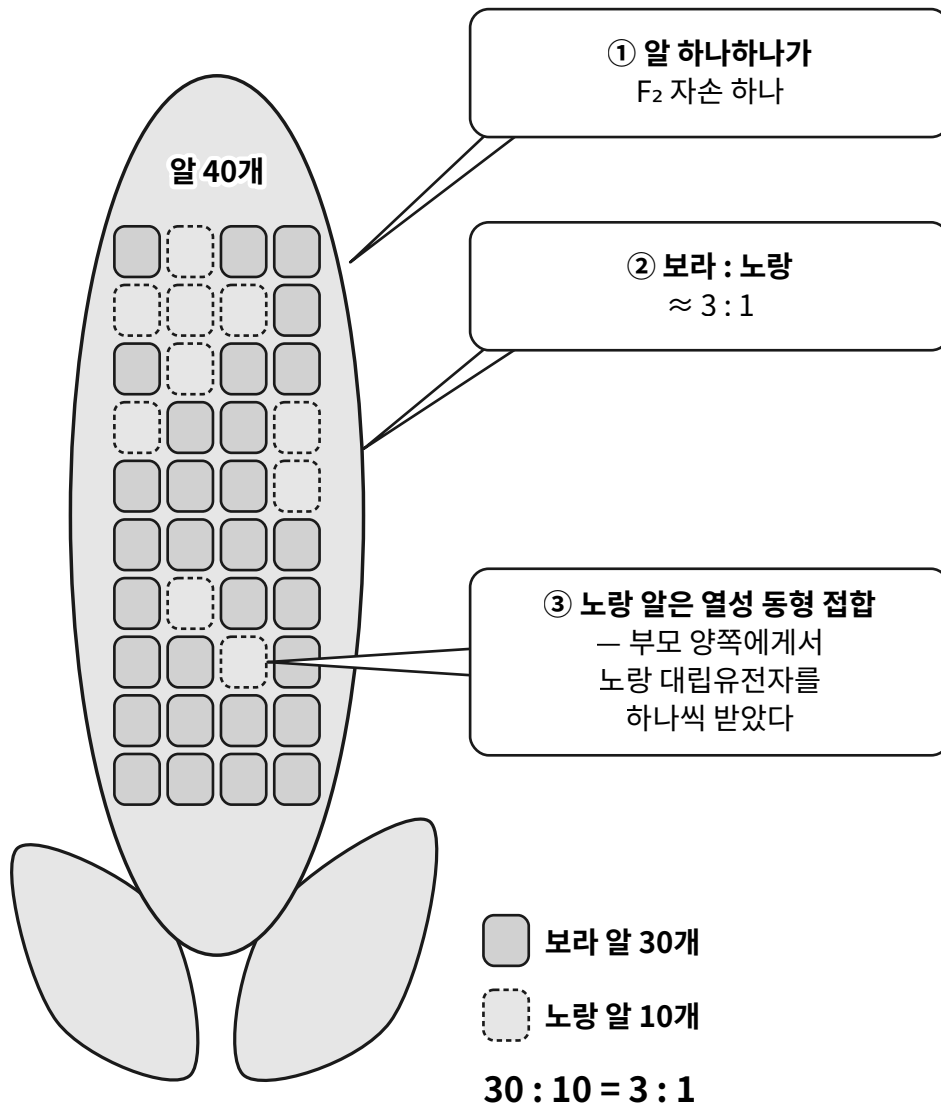


그림 18. 찰옥수수 한 자루의 보라 알과 노랑 알 — 보라 알 잡종끼리 교배해 얻은 자루에는 보라 알과 노랑 알이 약 3 : 1로 섞여 박힌다(모식도, 알 40개 중 보라 30개·노랑 10개로 그림)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 옥수수 알 하나하나가 F₂ 자손 하나이다.
2. 한 자루의 보라 알과 노랑 알은 약 3 : 1로 나타난다.
3. 노랑 알은 열성 동형 접합으로, 부모 양쪽에게서 모두 노랑 대립유전자를 받았다.

이 장의 출발점

- 1장의 대립유전자·유전자형·표현형, 그리고 확률의 곱(독립)과 덧셈(배타).
- 2장의 상동 염색체: 같은 유전자 자리에 대립유전자가 하나씩 놓인다.
- 3장의 감수 1분열: 상동 염색체가 갈라져 생식세포에는 쌍마다 하나씩 들어간다.

이모가 강원도에서 찰옥수수 한 자루를 사 왔다. 썰 놓은 옥수수를 집어 든 하린이 알을 하나씩 떼어 먹다가 손을 멈췄다. 보라 알 사이에 노랑 알이 군데군데 박혀 있었다.

하린 교수님, 이 옥수수는 왜 알 색이 섞여 있어요? 한 자루면 한 식물에서 나온 거잖아요.

석 교수 오늘 공부를 이 옥수수가 다 해 줄 것 같다. 알 하나 하나는 서로 다른 꽃가루를 받아 생긴 씨앗이야. 그러니 한 자루에 박힌 알 수백 개는 같은 어미에게서 난 형제 수백 명이다. 몇 개인지 세어 볼래?

하린 이 줄만 세 볼게요. 보라가 30개, 노랑이 10개예요.

태오 3 : 1이네요. 1장에서 본 보라 꽃 705 : 흰 꽃 224랑 같은 비예요.

석 교수 그 3 : 1이 왜 나오는지 오늘 끝까지 따라가 보자. 그리고 이 숫자가 단지 우연이 아니라는 것도 확인하자. 멘델이 150여 년 전에 완두로 했던 실험을, 우리는 3장의 감수 분열을 이미 알고서 다시 읽는다. 멘델은 몰랐던 염색체를 우리는 알고 있으니, 그의 가정이 왜 맞았는지 확인할 수 있다.

4.1 왜 하필 완두였나

석 교수 멘델은 지금의 체코 브르노에 있던 수도원의 수도사였다. 1856년부터 8년 가까이 완두 수만 그루를 교배하고 썼다. 완두를 고른 데는 이유가 있다.

이모 그냥 수도원 마당에 있어서 아닐까요?

석 교수 그것도 하나지만 과학적인 이유가 셋 있다. 첫째, 완두는 꽃잎이 암술과 수술을 감싸고 있어 저절로 **자가 수분**한다. 그래서 여러 세대 동안 같은 형질만 내는 **순종**을 쉽게 얻는다. 둘째, 사람이 수술을 미리 따 내고 다른 꽃의 꽃가루를 붓으로 묻히면 원하는 짝끼리 교배, 곧 **타가 수분**을 시킬 수 있다. 셋째, 대립 형질이 뚜렷해서 세기 쉽고, 한 세대가 짧아 해마다 결과를 볼 수 있다.

태오 순종이 왜 중요해요?

석 교수 출발점을 확실히 하기 위해서다. 둥근 씨 순종은 자가 수분을 몇 세대 거듭해도 둥근 씨만 낸다. 이런 계통을 부모(P)로 써야 자손에서 나타나는 변화가 교배 때문이라고 말할 수 있다. 실험에서 변인을 통제하는 것과 같은 생각이야. 반대로 서로 다른 형질의 순종끼리 교배해 얻은 자손을 **잡종**이라고 한다.

하린 멘델은 몇 가지 형질을 봤어요?

석 교수 일곱 가지다. 각각 대립 형질이 두 가지로 뚜렷한 것만 골랐다. 표 10에 멘델의 1866년 논문에 실린 F₂ 숫자를 옮겼다.

표 10. 멘델의 일곱 형질과 F₂의 실제 수 — 우성 형질 수 : 열성 형질 수와 그 비(Mendel, 1866)

형질	우성 형질	열성 형질	F ₂ 우성 : 열성	비
씨 모양	둥근	주름진	5,474 : 1,850	2.96 : 1

유전 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

감수 분열에서 갈라진 대립유전자가 확률의 곱으로 다시 만난다

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 22문항(2008~2025학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 17문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 유전인가: 닳음과 다름의 규칙
2. 유전자는 어디에 있나: 염색체와 핵형
3. 세포는 어떻게 나뉘나: 체세포 분열과 감수 분열
4. 멘델의 완두: 우열과 분리의 법칙
5. 두 형질을 함께 보면: 독립의 법칙
6. 감수 분열이 만드는 다양성
7. 함께 다니는 유전자: 연관과 교차

8. 우열이 분명하지 않을 때: 중간 유전과 ABO식 혈액형
9. 유전자가 유전자를 가릴 때: 상위
10. 여러 유전자가 하나의 형질을: 다인자 유전
11. X 염색체 위의 유전자: 성염색체와 반성 유전
12. 가계도 읽기: 우열·위치·확률
13. 염색체가 잘못 나뉠 때: 비분리와 구조 이상
14. 집단 속의 유전자와 유전병, 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: 세포와 세포 분열 · DNA와 유전자 발현 · 생명공학 · 진화와 생물 다양성



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 979-11-23065-02-1

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도 — 전체 430쪽

ssbook.kr/book/nonsul-03

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

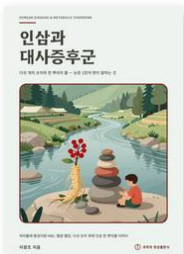
인삼 (6)



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

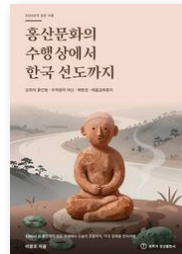
독립영양인간 (2)



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