



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역

대학 기출로 완성하는 분자생물학의 중심원리

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-01

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

유전 암호· 전사·번역



유전 암호 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 12문항 · 2011~2024학년도

이광조 지음

MASTER

논술 생물

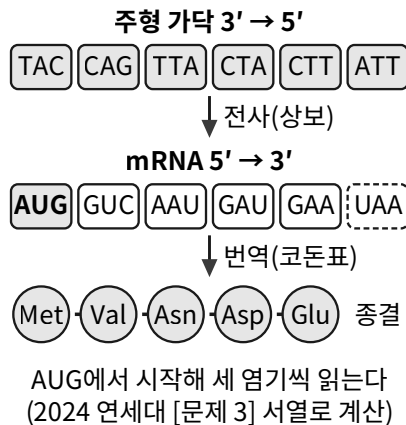
유전 암호·전사·번역

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

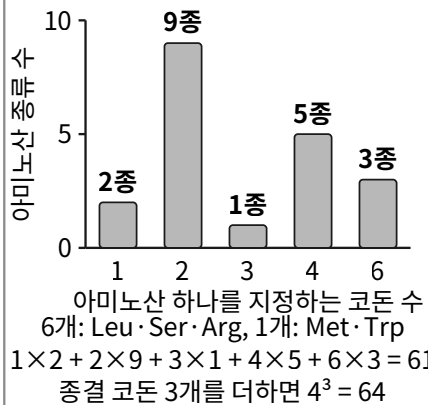
유전 암호 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 주형 가닥 → mRNA(5'→3') × 코돈표 × 돌연변이의 결과 | 12문항 · 6개 대학 (2011~2024)

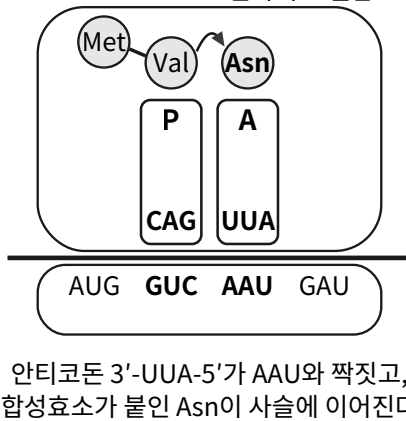
① 주형 가닥에서 단백질까지



② 61개 코돈, 20종 아미노산



③ 리보솜에서 코돈과 안티코돈 → 펩타이드 결합



④ 한 글자가 바뀌면

정상	Met Val Asn Asp Glu
침묵	Met Val Asn Asp Glu GUC→GUU
미스센스	Met Val Lys Asp Glu AAU→AAA
넌센스	Met Val Asn Asp 종결 GAA→UAA
틀이동	Met Ser Gln 종결 A 삽입 치환은 한 자리를, 삽입·결실은 그 뒤 읽기 틀 전체를 바꾼다

한 줄 요약: 주형 가닥을 상보로 바꾸고, 5'→3'로 AUG부터 세 글자씩 읽는다

그림 1. 유전 암호·전사·번역 단원의 그림 요약. ① 주형 가닥을 전사해 mRNA를 만들고 AUG부터 세 염기씩 읽어 아미노산 서열을 얻는다(2024 연세대 기출 서열로 계산). ② 61개 코돈이 20종 아미노산을 지정하는 축퇴성 — 아미노산별 코돈 수. ③ 리보솜의 신장 단계 — 안티코돈이 코돈과 상보적으로 짝짓고, 아미노아실-tRNA 합성효소가 붙인 아미노산이 사슬에 이어진다. ④ 돌연변이의 네 유형 — 같은 서열에 치환·삽입을 넣어 번역한 결과. 모든 서열과 코돈 수는 표준 유전 암호표로 계산했다.

한 줄 요약: 유전 암호 = 주형 가닥을 상보로 바꾸고, 5'→3'로 AUG부터 세 글자씩 읽어, 코돈표로 옮긴다

연결 단원 → 유전자 발현 조절 · DNA 구조·복제 · 멘델 유전 · 효소 · 면역·백신 · 생명 공학

이광조 · v1

기본개념편	12
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	13
기본개념편을 열며	15
제 1장 왜 유전 암호인가	17
1.1 같은 DNA, 다른 세포 — 정보와 일꾼	19
1.2 DNA → RNA → 단백질: 중심 원리	20
1.3 네 글자로 얼마나 많은 것을 적을 수 있나	22
1.4 이 책의 길, 기출이 묻는 것	24
제 2장 유전자 하나, 효소 하나	26
2.1 가로드의 ‘선천성 대사 이상’	28
2.2 비들과 테이텀의 붉은땀곰팡이 실험	29
2.3 첨가 실험으로 경로 순서 정하기	31
2.4 1유전자 1효소에서 1유전자 1폴리펩타이드로	33
제 3장 DNA와 RNA: 두 가닥과 한 가닥	36
3.1 뉴클레오타이드의 세 부분	38
3.2 방향이 있는 사슬: 5' 끝과 3' 끝	39
3.3 한 가닥 RNA는 스스로 접힌다	41
3.4 RNA의 세 종류	43
제 4장 전사: 유전자를 RNA로 베끼기	45
4.1 두 가닥 중 하나만 베낀다: 주형 가닥과 암호 가닥	47
4.2 RNA 중합효소와 프로모터: 어디서 시작하고 어디서 멈추나	48
4.3 새 RNA는 5' → 3'로만 자란다	49
4.4 전사의 속도와 양	51
4.5 전사가 안 되면: 프로모터가 고장 난 유전자	52
제 5장 진핵세포의 RNA 가공: 인트론을 잘라 내다	54
5.1 원핵과 진핵: 핵막이 만든 차이	56
5.2 유전자 속의 끊어진 문장: 엑손과 인트론	57
5.3 5' 캡과 폴리 A 꼬리	59
5.4 사람 유전자를 대장균에 넣으면	60
제 6장 세 글자 암호: 트리플렛과 읽기 틀	63
6.1 왜 세 글자인가	65
6.2 겹치지 않고 띄어 쓰지 않는다	66
6.3 크릭과 브레너의 틀이동 실험	68
6.4 읽기 틀을 정하는 것: 개시 코돈	70
제 7장 암호를 풀다: 폴리U에서 코돈표까지	72
7.1 니런버그와 마태이: 시험관 속의 번역	74
7.2 반복 서열로 좁히기	76
7.3 니런버그와 레더: 삼중 염기 결합 실험	78
7.4 논리로 맞추기: 여러 실험의 공통 코돈	79
제 8장 코돈표 읽기와 축퇴성	81
8.1 코돈표 읽는 법: 행, 열, 칸	83
8.2 개시 코돈 AUG와 종결 코돈 셋	85
8.3 축퇴성: 61개가 20종을	85

8.4 셋째 자리는 왜 덜 위험한가	87
8.5 거꾸로 세기: 아미노산 서열에서 mRNA의 수	89
제 9장 주형 가닥에서 아미노산 서열까지	92
9.1 세 가닥의 관계	94
9.2 방향 맞추기	96
9.3 개시 코돈 찾기와 읽기 틀 고정	97
9.4 흔한 실수 네 가지	98
제 10장 tRNA와 아미노아실-tRNA 합성효소	102
10.1 tRNA: 한쪽은 안티코돈, 다른 쪽은 아미노산	104
10.2 아미노아실-tRNA 합성효소: 진짜 번역가	106
10.3 리보솜은 tRNA만 본다: 샤프빌 실험	107
10.4 흔들림 짝짓기: tRNA가 61종보다 적은 까닭	109
제 11장 리보솜의 번역: 개시·신장·종결	112
11.1 리보솜: 두 단위체와 세 자리	114
11.2 개시: AUG에 첫 tRNA가 앉는다	115
11.3 신장: 결합하고, 잇고, 옮긴다	115
11.4 종결: tRNA 대신 방출 인자	117
11.5 한 mRNA에 여러 리보솜: 폴리솜과 번역 속도	118
제 12장 유전자 돌연변이: 한 글자가 바뀌면	122
12.1 염기 치환: 침묵·미스센스·넌센스	124
12.2 삽입·결실과 틀이동, 그리고 유전자 밖의 돌연변이	126
12.3 염색체 구조 이상: 결실·중복·역위·전좌	127
12.4 억제 tRNA: 넌센스를 다시 읽는 또 하나의 돌연변이	128
12.5 돌연변이는 언제 생기나: 루리아-델브뤼크 요동 실험	129
제 13장 유전자형에서 표현형으로	132
13.1 우성과 열성을 분자로 보면	134
13.2 멘델의 주름진 완두	135
13.3 효소 활성과 표현형의 문턱	136
13.4 아미노산 하나가 바뀌면: 결사슬의 성질	138
13.5 기능 획득과 기능 상실: 발암 유전자와 암 억제 유전자	138
제 14장 몸속·기술 속의 유전 암호, 그리고 2부로	142
14.1 mRNA 백신: 우리 세포의 리보솜이 항원을 번역한다	144
14.2 1차·2차 면역과 접종 시기	146
14.3 안티센스 RNA: 상보 가닥이 번역을 막는다	148
14.4 유전 암호는 거의 보편적이다: 대장균이 만드는 사람 인슐린	149
14.5 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	150
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	152
부록 B. 용어 풀이	156
기출문제와 기본개념	164
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	165
0. 이 장의 사용법	166
1. 출제 개념	167
1.1 중심 원리와 1유전자 1효소설 — C1 · C2	168
1.2 핵산의 구조와 전사 — P1 · C3 · C4	169
1.3 진핵세포의 RNA 가공 — C5	170

1.4 트리플렛 코드·해독 실험·코돈표 — C6 · C7 · C8 · A1	171
1.5 서열 변환 — C9.....	172
1.6 tRNA·합성효소·리보솜 — C10 · C11.....	173
1.7 돌연변이와 염색체 이상 — C12 · C13 · A2	173
1.8 유전자형에서 표현형으로 — C14 · A5 · A6	174
1.9 응용: mRNA 백신과 안티센스 — A3 · A4	175
1.10 그래프 개념도 읽는 법	176
2. 출제 경향	179
2.1 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	181
2.2 학교별 성향	182
논술답안작성 패턴분석	183
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	184
3. 답안 작성법	186
3.1 자료 해석형 답안의 4단 구조	186
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	188
3.3 표기와 서열 규칙	189
3.4 시간 배분과 자기 점검	189
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	190
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	192
실전기출문제와 풀이과정	197
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	198
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념	200
5.1 한눈에 보는 기출 12문항	200
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론.....	200
5.3 기본 개념 한눈에	201
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	202
6. 출제 문항 분석과 모범답안	204
〈기출문제 1 (연세대 2024년)〉	205
〈기출문제 2 (연세대 미래캠퍼스 2023년)〉	213
〈기출문제 3 (경희대 2020년)〉	224
〈기출문제 4 (경희대 2020년)〉	232
〈기출문제 5 (연세대 2019년)〉	240
〈기출문제 6 (성균관대 2016년)〉	248
〈기출문제 7 (성균관대 2016년)〉	259
〈기출문제 8 (부산대 2015년)〉	268
〈기출문제 9 (연세대 2013년)〉	277
〈기출문제 10 (고려대 2012년)〉	287
〈기출문제 11 (고려대 2011년)〉	299
〈기출문제 12 (성균관대 2011년)〉	313
7. 변형·예상 문항	324
8. 강의 연결.....	331
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	332
8.2 강의 구성 시 유의점	332
9. 전체 문제 총평	334

9.1 숫자로 먼저 보기	334
9.2 다섯 가지 총평	334
9.3 대학별 한 줄 총평	336
9.4 이렇게 공부하자	336
10. 참고문헌	337

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 유전 암호 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	17
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	18
그림 4. 중심 원리의 흐름.....	21
그림 5. 서열의 수 4^n 과 아미노산 20종	22
그림 6. 제 2장 개념도	26
그림 7. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 8. 영양 요구주를 찾는 실험 순서	30
그림 9. 아르지닌 합성 경로와 돌연변이	31
그림 10. 제 3장 개념도	36
그림 11. 생활 속 개념도 3.....	37
그림 12. DNA 이중 가닥과 RNA 단일 가닥	40
그림 13. RNA 머리핀 구조.....	42
그림 14. 제 4장 개념도	45
그림 15. 생활 속 개념도 4.....	46
그림 16. 전사 거품과 RNA 중합효소	48
그림 17. 방향 맞추기의 예.....	50
그림 18. 제 5장 개념도	54
그림 19. 생활 속 개념도 5.....	55
그림 20. 원핵세포와 진핵세포의 유전자 발현	57
그림 21. β -글로빈 유전자의 엑손과 인트론	58
그림 22. 제 6장 개념도	63
그림 23. 생활 속 개념도 6.....	64
그림 24. 같은 서열의 세 읽기 틀	67
그림 25. 틀이동 실험의 원리	68
그림 26. 제 7장 개념도	72
그림 27. 생활 속 개념도 7.....	73
그림 28. 폴리U 실험의 설계	75
그림 29. 반복 서열 mRNA가 만드는 코돈	76
그림 30. 제 8장 개념도	81
그림 31. 생활 속 개념도 8.....	82
그림 32. 표준 코돈표	84
그림 33. 아미노산별 코돈 수	86
그림 34. 코돈 자리별 동의 치환 비율.....	88
그림 35. 제 9장 개념도	92
그림 36. 생활 속 개념도 9.....	93
그림 37. 세 가닥의 정렬	95
그림 38. DNA에서 아미노산까지의 순서도	100
그림 39. 제 10장 개념도	102
그림 40. 생활 속 개념도 10	103
그림 41. tRNA 클로버잎 구조.....	105
그림 42. 합성효소의 두 단계 반응	107
그림 43. 흔들림 짝짓기	109
그림 44. 제 11장 개념도	112
그림 45. 생활 속 개념도 11	113
그림 46. 신장 단계의 세 동작	116
그림 47. 번역 시간과 오류 없을 확률.....	120

그림 48. 제 12장 개념도	122
그림 49. 생활 속 개념도 12	123
그림 50. 돌연변이 유형 비교	125
그림 51. 염색체 구조 이상	128
그림 52. 요동 실험의 두 가설(가상 자료)	130
그림 53. 제 13장 개념도	132
그림 54. 생활 속 개념도 13	133
그림 55. 완두 씨 모양의 분자 경로	135
그림 56. 효소 활성화와 생성물의 문턱 모형	137
그림 57. 세포 융합으로 본 기능 획득과 기능 상실	139
그림 58. 제 14장 개념도	142
그림 59. 생활 속 개념도 14	143
그림 60. mRNA 백신의 작동 순서	145
그림 61. 1차·2차 면역 반응 모형	147
그림 62. 안티센스 RNA의 작용	148
그림 63. 유전자 발현 단계와 기출 지도	168
그림 64. 전체 개념 그래프	177
그림 65. 개념별 출제 횟수	178
그림 66. 연도별 출제 문항 수	180
그림 67. 대학별 출제 문항 수	180
그림 68. 자료 해석형 풀이 절차	186
그림 69. 〈연세대 2024〉 개념 그래프	206
그림 70. 문항 168 전사·번역 풀이	209
그림 71. 〈그림1-1〉 항체 농도 곡선(기출 177)	214
그림 72. 〈연세대 미래캠퍼스 2023〉 개념 그래프	215
그림 73. [1-2] 주형 가닥 → mRNA → 아미노산(기출 177)	219
그림 74. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	225
그림 75. 구간별 경우의 수	228
그림 76. 〈그림 1〉 유전자·효소·생성물(기출 228)	233
그림 77. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	233
그림 78. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	241
그림 79. 유전자형에서 표현형으로	244
그림 80. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	249
그림 81. 3-ii 대사 경로와 차단 단계(기출 208)	253
그림 82. 3-iii 틀이동의 한 예(기출 208)	255
그림 83. 〈성균관대 2016〉 개념 그래프	260
그림 84. 반복 서열과 공통 코돈	263
그림 85. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	269
그림 86. 3-2 코돈 51칸의 경우의 수(기출 205)	272
그림 87. 3-3 혼성 이중 가닥과 RNA 머리핀(기출 205)	274
그림 88. 〈연세대 2013〉 개념 그래프	279
그림 89. 〈고려대 2012〉 개념 그래프	288
그림 90. (a) 세포 융합과 우열 해석(기출 94)	291
그림 91. (b) Q·R·S 조절과 고장 지점(기출 94)	293
그림 92. (c) X·Y 되먹임과 고장 지점(기출 94)	295
그림 93. 원문 그림 1 다시 그림	300
그림 94. 원문 그림 2·3 다시 그림	301
그림 95. 〈고려대 2011〉 개념 그래프	301
그림 96. 억제 tRNA로 본 돌연변이체	308

그림 97. 〈성균관대 2011〉 개념 그래프	315
그림 98. 5-i 아미노산별 코돈 후보(기출 99)	317
그림 99. 5-iii 야생형과 돌연변이의 아미노산(기출 99)	320

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. DNA·RNA·단백질 비교.....	20
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. 아르지닌 요구주의 성장(+ 자람, - 못 자람).....	31
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 8. DNA와 RNA의 비교.....	39
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	45
표 10. DNA 복제와 전사의 비교.....	49
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	54
표 12. 원핵세포와 진핵세포의 유전자 발현 비교.....	60
표 13. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	63
표 14. 삽입·결실 수에 따른 읽기 틀과 기능 회복 여부(세 글자 암호일 때).....	69
표 15. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	72
표 16. 합성 mRNA와 그것이 만드는 코돈·폴리펩타이드.....	77
표 17. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	81
표 18. 코돈 수에 따른 아미노산 분류.....	86
표 19. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	92
표 20. 흔한 실수 네 가지와 그 결과.....	98
표 21. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	102
표 22. 코돈-안티코돈-아미노산의 짝.....	105
표 23. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	112
표 24. 번역의 세 단계 비교.....	118
표 25. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	122
표 26. 유전자 돌연변이의 종류와 결과.....	127
표 27. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	132
표 28. 아미노산 20종의 결사슬 분류(한 글자·세 글자 기호).....	138
표 29. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	142
표 30. 유전 암호를 이용하는 세 가지 기술 비교.....	149
표 31. 기본개념편에서 2부로.....	150
표 32. 기출문제와 기본개념(2부) 목차와 내용.....	165
표 33. 아르지닌 영양 요구주의 성장.....	169
표 34. DNA와 RNA의 비교.....	169
표 35. 원핵세포와 진핵세포의 유전자 발현 비교.....	170
표 36. 코돈 수에 따른 아미노산.....	171
표 37. 서열 변환의 흔한 실수 네 가지와 그 결과(표준 코돈표로 계산).....	172
표 38. 번역의 세 단계.....	173
표 39. 돌연변이의 종류와 자료에 남는 단서.....	174
표 40. 유전 암호를 이용하는 세 가지 기술.....	176
표 41. 이 책의 기출 문항 목록.....	179
표 42. 대학별 출제 문항.....	180
표 43. 문항별 요구 개념 수와 최대 층.....	181
표 44. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	182
표 45. 생물 논술 기본 패턴 다섯 가지와 순서.....	184
표 46. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	184
표 47. 자료의 모양과 그 모양이 뜻하는 것.....	187

표 48. 서술형 답안의 문장 틀(과정 설명).....	188
표 49. 판별형 답안의 문장 틀	188
표 50. 시간 배분의 예	189
표 51. 논술 기본 패턴 5가지.....	190
표 52. 문항별 소문항에 적용한 패턴.....	190
표 53. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(최근 시험부터).....	198
표 54. 대학별 기출 문항 수·연도·소재.....	200
표 55. 학년도별 문항 수	200
표 56. 소문항에 적용한 답안 패턴의 분포(28개 소문항, 두 패턴을 결합한 소문.....	201
표 57. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순)	201
표 58. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	202
표 59. 제시문 [마] 코돈표의 일부(원문 표를 다시 조판, 아미노산 이름은 원문	205
표 60. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	206
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	207
표 62. E와 T 대장균의 번역 결과를 코돈마다 비교(이 책의 정리)	209
표 63. 〈표1-1〉 원문 표를 다시 조판	213
표 64. 〈표1-2〉 유전부호(코돈표)	214
표 65. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	215
표 66. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	216
표 67. <표 1> 64개 코돈이 지정하는 아미노산(원문 그림 표를 표준 코돈표로	224
표 68. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	225
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	226
표 70. 코돈 수로 묶은 20종 아미노산(표준 유전 암호, 이 책의 정리)	228
표 71. 〈표 1〉 원문 표를 다시 조판(염기 수·효소 활성은 생략함)	232
표 72. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	233
표 73. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	234
표 74. 〈표 1〉을 읽는 법.....	236
표 75. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	241
표 76. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	242
표 77. 2대 자손의 유전자형과 단백질·표현형(완두 모양의 예, 이 책의 정리).....	244
표 78. [문제 3-ii]의 표(원문 표를 다시 조판)	248
표 79. [문제 3-iii]의 표(원문 표를 다시 조판)	249
표 80. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	250
표 81. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	251
표 82. [4-i]의 결과(원문 표를 다시 조판).....	259
표 83. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	260
표 84. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	261
표 85. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	269
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	270
표 87. 그림 3.....	277
표 88. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	279
표 89. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	280
표 90. 보기 a)~e)의 결과지 분류(그림 3의 구조를 기준으로 이 책이 센 값	282
표 91. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	288
표 92. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	289
표 93. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	302
표 94. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	303
표 95. 유전자 X의 100~123번 염기를 1번 AUG에서 시작한 읽기 틀로 끊	304
표 96. 그림 3에서 염기쌍 수와 결합 에너지를 구하는 계산(이 책의 계산)	309

표 97. [표 1] 유전 암호표(원문 표를 다시 조판, 원문 표기).....	313
표 98. [문제 5-iii]의 표(원문 표를 다시 조판).....	314
표 99. 기출문제 12의 개념과 복습 위치.....	315
표 100. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	316
표 101. 5-iii의 번역과 결가지 성질 비교.....	321
표 102. 변형 6의 성장 결과(최소 배지에 넣은 물질).....	326
표 103. 인강 회차 구성(제안)	331
표 104. 12개 문항의 규모	334
표 105. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	336

제 1 부

기본개념편

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

유전 암호·전사·번역

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 중심 원리 → 1유전자 1효소 → DNA와 RNA → 전사 → RNA 가공 → 세 글자 암호 → 해독 실험 → 코돈표 → 서열 변환 → tRNA와 합성효소 → 리보솜의 번역 → 돌연변이 → 표현형 → 응용의 순서로 이어집니다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 정보는 어디로 가나	1~2장	DNA의 정보가 RNA를 거쳐 단백질이 된다는 중심 원리와, 유전자 하나가 효소 하나를 만든다는 실험에서 출발한다.
B. 정보를 베끼다	3~5장	DNA와 RNA의 차이, 주형 가닥을 RNA로 베끼는 전사, 진핵세포가 인트론을 잘라내는 RNA 가공을 본다.
C. 암호를 읽다	6~9장	왜 세 글자인지, 암호를 어떻게 풀었는지, 코돈표와 축퇴성, 그리고 주형 가닥에서 아미노산 서열까지 방향을 맞추어 바꾸는 법을 익힌다.
D. 번역 기계	10~11장	tRNA와 아미노아실-tRNA 합성효소가 암호를 아미노산에 잇고, 리보솜이 개시·신장·종결로 사슬을 만든다.
E. 바뀌면, 그리고 쓰이면	12~14장	염기가 바뀌었을 때의 결과, 유전자형이 표현형이 되는 과정, mRNA 백신과 안티센스 RNA를 보고 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

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

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (17쪽) 왜 유전 암호인가	중심 원리 · 복제·전사·번역 · 정보량 4 ⁿ
기본개념편 제 2장 (26쪽) 유전자 하나, 효소 하나	1유전자 1효소설 · 영양 요구주 · 대사 경로 순서 정하기
기본개념편 제 3장 (36쪽) DNA와 RNA: 두 가닥과 한 가닥	리보스와 우라실 · 5'→3' 방향 · 머리핀 구조 · mRNA·tRNA·rRNA
기본개념편 제 4장 (45쪽) 전사: 유전자를 RNA로 베끼기	주형 가닥·암호 가닥 · RNA 중합효소 · 프로모터
기본개념편 제 5장 (54쪽) 진핵세포의 RNA 가공	엑손·인트론 · 스플라이싱 · 5' 캡·폴리 A 꼬리 · cDNA
기본개념편 제 6장 (63쪽) 세 글자 암호: 트리플렛과 읽기 틀	트리플렛 코드 · 읽기 틀 · 틀이동
기본개념편 제 7장 (72쪽) 암호를 풀다: 폴리U에서 코돈표까지	무세포 번역계 · 폴리U 실험 · 반복 서열 mRNA

장	새로 배우는 개념
기본개념편 제 8장 (81쪽) 코돈표 읽기와 축퇴성	개시·종결 코돈 · 축퇴성 · 셋째 자리 흔들림 · 역번역 경우의 수
기본개념편 제 9장 (92쪽) 주형 가닥에서 아미노산 서열까지	세 가닥의 관계 · 방향 맞추기 · 흔한 실수 네 가지
기본개념편 제 10장 (102쪽) tRNA와 아미노아실-tRNA 합성효소	안티코돈 · 합성효소의 기질 특이성 · 흔들림 짝짓기
기본개념편 제 11장 (112쪽) 리보솜의 번역: 개시·신장·종결	A·P·E 자리 · 펩타이드 결합 · 방출 인자 · 폴리솜
기본개념편 제 12장 (122쪽) 유전자 돌연변이: 한 글자가 바뀌면	침묵·미스센스·넌센스 · 틀리동 · 염색체 구조 이상 · 억제 tRNA
기본개념편 제 13장 (132쪽) 유전자형에서 표현형으로	우성·열성의 분자적 뜻 · 효소 활성의 문턱 · 발암·암 억제 유전자
기본개념편 제 14장 (142쪽) 몸속·기술 속의 유전 암호, 그리고 2부로	mRNA 백신 · 안티센스 RNA · 유전 암호의 보편성

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 서열을 손으로 한 번 옮겨 적어 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 실수가 가장 많은 곳은 9장(주형 가닥에서 아미노산 서열까지)과 12장(돌연변이 판별)이다. 이 두 장은 두 번 읽는다.
- 코돈표는 외우지 않는다. 시험지에 주어진다. 대신 표를 빠르고 정확하게 읽는 손을 만든다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

유전 암호는 생명과학Ⅱ에서 처음 제대로 만나고, 대학 논술에서는 서열을 바꾸어 쓰는 손과 과정을 설명하는 글이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(세포와 핵, DNA라는 이름, 간단한 곱셈과 경우의 수)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 것을 먼저 주지 않고, 왜 그런가를 먼저 묻고 그다음에 규칙을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 고등학교 2학년 논술 준비생이다. 궁금한 것은 바로 묻고, 태오는 서열을 옮기다 자주 방향을 틀린다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 일상의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 충북 단양 ‘돌집 과학방’의 선생님. 은퇴한 생물·화학 교수로, 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

각 장의 구성

- 〈생활 속 개념도〉 — 그 장의 개념이 보이는 일상 장면 한 쪽.
- 〈이 장의 출발점〉 — 이 장을 읽기 전에 알아야 할 것.
- 본문 대화 — 실험과 일상 예에서 개념을 만든다.
- 〈문제〉 + 풀이 대화 — 본문 속에서 바로 풀어 본다.
- 〈핵심〉 상자 — 풀이 절차와 꼭 남길 것.
- 〈스스로 풀어 보기〉 — 정답과 해설은 부록 A. 장 끝에 참고문헌을 붙였다.

첫 토요일

토요일 오후, 돌집 과학방 창으로 남한강 물빛이 들어왔다. 이모가 두부를 썰어 접시에 담는 동안 태오는 지난해 논술 기출 한 장을 탁자에 펼쳤다. 문제지 한가운데에는 A, T, G, C가 스무 개 남짓 늘어서 있었다.

태오 교수님, 이 문제요. 염기 서열을 주고 아미노산 서열을 구하래요. 코돈표도 있는데, 왼쪽부터 세 글자씩 읽었더니 답이 안 맞아요.

석 교수 어느 가닥을 읽었니?

태오 그냥... 주어진 줄이요. 위에 있는 거.

석 교수 그 줄 옆에 ‘주형 가닥’이라고 적혀 있구나. 그리고 3’에서 시작하지. 오늘부터 우리가 할 일은 그 두 낱말, ‘주형’과 ‘3’을 이해하는 거다.

하린 저는 코돈이라는 말부터 모르겠어요. 아미노산은 과학 시간에 들었어요. 단백질을 이루는 작은 조각이라고요.

석 교수 맞다. 그럼 질문 하나. 하린이 몸의 간세포와 피부세포에 든 DNA는 같을까, 다를까?

하린 같은 사람이니까... 같아요?

석 교수 같다. 그런데 간세포는 해독 효소를 만들고 피부세포는 케라틴을 만든다. 같은 책을 가지고 서로 다른 요리를 하는 셈이지.

이모 우리 두부집에도 할머니 비법 공책이 있어요. 콩 불리는 시간, 간수 넣는 양이 다 적혀 있죠. 공책은 안방에 두고, 필요한 쪽만 쪽지에 베껴 부엌에 붙여요.

석 교수 그게 오늘 이야기의 전부입니다. 공책이 DNA, 쪽지가 mRNA, 두부가 단백질이에요. 베끼는 일을 전사, 쪽지를 보고 만드는 일을 번역이라고 부르지요.

태오 그럼 코돈은요?

석 교수 쪽지의 글자를 세 개씩 꿰은 낱말이다. 네 가지 염기로 세 글자 낱말을 만들면 몇 가지가 될까?

태오 4 곱하기 4 곱하기 4, 64가지요.

하린 아미노산은 20가지라면서요. 낱말이 너무 많아요.

석 교수 좋은 의문이다. 남은 낱말은 어떻게 쓰일까? 같은 뜻을 가진 낱말이 여럿 있고, ‘여기서 끝’이라는 낱말도 있다. 그걸 정리한 표가 코돈표다.

이모 쪽지를 베끼다 글자 하나를 틀리면 두부 맛이 달라지듯이, 유전자도 그런가요?

석 교수 그렇습니다. 어떤 오타는 뜻이 그대로이고, 어떤 오타는 문장 전체를 망가뜨리지요. 그게 돌연변이 이야기이고, 논술에서 아주 자주 묻습니다.

태오 그럼 이 기출은 언제쯤 풀 수 있어요?

석 교수 9장에서 서열을 바꾸는 손을 만들고, 10~11장에서 그 서열을 읽는 기계를 보면 풀 수 있다. 4부에서 이 문제를 다시 만나면 오늘의 오답이 어디서 났는지 네가 먼저 말하게 될 거다.

하린 처음 질문으로 돌아가면요, 왜 하필 세 글자예요? 두 글자면 안 돼요?

석 교수 그 질문이 6장의 제목이다. 오늘은 1장부터 시작하자. 정보는 어디에서 어디로 흐르는가.

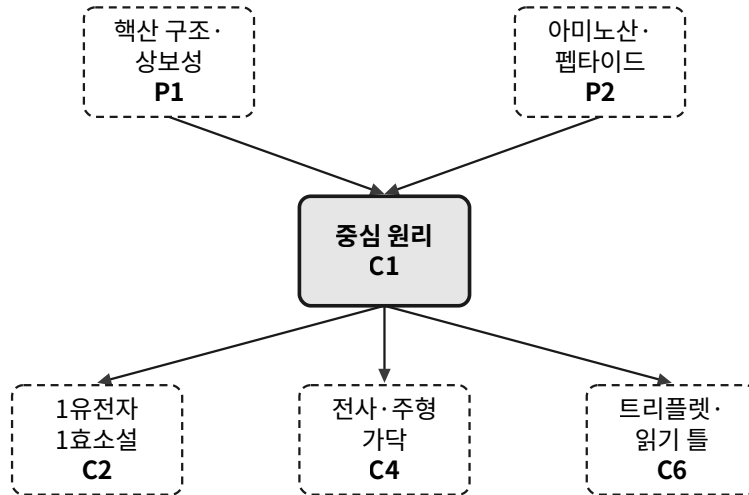
생명이 쓰는 정보는 네 가지 염기의 배열이고, 그 배열을 스무 가지 아미노산의 배열로 옮기는 규칙이 유전 암호다. 1장은 정보의 흐름(중심 원리)에서 출발해, 2장에서 유전자가 효소를 만든다는 실험 증거를 본다. 3~5장은 DNA를 RNA로 베끼는 일, 6~9장은 그 RNA를 읽는 규칙, 10~11장은 읽는 기계, 12~14장은 글자가 바뀌었을 때의 결과와 그 응용이다. 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 유전 암호인가

새 개념 중심 원리 · 복제·전사·번역 · 정보량 4ⁿ

이어짐 1유전자 1효소 2장 · 전사 4장 · 트리플렛 6장

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 중심 원리)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.

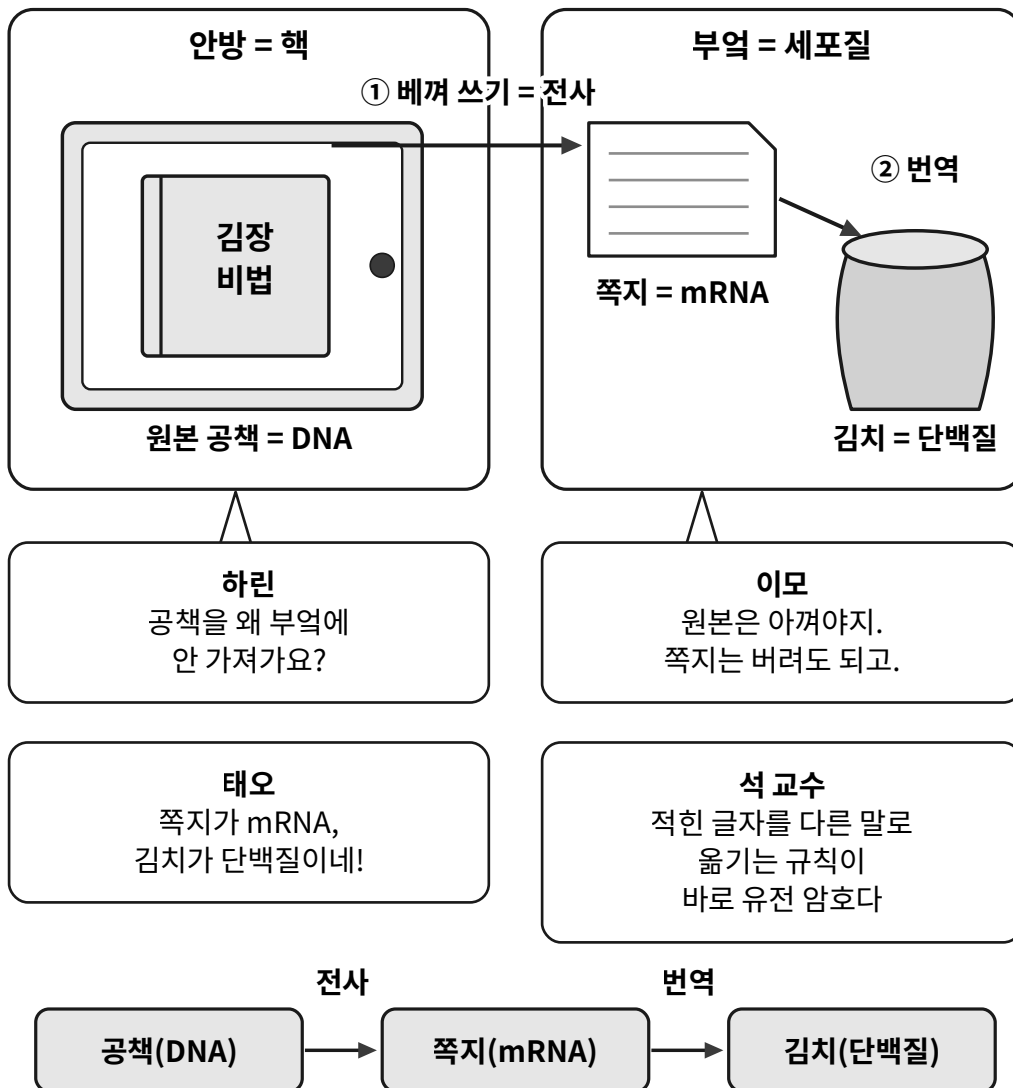
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 5 (연세대 2019년) (240쪽)	동형접합 자손의 표현형과 중심 원리	C1 중심 원리
기출 9 (연세대 2013년) (277쪽)	산성 아미노산 6개와 β-아미노산	C1 중심 원리

할머니 김치 비법 공책과 부엌 쪽지

원본은 금고에, 베낀 쪽지는 부엌으로



③ 같은 공책이라도 어느 쪽을 베끼느냐에 따라
부엌마다 다른 음식 — 세포마다 다른 단백질

그림 3. 집안 요리 비법 공책과 부엌 쪽지 — 원본 공책은 안방 금고에 두고, 필요한 쪽만 쪽지에 베껴 부엌으로 가져가 김치를 담근다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 원본 공책(DNA)은 안방 금고(핵)에 두고, 필요한 쪽만 베낀 쪽지(mRNA)를 부엌(세포질)으로 보낸다.
2. 쪽지의 글을 읽고 실제 음식(단백질)을 만드는 일이 번역이다.
3. 같은 공책이라도 어느 쪽을 베끼느냐에 따라 부엌마다 다른 음식이 나온다.

이 장의 출발점

- 세포는 핵과 세포질로 나뉘고, 핵 속에 DNA가 들어 있다는 것(중학교 과학).
- 단백질은 아미노산 수십~수천 개가 사슬처럼 이어진 분자이고, 아미노산은 20종이라는 것.
- DNA는 A·T·G·C 네 가지 염기가 늘어선 긴 사슬이며, 두 가닥이 A-T, G-C로 짝을 짓는다는 것.
- 경우의 수의 곱셈(두 자리에 각각 4가지가 오면 $4 \times 4 = 16$ 가지).

첫서리가 내린 토요일 아침, 돌집 과학방 탁자 위에 이모가 낡은 공책 한 권을 올려놓았다. 겉장에는 “김장 — 어머니 글씨”라고 적혀 있었다. 이모는 공책을 펴는 대신 메모지 한 장을 꺼내 몇 줄을 베껴 쓰기 시작했다.

하린 이모, 공책을 그냥 부엌에 가져가면 되잖아요. 왜 또 베껴 써요?

이모 이건 할머니가 남기신 하나뿐인 공책이야. 고춧가루 묻고 김치국물 튀면 끝이지. 쪽지는 버려도 되지만 공책은 안 돼.

석 교수 오늘 공부가 바로 그 장면이다. 세포도 하나뿐인 원본을 아끼고, 필요한 부분만 베껴서 일하는 곳으로 보낸다. 원본은 DNA, 베낀 쪽지는 RNA, 쪽지를 보고 만든 김치는 단백질이야.

태오 그 흐름이 중심 원리죠? 교과서 첫 쪽에 있는 DNA → RNA → 단백질.

석 교수 그렇다. 그런데 오늘 진짜 묻고 싶은 건 다른 거다. 공책의 글자와 김치는 전혀 다른 물건이잖니. 글자를 음식으로 바꾸려면 “이 글자는 이 재료”라는 규칙이 있어야 한다. DNA의 염기 서열을 단백질의 아미노산 서열로 바꾸는 그 규칙을 **유전 암호**라고 한다. 이 책 한 권이 그 규칙 하나를 끝까지 따라가는 이야기다.

1.1 같은 DNA, 다른 세포 — 정보와 일꾼

석 교수 먼저 질문 하나. 하린이 간세포와 피부 세포와 근육 세포에 든 DNA는 같을까, 다를까?

하린 다르지 않을까요? 하는 일이 다 다르니까요.

석 교수 대부분 같다. 몸의 세포는 수정란 하나가 분열해서 생겼고, 분열할 때마다 DNA를 통째로 복사해 나누어 가졌기 때문이다. 사람 세포 하나에는 염기쌍 약 3.1×10^9 개짜리 유전체가 두 벌 들어 있고, 간세포든 피부 세포든 그 두 벌은 거의 같다.

태오 그럼 간세포가 간 일을 하고 근육 세포가 수축하는 차이는 어디서 와요?

석 교수 어떤 유전자를 꺼내 쓰느냐에서 온다. 사람 유전체에는 단백질을 만드는 유전자가 약 2만 개 있다. 간세포는 알부민 같은 혈액 단백질 유전자를 많이 꺼내 쓰고, 근육 세포는 액틴과 마이오신 유전자를, 피부 세포는 케라틴 유전자를 많이 꺼내 쓴다. 같은 공책에서 집집마다 다른 쪽을 베끼는 거지.

이모 그러니까 DNA는 정보이고, 실제로 일하는 건 단백질이군요.

석 교수 아주 정확한 요약이다. DNA는 스스로 아무 반응도 일으키지 않는다. 산소를 나르는 헤모글로빈, 녹말을 자르는 아밀레이스, 근육을 당기는 마이오신, 세균을 붙잡는 항체가 모두 단백질이다. 단백질은 일꾼이고, DNA는 그 일꾼을 만드는 설명서다.

하린 그럼 RNA는 뭐예요? 정보예요, 일꾼이에요?

석 교수 둘 사이를 잇는 전달자라고 보면 된다. 세 분자를 표 4에 나란히 놓았다. 단위체가 무엇이고 몇 종류인지, 가닥이 몇 개인지, 세포 어디에 주로 있는지를 보자.

표 4. DNA·RNA·단백질 비교 — 단위체, 단위체 종류 수, 가닥, 주로 있는 곳, 하는 일

구분	단위체	단위체 종류	가닥	주로 있는 곳(진핵세포)	하는 일
DNA	뉴클레오타이드 (디옥시리보스)	4(A·T·G·C)	두 가닥	핵	유전 정보의 원본 보관
RNA	뉴클레오타이드 (리보스)	4(A·U·G·C)	한 가닥	핵에서 만들어져 세포질로	정보 전달(mRNA), 운반(tRNA), 리보솜 구성(rRNA)
단백질	아미노산	20	사슬(접혀서 입체 구조)	세포질·막·세포 밖	효소·운반·구조·방어 등 실제 기능

태오 단위체 종류가 DNA는 4, 단백질은 20이네요. 4가지 글자로 20가지 재료를 가리켜야 하는 거고요.

석 교수 오늘 공부의 셋째 절이 바로 그 문제다. 그 전에 하나만 더 짚자. 왜 굳이 베끼는 단계를 거칠까? DNA에서 바로 단백질을 만들면 더 빠를 텐데.

하린 이모 말처럼 원본이 상하면 안 되니까요.

석 교수 그게 첫째 이유다. 둘째 이유는 양이다. 간세포 하나에 알부민 유전자는 두 벌뿐인데, 그 세포는 알부민 단백질을 엄청나게 많이 만들어 내보낸다. 유전자 하나에서 mRNA를 여러 장 베끼고, mRNA 한 장을 리보솜 여러 개가 동시에 읽으면 단백질이 곱절로 불어난다. 쪽지를 열 장 베끼면 부엌 열 곳에서 동시에 김치를 담글 수 있는 것과 같다.

이모 쪽지는 쓰고 버려도 되니까 필요 없을 때는 안 만들면 되겠네요.

석 교수 그것이 셋째 이유다. mRNA는 몇 분에서 며칠 사이에 분해된다. 그래서 세포는 지금 필요한 단백질의 쪽지만 베껴 두고, 필요가 없어지면 쪽지를 버려 생산을 멈춘다. 베끼는 단계가 곧 조절하는 손잡이가 되는 셈이다. 그 조절 이야기는 유전자 발현 조절 단원에서 자세히 다룬다.

1.2 DNA → RNA → 단백질: 중심 원리

석 교수 1953년 왓슨과 크릭이 DNA 이중 나선 구조를 밝히자, 다음 질문은 “이 염기 서열이 어떻게 단백질이 되나?”였다. 1958년에 프랜시스 크릭이 그 답의 틀을 두 가지 가설로 정리했다. 하나는 **서열 가설**로, 핵산의 염기 서열이 단백질의 아미노산 서열을 정한다는 것이다. 다른 하나가 정보의 흐름에 관한 것인데, 크릭은 1970년에 그것을 다시 그림으로 다듬었다. 그것이 **중심 원리**다. 그림 4를 보자.

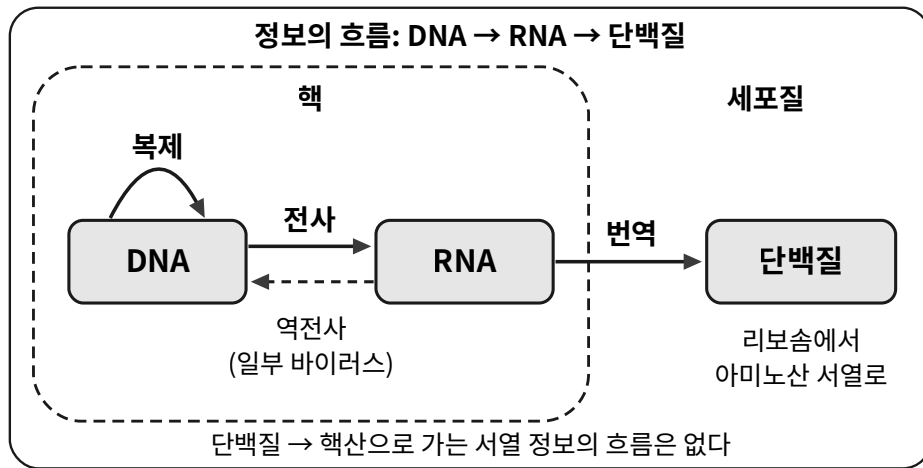


그림 4. 중심 원리의 흐름 — DNA는 복제로 자신을 복사하고(고리 화살표), 핵 안에서 전사로 RNA를 만들며, RNA는 세포질의 리보솜에서 번역되어 단백질이 된다. 역전사(점선)는 일부 바이러스에서 보이는 예외 경로이고, 단백질에서 핵산으로 가는 화살표는 없다

- 하린** 화살표가 세 종류예요. DNA에서 DNA로 도는 것, DNA에서 RNA, RNA에서 단백질.
- 석 교수** 차례로 이름을 붙이자. DNA가 자기와 똑같은 DNA를 만드는 것이 **복제**, DNA의 한 구간을 RNA로 베끼는 것이 **전사**, RNA의 염기 서열을 아미노산 서열로 바꾸는 것이 **번역**이다.
- 태오** 전사와 번역은 이름이 비슷한데 뭐가 달라요?
- 석 교수** 좋은 질문이다. 전사는 같은 언어 안에서 베끼는 일이다. DNA도 RNA도 염기라는 같은 글자를 쓰니까, 글씨체만 조금 바뀌 옮겨 적는 셈이지. T 자리에 U를 쓰는 정도의 차이이다. 번역은 언어가 바뀐다. 염기 네 글자의 언어를 아미노산 스무 글자의 언어로 옮긴다. 그래서 사전이 필요하고, 그 사전이 유전 암호다.
- 이모** 그림에서 점선은 뭐예요? RNA에서 DNA로 거꾸로 가는 화살표요.
- 석 교수** **역전사**다. 에이즈를 일으키는 HIV 같은 레트로바이러스는 RNA를 유전 물질로 가지고 있다가, 세포에 들어오면 역전사 효소로 자기 RNA를 DNA로 바꾸어 숙주의 DNA에 끼워 넣는다. 1970년에 발견되어 “중심 원리가 깨졌다”는 말도 나왔지만, 크릭은 처음부터 RNA → DNA 흐름을 가능한 경로로 남겨 두었다. 그래서 그림에서 점선으로 그렸다.
- 태오** 그럼 절대 없는 화살표도 있어요?
- 석 교수** 있다. 단백질에서 핵산으로, 또는 단백질에서 단백질로 서열 정보가 옮겨 가는 길은 지금까지 알려진 생물에 없다. 크릭이 중심 원리에서 진짜로 금지한 것은 그것이다. 단백질의 아미노산 서열을 보고 거꾸로 DNA를 만들어 내는 기계는 세포 안에 없어.
- 하린** 그러면 운동해서 생긴 근육 단백질이 DNA를 바꾸지 못하는 것도 그래서예요?
- 석 교수** 연결을 잘 지었다. 근육 단백질이 늘어나도 그 정보가 DNA로 거꾸로 적히지 않는다. 그래서 몸에서 얻은 변화가 자식의 DNA로 바로 가지 않는 거다.
- 이모** 장소도 다르게 그려져 있네요. 핵과 세포질이요.
- 석 교수** 진핵세포에서는 복제와 전사가 핵 안에서, 번역은 세포질의 리보솜에서 일어난다. 원본 공책은 안방 금고에, 김치는 부엌에서 담그는 것과 같다. 핵막이 없는 세균은 한 공간에서 전사와 번역이 거의 동시에 일어나는데, 그 차이는 5장에서 본다(**기본개념편 제 5장 (54쪽)**).

1.3 네 글자로 얼마나 많은 것을 적을 수 있나

석 교수 이제 오늘의 계산이다. 염기는 네 종류인데 아미노산은 스무 종류다. 염기 하나가 아미노산 하나를 가리키면 몇 종류를 가리킬 수 있지?

하린 네 종류요. 스물에 한참 모자라요.

석 교수 그럼 염기 두 개를 한 묶음으로 읽으면?

태오 첫째 자리 4가지, 둘째 자리 4가지니까 $4 \times 4 = 16$ 가지요. 이것도 20보다 작네요.

석 교수 세 개라면?

태오 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 가지. 이제 20을 넘어요.

석 교수 그렇다. 염기 n 개를 한 묶음으로 읽으면 만들 수 있는 서열은 4^n 가지다. **그림 5**에 $n = 1, 2, 3, 4$ 일 때를 막대로 그리고, 아미노산 20종을 가로선으로 그었다.

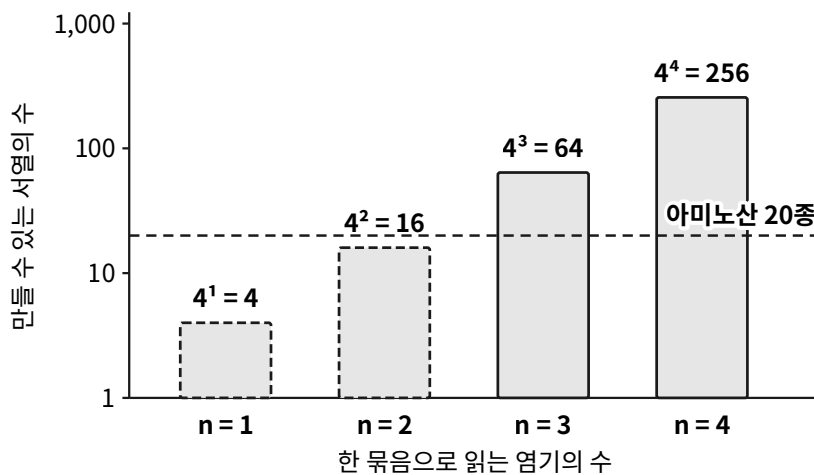


그림 5. 염기 n 개로 만들 수 있는 서열의 수 4^n — $n=1$ 에서 4, $n=2$ 에서 16으로 아미노산 20종(점선)에 못 미치고, $n=3$ 에서 64로 처음 20을 넘는다(세로축은 로그 눈금)

이모 세로축 눈금이 1, 10, 100으로 열 배씩 커지네요.

석 교수 막대 길이 차이가 너무 커서 로그 눈금을 썼다. n 이 하나 늘 때마다 네 배씩 커지니까 로그 눈금에서는 막대 끝이 같은 간격으로 올라간다. 16과 64 사이에 20이 끼어 있다는 게 핵심이다. 그래서 세 염기가 한 묶음이 되어야 하고, 그 묶음을 **코돈**이라 부른다. 왜 하필 셋인지, 실제로 셋이라는 걸 어떻게 확인했는지는 6장에서 실험으로 본다(**기본개념편 제 6장** (63쪽)).

태오 그런데 꼭 묶음 길이가 같아야 해요? 어떤 건 두 글자, 어떤 건 세 글자로 섞어 쓰면 덜 낭비될 것 같은데요.

석 교수 생각은 좋다. 실제로 그런 암호를 상상한 과학자들도 있었다. 그런데 심표 없이 이어진 글자를 길이가 섞인 묶음으로 끊으려면, 어디서 끊어야 하는지를 알려 주는 표시가 따로 있어야 한다. 모든 묶음이 세 글자로 같으면 시작점 하나만 알면 끝까지 셋씩 끊어 읽으면 된다. 실제 생물은 그 단순한 방식을 쓴다.

하린 64가지인데 아미노산은 20가지면 44가지는 남잖아요. 그건 버려요?

석 교수 버리지 않는다. 하나의 아미노산을 여러 코돈이 함께 가리키고, 세 개는 “여기서 멈춰라”라는 종결 신호로 쓴다. 그것이 8장의 축퇴성이다(**기본개념편 제 8장** (81쪽)). 오늘은 “셋이면 넉넉하다”까지만 기억하자.

문제 1.1

염기 3개로 된 서열은 모두 몇 가지인가? 염기 10개로 된 서열이라면 몇 가지인가?

하린 3개면 아까 한 대로 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 가지예요.

태오 10개면 4를 열 번 곱하니까 4^{10} 이예요. $4^5 = 1,024$ 이니까 $1,024 \times 1,024 = 1,048,576$ 가지요.

석 교수 둘 다 맞다. 정답은 $4^3 = 64$ 가지, $4^{10} = 1,048,576$ 가지, 약 백만 가지다. 4^{10} 을 $4^5 \times 4^5$ 로 나눈 것도 좋은 계산 습관이다. 염기 열 개만 되어도 백만 가지가 넘는데, 사람 유전체는 그런 글자가 약 31억 개 이어진 책이다.

이모 네 글자뿐이라고 정보가 적은 게 아니네요. 자리 수가 많으면 얼마든지 적을 수 있고요.

석 교수 컴퓨터가 0과 1 두 글자로 사진과 음악을 다 저장하는 것과 같은 이치다. 글자 종류보다 글자 수가 정보량을 정한다.

태오 그럼 사람 유전체 한 벌을 컴퓨터에 넣으면 용량이 얼마나 돼요?

석 교수 직접 해 보자. 0과 1 한 자리를 1비트라고 하면, 네 글자 가운데 하나를 고르는 데는 몇 비트가 필요하지?

태오 2비트면 00, 01, 10, 11 네 가지니까 2비트요. 그러면 31억 염기 $\times$ 2비트 $= 6.2 \times 10^9$ 비트이고, 8비트가 1바이트니까 $6.2 \times 10^9 \div 8 = 7.75 \times 10^8$ 바이트, 약 775메가바이트예요.

석 교수 맞다. 반수체 유전체 한 벌이 영화 한 편 정도의 용량이다. 그 정보가 지름 몇 마이크로미터의 핵 안에 들어 있다. 다만 그 가운데 단백질의 아미노산 서열을 직접 적는 부분은 약 1~2 %에 지나지 않고, 나머지는 언제 어디서 어느 유전자를 쓸지 정하는 부분이거나 아직 역할을 다 모르는 부분이다.

하린 정보는 많은데 실제 레시피는 일부뿐이네요.

문제 1.2

사람의 β -글로빈(헤모글로빈을 이루는 사슬 하나)은 아미노산 146개로 되어 있다. mRNA에서 번역은 메싸이오닌을 지정하는 개시 코돈에서 시작하지만, 이 첫 메싸이오닌은 번역이 끝난 뒤 잘려 나간다. 번역은 아미노산을 지정하지 않는 종결 코돈에서 끝난다. mRNA에서 개시 코돈부터 종결 코돈까지의 암호 부분은 최소 몇 염기인가?

태오 아미노산 146개에 코돈이 하나씩이니까 $146 \times 3 = 438$ 염기요.

석 교수 빠뜨린 게 두 개 있다. 문제를 다시 읽어 보자.

하린 처음 메싸이오닌은 잘려 나갔지만 mRNA에는 그 코돈이 있어야 해요. 그리고 마지막 종결 코돈도 아미노산은 없지만 염기 세 개예요.

태오 아, 그럼 코돈 수가 $1 + 146 + 1 = 148$ 개이고, $148 \times 3 = 444$ 염기요.

석 교수 정답이다. 암호 부분은 최소 $(1 + 146 + 1) \times 3 = 444$ 염기다. 실제 mRNA에는 이 앞뒤로 번역되지 않는 부분이 더 붙어 있어서 전체 길이는 더 길다. 그래서 “최소”라고 물은 거야. 이 “개시 하나, 종결 하나를 더한다”는 습관은 기출 계산 문제에서 자주 점수를 가른다.

이모 단백질 크기로 유전자 길이를 대강 짐작할 수 있겠네요.

석 교수 그렇다. 다만 진핵세포 유전자는 중간에 번역되지 않는 구간이 끼어 있어서 DNA 위 길이는 이보다 훨씬 길다. β-글로빈 유전자도 그렇다. 그 이야기는 5장에서 숫자로 확인하자.

1.4 이 책의 길, 기출이 묻는 것

석 교수 오늘 배운 중심 원리를 지도 삼아 이 책의 길을 미리 보자. 앞쪽 다섯 장은 정보가 어디서 어디로 가는지 본다. 2장은 유전자 하나가 효소 하나를 만든다는 생각이 어떻게 나왔는지, 3장은 DNA와 RNA의 구조, 4장은 전사, 5장은 진핵세포가 RNA를 다듬는 과정이다.

태오 그다음에 암호 자체겠네요.

석 교수 6장에서 9장까지가 암호를 읽는 법이다. 왜 세 글자인지, 그 암호를 실험으로 어떻게 풀었는지, 코돈표를 어떻게 읽는지, 주형 가닥에서 아미노산 서열까지 방향을 맞추어 옮기는 법이다. 기출의 절반쯤이 9장의 기술에서 점수가 걸린다. 10장과 11장은 번역 기계인 tRNA와 리보솜, 12장과 13장은 글자가 바뀌면 단백질과 형질이 어떻게 달라지는지, 14장은 mRNA 백신 같은 응용이다.

하린 대학 논술 문제는 주로 뭘 물어요?

석 교수 크게 네 갈래다. 첫째, 주형 가닥을 주고 아미노산 서열을 구하라는 **서열 변환**. 둘째, 아미노산 서열에서 가능한 mRNA가 몇 가지인지 세는 **축퇴성 계산**. 셋째, 서열이나 효소 활성 자료를 보고 어떤 **돌연변이**인지 판별하기. 넷째, 유전자형이 왜 그 **표현형**으로 나타나는지 중심 원리로 설명하기다.

이모 네 갈래 다 오늘 그림 위에 있는 거네요. 서열 변환은 전사와 번역, 표현형은 단백질 쪽이 고요.

석 교수 그렇다. 어떤 문제를 만나든 “지금 화살표의 어디를 묻고 있나?”를 먼저 짚으면 길을 잃지 않는다. 네 갈래가 한 사례 안에서 모두 이어지는 예를 하나 보자. 겸상 적혈구 빈혈증이다.

하린 적혈구가 낫 모양으로 휘는 병이요? 과학 잡지에서 봤어요.

석 교수 그 병의 원인은 β-글로빈 유전자의 염기 하나다. 정상 mRNA에서 여섯째 코돈이 GAG인데, 환자에게는 가운데 A가 U로 바뀐 GUG다. GAG는 글루탐산, GUG는 발린을 지정한다. 1957년 잉그럼이 두 헤모글로빈의 아미노산을 조각조각 비교해 146개 가운데 딱 하나가 다르다는 것을 처음 보였다.

태오 146개 중에 하나만 바뀌었는데 병이 돼요?

석 교수 글루탐산은 음전하를 띠어 물과 잘 어울리고, 발린은 물을 싫어하는 결사슬을 가졌다. 산소가 적을 때 그 발린 자리가 이웃 헤모글로빈의 소수성 부위에 달라붙어 긴 섬유를 만들고, 적혈구가 낫처럼 휘다. 흰 적혈구는 가는 혈관을 막고 쉽게 깨진다. 염기 하나(유전자) → 코돈 하나(전사) → 아미노산 하나(번역) → 단백질의 성질 → 세포 모양 → 빈혈이라는 형질까지, 오늘 그림의 화살표를 끝까지 따라간 셈이다.

이모 글자 하나 차이가 몸 전체로 번지는 거네요. 그래서 그 규칙을 정확히 알아야 하는 거구요.

석 교수 그렇다. 이 사례는 12장과 13장에서 돌연변이의 종류와 표현형을 다룰 때 다시 꺼낸다.

핵심 중심 원리로 문제를 읽는 네 단계

1. 문제에 나온 분자가 DNA인지, RNA인지, 단백질인지부터 표시한다.
2. 물음이 화살표의 어디인지 정한다: 복제(DNA → DNA), 전사(DNA → RNA), 번역(RNA → 단백질), 역전사(RNA → DNA).
3. 전사는 염기 → 염기(T 대신 U), 번역은 염기 세 개 → 아미노산 하나로 바꾼다. 개시 코돈과 종결 코돈을 따로 센다.
4. 표현형을 묻는다면 “유전자 → 단백질(구조·양·활성) → 형질”의 순서로 한 문장씩 잇는다.

스스로 풀어 보기

1. DNA·RNA·단백질 가운데 단위체 종류가 20인 것과 4인 것을 쓰고, 4인 것 둘의 염기 차이를 쓰라.
2. 염기 2개를 한 묶음으로 읽는 암호라면 아미노산 20종을 모두 지정할 수 없는 이유를 수로 설명하라.
3. 아미노산 300개로 된 단백질(개시 메싸이오닌이 그대로 남는다고 한다)의 mRNA 암호 부분은 개시 코돈부터 종결 코돈까지 몇 염기인가?
4. 중심 원리에서 일부 바이러스에만 있는 경로의 이름과 방향을 쓰고, 알려진 생물에 없는 정보 흐름을 하나 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 중심 원리는 4부 기출 전체의 바탕이지만, 특히 두 문항에서 직접 쓰인다. **기출문제 5**(연세대 2019) (240쪽)은 동형접합 자손의 표현형을 중심 원리로 설명하게 하는데, 유전자형이 표현형으로 나타하려면 전사와 번역을 거쳐 단백질이 만들어져야 한다는 이 장의 흐름이 답안의 뼈대가 된다. **기출문제 9**(연세대 2013) (277쪽)은 단백질의 성질이 아미노산 서열과 결사슬로 정해진다는 것, 곧 화살표의 맨 끝인 단백질 쪽을 묻는다. 두 문제 모두 “지금 화살표의 어디를 묻는가”부터 짚고 들어가면 된다.

이 장의 참고문헌

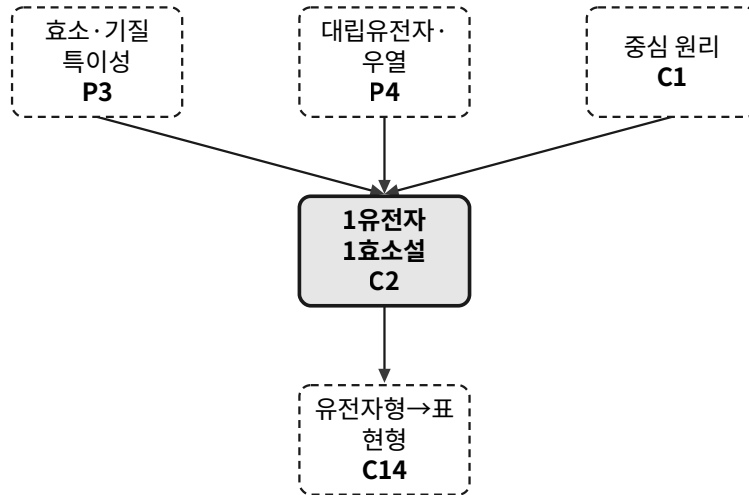
- Crick, F. (1970). Central dogma of molecular biology. *Nature*, 227(5258), 561–563. <https://doi.org/10.1038/227561a0>
- Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171(4356), 737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
- Ingram, V. M. (1957). Gene mutations in human hæmoglobin: The chemical difference between normal and sickle cell hæmoglobin. *Nature*, 180(4581), 326–328. <https://doi.org/10.1038/180326a0>
- 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 2장 유전자 하나, 효소 하나

새 개념 1유전자 1효소설 · 영양 요구주 · 대사 경로 순서 정하기

이어짐 중심 원리 1장 · 유전자형과 표현형 13장

이 장의 개념도



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

그림 6. 제 2장에서 배우는 개념(C2 1유전자 1효소설)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.

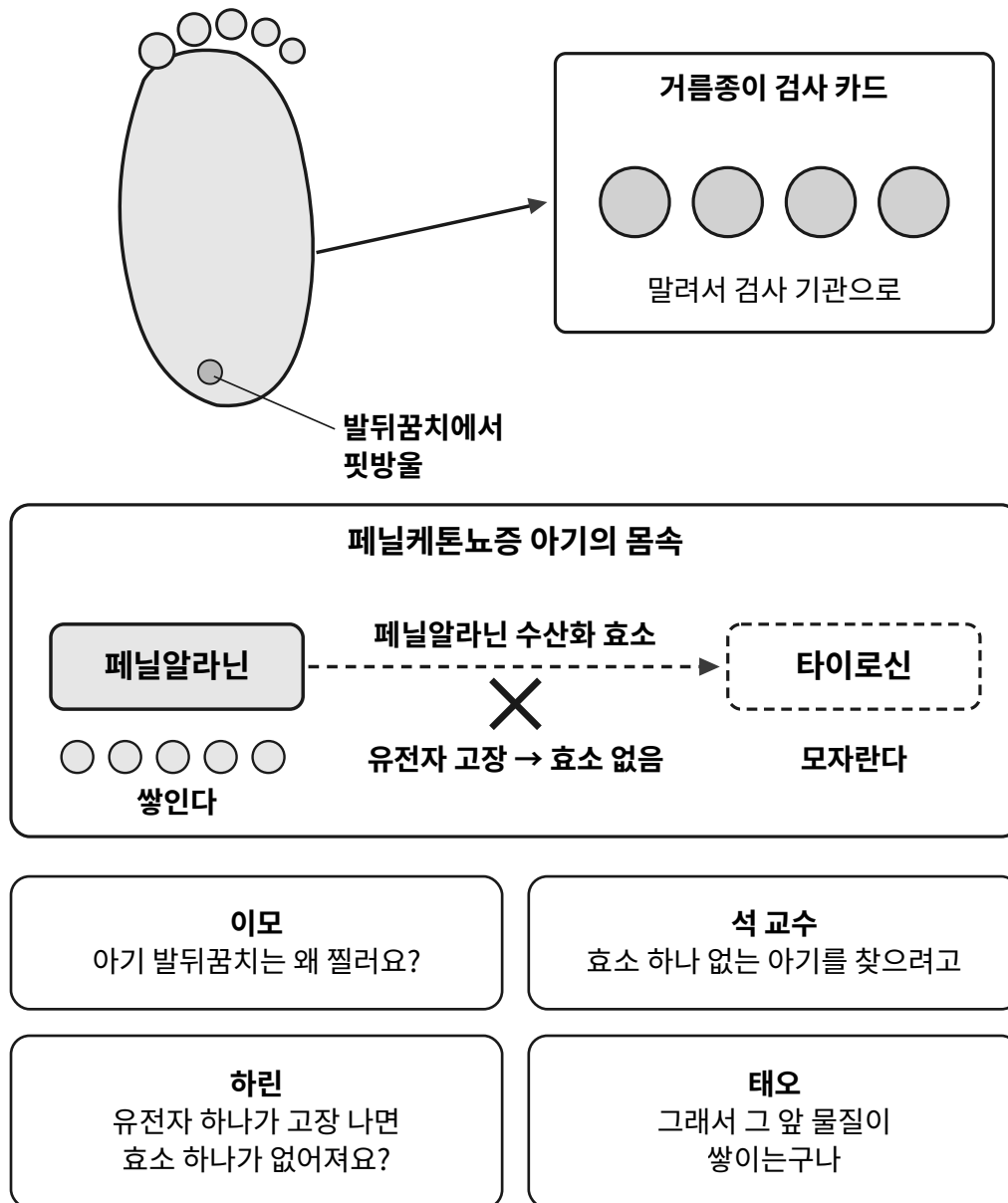
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 4 (경희대 2020년) (232쪽)	염기 수·효소 활성으로 돌연변이 가리기	C2 1유전자 1효소설
기출 6 (성균관대 2016년) (248쪽)	저항성 가설·영양 요구주·틀이동	C2 1유전자 1효소설

신생아 발뒤꿈치 채혈 검사

효소 하나가 없는 아기를 일찍 찾는다



대책: 페닐알라닌을 줄이고 타이로신을 채운 특수 분유

그림 7. 신생아 발뒤꿈치 채혈 검사 — 태어난 지 며칠 된 아기의 발뒤꿈치에서 핏방울 몇 개를 거름종이에 받아 선천성 대사 이상을 선별한다. 페닐케톤뇨증 아기는 페닐알라닌을 타이로신으로 바꾸는 효소가 없어 페닐알라닌이 쌓인다 (모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 유전자 하나가 고장 나면 그 유전자가 만드는 효소 하나가 없어진다.
2. 효소가 없으면 그 앞 단계 물질은 쌓이고 뒤 단계 물질은 모자란다.
3. 대사 경로를 알면 쌓이는 물질을 식단에서 줄여 증상을 막을 수 있다.

이 장의 출발점

- 효소는 단백질이며, 정해진 기질 하나(또는 비슷한 몇 개)에만 작용한다는 것(기질 특이성).
- 세포 안의 물질은 여러 효소가 차례로 바꾸어 만든다는 것(대사 경로).
- 중심 원리: 유전자 → (전사·번역) → 단백질(**기본개념편 제 1장** (17쪽)).
- 돌연변이는 DNA 염기 서열이 바뀌는 것이라는 정도의 뜻.

이모가 휴대폰 사진 한 장을 내밀었다. 사촌 동생이 낳은 아기의 발뒤꿈치에 작은 반창고가 붙어 있었다. “태어나고 사흘째 됐는데 발뒤꿈치를 찢어서 피를 뽑더라고요. 애가 얼마나 울었는지 몰라요.” 하린은 사진을 들여다보며 인상을 찌푸렸고, 석 교수는 칠판에 화살표 몇 개를 그리기 시작했다.

이모 교수님, 그 피로 뭘 검사하는 거예요? 아기가 아픈 데도 없는데요.

석 교수 효소 하나가 없는 아기를 일찍 찾아내려는 검사다. 대표적인 것이 페닐케톤노증이다. 페닐알라닌이라는 아미노산을 타이로신으로 바꾸는 효소가 없으면, 우유나 고기에 든 페닐알라닌이 몸에 쌓여 뇌 발달을 해친다. 그런데 일찍 찾아서 페닐알라닌을 줄인 특수 분유를 먹이면 거의 정상으로 자란다.

하린 유전자 하나가 고장 나면 효소 하나가 없어지는 거예요?

석 교수 그 질문이 오늘 장 제목이다. “유전자 하나가 효소 하나를 만든다.” 지금은 당연해 보이지만, 유전자가 무엇인지도 모르던 시절에 이 생각에 이르기까지 의사 한 사람과 곰팡이 실험이 필요했다.

2.1 가로드의 ‘선천성 대사 이상’

석 교수 1900년대 초 영국의 의사 아치볼드 가로드는 오줌이 공기에 닿으면 검게 변하는 환자들을 연구했다. **알칼톤노증**이라는 병이다. 환자의 오줌에는 호모젠티스산이라는 물질이 많이 섞여 나오는데, 이것이 공기 중 산소와 만나 검게 변한다.

태오 그 물질이 왜 쌓여요?

석 교수 가로드는 이렇게 추론했다. 보통 사람은 음식 속 아미노산을 분해하는 도중에 호모젠티스산을 만들고, 곧바로 다음 물질로 바꾸어 없앤다. 환자는 그 다음 단계를 맡은 효소가 없어서, 호모젠티스산이 쌓였다가 오줌으로 넘친다는 거지.

하린 물이 흘러가는 길에 독이 생기면 독 앞에 물이 고이는 것처럼요?

석 교수 아주 좋은 비유다. 가로드는 이 병이 사촌끼리 결혼한 집안에서 자주 나오고 멘델의 열성 형질처럼 유전된다는 것도 알아냈다. 그래서 1908년 강연에서 이런 병들을 **선천성 대사 이상**이라고 불렀다. 타고난 유전 요인 때문에 대사 경로의 한 단계가 막힌다는 뜻이다.

하린 사촌끼리 결혼한 집안에서 많이 나오는 건 왜예요?

석 교수 열성 형질이기 때문이다. 고장 난 대립유전자를 하나만 가진 사람은 정상 대립유전자가 효소를 충분히 만들어서 아무 증상이 없다. 이런 사람을 보인자라고 한다. 부모가 둘 다 보인자일 때만 아이가 고장 난 대립유전자 두 개를 받을 수 있고, 그 확률은 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ 이다. 친척끼리는 같은 조상에게서 같은 고장 난 대립유전자를 물려받았을 가능성이 높아서 둘 다 보인자인 경우가 더 잦다.

태오 정상 유전자 하나로 효소가 충분하다는 게 열성의 분자적인 뜻이네요.

- 석 교수** 그렇다. 그 이야기는 13장에서 효소의 양으로 다시 계산해 본다(**기본개념편 제 13장** (132 쪽)).
- 이모** 그럼 그때 벌써 유전자와 효소의 관계를 안 거예요?
- 석 교수** 생각의 씨앗은 있었다. 하지만 사람을 대상으로는 실험을 할 수 없으니 증거가 부족했고, 당시 학계는 크게 주목하지 않았다. 30여 년 뒤 이 생각을 실험으로 증명한 사람이 비들과 테이텀이다.
- 태오** 아까 이모가 말한 페닐케톤뇨증도 같은 종류네요.
- 석 교수** 같은 경로에 있다. 페닐알라닌 → 타이로신 → ... → 호모젠티스산 → ... 으로 이어지는 한 줄의 분해 경로에서, 페닐케톤뇨증은 첫 단계가, 알칼톤뇨증은 뒤쪽 단계가 막힌 것이다. 막힌 자리가 다르니 쌓이는 물질도 다르다.
- 이모** 페닐케톤뇨증 아기는 타이로신도 모자라겠네요. 독 뒤쪽은 물이 마르니까요.
- 석 교수** 정확하다. 보통 사람에게 타이로신은 페닐알라닌으로 만들 수 있는 아미노산이지만, 이 아기들에게는 음식으로 꼭 먹어야 하는 아미노산이 된다. 그래서 특수 분유는 페닐알라닌은 줄이고 타이로신은 넉넉히 넣는다. 독 앞은 덜 채우고 독 뒤는 따로 채워 주는 셈이지. 경로 하나를 이해하면 치료 방법까지 나온다.

2.2 비들과 테이텀의 붉은뽕곰팡이 실험

- 석 교수** 비들과 테이텀은 **붉은뽕곰팡이**를 골랐다. 이유가 셋이다. 첫째, 아주 단순한 배지에서도 자란다. 설탕, 무기 염류, 비타민 바이오틴 하나만 넣은 **최소 배지**에서 자기에게 필요한 아미노산과 비타민을 모두 스스로 합성한다. 둘째, 한살이의 대부분을 염색체가 한 벌뿐인 상태로 지낸다. 그래서 유전자가 고장 나면 짝이 가려 주지 못하고 바로 드러난다.
- 하린** 셋째는요?
- 석 교수** 빨리 자라고 교배가 쉬워서, 고장이 유전자 하나 때문인지 교배로 확인할 수 있다. 실험 순서는 **그림 8**와 같다.

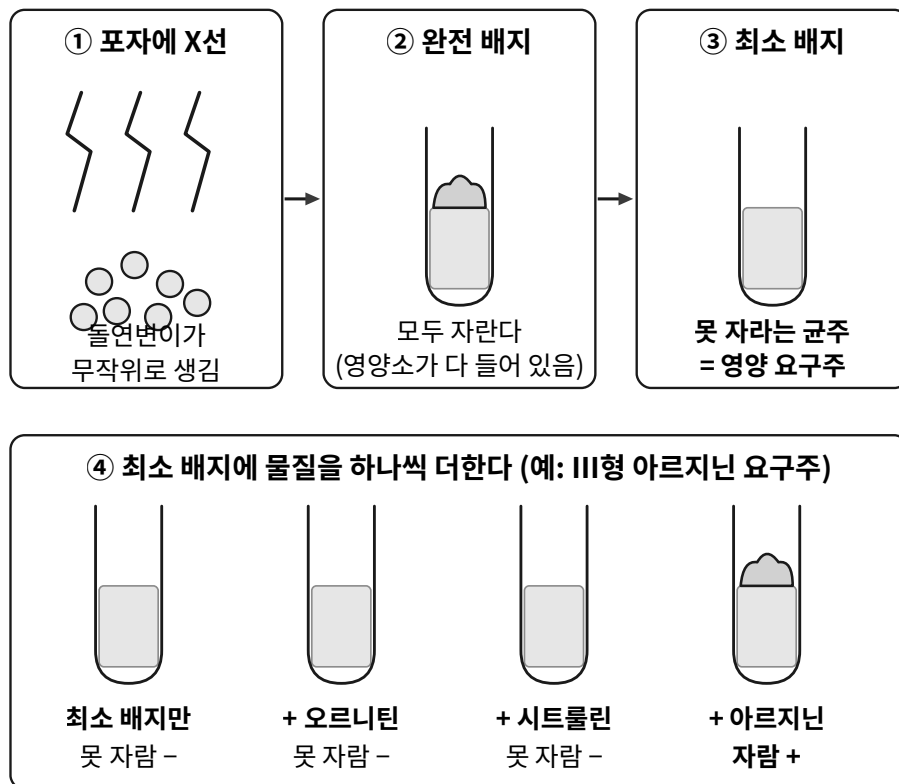


그림 8. 비들과 테이텀식 영양 요구주 찾기 — ① 포자에 X선을 쬔 뒤 돌연변이를 일으키고 ② 모든 영양소가 든 완전 배지에서 키운 뒤 ③ 최소 배지로 옮겨 자라지 못하는 균주(영양 요구주)를 고른다. ④ 최소 배지에 물질을 하나씩 더해 어느 물질이 있어야 자라는지 본다(모식도)

태오 X선으로 돌연변이를 일으켰는데, 그중 최소 배지에서 못 자라는 걸 골랐다는 거죠?

석 교수 그 전에 X선이 왜 돌연변이를 일으키는지부터 짚자. X선은 에너지가 커서 DNA 가닥을 끊거나 염기를 망가뜨린다. 세포가 그 상처를 고치다가 염기를 잘못 넣거나 조각을 빠뜨리면 염기 서열이 바뀐다. 어느 유전자가 바뀔지는 정할 수 없고, 무작위로 여기저기 생긴다. 그래서 수많은 포자에 X선을 쬔고, 그 가운데 우리가 원하는 성질이 바뀐 것을 골라내는 방식을 쓴다.

태오 낚시처럼 많이 던져서 걸리는 걸 고르는 거네요.

석 교수 그렇다. 정상 곰팡이는 최소 배지에서 자라는데, 돌연변이 곰팡이 가운데 일부는 최소 배지에서 못 자라고, 아미노산과 비타민을 모두 넣은 완전 배지에서만 자랐다. 스스로 무언가를 만들지 못하게 된 거지. 이런 균주를 **영양 요구주**라고 한다.

하린 왜 처음부터 최소 배지에 안 심고 완전 배지에서 먼저 키워요?

석 교수 그래야 영양 요구주가 죽지 않고 살아남는다. 최소 배지에 바로 심으면 우리가 찾는 돌연변이가 자라지 못해 사라져 버리지. 완전 배지에서 일단 모두 살려 놓고, 같은 균주의 일부를 떼어 최소 배지에 옮겨 본다. 완전 배지에서는 자라는데 최소 배지에서는 못 자라는 균주가 바로 찾던 것이다. 이렇게 대조할 짝을 남겨 두는 것이 실험 설계의 요령이다.

이모 무엇을 못 만드는지는 어떻게 알아요?

석 교수 최소 배지에 물질을 하나씩만 더해 본다. 아르지닌을 넣었을 때만 자란다면, 그 균주는 아르지닌을 못 만드는 **아르지닌 요구주**다. 비들과 테이텀은 1941년 논문에서 이렇게 얻은 돌연변이마다 대개 한 가지 물질만 못 만들게 되었고, 교배해 보면 그 성질이 유전자 하나처럼 멘델의 비율로 전해진다는 것을 보였다.

태오 유전자 하나가 고장 → 물질 하나를 못 만들 → 그 물질을 만드는 효소 하나가 없어짐. 그래서 1유전자 1효소군요.

석 교수 그렇다. 이것을 **1유전자 1효소설**이라 한다. 비들과 테이텀은 이 연구로 1958년 노벨상을 받았다.

태오 그런데 못 자라는 게 정말 유전자 하나 때문인지는 어떻게 확신해요? 여러 군데가 한꺼번에 망가졌을 수도 있잖아요.

석 교수 그래서 교배를 했다. 영양 요구주를 정상 균주와 교배하면 자손 포자의 절반은 정상, 절반은 영양 요구주로 1 : 1로 나왔다. 붉은빵곰팡이의 포자는 염색체가 한 벌이라 대립유전자 하나를 그대로 드러내니, 유전자 하나가 다들 때 기대되는 비율이 정확히 1 : 1이다. 고장이 유전자 두 개에 걸쳐 있었다면 이 비율이 나오지 않는다.

2.3 첨가 실험으로 경로 순서 정하기

석 교수 이 방법으로 대사 경로의 순서까지 알아낼 수 있다. 1944년 스르브와 호로위츠는 붉은빵곰팡이의 아르지닌 요구주 여러 균주를 모아 이 일을 해냈고, 교과서에 실린 아르지닌 실험이 바로 그것을 간추린 것이다. 우리도 아르지닌 요구주로 해 보자. 아르지닌은 세포 안에서 전구체 → 오르니틴 → 시트룰린 → 아르지닌 순서로 만들어진다. 각 화살표를 효소 A, B, C가 맡는다. **그림 9**를 보자.

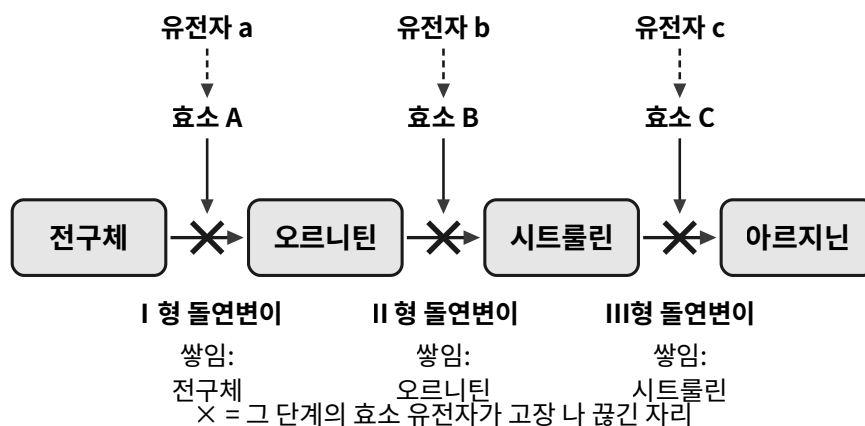


그림 9. 아르지닌 합성 경로와 돌연변이가 끊는 자리 — 효소 A·B·C가 전구체 → 오르니틴 → 시트룰린 → 아르지닌의 세 단계를 차례로 맡고, I 형·II 형·III형 돌연변이는 각각 A·B·C의 유전자가 고장 나 그 단계가 끊긴다(X). 끊긴 자리보다 뒤의 물질을 넣어 주면 자란다

하린 I 형은 첫 화살표가 끊겼네요. 그럼 오르니틴부터 못 만들어요.

석 교수 그렇다. 그런데 I 형 곰팡이에게 오르니틴을 넣어 주면 어떻게 될까?

하린 효소 B와 C는 멀쩡하니까 오르니틴을 시트룰린으로, 시트룰린을 아르지닌으로 바꿀 수 있어요. 자라요!

석 교수 시트룰린을 넣어도, 아르지닌을 넣어도 자란다. 끊긴 자리 뒤의 물질은 무엇이든 구원해 준다. 세 돌연변이의 결과를 **표 6**에 모았다.

표 6. 아르지닌 요구주의 성장(+ 자람, - 못 자람) — 최소 배지에 물질 하나씩을 더했을 때

균주	끊긴 단계	최소 배지	+ 오르니틴	+ 시트룰린	+ 아르지닌
정상	없음	+	+	+	+

군주	끊긴 단계	최소 배치	+ 오르니틴	+ 시트룰린	+ 아르지닌
I 형	전구체 → 오르니틴(효소 A)	-	+	+	+
II 형	오르니틴 → 시트룰린(효소 B)	-	-	+	+
III 형	시트룰린 → 아르지닌(효소 C)	-	-	-	+

태오 표를 거꾸로 읽으면 순서가 나오네요. III형은 아르지닌 하나로만 살고, I 형은 세 가지다 돼요.

석 교수 그게 규칙이다. **자라게 해 주는 물질의 수가 많을수록 그 돌연변이는 경로의 앞 단계가 고장 난 것이다.** 거꾸로 물질 쪽에서 보면, 더 많은 돌연변이를 살려 주는 물질일수록 경로의 뒤쪽에 있다. 아르지닌은 세 돌연변이를 모두, 시트룰린은 둘, 오르니틴은 하나를 살리니까 오르니틴 → 시트룰린 → 아르지닌 순서다.

이모 쌓이는 물질도 있겠네요. 아까 독 비유대로라면요.

석 교수 그렇다. II 형은 효소 B가 없으니 오르니틴이 쌓이고, III형은 시트룰린이 쌓인다. 실제 실험에서도 쌓인 물질을 확인해 순서를 검산했다. 기출에서는 이 표가 낫선 이름의 물질로 바뀌어 나온다. 연습해 보자.

하린 둘 다 같은 물질로만 살아나는 군주가 두 개 있으면요? 예를 들어 II 형이 두 군주라면요.

석 교수 같은 단계가 끊겼다는 것까지만 말할 수 있다. 같은 유전자의 다른 자리가 고장 났을 수도 있고, 그 단계의 효소가 사슬 두 종류로 되어 있어 서로 다른 유전자가 고장 났을 수도 있다. 성장 표만으로는 그 둘을 가릴 수 없고, 두 군주를 교배하거나 서로 합쳐 보는 실험이 따로 필요하다(교과 밖 심화). 논술에서 “같은 단계를 막는다”와 “같은 유전자다”를 구별해 쓰면 정확한 답이 된다.

문제 2.1

물질 P, Q, R을 거쳐 최종 산물 Z가 만들어진단(순서는 모른다). 영양 요구주 세 군주의 성장은 다음과 같다. m1은 최소 배지에 R 또는 Z를 넣으면 자란다. m2는 Q, R, Z 가운데 어느 것을 넣어도 자란다. m3은 Z를 넣어야만 자란다. P는 어느 군주도 살리지 못한다. 경로의 순서와 각 돌연변이가 끊는 단계를 쓰라.

태오 물질마다 살리는 군주 수를 세면 Z는 셋, R은 둘(m1, m2), Q는 하나(m2), P는 0이네요. 많이 살리는 물질이 뒤쪽이니까 $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow Z$ 예요.

석 교수 좋다. 이제 군주 쪽에서 보자.

하린 m2는 Q부터 뒤가 다 되니까 Q를 못 만드는 거예요. 그럼 $P \rightarrow Q$ 가 끊겼어요. m1은 R부터 되니까 $Q \rightarrow R$, m3은 Z만 되니까 $R \rightarrow Z$ 가 끊겼어요.

석 교수 정답이다. 경로는 $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow Z$ 이고, m2는 $P \rightarrow Q$, m1은 $Q \rightarrow R$, m3은 $R \rightarrow Z$ 단계가 끊겼다. 검산도 하자. m1은 $Q \rightarrow R$ 이 끊겼으니 Q를 넣어도 R을 못 만들어 자라지 못해야 한다. 문제의 조건과 맞지?

태오 맞아요. m1은 R이나 Z만 된다고 했으니까요. 그리고 P가 아무도 못 살리는 건 P가 맨 앞이라서고요.

석 교수 그렇다. 덧붙여 m1은 Q가 쌓이고, m3은 R이 쌓일 거라고 예측할 수 있다. 답안에 이런 예측 한 줄을 붙이면 “경로를 이해했다”는 증거가 된다.

이모 답안은 어떻게 써야 점수를 받아요? 순서만 쓰면 돼요?

- 석 교수** 순서만 쓰면 근거가 빠진다. 세 문장이면 된다. 첫째, “Z는 세 균주를, R은 두 균주를, Q는 한 균주를 살리므로 뒤쪽 물질일수록 많은 균주를 살린다.” 둘째, “따라서 경로는 $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow Z$ 이다.” 셋째, “m2는 Q 이후의 물질로 모두 살아나므로 $P \rightarrow Q$ 단계의 효소 유전자가, m1은 $Q \rightarrow R$, m3은 $R \rightarrow Z$ 단계의 효소 유전자가 고장 났다.” 근거 → 결론 → 돌연변이별 해석의 순서다.
- 태오** 마지막에 “효소 유전자”라고 꼭 쓰는 게 중요하겠네요. 물질이 고장 난 게 아니라 효소가 없어진 거니까요.
- 석 교수** 그 한 낱말이 이 장의 핵심을 보여 준다. “ $P \rightarrow Q$ 단계가 고장”이라고만 쓰면 무엇이 고장인지 흐려진다.

2.4 1유전자 1효소에서 1유전자 1폴리펩타이드로

- 석 교수** 1유전자 1효소설은 곧 수정이 필요해졌다. 1장에서 본 겸상 적혈구 빈혈증을 떠올려 보자 (기본개념편 제 1장 (17쪽)). 그 병은 헤모글로빈의 β 사슬이 바뀐 것인데, 헤모글로빈은 효소가 아니다. 산소를 나르는 운반 단백질이지.
- 하린** 그럼 유전자는 효소가 아닌 단백질도 만드는 거네요. “1유전자 1단백질”이라고 하면 되잖아요.
- 석 교수** 그것도 정확하지 않다. 헤모글로빈 분자 하나는 α 사슬 두 개와 β 사슬 두 개, 모두 네 개의 사슬로 되어 있다. 이것을 $\alpha_2\beta_2$ 라고 쓴다. α 사슬은 α -글로빈 유전자가, β 사슬은 β -글로빈 유전자가 만든다.
- 태오** 단백질 하나에 유전자가 두 개 필요하네요. 그러면 유전자 하나가 만드는 건 단백질이 아니라 사슬 하나고요.
- 석 교수** 그렇다. 아미노산이 펩타이드 결합으로 길게 이어진 사슬 하나를 **폴리펩타이드**라고 한다. 아미노산 두 개가 이어지면 다이펩타이드, 몇 개면 올리고펩타이드, 수십 개 이상이면 폴리펩타이드라고 부른다. 폴리펩타이드가 접혀 기능을 가진 덩어리가 되면 단백질이라 부르고, 그 덩어리가 사슬 하나일 수도 여러 개일 수도 있다. 그래서 오늘날에는 **1유전자 1폴리펩타이드설**이라고 고쳐 말한다. 효소도 대개 폴리펩타이드 한 개 이상으로 된 단백질이니, 1유전자 1효소설은 이 더 넓은 규칙의 한 경우였던 셈이다.

문제 2.2

헤모글로빈은 α 사슬 2개와 β 사슬 2개로 된 단백질($\alpha_2\beta_2$)이며 효소가 아니다. 헤모글로빈을 만드는 데 필요한 유전자의 종류 수를 1유전자 1효소설과 1유전자 1폴리펩타이드설로 각각 설명하라.

- 태오** 1유전자 1효소설로는 헤모글로빈이 효소가 아니니까 아예 설명이 안 돼요. 1유전자 1폴리펩타이드설로는 사슬이 네 개니까 유전자 네 종류요.
- 석 교수** 절반은 맞았다. 사슬이 네 개지만 종류는 몇 가지지?
- 태오** 아, α 와 β 두 종류예요. 같은 α 사슬 두 개는 같은 유전자에서 나오니까 유전자는 두 종류면 돼요.
- 석 교수** 정답이다. 1유전자 1효소설로는 효소가 아닌 헤모글로빈을 설명할 수 없고, 1유전자 1폴리펩타이드설로는 폴리펩타이드 종류가 α 와 β 두 가지이므로 유전자 2종이 필요하다. 사슬의 개수와 종류를 구별하는 것이 핵심이다.

이모 그럼 효소 하나가 고장 나면 형질이 바뀐다는 오늘 이야기는 결국 13장의 유전자형과 표현형으로 이어지겠네요.

석 교수 그렇다. 정상 대립유전자가 하나만 있어도 효소가 충분하면 그 형질이 우성으로 보인다. 그 계산은 13장에서 한다. 덧붙여, 오늘날에는 유전자 하나가 RNA 가공 방식에 따라 여러 폴리펩타이드를 만들거나 단백질이 아닌 RNA만 만드는 경우도 알려져 있다. 그래도 논술에서 “유전자 → 효소(폴리펩타이드) → 대사 경로 → 형질”이라는 사슬은 가장 자주 쓰이는 설명 틀이다.

핵심 영양 요구주 자료로 대사 경로를 푸는 네 단계

1. 표를 물질 쪽에서 읽는다: 물질마다 살려 주는 균주의 수를 센다. 많이 살릴수록 경로의 뒤쪽이다.
2. 균주 쪽에서 읽는다: 자라게 해 주는 물질이 많을수록 앞 단계가 고장 났다. 살려 주는 물질 가운데 가장 앞의 것 바로 앞 단계가 끊긴 자리다.
3. 끊긴 자리 앞의 물질은 쌓이고 뒤의 물질은 모자란다는 예측으로 검산한다.
4. 끊긴 단계 → 그 단계의 효소 → 그 효소의 유전자로 이어 쓴다. 효소가 아닌 단백질이면 “1 유전자 1폴리펩타이드”로 쓴다.

스스로 풀어 보기

1. 붉은빵곰팡이가 1유전자 1효소설을 증명하는 데 알맞았던 까닭 두 가지를 쓰라.
2. 물질 $W \rightarrow X \rightarrow Y \rightarrow Z$ 경로에서 $X \rightarrow Y$ 단계를 맡는 효소가 없는 균주는 최소 배지에 어떤 물질을 넣으면 자라는가? 이 균주에서 쌓일 것으로 예상되는 물질은?
3. 돌연변이가 a는 $E \cdot F \cdot G$ 가운데 G를 넣어야만, b는 F나 G를 넣으면, c는 $E \cdot F \cdot G$ 모두에서 자란다. 경로의 순서를 쓰라.
4. 인슐린은 A 사슬과 B 사슬 두 폴리펩타이드로 되어 있지만 유전자 하나에서 만들어진다. 이 사실이 1유전자 1폴리펩타이드설과 어긋나 보이는 까닭과, 실제로는 어떻게 설명되는지 추측해 쓰라(교과 밖 심화).

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 첨가 실험 논리는 4부의 두 기출에서 그대로 쓰인다. **기출문제 6**(성균관대 2016) (248쪽)의 3-ii는 영양 요구주 네 균주의 성장 표를 주고 대사 경로의 순서와 각 돌연변이가 끊는 단계를 묻는데, 물질마다 살리는 균주 수를 세는 이 장의 방법으로 바로 풀린다. **기출문제 4**(경희대 2020) (232쪽)은 유전자 1·2가 만드는 효소 1·2가 물질 ㉠ → ㉡ → ㉢의 두 단계를 맡는 경로에서, 세균마다 효소 활성이 달라질 때 색깔 표현형이 어떻게 되는지 묻는다. “끊긴 단계 앞은 쌓이고 뒤는 모자란다”는 이 장의 문장이 그 답의 출발점이다.

이 장의 참고문헌

Beadle, G. W., & Tatum, E. L. (1941). Genetic control of biochemical reactions in *Neurospora*.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 27(11), 499–506. <https://doi.org/10.1073/pnas.27.11.499>

Garrod, A. E. (1908). The Croonian lectures on inborn errors of metabolism. The Lancet, 172(4427), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(01\)78482-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)78482-6)

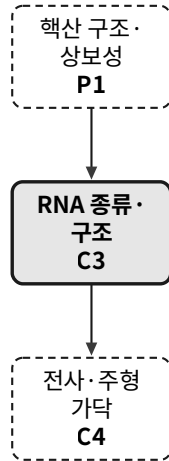
- Ingram, V. M. (1957). Gene mutations in human hæmoglobin: The chemical difference between normal and sickle cell hæmoglobin. *Nature*, 180(4581), 326–328. <https://doi.org/10.1038/180326a0>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.

제 3장 DNA와 RNA: 두 가닥과 한 가닥

새 개념 리보스와 우라실 · 5'→3' 방향 · 머리핀 구조 · mRNA · tRNA · rRNA

이어짐 전사 4장 · tRNA 10장 · 안티센스 14장

이 장의 개념도



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

그림 10. 제 3장에서 배우는 개념(C3 RNA 종류·구조)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

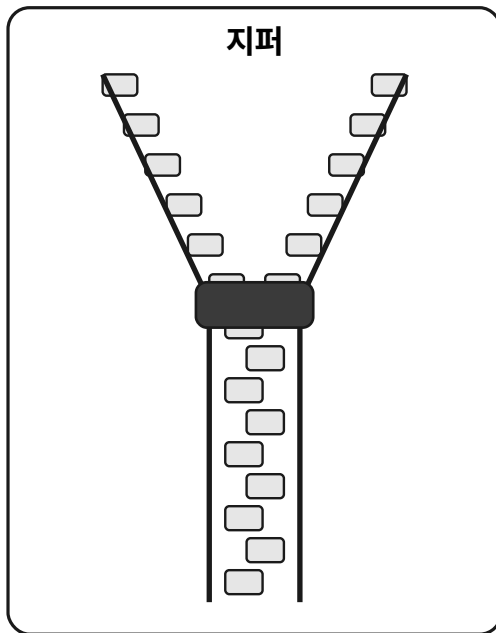
이 장의 개념이 쓰인 기출

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

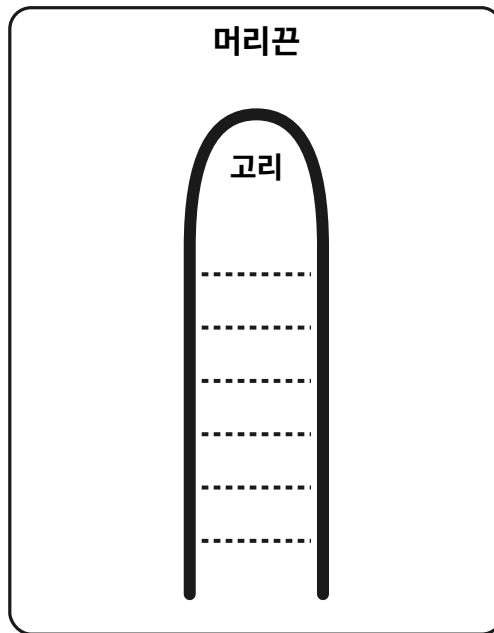
기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 7 (성균관대 2016년) (259쪽)	합성 mRNA · 인트론 · 상보적 RNA	C3 RNA 종류·구조
기출 8 (부산대 2015년) (268쪽)	역번역의 경우의 수와 RNA 구조	C3 RNA 종류·구조
기출 11 (고려대 2011년) (299쪽)	종결 코돈 돌연변이와 억제 tRNA	C3 RNA 종류·구조

점퍼 지퍼와 접히는 머리끈

두 가닥이 맞물리는 것과 한 가닥이 제 몸끼리 접히는 것



① 양쪽 이가 맞물려야 잠긴다
= 두 가닥 DNA



② 한 가닥이 접혀 제 몸끼리
짹 = RNA 머리핀

하린

지퍼는 양쪽 이가 있어야 잠기잖아요

태오

한 줄짜리 끈은 제 몸끼리 꼬이고

석 교수

RNA는 한 가닥이라 제 몸의
상보 서열끼리 짹을 짓는다

이모

그래서 RNA가
여러 모양이 되는군요

③ 상보 서열은 뒤집어 읽어야 짹이 맞는다

5'-GCAUCC ... GGAUGC-3' → 뒤쪽을 거꾸로 읽으면 CGUAGG

그림 11. 점퍼 지퍼와 접히는 머리끈 — 지퍼는 양쪽 이가 서로 맞물려야 잠기고(두 가닥 DNA), 한 줄짜리 머리끈은 제 몸끼리 접혀 고리를 만든다(한 가닥 RNA의 머리핀)(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. DNA는 두 가닥이 방향을 반대로 하여 염기끼리 짹을 짓는다.
2. RNA는 한 가닥이어서 같은 가닥 안의 상보 서열끼리 짹지어 머리핀 같은 모양을 만든다.
3. 상보 서열은 방향을 뒤집어 읽어야 짹이 맞는다.

이 장의 출발점

- DNA → RNA → 단백질의 흐름(중심 원리)과 DNA·RNA의 염기 네 가지(**기본개념편 제 1장** (17쪽)).
- 염기쌍 규칙: A는 T와, G는 C와 짝을 짓는다(중학교 과학).
- 수소 결합은 공유 결합보다 훨씬 약해서 열이나 힘으로 쉽게 풀린다는 것.

하린이 점퍼 지퍼를 올리다 말고 한참을 씨름했다. 한쪽 이가 어긋나 아래까지 다시 내렸다가 올려야 했다. 옆에서 태오는 머리카락을 손가락에 감았다가 놓았고, 끈은 저절로 꼬여 작은 고리가 되었다. 석 교수가 웃으며 두 사람의 손을 가리켰다. “오늘 공부할 두 분자가 지금 너희 손에 다 있구나.”

하린 지퍼가 DNA예요? 양쪽 이가 맞물리니까요?

석 교수 그렇다. DNA는 두 가닥이 염기끼리 맞물린 지퍼다. 그리고 태오 손의 머리카락은 한 가닥짜리 RNA를 닮았다. 짝이 될 반대편 가닥이 없으니, 제 몸의 다른 부분과 짝을 지어 접한다.

이모 둘 다 핵산이라면서요. 그런데 왜 하나는 두 가닥이고 하나는 한 가닥이예요?

석 교수 하는 일이 다르기 때문이다. DNA는 원본이라 오래 안전하게 보관해야 하고, RNA는 베낀 쪽지라 쓰고 버리기도 하고, 여러 모양으로 접혀 일을 하기도 한다. 오늘은 구조의 차이가 기능의 차이로 이어지는 모습을 차례로 보자. 특히 “방향”을 정확히 익혀 두면 9장까지 이어지는 서열 문제에서 실수가 크게 줄어든다(**기본개념편 제 9장** (92쪽)).

3.1 뉴클레오타이드의 세 부분

석 교수 DNA와 RNA의 단위체는 둘 다 **뉴클레오타이드**다. 뉴클레오타이드는 세 부분으로 되어 있다. 인산, 탄소 다섯 개짜리 당, 그리고 염기다.

태오 당이 DNA와 RNA에서 다르죠? 이름이 디옥시리보스와 리보스요.

석 교수 그렇다. 당의 탄소 다섯 개에 1'부터 5'까지 번호를 붙인다. 염기와 구별하려고 숫자에 프라임(')을 붙여 ‘1프라임’이라고 읽는다. 리보스는 2' 탄소에 -OH가 붙어 있고, 디옥시리보스는 그 자리에 -H만 있다. ‘디옥시’는 산소 하나가 빠졌다는 뜻이다.

하린 산소 하나 차이가 그렇게 중요해요?

석 교수 중요하다. 2'의 -OH는 반응성이 커서, 바로 옆 인산과의 결합을 공격해 사슬을 끊을 수 있다. 그래서 RNA는 DNA보다 쉽게 분해된다. 원본은 오래 가야 하니 그 -OH를 뺀 디옥시리보스를 쓰고, 쪽지는 빨리 쓰고 버리는 편이 조절에 유리하니 리보스를 쓰는 셈이다.

이모 염기도 하나가 다르다고 했죠? T 대신 U요.

석 교수 DNA는 A·G·C·T, RNA는 A·G·C·U를 쓴다. U는 우라실, T는 타이민인데, 타이민은 우라실에 메틸기(-CH₃) 하나가 더 붙은 모양이다. 짝짓는 상대는 둘 다 A로 같다. 염기는 고리 두 개짜리 **퓨린**(A, G)과 고리 하나짜리 **피리미딘**(C, T, U)으로 나뉘고, 짝은 언제나 퓨린 하나와 피리미딘 하나가 만난다.

태오 그래서 이중 나선의 폭이 일정한 거군요. 큰 거 하나, 작은 거 하나씩이니까요.

석 교수 그렇다. 당과 인산이 번갈아 이어진 뼈대는 나선의 바깥에, 염기는 안쪽에서 서로 마주 본다. 이웃한 염기쌍 사이의 거리는 0.34 nm이고, 약 10.5쌍마다 나선이 한 바퀴 돈다.

하린 0.34 nm면 유전자 하나는 얼마나 길어요?

석 교수 계산해 보렴. 1,500 bp짜리 유전자라면?

하린 $1,500 \times 0.34 \text{ nm} = 510 \text{ nm}$ 예요. $0.51 \mu\text{m}$ 요. 나선은 $1,500 \div 10.5 = \text{약 } 143$ 바퀴 돌고요.

석 교수 맞다. 같은 방법으로 사람 유전체 한 벌 $3.1 \times 10^9 \text{ bp}$ 를 늘이면 $3.1 \times 10^9 \times 0.34 \times 10^{-9} \text{ m} = \text{약 } 1.05 \text{ m}$, 두 벌이면 약 2 m다. 지름 몇 μm 의 핵에 2 m의 실이 감겨 들어 있는 셈이다. 덧붙여, 한 가닥 RNA를 곧게 잡아당기면 이웃 염기 사이가 약 0.5 nm로 이중 나선의 0.34 nm보다 길어진다. 이 값은 머리핀을 잡아당겨 푸는 기출 문제에서 쓰인다.

석 교수 두 분자의 차이를 표 8에 정리했다.

표 8. DNA와 RNA의 비교 — 당, 염기, 가닥, 구조의 다양성, 수명, 기능

구분	DNA	RNA
당	디옥시리보스(2'에 -H)	리보스(2'에 -OH)
염기	A·G·C·T	A·G·C·U
가닥	두 가닥(역평행 이중 나선)	한 가닥(같은 가닥 안에서 부분적으로 짝)
구조의 다양성	거의 일정한 이중 나선	머리핀·고리 등 다양한 입체 구조
수명	길다(세포가 사는 동안 보관)	짧다(몇 분~며칠, 종류에 따라 다름)
주된 기능	유전 정보의 원본	정보 전달(mRNA), 아미노산 운반(tRNA), 리보솜 구성(rRNA)

3.2 방향이 있는 사슬: 5' 끝과 3' 끝

석 교수 뉴클레오타이드끼리는 한 뉴클레오타이드의 3' 탄소에 붙은 -OH와 다음 뉴클레오타이드의 5' 탄소에 붙은 인산이 결합하며 이어진다. 그래서 사슬의 한쪽 끝에는 5' 인산이, 다른 쪽 끝에는 3' -OH가 남는다. 이것을 **5' 끝**, **3' 끝**이라고 부른다.

하린 기차처럼 앞과 뒤가 정해져 있는 거예요?

석 교수 바로 그거다. 같은 글자 ATG라도 5'-ATG-3'와 5'-GTA-3'는 다른 서열이다. 그래서 서열을 쓸 때는 반드시 양 끝에 5'과 3'을 붙이고, 아무 표시가 없으면 왼쪽이 5' 끝이라는 약속을 따른다.

태오 DNA 두 가닥은 방향이 서로 반대라고 배웠어요.

석 교수 그것을 **역평행**이라고 한다. 그림 12의 위쪽을 보자. 위 가닥이 왼쪽 5'에서 오른쪽 3'로 가면, 아래 가닥은 왼쪽이 3', 오른쪽이 5'이다. 아래쪽에는 짝이 없는 한 가닥 RNA를 그려 두었다.

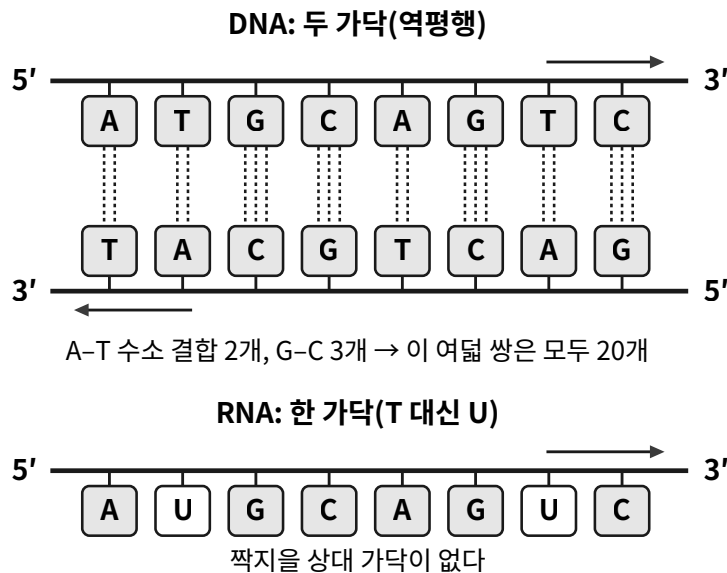


그림 12. DNA 이중 가닥과 RNA 단일 가닥 — DNA의 두 가닥은 방향이 반대(역평행)이며 A-T(수소 결합 2개), G-C(3개)로 짝을 짓는다. RNA는 T 대신 U를 쓰는 한 가닥이고 짝지을 상대 가닥이 없다

- 이모** 그럼 한 가닥을 알면 다른 가닥은 어떻게 써요? 글자만 바꾸면 되는 거 아니에요?
- 석 교수** 많은 학생이 거기서 틀린다. 글자만 바꾸면 방향이 반대인 서열이 나온다. 5'-ATGC-3'의 상보 가닥을 글자만 바꾸면 TACG인데, 이 글자들은 원래 가닥과 마주 보고 있으니 왼쪽이 3' 끝이다. 곧 3'-TACG-5'다. 이걸 약속대로 5'부터 쓰려면 뒤집어야 한다.
- 태오** 5'-GCAT-3'이네요. “뒤집고 바꾼다”.
- 석 교수** 그렇다. 상보 서열을 5' → 3'로 쓰는 요령은 “원래 서열을 오른쪽 끝부터 거꾸로 읽으며 짝 글자로 바꾼다”이다. 순서를 바꾸어 “바꾸고 뒤집어도” 결과는 같다. RNA로 쓰라고 하면 T 자리에 U를 쓰면 된다.
- 태오** 짝이 정해져 있으니까 염기 비율에도 규칙이 있겠네요.
- 석 교수** 있다. 두 가닥 DNA 전체에서는 A의 수와 T의 수가 같고, G의 수와 C의 수가 같다. A가 있는 자리 맞은편에는 반드시 T가 있으니까. 1950년 무렵 샤가프가 여러 생물의 DNA를 분석해 이 규칙을 먼저 찾았고, 왓슨과 크릭의 이중 나선은 그 까닭을 설명했다.
- 이모** 그럼 하나만 알면 나머지를 다 알 수 있어요?
- 석 교수** 해 보자. 어떤 두 가닥 DNA에서 A가 전체 염기의 30 %라면 나머지는?
- 하린** T도 30 %예요. 그럼 G와 C가 합쳐서 $100 - 60 = 40$ %이고, 둘이 같으니까 20 %씩이에요.
- 석 교수** 정확하다. 그런데 같은 계산을 RNA나 한 가닥 DNA에 하면 틀린다. 한 가닥 안에서는 A와 T(U)가 짝을 이룰 의무가 없어서 비율이 제멋대로다. 기출에서 “이 핵산은 A와 U의 비율이 다르므로 한 가닥이다” 같은 추론을 요구하기도 한다.
- 태오** 짝이 많으면 두 가닥이 더 단단히 붙어 있겠네요. G-C는 수소 결합이 세 개니까요.
- 석 교수** 그렇다. 염기쌍 20개짜리 DNA 조각에서 G-C 쌍이 12개, A-T 쌍이 8개라면 수소 결합은 $12 \times 3 + 8 \times 2 = 36 + 16 = 52$ 개다. G-C 쌍이 4개뿐이면 $4 \times 3 + 16 \times 2 = 44$ 개로 줄어든다. 그래서 G-C 비율이 높은 DNA일수록 두 가닥을 떼어 내는 데 더 높은 온도가 필요하다. 이 차이는 PCR 같은 실험에서 온도를 정할 때 실제로 쓰인다.

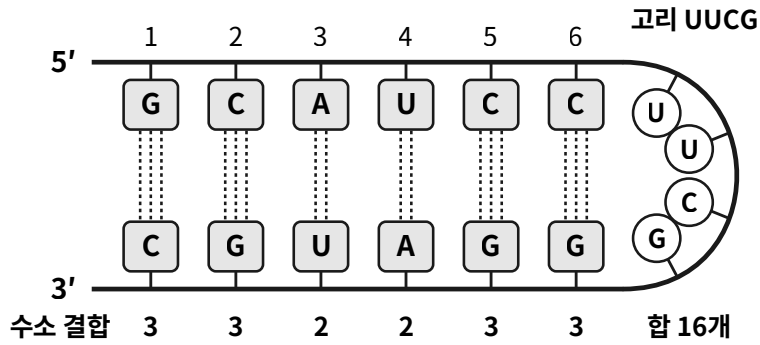
문제 3.1

DNA 가닥 5'-ATGCCGTA-3'에 상보적인 RNA를 5' → 3' 방향으로 쓰라.

- 하린** 글자를 바꾸면 TACGGCAT이고, T를 U로 하면 UACGGCAU예요. 그런데 뒤집어야 하죠?
- 석 교수** 해 보자. 원래 서열을 오른쪽 끝부터 읽으면?
- 하린** A, T, G, C, C, G, T, A... 어, 원래 서열이랑 똑같아요!
- 석 교수** 그렇다. 이 서열은 뒤집어 읽어도 같은 글자가 나오는 특별한 경우다. 그래도 순서대로 하자. 거꾸로 읽은 ATGCCGTA를 짝 글자로 바꾸면 TACGGCAT, T를 U로 바꾸면?
- 태오** 5'-UACGGCAU-3'이요. 이번에는 뒤집어도 안 뒤집어도 글자가 같아서 운 좋게 맞는 거고요.
- 석 교수** 정답은 5'-UACGGCAU-3'이다. 다만 이 문제에서 우연히 맞았다고 다른 서열에서도 뒤집기를 빼먹으면 틀린다. 예를 들어 5'-AAGC-3'의 상보 RNA는 5'-GCUU-3'인데, 글자만 바꾼 UUCG를 5'부터 쓴 것이라 착각하면 틀린 답이다. 답을 쓴 뒤 두 서열을 위아래로 맞대어 5'과 3'이 서로 반대인지, 모든 자리가 짝인지 확인하는 것이 가장 확실한 검산이다.
- 이모** 글자 바꾸고, 방향 확인하고, T를 U로. 세 가지만 기억하면 되겠네요.
- 석 교수** 하나만 덧붙이자. DNA 가닥과 RNA 가닥도 서로 짝을 지을 수 있다. 이것을 **혼성 이중 가닥**이라고 한다. 이때 DNA의 A 맞은편에는 RNA의 U가, DNA의 T 맞은편에는 RNA의 A가 온다. 4장에서 배울 전사 도중에 잠깐 생기는 것이 바로 이 DNA-RNA 혼성이고, 실험실에서 특정 RNA를 찾아낼 때도 이 성질을 쓴다(**기본개념편 제 4장** (45쪽)).
- 태오** 그럼 혼성 가닥에서 A-U 짝은 몇 개, A-T 짝은 몇 개인지 세는 문제도 나오겠네요.
- 석 교수** 실제로 나온다. DNA 쪽에 A가 있으면 RNA 쪽은 U, DNA 쪽에 T가 있으면 RNA 쪽은 A이니, 두 경우 모두 수소 결합은 2개다. 짝의 종류 이름만 다를 뿐 셈은 같다.

3.3 한 가닥 RNA는 스스로 접힌다

- 석 교수** 이제 머리끈 차례다. RNA는 한 가닥이라 짝을 지을 상대 가닥이 없다. 그런데 한 가닥 안에 서로 상보적인 두 구간이 있으면, 가닥이 반으로 접히며 그 두 구간이 짝을 짓는다. 짝지은 부분을 **줄기**, 접힌 끝에 짝 없이 남은 부분을 **고리**라 하고, 둘을 합쳐 **머리핀 구조**라고 한다. **그림 13**에 예를 그렸다.



줄기 6쌍: 위 1~6번이 아래 16~11번과 역평행으로 짝

그림 13. RNA 5'-GCAUCCUUCGGAUGC-3'가 만드는 머리핀 — 앞쪽 여섯 염기와 뒤쪽 여섯 염기가 접히며 G-C, C-G, A-U, U-A, C-G, C-G의 줄기 6쌍을 이루고(수소 결합 $3+3+2+2+3+3 = 16$ 개), 가운데 UUCG 네 염기가 고리가 된다

하린 앞쪽 GCAUCC와 뒤쪽 GGAUGC가 짝이에요? 글자가 비슷해 보이는데요.

석 교수 접히면 뒤쪽 구간은 방향이 반대로 돌아온다. 그래서 뒤쪽을 거꾸로 읽어야 짝이 보인다. GGAUGC를 거꾸로 읽으면?

하린 CGUAGG예요. 앞쪽 GCAUCC와 맞대 보면 G-C, C-G, A-U, U-A, C-G, C-G. 다 짝이에요!

석 교수 아까 배운 “뒤집고 바꾼다”가 한 가닥 안에서도 그대로 통한다. 같은 가닥의 두 구간이 역평행으로 마주 보는 거지.

이모 긴 RNA에서 머리핀이 어디 생길지는 어떻게 찾아요?

석 교수 서열 안에서 “앞쪽 구간을 뒤집고 바꾼 것”이 조금 뒤에 다시 나오는지를 찾는다. 이런 짝을 거꾸로 된 반복, 곧 **역위 반복**이라고 한다. 이 서열에서는 앞의 GCAUCC를 뒤집고 바꾸면 GGAUGC가 되는데, 그 글자가 고리 네 개를 건너 실제로 뒤쪽에 있다. 시험에서 서열이 길게 주어진다면 처음 몇 글자의 상보 서열을 만들어 놓고 뒤쪽에서 그 글자를 찾는 것이 가장 빠르다.

태오 그러면 이 머리핀은 얼마나 단단해요?

석 교수 대략 수소 결합 수로 비교할 수 있다. 다음 문제로 확인하자.

문제 3.2

RNA 5'-GCAUCCUUCGGAUGC-3'는 머리핀 구조를 만든다. 줄기의 염기쌍 수와 줄기에 있는 수소 결합의 수를 구하라(A-U는 2개, G-C는 3개).

태오 줄기 쌍이 G-C, C-G, A-U, U-A, C-G, C-G로 여섯 쌍이에요. G-C 계열이 네 쌍, A-U 계열이 두 쌍이니깐 $4 \times 3 + 2 \times 2 = 12 + 4 = 16$ 개요.

석 교수 정답이다. 줄기 6쌍, 수소 결합 $3 + 3 + 2 + 2 + 3 + 3 = 16$ 개. 염기 16개 가운데 12개가 줄기, 4개가 고리다. 계산으로 $12 + 4 = 16$ 이 전체 길이와 맞는지도 보자.

하린 맞아요. 그런데 고리를 더 짧게, 두 개만 남기고 접으면 안 돼요?

- 석 교수** 좋은 질문이다. 가닥이 너무 급하게 꺾일 수는 없어서, 고리에는 보통 염기가 적어도 서너 개 필요하다. UUCG 같은 네 염기 고리는 특히 안정한 고리로 알려져 있다. 그리고 실제 RNA에서 짝을 짓는 힘은 수소 결합 수만으로 정해지지 않고, 이웃 염기쌍끼리 겹쳐 쌓이는 힘이 크게 보탠다. 논술 수준에서는 “G-C 쌍이 많을수록 줄기가 안정하다”까지 쓰면 충분하다.
- 이모** RNA가 접혀서 모양을 만드는 게 왜 중요해요? 쪽지는 그냥 펴져 있어야 읽기 좋을 텐데요.
- 석 교수** 쪽지 역할을 하는 mRNA에서는 너무 단단한 머리핀이 오히려 번역을 방해하기도 한다. 하지만 일을 하는 RNA에게는 접힌 모양이 곧 기능이다. 대표가 tRNA다. tRNA는 염기 약 76개 길이인데, 머리핀 셋과 줄기 하나가 모여 네잎클로버처럼 생긴 **클로버잎 구조**를 이룬다. 그 가운데 한 고리에 코돈을 읽는 안티코돈이 있고, 3' 끝에 아미노산이 붙는다. 10장에서 자세히 본다(**기본개념편 제 10장** (102쪽)).
- 태오** RNA에서는 G-U 짝도 생긴다고 들었어요.
- 석 교수** 맞다. RNA의 줄기에서는 G와 U가 수소 결합 두 개로 약하게 짝짓는 경우가 있다. 퓨린과 피리미딘의 짝이긴 하지만 모양이 조금 비뚤어져 있어서, 줄기 중간에 끼면 나선이 살짝 휘다. 이 G-U 짝이 10장의 흔들림 짝짓기로 이어진다. DNA 이중 나선에서는 보기 드물다.

3.4 RNA의 세 종류

- 석 교수** 세포 안의 RNA는 하는 일에 따라 셋으로 나눈다. **mRNA**(전령 RNA)는 유전자의 정보를 베껴 리보솜으로 나르는 쪽지다. **tRNA**(운반 RNA)는 아미노산을 리보솜으로 실어 와 코돈과 짝을 맞춘다. **rRNA**(리보솜 RNA)는 단백질과 함께 리보솜을 이루는 뼈대이자, 아미노산을 잇는 반응을 실제로 일으키는 일꾼이다.
- 하린** 셋 중에 뭐가 제일 많아요?
- 석 교수** 대장균 세포의 RNA를 모두 모아 무게로 따지면 대부분이 rRNA다. 리보솜이 세포 하나에 수만 개나 있기 때문이다. tRNA가 그다음이고, mRNA는 몇 %밖에 안 된다. 정보를 나르는 쪽지가 가장 적다는 게 뜻밖이지?
- 태오** mRNA는 빨리 분해되니까 늘 조금만 있는 거네요.
- 석 교수** 그렇다. mRNA는 종류는 수천 가지로 가장 다양하지만 한 종류당 양은 적고 수명이 짧다. 반면 rRNA와 tRNA는 종류가 적고 오래 남아 계속 재사용된다.
- 하린** 길이도 서로 달라요?
- 석 교수** 많이 다르다. tRNA는 약 76염기로 가장 짧다. 대장균 리보솜의 rRNA는 작은 단위체에 약 1,500염기짜리 하나, 큰 단위체에 약 2,900염기짜리와 약 120염기짜리가 들어 있다. mRNA는 그것이 담은 단백질의 길이에 따라 수백에서 수천 염기다. 1장에서 계산한 β-글로빈의 암호 부분 444염기처럼, 단백질이 길수록 mRNA도 길다.
- 이모** 그럼 리보솜은 단백질이 아니라 RNA가 주인공이에요?
- 석 교수** 리보솜 무게의 절반 이상이 rRNA이고, 펩타이드 결합을 만드는 자리도 rRNA로 되어 있다. 그래서 RNA는 정보도 담고 일도 하는 분자다. DNA는 정보만, 단백질은 일만 하는데 비하면 독특하지. 생명이 처음 생길 때 RNA가 두 역할을 다 했을 거라는 생각도 그래서 나왔다(교과 밖 심화).

핵심 핵산 서열 문제를 푸는 네 단계

1. 주어진 가닥이 DNA인지 RNA인지 확인한다. RNA면 T 대신 U를 쓴다.
2. 양 끝의 5'과 3'을 반드시 적는다. 표시가 없으면 왼쪽이 5'이다.
3. 상보 서열을 5' → 3'로 쓸 때는 원래 서열을 오른쪽 끝부터 거꾸로 읽으며 짝 글자로 바꾼다 (뒤집고 바꾼다).
4. 두 서열을 위아래로 맞대어 방향이 반대인지, 모든 자리가 짝인지로 검산한다. 한 가닥 안의 머리핀도 같은 규칙으로 찾는다.

스스로 풀어 보기

1. DNA와 RNA의 당이 다른 자리와 그 차이가 RNA의 수명에 주는 영향을 한 문장으로 쓰라.
2. DNA 가닥 5'-GGATCCTA-3'의 상보 DNA 가닥을 5' → 3'로 쓰라.
3. RNA 5'-CCGAGAAAUCUCGG-3'가 머리핀을 만들 때 줄기 염기쌍 수, 고리 염기, 줄기의 수소 결합 수를 구하라.
4. 대장균의 세 가지 RNA 가운데 세포 안 양이 가장 많은 것과 가장 적은 것을 쓰고, 그 까닭을 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 방향 규칙과 RNA 접힘은 4부의 세 기출에서 쓰인다. **기출문제 8**(부산대 2015) (268쪽)의 3-3은 DNA 가닥에 상보적인 RNA 서열을 쓰고, RNA가 한 가닥이어서 같은 가닥 안의 염기끼리 수소 결합해 다양한 입체 구조를 만든다는 점을 설명하게 한다. 이 장의 “뒤집고 바꾼다”와 머리핀이 그 답이다. **기출문제 7**(성균관대 2016) (259쪽)의 4-iii은 mRNA에 상보적인 RNA가 들어오면 두 가닥이 짝을 지어 번역이 막히는 까닭을 묻는데, 상보 서열이 역평행으로 짝을 짓는다는 이 장의 그림이 출발점이다. **기출문제 11**(고려대 2011) (299쪽)는 RNA 머리핀을 잡아당겨 풀 때의 힘과 거리에서 염기쌍 수를 추론하는 고난도 문항으로, 줄기의 염기쌍 수를 세는 이 장의 연습이 바탕이 된다.

이 장의 참고문헌

- Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171(4356), 737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
- 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.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). Macmillan Learning.
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.

제 4장 전사: 유전자를 RNA로 베끼기

새 개념 주형 가닥·암호 가닥·RNA 중합효소·프로모터·5'→3' 합성

이어짐 RNA 구조 3장·서열 변환 9장·프로모터 돌연변이 12장

이 장의 개념도

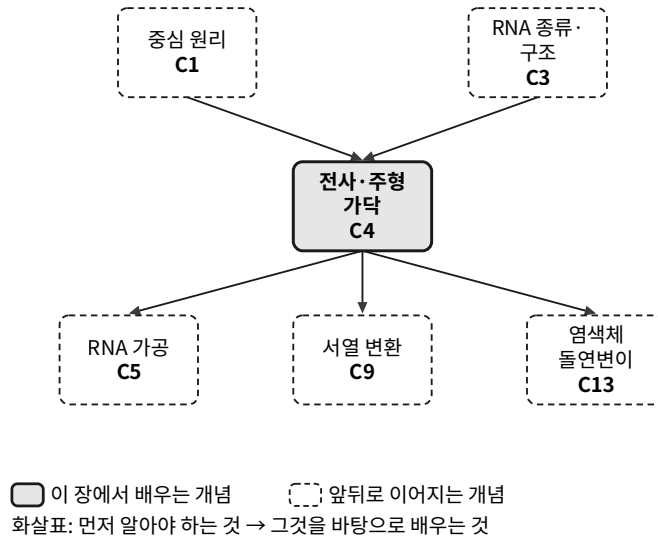


그림 14. 제 4장에서 배우는 개념(C4 전사·주형 가닥)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

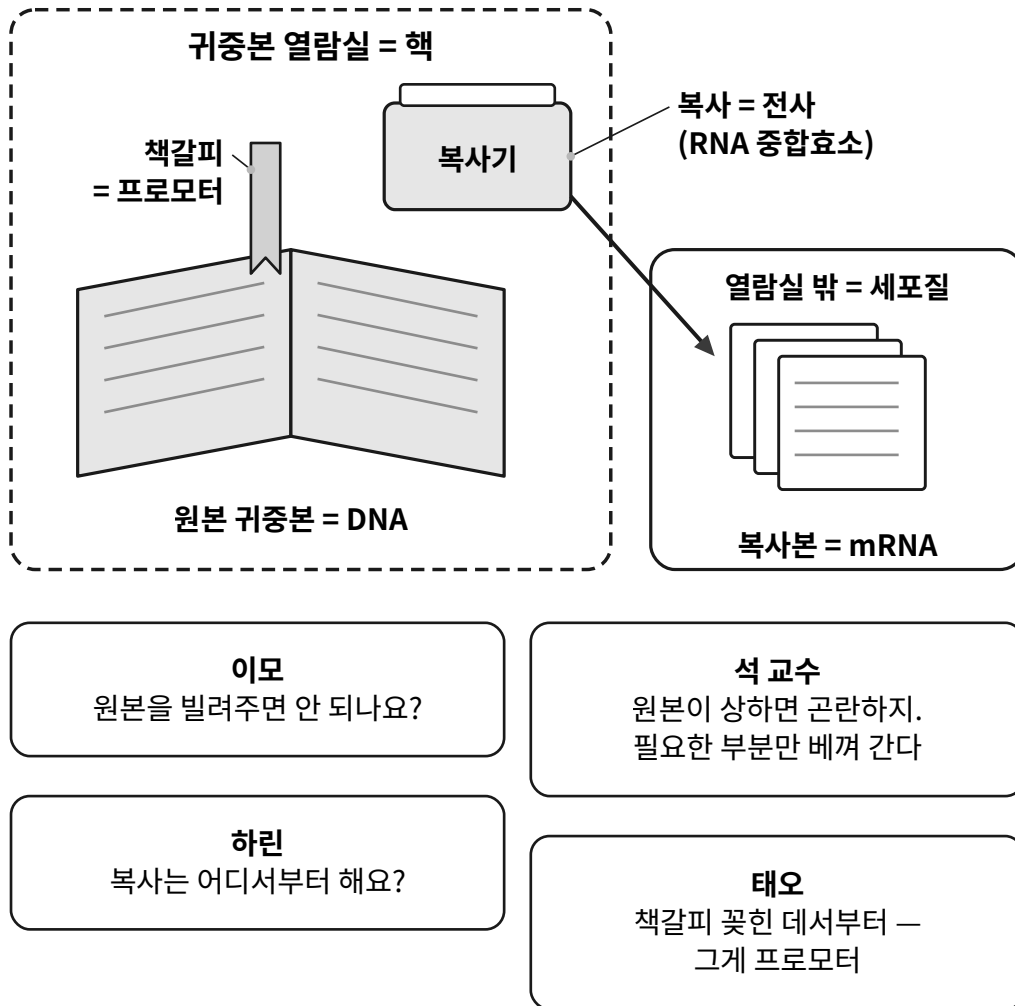
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 2024년) (205쪽)	바뀐 합성효소와 번역의 신장 단계	C4 전사·주형 가닥
기출 2 (연세대 미래캠퍼스 2023년) (213쪽)	항체 곡선과 바이러스 껍질 단백질 번역	C4 전사·주형 가닥
기출 5 (연세대 2019년) (240쪽)	동형접합 자손의 표현형과 중심 원리	C4 전사·주형 가닥
기출 6 (성균관대 2016년) (248쪽)	저항성 가설·영양 요구주·틀이동	C4 전사·주형 가닥

도서관 귀중본과 복사본

원본은 열람실 안에, 필요한 쪽만 복사해 밖으로



- ① 전사는 DNA의 필요한 부분(유전자)만 RNA로 베긴다
- ② 베끼기는 프로모터에서 시작한다
- ③ 원본 DNA는 핵에 남고 복사본 mRNA만 나간다

그림 15. 도서관 귀중본과 복사본 — 귀중본은 열람실 밖으로 내보내지 않고, 책갈피가 꽂힌 쪽부터 필요한 부분만 복사해 가져간다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 전사는 DNA 전체가 아니라 필요한 한 부분(유전자)만 RNA로 베긴다.
2. RNA 중합효소는 책갈피에 해당하는 프로모터에 붙어 베끼기를 시작한다.
3. 원본 DNA는 핵에 남고 복사본인 mRNA만 세포질로 나간다.

이 장의 출발점

- DNA 두 가닥은 역평행이고, 상보 서열은 “뒤집고 바꾸어” 5' → 3'로 쓴다(**기본개념편 제 3장** (36쪽)).
- RNA는 리보스와 U를 쓰는 한 가닥 사슬이다(**기본개념편 제 3장** (36쪽)).
- 효소는 정해진 기질에만 작용하고, 반응의 방향을 한쪽으로 정해 준다는 것.
- DNA 복제에서 새 가닥은 원래 가닥을 주형으로 짝지어 만들어진다는 것(중학교 과학 수준).

토요일 오후, 석 교수는 읍내 도서관에서 빌려 온 복사본 몇 장을 탁자에 펼쳤다. 백 년도 넘는 지역 향토지의 몇 쪽이었다. “원본은 귀중본 열람실 밖으로 못 나간다더구나. 필요한 쪽을 말하니 사서가 책갈피를 꽂아 두고 그 쪽만 복사해 주었다.” 하린은 복사본 귀퉁이에 찍힌 ‘복사본’ 도장을 손가락으로 짚어 보았다.

이모 원본을 그냥 빌려주면 안 되나요? 복사하는 것도 일인데요.

석 교수 원본이 상하면 모두가 곤란하지. 그래서 필요한 부분만 베껴 간다. 세포도 똑같다. 원본 DNA는 핵 밖으로 내보내지 않고, 필요한 유전자 한 부분만 RNA로 베껴서 세포질로 보낸다. 이 베끼기가 오늘 배울 **전사**다.

하린 복사는 어디서부터 해요? 아무 데서나 시작해요?

태오 책갈피 꽂힌 데서부터지. 그게 프로모터고.

석 교수 태오가 한발 앞서 갔구나. 오늘은 세 가지를 정확히 하자. 두 가닥 중 어느 쪽을 베끼는지, 어디서 시작하고 어디서 멈추는지, 그리고 어느 방향으로 베끼는지. 특히 세 번째, 방향이 기출에서 가장 많이 틀리는 곳이다.

4.1 두 가닥 중 하나만 베낀다: 주형 가닥과 암호 가닥

석 교수 DNA는 두 가닥인데, 한 유전자를 전사할 때 RNA 중합효소는 두 가닥 가운데 한 가닥만 읽는다. RNA가 만들어질 때 짝을 맞추는 바탕이 되는 가닥을 **주형 가닥**, 그 맞은편 가닥을 **암호 가닥**이라고 한다.

하린 왜 이름이 암호 가닥이에요? 읽히지도 않는 쪽인데요.

석 교수 좋은 질문이다. 주형 가닥을 짝지어 베끼면 새 RNA는 주형 가닥과 상보적이 된다. 그런데 주형 가닥과 상보적인 서열이 바로 맞은편 가닥, 곧 암호 가닥의 서열이다. 그래서 mRNA의 서열은 T가 U로 바뀐 것만 빼면 암호 가닥과 똑같다. 코돈이 적힌 그대로 읽히는 쪽이라서 암호 가닥이라 부른다. 교재에 따라 비주형 가닥, 센스 가닥이라고도 한다.

태오 그러니까 세 가닥의 관계가 “주형과는 상보, 암호와는 같음(T → U)”이네요.

석 교수 그 한 문장을 꼭 외워라. 9장에서 이 관계 하나로 모든 서열 변환 문제를 푼다(**기본개념편 제 9장** (92쪽)).

이모 그럼 한 DNA에서 항상 같은 쪽 가닥이 주형이에요?

석 교수 아니다. 유전자마다 다르다. 어떤 유전자는 위 가닥을, 그 옆 유전자는 아래 가닥을 주형으로 쓸 수 있다. 어느 가닥이 주형인지는 프로모터가 어느 방향을 향해 놓였느냐로 정해진다. 기출에서 “두 가닥 가운데 어느 것이 주형 가닥인지 판단하라”는 문제가 나오는 까닭이다.

하린 한쪽만 베끼면 다른 쪽 가닥은 왜 있어요? 필요 없잖아요.

- 석 교수** 둘째 가닥은 원본의 백업이다. 한 가닥이 손상되면 맞은편 가닥의 서열을 보고 고칠 수 있고, 복제할 때는 두 가닥이 모두 주형이 된다. 전사에서만 한쪽을 읽는 거야.
- 태오** 거꾸로, mRNA 서열을 알면 어느 가닥이 주형인지도 알 수 있겠네요.
- 석 교수** 그렇다. 두 가닥 DNA 5'-ATGCTT-3'/3'-TACGAA-5'에서 mRNA가 5'-AUGCUU-3'로 나왔다면, mRNA와 같은 서열인 위 가닥이 암호 가닥이고 아래 가닥이 주형 가닥이다. 반대로 mRNA가 5'-AAGCAU-3'였다면 어느 쪽이 주형이지?
- 하린** AAGCAU에서 U를 T로 바꾸면 AAGCAT이네요. 위 가닥에는 없는데... 아래 가닥을 5'부터 읽으면 AAGCAT이네요! 그럼 이번에는 아래 가닥이 암호 가닥이고 위 가닥이 주형이네요.
- 석 교수** 정확하다. mRNA와 같은 글자를 가진 가닥을 5'부터 읽어서 찾는 것, 그것이 주형 가닥 판별의 요령이다.

4.2 RNA 중합효소와 프로모터: 어디서 시작하고 어디서 멈추나

- 석 교수** 전사를 맡는 효소는 **RNA 중합효소**다. 이 효소는 DNA 위의 특정한 염기 서열인 **프로모터**를 알아보고 거기에 붙는다. 붙고 나면 DNA 이중 나선을 약 십여 염기쌍 정도 풀어 작은 거품처럼 벌린 다음, 주형 가닥의 염기에 맞는 리보뉴클레오타이드를 하나씩 가져와 잇는다. **그림 16**을 보자.

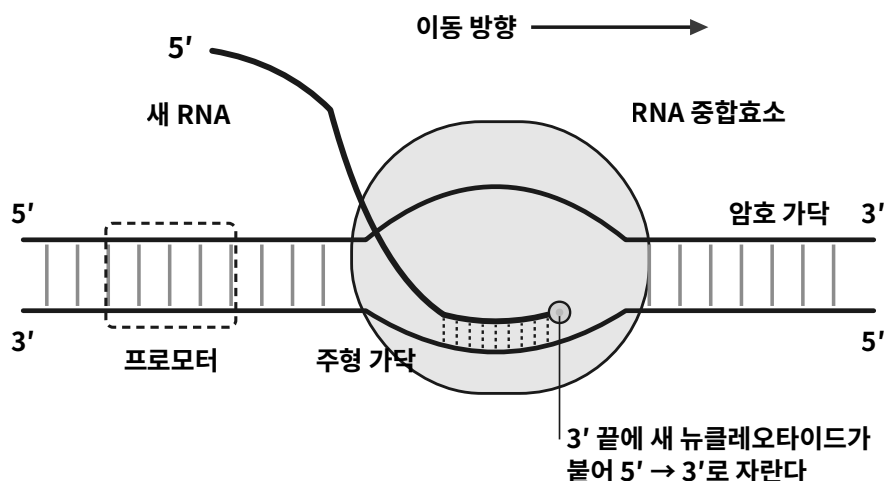


그림 16. 전사 거품 — RNA 중합효소가 프로모터에서 출발해 오른쪽으로 이동하며 DNA를 조금씩 풀고, 주형 가닥(아래)에 짝을 맞추어 RNA를 5' → 3' 방향으로 늘린다. 효소가 지나간 뒤 DNA는 다시 감기고, 새 RNA의 5' 끝은 DNA에서 떨어져 나간다(모식도)

- 하린** 거품 안에서만 RNA랑 DNA가 붙어 있네요. 뒤로는 RNA가 꼬리처럼 떨어져 나가고요.
- 석 교수** 그렇다. 거품 안에서는 새 RNA와 주형 가닥이 여덟 쌍 남짓 잠깐 짝지어 3장에서 말한 혼성 가닥을 이루고, 효소가 앞으로 가면 뒤쪽 RNA는 떨어져 나가 DNA는 다시 원래의 이중 나선으로 감긴다(**기본개념편 제 3장** (36쪽)). 그래서 전사가 끝나도 DNA는 아무 손상 없이 그대로다.
- 태오** 멈추는 곳은요?

석 교수 유전자 끝 쪽에 **종결자**라는 서열이 있다. 세균에서는 종결자 부분이 전사되면 RNA가 3장에서 본 머리핀을 만들고, 그 직후 효소와 RNA가 DNA에서 떨어져 나가는 방식이 대표적이다. 진핵세포는 조금 더 복잡한 방식을 쓰는데, 원리는 “정해진 신호에서 멈춘다”로 같다. 프로모터와 종결자는 전사를 시작하고 끝내는 신호일 뿐이라서, 그 자체는 mRNA의 코돈으로 번역되지 않는다. 책갈피와 ‘여기까지’ 표시는 복사본의 본문이 아닌 것과 같다.

이모 복사기는 책갈피만 보고 시작하지만, 세포는 언제 복사할지도 정해야 하잖아요.

석 교수 정확하다. 세균의 RNA 중합효소는 시그마 인자라는 단백질과 함께 프로모터를 찾고, 진핵세포에서는 여러 **전사 인자**가 먼저 프로모터에 모여야 RNA 중합효소가 붙는다. 어떤 전사 인자가 모이느냐에 따라 그 유전자를 지금 베길지 말지가 정해지지. 그 조절 이야기는 유전자 발현 조절 단원의 몫이고, 여기서는 “프로모터가 없으면 시작 자체가 안 된다”만 기억하자.

하린 RNA 중합효소는 한 종류예요?

석 교수 세균은 한 종류가 mRNA, tRNA, rRNA를 모두 만든다. 진핵세포는 세 종류를 나누어 쓴다. RNA 중합효소 I 은 대부분의 rRNA를, II 는 mRNA를, III은 tRNA와 작은 rRNA를 만든다(교과 밖 심화). 세 효소가 알아보는 프로모터도 서로 다르다.

태오 DNA 복제할 때는 프라이머가 있어야 시작한다고 배웠는데, 전사도 그래요?

석 교수 전사에는 프라이머가 필요 없다. RNA 중합효소는 아무것도 없는 자리에서 첫 뉴클레오타이드 두 개를 바로 이을 수 있다. DNA 중합효소는 이미 있는 사슬의 3' 끝에만 덧붙일 수 있어서 짧은 RNA 프라이머가 먼저 있어야 하지. 두 과정을 표 10에 비교했다.

표 10. DNA 복제와 전사의 비교 — 주형, 효소, 재료, 산물, 프라이머, 범위

구분	DNA 복제	전사
주형	두 가닥 모두	한 유전자의 한 가닥(주형 가닥)
효소	DNA 중합효소	RNA 중합효소
재료	디옥시리보뉴클레오타이드(A·T·G·C)	리보뉴클레오타이드(A·U·G·C)
산물	두 가닥 DNA 두 분자	한 가닥 RNA
프라이머	필요	필요 없음
범위	유전체 전체를 한 번	필요한 유전자만, 여러 번 반복
합성 방향	새 가닥 5' → 3'	새 RNA 5' → 3'

이모 마지막 줄은 둘이 같네요. 새 가닥은 5' → 3'.

석 교수 그 줄이 다음 절의 주인공이다.

4.3 새 RNA는 5' → 3'로만 자란다

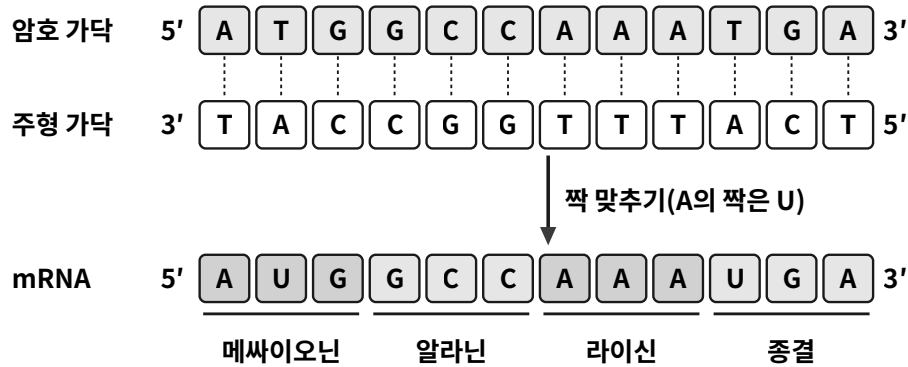
석 교수 3장에서 뉴클레오타이드끼리는 앞 뉴클레오타이드의 3' -OH에 다음 뉴클레오타이드의 5' 인산이 붙으며 이어진다고 했다. 그러니 사슬은 언제나 3' 끝 쪽으로만 길어진다. 새 RNA는 5' 끝에서 시작해 3' 끝 쪽으로 자란다. 이것을 **5' → 3' 합성**이라고 한다.

하린 그럼 주형 가닥은 어느 방향으로 읽혀요?

석 교수 새 RNA와 주형 가닥은 역평행으로 짝을 짓는다. 새 RNA가 5' → 3'로 자라면, 효소는 주형 가닥을 3' → 5' 방향으로 따라간다. 그림 16에서 주형 가닥은 왼쪽이 3'이고, 효소는 오른쪽, 곧 주형 가닥의 5' 쪽으로 움직인다.

태오 머리가 좀 복잡해요. 시험에서는 어떻게 맞춰요?

석 교수 세 단계로 맞춘다. 첫째, 주형 가닥의 5'과 3'을 확인한다. 둘째, mRNA는 주형과 반대 방향이므로 주형의 3' 끝 맞은편이 mRNA의 5' 끝이 되게 짝 글자를 쓴다. 셋째, T의 짝은 A, A의 짝은 U로 쓰고, mRNA를 5' → 3'로 정리한다. **그림 17**에 예를 하나 그렸다.



암호 가닥과 mRNA는 같은 서열(T 대신 U), 주형 가닥과는 상보

그림 17. 방향 맞추기의 예 — 주형 가닥 3'-TACCGTTTACT-5'의 맞은편에 짝 글자를 쓰면 mRNA 5'-AUGGCCAAUGA-3'가 되고, 세 염기씩 읽으면 메싸이오닌-알라닌-라이신에 이어 종결 코돈 UGA가 나온다. 암호 가닥 5'-ATGGCCAAATGA-3'는 mRNA와 같은 서열이다(T 대신 U)

이모 주형이 3'부터 적혀 있으니까 맞은편은 자연스럽게 5'부터 시작하네요.

석 교수 이 예는 주형 가닥을 일부러 3' → 5'로 주었다. 그러면 글자만 바꾸어 왼쪽부터 쓰면 바로 5' → 3' mRNA가 된다. 문제는 주형 가닥이 5' → 3'로 주어질 때다. 그때는 3장의 “뒤집고 바꾼다”를 써야 한다.

문제 4.1

어떤 유전자의 주형 가닥이 3'-TACCGTTTACT-5'이다. 이 부분에서 만들어지는 mRNA의 서열을 5' → 3'로 쓰고, 첫 염기부터 세 개씩 읽었을 때의 아미노산 서열을 쓰라(AUG 메싸이오닌, GCC 알라닌, AAA 라이신, UGA 종결).

하린 T, A, C, C, G, G, T, T, A, C, T를 하나씩 바꾸면 A, U, G, G, C, C, A, A, A, U, G, A예요.

석 교수 방향은?

하린 주형이 3'부터 시작하니까, 맞은편 mRNA는 5'부터예요. 5'-AUGGCCAAUGA-3'요.

태오 세 개씩 끊으면 AUG, GCC, AAA, UGA. 메싸이오닌-알라닌-라이신, 그리고 UGA는 종결이니깐 아미노산이 없어요.

석 교수 정답이다. mRNA는 5'-AUGGCCAAUGA-3', 아미노산 서열은 메싸이오닌-알라닌-라이신이고 UGA에서 번역이 끝난다. 검산으로 암호 가닥과 비교해 보자. 암호 가닥은 주형과 상보이니 5'-ATGGCCAAATGA-3', T만 U로 바꾸면 mRNA와 똑같지?

이모 정말 똑같네요. 그럼 암호 가닥이 주어지면 그냥 T만 U로 바꾸면 되는 거예요?

석 교수 그렇다. 암호 가닥이 주어지면 가장 쉽다. 그런데 기출은 대개 주형 가닥을, 그것도 5' → 3'로 준다. 같은 주형을 5' → 3'로 쓰면 5'-TCATTTGGCCAT-3'다. 이걸 받은 학생이 방향을 무시하고 왼쪽부터 짝 글자를 써서 5'-AGUAAACCGGUA-3'라고 하면 어떻게 될까?

유전 암호 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

유전 암호 = 주형 가닥을 상보로 바꾸고, 5'→3'로 AUG부터 세 글자씩 읽어, 코돈표로 옮긴다

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 12문항(2011~2024학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 9문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 유전 암호인가
2. 유전자 하나, 효소 하나
3. DNA와 RNA: 두 가닥과 한 가닥
4. 전사: 유전자를 RNA로 베끼기
5. 진핵세포의 RNA 가공: 인트론을 잘라 내다
6. 세 글자 암호: 트리플렛과 읽기 틀
7. 암호를 풀다: 폴리U에서 코돈표까지

8. 코돈표 읽기와 축퇴성
9. 주형 가닥에서 아미노산 서열까지
10. tRNA와 아미노아실-tRNA 합성효소
11. 리보솜의 번역: 개시·신장·종결
12. 유전자 돌연변이: 한 글자가 바뀌면
13. 유전자형에서 표현형으로
14. 몸속·기술 속의 유전 암호, 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: 유전자 발현 조절 · DNA 구조·복제 · 멘델 유전 · 효소 · 면역·백신 · 생명 공학



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 979-11-23065-00-7

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역 — 전체 340쪽

ssbook.kr/book/nonsul-01

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

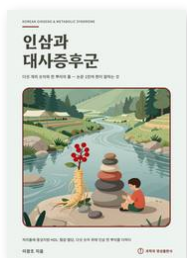
인삼 (6)



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

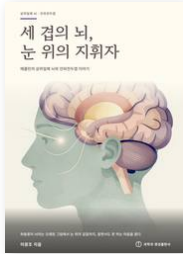
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



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 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 — 못은 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 반
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