



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA · 생명 공학

제한 효소의 인식 · 절단 × 조각 길이로 위치 추론 × 재조합 · 판별 실험 설계

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-05

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

재조합 DNA · 생명 공학



생명 공학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 5문항 · 2009~2025학년도

이광조 지음

MASTER

논술 생물

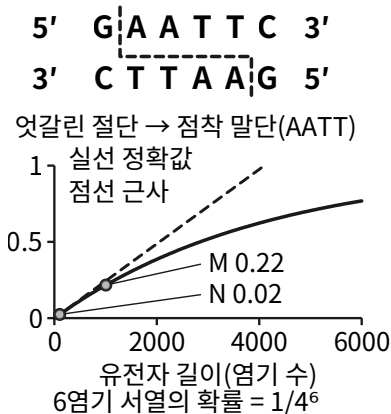
재조합 DNA · 생명 공학

1부 기본개념편 · 2부 기술문제와 기본개념 · 3부 논술답안작성 패턴분석 · 4부 실전기술문제와 풀이과정

생명 공학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

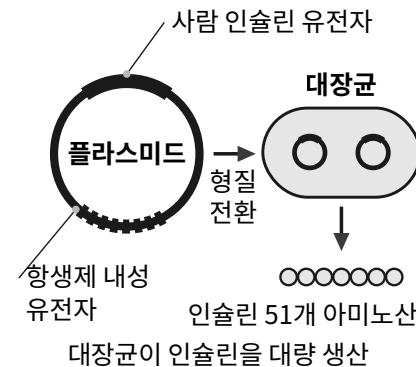
핵심 = 제한 효소의 인식·절단 × 조각 길이로 위치 추론 × 재조합·판별 실험 설계 | 5문항 · 3개 대학 (2009~2025)

① EcoRI의 인식 서열

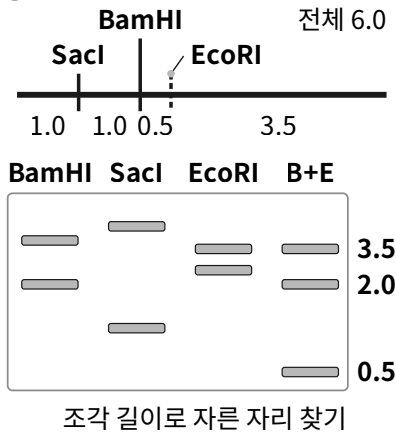


② 자르고 붙여 세균에 넣기

자르기(EcoRI) → 붙이기(리가아제)

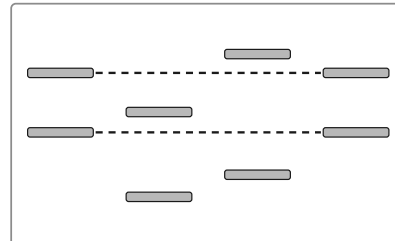


③ 조각 길이 → 자른 자리



④ 반복 서열로 복제 판별

핵 제공 난자 대리모 복제



점선: 핵 제공 개체와 같은 띠
위 = 긴 조각(반복 많음)

띠가 핵 제공 개체와 같다 → 복제

한 줄 요약 — 자르고(제한 효소) 붙이고(리가아제) 나르고(벡터),
잘린 조각의 길이로 DNA를 읽어 판별한다.

그림 1. 재조합 DNA · 생명 공학 단원의 그림 요약. ① 제한 효소 EcoRI의 인식 서열과 그 서열이 유전자 안에 한 번 이상 나올 확률, ② 플라스미드에 사람 인슐린 유전자를 넣어 대장균에서 생산하는 과정, ③ 조각 길이로 그린 제한 효소 지도와 전기영동 띠, ④ 반복 서열(STR) 띠로 복제 고양이를 판별하는 실험. 확률 곡선은 $1 - (1 - 1/4^n)^{n-5}$, 띠의 위치는 이동 거리가 조각 길이의 로그에 비례해 줄어든다는 관계로 계산했다.

한 줄 요약: 자르는 가위(제한 효소)와 붙이는 풀(리가아제), 나르는 배(플라스미드)로 유전자를 옮기고, 잘린 조각의 길이로 DNA를 읽어 판별한다.

연결 단원 → DNA 구조·복제 · 유전 암호·전사·번역 · 유전자 발현 조절 · 세포의 구조

이광조 · v1

기본개념편	10
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	11
기본개념편을 열며	13
제 1장 왜 생명 공학인가	15
1.1 생명 공학이란 무엇인가.....	17
1.2 이 권의 도구 상자: 자르기·붙이기·나르기·고르기·읽기	18
1.3 귀납적 탐구와 연역적 탐구	20
1.4 대조군·실험군과 세 가지 변인	22
1.5 연역적 탐구로 복제 개체를 판별해 보기.....	23
1.6 이 책의 길: 열네 장의 지도.....	24
제 2장 DNA를 자르는 가위: 제한 효소	26
2.1 세균은 왜 가위를 가졌나.....	28
2.2 인식 서열과 회문	29
2.3 엇갈린 절단과 곧은 절단.....	30
2.4 자리가 k개면 조각은 몇 개인가.....	32
2.5 실험실에서 가위를 쓰는 법	33
제 3장 인식 서열은 얼마나 자주 나올까	36
3.1 한 자리가 GAATTC일 확률	38
3.2 길이 N인 유전자 안의 창은 몇 개인가.....	39
3.3 ‘적어도 하나’는 여사건으로	40
3.4 근사 mp는 언제 믿을 수 있나	41
3.5 거꾸로 묻기: 몇 염기면 반반인가.....	43
3.6 실제 DNA는 무작위가 아니다	43
제 4장 붙이는 풀: DNA 리가아제와 재조합 DNA	46
4.1 점착 말단은 수소 결합으로 잠시 맞붙는다	48
4.2 같은 가위로 자르면 어떤 DNA든 붙는다	50
4.3 삽입 방향: 한 효소로 넣을 때와 두 효소로 넣을 때.....	52
4.4 시험관 속에서는 무엇이 만들어지나	53
4.5 평활 말단은 어떻게 있나.....	54
4.6 1973년 코언과 보이어의 실험.....	54
제 5장 유전자를 나르는 배: 플라스미드 벡터.....	57
5.1 플라스미드란 무엇인가.....	59
5.2 벡터의 세 조건	60
5.3 왜 ‘한 번만’ 잘려야 하나.....	61
5.4 재조합 플라스미드의 크기와 조각	62
5.5 자리가 두 개면 무엇이 빠지나	63
5.6 플라스미드를 다시 꺼내 확인하기	64
5.7 배는 항구에 맞아야 한다: 숙주와 복제 원점	65
5.8 다른 배들: 바이러스와 인공 염색체	65
제 6장 세균에 넣고 골라내기: 형질 전환과 선별	67
6.1 형질 전환: 세균이 바깥 DNA를 받아들인다.....	69
6.2 입장권 검사: 항생제 배지.....	70
6.3 손목띠 색: 청백 선별	71
6.4 형질 전환 효율 계산	72

6.5 대조군을 어떻게 놓을까.....	73
6.6 집락 하나에서 배양 탱크까지	75
제 7장 유전자 클로닝과 인슐린 생산	77
7.1 유전자 클로닝: 같은 DNA를 많이 만들기	79
7.2 첫째 함정: 인트론과 cDNA	80
7.3 둘째 함정: 세균의 프로모터와 발현 벡터	82
7.4 사람 인슐린: 51개 아미노산과 두 사슬	82
7.5 재조합 단백질 의약품	84
제 8장 DNA 조각의 길이를 재다: 겔 전기영동	87
8.1 DNA는 왜 (+)극으로 가나	89
8.2 전하는 같은데 왜 갈라질까	90
8.3 크기 표준과 로그 눈금	91
8.4 띠의 굵기와 겹친 띠	93
8.5 염색과 관찰, 그리고 원형 DNA	95
제 9장 조각 길이로 위치를 찾다: 제한 효소 지도	97
9.1 지도를 그리는 세 가지 규칙	99
9.2 경희대형 자료를 한 단계씩	100
9.3 해가 두 개인 이유	101
9.4 아직 하지 않은 실험을 예측하기.....	103
9.5 원형 플라스미드의 지도.....	104
제 10장 DNA를 복사하다: PCR	108
10.1 세 온도가 한 주기	110
10.2 프라이머가 구간을 정한다	111
10.3 2 ⁿ 증폭과 정확한 길이의 산물	113
10.4 PCR과 클로닝, 그리고 쓰임새	115
제 11장 반복 서열과 DNA 지문	118
11.1 사람마다 다른 반복 횟수.....	120
11.2 반복 수가 길이가 된다.....	121
11.3 띠 두 개는 부모에게서 하나씩.....	122
11.4 범인 찾기와 배제의 논리.....	124
11.5 우연히 같을 확률 — 곱의 법칙	125
제 12장 염기 서열을 읽다: 서열 분석과 유전체	128
12.1 사슬을 멈추는 염기	130
12.2 조각 길이로 서열을 읽는다	131
12.3 주형 가닥은 거꾸로 읽힌다	133
12.4 사람 유전체와 개인 사이의 차이.....	133
12.5 유전체 정보를 어디에 쓰나	135
제 13장 복제 동물과 줄기세포	138
13.1 분화된 세포에도 모든 유전자가 있다	140
13.2 돌리는 이렇게 태어났다.....	140
13.3 복제를 어떻게 증명하나 — 연구 설계	142
13.4 핵이 같아도 다른 점	144
13.5 줄기세포 세 가지	144
제 14장 유전자 치료·유전자 편집·GMO, 그리고 2부로	148
14.1 결핍의 원인 단계와 네 가지 치료.....	150
14.2 유전자 치료: 유전자를 어떻게 나르나	152
14.3 크리스퍼: 원하는 자리를 찾아 자르는 가위	153

14.4 형질 전환 생물: 발과 축사의 생명 공학	154
14.5 생명 윤리와 안전성	155
14.6 기본개념편을 마치며: 2부로 가는 길	156
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	158
부록 B. 용어 풀이	162
기출문제와 기본개념.....	171
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	172
0. 이 장의 사용법	173
1. 출제 개념.....	174
1.1 제한 효소와 인식 서열 — C1 · C2 · P1 · P5.....	174
1.2 재조합 DNA: 리가아제와 벡터 — C3 · C4	175
1.3 형질 전환·선별·클로닝 — C5 · C6 · A1 · P2.....	176
1.4 겔 전기영동과 제한 효소 지도 — C7 · C8	178
1.5 PCR · 반복 서열 · 서열 분석 — C9 · C10 · C11	180
1.6 핵치환 · 줄기세포와 판별 설계 — C12 · C13 · A2 · C15 · P3 · P4.....	181
1.7 유전자 치료 · 유전자 편집 · 응용 — C14 · A3 · A4 · A5.....	182
1.8 그래프 개념도 읽는 법	183
2. 출제 경향.....	186
2.1 개념의 깊이로 본 문항	187
2.2 반복되는 출제 패턴 다섯 가지	187
2.3 학교별 성향	188
논술답안작성 패턴분석	190
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	191
3. 답안 작성법	193
3.1 자료 해석형 답안의 4단 구조	193
3.2 서술형 답안의 4문장 틀	194
3.3 표기와 용어 규칙	195
3.4 시간 배분과 자기 점검	195
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	196
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	197
실전기출문제와 풀이과정	203
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	204
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	206
5.1 한눈에 보는 기출 5문항	206
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론.....	206
5.3 기본 개념 한눈에	207
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다.....	208
6. 출제 문항 분석과 모범답안	210
<기출문제 1 (연세대 2025년)>	211
<기출문제 2 (연세대 2022년)>	222
<기출문제 3 (경희대 2020년)>	232
<기출문제 4 (성균관대 2011년)>	243
<기출문제 5 (성균관대 2009년)>	254

7. 변형·예상 문항	265
7.1 제한 효소와 인식 서열의 확률	265
7.2 재조합 DNA와 클로닝	266
7.3 전기영동과 제한 효소 지도	268
7.4 PCR · 반복 서열 · 서열 분석	269
7.5 복제·치료·편집	270
7.6 더 나아가기	272
8. 강의 연결	274
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	274
8.2 강의 구성 시 유의점	275
9. 전체 문제 총평	276
9.1 숫자로 먼저 보기	276
9.2 다섯 가지 총평	276
9.3 대학별 한 줄 총평	277
9.4 이렇게 공부하자	278
10. 참고문헌	279

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 생명 공학 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	15
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	16
그림 4. 생명 공학의 도구 상자	19
그림 5. 생명 공학 연표	20
그림 6. 연역적 탐구의 순서	21
그림 7. 제 2장 개념도	26
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	27
그림 9. EcoRI의 인식과 절단.....	30
그림 10. 절단 위치와 말단 모양	31
그림 11. 선형과 원형의 조각 수	33
그림 12. 제 3장 개념도	36
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	37
그림 14. 여섯 칸이 모두 맞을 확률.....	38
그림 15. 인식 서열 길이와 평균 간격.....	39
그림 16. 정확값과 근사의 차이	42
그림 17. 제 4장 개념도	46
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	47
그림 19. 자르가·맞붙기·잇기	49
그림 20. 호환 말단의 연결.....	51
그림 21. 삽입 방향.....	52
그림 22. 제 5장 개념도	57
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	58
그림 24. pUC19 플라스미드 지도	61
그림 25. 재조합 플라스미드와 예상 띠	63
그림 26. 자리가 두 개인 벡터의 문제.....	64
그림 27. 제 6장 개념도	67
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	68
그림 29. 청백 선별의 원리.....	71
그림 30. 형질 전환과 청백 선별의 흐름	72
그림 31. 대조군 배지 네 장.....	74
그림 32. 제 7장 개념도	77
그림 33. 생활 속 개념도 7.....	78
그림 34. 유전자 클로닝의 다섯 단계.....	80
그림 35. 유전체 DNA와 cDNA의 길이	81
그림 36. 프리프로인슐린에서 인슐린으로.....	83
그림 37. 제 8장 개념도	87
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	88
그림 39. 겔 전기영동 장치.....	89
그림 40. 반로그 검량선	92
그림 41. 래더와 시료의 겔.....	94
그림 42. 제 9장 개념도	97
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	98
그림 44. 선형 DNA 지도의 두 해.....	101
그림 45. 이중 처리 결과의 겔	103
그림 46. 원형 플라스미드 지도	105
그림 47. 제 10장 개념도	108

그림 48. 생활 속 개념도 10	109
그림 49. PCR의 온도-시간 그래프	111
그림 50. PCR 한 주기의 세 단계	112
그림 51. PCR 주기와 분자 수	114
그림 52. 제 11장 개념도	118
그림 53. 생활 속 개념도 11	119
그림 54. STR 좌위와 조각 길이	121
그림 55. 친자 판별 겔	123
그림 56. 범죄 현장 시료의 겔	124
그림 57. 제 12장 개념도	128
그림 58. 생활 속 개념도 12	129
그림 59. dNTP와 ddNTP	130
그림 60. 생어 서열 분석의 겔	132
그림 61. 두 사람 서열의 정렬	134
그림 62. 제 13장 개념도	138
그림 63. 생활 속 개념도 13	139
그림 64. 체세포 핵치환 과정	141
그림 65. 복제 판별의 예상 겔	143
그림 66. 줄기세포의 세 종류	145
그림 67. 제 14장 개념도	148
그림 68. 생활 속 개념도 14	149
그림 69. 결핍 원인 단계와 치료 전략.....	151
그림 70. 크리스퍼-Cas9의 표적 인식	153
그림 71. 생명 공학 기술 지도	156
그림 72. 제한 효소 지도와 예상 겔.....	179
그림 73. 전체 개념 그래프.....	184
그림 74. 개념별 출제 횟수.....	185
그림 75. 연도별 출제 문항 수	186
그림 76. 대학별 출제 문항 수	187
그림 77. 자료 해석형 풀이 절차	193
그림 78. 호르몬 X 분비량(기출 186)	212
그림 79. 〈연세대 2025〉 개념 그래프	212
그림 80. 원인 단계와 치료 전략(기출 186)	215
그림 81. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	223
그림 82. 복제 판별 예상 겔(기출 174).....	226
그림 83. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	233
그림 84. 제한 효소 지도 두 경우(기출 216)	236
그림 85. [표 2]의 겔 띠와 예측(기출 216)	238
그림 86. 클로닝 전기영동과 항체 분석(기출 102)	244
그림 87. 〈성균관대 2011〉 개념 그래프	245
그림 88. 세 플라스미드의 구조(기출 102)	248
그림 89. 유전자 재조합 과정(기출 291)	255
그림 90. 〈성균관대 2009〉 개념 그래프	256
그림 91. 확률의 정확값과 근사(기출 291)	259

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	11
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	11
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	15
표 4. 귀납적 탐구와 연역적 탐구.....	21
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	26
표 6. 이 권에서 쓰는 제한 효소.....	30
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	36
표 8. 유전자 길이 N에 따른 정확값 $1 - (1 - 1/4096)^{N-5}$ 과 근사.....	41
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	46
표 10. 제한 효소와 DNA 리가아제.....	49
표 11. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	57
표 12. 벡터가 갖춰야 할 조건.....	60
표 13. 배지 조건별 기대 결과.....	74
표 14. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	77
표 15. 인슐린을 얻는 방법 비교.....	84
표 16. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	87
표 17. 크기 표준(래더)의 길이와 이동 거리.....	91
표 18. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	97
표 19. 길이 6.....	100
표 20. PCR에 넣는 재료와 하는 일.....	113
표 21. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	118
표 22. 세 좌위 유전자형 빈도의 계산 예.....	125
표 23. 서열 분석 방법의 비교(차세대 서열 분석은 교과 밖 심화).....	135
표 24. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	138
표 25. 돌리 실험의 단계별 수와 성공률(윌머트 외, 1997의 젓샘 세포 실험).....	142
표 26. 줄기세포의 비교.....	146
표 27. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	148
표 28. 단백질 결핍을 치료하는 네 가지 전략.....	151
표 29. 생명 공학 기술과 함께 따지는 윤리·안전 쟁점.....	155
표 30. 2부 목차와 내용.....	172
표 31. 이 책에서 쓰는 제한 효소.....	174
표 32. 길이에 따른 EcoRI 자리 확률.....	175
표 33. 제한 효소와 리가아제 비교.....	176
표 34. 벡터의 조건과 이유.....	176
표 35. 배지 조건별 기대 결과.....	177
표 36. 사람 인슐린과 재조합 생산의 수치.....	177
표 37. DNA를 읽는 세 도구 비교.....	180
표 38. 복제 개체 판별.....	181
표 39. 결핍 원인 단계와 치료 전략의 짝.....	182
표 40. 이 책의 기출 문항 목록.....	186
표 41. 대학별 출제 문항.....	187
표 42. 문항별 요구 개념 수와 최대 층.....	187
표 43. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	188
표 44. 논술 기본 패턴 다섯 가지(생물 권).....	191
표 45. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	191
표 46. 서술형 답안의 문장 틀(현상 → 원리 → 결과 → 조건·한계).....	194
표 47. 실험 설계 답안의 다섯 칸.....	194

표 48. 논술 기본 패턴 5가지.....	196
표 49. 문항별 소문항에 적용한 패턴(기호는 위 표).....	196
표 50. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는	204
표 51. 실전기출문제와 풀이과정(4부) 장별 내용.....	204
표 52. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호).....	206
표 53. 학년도별 문항 수.....	206
표 54. 소문항에 적용한 답안 패턴의 분포(9개 소문항, 둘이 결합된 소문항은 주	207
표 55. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 기출 = 그 개념을 쓴 문항 수).....	207
표 56. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	209
표 57. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	213
표 58. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	214
표 59. 원인 단계별로 맞는 치료.....	217
표 60. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	223
표 61. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	225
표 62. 네 고양이와 각자의 역할, 기대 결과.....	227
표 63. 이 문제에 적용한 귀납적 탐구와 연역적 탐구.....	228
표 64. [표 2].....	232
표 65. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	233
표 66. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	234
표 67. 모든 자료의 검산.....	238
표 68. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	245
표 69. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	246
표 70. 레인별 판정.....	248
표 71. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	256
표 72. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	257
표 73. M·N 유전자의 확률 비교.....	260
표 74. 인강 회차 구성(제안).....	274
표 75. 5개 문항의 규모.....	276
표 76. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	277

제 1 부

기본개념편

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

재조합 DNA·생명 공학

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 자르기 → 붙이기 → 나르기 → 고르기 → 읽기 → 개체에 쓰기의 순서로 이어집니다. 앞 장에서 만든 도구가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 생물 권이지만 이 단원에는 숫자로 푸는 곳이 분명히 있습니다. 인식 서열이 나올 확률($1/4^n$), 조각 길이의 합, 로그 눈금으로 읽는 전기영동, PCR의 2^n , 유전자형 빈도의 곱이 그것입니다. 이 계산은 숫자를 모두 보이며 풉니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 출발과 가위	1~3장	생명 공학이 무엇을 하는 기술인지, 실험을 어떤 틀(연역적 탐구)로 설계하는지 정한 뒤, DNA를 자르는 제한 효소와 그 인식 서열이 나올 확률을 계산한다.
B. 붙이고 나르고 고르기	4~7장	리가아제로 붙이고, 플라스미드에 실어 세균에 넣고, 항생제와 색으로 재조합 클론을 골라 인슐린 같은 단백질을 만든다.
C. DNA를 재는 도구	8~10장	전기영동으로 조각 길이를 재고, 조각 길이로 제한 효소 지도를 그리며, PCR로 원하는 구간을 늘린다.
D. 사람을 가려내는 DNA	11~12장	반복 서열의 띠로 개인을 구별하고, 염기 서열을 직접 읽어 유전체를 비교한다.
E. 개체 수준의 응용	13~14장	핵치환 복제와 줄기세포, 유전자 치료·유전자 편집·형질 전환 생물과 생명 윤리를 다루고 2부로 간다.

표 1의 구간 B와 C가 기출의 중심입니다. 제한 효소 지도(9장)와 반복 서열 판별(11장, 13장)은 4부에서 원문 그대로 다시 만납니다.

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 개념도가 있어 그 장의 개념이 부엌·마트·병원 같은 일상 장면에서 어떻게 보이는지 그림으로 정리합니다. 〈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	제목	새로 배우는 개념
제 1장	왜 생명 공학인가	생명 공학 기술의 범위 · 연역적 탐구 · 실험군과 대조군
제 2장	DNA를 자르는 가위: 제한 효소	제한 효소 · 인식 서열 · 회문 서열 · 점착 말단과 평활 말단
제 3장	인식 서열은 얼마나 자주 나올까	$1/4^n$ 확률 · 여사건 · 곱셈 근사와 그 오차
제 4장	붙이는 풀: DNA 리가아제와 재조합 DNA	DNA 리가아제 · 호환 말단 · 삽입 방향
제 5장	유전자를 나르는 배: 플라스미드 벡터	벡터 · 복제 원점 · 선택 표지 · 다중 클로닝 자리

장	제목	새로 배우는 개념
제 6장	세균에 넣고 골라내기: 형질 전환과 선별	형질 전환 · 항생제 선별 · 청백 선별 · 형질 전환 효율
제 7장	유전자 클로닝과 인슐린 생산	유전자 클로닝 · cDNA와 역전사 효소 · 발현 벡터 · 재조합 단백질 의약품
제 8장	DNA 조각의 길이를 재다: 겔 전기영동	겔 전기영동 · 크기 표준 · 로그 눈금 읽기
제 9장	조각 길이로 위치를 찾다: 제한 효소 지도	단일·이중 처리 · 조각 길이의 합 · 좌우 대칭 해
제 10장	DNA를 복사하다: PCR	중합 효소 연쇄 반응 · 프라이머 · 내열성 중합효소 · 2 ⁿ 증폭
제 11장	반복 서열과 DNA 지문	짧은 연쇄 반복(STR) · DNA 지문 · 곱의 법칙
제 12장	염기 서열을 읽다: 서열 분석과 유전체	생어 서열 분석 · 다이디옥시 뉴클레오타이드 · 유전체 비교
제 13장	복제 동물과 줄기세포	핵치환 · 체세포 복제 · 역분화 줄기세포 · 복제 판별 설계
제 14장	유전자 치료·유전자 편집·GMO, 그리고 2부로	유전자 치료 · 크리스퍼 유전자 편집 · 형질 전환 생물 · 생명 윤리

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 그림에 나온 염기 서열과 조각 길이를 손으로 한 번 옮겨 적어 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 막히기 쉬운 곳은 3장(확률 근사)과 9장(제한 효소 지도)이다. 이 두 장은 두 번 읽고, 표의 숫자를 직접 더해 본다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

재조합 DNA와 생명 공학은 고등학교 생명과학 II의 마지막 단원으로 만나고, 대학 논술에서는 자료 해석과 실험 설계가 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 DNA가 두 가닥의 이중 나선이고 A는 T와, G는 C와 짝을 짓는다는 것, 그리고 유전자가 전사·번역되어 단백질이 된다는 것만 알면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 것을 먼저 주지 않고, 왜 그런 도구가 필요한가를 먼저 묻고 그다음에 방법을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다. 돌집 과학방에서 토요일마다 과학을 배운다.
- 이모 이모 — 두부집 사장. 장보기와 가게 일에서 생기는 궁금증을 들고 온다.
- 석 교수 — 은퇴한 화학·생물 교수. 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

이 단원을 시작하는 날

토요일 아침, 이모가 콩 자루 하나를 끌고 과학방 문을 열었다. 자루 옆면에는 작은 글씨로 “유전자 변형 콩 아님”이라고 찍혀 있었다.

- 이모** 교수님, 이 글씨 좀 보세요. 콩에 왜 유전자 이야기가 붙어 있어요? 콩이 콩이지, 유전자를 바꾼 콩이 따로 있다는 거예요?
- 석 교수** 있지요. 다른 생물의 유전자를 콩의 DNA에 넣으면, 콩이 원래 못 만들던 단백질을 만들게 됩니다. 오늘부터 그 방법을 처음부터 배워 볼 거예요.
- 하린** 유전자를 넣는다고요? DNA는 세포 안에 있잖아요. 손으로 꺼내서 붙여요?
- 석 교수** 손으로는 못 하지. 대신 DNA를 정해진 자리에서만 자르는 효소와, 잘린 끝을 다시 잇는 효소가 있다. 가위와 풀이라고 생각하면 돼.
- 태오** 그 가위가 제한 효소요? 논술 기출에도 나온단데요.
- 석 교수** 맞다. 경희대 2020학년도에는 제한 효소로 자른 조각의 길이만 주고 자른 자리를 그리라고 했고, 연세대 2022학년도에는 복제 고양이로 진짜 복제인지 증명하는 실험을 설계하라고 했어.
- 하린** 고양이를 복제해요? 그건 영화 이야기 같아요.
- 석 교수** 1996년에 양 돌리가 태어났고, 그 뒤 고양이와 개도 복제되었다. 복제인지 아닌지는 DNA 조각의 띠 무늬로 가린다. 사람마다 반복 횟수가 다른 서열이 있거든.
- 이모** 우리 집 냉장고에 있는 언니 인슐린도 그런 기술로 만든 거라던데, 정말이에요?
- 석 교수** 그렇습니다. 사람 인슐린 유전자를 대장균이나 효모에 넣어 키우면, 그 미생물이 사람 인슐린을 만듭니다. 예전에는 돼지나 소의 이자에서 뽑아 썼지요.
- 태오** 그러면 이 단원은 자르고, 붙이고, 세균에 넣는 순서로 가는 거네요.
- 석 교수** 하나 더 있다. 넣은 뒤에는 제대로 들어갔는지 골라내야 하고, 잘린 DNA의 길이를 재서 읽어야 해. 그래서 이 단원의 도구는 자르기, 붙이기, 나르기, 고르기, 읽기 다섯 가지다.
- 하린** 길이는 자로 재요?
- 석 교수** 겔이라는 젤리 판에 넣고 전기를 걸면, 짧은 조각이 더 멀리 간다. 그 거리를 보고 길이를 읽지. 8장에서 직접 계산해 볼 거야.

태오 3장은 확률이라고 쓰여 있던데, 생물에 확률이 왜 나와요?

석 교수 제한 효소가 알아보는 여섯 글자 서열이 어떤 유전자 안에 우연히 들어 있을 확률을 따져야 하거든. 성균관대 2009학년도 문제가 바로 그 계산이 맞는지를 물었다. 네 가지 염기가 여섯 자리에 오니 $1/4^6$, 곧 4096분의 1부터 시작한다.

이모 숫자가 나오니 벌써 어지럽네요. 저 같은 사람도 따라갈 수 있을까요?

석 교수 그래서 장마다 생활 속 장면을 하나씩 그려 두었어요. 자물쇠 비밀번호, 택배 상자, 복사기, 바코드 같은 것들입니다. 그림에서 먼저 감을 잡고, 그다음에 숫자를 넣으면 됩니다.

하린 그럼 오늘은 무엇부터 해요?

석 교수 오늘은 1장이다. 실험을 어떤 순서로 설계하는지부터 정한다. 가설을 세우고, 대조군을 두고, 결과를 보고 결론을 내리는 연역적 탐구지. 이 틀이 있어야 뒤의 모든 실험이 답안으로 바뀐다.

태오 실험 설계는 답을 쓰기가 막막했는데, 틀이 있으면 좀 낫겠네요.

석 교수 이모님 콩 자루에서 시작해 보자. “이 콩은 유전자 변형 콩이 아니다”라는 말을 어떻게 확인할지, 오늘 끝날 때쯤이면 너희가 직접 실험을 짤 수 있을 거야.

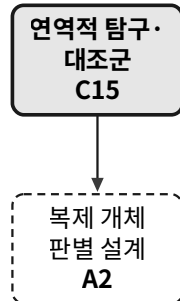
왜 생명 공학인가? **기본개념편 제 1장** (15쪽)은 이 질문에서 출발한다. 생명 공학은 생물이 이미 가진 도구(세균의 제한 효소, 복제하는 플라스미드, DNA 중합효소)를 빌려 DNA를 자르고 붙이고 옮기고 읽는 기술이다. **기본개념편 제 2장** (26쪽)에서 **기본개념편 제 7장** (77쪽)까지는 유전자를 옮겨 단백질을 만드는 길을, **기본개념편 제 8장** (87쪽)에서 **기본개념편 제 12장** (128쪽)까지는 DNA를 재고 읽는 길을, **기본개념편 제 13장** (138쪽)과 **기본개념편 제 14장** (148쪽)는 그 도구가 동물·사람·작물에 쓰이는 장면을 따라간다. 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 줄거리다.

제 1장 왜 생명 공학인가

새 개념 생명 공학 기술의 범위 · 연역적 탐구 · 실험군과 대조군

이어짐 제한 효소 2장 · 인슐린 생산 7장 · 복제 판별 13장

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(C15 연역적 탐구·대조군)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2022년) (222쪽)	복제 고양이 입증을 위한 연역적 연구 설계	C15 연역적 탐구·대조군

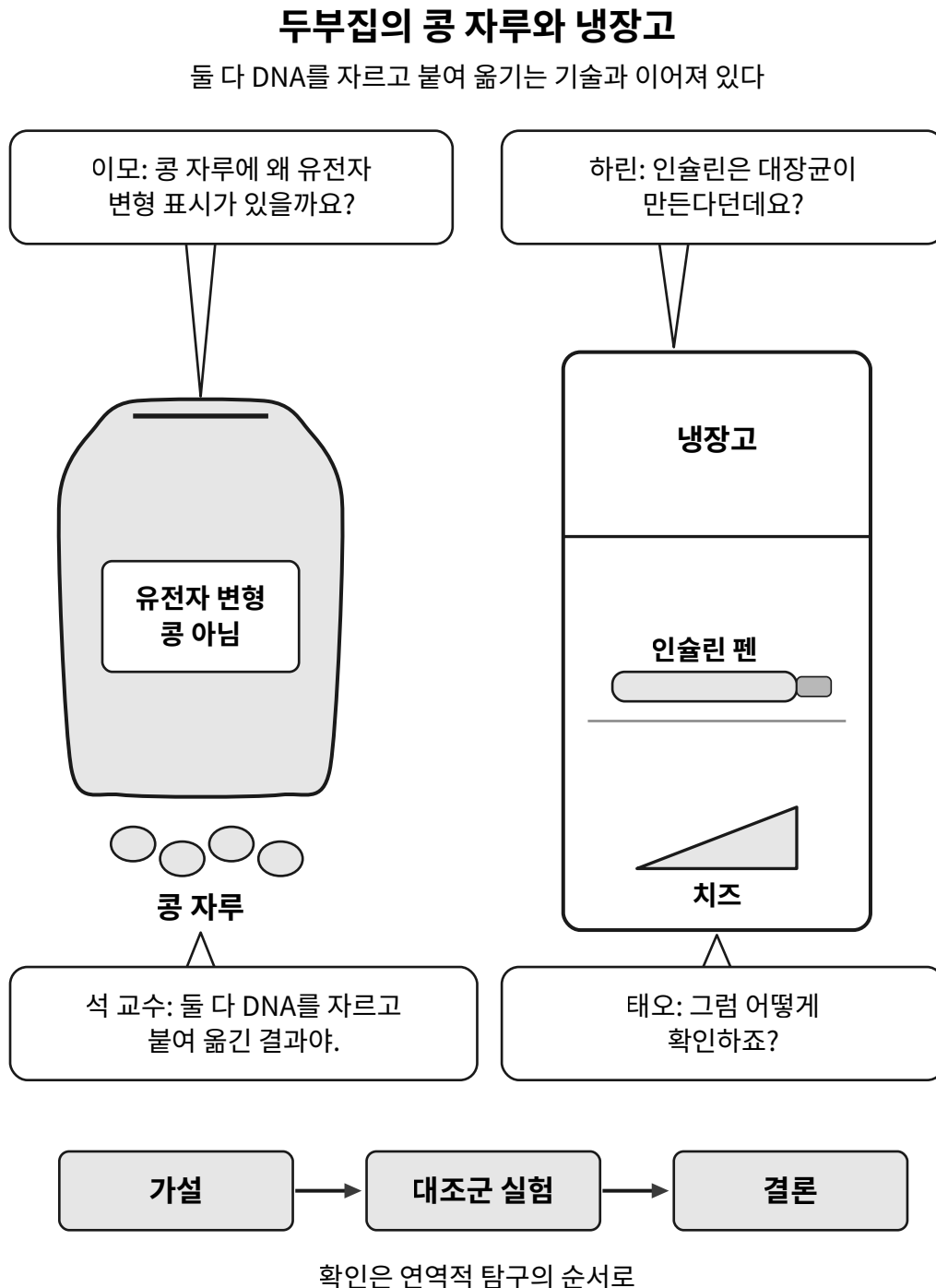


그림 3. 두부집 콩 자루의 표시와 냉장고 속 인슐린 펜 — 둘 다 DNA를 자르고 붙여 옮기는 기술과 이어져 있다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 생명 공학은 생물의 유전 지식으로 물질을 만들거나 병을 고치는 기술이다.
2. 인슐린 펜과 콩 자루의 표시는 모두 유전자 재조합 기술과 이어져 있다.
3. 확인은 가설 → 대조군을 둔 실험 → 결론의 연역적 탐구로 한다.

이 장의 출발점

- DNA는 두 가닥이 꼬인 이중 나선이고, A는 T와, G는 C와 수소 결합으로 짝을 짓는다.
- 유전자의 정보는 DNA → RNA(전사) → 단백질(번역)로 흐른다. 세 염기가 아미노산 하나를 정한다.
- 확률의 곱: 서로 독립인 두 사건이 함께 일어날 확률은 각 확률의 곱이다.

이모가 끌고 온 콩 자루는 과학방 탁자 옆에 그대로 서 있었다. 석 교수는 칠판에 “생명 공학”이라고 크게 쓰고, 그 아래에 이모의 콩 자루와 냉장고 속 인슐린 펜을 나란히 그렸다.

석 교수 오늘은 두 가지를 정한다. 하나는 생명 공학이 무엇을 하는 기술인지, 다른 하나는 그 기술로 한 실험을 어떤 순서로 설계하고 답안으로 쓰는지다.

하린 생명 공학이라는 말은 많이 들었는데, 정확한 뜻은 모르겠어요. 실험실에서 생물을 만드는 거예요?

석 교수 교과서의 정의부터 읽어 보자. “생명 공학 기술이란 물질대사, 생장, 생식, 유전 등의 지식을 이용해 인간에게 필요한 물질을 생산하고 가공하거나 질병 치료에 활용하는 기술을 말한다.” 이 문장은 연세대 2025학년도 논술 제시문에 거의 그대로 나왔다.

태오 그러면 생명 공학은 ‘생물에 대한 지식’을 ‘쓸모’로 바꾸는 기술이네요.

석 교수 그렇다. 정의 안에 두 쪽이 있다. 앞쪽은 지식, 곧 물질대사·생장·생식·유전이고, 뒤쪽은 쓸모, 곧 물질 생산·가공·질병 치료다. 된장과 김치를 담그는 발효도 넓은 뜻의 생명 공학이지만, 이 책이 다루는 것은 그중 ‘유전’ 쪽, DNA를 직접 다루는 기술이다.

1.1 생명 공학이란 무엇인가

이모 콩에 다른 생물의 유전자를 넣는다고 하셨잖아요. 그게 왜 필요해요? 콩은 원래 잘 자라는 데요.

석 교수 예를 들어 어떤 세균은 특정 제초제를 맞아도 죽지 않게 하는 효소를 만든다. 그 효소의 유전자를 콩에 넣으면, 밭에 제초제를 뿌려도 잡초만 죽고 콩은 산다. 그렇게 유전자를 바꾼 생물을 유전자 변형 생물, 영어 머리글자로 GMO(Genetically Modified Organism)라고 하고, 살아서 번식할 수 있는 상태면 LMO(Living Modified Organism)라고 부른다. 자루의 표시는 그 콩이 아니라는 뜻이야.

하린 인슐린은요? 이모 언니가 매일 맞다는 그거요.

석 교수 인슐린은 이자에서 나와 혈당을 낮추는 단백질 호르몬이다. 이자가 인슐린을 충분히 만들지 못하면 밖에서 넣어 줘야 하지. 1980년대 초까지는 돼지나 소의 이자에서 뽑아 썼다. 지금은 사람 인슐린 유전자를 대장균이나 효모에 넣고 큰 통에서 키워, 그 미생물이 만든 사람 인슐린을 정제해 쓴다.

이모 세균이 사람 호르몬을 만든다니, 믿기지 않네요.

석 교수 유전 암호가 거의 모든 생물에서 같기 때문에 가능하다. 대장균의 리보솜도 사람 mRNA의 코돈을 사람 세포와 같은 아미노산으로 읽는다. 그러니 DNA만 제대로 옮겨 주면 대장균이 사람 단백질을 만든다. 물론 그 ‘제대로’에 함정이 여럿 있어서 7장 한 장을 통째로 쓴다.

태오 결국 콩과 인슐린 둘 다 ‘한 생물의 DNA 조각을 다른 생물에 넣었다’는 공통점이 있네요.

- 이모** 냉장고에 치즈도 있는데, 치즈도 그런 거예요?
- 석 교수** 치즈를 굳히는 효소 키모신은 원래 송아지 위에서 얻었습니다. 지금은 키모신 유전자를 넣은 미생물이 만든 효소를 많이 써요. 그 밖에 어린이 성장 호르몬, B형 간염 백신의 단백질, 빨래 세제에 든 효소도 같은 방식으로 만듭니다. 이렇게 유전자를 옮긴 생물에게만 들게 한 단백질을 재조합 단백질이라고 하지요.
- 하린** 그럼 생명 공학은 다 좋은 거예요?
- 석 교수** 쓸모가 큰 만큼 따져 볼 점도 있다. 형질 전환 작물의 유전자가 들판의 다른 식물로 퍼지지 않을까, 복제 동물이나 사람 배아를 다루어도 되는가 같은 질문이지. 이런 안전성과 윤리 문제는 14장에서 따로 다룬다. 지금은 기술의 원리를 먼저 정확히 아는 게 순서다. 원리를 모르면 찬성도 반대도 근거가 없거든.
- 태오** 논술에서 윤리 문제도 나와요?
- 석 교수** 이 권의 기출에서는 윤리를 단독으로 묻지 않았다. 대신 기술을 설명하거나 자료를 해석하게 한 뒤, 그 기술을 어디에 쓸 수 있는지 묻는 형태가 많았다. 그러니 원리와 자료 해석이 먼저다. 다시 콩과 인슐린으로 돌아가자. 둘의 공통점을 유전자 재조합이라고 부른다. 서로 다른 DNA를 잘라 이은 것을 재조합 DNA라 하고, 그 DNA를 다른 생물에 넣어 원하는 단백질을 만들게 하는 것이 유전자 재조합 기술이다. 이 권의 기출 다섯 문항 중 네 문항이 이 기술의 어느 한 단계를 묻는다.

1.2 이 권의 도구 상자: 자르가·붙이기·나르가·고르가·읽기

- 석 교수** 유전자 재조합을 해 보자. 사람 DNA에서 인슐린 유전자만 꺼내 대장균에 넣으려면 무엇이 필요할까?
- 하린** 먼저 그 유전자만 오려 내야 해요. 가위가 필요하네요.
- 태오** 오린 걸 대장균이 가진 DNA에 붙여야 하니 풀도 있어야 하고요.
- 이모** 그걸 대장균 안으로 들여보낼 방법도 있어야겠죠. 그리고 정말 들어갔는지 확인도 해야 하고요.
- 석 교수** 셋이 나눠서 거의 다 말했다. **그림 4**가 그 순서다. 가위는 제한 효소(2장), 풀은 DNA 리가아제(4장), 배는 플라스미드(5장), 고르기는 항생제와 색으로 하는 선별(6장)이다. 그리고 이 모든 결과를 확인하는 눈이 있어야 하는데, 그게 ‘읽기’다. DNA 조각의 길이를 재는 전기영동(8장), 조각 길이로 자른 자리를 찾는 제한 효소 지도(9장), 원하는 구간을 늘리는 PCR(10장), 사람마다 다른 반복 서열(11장), 염기 서열을 직접 읽는 방법(12장)이 읽기의 도구다.

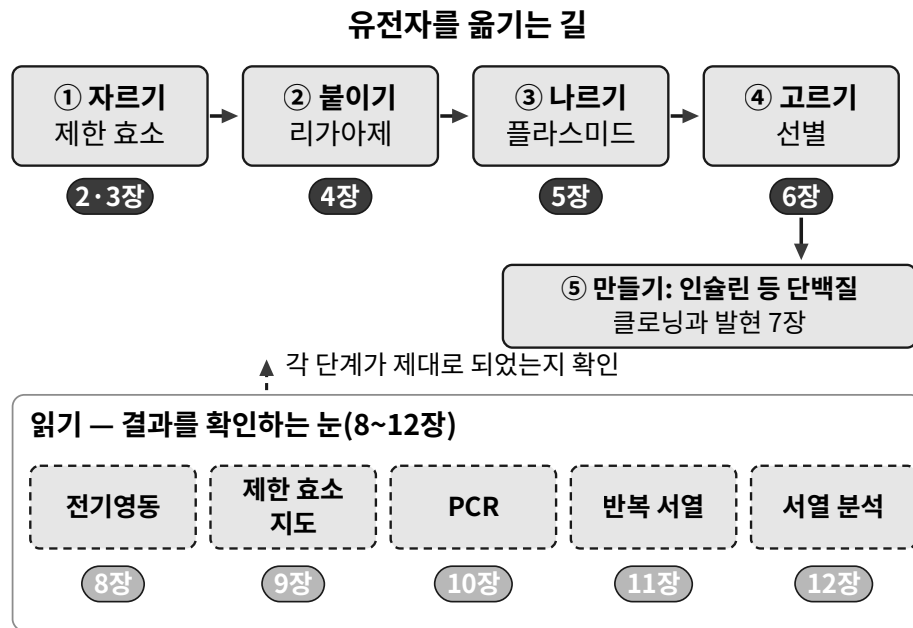


그림 4. 생명 공학의 도구 상자 — 자르기(제한 효소) → 붙이기(리가아제) → 나르기(플라스미드) → 고르기(선별) → 읽기(전기영동·PCR·서열 분석)의 순서와 각 도구를 다루는 장(모식도)

하린 칩에 쓰인 숫자가 장 번호예요?

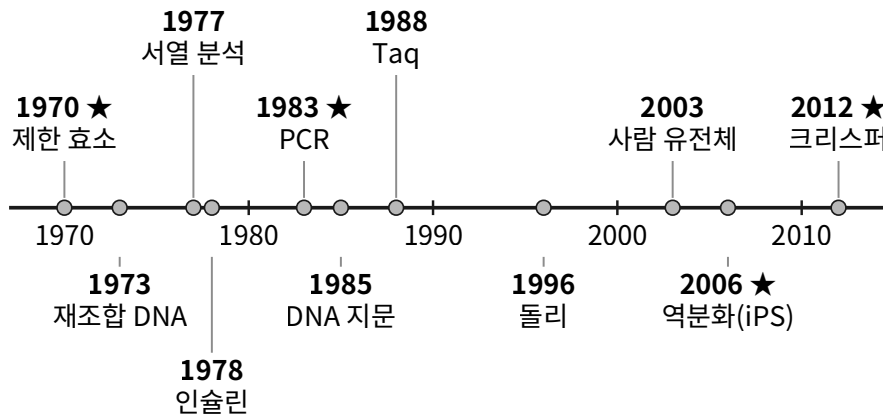
석 교수 그래. 앞 도구가 뒤 도구의 재료가 되도록 장을 늘어놓았다. 가위를 모르면 풀을 이해할 수 없고, 가위와 풀을 모르면 배에 짐을 실을 수 없다.

태오 그런데 이 도구들은 누가 만든 거예요? 공장에서 만든 기계예요?

석 교수 대부분 생물이 원래 가진 것을 빌렸다. 제한 효소는 세균이 침입한 바이러스 DNA를 자르려고 가진 효소이고, 플라스미드는 세균이 서로 주고받던 작은 원형 DNA이며, PCR에 쓰는 내열성 DNA 중합효소는 온천에 사는 세균에서 얻었다. 생명 공학의 역사는 ‘생물이 이미 가진 도구를 찾아내 다른 쓸모에 쓰는 역사’라고 해도 된다.

이모 언제부터 그런 걸 했어요? 제가 어릴 때도 있었나요?

석 교수 생각보다 짧다. **그림 5**에 연표를 그렸다. 1970년에 스미스가 정해진 서열만 자르는 제한 효소를 분리했고, 1973년에 코언과 보이어가 서로 다른 DNA를 이어 대장균에 넣는 데 성공했다. 1977년에 생어가 염기 서열을 읽는 방법을 내놓았고, 1978~79년에 대장균으로 사람 인슐린을 만들었다. 1983년에 멀리스가 PCR을 고안했고, 1988년에 내열성 Taq 중합효소를 쓰면서 자동화되었다.



★ 노벨상으로 이어진 사건(1978·1993·2012·2020년 수상)

그림 5. 생명 공학 연표(1970~2012) — 눈금은 연도에 비례해 그렸고, 별표는 노벨상(1978 제한 효소, 1993 PCR, 2012 역분화, 2020 크리스퍼)과 이어진 사건이다

태오 1985년의 DNA 지문, 1996년의 돌리, 2003년의 사람 유전체, 2006년의 역분화 줄기세포, 2012년의 크리스퍼까지 있는데요. 다 이 책의 뒷장 제목이에요.

석 교수 맞다. 앞쪽 십 년 동안 자르고 붙이고 읽는 도구가 거의 다 나왔고, 뒤쪽은 그 도구를 동물과 사람에게 쓰는 일이다. 연표의 사건들 사이 간격을 세어 보면, 제한 효소에서 인슐린 생산까지 고작 8~9년이 걸렸다. 도구가 갖춰지면 응용은 빠르게 따라온다.

1.3 귀납적 탐구와 연역적 탐구

석 교수 이제 두 번째 주제다. 도구로 실험을 했으면, 그 결과로 무엇을 말할 수 있는지 따져야 한다. 생명과학의 탐구 방법은 두 가지로 나눈다.

하린 귀납과 연역이요? 국어 시간에 들어 봤어요.

석 교수 과학에서도 뜻은 같다. 귀납적 탐구는 여러 관찰 결과를 모아 공통점을 찾아 일반 원리를 끌어내는 탐구다. 많은 세균을 조사했더니 모두 제한 효소를 가졌더라, 그러니 세균은 대체로 제한 효소를 가진다, 이런 식이지. 가설과 대조 실험이 반드시 필요하지는 않다.

태오 연역적 탐구는 가설을 먼저 세우는 거죠?

석 교수 그렇다. 문제를 인식하고, 그 문제의 답이 될 수 있는 가설을 세우고, 가설이 옳다면 어떤 결과가 나와야 하는지를 예측한 뒤 실험으로 확인한다. 결과가 예측과 맞으면 가설을 받아들이고, 맞지 않으면 가설을 버리거나 고쳐서 다시 실험한다. 그림 6처럼 고리를 이루지.

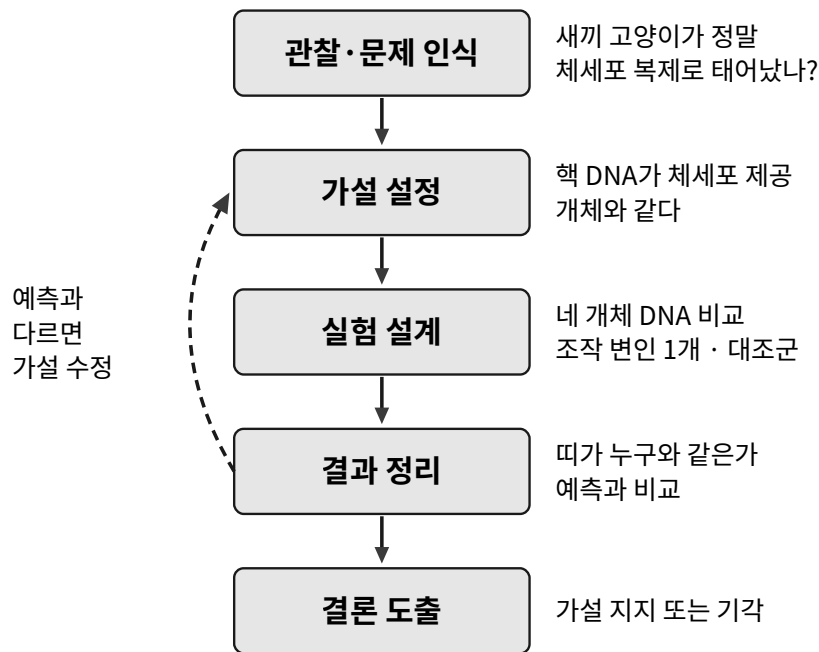


그림 6. 연역적 탐구의 순서 — 관찰과 문제 인식 → 가설 설정 → 실험 설계(대조군·변인 통제) → 결과 정리 → 결론 도출. 결과가 예측과 다르면 가설을 고쳐 다시 실험한다(점선 화살표)

이모 가설은 그냥 짐작 아니에요?

석 교수 짐작이되, 실험으로 틀렸는지 가릴 수 있는 짐작이어야 한다. “이 콩은 좋은 콩이다”는 가설이 될 수 없다. 무엇을 재야 틀렸는지 알 수 없으니까. “이 콩의 DNA에는 세균에서 온 제초제 내성 유전자가 없다”는 가설이 된다. 그 유전자를 찾는 실험을 하면 있는지 없는지가 갈리거든.

태오 연세대 2022학년도 문제가 바로 이거였죠? 제시문에 귀납과 연역을 정의해 주고, 복제 고양이가 진짜 체세포 복제로 태어났는지 연역적 탐구로 입증하는 연구 과정을 쓰라고 했어요.

석 교수 그렇다. 그 문제는 지식보다 순서를 본다. 가설-실험 설계-결과 해석-결론의 네 칸을 빠짐없이 채웠는지가 채점의 뼈대다. 표 4에 두 탐구를 비교하고, 답안에 쓸 문장 틀까지 넣었다.

표 4. 귀납적 탐구와 연역적 탐구 — 단계, 예, 논술 답안에 쓰는 문장 틀

구분	귀납적 탐구	연역적 탐구
출발	여러 관찰 사실	문제 인식과 가설
핵심 단계	관찰 → 자료 정리 → 공통점 → 일반 원리	가설 → 실험 설계 → 결과 → 결론
대조 실험	만드시 필요하지는 않다	대조군이 반드시 있어야 한다
이 권의 예	여러 세균에서 제한 효소를 찾아 목록을 만든다	복제 개체의 DNA가 핵 제공 개체와 같은지 확인한다
답안 문장 틀	“관찰한 ○○에서 공통적으로 △△가 나타나므로 …라는 원리를 이끌어 낸다.”	“가설: … / 실험: 실험군 …, 대조군 … / 결과가 …이면 가설을 지지하고 …이면 기각한다 / 결론: …”

1.4 대조군·실험군과 세 가지 변인

석 교수 연역적 탐구에서 가장 많이 감점되는 곳이 대조군이다. 실험군은 확인하고 싶은 요인을 넣은 집단, 대조군은 그 요인만 빼고 나머지 조건을 모두 같게 둔 집단이다.

하린 왜 꼭 둘이 있어야 해요? 실험군만 보면 안 돼요?

석 교수 실험군에서 무언가가 일어났을 때, 그게 넣은 요인 때문인지 다른 이유 때문인지 가릴 수 없거든. 변인을 세 가지로 나눠 보자. 실험하는 사람이 일부러 바꾸는 조건이 조작 변인, 똑같이 유지하는 조건이 통제 변인, 그 결과로 재는 값이 종속 변인이다.

태오 조작 변인은 하나만 바꾸는 거죠? 둘을 같이 바꾸면 결과가 어느 쪽 때문인지 모르니까요.

석 교수 정확하다. 6장에서 할 실험으로 연습해 보자.

문제 1.1

항생제 앰피실린이 든 배지 두 장을 준비했다. 한 장에는 앰피실린 내성 유전자를 가진 플라스미드를 넣는 처리(형질 전환)를 한 대장균 시료를, 다른 한 장에는 같은 처리를 하되 플라스미드만 넣지 않은 대장균 시료를 같은 양 펼쳤다. 하룻밤 뒤 앞의 배지에는 집락이 200개, 뒤의 배지에는 0개 생겼다. (1) 실험군과 대조군은 무엇인가? (2) 조작 변인·통제 변인·종속 변인은? (3) 무엇을 결론지을 수 있는가?

하린 (1)은 쉬워요. 플라스미드를 넣은 쪽이 실험군, 안 넣은 쪽이 대조군이네요.

태오 (2) 조작 변인은 플라스미드를 넣었는지 여부, 종속 변인은 집락 수예요. 통제 변인은 배지의 앰피실린 농도, 대장균의 종류와 양, 처리 방법, 배양 온도와 시간이고요.

석 교수 좋다. (3)은?

태오 플라스미드를 넣은 쪽에서만 집락이 생겼으니까, 플라스미드가 대장균을 앰피실린에서 살아남게 했다고 결론 내려요.

석 교수 한 걸음만 더 정확하게 쓰자. 대조군 배지에 집락이 0개라는 건, 처리 과정이나 배지 자체 때문에 내성이 생긴 게 아니라는 뜻이다. 그래서 “앰피실린 배지에서 자란 집락은 플라스미드(앰피실린 내성 유전자)를 받아들인 세포에서 생긴 것이다”라고 쓰면 정답이다.

이모 대조군에서 집락이 몇 개 나왔다면요?

석 교수 그러면 앰피실린이 약해졌거나, 원래 내성인 세균이 섞여 들어왔다는 뜻이니 결론을 내리기 전에 그 원인부터 찾아야 한다. 대조군은 결론을 내려도 되는지 알려 주는 안전장치야.

하린 이모 콩도 대조군이 필요하겠네요. 유전자를 찾는 검사를 했는데 아무것도 안 나오면, 정말 없어서인지 검사가 실패해서인지 모르잖아요.

석 교수 아주 좋은 생각이다. 그래서 실제 검사에서는 대조군을 두 종류 둔다. 그 유전자가 확실히 있는 콩을 함께 검사해 신호가 나와야 하는 양성 대조군, 확실히 없는 콩을 검사해 신호가 나오지 말아야 하는 음성 대조군이다. 양성 대조군에서 신호가 나오고 음성 대조군에서 안 나와야, 이모 콩의 결과를 믿을 수 있다.

태오 양성 대조군은 ‘검사가 제대로 작동하는지’, 음성 대조군은 ‘오염이 없는지’를 보는 거군요.

석 교수 이 두 문장을 외워 두면 실험 설계 답안의 절반은 끝난다.

1.5 연역적 탐구로 복제 개체를 판별해 보기

석 교수 이제 연세대 2022학년도와 같은 상황을 짧게 연습해 보자. 반복 서열과 복제 기술은 11장과 13장에서 자세히 배우니, 지금은 순서만 본다.

문제 1.2

어떤 고양이(체세포 제공 개체)의 피부 세포 핵을, 다른 고양이(난자 제공 개체)의 핵을 뺀 난자에 넣어 복제란을 만들고 세 번째 고양이(대리모)에 이식해 새끼(복제 개체)를 얻었다. 가설 “복제 개체의 핵 DNA는 체세포 제공 개체와 같다”를 검증하는 실험에서 비교할 개체와 기대 결과를 쓰라. 단, 사람마다 반복 횟수가 다른 반복 서열이 고양이에게도 있다고 가정한다.

태오 비교 대상은 복제 개체와 체세포 제공 개체 둘이면 되지 않아요? 둘이 같으면 끝이잖아요.

석 교수 그게 흔한 감점 답안이다. 둘이 같다는 것만으로는, 그 반복 서열이 고양이들 사이에서 원래 흔해서 우연히 같은 건지 구별할 수 없다. 누가 대조군 역할을 해야 할까?

하린 난자를 준 고양이랑 대리모요! 새끼를 낳은 건 대리모니까, 그냥 대리모 새끼일 수도 있잖아요.

석 교수 바로 그거다. 네 개체 모두의 DNA를 얻어 반복 서열 부위를 비교한다. 그 반복 서열 조각의 길이를 전기영동으로 재면 띠의 위치가 나오지.

태오 그럼 기대 결과는, 복제 개체의 띠가 체세포 제공 개체와는 모두 같고, 난자 제공 개체나 대리모와는 다르면 가설을 지지한다예요.

석 교수 정답이다. 반대로 복제 개체의 띠가 대리모나 난자 제공 개체의 띠를 물려받은 모양이면 가설을 기각한다. 그때는 체세포 복제가 아니라 보통의 수정으로 태어났을 가능성을 의심해야지. 한 부위만 보면 우연히 같을 수 있으니, 여러 부위를 함께 보면 더 확실해진다. 그 확률 계산은 11장에서 한다.

이모 핵 DNA라고 굳이 쓴 이유가 있나요?

석 교수 날카로운 질문이에요. 세포에는 핵 말고도 미토콘드리아에 작은 DNA가 있는데, 복제란의 세포질은 난자에서 왔으니 미토콘드리아 DNA는 난자 제공 개체를 닮습니다. 그래서 가설을 ‘핵 DNA’로 한정해야 더 정확하지요. 13장에서 이 차이를 다시 봅니다.

태오 답안으로 쓰면 어떤 모양이 돼요? 한번 들려주세요.

석 교수 네 문장이면 된다. 받아 적어 보렴. “(가설) 복제 개체의 핵 DNA는 체세포 제공 개체의 핵 DNA와 같다. (실험) 체세포 제공 개체·난자 제공 개체·대리모·복제 개체의 DNA를 얻어, 사람마다 반복 횟수가 다른 반복 서열 부위 여러 곳의 조각 길이를 전기영동으로 비교한다. 난자 제공 개체와 대리모는 대조군이다. (결과) 복제 개체의 띠가 모든 부위에서 체세포 제공 개체와 같고 다른 두 개체와 다르면 가설을 지지하고, 대리모나 난자 제공 개체에게서 받은 띠가 섞여 있으면 기각한다. (결론) 따라서 복제 개체는 체세포 제공 개체의 핵을 이어받은 체세포 복제로 태어났다.”

하린 괄호 안의 낱말이 네 칸의 이름이네요. 실제 답안에도 그렇게 써요?

석 교수 칸 이름을 굳이 쓰지 않아도 되지만, 네 칸이 순서대로 보이게 문단을 나누면 채점자가 놓치지 않는다. 연역적 탐구를 쓰라는 문제에서 칸 하나가 빠지면 그 칸의 점수가 통째로 빠진다고 생각하면 된다.

태오 결과를 미리 두 갈래로 적어 두는 게 중요하네요. ‘같으면 지지, 다르면 기각’이요.

석 교수 그렇다. 예측을 결과보다 먼저 적어야 결과를 보고 나서 해석을 끼워 맞추는 일을 막을 수 있다. 논술 답안에서도 “만약 …라면 가설을 지지하고, …라면 기각한다”처럼 두 경우를 모두 쓰면 채점자가 연역적 탐구의 구조를 바로 알아본다.

1.6 이 책의 길: 열네 장의 지도

하린 오늘 배운 건 도구 이름과 실험 순서뿐인데, 앞으로 열세 장이 더 있다고요?

석 교수 오늘은 지도를 펼친 날이다. 길은 세 구간이다. 2장부터 7장까지는 유전자를 옮겨 단백질을 만드는 길이다. 가위로 자르고, 그 가위가 엉뚱한 곳을 자를 확률을 계산하고, 풀로 붙이고, 배에 싣고, 세균에 넣어 고르고, 마지막에 인슐린을 만든다.

태오 8장부터 12장은 읽는 길이죠. 길이 재기, 지도 그리기, 복사, 반복 서열, 서열 읽기.

석 교수 그렇다. 그리고 13장과 14장은 그 도구가 개체에 쓰이는 길이다. 복제 동물과 줄기세포, 유전자 치료와 유전자 편집, 형질 전환 작물과 생명 윤리를 다룬다.

이모 그럼 우리 콩 자루의 표시를 확인하는 방법은 어디서 나와요?

석 교수 10장의 PCR이다. 형질 전환 콩에는 세균이나 바이러스에서 온 특정한 DNA 구간이 들어 있는데, 그 구간의 양 끝에만 붙는 짧은 DNA(프라이머)를 넣고 PCR을 돌리면 그 구간이 있을 때만 수억 배로 늘어난다. 늘어난 조각을 8장의 전기영동으로 보면 띠가 생기지. 오늘 배운 양성 대조군과 음성 대조군도 그 검사에 그대로 들어간다.

하린 결국 오늘 배운 순서가 마지막까지 쓰이는 거네요.

석 교수 이 단원의 논술은 대개 둘 중 하나를 묻는다. 도구가 어떻게 작동하는지 설명하라, 아니면 도구로 얻은 자료를 해석해 결론을 내라. 앞쪽은 2장부터의 지식, 뒤쪽은 오늘의 연역적 탐구가 답안의 뼈대가 된다.

태오 기출 다섯 문항이 어디에 걸리는지도 미리 알 수 있을까요?

석 교수 성균관대 2009학년도는 3장의 확률, 경희대 2020학년도는 9장의 지도, 연세대 2022학년도는 오늘의 연역적 탐구와 11장·13장, 연세대 2025학년도는 7장과 14장, 성균관대 2011학년도의 클로닝은 4장부터 7장까지다. 장마다 첫머리 표에 그 연결을 다시 적어 두었다.

핵심 연역적 탐구로 실험을 설계하는 네 단계

1. 가설: 실험으로 틀렸는지 가릴 수 있는 문장으로 쓴다(예: “복제 개체의 핵 DNA는 체세포 제공 개체와 같다”).
2. 실험 설계: 조작 변인 하나만 바꾸고 나머지는 통제한다. 실험군과 대조군(양성·음성)을 함께 둔다.
3. 결과: 가설이 옳을 때와 틀릴 때 각각 어떤 결과가 나올지 미리 적고, 실제 결과를 그 둘과 비교한다.
4. 결론: 결과가 예측과 맞으면 가설을 지지하고, 다르면 기각하거나 고쳐 다시 실험한다. 대조군이 무엇을 걸러 냈는지 한 문장으로 밝힌다.

스스로 풀어 보기

1. 생명 공학 기술의 교과서 정의를 ‘이용하는 지식’과 ‘쓰는 곳’으로 나누어 쓰라.
2. 귀납적 탐구와 연역적 탐구의 차이를 ‘가설’과 ‘대조군’이라는 낱말을 넣어 두 문장으로 쓰라.

3. “새로 개발한 비료가 콩의 수확량을 늘린다”는 가설을 검증할 때 조작 변인·통제 변인 두 가지·종속 변인을 쓰라.
4. 어떤 유전자를 찾는 검사에서 양성 대조군에 신호가 나오지 않았다. 이때 시료에서 신호가 나오지 않은 결과를 어떻게 해석해야 하는가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 틀은 4부의 여러 기출에서 답안의 뼈대가 된다. **기출문제 2**(연세대 2022) (222쪽)는 제시문에서 귀납적 탐구와 연역적 탐구를 정의하고, 복제 고양이가 체세포 복제로 태어났는지 입증하는 연구 과정을 쓰게 한다. 문제 1.2의 네 개체 비교가 그 답안의 중심이다. **기출문제 1**(연세대 2025) (211쪽)은 이 장 첫머리의 생명 공학 기술 정의를 제시문으로 주고, 호르몬이 부족한 세포를 생명 공학 기술로 치료하는 방법을 묻는다. **기출문제 4**(성균관대 2011) (243쪽)는 이 장의 도구 상자 순서 그대로 자르고 (BamHI) 붙이고(리가아제) 나르고(pUC18) 고른(콜로니) 뒤, 그 결과를 띠로 읽어 판별하게 한다.

이 장의 참고문헌

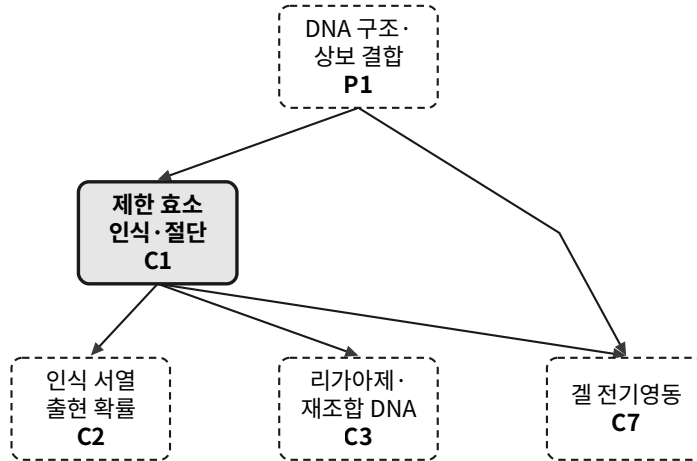
- Cohen, S. N., Chang, A. C. Y., Boyer, H. W., & Helling, R. B. (1973). Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 70(11), 3240–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.70.11.3240>
- Jackson, D. A., Symons, R. H., & Berg, P. (1972). Biochemical method for inserting new genetic information into DNA of simian virus 40. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69(10), 2904–2909. <https://doi.org/10.1073/pnas.69.10.2904>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.

제 2장 DNA를 자르는 가위: 제한 효소

새 개념 제한 효소 · 인식 서열 · 회문 서열 · 점착 말단과 평활 말단

이어짐 확률 3장 · 리가아제 4장 · 전기영동 8장 · 제한 효소 지도 9장

이 장의 개념도



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

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

이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 2 (연세대 2022년) (222쪽)	복제 고양이 입증에 위한 연역적 연구 설계	C1 제한 효소 인식·절단
기출 3 (경희대 2020년) (232쪽)	조각 길이로 그리는 제한 효소 지도	C1 제한 효소 인식·절단
기출 5 (성균관대 2009년) (254쪽)	EcoRI 인식 서열 확률 예측의 타당성	C1 제한 효소 인식·절단

정해진 낱말에서만 오리는 가위

제한 효소는 인식 서열이 나오는 곳만 자른다

하린: 아무 데나
자르지 않네요?

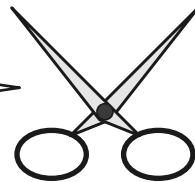
석 교수: 여섯 글자 암호를
읽은 곳만 자른다.

DNA 일보

```

G C T A A A G A C A A T T A C A T A A C A T A C A C
G T C A G C A C G G A A T T C G T T G G C C C A G T
G T G A A T C G C T T A A G G G T T A A G T A A G T
G T G A T G C A T A C G C C T T T A C T T G C T G T
G T C C A C C C C A T C G G A G A A T T C T T T T T
A T T A C A C T C A G A A A C A G A A C T C G G G T
    
```

태오: 두 가닥이 엇갈려 잘리면
끈끈한 끝이 남아요.



5'-G
3'-CTTAA

+

AATTC-3'
G-5'

자른 두 끝에 AATT가 튀어나온다(점착 말단)

그림 8. 신문 기사를 정해진 낱말에서만 오리는 가위 — 제한 효소는 정해진 염기 서열이 나오는 곳에서만 DNA를 자른다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 제한 효소는 특정 염기 서열만 인식해 자른다.
2. EcoRI는 G와 A 사이를 엇갈려 잘라 AATT 돌출 말단을 남긴다.
3. 선형 DNA는 자리 k개에서 k+1조각, 원형은 k조각이 된다.

이 장의 출발점

- DNA 두 가닥은 방향이 반대다. 한 가닥이 5'→3'이면 짝 가닥은 3'→5'로 놓인다.
- 상보 결합: A-T(수소 결합 2개), G-C(수소 결합 3개).
- 한 가닥의 뼈대는 당과 인산이 번갈아 이어진 사슬이고, 이웃 뉴클레오타이드는 인산다이에스터 결합으로 이어진다.

하린이 신문 한 장과 가위를 들고 왔다. 학교 숙제로 “유전자”라는 낱말이 나온 기사만 오려 오라는 것이었다. 석 교수는 그 가위를 받아 들고 웃었다.

석 교수 하린이가 지금 하려는 일이 오늘 배울 효소가 하는 일과 똑같다. 기사 전체를 아무 데나 자르는 게 아니라, 정해진 낱말이 나오는 곳만 찾아서 자르지.

하린 그런 효소가 정말 있어요? DNA에는 글자가 수십억 개나 있잖아요.

석 교수 있다. 제한 효소라고 부른다. 정해진 몇 글자, 보통 네 글자에서 여덟 글자의 염기 서열을 알아보고 그 자리에서만 두 가닥을 자른다. 오늘은 이 가위가 어디서 왔고, 무엇을 알아보고, 어떻게 자르며, 자르면 조각이 몇 개 생기는지를 본다.

2.1 세균은 왜 가위를 가졌나

태오 이름이 왜 ‘제한’ 효소예요? 자르는 효소면 ‘절단’ 효소라고 해야 할 것 같은데요.

석 교수 이름은 처음 발견된 현상에서 왔다. 세균을 감염시키는 바이러스를 박테리오파지, 줄여서 파지라고 한다. 1950년대에 어떤 대장균 균주에서는 파지가 잘 붙어나지 못하는 현상이 관찰되었다. 파지의 증식이 ‘제한’된 거지. 그 원인을 찾아보니, 세균 안에 들어온 파지 DNA를 잘라 버리는 효소가 있었다.

이모 세균에게도 면역 같은 게 있는 거네요.

석 교수 그렇게 볼 수 있습니다. 파지가 자기 DNA를 세균 안에 주입하면, 제한 효소가 그 DNA에서 인식 서열을 찾아 토막을 냅니다. 토막 난 DNA로는 파지가 붙어나지 못하지요. 연세대 2022학년도 제시문에도 “제한 효소는 세균이 자기 세포 안으로 침입한 외부 DNA를 제거할 때 사용하는 효소”라고 나왔다.

하린 그런데 세균 자기 DNA에도 같은 서열이 있을 거 아니예요? 자기 DNA는 왜 안 잘려요?

석 교수 좋은 질문이다. 세균은 짝이 되는 효소를 하나 더 가지고 있다. 자기 DNA의 인식 서열에 메틸기(-CH₃)를 붙여 표시해 두는 효소다. 메틸기가 붙은 자리는 제한 효소가 자르지 못한다. 그래서 표시가 된 자기 DNA는 무사하고, 표시가 없는 바깥 DNA만 잘린다. 이 메틸화 보호 체계는 교과 밖 심화이니 “자기 DNA는 표시해서 보호한다” 정도로 알아 두면 된다.

태오 그 효소가 ‘바깥 DNA만’ 자른다는 건 어떻게 확인했어요? 1장에서 배운 대로라면 대조균이 있어야 할 텐데요.

석 교수 1970년 스미스의 실험이 딱 그 구조다. 헤모필루스 세균을 부순 추출물에 두 가지 DNA를 따로 넣었다. 하나는 그 세균에 감염하는 파지가 아닌 다른 파지의 DNA, 곧 바깥 DNA였고, 다른 하나는 헤모필루스 자기 DNA였다. 긴 DNA 용액은 끈적하고, 토막이 나면 묽어진다. 그래서 용액의 끈끈한 정도(점도)를 잰더니, 바깥 DNA를 넣은 쪽만 점도가 빠르게 떨어졌고 자기 DNA를 넣은 쪽은 거의 그대로였다.

- 하린** 자기 DNA를 넣은 쪽이 대조군이네요! 추출물이 아무 DNA나 다 부수는 게 아니라는 걸 보여 주니까요.
- 석 교수** 그렇다. 조작 변인은 DNA의 출처, 종속 변인은 점도 변화다. 그 뒤 잘린 끝의 염기를 하나 하나 분석해, 이 효소가 정해진 서열에서만 자른다는 것을 밝혔다. 관찰에서 가설을 세우고 대조군으로 확인한 전형적인 연역적 탐구다.
- 태오** 효소 이름은 EcoRI, HindIII처럼 이상하게 생겼던데, 규칙이 있어요?
- 석 교수** 있다. 앞의 세 글자는 효소를 얻은 세균의 속명 첫 글자와 종명 앞 두 글자다. EcoRI의 Eco는 대장균(*Escherichia coli*), R은 그 균주 이름, 끝의 로마 숫자 I은 그 균주에서 찾은 첫 번째 효소라는 뜻이다. HindIII는 헤모필루스 인플루엔자(*Haemophilus influenzae*) Rd 균주에서 세 번째로 찾은 효소다. 1970년에 스미스가 이 세균에서 정해진 서열만 자르는 효소를 처음 분리했고, 1978년에 노벨 생리의학상을 받았다.

2.2 인식 서열과 회문

- 석 교수** EcoRI가 알아보는 서열을 적어 보자. 한 가닥은 5'-GAATTC-3'다. 짝 가닥을 적어 볼래?
- 하린** G의 짝은 C, A의 짝은 T니까... 3'-CTTAAG-5'예요.
- 석 교수** 이제 그 짝 가닥을 5' 쪽부터, 곧 오른쪽에서 왼쪽으로 읽어 보자.
- 하린** 5'부터면 G, A, A, T, T, C... 어, GAATTC예요! 위 가닥이랑 똑같아요.
- 석 교수** 이런 서열을 회문 서열이라고 한다. 국어의 '기러기'나 '토마토'처럼 거꾸로 읽어도 같은 말을 회문이라 하는데, DNA에서는 두 가닥을 각자 5'→3' 방향으로 읽었을 때 같은 서열을 말한다. 대부분의 제한 효소는 회문 서열을 인식한다.
- 태오** 왜 하필 회문이에요?
- 석 교수** 제한 효소는 똑같은 단백질 두 개가 짝을 이뤄 일하는 경우가 많다. 각 단백질이 한 가닥씩 맡아 같은 서열을 같은 방향으로 읽고 같은 자리를 자르니, 두 가닥의 서열이 같아야 일이 맞아떨어진다. 그 덕에 회문 서열은 어느 가닥에서 읽어도 같으니, 서열을 찾을 때 한쪽 가닥만 보면 된다. 3장의 확률 계산에서 이 사실을 다시 쓴다.
- 이모** 그럼 아무 서열이나 회문인지 어떻게 알아봐요?
- 석 교수** 두 단계면 됩니다. 서열의 상보 가닥을 쓰고, 그것을 거꾸로 읽어 처음 서열과 같은지 봅니다. 줄여서 '거꾸로 된 상보 서열이 자기 자신인가'를 보는 거지요. 예를 들어 GGATCC는 상보 가닥이 CCTAGG이고, 거꾸로 읽으면 GGATCC라 회문입니다. GAATTG는 상보 가닥 CTTAAC를 거꾸로 읽으면 CAATTC라 회문이 아닙니다.
- 태오** 정말 한쪽 가닥만 봐도 되는지 확인해 보고 싶어요.
- 석 교수** 해 보자. 위 가닥이 5'-CAGGATCCTA-3'인 짧은 DNA가 있다. 위 가닥에서 GGATCC는 3번에서 8번까지다. 아래 가닥을 5' 쪽, 곧 오른쪽 끝부터 읽어 보렴.
- 태오** 위 가닥의 상보 서열은 3'-GTCCTAGGAT-5'이고, 이걸 오른쪽부터 읽으면 5'-TAGGATCCTG-3'이에요. 여기서도 GGATCC가 나오네요. 위치는... 아래 가닥 기준 3번에서 8번인데, 이건 위 가닥의 3번에서 8번과 같은 자리예요.
- 석 교수** 그렇다. 회문 서열은 두 가닥이 같은 자리에서 같은 글자로 읽힌다. 그러니 위 가닥에서 한 번 찾으면 그게 그 자리의 전부다. 만약 회문이 아닌 서열을 찾는다면 위 가닥과 아래 가닥에서 서로 다른 자리가 나올 수 있으니 두 번 찾아야 한다. 3장의 확률 계산에서 바로 이 차이가 창 수를 한 번 셀지 두 번 셀지를 가른다.

태오 회문이면 길이가 짝수여야겠네요. 가운데 글자가 자기 짝과 같아야 하는데, A의 짝은 T라서 같을 수가 없으니까요.

석 교수 잘 짚었다. 여섯 글자짜리 회문은 앞 세 글자만 정하면 뒤 세 글자가 정해진다. GAA를 정하면 뒤는 TTC가 될 수밖에 없지. 이 권에서 쓰는 효소들을 표 6에 모았다.

표 6. 이 권에서 쓰는 제한 효소 — 인식 서열(^는 위 가닥의 절단 위치), 자른 뒤의 말단, 효소를 얻은 세균

효소	인식 서열(5'→3')	자른 뒤의 말단	얻은 세균
EcoRI	G [^] AATTC	5' 돌출 AATT(점착)	대장균(<i>Escherichia coli</i>)
BamHI	G [^] GATCC	5' 돌출 GATC(점착)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
BglII	A [^] GATCT	5' 돌출 GATC(점착, BamHI와 같음)	<i>Bacillus globigii</i>
HindIII	A [^] AGCTT	5' 돌출 AGCT(점착)	<i>Haemophilus influenzae</i>
SacI	GAGCT [^] C	3' 돌출 AGCT(점착)	<i>Streptomyces achromogenes</i>
SmaI	CCC [^] GGG	평활 말단(돌출 없음)	<i>Serratia marcescens</i>
AluI	AG [^] CT	평활 말단(돌출 없음)	<i>Arthrobacter luteus</i>

2.3 엇갈린 절단과 곧은 절단

석 교수 이제 자르는 모양이다. EcoRI는 위 가닥의 G와 A 사이를 자른다. 회문이니 아래 가닥도 5' 쪽부터 읽어 G와 A 사이를 자르지. 그림 9를 보자.

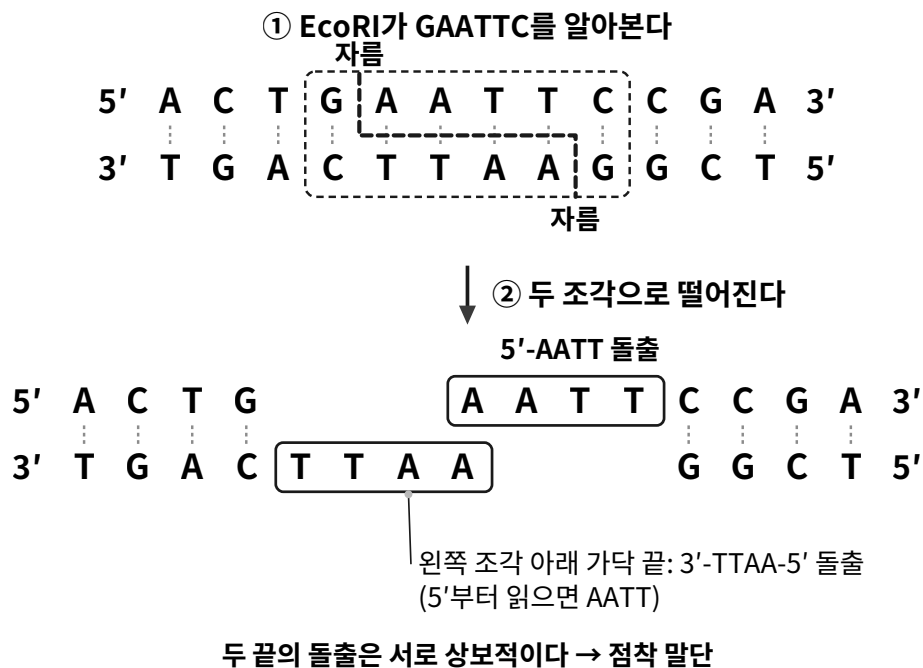


그림 9. EcoRI의 인식과 절단 — 위 가닥 5'-G[^]AATTC-3'와 아래 가닥 3'-CTTAA[^]G-5'를 엇갈려 자르면, 두 조각의 끝에 각각 5'-AATT 단일 가닥이 튀어나온 점착 말단이 생긴다(모식도)

하린 자른 자리가 위와 아래에서 어긋나 있어요. 계단 모양이에요.

석 교수 그래서 두 가닥 사이의 수소 결합 네 쌍, 곧 AATT와 TTAA 사이의 결합만 남는다. 그 네 쌍은 약해서 쉽게 떨어지고, 각 조각의 끝에는 AATT라는 네 글자가 단일 가닥으로 튀어나온다. 이것을 점착 말단, 영어로 끈끈한 끝(sticky end)이라고 한다.

태오 왜 끈끈하다고 해요?

석 교수 튀어나온 AATT는 다른 AATT와 상보적이기 때문이다. 5'-AATT-3'의 상보 서열을 거꾸로 읽으면 다시 AATT지. 그래서 EcoRI로 자른 조각이라면 어느 생물에서 왔든 끝끼리 수소 결합으로 다시 맞붙을 수 있다. 성균관대 2009학년도 제시문에도 “이 단일 사슬 부분이 다른 DNA와 결합할 때 중요하게 쓰인다”라고 나왔다. 붙인 뒤에 단단히 잇는 일은 4장의 리가아제가 한다.

하린 그런데 ‘자른다’는 게 정확히 무엇을 끊는 거예요? 수소 결합이요?

석 교수 여기가 중요한 구분이다. 제한 효소가 끊는 것은 각 가닥의 뼈대, 곧 당과 인산 사이의 인산다이에스터 결합이다. 물 분자를 끼워 넣어 끊는 가수분해 반응이지. 위 가닥에서 한 번, 아래 가닥에서 한 번 뼈대를 끊으면, 두 조각을 붙잡고 있는 것은 엇갈린 구간의 수소 결합뿐이다. 그 수소 결합은 체온 정도의 온도에서도 쉽게 풀려서 두 조각이 떨어진다.

태오 그러면 4장의 리가아제는 반대로 끊긴 뼈대를 다시 잇는 거겠네요.

석 교수 정확하다. 수소 결합으로 맞붙는 건 저절로 일어나지만, 뼈대의 공유 결합을 다시 만드는 건 효소와 에너지가 필요하다. 논술에서 “제한 효소는 수소 결합을 끊는다”라고 쓰면 틀린 답이니 조심하자. 끊는 것은 인산다이에스터 결합이고, 수소 결합은 그 결과로 풀릴 뿐이다.

이모 모든 효소가 그렇게 엇갈려 자르나요?

석 교수 아닙니다. **그림 10**에 네 가지를 비교했어요. EcoRI와 BamHI는 5' 쪽 끝이 튀어나오고, SacI는 반대로 3' 쪽 끝이 튀어나옵니다. SmaI는 두 가닥을 같은 자리에서 곧게 자르기 때문에 튀어나온 부분이 없지요. 이런 끝을 평활 말단이라고 합니다.

효소	인식 서열과 자르는 자리	자른 뒤의 끝
EcoRI	5' G A A T T C 3' 3' C T T A A G 5'	5' 돌출 AATT
BamHI	5' G G A T C C 3' 3' C C T A G G 5'	5' 돌출 GATC
SacI	5' G A G C T C 3' 3' C T C G A G 5'	3' 돌출 AGCT
SmaI	5' C C C G G G 3' 3' G G G C C C 5'	평활 말단 돌출 없음

그림 10. 제한 효소 네 가지의 절단 위치와 말단 모양 — EcoRI·BamHI는 5' 돌출, SacI는 3' 돌출, SmaI는 평활 말단(굵은 선이 자른 자리, 모식도)

태오 평활 말단은 서로 붙을 수 없겠네요. 끈끈한 부분이 없으니까요.

석 교수 붙일 수는 있지만 훨씬 어렵다. 점착 말단은 수소 결합으로 잠시 맞붙어 있는 동안 리가아제가 이어 주는데, 평활 말단은 맞붙잡을 것이 없어서 리가아제가 우연히 두 끝이 만날 때를 기다려야 하지. 대신 평활 말단은 어떤 평활 말단과도 이을 수 있다는 장점이 있다.

하린 돌출이 5'인지 3'인지는 어떻게 알아요?

석 교수 위 가닥의 절단 위치가 인식 서열의 가운데보다 왼쪽에 있으면 5' 돌출, 오른쪽에 있으면 3' 돌출, 정가운데면 평활이다. EcoRI는 G^AAATTC로 여섯 글자 중 첫째 뒤를 자르니 가운데(셋째 뒤)보다 왼쪽이라 5' 돌출, SacI는 GAGCT^AC로 다섯째 뒤를 자르니 오른쪽이라 3' 돌출, SmaI는 CCC^AGGG로 정가운데라 평활이다.

태오 돌출 길이도 계산되겠네요. EcoRI는 첫째 뒤와 다섯째 뒤의 차이니까 네 글자, SacI도 다섯째 뒤와 첫째 뒤의 차이로 네 글자예요.

석 교수 그렇다. 위 가닥의 절단 위치와 아래 가닥의 절단 위치 사이의 글자 수가 돌출 길이이다.

문제 2.1

다음 이중 가닥 DNA(위 가닥만 표시)를 EcoRI와 BamHI로 함께 처리한다. 5'-TTGAATTCAGGATCCAA-3' (1) 두 효소의 인식 자리를 왼쪽부터 번호(1~17)로 찾아라. (2) 이 선형 DNA는 몇 조각이 되는가? (3) 위 가닥 기준으로 각 조각은 몇 염기인가?

하린 왼쪽부터 번호를 매기면 T1, T2, G3, A4, A5, T6, T7, C8, A9, G10, G11, A12, T13, C14, C15, A16, A17이에요. GAATTC는 3번에서 8번까지 있어요.

태오 GGATCC는 10번에서 15번이에요. 그러니까 자리가 두 개, 선형이니까 조각은 세 개예요.

석 교수 (3)은?

태오 EcoRI는 G와 A 사이, 3번과 4번 사이를 자르니 첫 조각은 TTG, 3염기예요. BamHI는 G^AGATCC니까 10번과 11번 사이를 잘라서, 둘째 조각은 4번부터 10번까지 AATTCAG 7염기, 셋째 조각은 11번부터 17번까지 GATCCAA 7염기예요.

석 교수 정답이다. (1) EcoRI 3~8번, BamHI 10~15번, (2) 3조각, (3) 위 가닥 기준 3, 7, 7염기. 더하면 3 + 7 + 7 = 17로 처음 길이와 같은 것도 확인했지? 조각 길이의 합이 처음 길이와 같다는 규칙은 9장에서 지도를 그릴 때 가장 먼저 쓰는 계산이다.

이모 그런데 BamHI 자리의 GATCC가 GGATCC 안에 있고, 그 앞 G는 10번이에요. 9번 A는 상관없나요?

석 교수 상관없습니다. 효소는 정해진 여섯 글자만 봅니다. 앞뒤에 무엇이 오든 GGATCC만 있으면 자르지요. 반대로 한 글자라도 다르면, 예를 들어 GGATCA라면 자르지 않습니다. 그게 이 가위의 정확성입니다.

2.4 자리가 k개면 조각은 몇 개인가

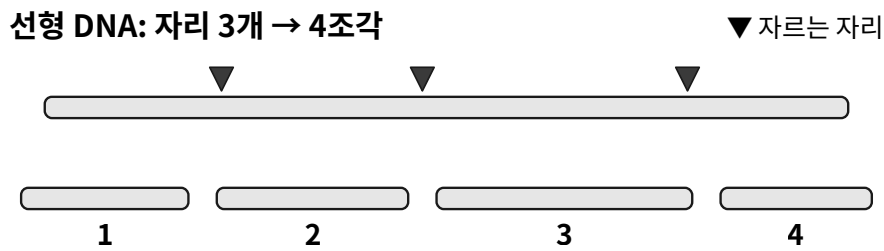
석 교수 마지막으로 조각 수를 세는 규칙이다. 막대 과자 하나를 칼로 한 번 자르면 몇 조각이지?

하린 두 조각이요. 두 번 자르면 세 조각이고요.

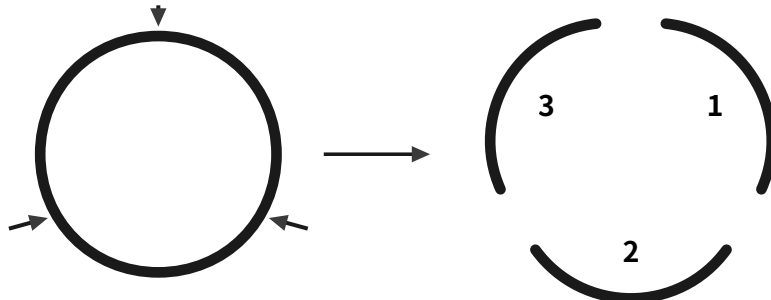
석 교수 이번엔 고무줄처럼 둥근 고리를 한 번 자르면?

하린 어, 한 줄이 돼요. 조각은 하나예요! 두 번 자르면 두 조각이고요.

석 교수 그게 규칙이다. 선형 DNA에 자르는 자리가 k개 있으면 조각은 k + 1개, 원형 DNA에 k개 있으면 조각은 k개다. **그림 11**에 자리 세 개를 표시해 비교했다.



원형 DNA(플라스미드): 자리 3개 → 3조각



자리가 1개뿐이면 고리가 열려 선형 1조각이 된다

그림 11. 자르는 자리 3개 — 선형 DNA는 4조각, 원형 DNA(플라스미드)는 3조각이 된다. 원형은 자리 하나만 있으면 끊어져 선형 한 조각이 된다(모식도)

태오 세균의 플라스미드는 원형이니까, 자리가 하나면 고리가 열리기만 하는 거네요.

석 교수 그렇다. 그래서 5장에서 플라스미드에 유전자를 넣을 때는 자르는 자리가 딱 하나인 효소를 고른다. 자리가 하나면 고리가 한 곳에서 열리고, 그 틈에 유전자를 끼워 넣을 수 있거든.

문제 2.2

원형 플라스미드에 HindIII 자리가 2개, EcoRI 자리가 1개 있다(세 자리는 모두 다른 곳). (1) HindIII만, (2) EcoRI만, (3) 두 효소를 함께 처리하면 각각 몇 조각이 되는가?

하린 원형이니까 자리 수가 곧 조각 수예요. (1) HindIII 자리 2개니까 2조각, (2) EcoRI 1개니까 1조각이에요.

태오 (3)은 자리가 모두 3개니까 3조각이요.

석 교수 정답이다. 2조각, 1조각, 3조각. (2)의 1조각은 고리가 열려 선형 한 가닥이 된 것이니, 전기영동에서는 고리 상태와 다른 위치에 띠가 생긴다. 8장에서 다시 보자.

이모 만약 문제에서 선형이라고 했다면요?

석 교수 그러면 하나씩 더해서 3조각, 2조각, 4조각이 됩니다. 시험에서 DNA가 선형인지 원형인지를 먼저 확인하는 습관이 감점을 막습니다. 경희대 2020학년도 문제는 첫 문장에 “길이 6.0인 선형 DNA”라고 못박아 두었지요.

2.5 실험실에서 가위를 쓰는 법

태오 실제 실험에서는 효소를 어떻게 써요? 시험관에 DNA랑 효소를 넣기만 하면 돼요?

석 교수 거의 그렇다. DNA 용액에 효소와, 효소가 잘 일하도록 pH와 염 농도를 맞춘 완충 용액, 그리고 마그네슘 이온(Mg^{2+})을 넣는다. 대장균에서 온 EcoRI라면 대장균이 사는 온도인 37 °C에 한두 시간 두면 된다. 잘랐는지는 8장의 전기영동으로 조각을 보면 알지.

하린 너무 오래 두면 엉뚱한 데까지 잘라요?

석 교수 조건이 정상이면 인식 서열만 자른다. 다만 효소를 지나치게 많이 넣거나 염 농도가 맞지 않으면, 비슷하지만 한 글자 다른 서열까지 자르는 일이 생긴다. 그래서 실험 설명서에 정해진 조건을 지킨다. 반대로 효소가 너무 적거나 시간이 짧으면 일부 자리만 잘린 부분 절단이 생겨, 예상보다 긴 조각이 섞인다. 9장의 조각 길이 문제는 모두 ‘모든 자리가 다 잘렸다’는 완전 절단을 전제로 한다.

이모 효소 두 개를 한꺼번에 넣어도 되나요?

석 교수 두 효소가 같은 완충 용액에서 잘 일하면 함께 넣습니다. 이것을 이중 처리라고 하지요. 경희대 2020학년도 문제의 자료가 바로 효소 하나씩, 그리고 둘씩 처리해 얻은 조각 길이였습니다. 하나씩 자른 조각과 둘을 함께 자른 조각을 비교하면, 자리가 서로 어떤 순서로 놓였는지가 보입니다.

태오 네 글자를 보는 AluI와 여섯 글자를 보는 EcoRI는 어느 쪽이 더 자주 잘라요?

석 교수 짐작해 보렴. 네 글자가 우연히 맞기 쉬울까, 여섯 글자가 맞기 쉬울까?

태오 네 글자요. 맞혀야 할 글자가 적으니까요.

석 교수 그렇다. 네 글자 서열은 평균 256 염기에 한 번, 여섯 글자 서열은 4096 염기에 한 번꼴로 나온다. 그래서 AluI로 자르면 잘게 토막 나고, EcoRI로 자르면 큼직한 조각이 나온다. 이 숫자가 어디서 나왔는지, 그리고 그 평균을 그대로 믿어도 되는지가 다음 장의 주제다. 유전자 하나를 통째로 꺼내려면 그 유전자 안을 자르지 않는 가위를 골라야 하니, 이 계산이 실험 계획의 첫 단계가 된다.

핵심 제한 효소 문제를 푸는 네 단계

1. 인식 서열을 위 가닥에서 찾는다. 회문 서열이면 한쪽 가닥만 보면 된다(거꾸로 된 상보 서열 = 자기 자신).
2. 절단 위치(^)로 말단을 정한다: 가운데보다 왼쪽이면 5' 돌출, 오른쪽이면 3' 돌출, 가운데면 평할 말단.
3. 조각 수를 센다: 선형은 자리 k개 → k + 1조각, 원형은 k개 → k조각.
4. 조각 길이의 합이 처음 길이와 같은지 계산한다.

스스로 풀어 보기

1. 5'-AAGCTT-3'(HindIII)와 5'-GAATTC-3' 중 회문 서열은 어느 것인가? 이유를 상보 가닥으로 보여라.
2. BamHI(G[^]GATCC)로 자른 말단은 5' 돌출인가 3' 돌출인가? 튀어나온 염기 서열을 5'→3'으로 쓰라.
3. 선형 DNA를 효소 A로 자르면 4조각, 효소 B로 자르면 2조각이 된다. A와 B의 자리가 겹치지 않을 때 두 효소를 함께 쓰면 몇 조각인가?
4. 세균의 제한 효소가 자기 DNA를 자르지 않는 까닭을 한 문장으로 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 가위는 4부의 여러 기출에서 제시문의 첫 문장으로 나온다. **기출문제 3**(경희대 2020) (232쪽)은 BamHI·SacI·EcoRI로 선형 DNA를 자른 조각 길이만 주고 자른 자리를 찾게 하는데, “선형은 $k + 1$ 조각, 조각 길이의 합은 처음 길이”라는 이 장의 규칙이 풀이의 출발점이다. **기출문제 5**(성균관대 2009) (254쪽)의 제시문은 EcoRI가 GAATTC를 인식해 G와 A 사이를 자르고 단일 사슬 끝을 남긴다고 설명하고, **기출문제 2**(연세대 2022) (222쪽)의 제시문 (나)는 세균이 침입한 외부 DNA를 제거하는 제한 효소를 소개한다. **기출문제 4**(성균관대 2011) (243쪽)의 cDNA 클로닝도 이 장의 가위에서 시작한다. BamHI으로 넣고 EcoRI으로 확인하며, 원형 플라스미드는 자리 k 개에서 k 조각이 된다는 이 장의 규칙이 띠 해석의 열쇠다.

이 장의 참고문헌

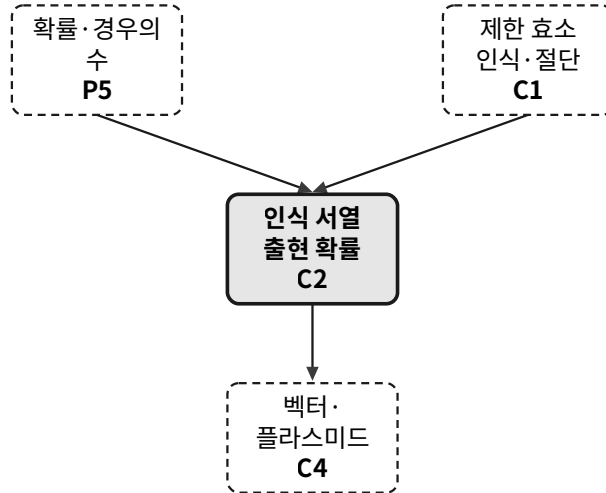
- Hedgpeth, J., Goodman, H. M., & Boyer, H. W. (1972). DNA nucleotide sequence restricted by the RI endonuclease. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69(11), 3448–3452. <https://doi.org/10.1073/pnas.69.11.3448>
- Kelly, T. J., Jr., & Smith, H. O. (1970). A restriction enzyme from *Hemophilus influenzae*: II. Base sequence of the recognition site. *Journal of Molecular Biology*, 51(2), 393–409. [https://doi.org/10.1016/0022-2836\(70\)90150-6](https://doi.org/10.1016/0022-2836(70)90150-6)
- Smith, H. O., & Wilcox, K. W. (1970). A restriction enzyme from *Hemophilus influenzae*: I. Purification and general properties. *Journal of Molecular Biology*, 51(2), 379–391. [https://doi.org/10.1016/0022-2836\(70\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0022-2836(70)90149-X)
- 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.

제 3장 인식 서열은 얼마나 자주 나올까

새 개념 $1/4^n$ 확률 · 여사건 · 근사 $1 - (1 - p)^m \approx mp$

이어집 제한 효소 2장 · 플라스미드의 단일 자리 5장 · 유전자 편집의 특이성 14장

이 장의 개념도



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

그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C2 인식 서열 출현 확률)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

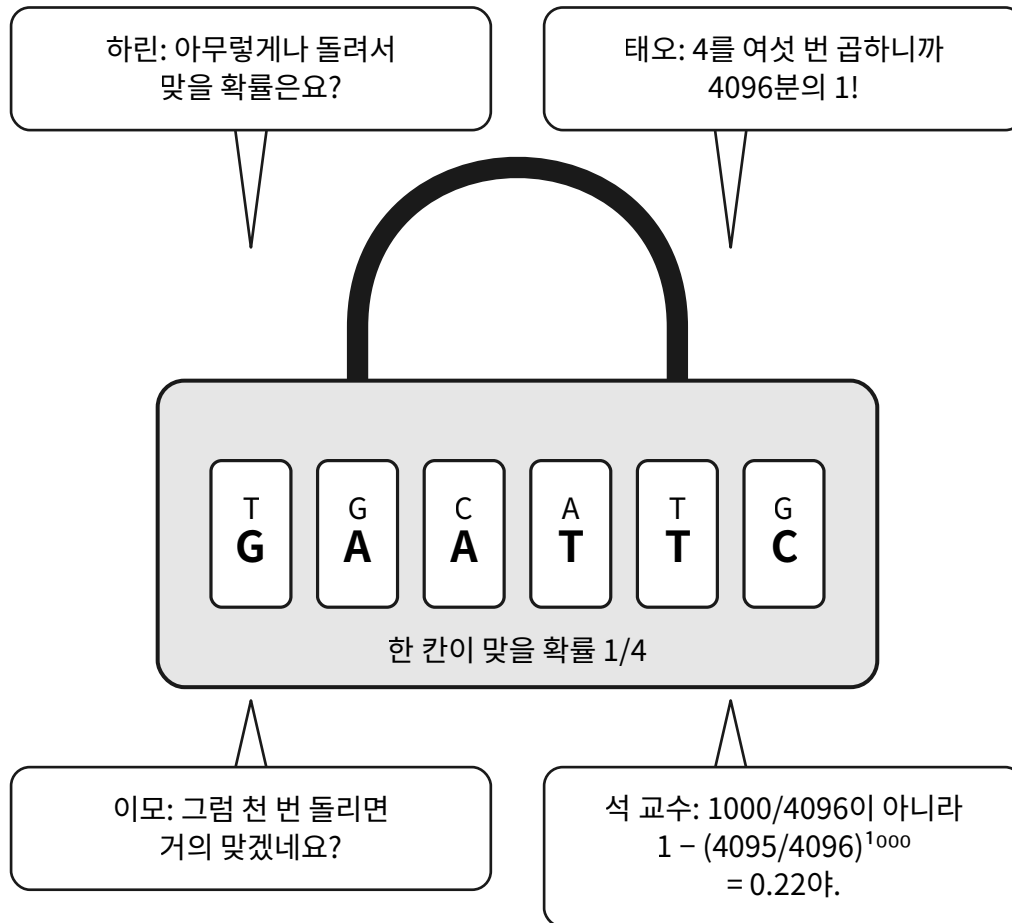
이 장의 개념이 쓰인 기출

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

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 5 (성균관대 2009년) (254쪽)	EcoRI 인식 서열 확률 예측의 타당성	C2 인식 서열 출현 확률

여섯 자리 비밀번호 자물쇠

바퀴마다 A·T·G·C 네 글자 — 아무렇게나 돌려서 열릴 확률은?



천 번 돌려 한 번이라도 열릴 확률

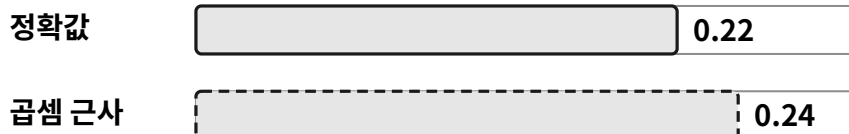


그림 13. 여섯 자리 비밀번호 자물쇠 — 각 자리에 A·T·G·C 네 글자가 있으면 한 번에 맞을 확률은 $1/4^6 = 1/4096$ 이다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 특정 6염기 서열이 한 자리에 나올 확률은 $1/4096$ 이다.
2. ‘적어도 하나’는 1에서 ‘하나도 없음’을 빼서 구한다.
3. 시도가 많아지면 곱셈 근사 mp가 실제 확률보다 커진다.

이 장의 출발점

- **기본개념편 제 2장 (26쪽)**의 인식 서열과 회문: EcoRI는 GAATTC를 인식하고, 회문이므로 한쪽 가닥만 보면 된다.
- 독립 사건의 곱: 동전 두 개가 모두 앞면일 확률은 $1/2 \times 1/2 = 1/4$.
- 여사건: 어떤 사건이 일어날 확률은 $1 - (\text{일어나지 않을 확률})$ 이다.

과학방 문에 새 자물쇠가 달려 있었다. 숫자 대신 A, T, G, C 네 글자가 새겨진 바퀴 여섯 개짜리였다. 하린은 비밀번호를 모른 채 바퀴를 아무렇게나 돌려 보다가 손을 들었다.

하린 교수님, 이거 몇 번이나 돌려야 열려요?

석 교수 그게 오늘 문제다. 그리고 그 자물쇠 문제는 2009학년도 성균관대 논술과 똑같은 문제야. 그 시험에서는 성균이라는 학생이 EcoRI로 두 유전자를 플라스미드에 넣으려 하는데, 유전자 안에 GAATTC가 우연히 들어 있으면 유전자가 토막 나 버린다. 그래서 그 확률을 계산해 “M 유전자는 확인할 필요가 크고 N 유전자는 상대적으로 적다”고 예측했지. 문제는 그 예측이 타당한지 논하라는 것이었다.

태오 확률이 생물 시험에 나오다니, 수학 시간 같네요.

석 교수 계산은 고등학교 확률의 곱과 여사건이면 충분하다. 다만 어떤 가정을 깔고 계산했는지, 그리고 어디서 근사를 썼는지를 따지는 게 이 문제의 핵심이다.

3.1 한 자리가 GAATTC일 확률

석 교수 자물쇠부터 하자. 바퀴 하나에 글자가 넷이니, 첫 바퀴가 우연히 맞을 확률은?

하린 4분의 1이요.

석 교수 첫 바퀴와 둘째 바퀴가 모두 맞을 확률은?

하린 $1/4 \times 1/4 = 1/16$ 이요. 여섯 바퀴면 $1/4$ 을 여섯 번 곱해서... $4^6 = 4096$ 이니가 4096분의 1이네요.

석 교수 그림 14처럼 한 바퀴씩 곱해 가면 $1/4$, $1/16$, $1/64$, $1/256$, $1/1024$, $1/4096$ 으로 줄어든다. DNA도 같다. 어떤 자리에서 연속한 여섯 염기가 정확히 GAATTC일 확률은 $(1/4)^6 = 1/4096$ 이다.

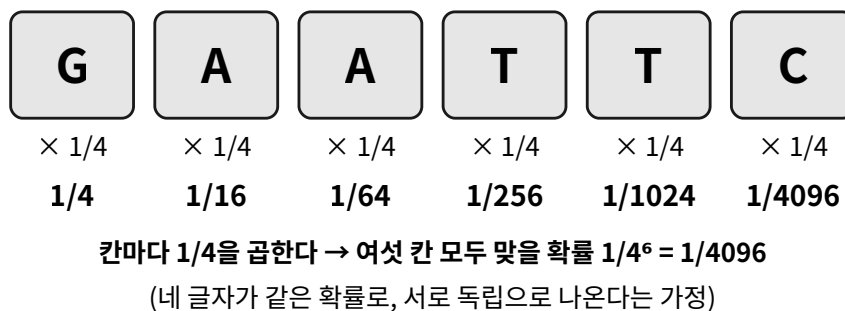


그림 14. 여섯 칸 자물쇠의 확률 — 칸마다 네 글자 중 하나가 맞을 확률 $1/4$ 을 곱해 가면 여섯 칸이 모두 맞을 확률은 $1/4096$ 이 된다(모식도)

태오 그런데 이 계산이 맞으려면 조건이 있잖아요. 네 염기가 똑같이 1/4씩 나오고, 앞 자리의 염기가 뒷자리에 영향을 주지 않아야 해요.

석 교수 그 두 가정을 기억해 두자. 첫째, 네 염기의 빈도가 같다. 둘째, 각 자리의 염기는 서로 독립이다. 성균관대 제시문도 “각각의 위치에는 4 종류의 염기가 들어갈 확률이 모두 같다고 생각하였다”라고 가정을 밝혔다. 이 가정이 실제 DNA에서 얼마나 맞는지는 이 장 끝에서 따진다.

이모 그럼 네 글자짜리 가위와 여덟 글자짜리 가위는요?

석 교수 같은 방법입니다. n 글자 서열이 한 자리에 나올 확률은 $1/4^n$ 이지요. 네 글자면 $1/256$, 여섯 글자면 $1/4096$, 여덟 글자면 $1/65\,536$ 입니다. 거꾸로 말하면 평균 256 염기, 4096 염기, 65 536 염기마다 한 번꼴로 자리가 나온다는 뜻이에요. **그림 15**에 세로축을 로그 눈금으로 그렸습니다.

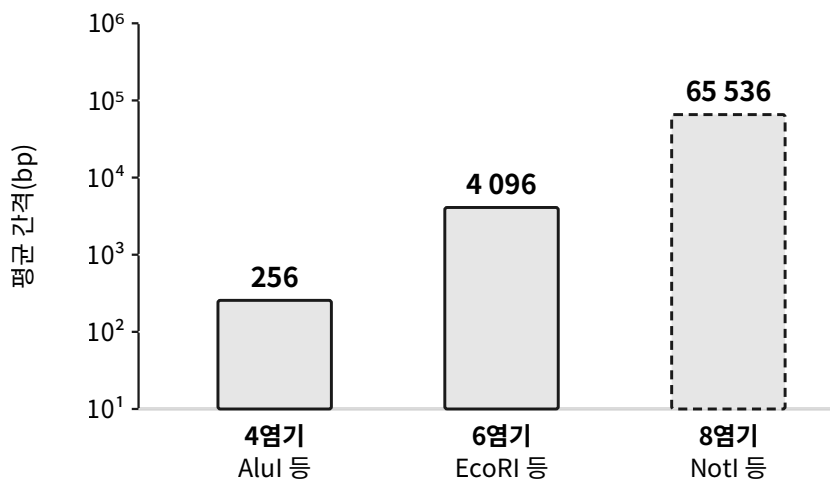


그림 15. 인식 서열 길이에 따른 평균 자리 간격 — 4염기 256 bp, 6염기 4096 bp, 8염기 65 536 bp. 글자가 2개 늘 때마다 간격이 16배가 된다(세로축 로그 눈금, 계산값)

하린 글자가 두 개 늘 때마다 16배씩 커지네요.

석 교수 $4^2 = 16$ 이니까. 그래서 큰 유전자를 통째로 꺼내려면 여섯이나 여덟 글자짜리 가위를 쓰고, DNA를 잘게 토막 내려면 네 글자짜리를 쓴다.

3.2 길이 N인 유전자 안의 창은 몇 개인가

석 교수 이제 유전자 하나를 보자. 길이가 N 염기인 가닥에서 연속한 여섯 염기를 고르는 방법은 몇 가지일까?

태오 N개 아니에요?

석 교수 작은 예로 확인해 보자. 염기가 7개라면, 여섯 개짜리 창을 1번부터 대면 1~6, 2~7이 끝이다.

태오 아, 두 개네요. $7 - 5 = 2$. 그러니까 N개가 아니라 $N - 5$ 개예요.

석 교수 그렇다. n 글자 창이면 $N - n + 1$ 개다. 마지막 창의 첫 글자가 $N - n + 1$ 번이니까. 1005 염기짜리 M 유전자에는 창이 1000개, 105 염기짜리 N 유전자에는 100개 있다. 문제를 낸 사람이 일부터 1005와 105를 골라 창 수가 깔끔한 1000과 100이 되도록 했지.

하린 두 가닥이니 창을 두 배로 세야 하지 않아요?

석 교수 좋은 의심이다. 2장에서 직접 확인했듯이, 아래 가닥에서 GAATTC를 읽는 것은 위 가닥의 같은 자리에서 GAATTC의 거꾸로 된 상보 서열을 읽는 것과 같다. 그런데 GAATTC는 회문이라 거꾸로 된 상보 서열이 자기 자신이다. 그래서 아래 가닥의 GAATTC는 위 가닥의 GAATTC와 같은 자리이고, 따로 셀 필요가 없다. 성균관대 제시문이 “상보적인 서열은 고려하지 않고 한쪽 가닥의 서열만을 생각할 때”라고 쓴 이유가 이것이다. 회문이 아닌 서열을 찾는다면 두 가닥을 모두 세야 한다.

3.3 ‘적어도 하나’는 여사건으로

석 교수 이제 M 유전자에 GAATTC가 적어도 하나 있을 확률을 구하자. 한 번, 두 번, 세 번 나올 경우를 다 더하는 건 복잡하니...

태오 하나도 없을 확률을 1에서 빼요! 한 창이 GAATTC가 아닐 확률은 $1 - 1/4096 = 4095/4096$ 이고, 창 1000개가 모두 아니어야 하니까 $(4095/4096)^{1000}$ 이요.

석 교수 창끼리 독립이라고 보면 그렇다. 엄밀히는 이웃 창이 다섯 글자를 공유하니 완전히 독립은 아니지만, GAATTC는 자기 자신과 겹쳐 나오기 어려운 서열이라 이 계산의 오차는 아주 작다. 확률을 계산할 때는 독립으로 근사해도 되지만, 남의 계산이 타당한지 논할 때는 다르다. 2009학년도 성균관대 문항의 대학 예시 답안은 바로 이 “창끼리 독립이 아니다”를 예측의 결함으로 꼽았다.

하린 이웃 창이 겹친다는 게 무슨 뜻이에요?

석 교수 일곱 염기짜리 서열을 보자. 창은 1~6번과 2~7번 두 개다. 두 창이 동시에 GAATTC가 되려면 1~6번이 GAATTC이고 2~7번도 GAATTC여야 하는데, 그러면 2번 글자가 A(앞 창의 둘째)이면서 G(뒤 창의 첫째)여야 하니 불가능하다. 그러니 이 경우 정확한 확률은 딱 $2/4096$ 이다. 독립이라고 계산하면 $1 - (4095/4096)^2 = 2/4096 - 1/4096^2$ 로, 차이가 $1/4096^2$, 곧 약 6×10^{-8} 이다.

태오 무시해도 될 만큼 작네요.

석 교수 그래서 독립 가정으로 계산해도 결과가 거의 같다. 계산해 보자.

문제 3.1

M 유전자(1005 염기)에 EcoRI 인식 서열 GAATTC가 적어도 하나 있을 확률을 (1) 정확한 식 $1 - (1 - 1/4096)^m$ 으로, (2) 근사 $m/4096$ 으로 구하고, (3) 근사가 정확값보다 몇 % 큰지 구하라. (네 염기의 빈도는 같고 각 자리는 독립이라고 가정)

태오 $m = 1005 - 5 = 1000$ 이에요. $(4095/4096)^{1000}$ 은 계산기로... 자연로그로 바꾸면 $1000 \times \ln(4095/4096) = 1000 \times (-2.442 \times 10^{-4}) = -0.2442$, $e^{(-0.2442)} = 0.7834$ 예요. 그러니까 (1)은 $1 - 0.7834 = 0.2166$ 이요.

하린 (2)는 $1000 \div 4096 = 0.2441$ 이에요.

태오 (3)은 $(0.2441 - 0.2166) \div 0.2166 = 0.127$, 약 13 % 커요.

석 교수 정답이다. (1) 0.2166, (2) 0.2441, (3) 근사가 약 13 % 크다. 같은 계산을 N 유전자에 해 보면, 창 100개에서 정확값 0.0241, 근사 $100/4096 = 0.0244$ 로 차이가 1 % 남짓이다.

이모 같은 근사인데 M에서는 13 %나 틀리고 N에서는 1 %밖에 안 틀리네요. 왜 그래요?

3.4 근사 mp는 언제 믿을 수 있나

석 교수 근사식의 정체를 보면 알 수 있어요. $1 - (1 - p)^m$ 을 펼치면 mp에서 시작해 $(mp)^2/2$ 정도를 빼고, 그보다 작은 항들이 이어집니다. p가 아주 작으면 $(1 - p)^m \approx 1 - mp$ 라고 보고 $1 - (1 - mp) = mp$ 로 쓴 게 근사예요. 버린 항 중 가장 큰 것이 $(mp)^2/2$ 이니, 근사의 상대 오차는 대략 $mp/2$ 입니다.

태오 M은 $mp = 0.0244$ 니까 오차가 약 0.12, 12 %. 실제로 13 %였어요. N은 $mp = 0.0244$ 니까 약 1.2 %고요.

석 교수 맞다. 그래서 확인 규칙을 이렇게 정한다. 근사값 mp가 0.1보다 작으면 상대 오차가 5 % 남짓 이하라 근사를 믿고, 0.1을 넘으면 정확한 식으로 다시 계산한다. 2부에서 다시 쓸 규칙이다. 표 8에 길이에 따른 값을 계산해 두었다.

표 8. 유전자 길이 N에 따른 정확값 $1 - (1 - 1/4096)^N$ 과 근사 $(N - 5)/4096$ — 근사의 상대 오차는 대략 $mp/2$ 이다(계산값)

길이 N(염기)	창 수 m	정확값	근사 mp	근사의 상대 오차
105	100	0.0241	0.0244	1.2 %
505	500	0.1149	0.1221	6.2 %
1005	1000	0.2166	0.2441	12.7 %
2005	2000	0.3864	0.4883	26.4 %
4101	4096	0.6322	1.0000	58.2 %

하린 맨 아래 줄은 근사가 1이에요. 확률이 1이면 반드시 있다는 거잖아요. 그런데 정확값은 0.63이에요.

석 교수 그게 근사가 틀어지는 모습이다. 사실 mp는 확률이 아니라 ‘창 1000개에서 GAATTC가 평균 몇 번 나오나’, 곧 기댓값이다. 평균 1번 나오는 상황에서도 운이 나쁘면 0번, 운이 좋으면 2번, 3번 나온다. 0번일 확률이 약 0.37이라, 적어도 한 번일 확률은 0.63에 그치지. 기댓값이 작을 때만 기댓값과 확률이 거의 같아진다. 그림 16에서 실선과 점선이 처음에는 붙어 가다가 점점 벌어지는 게 그 모습이다.

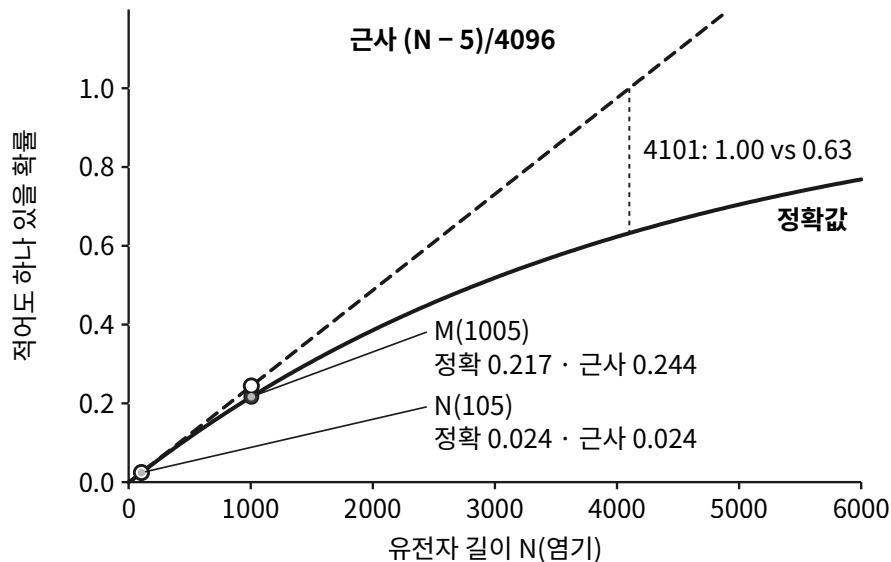


그림 16. 유전자 길이에 따른 ‘GAATTC가 적어도 하나 있을 확률’ — 실선은 정확값 $1 - (1 - 1/4096)^{N-5}$, 점선은 근사 $(N - 5)/4096$. M(1005 염기)에서 0.217과 0.244로 벌어지고 N(105 염기)에서는 거의 같다(계산값)

이모 기댓값과 확률이 다르다는 게 아직 잘 와닿지 않아요. 숫자로 한 번 더 보여 주실 수 있어요?

석 교수 M 유전자로 나눠 보지요. 창 1000개 중 정확히 한 곳만 GAATTC일 확률은, 한 곳을 고르는 1000가지 × 그곳이 GAATTC일 확률 $1/4096$ × 나머지 999곳이 모두 아닐 확률 $(4095/4096)^{999}$ 이라, $1000 \times (1/4096) \times (4095/4096)^{999} = 0.1913$ 입니다. 적어도 한 곳일 확률이 0.2166이었으니, 두 곳 이상일 확률은 $0.2166 - 0.1913 = 0.0253$ 이에요.

태오 근사 $mp = 0.2441$ 은 ‘한 번’을 1로, ‘두 번’을 2로 쳐서 더한 평균이니까, 두 번 이상인 경우를 여러 번 세서 확률보다 커지는 거군요.

석 교수 바로 그거다. 확률은 ‘있느냐 없느냐’만 세고, 기댓값은 ‘몇 개냐’를 센다. 두 번 이상 나올 일이 드물 때, 곧 mp 가 작을 때만 둘이 거의 같다.

태오 그럼 성균이의 결론은 틀린 거예요?

석 교수 결론, 곧 ‘M을 확인할 필요가 N보다 크다’는 그대로 맞다. 정확값으로도 M은 0.22, N은 0.024로 약 9배 차이가 나니까. 틀린 것은 M의 확률값을 0.24라고 쓴 부분의 정밀도다. 4부에서 그 문제를 풀 때는 이 둘을 나누어 평가해야 한다. ‘계산의 틀은 맞다, 근사의 정확도는 M에서 떨어진다, 결론은 유지된다’ 이 세 문장이 답안의 뼈대다.

이번엔 네 글자짜리 가위로 같은 유전자를 보자.

문제 3.2

M 유전자(1005 염기)에 AluI 인식 서열 AGCT(4염기, 회문)가 (1) 하나도 없을 확률과 (2) 평균 몇 번 나오는지(기댓값)를 구하라. 이 유전자를 통째로 꺼낼 때 AluI를 써도 되는가?

하린 네 글자니까 창 수는 $1005 - 4 + 1 = 1002$ 개예요. 한 창이 AGCT일 확률은 $1/256$ 이고요.

- 태오** (1)은 $(255/256)^{1002}$ 이에요. $1002 \times \ln(255/256) = 1002 \times (-0.003914) = -3.922$, $e^{-3.922} = 0.0198$ 이요. (2)는 $1002 \div 256 = 3.91$ 번이에요.
- 석 교수** 정답이다. 하나도 없을 확률은 0.0198, 약 2 %이고 평균 3.91번 나온다. 그러니 Alu로 자르면 이 유전자는 거의 틀림없이 토막 난다. 통째로 꺼내려면 Alu는 쓰면 안 된다. 여기서 $mp = 3.91$ 로 0.1을 훨씬 넘으니, 근사로 ‘확률 391 %’라고 쓰면 말이 안 되는 답이 나온다는 것도 확인해 뒀.
- 하린** 짧은 N 유전자라면 Alu를 써도 괜찮아요?
- 석 교수** 계산해 보자. 105 염기에 네 글자 창은 $105 - 3 = 102$ 개다.
- 하린** 하나도 없을 확률은 $(255/256)^{102} = 0.671$ 이에요. 그러니까 적어도 한 번 잘릴 확률은 $1 - 0.671 = 0.329$, 약 33 %요. 기댓값은 $102 \div 256 = 0.398$ 번이고요.
- 태오** 이번에도 근사 0.398은 정확값 0.329보다 꽤 크네요. mp가 0.4라서 0.1을 넘으니까요.
- 석 교수** 잘 확인했다. 짧은 N 유전자라도 Alu로는 세 번에 한 번꼴로 잘린다. 네 글자 가위는 짧은 유전자에도 위험하고, 여섯 글자 가위는 짧은 유전자에는 안전하지만 긴 유전자에는 위험하다. 가위의 글자 수와 유전자 길이를 함께 따져야 한다는 것, 성균관대 문제가 M과 N 두 길이를 나란히 준 이유가 바로 이것이다.

3.5 거꾸로 묻기: 몇 염기면 반반인가

- 석 교수** 논술 문제는 가끔 계산을 거꾸로 묻는다. GAATTC가 적어도 하나 있을 확률이 꼭 절반이 되려면 유전자가 몇 염기여야 할까?
- 태오** 하나도 없을 확률이 0.5면 되니까 $(4095/4096)^m = 0.5$ 예요. 양변에 로그를 취하면 $m \times \ln(4095/4096) = \ln 0.5$, $m = -0.6931 \div (-2.442 \times 10^{-4}) = 2839$ 예요. 창 수가 2839개니까 길이는 $2839 + 5 = 2844$ 염기요.
- 석 교수** 정답이다. 약 2844 염기, 곧 3 kb가 조금 안 되는 유전자라면 EcoRI 자리가 있을 확률과 없을 확률이 반반이다. 평균 간격 4096보다 짧은 길이에서 벌써 절반에 이른다는 점이 재미있지?
- 하린** 평균 4096마다 한 번이면, 4096 염기쯤 돼야 반반일 줄 알았어요.
- 석 교수** 많은 사람이 그렇게 착각한다. 4096 염기에서는 기댓값이 1이고, 그때 적어도 한 번일 확률은 앞에서 본 대로 0.63이다. 반반이 되는 길이는 $4096 \times \ln 2 \approx 4096 \times 0.693 \approx 2840$ 으로, 평균 간격의 약 0.69배다.
- 태오** 근사가 5 % 오차로 버티는 한계 길이도 구할 수 있겠네요. $mp = 0.1$ 이면 $m = 0.1 \times 4096 = 410$, 길이 415 염기요.
- 석 교수** 그렇다. 415 염기보다 짧은 유전자라면 $m/4096$ 근사로 충분하고, 그보다 길면 정확한 식으로 계산하는 편이 안전하다. 105 염기의 N은 근사 영역 안쪽, 1005 염기의 M은 바깥쪽에 있었던 거다.

3.6 실제 DNA는 무작위가 아니다

- 이모** 그런데 실제 유전자도 정말 네 글자가 1/4씩 고르게 섞여 있나요?
- 석 교수** 그렇지 않습니다. 이게 이 계산의 가장 큰 한계예요. 람다 파지라는 바이러스의 DNA는 48 502 염기쌍입니다. 무작위라면 EcoRI 자리가 $48\,497 \div 4096 = 11.8$ 개쯤 있어야 하는데, 실제로는 5개뿐이에요.

- 태오** 반도 안 되네요. 왜 그래요?
- 석 교수** 몇 가지 이유가 있다. 생물마다 G와 C의 비율이 달라 네 염기가 1/4씩이 아니다. 단백질을 만드는 유전자는 같은 아미노산을 정하는 코돈 가운데 특정한 것을 더 자주 쓰는 경향이 있고, 그 때문에 특정 여섯 글자 조합이 많거나 적어진다. 파지처럼 세균에 침입하는 생물은 세균의 가위에 덜 잘리도록 인식 서열이 줄어드는 쪽으로 진화했을 가능성도 거론된다. 마지막 설명은 교과 밖 심화다.
- 하린** G와 C 비율이 다르면 확률이 얼마나 달라져요?
- 석 교수** 계산해 보자. 어떤 생물의 DNA에서 G와 C가 각각 30 %, A와 T가 각각 20 %라고 하자. GAATTC는 G 하나, A 둘, T 둘, C 하나니까 $0.3 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.3$ 이다.
- 태오** $0.3^2 \times 0.2^4 = 0.09 \times 0.0016 = 0.000144$ 예요. $1/4096 = 0.000244$ 보다 작아요. $0.000144 \div 0.000244 = 0.59$ 배요.
- 석 교수** 그렇다. 이런 DNA에서는 GAATTC가 평균 6944 염기에 한 번꼴로, 고른 경우보다 40 % 남짓 드물게 나온다. 1005 염기의 M 유전자라면 기댓값은 $1000 \times 0.000144 = 0.144$ 로 줄어든다. 염기 빈도 하나만 바뀌도 결과가 이만큼 흔들리니, $1/4096$ 은 출발점일 뿐이다.
- 하린** 그럼 확률 계산은 쓸모없어요?
- 석 교수** 쓸모는 있다. 실험 전에 위험도를 대략 가늠하는 데는 충분하다. 다만 실제 실험에서는 확률로 끝내지 않고, 유전자의 염기 서열을 읽어 GAATTC가 있는지 직접 확인하거나, 유전자를 EcoRI로 잘라 보고 8장의 전기영동으로 토막이 났는지 본다. 성균관대 문제의 지도 교수도 결국 “점검하라”고 했지, 확률로 판단을 끝내라고 하지는 않았지.
- 이모** 실험실에 가위가 여러 개 있으면 덜 걱정해도 되겠네요.
- 석 교수** 맞아요. 그것도 계산할 수 있습니다. 서로 다른 여섯 글자 가위 세 개가 있고, 각각이 M 유전자를 자를 확률이 0.2166이라고 합시다. 세 가위가 모두 M을 자를 확률은, 서로 독립이라고 보면 $0.2166^3 = 0.0102$ 예요. 그러니 셋 중 적어도 하나는 M을 자르지 않을 확률이 $1 - 0.0102 = 0.990$ 입니다.
- 태오** 가위 하나로는 다섯 번에 한 번꼴로 실패하지만, 셋 중에서 고르면 거의 실패하지 않네요. 그래서 5장에서 플라스미드에 여러 효소 자리를 모아 둔다고 하셨군요.
- 석 교수** 그렇다. 다중 클로닝 자리라고 부르는데, 그중 유전자를 자르지 않는 가위를 골라 쓰면 된다.
- 태오** 사람 유전체 전체에는 EcoRI 자리가 몇 개쯤 될까요?
- 석 교수** 반수체 약 3.1×10^9 염기쌍이니, 무작위라면 $3.1 \times 10^9 \div 4096 \approx 7.6 \times 10^5$, 약 76만 자리다. 실제 수와는 차이가 있겠지만, 사람 DNA를 EcoRI로 자르면 평균 수천 염기쌍 길이의 조각 수십만 개가 생긴다는 그림은 얻을 수 있다.
- 이모** 수십만 개의 조각이면 8장의 겔에서는 어떻게 보여요?
- 석 교수** 길이가 제각각인 조각이 너무 많아서 띠 하나하나로 갈리지 않고, 위에서 아래까지 길게 번진 얼룩처럼 보입니다. 그래서 사람 유전체에서 특정한 부위를 보려면 그 부위만 골라 늘리거나(10장의 PCR) 그 부위에만 붙는 탐침을 써야 하지요. 그 이야기는 뒤에서 이어 집니다.
- 태오** 14장의 유전자 가위가 20글자를 읽는다던데, 그것도 이 계산으로 설명돼요?

석 교수 그래. 4^{20} 은 약 1.1×10^{12} 로 유전체 길이보다 훨씬 크니, 20글자 서열은 유전체에 우연히 한 번 더 나올 가능성이 매우 낮다.

핵심 인식 서열 확률을 계산하는 다섯 단계

1. 한 자리 확률: n 글자 서열은 $p = 1/4^n$ (네 염기 빈도 같음·자리끼리 독립 가정).
2. 창 수: 길이 N 에서 $m = N - n + 1$. 회문이면 한쪽 가닥만 센다.
3. 적어도 하나: $1 - (1 - p)^m$. 하나도 없음: $(1 - p)^m$.
4. 근사: mp (= 기댓값). $mp < 0.1$ 이면 믿고, 넘으면 정확한 식으로 다시 계산한다(상대 오차 $\approx mp/2$).
5. 한계: 실제 DNA는 무작위가 아니므로 계산은 위험도의 추정이고, 서열 확인이나 절단 실험으로 검증한다.

스스로 풀어 보기

1. 8염기 서열 GCGGCCGC(NotI)가 한 자리에 나올 확률과 평균 자리 간격을 쓰라.
2. 2005 염기 유전자에 GAATTC가 적어도 하나 있을 확률의 정확값과 근사를 쓰고, 어느 쪽을 답으로 써야 하는지 확인 규칙으로 판정하라.
3. 회문이 아닌 6염기 서열 GAATTG를 길이 1005 염기의 이중 가닥 DNA에서 찾을 때 창 수는 몇 개로 세야 하는가?
4. M 유전자(1005 염기)에 NotI 자리가 적어도 하나 있을 확률을 근사로 구하고, 근사를 믿어도 되는지 판정하라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 계산은 4부의 **기출문제 5**(성균관대 2009) (254쪽)에서 그대로 쓰인다. 그 문제는 M(1005 염기)과 N(105 염기) 유전자에 EcoRI 인식 서열이 있을 확률을 근사로 구한 학생의 예측이 타당한지 묻는다. 대학 예시 답안이 배점의 대부분을 준 것은 “ $n - 5$ 개의 창을 독립시행으로 보았지만 이웃 창은 겹쳐 독립이 아니다”라는 이 장의 지적이고, 문제 3.1의 정확값과 근사, **표 8**의 상대 오차, 실제 DNA가 무작위가 아니라는 한계가 그 뒤를 받친다. **기출문제 3**(경희대 2020) (232쪽)은 확률을 묻지는 않지만, 제한 효소가 정해진 서열에서만 자른다는 이 장의 출발점 위에서 조각 길이를 해석하게 한다.

이 장의 참고문헌

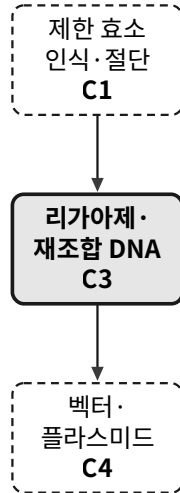
- Danna, K., & Nathans, D. (1971). Specific cleavage of simian virus 40 DNA by restriction endonuclease of *Hemophilus influenzae*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 68(12), 2913–2917. <https://doi.org/10.1073/pnas.68.12.2913>
- Smith, H. O., & Wilcox, K. W. (1970). A restriction enzyme from *Hemophilus influenzae*: I. Purification and general properties. *Journal of Molecular Biology*, 51(2), 379–391. [https://doi.org/10.1016/0022-2836\(70\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0022-2836(70)90149-X)
- 성균관대학교. (2008). 2009학년도 신입학전형(수시 2-II) 논술고사 문제지(자연) [시험 자료].
- 성균관대학교 입학처. (2010). 2011학년도 성균관대학교 논술 가이드북 [자료집].

제 4장 붙이는 풀: DNA 리가아제와 재조합 DNA

새 개념 DNA 리가아제 · 인산다이에스터 결합 · 호환 말단 · 삽입 방향

이어짐 제한 효소 2장 · 플라스미드 5장 · 클로닝 7장

이 장의 개념도



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

그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C3 리가아제·재조합 DNA)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.

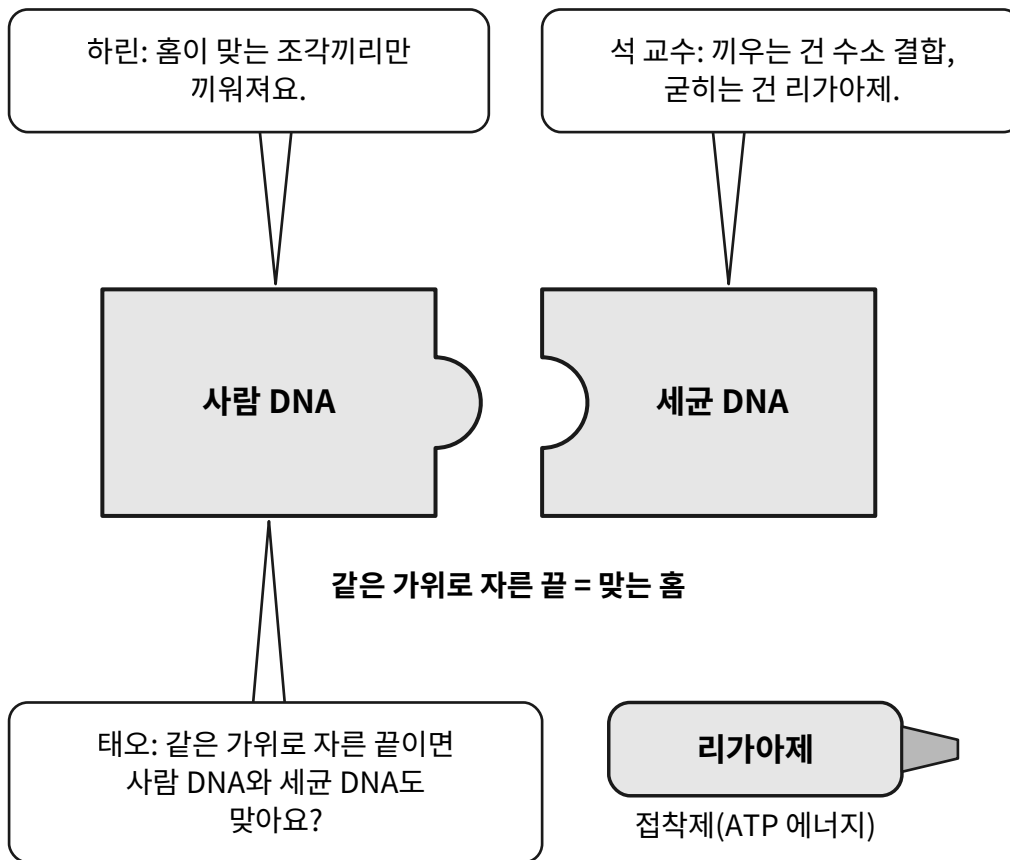
이 장의 개념이 쓰인 기출

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 4 (성균관대 2011년) (243쪽)	cDNA 클로닝 결과를 따로 판별하기	C3 리가아제·재조합 DNA

홈이 맞는 퍼즐 조각과 접착제

끼우는 것은 수소 결합, 굳히는 것은 리가아제



실제 DNA의 홈: EcoRI가 남긴 AATT 돌출

T	C	A	G	A	A	T	T	C	G	G	A	맞물림
A	G	T	C	T	T	A	A	G	C	C	T	

그림 18. 홈이 맞는 퍼즐 조각과 접착제 — 같은 가위로 자른 끝은 홈이 맞아 끼워지고(수소 결합), 접착제(리가아제)가 이음매를 굳힌다(모식도)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 같은 제한 효소로 자른 점착 말단은 서로 상보적이라 맞물린다.
2. DNA 리가아제가 당-인산 골격을 공유 결합으로 잇는다.
3. 이렇게 서로 다른 생물의 DNA를 이은 것이 재조합 DNA다.

이 장의 출발점

- **기본개념편 제 2장 (26쪽):** EcoRI는 G^AAATTC를 엇갈려 잘라 양쪽 끝에 5'-AATT 돌출(점착 말단)을 남긴다. 제한 효소가 끊는 것은 인산다이에스터 결합이다.
- DNA 가닥의 뼈대: 한 뉴클레오타이드의 3'-OH와 다음 뉴클레오타이드의 5'-인산이 이어진 당-인산 사슬.
- ATP는 세포의 에너지 화폐로, 결합을 만드는 반응에 에너지를 낸다.

하린이 가져온 퍼즐 상자를 쏘자 탁자 위에 조각들이 흩어졌다. 하린이 아무 조각이나 맞춰 보다가 흠이 맞는 두 조각을 찾아 끼웠고, 태오는 그 위에 투명 접착제를 바르려 했다.

석 교수 지금 둘이 한 일이 오늘의 두 단계다. 흠이 맞는 조각을 찾아 끼우는 일, 그리고 끼운 조각을 접착제로 굳히는 일.

하린 지난주에 자른 DNA 끝이 AATT로 튀어나와 있었잖아요. 그게 흠이예요?

석 교수 그래. 2장에서 DNA를 잘랐으니 오늘은 붙인다. 잘린 두 끝이 어떻게 다시 만나고, 무엇이 그 이음매를 굳히며, 다른 가위로 자른 끝끼리도 붙을 수 있는지, 그리고 유전자를 넣을 때 방향은 어떻게 정해지는지를 본다.

4.1 점착 말단은 수소 결합으로 잠시 맞붙는다

석 교수 EcoRI로 자른 사람 DNA 조각 하나와 EcoRI로 자른 세균 DNA 조각 하나를 한 시험관에 넣었다고 하자. 두 조각의 끝에는 모두 5'-AATT가 튀어나와 있다.

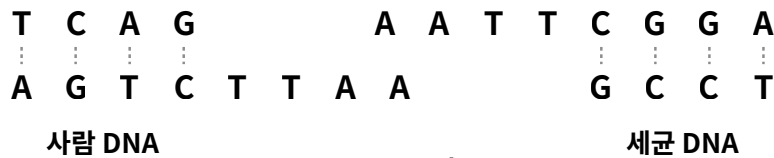
태오 AATT의 상보 서열을 거꾸로 읽으면 AATT니까, 두 끝이 서로 짝을 지을 수 있어요. A는 T와, T는 A와요.

석 교수 맞다. 두 끝이 우연히 만나면 네 쌍의 염기가 수소 결합으로 맞붙는다. 그런데 A-T 쌍은 수소 결합이 두 개씩이니, 네 쌍이면 겨우 여덟 개다. 이 정도로는 실온에서 금방 다시 떨어진다. 붙었다 떨어졌다를 되풀이하는 셈이지.

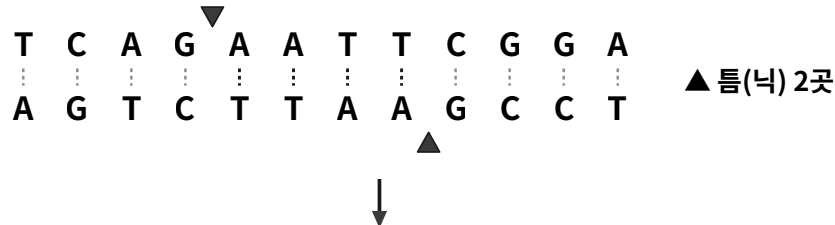
하린 그럼 붙어 있는 짧은 순간에 누가 단단히 이어 줘야겠네요.

석 교수 그게 DNA 리가아제다. **그림 19**를 보자. 맞붙은 두 조각의 위 가닥에는 끊긴 틈이 하나, 아래 가닥에도 끊긴 틈이 하나 있다. 이 틈을 닉(nick)이라고 부른다. 두 가닥의 염기는 모두 짝을 지었지만, 각 가닥의 뼈대가 한 군데씩 끊겨 있는 거야.

① 같은 가위(EcoRI)로 자른 두 조각



② 상보적인 돌출이 수소 결합으로 맞붙는다



③ 리가아제가 틈을 잇는다(ATP)

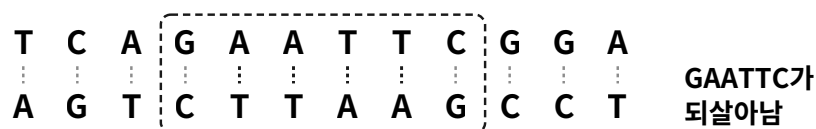


그림 19. 자르기 → 맞붙기 → 잇기 — EcoRI로 자른 두 조각의 AATT 돌출이 수소 결합(점선)으로 맞붙고, DNA 리가아제가 위·아래 가닥에 하나씩 남은 틈(▲)을 인산다이에스터 결합으로 이어 하나의 DNA가 된다(모식도)

이모 틈이 두 개인데 리가아제가 두 번 일하는 거예요?

석 교수 그렇습니다. 위 가닥의 틈 하나, 아래 가닥의 틈 하나를 각각 이어요. 틈의 위치가 엇갈려 있다는 것도 보세요. 2장에서 위와 아래를 엇갈려 잘랐으니, 다시 붙여도 틈이 엇갈린 자리에 남습니다. 그 엇갈림 덕분에 틈 하나가 이어지기 전에도 두 조각이 네 쌍의 염기로 붙잡혀 있을 수 있지요.

태오 리가아제가 정확히 무엇과 무엇을 이어요?

석 교수 틈의 한쪽에는 앞 뉴클레오타이드의 당에 붙은 3'-OH가, 다른 쪽에는 다음 뉴클레오타이드의 5'-인산이 있다. 리가아제는 이 둘 사이에 인산다이에스터 결합을 만든다. 제한 효소가 가수분해로 끊었던 바로 그 결합을 다시 만드는 거지. 결합을 만드는 반응은 에너지가 필요해서, 실험실에서 흔히 쓰는 리가아제는 ATP의 에너지를 쓴다.

하린 제한 효소가 자를 때 끝에 3'-OH와 5'-인산을 남겨 두니까, 리가아제가 바로 이를 수 있는 거군요.

석 교수 그렇다. 제한 효소와 리가아제가 짝이 잘 맞는 이유다. 둘을 한 표에 비교해 보자.

표 10. 제한 효소와 DNA 리가아제 — 하는 일, 끊거나 만드는 결합, 필요한 것, 비유

구분	제한 효소	DNA 리가아제
하는 일	특정 염기 서열을 인식해 DNA 두 가닥을 자른다	맞붙은 DNA 조각의 끊긴 뼈대를 잇는다
대상 결합	인산다이에스터 결합을 끊는다(가수분해)	인산다이에스터 결합을 만든다
필요한 것	인식 서열, Mg ²⁺	맞닿은 3'-OH와 5'-인산, ATP(에너지)
서열을 가리는가	인식 서열에서만 자른다	서열을 가리지 않고 틈이면 잇는다
세포 속 본래 역할	세균이 침입한 파지 DNA를 자른다	DNA 복제·수선에서 끊긴 가닥을 잇는다

구분	제한 효소	DNA 리가아제
비유	정해진 날말에서만 오르는 가위	홈이 맞은 조각을 굳히는 접착제

- 태오** 리가아제 반응은 몇 도에서 해요? 효소니까 37 °C가 제일 좋지 않아요?
- 석 교수** 여기에 재미있는 줄다리기가 있다. 효소만 보면 따듯할수록 빨리 일한다. 그런데 네 쌍짜리 AATT 맞붙음은 온도가 높을수록 쉽게 풀린다. 37 °C에서는 두 끝이 맞붙어 있는 시간이 너무 짧아서 리가아제가 일할 틈이 적지. 그래서 흔히 16 °C 안팎의 낮은 온도에서 오래, 몇 시간에서 하룻밤 동안 반응시킨다. 효소는 느려지지만 끝이 맞붙어 있는 시간이 길어지니까.
- 하린** 효소가 일하기 좋은 온도와 끝이 붙어 있기 좋은 온도의 중간을 고르는 거네요.
- 석 교수** 그렇다. 실험 조건 하나에도 이유가 있다. 논술에서 ‘왜 이런 조건을 썼는가’를 물으면, 이렇게 두 요인의 줄다리기로 설명하면 된다.
- 이모** 리가아제는 원래 세포에서 무슨 일을 해요? 세포가 DNA를 일부러 붙일 일이 있나요?
- 석 교수** 많습습니다. DNA를 복제할 때 한쪽 가닥은 짧은 조각(오카자키 절편)으로 끊어서 만드는데, 그 조각들을 이어 붙이는 것이 리가아제예요. 손상된 DNA를 고친 뒤 마지막 틈을 막는 것도 리가아제고요. 생명 공학은 그 접착제를 시험관으로 빌려 온 겁니다.

4.2 같은 가위로 자르면 어떤 DNA든 붙는다

- 태오** 그럼 사람 DNA와 세균 DNA도 EcoRI로만 자르면 붙어요?
- 석 교수** 그게 이 기술의 핵심이다. 리가아제는 이음매 양쪽이 어느 생물에서 왔는지 따지지 않는다. 돌출 서열이 맞기만 하면 사람의 인슐린 유전자와 대장균의 플라스미드도 이어진다. 이렇게 서로 다른 출처의 DNA를 이어 만든 DNA를 재조합 DNA라고 한다.
- 하린** 그러면 다른 가위로 자른 끝끼리는 절대 안 붙어요?
- 석 교수** 돌출 서열이 같으면 다른 가위라도 붙는다. BamHI와 BglII를 보자. BamHI는 G[^]GATCC, BglII는 A[^]GATCT를 자르는데, 둘 다 5'-GATC를 남긴다. 인식 서열은 다르지만 튀어나온 홈의 모양이 같은 거지. 이런 끝을 호환 말단이라고 한다. 이어진 자리를 그림 20에 칸으로 그렸다.

생명 공학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

자르는 가위(제한 효소)와 붙이는 풀(리가아제), 나르는 배(플라스미드)로 유전자를 옮기고, 잘린 조각의 길이로 DNA를 읽어 판별한다.

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

2부 기출문제와 기본개념

기출 5문항(2009~2025학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

3부 논술답안작성 패턴분석

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

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 4문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 생명 공학인가
2. DNA를 자르는 가위: 제한 효소
3. 인식 서열은 얼마나 자주 나올까
4. 붙이는 풀: DNA 리가아제와 재조합 DNA
5. 유전자를 나르는 배: 플라스미드 벡터
6. 세균에 넣고 골라내기: 형질 전환과 선별
7. 유전자 클로닝과 인슐린 생산
8. DNA 조각의 길이를 재다: 겔 전기영동
9. 조각 길이로 위치를 찾다: 제한 효소 지도
10. DNA를 복사하다: PCR
11. 반복 서열과 DNA 지문
12. 염기 서열을 읽다: 서열 분석과 유전체
13. 복제 동물과 줄기세포
14. 유전자 치료·유전자 편집·GMO, 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: DNA 구조·복제 · 유전 암호·전사·번역 · 유전자 발현 조절 · 세포의 구조



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 979-11-23065-04-5

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명 공학 — 전체 282쪽

ssbook.kr/book/nonsul-05

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

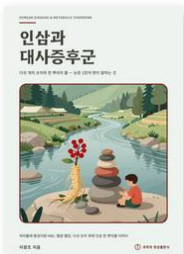
인삼 (6)



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

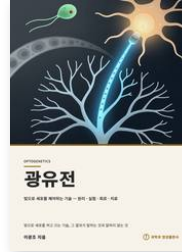
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/cupping99



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

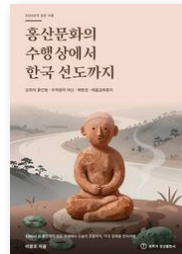
독립영양인간 (2)



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 홀로세 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