

# 생물진화

## 같은 문제, 다른 몸의 해법

인간은 완성형이 아니라, 같은 생리적 문제를 서로 다른 환경과 역사적 제약 속에서 풀어 온 척추동물의 여러 해법 가운데 하나다.

독자용 통합초고 v2.1 · 검토 후보

2026년 10월 4일

이 원고는 기존 18장의 내용을 중심으로 설명과 비교를 한 흐름에 통합한 초고다. 턱·치아의 신규 연구는 별도 검토 후보로 남아 있다. 출판 확정본은 아니다.

# 차례

프롤로그 · 기관은 사다리처럼 진화하지 않는다  
읽기 도구 · 분기, 비교, 발생, 증거

01. 심장 - 방의 수보다 회로의 배열
  02. 폐 - 물과 공기에서 기체를 교환하는 법
  03. 신장 - 물을 버릴 것인가, 지킬 것인가
  04. 간 - 대사 흐름이 모이는 장소
  05. 피부 - 막으면서도 통과시키는 경계
  06. 소화관 - 하나의 관이 여러 공간으로 나뉜다
  07. 뇌·신경계 - 더 큰 뇌가 아니라 다른 정보망
  08. 후각 - 화학환경을 읽는 여러 방식
  09. 청각 - 균형과 진동의 계통사
  10. 통각·심부감각 - 몸이 자기 상태를 읽는 법
  11. 운동기관 - 지느러미와 손 사이에는 사다리가 없다
  12. 뼈 - 단단함과 가벼움, 저장과 재생 사이
  13. 면역 - 자기 경계를 유지하는 여러 방식
  14. 생식 - 다음 세대로 이어지는 구조의 다양성
  15. 호르몬 - 기관을 연결하는 화학적 조절
  16. 혈관·혈액 - 움직이는 내부환경
  17. 시각 - 빛을 보는 방법은 하나가 아니다
  18. 미각 - 먹을 것과 피할 것을 구분하는 화학감각
  19. 턱·치아 - 보충 연구 후보와 열린 질문
- 인터루드: 체장 / 수선과 재생 / 림프·비장·흉선 / 태반  
근거와 편집 범위

## 프롤로그

### 기관은 사다리처럼 진화하지 않는다

사람의 몸을 바라볼 때 우리는 현재의 구조를 너무 쉽게 기준으로 삼는다. 네 개의 방을 가진 심장, 폐포로 가득한 폐, 농축뇨를 만드는 신장, 총판화된 대뇌피질 같은 구조를 보고 있으면 이전의 형태들은 자연스럽게 '덜 완성된 단계'처럼 보인다. 그러나 비교해부학과 계통생물학이 보여주는 그림은 다르다. 척추동물의 기관은 하나의 이상형을 향해 올라간 것이 아니라 서로 다른 환경과 계통의 제약 속에서 갈라지고, 기존 구조를 재사용하고, 때로는 기능을 잃고, 다른 방식으로 문제를 해결해 왔다.

질문은 '어느 기관이 더 발달했는가'가 아니라 '어떤 문제를 어떤 구조로 해결했는가'다. 물과 공기, 압력과 중력, 수분과 염분, 먹이와 독성, 감각과 운동, 감염과 번식이라는 조건이 바뀌면 좋은 해법도 바뀐다. 따라서 같은 기능을 서로 다른 구조가 수행할 수 있고, 같은 구조가 새로운 기능으로 전용될 수도 있다.

현재 인간의 몸은 이 긴 역사에서 나온 하나의 조합이다. 인간은 비교의 마지막 열에 놓일 수는 있지만 진화의 목적지가 아니다. 이 원칙을 지키면 심장과 폐, 신장과 간, 감각과 신경, 뼈와 면역을 하나의 진보 서사가 아니라 제약·구조·기능·절충의 역사로 읽을 수 있다.

이 책은 기관들이 시간 속에서 어떻게 달라졌는지를 따라간다. 한편 오늘의 인간 몸에서는 그 기관들이 서로 연결되어 물질과 신호를 주고받는다. 시간에 따른 변화와 현재의 연결을 함께 보면 오늘의 호흡·순환·감각·운동을 다르게 이해할 수 있다. 다만 두 설명을 합쳤다는 이유만으로 진화사가 인간 경험의 모든 원인을 설명해 주는 것은 아니다.

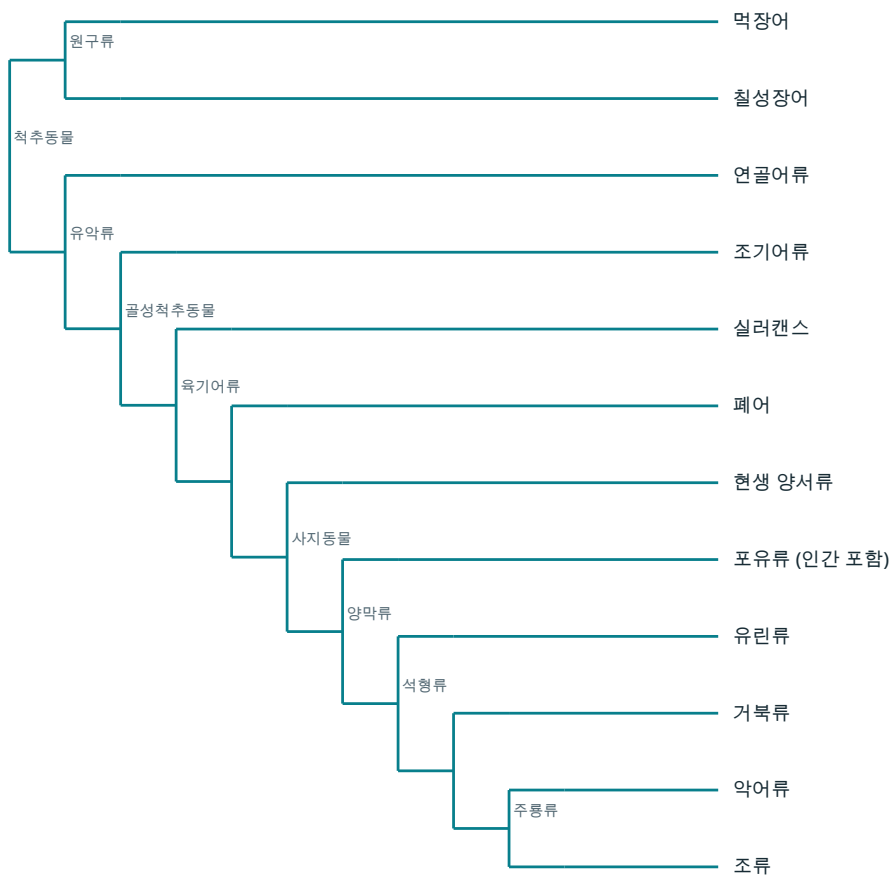
낯선 동물을 인간을 설명하기 위한 징검다리만으로 쓰지 않으려 한다. 그 동물이 현재 해결해야 하는 문제에서 출발해 보자. 이름을 알고 있던 기관에서도 보이지 않던 관계가 드러난다. 더 큰 것과 더 많은 것 대신, 무엇이 어디로 흐르고 무엇과 맞물리는지가 질문의 중심으로 온다.

# 읽기 도구

## 낮선 몸을 비교하는 여섯 가지 문법

### 분기표를 읽는 법

이 책의 동물들은 계단에 서 있지 않다. 물고기 옆의 개구리는 물고기의 미래가 아니며, 새 옆의 사람은 새보다 높은 단계가 아니다. 가지가 만나는 곳은 공통조상을 뜻한다. 현재 살아 있는 종은 모두 각자의 가지 끝에 있다. 그림의 위아래 순서를 바꿔도 친연관계는 달라지지 않는다. 이 책의 '어류'는 편의적 생태·형태 묶음이며, 사지동물을 제외하면 하나의 완전한 계통군이 아니다. 조류는 파충류 계통 안에, 인간은 포유류 안에 놓인다.



가지 길이는 시간·진보·유사성의 양을 뜻하지 않는다.

주요 현생 계통만 표시. 멸종 계통은 생략했다.

분기 지도 | 주요 현생 척추동물의 분기 지도. 모든 잎은 현재 살아 있는 계통이며 인간은 포유류 안에 포함된다. 가지 길이는 시간이 나 변화량이 아니며 일부 현생 계통만 표시했다.

## 같은 것과 비슷한 것

날개라는 기능이 같다고 기원이 모두 같은 것은 아니다. 상동은 공통조상에서 물려받은 관계, 상사는 기능이나 형태의 유사성을 가리킨다. 서로 다른 계통에서 비슷한 특성이 진화하면 수렴이라 한다. 비교 단위를 먼저 정하자. 앞다리 전체의 상동성과 비행 장치의 수렴은 같은 사례 안에서 함께 성립할 수 있다. 유전자를 공유한다는 사실만으로 기관 전체의 상동성이 확정되지는 않는다.

## 머리를 만드는 두 출발점

신경능선은 배아에서 이동해 여러 조직에 기여하는 세포집단이다. 머리의 골격 일부와 말초신경계 등을 이해할 때 중요하지만 머리의 모든 조직을 만드는 단일 재료는 아니다. 감각판, 곧 cranial placode는 머리 외배엽의 국소 영역으로 여러 감각기관·감각신경절 발생에 관여한다. 피부 부속기관의 placode라는 용어와는 문맥을 구분한다. 두 세포집단은 이웃하고 협력하지만 서로 같은 집단은 아니다. [T01]

## 발생의 주소와 재료

Hox 유전자군은 몸의 위치별 정체성을 정하는 조절망에 관여한다. 기관을 완성하는 부품 목록이나 의도를 가진 설계자는 아니다. Dlx, Shh 등과의 관계도 조직·시기별로 달라진다. 유전자 중복은 복사본이 다른 기능을 맡을 여지를 주지만, 복사본 증가가 복잡성 증가를 보장하지 않는다. 초기 척추동물 유전체 중복을 관용적으로 2R이라 부르되 모든 현생 계통이 같은 두 번의 사건을 그대로 공유한다는 도식은 피한다. 2024년 먹장어 유전체 분석은 원구류와 유악류의 후속 중복 역사가 다름을 지지한다. [T02]

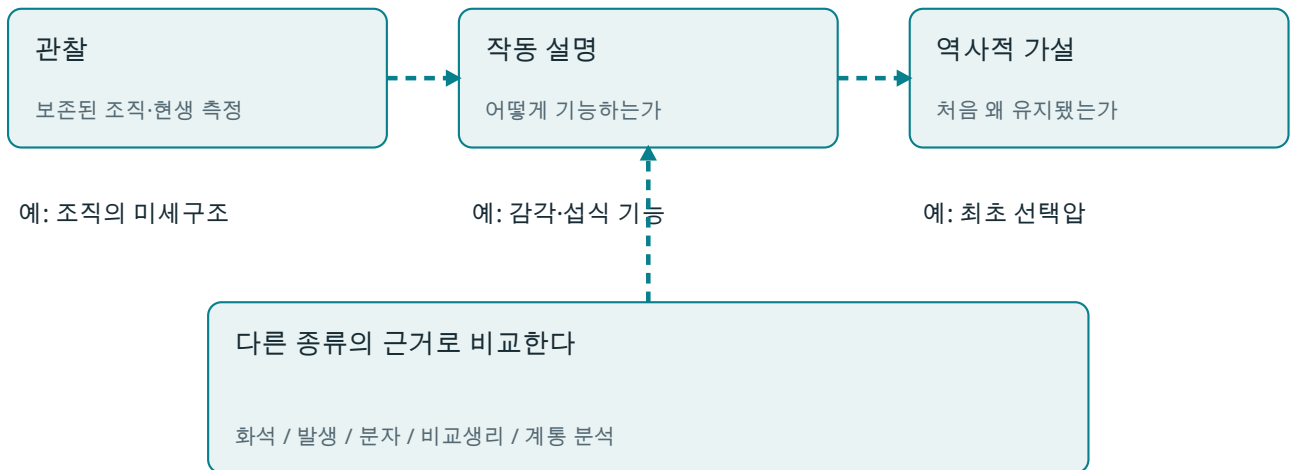
## 전용과 대가

어떤 구조가 오늘 맡는 기능이 처음 생긴 이유와 같을 필요는 없다. 기존 특성이 다른 기능에 활용되는 전용, exaptation을 생각하면 귀와 턱의 관계를 목적론 없이 읽을 수 있다. trade-off는 한 조건의 이득이 다른 조건의 비용과 맞물리는 관계다. 그러나 그럴듯한 비용을 찾아냈다는 이유만으로 실제 선택의 역사를 증명한 것은 아니다. 상관, 작동기전, 선택원인이라는 세 문장을 구분한다.

## 근거는 서로 다른 질문에 답한다

화석은 보존된 구조와 최소 연대를 보여주지만 당시의 생리 전체를 직접 재생하지 못한다. 발생학은 조직의 기원과 형성 과정을, 분자자료는 유전자·세포유형·조절의 관계를, 비교생리학은 특정 조건에서의 작동을 보여준다. 배아 발생을 진화사의 빠른 재생으로 읽지 않는다. 현생 동물의 실험에서 기능을 확인했더라도 멸종 조상의 최초 선택압까지 확인한 것은 아니다. 아래 장에서 ‘관찰’, ‘지지되는 해석’, ‘아직 모름’을 번갈아 만나는 이유다.

그림 3 | 관찰과 해석 사이에 남는 질문



점선은 추가 검증이 필요한 추론. 오른쪽으로 자동 승격되는 단계가 아니다.

새 증거는 설명을 지지할 수도, 범위를 줄이거나 반박할 수도 있다.

구조 관찰, 현재 작동의 설명, 과거 선택의 해석은 다른 수준의 주장이다. 그림의 점선은 추가 근거를 요구하는 추론을 나타낸다.

## 01

### 심장 - 방의 수보다 회로의 배열

두 그림의 심장에 각각 두 개와 네 개의 방이 보인다고 해 보자. 숫자만 보면 후자가 정답처럼 느껴진다. 이제 방의 숫자를 가리고 혈액의 이동 경로를 따라가 보자. 아가미에서 전신으로 이어지는 길과, 폐와 전신을 나누어 도는 길은 처음부터 같은 시험을 치르고 있지 않다. 비교의 단위를 방에서 회로로 바꾸는 순간 질문이 달라진다.

심장의 진화를 두 방, 세 방, 네 방의 순서로 설명하면 편하지만 곧바로 사다리 서사가 된다. 더 중요한 질문은 혈액이 어디에서 어디로 흐르는가, 폐와 전신에 어떤 압력이 필요한가, 산소가 많은 혈액과 적은 혈액이 어느 정도 분리되는가, 그리고 필요할 때 두 회로를 다시 연결할 수 있는가이다.

#### 문을 나누는 것과 길을 나누는 것

많은 어류에서 심장에서 나온 혈액은 아가미를 거쳐 전신으로 향한다. 아가미의 미세한 교환면을 통과 하면서 압력이 떨어지는 이 단일 순환은 수중 호흡이라는 조건 속에서 작동한다. 공기호흡과 별도의 호흡회로가 중요해지면 심장은 새로운 과제를 만난다. 호흡기관으로 향하는 흐름과 전신으로 향하는 흐름을 어느 정도 분리할 것인가이다.

심장의 방은 눈에 보이는 칸이고 순환은 그 칸을 연결한 경로다. 칸막이만 세면 혈액이 호흡기관을 지난 뒤 다시 심장으로 돌아오는지, 곧바로 몸으로 가는지가 사라진다. 회로의 배열을 뜻하는 토폴로지는 이 연결관계를 가리킨다. 같은 그림에서도 압력을 표시하면 한 층이 더 보인다. 몸의 넓은 범위에 혈액을 보내는 요구와 얇은 기체교환면을 지키는 요구는 같은 숫자로 답하기 어렵다.

양서류와 여러 파충류에서는 심실 내부 구조, 유출로의 배열, 수축 순서와 혈관저항이 함께 작용해 혈류를 분배한다. 심실 안에서 혈액이 어느 정도 만날 수 있다는 사실만으로 이 심장을 '미완성'이라 부를 수 없다. 특히 일부 파충류의 심장 내 셉트는 잠수나 호흡 상태의 변화에서 혈류 경로를 유연하게 바꿀 수 있는 기능적 특성이다.

## 회로가 바뀌면 질문도 바뀐다

압력을 충분히 만들고도 얇은 교환면을 보호해야 한다는 요구는 서로 맞물린다. 흐름을 분리하는 구조가 어떤 조건에서 유리하다는 설명과, 모든 동물에게 같은 구조가 유리하다는 주장은 다르다. 셉트도 존재와 작동 조건을 먼저 설명하고, 잠수·소화·체온조절에서의 적응적 이득은 각각 검증해야 한다.

조류와 포유류에서는 폐순환과 체순환의 압력이 강하게 분리된다. 높은 전신 압력과 상대적으로 낮은 폐순환 압력을 동시에 유지할 수 있는 구조는 높은 지속 대사와 결합해 중요한 이점을 준다. 하지만 조류와 포유류는 서로 다른 계통에서 유사한 회로 분리를 획득했으므로 이를 모든 심장이 향하는 종착점으로 해석할 이유는 없다.

심근 구조와 관상순환도 단순한 '벽이 두꺼워져서 관상동맥이 생겼다'는 한 줄 인과보다 복잡하다. 척추동물의 심근은 해면상과 치밀한 층의 비율, 산소공급 경로와 혈관화 정도에서 연속적인 다양성을 보인다. 관상혈관 역시 이런 구조적 조건과 발생적 재구성 속에서 이해해야 한다.

심장 진화의 핵심은 방의 수가 증가한 역사가 아니라 회로의 연결관계, 압력 분리, 셉트 가능성, 심근의 산소공급 방식과 대동맥궁 배치가 계통별로 다르게 조합되어 온 역사다. 인간의 네 방 심장은 그 여러 해법 가운데 포유류 계통의 한 형태다.

셉트는 혈액 일부가 다른 경로로 흐르는 연결이다. 연결이 존재한다는 해부학적 관찰, 실제로 혈액이 그 길을 이용한다는 생리적 측정, 그 경로가 특정 환경에서 생존이나 번식에 이득이었다는 진화적 설명은 서로 다른 질문이다. 이 세 질문을 구분하면 유연성을 미완성으로 오해하는 일도, 모든 연결에 그럴듯한 목적을 붙이는 일도 줄어든다.

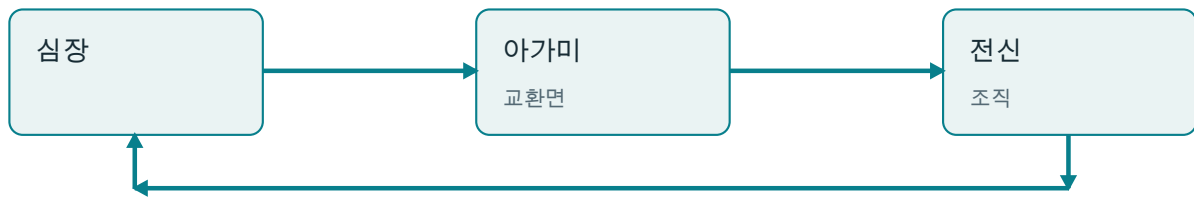
## 그렇듯한 이점도 실험을 지나야 한다

악어의 우좌셉트가 소화에 이득을 준다는 설명은 그럴듯하지만, 조건을 바꾸어 측정하면 다른 결과가 나올 수 있다. 2026년 연구는 좌대동맥을 폐쇄하는 수술을 받은 뒤 7년이 지난 사육 미국악어와 대조군을 비교했다. 9세 악어에게 설치류 먹이를 주었을 때 측정한 소화효율과 먹이 통과시간에서는 차이가 관찰되지 않았다. 이 결과는 셉트의 소화상 이점을 보편적 설명으로 삼기 어렵게 한다. 그러나 야생의 모든 조건이나 다른 생리적 역할까지 배제하는 결과는 아니다. 구조에 목적을 붙이는 것보다 어떤 조건에서 무엇을 측정했는지를 먼저 읽어야 하는 이유다. [H01]

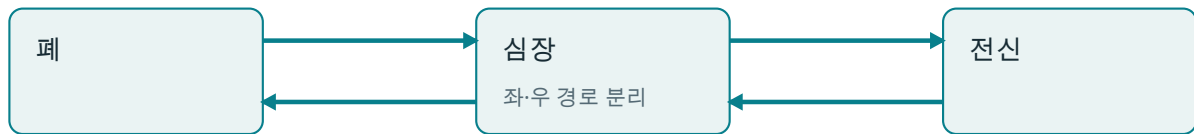
우리 심장을 볼 때도 방의 숫자만으로 건강이나 기능을 재단할 수는 없다. 이 장이 건네는 인간의 흔적은 우월성의 증거가 아니라, 특정 회로를 물려받았다는 사실이다. 혈액을 움직이는 일과 혈액이 무엇을 운반하는지는 16장에서 다시 만난다.

## 그림 1 | 방 대신 혈액의 길을 읽기

### A. 많은 아가미호흡 어류의 단순화한 회로



### B. 성체 포유류의 분리된 두 순환



화살표는 흐름 방향, 길이·두께는 압력과 유량을 나타내지 않는다.

많은 아가미호흡 어류와 성체 포유류의 혈액 이동을 단순화한 기능도다. 발생 계열이나 진보 순서를 나타내지 않는다. 심장 내부 해부구조·선택·판막은 생략했다. 기존 심장 해부 비교도와 별개로 작성한 설명용 회로도다.

## 02

## 폐 - 물과 공기에서 기체를 교환하는 법

숨을 들이마신다는 표현은 호흡을 공기의 이동으로 생각하게 한다. 그러나 공기가 들어온 것으로 이야기는 끝나지 않는다. 얇은 교환면의 다른 쪽에 혈액이 와야 하고, 기체가 그 경계를 넘어야 한다. 환기·관류·확산이라는 세 단어는 하나의 숨을 서로 다른 면에서 부르는 이름이다.

기체교환기관의 핵심 문제는 충분한 교환면, 짧은 확산거리, 그리고 농도차를 유지하는 흐름을 만드는 것이다. 그러나 물과 공기는 같은 매질이 아니다. 물은 밀도와 점성이 높고 이용 가능한 산소가 적기 때문에 호흡매질을 움직이는 비용이 크다. 공기에서는 산소 이용이 쉬워지지만 교환면을 외부에 노출할수록 수분을 잃기 쉽다.

### 세 개의 동사가 모여 호흡이 된다

많은 수생 척추동물의 아가미는 얇고 넓은 교환면과 지속적인 물 흐름을 이용한다. 육상에서는 교환면이 몸 안쪽으로 들어가고 환기장치가 내부의 공기를 바꾼다. 그러나 폐의 해법은 하나가 아니다. 양서류에서는 피부와 폐가 함께 기체교환에 기여할 수 있고, 여러 파충류에서는 체벽과 늑골 운동이 중요한 환기 수단이 된다.

환기는 호흡매질을 교환면까지 움직이는 일, 관류는 그곳에 혈액을 공급하는 일, 확산은 기체가 경계를 건너는 일이다. 어느 하나의 면적이나 속도만 키운다고 나머지 둘이 자동으로 따라오지는 않는다. 큰 폐라는 사진 한 장으로 산소공급 능력을 판정하기 어려운 이유다.

조류와 포유류는 모두 높은 산소공급 능력을 가지지만 구조는 다르다. 포유류는 가지를 치는 기도 끝의 폐포와 왕복성 환기를 이용하고, 조류는 단단한 폐와 기낭계, 다른 형태의 공기 흐름을 이용한다. 비슷한 생리적 요구가 서로 다른 구조적 해법으로 이어진 사례다.

## 공기가 도착한 곳에 혈액도 와야 한다

물속 아가미와 포유류 폐포, 새의 폐와 기낭을 비교할 때 가장 큰 구조를 고르는 대신 세 질문을 해 보자. 매질을 누가 움직이는가. 교환은 어디에서 일어나는가. 그곳으로 혈액은 어떻게 오는가. 기낭을 교환면 자체와 혼동하면 조류의 해법을 놓친다. 구조의 차이를 효율 순위로 바꾸려면 먼저 비교할 조건과 측정 값을 정해야 한다.

폐와 부레의 발생·유전 자료는 두 기관의 깊은 상동성을 지지한다. 폐와 관련된 구조를 골성척추동물의 조상 상태로 놓고 일부 조기어류에서 부레가 파생됐다고 보는 모형이 현재 자료와 잘 맞는다. 다만 발생 위치가 배쪽에서 등쪽으로 단순히 뒤집혔다는 도식으로는 유전자 발현 차이를 충분히 설명하지 못한다. 폐와 부레의 관계는 공통의 재료와 계통별 조절 변화가 함께 있는 역사로 읽어야 한다. [A21-LUNG]

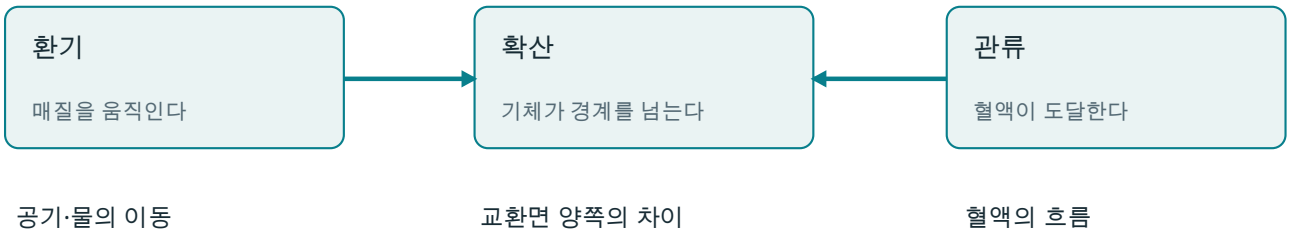
폐 기능은 환기만으로 결정되지 않는다. 교환면에 공기가 도달해도 혈액이 흐르지 않으면 산소는 몸으로 이동하지 못한다. 반대로 충분한 혈류가 있어도 환기가 부족하면 같은 문제가 생긴다. 그래서 폐는 심장·혈액과 함께 환기·관류·확산이라는 접점에서 이해해야 한다.

인간의 폐포성 폐는 여러 호흡 해법 가운데 하나다. 호흡은 뇌를 포함한 모든 조직의 기능에 필요한 조건이지만, 폐의 진화가 인간의 언어나 의식을 직접 만들어냈다고 말할 근거는 없다.

독자는 여기서 장기 하나의 진화와 기관 사이 조합의 진화를 함께 보게 된다. 새로운 교환면은 혈류와 환기 방식이 맞물릴 때 기능한다. 다만 오늘날 잘 맞물린다는 사실만으로 그 요소들이 한꺼번에 생겼다고 추정할 수는 없다. 현재의 작동을 설명하는 일과 그 작동이 만들어진 순서를 밝히는 일은 각각의 증거를 필요로 한다.

2025년 폐 기원 연구는 폐가 없는 연골어류에도 폐 발생과 관련된 유전적 기반의 상당 부분이 있음을 보고했다. 유전적 재료의 존재와 완성된 기관의 존재는 다른 판단이라는 점이 중요하다. 이 결과는 폐·부레의 기존 상동성 문장을 지우는 대신, '부품의 역사'와 '기관의 역사'를 나누어 읽게 한다. [E01]

## 그림 2 | 호흡을 이루는 세 과정



### 비교할 때 묻는 질문

누가 매질을 움직이는가? 교환면은 어디인가? 혈액은 어떻게 오는가?

새의 기낭과 폐는 같은 일을 하지 않는다. 큰 공간이 곧 교환면은 아니다.

기능 분해도, 세 과정의 진화 순서나 모든 종의 해부학을 뜻하지 않는다.

환기·확산·관류를 구분해 호흡의 기전을 읽는 도식이다. 세 과정이 모두 맞물려야 하며 어느 하나만으로 전체 호흡 성능을 판정하지 않는다.

## 03

### 신장 - 물을 버릴 것인가, 지킬 것인가

물을 아끼는 능력이 좋은 신장의 기준이라면 담수에서 살아가는 동물을 설명하기 어렵다. 주변의 물이 몸 안으로 들어오기 쉬운 조건에서는 물을 내보내면서 이온은 지켜야 한다. 수분보존이라는 익숙한 목표를 잠시 내려놓으면 배설기관의 다양성이 보인다.

신장의 진화에는 하나의 방향이 없다. 담수에서는 몸 안으로 들어오는 물을 버리고 필요한 이온을 보존해야 하고, 해수에서는 물을 잃지 않으면서 과잉 염분을 처리해야 한다. 육상에서는 증발손실이 커지므로 물을 보존하면서 질소폐기물을 제거하는 문제가 중요해진다.

#### 거른 뒤 다시 회수하는 방식

사구체가 담수의 과잉 수분을 버리기 위해 처음 생겼다는 설명은 널리 반복됐다. 2023년 비교생리 종합 논문은 초기 척추동물의 서식환경과 현생 신장 구조를 검토해, 해양의 오래된 여과계에서 사구체의 기원을 찾는 모형을 제안했다. 이 모형에서는 담수의 물 배출이 기존 여과 기능의 새로운 활용으로 해석된다. 그러나 현생 생물의 구조와 기능을 비교한 설명을 최초 사구체의 환경과 선택압을 직접 관찰한 사실로 바꿀 수는 없다. [A21-KIDNEY]

사구체는 여과가 일어나는 모세혈관 구조이고, 세뇨관은 여과된 액체의 성분을 바꾸는 경로다. 물질이 몸에서 나가는 양은 처음 걸러진 양만으로 정해지지 않는다. 다시 혈액으로 회수되는 양과 관 안으로 추

가되는 양을 함께 봐야 한다. 이렇게 나누어 읽으면 신장이 단순한 거름망이라는 그림에서 벗어날 수 있다.

여과량이 많다고 항상 좋은 것은 아니다. 필요한 물질까지 일단 세뇨관으로 보내고 다시 회수해야 하는 비용이 생기기 때문이다. 실제로 일부 경골어류에서는 사구체가 크게 줄거나 사라졌고, 무사구체 신장은 한 번의 사건이 아니라 여러 계통에서 독립적으로 나타났다. 환경 하나만으로 그 분포를 설명할 수도 없다.

## 물은 버려야 할 때도 있다

여과는 쓸모없는 것만 골라 버리는 과정이 아니다. 필요한 물질도 함께 나갈 수 있기 때문에 회수와 조절이 뒤따른다. 여과량, 재흡수, 분비와 다른 기관의 역할을 묶어 봐야 비용을 비교할 수 있다. 무사구체형을 단순한 기능 퇴화로 읽을 수 없는 까닭이다. 다만 ‘덜 여과하니 무조건 싸다’도 실제 에너지 측정 없이 결론 내릴 수 없다.

질소폐기물의 형태 또한 이득과 비용의 절충이다. 암모니아는 독성이 높고 많은 물이 필요하지만 합성 비용이 낮고, 요소와 요산은 다른 물·에너지 비용을 가진다. 암모니아에서 요소, 요산으로의 순서를 진화적 서열로 볼 수 없다.

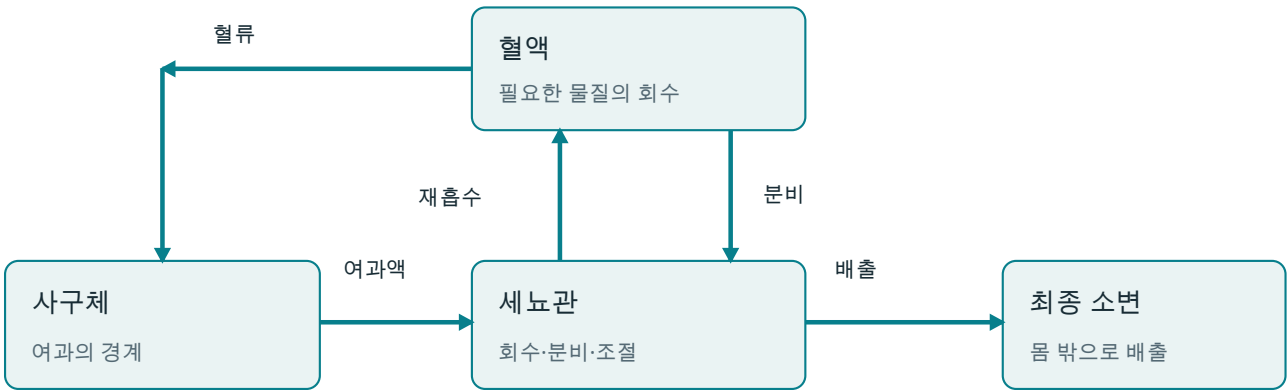
포유류의 헨레고리와 대항류 증폭계는 농축뇨를 만드는 강력한 해법이지만 모든 척추동물이 향한 완성형은 아니다. 조류의 신장에도 헨레고리가 있는 네프론과 없는 네프론이 함께 존재한다. 따라서 헨레고리의 유무만으로 포유류와 조류를 두 칸에 나눌 수 없다. 배설화학과 신장 밖의 염분 처리도 함께 비교해야 하며, 염류샘 역시 모든 조류·파충류의 공통 장치로 놓아서는 안 된다. [A21-BIRD-KIDNEY; A21-SALT]

신장의 핵심은 얼마나 여과하는가, 무엇을 다시 흡수하는가, 어떤 폐기물을 어떤 물의 비용으로 버리는가, 그리고 다른 기관과 기능을 어떻게 나누는가이다. 인간 신장은 이 문제에 대한 포유류식 해법의 하나다.

같은 물질을 처리하는 부담도 한 기관에만 실리지 않는다. 아가미나 염류샘의 역할을 지운 채 신장의 크기만 비교하면 분업을 기능 저하로 오해할 수 있다. 좋은 비교표의 첫 열은 성능 순위가 아니라 동물이 사는 매질이어야 한다.

인간에게 익숙한 농축뇨는 한 해법이다. 염류샘과 아가미 같은 다른 경로를 사용하는 동물까지 신장 하나의 성능표에 넣으면 분업을 놓친다. 환경을 먼저 고르고 그다음 담당 경로를 찾아보자.

그림 4 | 여과했다고 모두 버리는 것은 아니다



여과액은 최종 소변이 아니다. 물질마다 회수·분비되는 정도가 다르다.

사구체가 있는 신장의 기능을 단순화했다. 혈관의 전체 주행은 생략했다.

사구체가 없는 어류와 종별 세부 구조·농축 능력까지 나타내지는 않는다.

혈액-세뇨관 화살표는 상피를 통한 물질 이동이며 열린 통로를 뜻하지 않는다.

사구체를 가진 신장에서 여과·재흡수·분비·배출을 나눈 자체 기능도다. 혈액의 일부 물질이 여과액으로 이동한 뒤 필요한 물질이 회수되고 다른 물질은 추가 분비될 수 있다. 최종 소변은 이 조절을 거친 결과다. 종별 신장 해부구조와 유량·압력은 나타내지 않는다.

| 조건의 예     | 생리 문제      | 구조·경로      | 함께 물을 비용    |
|-----------|------------|------------|-------------|
| 담수 경골어류 예 | 물 유입·이온 손실 | 신장·아가미의 분업 | 물 배출과 이온 보존 |
| 해수 경골어류 예 | 물 손실·염 부하  | 장·아가미·신장   | 염 처리와 수분 확보 |
| 육상 포유류 예  | 증발·질소 배설   | 신장 농축·요소   | 수분·에너지 비용   |
| 일부 조류·파충류 | 수분·염 조건 다양 | 요산·염류샘 등   | 여러 경로의 분업   |

정량 효율 순위표가 아니다. 종·상태별 예외와 실제 비용 측정은 별도다.

환경 비교 | 환경에 따라 달라지는 수분·염·질소 문제. 해법을 순위가 아닌 분업과 비용으로 비교한다.

## 04

### 간 - 대사 흐름이 모이는 장소

먹이가 장벽을 통과했다고 곧바로 모든 조직에 같은 의미의 자원이 되는 것은 아니다. 저장할지, 다른 분자로 바꿀지, 다시 혈액으로 보낼지를 결정하는 여러 반응이 이어진다. 간을 창고 하나로 부르기보다 들어오는 물질과 나가는 물질의 차이를 보는 편이 낫다.

간은 탄수화물·지질·아미노산 대사, 담즙 생성, 혈장 단백질 합성, 해독, 저장과 면역조절에 관여한다. 그러나 기능이 많다는 사실을 '가장 진화한 대사기관'이라는 표현으로 바꿀 수는 없다. 간의 진화는 소화관에서 들어온 물질과 전신 혈액이 만나는 대사 접점이 어떻게 조직됐는지를 보는 것이 핵심이다.

#### 입구가 다르면 일이 달라진다

창고기의 간맹장은 척추동물 간의 기원을 이해하는 비교대상이다. 2024년 연구는 단일세포·단일핵 유전자 발현 비교와 기능 실험을 결합해 두 기관의 상동성을 지지했다. 공통 기원의 관계라는 해석과 현재 기능·조직의 일대일 동일성은 구분해야 한다. 창고기의 간맹장은 현대 포유류 간의 축소판이나 변하지 않은 원형이 아니다. [A21-LIVER]

문맥은 소화관 등에서 온 혈액을 간으로 모으는 경로다. 간이 어디에 놓였는가는 단순한 위치 정보가 아니다. 흡수된 물질이 전신으로 다시 분배되기 전에 변환과 저장의 여러 반응을 만난다는 뜻이다. 같은 조직 안에서도 혈류와 물질 조건에 따라 일의 비중이 달라지는 공간적 분화를 구역화, 곧 zonation이라 부른다.

간의 혈류 구조는 소화관에서 흡수된 물질을 처리하기에 적합한 위치를 만든다. 간세포판, 동굴양 혈관, 담관과 문맥의 관계는 계통마다 다르며 일부 어류·조류·포유류에서 서로 다른 미세구조가 나타난다. 포유류의 대사성 구역화가 두드러지지만 구역화 자체가 포유류에만 존재한다고 말할 수는 없다.

#### 먹은 것과 몸이 쓸 것은 다르다

상어의 간이 부력에도 관여한다는 사례는 장기 이름이 기능 하나와 일대일로 맞지 않음을 보여준다. 간맹장과 간을 비교할 때도 '닮았다'와 '작동 방식이 모두 같다'를 나누어야 한다. 상동성은 차이를 지우는 말이 아니라 차이가 생긴 역사를 물을 수 있게 하는 말이다.

상어의 거대한 간처럼 같은 장기가 대사뿐 아니라 부력 조절에 큰 역할을 하는 계통도 있다. CYP 계열처럼 외부 화학물질 처리에 관여하는 유전자군도 식이와 환경에 따라 복제·소실을 반복한다. 이것은 해독 능력이 일직선으로 향상된 것이 아니라 서로 다른 화학환경에 맞는 레퍼토리가 유지된 결과다.

질소 대사는 간과 신장이 분업한다. 화학적 전환이 한 기관에서 일어나고 최종 배출이 다른 기관에서 이루어진다. 따라서 '해독기관' 하나가 모든 일을 한다는 그림보다 여러 기관 사이의 물질 흐름을 보는 것이 정확하다.

간 진화의 핵심은 무엇을 저장하고, 무엇을 변환하며, 어떤 물질을 혈액으로 다시 보내고, 어떤 물질을 제거 경로로 넘기는가이다. 인간 간은 이 분업의 한 형태다.

창고기의 간맹장과 척추동물의 간을 비교할 때 중요한 발견은 덜 완성된 간을 찾는 일이 아니다. 서로 달라진 구조 안에 공유되는 세포와 기능의 관계를 찾는 일이다. 공통 기원이 확인될수록 이후에 무엇이 새로워졌는지도 더 정확하게 질문할 수 있다.

### 간세포만 보면 간의 절반을 놓친다

단일세포 분석은 조직을 한 덩어리로 비교하는 대신 어떤 세포가 어떤 유전자를 사용하는지 나누어 본다. 간에서 물질을 처리하는 세포만큼 그 세포를 혈액과 만나게 하는 혈관의 세포도 중요하다. 2024년 연구는 유전체 중복에서 나온 두 유전자 *kdr*와 *flt4*가 간 동굴양 혈관의 내피세포 발달에 관여함을 보고했다. 내피세포는 혈관 안쪽을 이루는 세포다. 즉 복잡한 장기는 기능 목록이 길어지는 것뿐 아니라, 서로 다른 일을 하는 세포가 어떤 접촉면으로 조직되는지의 문제이기도 하다. [A21-LIVER]

### 상동성이 밝혀져도 남는 것

여기서 알려진 것은 비교되는 두 기관 사이의 계보를 지지하는 세포·기능 근거다. 아직 더 설명해야 하는 것은 오늘날 각 계통에서 그 세포들이 어떤 비율과 공간 관계로 일하는가이다. 공통 기원을 안다는 사실은 차이를 지우는 종결문이 아니라, 그 차이가 언제 어떻게 생겼는지 묻는 출발점이다.

간과 신장 사이에는 한 기관의 일을 다른 기관이 마무리하는 연결이 있다. 화학적 전환과 배출을 같은 말로 묶지 않으면 '해독'이라는 표현이 숨긴 분업이 드러난다. 간과 신장을 함께 읽을 때 이 분업이 더 또렷해진다.

## 05

### 피부 - 막으면서도 통과시키는 경계

피부가 완벽하게 막는 벽이라면 더 두껍게 만드는 것이 늘 좋은 선택일 것이다. 하지만 피부를 통해 기체와 물이 이동하는 동물에게 그 벽은 생존을 가로막을 수 있다. 무엇을 막을지보다 무엇을 어느 정도 통과시킬지가 더 정확한 질문이다.

피부는 단순한 벽이 아니다. 생명체는 외부와 완전히 차단될 수 없기 때문이다. 물, 이온, 기체, 열, 감각 정보와 미생물이 몸 표면을 통해 끊임없이 상호작용한다. 따라서 피부의 핵심 문제는 차단이 아니라 선택적인 경계를 만드는 것이다.

## 경계의 성능은 통과 목록에 있다

많은 어류에서는 점액층이 마찰을 줄이고 표면을 보호하며 미생물·이온과의 접촉을 조절한다. 양서류에서는 피부 자체가 호흡과 수분 이동에 중요한 역할을 하므로 지나치게 두껍고 불투과성인 장벽은 오히려 불리할 수 있다. 교환에 유리한 표면은 수분손실과 환경변화에 취약하다는 이득과 비용의 절충이 여기서 드러난다.

피부에 화살표를 그려 보자. 물이 나가는 화살표, 기체가 오가는 화살표, 열이 이동하는 화살표, 자극을 받아 신경으로 전해지는 화살표는 서로 다른 통로와 과정을 뜻한다. 이들을 모두 투과성이라는 말 하나로 합치면 두꺼움과 얇음의 비교로 되돌아가기 쉽다.

양막류에서는 각질화와 지질장벽이 육상에서의 수분보존에 중요한 역할을 한다. 그러나 파충류 비늘, 조류 깃털, 포유류 털을 하나의 직선 변환계보로 놓을 수는 없다. 이 구조들은 공통의 오래된 발생 발생 조절체계를 일부 공유하면서 계통별로 크게 다양화됐다.

## 닫아야 하는가, 열어야 하는가

양서류의 교환면과 양막류의 수분 장벽을 비교해 보자. 같은 표면이 서로 다른 조건을 말한다. 여기에서 수분손실이라는 비용을 읽을 수 있지만, 모든 피부 특성을 건조 적응 하나로 설명해서는 안 된다. 감각, 면역, 마찰, 체온조절도 같은 경계에 걸려 있다.

포유류에서는 피지샘, 땀샘, 유선 같은 다양한 표피 유래 구조가 나타난다. 이를 단순한 복잡성 증가로 보는 대신 체온조절, 윤활, 영양공급 같은 기능이 서로 다른 방식으로 분업된 결과로 보는 편이 적절하다.

피부는 면역과 감각의 경계이기도 하다. 물리적 장벽, 화학적 환경, 공생미생물, 면역세포와 감각신경이 같은 표면에서 만난다. 따라서 투과성, 수선, 면역방어, 감각 사이의 균형이 핵심이다.

인간 피부의 얇은 체모, 많은 에크린 땀샘과 복잡한 감각·면역 경계 역시 육상척추동물 피부의 종착점이 아니라 특정 환경과 행동사에서 나온 조합이다.

지방과 단백질이 만드는 장벽, 표면의 분비물, 감각수용기와 면역세포는 같은 경계에서 다른 일을 한다. 피부가 무엇을 막는지 설명한 뒤에는 그 차단을 유지하기 위해 무엇을 만들고 수선해야 하는지도 물어야 한다. 경계는 이미 지어 놓은 벽이라기보다 계속 유지되는 활동이다.

사람의 피부도 차단과 교환을 함께 수행한다. 이 장의 관심은 몸과 환경의 경계가 어떻게 구성되는가이다. 조직이 손상됐을 때 경계를 닫는 일과 원래 구조를 되찾는 일은 뒤의 재생 인터루드에서 구분한다.

## 06

# 소화관 - 하나의 관이 여러 공간으로 나뉜다

음식 한 조각의 경로를 따라가 보자. 잠시 머무는 곳, 잘게 부서지는 곳, 화학적으로 분해되는 곳, 흡수되는 곳은 같은 조건을 요구하지 않는다. 관의 길이만으로 소화 능력을 평가하면 이 공간적 분업이 사라진다.

소화관은 입에서 항문까지 이어지는 관이지만 생리적으로는 하나의 균일한 파이프가 아니다. 저장, 기계적 분쇄, 산성화, 효소분해, 미생물 발효, 흡수와 배출은 서로 다른 조건을 요구한다. 소화관의 진화는 길이나 복잡성 자체보다 기능의 공간적 분업으로 읽는 편이 정확하다.

### 길이보다 머무는 장소

어류에서는 위가 있는 계통과 위를 잃은 계통이 모두 존재한다. 위 소실과 위 기능 관련 유전자군의 소실은 여러 계통에서 관찰된다. 어떤 식이·생리 조건이 각각의 소실을 설명하는지는 계통별로 검증해야 한다. [E03] 유문수나 나선판처럼 제한된 공간에서 흡수면적과 체류시간을 조절하는 해법도 있다.

소화관을 따라 표시할 것은 길이뿐만이 아니다. 먹이가 어느 구획에서 얼마나 머무는지, 그곳의 화학적 조건과 미생물의 참여가 어떤지가 필요하다. 산성화와 발효, 흡수를 한 장소에 모두 겹쳐 놓으면 각 과정에 유리한 조건이 충돌할 수 있다. 공간을 나누는 일 자체가 기능을 만든다.

조류에서는 입에서 하던 기계적 처리의 일부가 선위와 모래주머니로 이동한다. 이 구조를 비행을 위한 ‘초효율 시스템’으로 부르기보다 체중, 섭식속도, 분쇄와 대사요구 사이의 한 해법으로 보는 편이 적절하다.

### 같은 관 안에서 서로 다른 일이 벌어진다

조류의 기계적 처리와 초식동물의 미생물 발효는 ‘복잡한 위’라는 한 줄에 놓기 어렵다. 먹이를 어느 장소에서 어떤 시간 동안 처리하는가가 다르기 때문이다. 위가 없는 계통도 살아 있는 비교대상이다. 소실을 설명할 때 특정 식이가 원인이었다고 단정하려면 계통별 근거가 더 필요하다.

초식동물에서는 숙주 효소만으로 분해하기 어려운 식물세포벽을 처리하기 위해 미생물 발효가 중요해진다. 전위발효와 후장발효는 서로 다른 이점과 비용을 가진다. 소화관은 여러 계통에서 숙주와 미생물이 함께 만드는 대사 공간이기도 하다.

Cdx, Hox 같은 발생 조절인자는 구획화에 중요하지만 하나의 ‘마스터 유전자’가 소화관을 설계했다는 식으로 단순화해서는 안 된다. 유전체 중복 역시 유전적 재료를 늘렸을 수 있지만 그것만으로 전문화된 소화기관이 만들어졌다고 단정할 수 없다.

인간의 요리, 전분 이용과 문화적 식생활은 영양환경을 크게 바꾸었지만 이를 요리→에너지 절약→큰 뇌→지능이라는 단일 역사로 고정하지 않는다. 영양 획득과 뇌의 에너지 수요 사이의 관계와 특정 소화 적응이 지능을 ‘만들었다’는 주장은 다른 수준의 설명이다.

산성 위가 없다는 관찰은 장 전체가 짧거나 소화가 나쁘다는 결론과 같지 않다. 남은 구획과 효소, 먹이의 성질을 함께 보아야 한다. 이 장에서 소실은 이야기의 빈칸이 아니라 비교해야 할 또 하나의 구성이다.

소화관 밖에서 이 관으로 물질을 보내는 기관도 있다. 다음 인터루드의 체장은 분해를 돕는 분비물과 전신에 보내는 신호를 함께 다룬다. 소화가 끝나는 지점과 대사조절이 시작되는 지점을 하나의 선으로 자르기 어려운 이유다.

## 인터루드

### 분해물을 보내는 길, 신호를 보내는 길

한 장기를 어디에 분류할지는 우리가 던지는 질문에 달려 있다. 체장은 소화관으로 분비물을 보내는 외분비 기능과 혈액으로 호르몬을 보내는 내분비 기능을 함께 가진다. 전자는 먹이를 처리하는 조건에, 후자는 흡수된 자원을 저장하고 사용하는 조절에 관여한다. 가까이 놓였다는 이유로 두 기능을 같은 관으로 그려서는 안 된다.

이중 기능은 기관의 이름과 세포의 역할을 구분하게 한다. 철성장어의 체장 관련 유전자 발현을 조사한 연구는 오래된 발생 조절 요소의 공유를 보여준다. 그러나 오늘날 인간에서 보는 하나의 치밀한 기관 배치를 모든 척추동물의 원형으로 놓을 수는 없다. 흩어진 조직과 모인 조직의 비교는 발전 단계가 아니라 계통별 조직화의 차이를 묻는 출발점이다. [I01a]

체장의 진화가 인슐린을 중심으로 완성됐다는 이야기나 모든 어류의 조직 배치에 관한 일반화는 하지 않는다. 관을 따라 장으로 가는 물질과 혈액으로 전달되는 신호를 나누어 그리면 하나의 기관에서 서로 다른 연결이 보인다.

## 07

# 뇌·신경계 - 더 큰 뇌가 아니라 다른 정보망

뇌 그림을 같은 크기로 맞추면 무엇이 사라질까. 전체 부피라는 단서는 약해지고, 어느 영역이 어떤 입력을 받는지가 눈에 들어온다. 서로 다른 감각환경에서 살아가는 동물의 뇌는 같은 정보를 같은 비율로 처리하지 않는다.

신경계 진화를 전체 뇌의 크기나 신피질의 등장만으로 설명하면 계통별 특수성을 놓친다. 더 중요한 질문은 어떤 정보를 받아들이고, 어디에서 처리하며, 얼마나 빠르고 정확하게 전달하고, 어떤 행동으로 연결하는가이다.

### 크기와 배선은 서로 다른 정보다

어류에서는 시각, 후각, 촉선, 전기감각 같은 입력의 비중을 따라 후뇌·중뇌·소뇌의 상대적 발달이 크게 달라질 수 있다. 작은 대뇌피질을 가진 동물을 '단순한 뇌'로 부르기 어려운 이유다. 전체 크기보다 어떤 회로와 영역에 자원이 배분되는지가 중요하다.

지도를 크게 인쇄한다고 길이 더 늘어나지는 않는다. 뇌도 전체 크기와 연결방식은 별개의 정보다. 이 비유가 뇌를 지도와 동일한 물건으로 만든다는 뜻은 아니다. 부피를 비교하는 측정과 세포·연결을 비교하는 측정이 서로 다른 질문에 답한다는 점만 빌려 쓰는 것이다.

조류는 포유류와 같은 6 층 신피질을 가지지 않지만 높은 뉴런 밀도와 다른 전뇌 조직방식으로 복잡한 행동을 수행한다. 따라서 복잡한 정보처리에는 하나의 해부학적 해법만 있는 것이 아니다.

### 크기 대신 배분을 보자

조류의 전뇌와 포유류 신피질은 복잡한 행동이 하나의 층판 구조에만 의존하지 않는다는 비교를 가능하게 한다. 그렇다고 행동이 비슷하다는 이유로 영역과 세포형을 통째로 일대일 대응시켜서는 안 된다. 무엇이 상동인지 묻는 질문에는 영역, 발생영역, 세포유형, 회로라는 서로 다른 해상도가 있다.

조류와 파충류의 전뇌 일부를 이루는 등쪽뇌실용기(DVR)와 포유류 신피질은 비교의 단위에 따라 다른 관계를 드러낸다. 발생영역, 세포유형, 유전자 발현, 연결회로가 모두 하나의 대응표로 합쳐지는 것은 아니다. 2025년 세포지도 연구도 보존되는 세포형과 크게 달라진 세포형, 발생 후기에 유사해지는 발현 양상을 함께 보고했다. 따라서 DVR 전체를 신피질 전체와 일대일 상동 구조로 놓는 표현은 피한다.

[A21-NEURAL]

유전체 중복과 이온채널·수용체 유전자군의 다양화는 진화에 사용할 수 있는 재료를 늘렸지만 유전체 중복에서 복잡한 뇌를 거쳐 고등지능으로 이어진다는 단일 인과이라는 사슬은 성립하지 않는다. 세포형, 회로, 발생, 에너지와 환경이 함께 작동한다.

인간 신피질과 소뇌, 기저핵은 긴 척추동물 신경계 역사에서 나온 하나의 조합이다. 신경계 진화의 핵심은 복잡성의 증가보다 정보가 들어오고 분배되고 처리되고 행동으로 나가는 경로의 재배치다.

배쪽에 놓인 한 영역과 등쪽의 다른 영역이 비슷한 일을 한다고 해서 같은 조직이라고 확정할 수는 없다. 반대로 조직의 배열이 달라졌다고 공통 기원이 사라지는 것도 아니다. 세포유형, 발생영역, 연결과 기능의 일치 여부를 따로 보아야 뇌의 다양성이 우열표 밖으로 나온다.

### 비슷해 보이는 세포가 다른 길로 왔을 때

2025년 연구는 닭, 생쥐, 비조류 파충류의 세포지도를 비교했다. 조류의 많은 억제성 뉴런 유형은 다른 양막류와 공유됐지만, 흥분성 뉴런에서는 어느 영역을 비교하느냐에 따라 보존과 분화의 양상이 달랐다. 더 흥미로운 결과는 조류에서 서로 다른 위치에 있는 두 전뇌 영역의 유전자 발현이 발생 후기에 가까워질 수 있다는 점이다. 성체에서 비슷하다는 사실만으로 같은 발생 경로를 거쳤다고 읽을 수 없는 이유다. [A21-NEURAL]

### 한 장의 대응표로 끝내지 않기

전뇌의 넓은 발생영역을 비교하는 지도와 세포 하나의 유전자 사용을 비교하는 지도는 확대율이 다르다. 확대율을 바꾸면 새롭게 보이는 관계도 달라진다. 이 차이를 모순으로만 보지 않으면, 인간의 신피질과 새의 전뇌를 같은 것 아니면 완전히 다른 것이라는 두 칸에 억지로 넣지 않아도 된다.

이 장에서는 ‘얼마나 똑똑한가’라는 한 줄 순위 대신 입력·연결·에너지·출력의 배분을 읽는다. 인간의 인지나 의식에 관한 설명은 이 비교만으로 완성되지 않는다. 필요조건을 충분조건으로 바꾸지 않는 것이 이 장의 마지막 경계다.

## 08

### 후각 - 화학환경을 읽는 여러 방식

물에 녹아 움직이는 신호와 공기 중을 이동하는 신호는 같은 방식으로 코에 도착하지 않는다. 후각을 수용체 개수 순위로만 보면 매질과 행동이 사라진다. 무엇을 탐지하고 언제 움직이는지가 함께 보여야 한다.

후각은 인간에게 약해진 감각이라는 통념 때문에 다른 동물의 강한 후각이 원시적인 특징처럼 보일 수 있다. 그러나 물속의 용존 물질과 공기 중의 휘발성 물질은 이동 방식이 다르므로 후각계는 매질과 행동 생태에 따라 달라진다.

### 분자는 환경 속에서 움직인다

수중 척추동물에서는 아미노산, 담즙산과 여러 화학신호가 중요한 입력이 된다. 육상에서는 공기 중 휘발성 분자의 비중이 커진다. 수용체 유전자군도 이 환경 변화와 계통에 따라 증가·감소한다.

냄새를 맡는 동물은 분자를 기다리는 수용체의 집합만이 아니다. 물과 공기의 흐름 속에서 몸을 움직이고, 얻은 정보를 행동에 연결한다. 어떤 분자를 감지할 수 있다는 사실과 먼 거리에서 먹이를 찾아가는 능력 사이에는 전달환경과 행동이라는 단계가 있다.

수용체 수가 많다고 후각이 더 ‘발달’한 것은 아니다. 어떤 수용체가 어디에서 발현되고 어떤 신경회로·행동과 연결되는지가 함께 중요하다. 양서류와 일부 반수생 계통은 수중과 공기라는 두 환경의 화학정보를 처리하는 구조를 함께 유지할 수 있다.

## 분자 수가 경험의 크기는 아니다

조류의 후각은 ‘새는 눈이 좋으니 냄새를 못 맡을 것’이라는 직관을 혼돈다. 하나의 감각이 중요하다는 사실이 다른 감각의 무용함을 뜻하지 않는다. 유전자 레퍼토리와 실제 탐지 성능, 학습된 행동도 서로 구분해야 한다.

조류가 시각 우위이므로 후각이 퇴화했다는 단순 서사도 맞지 않는다. 여러 조류는 다양한 후각수용체 레퍼토리와 실제 후각행동을 보인다. 특정 감각 하나의 강화가 다른 감각의 단순 소실을 의미하지 않는다.

## 먹이를 찾는 코, 돌아오는 길을 찾는 코

바다에서 먹이를 구하고 번식지로 돌아오는 숨새를 떠올려 보자. 우리 눈에는 넓은 물과 하늘이 이어지지만, 새가 얻는 정보가 눈에 보이는 것에만 한정될 이유는 없다. 그렇다고 곧바로 “냄새로 집을 찾는다”고 선언해서도 안 된다. 먹이를 찾아 나서는 일, 먹이를 얻는 일, 돌아갈 방향을 잡는 일을 나누어 살펴봐야 한다.

2017년 연구자들은 지중해의 숨새 한 종인 스코폴리숨새의 자연스러운 먹이활동을 GPS로 추적했다. 후각을 차단한 새들도 바다로 나갔고, 체중이 늘어난 상태로 번식지에 돌아왔다. 차이는 돌아오는 과정에서 나타났다. 먼바다에서는 번식지 방향을 잡는 데 문제가 생겼지만, 해안 가까이에서의 항해에는 같은 영향이 관찰되지 않았다. 감각 하나를 막았다고 모든 행동이 함께 무너진 것이 아니었다. [DOLF01]

이 실험은 냄새 정보가 먼바다에서 위치와 방향을 판단하는 데 기여한다는 해석을 뒷받침한다. 동시에 “후각이 없으면 아무것도 못 한다”는 설명도 막는다. 한 몸이 여러 단서를 사용하는 방식은 과업과 장소에 따라 달라질 수 있다. 후각의 역할을 묻는 일은 코의 크기나 수용체 수를 재는 일에서 끝나지 않는다. 어느 순간 어떤 행동의 정확도가 달라지는지를 보아야 한다.

다만 이 결과만으로 새가 읽는 냄새 지도의 모든 성분과 뇌 속 표현이 밝혀진 것은 아니다. 해당 종과 실험 조건에서 얻은 결과를 모든 새의 항해법으로 확대할 수도 없다. 사람에게 보이지 않는 정보가 다른 동물의 행동에 중요하다는 사실과, 그 동물의 감각세계를 우리가 모두 알아냈다는 주장은 다르다. 이 사이의 간격을 남겨 두는 것이 비교를 더 정확하게 만든다.

인간을 포함한 일부 영장류에서 많은 후각수용체 유전자가 가유전자화됐다는 사실도 ‘후각의 실패’라기 보다 감각·행동 생태가 달라진 결과 가운데 하나다.

후각의 핵심은 어떤 화학분자를 감지하고, 수용체 레퍼토리를 어떻게 유지하며, 그 정보를 먹이·위험·생식·사회행동에 어떻게 연결하는가이다.

가유전자는 기능하던 유전자가 변이를 축적해 그 기능을 잃은 흔적을 가리킨다. 그 수를 세는 일은 진화의 흔적을 읽는 데 유용하지만 감각 전체의 성적표가 되지는 않는다. 유지된 수용체가 어떤 분자를 감지하는지, 그 신호를 어떻게 사용하는지까지 함께 읽어야 한다.

사람이 어떤 냄새를 잘 맡거나 놓친다는 사실은 인간 전체가 한 줄 후각 사다리의 낮은 곳에 있다는 뜻이 아니다. 감소와 가유전자화를 관찰하는 일, 그것이 어떤 선택이나 제약으로 생겼는지 설명하는 일은 별개의 단계다.

## 09

### 청각 - 균형과 진동의 계통사

같은 뼈의 계보를 따라가는데 어느 장에서는 턱을 지지하고 다른 장에서는 진동을 전달한다. 이런 이야기는 부품을 떼어 새 장치에 붙이는 장면처럼 읽히기 쉽다. 실제로 필요한 것은 중간 형태, 조직의 발생, 관절과 연결의 변화에 대한 증거다.

생물학적 구조는 필요에 따라 새 부품을 설계해 붙이는 과정이 아니라 기존 발생구조가 계통과 환경 속에서 변형되는 과정이다.

#### 진동의 전달과 소리의 경험

초기 내이 구조는 소리뿐 아니라 중력과 가속도, 몸의 방향을 감지하는 전정 기능과 깊게 연결돼 있다. 따라서 청각의 진화는 처음부터 '소리를 더 잘 듣기 위한 역사'가 아니었다. 반고리관의 수와 배열도 한 개 → 두 개 → 세 개의 완성사다리로 해석하지 않는다.

임피던스라는 낯선 말은 진동이 매질을 건널 때 만나는 저항 성질을 설명하는 데 쓰인다. 공기에서 조직으로 진동을 전달하는 문제는 물속에서 몸 전체가 진동을 받는 문제와 다르다. 중이 구조를 이해할 때도 뼈의 개수보다 어디에서 무엇을 받아 어디로 전하는지 먼저 따라가면 된다.

수중에서는 몸 조직과 물의 밀도 차이가 작아 외이·중이 없이도 진동이 내이에 전달될 수 있다. 육상에서는 공기와 조직 사이의 임피던스 차이가 커지면서 진동 전달을 위한 다른 구조적 조건이 중요해진다.

#### 먹는 구조와 듣는 구조 사이

등자뼈의 계보와 포유류의 망치뼈·모루뼈 계보를 한 번의 '턱뼈 이동'으로 묶지 말자. 설악골과 등자뼈의 관계, 관절골과 망치뼈 및 방형골과 모루뼈의 관계는 구분해서 추적한다. 2024년 화석 연구들은 턱관절과 중이의 재구성을 구체화하지만, 포유류형 관절이 보이면 모두 같은 직접 조상이라는 해석도 경계하게 한다. [J09, J10]

사지동물의 등자뼈는 어류 조상의 설악골 요소와 상동관계를 가진다. 그러나 이를 ‘턱뼈가 갑자기 귀뼈로 변했다’는 식으로 축약해서는 안 된다. 지지기능과 분수공 주변 영역, 발생 구조의 재배치를 함께 봐야 한다.

포유류의 달팽이관과 세 이소골은 특정 계통의 결과다. 조류·파충류·양서류·어류는 각기 다른 주파수 범위와 매질, 행동환경에 맞는 청각계를 가진다.

인간에서 청각은 언어의 중요한 입력이지만 청각기관의 진화가 언어 자체를 직접 만들었다고 직접 결론 내릴 수는 없다. 언어는 발성, 뇌회로, 학습과 사회적 상호작용을 포함하는 별도의 해석층이다.

등자뼈, 망치뼈, 모루뼈라는 이름을 한 줄로 외우면 서로 다른 계보가 하나로 납작해진다. 오늘 함께 작동하는 구조라도 진화사를 추적하는 단서는 다를 수 있다. 이 차이가 턱과 귀를 함께 읽는 이유다.

귀에서 진동을 전달하는 뼈를 턱에서는 섭식 장치의 역사로 만나게 된다. 같은 뼈가 등장해도 질문에 따라 드러나는 관계가 달라진다.

## 10

### 통각·심부감각 - 몸이 자기 상태를 읽는 법

눈을 감고 손가락을 굽히면 손의 위치를 전혀 모르는 상태가 되지는 않는다. 몸의 자세와 힘을 읽는 정보가 시각 이외의 경로에서도 들어오기 때문이다. 이 익숙한 경험은 심부감각을 소개하는 출발점이지만, 그 경험만으로 다른 동물의 주관적 감각을 대신할 수는 없다.

통각과 심부감각은 외부의 물체 자체보다 몸의 상태를 읽는 데 깊게 관여한다. 통각은 손상 가능성과 유해자극을 감지하고, 심부감각은 근육·관절·힘줄과 신체 위치 정보를 전달한다.

#### 검출, 전달, 경험을 나누어 읽기

어류의 심부감각을 미완성이라고 부를 수 없다. 물속에서는 부력과 수류가 몸을 지지하고 측선 같은 외부감각이 운동정보를 보완한다. 육상에서는 중력에 맞서 관절과 사지를 제어해야 하므로 내부 위치정보의 상대적 중요성이 달라진다.

뜨거움이나 압력에 반응하는 분자 장치가 있다는 사실은 감각 과정의 한 부분을 보여준다. 신호가 신경을 따라 전달되고 다른 정보와 합쳐지는 단계, 그리고 경험이 형성되는 문제는 그 다음에 남는다. 어느 단계의 증거인지 표시하면 분자 하나로 고통의 전부를 설명하려는 혼선을 피할 수 있다.

Piezo 계열은 기계적 자극, 여러 TRP 채널은 온도·화학적 자극의 감지에 중요하다. 유전자 중복은 수용체 다양성을 늘릴 수 있지만 이것만으로 감각의 ‘해상도’가 자동 증가한 것은 아니다.

## 눈을 감아도 손은 어디에 있는가

통각은 유해자극을 검출하는 과정이고 통증은 경험의 문제를 포함한다. 둘을 같은 말로 처리하면 분자 수용체의 비교가 곧 느낌의 비교인 것처럼 보인다. 물속과 육상에서 몸을 제어하는 조건을 비교하되, 특정 수용체가 있다는 사실만으로 감각의 풍부함을 순위 매기지 않는다.

빠른 비행, 달리기, 정밀 조작 같은 행동에서는 감각-운동 되먹임의 시간정밀도가 중요해진다. 그러나 모든 계통이 같은 감각구조를 필요로 하지 않는다.

통증 경험에는 감각수용기, 척수, 뇌, 염증과 면역계가 함께 관여한다. 인간의 사회적·심리적 통증까지 하나의 기관진화 계보로 바로 연결하는 것은 별도의 근거가 필요하다.

핵심은 운동환경이 달라질 때 몸의 위치와 힘을 얼마나 빠르게 측정하고 보정해야 하는가이다. 인간의 정밀 손동작과 직립보행도 이 문제에 대한 하나의 계통적 해법이다.

심부감각 역시 몸 안에 완성된 지도 한 장이 있다는 뜻은 아니다. 근육과 관절에서 들어온 정보가 운동과 맞물리며 계속 갱신되는 과정이다. 어떤 동작을 할 때 어떤 정보가 얼마나 빨리 필요해지는지 묻는 편이 감각기관의 숫자를 세는 것보다 유용하다.

수용기에서 운동 보정까지의 시간을 따라가면 감각과 운동이 분리된 목록이 아님을 알 수 있다. 사회적 고통이나 의식의 기원을 설명하려면 이 장의 비교를 넘어선 근거가 필요하다.

## 11

### 운동기관 - 지느러미와 손 사이에는 사다리가 없다

물속의 지느러미 앞에 사람의 손 그림을 놓으면 자꾸 손을 만들기 전의 단계처럼 보인다. 지느러미 그림만 다시 보자. 그 동물은 지금의 물속에서 추진하고 방향을 바꾸며 자세를 유지해야 한다. 아직 얻지 못한 미래의 손보다 현재 수행하는 일이 먼저다.

물속에서는 유체역학이, 육상에서는 체중지지와 지면반력이, 공중에서는 양력과 무게가 운동기관의 조건을 결정한다. 따라서 하나의 최적 운동기관은 존재하지 않는다.

#### 같은 기원을 가진 구조가 다른 일을 할 때

어류의 몸통 근육과 지느러미는 물속에서 추진력과 방향제어를 만든다. 사지의 기원을 이해할 때도 '지느러미가 손이 되었다'는 한 문장보다 공통 발생패턴과 중간 계통의 구조를 살펴야 한다. 인간의 손은 그 오래된 패턴의 목적지가 아니었다.

사지의 대응관계를 찾는 일과 이동 성능을 비교하는 일은 나누어야 한다. 앞다리의 뼈가 어떤 계보를 공유하는지 알게 되어도 비행과 달리기의 비용을 곧바로 계산할 수는 없다. 힘이 작용하는 방향, 관절의 배치, 근육과 힘줄, 주변 매질을 함께 읽어야 한다.

육상에서는 척추와 골반, 관절과 사지가 체중을 지지하고 지면에 힘을 전달해야 한다. 몸 옆으로 사지가 벌어진 자세와 몸의 앞뒤 방향으로 움직이는 사지 배열은 서로 다른 역학적 조건과 이동방식의 결과다.

### 지느러미를 미완성 손으로 보지 않기

뼈의 대응관계와 발생 조절의 공유는 중요한 단서지만 동일한 유전자를 사용한다는 사실과 모든 뼈가 하나씩 대응한다는 주장은 다르다. 사지의 개별 뼈를 비교할 때는 육기어류와 사지동물의 실제 구조와 화석 증거부터 살펴야 한다. 상어 지느러미 전체에 인간 팔의 뼈 이름을 그대로 붙일 수는 없다.

조류의 뼈 융합, 근육과 힘줄의 배치, 질량의 근위부 집중은 비행에 적합한 하나의 조합이다. 포유류의 달리기에서도 원위부 질량을 줄이면 회전관성을 낮출 수 있다. 이들은 특정 이동 조건 의 해법이지 '고등한 설계'가 아니다.

Hox와 Shh 등 여러 유전자 네트워크는 사지 패턴 형성에 중요하지만 새로운 운동기관이 하나의 유전자 때문에 만들어진 것은 아니다. 발생, 조직 성장, 기계적 부하와 계통적 제약이 함께 작동한다.

인간의 직립보행과 정밀 손동작은 문화와 도구사용에 큰 영향을 주었지만 운동기관의 진화가 언어나 지능을 직접 만들었다는 단일 인과로 결론 내릴 수는 없다.

몸 가까이와 먼 곳에 같은 질량을 놓는 것은 운동에서 같지 않다. 회전축에서 멀리 놓인 질량은 움직임을 시작하고 바꾸는 조건에 다르게 기여한다. 원위부 질량과 회전관성이라는 말은 이 관계를 다룬다. 그러므로 가벼움도 전체 무게뿐 아니라 어디에 놓였는지의 문제다.

우리의 손과 다리도 서로 다른 운동 조건 속에서 읽힌다. 구조가 가능하게 하는 동작과 실제 행동, 문화적 도구사용은 연결되지만 하나의 직선 원인사슬은 아니다.

## 12

### 뼈 - 단단함과 가벼움, 저장과 재생 사이

골격을 가장 단단한 재료로 채우면 더 좋은 몸이 될까. 무게가 늘고, 성장과 유지에 필요한 자원이 달라지며, 움직임도 영향을 받는다. 단단함 하나로 점수를 매길 수 없다는 것이 뼈를 읽는 출발점이다.

뼈는 지지대인 동시에 힘을 전달하고 장기를 보호하며 칼슘·인을 저장하고 일부 계통에서는 조혈과 면역세포 형성의 공간을 제공한다. 이 기능들은 서로 얽혀 있으며 강도, 무게, 성장과 대사비용 사이의 이득과 비용의 절충을 만든다.

### 재료가 살아 있다는 것

초기 척추동물 계통에서는 광물화된 조직이 체표와 외부 구조에서 널리 나타난다. 이후 내골격의 광물화와 관절, 척추와 사지 구조가 다양해졌다. 이를 외골격→내골격이라는 단순한 발전단계로 읽지는 않는다.

뼈를 재료로만 생각하면 생장과 교체가 부수적인 일이 된다. 살아 있는 골격에서는 조직을 만들고 제거하는 과정도 구조의 일부다. 무기질을 저장한다는 말 역시 한 번 채운 창고를 닫는다는 뜻이 아니다. 몸의 다른 과정과 물질을 주고받는 관계를 포함한다.

물속의 골격은 부력과 추진을 전제로 작동하고 육상에서는 체중을 직접 지지해야 한다. 조류에서는 비행 때문에 무게와 강성의 관계가 중요해져 여러 뼈의 융합과 함기화가 나타난다. 포유류에서는 반복 하중과 긴 수명 속에서 리모델링의 중요성이 커질 수 있다.

## 튼튼하기만 하면 되는가

뼈를 통한 힘의 전달과 무기질의 이동은 같은 조직에서 벌어지지만 같은 기능은 아니다. 골수까지 함께 생각하면 골격의 경계는 혈액과 면역으로 이어진다. 이 관계는 모든 척추동물이 동일한 장소에서 조혈한다는 뜻이 아니다. 종과 시기별 배치를 구분해야 한다.

뼈는 동적인 무기질 저장고이기도 하다. 칼슘과 인은 골격 재료이면서 세포신호, 근수축과 신경기능에 필요하다. 골수와의 연결은 순환·면역계와 뼈를 강하게 결합한다.

턱의 기원을 단일 목적, 예를 들어 호흡효율 하나로 환원할 수는 없다. 턱과 치아의 관계에는 골격뿐 아니라 발생과 섭식의 증거도 필요하다.

인간 골격은 여러 역학·대사 문제를 함께 해결하는 포유류식 구성의 하나다.

단단함, 질량, 손상 회복을 같은 축의 양끝으로만 그릴 수는 없다. 형태와 미세구조, 하중의 방향과 반복, 나이와 조직 환경이 결과를 바꾼다. 재생을 비교할 때에도 얼마나 단단해졌는지와 원래 모양·기능을 얼마나 되찾았는지를 구분해야 한다.

구조를 유지하면서 손상에 대응하는 일은 재료 교체만으로 끝나지 않는다. 원래 모양과 연결을 얼마나 되찾는지에 따라 수선과 재생의 의미도 달라진다. 다음 인터루드는 뼈를 심장·피부·장·신경과 나란히 놓되 하나의 재생 점수로 줄이지 않는다.

## 인터루드

### 단힌 상처와 돌아온 구조는 다르다

상처가 닫혔다는 말은 무엇이 돌아왔다는 뜻일까. 표면의 연속성, 세포 수, 원래 모양, 신경 연결과 기능은 같은 결과가 아니다. 수선은 손상에 대응해 연속성과 기능을 회복하는 넓은 과정이고, 재생은 사라진 구조를 다시 형성하는 범위를 따져 써야 한다. 세포가 평소 교체되는 현상을 장기 전체의 재생과 혼동하지 않는다.

제브라피시 심장, 가시생쥐 피부, 장 상피와 사지 재생을 같은 ‘잘 재생하는 몸’으로 묶으면 차이가 가려진다. 2025년 제브라피시 연구의 BMP 신호와 복제 스트레스, 가시생쥐의 피부 손상 후 재생, 생쥐 장 줄기세포의 계보 추적은 각각 다른 조직·손상·측정에서 나온 결과다. [I04a-c]

아홀로를 사지에서는 재생에 참여하는 세포가 조직 기원의 제약을 유지한다는 계보 추적이 중요하다. 모든 세포가 완전히 백지 상태로 돌아가 새 몸을 만드는 그림은 맞지 않는다. [I04d] 신경에서도 축삭의 성장과 회로의 올바른 재연결, 기능 회복을 나누어 평가해야 한다. 뼈의 손상 회복은 나이와 국소·전신 환경에 영향을 받으며, 한 조건의 결과를 모든 골절로 넓히지 않는다. [I04e]

이 비교가 허용하지 않는 결론도 있다. ‘고성능 심장을 얻는 대가로 재생을 잃었다’는 단일 인과, ‘하등동물은 재생하고 고등동물은 못 한다’는 서열, 특정 유전자만 켜면 인간 장기가 재생한다는 약속이다. 비교 표에는 종, 나이, 손상 모델, 세포 출처, 구조·기능의 회복 정도와 관찰 기간을 따로 적는다.

## 13

### 면역 - 자기 경계를 유지하는 여러 방식

같은 표적을 알아본다고 같은 방식으로 이름표를 읽는 것은 아니다. 칠성장어와 유악류의 수용체를 비교하면 다양성을 만드는 분자적 해법이 하나가 아님을 알 수 있다. 한쪽을 다른 쪽의 미완성판으로 부르면 실제 차이가 사라진다.

면역계는 선천면역에서 적응면역으로 ‘발전’한 사다리가 아니다. 모든 척추동물은 기본적인 선천면역을 유지하고, 일부 계통에서 가변적 항원인식 체계가 그 위에 추가된다.

#### 인식 장치와 만나는 장소

칠성장어와 먹장어의 적응면역은 류신 반복 구조에 기반한 가변림프구수용체(VLR)을 사용하고, 유악류는 면역글로블린 도메인에 기반한 B세포·T세포 수용체(BCR/TCR)을 사용한다. 수용체 구조는 근본적으로 다르지만 두 체계 모두 매우 다양한 표적을 인식할 수 있다.

수용체는 표적과 만나는 분자 장치이고, 림프구는 그 장치를 이용하는 세포이며, 면역기관은 여러 세포가 발달하고 만나는 조직 환경이다. 세 층을 나누면 한쪽의 수용체가 다르다는 이유만으로 모든 세포와 기관의 기원까지 달랐다고 결론 내리지 않게 된다.

수용체가 다르다는 사실만으로 적응면역의 모든 요소가 각각 처음부터 만들어졌다고 할 수는 없다. 바다칠성장어에서는 서로 다른 수용체를 사용하는 림프구 집단과 반응의 차이가 확인되어 T세포와 비슷한 집단, B세포와 비슷한 집단을 구분할 근거가 되었다. 이런 비교는 오래된 림프구의 분업과 계통별 수용체 해법을 함께 생각하게 한다. 공통조상의 구체적 세포 구성을 직접 관찰한 것은 아니며, 두 집단이 인간의 T·B세포와 모든 성질에서 같다는 뜻도 아니다. [A21-IMMUNE]

## 서로 다른 인식 문법

그러나 다른 수용체를 쓴다는 사실이 면역의 모든 구성요소가 각각 독립적으로 시작됐다는 뜻도 아니다. 세포계통, 수용체, 조직의 배치라는 층위를 나누어야 공유되는 것과 달라진 것이 함께 보인다. 공유된 세포의 기본 구성과 서로 다른 수용체라는 구분이 이 두 사실을 함께 보여 준다.

유악류에서 RAG와 V(D)J 재조합은 B/T 세포 면역의 핵심이지만 RAG 사건 하나로 현대 면역계 전체를 설명할 수는 없다. 면역기관, 세포형, 신호분자와 조직환경이 함께 변했다.

면역은 피부와 장의 경계면, 혈액과 골수 등 여러 장소에서 작동한다. 그래서 면역 진화는 몸 안의 군대가 강해지는 역사가 아니라 경계를 어디에 두고 어떤 자극에 얼마나 반응하며 과잉 반응을 어떻게 억제할 것인가의 역사다.

인간의 면역계도 이 여러 해법의 종착점이 아니다. 특정한 수명, 체온, 미생물 환경과 생활사를 가진 포유류 한 종의 구성이다.

좋은 면역을 항상 더 강한 반응으로 정의하면 억제와 관용은 결함처럼 보인다. 그러나 자기 조직과 함께 사는 미생물, 감염원에 똑같이 반응하는 체계는 다른 문제를 만든다. 무엇을 알아보는가만큼 어디에서 어떤 조건으로 반응을 멈추는가가 중요하다.

## 표적을 알아본 다음의 행동

바다칠성장어 연구에서 VLRA와 VLRB는 서로 구별되는 림프구 집단에 나타났다. 항원에 반응한 뒤 VLRB는 분비되는 수용체로도 검출됐지만 VLRA는 같은 방식으로 분비되지 않았다. 무엇으로 알아보는지뿐 아니라 알아본 뒤 무엇을 하는지를 함께 비교한 것이다. T와 비슷하다, B와 비슷하다는 이름은 이런 발현과 반응의 비교에서 나온다. 이름이 같아 보인다는 이유로 인간 면역세포의 모든 작동을 그대로 옮길 수는 없다. [A21-IMMUNE]

세포가 무엇을 인식하는지 다음에는 어디에서 만나고 이동하는지 물어야 한다. 이어지는 림프·비장·흉선 인터루드는 인식체계의 계보를 다시 설명하지 않고, 흐름과 면역 조직의 배치를 연결한다.

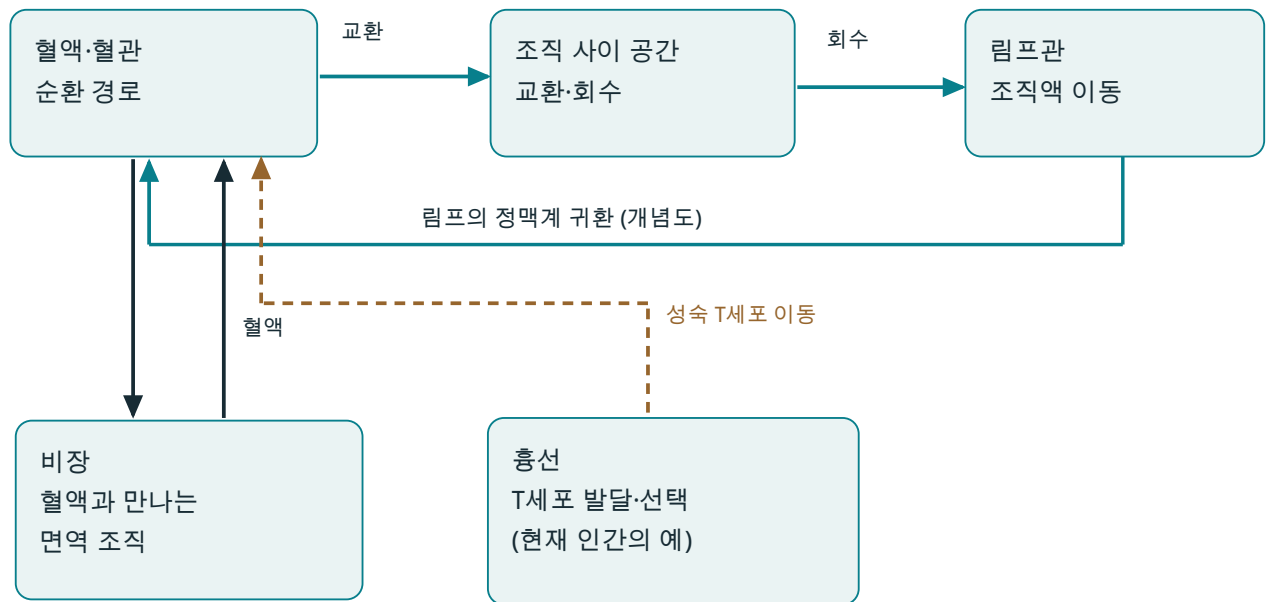
## 인터루드

### 돌아오는 액체와 만나는 세포

순환 그림에서 동맥과 정맥만 그리면 조직 사이 공간이 빠진다. 혈관 밖의 액체가 돌아오는 경로와 면역 세포가 이동하고 만나는 장소도 함께 보아야 한다. 그러나 림프관, 비장, 흉선을 '정화 장치' 하나로 묶으면 서로 다른 일을 놓친다.

림프관은 조직액의 회수·운반과 관련된다. 비장은 혈액을 통과하는 물질과 세포를 다루는 면역 조직이며, 흉선은 T세포 계열의 발달과 선택을 이해하는 장소다. 비장을 림프액이 반드시 거쳐 가는 정거장처럼 그리지 않는다. 종별로 기관의 배치와 미세구조가 달라 인간의 림프절 지도를 모든 척추동물에 덮어 쓸 수 없다. 제브라피시의 림프관 발생 생체영상 연구는 림프관을 포유류만의 구조로 볼 수 없음을 보여준다. [I02a]

칠성장어 유생 아가미 끝의 thymoid 후보에 관한 연구는 림프구 발달을 지원하는 조직을 비교할 단서를 준다. 그 구조를 인간의 흉선과 모든 면에서 같다고 하거나 '흉선 직전 단계'라고 부르지 않는다. [I02b] 면역계의 인식 분자에 더해 여기서는 액체 회수, 혈액 여과, 세포 발달이라는 세 질문을 분리한다. 이런 분업은 오늘날 인간의 기관 연결을 그릴 때도 지켜야 한다.



실선: 액체·혈액 경로    점선: 세포 이동 관계

비장은 림프액이 반드시 통과하는 정거장이 아니다.

현재 인간의 연결 개념도. 모든 척추동물의 공통 해부도가 아니다.

현재 인간의 연결 | 현재 인간의 조직액 회수와 면역기관 관계를 분리한 interface 지도. 모든 척추동물의 림프 해부학으로 일반화하지 않는다.

## 14

### 생식 - 다음 세대로 이어지는 구조의 다양성

알을 밖에 두는가, 몸 안에서 발달시키는가만으로 번식의 비용을 모두 설명할 수는 없다. 배아가 무엇에서 영양을 얻고, 어떤 조직을 사이에 두고 물질을 교환하며, 부모가 언제 얼마를 투자하는지 질문이 더 남는다.

생식기관의 진화는 외부수정에서 내부수정으로, 단순한 생식관에서 복잡한 생식기로 발전한 역사처럼 보이기 쉽다. 그러나 수정환경, 생식세포 이동, 배아 보호와 성 결정의 방식은 계통마다 다르다.

#### 한 가지 이름 뒤에 여러 축이 있다

현존 무악류의 비교적 단순한 생식세포 방출 방식을 '원시적 상태'라고만 부를 수 없다. 이들은 오래된 특징과 자신들만의 이후 진화를 동시에 가진 현대 생물이다.

외부수정과 내부수정은 생식세포가 만나는 장소의 구분이다. 난생과 태생은 배아가 발달하고 태어나는 방식의 구분이고, 영양공급은 또 하나의 축이다. 이 질문들을 한 줄에 겹치면 몸 안에서 자라는 모든 배아가 같은 방식으로 영양을 받는 것처럼 보인다.

척추동물에서 신장과 생식기관은 발생적으로 밀접하다. 일부 관 구조는 배설과 생식 사이에서 역할이 바뀌거나 분리된다. 생식계는 완전히 새로 등장한 독립기관이라기보다 기존 발생구조와 기능이 재배치된 결과라는 점이 중요하다.

## 몸 안에서 자란다는 말의 여러 뜻

오래된 내부수정 화석은 번식 전략의 역사를 되짚게 하지만, 그 화석 하나가 현생 모든 내부수정의 기원을 정해 주지는 않는다. '현재까지 알려진 증거'와 '역사상 최초'를 구분하는 문법이 여기서 특히 중요하다.

데본기 판피류 화석은 내부수정이 매우 오래된 전략임을 보여준다. 하지만 이를 모든 유악척추동물 내부수정의 단일 기원이나 '최초'로 확정하지 않는다. 판피류의 교미구조와 현대 상어의 교미기도 형태가 비슷해 보여도 발생적 기원이 다를 수 있다.

성 결정도 환경적 방식과 유전적 방식이 반복적으로 나타나며 한 방향으로 수렴하지 않는다. 내부수정, 난생, 태생 또한 우열이 아니라 서로 다른 생활사 조건의 해법이다.

인간 생식계는 이 다양한 구조와 전략의 한 형태다.

화석은 그 구분을 과거로 연장하는 증거를 제공한다. 그러나 오래된 증거를 찾았다는 말과 최초 사건을 찾았다는 말은 다르다. 보존되지 않았거나 아직 발견되지 않은 계통이 있을 수 있기 때문이다. 가장 오래된 것으로 알려진 표본은 역사를 제한하는 표지이지 역사의 모든 시작을 보여 주는 표지는 아니다.

다음 태반 인터루드에서는 포유류의 구조를 기본형으로 놓지 않는다. 다른 척추동물에서 비슷한 교환 기능이 독립적으로 나타날 수 있음을 보고, 같은 기능과 같은 조직기원을 따로 묻는다. 인간의 임신은 그 비교의 한 사례이며 진화의 마지막 단계가 아니다.

## 인터루드

### 경계 하나에 두 생명의 요구가 걸린다

몸 안에서 배아가 자란다는 사실과 부모에게서 지속적으로 영양을 받는다는 사실은 구분해야 한다. 저장된 난황을 이용하는 정도와 임신 중 추가되는 공급의 비중은 같지 않다. 태반을 논하려면 어떤 조직이 마주하고 무엇이 어떤 경로로 오가는지부터 밝혀야 한다.

포유류의 태반은 독자에게 익숙한 출발점이지만 모든 척추동물 태반의 원형은 아니다. 난태생 송사리과의 여러 계통에서 태반 구조가 반복적으로 나타났다는 연구는 비슷한 교환 기능에 수렴하면서도 서로 다른 구조적 해법이 가능함을 보여준다. [I03a] 같은 이름을 쓴다고 모든 태반이 기관 전체 수준에서 동일 기원인 것은 아니다.

포유류 내부에서도 세 포유형과 모체-배아 신호의 비교는 하나의 표준형보다 다양성을 보여준다. 2025년 비교 연구의 조상 신호 복원은 현생 자료와 모형에 기반한 추정이지 조상을 직접 관찰한 결과가 아니다. [I03b]

이 경계에서는 교환, 부착, 조절과 면역적 관계가 함께 중요하다. 부모와 자손의 이해가 다를 수 있다는 틀은 질문을 만들지만 모든 형질을 갈등 하나로 설명하지 않는다. 여기서 얻을 인간의 흔적은 '더 진화한 임신'이 아니라 여러 조직의 요구가 한 경계에서 만난다는 사실이다. 가족을 이루는 방식이나 개인의 생식 선택에 우열을 부여하는 논의로 확장하지 않는다.

## 15

### 호르몬 - 기관을 연결하는 화학적 조절

같은 신호분자가 있어도 모든 조직이 같은 반응을 보이지는 않는다. 수용체가 어디에 있고, 어떤 상태에서 신호를 받으며, 반응이 어떻게 되돌아오는지가 함께 중요하다. 호르몬의 이름만 외우면 조절의 절반이 사라진다.

호르몬은 하나의 기관이라기보다 여러 기관 사이를 연결하는 조절 방식이다. 누가 신호를 만들고, 얼마나 멀리 보내며, 어떤 수용체가 받고, 어떤 되먹임으로 되돌리는가가 핵심이다.

#### 원은 명령보다 많은 것을 보여 준다

세포의 화학신호는 척추동물보다 오래됐지만 원시 지구의 화학반응에서 현대 내분비축까지 직선 계보를 만들지는 않는다. 여기서는 척추동물 내분비 체계에서 비교 가능한 변화에 집중한다.

조절회로를 그릴 때 한 방향 화살표는 출발만 보여 준다. 표적에서 생긴 변화가 신호의 분비나 작용에 어떻게 되돌아오는지까지 그려야 피드백이 보인다. 되먹임은 신호의 양뿐 아니라 신호를 받는 조직의 상태와 함께 읽어야 한다.

유전체 중복은 여러 신호분자·수용체 유전자군의 다양화를 위한 재료를 늘렸지만 유전체 중복이 내분비계를 ‘만들었다’고 말할 수는 없다. 이후 계통마다 유전자의 유지·소실·분화가 달랐다.

## 메시지는 받는 곳에서 달라진다

수분, 이온, 칼슘을 조절하는 회로를 따라가면 한 기관이 다른 기관을 일방적으로 명령하는 그림이 맞지 않음을 알 수 있다. 신호를 만드는 장소, 표적, 피드백을 나눠 그려 보자. 분자계열의 공유와 내분비기관 전체의 상동성도 구분해야 한다.

수분조절은 신장과 시상하부·뇌하수체, 여러 말초 신호의 협업이고 칼슘 항상성은 뼈·신장·장과 내분비 조절이 함께 작동하는 문제다. 내분비의 진화는 중앙사령탑의 완성이라기보다 되먹임 회로가 추가되고 재배치되는 과정에 가깝다.

사지동물의 부갑상샘과 어류의 내부 아가미썩은 인두낭 내배엽 및 Gcm2라는 발생 조절인자와 연결된다. 2004년 연구에서는 닭의 부갑상샘 형성과 제브라피시·상어류(*Scyliorhinus canicula*)의 내부 아가미썩에서 Gcm2 발현을 비교했다. 제브라피시에서 Gcm2 기능을 억제하자 내부 아가미썩 형성이 방해받았고, 어류 아가미에서는 부갑상샘호르몬 관련 유전자와 칼슘감지수용체의 발현도 확인됐다. 이 결과는 깊은 발생·기능적 연관을 지지한다. 오늘날의 아가미 전체가 그대로 부갑상샘으로 바뀌었다는 의미는 아니다. [A21-HORMONE]

인간 내분비계는 오래된 신호체계와 포유류 특이적 변화가 겹친 한 구성이다.

기관 사이를 연결하는 화학신호를 장기의 목록에 억지로 넣으면 조절 자체가 사라진다. 반대로 모든 기관을 신호망으로만 그리면 물질이 실제로 어디를 통과하는지 놓친다. 흐름의 그림과 조절의 그림을 겹쳐 읽되 화살표의 뜻은 나누는 것이 좋다.

## 어떻게 만들고, 어디서 왔는가

발생 실험에서는 조절인자의 기능을 억제한 배아와 대조 배아를 비교할 수 있다. 특정 구조가 제대로 형성되지 않으면 그 인자가 그 발생 과정에 필요하다는 근거가 된다. 그러나 실험실의 배아에서 구조를 만들지 못하게 한 일은 과거에 그 기관이 처음 생겨난 장면을 재현한 일이 아니다. 제브라피시의 내부 아가미썩 실험이 현재의 발생기전을 직접 묻는다면, 아가미와 부갑상샘의 관계는 그 결과를 계통·조직 기원과 함께 읽어 얻는 역사적 추론이다. [A21-HORMONE]

체장의 내분비 기능은 6장 뒤 인터루드로 돌아가 읽을 수 있다. 같은 장기가 소화와 조절의 두 질문에 걸쳐 있음을 기억하면, 물질의 이동과 신호의 전달을 구별해 읽을 수 있다.

## 16

### 혈관·혈액 - 움직이는 내부환경

산소를 잘 붙잡는 헤모글로빈이 언제나 더 좋은 것일까. 필요한 장소에서 놓아주지 못하면 운반이라는 일은 끝나지 않는다. 결합과 방출을 함께 생각하면 친화도는 높은 쪽이 이기는 점수가 아니라 조건에 따라 읽어야 할 특성이다.

혈액은 산소와 이산화탄소, 영양소와 대사산물, 호르몬, 열과 면역세포를 함께 운반하는 움직이는 내부 환경이다. 그래서 혈액의 진화는 한 가지 성능을 최대화하는 과정이 아니라 여러 기능 사이의 절충을 보는 일이다.

#### 실어 나르는 양과 전달하는 양

대부분의 비포유류 척추동물 적혈구는 핵을 유지하지만 포유류 적혈구는 성숙 과정에서 핵을 잃는다. 무핵 적혈구는 내부 공간을 헤모글로빈에 더 많이 사용할 수 있고 좁은 모세혈관을 통과할 때 크게 변형될 수 있다. 그러나 조류가 높은 대사율과 비행능력을 가지면서도 유핵 적혈구를 사용하는 사실은 탈핵을 '진화의 정점'으로 부를 수 없게 한다.

혈액에 실린 산소의 양과 조직이 실제로 받아 쓰는 양은 동일한 문장이 아니다. 결합해 운반하는 능력, 필요한 곳에서 방출하는 성질, 혈액이 교환면에 도달하는 흐름이 함께 필요하다. 헤모글로빈의 친화도를 설명할 때 붙잡기와 놓아주기를 한 그림에 넣어야 하는 이유다.

헤모글로빈의 산소친화도에도 하나의 최적값이 없다. 높은 친화도는 낮은 산소분압에서 결합에 유리하지만 조직 방출에는 비용이 있을 수 있다. pH와 이산화탄소, 여러 조절물질은 실제 산소운반을 동적으로 바꾼다.

#### 잘 붙잡는 것과 잘 놓아주는 것

혈액에는 산소 외에도 여러 물질과 세포가 실린다. 운반량을 늘리는 변화가 흐름의 저항과 에너지비용에는 어떤 영향을 주는지 함께 물어야 한다. 적혈구의 핵 유무도 하나의 성능표로 읽지 않는다. 높은 대사를 유지하는 새의 유핵 적혈구가 이미 비교의 반례다.

백혈구와 면역분자도 혈액을 이용한다. 면역계가 무엇을 알아보는지는 13장에서 살폈다. 여기서는 그 세포와 분자가 이동하는 수송환경에 주목한다.

혈관에서도 압력, 탄성, 저항, 분기와 미세혈관 구조가 함께 변한다. 높은 압력은 먼 조직에 혈류를 보내는 데 유리할 수 있지만 얇은 교환면에는 부담이 될 수 있고, 적혈구 농도 증가는 산소운반능과 점도를 동시에 바꾼다.

따라서 혈액·혈관 진화의 핵심은 최대 수송량이 아니라 필요한 물질을 필요한 장소에 보내면서 압력, 점도, 교환면, 에너지비용과 안전성을 조절하는 것이다.

기관을 연결하는 내부환경은 단순한 배경이 아니다. 같은 혈류가 영양과 열, 신호와 세포를 함께 옮기기 때문에 한 기능의 변화가 다른 기능의 조건을 바꿀 수 있다. 심장을 펌프로, 혈액을 내용물로 분리해 설명한 뒤에는 두 설명을 다시 만나게 해야 한다.

심장이 만드는 압력과 혈액의 운반 성질, 교환면의 조건은 서로 만난다. 조직 사이로 나온 액체가 돌아가는 경로는 13장 뒤 림프 인터루드로 연결한다. 회로를 그릴 때 돌아오는 길을 빼놓지 않는 것이 중요하다.

## 17

### 시각 - 빛을 보는 방법은 하나가 아니다

눈에 빛이 들어오는 것과 신경조직이 그 신호를 처리하는 것은 다른 문제다. 투명한 광학 경로만 보면 그 뒤 조직이 어떻게 영양을 받고 대사산물을 내보내는지 놓치기 쉽다. 시각에도 운반과 교환의 문제가 들어 있다.

시각계를 진화의 걸작이나 정점으로 부르기 쉬운 이유는 눈의 구조가 복잡하기 때문이다. 그러나 시각계에서 중요한 것은 복잡성 자체가 아니라 어떤 빛환경과 행동문제를 해결해야 하는가이다.

#### 보이게 하는 조직도 먹고 산다

물속과 공기 중에서는 굴절조건이 다르기 때문에 렌즈와 각막의 역할도 달라진다. 많은 어류는 구형 렌즈와 다른 초점조절 방식을 이용한다. 육상에서는 각막의 굴절 기여가 커지고 표면을 마르지 않게 유지하면서 투명성을 확보해야 한다.

광수용체가 빛을 신호로 바꾸는 동안 주변 조직은 필요한 물질을 공급하고 대사산물을 처리한다. 눈의 광학적 투명성과 신경조직의 유지가 한 장소에서 만나는 것이다. 빛의 화살표만 그린 해부도에는 이 두 번째 이야기가 빠져 있다.

조류에서는 빠른 비행과 장거리 시각에 높은 공간·시간 해상도가 중요할 수 있고, 야행성 포유류에서는 낮은 광량에서 광자 포착이 더 중요할 수 있다. 일부 영장류에서는 색각과 중심시의 비중이 커졌다. 이것은 하나의 최종 눈을 향한 발전이 아니라 감각자원의 재배치다.

#### 투명함도 유지 비용이 있다

2026년 빛살기관 연구는 특히 안쪽 망막의 대사를 구분해 읽어야 한다. 이를 새의 눈 전체가 산소 없이 작동한다는 뜻으로 넓히지 않는다. 관찰된 대사 지원과 고고도 비행에 관한 진화적 해석 역시 같은 확실성으로 쓰지 않는다. [E02]

조류의 빛살기관(pecten)은 오랫동안 망막의 산소·영양 공급 구조로 설명돼 왔다. 2026년 연구가 구분한 것은 같은 눈 안의 서로 다른 층이다. 바깥쪽 광수용체는 산소에 접근할 수 있는 반면, 연구된 안쪽 망막은 만성적인 무산소 상태에서 해당과정으로 대사를 유지했다. 빛살기관이 이 안쪽 조직에 포도당을

공급하고 젖산을 제거한다는 근거도 제시됐다. 따라서 이 발견을 '새의 눈은 산소 없이 작동한다'로 줄이면 중요한 차별 차이가 사라진다. [A21-VISION]

척추동물의 역전망막도 잘못된 설계와 완벽한 최적설계라는 양극단을 피해야 한다. 광수용체, 망막색소상피(RPE)와 맥락막의 관계는 발생사와 대사요구 속에서 장점과 제약을 함께 가진다.

시각정보와 뇌 영역의 관계는 분명하지만 시각이 뇌팽창과 의식을 직접 만들었다는 단일 인과로 결론 내릴 수는 없다.

역전망막을 놓고 완벽하다고 말하거나 실패했다고 말하는 것은 모두 비교를 서둘러 끝내는 방식이다. 현재 구조가 어떻게 작동하는지, 어떤 발생적 관계를 이어받았는지, 어떤 비용을 갖는지를 차례로 물어야 한다. 그 세 설명이 함께 있어야 복잡한 기관을 경탄 이상의 대상으로 읽을 수 있다.

### 혈관이 적다는 사실 뒤의 두 가지 질문

빛이 지나가는 경로와 살아 있는 신경조직을 유지하는 경로를 한 그림에 겹쳐 보자. 눈에 혈관이 없거나 적다는 관찰만으로 영양도 공급되지 않는다고 할 수는 없다. 반대로 공급 구조가 있다는 이유만으로 그 주된 역할을 산소 공급이라고 정할 수도 없다. 어떤 물질이 어느 층으로 가고 무엇이 되돌아오는지를 측정해야 한다. 빛살기관의 이야기가 바꾸는 것은 장기의 이름보다 우리가 그 장기에 묻는 질문이다.

[A21-VISION]

밝은 곳과 어두운 곳, 물속과 공기 중에서 필요한 감도와 해상도는 같지 않다. 인간의 눈을 기준으로 각 동물의 결함을 세는 대신, 어떤 입력을 얻기 위해 어떤 제약을 감수하는지 묻는 것이 이 장의 비교법이다.

## 18

### 미각 - 먹을 것과 피할 것을 구분하는 화학감각

물고기의 몸 표면에서 먹이 관련 화학정보를 읽는 수용기가 작동한다고 해서 온몸이 인간의 혀처럼 맛 본다고 말할 수는 없다. 분자를 감지하는 장치와 그 신호가 만들어 내는 경험은 같은 수준의 설명이 아니다.

미각의 오래된 문제는 즐거움이나 미학이 아니라 이 물질을 먹어도 되는가, 영양분인가, 독성 가능성이 있는가, 현재 몸이 필요로 하는 자원과 관계하는가이다.

### 감지하는 곳과 느끼는 것은 다르다

어류에서는 미각수용기가 입안뿐 아니라 몸 표면과 지느러미 등에도 나타날 수 있다. 흐르는 물속의 화학정보를 감지하는 이 방식은 육상동물의 혀 중심 미각과 다르지만 덜 발달한 형태는 아니다.

분자가 감지되는 장소를 지도에 찍어 보자. 구강, 몸 표면, 장이 같은 색으로 표시되더라도 신호가 향하는 경로와 반응은 다를 수 있다. 분자부품의 공유는 비교의 시작이지 모든 조직에서 같은 맛이 느껴진다는 결론이 아니다.

수용체 유전자군은 식이와 계통에 따라 반복적으로 증가하거나 줄어든다. 고양이과의 단맛 수용체 변화나 여러 해양 포유류의 수용체 소실은 감각계가 항상 더 많은 수용체를 향해 진화하지 않는다는 것을 보여준다.

## 사라진 부품의 일을 다른 부품이 맡을 때

꽃 앞에서 머물며 꽃꿀을 먹는 벌새를 떠올려 보자. 당을 먹이로 이용한다면 그것을 구별하는 장치도 있을 것 같다. 그런데 2014년 연구에서 조사한 조류에는 포유류의 단맛 수용체를 이루는 핵심 부품 하나가 널리 결여돼 있었다. 유전자 목록만 읽었다면 벌새가 당을 감지하는 방식은 설명의 빈칸으로 남았을 것이다. [DTASTE01]

연구자들은 이름이 다른 부품을 살폈다. 보통 감칠맛과 관련된 아미노산 감지에 관여하는 두 단백질의 조합이었다. 벌새에서는 이 조합이 당에 반응하는 기능을 얻은 것으로 나타났다. 이를 구성하는 단백질이 T1R1과 T1R3이며, 포유류 단맛 수용체의 주요 조합인 T1R2와 T1R3와는 다르다. 세포에서 수용체를 발현시켜 반응을 측정한 결과와 사육·야생 벌새의 먹이 선택 행동이 함께 비교됐다. [DTASTE01]

여기서 새로워지는 것은 수용체의 개수보다 수용체와 입력의 관계다. 부품 하나가 없다는 사실이 그 부품과 관련된 기능 전체의 부재를 뜻하지 않을 수 있다. 물려받은 다른 분자장치의 작동이 바뀌면 비슷한 먹이 문제에 다른 경로로 접근할 수 있기 때문이다. 인간에게 익숙한 부품 명단을 모든 동물의 필수 조건으로 놓으면 이런 변화를 놓친다.

그렇다고 벌새가 인간과 똑같은 달콤함을 경험한다고 확인한 것은 아니다. 수용체의 분자 반응, 먹이를 선택하는 행동, 주관적인 맛의 경험은 나눠야 한다. 이 기능 변화가 꽃꿀 이용과 벌새 다양화에 기여했다는 진화적 해석도 모든 변화의 단일 원인이 확정됐다는 뜻은 아니다. 이 사례는 사라진 기능을 상상으로 메우는 대신, 남은 부품이 실제로 무엇을 하는지 시험할 때 설명이 달라진다는 것을 보여 준다.

## 입 밖의 수용체는 무엇을 하는가

고양이과의 단맛 수용체 변화는 수용체 수가 늘어나는 방향만 있는 것이 아니라는 반례다. 여기서 바로 ‘단맛이 쓸모없어서 버렸다’고 결론 내리면 관찰에서 선택원인으로 뛰어넘게 된다. 유전자의 소실·기능, 식이와 행동을 각각 확인해야 한다.

혀 수용체와 유사한 분자체계가 장 등 다른 조직에서 영양소 감지와 호르몬 분비에 관여할 수 있지만 이를 모두 같은 ‘맛 경험’으로 부를 수는 없다. 분자부품의 공유와 신경적 경험은 다른 수준이다.

인간의 미각은 요리와 문화 속에서 사용되지만 미각이 기술혁신과 사회지능을 직접 만들었다는 단일 인과는 피한다. 영양섭취, 에너지 이용, 문화적 행동은 서로 영향을 주지만 한 방향의 계보는 아니다.

미각 진화의 핵심은 무엇을, 어디에서 감지하고 어떤 행동과 대사반응으로 연결하는가이다.

맛의 진화를 먹을거리의 즐거움만으로 읽으면 영양과 위험의 문제가 사라지고, 독성 경보만으로 읽으면 현재 몸의 필요와 문화가 사라진다. 서로 영향을 주는 층들이 있다는 사실을 인정하면서도 한 층의 변화가 나머지 모두를 만들었다고 단정하지 않는 것이 이 책의 마지막 감각 비교다.

장에 있는 영양소 감지 체계와 구강의 미각은 분자부품을 공유할 수 있다. 하지만 인간의 맛 경험을 그 모든 조직으로 확장하지 않는다. 미각에서 소화·호르몬으로 넘어가는 연결은 감각의 서열보다 무엇이 어디에서 어떤 반응으로 이어지는지를 묻도록 만든다.

## 턱·치아 - 보충 연구 후보와 열린 질문

이 장은 기존 턱·치아 정보의 회수본이 아니다. 독립적인 원자료 계보가 확인되지 않은 상태에서 새 연구로 만든 읽기 후보이며, 정보 채택을 보류한다.

턱과 치아를 하나의 장치로 보면 둘이 한꺼번에 생겼을 것처럼 느껴진다. 그러나 턱은 먹이를 붙잡고 움직이는 골격과 근육의 관계이고, 치아는 표면의 조직과 발생·교체 양식까지 포함하는 문제다. 오늘날 함께 작동한다는 사실이 출발부터 하나의 단위였음을 보장하지는 않는다.

발생 연구는 턱이 만들어지는 위치와 그 앞쪽 영역의 관계, 세포의 이동과 조직 사이 신호를 비교한다. Dlx 유전자군의 기능을 바꾸었을 때 턱 영역의 정체성이 달라진다는 결과는 패턴 형성의 기전을 보여 준다. 그러나 현재 배아에서 필요한 유전자라는 사실만으로 그 유전자가 턱을 처음 발명했다고 말할 수는 없다. [J01-J03]

2025년의 치조직 연구는 오래된 화석 조직의 동정을 다시 따졌다. 치조직으로 해석되던 *Anatolepis*의 구조를 절지동물의 감각구조로 재해석하면서, 가장 오래된 증거의 위치도 달라졌다. *Eriptychius*의 체표 조직과 현생 동물의 신경분포 비교는 상아질을 포함한 체표 구조의 감각 기능에 주목하게 한다. 그렇다고 최초의 치아가 오직 감각을 위해 생겼다고 확정되는 것은 아니다. 관찰의 재분류와 기원에 대한 해석을 나누어 읽어야 한다. [J04]

초기 유악류의 턱과 치열을 구분한 화석 연구는 두 부분의 모듈성을 보여 주지만, 치열과 피부골격 형질의 공변성도 함께 보고된다. 서로 구분할 수 있는 단위라는 말과 모든 수준에서 독립이라는 말은 다르다. 교체치와 체표의 작은 치아 모양 구조를 비교할 때에도 위치, 조직, 추가되는 방식과 세포의 증거를 따로 물어야 한다. [J05-J07, J12, J15]

섭식은 턱만의 일이 아니다. 큰입배스의 흡입섭식 연구에서는 몸통 근육이 구강을 팽창시키는 동력과 연결된다. 이 결과는 특정한 종과 작동 조건의 증거이지만, 기관의 이름을 따라 경계를 그으면 실제 힘의 경로를 놓칠 수 있음을 보여 준다. 포유류에서는 턱관절의 일부 요소를 중이의 계보에서도 만나게 된다. 화석이 보여 주는 연결과 반복적 변화는 부품 하나가 단번에 자리만 옮겼다는 이야기보다 복잡하다. [J08-J10]

열린 질문은 빈칸이 아니다. 무엇을 치아로 분류할지, 어떤 조직 관계를 공유된 기원으로 읽을지, 어떤 단계에서 교체 체계가 달라졌는지가 서로 연결되어 있다. 새 자료가 어느 질문에 답하고 어느 질문을 남기는지 표시하면, 아직 확정하지 못한 역사도 독자가 따라갈 수 있는 연구의 지도가 된다.

# 근거와 편집 범위

## v2.0에서 v2.1로 무엇이 달라졌는가

v1.1은 원본 페이지와 보강 후보를 함께 둔 확장 검토본이었다. v2.0은 기존 18장의 본문을 문단 단위로 추적하면서 보강문과 설명을 독자용 흐름에 통합한 초고다. v2.1은 그 구조를 유지하고 7개 위험주장의 증거 수준과 실제 설명 사례를 보강한 개정 후보이다. 원본과 정본 구조는 보존했다. 내부 편집 용어는 별도 대응표로 옮겼고, 불확실성은 본문 문장에 남겼다. 19개 DIA family는 그대로이며 네 인터루드는 새 family가 아니다.

DIA는 통시적 기관진화, SYN은 현재 인간 기관 사이의 구조·흐름·조절, LIVE는 둘을 함께 읽는 해석층이라는 정의를 유지한다. 이 초고의 기관 비교를 현재 인간의 임상적 인과나 치료 효과로 자동 확장하지 않는다.

## 검증 범위

v2.0에서 기존 원문과 보강문을 독자용으로 통합했고, v2.1에서는 과학적 위험도가 높은 7개 핵심 주장과 조류 신장의 오해를 부르는 대조 1문단을 원논문 초록·그림설명 등 접근 가능한 자료와 대조해 교정했다. 사구체 해양기원은 새 관찰실험이 아니라 종합 논문의 역사적 모형임을 명시했다. 간·뇌·면역·호르몬·시각에 실제 연구의 질문과 관찰을 보강하고, 후각·미각에는 습새와 벌새의 실험 사례를 넣었다. 인용 자료의 확인 수준은 이전 source register를 승계한다. 초록·서지·검색본문 확인과 논문 전문 확인을 같은 것으로 보고하지 않는다. 18장 전체 문장의 원논문 대조와 새로운 도판의 학술 감수는 여전히 남아 있다. 따라서 독자 시험 및 출판사 검토용 초고로 활용할 수 있지만, 최종 인쇄와 전체 대중 공개를 승인한 파일은 아니다.

## 그림의 권리와 범위

수룩한 일곱 도식 가운데 세 개는 기존 v1.1의 자체 제작 그림을 재사용했고, 세 개는 v2.0에서 그린 자체 벡터 도식이다. v2.1에는 여과와 최종 배출을 구분하는 신장 기능도 한 개를 추가했다. 현대 논문 그림을 복제하지 않았다. 역사 도판과 기존 심장 비교도의 이미지 권리를 확인했다고 주장하지 않으며, 해당 그림을 이 초고에 삽입하지 않았다. 상세 캡션·대체텍스트·근거는 별도 도판 기록에 보존했다.

## 문헌 안내

본문 대괄호는 아래 문헌 식별자와 연결된다. 기존 18장의 원자료 위치와 문단별 변화는 별도 원문보존 대응표와 이전 출처 레지스트리에 남아 있다. 이 목록은 전체 본문의 완결된 학술 주석이 아니다.

J01 · Shigetani et al. (2002). Heterotopic shift of epithelial-mesenchymal interactions in vertebrate jaw evolution. *Science* 296:1316-1319.

<https://doi.org/10.1126/science.1068310>

확인 범위: PubMed 초록 확인. 해석 경계: 현생 비교로 턱의 최초 선택압을 확정하지 않음

J02 · Depew, Lufkin & Rubenstein (2002). Specification of jaw subdivisions by Dlx genes. *Science* 298:381-385.

<https://doi.org/10.1126/science.1075703>

확인 범위: 연구기관 서지·논문 검색본문 확인. 해석 경계: 유전자 하나가 턱을 발명했다는 해석 금지; 전문 세부 재확인 대기

J03 · Kuratani et al. (2013; online 2012). Developmental and evolutionary significance of the mandibular arch and prechordal/premandibular cranium in vertebrates: revising the heterotopy scenario of gnathostome jaw evolution. J Anat 222:41-55.

<https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2012.01505.x>

확인 범위: PubMed 초록·그림설명 확인. 해석 경계: 비교·모형 논문; premandibular를 현생의 제0 아가미궁으로 단정하지 않음

J04 · Haridy et al. (2025). The origin of vertebrate teeth and evolution of sensory exoskeletons. Nature 642:119-124. Online 2025-05-21.

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-08944-w>

확인 범위: PubMed 초록·그림설명, Nature 검색본문 확인; 전문 접근 제한; UCL accepted manuscript 공개 위치 확인(10222853), PDF50MB 웹 크기제한/직접요청403으로 전문 미열람 유지. 해석 경계: 중기 오르도비스기=현재 알려진 가장 오래된 증거; 감각 기능 기원은 저자 해석; 치아의 모든 기능·단일 선택압 확정 아님

J05 · Rücklin et al. (2012). Development of teeth and jaws in the earliest jawed vertebrates. Nature 491:748-751.

<https://doi.org/10.1038/nature11555>

확인 범위: PubMed 초록·출판 서지 확인. 해석 경계: 발생적 modularity를 모든 유악류·모든 시기에 완전 독립으로 일반화 금지

J06 · Rücklin & Donoghue (2015). Romundina and the evolutionary origin of teeth. Biology Letters 11:20150326.

<https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0326>

확인 범위: PubMed 초록·그림설명 확인. 해석 경계: 같은 논문에서 치열·피부골격 형질의 공변성도 보고; 모듈성=모든 수준의 독립 아님

J07 · Sox2+ progenitors in sharks link taste development with the evolution of regenerative teeth from denticles (2016). PNAS 113:14769-14774.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1612354113>

확인 범위: PNAS 논문 PMC 검색본문·PubMed 서지 확인. 해석 경계: 후보 전구세포 표지는 단독으로 운명추적 증명이 아님; 인간 치아 재생 치료로 직결 금지

J08 · Camp et al. (2015). Swimming muscles power suction feeding in largemouth bass. PNAS.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1508055112>

확인 범위: PubMed 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 한 종·측정 조건의 결과; 턱 근육만으로 모든 섭식 설명 금지

J09 · Fossils document evolutionary changes of jaw joint to mammalian middle ear (2024). Nature 628:576-581.

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07235-0>

확인 범위: Nature·PubMed 서지 및 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 발생의 재현이나 한 번의 직선 이행으로 읽지 않음

J10 · Brazilian fossils reveal homoplasy in the oldest mammalian jaw joint (2024). Nature 634:381-388.

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07971-3>

확인 범위: Nature 논문 페이지·초록 확인. 해석 경계: 포유류형 관절만으로 직접 조상 판정 금지

J11 · Olive et al. (2025). A new acanthothoracid placoderm from the Arctic Canada (Early Devonian) and its bearing on the evolution of jaws and teeth. Royal Society Open Science 12:250837.

<https://doi.org/10.1098/rsos.250837>

확인 범위: 기관 repository·PubMed 서지·PMC 검색본문 확인. 해석 경계: 표본·계통 해석의 범위 한정; 치아 기원의 단일 시나리오 확정 금지

J12 · Sox2 marks epithelial competence to generate teeth in mammals and reptiles (2013).

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3596986/>

확인 범위: 논문 검색본문 확인. 해석 경계: 발현 표지와 실제 교체능의 인과를 구별

J13 · Morphology predicts suction feeding performance in centrarchid fishes (2004).

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15472018/>

확인 범위: 연구 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 조건부 모델; 모든 섭식에 같은 절충 적용 금지

J14 · Body ram, not suction, is the primary axis of suction-feeding diversity in spiny-rayed fishes (2015).

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26596534/>

확인 범위: 연구 초록 검색본문 확인. 해석 경계: J13을 보편법칙으로 확장하지 않기 위한 반례

I01a · Lampreys, the jawless vertebrates, contain three Pax6 genes with distinct expression in eye, brain and pancreas (2019). Scientific Reports.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56085-8>

확인 범위: 논문 페이지·검색본문 확인. 해석 경계: 어류 전체의 체장 배치로 일반화하지 않음

I01b · The Exocrine Pancreas: Introduction / Anatomy (2010). NCBI Bookshelf 연구자 저술.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK54131/>

확인 범위: 저자 전문서 공개본문 검색 확인. 해석 경계: 기원 추론의 1차 연구로 사용하지 않음

I02a · Yaniv et al. (2006). Live imaging of lymphatic development in the zebrafish. Nature Medicine 12:711-716.

<https://doi.org/10.1038/nm1427>

확인 범위: 논문 검색본문·서지 확인. 해석 경계: 어류 림프기관 전체가 사람과 같다는 근거 아님

I02b · Bajoghli et al. (2011). A thymus candidate in lampreys. Nature 470:90-94.

<https://doi.org/10.1038/nature09655>

확인 범위: Nature·PubMed 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 후보·비교 구조의 범위를 유지

I02c · Emergence and Evolution of Secondary Lymphoid Organs (2016).

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5427510/>

확인 범위: 논문 검색본문 확인; 종합 논문. 해석 경계: 정확한 존재/부재 표를 만들 때 해당 종 1차 연구로 하향 추적 필요

I03a · Repeated independent origins of the placenta reveal convergent and divergent organ evolution within a single fish family (Poeciliidae) (2023).

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10446500/>

확인 범위: 연구 논문 검색본문 확인. 해석 경계: 기관 전체의 보편 상동성 주장 금지

I03b · Cell type and cell signalling innovations underlying mammalian pregnancy (2025). Nature Ecology & Evolution 9:1469-1486.

<https://doi.org/10.1038/s41559-025-02748-x>

확인 범위: 논문 페이지·검색본문 확인. 해석 경계: 조상 복원은 관찰이 아니라 모형 기반 추정

I04a · BMP signaling promotes zebrafish heart regeneration via alleviation of replication stress (2025). Nature Communications.

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-56993-6>

확인 범위: 연구 논문 검색본문 확인. 해석 경계: 인간 심장 재생으로 외삽 금지

I04b · Seifert et al. (2012). Skin shedding and tissue regeneration in African spiny mice (Acomys). Nature 489:561-565.

<https://doi.org/10.1038/nature11499>

확인 범위: 논문·연구기관 서지·검색본문 확인. 해석 경계: 모든 포유류·모든 조직으로 확대 금지

I04c · Barker et al. (2007). Identification of stem cells in small intestine and colon by marker gene Lgr5. Nature 449:1003-1007.

<https://doi.org/10.1038/nature06196>

확인 범위: PubMed 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 상피 유지=장기 전체 재생으로 등치 금지

I04d · Kragl et al. (2009). Cells keep a memory of their tissue origin during axolotl limb regeneration. *Nature* 460:60-65.

<https://doi.org/10.1038/nature08152>

확인 범위: 논문·PubMed 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 모든 세포의 백지화라는 서사 반박

I04e · Exposure to a youthful circulation rejuvenates bone repair through modulation of beta-catenin (2015). *Nature Communications* 6:7131.

<https://doi.org/10.1038/ncomms8131>

확인 범위: 논문 검색본문 확인. 해석 경계: 임상 회춘·수혈 치료 주장으로 전환 금지

T01 · Making a head: Neural crest and ectodermal placodes in cranial sensory development (2022).

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10224775/>

확인 범위: 논문 검색본문 확인; 개념 종합. 해석 경계: 개별 기관 상동성은 별도 근거 필요

T02 · Marlétaz et al. (2024). The hagfish genome and the evolution of vertebrates. *Nature*.

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07070-3>

확인 범위: 논문 초록 검색본문·PubMed 서지 확인. 해석 경계: 2R→복잡성 직접 인과 금지

E01 · Li et al. (2025). Origin and stepwise evolution of vertebrate lungs. *Nature Ecology & Evolution* 9:672-691.

<https://doi.org/10.1038/s41559-025-02642-6>

확인 범위: Nature 연구 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 기존 lung-gas bladder canonical 자동 교체 금지

E02 · Damsgaard et al. (2026). Oxygen-free metabolism in the bird inner retina supported by the pecten. *Nature* 650:657-663. Online 2026-01-21.

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09978-w>

확인 범위: Nature·연구기관·Crossmark 서지 및 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 고고도 비행에 관한 exaptation은 해석; 전체 눈 무산소 아님

J15 · Suchánek, Huysseune & Cerny (2026; online 2025). The dental plate on bichir pectoral fins: A unique dermal skeletal element bearing individual odontodes with tooth-like replacement. *Journal of Anatomy* 249:127-140.

<https://doi.org/10.1111/joa.70053>

확인 범위: Wiley 논문 페이지·PubMed 서지 확인. 해석 경계: 구강 치아와의 관계를 부분별 비교; 직접 조상으로 쓰지 않음

J16 · Kang, Blom, Märss & Chen (2026). Orthodontine-osteodontine and osteocytic-anosteocytic transition inferred from Silurian stem chondrichthyan dermal jawbones with ever-white teeth overgrown by brown denticles. *Developmental Dynamics*. Online 2026-09-12.

<https://doi.org/10.1002/dvdy.70184>

확인 범위: PubMed 초록·Wiley Early View 게시일 확인. 해석 경계: 이시성 기전은 제안; 모든 치조조직의 기원 설명으로 확대 금지

E03 · Castro et al. (2014; online 2013). Recurrent gene loss correlates with the evolution of stomach phenotypes in gnathostome history.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24307675/>

확인 범위: PubMed·PMC 연구 초록 검색본문 확인. 해석 경계: 식이와 비용이 소실의 단일 선택원인이라는 결론은 별도 검증

H01 · Slay et al. (2026). Digestion is unaffected by surgical elimination of the right-to-left cardiac shunt in American alligators. *Journal of Experimental Biology* 229(1):jeb250393.

<https://doi.org/10.1242/jeb.250393>

확인 범위: PubMed PMID41230628 및 출판사 원논문 초록 확인; 전문 미열람. 해석 경계: 야생·모든 연령·모든 생리적 역할로 일반화 금지; 기존 연구와 조건·지표가 달라 단순 재현실패로 명명하지 않음

A21-LIVER · Wu et al. (2024). Single-cell analysis of the amphioxus hepatic caecum and vertebrate liver reveals genetic mechanisms of vertebrate liver evolution. *Nature Ecology & Evolution* 8:1972-1990.

<https://doi.org/10.1038/s41559-024-02510-9>

확인 범위: PubMed PMID39152328 원논문 초록 직접 확인; Nature 전문 접근 실패. 해석 경계: 저자의 상동성 결론은 지지 근거로 인용; 모든 조직·기능의 일대일 동일성 또는 완결된 기관기원 증명으로 확대하지 않음

A21-KIDNEY · Evans (2023). Evolution of the glomerulus in a marine environment and its implications for renal function in terrestrial vertebrates. *AJP Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 324.

<https://doi.org/10.1152/ajpregu.00210.2022>

확인 범위: 원저자 Review의 초록·서론·해양척삭동물 신장 절 검색본문 확인; 독립 새 실험논문 아님; 전문 열람 실패. 해석 경계: 이 원문은 기원모형의 1차 제안/논증 자료지만 관찰실험의 1차 증거로 취급하지 않음. 최초 사구체의 실제 환경·선택압 직접 확인 아님

A21-NEURAL · Zaremba et al. (2025). Developmental origins and evolution of pallial cell types and structures in birds. *Science* 387:eadp5182.

<https://doi.org/10.1126/science.adp5182>

확인 범위: PubMed PMID39946461 초록의 검색본문 확인; Science 전문403; preprint와 심사본을 혼동하지 않음. 해석 경계: 발현 유사도=영역 전체 상동성 아님; DVR 전체=신피질 일대일 대응 금지

A21-IMMUNE · Guo et al. (2009). Dual nature of the adaptive immune system in lampreys. *Nature* 459:796-801.

<https://doi.org/10.1038/nature08068>

확인 범위: 원논문 PubMed PMID19474790 초록 검색본문·PMC 결과/그림설명 검색본문 확인; 전문 CAPTCHA/접근실패. 해석 경계: 칠성장어의 T-like/B-like 비교를 인간T/B세포와 완전동일·모든 무악류 동일로 확대하지 않음; corrigendum은그림축척1mm→1μm

A21-LUNG · Funk et al. (2020). Changes in Nkx2.1, Sox2, Bmp4, and Bmp16 expression underlying the lung-to-gas bladder evolutionary transition in ray-finned fishes. *Evolution & Development*.

<https://doi.org/10.1111/ede.12354>

확인 범위: PMC8013215 및 PubMed33463017 원논문 초록·검색본문 확인; 전체 페이지는 CAPTCHA로 재조회 실패. 해석 경계: 기관 전환의 모든 중간단계를 실제 관찰한 것이 아니며 발현의 공유와기관상동성을 단독등치하지 않음

A21-HORMONE · Okabe & Graham (2004). The origin of the parathyroid gland. *PNAS* 101:17716-17719.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0406116101>

확인 범위: PubMed15591343 초록·Fig1-4 설명 직접 확인; PMC539734 전문CAPTCHA. 해석 경계: 제브라피시 발생교란 관찰과기관 기원추론 분리; 현대아가미 전체가부갑상샘으로 이동했다는서사 금지

A21-VISION · Damsgaard et al. (2026). Oxygen-free metabolism in the bird inner retina supported by the pecten. *Nature* 650:657-663.

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09978-w>

확인 범위: Nature 원논문 초록·그림제목·자료가용성 직접 확인; 전문구독벽 확인. 해석 경계: 눈전체/모든조류에동일한생리라는확대금지; 고고도비행의전용은저자진화가설

A21-BIRD-KIDNEY · Morild, Bohle & Christensen (1985). Structure of the avian kidney. *Anatomical Record* 212:33-40.

<https://doi.org/10.1002/ar.1092120105>

확인 범위: 출판사 Wiley 초록 직접 확인; PubMed4073541 검색본문 교차; 전문 미열람. 해석 경계: 모든 조류의 네프론 비율·농축능을 같게 놓지 않음

A21-SALT · Hughes (1974). Water content of the salt glands and other avian tissues.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0300962974904812>

확인 범위: 출판사 원논문 초록 검색본문; PubMed4156245 서지; 직접 open403/본문없음. 해석 경계: 염류샘의 존재를 모든 조류나 파충류에 일반화하지 않음; 전문 미열람

DOLF01 · Padget O, Dell'Arciccia G, Gagliardo A, González-Solís J, Guilford T. (2017). Anosmia impairs homing orientation but not foraging behaviour in free-ranging shearwaters. Scientific Reports 7:9668.

<https://www.nature.com/articles/s41598-017-09738-5>

확인 범위: PubMed 원논문 초록 검색본문, PMC 논문 검색본문, 연구자 소속기관 Oxford의 초록·서지 교차확인. 직접 open은 PMC/PubMed 봇확인·Nature 접근오류. 전문 통계·보충자료를 전부 읽었다고 주장하지 않음.. 해석 경계: 냄새지도 구성물질·신경표상 확정 금지. 모든종·모든조건·장거리이동 전반으로 확대금지. 냄새가먹이를못찾는다고쓰지않음.

DTASTE01 · Baldwin MW et al. (2014). Evolution of sweet taste perception in hummingbirds by transformation of the ancestral umami receptor. Science 345:929–933.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25146290/>

확인 범위: PubMed 원논문 초록·그림설명 실제 열람; PMC 원논문 검색본문 확인. PMID25146290. 전문의 전수 대조는 아님.. 해석 경계: 모든새가같은기전이라는 주장금지; 인간과주관적맛같음금지; 벌새종다양화단일원인금지; 현존T1R유전자계열이셋뿐이라는 일반화금지.