

# 빛과 시각

전자기 에너지가 봄이 되는 자리 — 가시창에서 전깃불과 열린 쟁점까지 · 기준일 2026-09-17

---

빛은 전자기 복사다. 좁게는 사람 눈이 영상으로 삼는 가시광선이고, 넓게는 라디오에서 감마선까지를 같은 이름으로 부른다.<sup>1 2</sup> 시각은 그 복사 가운데 일부가 눈에 들어와, 신경이 장면을 조립하는 능력이다.<sup>3</sup> 둘은 한 주제의 두 면이다. 가시라는 칸은 물리량이 아니라 종의 눈으로 그어지고, 눈은 그 칸 안의 광자를 받아 진화했다.

택한 해석은 빛만의 물리학 사전이나 안과 교과서가 아니다. 중심 질문은 하나다. **전자기 에너지가 어떻게 ‘봄’이 되며, 그 봄이 거꾸로 ‘빛’의 경계를 어떻게 긋는가.** 1장이 이름의 폭을, 2장이 전파를, 3장이 광변환을, 4장이 색과 촉광을, 5장이 장면의 구성을 본다. 6장이 이론이 바뀐 자리를, 7장이 눈과 전깃불의 확산과 값을, 8장이 아직 합의되지 않은 것을 본다. 기준일은 2026년 9월 17일이다.

주

- 1 한국어 위키백과 「빛」, 2026-07-21. <https://ko.wikipedia.org/wiki/빛> 위치: 리드.
- 2 영어 위키백과 「Light」, oldid 1374369149. <https://en.wikipedia.org/wiki/Light> 위치: 리드.
- 3 한국어 위키백과 「시각」, oldid 41311675, 2026-02-08. <https://ko.wikipedia.org/wiki/시각> 위치: 리드.

1장.

# 이름이 가리키는 폭

## 빛이라는 단어의 두 폭

일상어의 빛은 눈에 보이는 전자기파, 가시광선이다. 물리학의 빛은 같은 파동의 전체다. 라디오와 엑스선도 진공에서 같은 속력으로 가고, 같은 맥스웰 방정식으로 적힌다. 한국어 위키백과는 물리학이 주로 넓은 뜻을 쓴다고 적는다.<sup>1</sup> 영어 위키백과도 가시 복사를 기본값으로 두고, 물리에서는 파장과 무관하게 전자기 복사를 빛이라고 부를 수 있다고 한다.<sup>2</sup>

국제조명위원회(CIE)는 빛을 “시각 감각을 직접 일으킬 수 있는 복사”로 적는다. 영어 위키백과가 인용하는 CIE 어휘다.<sup>3</sup> 정의가 이미 관찰자를 넣는다. 가시라는 칸은 스펙트럼의 자연 경계가 아니다.

나무위키는 같은 갈림을 한 문장으로 압축한다. 일상에서 빛은 가시광선이고, 물리학에서 빛은 전자기파이기도 하다.<sup>4</sup>

## 가시라는 칸의 숫자

사람 눈이 반응하는 파장 구간은 출처마다 다르다. 경계가 다른 것이 오류가 아니라, 칸을 긋는 기준이 다른 것이다.

| 출처가 적는 구간        | 숫자                                  | 비고                                          |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| 영어 「Light」 관용    | 400–700 nm (약 750–420 THz)          | 리드의 보통 정의 <sup>2</sup>                      |
| 영어·한국어 「가시 스펙트럼」 | 약 380–750 nm                        | “전형적인 눈” <sup>5</sup>                       |
| 한국어 「시각」         | 370–730 nm                          | 생리학 절 <sup>6</sup>                          |
| 산업의 좁은 칸         | 약 420–680 nm                        | 보수적 절단 <sup>5</sup>                         |
| 실험실의 끝           | 짧으면 약 310–313 nm, 길면 약 1050–1100 nm | 젊은 관찰자·강한 근적외선. 렌즈 형광이 섞일 수 있다 <sup>5</sup> |

## 전자기 스펙트럼 (파장, 로그)



관용 가시창 400–700 nm

긴 파장 · 낮은 주파수

짧은 파장 · 높은 주파수

막대 폭은 모식. 가시창은 스펙트럼 전체에서 좁다.

전자기 스펙트럼에서 사람 가시창이 차지하는 자리. 라디오에서 감마까지를 로그 파장으로 한 줄에 두고, 400–700 nm만 색 띠로 표시했다. 수치는 위 표의 관용 구간과 같다. 직접 그린 도해.

단파장 쪽은 각막과 수정체가 자외선을 막고, 장파장 쪽은 L 옅신의 흡수 곡선이 끊는다. 수정체를 뺀 눈(무수정체)은 근자외를 더 들인다. 오존은 대략 315 nm보다 짧은 햇빛을 거의 지상에서 지운다.<sup>5</sup> 분홍과 자홍은 이 표에 없다. 한 파장만으로는 나오지 않는 혼합색이다.

## 시력

한국어에서 視覺이 이 책의 대상이다. 같은 소리의 時刻은 시계의 한 점, 視角은 관점 또는 물체 양 끝이 눈에서 벌리는 각도다.<sup>7</sup>

시력은 시각의 예리함이다. 고대비 글자를 광학적 무한대(보통 6 m)에서 가리는 공간 분해능이다. 미국식 20/20은 미터법 6/6, 소수 1.00, logMAR 0.00과 같다. 그 거리에서 약 1.75 mm 떨어진 윤곽을 가른다는 뜻이다.<sup>8</sup> 굴절 이상을 렌즈로 보정하면 시력은 오르고, 시각 경험 전체는 그대로일 수 있다. 시력은 시각이 측정으로 잘리는 한 면이다.

## 주

- 1 한국어 위키백과 「빛」. 위치: 리드.
- 2 영어 위키백과 「Light」, oldid 1374369149. 위치: 리드.
- 3 영어 위키백과 「Light」가 인용하는 CIE *International Lighting Vocabulary* (1987) 및 CIE S 017/E:2020. 위치: 리드.
- 4 나무위키 「빛」, 2026-09-11. <https://namu.wiki/w/빛> 위치: 개요·관념.
- 5 영어 위키백과 「Visible spectrum」, oldid 1368627592; 한국어 위키백과 「가시광선」, 2026-09-17.
- 6 한국어 위키백과 「시각」, oldid 41311675. 위치: 시각계.
- 7 나무위키 「시각」, 2026-09-06. <https://namu.wiki/w/시각>
- 8 영어 위키백과 「Visual acuity」; 한국어 위키백과 「시력」, 2026-08-17.

## 복사가 공간을 건너는 방식

### 파동과 광자

고전 전자기학에서 빛은 전기장과 자기장이 서로를 밀어 진공으로 진행하는 횡파다. 매질이 필요 없다. 가속된 전하가 그 파동을 내보낸다. 간섭과 회절은 이 그림에서 자연스럽다.<sup>1</sup>

양자 그림은 같은 복사를 셀 수 있는 알갱이로 적는다. 광자의 에너지는  $E = h\nu$ 다. 정지질량은 0이고 스핀은 1이다. 진공에서 광자는 한 속력만 갖는다. 실험 상한은  $10^{-18}$  eV/c<sup>2</sup>보다 작다.<sup>2</sup> 낮은 주파수에서는 파동처럼, 높은 주파수에서는 입자처럼 보이는 경향이 있으나, 가시광선은 두 얼굴을 모두 보여 준다. 어떤 얼굴이 드러나는지는 관측 설정이 정한다.<sup>3</sup>

### 정의된 속력

진공에서 빛의 속력  $c$ 는 정확히 299 792 458 m/s다. 1983년 이후 미터는 이 숫자로 정의된다. BIPM의 문장은 “진공에서 빛이 1/299 792 458초 동안 진행한 경로의 길이”다.<sup>4</sup> 초는 세슘 전이로 잡혀 있으므로,  $c$ 를 더 정밀히 재는 실험은 이제 길이를 재정의하지 않는다.

물질 속에서 속력은 떨어진다. 물에서는 대략 진공의 3/4이다.<sup>3</sup> 굴절률  $n = c/v$ 는 항상 1보다 크다. 루비덤 보스-아인슈타인 응축에서 “멈춘 빛”으로 보도된 실험은, 펄스를 원자 들뜬 상태에 저장했다가 다시 내보낸 것이지 빛이 빛인 채로 정지한 것이 아니다.<sup>3</sup>

### 직진, 반사, 굴절

기하광학은 파장이 물체보다 훨씬 짧을 때 쓴다. 눈, 렌즈, 거울, 광섬유가 이 근사 안에 있다. 경로는 측지선이고, 일상 언어로는 직진이다.

경계에서 일부 에너지는 되돌아가고(반사) 일부는 들어간다. 스넬의 법칙은  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 다. 굴절각이 90°에 닿는 입사각이 임계각이고, 그 이상에서 전반사한다. 이 관계의 기록은 6장이 본다.

파동광학은 간섭과 회절을 맡는다. 관례상 몇 개 파면의 겹침을 간섭, 많은 파면의 겹침을 회절이라고 부르기도 한다.<sup>1</sup> 격자, 조리개, 눈의 동공이 상을 흐리는 한계가 여기 있다.

### 어디서 오는가

열복사는 온도가 정한 스펙트럼이다. 태양 광구는 대략 6000 K이고, 지상에 닿는 태양 에너지의 약 44%가 가시 구간에 있다.<sup>3</sup> 백열은 같은 열복사인데 가시로 나가는 몫이 훨씬 작다. 개설이 적는 숫자는 갈린다. 7장이 그 긴장과 효율 표를 둔다. 반딧불이처럼 열 없이 내는 빛도 있다.

측정은 두 저울을 쓴다. 복사측정은 모든 파장의 일률이다. 측광은 사람 눈의 밝기 모형으로 가중한다. 4장이 그 가중 곡선과 칸델라를 다룬다.

### 주

1 한국어 위키백과 「빛」. 위치: 물리학에서 보는 빛·성질.

2 영어 위키백과 「Photon」, oldid 1372540032.

3 영어 위키백과 「Light」, oldid 1374369149.



## 광자가 신경이 되는 자리

### 눈이라는 광학기

사람 성인의 눈은 대략 구에 가깝다. 전후 길이는 약 24 mm, 부피는 약 6.5 mL다. 태어날 때는 16–17 mm다.<sup>1</sup> 빛은 각막에서 대부분 꺾이고, 홍채가 동공(대략 2–8 mm)으로 양을 조절하고, 수정체가 남은 초점을 맞춘다. 상은 망막에 거꾸로 맺힌다.

한 눈의 시야는 위 30°, 코쪽 45°, 아래 70°, 귀쪽 107° 정도로 적힌다. 두 눈을 합치면 수직 약 100°, 수평 최대 약 214°다.<sup>1</sup> 맹점은 이측 15°, 수평 아래 1.5° 부근에 있고, 대략 7.5° × 5.5°다. 시신경이 망막을 뚫고 나가는 자리다. 문어 눈은 시신경이 망막 뒤에 붙어 맹점이 없다. 두 설계는 독립 기원이다. 7장이 그 분기점을 본다.

휘도 동적 범위는 10<sup>-6</sup>에서 10<sup>8</sup> cd/m<sup>2</sup>까지, 대략 10<sup>14</sup> 배로 적힌다.<sup>1</sup> 동공과 순응이 그 폭을 나눈다. 이 숫자는 카메라 스펙이 아니라, 같은 기관이 달빛과 정오를 모두 견딘다는 뜻이다.

### 막대와 원추

광수용체는 옵신과 레티날의 복합이다. 맞는 파장의 광자가 색소를 가르면 신호가 시작된다. 영어 위키백과는 사람 망막에 막대가 약 1억 2천만, 원추가 약 6백만이라고 적는다. 아래 수는 그 개설의 약수다.<sup>2</sup>

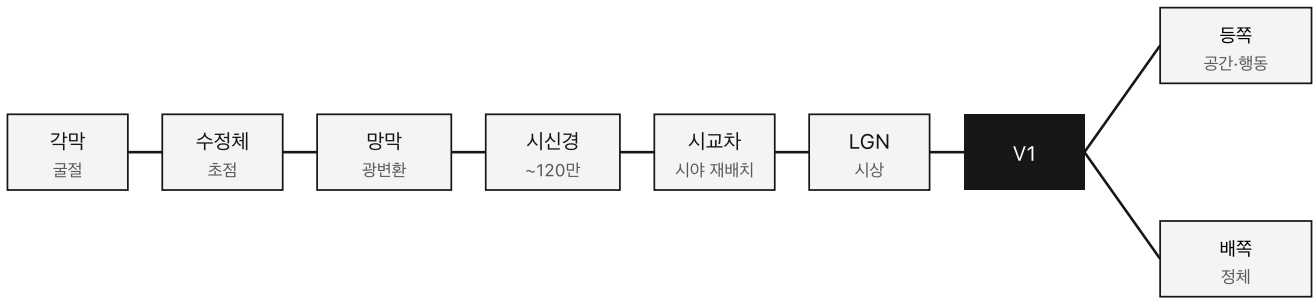
막대는 그늘과 주변에 많고 색이 거의 없다. 원추는 중심와에 촘촘하고 낮의 색과 예리함을 맡는다. 중심와는 막대를 거의 배제하고, 시야각 약 2°를 덮는다.<sup>1 3</sup> S 원추는 중심와 바닥에 거의 없고, 경사면에서 비율이 오른다.<sup>4</sup>

수용체는 대략 10<sup>8</sup> 규모이고, 신경절세포 축삭은 약 120만 가닥이다.<sup>5</sup> 망막 안에서 이미 압축이 일어난다. 양극세포와 신경절을 거쳐 시신경이 된다.

광에 민감한 신경절세포는 영상을 만들지 않는다. 멜라놉신은 대략 420–540 nm를 흡수하고, 하루 주기와 동공 반사를 민다.<sup>6</sup> 봄의 기관과 시계의 기관이 같은 눈에 있다.

### 교차에서 피질까지

두 시신경은 시교차에서 만난다. 각 반구는 반대쪽 시야를 받는다. 가쪽무릎핵(LGN)은 시상의 중계핵이고, 대세포·소세포·코니오 층이 갈린 채로 1차 시각피질(V1, 선조피질)로 간다. 일부는 상구로 빠져 단속운동을 돕는다.<sup>5</sup>



광자 → 신경 압축 → 교차 → 시상 → 후두엽. 갈림은 V1 이후이며 절연된 두 케이블이 아니다.

한 눈에서 1차 시각피질까지의 경로. 각막·수정체·망막에서 시신경, 시교차, 가쪽무릎핵, V1로 이어진다. 등쪽(두정, 공간·행동)과 배쪽(촉두, 정체)은 V1 이후의 갈림이다. 직접 그린 도해. 해부 이름은 이 장과 같다.

V1 너머를 선조외 피질이라 부른다. 1982년 언거라이더와 미시킨은 마카크 손상으로 등쪽의 공간 경로와 배쪽의 물체 경로를 갈랐다. 1992년 굿데일과 밀너는 입력의 어디/무엇을 쓰임의 지각/행동으로 고쳐 읽었다. 배쪽은 상대적이고 물체 중심인 장면, 등쪽은 머리 중심의 절대 좌표로 손을 민다.<sup>7</sup>

이 갈림은 실험의 안내 도식이지 절연된 두 케이블이 아니다. 8장이 환자 D.F.와 후속 비판을 본다.

## 주

- 1 영어 위키백과 「Human eye」, oldid 1373402910; 한국어 위키백과 「눈 (해부학)」, 2026-05-21 (전후 약 24 mm).
- 2 영어 위키백과 「Photoreceptor cell」, oldid 1375073503.
- 3 Webvision, Simple Anatomy of the Retina. <https://www.webvision.pitt.edu/book/part-i-foundations/simple-anatomy-of-the-retina/>
- 4 Webvision, Photoreceptors.
- 5 영어 위키백과 「Visual system」; 한국어 위키백과 「시각계」, 2026-05-20.
- 6 영어 위키백과 「Visible spectrum」.
- 7 영어 위키백과 「Two-streams hypothesis」, 2026-07-09.

## 색과 밝기가 갈라지는 자리

### 세 원추

색각은 강도와 따로, 주파수 조성이 다른 빛을 가리는 능력이다.<sup>1</sup> 사람 낮 시야의 원추는 셋이다. 개설이 적은 흡수 피크는 구간으로 온다.

| 원추           | 대략 피크      | 대략 감응 구간   |
|--------------|------------|------------|
| S (단파장, "청") | 420–440 nm | 400–500 nm |
| M (중파장, "녹") | 534–555 nm | 450–630 nm |
| L (장파장, "적") | 564–580 nm | 500–700 nm |

막대의 피크는 약 500 nm, 명시 감도의 봉우리는 약 555 nm다.<sup>1 2</sup> 영-헬름홀츠의 삼색설은 수용체 단계다. 헤링이 1872년에 낸 반대과정은 그 다음이다. 신경절 이후는 적-녹, 청-황, 흑-백으로 적대한다.<sup>1</sup> 두 이론은 층을 달리하면 같이 산다.

사람은 혼합으로 약 1천만 색을 가린다고 적힌다. 파장 차의 막 알아챌은 청록·노랑 근처에서 약 1 nm, 빨강·파랑 끝에서 10 nm가 넘기도 한다.<sup>2</sup> 분홍은 스펙트럼 표에 없다.

### 종이 다른 칸

대부분의 포유류는 원추 두 종류다. 야행성 병목으로 읽힌다. 구세계 영장류가 L을 나눠 삼색을 되찾았다. 새와 많은 어류·파충류는 사색이고 근자외를 본다. 벌은 자외를 보고 장파 한계는 약 590 nm다. 갯가재는 옵신이 열 개를 넘고, 대략 300 nm부터 700 nm 너머까지를 잡는다. 구덩이 살모사는 5–30 μm 열을 보는데, 이것은 시각 옵신이 아니다.<sup>3</sup>

나무위키는 가시광선이 물에 잘 통과한다는 사실을, 초기 눈이 이 칸에 묶인 이유로 적는다.<sup>4</sup> 육지의 눈도 그 칸을 대체로 유지한다. 확인되는 것은 겹침이지, 그 겹침이 유일한 원인이라는 합의는 아니다.

### 색이 깨지는 방식

적록 색각 이상은 X염색체 옵신 유전자 때문이다. 북유럽 계통에서 적록 이상은 남성 약 8%, 여성 약 0.5%로 적힌다. 개설 표는 적색맹(프로타노피아) 남성 1.3%/여성 0.02%, 녹색맹(듀테라노피아) 1.2%/0.01%, 청색맹(트리타노피아) 0.008%를 준다.<sup>5</sup> 한국어 위키백과는 대한민국에서 색각 이상자는 공군에 지원할 수 없다고 한 줄을 적는다.<sup>6</sup> 제도가 측정 가능한 '봄'을 직업의 문으로 쓴 사례다.

일부 여성은 L 옵신 대립유전자가 둘이라 약한 사색을 보일 수 있다. 새의 사색과는 규모가 다르다.<sup>1</sup>

### 칸델라라는 관찰자

측광의 기본 단위 칸델라는 SI 기본 단위다. 2019년 브로슈어는 주파수 540 THz 단색 복사에 대해  $K_{cd} = 683 \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$ 을 고정한다. 그 방향의 복사 광도가 1/683 W/sr이면 1 칸델라다.<sup>7</sup> 540 THz는 약 555 nm, 명시 감도의 봉우리 근처다. 루멘은 칸델라·스테라디안, 럭스는 루멘/제곱미터다.<sup>8</sup>

표준 관찰자는 평균이지 개인이 아니다. 암순응(암시) 곡선은 봉우리가 더 짧고, 색이 거의 없다. 3 cd/m<sup>2</sup> 위에서 보통 명시를 쓴다.<sup>8</sup> 같은 와트가 같은 밝기로 보이지 않는다. 조명 효율의 단위 루멘/와트가 여기서 나온다. 7장의 표가 그 숫자다.

---

## 주

- 1 영어 위키백과 「Color vision」, oldid 1369240392.
- 2 한국어 위키백과 「색채 지각」, 2026-03-20.
- 3 영어 위키백과 「Visible spectrum」; 한국어 위키백과 「가시광선」.
- 4 나무위키 「빛」. 위치: 성질.
- 5 영어 위키백과 「Color blindness」, oldid 1368875735.
- 6 한국어 위키백과 「색각 이상」, 2026-04-26.
- 7 BIPM, SI base unit candela. <https://www.bipm.org/en/si-base-units/candela>
- 8 영어 위키백과 「Photometry (optics)」, 2025-12-20.

## 장면이 조립되는 방식

### 망막은 사진이 아니다

보이는 경험은 망막 배열의 직역이 아니다. 헬름홀츠는 1867년 《생리학적 광학 핸드북》 이후, 눈이 혼자서 완전한 상을 만들지 못한다고 보고 무의식적 추론을 적었다. 위에서의 조명, 가림, 바로 선 얼굴 같은 가정이 빈칸을 채운다. 가정이 깨지는 입력이 착시다.<sup>1</sup>

방출설이 실험으로 접힌 자리는 6장이다. 여기서 필요한 것은 그 결과뿐이다. 보이는 것은 눈에서 나간 선이 아니라, 들어온 빛에 대한 뇌의 재구성이다.

### 묵는 규칙과 움직이는 눈

게슈탈트 심리학은 1930–40년대에 묵음의 인자를 나열했다. 근접, 유사, 폐쇄, 대칭, 공통 운명, 연속, 좋은 형태, 과거 경험.<sup>2</sup> 한국어 위키백과는 주관적 윤곽 — 모서리만 있는데 사각형이 보이는 그림 — 을 그 예로 둔다.<sup>3</sup>

1960년대 이후 안구운동 추적이 읽기·그림 보기·운전에 적용됐다. 야르부스의 1967년 기록은, 처음 2초가 대비가 큰 곳과 얼굴로 튜다고 보여 준다. 고정은 완전히 멈추지 않는다. 미세단속, 드리프트, 떨림이 있다.<sup>2</sup>

깊이 단서는 상대적이다. 가림, 상대 크기, 결의 밀도, 선형 원근, 대기 원근, 운동 시차. 한국어 위키백과의 목록은 2000년 심리학 교과서를 가리킨다.<sup>3</sup> 단서가 상대라서 같은 조건에서 착시가 난다.

### 얼굴은 특별해 보인다

얼굴실인증은 물체를 남기고, 어떤 물체실인증은 얼굴을 남긴다. 뒤집힌 얼굴은 물체보다 더 무너진다. 방추이랑 얼굴 영역이 그 갈림의 해부 후보다.<sup>2</sup> 오래 실명했다가 시력을 되찾은 사람은 색·운동·단순 형태보다 물체와 얼굴에서 더디다. 아동기 임계기가 있다는 주장은 2007년 이후의 늦은 학습 보고와 긴장한다.<sup>2</sup>

### 계산의 층

데이비드 마(1970년대, 책 1982)는 비전을 세 층으로 나눴다. 계산(무슨 문제인가), 알고리즘, 구현. 2차원 스케치에서 2½차원, 3차원 모형으로 올라간다는 경로다. 비판은 3차원 형태가 깊이 지도보다 앞설 수 있고, 그림-바탕 제약이 빠져 있다는 것이다. 다른 틀은 부호화·선택(주의)·복호로 자른다.<sup>2</sup>

착시가 보여주는 것은 구성이 실패하는 조건이다. 경험이 세계를 직접 가리키는가 하는 물음은 8장이 본다.

이 장이 설명하는 것은 구성이다. 구성이 언제 깨지는가: 단서가 서로 모순될 때, 조명이 가정의 반대일 때, 얼굴이 뒤집혔을 때, 임계기 전에 입력이 없었을 때.

---

#### 주

1 영어 위키백과 「Visual perception」 §Unconscious inference; 「Hermann von Helmholtz」.

2 영어 위키백과 「Visual perception」, oldid 1375293861.

3 한국어 위키백과 「시각」, oldid 41311675. 위치: 심리학.

## 빛이 무엇이라고 말해 왔는가

### 눈에서 나가는 선

엠페도클레스(기원전 5세기)는 눈 안에 불을 두고, 태양 광선과의 만남으로 밤의 불을 설명했다. 유클리드(약 기원전 300) 《광학》은 눈에서 나가는 직선 광선의 원뿔로 겹보기 크기를 기하로 적었다. 별이 즉시 보인다는 사실이 그 방출을 의심하게 했다. 프톨레마이오스(2세기)는 굴절을 재었으나 입사와 굴절의 선형 관계라는 틀린 맞춤을 남겼다.<sup>1</sup> 아리스토텔레스와 갈레노스는 반대로, 물체에서 무언가가 들어온다고 했다.<sup>2</sup>

중국 묵가(기원전 4세기)는 핀홀이 거꾸로 된 상을 만든다고 적는다. 헤론은 반사 경로가 최단이라고 기하로 보였다.<sup>1</sup>

### 입사의 실험

이븐 알하이탐의 《광학의 책》은 방출설을 실험으로 접었다. 직진, 반사, 굴절, 렌즈. “현대 광학의 아버지”라는 칭호는 후대가 붙인 말이다.<sup>3</sup> 이븐 사후의 984년 굴절 관계는 스넬과 수학적으로 같다. 빌레브로르트 스넬리우스가 1621년에, 데카르트가 1637년 《굴절광학》에서 출판했다.<sup>4</sup>

유럽 중세는 그 라틴 번역 위에 섰다. 프라이베르크의 테오도리크와 카말 알딘 알파리시는 무지개를 올바로 설명했다.<sup>1</sup> 아비센나와 비루니는 빛의 속력이 유한하고 소리보다 빠르다고 했다. 그 숫자가 닫히는 자리는 이 장 끝의 속력 측정이다.

### 입자와 파동

케플러 1604년 《천문학의 광학 부분》은 현대 광학의 시작으로 자주 적힌다. 굴절 법칙은 없다. 뉴턴은 프리즘이 흰빛을 나누고 두 번째 프리즘이 다시 합친다는 것을 보였다. 색은 물체가 만드는 것이 아니다. 1668년 반사 망원경은 색수차를 피하려고 거울을 썼다. 《광학》(1704)의 미립자 그림이 18세기를 지배했다. 직진이 파동에 대한 증거로 읽혔다. 더 뻑뻑한 매질에서 더 빠르다는 예측은 틀렸다.<sup>1 5</sup>

하위헌스(1678/1690)는 에테르의 파동을 적었다. 영은 1802–1803년에 간섭을 일반 법칙으로 올렸다. 프레넬의 횡파 수학과 아라곤가 확인한 원반 뒤의 밝은 점(1819년경)이 입자설을 고전 영역에서 접었다. 푸코 1850년의 매질 속 속력 측정이 파동 쪽에 섰다.<sup>5 6</sup>

### 전자기에서 양자로

패러데이 1845년의 자기광학 회전이 빛과 전자기 사이의 첫 실험 고리다. 맥스웰은 1861–62년 「힘의 물리선에 관하여」와 1865년 「전자기장의 동역학 이론」에서, 전자기 교란이 측정된 광속으로 퍼진다고 적었다. “빛 자체가 전자기파”라는 동일시가 여기서 닫힌다.<sup>7</sup> 헤르츠는 1887년 라디오파를 만들고 같은 광학을 보여 주었다.

플랑크 1900년의 흑체 양자는 진동자의 에너지 교환을 잘랐다. 아인슈타인 1905년은 광전효과의 광자를 실재로 두었다.  $K_{\max} = h\nu - W$ . 문턱 주파수 아래에서는 세기가 커도 전자가 안 나간다. 지연은  $10^{-9}$ 초보다 짧다.<sup>8</sup> 밀리컨의 1914년 자료가 선형 관계를 확인했다. 노벨상은 아인슈타인 1921년(광전효과의 법칙), 밀리컨 1923년이다. G. N. 루이스가 1926년에 photon이라는 이름을 붙였다. 콤프턴 1923년의 파장 이동은 입자 운동량이 필요했다.<sup>8</sup>

마이컬슨–몰리 이후 에테르는 버려졌다. 빛은 매질 위의 물결이 아니라, 장이거나 그 장의 양자로 남았다.

속력을 켤 역사는 같은 장의 실험 줄기다. 뢰머 1676년, 목성 위성 이오의 식: 지구 궤도 지름을 건너는 데 약 22분. 피조 1849년 톱니바퀴. 푸코 1862년 회전 거울. 마이컬슨의 20세기 초 진공 경로. 숫자가  $c$ 의 정의로 흡수되기 전까지의 경주다.<sup>9</sup>

---

## 주

- 1 영어 위키백과 「History of optics」, 2026-09-08.
- 2 한국어 위키백과 「시각」. 위치: 이론.
- 3 영어 위키백과 「Ibn al-Haytham」.
- 4 영어 위키백과 「Snell's law」.
- 5 영어 위키백과 「Light」. 위치: Historical theories.
- 6 나무위키 「빛」. 위치: 파동성과 입자성 (아라고 점 1819).
- 7 영어 위키백과 「James Clerk Maxwell」; 「Electromagnetic radiation」.
- 8 영어 위키백과 「Photoelectric effect」.
- 9 영어 위키백과 「Speed of light」; 한국어 위키백과 「빛의 속도」.

# 눈과 전깃불이 퍼진 자리

## 눈이 여러 번 생긴 이유

복잡한 영상 형성 눈은 여러 번 독립으로 생겼다. 광수용 반점은 40–65회 따로 나타났다고 적힌다. 방향 있는 눈을 만든 동물 문은 여섯뿐인데, 그 문이 종의 96%를 차지한다.<sup>1</sup> 옴신은 좌우대칭동물 공통조상에 이미 여러 군이 있었고, 척추동물 시각 옴신 다섯 가운데 넷은 원구류-어류 분기 이전이다. PAX6이 먼 문의 눈 자리를 같이 표시한다.<sup>1</sup>

닐슨의 1994년 계산은 비관적 돌연변이율과 1년 세대를 가정하고도, 척추동물 눈이 광수용 패치에서 36만 4천 년 안에 자랄 수 있다고 했다.<sup>1</sup> 확인된 이른 화석은 약 5억 3천만 년 전 슈미트티엘루스. 에디아카라 5억 5천5백만 년 전 후보가 있다. 캄브리아 “빛 스위치” 가설은 봄이 군비 경쟁을 켜다고 읽는다. 가설이지 합의가 아니다.

절지동물의 겹눈과 척추동물·두족류의 카메라 눈은 다른 해법이다. 문어는 맹점이 없고, 척추동물은 시신경이 망막 앞에 있어 맹점이 있다. 3장의 해부가 이 분기점을 이미 가리킨다.

## 렌즈가 직업이 되기 전

읽기돌(11–13세기)과 1286년경 피사 부근의 첫 안경은 광학이 일상의 봄을 연장한 전환점이다. 발명자 이름은 없다. 네덜란드 굴절 망원경은 1608년(리퍼르헤이 특허). 갈릴레오가 개량했다. 뉴턴 1668년 반사 망원경이 작동하는 첫 반사경으로 적힌다. 복합현미경은 1620년경.<sup>2</sup>

도구가 바뀌면 보이는 세계의 척도가 바뀐다. 별과 세포가 같은 기하광학 안에 들어왔다.

## 루멘의 단가

전기 아크는 1800년대 초에 지속 가능했고, 데이비가 시연했다. 상업 가로·건물 조명은 1870년대 아크, 1880년대 스완과 에디슨의 백열이다. 네온 1910, 텅스텐 필라멘트 특허 1912, 형광 원형 1934, 실용 LED 1962, 고휘도 청색 LED 1990년대 (나카무라·아마노·아카사키, 2014년 노벨 물리학상). 21세기 초 백열 퇴출이 여러 나라에서 진행됐다.<sup>3 4</sup>

백열의 가시 몫은 개설키다 갈린다. 「Electric light」는 소비 에너지의 2–5%만 가시라고 적고, 「Light」는 대략 10% 안팎을 적는다.<sup>3 5</sup> 분모(입력 전력인지, 복사 에너지인지)가 본문에 밝혀져 있지 않다. 확인되는 것은 백열이 열로 대부분을 버린다는 방향이다. 발광효율의 개설키 숫자는 대략 아래와 같다.

| 광원      | 대략 lm/W   | 비고                |
|---------|-----------|-------------------|
| 백열      | 5–18      | 전압·와트에 따라 구간      |
| 형광(CFL) | 46–75     |                   |
| LED     | 대략 75–217 | 2010년대 이후 상단이 오른다 |

숫자는 제품 한 종이 아니라 기술 세대의 구간이다.<sup>6</sup> LED 항목은 2009년 105 lm/W, 2010년 140 lm/W 같은 실험실·시제 숫자를 따로 적는다.<sup>4</sup>

Our World in Data가 인용하는 푸케 계열은, 영국 조명 실질 가격이 1300년대 이후 99.9% 넘게 떨어졌다고 한다. 같은 페이지는 1300년대 백만 루멘시를 2000년 물가로 약 3만 4천 파운드, 2023년을 약 2.15파운드로 적는다. 두 숫자의 물가 기준년이 달라 배수를 한 선으로 합치지 않는다. 1700년 평균 효율 30 루멘시/kWh에서 2000년 2만 5천 루멘시/kWh로 거의 1천 배라는 효율 쪽은 같은 단위다.<sup>7</sup>

## 밤이 비싸진 이후

싼 루멘은 밤하늘을 지웠다. 영어 「Light pollution」이 인용하는 2016년 세계 지도(Falchi 등)는 세계 인구의 83%가 빛공해 하늘 아래 살고, 육지의 23%가 하늘빛에 영향을 받으며, 미국인의 80%·유럽인의 60%가 은하수를 못 본다고 적는다.<sup>8</sup> 1992–2017년 적어도 49% 증가, 2014–2022년 16% 증가, 프랑스는 정책으로 33% 감소라는 후속 숫자도 같은 항목에 있다.

생태 피해를 달러로 환산한 숫자와 개별 암 증가율은 논문마다 갈린다. 인공 밤이 수면·멜라토닌·철새·거북·곤충의 주기와 충돌한다는 방향은 여러 개설이 같이 적는다. DarkSky International(구 IDA)이 1980년대부터 그 충돌을 제도의 언어로 옮겼다.

---

### 주

- 1 영어 위키백과 「Evolution of the eye」, oldid 1369638761.
- 2 영어 위키백과 「History of optics」. 위치: Lenses and lensmaking.
- 3 영어 위키백과 「Electric light」, 2026-09-12.
- 4 영어 위키백과 「Light-emitting diode」.
- 5 영어 위키백과 「Light」, oldid 1374369149. 위치: Light sources. 백열 가시 몫 약 10%.
- 6 영어 위키백과 「Luminous efficacy」, 2026-07-17.
- 7 Our World in Data, 「Light」, Fouquet & Pearson (2006) 및 페이지가 인용하는 후속. <https://ourworldindata.org/light>
- 8 영어 위키백과 「Light pollution」, oldid 1372348702. Falchi et al. 2016을 인용.

## 아직 합의되지 않은 것

### 두 경로는 얼마나 갈라져 있는가

등쪽/배쪽 모형은 손상 패턴과 착시-손질 해리로 버틴다. 굿데일 등 1991년의 환자 D.F.는 물체를 알아보지 못하면서 잡을 수 있었다. 아가글리오티 등 1995년은 크기 대비 착시가 손을 속이지 않는다고 보고했다.<sup>1</sup>

후속은 그 독립을 줄인다. 프란츠 등(2000, 2005)은 주의-과제 혼선을 지적했다. 헤세 등은 D.F.에게 등쪽 결손도 있다고 했다. 힘멜바흐 등 2012년은 더 엄한 통계에서 갈림이 약해진다고 했다. 2009년 리뷰는 정신은 유지하되 “두 흐름의 독립이 과장됐다”고 적는다. 센크와 매킨토시 2010년은 형식 가설이 아니라 실험의 휴리스틱이라고 본다.<sup>1</sup> 무엇이 관측되면 이 경로를 접는가: 같은 과제에서 지각과 행동이 일관되게 같이 속고, 그 공변이 손상 해부와도 맞을 때.

### 색은 어디에 있는가

물리 스펙트럼은 무한 차원에 가깝고, 사람 색공간은 셋이다. 그 셋이 세계의 성질인지 경험의 성질인지는 형이상학의 열린 문제다. SEP 「Color」(1997, 실질 개정 2024-08-09)가 갈래를 나눈다.<sup>2</sup>

물리주의는 색을 반사율 유형 같은 숨은 물리량으로 환원한다(암스트롱, 힐베르트, 번-힐베르트). 성향주의는 적합한 관찰자가 적합한 조건에서 그렇게 보이게 하는 힘이다(로크 전통; 현대는 존스턴 등). 원초주의는 환원되지 않는 질적 성질을 물체에 둔다. 제거주의는 일상 개념의 색이 물체에 없다고 본다(하딘 등). 관계주의는 관찰자-조건에 상대화한다. 생태·행위 이론은 색을 환경과의 관계 또는 “색 있게 봄”으로 옮긴다.

과학(반대과정, 항등성, 고유 색상)이 후보를 줄이지, 결판내지는 않는다. 변이와 메타메리즘이 물리주의와 성향주의를 같이 압박한다. “정상 관찰자”는 칸델라의 표준 관찰자와 같은 종류의 평균이다.

### 경험은 세계를 직접 가리키는가

착시와 환각은 소박 실재를 혼든다. 감각여료 이론은 경험할 때마다 제시되는 비상적인 대상이 있다고 한다. 부사주의는 대상을 늘리지 않고 감지하는 방식을 고친다. 표상주의는 좋은 경우와 나쁜 경우가 같은 내용의 표상이라고 한다. 선언적 이접의 소박 실재는 진짜 봄만 직접 제시이고 환각은 다른 종류라고 한다.<sup>3</sup>

5장의 무의식적 추론과 베이즈 모형은 표상 쪽에 가깝다. 그것이 철학의 결판은 아니다. 신경이 가정을 쓴다는 사실과, 경험이 세계를 제시한다는 주장은 다른 층이다.

### 기계가 본다는 말

인공 시각은 카메라 입력을 장면 기술로 바꾸는 공학이다. 사람 이론이 영감을 주었고, 공학이 다시 사람 모형을 시험한다.<sup>4</sup> 광자에서 레이블까지의 경로는 사람 경로와 같다. 같은 구성의 실패(조명 가정, 가림, 적대적 무늬)가 다른 하드웨어에서 재현된다.

양자광학은 단일 광자원, 얽힘, 아토초 펄스, 광집계를 연구 전선으로 둔다. 김블 등 1977년의 “한 원자, 한 광자”가 비고전 광원의 이론 표지로 적힌다.<sup>5</sup> 이 전선은 2장의 이중성을 계속 가능한 상태로 만든다.

빛공해의 다음 분기점은 LED의 스펙트럼이다. 루멘당 와트가 내려가도 파란 성분이 멜라놉신을 더 밀면, 효율의 승리가 밤의 패배가 된다. 무효화 신호는 하늘빛과 중 피해가 효율 곡선과 같이 내려가는 규제다. 프랑스의 감소 보고가 그 방향의 한 점이다.<sup>6</sup> 한 점이지 전 지구의 추세는 아니다.

이 장이 멈추는 선: 합의된 메커니즘(2-4장)을 형이상학의 승리로 올리지 않는다. 열린 것은 열린 채로 둔다.

---

## 주

- 1 영어 위키백과 「Two-streams hypothesis」. 위치: Criticisms.
- 2 Barry Maund, 「Color」, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 실질 개정 2024-08-09. <https://plato.stanford.edu/entries/color/>
- 3 Crane & French, 「The Problem of Perception」, SEP, 2021-08-18.
- 4 영어 위키백과 「Visual perception」 §Artificial visual perception.
- 5 영어 위키백과 「History of optics」 §Quantum optics.
- 6 영어 위키백과 「Light pollution」.

## 참고문헌

각주는 아래 항목을 가리킨다.

### 시드

- 나무위키. 「빛」. 최종 수정 2026-09-11. <https://namu.wiki/w/빛>
- 나무위키. 「시각」. 최종 수정 2026-09-06. <https://namu.wiki/w/시각>
- 한국어 위키백과. 「빛」. 2026-07-21. <https://ko.wikipedia.org/wiki/빛>
- 한국어 위키백과. 「시각」. oldid 41311675, 2026-02-08. <https://ko.wikipedia.org/wiki/시각>
- 영어 위키백과. 「Light」. oldid 1374369149. <https://en.wikipedia.org/wiki/Light>
- 영어 위키백과. 「Visual perception」. oldid 1375293861. [https://en.wikipedia.org/wiki/Visual\\_perception](https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_perception)

### 물리·표준

- BIPM. *The International System of Units*. 미터·칸델라 정의. 2019 브로슈어. <https://www.bipm.org/en/si-base-units/metre> · <https://www.bipm.org/en/si-base-units/candela>
- 영어 위키백과. 「Visible spectrum」; 「Speed of light」; 「Photon」; 「Photoelectric effect」; 「Electromagnetic radiation」; 「James Clerk Maxwell」; 「Photometry (optics)」; 「Luminous efficacy」; 「Snell's law」.
- 한국어 위키백과. 「가시광선」(2026-09-17); 「빛의 속력」; 「광학」.

### 시각

- 영어 위키백과. 「Human eye」; 「Visual system」; 「Photoreceptor cell」; 「Color vision」; 「Color blindness」; 「Two-streams hypothesis」; 「Visual acuity」.
- 한국어 위키백과. 「시각계」; 「눈 (해부학)」; 「색채 지각」; 「색각 이상」; 「시력」.
- Webvision. Simple Anatomy of the Retina; Photoreceptors. <https://www.webvision.pitt.edu/>

### 역사·진화·조명

- 영어 위키백과. 「History of optics」; 「Ibn al-Haytham」; 「Thomas Young (scientist)」; 「Hermann von Helmholtz」; 「Evolution of the eye」; 「Electric light」; 「Light-emitting diode」; 「Light pollution」.
- Our World in Data. 「Light」. Fouquet & Pearson (2006) 및 페이지가 인용하는 후속. <https://ourworldindata.org/light>

### 철학

- Maund, Barry. 「Color」. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 1997; 실질 개정 2024-08-09. <https://plato.stanford.edu/entries/color/>
- Crane, Tim; French, Craig. 「The Problem of Perception」. SEP, 2005; 실질 개정 2021-08-18. <https://plato.stanford.edu/entries/perception-problem/>

## 그림

- 본문 도해 1: 가시창이 전자기 스펙트럼에서 차지하는 자리. 직접 그린 SVG. 수치는 본문 1장 표와 같다.
- 본문 도해 2: 눈에서 V1까지의 경로. 직접 그린 SVG. 해부 이름은 3장과 같다.