

33장: 전자기파

Electromagnetic Waves

우리는 전자기파의 바다에 산다

- 스마트폰 통화, 와이파이, 블루투스 — 모두 **전자기파(electromagnetic wave)** 다
- 전자레인지의 마이크로파, 리모컨의 적외선, 병원의 X선
- 밤하늘 별빛이 수백 년을 날아 우리 눈에 닿는 것도 전자기파
- 그리고 지금 이 슬라이드를 보는 **빛(light)** 자체가 전자기파다

지난 장에서 완성한 **맥스웰 방정식(Maxwell's equations)** 의 가장 극적인 결론:

빛은 전기장과 자기장이 서로를 유도하며 진행하는 파동이다.

이번 장의 두 가지 이야기

전반부 — 파동으로서의 전자기파

- 전자기 스펙트럼과 전자기파의 구조
- 왜 $E/B = c$ 이고, 왜 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 인가 (맥스웰 방정식으로 유도)
- 전자기파가 나르는 에너지(포인팅 벡터)와 운동량(복사 압력)
- 편광과 말뤼스 법칙

후반부 — 광선으로서의 빛 (기하광학의 시작)

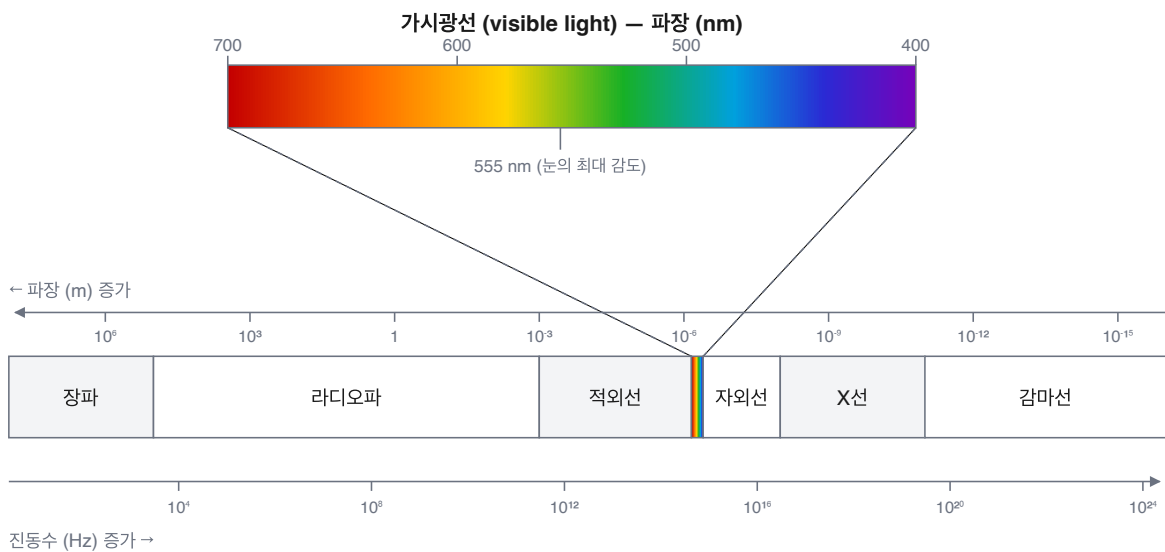
- 반사와 굴절 (스넬 법칙), 내부 전반사, 반사에 의한 편광 (브루스터 각)

전기·자기를 마무리하고 다음 장부터의 **광학(optics)** 으로 넘어가는 다리이다.

33.1 전자기파

맥스웰의 무지개

맥스웰 시대(1860년대)에 알려진 전자기파는 가시광선, 적외선, 자외선뿐이었다. 이후 헤르츠(Hertz)가 **전파(radio wave)**를 만들어내며, 모든 전자기파가 같은 본질임이 확인되었다.



모든 전자기파는 진공에서 같은 속력 $c = 3.0 \times 10^8$ m/s로 진행한다

- 파장(진동수)에는 상한도 하한도 없다 — 스펙트럼은 연속이고 빈틈이 없다
- 어떤 영역이든 **진공에서의 속력은 모두 같다**: $c = 3.0 \times 10^8$ m/s

스펙트럼의 주요 영역

영역	대표 파장	우리 주변의 예
라디오파	수 m ~ 수 km	FM·AM 방송, TV
마이크로파	mm ~ cm	전자레인지, 와이파이, 레이더
적외선	$\sim \mu\text{m}$	리모컨, 열화상 카메라
가시광선	400~700 nm	사람 눈이 보는 빛
자외선	$\sim 10\text{ nm}$	자외선 차단제가 막는 빛
X선·감마선	$< 1\text{ nm}$	의료 영상, 핵반응

파장이 짧아질수록 진동수는 커진다 — 둘은 $c = \lambda f$ 로 묶여 있다.

가시광선

전체 스펙트럼에서 사람 눈이 감지하는 부분은 좁은 띠 하나뿐이다.

- 눈의 감도는 **555 nm** (연두색) 부근에서 최대
- 감도가 최대의 1%로 떨어지는 파장을 경계로 잡으면 약 **430~690 nm**
- 경계는 칼로 자르듯 정해지지 않는다 — 감도가 양쪽으로 서서히 0에 접근

태양은 가시광선 영역에서 가장 강하게 복사한다. 우리 눈이 이 영역에 맞춰 진화한 것은 우연이 아니다.

예제 1: 파장과 진동수 ($c = \lambda f$)

(a) 서울 지역 FM 방송 89.1 MHz의 파장은?

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8}{89.1 \times 10^6} \approx 3.37 \text{ m}$$

(b) 와이파이 2.4 GHz의 파장은?

$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 0.125 \text{ m} = 12.5 \text{ cm}$$

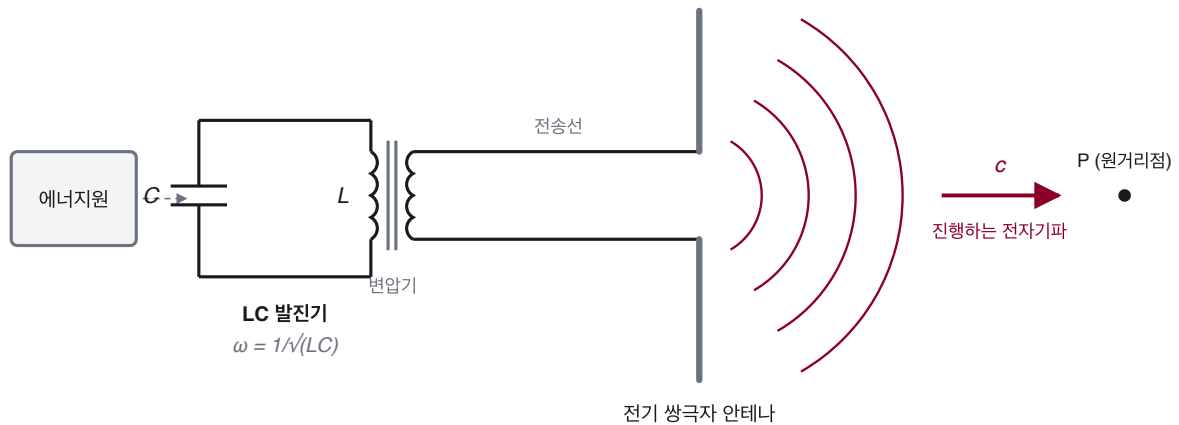
(c) 가시광선 555 nm의 진동수는?

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8}{555 \times 10^{-9}} \approx 5.4 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

FM 안테나가 미터 크기이고, 와이파이 안테나가 손가락 크기인 이유가 여기에 있다.

전자기파는 어떻게 만드는가

파장 1 m 정도의 전파는 회로로 직접 만들 수 있다.



LC 발진기의 각진동수 ω 로 안테나의 전하가 진동 → 같은 진동수의 전자기파가 방출된다

- 심장부는 **LC 발진기(LC oscillator)**: 각진동수 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 로 전하와 전류가 진동한다 (31장)
- 변압기와 전송선으로 **안테나(antenna)** — 두 개의 도체 막대 — 에 연결
- 안테나의 전하가 진동수 ω 로 위아래로 진동한다

진동하는 쌍극자가 파동을 방출한다

안테나는 전기 쌍극자 모멘트가 크기와 방향을 바꾸며 진동하는 **전기 쌍극자(electric dipole)** 처럼 행동한다.

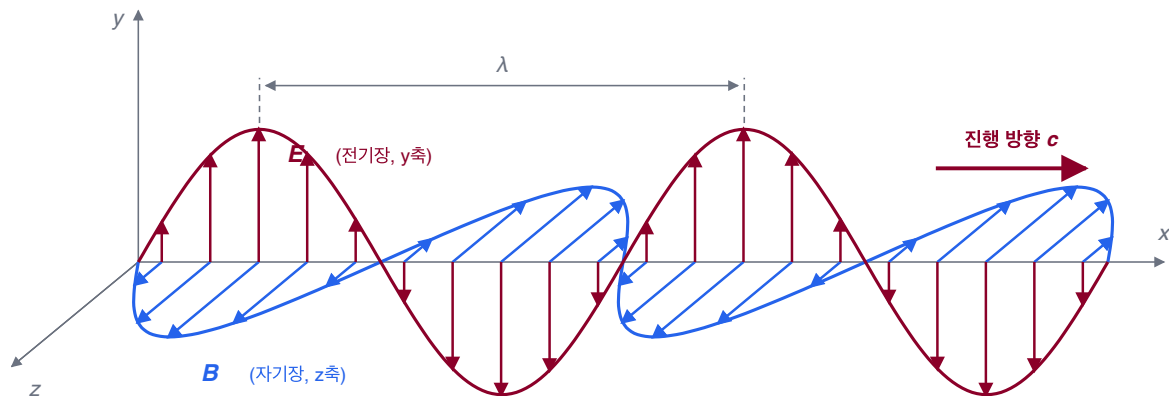
- 쌍극자 모멘트가 변하니 → 전기장이 변한다
- 전류가 변하니 → 자기장이 변한다
- 이 변화는 순간적으로 퍼지지 않고, 안테나로부터 속력 c 로 **바깥으로 전파** 된다

변하는 $\vec{E}$ 와 $\vec{B}$ 가 함께 만드는 이 파동이 전자기파이고, 진동수는 LC 발진기의 ω 와 같다.

멀리 떨어진 점에서는 파면의 곡률을 무시할 수 있다 → **평면파(plane wave)** 로 취급한다.

진행하는 전자기파의 구조

+ x 방향으로 진행하는 평면 전자기파의 스냅샷:



E 와 B 는 서로 수직이고 진행 방향(x 축)에도 수직 — 두 성분은 같은 위상(마루와 마루가 나란히)으로 진동한다

1. $\vec{E}$ 와 $\vec{B}$ 는 항상 진행 방향에 **수직** — 전자기파는 **횡파(transverse wave)** 다
2. $\vec{E}$ 는 항상 $\vec{B}$ 에 **수직**
3. $\vec{E} \times \vec{B}$ 는 항상 **진행 방향** 을 가리킨다
4. 두 장은 같은 진동수로, **같은 위상(in phase)** 으로 사인형 진동을 한다

수식으로 쓰면

$\vec{E}$ 는 y 축, $\vec{B}$ 는 z 축에 나란하다고 하면, 위치 x 와 시간 t 의 함수로:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

- E_m, B_m : 진폭 / $k = 2\pi/\lambda$: 파수 / $\omega = 2\pi f$: 각진동수
- 16장의 파동 이론 그대로: 파동의 속력은

$$c = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

전기파 성분과 자기파 성분은 따로 존재할 수 없다 — 서로가 서로를 유도하기 때문이다 (곧 유도한다).

시뮬레이션: 진행하는 전자기파 — E·B 벡터의 동시 진동과 $c = \lambda f$

가장 신기한 파동

줄의 파동은 줄이, 소리는 공기가 필요하다. 그런데 전자기파는 **매질이 필요 없다**.

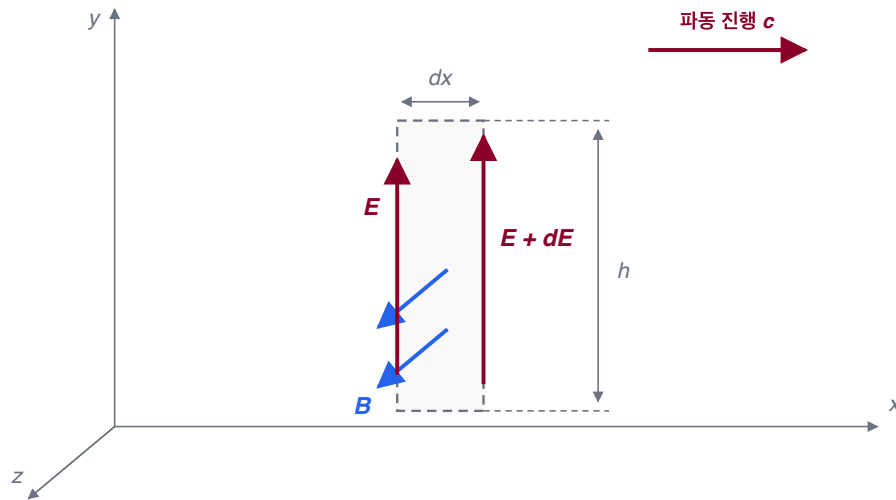
- 별과 우리 사이의 진공을 그대로 건너온다
- 태양의 전자기파가 없었다면 지구는 얼어붙은 암석이었을 것이다

또 하나: 진공에서 빛의 속력은 관측자의 운동과 무관하게 **누구에게나 같다** (특수 상대성 이론, 37장). 그래서 현재 미터(m)는 빛의 속력을 정확한 값으로 **정의** 해서 정한다:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{정확값})$$

유도 ①: 변하는 B가 E를 만든다 — 설정

이제 $E/B = c$ 와 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 를 유도 하자. 파동이 지나가는 공간에 xy 평면과 나란한, 폭 dx , 높이 h 의 가상 직사각형을 고정한다.



- 파동이 지나가면 직사각형을 통과하는 자기 플럭스 Φ_B 가 변한다
- **패러데이 법칙(Faraday's law)**에 의해 직사각형 둘레에 전기장이 유도된다
- 이 유도 전기장이 바로 전자기파의 전기장 성분이다

유도 ②: 패러데이 법칙 적용

직사각형 둘레를 반시계 방향으로 도는 선적분. 위·아래 변에서는 $\vec{E} \perp d\vec{s}$ 이므로 기여가 없고, 양쪽 세로 변만 남는다:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (E + dE)h - Eh = h dE$$

직사각형(넓이 $h dx$)을 지나는 자기 플럭스와 그 시간 변화율:

$$\Phi_B = B(h dx) \Rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = h dx \frac{dB}{dt}$$

패러데이 법칙 $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ 에 대입:

$$h dE = -h dx \frac{dB}{dt} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}}$$

(E, B 는 x 와 t 두 변수의 함수이므로 편미분으로 쓴다.)

유도 ③: $E/B = c$

사인형 해를 대입한다. $E = E_m \sin(kx - \omega t)$, $B = B_m \sin(kx - \omega t)$ 이므로:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_m \cos(kx - \omega t), \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 에 넣으면 코사인이 약분되고:

$$kE_m = \omega B_m \quad \Rightarrow \quad \frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c$$

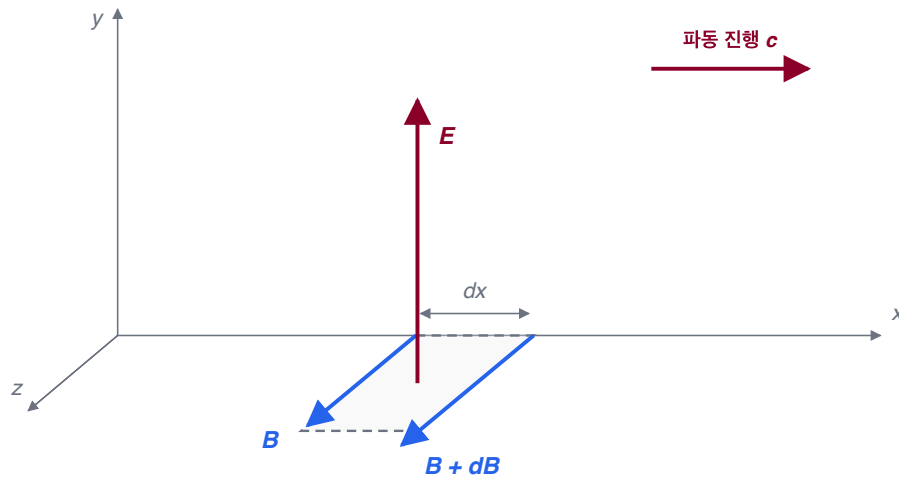
$$\boxed{\frac{E}{B} = c}$$

전기장과 자기장의 크기 비는 언제 어디서나 빛의 속력 c 이다. 두 성분은 진폭까지 묶여 있는 **한 몸**이다.

유도 ④: 변하는 E가 B를 만든다 — 설정

이번에는 xz 평면과 나란한 직사각형(폭 dx , 길이 h)을 놓는다.

진동하는 전기장(y 축)이 xz 면의 닫힌 경로에 자기장을 유도한다 — 맥스웰 유도 법칙



- 파동이 지나가면 이 직사각형을 통과하는 **전기 플럭스** Φ_E 가 변한다
- 32장에서 배운 **맥스웰 유도 법칙(Maxwell's law of induction)**:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- 이 유도 자기장이 전자기파의 자기장 성분이다

유도 ⑤: 맥스웰 법칙 적용

둘레를 반시계 방향으로 돌면 긴 두 변만 기여한다 (적분 방향과 $\vec{B}$ 의 방향을 따지면 부호가 반대):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = -(B + dB)h + Bh = -h dB$$

전기 플럭스와 그 변화율은:

$$\Phi_E = E(h dx) \Rightarrow \frac{d\Phi_E}{dt} = h dx \frac{dE}{dt}$$

맥스웰 법칙에 대입하고 편미분으로 정리하면:

$$-h dB = \mu_0 \varepsilon_0 h dx \frac{dE}{dt} \Rightarrow \boxed{-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}}$$

유도 ⑥: $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$

다시 사인형 해를 대입하면:

$$-k B_m \cos(kx - \omega t) = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\Rightarrow \frac{E_m}{B_m} = \frac{k}{\mu_0 \epsilon_0 \omega} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 (\omega/k)} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

유도 ③의 결과 $E_m/B_m = c$ 와 결합하면 $c = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$, 즉:

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}}$$

검산: $\frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8.85 \times 10^{-12})}} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ — 빛의 속력과 정확히

일치!

정전기(ϵ_0)와 자기(μ_0) 실험에서 나온 상수만으로 빛의 속력이 나온다. **빛은 전자기파다.**

33.2 에너지 수송과 포인팅 벡터

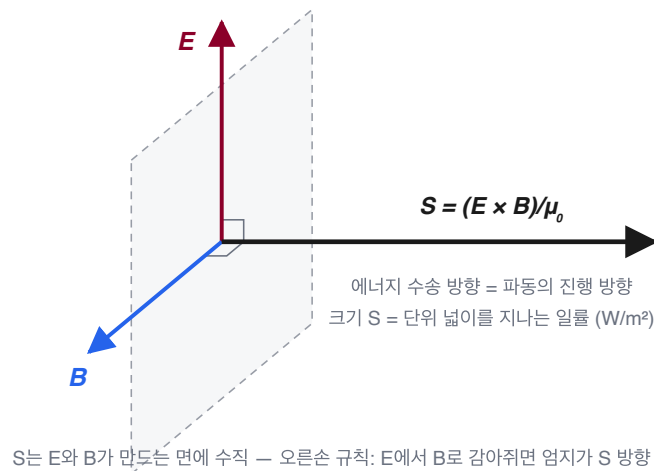
전자기파는 에너지를 나른다

한여름 뽕약벌에 서 보면 안다 — 전자기파는 에너지를 운반해 우리 몸에 전달한다.

파동이 단위 넓이당 에너지를 실어 나르는 비율(방향 포함)을 나타내는 벡터가 **포인팅 벡터(Poynting vector)** 다:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

포인팅 벡터 (Poynting vector) — 에너지 흐름의 방향과 크기



포인팅 벡터의 크기

$$S = \left(\frac{\text{에너지/시간}}{\text{넓이}} \right)_{\text{순간}} = \left(\frac{\text{일률}}{\text{넓이}} \right)_{\text{순간}}, \quad \text{단위: W/m}^2$$

- 방향: $\vec{E} \times \vec{B}$ — 파동의 진행 방향이자 에너지가 흘러가는 방향
- 크기: $\vec{E} \perp \vec{B}$ 이므로 $S = \frac{EB}{\mu_0}$

여기에 $B = E/c$ 를 대입하면 E 만으로 쓸 수 있다:

$$\boxed{S = \frac{E^2}{c\mu_0}} \quad (\text{순간 에너지 흐름률})$$

측정 장비가 주로 전기장에 반응하기 때문에 E 로 쓰는 쪽이 실용적이다.

세기: 시간 평균

S 는 매 순간 요동친다. 실제로 유용한 것은 시간 평균값 — 파동의 **세기(intensity)** I 다.

$$I = S_{\text{avg}} = \frac{1}{c\mu_0} [E_m^2 \sin^2(kx - \omega t)]_{\text{avg}}$$

$\sin^2$ 의 한 주기 평균은 $\frac{1}{2}$ 이므로, **rms 값** $E_{\text{rms}} = E_m/\sqrt{2}$ 을 정의하면:

$$I = \frac{E_m^2}{2c\mu_0} \Rightarrow \boxed{I = \frac{E_{\text{rms}}^2}{c\mu_0}}$$

교류 회로에서 V_{rms} 를 쓰던 것과 같은 요령이다.

전기 에너지와 자기 에너지는 정확히 같다

$E = cB$ 이고 c 가 큰 수이니 "전기 성분이 훨씬 세다"고 생각하기 쉽다. 단위가 다른 두 양을 직접 비교하면 안 된다 — **에너지 밀도** 로 비교하자.

전기장의 에너지 밀도(25장)에 $E = cB$ 를 대입:

$$u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 (cB)^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 \frac{B^2}{\mu_0\epsilon_0} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

그런데 $B^2/2\mu_0$ 는 자기장의 에너지 밀도 u_B 다 (30장):

$$\boxed{u_E = u_B}$$

전자기파의 에너지는 전기 절반, 자기 절반 — 두 성분은 에너지마저 공평하게 나눈다.

점광원과 역제곱 법칙

일률 P_s 로 사방에 균일하게(등방적으로) 복사하는 **점광원(point source)** 을 생각하자.

- 반지름 r 인 가상의 구를 씌우면, 방출된 모든 에너지가 이 구면을 통과한다
- 에너지 보존: 구면을 지나는 총 일률 = 광원의 일률 P_s

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

세기는 거리의 제곱에 반비례한다. 촛불에서 두 배 멀어지면 밝기는 $\frac{1}{4}$ 이 된다.

예제 2: 햇빛의 전기장과 자기장

지구 대기권 바로 밖에서 햇빛의 세기는 $I \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$ (태양 상수)이다. E_{rms} 와 B_{rms} 를 구하라.

$I = E_{\text{rms}}^2 / c\mu_0$ 를 뒤집으면:

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{Ic\mu_0} = \sqrt{(1.4 \times 10^3)(3.00 \times 10^8)(4\pi \times 10^{-7})} \approx 7.3 \times 10^2 \text{ V/m}$$

자기장은 $B = E/c$ 관계로:

$$B_{\text{rms}} = \frac{E_{\text{rms}}}{c} = \frac{726}{3.00 \times 10^8} \approx 2.4 \times 10^{-6} \text{ T} = 2.4 \mu\text{T}$$

$E_{\text{rms}} \approx 730 \text{ V/m}$ 는 꽤 큰 값이지만, $B_{\text{rms}} \approx 2.4 \mu\text{T}$ 는 지구 자기장($\sim 50 \mu\text{T}$)보다도 작다. 그래도 두 성분의 **에너지는 똑같이** 절반씩이다.

33.3 복사 압력

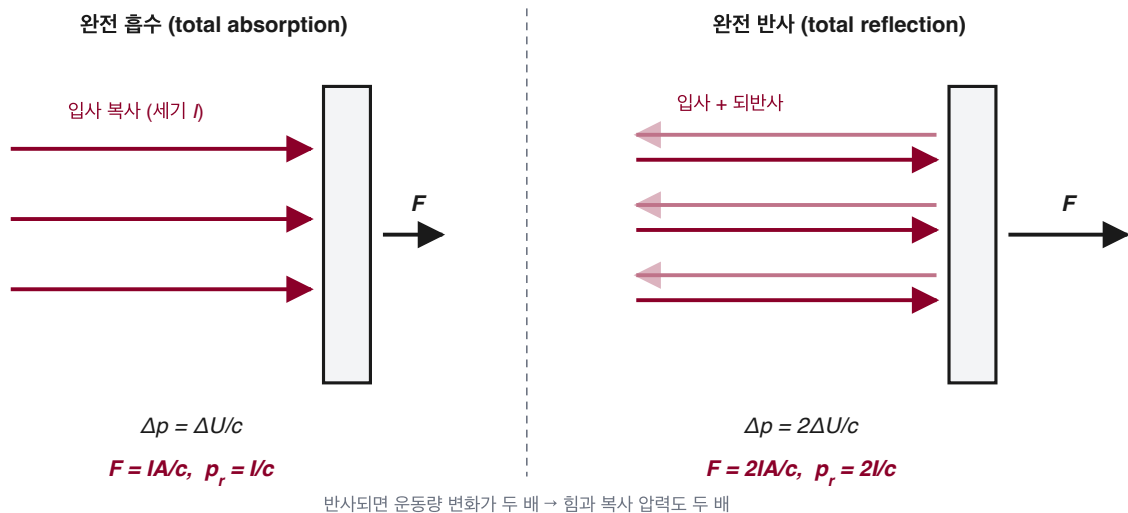
빛이 미치는 힘

전자기파는 에너지뿐 아니라 **선운동량(linear momentum)** 도 나른다. 물체에 빛을 쏘면 물체가 밀린다!

시간 Δt 동안 물체가 복사 에너지 ΔU 를 받을 때 (맥스웰의 결과):

- **완전 흡수** (검은 표면): $\Delta p = \frac{\Delta U}{c}$
- **완전 반사** (거울, 되반사): $\Delta p = \frac{2\Delta U}{c}$

반사가 흡수의 두 배인 이유: 공이 벽에 박히는 것(운동량 p 전달)과 튕겨 나오는 것($2p$ 전달)의 차이와 같다.



힘과 복사 압력

세기 I 인 빛이 넓이 A 에 수직으로 닿으면, Δt 동안 받는 에너지는 $\Delta U = IA \Delta t$.

뉴턴 제2법칙 $F = \Delta p / \Delta t$ 에 넣으면:

$$F = \frac{IA}{c} \text{ (완전 흡수)}, \quad F = \frac{2IA}{c} \text{ (완전 반사)}$$

단위 넓이당 힘이 **복사 압력(radiation pressure)** p_r 이다:

$$p_r = \frac{I}{c} \text{ (완전 흡수)}, \quad p_r = \frac{2I}{c} \text{ (완전 반사)}$$

부분 흡수·부분 반사면 그 사이 값. 단위는 압력과 같은 N/m^2 (Pa)이다.

복사 압력은 얼마나 셀까

햇빛($I = 1.4 \text{ kW/m}^2$)이 완전 흡수될 때:

$$p_r = \frac{I}{c} = \frac{1.4 \times 10^3}{3.0 \times 10^8} \approx 4.7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

대기압($\sim 10^5 \text{ Pa}$)의 **백억분의 일** 수준 — 카메라 플래시에 얻어맞아도 아무 느낌이 없는 이유다. 하지만:

- **솔라 세일(solar sail)**: 우주 돛단배 — 마찰 없는 우주에서 햇빛으로 가속 (IKAROS 위성이 실증)
- **혜성 꼬리**: 먼지 꼬리가 태양 반대쪽으로 밀리는 데 복사 압력이 한몫한다
- **레이저 집속**: 레이저는 좁은 점에 에너지를 모아 큰 복사 압력을 만든다 — 광 핀셋으로 세포를 집는다

33.4 편광

편광이란?

전자기파의 $\vec{E}$ 가 한 평면 안에서만 진동하면 그 파동은 **편광(polarized)** 되었다고 한다.

- $\vec{E}$ 벡터들이 담긴 평면: **진동면(plane of oscillation)**
- 정면에서 보면 $\vec{E}$ 의 진동을 **양방향 화살표 하나**로 나타낼 수 있다

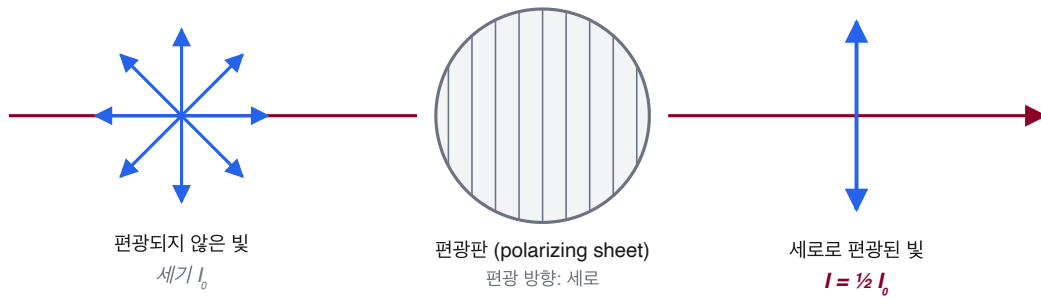
TV 송신 안테나가 만드는 전파는 모두 같은 방향으로 편광되어 있다. 그래서 수신 안테나도 그 방향에 맞춰 세운다.

반면 태양이나 전구 같은 보통 광원의 빛은 원자들이 제각각 내보내므로, $\vec{E}$ 의 방향이 마구 바뀐다 — **비편광(unpolarized)** 이다. 정면에서 보면 사방으로 뻗은 화살표 다발처럼 보인다.

편광판과 절반 규칙

편광판(polarizing sheet) 은 특정 방향(투과축)과 나란한 전기장 성분만 통과시키고, 수직 성분은 흡수한다.

절반 규칙 (one-half rule): 편광되지 않은 빛 → 편광판 → 세기가 절반



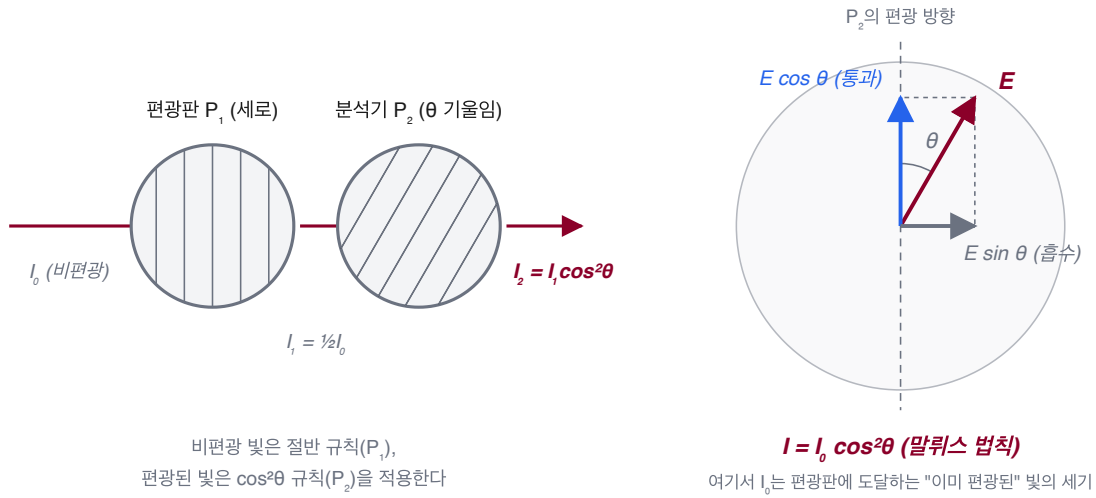
편광 방향과 나란한 E 성분만 통과, 수직 성분은 흡수 — 입사광이 비편광일 때만 사용

비편광 빛의 $\vec{E}$ 를 투과축 성분과 수직 성분으로 분해하면, 방향이 무작위이므로 평균적으로 두 성분의 몫이 같다. 수직 성분이 몽땅 흡수되니 세기는 절반:

$$\boxed{I = \frac{1}{2} I_0} \quad (\text{절반 규칙 — 입사광이 비편광일 때만})$$

말뤼스 법칙

이미 **편광된** 빛(세기 I_0 , 편광 방향이 투과축과 각 θ)이 편광판에 들어오면?



전기장에서 투과축과 나란한 성분만 살아남는다:

$$E_y = E \cos \theta$$

세기는 전기장 제곱에 비례하므로 ($I = E_{\text{rms}}^2 / c\mu_0$):

$$\boxed{I = I_0 \cos^2 \theta} \quad (\text{말뤼스 법칙 — 입사광이 편광일 때만})$$

$\theta = 0^\circ$ 면 전부 통과, $\theta = 90^\circ$ 면 완전 차단이다.

편광판 두 장

편광판을 두 장 겹치면 (첫 장을 **편광자(polarizer)**, 둘째 장을 **분석자(analyzer)** 라 한다):

- 두 투과축이 **평행** ($\theta = 0^\circ$): 첫 장을 통과한 빛이 전부 통과
- 두 투과축이 **수직** ($\theta = 90^\circ$, crossed): 빛이 **전혀** 통과하지 못한다
- 그 사이 각도: $\cos^2 \theta$ 만큼 통과

편광 선글라스 두 개를 직각으로 겹쳐 보면 렌즈가 겹친 부분이 캄캄해진다 — 직접 해 볼 수 있는 실험이다.

예제 3: 편광판 세 장

비편광 빛(세기 I_0)이 편광판 세 장을 통과한다. 투과축은 차례로 y 축 방향, y 축에서 60° , x 축 방향(y 축에서 90°)이다. 최종 세기는?

첫째 장: 입사광이 비편광 $\rightarrow$ 절반 규칙:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

둘째 장: 입사광은 y 방향 편광, 투과축과의 각 $\theta = 60^\circ \rightarrow$ 말뤼스 법칙:

$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ$$

셋째 장: 입사광은 60° 방향 편광, 투과축(90°)과의 각 $\theta = 30^\circ$:

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ = \frac{1}{2} I_0 (0.500)^2 (0.866)^2 = \frac{1}{2} (0.250)(0.750) I_0 \approx 0.094 I_0$$

약 9.4%가 통과한다. 재미있는 점: 가운데 장을 **빼면** 첫 장과 셋째 장이 직각이라 **0%**가 된다. 장을 하나 더 넣었는데 빛이 더 통과한다!

시뮬레이션: 편광판 모드 — 말루스 법칙 $I = I_0 \cos^2 \theta$ 직접 확인

편광의 응용

- **편광 선글라스**: 물·도로에서 반사된 눈부신 빛은 수평 편광이 강하다 → 투과축을 세로로 세워 차단 (원리는 33.7절에서)
- **LCD 화면**: 두 편광판 사이의 액정이 픽셀마다 편광 방향을 비틀어 밝기를 조절한다 — 편광 선글라스를 쓰고 모니터를 기울여 보면 화면이 어두워진다
- **3D 영화 안경**: 좌우 눈에 서로 다른 편광의 영상을 보낸다
- **하늘의 산란광**: 대기 분자가 산란시킨 하늘빛은 부분 편광 — 꿀벌은 이를 나침반 삼아 길을 찾는다
- **카메라 편광 필터**: 유리창·수면 반사를 지우고 하늘을 더 파랗게 찍는다

33.5 반사와 굴절

광선으로 보는 빛 — 기하광학

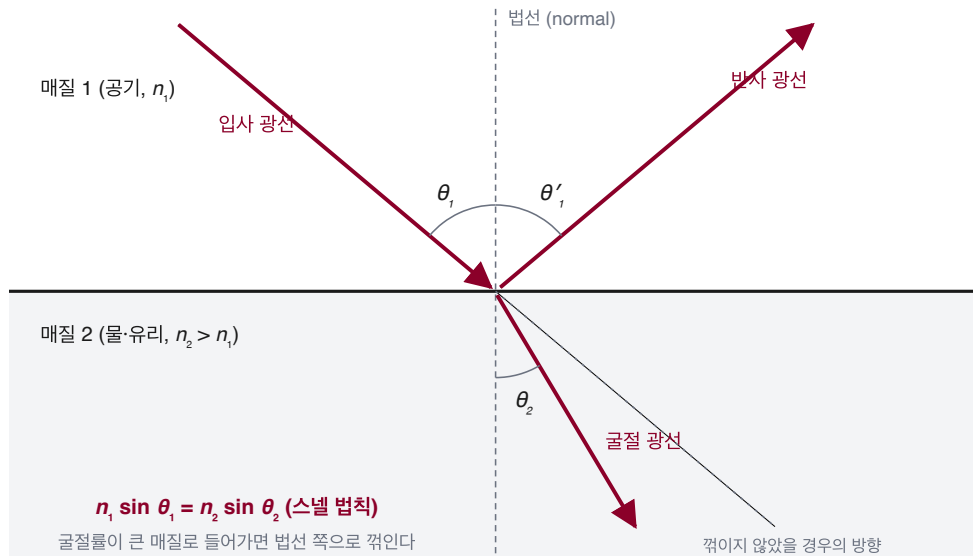
빛은 파동이지만, 장애물이 파장보다 훨씬 크면 **직선으로 진행하는 광선(ray)** 으로 근사할 수 있다. 이것이 **기하광학(geometrical optics)** 이다.

레이저 빔이 수면에 닿으면 두 가지 일이 동시에 일어난다:

- 일부는 표면에서 튕겨 나온다 — **반사(reflection)**
- 나머지는 물속으로 꺾여 들어간다 — **굴절(refraction)**

빛이 통과할 수 있는 물질(물, 유리)을 **투명(transparent)** 하다고 한다. 각도는 모두 표면에 수직인 **법선(normal)** 을 기준으로 잰다.

반사 법칙과 굴절 법칙 (스넬 법칙)



반사 법칙: 반사각은 입사각과 같다.

$$\theta'_1 = \theta_1$$

굴절 법칙 (스넬 법칙, Snell's law):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

n 은 매질마다 정해지는 **굴절률(index of refraction)** 이다. 입사 광선, 반사 광선, 굴절 광선은 모두 법선을 포함한 한 평면(입사면) 안에 있다.

굴절률

굴절률은 매질 속 빛의 속력 v 로 정의된다: $n = c/v$ (35장에서 유도). 항상 $n \geq 1$ 이다.

매질	n
진공	정확히 1
공기 (표준 상태)	1.00029
물 (20°C)	1.33
용융 석영	1.46
크라운 유리	1.52
다이아몬드	2.42

공기는 거의 1이므로 보통 $n_{\text{air}} \approx 1$ 로 근사한다.

굴절의 세 가지 경우

스넬 법칙을 $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$ 로 정리하면:

- $n_2 = n_1$: $\theta_2 = \theta_1$ — 꺾이지 않고 직진
- $n_2 > n_1$ (성긴 $\rightarrow$ 뽁뽁한 매질): $\theta_2 < \theta_1$ — **법선 쪽으로** 꺾인다
- $n_2 < n_1$ (뽁뽁한 $\rightarrow$ 성긴 매질): $\theta_2 > \theta_1$ — **법선에서 멀어지게** 꺾인다

빨대가 물컵 속에서 꺾여 보이는 것, 수영장 바닥이 실제보다 얕아 보이는 것이 모두 굴절 때문이다.

굴절은 **표면에서만** 일어난다 — 매질 안에 들어가면 다시 직진한다.

예제 4: 물 → 유리 → 공기

물($n_1 = 1.33$) 속에서 빛이 유리판($n_2 = 1.77$)에 입사각 $\theta_1 = 40^\circ$ 로 들어간다.

(a) 유리 속 굴절각은?

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \frac{1.33}{1.77} \sin 40^\circ = 0.483 \quad \Rightarrow \quad \theta_2 \approx 28.9^\circ$$

굴절률이 큰 매질로 들어가므로 법선 쪽으로 꺾인다 ($40^\circ \rightarrow 28.9^\circ$). ✓

(b) 유리판 반대면(유리 → 공기, $n_3 = 1.00$)에서 굴절각은? 두 면이 평행하므로 입사각은 θ_2 와 같다:

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_3} \sin \theta_2 = \frac{1.77}{1.00} (0.483) = 0.855 \quad \Rightarrow \quad \theta_3 \approx 58.8^\circ$$

굴절률이 작은 공기로 나가므로 법선에서 크게 멀어진다.

색분산 — 굴절률은 파장에 따라 다르다

진공이 아닌 매질에서 굴절률 n 은 빛의 **파장에 따라** 조금씩 다르다.

- 일반적으로 파장이 짧을수록(파란빛) n 이 크다
- 같은 표면에서 **파란빛이 빨간빛보다 더 크게 꺾인다**

여러 파장이 섞인 백색광이 굴절하면 색깔별로 다른 각도로 퍼진다 — **색분산 (chromatic dispersion)**.

프리즘은 두 번의 굴절로 분산을 증폭시켜 무지개색 띠를 만든다. 뉴턴이 백색광이 여러 색의 혼합임을 보인 실험이 바로 이것이다.

무지개



색분산의 가장 아름다운 예. 햇빛이 떨어지는 **물방울** 하나하나에서 굴절 → 내부 반사 → 굴절을 거치며 색깔별로 갈라진다.

무지개의 기하학

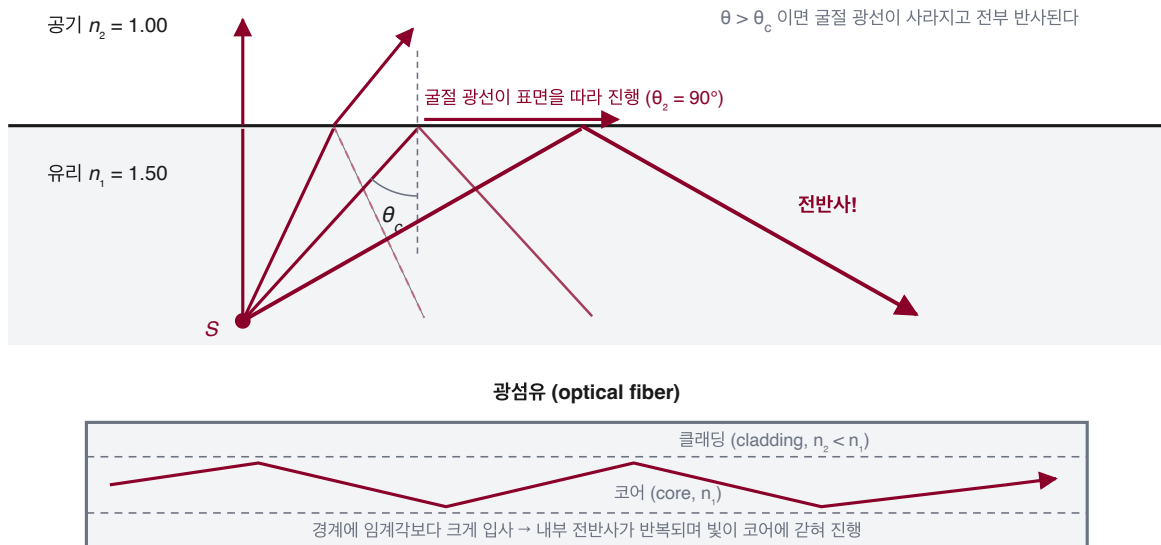
- **1차 무지개:** 물방울 안에서 **한 번** 반사. 태양 반대점(antisolar point)에서 **42°** 떨어진 원호에 나타난다
- 42° 방향의 모든 물방울이 기여하므로 무지개는 항상 **원호** 다 — 비행기에서는 완전한 원으로 보이기도 한다
- **2차 무지개:** 물방울 안에서 **두 번** 반사. **52°** 원호, 더 어둡고, **색 순서가 반대**

쌍무지개를 보면 바깥쪽(2차)의 색 배열이 안쪽(1차)과 뒤집혀 있는지 확인해 보자.

33.6 내부 전반사

빛이 갇힌다

굴절률이 큰 매질(유리) 안에서 작은 매질(공기) 쪽으로 빛을 쏘면, 입사각이 커질수록 굴절각은 더 빨리 커진다.



- 굴절각이 90° 가 되는 입사각 — **임계각(critical angle) θ_c**
- $\theta > \theta_c$ 이면 굴절 광선이 사라지고 빛이 **전부 반사** — **내부 전반사(total internal reflection)**

임계각 유도

스넬 법칙에 $\theta_1 = \theta_c, \theta_2 = 90^\circ$ 를 넣으면:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

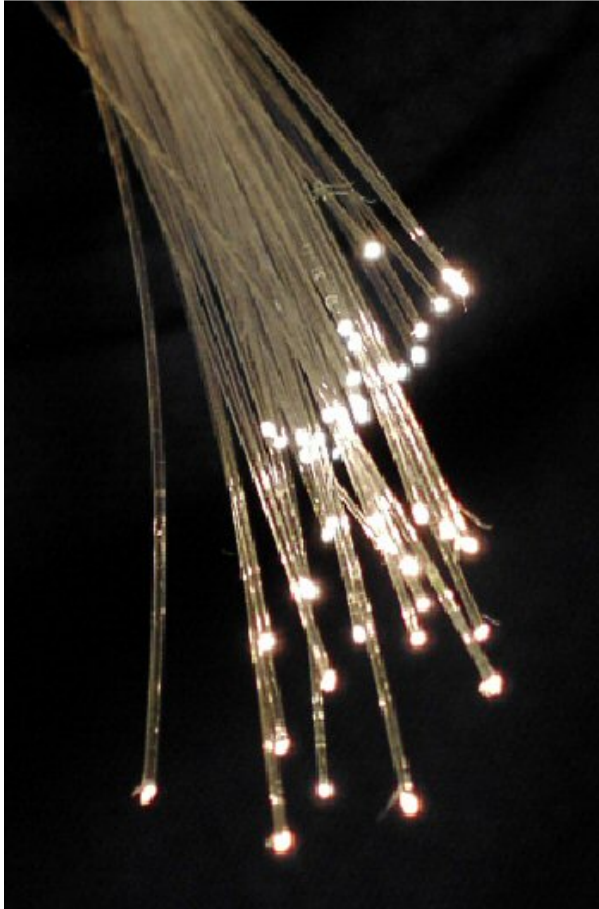
$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

사인은 1을 넘을 수 없으므로 $n_2 < n_1$ 일 때만 임계각이 존재한다 — 전반사는 **굴절률이 큰 쪽에서 작은 쪽으로** 갈 때만 일어난다.

경계	θ_c
유리(1.50) → 공기	$\sin^{-1}(1/1.50) = 41.8^\circ$
물(1.33) → 공기	$\sin^{-1}(1/1.33) = 48.8^\circ$
다이아몬드(2.42) → 공기	$\sin^{-1}(1/2.42) = 24.4^\circ$

다이아몬드가 반짝이는 비밀: 임계각이 24.4° 로 작아서, 위로 들어온 빛이 내부에서 전반사를 거듭하다 위쪽으로만 쏟아져 나오도록 커팅한다.

광섬유 — 전반사로 세상을 연결하다



광섬유(optical fiber) 는 굴절률이 큰 코어(core)를 굴절률이 작은 클래딩(cladding)이 감싼 가는 유리 실이다.

- 코어-클래딩 경계에 임계각보다 크게 입사한 빛은 전반사를 반복하며 코어에 갇혀 진행한다
- 휘어져도 빛이 새지 않는다 → 해저 케이블로 대륙 간 인터넷을 나른다
- **내시경**: 광섬유 다발로 몸속에 빛을 넣고 영상을 꺼낸다 — 절개 없이 위·대장을 본다

33.7 반사에 의한 편광

반사광은 편광되어 있다

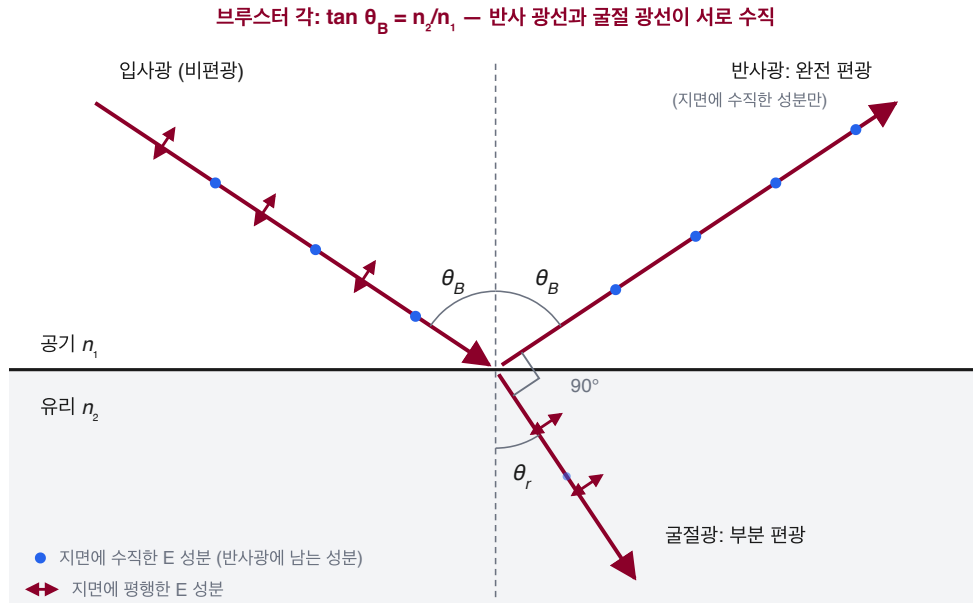
호수 수면에 반사된 햇빛을 편광 선글라스를 쓰고 보면, 렌즈를 돌릴 때 눈부심이 확 줄어드는 각도가 있다. 반사광이 **편광** 되어 있기 때문이다.

비편광 빛의 $\vec{E}$ 를 두 성분으로 나누자:

- **수직 성분**: 입사면(입사·반사·굴절 광선이 담긴 평면)에 수직 — 그림에서 점으로 표시
- **평행 성분**: 입사면에 평행 — 양방향 화살표로 표시

일반적으로 반사광에는 두 성분이 섞여 있지만(부분 편광), 특별한 입사각에서는 **수직 성분만** 남는다.

브루스터 각



그 특별한 각이 **브루스터 각(Brewster angle)** θ_B 이다. 이 각으로 입사하면:

- 반사광: 입사면에 수직인 성분만 — **완전 편광**
- 굴절광: 평행 성분 전부 + 수직 성분 일부 — **부분 편광**
- 실험적 사실: 이때 **반사 광선과 굴절 광선이 서로 수직** 이다

브루스터 법칙 유도

반사각은 θ_B , 굴절각을 θ_r 이라 하자. 반사 광선 $\perp$ 굴절 광선이므로 (기하학):

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ$$

스넬 법칙 $n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_r$ 에 $\theta_r = 90^\circ - \theta_B$ 를 대입:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

$$\boxed{\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}} \quad (\text{브루스터 법칙})$$

공기($n_1 \approx 1$) $\rightarrow$ 물(1.33): $\theta_B = \tan^{-1} 1.33 = 53.1^\circ$. 공기 $\rightarrow$ 유리(1.50): $\theta_B = 56.3^\circ$.

수면 반사광은 수면과 나란한(수평) 편광이 강하다 $\rightarrow$ 편광 선글라스의 투과축을 **세로**로 만드는 이유다. 레이저 공진기의 브루스터 창(Brewster window)도 같은 원리를 쓴다.

Review & Summary

핵심 개념

- **전자기파**: 진동하는 $\vec{E}$ 와 $\vec{B}$ 가 서로를 유도하며 진공을 c 로 진행하는 횡파. 매질이 필요 없다
- $\vec{E} \perp \vec{B} \perp$ 진행 방향, 같은 위상, $E/B = c$, $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$
- **포인팅 벡터**: 에너지 흐름의 방향과 크기. 세기는 $I = E_{\text{rms}}^2/c\mu_0$, 점광원은 $I = P_s/4\pi r^2$
- **복사 압력**: 빛은 운동량도 나른다 — 흡수 I/c , 반사 $2I/c$
- **편광**: 비편광 $\rightarrow$ 편광판 $\rightarrow$ 절반 규칙. 편광 $\rightarrow$ 편광판 $\rightarrow$ 말뤼스 법칙
- **기하광학**: 반사 법칙, 스넬 법칙, 임계각(전반사), 브루스터 각(반사 편광)

핵심 공식

개념	공식
파동식	$E = E_m \sin(kx - \omega t), B = B_m \sin(kx - \omega t), E/B = c$
빛의 속력	$c = \lambda f = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$
포인팅 벡터·세기	$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{B}/\mu_0, I = E_{\text{rms}}^2/c\mu_0, I = P_s/4\pi r^2$
복사 압력	$p_r = I/c$ (흡수), $p_r = 2I/c$ (반사)
편광	$I = \frac{1}{2}I_0$ (비편광), $I = I_0 \cos^2 \theta$ (편광, 말뤼스)
굴절·전반사·브루스터	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1), \theta_B = \tan^{-1}(n_2/n_1)$

기억할 것:

- 전자기파의 전기 에너지와 자기 에너지는 언제나 반반 ($u_E = u_B$)
- 전반사는 굴절률이 큰 매질 $\rightarrow$ 작은 매질로 갈 때만 ($n_1 > n_2$)
- 절반 규칙은 비편광 입사, 말뤼스 법칙은 편광 입사에만 쓴다