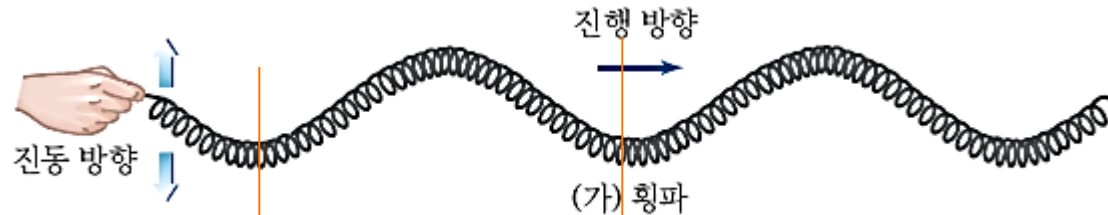


# >>> 25& 27. 빛의 반사, 굴절, 간섭

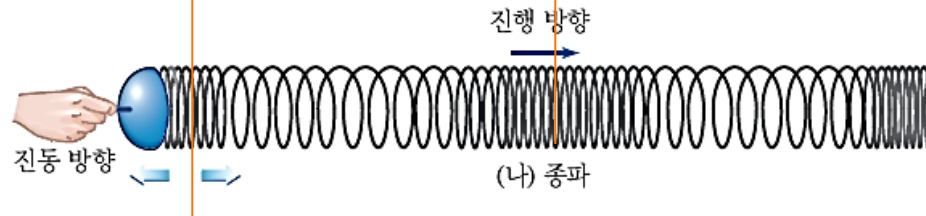
- 25.1 빛의 본질
- 25.2 기하 광학에서의 광선 모형
- 25.3 분석 모형: 반사파
- 25.4 분석 모형: 굴절파
- 25.5 분산과 프리즘
- 25.6 호이겐스의 원리
- 25.7 내부 전반사
- 25.8 연결 주제: 광섬유



# 횡파와 종파



- 횡파: 파동의 진행방향과 매질의 진동 방향이 수직(횡파 = 고저파)  
    횡파의 예 : 전자기파, 지진파의 S파, 등...



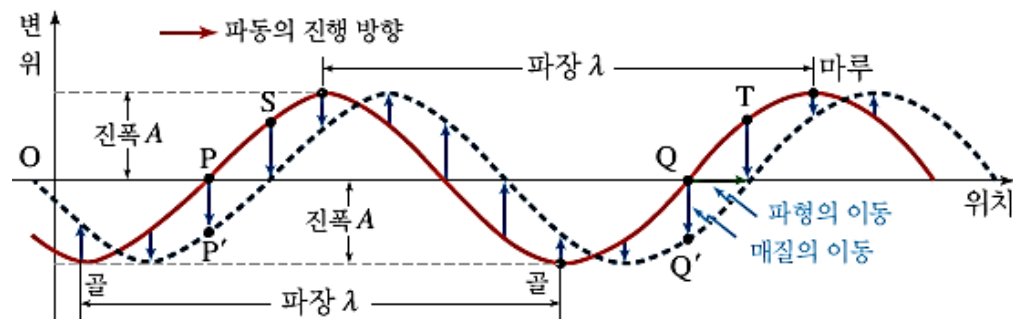
- 종파: 파동의 진행방향과 매질의 진동 방향이 평행(종파 = 소밀파)  
    종파의 예 : 음파, 지진파의 P파,



# 주기적인 파동 (Periodic Waves)

» 조화파 주기적인 파동의 가장 기본적인 형태이다.

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$



$$y(x) = A \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda} + \delta\right) = A \sin(kx + \delta), \quad \delta: \text{초기위상}, (kx + \delta) \text{ 위상}$$

파동수 (wave number):  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  (단위:  $\text{rad/m}$ )

각진동수:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi v}{\lambda}$  (단위:  $\text{rad/s}$ )

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

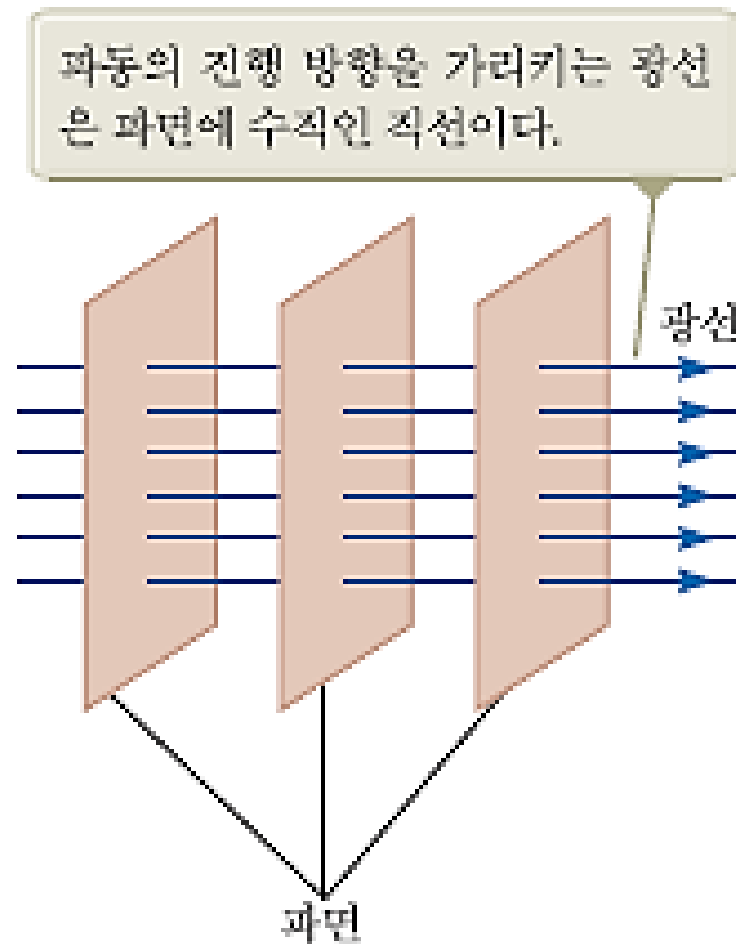
속력  $v$ 로  $x$ 가 증가하는 방향으로 진행하는 파동에 대해서는

$$y(x, t) = A \sin k(x - vt) = A \sin(kx - kvt) = A \sin(kx - \omega t) \quad \text{조화파동}$$



## 25.2 기하 광학에서의 광선 모형

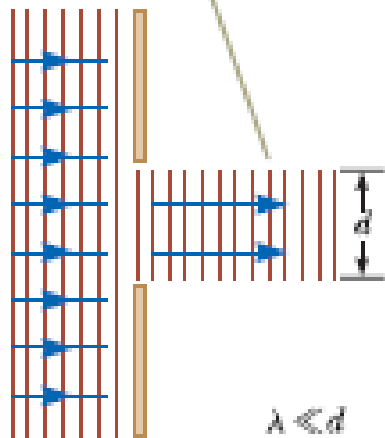
광선 근사(ray approximation) : 단일 파동의 전파 방향인 광선을 바탕으로 한 기하학적인 모형. 거울 프리즘과 같은 광학 도구 등에서의 빛을 설명하기 편리함.



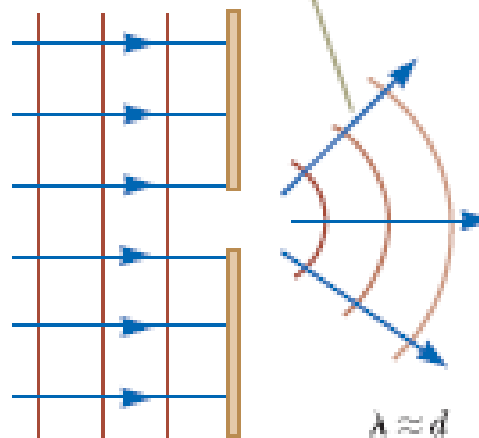
# 회절

- » **회절**은 빛(전자기파)이 공간을 전파해가거나 또는 장애물을 만나서 굴절하거나 퍼져나가는 현상을 말하는 것으로 빛뿐만이 아니라 모든 종류의 파동에서 일어난다. 사진기, 현미경, 망원경 등과 같은 모든 일정한 구경을 갖는 광학기기들은 모두 회절이 생긴다고 생각할 수 있다.

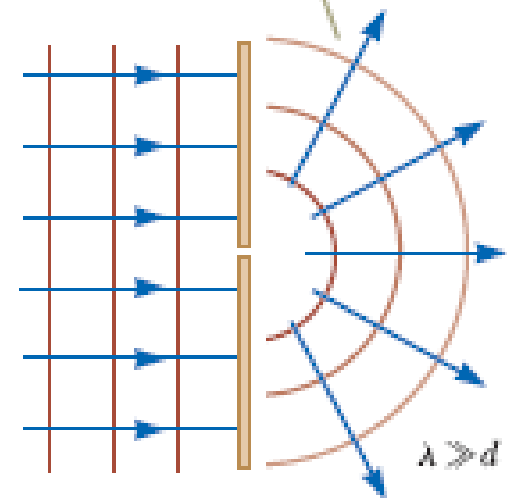
$\lambda \ll d$ 인 경우는 회절이 거의 일어나지 않으며, 광선 근사는 유효하다.



$\lambda \approx d$ 인 경우 회절 현상이 나타난다.



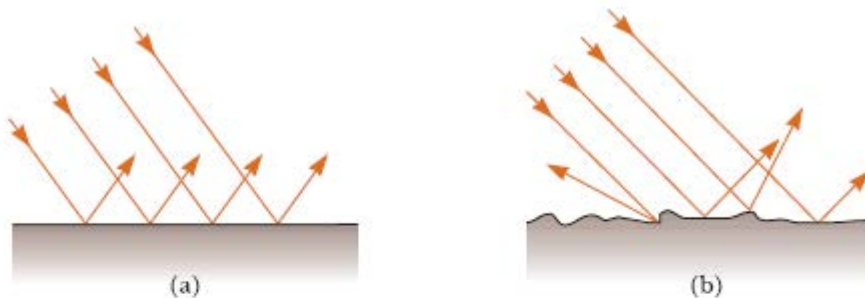
$\lambda \gg d$ 인 경우 좁은 구멍과의 점광원처럼 된다.



# 분석 모형:반사파

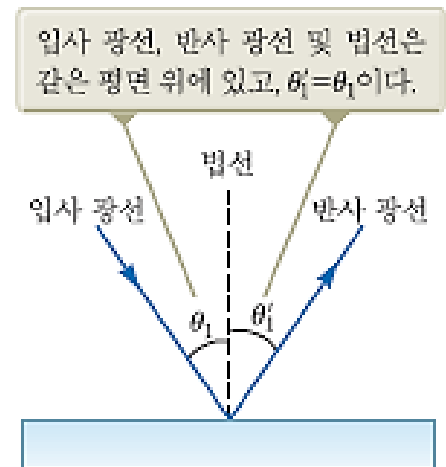
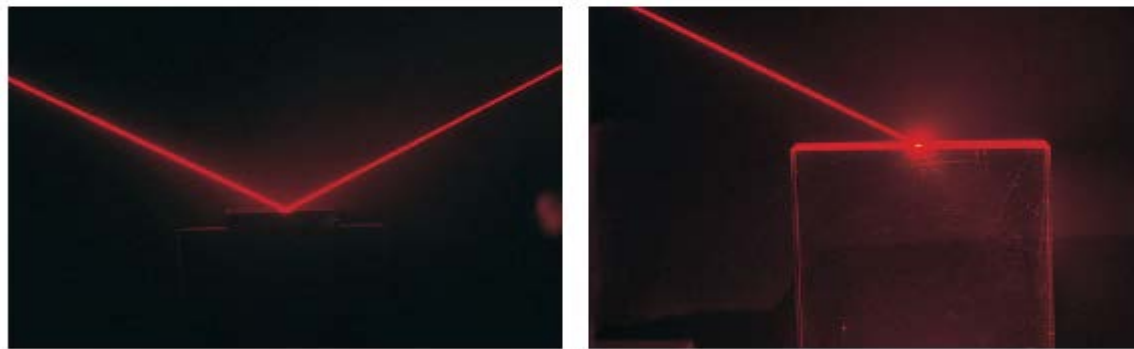
**정반사**(specular reflection): 반사 광선은 서로 평행하게 된다. 반사 광선의 방향은 입사 광선을 포함하고 반사면에 수직인 평면 상에 놓인다.

**난반사**(diffuse reflection): 거친 면으로부터 반사될 때 반사 광선은 여러 방향으로 흩어진다.



$$\theta'_1 = \theta_1$$

반사의 법칙(law of reflection)



## 예제 25.1 이중으로 반사된 광선

그림과 같이 두 개의 거울이 서로  $120^\circ$ 의 각을 이루고 놓여있다. 거울  $M_1$ 에  $65^\circ$ 의 입사각으로 들어온 광선이 거울  $M_2$ 로부터 반사될 때의 방향을 구하라.

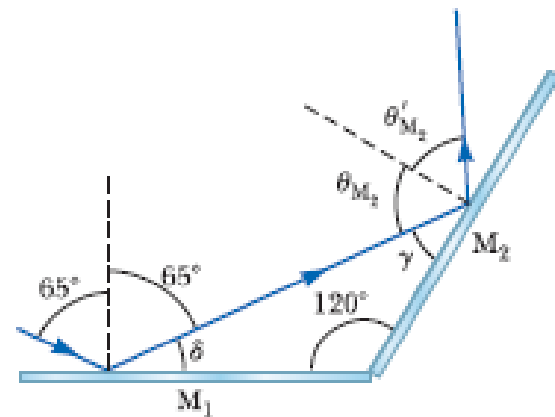
**풀이** 첫 번째 반사 광선이 수평면과 이루는 각도

$$\delta = 90^\circ - 65^\circ = 25^\circ$$

$$\gamma = 180^\circ - 25^\circ - 120^\circ = 35^\circ$$

$$\theta_{M_2} = 90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$$

$$\theta'_{M_1} = \theta_{M_2} = 55^\circ$$



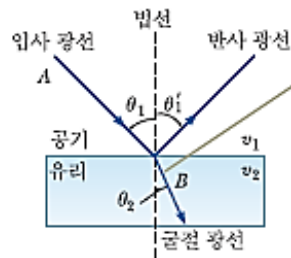
그림에서 입사 광선과 반사 광선을 거울 뒤로 연장하면 두 광선은  $60^\circ$ 의 각으로 교차할 것이며, 광선의 방향 변화는 모두  $120^\circ$ 가 된다. 이는 곧 거울의 사이각이다.

광선의 방향 변화는 항상 거울의 사이각과 일치하지는 않으며, 위의 경우는 특별한 경우이다. 사이각이  $90^\circ$ 인 경우 방향 변화는  $180^\circ$ 가 되어 반사된 빛은 원래의 방향으로 돌아가게 된다.

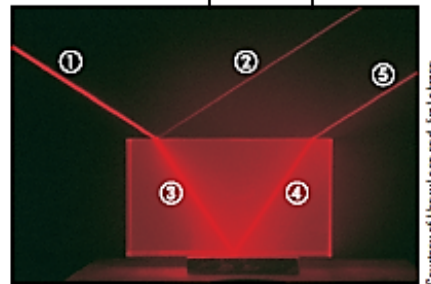
# 분석모형: 굴절파

한 매질에서 진행 중인 광선이 다른 매질과의 경계면에 닿으면 에너지의 일부는 반사되고, 나머지는 두 번째 매질 속으로 투과된다. 이때 투과되는 광선은 경계면에서 꺾이며 굴절(refraction)되었다고 한다.

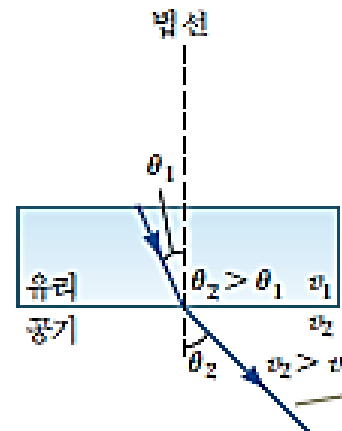
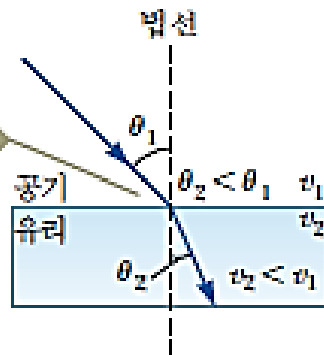
모든 광선과 법선은 같은 평면에 있으며, 굴절된 광선은  $v_2 < v_1$  이므로 법선 쪽으로 꺾이게 된다.



$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$



빛이 공기 중에서 유리로 입사할 때, 경로는 법선 방향으로 꺾인다.



유리에서 공기로 진행할 경우에는 법선에서 먼 쪽으로 꺾인다.



## 굴절률(Index of refraction):

$$n \equiv \frac{\text{진공속에서 빛의속력}}{\text{매질속에서 빛의속력}} \equiv \frac{c}{v}$$

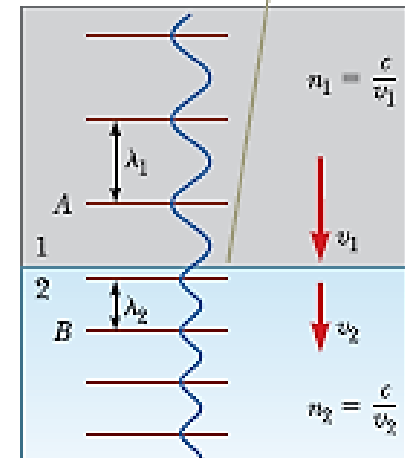
표 25.1 | 여러 가지 물질의 굴절률

물 질	굴절률	물 질	굴절률
20 °C의 고체		20 °C의 액체	
큐빅 지르코니아	2.20	벤젠	1.501
다이아몬드 (C)	2.419	이황화탄소	1.628
형석 (CaF <sub>2</sub> )	1.434	사염화탄소	1.461
석영 유리 (SiO <sub>2</sub> )	1.458	콘 시럽	2.21
인화갈륨 (GaP)	3.50	에틸알코올	1.361
크라운 유리	1.52	글리세린	1.473
납유리	1.66	물	1.333
얼음 (H <sub>2</sub> O)	1.309	0 °C 1기압의 기체	
폴리스티렌	1.49	공기	1.000293
소금 (NaCl)	1.544	이산화탄소	1.00045

Note: 진공 중에서 파장 589 nm의 빛에 대한 값이다.

빛이 한 매질에서 다른 매질로 진행할 때, 파동의 진동수  $f$ 는 변하지 않으나 파장은 변한다.

파동이 매질 사이를 진행할 경우, 파장은 변하지만 진동수는 일정하게 유지된다.



$$v_1 = \lambda_1 f \quad \text{그리고} \quad v_2 = \lambda_2 f$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

매질의 굴절률:  $n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$



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

스넬의 굴절 법칙(Snell's law of refraction)

## 예제 25.2 유리의 굴절각

파장이 589nm인 빛이 공기 중에서 투명하고 평평한 크라운 유리로 법선과 이루는 입사각 30.0°인 상태로 입사한다. (A) 굴절각, (B) 유리에서 이 빛의 속력 및 (C) 빛의 파장을 구하라.

풀이

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \text{ 이므로}$$

$$\sin \theta_2 = \left( \frac{1.00}{1.52} \right) \sin 30.0^\circ = 0.329$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(0.329) = 19.2^\circ$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.52} = 1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.52} = 388 \text{ nm}$$

## 예제 25.3 평행판을 통과하는 빛

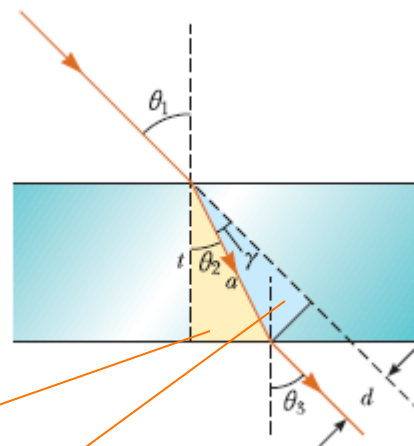
빛이 매질 1로부터 매질 2, 즉 굴절률이  $n_2$ 인 두꺼운 평행판을 통과한다. 통과된 빛이 입사한 빛과 평행함을 보여라.

풀이

$$(1) \quad \sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$$(2) \quad \sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) = \sin \theta_1$$



만약 평행판의 두께가 두 배로 되면 두 광로 사이의 거리  $d$ 도 두 배로 되는가?

$$a = \frac{t}{\cos \theta_2}$$

$$d = \frac{t}{\cos \theta_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

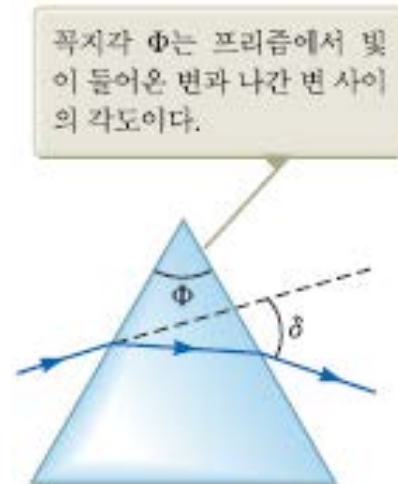
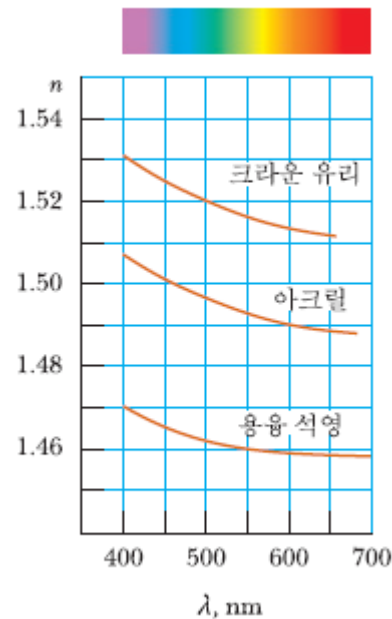
$$d = a \sin \gamma = a \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

광로 사이의 거리  $d$ 가 평행판 두께에 비례한다.

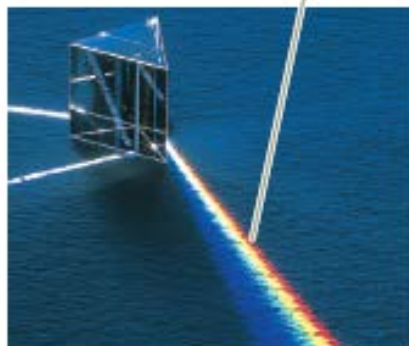
# 분산과 프리즘

굴절률은 파장에 따라 변하며, 이와 같은 성질을 **분산**(dispersion)이라고 한다.

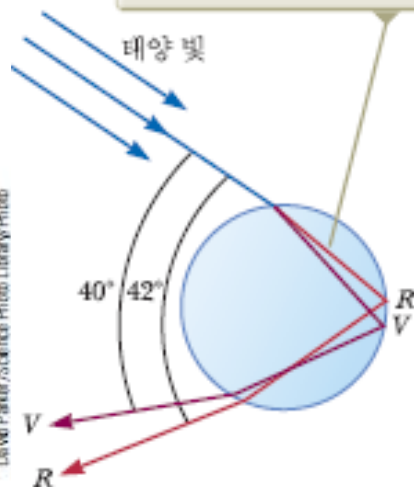
일반적으로 파장이 증가함에 따라 굴절률은 감소한다. 이는 빛이 어떤 물질에서 굴절될 때 파란색 빛이 빨간색 빛보다 더 많이 꺾임을 의미한다.



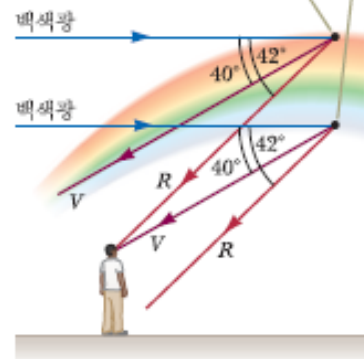
프리즘에서의 분산에 의해 파장이 다른 빛은 서로 다른 각도로 굴절되기 때문에 굴절된 빛의 색들이 분리된다.



보라색 빛이 빨간색 빛보다 더 큰 각도로 굴절된다.



높은 곳에 있는 물방울로부터 관측자의 눈으로 오는 가장 강한 빛은 빨간색이고, 반면에 낮은 곳에 있는 물방울로부터 오는 가장 강한 빛은 보라색이다.

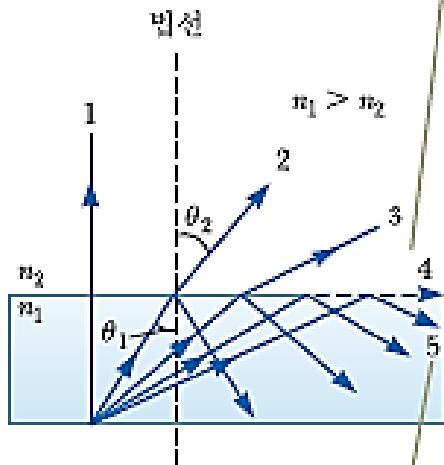


# 내부 전반사 Total Internal Reflection

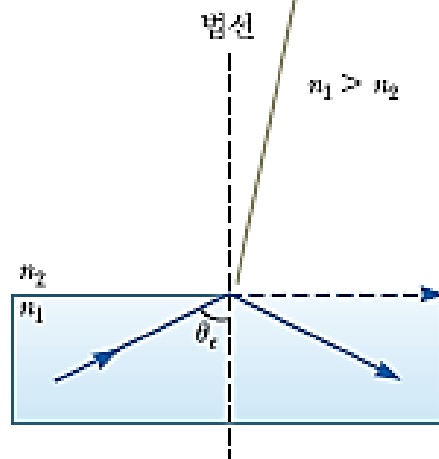
**내부 전반사**(total internal reflection): 굴절률이 큰 매질(밀한 매질)로부터 작은 매질(소한 매질)로 빛이 진행할 때 굴절 없이 반사만 일어나는 현상

입사각  $\theta_1$ 이 커짐에 따라 굴절각  $\theta_2$ 는  $90^\circ$  (광선 4)에 이를 때까지 커진다. 점선은 이 방향으로 에너지가 실제로 퍼져 나가지 않음을 나타낸다.

굴절각이  $90^\circ$ 일 때의 입사각을 임계각  $\theta_c$ 라 한다. 이 각보다 큰 입사각으로 입사한 빛의 모든 에너지는 반사된다.



입사각이 커질 경우 내부 전반사가 일어난다(광선 5).



**임계각**(critical angle)이라 하는 어떤 특정한 입사각  $\theta_c$ 에서, 굴절 광선은 경계면과 평행하게 진행하므로  $\theta_2 = 90^\circ$ 이다.

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

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2 \text{인 경우})$$

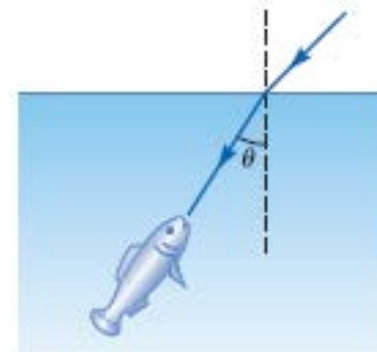
## 예제 25.4 물고기의 눈에 보이는 전경

물의 굴절률이 1.33이라면 공기-물 경계면에서 임계각은 얼마인가?

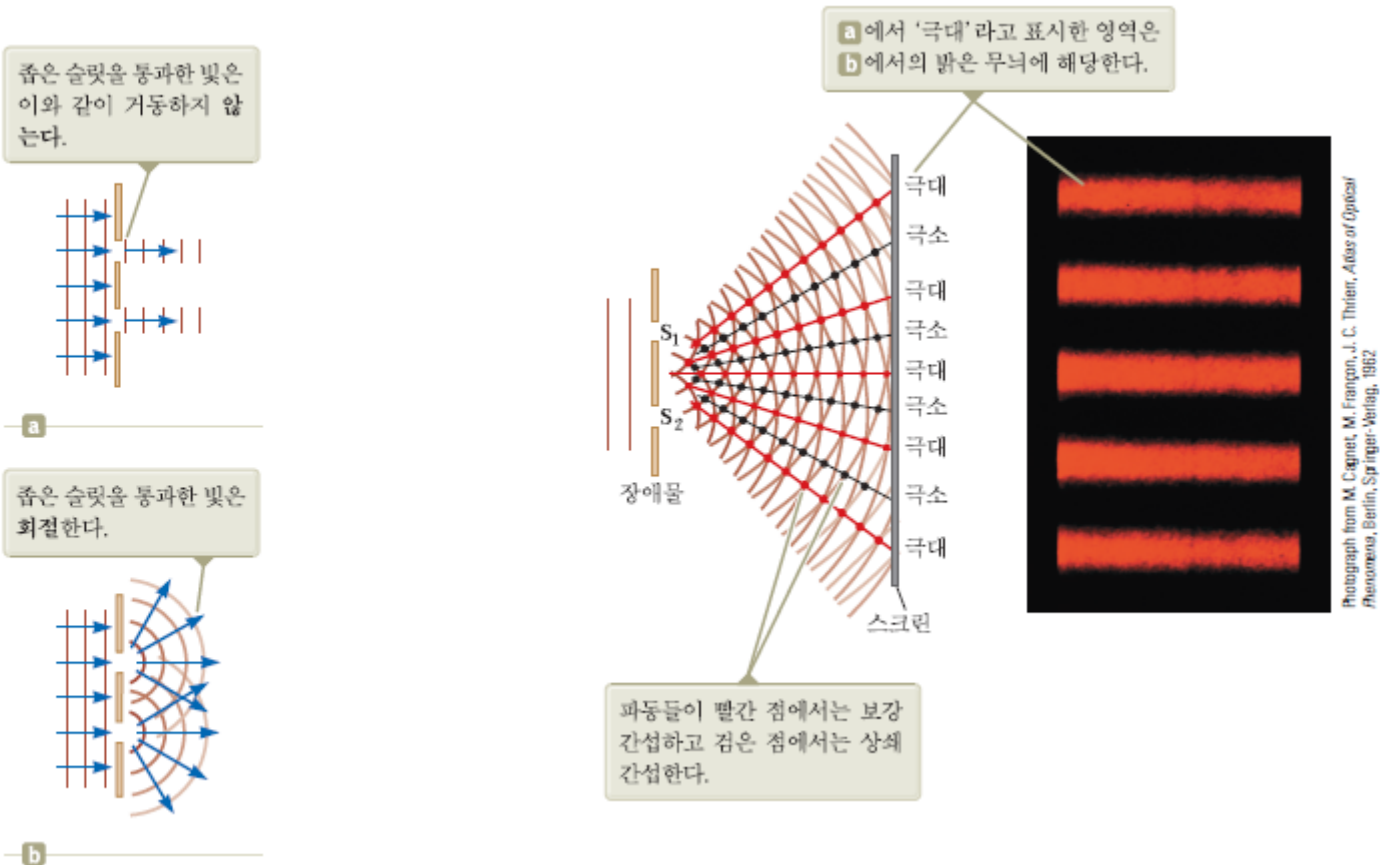
풀이

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.00}{1.33} = 0.752$$

$$\theta_c = 48.8^\circ$$



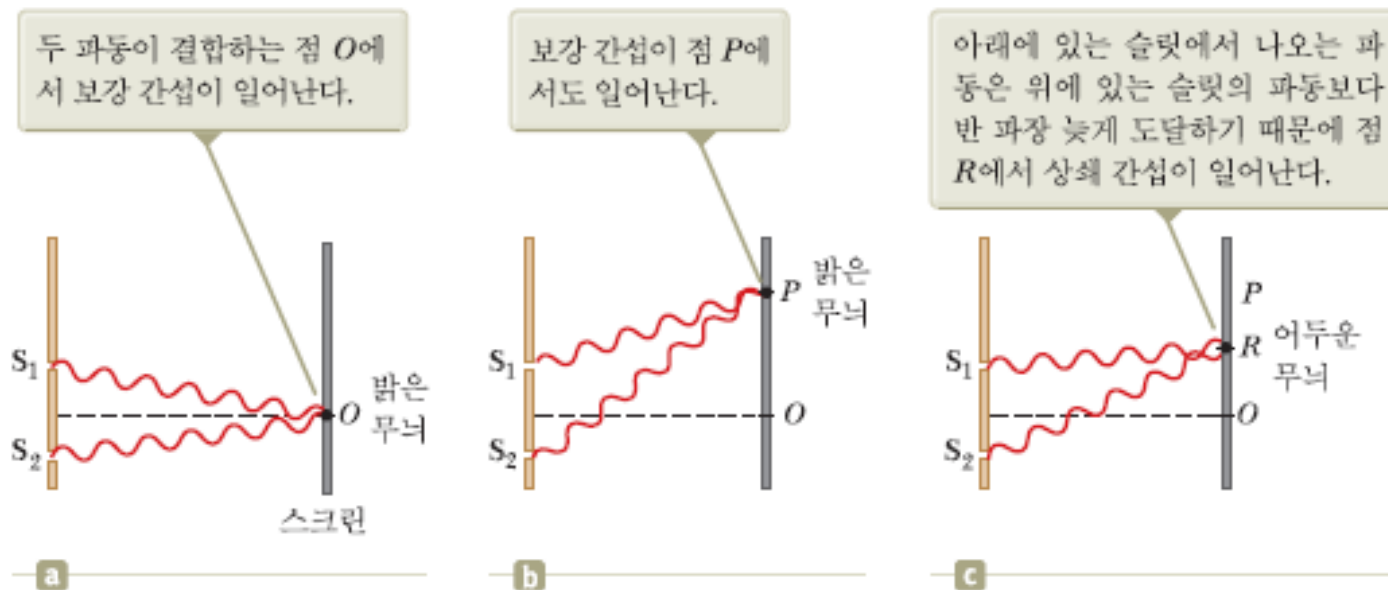
# 영의 이중 슬릿 실험



회절(diffraction) : 빛이 처음 경로로부터 퍼지는 것

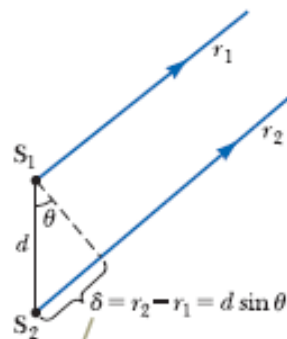
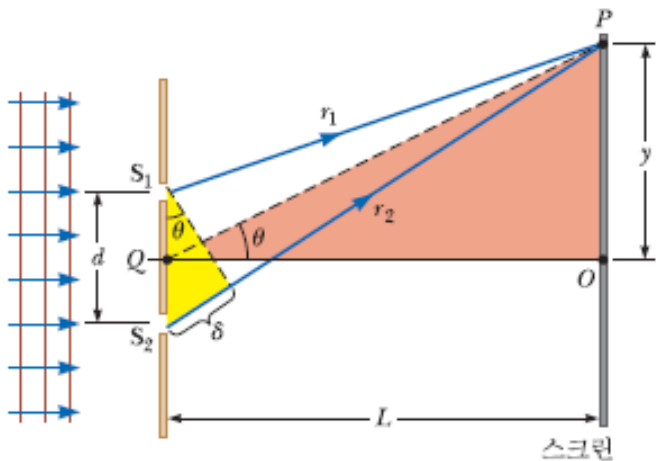


# 간섭 무늬(fringes)의 형성





# 분석 모형: 파동의 간섭



$r_1$ 이  $r_2$ 와 평행하다고 가정하면, 두 광선 사이의 경로차는  $r_2 - r_1 = d \sin \theta$ 이다.

경로차(path difference)

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

경로차가 영 또는 파장의 정수배이면, 두 파동은 점  $P$ 에서 위상이 같고 보강 간섭이 일어난다.


**보강 간섭**(constructive interference) 조건 :

$$d \sin \theta_{\text{bright}} = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

**상쇄 간섭**(destructive interference) 조건 :

$$d \sin \theta_{\text{dark}} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$m$  : 차수(order number)



$$\tan \theta = \frac{y}{L} \rightarrow$$

$$y_{\text{bright}} = L \tan \theta_{\text{bright}}$$

$$y_{\text{dark}} = L \tan \theta_{\text{dark}}$$

$$\theta \text{가 작은 경우, } \tan \theta \approx \sin \theta = \frac{y}{L}$$

$$y_{\text{bright}} = L \left( \frac{m\lambda}{d} \right) \quad (\text{작은 각})$$

$$y_{\text{dark}} = L \frac{\left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda}{d} \quad (\text{작은 각})$$

### 예제 27.1 광원의 파장 측정

이중 슬릿으로부터 스크린까지의 거리는 1.2m이고, 두 슬릿 사이의 간격은 0.030mm이다. 단색광이 이중 슬릿으로 들어가서 스크린에 간섭 무늬를 형성한다. 2차 밝은 무늬( $m=2$ )는 중심선에서 4.5 cm 떨어져 있다. (A) 빛의 파장을 구하라. (B) 이웃한 밝은 무늬들 사이의 거리를 구하라.

풀이

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{y_{\text{bright}} d}{mL} \\ &= \frac{(4.5 \times 10^{-2} \text{ m})(3.0 \times 10^{-5} \text{ m})}{2(1.2 \text{ m})} \\ &= 5.6 \times 10^{-7} \text{ m} = 560 \text{ nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{m+1} - y_m &= L \frac{(m+1)\lambda}{d} - L \left( \frac{m\lambda}{d} \right) \\ &= L \left( \frac{\lambda}{d} \right) = 1.2 \left( \frac{5.6 \times 10^{-7} \text{ m}}{3.0 \times 10^{-5} \text{ m}} \right) \\ &= 2.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.2 \text{ cm} \end{aligned}$$

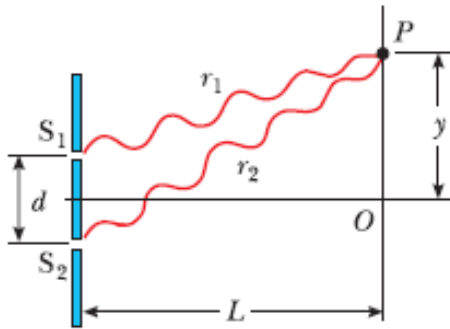
# 이중 슬릿에 의한 간섭 무늬의 세기 분포

$$\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = 2 \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2) \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2)$$

이중 슬릿에 의한 간섭 무늬의 세기 분포

$$E_1 = E_0 \sin \omega t$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi)$$



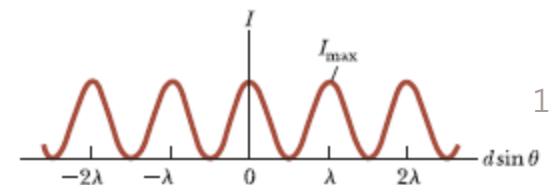
슬릿에서 두 파동의 위상이 같지만,  $P$  에서 이들의 위상차  $\phi$ 는 경로차  $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$ 에 따라 달라진다.

$$\frac{\delta}{\phi} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad \Rightarrow \quad \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$



시간 평균 빛의 세기

$$I = I_{\max} \cos^2 \left( \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)$$





# 단원 마무리 과제

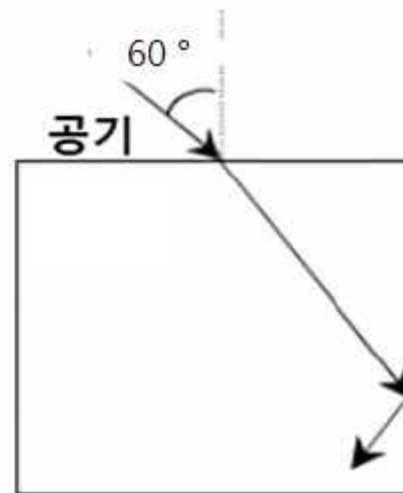
다음 문제는 풀어서 제출 (다음 시간까지 제출)

- » 2013년 2학기 기말 기출시험 문제: 5번
- » 2015년 2학기 기말 기출시험 문제: 6번
- » 2014년 2학기 기말 기출시험 문제: 6번
- » 예제 25-3, 27-1

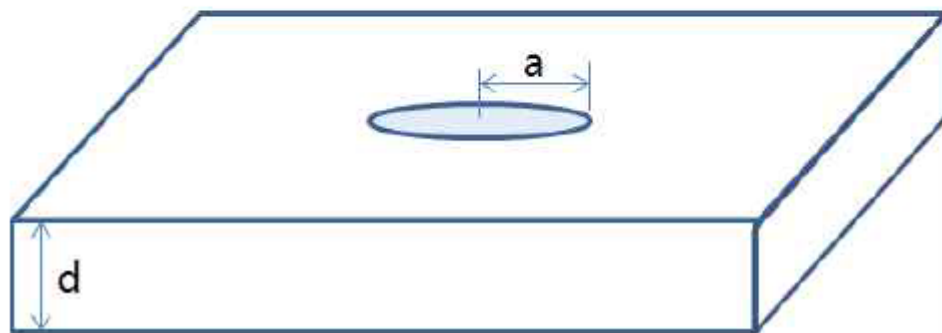


2013-2-f

5. 그림과 같이 공기 중에서 정육면체 모양의 어떤 투명블록의 윗면에  $60^\circ$ 의 각도로 빛이 입사하여 굴절된 후, 블록의 우측면에서 전반사가 일어나려면 이 투명블록의 굴절률은 최소한 얼마 이상이어야 하는가? (단, 공기의 굴절률은 1이다.) [10점] [난이도 상]

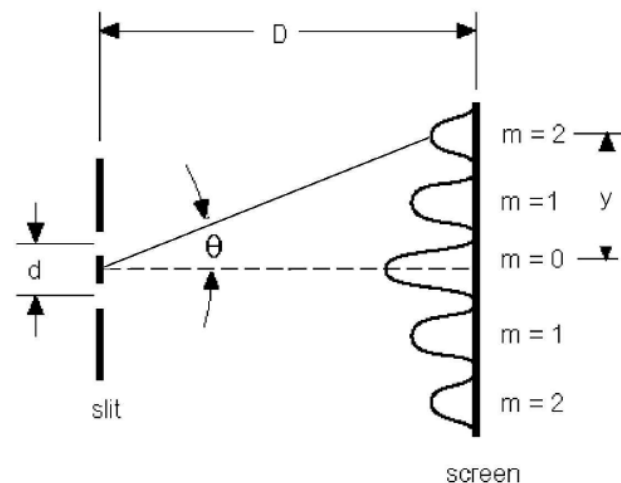


6. 그림과 같이 수영장에 덮개가 덮여있고, 이 덮개에는 반지름이  $a$ 인 원형 구멍이 뚫어져 있다. 수심이  $d$ 일 때, 구멍을 통해 볼 수 있는 수영장 바닥의 넓이를 구하시오. (공기의 굴절률은 1, 물의 굴절률은  $n$  이라 하자.)(10점)  
(난이도 상)



6. LASER가 이중슬릿을 통과하여 간섭무늬가 생겼다. 슬릿간의 간격이  $0.1\text{mm}$ , 각 슬릿의 폭이  $0.04\text{mm}$ 이다. 슬릿과 스크린 사이의 거리는  $2\text{m}$ 이다.(난이도 하 10점)

(가)  $m=2$ 에 밝은 무늬가 생겼는데 가운데 가장 밝은 지점으로부터 거리를 측정하니  $26.6\text{ mm}$ 였다.



‘ $\theta$ 가 매우 작다’라는 사실로부터 근사식을 이용하여 이 LASER의 파장을 구하라.

(나) 이 실험을 수조(water tank) 안에서 한다면, (가)에서 측정한 거리  $m=0$ 에서  $m=2$  까지의 거리의 값은 얼마가 되겠는가? 물의 굴절률은  $1.33$  이다.