4.3.3 반사율

- 반사계수는 입사파의 전기장 진폭에 대한 반사파 전기장의 진폭의 비(ratio)를 의미
- **반사율은** 단위 시간당 입사하는 에너지에 대한 반사하는 에너지의 비를 의미함 이를 수식으로 표현하면,

$$\text{반사율}(R):\ R \equiv \frac{\text{단위시간당 반사 에너지}}{\text{단위시간당 입사 에너지}} \tag{4.3.22}$$

- 또한, 경계면에 평행한 단면적 A에 단위시간당 입사하는 평균 에너지를 **포인팅 (Poynting) 벡터**를 사용하여 나타내면,

$$P(\text{단위시간당 에너지}) = \langle S \rangle A \tag{4.3.23}$$

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} v \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \frac{n}{\mu c} E^2$$

$$\left(n = \frac{c}{v},\ c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},\ v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right)$$

4.3.3 반사율

- TE-편광과 TM-편광에 대한 반사율은 각각

$$R_s = \frac{P_r}{P_i} = \frac{< S_r > A\cos\theta_r}{< S_i > A\cos\theta_i} = \left|\frac{E_r}{E_i}\right|^2_{TE} = |r_s|^2$$

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{< S_r > A\cos\theta_r}{< S_i > A\cos\theta_i} = \left|\frac{E_r}{E_i}\right|^2_{TM} = |r_p|^2 \qquad (4.3.24)$$

- 투과율도 단위 시간당 입사하는 에너지에 대한 투과되는 에너지의 비를 의

$$\text{투과율}(T):\ T \equiv \frac{\text{단위시간당 통과 에너지}}{\text{단위시간당 입사 엔너지}} \qquad (4.3.25)$$

이를 포인팅 벡터를 이용하여 나타내면,

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{< S_t > A_t}{< S_i > A_i} = \frac{< S_t > A\cos\theta_t}{< S_i > A\cos\theta_i} \qquad (4.3.26)$$

$$= \frac{n_t E_t^2 \cos\theta_t}{n_i E_i^2 \cos\theta_i} = \frac{n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i}\left(\frac{E_t}{E_i}\right)^2$$

TE－편광에 대한 투과율은 $T_s = \dfrac{n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i}|t_s|^2$ 이 된다.
따라서 TE－편광에 대한 반사율과 투과율의 합을 구하면,

$$R_s + T_s = |r_s|^2 + \frac{n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i}|t_s|^2 \tag{4.3.27}$$

$$= \left[\frac{\cos\theta_i - n\cos\theta_t}{\cos\theta_i + n\cos\theta_t}\right]^2 + \frac{n\cos\theta_t}{\cos\theta_i}\left[\frac{2\cos\theta_i}{\cos\theta_i + n\cos\theta_t}\right]^2$$

$$= 1 \ (n_t / n_i = n)$$

이 되어 **에너지가 보존됨**을 알 수 있다.

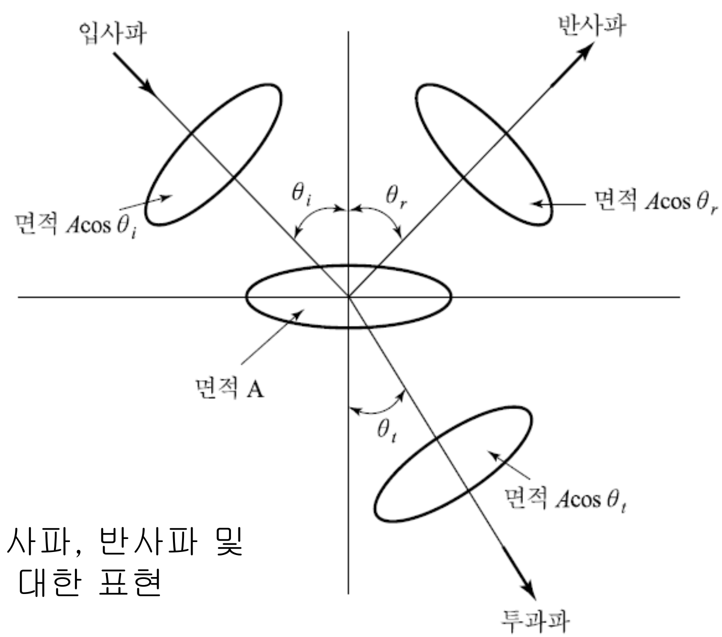

그림 4-10. 경계면에서 면적 A를 입사파, 반사파 및 투과파의 진행방향에 수직인 면적에 대한 표현

예제 1

수직 입사의 경우 반사 및 투과율에 대하여 알아보라.

해답

한 예로서 빛이 경계면에 수직으로 입사하는 경우를 생각하여 보자. 이 경우에 입사각과 굴절각은 $\theta_i = \theta_t = 0$ 이 되므로 TE－편광과 TM－편광에 대한 반사계수 및 투과계수를 구하면,

$$r_s = r_p = \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t}, \quad t_s = t_p = \frac{2n_i}{n_i + n_t}$$

이 된다. 이를 이용하여 반사율과 투과율을 구하여 함께 더하면,

$$R_s + T_s = \left[\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t}\right]^2 + \frac{n_t}{n_i}\left[\frac{2n_i}{n_i + n_t}\right]^2 = 1$$

이 성립함을 알 수 있으며, 이로부터 에너지가 보존됨을 알 수 있다.

- 서로 다른 두 매질의 경계면에서 일어나는 빛의 반사는 크게 두 가지로 구별할 수 있음
- 첫째는, 입사하는 쪽에 있는 물질의 굴절률이 굴절되어 나오는 쪽에 있는 물질의 굴절률보다 작은 경우(외부 반사)이고,
- 둘째는 이와 정 반대인 경우(내부 반사)임

① 외부 반사(External reflection)

외부반사는 입사매질의 굴절률(n_i)이 투과매질의 굴절률(n_t)보다 작기 때문에 상대굴절률의 값(n)이 $n = \dfrac{n_t}{n_i} > 1$인 경우를 말한다.

- $n > 1$ 이므로 입사광에 대한 TE-편광 TM-편광의 반사 및 투과계수가 실수값
- 그림 4-11에 굴절률이 1.5인 유리에 대한 외부 반사를 입사각에 대한 반사계수 및 반사율을 계산한 것
- 그림 4-11(b)로부터 약 30°까지의 입사각에 대해서는 반사율이 약 0.04 (4 %) 정도를 유지
- 계면과 비스듬하게 입사하는 경우(입사각이
- 거의 90°)에는 1 (100 %)로 갑자기 증가함

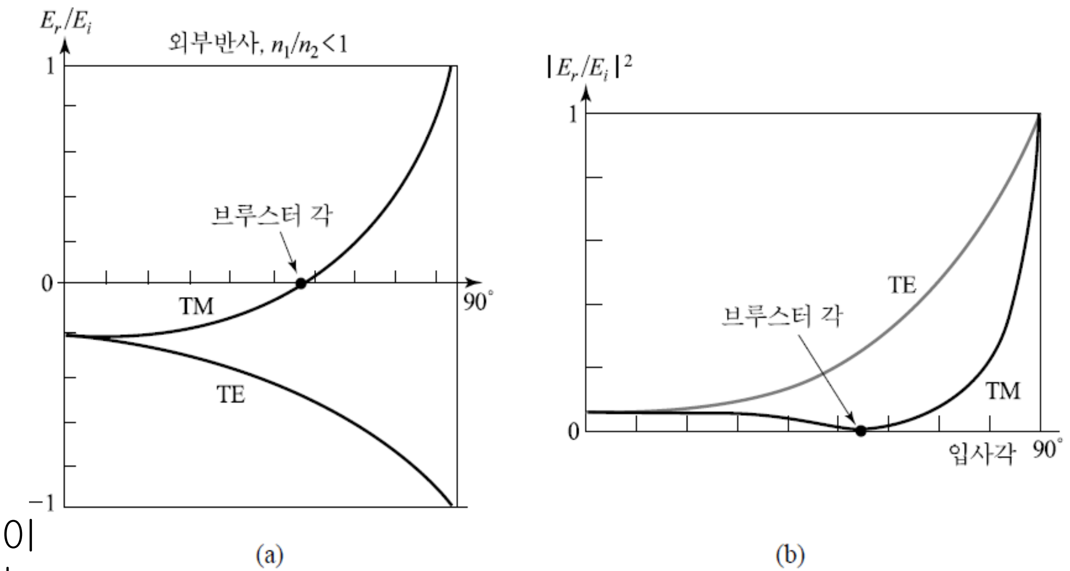

그림 4.11 굴절률이 1.5인 유리에 대한 외부반사

② 내부반사($n_i > n_t$, 즉 $n < 1$인 경우)

내부반사의 경우에는 입사매질의 굴절률이 투과매질의 굴절률보다 크므로, 상대 굴절률(n)에 대해 $\sin\theta_i > n$ $[\theta_i > \sin^{-1}(n)]$을 만족하는 특수 각이 존재하게 되는데 이를 임계각이라 한다. 공기에 대한 상대 굴절률이 1.5인 유리의 경우에 임계각은

$$\theta_{critical} = \sin^{-1}\frac{1}{1.5} \approx 41°$$

가 되며, 이보다 큰 각으로 입사하는 모든 빛은 경계면으로부터 **100% 반사하게 된다.** 이와 같이 임계각보다 큰 각으로 입사하는 빛에 대해 100% 반사한다는 사실은 (4-3-18)식과 (4-3-19)식을 사용하면 쉽게 증명이 된다.

입사각이 임계각보다 큰 경우, (4-3-17)식과 (4-3-18)식의 제곱근 안의 값은 복소수가 되어 각각

$$r_s = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} = \frac{\cos\theta_i - i\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}}{\cos\theta_i + i\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}} \qquad (4.3.17a)$$

$$r_p = \frac{-n\cos\theta_i + \cos\theta_t}{n\cos\theta_i + \cos\theta_t} = \frac{-n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} = \frac{-n^2\cos\theta_i + i\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}}{n^2\cos\theta_i + i\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}} \qquad (4.3.18a)$$

4.3.4 외부 및 내부반사

따라서 반사율(R)은 $R = |r_s|^2 = r_s r_s^*$ 또는 $R = |r_p|^2 = r_p r_p^*$이므로

반사율(R)을 구해보면 $R = 1$이 됨을 쉽게 알 수 있으며,

그림 4.12는 굴절률이 1.5인 유리에 대한 내부반사의 경우,

입사각에 대한 E_r / E_i와 $|E_r / E_i|^2$의 그래프이다.

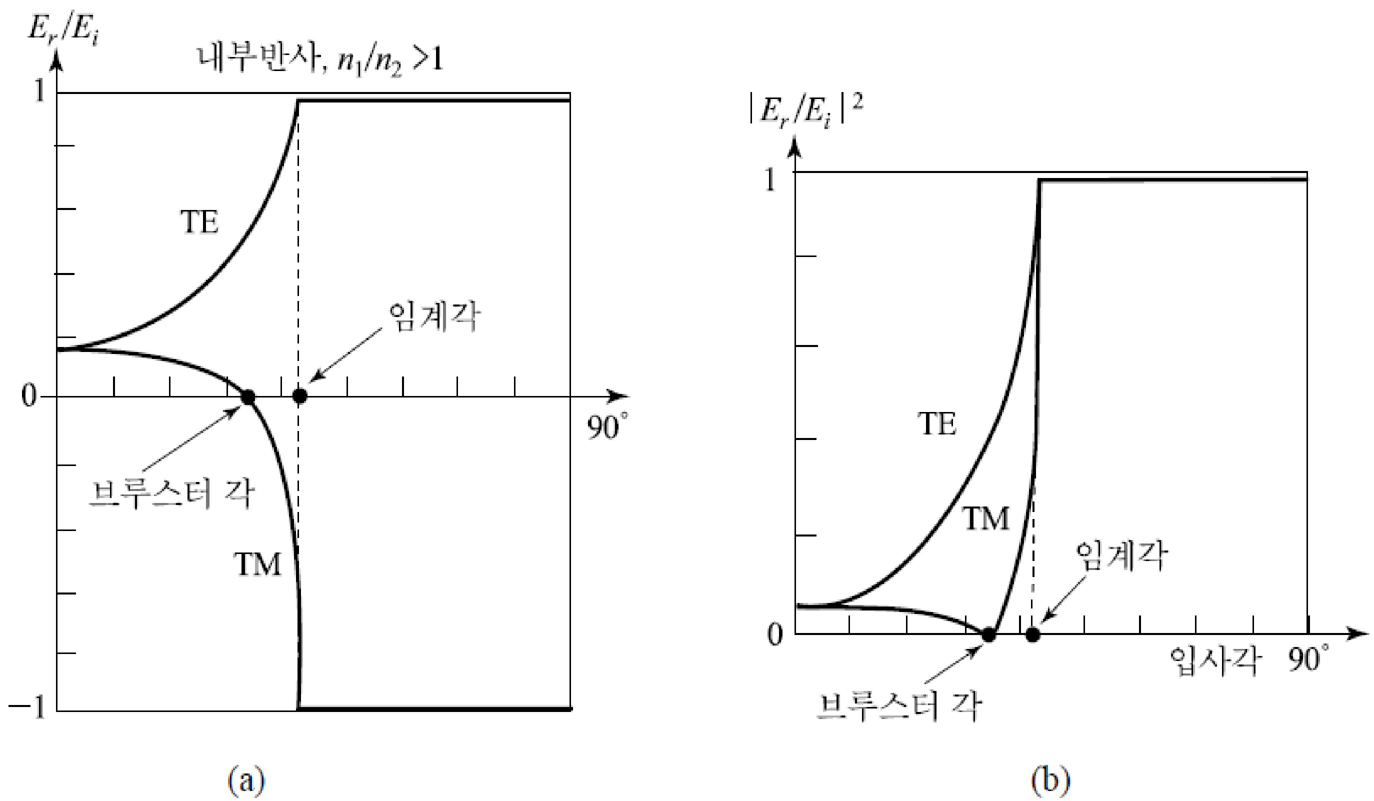

그림 4.12 굴절률이 1.5인 유리에 대한 내부 반사

4.4 브루스터 각(Brewster Angle)

TM－편광의 경우에 반사계수(r_p)가 "영"이 되는 특수한 입사각이 존재하는데 이 각을 편광 각(polarizing angle) 또는 브루스터 각(θ_B: Brewster angle)이라 한다.

브루스터각으로 입사한 빛의 경우에 **TM-편광된 빛이 반사되지 않으므로** 반사파는 완전 TE-편광된 빛이 되어 **브루스터각을 편광각**이라고도 한다.

이는 입사각과 굴절각이 $\theta_i + \theta_t = 90°$ 되는 조건하에서 일어나므로,

$$\theta_B = \tan^{-1}(n_t / n_i) = \tan^{-1} n$$

θ_B 로 입사하는 경우에 $r_p = 0$이 되므로,

이는 레이저에서와 같이 반사에 의한 빛의 손실을 줄이는데 있어서 매우 중요한 의미

이러한 브루스터각이 얻어지는 조건을 수식을 사용하여 구해보면 다음과 같다.

4.4 브루스터 각(Brewster Angle)

$$r_p = \frac{-n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} = 0 \;\Rightarrow\; -n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} = 0 \qquad (4.4.1)$$

양변을 제곱하면,

$$n^4\cos^2\theta_i = n^2 - \sin^2\theta_i \qquad (4.4.2)$$

$$(n^2 - 1)(n^2\cos^2\theta_i + \cos^2\theta_i - 1) = 0$$

굴절률이 서로 다른 두 매질에 대한 상대 굴절률(n)은 $n \neq 1$이므로 식 (4.4.2)으로부터

$$n^2\cos^2\theta_i + \cos^2\theta_i - 1 = 0 \qquad (4.4.3)$$

$$n^2\cos^2\theta_i = \sin^2\theta_i$$

$\Rightarrow$ $n = \tan\theta_i \;\Rightarrow\; \theta_i = \tan^{-1} n \;\Rightarrow$ 브루스터 각

4.4 브루스터 각(Brewster Angle)

공기로부터 굴절률이 1.5인 유리내로 빛이 입사할 때에 외부반사에 대한 브루스터각은

$$\theta_{Brewster} = \tan^{-1} 1.5 \approx 56.31° \qquad (4.4.4)$$

이 되며, 유리에서 공기로 입사할 경우에 일어나는 내부반사에 대한 브루스터각은

$$\theta_{Brewster} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1.5}\right) \approx 33.69° \qquad (4.4.5)$$

- 빛의 굴절률은 파장에 따라서 변화되므로 엄밀히 말해 브루스터각은 빛에 대한 파장의 함수가 됨.
- 하지만 가시영역 내에서의 굴절률의 변화는 매우 작으며,
- 이러한 브루스터각은 레이저 시스템에서 매우 중요함
- 편광되지 않은 빛이 브루스터각으로 입사하면, 반사된 빛은 입사면에 수직한 전기장 벡터를 가지고 선형 편광되므로 투과된 빛도 부분적으로 편광이 일어남
- 브루스터각에서 반사에 의한 편광은 효율적이지 못한데 그 이유는 약 15%만이 반사되기 때문이다. 이러한 배치를 여러 번 함으로서 투과파의 편광 정도를 높일 수 있음

4.4 브루스터 각(Brewster Angle)

※ Brewster window (브루스터 창)

- TM mode로 선형 편광된 빛이 그림 4-12에서와 같이 두 개의 평행한 면을 가진 유리에 브루스터각으로 입사하는 경우
- 이때에 브루스터각으로 입사하는 TM선형 편광된 빛이 처음 유리면과 부딪치는 첫 번째 경계면에서의 반사는 없음
- 또한, 두 번째 경계면에 대한 입사각 θ_r 도 내부 반사에 대한 브루스터 법칙을 만족하므로 두 번째 면으로부터의 내부 반사도 존재하지 않음

⇒ 그 결과 브루스터각으로 입사한 빛이 모두 경계면을 통과하게 되어 경계면에서의 반사에 의한 손실은 전혀 없게 됨

⇒ 이러한 경우를 브루스터 창이라 하는데, 레이저 응용에 있어서 광범위하게 사용되고 있음

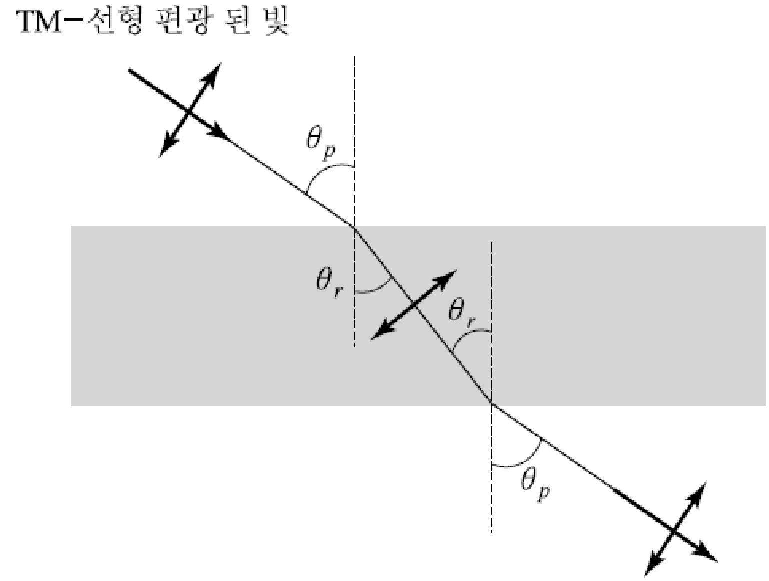

그림 4.13 브루스터 창