

## Chap 8. 편광(Polarization)

두 파가 다음과 같이  $x, y$  축에 놓인 파라고 가정하고 합성 벡터에 대해 조사하도록 한다.

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i} E_{ox} \cos(kz - \omega t) \quad (8.1)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j} E_{oy} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (8.2)$$

여기서  $\varepsilon$  은 두 파의 상대적인 위상 차(phase difference)이다.

### 8.1 Polarization의 종류

#### 8.1.1 Linear Polarization (P-state)

평면에서 선형으로 진동하는 파(wave)이며 P-state라 한다.

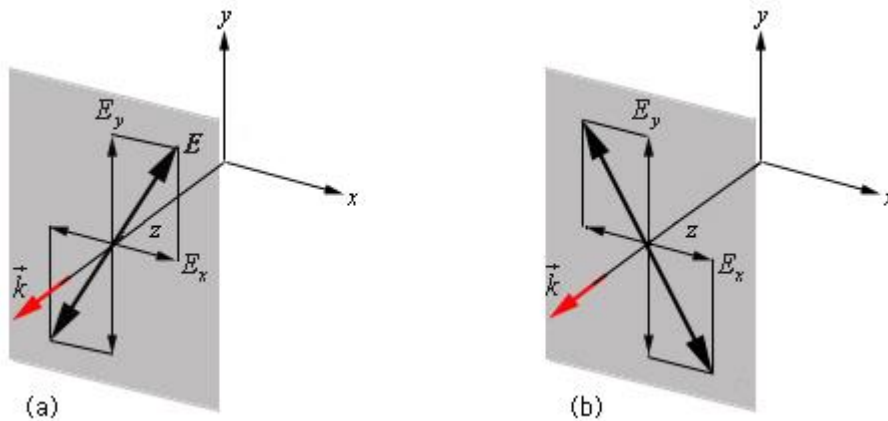
(a)  $\varepsilon = 0$  이면 (8.1)과 (8.2)의 합성벡터는

$$\vec{E} = (\hat{i} E_{ox} + \hat{j} E_{oy}) \cos(kz - \omega t) \quad (8.3)$$

(b)  $\varepsilon = \pm\pi$ , 즉 (8.2)가 (8.1)의 파와  $180^\circ$  out of phase이면

$$\vec{E} = (\hat{i} E_{ox} - \hat{j} E_{oy}) \cos(kz - \omega t) \quad (8.4)$$

(8.3)과 (8.4)는 아래 그림의 (a)와 (b)로 각각 진동하면서  $z$  축을 따라 진행하는 파이다. 이러한 파를 linear polarization (P-state) wave라 한다.



#### 8.1.2 Circular Polarization (R-state 또는 L-state)

우측 회전인 R-state와 좌측 회전인 L-state가 있다.

(a) Right circularly polarized wave (R-state)

분석을 단순화하기 위하여 각 성분의 진폭이  $E_o = E_{ox} = E_{oy}$ 로 같고  $\varepsilon = -\frac{\pi}{2}$ 라면

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i} E_o \cos(kz - \omega t) \quad (8.5)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j} E_o \sin(kz - \omega t) \quad (8.6)$$

$$\text{합성 벡터: } \vec{E} = E_o [\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (8.7)$$

$t=0$ 에서  $\vec{E}$ 의 성분  $E_x$ 와  $E_y$ 는 각각  $x, y$  기준(reference)축에 놓여 있다. 이때의 성분은

$$\vec{E}_x = \hat{i} E_o \cos kz, \quad \vec{E}_y = \hat{j} E_o \sin kz \quad (8.8)$$

$$t = kz_o / \omega \text{ 일 때 } \vec{E}_x = \hat{i} E_o, \quad \vec{E}_y = 0$$

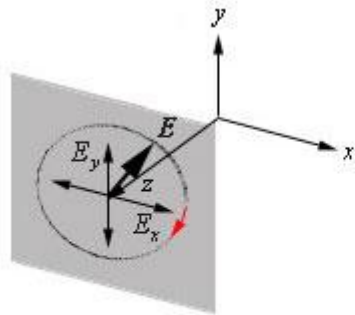
이 경우  $\vec{E}$ 는 시계방향으로 회전하며  $z$  축을 따라 진행한다. 파가 진행하는 방향의 뒤를 돌아보면 관측자는 파가 시계방향 (clockwise) 원형으로 도는 것이 관측된다. 이러한 파를 **right-circular polarization**(R-state)이라 한다. 만일 진폭이  $E_o \neq E_{ox} \neq E_{oy}$  라면 원이 아닌 타원으로 관찰될 것이다.

(b) Left circularly polarized wave (L-state)

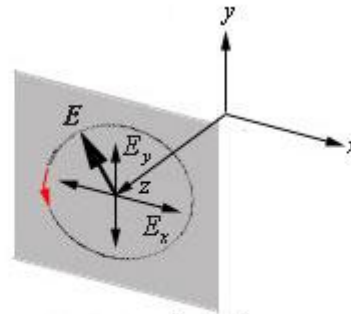
$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \text{ 일 때,}$$

$$\vec{E} = E_o [\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (8.9)$$

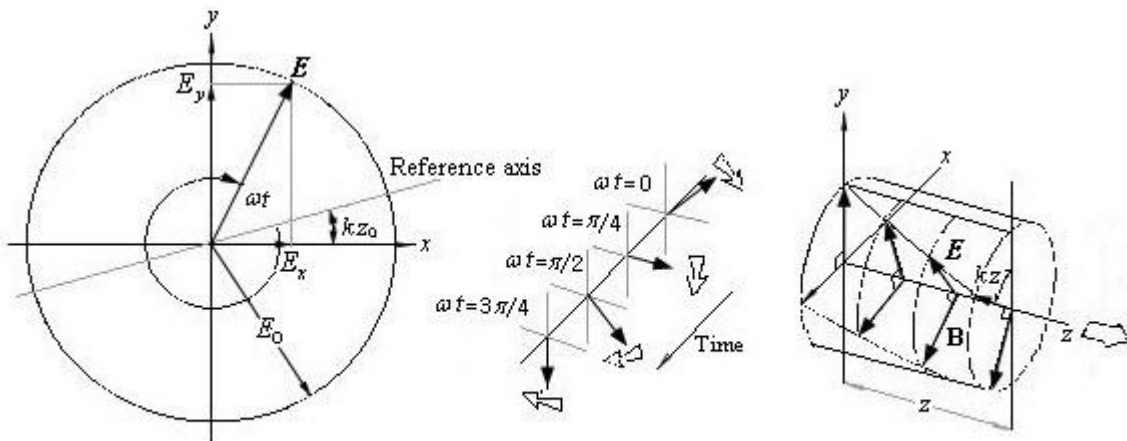
파가 진행하는 방향의 뒤를 관측자가 돌아보면 파는 반시계방향(anticlockwise), 즉 좌측으로 도는 것이 관측된다. 이러한 파를 **left-circular polarization**(L-state)이라 한다.



(a) R-state polarization



(b) L-state polarization



Rotation of the electric vector in a right-circular wave

R-state 인 (8.7)과 L-state 인 (8.9)를 더하면 다음의 **linear polarization**(P-state)이 된다.

$$\vec{E} = \hat{i} [2E_o \cos(kz - \omega t)] \quad (8.10)$$

### 8.1.3 Elliptical Polarization (E-state)

$\varepsilon$  이 일반각인 경우 (8.1)과 (8.2)를  $E_x$  와  $E_y$  성분으로 표시하자.

$$E_x = E_{ox} \cos(kz - \omega t) \rightarrow \frac{E_x}{E_{ox}} = \cos(kz - \omega t) \quad (8.11)$$

$$E_y = E_{oy} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \rightarrow \frac{E_y}{E_{oy}} = \cos(kz - \omega t) \cos \varepsilon - \sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon \quad (8.12)$$

(8.11)을 (8.12)에 대입하고 양변을 자승하면

$$\begin{aligned} \frac{E_y}{E_{oy}} &= \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon - \sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon \rightarrow \frac{E_y}{E_{oy}} - \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon = -\sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon \\ \left( \frac{E_y}{E_{oy}} - \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon \right)^2 &= \sin^2(kz - \omega t) \sin^2 \varepsilon \end{aligned} \quad (8.13)$$

$$\ast \cos^2(kz - \omega t) + \sin^2(kz - \omega t) = 1 \rightarrow \sin^2(kz - \omega t) = 1 - \cos^2(kz - \omega t)$$

$$(8.11) \text{을 위의 값에 대입: } \sin^2(kz - \omega t) = 1 - \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2$$

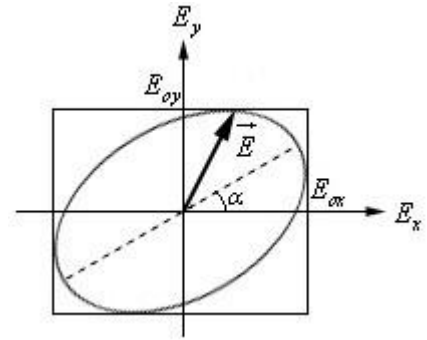
이것을 (8.13)에 대입하고 재 정리하면

$$\begin{aligned} \left( \frac{E_y}{E_{oy}} - \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon \right)^2 &= \left[ 1 - \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 \right] \sin^2 \varepsilon \\ \left( \frac{E_y}{E_{oy}} \right)^2 - 2 \left( \frac{E_y}{E_{oy}} \right) \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon \right) + \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \varepsilon \right)^2 &= \left[ 1 - \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 \right] \sin^2 \varepsilon \\ \left( \frac{E_y}{E_{oy}} \right)^2 + \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 - 2 \left( \frac{E_y}{E_{oy}} \right) \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right) \cos \varepsilon &= \sin^2 \varepsilon \end{aligned} \quad (8.14)$$

이 식은 우측 그림과 같이  $(E_x, E_y)$ -coordinates에서 다음의 각  $\alpha$  로 기울어진 타원(ellipse) 방정식이다.

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{ox}E_{oy} \cos \varepsilon}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \quad (8.15)$$

(8.14)와 (8.15)는 편광을 일반화한 수식들이다. 즉  $\varepsilon$  에 특수한 값들을 대입하면 위에서 공부한 모든 종류의 편광을 얻을 수 있다.



(a)  $\varepsilon = (m + \frac{1}{2})\pi$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) 이면, (8.15)는  $\tan 2\alpha = 0$  그리고 (8.14)는

$$\left( \frac{E_y}{E_{oy}} \right)^2 + \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 = 1 \quad (8.16)$$

이것은 기울어지지 않은 타원이다. 만일  $E_{ox} = E_{oy} = E_o$  이면,  $E_x^2 + E_y^2 = E_o^2$  으로 원이다.

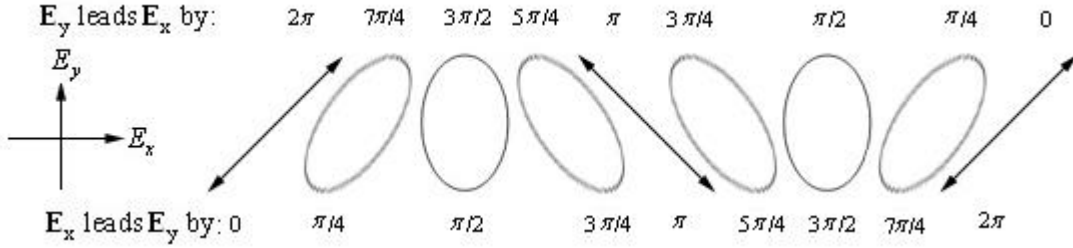
(b)  $\varepsilon = 2m\pi$  또는  $\varepsilon = (2m+1)\pi$  이면, (8.14)는 각각

$$\varepsilon = 2m\pi \text{ 일 때: } \left( \frac{E_y}{E_{oy}} - \frac{E_x}{E_{ox}} \right)^2 = 0 \rightarrow E_y = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x \quad (8.17)$$

$$\varepsilon = (2m+1)\pi \text{ 일 때: } \left(\frac{E_y}{E_{oy}} + \frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 = 0 \rightarrow E_y = -\frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x \quad (8.18)$$

(8.17)과 (8.18)은 기울기가  $\pm E_{oy}/E_{ox}$ 인 linear polarization이다.

$E_x, E_y$ 가 lead하는 각에 따라 편광(polarization)은 다음과 같이 나타난다.



### 8.1.4 Angular Momentum and the Photon Picture

입사하는 평면 파가 원형 편광(circular polarization)이면 물질 내의 전자들은 도는  $E$ -field에 의해 원운동으로 반응할 것이다. 원형으로 편광된  $E$ -field는 두 성분이 직각이며 하나가 다른 하나에 대해  $90^\circ$  out of phase인 P-state의 빛으로 간주될 수 있다. 이들 두 파의 위상 차  $\pi/2$ 를 가지고 두 수직방향에서 동시에 전자를 이끌(drive)므로 전자의 결과적인 운동은 원운동이다. 이때  $E$ -field는 전자를 각 속도  $\omega$ 로 drive하며 그 결과 파의 각 운동량이 물질 내의 구속되어 있는 전자들에 전달된다. 이 경우 빛이 system에 전달하는 일률(power)은 다음과 같다.

$$\frac{d\xi}{dt} = \omega\tau = \omega \frac{dL}{dt} \quad (8.19)$$

여기서  $\tau$ 는 torque이고  $L$ 은 각 운동량(angular momentum)이다.

(8.19)를 미분형태가 아닌 것으로 다시 쓰면  $\xi = L\omega$ , 즉

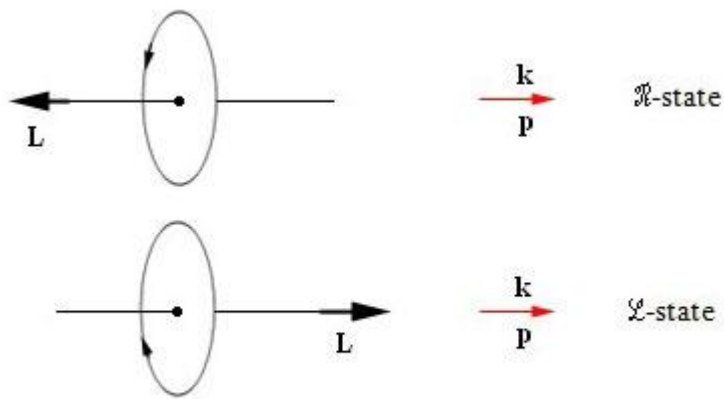
$$L = \frac{\xi}{\omega} \quad (8.20)$$

입사하는 circular wave로부터 에너지  $\xi$ 를 흡수하는 전하(charge)는 (8.20)로 표시되는 각 운동량  $L$ 과 3.6.2 절에서 기술한 선 운동량(linear momentum)  $p$ 를 동시에 흡수한다.

$$\text{Photon의 선 운동량: } p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{\lambda\nu} = \frac{\xi}{c} \quad (8.21)$$

만일 입사 광이 R-state (소스 쪽으로 바라볼 때  $\vec{E}$ 가 시계방향으로 회전)라면 그것의 각 운동량  $\vec{L}$ 는 아래 그림처럼 좌측 방향이고 반대로 L-state이면 우측 방향이며 입사광의 state 조건에 따라 물질 내의 전하는 이들 방향의 각 운동량을 흡수한다. 따라서 R-state를 흡수한 전하는 시계방향으로 돌고, L-state를 흡수한 전하는 반 시계방향으로 돌게 될 것이다. 아래 그림에서  $\vec{k}$ 는 빛이 진행하는 wave vector,  $\vec{p}$ 는 선운동량,  $\vec{L}$ 는 각 운동량을 각각 나타낸다.

보는 바와 같이 R-state의  $\vec{L}$ 는  $\vec{p}$ (또는  $\vec{k}$ )와 반 평행(antiparallel), 이와 반대로 L-state의  $\vec{L}$ 는 평행(parallel)이다.

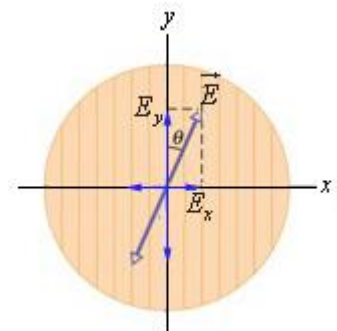


Angular momentum of a photon

전자기 파는 흡수하는 물질에  $\xi = h\nu = \hbar\omega$  인 양자화된 광자 에너지(photon energy)를 전달한다. 광자의 intrinsic spin 각 운동량(angular momentum)은  $\pm\hbar$  로 여기서 부호는 스핀 방향이 오른쪽 또는 왼쪽방향을 각각 나타내고 광자에너지와는 관계없이 존재한다. 전자기(electromagnetic) 복사(radiation)를 방출하거나 흡수할 때마다 전하 입자는 에너지 및 선 운동량과 함께  $\pm\hbar$  인 각 운동량(angular momentum)의 변화를 동시에 수행한다. 좌회전 편광(left circularly polarized) 평면 파(plane wave) 속의 모든 photon들은 진행방향으로 정렬된 스핀을 가진 것처럼 target에 각 운동량을 주고 빛을 right circular로 바꾸면 photon들의 spin 방향이 역전되어 target에 torque가 작용한다.

위의 그림에서 보듯 단독 photon의 각 운동량은  $\vec{k}$  에 평행 또는 반 평행인 스핀을 갖는다. 그러나 하나하나가 아닌 군집으로 해석하면(고전론적 해석) P-state 는 beam 속에 같은 양의 R-state 와 L-state 인 photon들이 중첩(superposition)하여 나타난 결과로 간주되며 그것은 (8.10)식과 같다. 따라서 linear light(P-state)의 beam은 동수의 right- 과 left-handed photon들로 이루어진 것처럼 물질과 상호작용한다. 따라서 P-state 는 정확히 같은 양의 잘 정의된 right- 과 left-handed photon들로 이루어져 있다고 말할 수 있고, 그 결과 P-state 의 beam은 전체적으로 보았을 때 target에 각 운동량(angular momentum)을 주지 않는 것과 같은 것이다. 결론적으로 말하면 beam 내의 right- 과 left-handed spin photon들이 균형을 이루면 P-state , right- 또는 left-handed spin photon들로만 이루어져 있다면 R-state 또는 L-state이며 이들이 균형을 이루고 있지 않다면 E-state로 규정 할 수 있다.

**Malus's law:** 다음 절에서 공부할 P-state (linear polarization) 만 만들어 내는 polarizer(편광 판)에서 우측 그림과 같이 y 축 방향 이 빛이 통과하는 축(transmission axis)이라고 할 때 y 축에 대해 임의의 각  $\theta$  로 입사하는  $\vec{E}$  가 이 polarizer를 통과하고 나면  $E_y$  성분만 남는다. 이때  $E_y$  성분 및 그 강도(irradiance)는 다음 수식으로 표현하고 이것을 Malus's law라 한다.



$$E_p = E_y = E \cos \theta \quad (8.22)$$

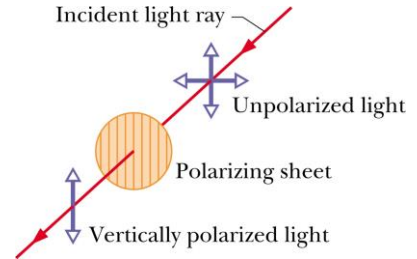
$$I_p = I_o \cos^2 \theta \quad (8.23)$$

여기서  $I_o = \vec{E} \cdot \vec{E}^*$

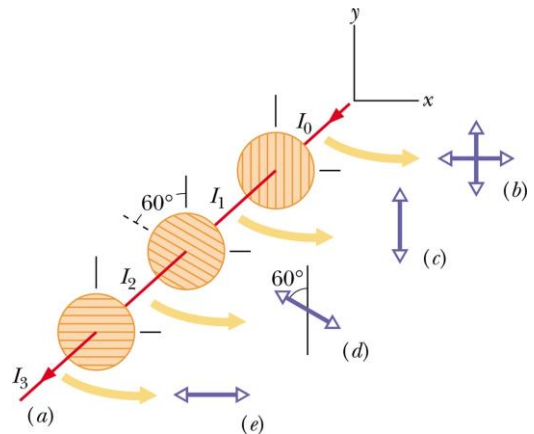
### 비 편광(non-polarization) 빛이 편광 된 후의 세기

한 방향으로 진동하는 빛을 선형편광 되었다고 하고, 전기장  $\vec{E}$  가 y 축으로만 진동하는 것을 y 축으로 편광 되었다고 말한다. 우리가 주위에서 보는 광들은 비편광(unpolarized light)이며 모든 방향으로 진동한다. 이러한 광을 y 축 편광 판(그림에서 polarizing sheet)으로 편광 광(그림에서 vertically polarized light)을 만들면 편광 된 파동의 세기(intensity)는 비 편광 입사 세기의 반이 된다.

$$I = \frac{1}{2} I_o \quad (8.24)$$



(예제) 비편광 된 빛(그림의 b)이 진행하는 경로에 우 축 그림과 같이 세 개의 편광판을 놓았다. 첫 번째 편광판의 편광방향은 y 축과 평행하고(그림 c), 두 번째 편광판은 y 축을 기준으로 반 시계방향으로  $60^\circ$  기울어져 있다(그림 d). 그리고 세 번째 편광판의 편광방향은 x 축과 평행하다(그림 e). 투과한 빛의 세기  $I_3$  는 처음 세기  $I_o$  의 얼마인가?



(풀이) 첫 번째 통과한 빛의 세기:  $I_1 = \frac{1}{2} I_o$

두 번째 통과한 빛의 세기:  $I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ$

세 번째 통과한 빛의 세기:  $I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ = I_1 \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ = \frac{1}{2} I_o \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ$

$$I_3 = \frac{1}{2} I_o \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 = \frac{3}{32} I_o \rightarrow \frac{I}{I_o} = \frac{3}{32} = 0.094$$

## 8.2 Polarizers

자연광(natural light)이 편광(polarization) 되어 나오게 하는 물질을 polarizer라 한다. Polarizer 는 다음의 네 가지 물리적 기본현상에 기초하여 만들어 진다.

Dichroism (selective absorption), Birefringence (double refraction), Scattering, Reflection.

**Natural light:** 비편광 빛(unpolarized light)이며 정확히 말하면 randomly polarized light이다.

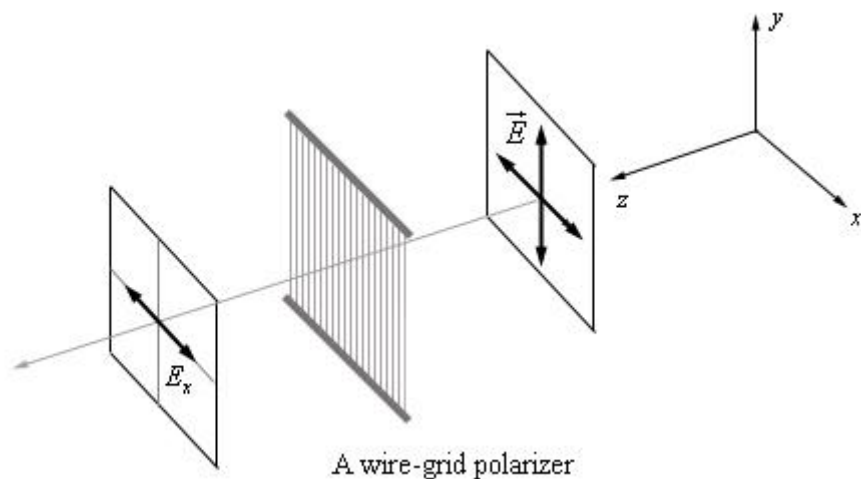
### 8.2.1 Dichroism(Selective Absorption)

$x$ ,  $y$  축으로 분해된 입사광의 두 P-state 성분 중 하나만을 선택적으로 흡수하고 나머지 축 방향의 성분은 통과시키는 현상을 dichroism이라 한다. 따라서 이 경우 축의 광에 대한 물리적인 현상은 비등방적(anisotropic)이다.

Anisotropic: 방향에 따라 물리적인 특성이 달리 나타나는 현상. 반대말은 isotropic.

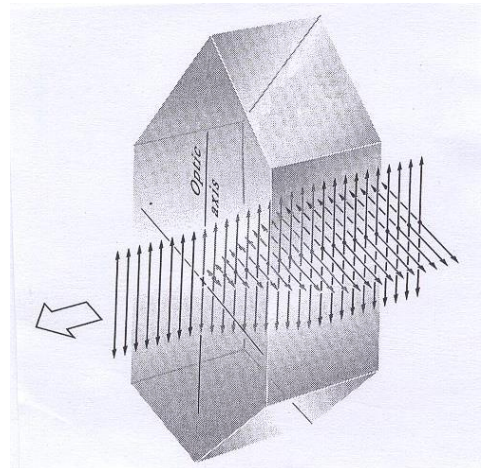
#### (i) Wire-grid polarizer

$x$  축으로는 좁고  $y$  축으로 긴 전도체 wire를 설치하면 하나의  $x$  축 편광 grid가 된다. Wire와 wire의 간격은 보통 입사광의 한 파장 이내이다. 이 grid로 들어오는 비편광 빛의  $y$  축 성분은 wire의 전도전하를 drive하여 에너지를 잃고 이 driven 전하는 같은 주파수의 파를 그 wire의 앞과 뒤의 방향으로 다시 발산하며 들어오는 파의  $y$  성분 일부를 서로 상쇄시킨다. 그 결과 이러한 구조의 grid는  $x$  축으로 편광 된 빛을 만드는 polarizer이다.



#### (ii) Dichoric crystals

자연에는 구조가 비등방적(anisotropy)이기 때문에 고유하게 어떤 선택적인 방향으로 빛을 흡수하는 결정들이 있다. 예를 들면 tourmaline의 일종인  $[\text{NaFe}_3\text{B}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4]$ 는 결정 내에 원자 구성에 의한 광축(principal axis or optic axis)으로 알려진 특별한 방향이 있고 이 축에 수직인 입사 전기장 성분을 강하게 흡수하며, 결정이 어느 정도 두꺼우면 우측 그림처럼 광축에 수직 성분이 완전히 제거된다. 따라서 tourmaline 결정을 두께가 수 밀리미터 되도록 광축에 평행하게 절단하면 선형 편광기(linear polarizer)로 사용할 수 있다. 이 때 광축은 편광의 transmission axis(빛을 통과 시키는



축)가 된다. 그러나 이러한 물질은 흡수가 파장에 의존하는 약점을 가지고 있고, 전자의 탄성 결합 힘(elastic binding force)이 방향에 따라 다르기 때문에 입사 전자기파의 전기장에 반응하는 것이 다르게 나타난다. 만일 백색광이 입사하면 그러한 결정은 색깔을 띠게 되며 그 색깔은  $\vec{E}$ 의 방향에 의존하게 될 것이라는 것을 의미한다. 두 개나 또는 세 개의 서로 다른 색깔을 나타내는 물질을 각각 dichroic 또는 trichroic이라 한다.

### (iii) Polaroid

1928년 Edwin Herbert Land는 J-sheet라 부르는 초기 dichroic sheet polarizer를 개발하고 1938년에 현재 linear polarizer로 가장 많이 사용되는 H-sheet polarizer를 발명하였다. 상업적으로 이러한 polarizer를 polaroid라 한다. 이들은 dichroic crystal이 아니라 분자나열이 마치 wire grid처럼 이루어진 sheet 물질이다. 만드는 방법은 투명한 polyvinyl alcohol의 sheet를 가열하여 주어진 방향으로 잡아당기면 hydrocarbon 분자가 당긴 방향으로 길게 나열한다. 그 후 sheet를 iodine 용액 속에 담그면 iodine이 plastic sheet에 스며들어 직선으로 긴 고리 중합체 분자(chain polymeric molecules)에 붙으면서 효과적으로 자신의 고리(chain)를 형성한다. 이때 iodine의 전도전자들은 가는 wire가 있는 것처럼 iodine chain을 따라 움직일 수 있다. 그러므로 chain 분자들에 평행으로 입사하는 전기장  $\vec{E}$ 의 성분은 그 전자들을 iodine chain을 따라 drive하므로 전자들에 의해 강하게 흡수된다. 그 결과 polarizer의 transmission 축은 앞에서 소개한 wire-grid polarizer처럼 film이 잡아 당겨진 방향에 수직이다.

H-sheet는 푸른 색 끝에서 흡수가 약간 떨어지는 것을 제외하고 전 가시광선 영역에 대해 효과적인 polarizer이다. 여기에는 용도에 따라 다음과 같은 polarizer가 있다.

HN-50: 자연 광을 이상적으로 50% 흡수하고 50%는 투과하는 polarizer.

실제에서는 4%정도의 반사가 있으며 HN-46에 해당한다. Iodine의 양에 따라 HN-38, HN-32, HN-22 등이 상업적으로 출시되고 있다.

K-sheet: Straight-chain hydrocarbon polyvinylene polarizer.

HR-sheet: H-, K-sheet로부터 발전된 near-IR(근 적외선) polarizer.

이 외에도 300~400nm의 UV 영역에서 사용되는 polarizer가 상업적으로 획득 가능하다.

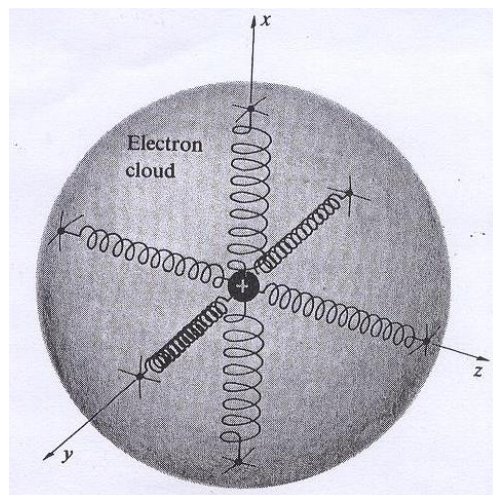
## 8.2.2 Birefringence(이중굴절)

항상 그런 것은 아니지만 유리나 plastic 같은 무정형(amorphous) 고체는 방향에 따라 같은 광학적 성질을 나타낸다. 이와 달리 많은 결정들은 비등방적(anisotropic), 즉 방향에 따라 광학적 성질이 다르며, 위의 dichroic crystal들은 이러한 물질의 일종이다.

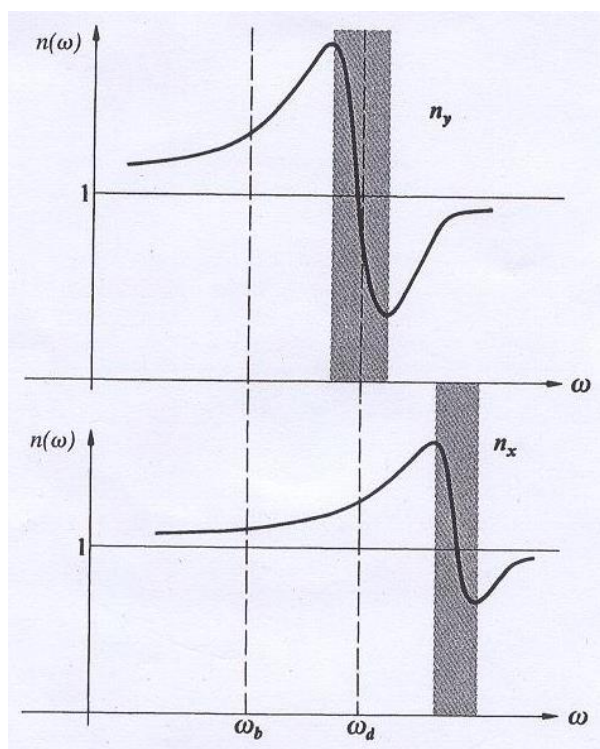
이중굴절(birefringence)은 결정의 축이 광학적으로 비등방적이기 때문에 다음 그림에서 설명되는 결정의 축 방향에 따라 굴절률(refractive index)이 달리 나타나는 현상을 말한다.



그림에서 중심에 있는 양의 전하와 각각의 축에 놓인 전자 사이의 **spring constant**, 즉 **binding force**가 다르면 전자는 각 축에 입사하는 외부 전기장에 대해 달리 반응하고 이것은 흡수에 의한 굴절을 일으켜 빛의 속도가 달라진다. 예를 들면 **binding force**가  $x$  축이 가장 크다면  $x$  축 전자의 고유 진동수 (**natural frequency**:  $\omega = \sqrt{k/m}$ )는 높고, 반대로 **spring constant**가 이 보다 작은  $y$  축은 고유 진동수가 작을 것이다. 자연광이 이러한 구조의 결정에 입사하면 각각의 축은 흡수하는 파장이 다르다. 굴절률은 진동수의 함수이므로 물질은



축에 따라 굴절률이 달리 나타난다. 만일 입사하는 광의 진동수가  $y$  축의 고유진동수인  $\omega_d$  근처라면 그것은  $n_y(\omega)$ 의 **absorption band** 내에 있게 되어  $y$  방향에 대해 강하게 흡수가 일어나 사라지거나 굴절된 빛을 내보내며 다른  $x$  축에 대해서는 **transmission**한다.



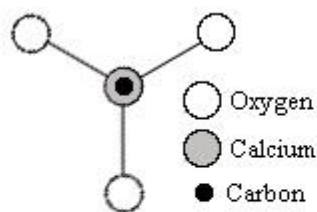
$n(\omega)$  versus frequency along two axes in a crystal.

Regions where  $dn/d\omega$  correspond to absorption bands

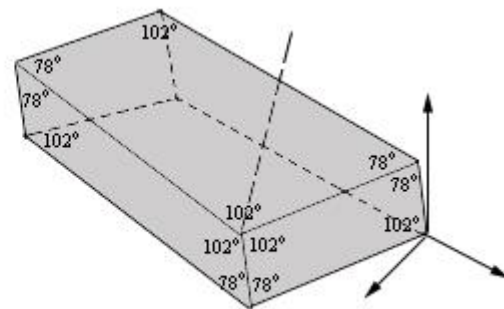
수직(orthogonal)인 P-state의 하나를 흡수하는 이중굴절 물질은 하나는 통과시키는 **dichroic** 물질이다. 만일  $y$ 와  $z$  방향이 **binding force**가 같다면 이들 각자는 똑 같은 고유진동수를 갖고 굴절률도 갖게 나타난다. 대표적인 결정으로는 다음에 논할 **calcite**가 있다.

## (i) Calcite: Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ )

Calcite는 높은 출력의 laser용 linear polarizer를 만드는 데 사용하는 가장 보편적인 물질로 이 중굴절을 갖는 대표적인 결정이다. 이것의 한쪽 축의 굴절률은 1.6584, 다른 축은 1.4864이며 이 결정으로 한 글자를 보면 축에 따른 굴절을 차이 때문에 두 글자가 어그러져 나타난다. 결정 내 각각의  $\text{CO}_3$  그룹은 삼각형의 cluster를 형성하고 이들 평면은 광축(optical or principal axis)에 수직이다. Carbonate group C-O는 광축(Ca-C)에 대해 3-fold symmetry이며( $120^\circ$  돌릴 때 마다 겹쳐지는 것) 모두 광축에 수직인 평면에 놓여 있다. 이 결정의 유도된 산소 dipole의 상호작용은 전기장  $\vec{E}$ 가  $\text{CO}_3$  그룹의 평면과 그 평면에 수직일 때 상당히 다르다. Calcite crystal은 cleavage planes로 알려진 쉽게 쪼개지는 편평한 평행사변형 면을 만든다. 면이 모서리에서 만나는 각은  $78.5^\circ$ 와  $101.55^\circ$ 이며, calcite 자체의 결정 형태는 rhombohedron(능면체)이다. 이 결정은 면들이 둔각(obtuse angle)으로 만나는 두 개의 예리하지 않은(blunt) 모서리가 있고, 양 blunt corner를 지나는 선이 3-fold symmetry이므로 광축은 blunt corner만 찾으면 된다.

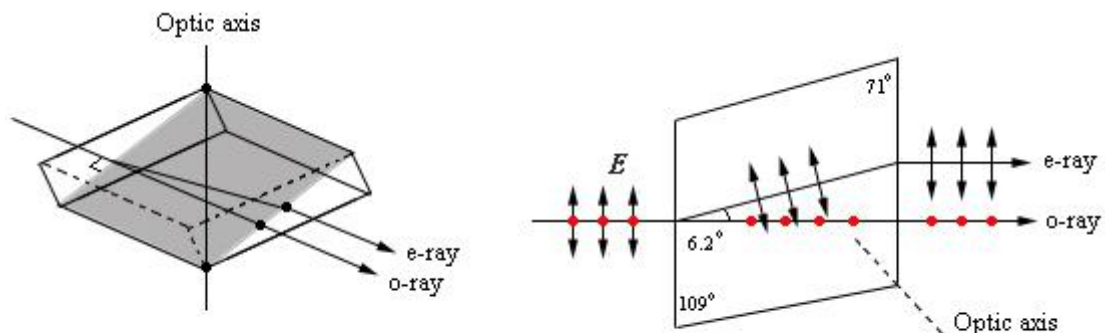


Atomic arrangement for calcite  
looking down the optical axis



Calcite cleavage form

비편광 빛이 광축을 담고 있는 principal section(아래 그림의 대각선 회색 평면)을 가로질러 통과하면 이 광은 둘로 갈라져 두 개의 평행한 광으로 나오며 그 결과 종이 위의 점 하나는 둘로 보이고 crystal을 돌리면 한 점은 그대로 있고 다른 점은 그 주위에서 원을 따라 움직인다. 이때 고정 점을 형성하는 광을 ordinary ray(o-ray), 방향에 따라 위치가 다른 점을 형성하는 광을 extraordinary ray(e-ray)라 한다. 여기서 o-ray는 principal section에 수직이고 e-ray는 평행으로 분리된 편광 광이다. Calcite의 광축에 평행으로 비쳐진 광은 둘로 분리되지 않는다.



A light beam with two orthogonal field components traversing a calcite principal section

## (ii) Birefringent crystals

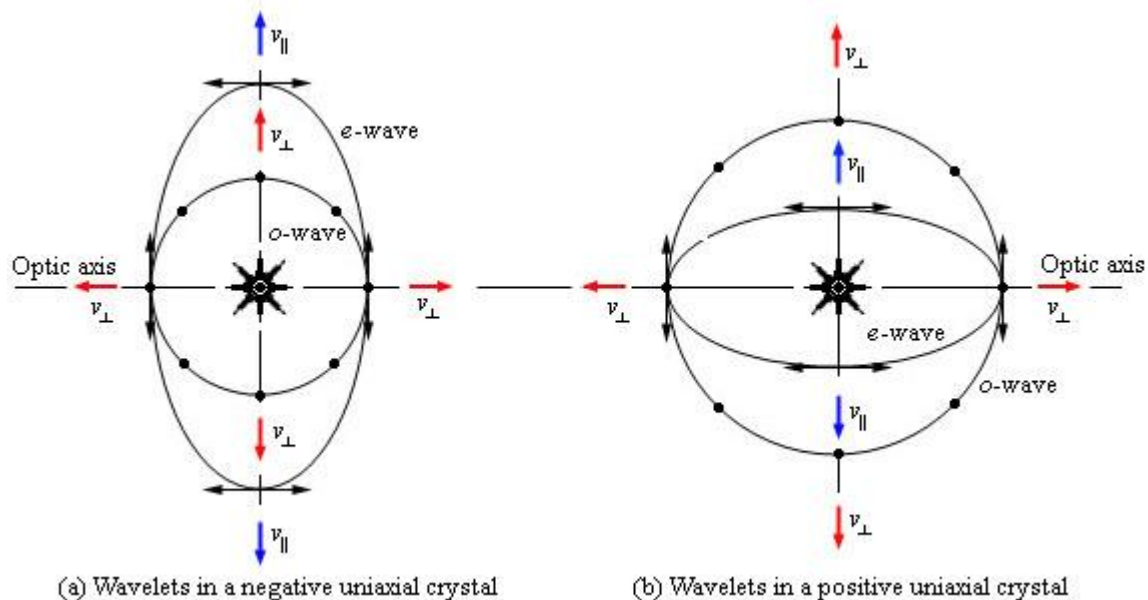
결정의 형태에 따라 다음과 같은 광학적 특성을 나타낸다.

(a) Cubic system(예: salt): 높은 symmetry(4 개의 3-fold symmetry)를 가지고 있기 때문에 광학적으로 등방적(isotropic)이며 모든 방향에서 하나의 굴절률을 갖는다. 그 결과 이중굴절 현상은 나타나지 않는다.

(b) Hexagonal, tetragonal, trigonal systems: 일반적인 방향에서 진행하는 빛에 대해 비등방적(anisotropic)이므로 이중굴절이 있다. 광축(optical axis)은 원자들이 대칭적(symmetric)으로 정렬된 방향과 일치하고 그러한 축은 단 하나가 존재하며 이것을 단축(uniaxial)이라 한다. 이러한 결정에 들어온 자연광은 spherical o-wavelet과 ellipsoidal e-wavelet를 야기한다. o-ray의  $\vec{E}$ -field는 어디서나 광축에 수직이므로 모든 방향에서  $v_{\perp}$  속도를 갖는다. 유사하게 광축에 평행인  $\vec{E}$ -field e-ray의  $v_{\parallel}$ 은 오직 광축에서만  $v_{\perp}$ 을 갖고 항상 o-ray의 접선이다. 따라서 단축 물질들은 두 개의 굴절률 즉  $n_o = c/v_{\perp}$ 와  $n_e = c/v_{\parallel}$ 를 갖는다. 이때 이중굴절은 다음과 같이 정의한다.

Birefringence의 정의:  $\Delta n = n_e - n_o$  (8.25)

Calcite의 경우  $v_{\parallel} > v_{\perp}$ 이므로  $\Delta n = -0.172$ 인 음수이며, 이러한 것을 negative uniaxial이라 한다. 이와 달리 quartz와 ice는  $v_{\parallel} < v_{\perp}$ 이기 때문에 positive uniaxial이며 ellipsoidal e-wavelets가 spherical o-wavelets 내에 있다. 아래 그림은 negative와 positive uniaxial 물질에 대한 o-와 e-ray의 구성과 그에 따른 ray들의 속도들을 보여준다. 양쪽 화살표와 점들은 각각 e-wave와 o-wave의 진동방향을 나타낸다. o-wave의  $\vec{E}$ -field는 어디서나 optic axis에 수직이다.

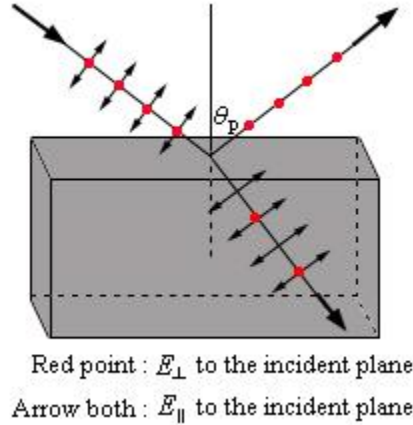


(c) Orthorhombic, monoclinic, triclinic systems: 두 개의 optic axis 즉 biaxial 이며 3 개의 굴절률을 갖는다. 이러한 물질로는 mica[  $\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$  ]가 있으며 birefringence  $\Delta n$ 은 가장 큰 굴절률과 가장 작은 굴절률의 차로 정의 한다.

### 8.3 그 밖의 Polarization

**Scattering**의한 편광: Scattering은 물체에 들어온 입사 파가 electric dipole에 의해 여러 방향으로 재 방출되는 현상으로 원자의 유도 dipole의 방향에 따라 polarization을 만들 수 있다.

**Reflection**에 의한 편광: 비편광 빛이 Brewster's angle로 입사하면 입사면에 평행인 성분은 사라지고 오직 수직 성분만 남는다.



Brewster's angle은 Snell's law에 의해 다음과 같이 정의 되는 각이다.

Brewster's angle:  $\theta_i + \theta_t = 90^\circ \rightarrow \theta_t = 90^\circ - \theta_i$

이 때의 입사각  $\theta_i$ 를 Brewster's angle  $\theta_p$  또는 polarization angle  $\theta_p$ 라 한다.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t = n_t \cos \theta_i \rightarrow \tan \theta_i = \frac{n_t}{n_i} \quad (8.26)$$

$\theta_p$ 는 4장에서 본 Fresnel 방정식에 의해 어떤 편광인지를 알 수 있다. 자연광을 입사평면에 수직과 수평성분으로 분해하면, amplitude reflection coefficients는

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad [4.43]$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad [4.45]$$

$\theta_i + \theta_t = 90^\circ$ 이면  $r_{\perp}$ 은 0이다. 따라서  $\theta_i = \theta_p$  조건을 만족하면 입사 광은 오직 입사평면에 수직성분  $r_{\perp}$ 만 남는다. 이때의 반사도(reflectance)는

$$\text{성분의 반사도: } R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} = \sin^2(\theta_i - \theta_t), \quad R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} = 0$$

$$\text{Total reflectance: } R = \frac{1}{2}(R_{\perp} + R_{\parallel}) = \frac{1}{2}R_{\perp} \quad (8.27)$$

편광 되지 않은 입사광의 intensity를  $I_i$ 라 하면  $\theta_p$  조건에서 반사하는 광의 intensity  $I_p$ 는

$$I_p = RI_i = \frac{1}{2}R_{\perp}I_i \quad (8.28)$$

예를 들면 공기( $n_i = 1.0$ ) 속에서 굴절률이  $n_t = 1.5$ 인 유리에 광이 입사할 때

$$\theta_p = \theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{n_t}{n_i}\right) = \tan^{-1}(1.5) = 56.3^\circ$$

$$\theta_t = 90^\circ - 56.3^\circ = 33.7^\circ$$

$$R_\perp = \sin^2(\theta_p - \theta_t) = \sin^2(22.6^\circ) = 0.148$$

$$I_p = \frac{1}{2} R_\perp I_i \rightarrow \frac{I_p}{I_i} = \frac{1}{2} (0.148) = 0.074$$

입사 시 비편광 intensity 의 약 7.4% 가 입사평면에 수직으로 편광 되어 반사한다.

$$\text{Degree of polarization: } D = \frac{I_p}{I_p + I_n} = \frac{I_p}{I_i} \quad (8.29)$$

여기서  $I_p$ ,  $I_n$  및  $I_i$  는 각각 편광, 비편광 및 입사광의 intensity이다.

예를 들면 편광 된 빛의  $I_p = 4 \text{ W/m}^2$  이고, 비편광 된 빛이  $I_n = 6 \text{ W/m}^2$  라면  $D$  는 40% 이다.

만일 나온 빛의 비편광 intensity가  $I_n = 0$  이면  $D = 1$ , 반대로  $I_p = 0$  이면  $D = 0$ .

## 8.4 Retarders

입사파의 편광형태를 변형시키는 광학적 요소(element)를 retarder라 한다. 서로 직교이며 위상이 같은 두 P-state 인 파가 retarder를 통과하면 처음과 달리 이들은 상대적인 위상차가 발생한다.

Retarder를 만드는 원리는 축에 따른 굴절을 차이로 나타나는 이중굴절을 이용한다.

### 8.4.1 Wave plates and Rhombs(Rhombus: 기울어진 육면체)

Calcite( $\text{CaCO}_3$ )의 경우 자른 면이 광축(optic axis)에 평행하고 입사하는 단색(monochromatic) 평면 파(plane wave)가 광축에 수평과 수직성분을 갖는 다면 이 파는 결정을 통과하고 나서 o-ray와 e-ray로 분리될 것이다. Calcite는  $n_o > n_e$  ( $n_o = 1.6584$ ,  $n_e = 1.4864$ ) 이기 때문에 속력은  $v_o > v_e$  이다. 두께  $d$  를 통과하고 난 후 파는 위상 차  $\Delta\phi$  를 갖는 서로 수직인 e-ray와 o-ray의 superposition(중첩)으로 나타난다. 이때 상대적인 광로 차(OPLD)  $\Lambda$  와 위상차 또는 retardance  $\Delta\phi$  는 각각 다음과 같다.

$$\text{OPLD: } \Lambda = d(|n_o - n_e|) \quad (8.30)$$

$$\text{위상차(retardance): } \Delta\phi = k\Lambda = \frac{2\pi}{\lambda_o} d(|n_o - n_e|) \quad (8.31)$$

$\lambda_o$  는 진공 속에서 파장이다.

위상차  $\Delta\phi$  에 따라서 다음과 같은 retarder plate들을 만들 수 있다.

(a) Full-wave plate:  $\Delta\phi = 2m\pi$  (정수 배 파장 차)를 만드는 retarders.

정수 배 파장 차는 이동하지 않은 것과 동일하므로 변하지 않은 것처럼 나타난다.

(b) Half-wave plate: 상대적인 위상 차가  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$  (반 파장 차)를 만드는 retarders.

e-ray와 o-ray 사이의 위상 차를  $\pi$  로 만드는 retarder로, half-wave plate라 한다. 이것은 1,3

상한에 있는 선형편광(linear polarization)을 2,4 상한의 선형편광으로 바꾸거나 원형편광(circular polarization)인 R-state는 L-state로, L-state는 R-state로 전환한다. 이것을 만드는 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$k\Lambda = (2m+1)\pi \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda_0}[d|n_o - n_e|] = (2m+1)\pi$$

$$d|n_o - n_e| = (m + \frac{1}{2})\lambda_0 \quad (8.32)$$

Calcite는 잘 부서지기 때문에 biaxial crystal mica가 주로 사용된다. 그 중에서도 pale brown muscovite가 많이 사용되는 데 이것은 쉽게 쪼갤 수 있을 뿐만 아니라 견고하며 얇게 할 수 있고 특히 두 개의 principal(optic) axes가 cleavage 평면에 거의 정확히 평행이다. Sodium light (589.3nm)의 축에 따른 굴절률은 각각 1.599와 1.594이며 half-wave plate의 최소 두께는 60 microns 정도이다. 그 외에도 용도에 따라 다음이 사용된다.

Crystalline quartz, Magnesium fluoride(MgF<sub>2</sub>): 3–6 μm IR을 위해 사용

Cadmium sulfide(CdS): IR 6–12 μm IR을 위해 사용.

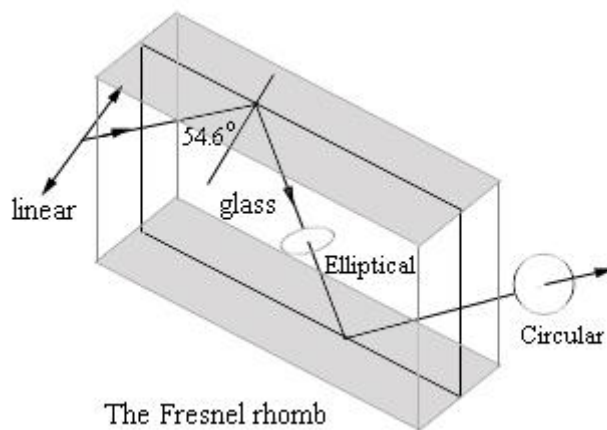
이들과 달리 결정이 아닌 polyvinyl alcohol의 sheet는 잡아 당긴 방향으로 긴 chain을 형성하는 birefringence 물질이다. 따라서 retarder plate로 사용될 수 있다.

(c) Quarter-wave plate: o-와 e-rays 사이에  $\Delta\phi = (4m+1)\pi/2$  (1/4 파장 차)를 만드는 retarder이다. Quarter-wave plate의 principal axis(x- or y-axis)에 45°로 입사하는 P-state의 광은 o-와 e-ray의 amplitude가 같다. 이러한 조건하에서 retarder를 나온 광은 원형편광이 되고 역으로 circular light는 45° 선형편광이 되어 나온다. 만드는 물질은 quartz, mica, organic polymeric plastic 등등으로 이러한 birefringence 물질의 두께는 다음 조건을 만족해야만 한다.

$$k\Lambda = (4m+1)\frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda_0}[d|n_o - n_e|] = (4m+1)\frac{\pi}{2}$$

$$d|n_o - n_e| = (m + \frac{1}{4})\lambda_0 \quad (8.33)$$

(d) The Fresnel Rhomb: 제 4 장에서 공부한 바와 같이 전반사(total internal reflection)가 일어나면 두 수직 전기장 성분 사이에는 위상 차이가 발생한다. 예를 들면 굴절률이  $n=1.51$ 인 유리 속에서 입사각이  $\theta_i = 54.6^\circ$ 이면 두 직교 성분의 전기장의 위상 차는 45°가 된다. 그 결과 유리 속에서 두 번 반사하여 나온 빛은 상대적인 위상 차이가 90°이다. Fresnel rhomb은 이러한 목적으로 사용되는 장치이다. 만일 이 장치에 45°인 선형편광 광이 들어 온다면 입사 평면에 평행과 수직 성분의 진폭은 크기가 같을 것이며 유리 내에서 처음 반사한 빛은 타원편광이 되고 두 번째 반사에서 원형편광이 된다. 따라서 rhomb은 파장과는 관계없이 이러한 현상이 일어나므로 색이 변하지 않는(achromatic) 90° retarder이며 특수 파장에 대해 반응하는 crystal retarder 보다 큰 장점을 가진다. 한편 Mooney rhomb( $n=1.65$ , 입사각 60°)은 비록 작동원리가 약간 다르기는 하지만 원리 면에서 Fresnel rhomb과 동등한 90° retarder이다.



## 빛의 이중굴절로 인한 retardation의 관찰 실험

**실험 1:** Cellophane tape을 microscope용 유리판에 붙임으로써 half-wave plate를 만들 수 있다. Fast axis(빛의 속도가 빠른 축)는 tape의 폭을 가로지르는 방향이고 slow axis는 길이 방향이다. 만일 두 가려진 polarizer 사이에  $45^\circ$  각도로 이것을 setting하면 빛이 통과하여 나오는 것을 볼 수 있다.

**실험 2:** 조잡하기는 하지만 음식을 싸는 wrap으로 quarter-wave plate을 만들 수 있다. 이것은 둘둘 말린 방향이 광축(principal axis)이다. 6층 정도를 겹쳐 쌓을 때 가장자리가 평행이 되도록 조심하고 polarizer의 축에  $45^\circ$  되도록 이것을 놓아라. 그리고 나서 polarizer를 돌려 모든 방향에서 대충 빛의 강도가 일정하게 될 때까지 한번에 한 장씩 첨가하면 투과한 빛은 circular light이며 이 두께가 quarter-wave plate이다.

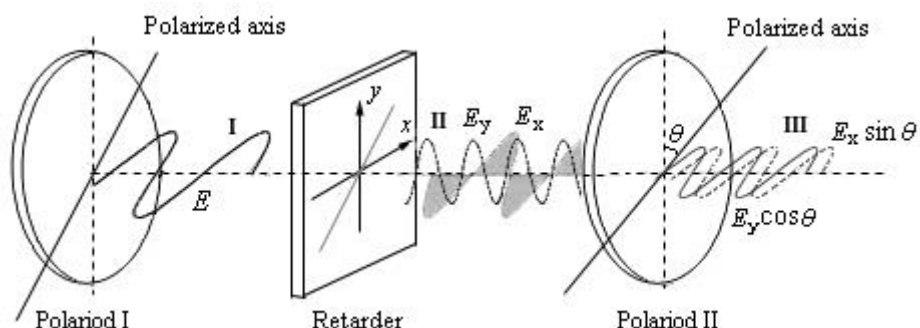
상업적으로 140nm quarter wave plate는 560nm 인 green light에 작용하는 plate이다.

**실험 3: (Interference colors):** 백색광이 비춰진 두 polarizer 사이에 cellophane sheet를(담배 포장 종이) 여러 겹이나 구겨서 넣어보라. Cellophane을 돌리면 변하는 다양한 색깔(multicolor)의 pattern을 가진 영역이 나타날 것이다. 또는 polarizer의 하나를 돌리면 보색(compliment color)이 이동하게 될 것이다. 이것은 frequency에 의존하는 간섭무늬의 색깔로써 retardation에 의존하는 파장으로부터 야기된 것으로, 두께나 이중굴절 또는 두 역할 모두에 의한 변화 때문이다. 한 단색광(monochromatic light)이 retarder의 y 축에 대해 편광 축이  $45^\circ$ 로 놓인 첫 polarizer에 들어온 후 retarder를 통과하면 이 빛은  $E_x$ 와  $E_y$ 로 분해되면서 물질의 축에 따른 굴절을 차이로 위상 차  $\Delta\phi$ 가 발생하여 타원 빛이 되어 나오고, 다시 retarder의 y 축에 대해  $\theta$ 로 기울어진 polarizer II를 통과하면 두 파가 합쳐져 간섭이 일어난다.

요약하면 다음 그림에서 I로 표시된 전기장  $\mathbf{E}$ 는 첫 polarizer를 통과한 축에 평행이다. 이 전기장은 retarder를 통과한 후 서로 직교하면서 위상 차  $\Delta\phi$ 가 있는  $E_x$ 와  $E_y$ 로 분해되고 합쳐진 결과는 타원인 편광 된 빛이다. 다시 이 분해된 파들이 y 축에 대해  $\theta$ 로 기울어진 polarizer II



를 통과하면 각 성분은 이 polarizer에 평행이며 그 전기장의 크기는 각각  $E_y \cos \theta$  와  $E_x \sin \theta$  이다. 그리고 이들의 위상 차가  $\Delta\phi = 2m\pi$  이면 보강,  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$  이면 소멸로 나타나는 무늬가 된다.



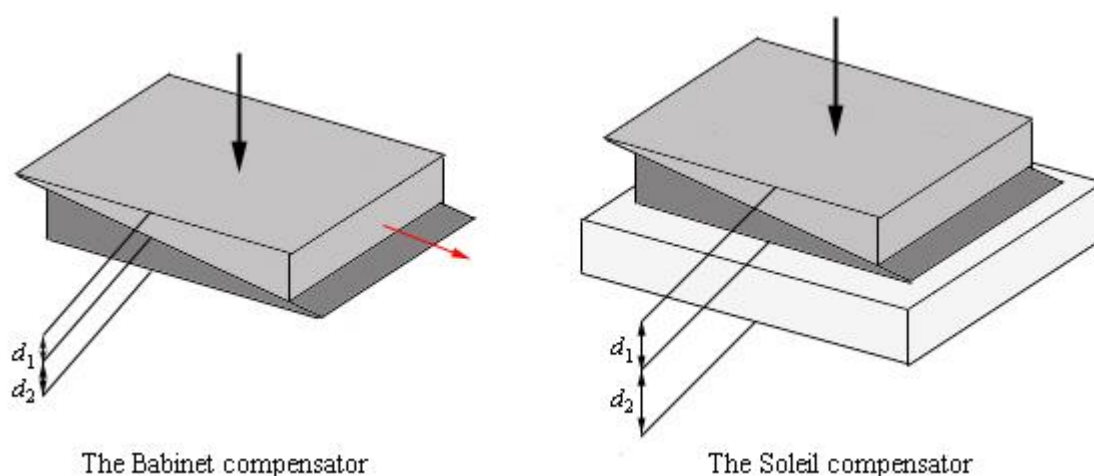
## 8.4.2 Compensators

Compensator는 파의 조정 가능한 retardance를 압제할 수 있는 광학 기구이다. Retarder는  $\Delta\phi$ 가 고정인데 반하여 compensator는 상대적인 위상 차가 연속적으로 변하게 만든 것이다. 여기서는 많은 종류 중에서 가장 많이 사용하는 두 가지를 소개한다.

(a) Babinet compensator: 두 개의 독립적인 calcite나 또는 보편적으로 사용하는 quartz로 이루어져 있다. 다음의 첫 번째 그림은 이것의 형태를 보여준다. 임의의 점에서 이 기구를 통해 아래로 지나가는 광은 상층 wedge의 두께  $d_1$ 과 하층 wedge의 두께  $d_2$ 를 횡단한다. 위상 차는

$$\Delta\phi = k(d_1 - d_2)(|n_o - n_e|) = \frac{2\pi}{\lambda_o}(d_1 - d_2)(|n_o - n_e|) \quad (8.34)$$

만일 compensator가 calcite라면 상층 wedge에서 e-wave가 o-wave를 앞선다. 따라서  $d_1 > d_2$ 라면  $\Delta\phi$ 는 e-ray가 o-ray를 앞서는 각이다. Quartz라면 이 현상은 역으로 나타난다.  $d_1 = d_2$ 인 중심에서 wedge 효과는 상쇄되기 때문에 모든 파장에 대해  $\Delta\phi = 0$ 이다. 그림에서 붉은 화살표 방향은 screw를 조정했을 때 상층 wedge가 진행하는 방향이다.



(b) Soleil compensator: Babinet compensator의 약점인 빛의 빔나감(deviation)이 없도록 보완



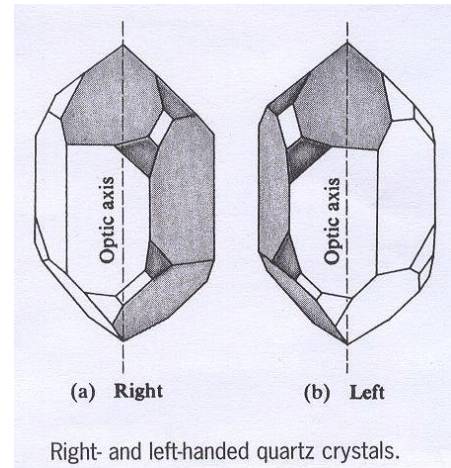
하여 표면 위에서 균일한 retardance를 생성하는 이점을 가진 compensator이다. 일반적으로 가시광선에서 quartz, 적외선에서  $\text{MgF}_2$  또는  $\text{CdS}$ 가 사용되며 두 개의 wedge와 하나의 평평한 평행 평석 석판(slab)으로 이루어져 있다.  $d_1$ 은 두 wedge의 총 두께로 이것은 어떤 setting에 대해서도 일정하다.

## 8.5 Optical Activity

빛과 물질의 상호작용으로 분자의 구조에 대한 정보를 얻을 수 있다.

**Optical activity:** 한 선형평면 파가 물질을 통과한 후 일정한 각으로 회전되어 나온다면 그 물질은 광학적으로 active하다고 한다. 관찰자가 광원 방향으로 들여다 보았을 때  $\vec{E}$ -field의 방향이 시계방향으로 회전했다면 그 물질은 dextrorotatory(d-rotatory), 반시계방향이면 levorotatory(l-rotatory)라 한다. 여기서 dextro와 levo는 Latin어로 각각 right과 left를 의미하며 quartz에서 d-rotatory 나 l-rotatory는 실제로 두 개의 서로 다른 crystallographic structure와 일치한다.

비록 quartz 결정은 모두  $\text{SiO}_2$ 로 이루어져 있지만 우측 그림에서 보는 것처럼 이들 분자는 right- 또는 left-handed로 정돈되어 있다. 이 두 개의 모습은 하나가 다른 것의 mirror image인 것을 제외하고 모든 면에서 똑 같으며, 이때 이들은 서로 좌우대칭(enantiomorphs)하다고 말한다. 모든 투명한 좌우대칭 물질은 광학적으로 active하지만 녹거나(molten) 또는 fused quartz는 active하지 않다. 이와 같은 결정은 광물이나 유기물에 많으며 그 예로 benzil과  $\text{NaBrO}_3$ 가 이에 해당한다. 이와 달리 유기물인 설탕(sugar), tartaric acid, turpentine compounds는 액체 상태나 용액



속에서 광학적으로 active하다. 분자의 나열 형태에 의해 나타나는 이러한 현상은 rubidium tartrate의 경우 용액 상태에서는 d-rotatory, 결정인 상태는 l-rotatory를 보여준다.

원리적으로 물질에 입사하는 선형편광(linearly polarized) 빛은 같은 수의 R-state와 L-state photon들의 중첩(superposition)으로 나타난 것이다. 이들이 active circular birefringence, 즉 두 개의 굴절률  $n_R$ 과  $n_L$ 을 가진 active 물질에 들어가면  $z$ 축으로 진행하는 right-과 left-circular monochromatic light는 수식적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\vec{E}_R = E_o [\hat{i} \cos(k_R z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_R z - \omega t)] \quad (8.35)$$

$$\vec{E}_L = E_o [\hat{i} \cos(k_L z - \omega t) - \hat{j} \sin(k_L z - \omega t)] \quad (8.36)$$

여기서  $k_R = k_o n_R$ ,  $k_L = k_o n_L$ 이다.

계산을 간단히 하기 위하여  $k_R z - \omega t \equiv \alpha$ ,  $k_L z - \omega t \equiv \beta$ 로 놓으면 위의 식은

$$\vec{E}_R = E_o (\hat{i} \cos \alpha + \hat{j} \sin \alpha) \quad (8.37)$$

$$\vec{E}_L = E_o(\hat{i} \cos \beta - j \sin \beta) \quad (8.38)$$

두 파를 중첩하면

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L = E_o[\hat{i}(\cos \alpha + \cos \beta) + j(\sin \alpha - \sin \beta)] \quad (8.39)$$

$$\ast \cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}, \quad \sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= 2E_o[\hat{i}(\cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}) + j(\cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2})] \\ &= 2E_o(\cos \frac{\alpha + \beta}{2})[\hat{i}(\cos \frac{\alpha - \beta}{2}) + j(\sin \frac{\alpha - \beta}{2})] \end{aligned} \quad (8.40)$$

$$\ast \alpha + \beta = (k_R z - \omega t) + (k_L z - \omega t) = (k_R + k_L)z - 2\omega t$$

$$\ast \alpha - \beta = (k_R z - \omega t) - (k_L z - \omega t) = (k_R - k_L)z$$

$$\vec{E} = 2E_o \cos[\frac{(k_R + k_L)z}{2} - \omega t][\hat{i} \cos \frac{(k_R - k_L)z}{2} + j \sin \frac{(k_R - k_L)z}{2}] \quad (8.41)$$

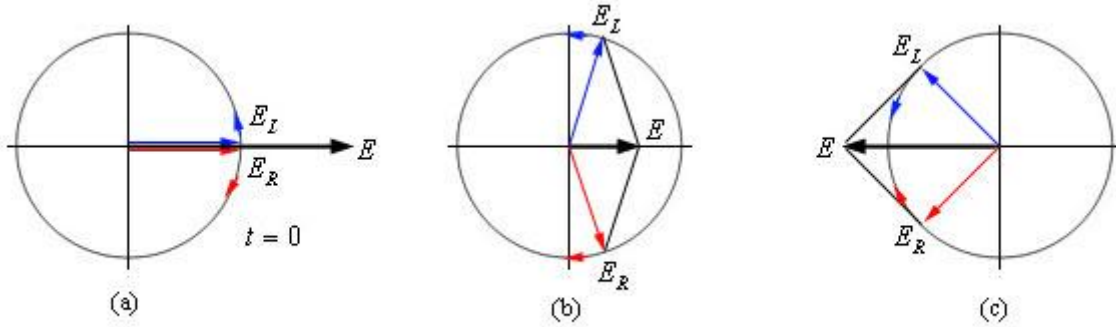
(8.41) 식의 해석

(a)  $k_R = k_L$ , 즉  $n_R = n_L$  이면

$$\vec{E} = [2E_o \cos(kz - \omega t)]\hat{i} \quad (8.42)$$

여기서  $k = 2k_R = 2k_L$

물질에 들어온 monochromatic linear light을 같은 크기의  $E_R$ 과  $E_L$ 로 생각하여 물질 속을 통과한다고 할 때, 다음 그림처럼 합성벡터  $\vec{E}$ 가  $x$ 축의 linear polarization으로 나타난다.



The superposition of R- and L-state at  $z = 0$

(b)  $n_R > n_L$ , 즉  $k_R > k_L$  이면  $x$ 축과  $y$ 축의 크기와 벡터 방향의 부호는

$$\hat{i} \cos \frac{(k_R - k_L)z}{2} > 0, \quad j \sin \frac{(k_R - k_L)z}{2} > 0 \quad (8.43)$$

이므로  $\vec{E}$ 는 제 1상한의 vector가 된다. 따라서 물질에 들어온 monochromatic linear light은 좌측으로 회전(counterclockwise)되어 나온다.

(c)  $n_R < n_L$ , 즉  $k_R < k_L$  이면

$$\hat{i} \cos \frac{(k_R - k_L)z}{2} > 0, \quad j \sin \frac{(k_R - k_L)z}{2} < 0 \quad (8.44)$$

이 경우  $\vec{E}$ 는 제 4상한의 벡터가 이므로 물질에 들어온 monochromatic linear light은 우측으로

로 회전(clockwise)되어 나온다.

+x 축을 기준으로 z 축의 길이 d (물질의 두께)를 통과하는 동안 회전각을  $\beta$  라 하면 수식에서 x 성분을 y 성분으로 나눈 값이  $\tan \beta$  이므로

$$\tan \beta = \tan \frac{(k_R - k_L)d}{2} \rightarrow \beta = \frac{(k_R - k_L)d}{2} \quad (8.45)$$

$$\beta = \frac{1}{2} k_o (n_R - n_L) d = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda_o} (n_R - n_L) d = \frac{\pi(n_R - n_L)d}{\lambda_o} \quad (8.46)$$

시계방향을 positive angle로 잡고 계산한 결과는

$n_R > n_L$  이면 d-rotatory

$n_R < n_L$  이면 l-rotatory

**Rotatory power:**  $P_r = \beta / d$  (8.47)

여기서  $\beta$  는 회전 각, d 는 빛이 물질을 통과한 거리.

다음은 sodium light (589.3nm)을 사용한 rotatory power의 예이다.

Quartz:  $P_r = 21.7^\circ / \text{mm}$ . 이것은 optic axis를 따라 진행하는 빛에 대해  $|n_R - n_L| = 7.1 \times 10^{-5}$

Quartz는 positive, uniaxial crystal처럼 행동하는 birefringence 물질이며 광축에 수직으로 입사하는 빛에 대해서는 inactive하다.

HgS(Cinnabar):  $n_o = 2.854$ ,  $n_e = 3.201$ 인 birefringence 물질로  $P_r = 32.5^\circ / \text{mm}$ 이며 uniaxial 및 biaxial로 작용하는 active crystal이다.

NaClO<sub>3</sub>:  $P_r = 3.1^\circ / \text{mm}$ 로 active하지만 birefringence 물질은 아니다.

용액의 rotatory power는 고체에 비해 상대적으로 대단히 작다. 예를 들면 C<sub>10</sub>H<sub>6</sub>(turpentine)는 10 °C 에서  $P_r = 37^\circ / 10\text{cm}$  이다. 용액은 또한 농도에 따라 변하기 때문에 sugar syrup속의 sugar양을 재는데 rotatory power가 응용되기도 한다.

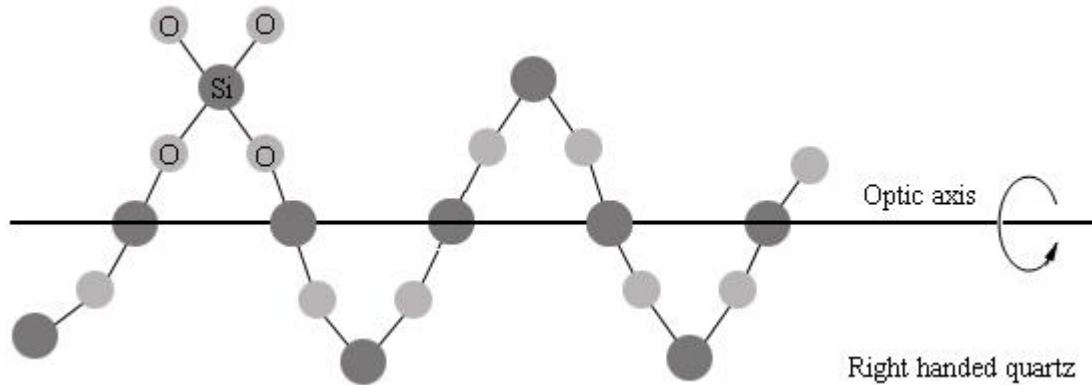
화학에서 분자구조는 같지만 광학적으로 d-rotatory와 l-rotatory로 구분되는 mirror image인 물질을 isomer(이성체)라 하고 이에 대한 유기물(organic) 및 무기물(inorganic)의 연구학문을 stereochemistry라 한다.

**실험 4:** 약 1-inch 유리그릇(glass container)에 무색의 corn syrup( $P_r = 30^\circ / \text{inch}$ )을 넣고 교차시킨 polaroid 사이에 이것을 놓은 후 flashlight을 polaroid 밖에서 비추면 파장  $\lambda$ 에 의존하는 rotatory dispersion에 의한 아름다운 간섭무늬를 관찰할 수 있다.

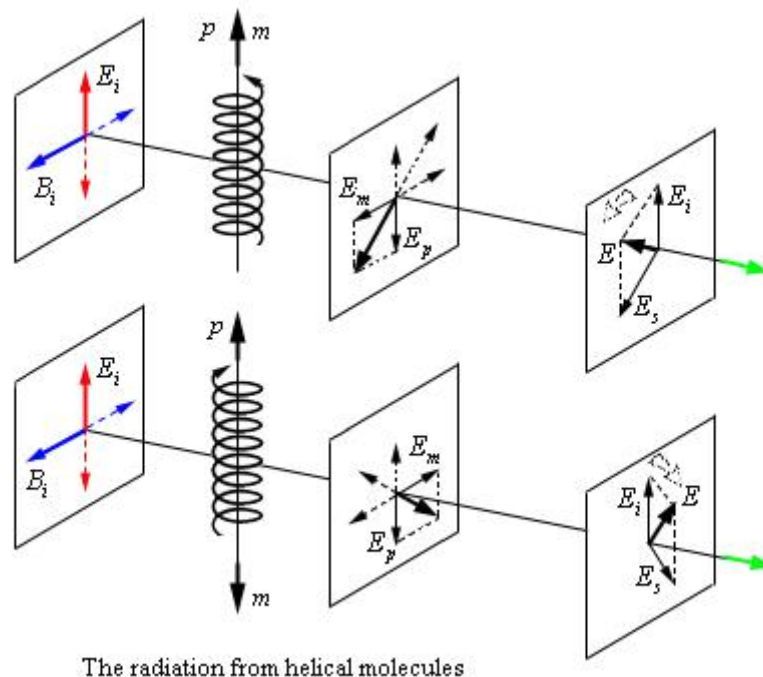
## A Useful Classical Model for Active Materials

Optical activity는 현상학적으로 지극히 복잡하여 실질적으로 양자역학적인 해답을 요구하지만 전자들이 꼬인(twisting) 단순히 나선형(helical) 길(path)을 따라 움직이는 것으로 제한한 고전적 model로 이를 설명할 수 있다. 달리 말하면 꼬인 분자는 conducting helix, 즉 전기전도가 나선으로 전도되는 것처럼 그려질 것이다. 예를 들면 quartz는 Si와 O 원자가 아래 그림의 광축 주

위에 right- 또는 left-handed spiral로 정돈되어 있는 helix들(helices)의 평행한 array이다. Quartz에 들어온 입사파는 right- 또는 left-handed helix 여부에 따라 달리 반응하므로 그 파의 right와 left 성분에 대한 굴절률은 다를 것으로 기대된다.



결정과 달리 active한 sugar 용액은 임의의 방향으로 놓인 helices의 분포와 유사하지만 각각은 똑 같은 handedness를 갖는다. 용액에서 임의로 나열된 한 분자는 그것의 한 축이 전자기파의 harmonic E-field에 평행으로 우연히 놓일 수 있고, 이 field는 분자의 길이 축을 따라 아래 위로 전하를 drive하여 효과적으로 시간에 따라 변하는 축에 평행한 전기 dipole moment  $p(t)$ 와 전자의 spiraling motion과 관계한 회전하는 전류를 만들 것이다. 이것은 또한 교대로 helix의 축을 따라 있는 진동하는 magnetic dipole moment  $m(t)$ 를 만들고, 반대로 분자가 파의 B-field에 평행이면 시간에 따라 변하는 flux가 분자 주위를 도는 전류를 유도하면서 다시 진동하는 축의 전기와 자기 dipole moment들을 지배할 것이다.



양 경우에  $p(t)$ 와  $m(t)$ 는 특별한 분자 helix의 방향에 의존하는 서로간에 평행 또는 반 평행이

다. 입사 에너지는 진동하는 **dipole**을 만들면서 흡수되고 이 **dipole**은 전자기파를 재 방사 (reradiate), 즉 산란 시킨다. Electric dipole에 의한 주어진 방향에서 방출된 전기장  $E_p$ 는 자기 dipole에 의해 방출된 전기장  $E_m$ 에 수직이다. 따라서 이들의 합으로 나타난 **helix**에 의해 산란된 전기장  $E_s$ 는 진행방향에 따른 입사 장  $E_i$ 와 평행하지 않다. 결과의 transmitted light  $\vec{E}_s + \vec{E}_i$ 는 **helix**의 관점에 의해 결정되는 방향으로 돌게 된다. 도는 양은 각 분자의 방향에 따라 변한다. 그러나 이것은 항상 똑 같은 관점의 **helices**에 대해 똑 같은 방향에 있다.

## Optically Active Biological Substances

Optical activity가 가장 매력을 끄는 분야는 생물학에 있다. 광학적으로 inactive한 화합물을 가지고 유기물 분자(organic molecules)를 실험실에서 합성하면 동수의 d-rotatory와 l-rotatory 이성체(isomers)가 만들어진다. 실험실에서 일단 존재한다면 d-와 l-optical stereoisomers가 자연의 유기물 속에서 발견되리라고 기대할 수도 있지만 이것은 결코 합당한 결론이 아니다. 예를 들면 장소에 관계없이 자란 사탕수수(sugar cane)나 사탕무(sugar beets)로부터 추출된 자연에서 생산되는 모든 sugar(sucrose:  $C_{12}H_{22}O_{11}$ )는 항상 d-rotatory이다. 더욱이 d-rotatory이기 때문에 이름이 명명된 간단한 sugar dextrose(포도당)[detro는 d-rotatory라는 의미] 또는 d-glucose ( $C_6H_{12}O_6$ )는 인간의 신진대사(metabolism)에 가장 중요한 탄수화물(carbohydrate)이다. 살아있는 것들은 어떠한 광학적 이성체를 분명히 구분할 수 있다.

Amino acids로 알려진 화합물의 모든 단백질(protein)들은 인공적으로 제조된다. 여기에는 20 여 개의 amino acids가 있고 그들 모두는 일반적으로 l-rotatory이다. 만일 egg, 이것이 어떤 egg든 예를 들면 딱정벌레(beetle)의 egg라 하더라도 이들로부터 얻어진 한 단백질 분자를 분쇄한다면 그것의 구성 amino acids는 l-rotatory일 것이라는 것을 의미한다. 한 중요한 예외로 bacteria에 독성을 나타내어 사멸시키는 penicillin과 같은 antibiotic group(amino acids의 일종)은 일부의 dextro amino acids를 담고 있다.

이러한 현상은 지구와 다른 특성 위에 사는 가능한 생명체에 대해 생각해 보게 하는 흥미를 불러 일으킨다. 예를 들면 지구 위의 생명체는 본래 양 쪽의 mirror image 형태, 즉 동수의 d-와 l-rotatory로 이루어 졌었는가? 라는 질문이다. 1969년 11월 28일 호주의 Victoria에 떨어진 운석(meteorite) 속에서 발견된 5종류의 amino acids를 분석한 결과 광학적으로 right-과 left-handed 형태가 대충 같은 것으로 나타났다. 이것은 지구상의 바위에서 발견되는 단연 지배적으로 많은 left-handed form과 뚜렷이 구별된다.

## 8.6 Induced Optical Effects-Optical Modulators

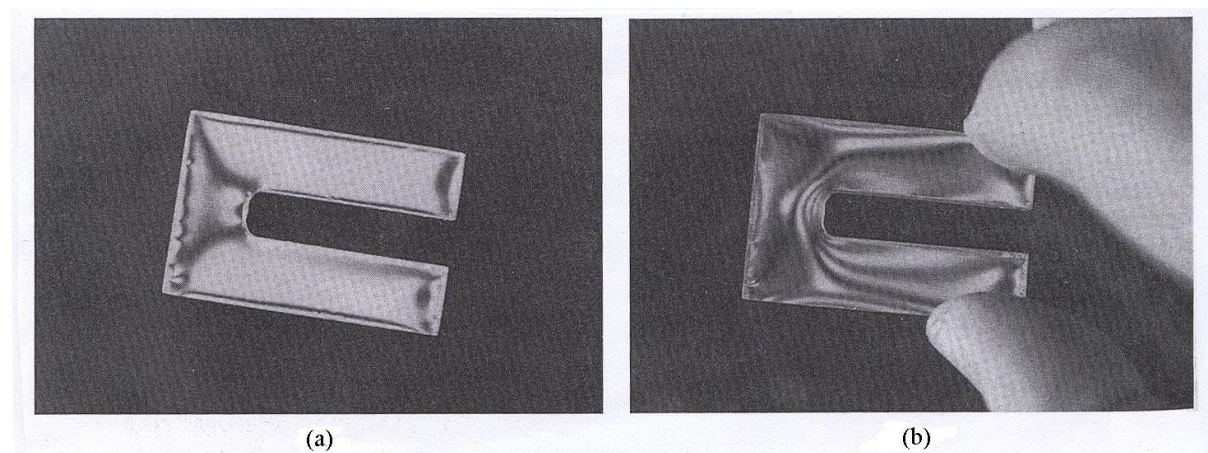
외부에서 광학 물질에 역학적 힘(mechanical force)이나 전기장 또는 자기장을 가하여 특수한 편광을 유도할 수 있다.

### 8.6.1 Photoelasticity(광 탄성)

투명하며 광학적으로 등방적(isotropic)인 물질에 역학적 stress를 가하여 비등방적으로 만드는 것을 photoelasticity 또는 mechanical(or stress) birefringence라 한다. 압축(compression)이나 tension 아래서 물질은 각각 음(negative) 또는 양(positive)인 단축결정(uniaxial crystal)의 특성이 나타나며 실질적인 광축(effective optic axis)은 stress 방향에 있고, 시료 위의 어떤 점에서 유도된 이중굴절로 인한 retardance는 principal stress difference, 즉  $\sigma_1 - \sigma_2$ 에 비례한다. 여기서 시그마들은 수직인(orthogonal) principal stress이다. 예를 들어 시료에 tension이 수직으로 존재하는 판이라면  $\sigma_1$ 은 수직방향에서 최대 principal stress이고 수평인  $\sigma_2$ 는 최소 principal stress(때때로 0)이다. 물질 내부의 복잡한 상황에서 principal stress들은 그들의 차와 함께 영역별로 변할 것이다.  $\sigma_1 - \sigma_2$ 가 일정한 지역은 등색(같은 색)의 지역(isochromatic regions)으로 알려져 있고 그러한 각 영역은 특별한 색깔과 일치하며 색깔이 다른 여러 영역이 겹쳐진 부분은 검은 띠로 나타난다. 등복각 (isoclinic or isoclinals) 띠(band)로 알려진 검은 영역과 아름답게 보이는 fringe pattern은 stress의 지도와 양적인 계산을 위한 기초를 제공한다.

Photoelasticity는 stress를 연구하는 기초적인 기술이다. 예를 들면 고르게 annealing 되지 않아 stress가 있는 자동차의 앞 창 유리 또는 망원경 렌즈는 photoelasticity로 쉽게 내부의 stress를 검지해 낼 수 있고, 따라서 stress가 내부적으로 있는 부적절한 유리나 렌즈를 자동차나 망원경에 장착하는 것을 미연에 차단할 수 있다. 불투명한 물질의 표면의 strain에 관한 정보는 조사하고자 하는 부분에 photoelastic coating을 함으로써 얻어질 수 있다. Coating 물질로는 광학적 stress에 민감한 epoxy, glyptol 또는 modified polyester resin이 사용된다.

**실험 5: (Photoelasticity):** Stress가 내부에 있는 물질의 birefringence는 장소에 따라 다르기 때문에 그 제품을 편광판 사이에 놓으면 내부 stress를 나타내는 복잡한 fringe pattern을 볼 수 있다. 두 장의 polarizer 사이에 투명한 plastic을 놓고 시험에 보아라. 특히 손으로 stress를 가하면 어떤 현상이 나타나는지 관찰해 보아라. 내부 stress로 인한 간섭무늬가 보일 것이다.



(a) A permanently stressed piece of clear plastic between crossed polaroids.  
(b) The fringe pattern changes with the application of a force.



## 8.6.2 The Faraday Effect

Faraday effect는 Michael Faraday가 1875 년에 발견한 현상으로 일명 magneto-optic effect라고도 하며 최초로 전자기와 빛 사이의 상호관계를 밝힌 것으로, optical activity와 유사하지만 원리적인 면에서 큰 차이가 존재한다. 강한 외부 자기장이 가해진 물질 속을 지나가는 빛은 그 자기장의 영향을 받아 일정한 각으로 도(rotating)는 것이 관측된다.

입사평면 파가 자기장이 가해진 물질 속을 통과하고 난 후 돌아 간 각  $\beta$  (분으로 잰 각)는 다음의 경험 식으로 표현된다.

$$\beta = V_c B d \quad (8.48)$$

$\beta$ : Modulator를 나온 편광 빛이 입사 축에 대해 돌아간 각(rotated angle).

$V_c$ : 온도와 입사 파장에 의존하는 Verdet constant.

일반적으로  $V_c$ 는 상온에서 sodium light (589.3nm)로 측정한 값이다.

$B$ : Gauss 단위로 측정된 가한 자기장.

$d$ : cm 단위로 측정된 빛이 지나가는 매질의 길이.

물질에 따른  $V_c$ 는 다음과 같다. 모든 시료는 589.3nm로 측정한 값이며 \*는 특별히  $\lambda = 578\text{nm}$  and 760 mmHg에서 측정한 값이다.

물질 (material)	온도 (°C)	$V_c$ (min of arc/ gauss · cm)
Light flint glass	18	0.0317
Water	20	0.0131
NaCl	16	0.0359
Quartz	20	0.0166
NH <sub>4</sub> Fe(SO <sub>4</sub> ).12H <sub>2</sub> O	26	-0.00058
Air*	0	6.27x10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub> *	0	9.39x10 <sup>-6</sup>

(예) 1 Tesla(10<sup>4</sup> gauss)에 있는 1cm 길이의 물 시료를 통과한 편광 된 빛의 돌아간 각은

$$\beta = V_c B d = (0.0131 \text{ min/ gauss} \cdot \text{cm})(1 \times 10^4 \text{ gauss})(1 \text{ cm}) = 131 \text{ min}$$

$$1^\circ = 60' \text{ 이므로 } \beta = 2^\circ 11'$$

표에서 양(positive)의  $V_c$ 는 빛이  $\vec{B}$ -field에 평행(parallel)일 때 Faraday effect가 l-rotatory, 반평행(antiparallel)일 때 d-rotatory인 반자성 물질(diamagnetic materials)에서 나타난다. 그러한 역전 handedness는 자연의 optical activity의 경우에는 결코 일어나지 않는다. 이것을 이해하기 위하여 시료 주위에 감긴 solenoid coil의 전류로 만들어진 B-field를 생각하면,  $V_c$ 가

positive일 때 진동 면(the plane of vibration)은 beam의 축에 따른 진행방향과 관계없이 coil 속을 흐르는 전류와 같은 방향으로 회전한다. 따라서 시료를 통해 여러 번 빛을 앞뒤로 반사시키면 회전 각을 증폭시킬 수 있다.

Faraday effect는 원자나 분자의 에너지 level에  $\vec{B}$ 의 효과를 포함하는 확산의 양자역학 이론으로 취급하여 해결한다. 여기서는 단순히 비자성 물질에 대한 제한된 고전이론을 개괄하는 것으로 제한할 것이다. Circular이면서 단색(monochromatic)인 입사 광을 가정하자. 하나의 탄성적으로 구속된 전자는 도는  $\vec{E}$ -field에 의해 이끌려 진(driven) 일정한 상태(steady state)의 원 궤도를 가지려고 하는 경향을 보일 것이다. 이 궤도의 평면에 수직으로 가해진 큰 자기장은 그 전자에 작용하는 중심 축 힘(radial force)  $F_M$ 을 초래한다. 빛의 handedness와 가한 자기장  $\vec{B}$ -field의 방향에 의존하는 그 힘은 원의 중심이나 밖으로 향할 수 있다. 그러므로 총 radial force( $F_M$  + 탄성 복원력)는 두 개의 다른 값을 가질 수 있고 궤도의 반경도 역시 그러할 수 있다. Optical activity를 논할 때 두 개의 굴절률  $n_R$ 과  $n_L$ 이 있는 것처럼 결과적으로 주어진 자기장에 대해 전기 dipole moment, polarization 그리고 permittivity에 대한 두 개의 다른 값이 있을 것이다. 이 후 이론은 앞에서 논한 Fresnel의 optical activity로 취급하면 된다.

강자성 물질(ferromagnetic substances)에 대한 것은 좀더 복잡하다.  $\beta$ 는 가해진 직류 장(dc field)의 성분보다 오히려 진행방향(direction of propagation)에서 자화(magnetization)의 성분에 비례하여 나타난다.

## Faraday effect modulator 응용

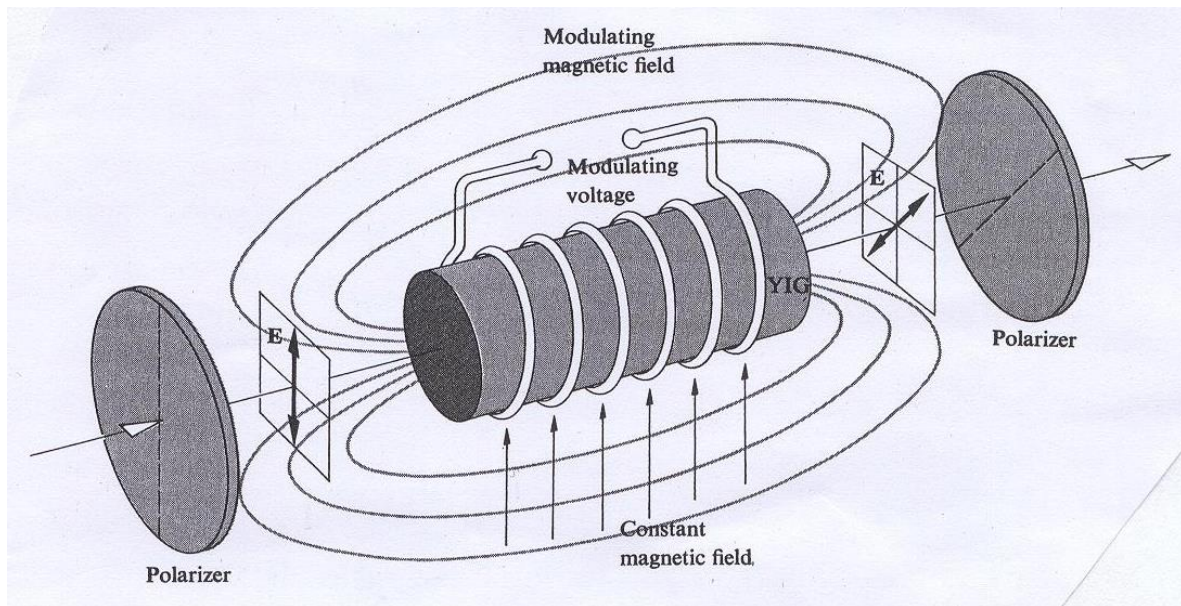
- (a) Hydrocarbon의 혼합물(mixture)의 분석: Hydrocarbon의 각 구성은 특성적인 magnetic rotation을 갖고 있기 때문에 hydrocarbon의 혼합물을 분석하는 데 사용된다.
- (b) Faraday effect를 spectroscopic study로 활용하면 ground level 이상의 에너지 상태의 특성에 관한 정보를 얻을 수 있다.
- (c) Laser를 이용한 현대통신의 파의 진폭, 편광, 전파방향, 위상, 주파수 변조에 응용할 수 있다.
- (d) YIG Faraday effect modulator: Modulator는 빛의 흡수가 가능한 한 작고 나오는 빛의 회전 각은 커야 한다. Gallium이 약간 첨가된 YIG(yttrium-iron garnet)는 인조 합성한 강자성 신 물질의 일종으로 적외선 modulator에 사용된다.

**YIG modulator의 원리:** 아래 그림은 YIG를 이용한 modulator의 작동원리를 요약한 것으로 좌측에서 선형 적외선 laser beam이 modulator로 들어온다. 적외선 laser beam이 지나는 축을 가로질러 가하는 dc 자기장은 YIG crystal 내에서 외부에서 가한 그 자기장의 방향과 관계한 자화(magnetization)를 포화(saturation)시킨다. 자화는 coil 속을 흐르는 modulating current 양에 비례하여 YIG 결정의 축 쪽으로 기울어지기 때문에 총 자화는 방향에 따라 변할 수 있다.

Faraday rotation은 그 자화의 축 성분에 의존하며 coil의 전류는 돌아가는 각  $\beta$ 를 지배한다. 요약하면 전달되는 signal은 voltage로 조절되는 coil을 가로질러 들어오고 나오는 laser beam은



Malus's law가 적용되는 output polarizer에 의한 진폭변화의 형태 속에 그 정보(돌아 간 각의 정보)를 전달한다.



실제적으로는 여러 개의 다른 magneto-optic effect가 존재한다. 그 중 Voigt effect와 Cotton-Mouton effect는 투명한 매질에 일정한 자기장이 입사광의 진행방향에 수직으로 가해졌을 때 나타나는 것으로 전자는(Voigt effect) 기체에서, 후자는 액체에서 일어나는 현상이다. 양 경우 모두 매질은 광축이 입사 광에 수직인 dc 자기장 방향에 있는 uniaxial crystal과 유사한 이중굴절을 나타낸다. Uniaxial crystal에서 두 개의 굴절률은 Cotton-Mouton effect에서 파의 진동 면이 가한 외부 자기장에 수직이거나 평행인 상황에 부합하며, birefringence  $\Delta n$ 은 자기장의 제곱에 비례한다. 액체 속에서 일어나는 이러한 현상은 매질 분자가 광학적 및 자기적으로 비등방적 배열이기 때문이다. 정적 장(static field)에 대해 0 나  $\pi/2$ 가 아닌 어떤 각에서 빛이 들어와 진행한다면 Faraday와 Cotton-Mouton effect가 동시에 일어난다. 여기서 Faraday effect는 일반적으로 후자의 효과보다 훨씬 더 크며, Cotton-Mouton effect는 다음의 Kerr electro-optic effect와 상당히 유사하다.

## 8.6.2 The Kerr and Pockels Effects

### (i) The Kerr effect

투명한 등방적 물질(isotropic transparent material)을 전기장  $\vec{E}$  속에 놓으면 광축(optic axis)이 가해진 전기장의 방향과 일치하는 uniaxial crystal의 특성을 갖는 이중굴절(birefringence)을 일으킨다. 두 개의 굴절률  $n_{\parallel}$ 과  $n_{\perp}$ 는 가한 전기장의 진동평면의 두 방향, 즉 전기장에 평행 및 수직방향과 관련이 있고 그들의 차 birefringence( $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ )는 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta n = \lambda_o K E^2 \quad (8.49)$$

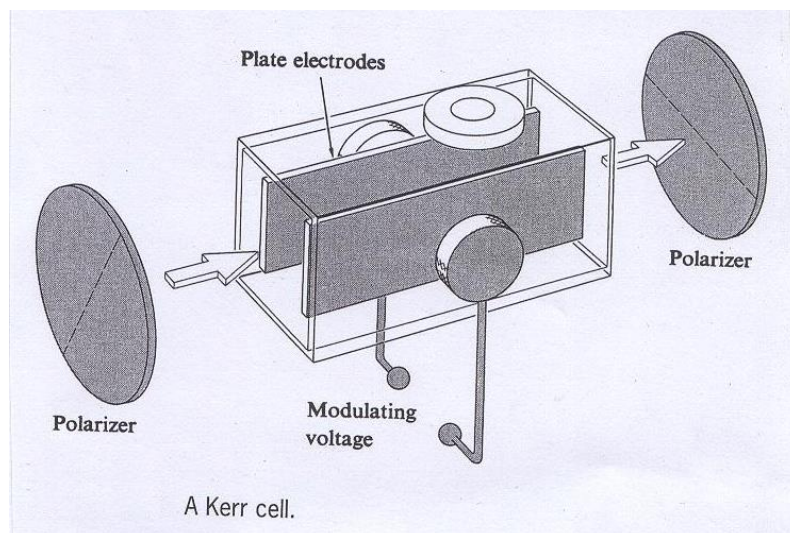
여기서  $K$ 는  $\lambda_o = 589.3\text{nm}$ 를 가지고  $20^\circ\text{C}$ 에서 측정한 Kerr constant 값으로 물질에 따라 그 값은 다음과 같다.

물질(Substance)		$K$ (in units of $10^{-7}\text{cm}\cdot\text{statvolt}^{-2}$ )
Benzene	$\text{C}_6\text{H}_6$	0.6
Carbon disulfide	$\text{CS}_2$	3.2
Chloroform	$\text{CHCl}_3$	-3.5
Water	$\text{H}_2\text{O}$	4.7
Nitrotoluene	$\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$	123
Nitrobenzene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	220

※ 1statvolt  $\approx$  300 V

$K$ 가 양(positive)이면  $\Delta n$ 은 양으로 이 경우 물질은 마치 positive uniaxial crystal처럼 행동하며, 전기장의 자승에 비례하므로 종종 quadratic electro-optic effect라 하고, 자기장에 자승으로 반응하는 Cotton-Mouton effect와 대비된다. 액체에서 Kerr effect가 나타나는 원인은 전기장에 의해 비등방적 분자들의 일부 정렬에 기인하며 고체에서 상황은 이보다 훨씬 복잡하다.

다음 그림은 광학적 modulator인 Kerr shutter(보통 Kerr cell로 명명)를 나타낸 것으로, 두 개의 전극을 양단에 가진 하나의 유리 셀과 그 속에 극성 액체(polar liquid)로 채워진 구조로 이루어져 있다.



이 장치는  $\pm 45^\circ$  (가하는 외부 전기장  $\vec{E}$ -field에 대해)로 기울어져 놓인 선형편광 판 사이에 위치하기 때문에 Kerr cell의 전극 판에 전압을 가하지 않으면(0 voltage) 첫 polarizer에서 나온 cell을 투과하는 빛은 각의 변화가 없어 두 번째 polarizer를 통과하지 못한다. 이것은 마치

shutter가 닫힌 것과 같다. Cell에 modulating voltage를 가하면 전기장을 생성하고 이 전기장은 입사 파를 적절히 회전시켜 마치 shutter가 적당히 열리게 하는 기능을 수행한다. 이 기구는 열고 닫는 데 대충  $10^{10}$  Hz 에 효과적으로 반응할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. Kerr cell은 보통 nitrobenzene(독성이 있는 화약재료) 또는 carbon disulfide( $CS_2$ )가 채워져 다양한 응용 분야에서 사용된다. 예를 들면 그들은 초고속 사진에서의 shutter, 또는 톱니화된 바퀴를 대체하는 light-beam chopper, 또는 pulsed laser system의 O-switch로 사용되어 왔다. 고체 물질로는 투명한 KTN( $KTa_{0.65}Nb_{0.35}O_3$ )이나  $BaTiO_3$  가 Kerr effect를 보여 준다.

만일 electrodes로 기능하는 판들(plates)의 길이가  $l$  cm 이고 두 전극 판의 거리가  $d$  만큼 떨어져 있다면 retardation은 다음으로 주어진다.

$$\Delta\phi = 2\pi K l V^2 / d^2 = 2\pi K l E^2 \quad (8.50)$$

여기서  $V$  는 가한 전압이며 전기장  $E = V/d$  이다.

(예)  $d=1$ cm,  $l$ 은 수 cm인 nitrobenzene cell이 half wave plate처럼 작용하려면 가하는 전압은 대충  $V=3 \times 10^4$  V 이어야 하고 이것은 half wave voltage  $V_{\lambda/2}$  로 알려진 특별한 값이다.

## (ii) The Pockels effect

Pockels effect는 유도된 birefringence가 가한 전압에 일차로 비례하는 대단히 중요한 또 다른 electro-optical effect이다. 이것은 crystallography에서 32개의 point group중 center symmetry가 없는 20개의 point group에 속한 압전(piezoelectric) 결정들에서만 나타나는 현상이다. 그러므로 center symmetry가 있는 crystal과 액체는 이 효과를 보여 줄 수 없다.

이것의 원리는 고체 Kerr cell과 같고 polarization modulator로써 기능한다. 첫 번째 실질적인 Pockels cell은 1940년대 적절한 결정들이 개발될 때까지 shutter나 modulator로 사용될 수 없었다. 초기 물질로는 다음과 같은 것들이 사용되었다.

Ammonium dihydrogen phosphate(ADP:  $NH_4H_2PO_4$ )

Potassium dihydrogen phosphate(KDP:  $KH_2PO_4$ )

현재는 중수의 용액 속에서 growing시켜 단결정(single crystal)로 만든 상당히 개선된 다음의 결정들이 많이 사용된다.

Potassium dideuterium phosphate( $KD^*P$ :  $KD_2PO_4$ )

Cesium dideuterium arsenate( $CD^*A$ )

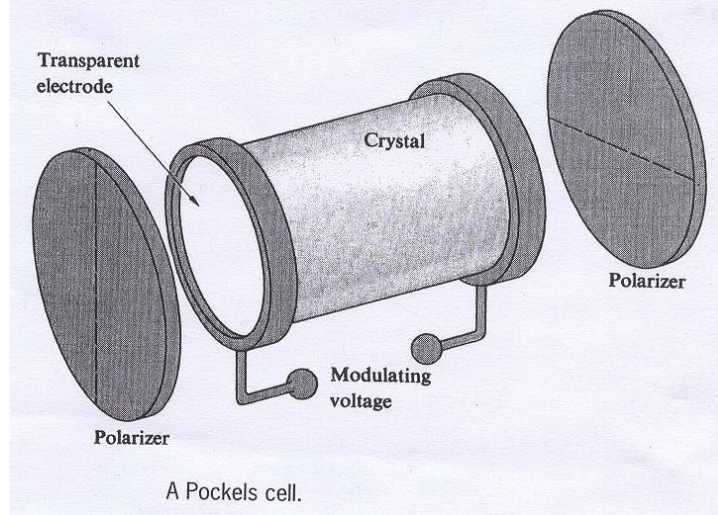
이 분야는 첨단 기술로 새로운 물질을 찾으려는 노력이 진행 중이다.

예를 들면 lithium tantalite 또는 lithium niobate, barium titanate, rubidium dihydrogen arsenate등등 열거할 수 없을 정도로 많다.

Pockels cell은 동등한 Kerr cell보다 5~10배 정도 훨씬 작은 전압에서 동작하고 KDP의 경우 반응시간은 10ns 보다 작으며 약 25GHz까지의 light beam을 변조시킬 수 있다.

여기에는 가한 E-field가 빛이 진행하는 방향에 수직 또는 평행인가에 따라 의존하는 transverse

와 longitudinal로 언급된 두 개의 보편적인 cell 구성이 있다. 가장 기본적인 형태는 다음 그림에서 보여주는 longitudinal type으로, beam은 electrodes를 횡단하기 때문에 이것들은 보통 SnO, InO, 또는 CdO와 같은 투명한 금속산화물 coating으로 이루어진다.



일반적으로 결정 자체는 가한 field가 없는 상태에서 uniaxial이며 광축은 beam의 진행방향을 따라 있도록 정돈된다. 그러한 정돈에서 retardance는 다음으로 주어진다.

$$\Delta\phi = 2\pi n_o^3 r_{63} V / \lambda_o \quad (8.51)$$

여기서  $r_{63}$ 은 단위가 m/V인 electro-optic constant,  $n_o$ 는 ordinary 굴절률,  $V$ 는 전압,  $\lambda_o$ 는 진공에서의 파장이다. 결정들은 비등방적이고 그들의 특성은 방향에 따라 다르기 때문에 그들은 2차 electro-optic tensor  $r_{ij}$ 로 표시되는 항들의 group에 의해 기술되지만 다행히도 우리는 그러한 components 중에서 다음 표에 나타난 단지 하나인  $r_{63}$ 의 값만이 필요하다.

Material	$r_{63} (10^{-12} \text{ m/V})$	$n_o$	$V_{\lambda/2} (\text{kV})$
ADP( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )	8.5	1.52	9.2
KDP( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	10.6	1.51	7.6
KDA( $\text{KH}_2\text{AsO}_4$ )	~13.0	1.57	~6.2
KD*P( $\text{KD}_2\text{PO}_4$ )	~23.3	1.52	~3.4

Half wave voltage는  $\Delta\phi = \pi$ 에 부합하므로 retardance는 또한 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta\phi = \pi \frac{V}{V_{\lambda/2}} \quad (8.52)$$

(10.51)과 (10.52)를 같게 놓으면

$$\Delta\phi = \pi \frac{V}{V_{\lambda/2}} = \frac{2\pi n_o^3 r_{63} V}{\lambda_o} \rightarrow V_{\lambda/2} = \frac{\lambda_o}{2\pi n_o^3 r_{63}} \quad (8.53)$$

(예) KDP에 대해  $\lambda_o = 546.1 \text{ nm}$ 로 측정한  $V_{\lambda/2} \approx 7.6 \times 10^3 \text{ V}$

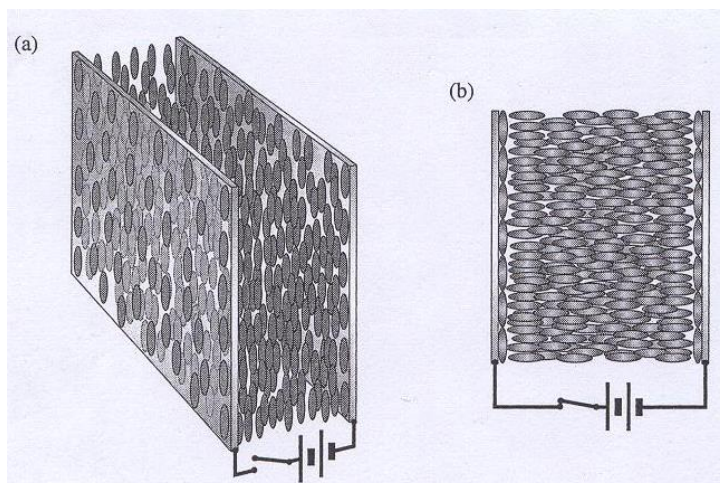


## 8.7 Liquid Crystals

Liquid crystal(LC)은 위치적인 정돈(positional order)이 없이 일반적인 액체처럼 이리저리 움직일 수 있는 긴 담배-형태의 분자들이지만 결정처럼 그들 분자들은 큰 scale의 directional order를 유지하기 위하여 강하게 상호작용한다. 여기에는 분자의 정돈 방법에 따라 구분되는 세 가지 형태의 LC가 있고, 여기서는 분자들이 비록 위치가 제멋대로이지만(random) 다소간 평행으로 나열하려는 경향을 가진 nematic variety 현상에 초점을 맞출 것이다.

※ Nematic variety: 가늘고 긴 분자가 상호 위치는 서로 불규칙하지만 장축이 모두 일정 방향으로 향하는 변화를 보여주는 현상.

Parallel nematic cell을 준비하려면 투명한 도체 film, 예를 들면 450~1800nm에서 최대 투과를 갖는 indium tin oxide film을 평판인 두 유리판 각각의 한 면에 부친다. 이 두 유리판 사이에 LC를 넣고 film을 붙인 유리창들은 전압을 가할 전극으로 사용한다. 유리판과 LC 분자들이 상호간에 평행이 되도록 하기 위하여 평행한 골마루(ridge)의 수지형판을 만드는 것이 필요하며 이 골마루를 따라 분자들이 나열할 수 있도록 조심스럽게 indium tin oxide film 위에 얇은 유전체 layer를 덮어 문지른다. 이때 LC는 평행하게 microgroove를 형성하며 나열된 nematic LC의 분자 두께는 대략 수 미크론부터 최대 10 $\mu$ m 정도이고, LC의 분자들이 길게 나열된 방향을 director라 한다. 가늘고 긴 정렬된 방향 때문에 이 LC는 positive uniaxial birefringence의 하나인 비등방적 유전체로써 행동한다. 분자의 긴 축은 extraordinary index (slow axis)로 정의하고, LC director에 평행하게 선형으로 편광 된 빛은 e-ray가 되며 이것은 cell을 통과할 때에 phase 변화를 경험한다. 이와 대조적으로 director에 45°로 선형편광 된 빛은 이중굴절 결정을 통과한 것처럼 retardance  $\Delta\phi$ 를 갖는다.



(a) LC molecules align parallel to a set of microgrooves on the inside faces of the two transparent electrodes.

(b) When a voltage is applied, the molecules rotate into alignment with the field.

Cell을 가로질러 전압  $V$ 를 가하면 유리창에 수직인 전기장이 만들어 지며(위의 우측 그림)

electric dipole이 나타나거나 유도되고 이때 LC 분자들은 전기장에 정렬하려는 회전이 일어나 torque를 경험한다. 전압이 증가하면 LC는 유리창 내부 표면에 고착된 것들을 제외하고 점점 더 전기장 방향으로 회전하는 분자들이 늘어나, 그 결과 birefringence  $\Delta n = n_e - n_o$  가 감소하므로  $\Delta\phi$  도 따라 감소한다. 통상적으로 birefringence  $\Delta n$  은 0.1 에서 0.3 정도로 다음 수식과 같이 전압, 온도( $1^\circ\text{C}$  증가에 대해 약 0.4% 감소), 파장의 함수이다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_o} d \Delta n(V, T, \lambda_o) \quad (8.54)$$

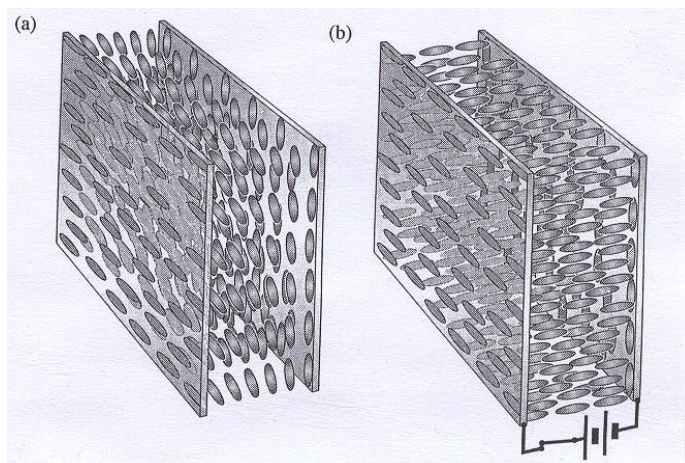
최대 retardance(전형적으로  $\lambda_o/2$ , 각으로는  $\pi$ )는 가한 전압이 0 일 때 얻어진다.

V 가 클 때(20 V 정도) retardance는 약 30 nm로 하나의 최소값(minimum)이 되며 compensator를 사용하여 이것을 제거하면 0로 만들 수 있다.

입사광이 slow axis에 평행인 편광이라면 이 기구는 voltage-controlled phase modulator로 사용할 수 있다. 또한 빛이 slow axis에 수평과 수직성분을 가질 때 이 LC cell은 넓은 영역대의 주 파수에 대한 연속적인 변화 retarder로 기능한다.  $\pm 45^\circ$ 로 교차된 편광 판 사이에 cell을 놓으면 이것은 하나의 전압으로 조정되는 irradiance modulator가 된다

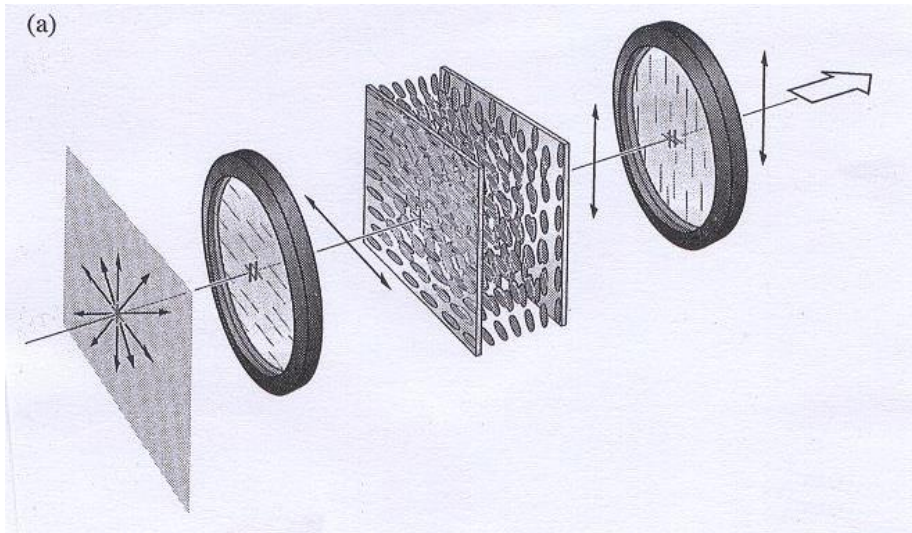
## The Liquid Crystal Display (LCD)

평행인 LC cell windows 중 하나를  $90^\circ$  돌리면 분자 층이 돌린 축을 따라 다음 그림처럼 나선(spiral)으로 꼬이게 된다. 이때 이것을 twisted nematic cell이라 한다. 아래 그림 (b)처럼 전압을 가하면 LC 분자들은 유리창에 고착된 것들을 제외하고 전기장에 평행하게 정렬하여 꼬인 구조가 사라지면서 입사광의 편광평면을 돌리는 능력을 잃는다. 전기장을 제거하면 cell은 다시 꼬인 구조로 돌아가고 빛을 다시 회전시킬 수 있다. 만일 cell이 교차된 편광판(polarizer) 사이에 놓이면 이것은 입사광을 흡수하거나 통과시킬 수 있는 전압으로 조정되는 switch로 작동할 수 있다.



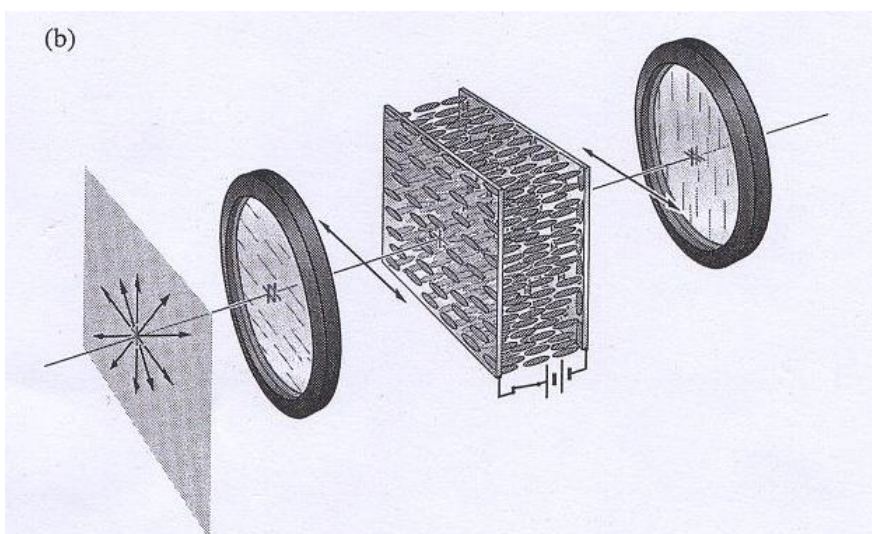
- (a) A twisted nematic cell, The LC molecules are aligned horizontally on the left window and vertically on the right window. They gradually twist (plane upon plane) from one to the other.  
 (b) When a voltage is applied across the cell the molecules align with the electric field.

LCD를 만들려면 마지막 편광 판 뒤에 편광한 거울을 놓는다. 좌측에서 입사하는 비편광 빛은 일차 편광 판에서 수평편광이 된다. 전압을 걸지 않은 LC cell을 통과한 이 빛은 수직편광으로 바뀌면서 편광이 수직인 두 번째 편광판을 그대로 통과하여 뒤에 놓인 거울에서 반사하고 다시 원래 길로 되 돌아간다. 이때 수직 편광이 다시 LC cell을 통과하면 수평 편광이 되어 나오므로 그 빛을 보면 나오는 빛은 상대적으로 밝다.



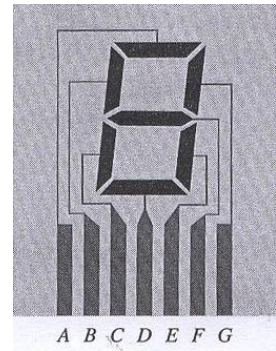
(a) A twisted nematic cell between crossed linear polarizers.  
Light polarized vertically emerges from the device.

Cell에 전압을 가하면 아래 그림처럼 LC 분자들이 재 정돈되면서 편광면을 돌리는 능력을 상실하므로 이때 일차 수평편광은 그대로 LC cell을 통과하여 2차 수직편광 판에서 모두 흡수되기 때문에 거울에서 반사가 없으므로 까맣게 보인다. LCD에 글자를 나타내는 원리는 이러한 현상을 응용한 것이다.



(b) When a voltage is applied across the cell it no longer rotates the plane of polarization. Light polarized horizontally enters and leaves the LC cell. That light is subsequently absorbed by the second polarizer and no longer emerges from the device

가장 간단한 liquid crystal display(LCD)는 계산기, 시계, 카메라 등등 대단히 작은 전기 에너지를 소모하는 장치들이다. 이들의 원리는 투명 전극 앞에 적절히 LC cell을 구성하여 까만 비반사 영역을 숫자나 글자 형태로 나타낼 수 있게 한 것이다. 보통 계산기의 숫자는 독립적으로 작용하는 7개의 작은 전극 bar를 digital 신호에 의해 조정하여 나타낸다. 이 bar들은 앞 window의 indium tin oxide film 위에 독립적인 영역으로 형성된다. 주어진 bar와 뒤의 전극을 가로질러 전압이 가해지면 bar 뒤의 전기장은 LC twist를 파괴한다.



**실험 6:** 계산기나 LC monitor 위에 편광판을 놓고 돌리면 글자나 그림이 보이지 않는 순간이 있을 것이다. 이것은 바로 LCD가 위의 현상에 의한 편광 된 빛이 나오기 때문이다.

연습문제



