

콜레스테릭 액정을 사용한 액정 원편광기의 설계, 제작 및 평가

공홍진 · 강주식 · 이재용
한국과학기술원 물리학과

(1993년 3월 29일 받음)

ZLI-1167과 CB15의 혼합 액정에 대하여 CB15의 혼합비를 바꾸어 가면서 파장에 대한 투과율을 측정하여 CB15의 혼합비와 이에 따른 선택적 반사대 중심파장간의 관계식을 찾아내었으며, 이로부터 632.8 nm에 대한 액정 원편광기를 설계, 제작하고 평가하였다. 본 연구에서 제작된 액정 원편광기를 통과한 빛의 타원도는 0.98로 측정되어 원편광기로 기능함을 확인하였다.

I. 서 론

1888년에 F. Reinitzer는 고체에서 액체로 변화할 때 두번 이상의 상 전이를 일으키는 물질들이 존재한다는 것을 처음으로 발견하였으며,^[1] 이들 물질은 1890년에 O. Lehmann에 의해 액정(liquid crystal: LC)이라 명명되고^[2] 1922년에 Friedel에 의하여 분류되어졌다.^[3] 이중 콜레스테릭 액정(cholesteric liquid crystal: CLC)은 그 특유의 나선구조로 인하여 빛의 파장과 편광에 대해 선택적 반사를 일으키는 특성을 가지고 있다. 즉 나선의 회전 방향과 같은 방향의 원편광 빛이 나선의 주기와 비슷한 파장을 가질 때 전반사되게 되는데, 액정 온도계, 액정 텍타이핀 등은 이 특성을 응용한 예이다. Jacobs는 이 특성을 이용하면 CLC 액정 셀로 원편광기를 제작할 수 있음을 보였다.^[4] 액정 원편광기는 단일 부품으로써 원편광의 빛을 만들 수 있다는 가장 큰 장점과 아울러 대구경으로의 제작이 용이하고 정렬(align)이 쉽다는 장점도 가진다.

CLC를 투과한 빛이 외부에서 되반사될 때에는 편광 상태가 반대 방향의 원편광으로 바뀌게 되므로, 편광의 선택적 반사 특성으로 인하여 다시 CLC로 입사될 때 투과하지 못하게 되어, CLC는 광단절기(optical isolator)로도 기능하게 된다. 반면에 액정 원편광기는 특정 파장영역에서만 원편광기로서의 기능을 하므로, 사용하고 자 하는 파장에 대한 원편광기를 제작하기 위해서는

사용하는 액정에 대한 특성의 분석이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 ZLI-1167과 CB15의 혼합 액정에 대하여 CB15의 혼합비에 따른 선택적 반사대의 변화를 측정하였으며, 셀의 최적 두께를 찾기 위하여 셀의 두께에 대한 투과율의 변화를 측정하였다. 이 결과들을 이용하여 632.8 nm의 광원에 사용할 액정 원편광기를 설계하고 제작하여 이의 특성을 조사하였다.

II. 이 론

1. CLC의 선택적 반사

콜레스테릭 액정의 분자 배열은 그림 1과 같다. 미시적으로 볼 때, 가정된 각 층(layer)은 평균적으로 한 방향으로 나란히 배열한 분자들로 구성되어 있는데, 이 분자들의 평균 방향을 가리키는 단위벡터를 방향자(director)라고 하며 n 으로 표시한다. 각 층을 이루는 분자들은 광활성(optical activity)을 가지므로, 층마다 작은 각도(10~30 arcsec)로 회전하게 되어 전체적으로 방향자가 광축(optical axis)을 따라 나선을 그리는 구조를 가진다.^[5]

광축이 z방향이고, 방향자의 공간적 주기인 피치(pitch)가 P인 우선형 CLC에 대한 방향자를 직각 좌표계의 성분으로 표시하면

$$n_x = \cos\theta(z), \quad n_y = \sin\theta(z), \quad n_z = 0 \quad (1)$$

본 연구는 한국표준과학연구원의 연·학협동연구사업의 지원을 받아 수행되었음.

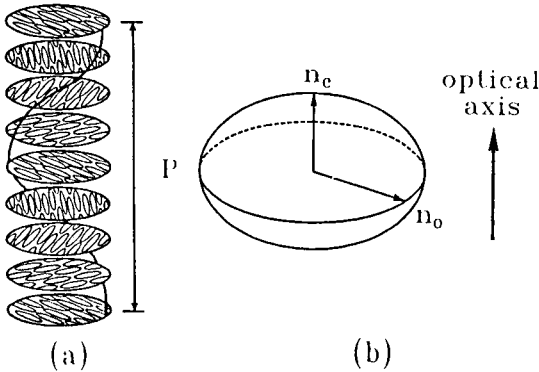


그림 1. Structure of cholesteric liquid crystal (CLC) whose pitch length is P. (a) molecular order of CLC (b) indicatrix and optical axes.

와 같고, 이 때 $\theta(z)$ 는

$$\theta(z) \equiv qz = 2\pi z/P \quad (2)$$

이다.

z 축 방향으로 빛이 수직 입사하는 경우 Maxwell 방정식은

$$-\frac{d^2}{dz^2} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \hat{\epsilon}(z) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

인데, $\hat{\epsilon}(z)$ 는 CLC의 유전율 텐서로

$$\hat{\epsilon}(z) = \epsilon_{av} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{\epsilon_a}{2} \begin{pmatrix} \cos 2\theta(z) & \sin 2\theta(z) \\ \sin 2\theta(z) & -\sin 2\theta(z) \end{pmatrix} \quad (4)$$

이다. 여기서 $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 는 유전 이방성(dielectric anisotropy)을, ϵ_{av} 는 평균 유전상수를 나타내며, ϵ_{\parallel} 와 ϵ_{\perp} 는 방향자의 방향과 각각 평행, 수직인 유전상수이다.

$$-\frac{d^2 E_x}{dz^2} = k_0^2 E_x + k_1^2 E_x e^{i2\theta(z)} \quad (5)$$

와 같이 되며, 이 때

$$E_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{x+} + iE_{x-})$$

$$k_0^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon_{av}$$

$$k_1^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \frac{\epsilon_a}{2} \quad (6)$$

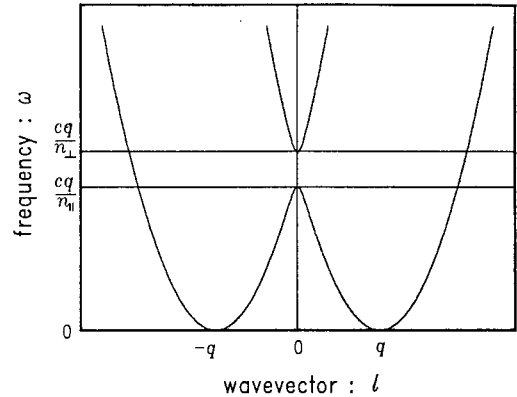


그림 2. Dispersion curve for CLC whose pitch length is P. $q=2\pi/P$: wavenumber of the CLC, n_{\parallel} , n_{\perp} : refractive indices parallel and perpendicular to the LC molecule, respectively.

인데, 위의 Maxwell 방정식을 만족하는 해는

$$E_x = A_{\pm} e^{i(l \pm q)z} \quad (7)$$

이며, wave-vector l 은

$$l^2 = k_0^2 + q^2 \pm \sqrt{4k_0^2 q^2 + k_1^2} \quad (8)$$

을 만족한다.^[6]

ω 와 l 과의 관계인 분산관계(dispersion relation)를 그려보면 그림 2와 같은데, 방향자의 방향과 각각 평행, 수직인 방향의 굴절률을 n_{\parallel} , n_{\perp} 라고 할 때 $l^2 < 0$ 이 되는 영역 $cq/n_{\perp} < \omega < cq/n_{\parallel}$ 에서는 우원편광은 모두 반사되어 없으며 좌원편광 빛만이 존재함을 알 수 있다. 이것을 CLC의 선택적 반사(selective reflection)라고 하며, 이때 선택적 반사대(selective reflection band: SRB)의 중심 파장 λ_0 와 SRB의 폭 $\Delta\lambda$ 는 액정분자의 평균 굴절률이 $n_{av} = (n_{\parallel} + n_{\perp})/2$ 이고, $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ 일 때

$$\lambda_0 = n_{av} P \quad (9)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta n}{n_{av}} \lambda_0 \quad (10)$$

이다.

2. 액정의 혼합과 특성 조사

일반적으로 두 종류의 콜레스테릭 액정을 혼합함으로써 새로운 콜레스테릭 액정을 만들 수 있는데, 두 액정의 혼합비에 따라 피치, 따라서 SRB의 중심파장이 변하게 된다. SRB의 중심파장 λ_0 의 역수를 회전능(rotatory

power) Θ 라고 정의하면 ($\Theta = \lambda_0^{-1}$)^[7]

$$\Theta = \alpha\{\Theta_1 + (1-\alpha)k_{21}\} + (1-\alpha)\{\Theta_2 + \alpha k_{12}\} \quad (11)$$

로 표시되는데, Θ_1 과 Θ_2 는 각각 액정 1과 액정 2의 회전능, α 는 액정 1의 질량 혼합비, k_{ij} 는 액정 j 에 의해 액정 i 에 유기된 회전능을 나타낸다. ($i, j=1, 2$)

액정 2가 네마틱인 경우에는 피치가 무한대이므로 $\Theta_2 = 0$ 이 되어

$$\Theta = (\Theta_1 + k)\alpha - k\alpha^2 \quad (k = k_{12} + k_{21}) \quad (12)$$

가 되고,

$$\lambda_0 = \frac{1}{a_1\alpha + a_2\alpha^2} \quad (a_1 = \Theta_1 + k, a_2 = -k) \quad (13)$$

의 표현을 얻을 수 있다.

따라서 여러 α 에 대한 λ_0 를 측정하여 curve fitting을 실시하여 상수 a_1 과 a_2 를 구해내면, 원하는 파장에서 선택적 반사가 일어나는 액정을 만들기 위한 혼합비 α 를 알 수 있게 되는 것이다.

III. 실험

1. 액정의 특성 조사

네마틱 액정인 ZLI-1167 (Merck사 제품)에 콜레스테릭 액정 CB15 Merck사 제품)을 그 혼합비를 달리하여 혼합하여, CB15의 혼합비가 각각 9.906%, 19.19%, 23.70%, 32.67%, 38.93%인 혼합 액정을 만들었다. CB15의 혼합비와 SRB의 중심 파장과의 관계를 찾기 위하여 각 액정으로 그림 3과 같은 planar 구조를 갖는 셀을 제작하고 spectrophotometer (Shimadzu UV-3100S)로 파장에 대한 투과율을 측정하였다($T = 17.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$). SRB의 중심 파장 λ_0 와 CB15의 혼합비 α 에 대한 실험결과는 그림 4에 도시하였으며, 이를 식 (13)으로 curve fitting한 결과 상수 a_1 과 a_2 는 각각 5.014와 -0.762 로 얻어졌다. 이 함수와 함께 측정값을 그림 5에 나타내었다. 그림 4에서 셀을 제작할 때 buffing을 하지 않은 (d)의 경우는 투과 곡선의 모양이 buffing을 실시한 나머지 투과도 곡선과 다름을 알 수 있다.

이로부터 632.8 nm의 파장에서 선택적 반사를 일으키는 CLC 셀을 제작하기 위해서는 ZLI-1167 66.81%와 CB 15 33.19%의 혼합액정을 사용하여야 함을 알 수 있다.

2. 셀의 두께에 따른 투과율의 측정

액정 원편광기의 셀 두께를 결정하기 위하여 셀 두께에

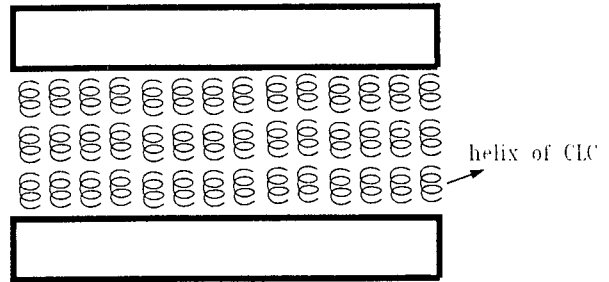


그림 3. Planar (Grandjean) texture of CLC cell.

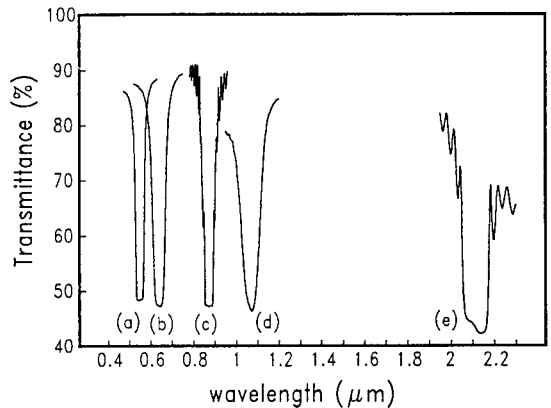


그림 4. Spectral transmittance of mixtures of ZLI-1167 and CB15. (a) CB15 9.906% (b) 19.19% (c) 23.70% (d) 32.67% (e) 38.93%.

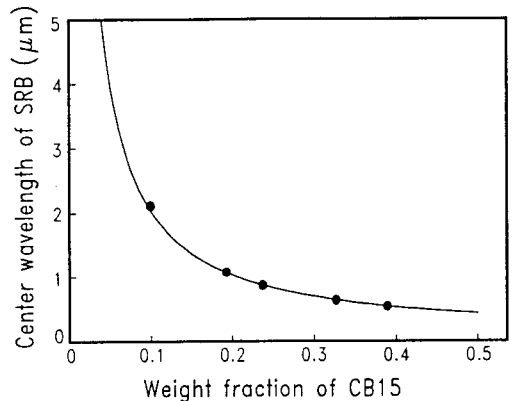


그림 5. Center wavelength of SRB as a function of weight fraction of CB15 in mixtures of ZLI-1167 and CB15.

따른 투과율의 변화를 측정하였다. 췌기 모양의 셀에 CB 15의 혼합비가 $\alpha = 33.19\%$ 인 ZLI-1167과 CB15의 혼합액정을 주입한 후, He-Ne 레이저를 사용하여 두께에

다른 투과율의 측정 실험을 실시하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 이 그림으로부터, 632.8 nm의 광원에 대해 사용할 액정 원편광기의 셀의 두께는 14 μm 이상이 적당함을 알 수 있었다.

3. 원편광기의 제작 및 평가

먼저 셀의 기판으로 사용할 BK7 유리판 (직경 1인치, 두께 6.35 nm)을 깨끗이 세척한 후, 안쪽 면에 alignment layer로써 폴리비닐 알코올(polyvinyl alcohol)의 2% 수용액을 스핀 코팅하고 buffing하였다. 셀의 두께는 SKC의 Skyrol 필름을 사용하여 18 μm 로 하였으며, CB15의 혼합비가 33.19%인 ZLI-1167과 CB15의 혼합 액정을 등방성 액체 상태로 가열하여, 셀에 주사기로 주입하였

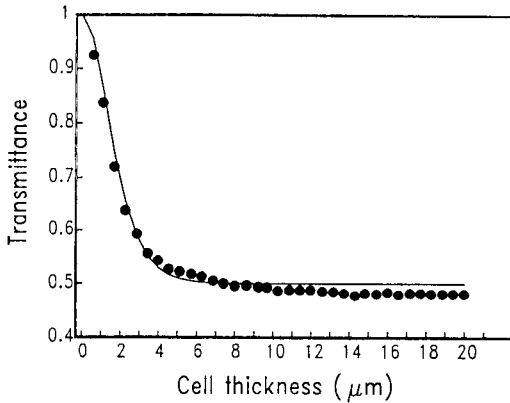


그림 6. Measured transmittance of a CLC to exhibit a selective reflection band peak at 632.8 nm, as a function of cell thickness. The solid line represents the theoretical curve.

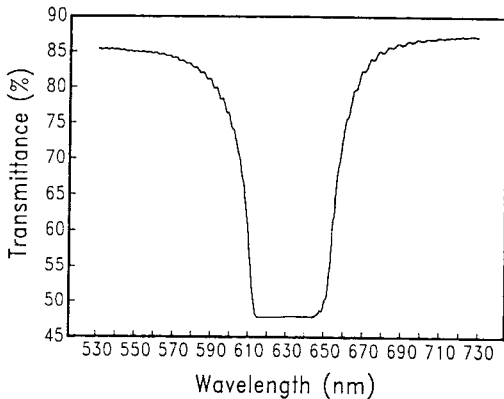


그림 7. Transmission of a CLC cell (tuned to exhibit its selective reflection band peak at 632.8 nm) as a function of wavelength.

다. 1 mm의 shearing에 의하여 focal conic 구조를 Grandjean 구조로 정렬시킨 뒤, 에폭시를 사용하여 셀을 접합하였다. Shimadzu UV-3100S spectrophotometer를 사용하여 투과율을 측정한 결과는 그림 7과 같은데, 이 결과로부터 SRB의 중심 파장이 632.8 nm임을 알 수 있다. 투과율의 최소값이 50% 보다 작은 것은 셀 표면에서의 반사로 인한 손실이 있기 때문이다. 원편광기로서의 기능을 확인하기 위하여 그림 8과 같은 실험장치를 사용하여 투과광의 편광 상태를 조사하였다. 입사광의 일부를 광분할기로 분할시키고 A/D 변환기를 사용하여 광-다이오우드 PD1과 PD2의 신호를 동시에 받아들여 레이저 출력의 요동을 보정할 수 있도록 하였다. 선편광기 LP를 회전시킴에 따라 출력의 변화는 그림 9와 같이 나타났는데 빛의 요동이 주기적(180°)임으로 보아 편광 상태가 타원 편광임을 알 수 있으며, CLC를 투과한 빛의 최대 강도와 요동의 비는 4%이므로, 타원도 (ellipticity)는 0.98임을 알 수 있었다.

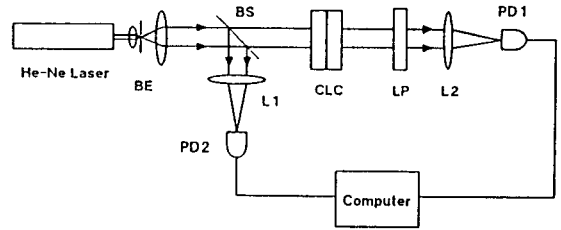


그림 8. Experimental setup for testing polarization of light transmitted the CLC. BE: beam expander; BS: beam splitter; LP: linear polarizer; CLC: cholesteric liquid crystal; PD1, PD2: photodiode; L1, L2: lens.

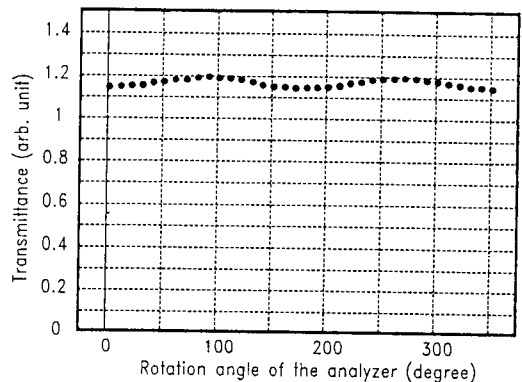


그림 9. Transmittance of CLC vs. rotation angle of the analyzer.

IV. 결 론

콜레스테릭 액정의 선택적 반사를 이용하여 632.8 nm에 대한 원편광기를 설계, 제작하였다. 액정으로는 네마틱 액정 ZLI-1167과 콜레스테릭 액정 CB15의 혼합 액정을 사용하였으며, CB15를 여러가지 혼합비로 혼합하여 파장에 대한 투과율을 측정하므로써 CB15의 혼합비 α 와 액정 셀의 선택적 반사대의 중심 파장 λ_0 간의 관계식 $\lambda_0 = 1/(5.014\alpha - 0.762\alpha^2)$ ($T = 17.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$)을 찾아내었다. 이로부터 632.8 nm에 대한 원편광기의 제작을 위하여 CB15의 혼합비가 33.19%인 혼합액정을 만들었으며, CLC셀의 두께에 따른 투과율을 측정하여 우원편광빛이 전반사 되기 위한 셀의 두께는 14 μm 이상임을 알 수 있었다. 이상의 설계 자료를 사용하여 액정 원편광기를 제작한 결과, 투과광의 타원도가 0.98인 특성을 나타내었다. 액정 원편광기는 단일 부품으로써 원편광을

만들 수 있고 대구경(≤ 200 mm)으로 제작할 수 있는 장점을 가지므로 널리 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] F. Reinitzer, *Montash Chem.* **9**, 421 (1888).
- [2] O. Lehmann and Z. Krist. **18**, 464 (1890).
- [3] G. Friedel, *Ann. Physique* **18**, 273 (1922).
- [4] S. D. Jacobs, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **307**, 98 (1981).
- [5] CLC는 나선의 방향에 따라 우선행과 좌선행이 있는데, 앞으로 우선행에 대해서만 논하겠다.
- [6] P. G. de Gennes, *The Physics of Liquid Crystals* (Clarendon Press, Oxford, 1974).
- [7] J. Adams and W. Haas, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **30**, 1 (1975).

Design, Fabrication and Testing of Cholesteric Liquid Crystal Circular Polarizer

Hong Jin Kong, Chu Shik Kang and Jae Yong Lee
Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: March 29, 1993)

We measured the spectral transmittance of the cholesteric mixtures of ZLI-1167 and CB15 for various weight fractions of CB15 in the mixture to find out the relationship between the center wavelength of the selective reflection band and the weight fraction of CB15 in the mixture. Left handed circular polarizer for 632.8 nm was designed and fabricated with this mixture whose weight fraction of CB15 was 33.19%. The ellipticity of the elliptical polarization of the transmitted light was measured to be 0.98 showing excellent property of the CLC circular polarizer.