90°꼬인 네마틱 액정 (90° Twisted-Nematic LC)의 이상 굴절 축(n_e axis) 방향 결정 방법에 대한 고찰

조규보, 신창목, 서동환, *배장근, 김수중
경북대학교 전자공학과, *구미 1대학 인터넷 전자 정보과
전화:053-940-8611 / 핸드폰: 011-817-7742

Consideration into method of deciding upon extraordinary axis direction in Twisted-Nematic LC

Kyu-bo Cho, Chang-Mok Shin, Dong-Hoan Seo, *Jang-Keun Bae, Soo-Joong Kim
Dept. of Electronic., Kyungpook Nat'l Univ.
*Dept. of Internet Electronic Information, Kumi the first College

Abstract

LCD is not very expensive and according to the principle that twisted-nematic LCD can modulate by electric signal, lots of researches been developed about many of theory, methods of design and calculating parameters effectively. In 1999 J. A. Davis *et al.* proposed the method of deciding upon extraordinary and ordinary axis direction, which is based on Blazing Effect, inspect into changes of diffraction patterns. But in laboratory, it is difficulty to observe 5th or 6th diffraction pattern, and not clear in mathematical.

In this paper, illuminating circular polarized beam been to TN LCD (twisted-nematic LCD), we found extraordinary axis direction with inspecting into maximum intensity distribution appeared in the side of analyzer. Using Jones matrix method, we endowed with mathematical propriety.

I. 서론

광신호는 각각 상호 작용이 없이 독립적이고 병렬적으로 전파할 수 있으며 2차원 신호를 광전파의 시간으로 고속 병렬 처리 할 수 있다는 특징이 있다. 여기에 광학 시스템의 푸리에 변환능력은 2차원 영상의 인식 및 처리와 광 계산 등에 유리한 기능을 제공한다. 이러한 광 정보처리 특성을 극대화하기 위해 실시간 동작이 가능한 공간 광 변조기를 사용하며 그 중 액정 디스플레이(liquid crystal display, LCD)는 기존의 공간 광 변조기에 비해 가격이 저렴하며 특히 꼬인 네마틱 액정 디스플레이(twisted-nematic LCD)는 전기 신호에 따라 광을 변조 할 수 있다는 원리에 의해 많은 연구 발전이 되어 왔다.

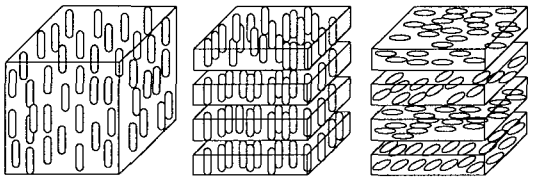
1990년 K. Lu 등에 의해 액정 디스플레이 공간 광 변조기의 여러 가지 이론과 설계 방법이 연구되었으며, 여러 가지 파라미터들을 효과적으로 계산하는 방법이 계속해서 발표되었다[1]. 1999년 J. A. Davis 등에 의해 회절 성분이 변화함을 관찰하여 Blazing Effect를 근거로 90° 꼬인 네마틱 액정의 정상 굴절 축과 이상 굴절 축의 방향을 찾는 방법을 제안하였다[2]. 하지만 실제 실험에서 5차 혹은 6차 회절 성분을 관찰하기 어렵고, 수식적인 근거가 명확하지 않다.

본 논문은 원형 편광 빔을 90° 꼬인 네마틱 액정에 투사 시켜 검광기 쪽에 나타난 최대 세기 분포를 관찰하여 이상 굴절 축의 방향을 찾고 Jones 행렬 계산법을 사용하여 수학적 타당성을 부여하였다.

II. 꼬인 네마틱 액정의 특징

2.1 꼬인 네마틱 액정의 구조 및 투과 특성

액정 물질은 그림 1에서와 같이 smectic, nematic, cholesteric 등의 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 분자 구조적인 면에서 smectic 액정은 긴 원통형의 분자가 그의 장축이 각 층에서 평행을 이루고 있다. 이 장축은 각 층의 면에 대해 수직을 이루고 있다. nematic 액정의 경우, 분자들은 평행을 유지하면서 각 층에서 불규칙하게 배열되어 있다. cholesteric 액정에서 분자들은 장축 면을 평행하게 유지하면서 각 층의 면과도 평행으로 배열되어 있다. 전체적인 장축의 방향은 층을 이루는 나선 구조를 가진다. 이 나선형의 분자 배열은 물질의 문턱 전압을 넘어서는 외부 전계의 인가로 인해 깨어지게 된다. 배열이 무너진 분자는 가해진 전계에 평행한 방향으로 되어 nematic이 된다. 이러한 특성을 가진 안정된 상태가 꼬인 네마틱 상태(twisted-nematic mode)이다.



(a) (b) (c)

그림 1. 액정 물질의 분자 배열
(a) nematic 액정; (b) smectic 액정; (c) cholesteric 액정:

본 논문에서 사용된 액정은 90° 꼬인 네마틱 액정으로써 액정분자의 배열은 전압이 인가되지 않은 경우 z 축 방향으로 서서히 회전이 되어 배치되어 있다. 꼬인 네마틱 액정의 cell은 광 축(optical axis)이 비 등방성 물질이다. 액정은 그 특징인 꼬임(twist)로 인하여 분자배열은 그림 2와 같은 나선구조를 가진다.

분자의 축 방향과 축에 직교되는 방향에서의 굴절율이 서로 다른 이러한 매질을 통과하는 편광된 광의 특성은 Jones 행렬 계산법에 의해 구해진다. 전압이 인가 되지 않았을 때 액정의 분자 배열은 z 축에 수직되게 일정한 비율로 회전된 층을 이루고 있다. 이 각각의 액정 층의 편광특성은 축 방향(ordinary)와 축에 직교하는 방향(extraordinary)으로의 굴절율인 n_e와 n_o의 함수인 Jones 행렬로 표현되며, 하나의 cell을 이루는 여러 층의 행렬은 각각을 곱하여 얻어진다. 두께가 d인 꼬임 각도가 90°, 그리고 z=0에서 분자 배열이 x

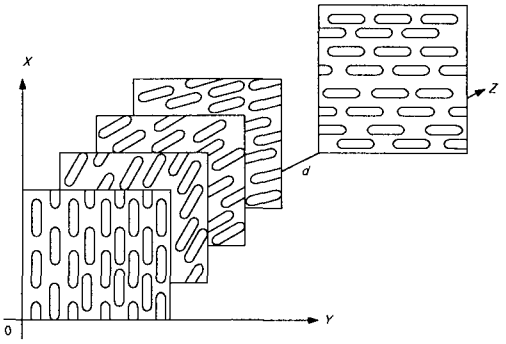


그림 4. 액정의 꼬임 (twist) 구조

축과 평행한 cell의 Jones 행렬은 다음 식과 같이 표현된다.

$$J=\exp(-j\phi)\begin{bmatrix} \frac{\pi}{2\gamma}\sin\gamma & \cos\gamma+j\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma \\ -\cos\gamma+j\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma & \frac{\pi}{\gamma}\sin\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 각 파라미터들은 $\phi=\frac{\pi d}{\gamma}(n_e+n_o)$, $\beta=\frac{\pi d}{\gamma}(n_e-n_o)$, $\gamma=[((\frac{\pi}{\alpha})^2+\beta^2)]^{1/2}$로 주어진다.

2.2 Jones 행렬 계산법

일반적으로 빛이 편광 감지 소자 (polarization sens-itive device)를 통과할 때 파의 편광 상태가 변화하기 때문에 편광의 초기 상태를 나타내는 벡터 $\vec{U}$ 항으로 새로운 편광상태를 나타내는 벡터 $\overrightarrow{U'}$ 를 찾아낼 수 있다. 여기에서 모든 편광기는 선형이라 가정하면 최종 편광 벡터는 Jones 행렬로 알려진 2×2 행렬 L 을 통해 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\overrightarrow{U'}=L\vec{U}=\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 행렬의 네 원소는 선형 장치가 파의 편광 상태에 미치는 영향을 나타낸다. 예를 들면 일반적인 좌표 변환에 대한 Jones 행렬은

$$R(\theta)=\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같고, 파의 x와 y 성분이 다른 위상 지연을 가지는 편광상태에 대한 Jones 행렬은

$$R_{\Delta}(\theta)=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \exp(-j\Delta)\end{bmatrix} \quad (4)$$

와 같이 주어지며, 여기서 상대적 위상차이 Δ 는 $\frac{2\pi(n_e-n_o)d}{\lambda_o}$ 이다.

III. 꼬인 네마틱 액정의 이상굴절 축 결정 방법 제안

3.1 이상 굴절 방향자 축 결정 방법 제안

기존의 방법은 회절 성분이 변화함을 관찰하여 Blazing Effect를 근거로 정상 굴절 방향자 축과 이상 굴절 방향자 축을 찾는 방법을 제안하였다. 공간 광 변조기에 인가되는 전압에 해당되는 그레이 레벨을 변화시키면서 출력 평면에 나타나는 회절 성분의 변화를 관찰한다. 그레이 레벨의 변화에 대해 회절 성분의 변화가 전혀 없으면 그 때의 투과 각도가 정상 굴절 축의 각도이며, 5차 혹은 6차 회절 성분에 변화가 생겼다가 그레이 레벨이 최고가 되었을 때 다시 원상태로 돌아올 때의 투과 각도가 이상 굴절 방향자 축이라는 결정 방법을 제안하였다. 하지만 실제 실험에서 5차 혹은 6차 회절 성분을 관찰하기 어렵고, 수식적인 근거가 명확하지 않다 본 논문에서는 원형 편광 된 빔을 꼬인 네마틱 액정에 투사하여 Jones 행렬 계산법을 이용, 이상 굴절 방향자 축을 찾아내고자 한다.

원형 편광 빔이 입사 될 때 출력 광은

$$J\begin{bmatrix}E\\ jE\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}E_x\\ E_y\end{bmatrix} =E\begin{bmatrix}\left\{\frac{\pi}{2\gamma}\sin\gamma-\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\right\}+j\cos\gamma\\ -\cos\gamma+j\left\{\frac{\pi}{2\gamma}\sin\gamma+\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\right\}\end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같이 표현되며, x축에서 θ만큼 기울어진 편광기로 검출할 때의 빔은 식 (5)와 $\begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\end{bmatrix}$의 내적이며

$$J\begin{bmatrix}E\\ jE\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\end{bmatrix} =E[\left\{\cos\theta\sin\gamma(\frac{\pi}{2\gamma}-\frac{\beta}{\gamma})-\cos\gamma\sin\theta\right\} -j\left\{\cos\theta\sin\gamma+(\frac{\pi}{2\gamma}+\frac{\beta}{\gamma})\sin\gamma\sin\theta\right\}] \quad (6)$$

와 같은 행렬식으로 표현이 되며 검광기 측에 나타나는 세기 패턴은 다음과 같다.

$$I_\theta=E^2\left\{1+\sin(2\theta)\sin(2\gamma)\frac{\beta}{\gamma}-\frac{\beta\pi}{\gamma^2}\sin^2(\gamma)\cos(2\theta)\right\} \quad (7)$$

최대 혹은 최소 값을 구하기 위해서 극대, 극소 값을 취하면,

$$\frac{dI_\theta}{d\theta}=2\cos(2\theta)\sin(2\gamma)\frac{\beta}{\gamma}+2\sin(2\theta)\times \sin^2(\gamma)\frac{\beta\pi}{\gamma^2}=0 \quad (8)$$

식 (8)을 만족하려면 $\cos(2\theta)=-\sin(2\theta)\frac{\pi\sin\gamma}{2\gamma\cos\gamma}$ 일 때,

$$I_{\max,\min} =E^2\left[1+\sin(2\theta)\left\{\sin(2\gamma)\frac{\beta}{\gamma}+\frac{\beta\pi^2}{2\gamma^3}\frac{\sin^3\gamma}{\cos\gamma}\right\}\right] \quad (9)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $\theta=45°,225°$ 일 때 최대 세기 분포를 가지고 $\theta=135°,315°$ 일 때 최소 세기 분포를 가진다. 편광판의 투과 축은 액정 셀이 최대의 복굴절 효과를 나타내기 위해서 꼬임 중심 축과 ±45°의 각도를 유지하고 있다. 따라서 이상 굴절 축의 방향 결정 방법은 최대 세기 분포가 측정되는 편광기의 투과 축의 각도에서 -45°가 되는 각도를 측정하여 간단히 찾을 수 있다.

IV. 광실험

실험 구성도는 그림 3에서와 같다. 선형 편광 빔을 왼손 원형 편광 빔 (Left-handed polarized beam)으로 변환시키기 위해서 -45°선형 편광기 뒤에 QWP (quarter wave plate; $\lambda/4$ plate)를 위치시킨다. 원형 편광 된 빔을 액정 공간 광 변조기에 투과시킨 다음 검광기와 CCD카메라를 통해서 최대 세기가 확인되는 투과 축 각도를 측정한다. 실험결과 43° 및 222°에서 최대 세기를 관찰할 수 있었으며 이 각도로부터 -45° 되는 지점을 찾아서 이상 굴절 축의 방향을 결정할 수 있다. 파라미터 γ가 $\pi/2$ 의 정수배가 되면 투과되어 나오는 빔이 원형 편광 빔이 되어 선형 편광 감지기로 세기 패턴을 관찰 할 수 없었다.

V. 결론

본 논문은 원형 편광 된 빔을 이용하여 꼬인 네마틱 액정의 이상 굴절 축의 각도를 찾아내는 방법을 제안

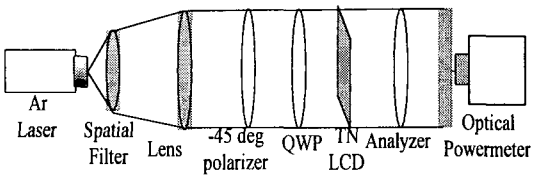


그림 5. 광 실험도

하였다. Jones 행렬 계산법을 이용하여 수학적인 타당성을 부여하였으며 기존의 회절 성분 분석을 이용하지 않고 투과시킨 빛의 세기를 측정하여 간단히 찾을 수 있다

파라미터 γ가 $\pi/2$ 의 정수배가 되면 투과되어 나오는 빔이 원형 편광 빔이 되어 실험에 사용된 선형 검광기를 이용하여 세기 패턴을 측정 할 수 없다는 단점을 가지는데 향후 연구를 통해서 파라미터 γ가 $\pi/2$ 의 정수배가 될 때도 측정 할 수 있는 방법과 원형 편광 빔을 이용 꼬인 네마틱 액정의 여러 가지 파라미터 .측정 및 계산법 및 꼬인 네마틱 액정 공간 광 변조기를 이용한 광 정보 보호 방법에 대한 연구가 진행 중이다.

참고문헌

[1] K. Liu, Bahaa E A. Saleh "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator," *Optical Engineering,* vol. 29, no. 3, 240-246, 1990.

[2] J. Davis, P. Tsai and K. D'Nelly ," Simple technique for determining the extraordinary axis direction for twisted-nematic liquid crystal spatial light modulator," ,*Optical Engineering* vol. 38, no. 5, 929-931, 1999.

[3] 정신일, "액정 텔레비젼의 공간적 광변조 특성 및 광 상관기에의 응용," 경북대학교 박사학위 논문, 1987.

[4] J. W. Goodman, Chapt. 7 in *Introduction to Fourier Optics*, 186-188, McGraw-Hill, New York.

[5] 노봉규 외 17명, "LCD Engineering," Chapt. 4, 77-78, 성안당, 서울.