

## 베레만의 4×4행렬방식을 이용한 액정표시소자의 편광투과특성 분석

양병관 · 김규석\* · 노봉규\*\* · 김진승 · 박희갑 · 박 찬

전북대학교 물리기술학부, 기초과학연구소

\*현재 삼성전자 근무중

\*\*현재 현대전자 근무중

### 이 형 종

전남대학교 물리학과

### 김 재 기

국방과학연구소

(1997년 2월 19일 받음)

베레만의 4×4행렬방정식을 써서 액정판의 편광투과특성을 분석하는 프로그램을 개발하고, 이를 써서 액정셀과 편광판의 편광투과특성을 살펴보았다. 개발된 프로그램을 써서 정상백색 모드드의 꼬인 네마틱(TN: Twisted Nematic) 액정셀에서 시야각에 따른 명암대비의 변화를 보여주는 등고선을 그려내어 그 특성을 예측할 수 있었다. 또한 편광판의 투과특성은 입사각이 커짐에 따라 투과된 빛의 편광타원의 주축이 투과축 방향에서 벗어나며 타원도가 커지는 것이 밝혀졌는데, 이 결과는 액정표시소자의 명암대비가 액정판만이 아니라 편광판의 특성에 의해서도 제한될 수 있음을 시사한다.

## I. 서 론

액정표시소자는 음극선관에 비해 얇고 가벼우며 전력소모가 적은 장점이 있지만 화상이 비교적 어둡고, 명암대비가 낮으며, 보는 방향에 따라서 밝기와 명암대비가 크게 바뀌는 것이 단점이다. 따라서 액정표시소자의 설계와 제작의 핵심요소는 이러한 단점이 최소가 되도록 액정의 물성, 두께, 꼬임각 등 갖가지 변수들의 값을 최적화하는 것이다.

실험을 통해서 액정표시소자의 변수의 최적화에는 많은 시간과 노력이 필요하므로 변수들을 쉽게 바꿀 수 있고 변수들 사이의 관계를 파악하는데 편리한 전산시뮬을 많이 쓴다. 이러한 목적의 전산 프로그램은 국내 기업체의 연구소에서도 개발했거나 상당한 값을 치르고 수입한 것으로 믿어지지만, 기업체의 성격상 이를 공개하지 않고 있으며 수입된 프로그램의 경우에는 소스 코드(source code)가 없으므로 그것을 필요에 따라서 수정하거나 보완하지 못하고 있다. 이 연구의 목적은 액정표시소자 설계에 필요한 액정판의 편광투과특성을 분석하는 프로그램의 개발로서, 앞으로 소스 코드를 공개하여 국내 액정표시소자 분야의 연구에 도움을 주기 위한 것이다.

액정<sup>1)</sup>과 같은 불균일 단축결정(inhomogeneous uniaxial medium)인 매질에 대해서는 파동방정식을 해석적으로 풀 수 없어서 편광투과특성을 이해하기 어렵다. 따라서 이러한 매

질의 편광투과특성을 분석하려면 매질의 특성이 비교적 고르다고 볼 수 있는 여러 개의 얇은 층으로 나누고, 각 층의 존즈 행렬을 구해 이를 종합하여 분석한다. 존즈연산<sup>2,3)</sup>은 단순하고 직관적이며 계산하기 쉽지만 층상구조의 경계면에서 빛이 반사되는 것은 무시하므로 빛이 수직으로 들어오는 경우에 주로 쓴다. 경계면에서의 반사를 고려하고, 빛이 비스듬히 들어오는 경우에 대해 엄밀한 결과를 얻으려면 베레만(D. W. Berreman)이 도입한 4×4행렬방정식<sup>4,5)</sup>을 쓴다. 이 방정식은 맥스웰 방정식을 전자기장의 각 직교좌표 성분에 대한 일계 미분방정식으로 바꾸어 행렬식으로 고치고, 매질의 특성을 전달행렬을 써서 나타낸다. 이 행렬방정식을 풀어 편광투과 특성을 분석하는 일은 컴퓨터를 써서한다. 특히 이 4×4행렬 방정식을 쓰면 빛이 액정판에 비스듬히 들어오는 경우도 분석할 수 있으므로 액정표시소자의 설계에서 시야각특성을 개선하는 조건을 찾아내는데 아주 중요하다. 액정표시소자의 주요 구성소자 가운데 하나인 편광판은 표시화면의 밝기와 명암대비에 큰 영향을 주고, 그 특성에 따라서 값도 상당히 다르므로 적절한 선택이 매우 중요하다. 그러나 편광판의 편광투과특성은 자세히 분석되지 않았으며, 특히 비스듬히 들어오는 빛의 투과특성은 헤케(R. Herke et al)와 하스(G. Haas et al)<sup>6,7)</sup>의 비교적 단순한 논문 밖에 없다. 편광판도 굴절율이 복소수인 단축결정으로 볼 수 있으므로 편광투과특성을 베레만의 4×4행렬방식으로 분석할 수 있다.

4×4행렬방식에서 경계조건을 충족시키려면 반사되는 빛의 전·자기장까지 생각하게 되므로 단색광에서는 다중반사에 의한 패브리-페로 효과<sup>8,9)</sup>가 나타나지만 실제의 화면소자

\*본 연구는 1995년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI-95-2432)와 한국과학재단 핵심전문과제(951-0205-019-2)의 연구비를 지원받아 수행하였으며, 개발된 프로그램의 소스 코드가 필요한 사람은 연락하면 제공하겠음.

에서는 단색광을 쓰지 않으므로 이 효과가 나타나지 않는다. 4×4행렬방식에서 이 효과를 없애는 몇가지 방법이 있다: (1) 파장평균법과, (2) 경계에서 위상이 일정하게 되도록 유리의 두께를 적절하게 조절하는 법, (3) 편광판에 의한 반사 자체를 피하기 위해서 편광판 앞에 편광판 굴절률의 실수부와 같은 굴절률을 갖는 가상의 매질을 가정하는 법, (4) 경계면에서 단일 반사만 하게 해서 패브리-페로 효과가 나타나지 않게 하는 법 등이 있다. 여기에서는 4×4행렬방식으로 액정셀과 편광판의 투과특성을 분석하였고, 패브리-페로 효과를 없애는데는 실제의 상황을 가장 충실히 반영하는 파장평균법을 썼다.

**II. 베레만의 4×4행렬방식**

이 절은 층상구조의 비균일 단축매질의 편광투과특성을 분석하는 4×4행렬방식과 관련되어 지금까지 발표된 결과를 요약한 것이다. 따라서 내용은 새롭게 없지만, 표기법의 일관성을 유지하였으므로 처음 이 분야를 살펴보는 경우에는 노력이 절약될 것이다.

투명 유전체에서의 전자기장에 관한 맥스웰 방정식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{1}{c} \quad (2) \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

고른 비자성 단축매질(homogeneous uniaxial medium)의 전자기적 특성은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{H} \\ \vec{D} &= \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서  $\vec{\epsilon}$ 는 매질의 유전률 텐서이다.  $\epsilon_{||}$ 과  $\epsilon_{\perp}$ 을 각각 전기장이 액정분자의 장축과 나란하게 걸린 때와 수직하게 걸어진 때의 유전률이라면  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{\perp} \delta_{ij} + (\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}) n_i n_j$ 이다( $i, j=1, 2, 3$ ). 여기에서  $n_i$ 는 액정분자의 장축방향의 단위벡터(방향자: director)의 직교좌표성분으로서 방향자의 기울기각(polar angle)이  $\theta$ 이고 방위각이  $\phi$ 이면  $\vec{n} = (\cos\theta \cos\phi, \cos\theta \sin\phi, \sin\theta)$ 이다. 식 (1)에 식 (2)를 넣어 풀면 전기장 세 성분과 자기장 세 성분에 의해서 6개의 일계 미분방정식이 되어 6×6행렬식으로 표현된다. 빛은 횡파이므로 6개의 식 가운데 서로 독립인 식은 4개이다. 직교좌표축의 x축은 입사면과 매질의 경계면의 교선의 방향으로, z축은 경계면에 대한 법선방향으로 잡으면 입사하는 빛살은 x-z평면에 있게된다. 입사광의 파수벡터의 x성분은 경계조건에 의해서 항상 일정하다. 이상의 조건을 쓰면 전기장, 자기장의 z성분을 지워 6×6행렬식을 아래와 같이 4×4행렬식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{d\Psi}{dz} = ik_0 \delta \Psi \quad (3)$$

$k_0$ 는 진공에서의 빛의 전파상수이고,  $\Psi$ 는 세로줄 행렬로서 그 행렬요소는 다음과 같이 들어오는 빛의 전기장( $E_x, y$ )과 자기장( $H_x, y$ )의 x, y성분으로 결정된다:

$$\Psi = (E_x, H_y, E_y, -H_x)^T \quad (5)$$

$\Delta$ 는 매질의 전파특성을 나타내는 4×4행렬로서 그 행렬요소들은 다음과 같이 들어오는 빛의 입사각과 매질의 유전률 텐서로 결정된다.:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} & 0 \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= -X \frac{\epsilon_{xz}}{\epsilon_{zz}} & \Delta_{12} &= 1 - \frac{X^2}{\epsilon_{zz}} \\ \Delta_{13} &= -X \frac{\epsilon_{yz}}{\epsilon_{zz}} & \Delta_{21} &= \epsilon_{xx} - \frac{\epsilon_{xz}^2}{\epsilon_{zz}} \\ \Delta_{23} &= \epsilon_{xy} - \frac{\epsilon_{xz} \epsilon_{yz}}{\epsilon_{zz}} & \Delta_{43} &= \epsilon_{yy} - \frac{\epsilon_{yz}^2}{\epsilon_{zz}} - X^2 \end{aligned}$$

$X = \sin A$ 이고, A는 매질에 들어오는 빛의 입사각이다.

이 식을 풀면 z+h에서의 세로줄 행렬의 요소  $\Psi(z+h)$ 는 z에서의  $\Psi(z)$ 를 써서 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\Psi(z+h) = P(h) \Psi(z) \quad (6)$$

여기에서 P(h)는 전달행렬로서 다음과 같이 정의된다:

$$P(h) = I + i \frac{k_0 h}{1!} \Delta - \frac{(k_0 h)^2}{2!} \Delta^2 + \dots \quad (7)$$

I는 단위행렬이고 h는 매질의 두께이다. 이 식을 쓰면 z에서의 전자기장  $\Psi(z)$ 을 알면 이로부터 h만큼 떨어진 곳의  $\Psi(z+h)$ 을 전달행렬로부터 셈할 수 있다. 전달행렬은 오로지 매질의 특성에 의해서만 결정된다. P(h)는 무한급수이므로 전산 시뮬에서는 절단오차를 무시할 수 있도록 h값을 작게 잡으므로 계산량이 많아진다.

빌리<sup>[10]</sup>는 고른 매질에서는 다음과 같은 케일리-하밀톤(Caley-Hamilton) 정리를 써서 전달행렬을 정확하고 빠르게 셈할 수 있음을 보였다:

$$P(h) = \beta_0 I + \beta_1 \Delta + \beta_2 \Delta^2 + \beta_3 \Delta^3 \quad (8)$$

여기에서 전계수  $\beta_{0, 1, 2, 3}$ 는  $\Delta$ 행렬의 고유값의 함수로서 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= -\sum_{i=1}^4 \lambda_j \lambda_k \lambda_l \frac{f_i}{\lambda_{ij} \lambda_{ik} \lambda_{il}} \\ \beta_1 &= \sum_{i=1}^4 (\lambda_j \lambda_k + \lambda_k \lambda_l + \lambda_l \lambda_j) \frac{f_i}{\lambda_{ij} \lambda_{ik} \lambda_{il}} \quad (9) \\ \beta_2 &= -\sum_{i=1}^4 (\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l) \frac{f_i}{\lambda_{ij} \lambda_{ik} \lambda_{il}} \\ \beta_3 &= \sum_{i=1}^4 \frac{f_i}{\lambda_{ij} \lambda_{ik} \lambda_{il}} \end{aligned}$$

여기서  $f_i = \exp(ik_0 \lambda_i h)$ 이고  $\lambda_i$ 는  $\Delta$ 의 고유값이다.

$$\lambda_{1,2} = \pm(\epsilon_{\perp} - X^2)^{1/2}$$

$$\lambda_{3,4} = -X \frac{\epsilon_{xz}}{\epsilon_{zz}} \pm \frac{\sqrt{\epsilon_{\perp} \epsilon_{||}}}{\epsilon_{zz}} \left[ \epsilon_{zz} - X^2 \left( 1 - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{||}} \cos^2(\theta) \sin^2(\psi) \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

$\Delta \epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  이고  $\lambda_{ij} = \lambda_i - \lambda_j$  ( $i, j, k, l = 1, \dots, 4$ ) 이다.

식 (8)에서 전달행렬을 구해 식 (6)에 넣어 투과광  $\psi(z+h)$  을 구하는데, 식 (6)의  $\psi(z)$ 에 들어오는 빛과 반사되는 빛을 함께 생각하여 넣어야 맥스웰 방정식의 정확한 해  $\psi(z+h)$ 를 얻는다.

### III. 전산시능

#### 3.1. 액정셀

그림 1은 액정셀에 파장 632.8 nm인 빛이 수직하게 들어올 때의 전기광학 투과도 곡선이다. 액정셀은 정상백색(Normally White)모드의 TN(Twisted Nematic)셀로 뒷유리의 배향각을 문지른 방향과 편광판의 투과축이 나란히 세로축 방향이다. 액정의 굴절율은  $n_o=1.4923$ ,  $n_e=1.593$ 이고 퍼짐(splay), 꼬임(twist), 구부러짐(bend)변형에 대한 탄성상수는 SI단위로 각각  $k_{11}=12.8 \times 10^{-12}$ ,  $k_{22}=7.4 \times 10^{-12}$ ,  $k_{33}=15.5 \times 10^{-12}$ 이며, 두 주축방향의 유전율은 가우스 단위로 각각  $\epsilon_{||}=7.3$ ,  $\epsilon_{\perp}=3.6$ 이다. 액정분자의 선경사각은  $2^\circ$ 이고 꼬임각은 왼쪽으로  $90^\circ$ 이며 액정층의 두께는  $5.20 \mu\text{m}$ 이다. 편광판의 투과축과 흡수축 방향의 선편광에 대한 복소수 굴절률은  $1.5+i2.5 \times 10^{-5}$  과  $1.5+i1.5 \times 10^{-3}$ 이고 두께는  $210 \mu\text{m}$ 로 했다. 액정분자의 배향구조는 프랭크-오신(Frank-Oseen)의 연속탄성체이론<sup>[2,3]</sup>에 따라서 구했고, 실제 화면표시소자에 있는 유리는 전산시능에서는 고려하지 않았다.

액정셀에 걸린 전압이 작을 때는 액정분자가 고르게  $90^\circ$  꼬여있기 때문에 광활성효과가 나타나 빛이 액정셀을 지나면서 편광축이  $90^\circ$ 돌아 나와 검광판을 투과하게 된다. 전압이 아주 높아지면 액정분자들이 전기장에 나란히 배열되어 분자축이 경계면에 수직하게 일어선다. 따라서 액정셀에 대해 수직하게 진행하는 빛에 대해서는 액정이 등방성을 띠게 되므로 액정셀을 지나가는 동안 편광상태가 바뀌지 않는다. 그래서 투과축이 편광판의 투과축과 직교하는 검광판을 지나면서 소광되므로 2.7 volt 근처에서는 투과되는 빛의 밝기가 급격히 떨어진다.

그림 2는 이 액정셀의 명암대비가 시야각에 따라서 달라지는 모습을 보여준다. 점등상태와 소등상태의 전압은 각각 액정셀의 한 가운데 있는 액정분자의 기울기각이  $2.1$ 도일 때인 1.15 volt와  $89.8$ 도일 때인 9.8 volt로 잡았다. 이 각각의 경우에서의 투과광의 밝기는 빛이 수직으로 들어올 경우 0.37과  $1.73 \times 10^{-3}$ 로서 명암대비율은 약 210이다. 시야각에 대한 명암대비의 분포는  $-45^\circ$ 방향을 기준으로 대칭풀인데, 이것은 액정분자의 배향분포가 이 방향에 대해 대칭이기 때문이다. 명암

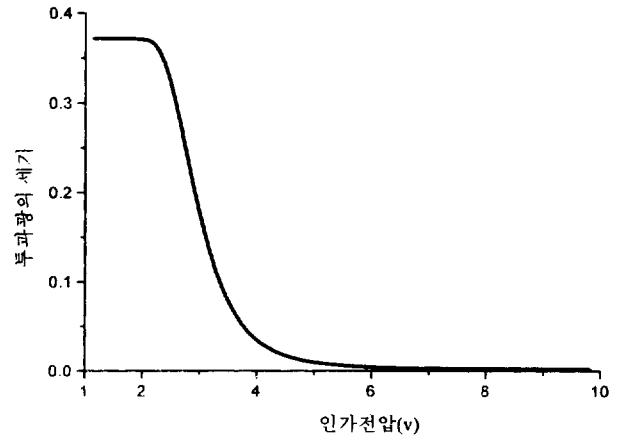


그림 1. TN셀에 수직입사할 때 인가전압에 대한 광의 밝기 변화

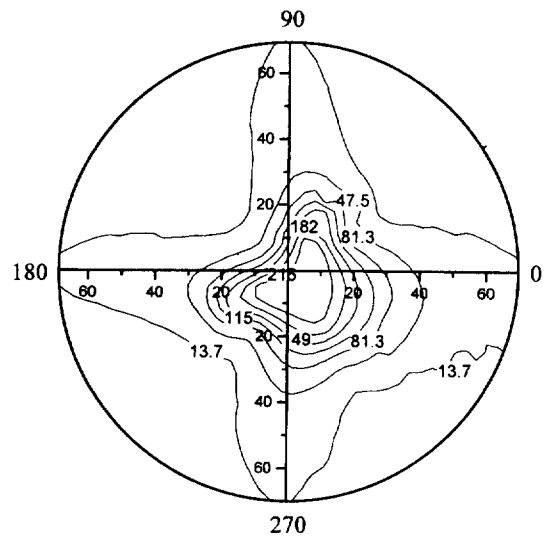


그림 2. TN셀의 명암대비의 등고선 그림

대비율이 최대가 되는 경우는 빛이 들어오는 방향이 입사각  $10^\circ$ , 방위각  $-45^\circ$ 로서 4상한으로 이동되어 있는데 이것은 액정분자의 기울기각 때문에 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이 액정셀에서는 명암대비의 역전현상은 나타나지 않는다.

#### 3.2. 편광판

액정표시소자에 많이 쓰는 편광판은 대면적을 대량생산할 수 있는 고분자로 만드는데, 이것은 폴리비닐알콜(PVA: poly-vinyl alcohol)막에 요드와 같은 바늘모양의 할로겐염 결정을 흡착시킨 후 PVA막을 늘려 바늘모양의 결정들을 나란히 정렬시켜 이색성을 띠게 한 것이다. 여기에 보호층으로서 삼초산셀룰로스(TAC: tri-acetyl cellulose)층을 양면에 붙인다. 때로는 요오드 결정 대신에 이색성 염료를 쓰기도 한다. 이러한 편광판은 (이상)광축의 위도각이 0이고 굴절률이 복소수인 단축박막(uniaxial film)으로 볼 수 있다. 이상적인 편광판에서는 이상광축방향의 선편광성분은 모두 흡수되고 그에 수직인 성분은 모두 투과되어야 하지만, 실제로는 투과되는 빛이 완벽한 선편광이 아니다.

편광판을 지나온 빛의 편광상태를 분석할 때 좌표계가 편광판이 아닌 공간에 고정되면, 투과광의 편광상태가 투과축의 방향에 따라서 달라지므로 편광판의 투과특성을 분석하는데 적합하지 않다. 그래서 편광판의 투과축을 기준으로 투과광의 편광상태를 분석할 수 있는 새로운 좌표계를 구성하였다.

입사면과 편광판이 이루는 교선방향을 x축으로 잡고 입사각을  $\theta$ 라 하자. 그리고 편광판의 투과축( $\hat{a}$ )과 x축 사이각을  $\phi$ 라고 하자. 파수벡터( $\hat{k}$ )와  $\hat{a}$ 가 만드는 평면을 A라 하고 파수벡터에 수직인 평면을 B라 할 때 평면 A와 평면 B가 만드는 교선의 단위벡터( $\hat{e}_p$ )는 다음과 같다(그림 3):

$$\hat{e}_p = \frac{\hat{k} \times (\hat{a} \times \hat{k})}{|\hat{k} \times (\hat{a} \times \hat{k})|} = \frac{\hat{x} \cos^2\theta \cos\phi + \hat{y} \sin\phi - \hat{z} \sin\theta \cos\theta \cos\phi}{(1 - \sin^2\theta \cos^2\phi)^{1/2}} \quad (11)$$

이 방향은 투과축과 나란한 선편광의 편광방향이다. 이에 대해 수직인 선편광의 방향은 다음 벡터로 정의된다:

$$\hat{e}_s = \hat{k} \times \hat{e}_p = \frac{-\hat{x} \cos\theta \sin\phi + \hat{y} \cos\theta \cos\phi + \hat{z} \sin\theta \sin\phi}{(1 - \sin^2\theta \cos^2\phi)^{1/2}} \quad (12)$$

이 두 벡터를 바탕으로 편광상태를 분석하면 편광판의 투과축이 돌아갈 경우 이 좌표계도 함께 회전하므로 이상적인 편광판을 지나오는 빛은 항상 똑같은 선편광상태가 되며, 실제의 편광판의 투과특성은 이 상태에서 벗어난 정도로부터 알 수 있다.

4×4행렬방식에서는 들어오는 빛에 대한 입사면과 매질사이의 교선방향을 x축으로 잡아 공간에 고정된 좌표계를 쓰므로 이 좌표계의 성분을 새로운 좌표계의 성분으로 변환시켜 편광판의 투과특성을 분석해야 한다. 투과되는 빛의 전기장  $E_T$ 는 새로운 좌표계에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\vec{E}_T = E_p \hat{e}_p + E_s \hat{e}_s = (\vec{E}_T \cdot \hat{e}_p) \hat{e}_p + (\vec{E}_T \cdot \hat{e}_s) \hat{e}_s \quad (13)$$

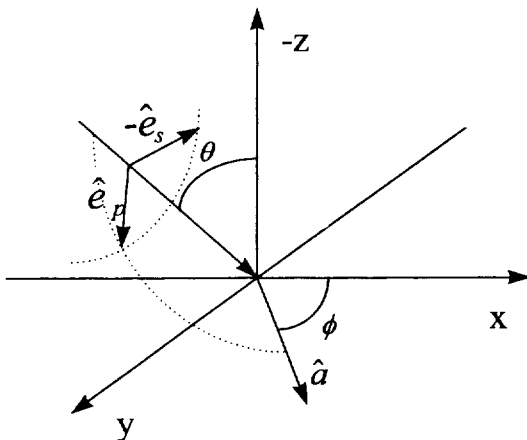


그림 3. 편광판의 투과축을 기준으로한 좌표계

주위매질의 굴절률이 1이면  $E_s = -\tan\theta E_x$ 이므로 식(11)과 식(12)를 식(13)에 넣어서 행렬식으로 표시하면 다음과 같다:

$$\begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x} \cdot \hat{e}_p - \tan\theta \hat{z} \cdot \hat{e}_p & \hat{y} \cdot \hat{e}_p \\ \hat{x} \cdot \hat{e}_s - \tan\theta \hat{z} \cdot \hat{e}_s & \hat{y} \cdot \hat{e}_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2\theta \cos^2\phi}} \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi/\cos\theta & \cos\theta \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (14)$$

이것은 공간에 고정된 좌표계에 대한 성분  $E_x, E_y$ 을 편광판의 투과축을 기준으로 하는 좌표계에 대한 성분  $E_p, E_s$ 으로 바꾸는 행렬변환식이다.  $E_p, E_s$ 로 스토크스변수(Stokes parameter)<sup>[11]</sup>는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} S_0 &= |E_p| + |E_s| \\ S_1 &= |E_p| - |E_s| \\ S_2 &= 2|E_p||E_s|\cos(\phi_p - \phi_s) \\ S_3 &= 2|E_p||E_s|\sin(\phi_p - \phi_s) \end{aligned} \quad (15)$$

$\phi_p$ 와  $\phi_s$ 는 각각  $E_p$ 와  $E_s$ 의 위상이다.  $S_0$ 는 빛의 밝기를 나타내고, 나머지 성분은 편광상태를 나타낸다. 편광성분만을 골라 아래와 같이 규격화시키면 반경이 1인 구의 방정식이 되는데 이를 뽀앙카레공(Poincare sphere)<sup>[11]</sup>이라고 한다.

$$s_i = \frac{S_i}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}, \quad i=1, 2, 3 \quad (16)$$

$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1$$

이상적인 편광판의 경우 투과광을 뽀앙카레공에 나타내면, 투과축이 x축과 나란한 경우에는 입사광의 진행방향이나 편광판의 광축에 관계없이 (1, 0, 0)이 된다. 실제의 편광판의 경우에는 입사광의 진행방향에 따라 투과광이 (1, 0, 0)에서 벗어난 정도로부터 편광판의 특성을 알 수 있다.

그림 4는 상굴절률이  $1.5+i5 \times 10^{-5}$ , 이상굴절률이  $1.5+i3.1$

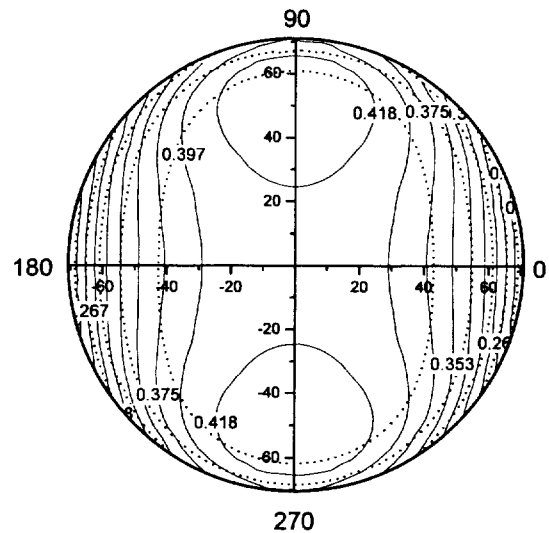


그림 4. 편광판을 투과한 광의 밝기

$\times 10^3$ 이고 두께가 0.1 mm인 편광판에 대한 투과광의 밝기를 전산시뮬한 등고선 그림이다. 원점으로부터의 거리가 입사각이고 오른쪽 가로축을 기준한 방위각이 입사면의 방위각이다. 들어오는 빛은 파장범위 530-570 nm의 자연광에 대해 평균하였다. 세로축으로 투과광에 극대값이 생기는데, 이 방향이 투과축 방향이므로 이 방향으로 입사하는 경우 브루우스터의 각(Brewster's angle) 근처에서 TM파가 최대투과하기 때문이다. 점선은 굴절률의 실수부가 1.2일 때 투과도이다. 편광판과 주위매질의 굴절률 차이가 적어 TE, TM파의 투과특성 차이가 약해져서 최대투과가 생기지 않았다.

그림 5는 위의 경우에 대해 투과광의 편광도(degree of polarization)를 보여준다. 투과광은 일반적으로 부분편광되어 있고 편광도는  $\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$ 이다. 여기에서 스토크스변수는 들어오는 자연광의 두 직교 편광성분에 대한 투과광의 스토크스변수를 더해서 구했다. 입사면이 투과축과 나란하면 편광도가 좋고 수직이면 편광도가 떨어지는데, TM파와 TE파의 투과특성이 다르기 때문이다. 또한 TM파는 입사각이 큰 경우에 투과가 잘 되므로 입사면이 투과축과 나란하면 입사각이 커질수록 편광도가 좋게 된다.

그림 6, 7은 투과광의 편광상태를 나타내는데, 투과광을 빔양카레공에서 나타냈을 때 이상적인 경우 (1, 0, 0)에 나타나도록 투과축을 수평축이 되도록 하였다. 그림 6은 위도각을 그림 7은 경도각을 도(°)로 나타냈다. 그림 6의 경우엔 실제값을 100배 했다. 그림 6의 위도각의 변화는 작지만 그림 7의 경도각은 크게 변한다. 입사광의 방위각이 45°, 135°, 225° 그리고 315°부근에서 위도각과 경도각이 최대가 된다. 이것은 편광타원의 장축이 투과축에서 벗어난 정도가 최대가 되고, 타원도가 커짐을 의미한다. 투과축과 나란하게 편광된 빛이 입사한 경우 투과광은 TM파 성분을 더 많이 갖게 되어 편광방향이 입사면에 나란하게 된다. 그래서 투과축을 기준한 좌표계에서 관찰하면 투과축 방향에서 벗어나게 된다. 점선은 굴절률의 실수부를 1.2로 했을 때이다. 투과도는 그림 4의 점선처럼 모양이 크게 변하지만 투과광의 편광에는 입사각의 변화와 같은 효과뿐이다.

그림 8은 이 편광판과 소광비가 같은 편광판을 투과한 광의 위도각을 그린 것이다. 상굴절률의 허수부 값이 두 편광판에서 서로 같고 두께는 0.2 mm로 했다. 이 경우 타원도가 작아

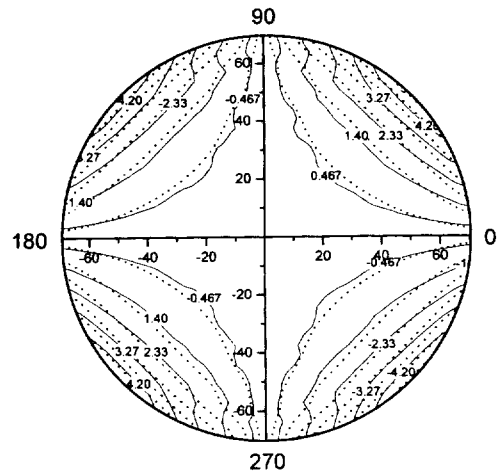


그림 6. 편광판을 투과한 광을 빔양카레공에 나타냈을 때 위도각(실제값의 100배)

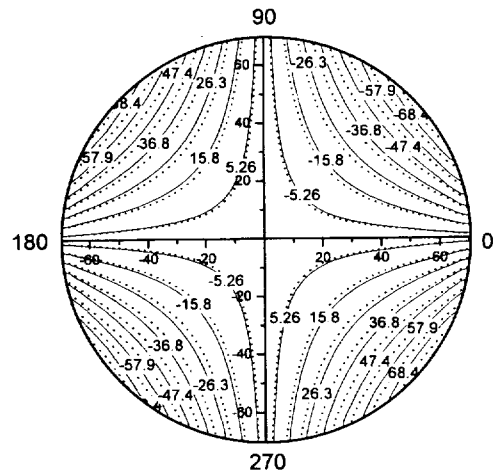


그림 7. 편광판을 투과한 광을 빔양카레공에 나타냈을 때 경도각

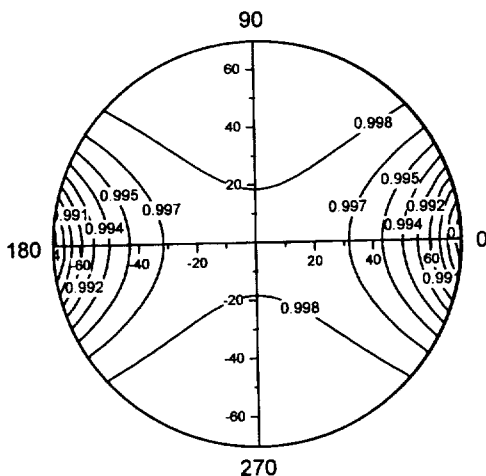


그림 5. 편광판을 투과한 광의 편광도

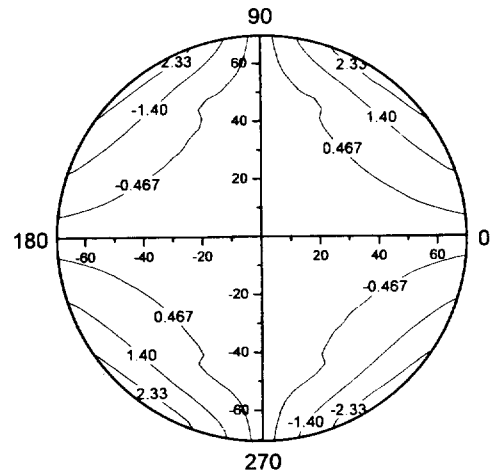


그림 8. 소광비가 같은 편광판의 위도각(실제값의 100배)

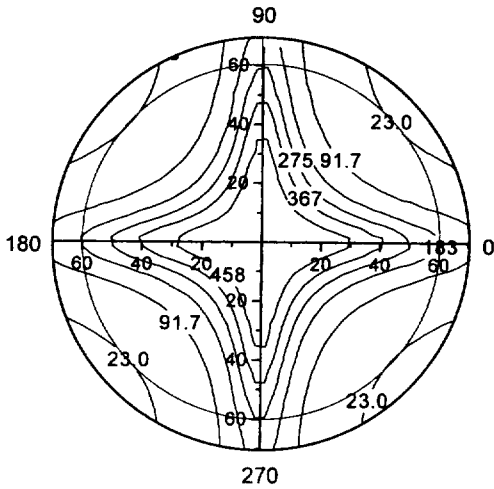


그림 9. 실제 편광판으로 얻을 수 있는 최대의 명암대비

지만, 편광도와 경도각은 변하지 않았다. 굴절률의 허수부를 10%씩 일정하게 증가시키고, 두께를 일정하게 한 경우에는 위도각도 변하지 않았다. 이것은 위도각이 편광판의 두께의 영향으로 변하고, 편광도와 경도각은 편광판의 소광비와 굴절률의 실수부에 의해서 결정되는 것을 시사한다.

그림 9는 실제의 편광판을 써서 설계한 액정셀에서 이상적으로 얻을 수 있는 명암대비이다. 이 경우 점등상태에서는 들어오는 빛이 액정의 광활성 작용에 의해서 편광방향이 90° 회전하기 때문에 두 축이 나란한 편광판 두 개를 투과한 경우로 했다. 소등상태는 입사광의 편광상태가 변하지 않기 때문에 두 축이 서로 직교하는 두 편광판을 투과한 경우로 했다. 점등상태의 투과축 방향은 세로축으로 했다. 대각선 방향에서 명암대비가 떨어지는 이유는 명암대비가 주로 소등상태에 의해서 결정되는데 두 편광판의 투과축이 직교한 경우 이 방향에서 최대투과가 생기기 때문이다. 액정분자의 기온각의 영향이 없어서 명암대비의 최대값이 이동하지 않고 대칭구조를 한다. 두 편광판의 투과축이 나란한 경우에는 이 방향에서 최대투과가 생기므로 세로축의 명암대비가 좋게 나왔다. 시야각이 60°일 때 최대의 명암대비는 275이고, 최소값은 23이다. 이것은 이 편광판을 사용한 액정셀에서 얻을 수 있는 명암대비가 275보다 클 수 없고, 특히 대각방향에서는 23보다 클 수 없음을 시사한다.

4. 결 론

베레만의 4×4행렬방식에 바탕을 둔 액정표시소자의 편광 투과특성을 분석하는 프로그램을 개발하였다. 수직입사의 경우 액정셀에 걸어진 전압에 따라 액정분자의 배향분포가 달

라져서 투과도가 변화하며, 임계전압 근처에서 투과도가 갑자기 떨어지는 것을 확인하였다. 액정분자의 기울기각과 꼬임각의 영향으로 명암대비가 최대가 되는 시야각 방향이 표시소자에 대해 수직방향이 아니라 약간 비스듬한 향으로 이동하고, 명암대비가 꼬임의 중심선에 대해서 대칭성을 띠는 것이 나타났는데, 이와 같은 특징은 시야각 특성이 개선된 액정표시소자의 설계에서 중요한 문제가 된다.

이 프로그램을 써서 편광판의 투과특성을 분석한 결과 편광판을 투과한 빛은 비교적 선편광에 가깝지만 입사각이 클수록 편광타원의 주축이 편광판의 투과축으로부터 많이 벗어나며 벗어난 정도와 투과광의 편광도는 편광판의 소광비에 의해서 결정된다. 실제 편광판을 사용해서 얻을 수 있는 이상적인 액정셀의 명암대비를 두 편광판의 투과축이 직교한 경우와 나란한 경우를 모형으로 구한 결과는 시야각이 60°일 때 275보다 클 수 없고, 특히 대각방향에서는 23보다 클 수 없다.

참 고 문 헌

- [1] B. Bahadur, *Liquid Crystal Applications and Uses*, Vol. 1 (World Scientific, Singapore, 1990).
- [2] 노 봉규, "액정셀의 편광투과특성과 그 응용," 박사학위논문, 전북대학교(1995).
- [3] 김 규석, "액정셀의 전기광학적 편광투과특성 연구와 이를 이용한 액정표시소자의 최 적설계," 석사학위논문, 전북대학교(1995).
- [4] D. W. Berreman, "Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4×4-Matrix Formulation," *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 502(1972).
- [5] D. W. Berreman, "Optics in smoothly varying anisotropic planar structures: Application to liquid-crystal twist cells," *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 1374(1973).
- [6] R. Herke *et al*, "Improved representation of polarizers for LCD modeling," *Journal of the SID*, 3/1, 9(1995).
- [7] G. Haas *et al*, "Polarizer model for liquid-crystal devices," *J. Opt. Soc. Am.* **A5**, 1571(1988).
- [8] K. H. Yang, "Elimination of the Fabry-Perot effect in 4×4 matrix method for inhomogeneous uniaxial media," *J. Appl. Phys.* **68**, 1550(1990).
- [9] H. L. Ong, "Elimination of Fabry-Perot Effect in 4×4 Propagation Matrix Method and Its Application to Liquid Crystal Displays," *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1085(1994).
- [10] H. W hler *et al*, "Faster 4×4 matrix method for uniaxial inhomogeneous media," *J. Opt. Soc. Am.* **A5**, 1554(1988).
- [11] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, fifth ed. (Pergamon Press, London, 1975) p30.

**A study on the polarization transmission characteristics of liquid crystal display devices  
by means of Berreman's  $4 \times 4$  matrix method**

Byeong Kwan Yang, Gyu Seok Kim\*, Bong Gyu Rho\*\*, Jin Seung Kim, Hee Gap Park and Chan Park

*School of Physics and Technology, Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea*

*\*Samsung Electronics Co., Ltd., Yong In 449-900, Korea*

*\*\*Hyundai Electronics Co., Ltd., Ichon 467-860, Korea*

Hyong Jong Lee

*Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea*

Jae Ki Kim

*Agency for Defence Development, P. O. Box 355, Taejon 305-600, Korea*

(Received : February 19, 1997)

A source code is developed on the basis of Berreman's  $4 \times 4$  matrix formalism for the analysis of polarization transmission characteristics of twisted nematic liquid crystal display devices. By using the program, the polarization transmission characteristics of liquid crystal cells and polarizers are analyzed. For a normally white twisted nematic liquid crystal cell, we obtained a family of iso-contrast contours which helps to understand the viewing angle characteristics of the liquid crystal display device by using the cell. The program also help us to understand the variation of the degree of polarization as well as the deviation of the state of polarization of the light transmitted through the polarizer commonly used in the LCD according to the change in incidence angle. This result suggests the contrast of the images appearing on the LCD can be limited by the characteristics of the polarizer in addition to the liquid crystal cell.