

액정판의 편광투과특성을 이용한 액정표시소자의 최적설계

노 봉규[†], 김 규석^{††}, 손 공숙, 양 병관, 박 찬, 박 회갑, 김 진승
 전북대학교 물리학과, 전주시 덕진구 덕진동, (우)561-756

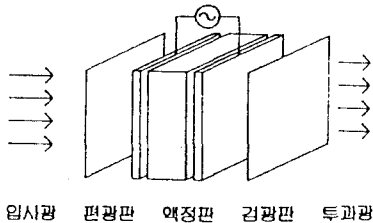
이 형종
 전남대학교 물리학과, 광주광역시 북구 용봉동, (우)500-757

김 재기
 국방과학연구소, 대전광역시 유성우체국 사서함 35, (우)305-600

화상표시소자의 기본특성은 밝기와 명암대비이다. 액정표시소자에서는 이러한 특성들을 결정하는 요소들이 많고, 이들 사이의 관계가 복잡하여 최적조건을 찾기 어렵다. 이 논문에서는 빛의 편광상태와 광학소자의 편광투과특성을 각각 쾨양카레공에서의 벡터와 기하학적변환으로 나타내어, 이를 바탕으로 화상의 특성을 나타내는 양을 정의하고, 이들을 최적화하는 설계방법을 설명하며, 이 방법을 실험적으로 확인한다.

I. 서론

액정표시소자는 그림1과 같이 광원, 편광판, 액정판 그리고 검광판으로 이루어진다.^[1] 액정판은 두 장의 유리판 사이에 분자배향이 고른 액정을 두께 4-10 μ m로 채운 것인데, 전압을 걸면 액정분자의 배향분포가 달라져서 그 부분을 지나는 빛의 편광상태가 달라지고, 이 빛이 검광판을 지나면서 밝기의 변화로 나타난다.



[그림1] 액정표시소자의 기본구조

액정표시소자 설계의 기본문제는 밝기와 명암대비가 가장 좋아지도록 액정의 복굴절도와 두께, 액정분자의 꼬임각, 편광판과 검광판의 투과축의 방향, 그리고 구동전압등을 결정하는 것이다. 꼬임각이 90°이하인 TN(Twisted Nematic) 액정표시소자에서는 Gooch와 Tarry가 끌어낸 다음의 투과도 공식을 써서 액정의 광학적 특성과 두께를 결정해왔다.^[2]

$$T = \frac{\sin^2 \left[\frac{\theta \sqrt{1+u^2}}{1+u^2} \right]}{1+u^2} \quad (1)$$

여기에서 θ 는 꼬임각, $u = \pi d \Delta n / \theta \lambda$ (Δn : 액정의 복굴절도; d : 액정의 두께; λ : 빛의 파장)이다. 이 밖에도 Ong이 기하광학적 근사법을 써서 끌어낸 식이 있으나, 식이 복잡하여 물리적 내용이 명확히 드러나지 않는다.^[3] 이들 근사식은 화소에 전압을 걸지 않은 상태를 가정하여 끌어냈는데, 실제로는 각 화소에 비선택전압 V_{off} 과 선택전압 V_{on} 이 교대로 걸리므로 근사식의 조건이 잘 맞지 않아서 전산시능을 많이 하여 설계하지만 아직도 액정표시소자의 광투과율은 0.65, 명암대비는 30 정도로서 개선의 여지가 많다.

최근에 액정판의 앞, 뒤 또는 양쪽에 위상판을 붙여 특성이 상당히 좋아졌지만, 액정판과 위상판 사이의 상호관계가 아직 명확히 이해되지 않았다.^[4]

우리는 쾨양카레공 표현법을 써서 빛의 편광상태와 광학소자들의 편광투과특성을 나타내고, 이를 바탕으로 액정표시소자를 밝기와 명암대비를 극대화하는 조건을 찾는 설계방법의 원리를 설명하고, 이 방법으로 찾아낸 최적조건을 실험적으로 확인한다.^[5,7]

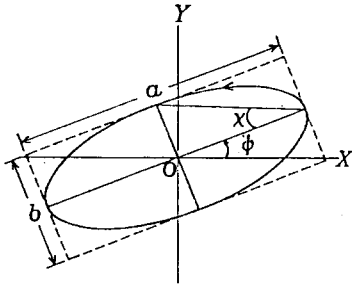
II. 빛의 편광상태와 광학소자의 기능의 기하학적 표현

여기에서는 빛의 편광상태와 광학소자의 편광투과특성을 기하학적으로 표현하고 분석하는 방법을 설명한다.

1) 편광상태의 쾨양카레공 표현

빛의 편광상태는 완전편광, 자연광, 그리고 불완전편광으로 나눌 수 있다. 액정표시소자에서는 광

원에서 나온 자연광이 편광판을 지나면서 완전편광으로 바뀌므로 앞으로는 완전편광만을 다룬다. 완전편광에서 전기장벡터의 끝점이 일반적으로 타원궤적을 그리므로 타원편광이라고 부른다. 궤적의 방향이 시계방향이면 오른손편광, 그 반대이면 왼손편광이라고 부른다. 편광타원은 장축의 방위각 ψ 와 타원도각 $\chi = \pm \arctan(b/a)$ (a 와 b 는 각각 장축과 단축의 길이)으로 완전히 결정된다. χ 의 부호가 +이면 왼손편광, -이면 오른손편광이다.^[8]



[그림2] 편광타원의 변수: 방위각 ψ 와 타원도각 χ .

편광상태는 다음과 같이 정의되는 스토크스 변수(Stokes parameters) s_1, s_2, s_3 를 쓰면 기하학적으로 기술할 수 있다.^[9]

$$s_1 = \cos 2\chi \cos 2\psi \quad (2.1)$$

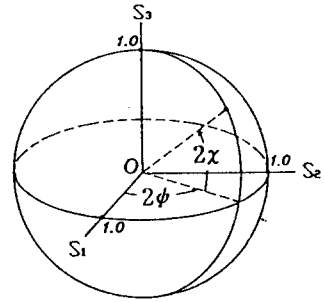
$$s_2 = \cos 2\chi \sin 2\psi \quad (2.2)$$

$$s_3 = \sin 2\chi \quad (2.3)$$

이 세 변수들은 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1$ 의 식을 충족시키므로 스토크스 변수를 직교좌표성분으로 하는 뽀앙카레벡터(Poincare vector) $s = (s_1, s_2, s_3)$ 의 꼭지점은 반지름 1인 뽀앙카레공(Poincare sphere)의 표면 위에 있다. 뽀앙카레공의 적도선 위의 점들은 선편광, 북극점과 남극점은 각각 오른손원편광과 왼손원편광, 북반구와 남반구의 각 점들은 각각 오른손 타원편광과 왼손 타원편광에 대응된다.

2) 편광판의 편광투과특성

모든 빛은 편광판을 지나면 투과축과 나란한 선편광이 되므로 편광판의 편광투과특성은 뽀앙카레공에서는 적도원^{으로}의 투사변환이다. 밝기가 1이고 뽀앙카레벡터가 r 인 빛이 투과축의 방위각이 ϕ , 인



[그림3] 뽀앙카레벡터의 각좌표 ψ 와 χ .

편광판을 지나오면 투과되는 빛의 뽀앙카레벡터 p 와 밝기 I 는 다음과 같다.^[9]

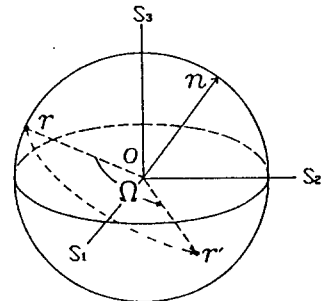
$$p = (\cos 2\phi, \sin 2\phi, 0) \quad (3.1)$$

$$I = (1 + r \cdot p) / 2 \quad (3.2)$$

3) 투명한 비등방성 광학소자의 편광투과특성

투명한 비등방성 광학소자의 편광투과특성은 그림4와 같이 뽀앙카레공에서는 회전변환으로 나타난다. 이 회전변환의 회전축방향의 단위벡터가 n , 회전각이 Ω 이면, 이 소자에 들어오는 빛과 이 소자를 지나온 빛의 편광상태에 대응되는 뽀앙카레벡터 r 과 r' 사이에는 다음 관계가 성립한다.^[10]

$$r' = \frac{n(n \cdot r)(1 - \cos \Omega) + r \cos \Omega + (n \times r) \sin \Omega}{2} \quad (4)$$



[그림4] 벡터 r 의 회전변환(회전축 n , 회전각 Ω).

회전변환 $R(n, \Omega)$ 과 역변환 $R^{-1}(n', \Omega')$ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다:

$$R^{-1}(n', \Omega') = R(n, -\Omega) = R(-n, \Omega) \quad (5)$$

투명한 비등방성 광학소자 2개가 붙어 이루어진 광학소자의 편광특성을 나타내는 회전변환 $R(n, \Omega)$ 의 회전축 n 과 회전각 Ω 는 각 광학소자의 회전변환 $R(n_1, \Omega_1)$ 과 $R(n_2, \Omega_2)$ 에 의해 다음과 같이 결정된다.^[10]

$$\cos\left(\frac{\Omega}{2}\right) = \cos\left(\frac{\Omega_1}{2}\right)\cos\left(\frac{\Omega_2}{2}\right) - (n_1 \cdot n_2)\sin\left(\frac{\Omega_1}{2}\right)\sin\left(\frac{\Omega_2}{2}\right) \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\Omega}{2}\right) n_{rot} = & \cos\left(\frac{\Omega_2}{2}\right)\sin\left(\frac{\Omega_1}{2}\right) n_1 \\ & + \cos\left(\frac{\Omega_1}{2}\right)\sin\left(\frac{\Omega_2}{2}\right) n_2 \\ & - \sin\left(\frac{\Omega_1}{2}\right)\sin\left(\frac{\Omega_2}{2}\right) n_1 \times n_2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

4) 액정판의 회전변환

액정판은 투명하고 비등방성이므로 이것의 편광 특성에 대한 편광특성에는 편향카레공에서의 회전변환이 대응된다. 화소전압이 V_{ns} 와 V_{st} 일때 각각 화소가 가장 어둡고 밝아진다고 하자. 각각의 전압이 걸렸을 때의 액정판의 편광특성에 대응되는 회전변환을 각각 $R_{ns} = R(n_{ns}, \Omega_{ns})$ 와 $R_{st} = R(n_{st}, \Omega_{st})$ 이라하면, 화소전압이 V_{ns} 에서 V_{st} 로 바뀔 때의 편광특성의 변화에 대응되는 유효회전변환 $R_{eff} = R(n_{eff}, \Omega_{eff})$ 은 다음의 복합회전변환이다:

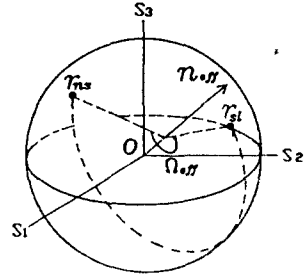
$$R_{eff} = R_{st} R_{ns}^{-1} \quad (7)$$

이 회전변환의 회전축 n_{eff} 과 회전각 Ω_{eff} 는 식 (6.1,2)를 써서 R_{ns} 와 R_{st} 로부터 구할 수 있다. 비선택화소와 선택화소의 액정판을 지나오는 빛의 편향카레벡터를 각각 r_{ns} 와 r_{st} 이라고 하면, 이 두 벡터는 유효회전변환 R_{eff} 에 의해 연결되므로 다음 관계가 성립한다:

$$\begin{aligned} r_{st} = & n_{eff}(n_{eff} \cdot r_{ns})(1 - \cos\Omega_{eff}) \\ & + r_{ns}\cos\Omega_{eff} + (n_{eff} \times r_{ns})\sin\Omega_{eff} \end{aligned} \quad (8)$$

III. 최적설계조건

액정표시소자의 구성요소들의 기능은 다음과 같다. 편광판은 광원에서 나온 자연광을 선편광으로 바꾸어준다; 액정판은 걸린 전압에 따라서 지나가는



[그림5] 비선택전압에서 선택전압으로 바뀔 때의 편향카레벡터의 회전변환.

빛의 편광상태를 바꾸어 준다; 검광판은 빛의 편광상태의 변화를 밝기의 변화로 바꾸어준다; 뒤쪽 위상판은 액정판에 들어가는 빛을 타원편광을 만들기 위한 것이고, 앞쪽 위상판은 액정판을 지나온 빛을 선편광으로 바꾸기 위한 것이다. 화소의 밝기는 광원의 밝기에 화소의 투과도를 곱한 것이므로, 앞으로는 편광판을 지나온 빛의 밝기를 1로 두어 화소의 투과도가 곧 밝기로 나타나도록 한다. 액정표시소자의 밝기 ΔI 와 명암대비 C 는 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta I \equiv I_{st} - I_{ns} = (r_{st} - r_{ns}) \cdot p_A / 2 \quad (9)$$

$$C \equiv \frac{I_{st} - I_{ns}}{I_{st} + I_{ns}} = \frac{(r_{st} - r_{ns}) \cdot p_A}{2 + (r_{st} + r_{ns}) \cdot p_A} \quad (10)$$

여기에서 p_A 는 검광판의 투과축과 나란한 선편광의 편향카레벡터이다. 이 식으로부터 밝기와 명암대비가 동시에 최대가 되려면 비선택화소와 선택화소를 지나 검광판에 들어오는 두 빛이 서로 직교하는 '선편광'이어야 함을 알 수 있다. 이 조건을 실현시키는 필요조건은 액정판에 대해 $\Omega_{eff} = 180^\circ$ 이다.^[6] 액정판의 R_{eff} 가 결정되면 편향카레공 표면을 따라 켜 선택화소와 비선택화소를 지나온 빛의 편향카레벡터의 꼭지점들 사이의 거리가 가장 멀어지도록, 즉 유효회전변환이 n_{eff} 에 수직한 대원을 따라서 이루어지도록 편광판의 투과축의 방향과 뒤쪽 위상판의 규격을 조절한다. 앞쪽 위상판은 유효회전변환이 적도선에서 일어나도록 규격을 정한다.

IV. 전산시뮬

- 1) 화소전압에 대한 액정분자의 배향분포 결정

액정판의 전기광학특성을 살펴보면 액정분자의 배향분포를 결정하고, 이로부터 편광투과특성을 썬한다. 액정분자의 배향분포는 기관의 배향조건에 맞추어 액정의 탄성에너지와 유전에너지의 합인 다음과 같은 자유에너지밀도 f_G 의 적분값이 최소가 되도록 결정된다.^[11]

$$f_G = \frac{2\pi k_{22}}{\rho_0} (\mathbf{m} \cdot \nabla \times \mathbf{m}) + \frac{1}{2} k_{11} (\nabla \cdot \mathbf{m})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (\mathbf{m} \cdot \nabla \times \mathbf{m})^2 + \frac{1}{2} k_{33} (\mathbf{m} \times \nabla \times \mathbf{m})^2 + \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} \quad (11)$$

\mathbf{m} 은 액정분자의 장축방향의 단위벡터(director); k_{11} , k_{22} , k_{33} 는 각각 액정의 퍼짐, 꼬임, 구부러짐 변형에 대한 탄성상수; ρ_0 는 전압을 걸지 않은 상태에서의 퍼치이다. 경계조건을 써서 식(11)의 자유에너지가 최소가 되는 조건을 구하면 전압에 대한 액정분자의 배향분포의 변화를 알 수 있다.

2) 액정판의 회전변환 및 유효회전변환의 결정

액정판 속에서의 분자배향분포가 정해지면 편광투과특성을 나타내는 존즈행렬을 썬한다. 배향이 고른 액정층은 선형위상판과 같고, 액정판은 위상값과 광축의 방향이 다른 얇은 선형위상판을 여러 장 겹친 것으로 볼 수 있으므로, 얇은 액정층에 대한 회전변환을 썬하여 차례로 곱하면 액정판 전체의 편광투과특성을 나타내는 회전변환을 얻는다.

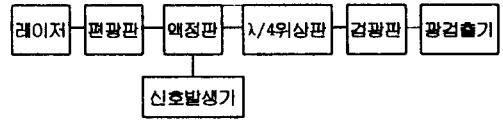
TFT 액정표시소자에서는 V_{in} 과 V_{ms} 를 마음대로 정할 수 있으므로 $\Omega_{eff} = 180^\circ$ 에 가까운 값이 되도록 구동전압을 정한다. DSTN 액정표시소자에서는 선택전압과 비선택전압이 서로 독립적이 아니고 주사선의 수 N 에 따라 두 전압의 비(선택비: SR)가 다음과 같이 결정된다.^[12]

$$SR \equiv \frac{V_{st}}{V_{ms}} = \left[\frac{N^{1/2} + 1}{N^{1/2} - 1} \right]^{1/2}$$

노트북컴퓨터에 쓰이는 DSTN 액정표시소자는 $N=240$ 이므로 $SR=1.067$ 인데, 시뮬레이션에서는 이 값을 써서 V_{ms} 를 바꾸어가며 $\Omega_{eff} = 180^\circ$ 에 가장 가까운 구동전압을 정한다.

V. 실험

편광측정장치는 그림6과 같이 광원, 편광판, 액정판, 사반($\lambda/4$)파장판, 검광판, 광검출기로 구성된다. 액정판의 편광투과특성을 결정하려면 서로 직교하는 두 쏘앙카레벡터에 해당하는 두 편광이 액정판



[그림6] 편광측정장치의 구성도.

을 지나면서 편광상태가 각각 어떻게 달라졌는가를 살핀다. S_1 축과 S_2 축 방향의 쏘앙카레벡터 e_1 과 e_2 에 대응되는 편광이 액정판을 지난 뒤에는 쏘앙카레벡터 e_1' 와 e_2' 에 대응되는 편광으로 바뀐다면 액정판의 편광투과특성에 대응되는 회전변환의 회전각 Ω 와 회전축 n 의 직교좌표성분 n_i ($i=1,2,3$)는 다음과 같이 결정된다:

$$\cos \Omega = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 e_i \cdot e_i - 1 \right) \quad (12)$$

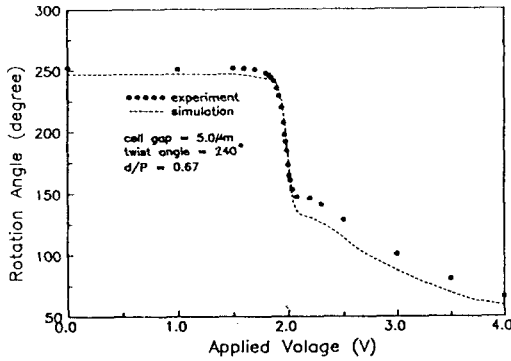
$$n_i = \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^3 \epsilon_{ijk} e_j \cdot e_k \quad (i=1,2,3) \quad (13)$$

VI. 실험결과와 전산시뮬결과의 비교

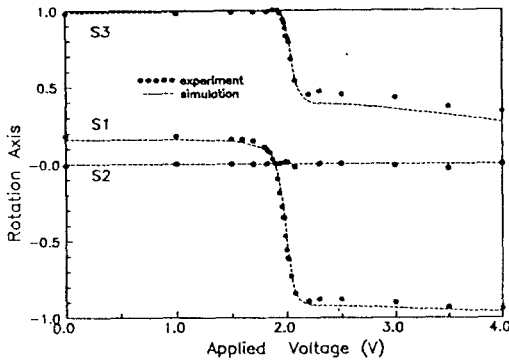
실험에 쓴 액정판은 꼬임각이 240° , 액정층의 두께 $5.0\mu\text{m}$, d/P 값은 0.67이다. 그림7은 붉은빛(파장 633nm)에 대한 액정판의 회전변환이 전압에 따라 달라지는 것을 보여주는데, 가)와 나)는 각각 회전각과 회전축의 변화이다. 두가지 모두 전압 1.8V에서부터 변하기 시작하여 약 1.9-2.1V에서 크게 변하고, 그 이상에서는 천천히 변하여 4.0V 이상에서는 안정되지만 비등방성이 완전히 사라지는 않음을 보여준다.

VII. 액정화소의 밝기변화

화소전압이 V_{ms} 에서 V_{st} 로 바뀔 때의 그 화소의 편광투과특성의 변화는 유효회전변환 R_{eff} 을 써서 나타낼 수 있음은 식(8)에서 설명했다. 화소에 V_{ms} 와 V_{st} 이 걸렸을 때 액정층을 지나온 빛의 편광상태를 나타내는 두 쏘앙카레벡터 r_{ms} 와 r_{st} 의 꼭지점 사이의 거리를 쏘앙카레공 표면을 따라서 쥘 때, 그 최대값은 Ω_{eff} 이다. 따라서 액정표시소자의 최대투과율은 액정판의 Ω_{eff} 가 결정한다. 비선택화소와 선택화소 각각의 액정층을 지나온 빛의 두 쏘앙카레



가) 회전각의 변화.



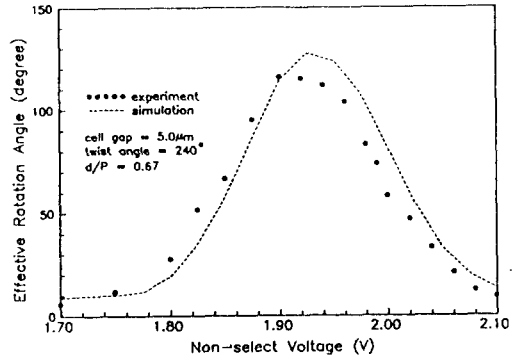
나) 회전축의 변화

[그림7] 액정판의 전기광학적 회전변환특성.

벡터의 거리는 Ω_{eff} , 그리고 뽀앙카레벡터 r_{ns} 와 유효회전축 n_{eff} 의 사이각에 따라서 달라지는데, Ω_{eff} 가 180° 이고 r_{ns} 와 n_{eff} 가 수직일 때 가장 멀어진다. 앞쪽 위상판의 광축과 검광판의 투과축을 조절하여 비선택 화소를 지난 빛이 완전히 소광되면 $I_{ns} = (1 + r_{ns} \cdot p_A)/2 = 0$ 이므로 $r_{ns} = -p_A$ 이다. 따라서 선택화소의 밝기 I_{si} 는 다음과 같다.

$$I_{si} = [1 - (n_{eff} \cdot r_{ns})^2] \sin^2\left(\frac{\Omega_{eff}}{2}\right) \leq \sin^2\left(\frac{\Omega_{eff}}{2}\right) \quad (14)$$

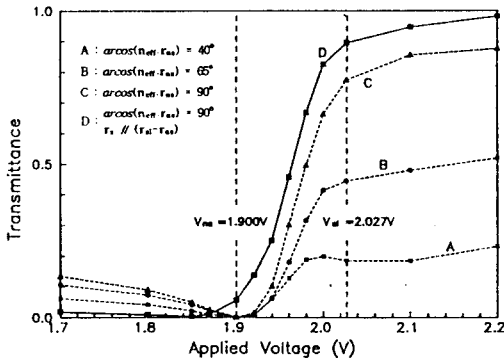
이 식에서 등식은 $n_{eff} \cdot r_{ns} = 0$ 로 n_{eff} 와 r_{ns} 가 서로 직교할 때 성립하는데, 이것은 유효회전변환이 뽀앙카레공의 대원을 따라 이루어져 두 벡터 r_{ns} 와 r_{si} 사이의 거리가 멀어질수록 선택화소가 밝아지는 것을 뜻한다. 따라서 선택화소의 최대밝기는 액정판의 Ω_{eff} 이 결정한다.



[그림8] 액정판의 유효회전각 Ω_{eff} 의 변화.

그림8은 $N=240$ 일 때 비선택전압의 변화에 대한 액정판의 Ω_{eff} 의 변화이다. 전산시뮬의 결과는 비선택전압이 1.920V일 때 유효회전각이 128° 로 가장 커지는데, 실험결과는 같은 비선택전압에서 115.9° 이다. 두 결과를 비교하면 전압에 대한 유효회전각의 변화의 전체적인 모습은 비슷하고 값은 조금 다른데, 이 차이의 원인은 실험적으로 정확하게 재기 어려운 액정층의 두께와 액정의 굴절률 그리고 탄성상수의 값의 오차로 짐작하며, 이것을 고려하면 실험결과가 이론과 비교적 잘 맞다고 볼 수 있다. 밝기와 명암대비가 가장 커지도록 하려면 유효회전각이 가장 큰(180° 에 가장 가까운) V_{ns} 를 정하여 그림7로부터 화소전압이 V_{ns} 와 V_{si} 일 때의 회전변환 R_{ns} 와 R_{si} 을 찾는다. 이 결과와 식(7)을 써서 n_{eff} 를 구한다. n_{eff} 이 정해지면 유효회전변환이 대원에서 일어나도록 편광판의 투과축을 정하고, 비선택화소를 지난 빛의 뽀앙카레벡터의 꼭지점이 적도선에 오도록 앞쪽 위상판을 정한다. 한 파장의 빛에 대해서는 앞쪽 위상판이 없이 편광판의 투과축만 조절하여 유효회전변환이 대원에서 일어나게 할 수 있다. n_{eff} 을 R_{ns}^{-1} 회전변환시킨 뽀앙카레벡터와 수직하고 꼭지점이 적도선을 지나는 뽀앙카레벡터와 나란히 편광판의 투과축을 두면 된다. 비선택화소를 지난 빛의 뽀앙카레벡터를 적도선으로 보내는 앞쪽 위상판은 여러가지이다. 적도선 위의 임의의 점을 중심으로 비선택화소를 지난 뽀앙카레벡터의 꼭지점을 지나는 원을, 반시계방향으로 그린다. 위상판의 빠른 축을 원의 중심에 두고, 위상값은 뽀앙카레벡터의 꼭지점과 원중심 그리고 원과 적도선이 만나는 점이 이루는 원주각과 같도록 앞쪽 위상판을 정

하면 비선택전압을 지나온 뽕앙카레펙터는 원과 적도선이 만나는 점으로 움직인다. 검광판의 투과율을 이 점의 대척점에 나란하게 두면 명암대비율이 최대가 된다. 그림9는 실험으로 구한 액정판의 전기광학 투과곡선이다. 곡선 A, B, C는 r_{ns} 와 r_{off} 이 이루는 각이 각각 40° , 65° , 90° 가 되도록 편광판의 투과축의 방향을 조절한 경우로, 식(21)로 계산한 선택화소의 밝기는 각각 0.30, 0.41, 0.72이다. 이 결과로부터 유효회전변환이 유효회전축의 대원 가까이에서 이루어질수록 선택화소의 투과율이 커짐을 알 수 있다. 곡선 D는 명암대비를 희생하는 대신 선택화소와 비선택화소의 밝기차가 최대가 되도록 할 때의 전기광학 투과곡선이다.



[그림9] 명암대비와 밝기가 최적인 조건에서 액정 표시소자의 전기광학 투과특성

VIII. 결 론

빛의 편광상태와 광학소자의 편광투과특성을 뽕앙카레공에서 기하학적으로 나타내어 밝기와 명암대비가 최적인 액정표시소자를 설계하는 방법을 설명하고, 그 타당성을 실험으로 확인하였다. 액정판의 전기광학적 유효회전각의 크기로부터 그 것을 쓴 액정표시소자에서 실현시킬 수 있는 밝기와 명암대비의 한계를 추정할 수 있고, 액정판의 구동전압은 구동방식에 따른 조건을 충족시키면서 유효회전각이 180° 에 가장 가까와지도록 결정할 수 있다. 이와 같은 기본조건 아래에서 화면의 밝기와 명암대비가 최대가 되도록 편광판과 검광판 그리고 위상판의 규격을 정할 수 있다. 이 방법은 각 화소를 지나는 빛의 편광상태를 변화시켜 밝기를 조절하는 모든 종류의 화면표시소자에 쓸 수 있다.

† : 현대전자에 근무중

‡ : 삼성전자에 근무중

* 이 논문은 1995년도 교육부 기초과학육성연구비 (BSRI-95-2432)의 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. B. Bahadur, *Liquid Crystal Applications and Uses, Vol.1* (World Scientific, Singapore, 1990).
2. C. H. Gootch and H. A. Tarry, *J. Phys. D8*, 1575 (1975).
3. H. L. Ong, *J. Appl. Phys.* 64, 614 (1988).
4. T. Miyashita, Z. Kikuchi, Y. Miyazawa, H. Aoki and A. Mawatari, *Janpan Display 92*, 495 (1992).
5. 노 봉규, 김 진승, *한국광학회지* 5, 25 (1994).
6. 노 봉규, 김 규석, 김진승, *한국광학회지* 5, 404 (1994).
7. 노 봉규, 김 규석, 김진승, *한국광학회지* 5, 411 (1994).
8. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, sixth ed. (Pergamon Press, London, 1982).
9. P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos, *Matrix Theory of Photoelasticity* (Springer-Verlag, Berlin, 1979).
10. S. L. Altman, *Rotations, Quaternions, and Double Groups* (Oxford University Press, London, 1986).
11. C. W. Oseen, *Faraday Soc. Trans.* 29, 883 (1933).
12. P. M. Alt and P. Pleshko, *IEEE Trans. Electron Devices* ED-21, 146 (1974).