

액정셀의 전기광학적 편광투과특성을 이용한 액정표시소자의 최적설계:

I. 단색광의 경우*

노봉규 · 김규석 · 김진승

전북대학교 물리학과

(1994년 8월 5일 받음)

액정층을 지나는 빛의 편광상태의 변화를 보양카레공에서의 회전변환으로 나타내어, 액정층에 걸어진 전압에 대한 회전변환의 회전각과 회전축의 변화를 쟀다. 이로부터 액정셀에 걸린 전압이 비선택전압에서 선택전압으로 바뀔 때의 회전변환의 회전각이 180° 에 가장 가까운 구동전압을 결정하고, 이 전압으로 액정셀을 구동할 때 화면의 콘트라스트 및 투과율이 최대가 되는 편광판과 검광판의 투과축의 방향을 회전변환의 일반적인 특성을 써서 결정하고, 실험적으로 확인하였다.

I. 서 론

액정표시소자는 가볍고 전력소모가 적으며 구동전압이 낮으므로 휴대용 전자기기의 화면소자로 많이 쓰이는데, 특히 보상판을 써서 착색현상을 없앤, 꼬임각 240° 이상인 BW STN(Black and White Super Twist Nematic)은 노트북컴퓨터의 화면소자로 많이 쓰인다. 보상판을 쓴 STN 액정표시소자의 편광투과특성은 액정의 굴절률 이방성, 두께, 꼬임각, 러빙방향, 위상판의 위상값과 광축의 방향, 편광판 및 검광판의 투과축의 방향등으로 변수가 많아서 이들의 최적값을 정하는 것은 매우 어렵고 복잡하다. 이러한 광학부품들의 규격을 정하려면 액정층을 지나는 빛의 편광상태의 변화와 이에 따라 검광판을 지나오는 빛의 밝기변화를 쟀해야 하는데, 지금까지는 파동방정식의 해를 해석적으로 구하거나(해석적 방법) 맥스웰 방정식을 그대로 미분행렬 방정식으로 고쳐서(행렬방법) 이 문제를 풀어 왔다.^[1,5] 해석적 방법은 액정의 광학적 특성을 고려한 파동방정식을 세우고, 이 방정식의 해를 적당한 근사법을 써서 구하여 그 해의 특성을 살펴 보는 방법으로서, 전압이 걸리지 않은 상태에서의 액정층의 편광투과특성을 살펴보는데 쓰인다.^[1,3] 그런데 액정셀에 걸어진 전압이 문턱값 이상이 되면 분자배향이 상당히 달라져서 파동방정식의 해를 해석적

으로 얻기가 어렵다. 이러한 경우에는 Frank-Oseen의 탄성연속체 이론으로부터 액정분자 배열을 알아내고, 액정층을 분자배향이 비교적 균일한 여러 층으로 이루어진 것으로 생각하여 빛이 각각의 액정층을 지나올 때의 편광상태의 변화를 행렬식을 써서 차례로 계산할 수 있다. 이 과정에서 각 액정층의 경계면에서의 빛의 반사효과를 생각하여 4×4 행렬을 쓰는 방법과 반사효과를 무시하여 계산을 더 빠르게 하는 2×2 행렬을 쓰는 방법이 있다.^[4,6] 행렬 방법은 액정층 속에서의 분자배향 분포가 고르지 않은 경우에 대해서도 쓸 수 있으므로 액정층에 전압이 걸려 분자들의 배향분포가 달라지는데 따른 편광투과특성의 변화도 살펴볼 수 있으나 계산결과에 대한 해석이 쉽지 않다. 그래서 실제로 액정표시소자를 설계하고 만들 때는 이론적 결과를 바탕으로 실험을 하여 부족한 점을 보완하는데, 액정표시소자의 특성을 결정하는 변수들이 많아서 이 변수들과 화면소자의 특성 사이의 관계를 파악하기가 쉽지 않다. 보다 특성이 좋은 액정표시소자를 만들려면 액정의 전기광학적 편광투과특성을 표시소자의 화면에 나타나는 화상의 질과 직접 연관시켜 살펴보는 것이 바람직하다. 이러한 시도로서 액정층의 편광투과특성을 나타내는 유니타리 존즈행렬을 보양카레공 표면에서의 회전변환과 대응시켜 기하학적으로 해석하고 이를 바탕으로 질이 가장 좋은 화상을 실현하려면 회전변환특성이 어떠한 조건을 갖추어야 하는 가를 이론적으로 살펴보았다.^[12] 이 논문에서

* 이 논문은 1993년 한국학술진흥재단 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

는 이러한 이론적 결과를 실험으로 확인하기 위해 액정셀에 걸어주는 전압을 변화시키 가면서 단색광에 대한 편광투과특성의 변화를 측정하고, 이 결과를 포앙카레공에서의 회전변환으로 환산하였다. 이 회전변환의 특성을 바탕으로 그 액정셀을 써서 화면표시소자를 만들 경우에 질이 가장 좋은 화상이 나타나도록 하려면 편광판과 검광판의 방향을 어떻게 정해야 하는가를 결정하여 그 특성을 실험적으로 확인하였다.

II. 액정셀의 회전변환

액정은 투명하고 광학적 비등방성을 지니므로 액정층의 편광투과특성은 2×2 유니타리 존즈행렬로 나타낼 수 있고,^{16,7} 이는 그림 1과 같은 포앙카레공에서 회전변환과 일대일로 대응된다.⁸ 액정층에 의한 회전변환이 $R(n, \Omega: n$ 회전축, Ω 회전각)이고, 액정층에 들어오는 빛의 편광상태에 대응되는 포앙카레공 위의 점을 (앞으로는 포앙카레벡터라고 부르기로 한다.) r 이라면, 액정층을 지나온 빛의 포앙카레벡터 r' 는 다음과 같다.⁹

$$r' = r \cos \Omega + n(n \cdot r)(1 - \cos \Omega) + (n \times r) \sin \Omega \quad (1)$$

비선택전압이 걸린 액정층의 회전변환을 $R_{ns} = R(n_{ns}, \Omega_{ns})$, 선택전압이 걸린 액정층의 회전변환을 $R_{st} = R(n_{st}, \Omega_{st})$ 라면, 액정층에 걸린 전압이 비선택전압에서 선택전압으로 바뀔 때의 회전변환 $R_{off} = R(n_{off}, \Omega_{off})$ 은 다음과 같은 복합회전변환이 된다.^{8,10}

$$R_{off} = R_{st} \cdot R_{ns}^{-1} \quad (2)$$

이 복합회전변환 R_{off} 의 회전축 n_{off} 과 회전각 Ω_{off} 은 각각 아래 식과 같이 결정된다.¹⁰

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\Omega_{off}}{2}\right) &= \cos\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega_{st}}{2}\right) + (n_{ns} \cdot n_{st}) \times \\ &\sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{st}}{2}\right) \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\Omega_{off}}{2}\right) \cdot n_{off} &= \cos\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{st}}{2}\right) n_{st} \\ &- \sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega_{st}}{2}\right) n_{ns} \\ &+ \sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{st}}{2}\right) (n_{ns} \times n_{st}) \end{aligned} \quad (3-2)$$

액정표시소자의 화질을 나타내는 대표적인 특성변수는 화상의 밝기 B와 명암대비율(contrast ratio) CR이다. 이 두 변수는 비선택전압과 선택전압이 걸린 화소(앞으로는 각각 비선택화소와 선택화소라고 부르기로 한다) 각각의 밝기의 차와 밝기의 비로 정의되는데, 화상의 밝기는 주로 선택화소의 밝기에 의해 결정되고, 명암대비율은 주로 비선택화소의 밝기에 의해 결정된다.¹¹ 액정표시소자 스스로는 빛을 내지 않으므로 각 화소의 밝기는 광원으로부터 나오는 광량과 각 화소의 투과율에 비례 하는데, 광원은 정해져 있으므로 액정셀의 특성에 따라서 결정되는 양은 각 화소의 투과율이다. 액정셀의 투과율이 최대가 되게 하려면 선택화소의 액정층과 비선택화소의 액정층 각각을 지나온 빛의 편광상태가 서로 직교해야 한다. 다시말해 선택화소의 액정층과 비선택화소의 액정층을 지난 빛의 두 포앙카레벡터가 포앙카레공의 표면을 따라 켄 거리가 가장 멀어지는, 공의 중심에 대해 대칭을 이루는 두 점이 되어야 한다. 이 조건을 충족시키려면 화소의 액정층을 지나온 빛의 포앙카레벡터가 회전변환 R_{off} 의 회전축 n_{off} 에 수직이고 원점을 포함하는 평면과 포앙카레공이 만나는 선으로 이루어지는 대원을 따라 회전변환되도록 해야 하며, 이 경우에 회전변환에 의한 포앙카레벡터의 꼭지점의 이동거리는 회전각 Ω_{off} 와 같으므로 $\Omega_{off} = 180^\circ$ 일 때 이동거리가 최대가 된다. 따라서 밝고 명암대비가 큰 액정표시소자가 되려면 회전변환 R_{off} 의 회전각 Ω_{off} 가 180° 가 되도록 액정셀을 만들어야 한다. 이러한 액정셀이 마련되면 빛이 선택전압과 비선택전압이 걸린 액정층을 지나가면서 겪는 편광상태의 변화에 해당하는 회전변환 R_{off} 이 회전축 n_{off} 에 수직인

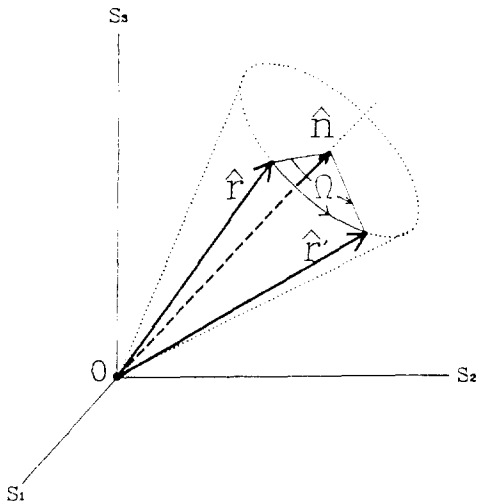


그림 1. 회전축 n 이 원점을 지나고 회전각이 Ω 인 회전변환에 의한 벡터 r 의 변화.

대원에서 일어나도록 액정셀 앞에 있는 편광판과 위상판의 규격을 정하고, 액정셀을 지난 빛이 검광판에 들어갈 때는 선편광이 되도록 액정셀과 검광판 사이에 있는 위상판의 규격을 정해야한다.^[11]

III. 회전변환의 측정

액정층의 편광투과특성을 재는 방법은 다음과 같다. 액정층에 서로 독립인 두 편광상태의 빛을 보내어, 각각의 경우에 대해 액정층을 지나온 빛의 편광상태를 재고, 이 결과로부터 액정층의 편광투과특성을 나타내는 2×2 존즈행렬의 요소들 또는 포앙카레공에서의 회전변환의 회전축과 회전각을 쟁한다. 이 논문에서는 액정층의 편광변환특성을 보다 직관적으로 이해할 수 있는 포앙카레공에서의 회전변환으로 나타내기로한다. 액정층을 지난 빛의 편광상태를 결정하려면 액정셀 뒤에 사반과장판(90° 위상 지연판)과 검광판을 차례로 두어 이 두 광축소자를 지나온 빛의 밝기를 쟁다. 사반과장판의 광축의 방향과 검광판의 투과축의 방향을 조절하면 빛이 소광되는데, 그 때의 사반과장판의 광축의 방향과 검광판의 투과축의 방향으로부터 액정층을 지나온 빛의 편광상태에 해당하는 포앙카레 벡터의 좌표를 결정할 수 있다.^[7] 포앙카레공에서 S₁(x축에 나란한 선편광), S₂(x축과 45°를 이룬 선편광), S₃(왼손 원편광)축 방향의 단위벡터를 e₁, e₂, e₃라 하고 이들이 회전변환 R(n, Ω)에 의하여 e'₁, e'₂, e'₃로 변환한다면 이 때의 회전축 n(n₁, n₂, n₃)과 회전각(Ω)은 다음과 같다.

$$\cos\Omega = \frac{1}{2}(e_1 \cdot e'_1 + e_2 \cdot e'_2 + e_3 \cdot e'_3 - 1) \quad (4)$$

$$n_1 = \frac{1}{2}(e'_2 \cdot e_3 - e'_3 \cdot e_2) \quad (5-1)$$

$$n_2 = \frac{1}{2}(e'_3 \cdot e_1 - e'_1 \cdot e_3) \quad (5-2)$$

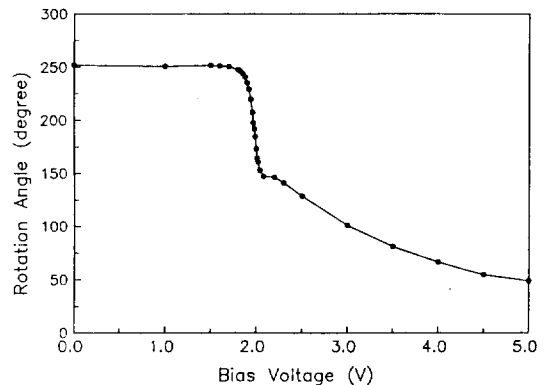
$$n_3 = \frac{1}{2}(e'_1 \cdot e_2 - e'_2 \cdot e_1) \quad (5-3)$$

벡터들 사이의 직교성은 회전변환에 대해 불변이므로 e'₃는 e'₁와 e'₂로부터 알 수 있다. 그러므로 e₁과 e₂에 대한 회전변환의 결과를 측정하면 회전축과 회전각을 알 수 있고 e'₁와 e'₂가 이루는 각을 계산하여 측정의 정확도를 확인할 수 있다. 실험에서의 측정오차는 1° 미만으로 나타났는데, 그 원인은 빛이 액정셀의 표면과 검광용 편광프리즘의 표면에서 일부 반사되어 두 면사이를 오가면서 편광상태가 조금 달라지기 때문임을 실험에서 확인하였다. 실험에 쓴 액정셀은 꼬임각이 210°가 되도록

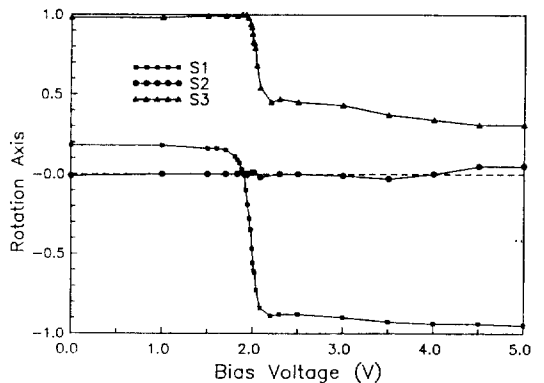
배향막의 문지른 방향이 어긋나게 유리기판을 두고, 그 사이에 네마틱 액정(Merck사의 ZLI 5100-100)에 1.5%의 폴레스테릭 액정(S811)을 섞어 주입하여 만들었다. 실험을 할 때의 온도는 23°C 이고, 액정셀에 걸어진 전압과형은 1 kHz 조화함수파이며, 광원은 헬륨네온레이저(파장 6328 Å)이다.

IV. 실험결과 및 토의

그림 2는 액정셀에 걸어진 전압에 따라 액정층의 회전변환이 달라지는 것을 보여준다. 그림 2(가)는 회전각의 변화인데, 걸어진 전압이 1.8 V일 때부터 변하기 시작하여 약 1.9~2.1 V에서 급격하게 변하고, 그 이상의 전압에 대해서는 천천히 변하여 포화상태에 이르는 것을 보여준다. 그림 2(나)는 회전축의 변화를 직교좌표축 성



(가) R(n, Ω)의 회전각 Ω의 변화



(나) 회전축 n의 직교좌표축 성분 (S1, S2, S3)의 변화

그림 2. 액정셀에 걸어진 전압에 따른 액정층의 회전변환

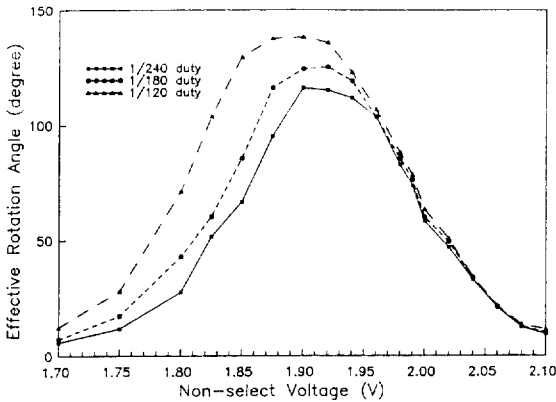


그림 5. 액정셀에 걸린 전압에 대한 액정층의 회전변환 R_{eff} 의 회전각의 변화.

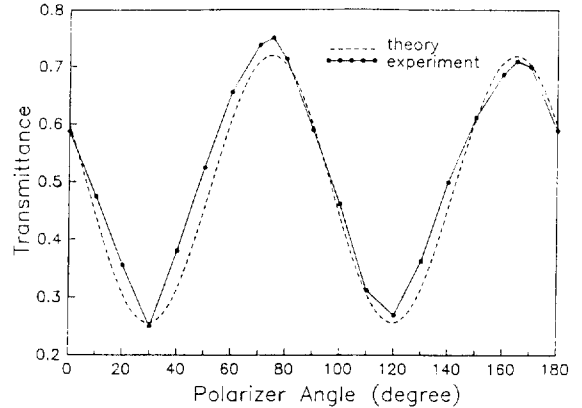


그림 6. 1/240 duty, 비선택화소를 소광시키는 조건에서 편광판의 투과축방향에 따른 선택화소의 투과율 변화

지나온 두 빛의 편광상태에 대응되는 두 쌍앙카레벡터가 쌍앙카레공위에서 최대 투과율을 나타내므로 액정표시소자가 빛을 통과시키는 최대 투과율은 액정층의 R_{eff} 회전각에 따라서 결정된다. 선택화소와 비선택화소의 액정층을 지난 두 빛의 쌍앙카레벡터의 꼭지점 사이의 거리는 회전변환 R_{eff} 로부터 알 수 있다.^[11] 위상판의 광축과 검광판의 투과축을 조절하여 비선택화소를 지난 빛을 완전히 소광시킬 때, 선택화소의 투과율은 다음과 같다.

$$T_{\Omega} = \sin^2 \left\{ \frac{\arccos \left[\frac{\cos \Omega_{eff} \times (n_{eff} \cdot r_{ns})^2 (1 - \cos \Omega_{eff})}{2} \right]}{2} \right\} \quad (7)$$

여기에서 r_{ns} 는 비선택화소의 액정층을 지나온 빛의 쌍앙카레벡터로서 액정층에 들어오는 빛의 쌍앙카레벡터를 r_i 라 하면 $r_{ns} = R_{ns} \cdot r_i$ 이다. 식 (7)로부터 선택화소의 투과율은 r_{ns} 가 R_{eff} 의 회전축 n_{eff} 에 수직일 때 가장 커지며, 그 값은 다음과 같다.

$$(T_{\Omega})_{max} = \sin^2(\Omega_{eff}/2) \quad (8)$$

그림 5에서 1/120, 1/180, 1/240 duty로 구동할 때의 최대 회전각 ($\Omega_{eff})_{max}$ 이 각각 138°, 125°, 116°이므로 이 액정셀을 써서 만드는 액정표시소자에서 실현할 수 있는 최대 투과율은 식 (8)에 의하면 각각 87%, 78%, 72%이다.

그림 6은 1/240 duty로 구동할 때의 Ω_{eff} 가 최대인 구동전압(비선택전압이 1.900 V, 선택전압이 2.027 V)에서 편광판의 방향에 따른 투과율을 (7)식으로 계산한 값과 측정값을 나타낸 것인데, 액정셀과 검광판 사이에 있는 사반과장판의 광축과 검광판의 투과축을 조절하여 비선택화소가 소광되는 조건에서의 선택화소의 투과율이다.

1/240 duty에서 회전각이 최대일 때 (비선택전압 1.900 V, 선택전압 2.027 V)의 회전변환

회전변환	회전축(n)			회전각(Ω)
	n_1	n_2	n_3	
R_{ns}	-0.04	0.0	1.0	235.3
R_d	0.71	-0.02	-0.70	203.0
R_{eff}	0.37	-0.71	-0.60	115.9

최소투과율 및 곡선의 모양으로부터 (7)식의 계산값과 측정값이 잘 맞음을 알 수 있다.

표 1은 이 때의 회전변환을 나타낸 것이다.

최대 투과율이 실현되는 조건에서의 편광판의 투과축의 방향각 ϕ 는 150°(75°×2)이고 경도각 θ 는 0°이며 쌍앙카레벡터의 좌표성분은 (0.866, 0.5, 0)이다. 이 빛이 비선택전압이 걸린 화소의 액정층을 지나면, 표 1의 회전변환 R_{ns} 값을 (1)식에 대입하여 회전변환한 쌍앙카레벡터의 직교좌표 성분은 (0.902, 0.427, 0.072)로서, R_{eff} 의 회전축과는 이루는 각이 89.2°로 거의 수직이다. 편광판과 선택전압이 걸린 액정층을 차례로 지난 빛의 쌍앙카레벡터는, 표 1의 회전변환 R_d 값을 (1)식에 대입하여 살펴보면 (-0.192, -0.673, 0.708)로서, R_{eff} 의 회전축과 이루는 각이 88.6°로 역시 거의 수직이다. 비선택전압과 선택전압이 걸린 상태에서 편광판과 액정층을 차례로 지난 두 빛의 쌍앙카레벡터가 모두 회전변환 R_{eff} 의 회전축과 거의 수직이므로, 쌍앙카레벡터가 R_{eff}

회전축의 대원 가까이에서 회전변환하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

액정층에 걸어진 전압을 변화시켜가면서 편광투과특성의 변화를 재고, 이것을 보양카레공에서의 회전변환 특성 -회전축과 회전각-의 변화로 나타냈다. 이 결과를 바탕으로 액정셀에 걸어진 전압이 비선택전압에서 선택전압으로 바뀔 때의 액정층의 편광투과특성의 변화에 해당하는 유효회전변환을 계산하여 그 유효회전각이 180° 에 가장 가까운 비선택-선택전압을 정하였다. 이 유효회전변환이 유효회전축에 대해 수직인 대원에서 일어나게 편광판의 투과축을 정하면 액정셀표시소자의 투과율의 변화가 최대가 되는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 편광판의 투과축을 변화시키는데 따른 투과율의 변화를 측정된 결과가 유효회전변환을 바탕으로 계산한 값과 잘 맞았다. 이 실험결과들은 액정셀의 전기광학적 편광투과특성을 보양카레공에서의 회전변환의 변화로 해석하고, 이를 바탕으로 액정표시소자의 특성을 예측하고 최적화하는 방법이 정확하면서 직관적이고 알기 쉬운 길임을 보여준다.

VI. 감사의 글

이 실험에 쓴 액정셀을 만드는데 도움을 주신 (주)삼성전관 연구소의 김 광수 선임연구원, (주)금성사 연구소(안양)의 김 택성 선임연구원, 그리고 (주)금성사 영상 디스플레이 연구소(구미)의 이임수 주임연구원께 저자들의 고마운 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, "Simplified approach to the propagation of polarized light in anisotropic media - Application to liquid crystals," *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 1252(1972).
- [2] C. H. Gootch and H. A. Tarry, "The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles 90° ," *J. Phys.* **D8**, 1575 (1975).
- [3] H. L. Ong, "Origin and characteristics of the optical properties of general twisted nematic liquid-crystal displays," *J. Appl. Phys.* **64**, 614(1988).
- [4] D. W. Berreman, "Optics in smoothly varying anisotropic planar structures: Application to liquid-crystal twist cells," *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 1374 (1973).
- [5] A. Lien, "Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence," *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2767 (1990).
- [6] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, sixth ed. (Pergamon Press, London, 1982).
- [7] P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos, *Matrix Theory of Photoelasticity* (Springer-Verlag, Berlin, 1979).
- [8] 노봉규, 김진승, 유니타리 존즈행렬의 기하학적 해석과 벡터표현, *한국광학회지* **5**, 25(1994).
- [9] H. Goldstein, *Classical Mechanics*, second ed. (Addison-Wesley, New York, 1980).
- [10] S. L. Altman, *Rotations, Quaternions, and Double Groups* (Oxford University Press, London, 1986).
- [11] 노봉규, 김규석, 김진승, 액정표시소자에서 명암대비와 화면밝기차를 극대화 하는 기본조건: I. 단색광의 경우, *한국광학회지* **5**, 404(1994).
- [12] P. M. Alt and P. Pleshko, "Scanning limitations of liquid-crystal displays", *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-21**, 146(1974).

**Optimal Design of Liquid Crystal Display Devices Using
Electro-optic Characteristics of Liquid Crystal Cell:
I. Monochromatic Case**

Bong Gyu Rho, Gyu Seog Kim and Jin Seung Kim
Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

(Received: August 5, 1994)

The electro-optic polarization transmission characteristics of a liquid crystal (LC) cell is represented by a rotational transformation on the Poincare sphere, and its characteristic parameters, the angle and the axis of the rotation, are experimentally determined with respect to the voltage applied to the LC cell. From the experimental data obtained, we determine driving voltage for the LC cell to give the rotation angle near 180° of the rotation for the change of the state of the LC cell from non-select to select state, which is a necessary condition for the realization of maximally bright images. The directions of the transmission axes of the polarizer and the analyzer which form a liquid crystal display panel together with the LC cell, are determined from the general characteristics of the rotational transformation of the LC cell.