

액정표시소자에서 화면의 명암대비와 밝기를 극대화하는 기본조건:

I. 단색광의 경우*

노봉규 · 김규석 · 김진승

전북대학교 물리학과

(1994년 8월 5일 받음)

빛이 액정셀을 지날 때의 편광상태의 변화를 편앙카레공에서의 회전변환으로 나타내면, 액정표시소자의 화면의 밝기와 명암대비는 이 회전변환의 특성(회전각과 회전축의 방향)의 함수로 나타낼 수 있다. 이로부터 액정 화면의 밝기와 명암대비를 동시에 극대화 하기위한 필요조건은 액정셀에 걸린 전압이 비 선택전압에서 선택전압으로 바뀔 때의 회전변환의 회전각이 180°임을 보였다.

I. 서 론

액정표시소자는 액정의 전기광학 특성을 이용하여 화상을 표시하는 장치로서 얇고 가벼우며 소비전력이 작으므로 거의 모든 휴대용 컴퓨터의 화면소자로 쓰이고 있고, 앞으로는 현재 널리 쓰이는 음극선관을 대체하여 화면소자의 주류를 이룰 것으로 기대된다. 액정표시소자의 기본적인 구조는 그림 1에 보인 것처럼 광원과 편광판 액정셀 검광판으로 이루어진다.^[1,4] 액정셀은 두 장의 유리판을 준비하여 안쪽에 투명전극을 붙여 바둑판 모양으로 화소(畵素)가 형성되도록 하고, 두 유리판 사이에 고르게 배향된 액정층을 얇게(두께 약 5~10 μm) 채운 것이다. 액정분자들은 흔히 막대모양으로서 바깥에서 걸어준 전기장의 방향에 따라서 분자에 유도되는 쌍극자의 크기와 방향이 달라지는 비등방성을 지닌다. 투명전극을 통해 각 화소에 전압을 걸어주면 액정층에 형성되는 전기장에 의해 액정분자에 전기쌍극자가 유도된다. 이 쌍극자가 전기장으로부터 회전력을 받아 액정분자들의 배향이 달라지고 이에 따라 액정셀의 편광투과특성이 달라진다. 따라서 액정셀에 걸어진 전압에 따라 액정셀을 지나오는 빛의 편광상태가 달라지고, 이 빛이 검광판을 지나면서 밝기의 변화로 바뀐다. 그러므로 화면을 구성하는 각 화소에 걸어주는 전압을 달리함으

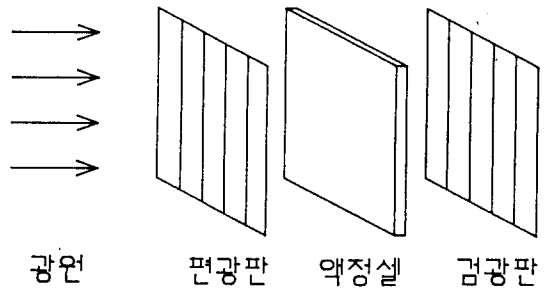


그림 1. 액정표시소자의 기본구조.

로써 화면에 원하는 모양을 그려낼 수 있다.

액정표시소자에 나타나는 화상의 질을 결정하는 기본적인 양은 화상의 밝기(brightness) 그리고 밝고 어두운 부분이 얼마나 선명하게 구분되는가를 나타내는 명암대비(contrast)이다.^[2,4] 이 밖에도 액정층의 광학적 비등방성이 빛의 진행방향에 따라서 달라지므로 화면을 보는 방향에 따라서 밝기와 명암대비가 다르게 나타나는 시야각(viewing angle) 특성과, 굴절률이 빛의 파장에 따라서 다르므로 화상의 밝기와 명암대비가 색깔에 따라 다르게 나타나는 색분산(color dispersion) 특성이 있다.^[2,4] 액정표시소자를 설계하고 만들 때 마주치는 기본적인 문제는 가능하면 넓은 시야각 범위에서 가시광의 모든 파장에 대해 밝기와 명암대비가 최대가 되도록 각 부분들의 규격-특히 편광판과 검광판의 투과축의 방향과 액정셀에서의 액정의 광학적 비등방성과 액정층의 두께를

* 이 논문은 1994년도 교육부 기초과학육성연구비 (BSRI-94-2432)의 지원에 의한 것임.

결정하는 것이다. 꼬임각이 90° 이하인 TN에서 액정셀에 채워넣는 액정의 광학적 특성과 두께를 결정하는데는 Gootch와 Tarry가 끌어낸 액정셀의 투과도에 관한 다음과 같은 공식을 써왔다.^[5]

$$T = \frac{\sin^2[\theta\sqrt{1+u^2}]}{1+u^2}$$

$$u = \frac{\pi d \Delta n}{\theta \lambda} \quad (1)$$

식 (1)은 편광판과 검광판의 투과축이 각각 부착된 유리판에 접한 액정분자의 배향방향과 나란할 때 적용되는 식으로, 여기에서 Δn 은 액정의 복굴절도, d 는 액정층의 두께, 그리고 θ 는 꼬임각이다. 흔히 이 식을 써서 투과도가 0이 되는 u 를 결정하고, 이 값을 바탕으로 액정의 복굴절도 Δn 의 크기에 따라서 액정층의 두께 d 를 결정하였다. 그러나 식 (1)은 극히 제한적인 조건을 만족시키는 액정표시소자에 대해 얻은 것이므로 이 값이 참으로 가장 좋은 특성을 지닌 액정셀을 결정하는 조건인가는 확실하지 않다.^[6] 꼬임각이 180° 이상인 STN 액정표시소자에 대해서는 Ong 이 기하광학적 근사법을 써서 파동방정식의 근사해를 얻고 이를 써서 다음과 같은 액정표시소자의 투과도에 관한 식을 얻었다.^[7]

$$T = \cos^2(\theta - \phi_{\text{exit}} + \phi_{\text{ent}}) + \sin^2(\theta\sqrt{1+u^2})\sin 2(\theta - \phi_{\text{ent}}) \times$$

$$\sin 2\phi_{\text{ent}} + \frac{1}{2\sqrt{1+u^2}}\sin 2\theta\sqrt{1+u^2}\sin 2(\theta - \phi_{\text{ent}} + \phi_{\text{exit}})$$

$$- \frac{1}{1+u^2}\sin^2(\theta\sqrt{1+u^2})\cos 2(\theta - \phi_{\text{ent}})\cos 2\phi_{\text{exit}} \quad (2)$$

여기에서 ϕ_{ent} 와 ϕ_{exit} 는 편광판과 검광판의 투과축의 방향으로 빛이 들어오는 쪽 유리기판에서의 액정분자의 장축방향을 기준으로 반시계방향으로 잰 것이다. 식 (1)과 식 (2)는 모두 액정층에 전압을 걸지 않은 상태에서의 액정표시소자의 투과도를 나타내는 것이므로 화면표시소자에서 실제로 액정셀이 쓰이는 상황과 정확하게는 맞지 않는다. 실제의 액정표시소자를 구동할 때는 각 화소에 비선택전압(nonselect voltage)과 선택전압(select voltage)이 교대로 걸리고, 이에 따라서 액정층 속에서의 액정분자들의 배향분포가 달라지므로 광투과도가 식 (1) 또는 식 (2)와는 크게 다를 수 있다. 또한 편광판과 액정셀 사이에 광학적 비등방성을 지닌 투명한 막을 끼워 넣어 액정셀에 들어가는 빛이 선편광이 아니라 타원편광이 되도록 할 수도 있는데, 이 경우에는 식 (2)보다 훨씬 더 복잡한 식이 되어 그 내용을 쉽게 파악할 수 없다.

이 논문에서는 뽀양카레공을 써서 액정셀의 편광투과 특성을 기하학적으로 해석하고, 이를 써서 단색광에 대한 액정셀의 전기광학적 편광투과특성이 어떠한 조건을 충족시켜야 액정표시소자에 나타나는 화상의 밝기와 명암대비가 가장 좋아질 수 있는가를 밝히겠다. 그리고 주어진 액정셀에 편광판과 검광판 그리고 위상판을 붙여 액정표시소자를 만들 때 편광판과 검광판의 투과축의 방향 그리고 위상판의 규격과 방향을 액정셀의 특성에 어떻게 맞추어야 화상의 명암대비 또는 밝기가 극대화될 수 있는가를 살펴보겠다.

II. 이 론

빛이 액정셀을 지나오면서 편광상태가 어떻게 달라지는가를 이론적으로 살펴보려면 액정층을 지나오는 빛에 관한 파동방정식을 풀어 그 해의 특성을 살펴보아야 한다. 액정은 광학적 비등방성 매질이고, 액정분자가 꼬인 액정셀에서는 각 층마다 액정분자의 배향이 다르다. 그러므로 실제로는 비등방성 비균일 매질 속에서의 파동방정식을 풀어야 하는데 액정셀에 임의의 전압이 걸린 일반적인 상황에서 파동방정식의 엄밀한 해석적 해를 얻는 것은 불가능하다. 따라서 지금까지는 수치해석법을 쓰거나 특수한 조건에서 적절한 근사를 하여 파동방정식의 해를 구하고 그 해의 특성을 살펴보았다. 수치해석법을 쓰는 경우에는 가장 일반적인 상황에 대해서도 해를 얻을 수는 있으나 액정의 굴절률이라든지 탄성상수, 액정층의 두께, 액정분자의 기울기각과 꼬임각등 액정셀의 기본적인 조건을 결정하는 매개변수가 많아서 이들의 변화에 따르는 편광투과특성의 변화에 관한 전반적인 이해를 얻기가 어렵다.

파동방정식의 해를 얻어 액정셀의 편광투과특성을 분석하는 해석적 접근법에서는 액정셀에 전압을 걸지 않은 상태에서의 파동방정식을 세우고, 적절한 근사를 하여 방정식을 비교적 단순한 꼴로 바꾼 다음, 이 방정식의 해를 얻어 액정셀의 편광투과특성을 나타내는 공식을 얻는다. 이 공식을 써서 액정셀의 여러 물리적 특성의 변화에 따른 광학적 특성의 변화를 전체적으로 살펴볼 수 있다. 이 방법이 묵시적으로 가정하는 바는 비선택전압이 걸린 액정셀 속의 액정분자의 배향분포는 전압이 전혀 걸리지 않은 상태와 거의 같고, 선택전압이 걸린 상태에서는 액정분자가 대부분 액정셀에 대해 수직방향으로 배향되어 액정셀의 편광투과특성이 등방성 매질과 거의 같다는 것이다. 실제로는 액정층에 전압을 걸어주면 이른바 Fredericksz 상전이가 일어나는 문턱전압에 이

를 때 까지는 액정분자의 배향이 크게 변하지 않지만 이 문턱전압에서는 액정분자들의 배향분포가 갑작스럽게 바뀌며, 그 뒤로는 전압을 높임에 따라 배향분포가 연속적으로 달라지는데 전압이 높아질수록 변화가 줄어드는 포화효과가 나타난다. 전압을 아주 높이면 유리기판에 아주 가까이 있는 분자들을 제외한 대부분의 액정분자들이 액정셀에 수직하게 배향되므로 액정셀에 수직하게 들어오는 빛은 편광상태가 거의 바뀌지 않은 채 액정셀을 지나온다. 근사법을 써서 얻은 결과가 실제의 액정셀의 특성을 잘 설명할 수 있으려면 비선택전압이 Fredericksz 천이전압보다 훨씬 낮고, 선택전압이 포화전압보다 훨씬 높아야 한다. 그러나 실제의 액정표시소자에서는 구동방법의 한계라든지 구동회로의 특성 때문에 비선택전압과 선택전압의 크기를 자유로이 정할 수 없다.^[8] 따라서 근사법을 써서 구한 해석적 해를 바탕으로 끌어낸 편광투과특성에 관한 공식은 다만 전체적인 경향을 파악하는데 도움이 될 뿐이고 정량적인 분석에는 쓰기 어렵다. 더구나 빛이 액정셀에 비스듬하게 들어오는 경우에는 파동방정식의 해석적인 해를 구하기 어려우므로 이러한 근사법마저 쓸 수 없다.

액정표시소자의 특성을 이해하려는 지금까지의 이론적 접근법에서는 액정표시소자를 구성하는 편광판과 액정셀 그리고 위상판의 세 요소들을 한데 묶어 분석해 왔다. 그러나 자세히 살펴보면 이 세 요소들은 각각 기능이 다르다. 액정셀의 앞과 뒤에 각각 한장씩의 편광판이 붙어 있지만, 빛이 들어오는 방향인 액정셀의 앞쪽에 있는 편광판은 액정셀에 들어가는 빛의 편광상태를 조절하는 것이고, 뒤쪽에 있는 검광판은 빛이 액정층을 지나오면서 편광상태가 바뀐 것을 밝기변화로 바꾸기 위한 것이다. 또한, 액정셀의 앞쪽이나 뒤쪽에 붙이는 보상판의 구실도 편광판과 액정셀 사이에 끼운 것은 액정셀에 들어가는 빛의 편광상태를 조절하는 것이고, 액정셀과 검광판 사이에 끼운 것은 액정셀을 지나 타원편광이 된 빛을 보상판을 지나면서 선편광이 되도록 함으로써 화소에 비선택전압과 선택전압이 걸렸을 때 검광판을 빠져 나오는 빛의 양이 가장 큰 차이가 나도록 하려는 것이다. 이들 가운데 가장 중심이 되는 소자는 액정셀로서 다른 소자들의 규격은 액정셀의 특성에 맞추어야 한다. 따라서 액정표시소자의 설계와 최적화의 문제는 본질적으로 액정셀의 여러 특성 가운데 화상의 질을 결정하는 것이 무엇인가를 밝히는 것과, 일단 마련된 액정셀에 가장 잘 맞도록 비선택전압과 선택전압의 크기를 결정하고, 이에 맞추어 편광판과 검광판 그리고 필요한 경우에는 위상판까지의 규격을 정해주는 두가지

의 문제로 나눌 수 있다.

액정표시소자에서 그려지는 화상의 가장 기본적인 특성은 밝기와 선명함인데, 이 두 양은 비선택전압이 걸린 화소(앞으로는 비선택화소라고 부른다)와 선택전압이 걸린 화소(앞으로는 선택화소라고 부른다)를 지나오는 빛의 밝기에 의해서 결정된다. 이상적인 액정표시소자라면 밝기와 선명함이 최대가 되고, 이러한 특성이 화면을 보는 방향과 빛의 파장에 따라 크게 달라지지 않아야 한다. 우리는 먼저 이러한 특성을 정량적으로 정의하고 이것이 최대가 될 수 있는 조건을 끌어낸다. 다음에는 명암차와 명암대비율이 가장 큰 액정표시소자를 만들려면 어떠한 전기광학적 편광투과특성을 지닌 액정셀이 필요한가를 살펴보고, 이러한 액정셀이 준비되는 경우에 이상적인 액정표시소자를 실현하는 방법을 생각한다. 또 액정셀의 전기광학적 편광투과특성이 그러한 이상적인 조건을 만족시키지 못하는 경우에, 그 액정셀을 써서 이상적인 조건에 가장 가까운 액정표시소자를 만들려면 화면소자를 어떻게 구성해야 하는가를 알아본다.

이 문제를 살펴보기 위해 우리는 빛의 편광상태를 그에 대응되는 쾨양카레공의 표면에서의 점에 해당하는, 길이가 1인 단위벡터(앞으로 쾨양카레벡터라고 부른다)로 나타내고, 빛의 편광상태를 변화시키는 광학소자들의 특성을 이 쾨양카레벡터에 대한 좌표변환으로 나타내겠다.^[9] 편광판과 검광판은 어떠한 편광상태의 빛이 들어오든 편광방향이 투과축에 나란한 선편광만을 내보낸다. 그러므로 편광판의 특성은 들어오는 빛에 대응되는 쾨양카레벡터를 편광판의 투과축과 나란한 선편광에 대응되는, 적도평면 위의 쾨양카레벡터로 투사시키는 투사변환에 해당한다. 다만 편광판을 빠져 나오는 빛의 밝기 I 는 편광판에 들어오는 빛과 빠져 나가는 빛 각각의 편광상태를 나타내는 쾨양카레 공의 표면에서의 두 점 사이의 거리가 얼마나 가까운가에 비례하여 커진다. 편광판에 들어오는 빛과 편광판을 지난 두 빛의 쾨양카레벡터를 각각 p 와 r 이라 할 때 편광판을 빠져 나오는 빛의 밝기는 다음과 같은 공식으로 결정된다.^[10]

$$I = (1 + r \cdot p) / 2 \quad (3)$$

여기에서 편광판에 들어오는 빛의 밝기는 1로 두었다. 편광판을 빠져 나오는 빛이 가장 어두운 때와 가장 밝은 때는 각각 편광판에 들어오는 빛의 쾨양카레벡터가 적도평면 위의 쾨양카레벡터 p 와 반대방향일 때와 나란할 때이다.

검광판의 투과축에 나란한 선편광의 쾨양카레벡터를 p_0 라 하고, 비선택전압과 선택전압이 걸린 액정셀을 지

나와 검광관으로 들어오는 빛의 뽀앙카레벡터를 각각 r_{ns} , r_{sl} 이라 하자. 액정셀에 비선택전압과 선택전압을 걸었을 때 검광관을 지나오는 빛의 밝기 I_{ns} 와 I_{sl} 는 식 (3)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$I_{ns} = (1 + r_{ns} \cdot p_a) / 2 \quad (4.1)$$

$$I_{sl} = (1 + r_{sl} \cdot p_a) / 2 \quad (4.2)$$

앞으로는 편의상 선택화소가 비선택화소 보다 더 밝다고 하고, 이 두 화소의 밝기의 차이 [앞으로는 밝기 (brightness)라고 부르겠다] ΔI 를 다음과 같이 정의한다:

$$\begin{aligned} \Delta I &\equiv I_{sl} - I_{ns} \\ &= (r_{sl} - r_{ns}) \cdot p_a / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

화상이 선명한 정도를 나타내는 명암대비(contrast) C 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} C &\equiv \frac{I_{sl} - I_{ns}}{I_{sl} + I_{ns}} \\ &= \frac{(r_{sl} - r_{ns}) \cdot p_a}{2 + (r_{sl} + r_{ns}) \cdot p_a} \end{aligned} \quad (6)$$

밝기가 크면 액정표시소자에 나타나는 화상이 밝고, 명암대비가 크면 선명하다. r_{ns} , r_{sl} 그리고 p_a 는 모두 길이가 1인 단위벡터들이므로 밝기와 명암대비를 나타내는 매개변수 ΔI 와 C 의 값의 범위는 다음과 같은 부등식에 의해 제한된다:

$$0 \leq \Delta I, C \leq 1 \quad (7)$$

특히 식 (6)에서 $I_{ns}=0$ 이 되도록 하면 밝기 ΔI 와는 무관하게 명암대비 C 는 최대값 1이 된다. 이 조건은 액정셀에 비선택전압이 걸렸을 때 검광관으로 들어오는 빛이 선풠광일 때 검광관의 투과축을 선풠광 방향과 직교하도록 두어 실현할 수 있으므로[식 (4.1)], 단색광에 대해서는 명암대비의 값을 최대로 만드는 일은 비교적 쉽다. 보다 자세히 살펴볼 일은 밝기를 극대화하는 일이다. 식 (7)의 부등식에서 ΔI 와 C 모두가 최대값 1이 되는 유일한 조건은 두 뽀앙카레벡터 r_{ns} 와 r_{sl} 이 서로 반대방향을 향하면서 적다면 위에 놓이고, p_a 는 두 벡터의 어느 하나와 나란한 것이다. 그러므로 화상이 가장 밝고 명암대비도 가장 큰 이상적인 액정표시소자를 만들려면 비선택화소와 선택화소 각각의 액정층을 지나 검광관으로 들어오는 빛의 편광상태들이 서로 직교하는 선풠광 상태가 되도록 하고, 검광관의 투과축을 두 선풠광 가운데 어느 하나와 나란하게 두면 된다. 이제 보다 구체

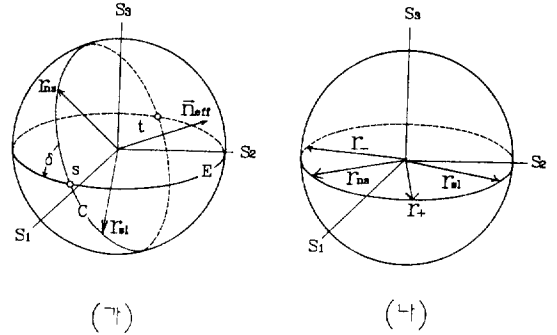


그림 2. 빛이 액정셀을 지난 뒤의 뽀앙카레벡터의 회전 변환.

적으로 액정셀의 편광투과특성이 전압에 따라서 어떻게 달라져야 이러한 조건이 성립할 수 있는가, 그리고 이러한 조건이 성립하지 않는 경우에는 어떻게 하면 ΔI 와 C 값을 가장 크게 만들 수 있는가 살펴보자.

투명한 비등방성 광학매질의 편광투과특성을 나타내는 존즈행렬은 유니타리이며, 이것은 빛의 편광상태를 뽀앙카레공에서의 단위벡터로 나타낼 때 회전변환에 대응된다. 회전변환은 회전축 방향의 단위벡터 n 과 회전각 Ω 가 주어지면 유일하게 결정되는데, 이 두가지는 유니타리 존즈행렬의 행렬요소로부터 결정할 수 있다.^[9] 비선택전압과 선택전압이 걸린 액정셀의 편광투과특성에 해당하는 뽀앙카레 공에서의 회전변환을 각각 $R_{ns} = R(n_{ns}, \Omega_{ns})$ 와 $R_{sl} = R(n_{sl}, \Omega_{sl})$ 로 나타내자. 여기에서 n_{ns} 와 n_{sl} 은 각 회전변환의 회전축 방향의 단위벡터를, Ω_{ns} 와 Ω_{sl} 은 회전각을 나타낸다. 액정셀에 들어오는 빛의 편광상태에 대응되는 뽀앙카레벡터를 r_i 라 하고, 비선택전압과 선택전압이 걸린 상태에서 액정셀을 지나온 빛의 편광상태에 대응되는 뽀앙카레벡터를 각각 r_{ns} 와 r_{sl} 이라고 하면 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하며, 그림 2의 (가)와 같이 나타낼 수 있다.^[9]

$$r_{ns} = n_{ns}(n_{ns} \cdot r_i)(1 - \cos \Omega_{ns}) + r_i \cos \Omega_{ns} + \sin \Omega_{ns}(n_{ns} \times r_i) \quad (8.1)$$

$$r_{sl} = n_{sl}(n_{sl} \cdot r_i)(1 - \cos \Omega_{sl}) + r_i \cos \Omega_{sl} + \sin \Omega_{sl}(n_{sl} \times r_i) \quad (8.2)$$

액정셀에 비선택전압을 걸었다가 선택전압을 걸어줄 때의 편광투과특성의 변화는 그림 2의 (나)와 같이 회전변환 R_{ns} 의 역변환 R_{ns}^{-1} 에 회전변환 R_{sl} 을 차례로 곱한 $R_{sl} \cdot R_{ns}^{-1}$ 에 해당한다. 회전축이 원점을 지나는 두 회전변환을 차례로 한 결과는 하나의 회전변환과 같으므로

$R_{sl} \cdot R_{ns}$ 도 뽀앙카레공에서의 회전변환이다. 앞으로는 이것을 유효회전변환이라고 부르고 $R_{eff} = R(\mathbf{n}_{eff}, \Omega_{eff})$ 로 나타내며, \mathbf{n}_{eff} 는 유효회전축, Ω_{eff} 는 유효회전각이라고 부르자. 유효회전축 \mathbf{n}_{eff} 와, 유효회전각 Ω_{eff} 는 회전변환 R_{ns} 와 R_{sl} 각각의 회전축과 회전각으로부터 다음과 같이 결정된다.^[9]

$$\cos\left(\frac{\Omega_{eff}}{2}\right) = \cos\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega_{sl}}{2}\right) + (\mathbf{n}_{ns} \cdot \mathbf{n}_{sl}) \times \sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{sl}}{2}\right) \quad (9.1)$$

$$\sin\left(\frac{\Omega_{eff}}{2}\right) \mathbf{n}_{eff} = \cos\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{sl}}{2}\right) \mathbf{n}_{sl} - \sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega_{sl}}{2}\right) \mathbf{n}_{ns} + \sin\left(\frac{\Omega_{ns}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_{sl}}{2}\right) (\mathbf{n}_{ns} \times \mathbf{n}_{sl}) \quad (9.2)$$

식 (5)와 식 (6)에서 값을 결정하는 인자는 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 의 합 $\mathbf{r}_+ = \mathbf{r}_{ns} + \mathbf{r}_{sl}$ 과 차 $\mathbf{r}_- = \mathbf{r}_{ns} - \mathbf{r}_{sl}$ 이다. 이 두 벡터는 서로 직교하며 그 길이의 제곱은 각각 $\mathbf{r}_+ \cdot \mathbf{r}_+ = 2(1 + \mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl})$ 와 $\mathbf{r}_- \cdot \mathbf{r}_- = 2(1 - \mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl})$ 로서 서로 상보적인데, \mathbf{r}_+ 는 짧고 \mathbf{r}_- 는 긴 것이 바람직하다. \mathbf{r}_- 의 길이는 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 의 스칼라곱 $\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl}$ 에 의해서 결정되는데, \mathbf{r}_{sl} 은 \mathbf{r}_{ns} 을 유효회전변환 R_{eff} 에 대해 회전변환한 것이므로 스칼라곱 $\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl}$ 은 식 (8)과 식 (9)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl} = (1 - \cos\Omega_{eff}) |\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{n}_{eff}|^2 + \cos\Omega_{eff} \quad (10)$$

이 식으로부터 다음 부등식을 얻는다.

$$\cos\Omega_{eff} \leq \mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl} \leq 1 \quad (11)$$

벡터 \mathbf{r}_- 가 가장 길게 되는 조건은 식의 왼쪽 부등식에서 등식 $\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{r}_{sl} = \cos\Omega_{eff}$ 이 성립하는 $|\mathbf{r}_{ns} \cdot \mathbf{n}_{eff}| = 0$ 으로서 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 이 유효회전축 \mathbf{n}_{eff} 와 수직인 것이다. 그러므로 뽀앙카레 공위에서 유효회전축 \mathbf{n}_{eff} 에 대해 수직인 대원 위에 \mathbf{r}_{ns} 가 오도록 하면 \mathbf{r}_{ns} 가 유효회전변환 R_{eff} 에 의해 대원을 따라 이동하여 \mathbf{r}_{sl} 이 된다. 이 때의 벡터 \mathbf{r}_- 의 길이는 이러한 회전변환에서는 실현 가능한 최대값인 $2 \sin(\Omega_{eff}/2)$ 이고, 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 의 꼭지점 사이의 거리를 뽀앙카레공의 표면의 측지선(geodesic line)을 따라서 잰 값은 유효회전각 Ω_{eff} 가 된다. 그러므로 밝기를 최대도 하려면 먼저 \mathbf{r}_{ns} 가 유효회전축 \mathbf{n}_{eff} 에 대해 수직인 대원 위로 오도록 하여 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 가 그 대원 위에서 가장 멀리 떨어지게 한다. 그 다음에는 적절한 회전변환을 하여 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 을 적도원

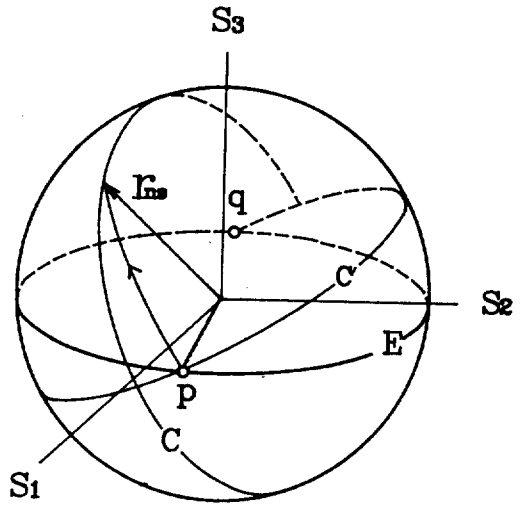


그림 3. \mathbf{r}_{ns} 와 \mathbf{r}_{sl} 가 가장 멀리 떨어지도록하는 편광판의 투과축 방향.

위로 옮긴다. 일단 적도원 위로 두 뽀앙카레벡터들이 옮겨지면 검광판의 투과축의 방향을 적절하게 조절하여 밝기나 명암대비의 어느 하나를 최대도 하거나 적당한 값이 되도록 할 수 있다.

이제 유효회전축 \mathbf{n}_{eff} 에 수직인 대원을 C라 하고 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_{ns} 를 대원 C위로 올리는 방법을 생각하자. 가장 쉬운 방법은 다음과 같다. 먼저 대원 C를 역변환 R_{ns}^{-1} 시켜 얻는 곡선을 C'이라 하자. 대원은 회전변환에 의해 다른 대원으로 바뀌고, 서로 다른 두 대원은 반드시 공의 중심을 대칭점으로 하는 두 점에서 만난다. 그림 3에 보인 것과 같이 대원 C'이 적도원 E와 만나는 두 점을 p와 q라 하고, 이 두점을 꼭지점으로 하는 뽀앙카레벡터를 각각 \mathbf{r}_p 와 \mathbf{r}_q 라 하자. 두 뽀앙카레벡터 \mathbf{r}_p 와 \mathbf{r}_q 는 적도원 E 위에서 서로 반대쪽에 있으므로 이들은 서로 직교하는 선편광이며, 대원 C' 위에 있으므로 비선택전압이 걸린 액정셀을 지나면 R_{ns} 회전변환되어 대원 C 위에 오게 된다. 그러므로 액정셀 앞에 편광판을 두면 그 투과축의 방향을 p(또는 q)에 나란하게 두면 편광판을 지나와 액정셀에 들어오는 빛의 편광상태에 대응되는 뽀앙카레벡터는 \mathbf{r}_p (또는 \mathbf{r}_q)가 된다. 이 빛이 비선택전압이 걸린 액정셀을 지나오면 뽀앙카레벡터가 R_{ns} 회전변환되어 대원 C위로 오게 된다. 그러므로 이 경우에는 $\mathbf{r}_{ns} = R_{ns} \cdot \mathbf{r}_p$ (또는 $\mathbf{r}'_{ns} = R_{ns} \cdot \mathbf{r}_q$)이다. 이제 액정셀에 선택전압을 걸어주면 액정셀의 편광투과특성의 변화는 유효회전변환 R_{eff} 로 나타나므로 액정셀을 지나온 빛의 편광상태에

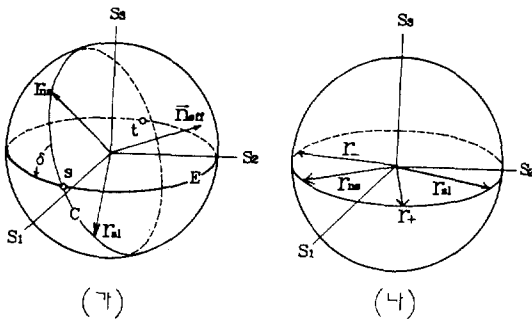


그림 4. 적도원 위에 있는 두 뾰양카레벡터 r_{ms} 와 r_{sl} .

대응되는 뾰양카레벡터 r_{sl} 는 r_{ms} 가 대원 C를 따라서 각도 Ω_{eff} 만큼 돌아간 것이 된다. 그러므로 $r_{ms} \cdot r_{sl} = \cos \Omega_{eff}$ 이다. 밝기를 최적화하려면 두 뾰양카레벡터 r_{ms} 와 r_{sl} 가 적도원 E위에 있어야 하는데, 일반적으로 대원 C가 적도원 E와 일치하지 않는다. 그러므로 대원 C가 적도원 E와 겹쳐 지도록 하는 적당한 회전변환을 결정해야 하는데, 이러한 회전변환은 수 없이 많다. 이 가운데 직관적으로 가장 쉽게 결정할 수 있는 회전변환은 그림 4의 (가)에서와 같이 대원 C와 적도원 E가 만나는 두 점 s와 t를 회전축으로 하고, 두 대원이 이루는 각 δ 를 회전각으로 하는 것이다. 이러한 회전변환은 선형위상판을 써서 실현할 수 있다. 투명한 선형위상판의 편광투과특성도 뾰양카레공에서는 회전변환으로 나타나는데, 회전축의 방향은 빠른축의 방향이 되고 회전각은 위상지연값(phase retardation value)이 된다. 위상지연값이 대원 C와 적도원 E가 이루는 각과 같은 선형위상판을 마련하여, 빠른축을 두 대원이 만나는 점의 방향에 맞추어 액정셀과 검광판 사이에 끼워 놓으면 액정셀과 선형 위상판을 차례로 지난 빛의 뾰양카레벡터는 액정셀에 비선택전압과 선택전압이 걸린 상태에서 모두 적도원 E 위에 유효회전각 Ω_{eff} 만큼 떨어져 있게 된다.

이제 액정셀에 비선택전압과 선택전압이 걸린 상태에서 편광판과 액정셀 그리고 보상판을 차례로 지나오는 빛의 두 뾰양카레벡터 r_{ms} 와 r_{sl} 가 그림 4의 (나)와 같이 모두 적도원 위에 유효회전각 Ω_{eff} 만큼 떨어져 있다고 할 때 화상의 밝기와 명암대비를 최적화하는 검광판의 투과축을 결정하자.

명암대비를 최적화하는 것은 아주 쉽다. 식 (6)에서 명암대비의 최대값은 1이고, 이값은 I_{ms} 또는 I_{sl} 의 값이 0이면 되는데, 식 (4)에서 이것은 검광판의 투과축의 방향을 나타내는 벡터 p_a 가 뾰양카레벡터 r_{ms} 또는 r_{sl} 와 반대방향이면 된다. 그런데 이 경우에는 밝기가 $2\sin^2(\Omega_{eff}/2)$ 이 되어

실현가능한 최대값 $2\sin(\Omega_{eff}/2)$ 보다는 작다. 이와는 반대로 밝기만을 최적화하려면 검광판의 투과축의 방향을 벡터 $r = r_{ms} - r_{sl}$ 에 나란하게 두면, 밝기는 $2\sin(\Omega_{eff}/2)$ 로 최대값이 되는데, 이 경우에는 명암대비가 $\sin(\Omega_{eff}/2)$ 가 된다. 특히 Ω_{eff} 가 180° 이면 밝기와 명암대비가 함께 최대값 1이 될 수 있으므로 가장 이상적인 액정셀은 비선택전압과 선택전압이 걸렸을 때의 편광투과특성을 바탕으로 식 (9)에 써서 결정한 유효회전각 Ω_{eff} 가 180° 가 되는 것이다.

III. 결 론

단색광에 대해 액정표시소자에 나타나는 화상의 밝기와 명암대비를 극대화시키기 위해 액정셀의 전기광학적 편광투과특성과 편광판 및 검광판의 투과축의 방향 그리고 보상판의 특성 사이의 관계를 밝혀주는 기본조건을 끌어내고, 실현가능한 화상의 밝기와 명암대비의 한계 값을 밝혔다. 주어진 액정셀을 써서 만드는 액정표시소자에서 실현가능한 명암대비의 값은 액정셀의 고유특성에 의해 정해지며, 그것을 실현하는 방법은 액정셀과 검광판 사이에 적절한 규격의 위상판을 한장만 끼워 넣으면 된다. 끼워넣는 위상판의 위상지연값과 광축의 방향은 액정셀의 전기광학적 편광투과특성에 의해 정해지고, 검광판의 투과축의 방향은 액정에 전기장을 걸었을 때와 걸지 않았을 때 액정셀과 위상판을 지나오는 빛의 뾰양카레벡터의 차이에 나란한 방향이다. 그러므로 액정셀의 전기광학적 편광투과특성을 실험적으로 재면 그 액정셀을 써서 만드는 액정표시소자에 나타나는 화상의 밝기나 명암대비를 극대화시킬 수 있다. 앞으로 이것을 확장하여 두가지 내지는 세가지 색깔의 빛에 대해 동시에 밝기와 명암대비를 극대화시킬 수 있는지를 살펴보겠다. 두가지 또는 세가지 색깔의 빛에 대해 밝기와 명암대비의 최적화를 실현할 수 있다면 어떤 조건을 충족시켜야 하는지를 찾아내고, 동시에 실현할 수는 없다면 최적화의 개념을 어떻게 수정해야 하는가를 살펴보겠다.

참 고 문 헌

- [1] I. C. Khoo and S. T. Wu, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*, (World Scientific, Singapore, 1993).
- [2] T. Scheffer and J. Nehring, "Supertwisted Nematic (STN) LCDs," SID SEMINAR LECTURE NOTES (1993).
- [3] B. Bahadur, *Liquid Crystal Applications and Uses*,

Vol.1 (World Scientific, Singapore, 1990).

- [4] 内田龍男, *液晶ディスプレイハンドブック*, (日刊工業新聞社, 東京, 1989).
- [5] C.H. Gootch and H.A. Tarry, "The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles $\leq 90^\circ$," *J. Phys.* **D8**, 1575 (1975).
- [6] C. Soutar, S. E. Monroe and J. Knopp, "Measurement of the complex transmittance of the Epson liquid crystal television," *Opt. Eng.* **33**, 1061(1994).
- [7] H. L. Ong, "Origin and characteristics of the optical properties of general twisted nematic liquid-crystal displays," *J. Appl. Phys.* **64**, 614 (1988).
- [8] E. Kaneko, "*Liquid Crystal TV Displays: Principles and Applications of Liquid Crystal Displays*," (KTK Scientific, Tokyo, 1987).
- [9] 노봉규, 김진승, 유니타리 존즈행렬의 기하학적 해석과 벡터표현, *한국광학회지* **5**, 25(1994).
- [10] P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos, *Matrix Theory of Photoelasticity* (Springer-Verlag, Berlin, 1979).

Fundamental Condition for the Realization of Maximal Contrast and Brightness in Liquid Crystal Display Devices: 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 contrast and the brightness of a liquid crystal display panel are expressed in terms of the characteristic parameters of the rotational transformation on the Poincare sphere of the liquid crystal (LC) cell, which is the geometric representation of the electro-optic polarization transmission characteristics of the cell. From these, we show that the contrast and the brightness of the displayed images can be maximized when the rotation angle becomes 180° for the rotational transformation corresponding to the change of the state of the LC cell from non-select to select state.