

액정표시소자에서 화면의 명암대비와 밝기를 극대화하는 기본조건: II. 다색광의 경우

양병관 · 김진승[†]

전북대학교 부설 광전자정보기술연구소

☎ 561-756 전북 전주시 덕진동 664-14

노봉규

세심광전자기술(주)

☎ 440-050 경기도 수원시 장안구 영화동 166-24

(2003년 4월 11일 받음, 2003년 7월 18일 수정본 받음)

뽀앙카레 공에서 액정셀의 전기광학적 편광투과특성을 분석하고, 이를 바탕으로 여러 파장에 대해 액정표시소자의 밝기와 명암대비를 최적화하는 위상판의 규격을 정하는 기본조건을 찾았다. 이 조건에 따르면 두 파장에 대해서는 분산특성이 적절하게 조절된 위상판 2매, 세 파장의 경우에는 두 파장으로 근사하거나 위상판 3매가 필요하다.

주제어 : liquid crystal display, Poincare sphere.

I. 서 론

액정표시소자는 소비전력이 작고 얇고, 가벼워 음극선관을 대체하여 컴퓨터 모니터, 휴대용 단말기 등의 표시소자로 많이 쓰이고 있다. 특히 휴대전화기의 경우 전력소모가 적고 천연색 표현이 가능한 저가의 STN(super-twisted nematic)^[1] LCD(liquid crystal display)를 많이 쓴다.

액정표시소자는 전기적으로 광투과특성이 바뀌는 액정 패널을 쓰는데, 기본구조는 2장의 유리기판 사이에 액정분자를 채운 액정셀과 액정셀 양면에 편광판이 붙어있다. 필요에 따라 편광판과 액정셀 사이 또는 액정셀과 검광판 사이 혹은 양쪽에 위상판을 두기도 한다.

액정표시소자는 스스로 빛을 내지 않으므로 광원으로 백라이트(backlight)를 붙여, 여기에서 나온 빛을 전기적으로 차단하거나 통과시켜 화면을 표시한다. 천연색은 보통 적색, 녹색 청색의 색필터를 뒤서 표현한다.

천연색 액정표시소자에서는 편광판과 색필터에서 많은 빛을 흡수하므로 비교적 어둡다. 화면을 밝게 하려면 백라이트를 밝게 하는데 그 경우 화면이 전체적으로 밝아져서 선명도가 떨어진다. 또한 소비전력이 커지므로 휴대용 단말기의 경우에는 바람직하지 않다. 그러므로 광효율이 극대화되도록 액정표시소자를 설계해야 한다. 하지만 셀 관련 변수, 편광판의 광축과 위상판이 있는 경우 위상판의 조건 등 조절해야 할 변수가 많아서 최적조건을 찾아내기가 쉽지 않다. 보통은 전산시뮬레이션(computer simulation)을 통해서 광특성을 수치해석하는데 패널 전체의 종합적인 광특성만 나타나므로 개개의 광부품이 패

널의 광특성에 주는 영향을 알기 어렵다. 그 결과 여러 부품과 관련 변수를 바꾸는 시행착오를 통해 조건을 찾게 되는데, 이때 많은 시간과 노력이 든다.

액정셀의 전기광학적 편광투과 특성을 뽀앙카레 공(Poincare sphere)^[2-3]에서의 회전변환으로 바꿔 분석하면 이런 노력을 줄일 수 있다. 표시소자의 광학적 특성을 기하학적으로 나타낼 수 있으므로 광특성을 시각적이고 직관적으로 분석할 수 있고 광부품의 개개의 특성이 전체 패널의 특성에 미치는 영향을 분석하기 쉬워 LCD의 설계에 이롭다. 그 결과 밝기와 명암대비가 동시에 최대가 되는 필요조건은 액정셀의 유효회전각이 180°인 경우임이 밝혀졌다.^[3-5] 일단 조건이 충족되면 이에 따라 편광판과 위상판을 설계한다. 이 논문은 단파장의 설계 조건에 관한 연구에^[4] 이어 다파장의 설계조건에 대해서 설명한다.

II. 단색광에 대한 액정셀의 최적설계조건

여기에서는 앞서 발표한 논문의 주된 내용을 다시 요약 설명한다.^[2-4]

2.1. 회전변환

액정셀과 같이 빛을 흡수하지 않는 매질의 편광투과 특성은 뽀앙카레 공에서 회전변환으로 나타낼 수 있다. 이 때 회전축, 회전각과 액정셀의 존즈행렬(U)의 행렬요소 사이의 관계는 다음과 같다.^[3,6]

$$U = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ -U_{12}^* & U_{11}^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

[†]E-mail: jin@moak.chonbuk.ac.kr

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) &= Re(U_{11}) \\ n_1 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) &= Im(U_{11}) \\ n_2 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) &= Im(U_{12}) \\ n_3 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) &= -Re(U_{12}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 (n_1, n_2, n_3) 는 회전축을 뺀 앙카레 공에 나타냈을 때의 좌표 성분이고, Ω_{rot} 는 회전각이다. U 는 액정셀의 존스행렬(Jones matrix)인데 판별식이 1인 유니타리(unitary)이다. 판별식이 1인 유니타리의 두 고유값은 크기가 1인 복소수로서 복소공액이다. 회전축은 존스행렬의 고유벡터이다. 두 고유값 가운데 위상이 큰 고유값을 갖는 고유벡터를 회전축으로 만들 때 회전각은 고유값 위상의 2배이고 회전방향은 축을 기준으로 반시계 방향이다.

위상판에 대해서도 회전변환이 적용되는데 고유벡터가 선편광이므로 회전축은 뺀 앙카레 공의 적도원 위에 놓고 회전각은 위상차이다. 회전축의 방위각은 위상판의 느린광축과 좌표축의 x축 사이각의 2배이다.

액정셀의 색분산·액정분자의 분산(material dispersion)과 셀의 광학적 구조(cell gap)에 의한 분산(geometrical dispersion)이 복합적으로 작용하여 나타나는 광학적 특성의 변화를 색분산(chromatic dispersion)이라고 하겠음·때문에 회전변환은 파장 의존적이다. 또한 셀의 광특성이 걸어진 전압에 따라 변하므로 전압의 함수이기도 하다. 이 논문에서는 문제를 간단히 하기 위하여 화소의 계조를 STN LCD와 같이 시분할 계조방식¹¹⁾을 사용하는 경우로 가정하여 걸어진 전압을 ON 전압(V_{ON})과 OFF 전압(V_{OFF})의 두 가지로 제한한다.

2.2. 유효회전 변환

유효회전변환(R_{EFF})을 V_{ON} 에서의 회전변환(R_{ON})과 V_{OFF} 에서의 회전변환(R_{OFF})으로 다음과 같이 정의한다.¹³⁻¹⁵⁾

$$R_{EFF}(n_{EFF}, \Omega_{EFF}) = R_{ON}(n_{ON}, \Omega_{ON}) \cdot R_{OFF}^{-1}(n_{OFF}, \Omega_{OFF}) \quad (3)$$

여기서 위첨자 -1은 역변환을 나타내고, n 은 회전축, Ω 는 회전각인데 아래첨자에 의해서 유효회전변환, V_{ON} 과 V_{OFF} 에 대한 값을 각각 EFF, ON, OFF를 붙여 구별하였다(V_{ON} 의 회전변환과 V_{OFF} 의 회전변환의 순서를 바꿔도 전체적인 논리는 변하지 않는다). 유효회전변환은 V_{OFF} 의 역변환 후, V_{ON} 의 회전변환을 한다. 즉, OFF 상태의 셀을 투과한 편광 r_{OFF} 을 ON 상태의 셀을 투과한 편광 r_{ON} 으로 변환하는 회전변환이다. 그래서 유효회전각 Ω_{EFF} 는 두 벡터 r_{OFF} 와 r_{ON} 의 사이각이 대일 때의 값이다. 이 경우는 r_{OFF} 와 r_{ON} 이 n_{EFF} 에 수직인 대원 위에 있을 때이다. 두 벡터 r_{OFF} 와 r_{ON} 이 가장 멀리 떨어져 있을 때 표시소자의 화질이 가장 좋는데 r_{ON} 이 검광판을 투과할 때 r_{OFF} 의 누설광이 가장 적어 밝고 선명한 화면을 얻을 수 있기 때문이다(뺀 앙카레 공에서 원점을 마주보는 두 대적점은 서로 직교하는 편광이다). 이로부터 광효율이 좋

고 선명한 액정표시소자의 기본조건은 액정셀의 유효회전각 Ω_{EFF} 이 180°임을 알 수 있다. 액정셀의 유효회전각은 편광판이나 위상판 등 다른 광부품과 상관없이 셀의 구동전압과 셀 고유의 광특성에 의해서 결정된다. 유효회전각이 180°가 아니면 밝기와 명암대비가 구현 가능한 최대값을 가질 수 없다.

2.3. 편광판, 위상판의 결정

셀 변수를 바꾸거나 V_{ON}/V_{OFF} 를 조절하여 일단 액정셀의 유효회전각 Ω_{EFF} 이 180°이면 밝기와 명암대비가 최대가 되는 편광판, 검광판과 위상판의 조건을 결정할 수 있다. 위상판은 편광판과 액정셀 사이 또는 액정셀과 검광판 사이에 둘 수 있다. 앞에서 말했듯이 액정셀을 지나온 빛의 편광상태(r_{OFF} 와 r_{ON})는 유효회전변환의 대원 C 위의 점이어야 한다. 편광판과 액정셀 사이에 위상판을 두는 경우에는 특히 r_{OFF} 이 대원 C 위의 점이 되도록 위상판의 규격을 정해야 한다. 일단 r_{OFF} 이 대원 C 위에 오면 유효회전변환의 정의에 의해 r_{ON} 는 자연스럽게 대원 C 위에 온다. 액정셀 다음의 위상판은 셀을 지나온 빛의 편광이 선편광이 되도록 규격을 정한다. 이후 검광판의 투과축을 이 조건에 따라 정한다.

다음은 단색광의 경우에 대해서 최적조건을 찾는 보기이다.¹⁴⁾ 유효회전변환의 회전축 n_{EFF} 에 수직인 대원 C를 V_{OFF} 의 회전변환 $R_{OFF}(n_{OFF}, \Omega_{OFF})$ 의 역변환 $R_{OFF}^{-1}(n_{OFF}, \Omega_{OFF})$ 하면 다시 대원이 되는데 이 대원이 그림 1의 C'이다. 이 대원과 적도원 E가 만나는 점 p에 편광판의 투과축을 둔다(편광판의 투과축과 좌표축의 x축 사이의 각을 점 p의 방위각의 절반이 되게 한다). 그럼 V_{OFF} 이 걸렸을 때 점 p는 액정셀에 의해서 회전변환 하여 대원 C 위의 점 p'가 된다. 이 점 p'는 유효회전변환하여 점 p''가 된다. 점 p''는 p'이 액정셀에 V_{ON} 전압이 걸렸을 때 회전변환 $R_{ON}(n_{ON}, \Omega_{ON})$ 한 편광과 같다. 일반적으로 편광 p', p''는 타원편광으로 적도원 E 위의 점이 아니다. 그러므로 위상판을 써서 이를 선편광으로 만든다. 위상판의 위상차는 적도원과 대원 C 사이의 각 δ 이고, 느린 광축은 두 대원의 교점 c방향이다(위상판의 느린광축과 좌표축의 x축 사이의 각을 교점 c의 방위각의 절반이 되게 한다). 그리하면 점 p'와 점 p''는 위상판에 의해 회전변환하여 적도원 위의 선편광이 된다. 이제 V_{ON} 의 선편광 p''과 검광판의 투과축을 나

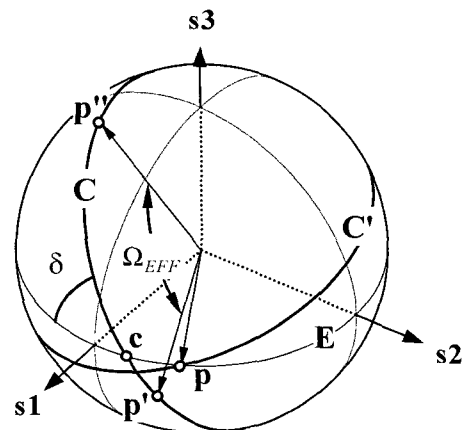


그림 1. 단색광에 대한 밝기와 명암대비를 최적화하는 조건.

란하게 두면 밝기와 명암대비율이 최대가 된다.

III. 다색광에 대한 액정셀의 구속조건

액정셀의 색분산 때문에 빛의 삼원색을 이루는 R(붉은색), G(초록색), B(파란색) 빛에 대한 회전변환 특성이 서로 다르다. 그래서 보통은 시각특성이 좋고 중심 파장인 G를 기준으로 셀을 설계한다. 그렇지만 좀 더 좋은 특성을 실현하려면 R과 B 또는 R, G, B 모두에 대해 최적화시켜야 한다. 여기서는 여러 파장에 대해서 밝기와 명암대비가 동시에 최대값을 갖는 셀의 조건과 위상판, 편광판의 최적설계 조건에 대해서 설명한다. 파장은 백라이트의 분광발광분포 곡선과 색필터의 분광투과도를 곱한 값이 최대가 되는 빨강(G), 초록(G), 파랑(B)의 세 단파장으로 제한한다.

3.1. 두 파장의 빛에 대한 밝기와 명암대비율의 최적화

먼저 R, B의 두 파장만 생각하자. 그림 2에 두 파장의 유효회전변환을 나타냈다. 대원 R_C 를 파장 R에 대한 유효회전변환의 대원이라 하고 대원 R_C 를 V_{OFF} 에서 파장 R의 역변환한 대원을 R_C' 이라 하자. 파장 B에 대해서도 파장 R과 같은 방식으로 나타내자.

먼저 V_{OFF} 에서 액정셀을 지나온 두 파장의 편광이 유효회전변환의 대원 위에 있도록 해야 한다. 이것은 곧 액정셀 바로 앞에서 두 파장 R, B의 편광이 각각 대원 R_C' 와 B_C' 위에 오도록 하는 것과 같다. 이 두 대원 R_C' 과 B_C' 은 두 점에서 만나는데 일반적으로 교점은 적도원 위에 있지 않다. 그래서 편광판만을 써서는 파장 R, B의 두 편광을 각각 대원 R_C' 와 B_C' 위의 편광을 만들 수 없다.

이제 액정셀과 편광판 사이에 투명한 선형 위상판을 둔다. 위상판이 색분산이 없으면 사반파장판을 써서 비교적 쉽게 이 같은 일을 할 수 있다. 교점 c' 의 자오선과 적도원이 만나는 곳에 사반파장판의 느린축을 두고 사반파장판의 느린축을 기준으로 교점 c' 를 시계방향으로 90° 회전한 적도원 위의 점에 편광판의 투과축을 두면 된다. 그러면 편광판에서 나온 빛이 사반파장판에 의해 회전변환(반시계방향)하여 교점 c' 의 편광이 된다. 그러나 위상판의 색분산의 영향으로 위상판을 지난

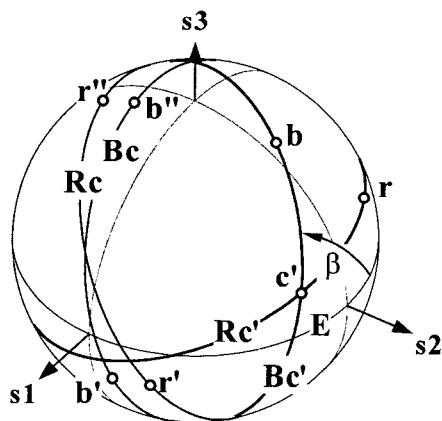


그림 2. 두 파장에 대한 유효회전변환의 대원.

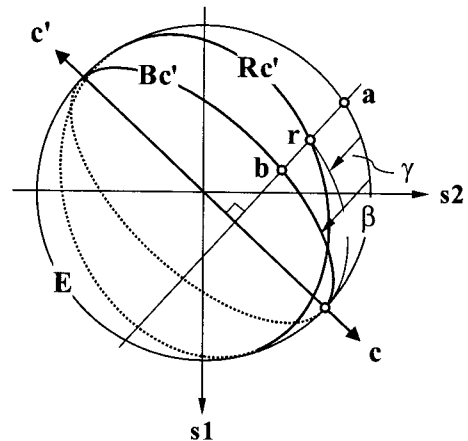


그림 3. 두 파장을 유효회전변환의 대원으로 보내는 위상판의 규격.

두 파장의 편광은 한 점에 모이지 않는다. 그러므로 이런 색분산 특성을 역으로 이용한다.

그림 3은 편광판과 위상판의 규격을 정하는 한 예인데 뽕양 카레 공의 표면을 s_1 - s_2 평면에 수직 투사한 투시도이다. 액정셀 앞에 둘 위상판의 느린 광축을 대원 B_C 과 적도원 E 가 만나는 교점과 일치시켰다. 그러면 위상판의 회전축은 c 가 된다. 파장 B에 대한 위상판의 위상차가 대원 B_C 과 적도원 사이각 β 와 같으면 위상판을 지나온 파장 B의 편광은 편광판의 위치에 상관없이 항상 대원 B_C 위의 점이 된다. 위상판의 위상차가 파장 R에서 γ 라 하자. 그러면 그림 3에서 편광판의 투과축을 a 에 둘 때 파장 R의 빛이 위상판을 지난 후의 편광은 r 이 되어 대원 R_C' 위의 편광이 된다.^[부록] 위상판의 색분산이 파장 R에서 이와 다를 경우 편광판의 위치 a 를 조절하거나 위상판의 느린축의 위치를 바꿔 가장 가깝도록 맞춘다. 일단 이런 조건이 만족되면 액정셀 바로 앞에서 파장 R, B의 편광은 각각 r, b 가 된다. V_{OFF} 에서 셀을 지난 다음의 편광은 유효회전변환의 대원인 R, B 위의 점 r', b' 가 되고 V_{ON} 에서 셀을 지난 다음의 편광은 r'', b'' 가 된다.

두 파장에서 유효회전각이 180° 이면 r'' 과 r' 그리고 b'' 와 b' 는 서로 대척적이다. r'' 와 b'' 를 적도원 위의 한 점으로 위상판을 써서 모으고 검광판의 투과축을 그 점과 일치시키면 V_{ON} 에서 밝고, V_{OFF} 에서 어둡게 되는데 이 때의 조건이 밝기와 명암대비율이 최대가 되는 조건이다.

유효회전각이 180° 가 아니면 얻을 수 있는 밝기나 명암대비율이 동시에 최적화할 수 없다. 명암대비율을 최적화하기 위해서는 V_{OFF} 에서 셀을 지나온 빛의 편광 r', b' 를 적도원 위의 한 점으로 위상판을 써서 모으고 검광판의 흡수축을 이 점과 일치시켜 셀을 지나온 빛을 차단한다. 명암대비율은 편광판의 흡수계수와 액정셀의 유효회전각에 의해서 액정패널에서 얻을 수 있는 최대값이 정해지는데 이 때의 명암대비율이 바로 그 최대값이다. 그리고 이 때의 밝기는 이 조건에서 얻을 수 있는 가장 큰 값이다. 밝기를 최적화하려면 r'' 와 b'' 를 한 점으로 모은 뒤, 이번에는 검광판의 투과축을 이 점과 일치시킨다. 밝기 역시 편광판의 흡수계수와 액정셀의 유효회전각에 의해서

얻을 수 있는 최대값이 정해진다. 이 때의 밝기가 패널에서 얻을 수 있는 최대 밝기이고, 이 때의 명암대비를 역시 밝기를 최적화한 조건에서 얻을 수 있는 최대값이다.

위상판의 색분산 특성을 써서 r'' 와 b'' 또는 r' 과 b' 를 한 점으로 모으는 방법은 위상판의 규격을 정하는 방법^[부록]과 정반대이다.

3.2. 세 파장의 빛에서 밝기와 명암대비율의 최적화

먼저 편광판과 위상판의 규격을 앞에서와 같이 V_{OFF} 에서 셀을 지나온 빛의 편광이 각각의 유효회전변환의 대원 위의 점으로 되도록 정한다. 세 파장 R, G, B의 유효회전변환한 대원은 V_{OFF} 전압의 역변화 $R_{OFF}^{-1}(n_{OFF}, \Omega_{OFF})$ 한 대원을 각각 Rc' , Gc' , Bc' 이라 하자. 그림 4에서의와 같이 대원 Rc' , Gc' , Bc' 를 차례로 가로지를 수 있는 직선 l 과 적도원 E가 만나는 점을 a에 편광판의 투과축을 둔다. 차수가 0인 투명 위상판은 파장이 클수록 위상차가 작다. 따라서 편광판에서 나온 빛이 위상판을 지난 대원 Rc' , Gc' , Bc' 위의 점으로 되기 위해서는 직선 l 이 대원 Rc' , Gc' , Bc' 를 차례로 가로질러야 한다. 위상판의 광축은 직선 l 에 수직인 방향이다.^[부록] 편광판의 위상판을 바꾸면 직선 l 이 평행이동하고, 위상판의 광축 방향을 바꾸면 직선 l 은 원의 중심을 기준으로 회전한다. 이 같은 특징을 잘 이용하면 위상판의 규격이 정해져 있는 경우에도 최적화 조건을 찾을 수 있다.

이제 셀을 지난 다음의 편광을 적도선 위의 한 점으로 모으게 한다. V_{ON} 에서 셀을 지나온 빛을 한 점으로 모으고 검광판의 투과축을 그 점에 두면 밝기가 최대가 되고, V_{OFF} 에서 셀을 지나온 빛을 적도원 위의 한 점으로 모으고 검광판의 흡수축을 그 점에 두면 명암대비율이 최대가 된다. 일반적으로 V_{ON} 또는 V_{OFF} 의 셀을 지나온 R, G, B의 편광은 s1-s2 평면의 투시도 상에서 직선 위에 있지 않다. 이와 같은 경우 위상판 1매를 써서 근사 조건을 찾거나 위상판 2매를 써야 한다. 그림 5(가)는 세 편광 가운데 가까운 두 편광 r, g를 두 편광을 있는 선분의 중점으로 근사하여 이 중점 k와 점 b를 적도원으로 변환시키는 위상판의 규격을 정하는 예이다. 중점 k

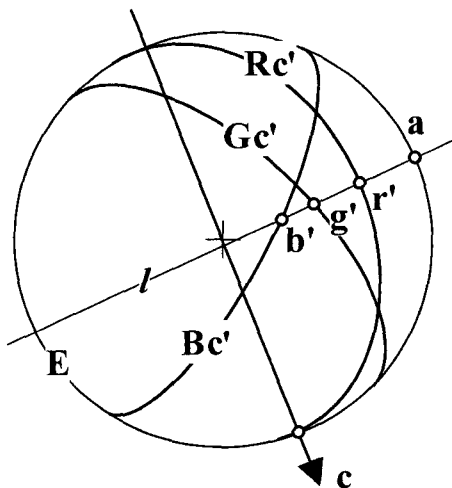
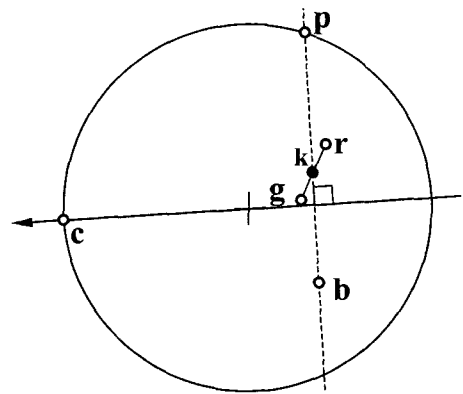
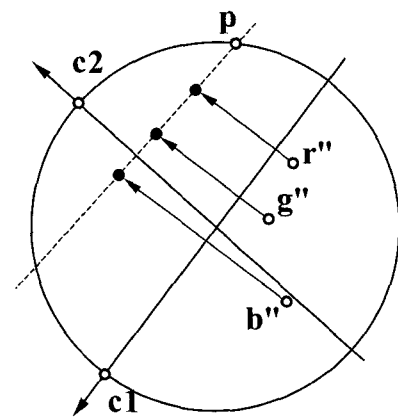


그림 4. 세 파장을 유효회전변환의 대원으로 보내는 위상판의 규격.



(a)



(b)

그림 5. 파장이 다른 세 편광을 한 점으로 모으는 위상판의 규격. (가)는 위상판 1매를 써서 근사한 경우이고 (나)는 위상판 2매를 쓰는 경우이다.

와 점 b를 지나는 직선에 수직인 방향으로 위상판의 광축을 둔다. 위상판의 분산값을 k와 b가 점 p에 오도록 정한다. 또는 그림 5(나)와 같이 위상판 2매를 쓸 수 있다. 액정셀 바로 다음의 위상판의 광축을 $c1$ 에 두고 분산특성을 r'' , g'' , b'' 가 그림과 같이 일직선에 오도록 분산특성을 맞춘다. 이후 다른 위상판을 써서 적도원 위의 한 점 p로 모은다.

IV. 결 론

두 파장 또는 세 파장의 빛에 대해서 밝기와 명암대비를 최적화하는 액정표시소자의 설계조건을 밝혔다. 두 파장의 경우 편광판과 액정셀 사이 그리고 액정셀과 검광판 사이에 각각 위상판을 1장씩 뒤서 밝기와 명암대비를 최적화할 수 있다. 세 파장의 경우 두 파장으로의 근사를 쓰거나 위상판을 3장 써야 한다.

밝기와 명암대비를 최적화하는 액정표시소자의 설계조건은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저 기준 색깔의 빛(보통 초록빛)에 대해 액정셀의 유효회전각이 180° 가 되도록 액정셀을 설계한다. 액정셀을 지나온 빛의 편광이 액정셀의 유효회전변환의 대원 위에 오도록 액정셀 앞의 위상판의 규격과 뒤

광판의 위치를 정한다. 액정셀을 지나온 빛이 적도원 위의 편광이 되도록 액정셀 다음에 오는 위상판의 규격을 정한다. 밝기 또는 명암대비율을 최적화하는 조건에 맞게 검광판의 위치를 정한다.

[부록: 위상판의 규격 결정]

그림 3에서 위상판의 느린 광축 c 를 중심으로 점 a 를 γ 만큼 회전하면 점 r 이 되고 β 만큼 회전하면 점 b 가 된다. 즉, 위상판의 색분산특성은 R파장(λ_R)에서 회전각이 γ , B파장(λ_B)에서 회전각이 β 이다. 굴절률의 분산식으로 Cauchy의 분산방정식^[7]을 쓰면 상굴절률(ordinary index) n_o , 이상굴절률(extraordinary index) n_e , 그리고 굴절률 비등방성 Δn 은 다음과 같다;

$$n_o = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2} + \dots, \tag{부1}$$

$$n_e = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} + \dots, \tag{부2}$$

$$\Delta n = \Delta A + \frac{\Delta B}{\lambda^2} + \dots. \tag{부3}$$

여기서 A_o, B_o, A_e, B_e 그리고 $\Delta A, \Delta B$ 는 각각 상광과 이상광의 Cauchy 계수이고, $\Delta A = A_e - A_o$ 이고, $\Delta B = B_e - B_o$ 이다. 그래서 위상판의 위상차 또는 회전각 ϕ 은 다음과 같다;

$$\phi = 2\pi(\Delta n) \frac{d}{\lambda} = 2\pi \left(\Delta A + \frac{\Delta B}{\lambda^2} + \dots \right) \frac{d}{\lambda} \tag{부4}$$

위상판의 조건(λ_R 에서 회전각이 γ 이고, λ_B 에서 회전각이 β)을 (부4)식에 넣으면 아래와 같이 대수 방정식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ \beta \end{pmatrix} = 2\pi d \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_R} & \frac{1}{\lambda_R^3} & \dots \\ \frac{1}{\lambda_B} & \frac{1}{\lambda_B^3} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \vdots \end{pmatrix} \tag{부5}$$

$\frac{1}{\lambda^3}$ 항까지 근사를 취해 정리하면 다음과 같다;

$$\frac{\lambda_R^3 \lambda_B^3}{\lambda_R^2 - \lambda_B^2} \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_B^3} & -\frac{1}{\lambda_R^3} \\ \frac{1}{\lambda_B} & \frac{1}{\lambda_R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \beta \end{pmatrix} = 2\pi d \begin{pmatrix} \Delta A \\ \Delta B \end{pmatrix} \tag{부6}$$

이 식을 써서 필름의 두께 d 가 주어진 경우 ΔA 와 ΔB 를 정할 수 있고, 이로부터 A_e, A_o, B_e 그리고 B_o 등 관련 변수의 값을 결정할 수 있는데, 여러 조합이 가능하다. 가능한 모든 조합이 (부6)식의 관계를 만족하므로 R파장의 빛의 회전각은 γ , B파장의 빛의 회전각은 β 가 된다. 이런 위상판의 느린 축을 그림 3의 c 에 두고 편광판의 투과축을 a 에 두면 그림 3의 점 a 에서 나오는 R, B 두 파장의 빛은 이 위상판을 지난 후 그림의 r, b 점의 편광이 된다. 위상판의 분산특성이 정상분산(normal dispersion) 영역에서 $\Delta B > 0$ 이므로 (부6)식에 따라 $\beta \lambda_B > \gamma \lambda_R$ 인 관계가 있다. $\beta \geq \gamma$ 이고(즉, r, b 두 점이 대원 Bc' 과 Rc' 의 교점 근처에 있는 경우), $\lambda_B \ll \lambda_R$ 이면 $\Delta B > 0$ 를

만족하기 위해서는 위상판의 색분산이 거의 없어야 하는데 본문에서는 위상판의 색분산이 있는 경우를 가정하였으므로 조건을 만족하기 어렵다. 이 경우에는 그림 3에서 $\beta \lambda_B > \gamma \lambda_R$ 을 만족할 만큼 β 이 γ 보다 충분히 크도록 대원 Bc' 과 Rc' 의 교점에서 멀리 떨어진 직선을 잡아 r, b 를 정한다.

그림 4에서와 같이 r', g', b' 세 파장의 빛에 대해서는 (부5)식은 아래와 같다;

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ \sigma \\ \beta \end{pmatrix} = 2\pi d \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_R} & \frac{1}{\lambda_R^3} & \frac{1}{\lambda_R^5} & \dots \\ \frac{1}{\lambda_G} & \frac{1}{\lambda_G^3} & \frac{1}{\lambda_G^5} & \dots \\ \frac{1}{\lambda_B} & \frac{1}{\lambda_B^3} & \frac{1}{\lambda_B^5} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta C \\ \vdots \end{pmatrix} \tag{부7}$$

여기서 G파장(λ_G)의 회전각을 σ 로 놓았다. 우변의 행렬을 $\frac{1}{\lambda^5}$ 까지 근사하여 3×3 행렬의 역행렬을 좌변과 우변에 곱해 위상판의 규격(Cauchy 계수 및 두께)를 결정한다.

Cauchy 계수를 고차항까지 더 정밀하게 결정할 경우, 예를 들어 (부7)식에서 $\frac{1}{\lambda^9}$ 항까지 일치하는 위상판의 규격을 정할 경우 λ_R 과 λ_G 사이와, λ_G 과 λ_B 사이에 또 다른 파장성분이 있는 경우를 가정하고, 각각의 새로 가정한 두 파장의 회전각을 그 앞뒤의 파장의 회전각을 내삽(interpolation)한 값으로 가정하여 조건식을 추가하면 조건식과 필름의 두께(d)를 제외한 나머지 미지수($\Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D, \Delta E$)의 수가 같아서 해를 얻을 수 있다. 이 해는 RGB 세 파장의 빛에 대해서 회전각의 조건을 Cauchy의 분산방정식의 $\frac{1}{\lambda^8}$ 항까지 만족한다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 지원[KRF-2002-C0003]에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] B. Bahadur, *Liquid Crystal Applications and Uses*, Vol. 1 (World Scientific, Singapore, 1990), Chapter 10.
- [2] J. S. Kim, B. G. Rho, and G. S. Kim, "Optimal Design of LCD on the Basis of ElectroOptic Characteristics of LC Panel," in Proc. Asia Display '95, p.173, 1995.
- [3] 노봉규, 김진승, "유니타리 존즈행렬의 기하학적 해석과 벡터표현," 한국광학회지, 제 5권 1호, pp. 25-30, 1994.
- [4] 노봉규, 김규석, 김진승, "액정표시소자에서 화면의 명암대비와 밝기를 극대화하는 기본조건: I. 단색광의 경우," 한국광학회지, 제 5권 3호, pp. 404-410, 1994.
- [5] 노봉규, 김규석, 김진승, "액정셀의 전기광학적 편광투과특성을 이용한 액정표시소자의 최적설계: I. 단색광의 경우," 한국광학회지, 제 5권 3호, pp. 411-417, 1994.
- [6] 양병관, 김진승, 노봉규, "위상판을 써서 BTN 액정표시소자의 시야각 특성을 개선하는 방법," 한국광학회지, 제 11권 1호, pp. 19-24, 2000.
- [7] Frank L. Pedrotti, S. J., and Leno S. Pedrotti, *Introduction to Optics, 2nd Ed.* (Prentice Hall, New Jersey, USA, 1993), p. 119.

**Fundamental condition for the realization of maximal contrast and brightness
in liquid crystal display device: II. Polychromatic case**

Byeong-Kwan Yang and Jin Seung Kim[†]

Institute of Photonics & Information Technology, Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

[†]*E-mail: jin@moak.chonbuk.ac.kr*

Bong Gyu Rho

Sesim Photonics Technology Co., Ltd. 166-24 Younghwa, Suwon 440-050, KOREA

(Received April 11, 2003, Revised manuscript July 18, 2003)

We analyze the electro-optic polarization transmission characteristics of liquid crystal cells in the Poincare sphere representation. We determine fundamental conditions on maximizing of brightness and contrast ratio of liquid crystal display devices for polychromatic light by use of retardation films. For optimizing two colors, at least two properly designed retardation films are needed, and for three wavelengths, either it can be approximated to the two-color case or three retardation films are needed.

OCIS Codes : 120.2040, 260.5430.