

논문 17-6-10

유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 Fringe-field Switching Mode의 Authentic-color 특성

Authentic-color Characteristic of the Fringe-field Switching Mode using a Liquid Crystal with Negative Dielectric Anisotropy

송제훈¹, 최윤석¹, 문대규², 한정인², 이승희^{1,a}
(Je Hoon Song¹, Yoon Seok Choi¹, Dae Gyu Moon², Jeong In Han², and Seung Hee Lee^{1,a})

Abstract

We have studied color tracking of a fringe-field driven homogeneously aligned nematic liquid crystal (LC) cell with negative dielectric anisotropy and compared it with other devices such as the twisted nematic(TN) and in-plane switching(IPS) modes. According to studies, the TN device shows bluish color at grey scale and even at a low retardation cell it cannot avoid color tracking. The authentic IPS device having cell retardation value of 0.23 μm also shows bluish white color. However, the FFS device shows excellent color tracking characteristics even at high retardation value of the cell while keeping high transmittance and greenish white.

Key Words : Color tracking, Fringe-field switching, Authentic-color, Low retardation cell

1. 서론

최근 모니터, 디지털 카메라 그리고 TV등에 사용되는 액정 디스플레이에 고화질과 양질의 색재현성이 많이 요구되고 있다[1]. 또한 액정 TV에서는 모든 중간 계조에서 색차가 없어야 하고 시야각에 따른 감마 곡선도 변하지 않아야 한다[2].

액정 디스플레이의 화질은 새로운 액정 모드들의 개발에 의해서 상당 수준 개선되었다[3]. 그 중에서도 액정의 방향자가 in-plane 회전하는 개념을 이용한 in-plane switching(IPS) 모드[4]와 fringe-field switching(FFS) 모드[5-8]가 개발되었다. 두 모드들은 액정의 방향자들이 in-plane 회전하기 때문에 twisted nematic(TN) 모드와 비교해서 매우

좋은 휘도 균일성을 보여준다.

양질의 색재현성을 얻기 위해서는 넓은 색 영역과 계조에 따른 색깔림이 적어야 한다. 넓은 색 영역을 얻기 위해서 고급 칼라필터가 개발되었고[9], 액정셀의 위상 지연값($d\Delta n$)을 조절해서 IPS 셀의 계조에 따른 색깔림을 감소시켰다[10]. IPS 셀에 대한 연구결과에 의하면, 액정의 $d\Delta n$ 이 낮은 셀을 이용하면 색깔림을 줄일 수 있다. 하지만 $d\Delta n$ 이 낮은 IPS 셀은 모든 계조에서 푸른색을 띠고 약 15% 정도의 투과율의 감소가 일어난다.

액정디스플레이에서의 색깔림은 인가된 전압의 변화에 따른 색의 변화된 정도라고 정의된다. 예를 들어 액정디스플레이에 중간 계조가 표시될 때에 순수한 중간 계조의 색을 띠지 않고 대신 푸른빛을 띠는 중간 계조색의 색이 느껴지는 경우가 있다. 이러한 색깔림은 과장에 따른 투과율이 최대한 지점인 피크파장이 계조별로 이동되는 정도가 작으면 색깔림이 개선된다[10]. 본 논문에서는 TN 셀, IPS 셀 그리고 유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀의 색깔림에 대해서 연구하였고, 각각의 셀들을 서로 비교하였다.

1. 전북대학교 신소재공학부
(전북 전주시 덕진동 1가 664-14)
2. 전자부품연구원 디스플레이연구센터
a. Corresponding Author : lsh1@moak.chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2004. 1. 14
1차 심사 : 2004. 3. 10
심사완료 : 2004. 3. 30

2. 시뮬레이션 결과

2.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 색깔림에 대한 전기-광학적 특성에 대해서는 전 파장 영역에서 2 X 2 Jones extended matrix 방법을 이용하였다[11]. 정면에서 투과율이 100 %인 지점을 T_{100} , 80 %인 지점을 T_{80} , 50 %인 지점을 T_{50} , 30 %인 지점을 T_{30} , 그리고 1 %인 지점을 T_1 으로 정의했다. 그리고 각각의 셀들의 색특성은 C. I. E. 1976 USC 색좌표를 이용해서 나타내었다. 전파장에 대해서 광원은 D65를 이용했고 TN 셀, IPS 셀 그리고 유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀의 액정셀들의 두께(d)는 4 μm 로 고정시키고 액정의 굴절률 이방성 값(Δn)을 바꾸어서 $d\Delta n$ 에 따른 색깔림 정도를 조사하였다.

2.2 TN 셀의 색깔림 특성

그림 1은 TN 셀의 구조와 동작원리를 나타낸 그림이다. 편광판과 검광판이 90°교차되어 있고 초기에 액정의 방향자가 상·하판에 90°꼬여져 있어서 액정의 유효 $d\Delta n$ 이 $(n \pm 1/2)\lambda$ 가 된다. 여기에서 n 은 정수이고 λ 는 입사광원의 파장이다. 따라서 편광판을 투과한 선편광된 빛이 액정셀을 지나면서 90°회전된 선편광된 빛이 되어 검광판을 투과해서 밝음 상태가 된다. 상, 하판에 수직전기장이 가해지면 액정의 방향자들이 전기장 방향으로 배열되어서 액정의 유효 $d\Delta n$ 이 0이 되어서 편광판을 투과한 선편광된 빛이 액정셀을 지나면서 편광된 상태 그대로 유지되어 검광판에 의해서 차단되기 때문에 어둡게 된다.

TN 셀의 투과율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{TN} = 1 - \frac{\sin^2[\pi(1+u^2)^{1/2}/2]}{(1+u^2)} \quad (1)$$

$$u = 2\Delta nd/\lambda \quad (2)$$

위 식에서 알 수 있듯이 TN 셀의 모든 중간 계조에서의 투과율은 액정의 $d\Delta n$ 에 의존한다. 그림 1에서 보듯이, 전압이 인가되면 액정 방향자들이 전기장 방향으로 배열된다. 이런 방향자들의 변화에 의해 액정의 유효 $d\Delta n$ 값이 감소하고 그래서 투과율이 감소된다. TN 셀은 중간 계조에서의 투과율이 액정의 $d\Delta n$ 에 영향을 받기 때문에 색깔림이 발생하게 된다.

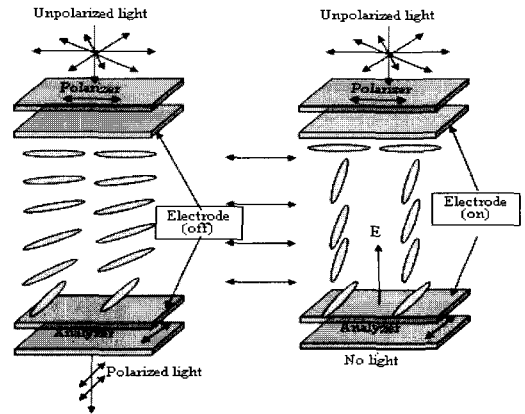


그림 1. TN 셀의 셀 구조와 동작 원리.

Fig. 1. Cell structure and switching principle of a TN cell.

그림 2는 $d\Delta n$ 이 0.48 μm 인 TN 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성을 나타낸 그림이다. 그림에서 화살표는 계조별 피크파장의 이동경로를 나타낸다. 전압이 인가됨에 따라 피크파장이 550 nm에서 440 nm로 이동된다. 계조에 따른 피크파장의 이동되는 정도가 심하기 때문에 TN 셀은 색깔림이 많이 발생한다. 이러한 피크파장이 이동되는 정도를 줄이기 위해서 액정의 $d\Delta n$ 을 줄여서 시뮬레이션 하였다. 그 중에서 $d\Delta n$ 이 0.32 μm 일 때 피크파장의 이동되는 정도가 적음을 알 수 있었다.

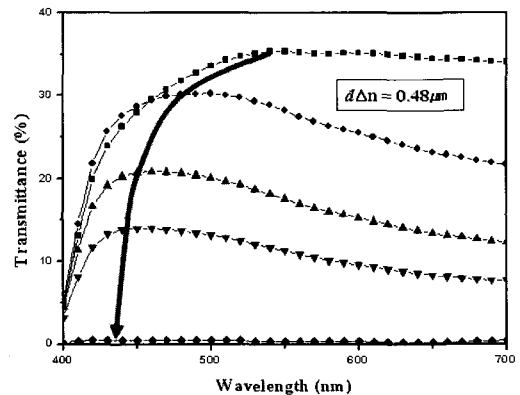


그림 2. $d\Delta n$ 이 0.48 μm 인 TN 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.

Fig. 2. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the TN cell of which the $d\Delta n$ value is 0.48 μm .

그림 3은 $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu\text{m}$ 인 TN 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성을 나타낸 그림이다. 그림에서 화살표는 계조별 피크파장의 이동경로를 나타낸다. 이 셀에서 피크파장은 전압이 인가됨에 따라서 500nm 로부터 440 nm 로 이동한다. 즉 피크파장의 이동 정도가 감소함을 알 수 있다.

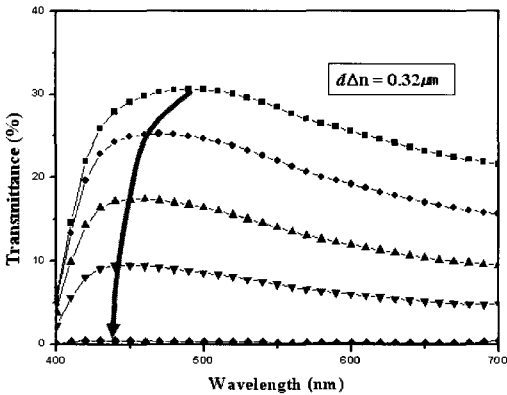


그림 3. $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu\text{m}$ 인 TN 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.

Fig. 3. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the TN cell of which the $d\Delta n$ value is $0.32 \mu\text{m}$.

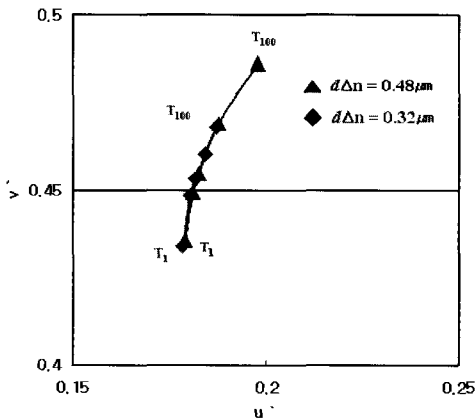


그림 4. $d\Delta n$ 이 $0.48 \mu\text{m}$ 과 $0.32 \mu\text{m}$ 인 TN 셀들의 색꺾림.

Fig. 4. Color tracking of TN cell when $d\Delta n$ values are $0.48 \mu\text{m}$ and $0.32 \mu\text{m}$.

TN 셀들의 색꺾림의 정도가 어느 정도 줄어들었는지 확인하기 위해서 그림 4에 각각의 TN 셀들의 계조에 따른 색꺾림 정도를 색좌표상에 나타내 보았다. $d\Delta n$ 이 $0.48 \mu\text{m}$ 인 TN 셀에서는 T_{100} 에서 T_1 으로 변함에 따라서 순수한 밝음 상태에서 푸른색을 띠는 어둠 상태 쪽으로 이동한다. $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu\text{m}$ 인 TN 셀에서는 푸른빛을 띠는 밝음 상태에서 푸른색을 띠는 어둠 상태 쪽으로 이동한다. TN 셀에서 $d\Delta n$ 을 조절해서 액정셀의 색꺾림을 어느 정도 줄였지만 많이 개선되지는 않았다. 즉, 수직 전기장에 의해 액정 방향자들이 tilt 되는 정도에 의해서 액정의 유효 $d\Delta n$ 이 바뀌는 액정셀들에서는 $d\Delta n$ 을 조절해도 색꺾림이 충분히 개선되지 않는다.

2.3 IPS 셀과 FFS 셀의 색꺾림 특성

그림 5와 6은 각각 IPS 셀과 FFS 셀의 셀 구조와 동작원리를 나타낸 그림들이다. 초기에 액정 방향자들이 평행하게 배열되어 있고 편광판의 투과축이 액정의 러빙방향과 일치하고 검광판의 투과축이 편광판에 90° 로 교차되어 있어서 어둠상태가 된다. 전압을 인가시 IPS 셀과 FFS 셀에 각각 in-plane 전기장과 fringe 전기장이 가해져서 액정 방향자가 회전하기 시작하고, 45° 회전하였을 때 최대 밝음 상태를 나타낸다. IPS 셀은 전극 가운데 부분에서 액정 방향자들이 거의 회전하지 않아서 전체적인 투과율이 떨어진다. 하지만 유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀은 전압 인가시 전극 가장자리부분에 있는 액정 방향자들이 수평 전기장에 의해 먼저 회전되고 전극 가운데 있는 액정 방향자들은 주변의 액정이 회전함에 따라 꼬임 탄성력을 받아 같이 회전하게 된다. 전극 위치에 따라 액정 방향자를 돌게 하는 힘이 달라 액정의 회전되는 각이 전극 위치에 따라 약간 다르다. 하지만 거시적으로 봤을 때 액정 방향자들이 twist 변형을 하며 위치별 투과율 차이가 감소하여 IPS 셀에 비해 전체적으로 높은 투과율을 나타낸다 [5-8].

IPS 셀과 FFS 셀에서 교차된 편광판들 사이에 유전율 이방성을 가지는 액정 디스플레이의 투과율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T/T_0 = \sin^2(2\Psi)\sin^2(\pi d\Delta n/\lambda) \quad (3)$$

이때 Ψ 는 편광판의 투과축과 액정 방향자가 이루는 각이다.

식(3)에서 알 수 있듯이 이상적인 IPS 셀과 FFS 셀의 경우, 각각 in-plane 전기장과 fringe 전기장에 의해서 액정의 방향자들이 평면 안에서 회전하기 때문에 단위 Ψ 의 변화에 의해서 투과율이 발생한다. 그러므로 IPS 셀과 FFS 셀의 중간계조에서의 투과율들은 액정의 $d\Delta n$ 에 의존하지 않는다. 그래서 이상적인 IPS 셀과 FFS 셀에서는 색깔링이 나타나지 않는다. 하지만 일반적으로 사용되는 IPS 셀과 FFS 셀에서는 색깔링 현상이 나타난다. 이러한 이유를 자세하게 분석하기 위해서 IPS 셀과 유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀의 색깔링에 대해 조사하였다.

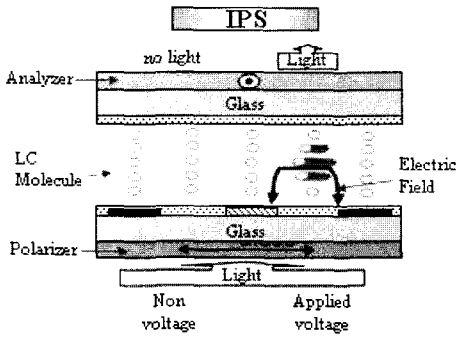


그림 5. IPS 셀의 셀 구조와 동작원리.
Fig. 5. Cell structure and switching principle of a IPS cell.

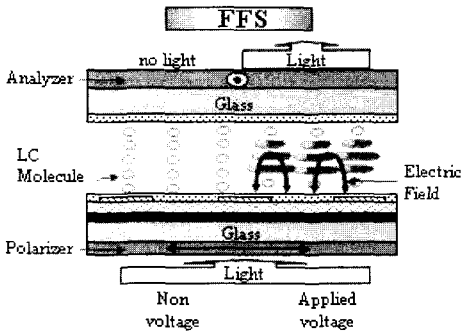


그림 6. FFS 셀의 셀 구조와 동작원리.
Fig. 6. Cell structure and switching principle of a FFS cell.

그림 7과 8은 $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu\text{m}$ 인 IPS 셀과 $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성을 나타낸 그림이다. 그림에서 화살표는 계조별 피크파장의 이동경로를 나타낸다. IPS 셀의 경우, 전압 인가시 피크파장이 460 nm 로부터 520 nm 로 이동되고 FFS 셀의 경우에는 피크파장이 500 nm 로부터 550 nm 로 이동한다. 그래서 IPS 셀과 FFS 셀의 피크파장들이 계조별로 이동되기 때문에 일반적으로 사용되는 IPS 셀과 FFS 셀에서는 색깔링이 발생한다.

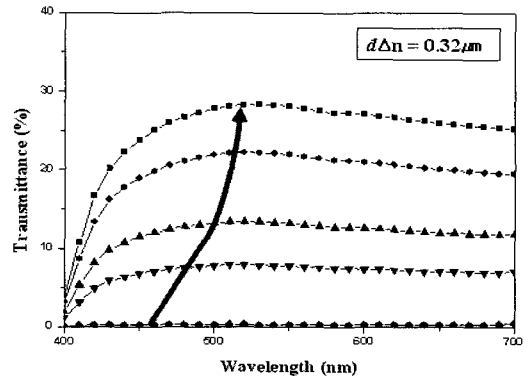


그림 7. $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu\text{m}$ 인 IPS 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.
Fig. 7. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the IPS cell of which the $d\Delta n$ value is $0.32 \mu\text{m}$.

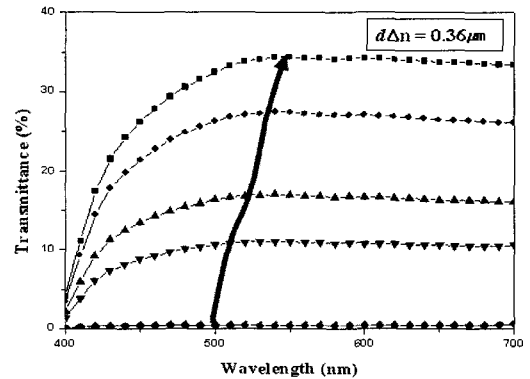


그림 8. $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.
Fig. 8. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the FFS cell of which the $d\Delta n$ value is $0.36 \mu\text{m}$.

이 두 셀들의 색끌림이 어느 정도 발생하는지를 그림 9에 나타내었다. 이상적인 IPS 셀과 FFS 셀과는 다르게 실제 IPS 셀과 FFS 셀에서는 색끌림이 발생하고 있다.

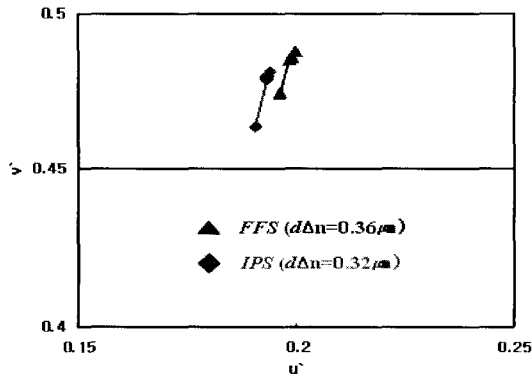


그림 9. $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu m$ 인 FFS 셀과 $0.32 \mu m$ 인 IPS 셀의 색끌림.

Fig. 9. Color tracking of FFS cell and IPS cell when the $d\Delta n$ values are $0.36 \mu m$ and $0.32 \mu m$, respectively.

실제 IPS 셀의 색끌림의 원인은 그림 5에 나와 있듯이 전압을 인가하면 액정 방향자들이 기판 근처에서는 강한 anchoring 에너지 때문에 고정되어 있고 상·하 기판의 중간부분에서만 액정 방향자들이 회전하기 때문에 꼬여진 형태를 가지게 되어 색끌림이 발생한다고 발표되었다[10]. FFS 셀에서도 그림 6과 같이 전압 인가시 액정 방향자들이 기판 근처에서는 고정되어 있고 중간 부분에서만 액정 방향자들이 회전하게 되어서 꼬여진 형태를 가지기 때문에 색끌림 현상이 발생한다.

Cathode ray tube (CRT) 디스플레이는 색좌표 상에서 T_1 과 T_{100} 사이의 거리라고 정의한 색차($\Delta u'v'$)가 0.011인데 이 조건을 만족하는 액정 디스플레이를 authentic-color 액정 디스플레이라고 정의했다[9]. CRT 디스플레이와 액정 디스플레이의 색끌림 정도를 비교하기 위해서 TN 셀, IPS 셀 그리고 유진율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀들의 $\Delta u'v'$ 를 조사하였다. 표 1은 CRT 디스플레이와 각각의 액정셀들의 $\Delta u'v'$ 를 나타낸다. 표 1에 나와있듯이 모든 액정셀들은 CRT수준의 $\Delta u'v'$ 를 만족시키지 못한다.

표 1. 모드별 색차이.

Table 1. Chromaticity difference in each mode.

모드	CRT	TN	IPS	FFS
$\Delta u'v'$	0.011	0.053	0.017	0.013

3. Authentic-color FFS 셀과 IPS 셀

3.1 FFS 셀과 IPS 셀의 색끌림 개선

과장에 따른 투과율의 최대 지점인 피크과장은 개략적으로 색도에 대응된다. 그래서 FFS 셀에 전압이 인가되면 피크과장이 500 nm에서 550 nm로, 그리고 IPS 셀에서는 피크과장이 460 nm에서 520 nm로 이동되는데 만약 T_{100} 에서의 피크과장이 T_1 에서의 피크과장 근처에 위치하게 하면 색끌림이 감소할 것이다. 식(3)으로부터 white 색도는 셀의 위상 지연값에 따라 변함을 알 수 있다. 즉, 만약에 액정 셀의 $d\Delta n$ 이 최적값보다 크거나 작으면 각각 피크과장이 녹색을 띤 밝음 상태와 푸른색을 띤 밝음 상태로 이동한다. 이로 인해 액정셀의 $d\Delta n$ 을 변화시켜서 FFS 셀과 IPS 셀의 색끌림을 개선할 수 있다.

3.2 Authentic-color FFS 셀과 IPS 셀의 비교

위에서 언급했듯이, T_{100} 에서의 피크과장을 단과장 쪽으로 이동시키기 위해서 $d\Delta n$ 을 낮추어서 컴퓨터 시뮬레이션하였다.

IPS 셀과 FFS 셀의 $d\Delta n$ 을 낮추어서 색끌림에 대해 조사한 결과 IPS 셀은 $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu m$ 에서, 그리고 FFS 셀은 $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu m$ 에서 색끌림이 많이 감소함을 알 수 있었다. 그림 10과 11은 각각 $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu m$ 인 IPS 셀과 $0.30 \mu m$ 인 FFS 셀들의 제조별 투과율의 파장 의존성을 나타낸 그림이다. 그림에서 화살표는 제조별 피크과장의 이동경로를 나타낸다. 그림 10에서 보듯이 $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu m$ 인 IPS 셀에서 피크과장이 450 nm에서 480 nm로 이동한다. 이것은 $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu m$ 인 IPS 셀에서의 피크과장의 이동되는 정도보다 감소함을 알 수 있다. 그렇지만 이 셀에서의 투과율이 $d\Delta n$ 이 $0.32 \mu m$ 인 IPS 셀에 비해 15 %정도 감소하고 셀 자체가 푸른색을 띤 밝음 상태를 나타내기 때문에 추가적인 백라이트의 조정이 필요하게 된다. 그래서 백라이트의 세기를 강하게 해주어야 하기 때문에 전력소비가 커진다. $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu m$ 인 FFS 셀의 경우, 그림 11에 나와 있듯이 피크과장이 490 nm에서 520 nm로 이동된다. 피크과장의 이동 정도가 $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu m$ 인 FFS 셀보다 줄어들었다. 투과율은 $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu m$ 인 FFS 셀의 최대 투과율에서 단지 4 %정도만 감소하였고 셀 자체가 녹색을 띤 밝음 상태를 나타내기 때문에 추가적인 백라이트 조정이 필요 없다.

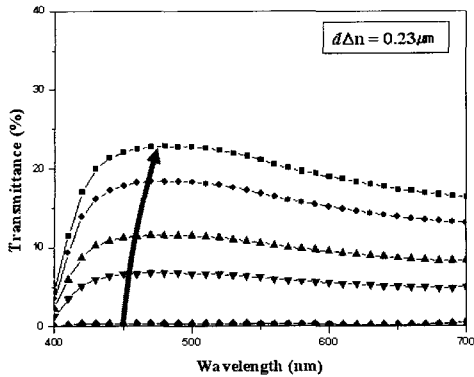


그림 10. $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu\text{m}$ 인 IPS 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.

Fig. 10. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the IPS cell of which the $d\Delta n$ value is $0.23 \mu\text{m}$.

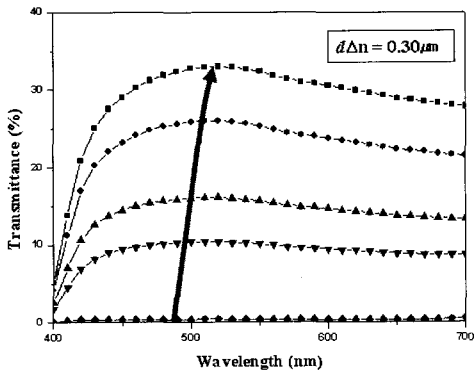


그림 11. $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 계조별 투과율의 파장 의존성.

Fig. 11. Wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the FFS cell of which the $d\Delta n$ value is $0.30 \mu\text{m}$.

$d\Delta n$ 이 $0.23 \mu\text{m}$ 인 IPS 셀과 $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 색깔림 정도를 알아보기 위해 그림 12에 각각의 셀들의 계조에 따른 색도를 색좌표상에 나타내 보았다. $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu\text{m}$ 인 IPS 셀과 $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 $\Delta u'v'$ 는 각각 0.0113과 0.011로서 CRT 수준의 $\Delta u'v'$ 값을 만족한다. 즉, IPS 셀에서는 $d\Delta n$ 이 $0.23 \mu\text{m}$ 이고 FFS 셀에서 $d\Delta n$ 이 $0.30 \mu\text{m}$ 일 때 authentic-color 액정 디스플레이가 된다.

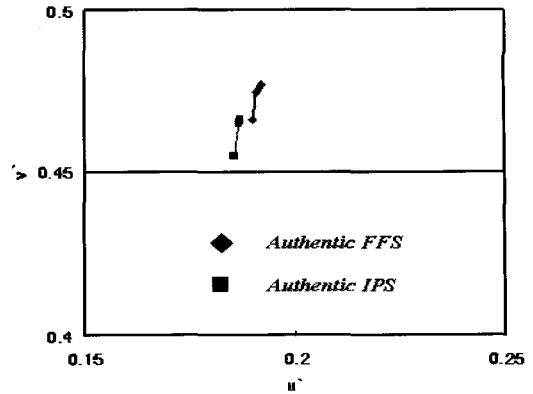


그림 12. Authentic-color IPS 셀과 FFS 셀의 색깔림.

Fig. 12. Color tracking of the authentic-color IPS and FFS cells.

그림 13과 14는 실제 유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀의 계조별 파장 분산성과 색깔림 정도를 spectrophotometer를 이용해서 측정하고 값을 나타낸 그림이다. 이 셀의 $d\Delta n$ 은 $0.30 \mu\text{m}$ 이고 광원은 D65를 사용했으며 전압은 파형 발생기를 이용해서 인가해 주면서 계조별 파장에 따른 투과율과 색좌표를 측정하였다. 그림에서 보듯이 시뮬레이션 결과와 실제로 측정된 결과 거의 일치함을 알 수 있다. 이때의 $\Delta u'v'$ 는 0.011이다.

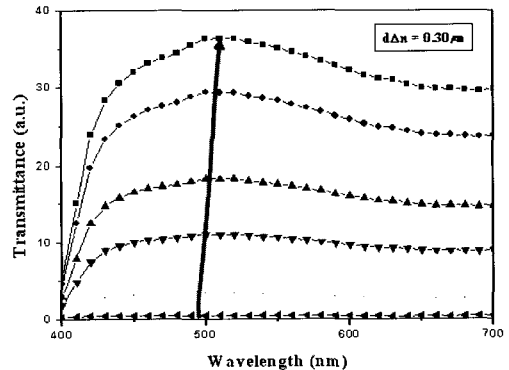


그림 13. Authentic-color FFS셀의 계조별 파장 분산성의 실험값.

Fig. 13. Experimental result of wavelength dependent-transmittance of each gray scale in the authentic-color FFS cell.

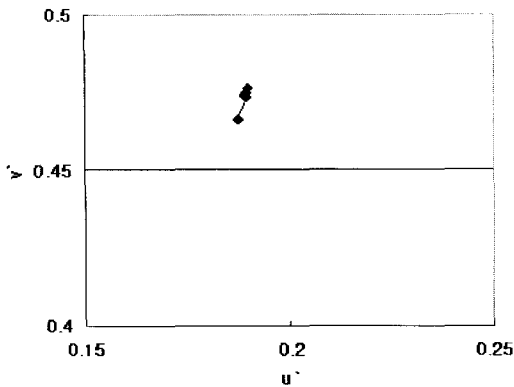


그림 14. Authentic-color FFS셀의 색감 특성 실험값.

Fig. 14. Experimental result of color tracking of the authentic-color FFS cell.

그림 15는 $\Delta u'v'$ 값이 CRT 수준의 0.011을 만족하는 authentic-color IPS 셀과 FFS 셀의 최대 투과율과 그때의 $d\Delta n$ 을 나타낸 그림이다. Authentic-color FFS 셀이 IPS 셀보다 투과율이 20 % 이상 높고 $d\Delta n$ 이 커서 좀더 큰 셀갭을 가질 수 있다는 장점이 있다.

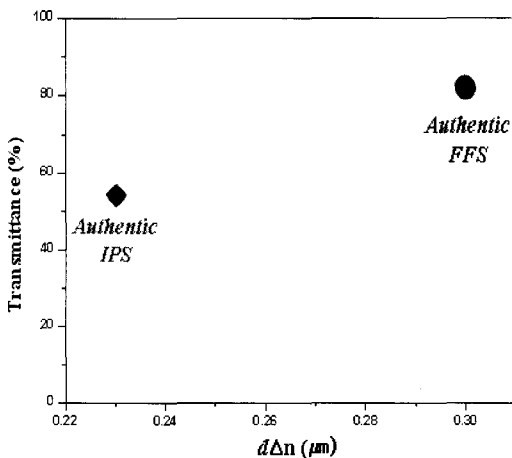


그림 15. Authentic-color IPS 셀과 FFS 셀의 최대 투과율과 $d\Delta n$.

Fig. 15. The maximum transmittance and $d\Delta n$ of Authentic-color IPS and FFS cells.

4. 결론

유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 FFS 셀의 색감 특성을 줄이기 위해 액정의 $d\Delta n$ 을 조절하면서 컴퓨터 시뮬레이션 하였고 실제 제작한 셀을 이용해서 색감 특성을 조사하였다. 액정의 $d\Delta n$ 을 조절함으로써 $\Delta u'v'$ 값이 0.011을 만족하는 Authentic-color FFS 셀을 만들 수 있었다. 이때의 최적 $d\Delta n$ 은 $0.30 \mu\text{m}$ 이고 일반적으로 사용되는 $d\Delta n$ 이 $0.36 \mu\text{m}$ 인 FFS 셀의 최대 투과율에서 단지 4 % 정도만 떨어지고 셀 자체가 녹색을 띠는 밝은 상태를 나타내기 때문에 추가적인 백라이트의 조정이 필요치 않다.

참고 문헌

- [1] 장진, "액정디스플레이 기술의 발전 전망", 전기전자재료학회지 9권 7호, p. 745, 1996.
- [2] Y. Utsumi, S. Komura, Y. Toyoda, and K. Kondo, "Color tracking in relation to liquid crystal display characteristics", IDW'01, p. 117, 2001.
- [3] 서대식, 이승희, "LCD의 액정배향 및 광시야 각 기술의 개발현황", 전기전자재료학회지, 11권, 1호, p. 20, 1998.
- [4] M. OH-E, M. Yoneya, M. Ohta, and K. Kondo, "Depending of viewing angle characteristics on pretilt angle in the in-plane switching mode", Liquid Crystals., Vol. 22, No. 4, p. 391, 1997.
- [5] S. H. Lee and H. Y. Kim, "Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching", Appl. Phys. Lett., Vol. 57, No. 20, p. 2881, 1998.
- [6] S. H. Lee, H. Y. Kim, S. M. Lee, S. H. Hong, J. M. Kim, J. W. Koh, J. Y. Lee, and H. S. Park. "Ultra-FFS TFT-LCD with super image quality, fast response time, and strong pressure-resistant characteristics", SID'01 Digest, p. 117, 2001.
- [7] 김미숙, 김향울, 이승희, "Fring-field switching (FFS)모드에서 액정의 유전율 이방성에 따른 동역학 안정성에 관한 연구", 전기전자재료학회지, 16권 3호, p. 224, 2003
- [8] 정송희, 김향울, 이종문, 이승희, "유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 fringe field

switching mode의 cell gap 변화에 따른 전기 광학 특성“, 전기전자재료학회지, 16권, 10호, p. 914, 2003.

- [9] N. Moruya, T. Uchida, and T. Honda
"Novel transmissive color filter using cholesteric liquid crystal with wide viewing angle", IDW'00, p. 347, 2000.
- [10] Y. Utsumi, I. Hiyama, S. Komura, M. Makoto, and K. Kondo, "Development of authentic color IPS LCD without color tracking", SID'02 Digest, p. 820, 2002.
- [11] A. Lien, "Extended Jones matrix representation for twisted nematic liquid crystal display at oblique incidence", Appl. Phys. Lett., 57. p. 2767, 1990.