

유전율 이방성이 양인 액정을 이용한 Fringe-Field Driven 수평 배향셀의 위상지연값 연구

Study on Retardation Value of Fringe-Field Driven Homogeneously Aligned Nematic Liquid Crystal Cell using Liquid Crystals with Positive Dielectric Anisotropy

정송희¹, 김향율^{1,2}, 송성훈², 이승희^{1,a}

(S. H. Jung¹, H. Y. Kim^{1,2}, S. H. Song², and S. H. Lee^{1,a})

Abstract

We have studied the optimal phase retardation value of a homogeneously aligned liquid crystal (LC) driven by fringe-field when using the LC with positive dielectric anisotropy. In general, the transmittance of a homogeneous aligned LC cell under crossed polarizer is maximum when a twist angle of LC by in-plane rotation is 45° with polarizer and the cell retardation becomes $\lambda/2$. However, the device using the LC with positive dielectric anisotropy does not follow this since the degree of rotation of the LC is dependent on electrode position and in addition the LCs tilt up along the fringe-field. At the center of common and pixel electrode, the LC is most twisted around a middle position of a cell whereas at the edge position of pixel electrode, the LC is most twisted near bottom surface of a cell. Consequently, the optimal phase retardation of the device becomes much larger than $\lambda/2$ and the transmittance can be described using the combination of the in-plane switching and twisted nematic mode.

Key Words : Phase retardation, Fringe-field, LC, Transmittance

1. 서론

최근 모니터의 대형화 추세로 인해 높은 공간 효율을 가진 liquid crystal display (LCD)가 기존에 많이 사용되었던 cathode-ray tube (CRT)를 대체하고 있는 추세이다. LCD는 높은 공간 효율을 가졌고 소비전력이 작고 가벼우며 눈의 피로도 가 적은 장점을 가지고 있는 반면 시야각에 따라 디스플레이의 화질이 달라지는 단점을 가졌다. 이

러한 단점을 극복하기 위해 여러 연구가 진행되어 실제로 wide view twisted nematic (WVTN)[1], multi-domain vertical alignment (MVA)[2], in-plane switching (IPS)[3,4], fringe field switching (FFS) [5-9] 등의 광시야각 모드들이 개발되었다. 이 중에서 IPS 모드는 액정 방향자가 전압 인가 시 수평방향으로 회전하면서 구동되는 모드로 보상필름을 사용하지 않고도 넓은 시야각 특성을 가지나 투과율이 낮은 단점이 있다. FFS 모드는 이러한 IPS 모드의 단점을 보완해주는 모드로 넓은 시야각과 높은 투과율을 나타낼 수 있는 장점이 있다. 현재까지 FFS 모드의 여러 가지 전기광학 특성 연구가 진행되었다. FFS 모드는 유전율 이방성에 따라 동력학적 메커니즘이 다르다. 유전율 이방성이 음인 액정을 사용한 경우 전극 위치별 액정 거

1. 전북대학교 신소재공학부

(전북 전주시 덕진동 1가 664-14)

2. BOE-HYDIS, TECHNOLOGY CO., LTD

a. Corresponding Author : lsh1@moak.chobuk.ac.kr

접수일자 : 2003. 8. 11

1차 심사 : 2003. 9. 19

심사완료 : 2003. 10. 6

동이 달라 투과율이 위치마다 다르나 oscillation 정도가 작아 전체 투과율이 높은 특성을 가진다 [5,8]. 유전을 이방성이 양인 액정을 사용한 경우 전극 위치별 투과율 oscillation 정도가 커 전체적인 투과율이 유전을 이방성이 음인 액정을 사용한 경우보다 상대적으로 낮고 러빙 방향에 따라 전기 광학 특성이 달라진다[6,10]. 전극 구조를 보면 초기에는 일자형 전극 모양이 사용되었는데 이 경우에는 액정이 한 방향으로만 회전해 시야각 의존성 및 색뎀 현상이 발생한다. 이를 개선하기 위해 책기형 전극 구조를 갖는 Ultra-FFS 모드가 개발되었는데 이 모드는 광시야각 이외에도 좋은 화질과 빠른 응답속도를 가진다[7].

액정 셀의 위상지연값은 액정소자의 광효율에 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 유전을 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 위상지연값에 관한 연구를 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 액정 거동이 액정 셀의 위상지연값에 어떠한 영향을 주는지 보았고 실험을 통하여 결과를 비교하였다.

2. FFS 모드의 셀 구조 및 동작원리

그림 1은 fringe 전기장, 즉 수평 및 수직 전기장에 의해 구동되는 FFS 모드의 셀 구조이다. 공통전극(common electrode)과 화소전극(pixel electrode)이 절연층을 사이에 두고 존재하며 두 전극간 수평 거리가 영이다. 전압 인가 전 편광판이 교차되어 있고 하부 편광판과 러빙 방향이 일치하여 암상태가 된다. 전압 인가 시 fringe 장에 의해 액정이 회전하면서 투과율이 발생한다.

일반적으로 교차된 편광판 사이에 복굴절 액정 물질을 갖는 액정 셀에서 표준화된 광 투과 공식은 다음과 같다.

$$T/T_0 = \sin^2(2\phi) \cdot \sin^2(\pi d\Delta n/\lambda) \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 교차된 편광판의 투과축 중 한축과 액정 방향자간의 각도이고, d 는 셀갭, Δn 은 액정의 굴절률 이방성, λ 는 입사광의 파장을 나타낸다. 이 식에 따르면 최대 투과율은 입사광의 파장에 대한 위상지연값($d\Delta n$)에 의존한다. 투과율이 최대가 되려면 액정 방향자가 하부 편광판 광축과 45° twist 되고 위상지연값이 $\lambda/2$ 가 되어야 한다. 그러나 FFS 모드의 경우 실제로는 이처럼 이상적인 형태로 구동되지 않는다. 또한 전극 위치별

dielectric torque 차이에 의해 위치마다 액정 방향자의 twist 와 tilt 각 정도가 다른데(그림 1 참조) 이는 FFS 모드의 최적 위상지연값 (투과율 최대인 점의 $d\Delta n$)이 $\lambda/2$ 보다 큰 값이 되게 한다.

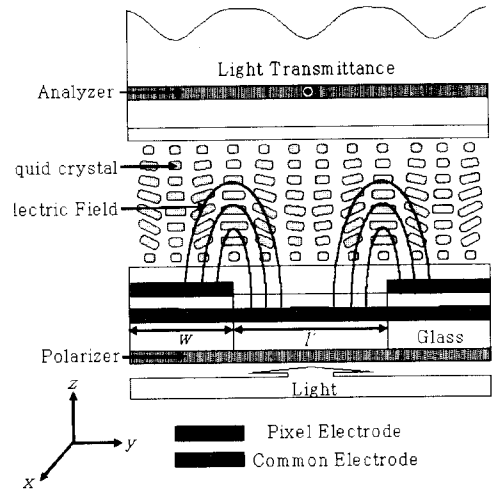


그림 1. 옆에서 본 FFS 모드의 셀 구조와 투과율.
Fig. 1. Cross-sectional view of the FFS cell structure and transmittance.

3. Simulation 결과 및 토의

그림 2는 FFS 모드의 전극 구조이다. 화소전극 폭(W)은 $3 \mu\text{m}$ 이고 화소전극간 거리(ℓ)는 $4.5 \mu\text{m}$ 이다. 액정분자는 초기에 pretilt 각이 2° 로 수평배향되고 있고 러빙은 fringe field의 수평성분에 대해 $78^\circ(a)$ 로 하였다. 본 연구에서는 fringe field에 의해 구동되는 수평배향된 액정 셀의 위상지연에 따른 투과율 변화를 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 위상지연값만을 변화시켰고 다른 조건들은 일치시켰다. 유전을 이방성 ($\Delta\epsilon$)은 8.2, 회전점도(γ)는 0.078 Pa·s, 탄성상수 K_1 은 9.7 pN, K_2 는 5.2 pN, K_3 는 13.3 pN, 셀갭은 $4 \mu\text{m}$ 로 하였고 입사광은 550 nm를 사용하였다. 광학적 투과율 계산은 2×2 extended Jones matrix를 적용하였다[11].

그림 3은 구동전압 인가시의 액정 분자 배열이다. 셀의 위상지연값은 $0.42 \mu\text{m}$ 로 하였다. 위치별 광 투과도를 보면 화소전극 가운데 부분(a)과 공통전극 가운데 부분(d)의 투과율은 낮고 상대적으로 화소전극 가장자리 부분(c)에서는 높다. 위치마다

광 투과도가 다른 이유는 전극 위치에 따라 액정 거동이 다르기 때문이다. 화소전극 가장자리 부분 (c)을 보면 anchoring 에너지 영향을 크게 받는 하부 기판 표면을 제외하고 셀의 아랫부분에서 액정들이 가장 많이 twist 되어있으며 상부 기판으로 올라가면서 연속적으로 twist 각이 감소하여 그 모습이 low twisted TN 모드와 같은 경향을 띤다. 화소전극의 가운데 부분과 공통전극의 가운데 부분을 보면 IPS 모드처럼 셀 중간 부분의 twist 각이 가장 크다.

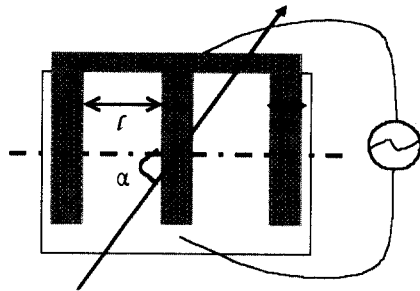


그림 2. FFS 모드의 정면에서 관찰한 셀 구조 개략도.

Fig. 2. Schematic diagram of the top view of cell structure in the FFS mode.

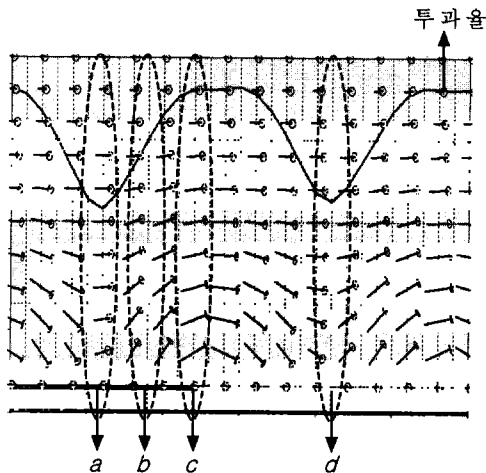


그림 3. 유전율 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 구동전압 인가상태에서의 액정 방향자의 분포.

Fig. 3. LC director distribution at operating voltage when using liquid crystals with positive dielectric anisotropy.

전극 위치별 액정 거동을 알아보기 위해서 전기장 분포를 살펴보았다. 그림 4는 수평 및 수직 전기장 분포로 A는 셀의 아랫부분에서 $0.4\mu\text{m}$ 떨어진 부분, B는 셀의 중간 부분, C는 셀의 위쪽에서 $0.4\mu\text{m}$ 떨어진 부분이다. 수평 전기장분포를 보면 전극의 가장자리에서 전기장의 세기가 가장 크고 전극 가운데 부분은 거의 영이다. 주목할만한 것은 FFS 모드의 경우 전극이 하부기판에만 존재하기 때문에 전기장의 세기가 하부기판근처에서 가장 강하다는 것이다. 수직 전기장의 세기는 전극 가장자리에서 영이고 가장자리에서 멀어질수록 커진다. 수평 전기장과 마찬가지로 전기장의 크기는 셀의 아랫부분에서 강하다. 따라서 화소전극의 가장자리에서는 기판 하부에서 작용하는 강한 수평 전기장의 영향으로 아래쪽 액정이 많이 꼬이게 된다. 이 부분의 수직 전기장은 영이므로 tilt 각은 매우 작다. 화소와 공통전극 가운데 부분의 수평 전기장은 영으로 셀 표면의 액정은 anchoring 에너지에 의해 그대로 있고 셀 중간 부분의 액정은 주변 액정에 의해 꼬인다.

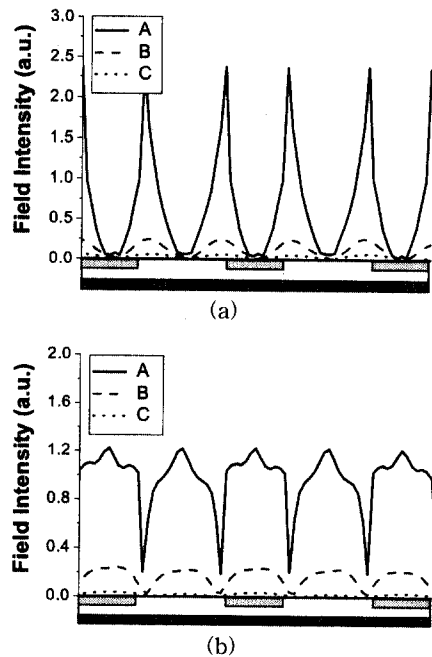


그림 4. 수직 방향 세 위치에서의 전극 위치별 (a) 수평 및 (b) 수직 전기장 분포.

Fig. 4. Field distribution of the horizontal (a) and vertical (b) component along the horizontal axis at three vertical positions.

그림 5는 전극 위치별 액정 분자의 twist 각과 tilt 각 분포이다. 먼저 twist 각 분포를 보면 화소 전극 가운데(a) 부분에서는 z/d 가 0.41, 즉 셀의 중간부분에서 twist 각이 31° 로 가장 크다. 이는 IPS 모드의 경우와 비슷한 분포를 가지나 twist 각이 충분치 않아 투과율이 떨어진다. 화소전극 가장자리(c)로 갈수록 최대 twist 지점의 z/d 가 셀의 아래쪽에 가까워져 low twisted TN 모드와 비슷한 형태가 된다. 다음으로 tilt 각 분포를 보면 전극 가장자리(c) 부분의 경우 tilt 각에 영향을 주는 수직 전기장의 세기가 매우 작지만 주위 액정과 상호작용으로 tilt 각이 발생한다. 화소전극 가운데와 가장자리 사이, 즉 위치 b의 경우 셀 아래쪽의 강한 수직 전기장에 의해 z/d 가 0.15인 지점에서 최대 tilt 각을 나타낸다.

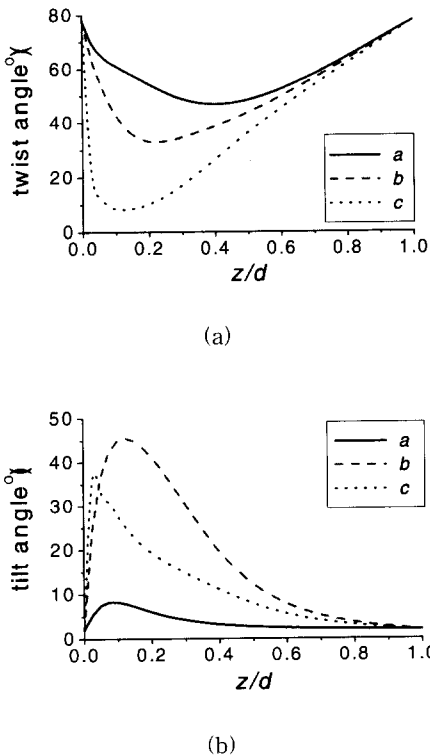


그림 5. 전극 위치별 액정 분자의 (a) twist 및 (b) tilt 각 분포.
 Fig. 5. Distribution of (a) twist and (b) tilt angle of the LC molecule according to the electrode position.

전체적으로 유전을 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 위상지연값 변화에 따른 최대 투과율의 변화가 식 (1)을 따르는지 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 액정셀의 위상지연값 변화에 따른 투과율 최대값(T_{max})이다. 여기서 각각의 \bullet 점들은 시뮬레이션 결과값을 나타낸다. 점선 β 는 IPS 모드의 투과율 공식 즉, 식 (1)을 이용하여 fitting한 곡선이고, 실선 α 는 IPS와 TN 모드의 투과율 공식을 합성하여 fitting한 곡선이다. 식 (1)을 이용하여 fitting한 경우(β) 위상지연값이 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 지점부터는 fitting 곡선에서 크게 벗어났다. 반면 IPS와 NW (Normally White) TN 모드의 투과율 공식을 합성하여 fitting한 결과(α)는 시뮬레이션 결과와 전 영역에서 일치하였다. 이러한 결과는 앞의 twist와 tilt 각 분포로부터 이미 예상되었다. 여기서 실선 α 의 최적 위상지연값은 $0.42 \mu\text{m}$ 였다.

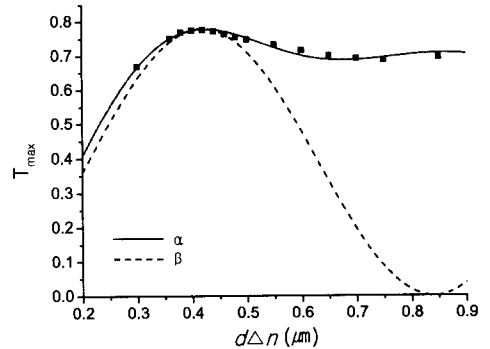


그림 6. 유전을 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 위상지연값 변화에 따른 투과율 최대값의 계산 결과.
 Fig. 6. Calculated result of the maximum transmittance as a function of cell retardation value in the FFS mode using the LC with positive dielectric anisotropy.

IPS와 TN 투과율 공식을 합성하여 fitting식의 유도과정을 보면 다음과 같다. FFS 모드처럼 초기 수평 배열된 액정분자는 전압 인가 시 액정분자의 거동이 변하면서 정면에서의 셀의 위상지연값이 변하는데 이는 즉 액정의 유효 복굴절값 (Δn_{eff})의 변화를 의미한다. 기본적으로 액정의 유효복굴절 (Δn_{eff})은 액정 광축과 편광판 사이의 twist와 tilt 각에 따라 달라지는데 FFS 모드의 경우 전극위치에 따라 액정의 거동이 다르기 때문에 식 (1)에 의해 표현 될 수 없다. 또한 앞에서 언급한 것처럼

이 모드는 전극 가운데 부분에서는 IPS 모드의 거동을 전극 가장자리에서는 NW TN 모드의 거동을 보이는데 이를 바탕으로 FFS의 투과율 공식은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$T/T_0 = A \sin^2(\pi d \Delta n_{eff} / \lambda) + C \left(1 - \frac{\sin^2(\pi/2 \sqrt{1 + (2d \Delta n_{eff} / \lambda)^2})}{1 + (2d \Delta n_{eff} / \lambda)^2} \right) \quad (2)$$

식의 오른쪽 첫 번째 항은 IPS 모드의 투과율식이고 두 번째 항은 NW TN 모드의 투과율 식이다. A는 IPS 모드, C는 NW TN 모드 식의 각각 광효율 관련 계수이다. 여기서 유효복굴절 (Δn_{eff})를 표현하기 위하여 $\Delta n_{eff} / \Delta n$ ratio를 적용시키면 아래와 같은 식(3)으로 표현된다. 여기서 B와 D는 각각 첫 번째 및 두 번째 항의 $\Delta n_{eff} / \Delta n$ ratio이다.

$$T/T_0 = A \sin^2(B \pi d \Delta n / \lambda) + C \left(1 - \frac{\sin^2(\pi/2 \sqrt{1 + (2D d \Delta n / \lambda)^2})}{1 + (2D d \Delta n / \lambda)^2} \right) \quad (3)$$

이 식을 이용하여 그림 6의 실선 α 를 fitting하였고 변수값 A, B, C, D는 각각 0.1, 0.54, 0.7, 1.16으로 나타났다.

실제 실험을 통하여 위의 fitting식이 실험결과와 얼마나 잘 일치하는지를 조사하였다. 그림 7은 셀갭을 $3.8 \mu\text{m}$ 로 고정시키고 Δn 값이 다른 액정을

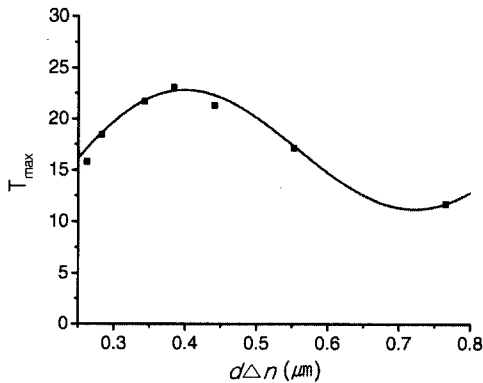


그림 7. 셀갭이 $3.8 \mu\text{m}$ 인 경우 위상지연 변화에 따른 T_{max} 측정값. 여기서, 실선은 식 (3)으로 fitting 결과이다.

Fig. 7. Measured maximum transmittance (T_{max}) dependent on cell retardation for a cell gap of $3.8 \mu\text{m}$. Here, the solid line is a fitting result using eqn. (3).

주입하여 위상지연값 변화에 따른 T_{max} 를 측정할 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 식 (3)으로 fitting한 결과 fitting 곡선과 실험 데이터가 거의 일치하였다. 이러한 결과를 통해 유전율 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드가 합성식에 의해 잘 표현됨을 알 수 있었다.

그림 8은 IPS 모드(D), TN 모드(E) 그리고 IPS와 TN 두 모드의 가중치를 1:1로 합성한 경우(F) 각각의 위상지연값 변화에 따른 최대 투과율(T_{max})을 이론적으로 계산하여 나타난 그래프이다. 각각의 투과율 first maximum의 위상지연값을 보면 IPS 모드는 $0.275 \mu\text{m}$ 이고 TN 모드는 $0.48 \mu\text{m}$ 이다. 두 모드를 합성한 경우인 곡선 F는 그 사이의 값인데 유전율 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 경우 이와 비슷한 경향을 보인다. F의 투과율 first maximum 위상지연값은 D와 E의 가중치에 따라 그 값이 달라진다.

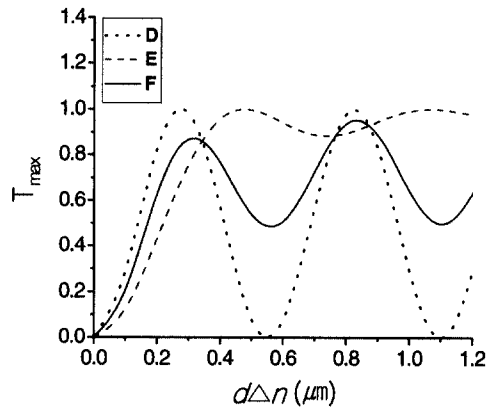


그림 8. IPS, TN, IPS+TN 모드의 위상지연 변화에 따른 최대 투과율의 계산값.

Fig. 8. Calculated maximum transmittance (T_{max}) dependent on cell retardation for the IPS, TN, and IPS+TN mode.

4. 결론

본 논문에서는 유전율 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 위상지연값 특성을 연구하였다. 시뮬레이션 결과 이 모드는 전압 인가 시 전극 위치마다 액정 거동이 달랐다. 화소전극 가장자리 부분에서는 하부 기판 표면의 수평 전기장 세기가

크기 때문에 anchoring 에너지의 영향을 크게 받는 셀의 하부 표면을 제외하고 하부기판 근처에서 액정들이 가장 많이 twist 되어 있으며 상부 기판으로 올라가면서 연속적으로 twist 각이 감소하는 low TN 모드의 형태를 띠었다. 화소와 공통전극의 가운데 부분에서는 전기장이 수평성분은 존재하지 않고 수직성분만 존재하여 하부 기판 근처에서 액정의 twist 각이 가장 크지 않고 IPS 모드처럼 셀의 중간 부분에서 twist 각이 가장 크다. 이러한 결과를 바탕으로 유전을 이방성이 양인 액정을 사용한 FFS 모드의 위상지연값 변화에 따른 투과율 특성을 알아보았다. 위상지연값 변화에 따른 투과율 최대점을 구하였는데 이는 IPS와 TN 모드 식의 합성으로 표현되었다. 또한 실제 실험을 통해 이론적인 결과와 실험 결과가 일치됨을 증명하였다.

감사의 글

본 연구는 IMT-2000 지원금 기술 개발 지원 사업에 의해서 시행되었습니다.

참고 문헌

- [1] S. H. Lee, S. H. Hong, J. M. Kim, H. Y. Kim, and J. Y. Lee, "An overview of product issues in wide viewing TFT-LCDs", Journal of the SID, p. 155, 2001.
- [2] N. Koma, Y. Baba, and K. Matsuoka, "No-rub multi-domain TFT-LCD using surrounding electrode method", SID'95 Digest, p. 869, 1995.
- [3] M. Oh-E and K. Kondo, "Quantitative analysis of cell gap margin for uniform optical properties", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, No. 11, p. 6798, 1997.
- [4] T. Satake, T. Nishioka, T. Saito, and T. Kurata, "Electrooptical study of an in-plane switching mode using a uniaxial medium model", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, No. 1, p. 195, 2001.
- [5] S. H. Lee, H. Y. Kim, and S. L. Lee, "A high quality AM-LCD using fringe-field switching technology", IDW'99, p. 191, 1999.
- [6] S. H. Hong, I. C. Park, H. Y. Kim, and S. H. Lee, "Electro-optic characteristic of fringe-field switching mode depending on rubbing direction", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, L527, 2000.
- [7] S. H. Lee, S. M. Lee, H. Y. Kim, J. M. Kim, S. H. Hong, Y. H. Jeong, C. H. Park, Y. J. Choi, J. Y. Lee, J. W. Koh, and H. S. Park, "Ultra-FFS TFT-LCD with super image quality and fast response time", SID'01 digest paper, p. 484, 2001.
- [8] 김향울, 고재완, 노정동, 서대식, 이승희, "유전을 이방성이 음인 액정을 이용한 이중 도메인 FFS 모드의 전기광학 특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 1호, p. 720, 2002.
- [9] 정태봉, 박지혁, 이종문, 김용배, 이승희, "1매의 편광판으로 구성된 반사형 Fringe-Field Switching Mode의 전기 광학 특성", 전기전자재료학회논문지, 16권, 2호, p. 131, 2003.
- [10] 김미숙, 김향울, 이승희, "Fringe-Field Switching (FFS) 모드에서 액정의 유전을 이방성에 따른 동력학 안정성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 16권, 3호, p. 224, 2003.
- [11] A. Lien, "Extended Jones matrix representation for twisted nematic liquid crystal display at oblique incidence", Appl. Phys. Lett., Vol. 57, p. 2767, 1990.