

Fringe-Field Switching (FFS) 모드에서 액정의 유전율 이방성에 따른 동력학 안정성에 관한 연구

Dynamic Stability Depending on the Dielectric Anisotropy of the LC in the Fringe-Field Switching (FFS) mode

김미숙*, 김향울**, 이승희*
(M. S. Kim*, H. Y. Kim**, and S. H. Lee*)

Abstract

The voltage-dependent transmittance curve of a homogeneously aligned liquid crystal (LC) cell driven by fringe-electric field (named FFS mode) was studied, while changing dielectric anisotropy of a LC. The results show that for a LC with positive dielectric anisotropy the disclination lines existing between domains extend into the active region with increasing voltage, whereas their width becomes small with increasing voltage for a LC with negative dielectric anisotropy while positioning at initial position. Therefore, we conclude that the dynamic stability is strongly dependent on the types of the LCs and voltage-dependent dynamics of the LC with negative dielectric anisotropy is stabler than that of the LC with positive dielectric anisotropy in the FFS mode.

Key Words : FFS mode, Disclination line, Dynamic stability, Dielectric anisotropy

1. 서론

액정 디스플레이의 이미지는 기존의 twisted nematic(TN)모드[1]에서 in-plane switching(IPS) 모드[2,3] 및 fringe-field switching(FFS) 모드[4-8]와 같은 새로운 개념의 액정 모드에 의해 발전해 왔다. IPS 모드는 시야각 특성이 좋은 장점을 가지는 반면 광투과도에 근본적인 문제점을 가지고 있다. 이러한 IPS의 단점을 보완한 FFS 모드는 좋은 이미지 특성뿐만 아니라 높은 투과율과 넓은 시야각 특성을 가지는 장점을 가진다. 흥미롭게도, FFS 모드에서 전압에 의존하는 액정 동력학 안정성은 액정의 유전율 이방성에 따라 다르게 나타난

다. 이러한 차이로 인해 디스플레이가 외부 압력에 다르게 행동하게 된다[9]. 액정 소자에서 전압에 따른 동력학적 안정성은 액정 소자가 높은 투과율, 빠른 반응시간, 낮은 구동전압 등 우수한 전기광학 특성을 가지게 한다. 따라서 본 논문에서는 이중 도메인 FFS 모드에서 두 가지 형태의 액정, 즉 유전율 이방성이 양인 액정(+LC)과 음인 액정(-LC)에서 전압에 의존하는 액정 동력학 안정성의 차이를 알아보려고 한다.

2. 실험

액정의 동력학 안정성을 알아보기 위해 본 연구에서는 이중 도메인 FFS 전극 구조 셀을 제작했다(그림 1참조). 하부 기판은 세 개의 층, 평면 형태의 공통 전극, SiNx로 만든 절연층, 쐐기 형태의 화소 전극으로 이루어져 있으며 화소 전극의 폭과 전극간 거리는 각각 4.4 μ m이고 이 때 pretwist 각

* : 전북대학교 신소재공학부
(전주시 덕진동 1가 664-14,
Fax: 063-270-2341

Corresponding Author : lsh1@moak.chonbuk.ac.kr

** : Hydis, 개발본부 개발 1그룹
2002년 11월 14일 접수, 2002년 12월 24일 1차 심사 완료,
2003년 1월 10일 최종 심사 완료.

(θ)은 7° 이다. 이러한 FFS 전극 구조에서 전압 인가시 두개의 방향으로 프리즈 전기장이 형성된다. 여기서 프리즈 전기장이라 함은 전기장이 수평 및 수직 성분을 모두 가지고 있음을 의미한다. 상부 기판은 전극이 존재하지 않는 투명한 유리 기판이다. 셀 제작 시 기판위에 수평 배향막을 약 1000Å으로 코팅하고 러빙 처리를 약 2° 의 프리틸트 각을 갖게 한다. 이 셀은 anti parallel한 러빙 방향을 가지도록 만들어지며 이때 셀 갭(d)은 $4\mu\text{m}$ 이다. 상하판 외부에 존재하는 편광판과 검광자는 서로 수직하게 위치하며 이들 광축중의 하나는 러빙 방향과 일치시킨다. 이러한 방식으로 만들어진 이중 도메인 FFS 셀에 +LC($\Delta\epsilon=8.2, \Delta n=0.099$ at 589nm)과 LC($\Delta\epsilon=4, \Delta n=0.077$)을 각각 주입 후 액정 동력학 안정성의 차이를 편광현미경과 시뮬레이션을 통해 알아보려고 한다.

3. 결과 및 고찰

IPS 모드에서 투과율 방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 ψ 는 교차된 편광판의 투과축 중의 하나와 액정 방향자 사이에 이루는 각을 말한다. 전압을 증가시 ψ 가 0° 부터 일정 값까지 증가하게 되며 특정 전압에서 광투과도가 발생한다. 또한 아무리 높은 전압을 인가해도 강한 표면 anchoring 에너지 때문에 액정 방향자가 90° 까지 증가할 수는 없다. FFS 모드도 이와 유사하게 표현될 수 있으며 제작된 FFS셀은 전압이 인가되기 전에 어두운 상태를 나타내며 전압 인가시 광투과도가 발생한다. 이중 도메인 FFS 전극구조에서 이러한 액정들은 서로 반대 방향으로 회전한다. 예를 들어 +LC는 전압 인가 전 수직 방향(y 방향)으로 배열되어 있다. 이러한 셀에 전압 인가시 프리즈 전기장이 두 방향으로 존재하며 도메인 사이에 위치한 액정은 시계방향과 반시계 방향으로 회전하게 된다(그림 1(a) 참조). 도메인 경계 부근에서 액정이 시계방향과 반시계 방향으로 회전하기 때문에 경계에 있는 액정은 어느 방향으로도 움직이지 않고 초기의 상태를 유지하게 되어 disclination line으로 존재하게 된다. LC는 전압 인가 전 수평 방향(x 방향)으로 배열되어 있다가 전압 인가시 서로 반

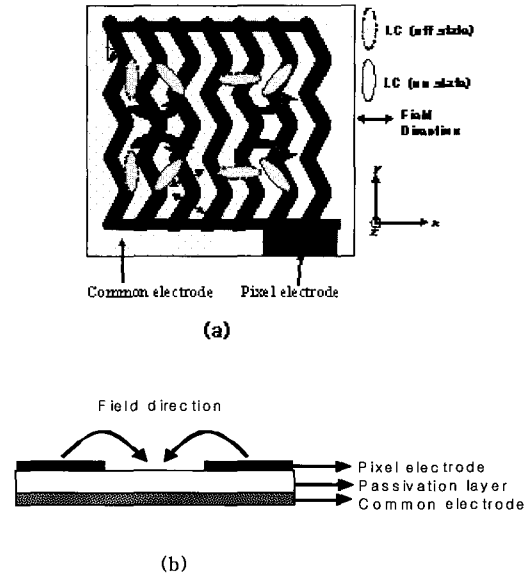
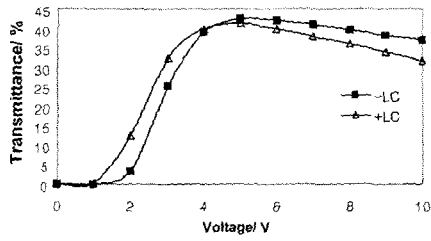


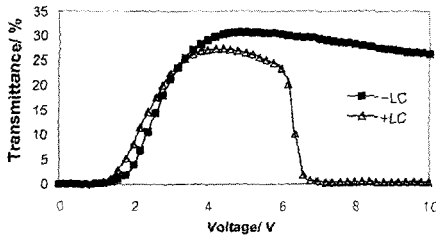
그림 1. FFS 전극 구조: (a) 정면에서 관찰한 그림, (b) 측면에서 관찰한 그림.

Fig. 1. The electrode structure in the FFS mode: (a) top view and (b) cross sectional view.

대 방향으로 회전하게 된다. 그림 2는 전압에 의존하는 투과율 곡선을 나타낸다. 그림 2(a)는 시뮬레이션을 통해 얻어낸 결과이며 이때 사용된 시뮬기는 LCD master(Shintech, Japan)이다. 그림 2(a)에서 보이는 것처럼 +LC, LC 모두 구동 전압까지 인가시 투과율이 증가하며 그 이상의 전압 인가시 액정들이 편광판의 축과 45° 이상 틀어지면서 광투과도가 약간 떨어진다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 그림 2(b)는 실제로 셀을 측정해서 나온 결과이다. 이 데이터는 60Hz에서 초당 0.1V씩 전압을 증가하면서 측정하였다. 그림 2(b)를 통해 +LC의 구동 전압이 -LC보다 낮은 것을 알 수 있으며 이는 +LC의 유전율 이방성 값이 -LC의 값보다 크기 때문이다. 여기서 흥미있는 것은 LC에서는 광투과도가 구동 전압 이상에서 많이 감소하는 현상이다. 그림 2(b)를 통해서 알 수 있듯이 -LC를 가진 셀에서는 V-T 곡선이 시뮬레이션 결과와 유사한 형태를 보이는 반면에 +LC를 가진 셀은 투과율이 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 이해하기 위해 우리는 전압을 증가시키면서 셀을 관찰하였다. 그림 3의 편광 현



(a)



(b)

그림 2. 이중 도메인 FFS 셀에서 전압에 의존하는 투과도 곡선: (a) 시뮬레이션 결과 (b) 측정된 결과.

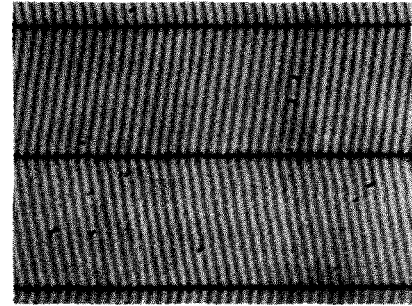
Fig. 2. Voltage-dependent transmission curves in the 2-domain FFS cells with +LC and LC: (a) simulated and (b) experimental results.

표 1. 시뮬레이션 조건.

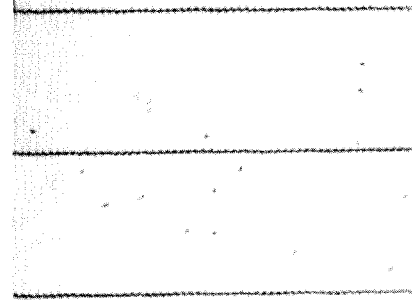
Table 1. Simulation condition.

Electrode width (μm)		3
Electrode distance (μm)		4.5
Cell gap (μm)		4
Pretilt angle($^{\circ}$)		2
+LC	K11(elastic constant for splay)	9.7
	K22(elastic constant for twist)	5.2
	K33(elastic constant for bend)	13.3
	Δn at 550nm	0.099
	$\Delta\epsilon$	8.1
-LC	K11(elastic constant for splay)	13.5
	K22(elastic constant for twist)	6.5
	K33(elastic constant for bend)	15.1
	Δn at 550nm	0.077
	$\Delta\epsilon$	-4

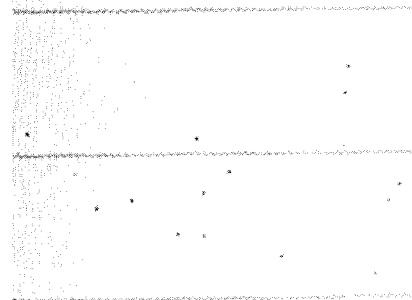
2V



4.7V



6V



8V

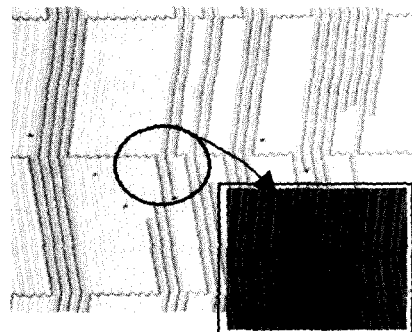


그림 3. +LC 경우 전압 증가에 따른 disclination line의 진행 정도에 대한 사진.

Fig. 3. Photos showing how disclination lines progress with increasing voltage for the +LC.

미경 사진은 전압에 따른 +LC texture를 나타낸다. 문턱 전압 근처인 2V 인가시 도메인 근처의 LC이 시계 방향과 반시계 방향으로 움직이기 때문에 도메인 경계의 액정은 초기 상태를 유지하면서 두꺼운 disclination line이 존재한다. 전압을 4.7V 이상 즉 구동전압 근처까지 증가시키면 더 많은 액정이 전기장 방향으로 배열하려고 하면서 두꺼운 disclination line이 얇아진다. 그러나 6V 이상에서는 화소전극 가장자리에서 시계방향으로 돌아가려는 힘과 반시계 방향으로 돌아가려는 힘 사이의 경쟁에 의해 직선형태의 disclination line이 굴곡 형태로 변하기 시작한다. 8V에 달하는 높은 전압을 인가시 도메인 경계에 위치해 있던 disclination line이 도메인 안쪽을 따라 이동한다. 이러한 영역에서 무슨 일이 일어나는지 이해하기 위해 도메인경계 부근에서 500배율로 확대해 셀을 관찰하였다.

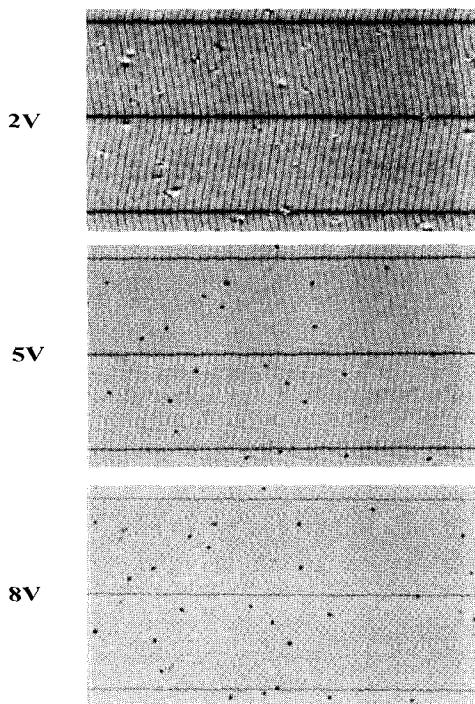


그림 4. -LC 경우 전압 증가에 따른 disclination line의 진행 정도에 대한 사진.
 Fig. 4. Photos showing how disclination lines progress with increasing voltage for the -LC.

disclination line이 화소전극 가운데와 공통 전극을 타고 도메인 내부로 이동하였다. 또한 이러한 현상은 도메인 경계 즉 수평한 축을 중심으로 교대로 나타났다. 다음 실험으로 그림 4에 보이는 것처럼 -LC을 가진 셀에서 전압에 의존하는 동력학 안정성을 알아보았다. 이 경우 문턱전압 근처인 2V 인가시 disclination line이 존재했다. 하지만 +LC의 경우와 달리 이 라인들은 구동전압 이상인 8V까지 증가시켜도 일직선의 모습을 그대로 유지했으며 다만 라인의 두께만이 얇아졌다. 이러한 관찰로부터 FFS 모드에서 전압에 의존하는 동력학 안정성은 액정의 형태에 의존한다는 것을 알 수 있었다. 또한 이중 도메인 FFS 모드에서 +LC의 경우보다 -LC의 경우가 동력학적으로 더 안정하다는 사실을 알 수 있었다. 사실 이 결과는 실제 TFT LCD의 화소 전극의 끝부분, 즉 전기장 방향이 일정치 않은 영역에서 액정 방향자들을 반대 방향으로 회전시킬 수 있기 때문에 매우 중요하다 [9]. 그러면 무엇이 그러한 차이를 만드는 것일까? 그 이유를 알아보기 위해 각각 +LC과 -LC의 경우, 시뮬레이션을 통해 액정 방향자의 분포와 투과율을 살펴보았다. 그림 5는 +LC에서 V_{op} 과 10V 인가시 액정 방향자의 분포 및 투과율을 나타낸다. +LC에 구동 전압 인가시 전극 가장자리 부분에서 수평전기장이 강하게 작용해 액정들이 기판에 평행한 상태로 충분히 회전되어 투과율이 좋다. 전극 가운데 부분에서는 수평 전기장의 영향이 적어 LC이 회전되는 정도가 적게 되고 투과율이 떨어진다. 반면에 10V에 달하는 높은 전압 인가시 비대칭적인 투과율 곡선을 나타낸다. 또한 수직 전기장의 영향을 크게 받아서 액정들이 기판에 서려는 경향이 크다. 전극 가장자리부분의 액정은 over twist되면서 투과율이 떨어지며 전극 가운데 액정 역시 회전되는 정도가 적어 투과율이 떨어진다. 이러한 현상을 자세히 알기 위해 FFS 모드에 +LC과 -LC을 사용해 전압 증가시 twist angle과 tilt angle을 각각 살펴보았다. 그림 6은 +LC에서 화소전극 가장자리와 가운데 부분에서 twist angle과 tilt angle을 나타낸다. 화소 전극 가장자리를 나타내는 그림 6(a)에서 z/d가 0.1인 하부기판 근처에서 액정들이 많이 twist 되어있으며 상부 기판으로 올라갈수록 연속적으로 twist angle이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 하부 기판 표면의 수평 전

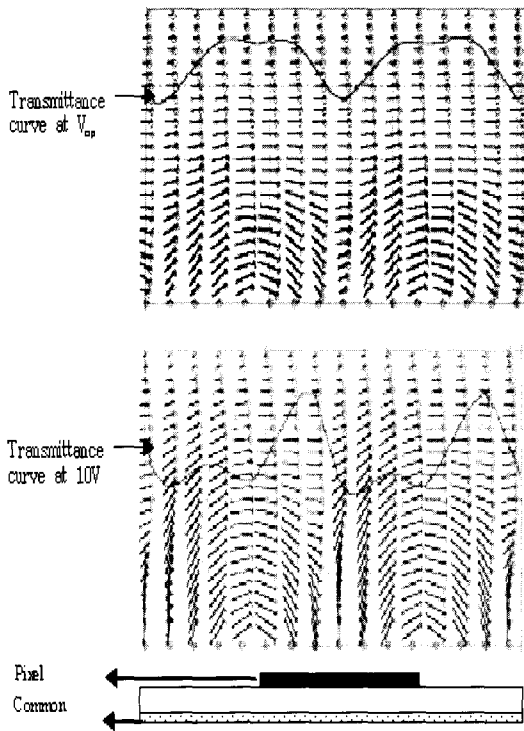


그림 5. +LC에서 V_{op} 과 10V 인가시 액정 방향자의 분포 및 투과율.

Fig. 5. Profile of the +LC molecules in V_{op} and 10V and corresponding transmittance.

기장의 세기가 크기 때문이다. 또한 구동 전압 근처에서는 70° 까지, 10V에 달하는 높은 전압 인가시는 80° 까지 twist angle이 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉 anchoring 에너지의 영향을 크게 받는 하부 기판 표면을 제외하고는 액정 분자의 배열이 low twisted TN 모드와 유사하다. 그림 6(b)는 화소 전극 가운데 부분에서의 twist angle을 나타내며 이 영역에서 수평 성분은 존재하지 않고 수직 성분만 존재해 하부 기판 근처에서 액정이 많이 twist 되지 않는다. 인가된 전압이 V_{op} 근처에서는 twist angle이 약 38° 까지 증가하며, 10V에 달하는 높은 전압 인가시는 twist angle이 약 40° 로 별 차이를 나타내지 않음을 알 수 있었다. 또한 최대 twist angle이 z/d 가 0.5 근처 영역으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 그림 6의 (c)와 (d)는 전압 증가시 화소 전극 가장자리와 가운데 부분에서의 tilt angle을 나타낸다. 그림 6(c)에서 보이는 것처럼

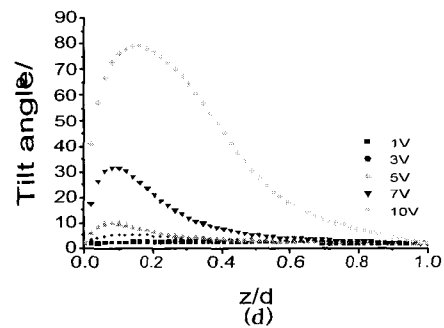
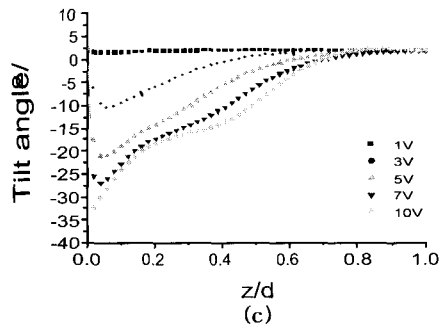
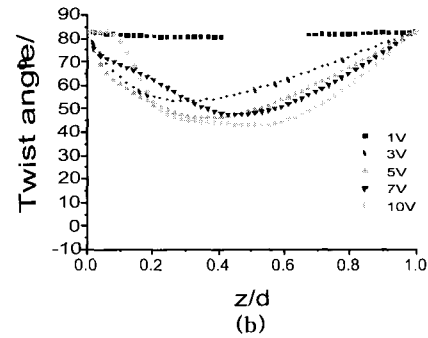
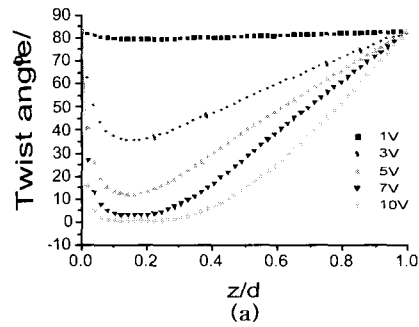


그림 6. +LC에서 twist 각과 tilt 각: (a)와 (c)는 화소 전극 가장자리, (b)와 (d)는 전극 중앙.

Fig. 6. Twist & tilt angles of the +LC: (a) and (c) at pixel electrode edge, and (b) and (d) at electrode center, respectively.

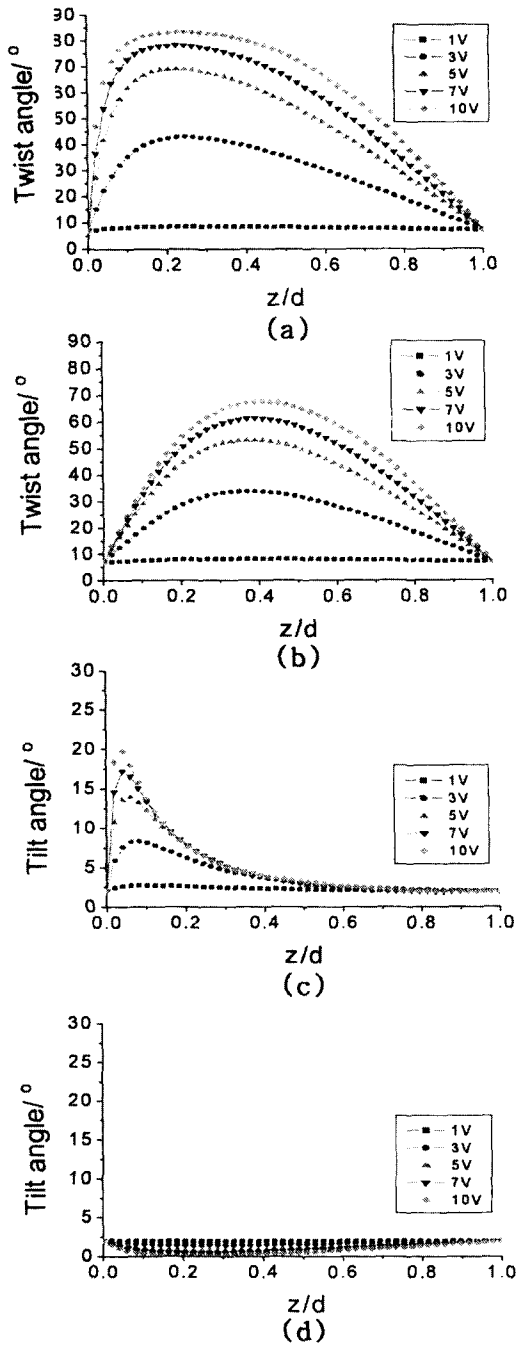


그림 7. -LC에서 twist 각과 tilt 각: (a)와 (c)는 화소 전극 가장자리, (b)와 (d)는 전극 중앙.
 Fig. 7. Twist and tilt angle of the -LC: (a) and (c) at pixel electrode edge, and (b) and (d) at electrode center, respectively.

tilt angle은 하부기판 표면 근처에서 가장 크게 일어나며 전압 증가시 tilt angle이 증가한다. 그리고 10V 인가시 tilt angle은 최대 35°까지 증가한다. 또한 그림 6(d)에서 보이는 것처럼 화소전극 가운데 역시 전압 증가시 최대 80°까지 tilt angle이 증가한다. 즉 +LC의 경우 기판 표면 근처에서 액정들이 많이 서있게 되며 이러한 영향으로 초기 배열 상태로 액정을 잡아주려는 힘이 약하다. 그림 7은 -LC의 경우 화소 전극 가장자리 부분과 가운데 부분에서의 twist angle과 tilt angle을 나타낸다. 그림 7(a)와 (b)는 화소 전극 가장자리 부분과 가운데 부분에서의 twist angle을 나타낸다. 그림 7(a)에 보이는 것처럼 -LC의 경우 화소 전극 가장자리에서 twist angle의 변화는 +LC과 비슷하다. 즉 전압 증가시 twist angle도 같이 증가한다. 또한 10V 인가시 하부 기판 근처에서 최대 80°까지 twist angle이 증가한다. 그림 7(b)는 -LC의 화소 전극 가운데 부분에서의 twist angle을 나타낸다. 이때의 액정 분포는 +LC의 경우와 달리 전압 인가시 전 영역에서 twist angle이 균일하게 증가한다. 또한 높은 전압인 10V 인가시 z/d 가 0.4 근처에서 약 60°의 최대 twist angle을 보인다. 그림 7(c)와 (d)는 화소 전극 가장자리와 가운데 부분에서의 tilt angle을 나타낸다. 그림 7(c)에서 보이는 것처럼 화소 전극 가장자리 부분에서 tilt angle은 +LC의 경우가 35°인 반면 -LC의 경우는 약 20°로 더 작다. 또한 그림 7(d)에서 보이는 것처럼 전극 가운데 부분에서 tilt angle은 +LC의 경우 80°인데 반해 -LC는 거의 0°의 tilt angle을 보이며 기판에 평행하게 배열하고 있다. 프리즈 전기장에 의해 구동되는 이중 도메인 FFS 모드에서 전기장에 평행하게 배열하려는 +LC 사용시 전극 가장자리 부분에서 시계 방향으로 회전하려는 힘과 반시계 방향으로 회전하려는 힘 사이의 경쟁이 일어난다. 이러한 두 힘 사이의 미세한 차이에 의해 액정은 한쪽으로 이동하게 된다. +LC의 경우 수직장의 영향을 크게 받아서 기판 표면 근처에서 액정들이 많이 서게 되며 따라서 초기 배열 상태를 잡아주려는 힘이 약하게 된다. 이러한 액정들은 화소 전극과 공통 전극을 따라 도메인 안쪽으로 이동하면서 직선 형태의 disclination line을 굴곡 형태로 바꾸고 투과율을 떨어뜨린다. 반면 전기장 방향에 수직으로 배열하려는 -LC의 경우 역시 전극 가장자리 부분에서 시계 방향으로 돌려는 힘과 반시계 방향으로 회전하려는 힘 사이의 경쟁이 일어난다. 그러나 이때는 액정을 회전시키는데 사용되는 수평전

기장의 증가와 동시에 액정을 기관에 유지시키려는 수직 전기장이 동시에 증가해 액정들이 기관에 평행하게 유지하게 된다. 따라서 +LC의 경우와는 달리 높은 전압을 인가해도 도메인 경계에 존재하는 액정들이 도메인 내부로 침범하지 않게 된다. 즉 이중 도메인 FFS 모드에서 전압에 의존하는 액정의 동력학 안정성은 LC이 +LC보다 더 우수하다.

4. 결론

본 연구를 통해 이중 도메인 FFS 모드에서 전압에 의존하는 액정 동력학 안정성은 액정의 유전율을 이방성에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다. 즉 이중 도메인 FFS 모드에서 -LC의 경우가 +LC보다 동력학적으로 더 안정하다. +LC에서는 전압 증가시 도메인 경계에 있던 액정들이 전극 가장자리에서의 경쟁에 의해 불안정해지며 수직장의 영향을 받은 액정들이 큰 tilt 각을 가지고 기관에 서 있게 된다. 이러한 액정은 화소 전극과 공통 전극을 타고 도메인 안쪽으로 이동해 투과율을 떨어뜨린다. -LC의 경우 액정들이 화소 전극 가장자리에서 시계방향으로 돌려는 힘과 반시계 방향으로 돌려는 힘 사이에 경쟁이 일어남에도 불구하고 액정을 회전시키는데 사용되는 수평 전기장이 증가하면서 액정을 기관에 유지시키려는 수직 전기장이 같이 증가해 동력학적으로 안정하게 된다. 이러한 결과는 화소 크기가 작은 고정세, 고 해상도 마이크로 디스플레이의 화소 설계에 유용한 정보다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R05-20002-000-00736-0)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] J. Y. Hwang, Y. M. Jo, S. J. Rho, D. K. Lee, H. K. Baik, and D. S. Seo, "Study on electro-optical characteristics of the ion beam aligned TN cell on the DLC thin film". 전기전자재료학회논문지, 15권, 8호, p. 726, 2002.
- [2] H. Y. Kim, D. S. Seo, and S. H. Nam, "A

study on VHR and residual DC property in the IPS cells", 전기전자재료학회논문지, 15권, 2호, p. 169, 2002.

- [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] S. H. Lee, S. L. Lee, and H. Y. Kim, "High-transmittance, wide-viewing-angle liquid crystal display controlled by fringe-field switching", Proc. 18th Int. Display Research Conf., p. 371, 1998.
- [5] S. H. Lee, S. L. 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. 73, p. 2881, 1998.
- [6] H. Y. Kim, J. W. Koh, J. D. Noh, D. S. Seo, and S. H. Lee, "Electro-optic characteristics of the dual domain fringe-field switching (FFS) mode using the liquid crystal with negative dielectric anisotropy", 전기전자재료학회논문지, 15권, 8호, p. 720, 2002.
- [7] 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, No. 6A, p. L527, 2000.
- [8] J. D. Noh, H. Y. Kim, J. M. Kim, J. W. Koh, J. Y. Lee, H. S. Park, and S. H. Lee, "Pixel structure of the Ultra-FFS TFT-LCD for strong pressure-resistant characteristic", Dig. Tech. papers of SID, p. 224, 2002.
- [9] 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, "18.1" Ultra-FFS TFT-LCD with super image quality and fast response time", Dig. Tech. papers of SID, p. 484, 2001.