

1매의 편광판으로 구성된 Fringe-Field 구동형 반사형 Hybrid Aligned Nematic 액정 디스플레이의 전기-광학 특성에 관한 시뮬레이션

Simulation for Electro-Optic Characteristics of the Fringe-Field Driven Reflective Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Display with One Polarizer

박지혁*, 정태봉*, 이종문*, 김용배**, 이승희*

(Chi Hyuck Park*, Tae Bong Jung*, John-Moon Rhee*, Yong Bai Kim**, and Seung Hee Lee*)

Abstract

We have performed computer simulation to obtain electro-optic characteristics of reflective hybrid aligned nematic liquid crystal displays (LCDs) driven by fringe field. The results show that the optimal retardation value ($d\Delta n$) of the cell is $0.289 \mu\text{m}$, which allows for the cell to have a practical cell gap of larger than $3 \mu\text{m}$ when manufacturing. A reflectance of the dark state is only 0.114 % for an incident light 550 nm. At this condition, the light efficiency of white state reaches 92.7 %. The display with optimized cell parameters shows that the contrast ratio greater than 5 exists over 60° of polar angle in all directions and lower driving voltage than that of fringe-field driven homogeneously aligned reflective LCD.

Key Words : Reflective liquid crystal display, Fringe-field switching, Hybrid aligned nematic

1. 서 론

반사형 액정 디스플레이는 backlight를 사용하지 않기 때문에, 얇고 가벼우며 소비전력이 적으면서 고정세 화면표시가 가능해서 mobile information display 소자로서 차츰 일반화되고 있다. 그러나 반사형 액정 디스플레이에 대해서 지금까지 여러 가지 모드가 연구되고 있음에도 불구하고, 독점적인 지위를 누릴 수 있을 만큼의 만족스러운 모드는 아직 등장하지 않았다[1]. 반사형 액정 디스플레이가 갖추어야 할 성능에는 반사율과 명암대비

비(CR)등의 전기-광학적 특성 외에도 생산하기 쉬운 구조와 옥내의 시인성이 뛰어나야 한다. 일반적인 반사형 디스플레이의 구조는 그 특성상 다층의 광학필름이 사용되어지고, 액정의 위상지연값($d\Delta n$)이 낮은 경우가 많다. 이러한 구조의 반사형 디스플레이가 설령 전기-광학적인 특성이 우수하다 할지라도 필름 수가 증가함에 따라 생산과정이 복잡해지고, 낮은 셀 갭으로 인해 생산성이 낮아진다. 뿐만 아니라, 사용 환경에 제한이 있는 굴절률 이방성 (Δn)이 작은 액정을 써야 하는 등의 문제가 있어서, 투과형 액정 디스플레이에 비해서 그다지 생산성이 높지 않다. 본 연구실에서는 fringe field switching (FFS) 모드를 응용한 투과형 액정 디스플레이와 액정의 배열이 homogeneously aligned (HA) 셀 구조에서 액정의 $d\Delta n$ 이 $\lambda/4$ 를 응용한 반사형 액정 디스플레이의 전기광학 특성에 관해 발표하였다[2-7]. 액정의 $d\Delta n$ 이 $\lambda/4$ 인 FFS 반사형

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

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

** : 건국대학교 화학과
2003년 1월 8일 접수, 2003년 5월 7일 1차 심사 완료
2003년 5월 13일 최종 심사 완료

액정 디스플레이는 편광판 1매와 액정셀로 이루어진 구조에서 별도의 위상필름을 부가하지 않고도 입사 파장이 550 nm일 경우에 비교적 높은 CR을 보이면서, 입사 파장에 대해서 광효율이 90 % 정도의 좋은 광 특성을 보였다. 다만, $\lambda/4$ 셀을 구현하기 위해서는 액정셀의 $d\Delta n$ 이 $0.1365 \mu\text{m}$ 가 되어야 하므로, 이러한 측면에서는 제조 공정상의 어려움이 있을 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 종래 투과형 액정 디스플레이에 적용하던 fringe field 구동형 hybrid aligned nematic (HAN) 모드[8-10]를 응용하여 반사형 액정 디스플레이의 광학 구조를 설계하고, 이에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 전기-광학 특성을 연구하였다.

2. 본 론

Fringe field 구동형 HAN 모드 셀은 그림 1과 같이 상부 배향층에 맞닿은 액정은 배향면에 수직으로 배향되고, 하부 배향층은 일반적인 FFS 모드와 같이 배향면에 수평으로 배향되어 있다. 수평 배향층은 전극이 형성된 면에 형성되고, 유전율이 이방성이 음인 액정의 경우 전계와 액정의 러빙 방향이 5° 에서 20° 의 각도를 이룬다. 전극의 모양은 좁은 리드 모양의 화소 전극이 나란히 형성되어 있다. 화소 전극과 절연층을 사이에 두고 상대 전극이 형성되어 있으며, 화소 전극과 상대 전극간에 형성되는 fringe field로 액정이 구동된다. 본 연구에서는 화소 전극의 폭을 $3 \mu\text{m}$ 로, 화소 전극 간 간격을 $4.5 \mu\text{m}$ 로 두었다. 상대 전극은 슬릿형이 아닌 평면 전극으로 되어 있고, 화소 전극과 상대 전극 사이에 두께 2500 \AA 와 유전상수 6.5를 가진 유전체를 두었다. 전압이 인가되지 않을 때에는 액정층이 아래쪽 수평 배향된 액정으로부터 위쪽 수직 배향된 액정까지 균일하게 펼쳐진 모양으로 배열되어 있다. 전압이 인가될 때는 펼쳐진 모양 그대로 전계에 반응하여 회전하는데 전체적으로 보면 펼쳐지면서 꼬인 모양이 된다.

컴퓨터 시뮬레이션은 먼저 셀 구조를 선정하고, 최적의 암(暗)상태를 구현하는 액정셀의 $d\Delta n$ 을 도출한 후, 도출된 $d\Delta n$ 에서 명(明)상태의 광효율과 전기광학 특성을 관찰하는 순서로 진행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 2×2 Jones extended matrix 방법으로 계산하였다[11]. 셀 구조는 1매의 편광판과 액정셀 그리고 반사판으로 normally black (NB) 모드가 되도록 구성하였다. 이를 위해서 수평 배향

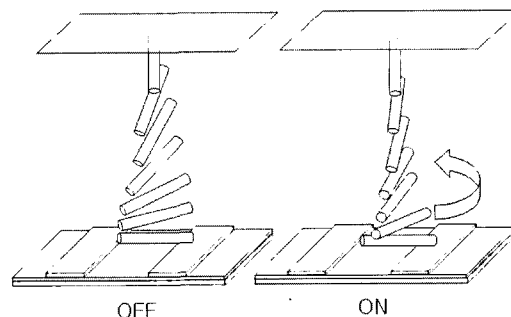


그림 1. Fringe field 구동형 HAN 모드의 on-off 시의 액정배열 (음의 액정의 경우).

Fig. 1. The configuration of the LC molecules in on and off state in the HAN-FFS mode (negative $\Delta\epsilon$ LC).

면의 액정 러빙 방향이 전극과 12° 의 각도를 이루도록 하였으며, 편광판의 투과축 방향이 액정의 러빙 방향과 45° 의 각도를 이루도록 하였다. 편광판의 투과율은 41.0 %이고, 반사판의 반사율은 100 %이다. 편광판과 반사판을 두었을 때의 반사율은 36.3 %이다. 입사 및 반사 경로에 따른 편광 진화는 반사형 FFS 모드와 같으므로, 액정셀이 $\lambda/4$ 로서 역할을 하도록 하였다. 액정셀은 전극이 있는 아래쪽 배향면은 수평 배향으로 두었고, 2° 의 프리틸트각 (θ_p)을 형성한다. 위쪽 배향면의 θ_p 는 90° 의 수직 배향으로 두어 액정이 수평과 수직의 hybrid 상태가 되도록 하였다. 액정의 전기적 이방성은 ϵ_{\parallel} 은 7.7, ϵ_{\perp} 은 3.7로서 $\Delta\epsilon$ 은 -4.0 이고, K_{11} , K_{22} , K_{33} 값은 각각 13.5 pN, 7.5 pN, 15.1 pN으로 두었다.

반사형 액정 디스플레이는 암상태의 구현이 가장 중요한 요소이다. 셀 갭을 $3.9 \mu\text{m}$ 로 일정하게 두고, 액정의 Δn 값을 변화시키면서 암상태의 반사율을 조사하였다. 그림 2는 $d\Delta n$ 에 따른 암상태의 반사율이다. 마치 수평 배향 셀에서의 $d\Delta n$ 에 따른 반사율 결과와 같은 사인 곡선을 이루고 있다. 이는 암상태가 액정층의 위상지연, 즉 편광 진화에 절대적으로 의존하고 있기 때문이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 입사파장이 550 nm일 때를 기준으로 $d\Delta n$ 이 $0.27 \mu\text{m}$ 에서 $0.31 \mu\text{m}$ 사이에서 각각 0.37 %와 0.65 %로 좋은 암상태를 보였다. 보다 세부적인 시뮬레이션으로 액정의 Δn 이 0.074 즉, $d\Delta n$ 이 $0.289 \mu\text{m}$ 일 때 암상태의 최저값인 0.114 %를 얻었다. 주목할만한 점은 이 같은 $d\Delta n$ 은 현재 일반적

으로 만들어지는 투과형 FFS 패널의 최적 $d\Delta n$ 이 $0.3 \mu\text{m}$ 인 것을 고려할 때 반사형 FFS-HAN 모드가 충분히 실용성이 있는 구조임을 입증하고 있는 것이다. 셀 갭이 $3.9 \mu\text{m}$ 일 경우에 적용될 액정의 Δn 값 0.074 는 현재 투과형 범용 액정디스플레이에 적용되고 있는 액정의 영역이다.

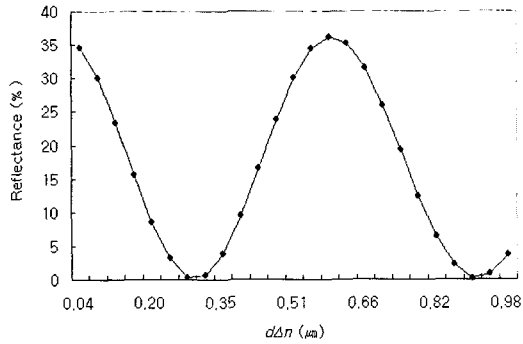
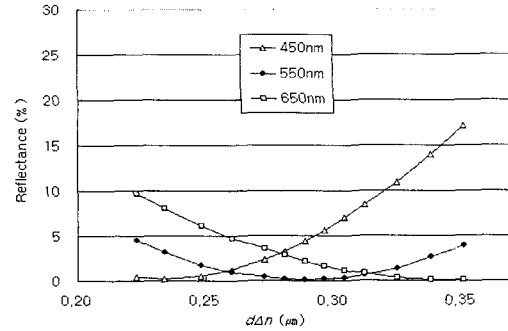


그림 2. 편광판 1매와 액정 셀 그리고 반사판으로 구성된 fringe field 구동형 반사형 HAN 셀 구조에서 입사파장이 550 nm일 때 암상태에서의 $d\Delta n$ 별 반사율.

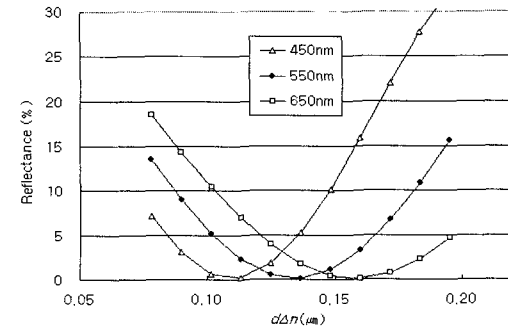
Fig. 2. The reflectance of a dark state as a function of $d\Delta n$ for incident light 550 nm in a fringe field driven reflective HAN cell with one polarizer and reflector.

위 결과에서 얻은 최적 $d\Delta n$ 값 $0.289 \mu\text{m}$ 에서 파장별 반사율을 조사하였다. 그림 3은 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드와 HA 모드의 암상태의 파장별 반사율을 비교한 것이다. 반사형 FFS 모드는 상하 배향면이 모두 수평으로 배향 되어있고, 액정셀이 $\lambda/4$ 역할을 하도록 하였다. 액정 러빙 방향과 편광판이 이루는 각도는 45° 로 하였다. 그림 3에서 보는 것과 같이 HAN 모드는 $d\Delta n$ 에 따른 반사율의 변화가 HA 모드에 비해서 보다 좋은 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 가장 좋은 암상태를 보이는 $d\Delta n$ 의 간격은 후자에 비해서 전자의 변화율이 적다. $d\Delta n$ 에 따른 파장별 반사율 변화가 적은 것과 최적 $d\Delta n$ 의 간격이 넓은 것은 모두 fringe field 구동형 HAN모드의 셀 갭 확대 효과에 의한 것이라 할 수 있다.

앞서 얻어진 암상태의 최적 Δn 값인 0.074 를 적용하여, 0 V부터 5 V까지 0.1 V 간격으로 전압별



(a)



(b)

그림 3. Fringe field 구동형 반사형 (a) HAN 모드와 (b) 수평 배열 모드의 입사파장에 따른 $d\Delta n$ 별 암상태의 반사 특성 비교.

Fig. 3. The comparison of reflectance characteristics at dark state for the fringe field driven reflective (a) HAN mode and (b) HA mode as a function of $d\Delta n$ for incident lights.

투과율을 조사하였다. 입사 파장을 550 nm로 기준으로 정면에서 최대 반사율 34.4 %를 얻었으며, 광효율로 환산하면 92.7 %이다. 구동 전압은 대략 3.7 V정도이고, 최대 반사율의 10 %가 되는 전압 (V_{10})은 1.5 V였으며, 반사율이 최대 반사율의 90 %가 되는 전압(V_{90})은 2.9 V였다.

그림 4는 전압 인가에 따른 반사율 곡선(V-R)이다. 서로 다른 파장에서도 파장별 암상태의 광누설 정도를 제외하고는 파장별 전압에 따른 반사율 곡선은 크게 다르지 않다.

그림 5는 $d\Delta n$ 에 따른 명상태의 광효율을 조사한 결과이다. 명상태는 반사율이 32 % 이상을 유지했

으며, 암상태와 달리 $d\Delta n$ 에 크게 의존하지 않는 특성을 보였다.

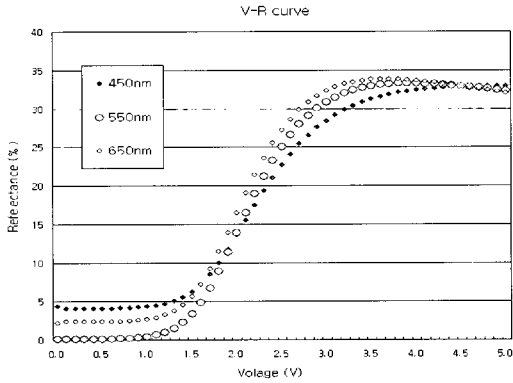


그림 4. Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드의 전압 인가에 따른 파장별 반사율 특성.

Fig. 4. The voltage-dependent reflectance characteristic of fringe field driven reflective HAN mode for different incident wavelengths.

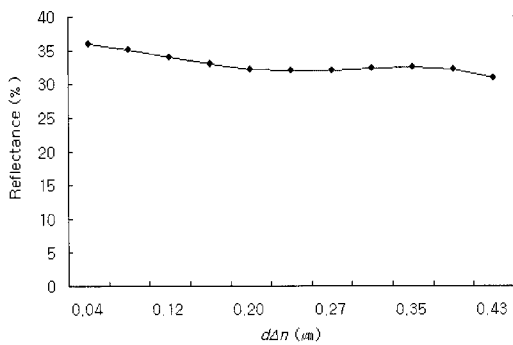


그림 5. Fringe field 구동형 반사형 HAN 셀 구조에서 입사파장이 550 nm일 때, 명상태에서의 $d\Delta n$ 별 반사율.

Fig. 5. The reflectance of a bright state as a function of $d\Delta n$ for incident light 550 nm in a fringe field driven reflective HAN cell.

그림 6은 인가 전압을 0.2 V 간격으로 해서 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드와 HA 모드의 V-R 결과를 비교한 것이다. Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드는 반사형 HA 모드보다

V-R 곡선의 경사가 급하고 따라서 최대 반사도에 도달하는 전압도 낮다. 이것은 천정 쪽 액정이 수직으로 배향된 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드에서 액정의 자유도가 더 높기 때문이다. 바꾸어 말하자면, HAN 모드는 HA 모드와 달리 천정 쪽에서 영향을 미치는 배향력이 없기 때문에 액정들이 전압에 반응하여 움직일 때의 저항이 그만큼 줄어든 것으로 해석할 수 있다.

표 1은 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드와 HA 모드의 구동전압을 비교한 것이다. 반사형 HAN-FFS 모드의 V_{10} 은 1.5 V이고, V_{90} 은 2.9 V이다. 반면에 반사형 HA-FFS 모드의 V_{10} 은 1.6 V이고, V_{90} 은 3.7 V이다. 전자가 후자보다 V_{10} 과 V_{90} 이 더 낮은 것을 알 수 있다.

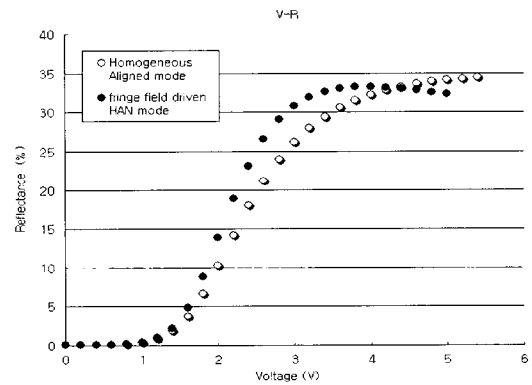


그림 6. Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드와 Homogeneous Aligned (HA) 모드의 전압에 따른 반사율 특성

Fig. 6. The comparison of voltage-dependent reflectance characteristics with fringe field driven reflective HAN mode and HA mode.

표 1. Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드와 HA 모드의 구동전압 비교.

Table 1. The comparison of driving voltage for fringe field driven reflective HAN and HA modes.

	V_{10}	V_{90}
Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드	1.5 V	2.9 V
HA FFS 모드	1.6 V	3.7 V

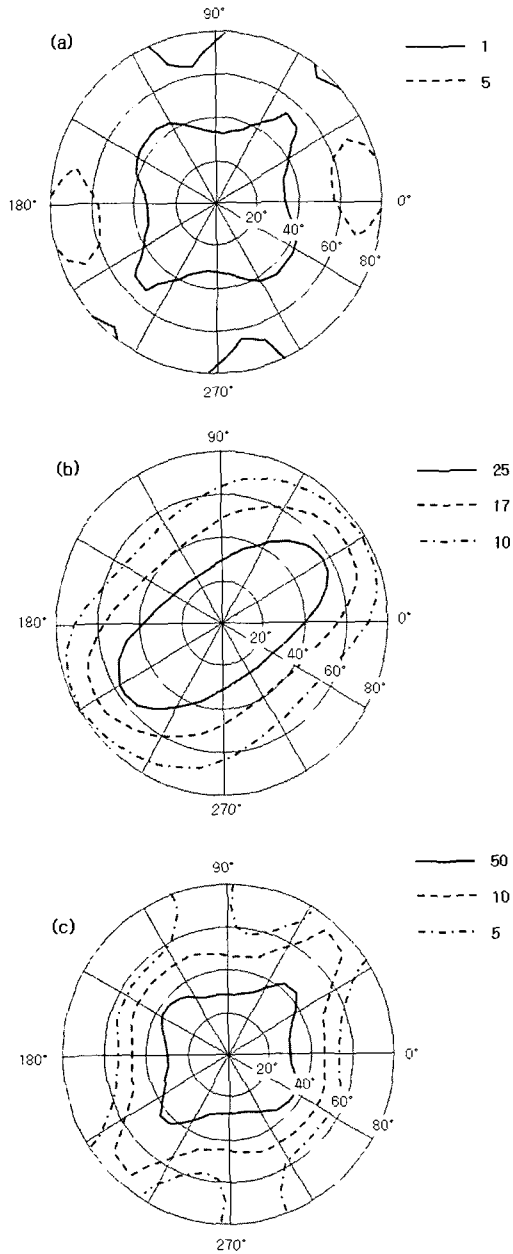


그림 7. 반사형 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드의 시야각 특성 (550 nm): (a) 암상태, (b) 명상태, (c) CR

Fig. 7. The viewing angle characteristics of fringe field driven reflective HAN mode for incident light 550 nm: (a) dark state, (b) white state, and (c) CR.

그림 7은 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드의 시야각을 나타낸 것이다. 그림 7(a)은 암상태의 반사율을 보인 것이다. 액정의 장축방향인 12°와 192°의 일부 영역을 제외하면 전체적으로 반사율이 5% 이하로 유지되며, 1% 이하인 영역도 극각 (polar angle) 40°에서 유지되고 있다. 액정의 단축 방향과 편광판의 흡수축 방향의 극각 60° 이상에서 반사율이 1% 이하의 영역이 나타나는 특징적인 현상도 보였다. 그림 7(b)은 명상태의 반사율을 보인 것이다. 액정 방향자의 장축 방향을 중심으로 타원형의 반사율을 보였다. 그림 7(c)은 CR을 보인 것이다. 입사파장 550 nm를 기준으로 살펴보면 CR이 5:1 이상인 영역이 상 60°/하 60° 좌 55°/우 55°이었으며, CR이 10:1 이상인 영역도 상/하 좌/우 모두 55° 이상이었다. 편광판의 투과축과 액정 러빙 방향에 대해서 90° 수직인 방향에서는 시야각이 특히 넓은 특성을 보였으며, 시야각 전체에 걸쳐서 고른 CR 특성을 보여 이상적인 형태를 보였다. 이는 액정 방향자가 전계에 대해서 위나 아래 방향으로 변형되는 것보다는 수평으로 회전하기 때문이다.

주목할 만 한 점은 액정이 대칭적으로 배열되어 있지 않음에도 불구하고 암상태와 CR의 모양이 대칭적이면서도 각 방향으로 고르게 나타났다는 것이다. 이것은 비록 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드의 액정 배열이 대칭적이지는 않으나 반사형에 적용되어 빛이 액정층을 두 번 통과하게 되어, 결과적으로는 대칭적인 액정층을 통과하는 것과 같은 효과가 있게 되므로, 이러한 고른 CR을 보이게 된 것으로 이해할 수 있다.

암상태에서의 광 누설 정도의 파장 의존성은 역시 최대 C/R을 갖는 셀의 $d\Delta n$ 이 파장마다 다르기 때문이다. 이를 완화시키기 위해서 $\lambda/4$ 위상차판에 의한 광 대역 반사형 셀 설계 등의 고려가 필요하다.

3. 결론

본 연구에서는 광학특성 뿐 아니라 생산성 측면에서도 실용성을 갖춘 반사형 액정 디스플레이 소자로서 fringe field 구동형 반사형 HAN 모드를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 특성을 연구하였다. 액정층의 $d\Delta n$ 을 실용적인 수준인 $0.289 \mu\text{m}$ 까지 끌어올릴 수 있다. 전기 광학적인 측면에서 반사형 FFS-HAN 모드는 시야각이 넓고 반사율이 높은

특성을 가지고 있으며, 균일한 화면과 안정적인 동작 특성을 보여 주었다. 뿐만 아니라 $\lambda/4$ 셀 반사형 FFS 모드의 장점을 그대로 유지되면서도 셀 갭이 실용성이 있는 실제적인 수준으로 구현이 가능하다는 것이 가장 큰 장점이다. 이는 액정 방향자가 수직에 가까울수록 실제로 효과를 내는 광학적 이방성이 감소하므로 전체적으로 셀 갭에 비하여 $d\Delta n$ 이 감소하게 된다. Fringe field 구동형 반사형 HAN 모드의 수직 배향면 액정은 셀 갭을 확대하는 역할을 하고, 수평 배향쪽 액정은 on-off를 담당하는 역할을 하는 역할 분담이 이루어지는 셈이다. 또한, fringe field 구동형 반사형 HAN 모드는 상판의 수직 배향된 액정이 하판의 수평 배향된 액정의 움직임의 자유도를 높이는 역할을 하여, fringe field 구동형 HA 모드보다 구동전압이 낮다. 광 특성 외의 장점으로는 액정셀의 수직 배향층은 러빙을 하지 않아도 되므로 공정이 단순화되며, 이 수직 배향으로 인해 수평 배향 셀보다 러빙 공정이 하나 줄어드는 공정상 이점이 있다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] T. Ogawa, S. Fujita, Y. Iwai, and H. Koseki, "The trend on the color and gray reflective LCDs for future electronic paper", SID'98 Digest, p. 217, 1998.
- [2] S. H. Lee, 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.
- [3] H. Y. Kim, J. W. Koh, J. D. Noh, D. S. Seo, and S. H. Lee "유전율 이방성이 음인 액정을 이용한 이중도메인 FFS 모드의 전기 광학 특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 8호, p. 720, 2002.
- [4] 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", SID '01, p. 484, 2001.
- [5] C. H. Park, T. B. Jung, H. Y. Kim, S. H. Lee, "1매의 편광판으로 구성된 반사형 Fringe Field Switching mode의 전기광학 특성", Proceeding of 2002 Spring Symposium of KIEEME, p. 136, 2002.
- [6] T. B. Jung, C. H. Park, H. Y. Kim, S. H. Hong, and S. H. Lee, "A reflective liquid crystal display with Fringe-Field Switching mode", Proc. of the 5th KLCC'02, p. 77, 2002.
- [7] T. B. Jung, C. H. Park, J. M. Rhee, Y. B. Kim, and S. H. Lee, "1매의 편광판으로 구성된 반사형 Fringe-field Switching Mode의 전기광학 특성", 전기전자재료학회논문지, 16권, 2호, p. 131, 2003.
- [8] S. H. Hong, Y. H. Jeong, H. Y. Kim, and S. H. Lee, "Novel nematic liquid crystal device associated with hybrid alignment controlled by fringe field", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, Part 2, No. 3B p. L272, 2001.
- [9] Y. H. Jeong, H. Y. Kim, and S. H. Lee "프린지 필드에 의해 구동되는 하이브리드형 네마틱 액정 디스플레이의 전기광학 특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 6호, p. 524, 2002.
- [10] Y. H. Jeong, H. Y. Kim, W. G. Lee, H. S. Park, W. C. Kim, and S. H. Lee, "Hybrid aligned nematic liquid crystal display driven by fringe electric field with low driving voltage and fast response time", IDW'02, p. 185, 2002.
- [11] A. Lien, "Extended Jones matrix representation for twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence", Appl. Phys. Lett., Vol. 57, No. 26, p. 2767, 1990.