

1매의 편광판으로 구성된 반사형 Fringe-field Switching Mode의 전기 광학 특성

Electro-optic Characteristics of the Fringe-field Driven-reflective Liquid Crystal Display with One Polarizer

정태봉*, 박지혁**, 이종문*, 김용배***, 이승희*

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

Abstract

We have performed computer simulation to obtain electro-optic characteristics of reflective liquid crystal display (LCD) using wide viewing angle LC mode, fringe field switching(FFS). Unlike other reflective LCD modes, in the FFS mode, the LC director rotates in plane so an application to reflective display consisted of a polarizer, LC layer and reflector is possible. When an incident light is 550nm, the optimal cell retardation value is 0.1365 μ m and the efficiency of reflectivity is high over 90% with very little wavelength dispersion. Further, we have studied a new reflective display with polarizer, optical compensation film with half plate, LC plus reflector. The display with optimized cell parameters shows high contrast ratio (CR) over 130 with high light efficiency over 90% at normal direction and the CR greater than 5 exists over 60° of polar angle in all directions.

Key Words : Reflective display, Fringe field switching, Wide viewing angle, Compensation film

1. 서 론

반사형 액정 디스플레이는 외부 광원을 사용하지 때문에 backlight를 사용하는 투과형에 비해서 얇고 가벼우며 소비전력이 적고 옥외 시인성이 뛰어나 mobile information display에 적합하다[1]. 지금까지 많은 반사형 디스플레이 모드가 제안되었지만 화질은 아직까지 충분하지 못할뿐더러 투과형 디스플레이보다 셀 설계가 더욱더 복잡해진다. 반사형 모드 중에서 reflective twisted nematic (R-TN) 모드는 셀의 위상지연 값이나

twisted angle에 대해서 컴퓨터 시뮬하였으며, 광시야각과 고속 응답성을 가지는 reflective optically compensated bend (R-OCB) 모드 그리고 편광판을 사용하지 않는 guest-host (GH) 모드와 polymer dispersed liquid crystal (PDLC) 모드가 제안되어졌다. 그 중에서도 R-TN 모드와 R-OCB 모드는 광학 위상 필름을 최적화함으로써 좋은 화질을 가진다[2,3].

투과형 디스플레이 중에서 in-plane switching (IPS) 모드는 시야각 특성은 좋으나 투과율이 낮아 반사형 디스플레이의 적용이 어려운 반면에 배향막에 수평 배열된 액정이 전계 인가 시 기판에 거의 평형을 유지하면서 구동되는 FFS 모드는 넓은 시야각과 높은 투과율을 보인다[4-6]. 따라서 투과형 FFS 모드가 반사형 디스플레이로서 적용이 가능하다. FFS 모드로 가능한 반사형 디스플레이는 여러 종류가 있고 편광판을 2매 사용하거나 편광판을 1매 사용하면서 액정을 반과장판으로 사

* : 전북대학교 신소재공학부
(전북 전주시 덕진동 1가 664-14)
Fax : 063-270-2341
Corresponding Author : lsh1@moak.chonbuk.ac.kr
** : Hydis LCO 연구소, 연구 3실
*** : 건국대학교 화학화
2002년 9월 5일 접수, 2002년 10월 22일 1차 심사완료,
2002년 11월 23일 최종 심사완료

용 시의 연구는 종래에 발표되었다[7,8]. 반사형 디스플레이에서 가장 요구되는 화질은 고반사율과 고명암대비비 (CR) 인데, 종래 반사형 FFS 모드의 연구 결과를 보면 편광판 2매보다는 1매 사용했을 때가 반사율이 더 좋으나, 편광판 1매와 반과장판 액정을 적용했을 경우에는 전계 인가시 액정이 22.5° 틀어지므로 구동 전압이 다른 경우보다 매우 낮지만, 시차 (parallax) 문제가 존재한다. 뿐만 아니라 FFS 모드는 액정이 수평으로 균일하게 유지되면서 구동하므로, 구동에 따른 액정셀의 굴절률 변화도 균일하게 변화된다. 이는 동적 광 위상필름으로서의 이상적인 조건이므로 반사형 디스플레이에서 좋은 특성을 기대할 수 있다[9,10].

본 연구에서는 편광판 1매를 사용하면서 시차도 존재하지 않는 새로운 반사형 FFS 셀 구조를 연구하였고, 1매의 광학 위상필름을 사용해서 기존의 셀 구조를 크게 변화시키지 않고 셀 특성이 파장의존도가 적은 반사형 디스플레이를 제안하였다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

2.1 Polarizer + LC + Reflector

본 논문에서는 반사형 FFS 모드의 전기-광학적 특성에 대해서는 2 X 2 Jones extended matrix [11]에 의해서 컴퓨터 시뮬레이션을 하였으며, 셀 구조는 편광판 1매와 액정셀 그리고 반사판으로 이루어진 NB모드를 채택하였다.

구동전극은 일반적인 투과형 FFS와 동일하게 구성하였고, 공통전극은 평면전극으로 되어 있으며, 두께 2500Å와 유전상수 6.5를 가진 절연체를 사이에 두고 화소전극이 배치되어있다. 화소전극의 폭은 3μm 이고, 화소 전극간 거리는 4.5μm이다. 액정은 유전율 이방성(Δε)이 -4.5이고 탄성계수가 K₁= 13.5pN, K₂= 6.0pN, K₃=15.1pN인 액정을 사용하였으며, 액정의 초기 배열은 필드의 수평성분 방향에 대하여 액정의 방향자를 12°로 두었고, pretilt각은 2°로 두었다.

그림 1에서 보는 것과 같이 NB모드를 구현하기 위해서는 액정 셀이 λ/4판으로서의 역할을 해야 하며, dark state에서는 편광판의 투과축과 액정 방향자가 45°를 이룬다. 이 때의 편광 상태는 입사광이 편광판을 지나면 선편광된 빛이 되고, 이 빛은 액정 방향자와 45° 틀어져 있어서 원편광된 빛이 되고 다시 반사판과 액정층을 지남으로써 처음 들어온 선편광된 빛과 90° 틀어져서 편광판에 의해서 차단되므로 dark state를 구현한다. 이와는 반대로 bright state에서는 액정층이 전기장에 의

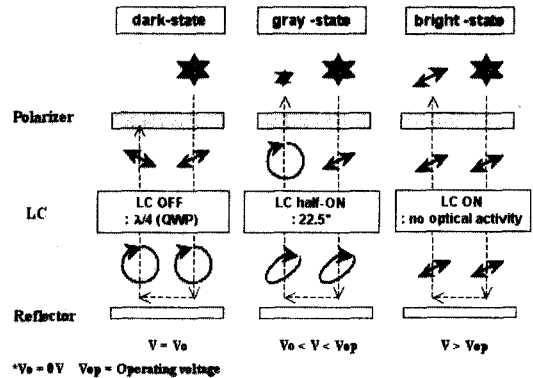
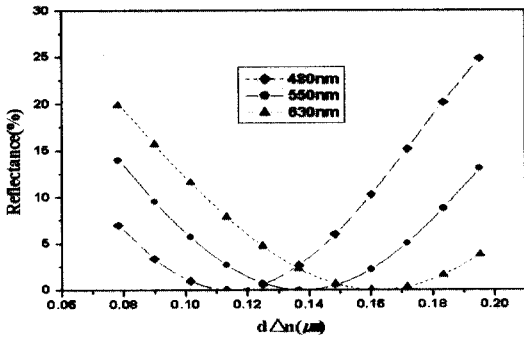


그림 1. 편광판 1매와 액정층만 사용한 반사형 액정셀에서의 빛의 편광 상태.

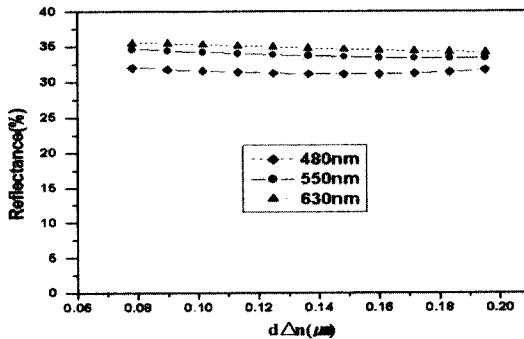
Fig. 1. Polarization state of the light in a reflective LC cell with one polarizer and the LC layer.

해 수평으로 회전하여 편광판의 투과축과 액정 방향자가 일치하여 위상 지연을 일으키지 않고 빛이 편광판을 통과하게 된다. gray state를 나타내기 위해서 액정의 방향자를 22.5°만 회전시키면 액정층을 두 번 통과한 빛은 처음 선편광된 빛이 원편광된 빛으로 편광 상태가 변화 되어져서 들어오는 빛에 대해서 50%만 투과된다.

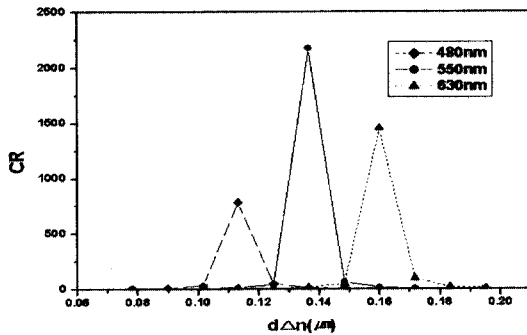
액정 셀의 최적 dΔn을 구하기 위해서 액정 층의 두께를 3.9μm로 일정하게 유지하고 액정의 Δn을 변화시켜 최적의 dΔn을 구했다. 그림 2는 dΔn에 따른 입사파장에 대한 on-off시 반사율 및 명암대비비를 나타낸 것이다. 1매의 편광판 반사율은 대략 35%정도이며 이를 광효율 100%로 설정하였다. 그림 2(a)는 off-state일 때 반사율을 나타낸 것인데, 입사파장이 작을수록 최적 dΔn이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 입사파장별 최적 dΔn이 다르다는 것을 보여주는데, 이것은 액정이 가지는 파장에 따른 굴절률 이방성이 다르기 때문이다. 그러므로 가시광선이 입사할 때 최적 dΔn외에서는 빛샘이 발생하고 cell gap margin이 매우 작음을 알 수 있다. 그림 2(b)는 on-state일 때의 반사율을 나타낸 것이고, 입사파장별 반사율은 대부분 31%이상이므로 매우 높을뿐더러 광효율 또한 90%이상이며, dΔn에 따라서 파장 의존성이 매우 작음을 보여준다. 반사형 디스플레이에서는 on-state의 반사율도 중요하지만 그보다 off-state에서 입사파장에 대해서 어



(a) 입사 파장별 off-state의 반사율



(b) 입사 파장별 on-state의 반사율



(c) 입사 파장별 CR

그림 2. 편광판 1매와 액정셀 그리고 반사판만으로 구성된 반사형 셀 구조에서 입사 파장 480nm, 550nm, 630nm에서의 $d\Delta n$ 별 (a)off-(b)on state의 반사율 및 (c)CR.

Fig. 2. Reflectance of (a)dark and (b)white states and the (c)CR as a function of $d\Delta n$ for incident lights 480nm, 550nm, and 630nm in a reflective LC cell with one polarizer and the LC layer.

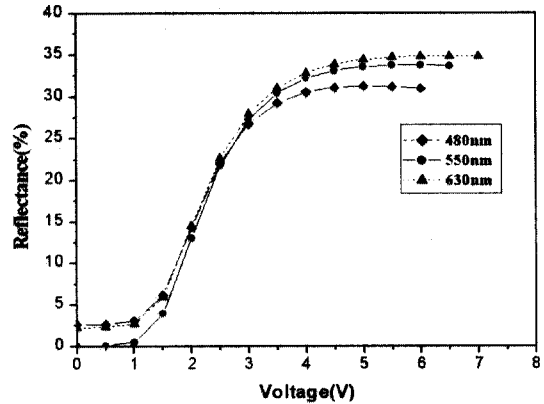


그림 3. 편광판 1매와 액정층만 사용한 반사형 액정셀에서 입사 파장이 550nm에서 액정의 $d\Delta n = 0.1365\mu m$ 일 때 입사파장별 전압에 따른 반사율.

Fig. 3. Voltage-dependent reflectance for an incident lights 480nm, 550nm, and 630nm in a reflective LC cell with one polarizer and the LC layer that the cell retardation value is $0.1365\mu m$ at 550nm.

는 정도 어둠을 나타내는가가 디스플레이의 화질을 좌우한다. 그림 2(c)는 CR을 나타내는데 입사 파장별 최대 CR은 550nm에서 매우 큰 값을 가지며 다른파장 대에서는 상대적으로 매우 낮음을 알 수 있는데, 이는 초기 dark state가 완벽하지 못하고 빛샘이 존재하기 때문이다. 뿐만 아니라 컴퓨터 시뮬레이션 결과 CR값이 가장 좋은 $d\Delta n$ 은 입사파장이 550nm일 경우 $0.1365\mu m$ 이고 이는 액정셀을 $\lambda/4$ 판으로 두고 계산한 값과 크게 차이가 나지 않는다.

그림 3은 액정셀의 $d\Delta n$ 이 $0.1365\mu m$ 일 때 입사 파장에 따른 전압-반사율(V-R) 그래프이다. 그래프에서 보는 것과 같이 off-state일 때 입사파장이 550nm를 제외하고는 다른 파장에서는 빛샘이 존재하는 것을 알 수가 있고, 파장별로 전압 인가시 최대 반사율은 30% 이상이다. 표 1은 입사파장에 따른 CR을 나타낸 것인데 그림 3과 마찬가지로 입사 파장이 550nm를 제외하고는 좋은 특성을 나타내지 못한다. 이러한 현상은 액정 자체가 가지는 입사 파장에 대해서 굴절률 이방성이 다르기 때문에 생기는 현상이다. 액정이 가지는 파장 의존성을 줄일 수 있는 방안으로는 액정의 셀 갭과 color filter의 두께를 각각 달리해서 입사하는 파장에 대해서 각각 $\lambda/4$ 만큼의 위상지연을 일으킬 수 있도

표 1. 편광판 1매와 액정층만 사용한 반사형 액정 셀의 컴퓨터 시뮬레이션 결과.

Table 1. Computer simulation result of a reflective LC cell with one polarizer and the LC layer.

	480 mm	550 mm	630 mm
Rmin(0V)	2.7 %	0.01%	2.28%
Rmax(5.4V)	31.1 %	33.7%	34.7%
CR	11	2174	15

특 하는 방법이 있다. 그러나 이는 입사하는 파장별 V-R 곡선이 달라지기 때문에 이러한 방법으로는 근본적인 파장 의존성을 해결할 수는 없는데, 본 연구에서는 이와는 달리 본래의 셀 구조를 크게 변화시키지 않고 1매의 광 보상 필름을 사용해서 액정 자체가 가지는 파장 의존성을 근본적으로 해결할 수 액정셀 구조를 제안하였다.

2.2 Polarizer + λ/2 + LC + Reflector

기존의 반사형 셀 구조를 크게 변화 시키지 않고 단지 광학 보상필름을 사용하여 액정의 파장 의존성을 줄일 수 있는 셀 구조는 그림 4에 나타나 있다. 액정의 리빙 방향은 필드방향에 12°로 놓여져 있으며, 보상 역할을 하는 λ/2 plate는 필드 방향에 대해서 72°로 틀어지고, 편광판은 87° 틀어져 있다. 그림 4(a)는 off-state를 나타낸 것인데 입사광이 편광판에 의해서 선편광된 빛이 되고 이 선편광되어진 빛이 λ/2 plate와 15° 틀어져서 처음 들어온 빛의 진행 방향에 대해서 30° 회전되어진 선편광된 빛이 되고 다시 이 빛은 액정 방향자와 45° 틀어져서 들어온 선편광 빛이 원편광 되어지고 반사판에 의해서 다시 액정층과 λ/2 plate를 지남으로써 처음 들어온 선편광 빛에 대해서 90°회전된 빛이 되어진다. 그러므로 편광판 투과축과 90°틀어져서 편광판에 의해서 차단되어지므로 dark state가 구현된다. 그림 4(b)는 on-state인데 유전율 이방성이 음인 액정을 사용하였기 때문에 전압이 인가되면 액정 방향자가 필드 방향과 수직으로 틀어지므로 어느 전압 하에서는 액정의 방향자와 λ/2 plate가 평형을 이루어져 액정 셀이 위상 지연을 일으키지 않으므로 선편광된 빛이 편광판 투과축과 일치해서 빛이 투과된다. 여기서 사용되는 λ/2 plate 1매의 투과율은 대략 90%정도이고, 광대역 (wide-band) type이 아니라 normal λ/2 plate이고, normal λ/2 plate 와 액정층이 특정

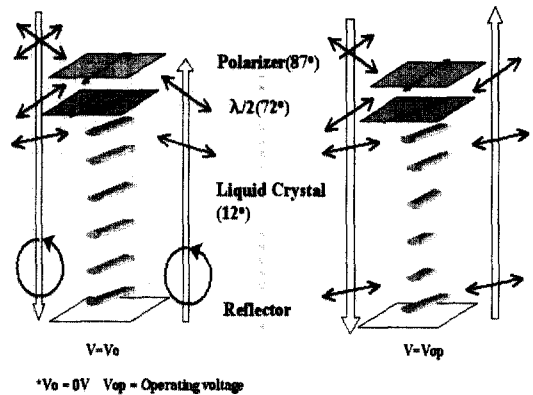


그림 4. 편광판 1매와 λ/2 광학 보상필름 그리고 액정층을 사용한 반사형 셀 구조와 전압 인가시와 무인가시 빛의 편광 변화.

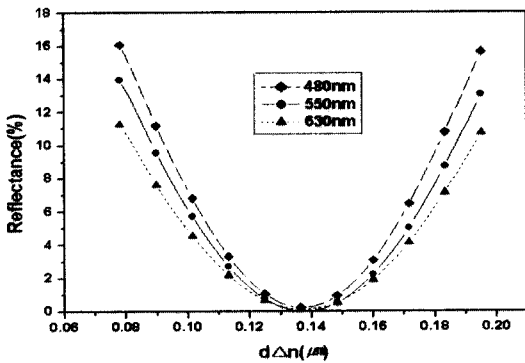
Fig. 4. Cell structure and polarization state of the light for (a)off-(b)on state in a reflective LC cell with a polarizer, half-plate compensation film and the LC.

각을 이룸으로써 자체적으로 입사 파장에 대해서 보상이 이루어져서 광대역 λ/4 plate가 된다.

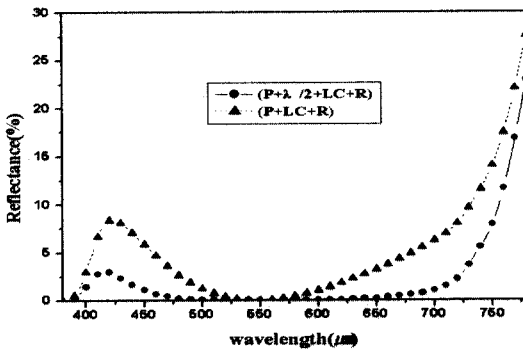
그림 5는 1매의 편광판과 액정층 그리고 λ/2 plate를 사용한 반사형 액정셀의 dΔn에 따른 off-state의 반사율이며, 액정셀의 dΔn이 0.1365μm일 때 액정셀만 사용한 경우와 액정셀과 λ/2 plate를 사용한 반사형 액정셀 구조에서의 입사파장에 따른 빛샘의 정도를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 off-state일 때의 입사 파장에 대한 액정셀의 dΔn에 따른 반사율인데 액정셀의 dΔn이 0.1365μm일 때 모든 파장에 대해서 거의 완벽한 dark state를 구현한다. 뿐만 아니라 cell gap margin이 기존보다 넓어서 실제 셀 제작 시 수율이 향상될 것이고 뿐만 아니라 입사파장별 CR도 훨씬 좋아질 것이다. 그림 5(b)에서는 액정셀의 dΔn이 0.1365μm일 때 액정만 사용할 때와 액정과 λ/2 plate를 사용했을 때 빛샘 정도를 비교 한 것인데 전자보다는 후자가 off-state일 때의 빛샘 정도가 적은 것을 볼 수 있으며, 이는 반사형 디스플레이에서 매우 중요한 CR에 큰 영향을 미치는 요인이다.

그림 6은 액정셀의 dΔn이 0.1365μm이고 λ/2 plate를 사용 하였을 때 전압에 따른 반사율을 나타낸 것이고 편광판 1매와 액정셀만 사용할 때와

비교해 보면 전파장에 대해서 전압을 인가하기 전 상태인 dark state가 거의 완벽하게 구현되는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 전압에 따른 반사율 곡선도 입사 파장에 대해서도 유사함을 보인다. 그런데 전압에 따른 반사율 그래프에서 특이한 점이 존재하는데, 입사파장이 550nm를 제외하고는 480nm와 630nm에서 전압을 인가하면 반사율이 증가하지 않고 완벽한 어둠상태를 보였으며 전압을 더 높이면 반사율이 다시 증가한다. 이는 550nm를 제외한 다른 파장에 대해서는 최적 조건이 달리 존재함을 알 수 있으므로 보다 완벽한 어둠 상태를 얻을 수



(a) 입사 파장별 off-state



(b) 입사 파장별 빛샘

그림 5. 입사파장에 따른 액정 셀의 $d\Delta n$ 별 dark-state의 (a)반사율 및 액정 셀의 $d\Delta n=0.1365$ 일 때 각각의 경우에 대한 off-state의 (b)빛샘 정도.

Fig. 5. (a) Reflectance as a function of $d\Delta n$ for each incident light and (b) wavelength-dependent light leakage for two different systems when the cell retardation value is $0.1365\mu m$.

있다. 실제로 디스플레이를 구동할시 480nm와 630nm에서는 0V가 아닌 임의의 전압을 걸어줌으로써 보다 나은 dark-state를 가짐으로 디스플레이 화질이 크게 향상될 것이다. 그리고 표 2는 편광판 1매와 $\lambda/2$ plate 그리고 액정셀을 사용한 반사형 셀 구조에서 on-off state의 반사율 및 구동 전압, CR 그리고 광효율을 나타낸 것인데, on-state일 때에도 전파장에 대해서 30%이상의 높은 반사율 및 86%이상의 광효율을 나타낸다. 구동 전압은 650nm의 파장에서만 조금 높은 구동 전압을 보이거나 나머지 파장에서는 매우 낮다.

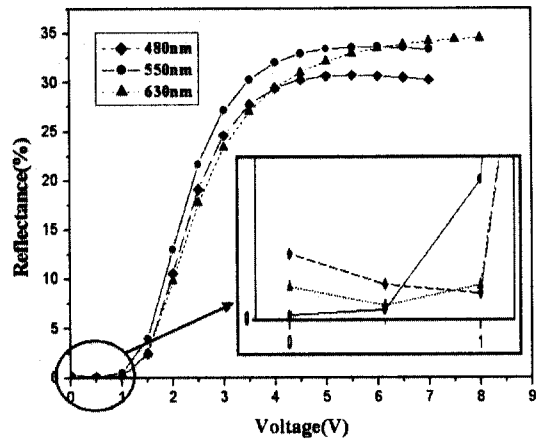


그림 6. 액정의 $d\Delta n=0.1365\mu m$ 이고 $\lambda/2$ plate를 사용한 반사형 셀 구조에서 입사파장별 전압에 따른 반사율.

Fig. 6. Voltage-dependent reflectance for an incident light lights 480nm, 550nm and 630nm in a reflective LC cell with one polarizer and half plate.

표 2. 편광판 1매와 $\lambda/2$ plate 그리고 액정 셀을 사용한 반사형 액정 셀의 컴퓨터 시뮬레이션 결과.

Table 2. Computer simulation results of a reflective LC cell with one polarizer and half-plate.

	480nm	550nm	630nm
Rmax(%)	30.1	32.9	32.8
Vmax(V)	4.4	4.5	6.4
CR	127	2125	285
Light Efficiency(%)	86	94	96

그림 7은 편광판 1매와 $\lambda/2$ plate 그리고 액정셀로 구성되어진 반사형 셀 구조에서 on-off state일 때의 등 반사율 곡선과 등 명암 대비율 곡선이다. off-state는 0V이며, on-state는 반사율이 최대인 전압이다. 그림 7(a)는 off-state일 때 등 반사율 곡선으로 전 방향에 대해서 극각 40°까지 dark state가 완벽하고, 반사율 곡선이 서로 대칭적으로

발생한다. 그림 7(b)는 on-state일 때의 등 반사율 곡선인데 시야각에 따른 반사율의 변화가 입사파장에 대해서 상대적으로 균일하게 발생한다. 그림 7(c)는 등 명암대비율 곡선인데 정면에서부터 60°까지 시야각 반경에서는 CR이 5:1 이상임을 알 수 있고, 파장별 CR도 최소 130이상으로 우수하다. 그러므로 편광판 1매와 액정셀만 사용한 반사형

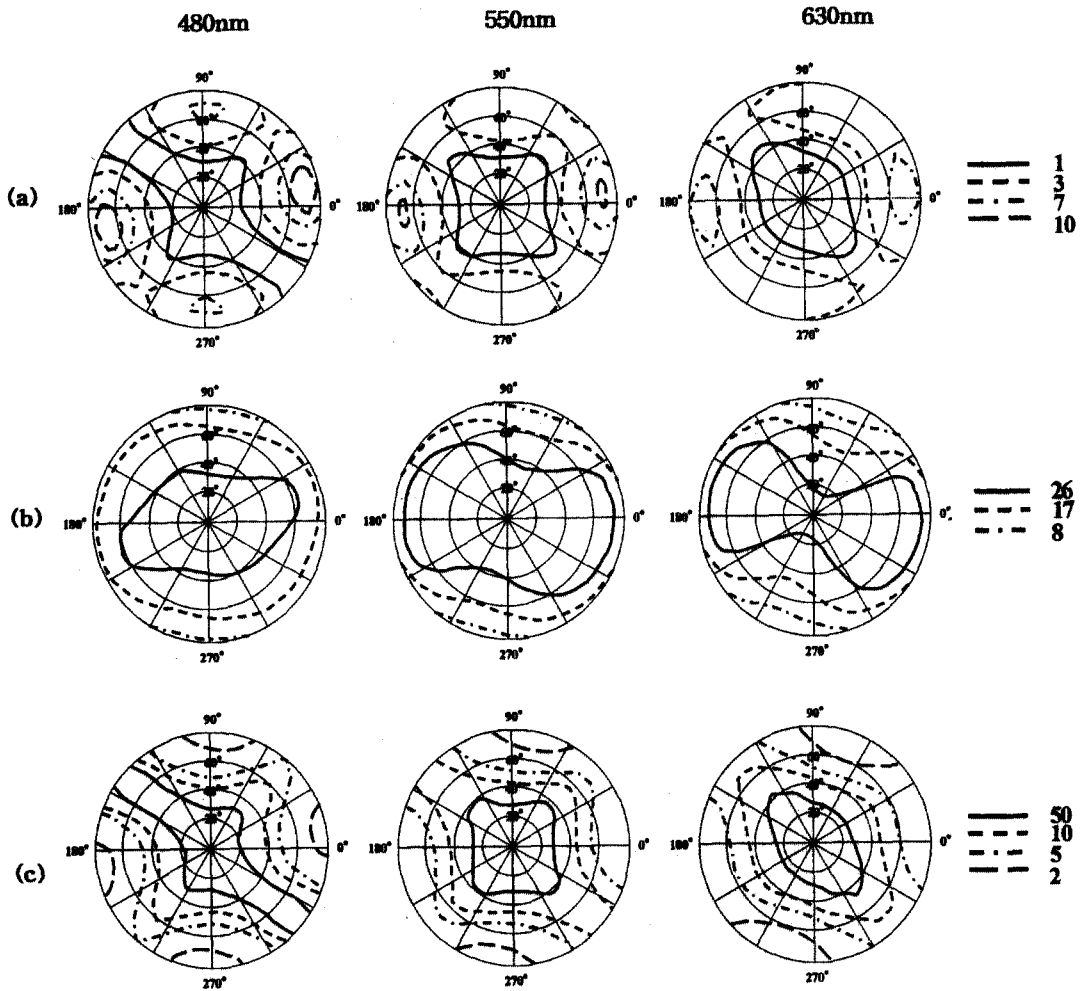


그림 7. (a) 전압 무인가시 등 반사율 곡선.
 (b) 전압 인가시 등 반사율 곡선.
 (c) 등 명암 대비율 곡선.

Fig. 7. (a) Iso-reflectance contour at off-state.
 (b) Iso-reflectance contour at on-state.
 (c) Iso-contrast contour.

셀 구조보다는 편광판 1매와 광학 보상 필름 그리고 액정 셀을 사용한 셀 구조가 대체적으로 우수한 시야각 특성을 나타낸다.

3. 결론

투과형 디스플레이에서 시야각 특성이 우수하고 또한 반사율도 높은 FFS 모드를 반사형 디스플레이에 적용하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 편광판과 액정 그리고 반사판만으로 구성되어진 반사형 셀에서 대부분의 파장 대에서 반사율이 31%이상과 90%이상의 높은 광효율을 보였으며 입사파장이 550nm일 경우에만 높은 CR을 가졌다. 이는 반사형 디스플레이로 구현할 수 있지만 파장의존성이 매우 크다는 것을 알 수가 있다. 이는 액정이 본질적으로 가지는 복굴절 값의 파장 의존성 때문인데 이를 극복하기 위해서는 종래의 셀 구조를 바꾸지 않고 단지 광학 보상 필름인 normal $\lambda/2$ plate 1장을 사용해서 이런 단점을 극복할 수 있다. 일반 $\lambda/2$ plate와 액정 방향자를 특정 각을 이루도록 하면 wide-band $\lambda/4$ plate가 되어서 전 파장에 걸쳐 거의 완벽한 dark state를 구현할 수 있다. off-state일 때 모든 파장에서 우수한 dark state를 보였으며, on-state일 때의 반사율이 30% 이상으로 광효율 또한 86%이상으로 우수하고 CR도 전파장에 대해서 130 이상임을 알 수 있다. 그리고 정면에서부터 60°까지의 시야각 반경에서는 CR이 5:1 이상임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 IMT-2000 지원금 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] Shin-Tson Wu, Chiung-Sheng Wu, and Chen-Lung KUO, "Reflective direct-view and projection display using twisted-nematic liquid crystal cells", Jpn. J. Appl.

Phys., Vol. 36, p. 2721, 1997.

- [3] D. S. Seo, "반사형 LCD의 기술현황", 전기전자재료학회지, 12권, 2호, p. 19, 1999.
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] S. H. Lee, S. H. Hong, H. and Y. Kim, D. S. Seo, G. D. Lee, and T. H. Yoon, "Reflective display associated with in-plane rotation of nematic liquid crystal", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, p. 5334, 2001.
 [8] S. H. Lee, S. H. Hong, H. Y. Kim, J. H. Park, W. G. Lee, G-D. Lee, and T-H. Yoon, "A reflective liquid crystal display with fringe-field switching mode", SID'00, p. 763, 2000.
 [9] C. H. Park, T. B. Jung, H. Y. Kim, and S. H. Lee, "1매의 편광판으로 구성된 반사형 Fringe Field Switching Mode의 전기광학 특성", 한국전기전자재료학회 2002춘계학술대회 논문집, p. 136, 2002.
 [10] 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.
 [11] A. Lien, "Extended jones matrix representation for twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence", Appl. Phys. Lett., Vol. 57, p. 2767, 1990.