

# 폴리머 격벽에 의해 화소고립된 구조의 이중주파수 쌍안정 네마틱 액정셀의 전기광학 특성

이성룡 · 이중하 · 신재훈 · 송동한 · 윤태훈 · 김재창<sup>†</sup>

부산대학교 전자공학과

☎ 609-735 부산광역시 금정구 장전2동 산30번지

(2008년 3월 18일 받음, 2008년 4월 25일 수정본 받음, 2008년 4월 28일 게재 확정)

본 논문에서는 왼손(left-handed)과 오른손(right-handed) 방향으로 각각 180°트위스트( $\pi$ -twist)된 액정상을 두 개의 안정상태로 가지는 쌍안정(bistable) 액정 디스플레이(liquid crystal display)를 제안한다. 제안된 소자는 액정과 자외선경화 폴리머 물질의 혼합물의 비등방성 상분리 방법으로 형성된 격벽에 의해 화소고립된(pixel-isolation) 구조를 가지며, 인가전압의 주파수에 따라 유전을 이방성의 부호가 바뀌는 이중주파수(dual-frequency) 특성의 네마틱(Nematic) 액정을 사용한다. 두 안정된 액정상 사이의 스위칭은 인가전압의 주파수를 연속적으로 변화시킴으로써 이루어지며, 주파수 변화에 따른 액정의 유체 효과에 의해 발생하므로 응답특성이 매우 빠르다. 두 액정상은 카이랄 도펀트(chiral dopant)가 아니라 격벽이 가지는 앵커링(anchoring)의 영향으로 안정화됐기 때문에 거의 동일한 탄성에너지(elastic free energy)를 가지게 되어 우수한 메모리 특성을 나타낸다. 또한, 위상지연필름을 이용한 투과형 광학보상을 통해 높은 정면 명암비(contrast ratio)를 가질 수 있다.

주제어: 쌍안정 액정디스플레이, 이중주파수, 180°트위스트, 화소고립, 폴리머 격벽

## I. 서 론

쌍안정 액정 디스플레이(liquid crystal display)는 별도의 전계를 인가하지 않고도 두 가지의 액정상을 유지할 수 있는 소자로서, 전자종이 및 전자책 등에 적용 가능한 저소비전력 디스플레이로 주목받고 있다. 현재까지 BTN(Bistable Twisted Nematic) 모드,<sup>[1]</sup> BCSN(Bistable Chiral Splay Nematic) 모드,<sup>[2]</sup> *BiNem*<sup>®[3]</sup> 등 다양한 쌍안정 액정표시 모드들이 제안되어져 왔으며, 각각의 모드들은 구동방법 및 액정상의 안정성 측면에서 서로 다른 특징들을 가지고 있다. 0°와 360°트위스트 상태를 이용하는 BTN 모드는 인가전압의 파형에 따른 액정의 유체효과를 이용하여 위상학적으로 동일한(topologically equivalent) 액정상 사이를 스위칭하므로 응답시간이 빠르다. 하지만, 카이랄 도펀트(chiral dopant)를 첨가하여 두 액정상의 탄성에너지(elastic free energy)를 비슷하게 맞춰주는데, 이때 180°트위스트 상태가 두 액정상보다 더 안정된 탄성 에너지를 가지게 되고, 결국 180°트위스트 상으로의 전이가 발생하여 유지시간이 짧다는 단점이 있다. BCSN 모드의 경우 0°와 180°트위스트 상태를 이용하며, 수평과 수직전계를 이용하여 스위칭한다. 두 액정상은 위상학적으로 동일하지 않으며, 카이랄 도펀트를 첨가하여 탄성에너지 차이를 줄여줌으로써 긴 유지시간을 가지게 된다. 하지만, 특이선을 동반한 전이과정으로 인해 스위칭 시간이 다소 느리다. *BiNem*<sup>®</sup>의 경우 BCSN과 동일한 안정상을 가지며 마찬가지로 카이랄 도펀트를 첨가하여 두 액정상의 탄성에너지 차를 줄인다. 하지만, 한 쪽 배향막의 앵커링(anchoring)을 파괴시켜 액정

유체효과를 이용하는 스위칭 방법을 사용하기 때문에, 유지 시간이 길고 스위칭 시간이 빠른 장점을 모두 가진다. 하지만, 앵커링 파괴를 위해 특수한 배향막이 필요하며, 액정유체 효과를 극대화하기 위해서 매우 낮은 셀갭이 요구된다는 단점이 있다. 이 외에도 다양한 쌍안정 모드들이 제안되고 있으며, 각각의 모드의 단점들을 보완해 나가는 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는, 스위칭 시간이 빠르고 유지시간이 긴 장점을 모두 가지는 새로운 쌍안정 액정 모드를 제안한다. 제안된 액정셀은 왼손(left-handed) 및 오른손(right-handed) 방향으로 180°트위스트된 상태를 두 개의 안정상으로 사용한다. 액정은 주파수에 따라 유전을 이방성의 부호가 바뀌는 이중주파수(dual-frequency) 네마틱 액정을 사용하며, 인가전압의 주파수를 연속적으로 변화시킴에 따라 발생하는 액정 유체효과를 이용하여 두 액정상 사이를 스위칭할 수 있다. 또한 카이랄 도펀트를 첨가하지 않고, 액정과 자외선경화(UV-curable) 폴리머의 비등방성(anisotropic) 상분리(phase separation)로 형성된 화소분리 격벽이 가지는 앵커링 효과를 이용해서 액정상을 안정화시켰기 때문에, 두 액정상은 거의 동일한 탄성 에너지를 가진다. 제안된 쌍안정 액정셀의 제작방법 및 스위칭 특성을 살펴보고, 스위칭 메커니즘과 화소분리 격벽의 탄성 에너지에 대한 효과를 이론적으로 접근해보았다. 또한, 각각의 액정상이 우수한 분광특성의 블랙과 화이트 상태가 되도록 하기 위해 위상지연필름을 사용한 광학보상을 하였으며 높은 명암비의 투과형 액정 디스플레이를 구현하였다.

<sup>†</sup>E-mail: jckim@pusan.ac.kr

## II. 제안된 쌍안정 액정셀의 제작

제안하는 쌍안정 액정셀의 제작방법 및 구동특성을 이해하기 위해서는 먼저 그림 1에 나타나 있는 파이셀(pi-cell)에서의 수직인가 전압에 따른 액정상의 변화를 알아야 한다. 파이셀은 동일한 배향방향을 가지도록 상하 기판을 합착한 액정셀이며, 초기에 스플레이(splay) 상태를 가진다. 액정물질이 주파수에 상관없이 양의 유전율 이방성( $\Delta\epsilon$ )을 가진다고 가정할 경우, 스플레이 상태의 액정셀에 일정 크기 이상의 수직 전압을 인가하면 특이선을 동반하며 밴드(bend) 상태로 전이된다. 밴드 상태에서 수직전압을 제거하면 액정의 유체 효과에 의해 180°트위스트( $\pi$ -twist) 상태가 되며 꼬이는 방향은 액정이 가지는 키랄 피치(chiral pitch)의 부호에 의해 결정되는데, 음의 부호일 때는 왼손방향으로 꼬이고, 양의 부호일 때는 오른손방향으로 꼬인다. 180°트위스트 상태는

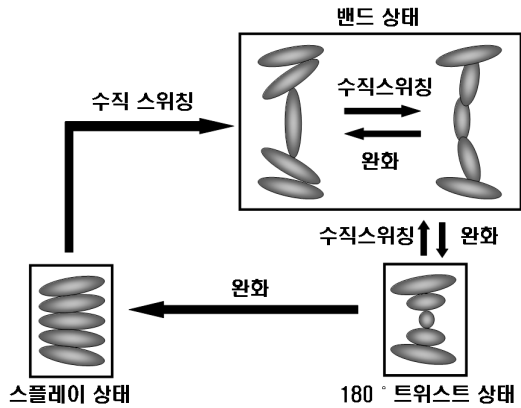


그림 1. 파이셀에서 인가전압에 대한 액정상의 변화.

일정시간이 지난 후 특이선을 동반하며 초기 스플레이 상태로 돌아가게 된다. 180°트위스트와 스플레이 상태는 두 액정상이 가지는 탄성에너지의 차이에도 불구하고 위상학적으로 서로 다른 상이기 때문에 이상적으로는 두 상태 사이의 에너지 장벽이 매우 커서 전이가 불가능하다. 하지만, 실제로는 액정분자배열이 불안정하여 에너지장벽의 효과가 없는 전이 핵과 스플레이 및 180°트위스트의 두 상태가 접하는 경계면 등에서부터 특이선을 동반한 전이가 발생하며, 상대적으로 에너지가 높은 180°트위스트 상태에서 낮은 스플레이 상태로 전이되는 것이다. 최근, 우리는 파이셀에 수직 전계를 인가하여 밴드로 전이시킨 상태에서 화소분리 격벽을 형성시킨 후 전압을 제거하면 격벽이 가지는 앵커링 효과로 180°트위스트 상태가 안정화된다는 결과를 발표하였으며,<sup>[4]</sup> 이것을 이용하여 초기 상태인 왼손방향 180°트위스트를 초기 액정상으로 가지는 쌍안정 액정셀을 제작하였다. 이때, 화소분리 격벽의 형성 방법으로 자외선 조사를 이용한 액정과 폴리머 물질의 비등방적 상분리 방법<sup>[5-8]</sup>을 이용하였다.

그림 2는 제안하는 액정셀의 제작과정을 나타낸다. 먼저 러빙 배향된 상하기판이 동일한 방향이 되도록 합착시킨 후, 이중주파수 액정과 자외선경화 폴리머 물질을 90:10의 질량 비로 섞은 혼합물을 주입한다. 배향막은 잘스(JRS.)사의 수평 배향막인 AI90101를 사용하였으며, 선경사각과 셀갭은 각각 5°와 4.2  $\mu\text{m}$ 였다. 액정 및 폴리머 물질은 각각 머크(Merck)사의 이중주파수 액정인 MLC-2048( $\Delta n = 0.2077$ , 1 kHz에서  $\Delta\epsilon = +3.3$ , 100 kHz에서  $\Delta\epsilon = -2.7$ )과 불소화 아크릴레이트(fluorinated acrylates)를 사용하였다. 상하기판에 1 kHz 주파수로 6 V의 교류전압을 인가한 상태에서 광마스크를 이용하여 선택적으로 자외선을 조사하였으며, 인가하는 수직전압은 스플레이에서 밴드로 전이시키고 자외선 조사 중 액정상을

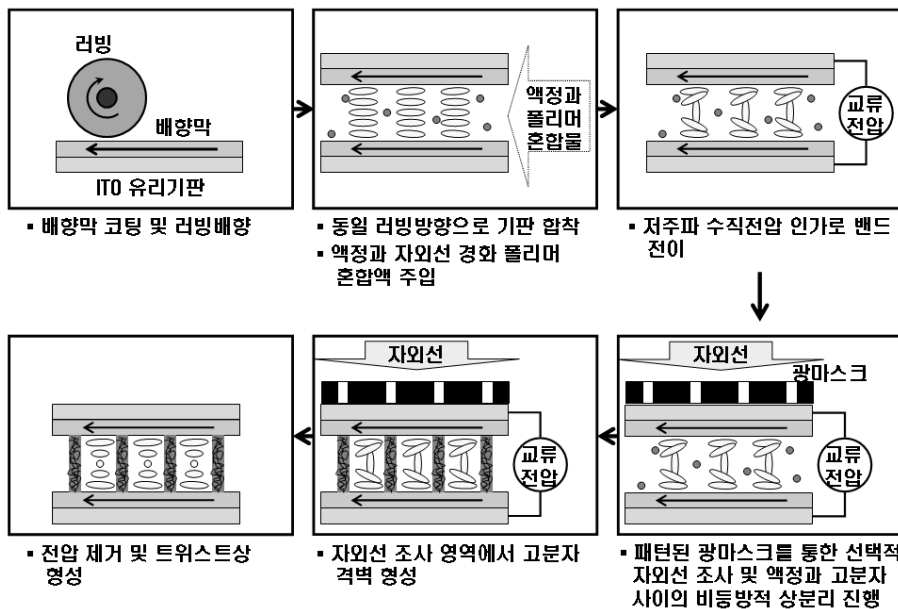


그림 2. 제안된 쌍안정 액정셀의 제작 과정.

밴드로 유지시켜주는 역할을 한다. 자외선은 30 mW/cm<sup>2</sup>의 세기로 30분 동안 조사하였으며, 광마스크는 자외선을 차단하는 300×300 μm<sup>2</sup> 면적의 검은색 사각패턴과 패턴 주위에 30 μm의 간격의 자외선 투과영역으로 이루어져 있다. 자외선이 조사된 부분은 격벽이 형성되고 검은색 패턴영역은 화소 부분이 된다. 격벽이 형성된 후 전기장을 제거하면 액정은 유체효과에 의해 180°트위스트 상태가 된다. 실험에 사용된 액정은 카이랄 도펀트를 섞지 않은 상태에서 기본적으로 -100 μm의 카이랄 피치를 가지기 때문에 꼬이는 방향은 왼손방향이 된다.

그림 3은 제작된 액정셀을 편광현미경 사이에 두고 초기상태를 관찰한 사진과 분광특성을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는

초기 스플레이 상태를 가지는 기존 파이셀이며, 그림 3(b)는 화소분리 격벽이 형성된 액정셀이다. 직교편광판 사이에 한쪽 편광판의 투과축과 러빙방향을 일치시킨 상태에서 기존 파이셀은 빛이 투과하지 않으며, 제안하는 쌍안정 액정셀은 격벽이 형성된 부분을 제외하고 빛이 투과하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 액정과 폴리머의 상분리가 잘 이루어졌으며, 화소 내부의 액정상이 스플레이가 아닌 트위스트 상태라는 것을 나타낸다. 분광기를 이용하여 측정한 두 액정셀의 분광특성과 상용시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계산한 분광특성을 비교해보면, 그림 3(c)와 같이 측정결과와 계산결과가 유사한 값을 가진다.

### III. 제작된 액정셀의 스위칭 특성

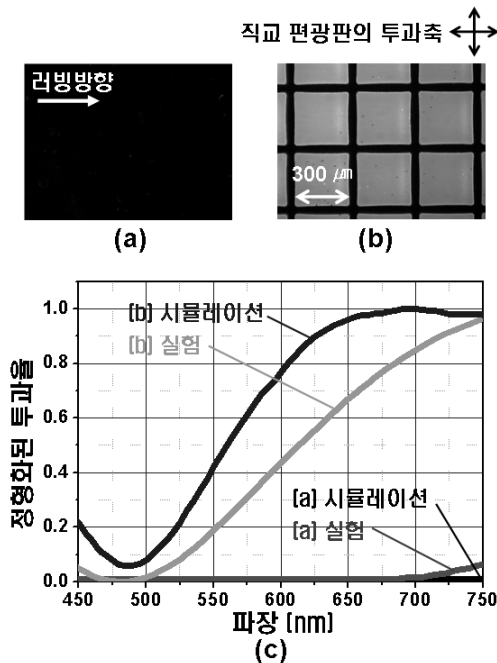


그림 3. 제작된 (a) 기존 파이셀 및 (b) 화소분리 격벽이 형성된 쌍안정 액정셀의 편광현미경 사진과 (c) 분광특성.

제작된 액정셀의 스위칭을 위해서는 그림 4(a)와 같이 저주파 구간, 완화(relaxation) 구간, 고주파 구간이 연속적으로 인가되는 이중주파수 구동파형의 수직전압을 인가해야 한다. 액정이 양의 유전을 이방성을 가지는 저주파 구간에서 액정상은 밴드 상태가 되며, 액정의 유체효과가 나타나는 짧은 완화 구간 이후, 고주파 구간은 액정이 가지는 음의 유전을 이방성을 이용하여 액정의 틸트각(tilt angle)을 강제로 낮추는 역할을 한다. 그림 4(b)는 직교편광판 사이에서 전압인가에 따른 액정셀의 투과율 변화를 측정된 결과를 나타낸다. 실험에 사용된 광원은 563.8 nm 파장의 레이저이고, 스위칭된 액정상 사이의 투과율 차를 구분하기 위해 편광판과 액정셀 사이에 530 nm 위상지연값을 갖는 필름의 광축을 편광판의 투과축과 45°각도를 이루도록 두었다. 초기 왼손방향 180°트위스트 상을 오른손방향 180°트위스트 상으로 변화시키기 위한 인가전압의 파형에서 저주파와 고주파 전압의 주파수는 각각 1과 100 kHz이며, 저주파, 액정완화, 고주파 전압의 인가시간( $T_{Low}$ ,  $T_{Relax}$ ,  $T_{High}$ ) 및 전압세기는 각각 4, 0.7, 0.4 ms와 20, 0, 20 V이다. 오른손방향 180°트위스트 상을 다시 왼손방향 180°트위스트 상으로 변화시키기 위해서 1 kHz의 저주파 전압 5 V를 40 ms동안 인가하였다. 그림 4(b)에서 인

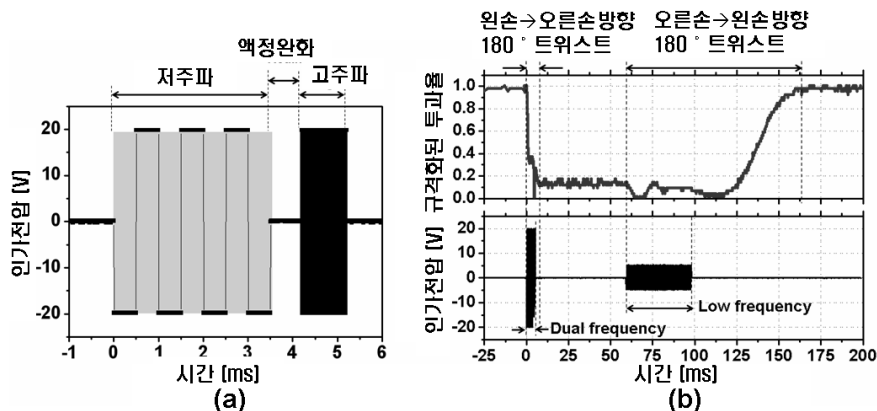


그림 4. (a) 쌍안정 액정셀의 스위칭을 위한 기본 구동파형과 (b) 전압인가에 따른 투과율 변화.

가전압에 의해 투과율이 변하고, 변화된 투과율은 전압을 제거한 후에도 유지가 되는 것을 확인할 수 있다. 왼손방향에서 오른손방향 트위스트 상태로 스위칭될 때, 전압제거 후 액정의 응답시간은 2.5 ms로 매우 빠른 응답특성을 보였다.

그림 5(a)와 5(b)는 각각 스위칭 전후의 액정셀의 편광현미경 사진이다. 투과율 측정 때와 마찬가지로 직교편광판 사이에 러빙방향과 편광판의 투과축이 일치하도록 액정셀을 두고, 액정셀과 편광판 사이에는 530 nm의 위상지연필름을 두었다. 위상지연필름을 두는 이유는 앞서 언급했듯이 왼손방향과 오른손방향 180°트위스트 상을 구분하기 위한 것이다. 액정의 꼬인방향만 다른 두 액정상을 통과한 선형편광 상태의 빛은 크기가 서로 동일하고 회전방향만 반대인 타원편광 상태가 되기 때문에, 별도의 위상지연필름을 사용하지 않으면 직교편광판 사이에서 광학적인 구분이 어렵다. 그림에서 격벽 부분이 보라색을 띠는 것은 위상지연필름 때문이며, 화소 영역은 액정상의 꼬인방향에 따라 붉은색과 푸른색으로 서로 상반된 색을 나타내고 있다. 분광기를 이용하여 측정된 각 안정된 상태에서의 분광특성과 계산을 통한 분광특성을 비교해 본 결과, 그림 5(c)와 같이 측정결과와 계산결과의 형태가 일치함을 확인할 수 있었다. 즉, 초기 액정상은 왼손방향으로 꼬였으며, 이중주파수를 이용한 스위칭에 의해 오른손방향으로 꼬인 180°트위스트 상태가 되었음을 확인할 수 있다.

#### IV. 스위칭 원리 분석

이중주파수 액정을 이용하여 서로 반대부호의 트위스트 상

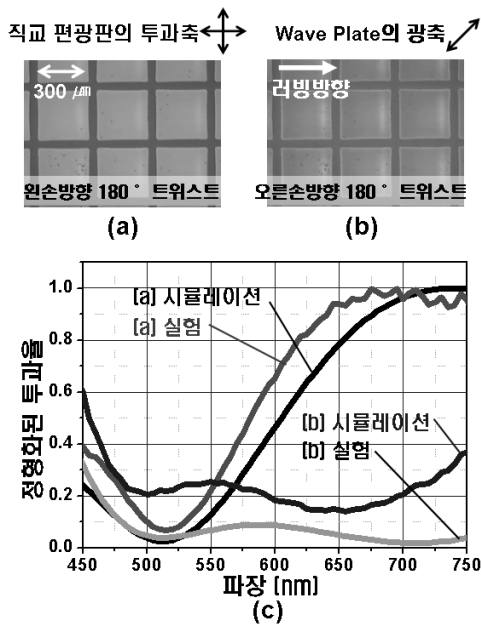


그림 5. 쌍안정 스위칭 전후 액정셀의 편광현미경 사진: (a) 왼손방향 180°트위스트 상태, (b) 오른손방향 180°트위스트 상태, 및 각각의 안정상태가 가지는 (c) 분광특성.

태간의 스위칭이 가능하다는 논문은 제시됐지만, 스위칭 원리에 대한 자세한 설명이 부족하였다.<sup>[9]</sup> 이 장에서는 제안된 액정셀에서 서로 꼬인방향이 반대인 180°트위스트 액정상 사이의 스위칭 원리를 밴드에서 180°트위스트로 상변화를 일으키는 과정에서 발생하는 액정상의 유체효과로 설명하고자 한다.

일반적으로 수직전계에 의해 밴드 상태가 된 파이셀에서 전계를 제거하면 전계방향으로 배열되어 있던 액정분자들의 틸트각이 낮아지게 되는데, 이 과정에서 배향표면이 가지는 앵커링에 의해 상하기판의 근처의 액정분자들이 벌크(bulk) 영역의 액정분자들보다 더 강한 유체흐름을 발생시키게 되고, 이러한 백플로우(backflow) 효과로 인해 액정상은 최종적으로 180°트위스트 상태가 된다.<sup>[10,11]</sup> 밴드 상태에서 180°트위스트 상태로 바뀌는 과정에서 액정분자들의 배열상태의 변화를 살펴보기 위해, 전계 제거 직후부터 시간에 따른 액정분자들의 틸트각과 트위스트 각의 변화를 에릭슨-레슬리(Ericksen-Leslie) 유체방정식을 이용해 계산하였다.<sup>[12,13]</sup> 그림 6(a)와 6(b)는 각각 실험에 사용된 액정셀과 동일한 조건의 액정셀에 수직전압을 인가하여 밴드 상태로 만든 후 전압을 제거하고, 그 직후부터 8 ms동안 액정분자들의 트위스트각과 틸트각의 시간에 따른 변화를 계산한 결과이다. 그림 6(a)를 살펴보면, 전압제거 이후 1 ms를 기준으로 액정분자들의 트위스트각이 서로 반대이며 1 ms 이전은 오른손방향, 이후는 왼손방향의 트위스트각을 가지게 됨을 알 수 있다. 이때,

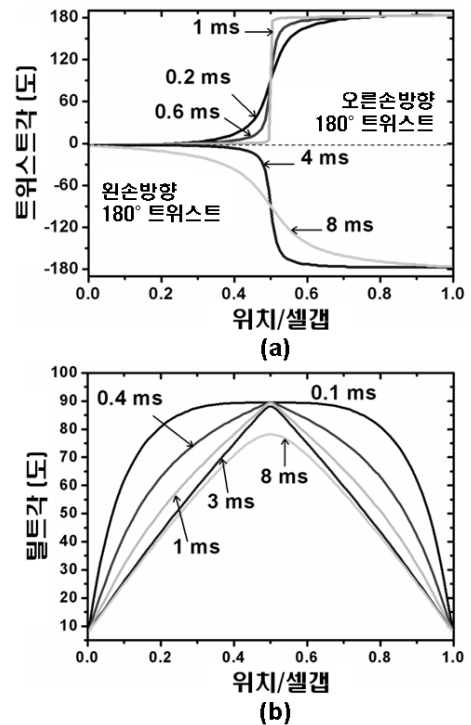


그림 6. 수직전압 20 V가 인가된 밴드 상태의 액정셀에서 전압을 제거한 후 액정분자들의 (a) 트위스트각 및 (b) 틸트각의 시간에 따른 변화.

그림 6(b)를 보면 액정분자들의 틸트각은 시간이 지남에 따라 점차 낮아지고 있으며, 결국 두 그림으로부터 최종적인 액정상이 왼손방향 180°트위스트가 됨을 예측할 수 있다. 또한, 전압제거 후 1 ms 동안 오른손방향의 트위스트각을 가지는 구간에서 강제로 액정분자들의 틸트각을 낮추준다면 오른손방향 180°트위스트 상태로 스위칭이 가능하다는 것도 예측할 수 있다.

그림 7은 각각의 트위스트 상태로의 스위칭 원리를 직관적으로 살펴보기 위해 그림 6의 계산결과를 바탕으로 액정층의 디렉터 분포를 도식화한 것이다. 그림 7(a)와 7(b)는 각각 왼손방향과 오른손방향 180°트위스트 상태로 스위칭하는 경우이다. 각 그림의 상부에는 인가된 전계 및 시간에 따른 액정분자의 배열상태를 나타내었다. 하부에는 상부의 배열상태에서 표시된 액정분자의 침형 끝부분을 원점으로 두고, 액정층의 아래쪽에서 바라봤을 때 액정분자의 위치에 따른 원통

형 끝부분의 분포를 연결한 궤적으로서 액정의 틸트각과 트위스트각을 동시에 고려할 수 있다. 스위칭은 저주파 전압을 인가하여 액정층의 트위스트 성분을 제거하고 밴드상태로 만드는 것으로부터 시작하며, 저주파 전압을 제거한 후 고주파 전압을 인가하는 순간의 액정분자 배열에 따라 최종적으로 안정상태의 트위스트 방향이 결정된다. 그림 7(a)와 같이, 저주파 전압을 제거한 후에 액정분자의 트위스트 성분이 오른손방향인 기간을 지난 후, 별도의 전압을 인가하지 않거나 고주파 전압을 인가하는 경우에는 왼손방향 180°트위스트 상태가 안정화된다. 반면에, 그림 7(b)와 같이, 저주파 전압을 제거한 후 액정분자의 트위스트 성분이 오른손방향인 기간 내에 고주파 전압을 인가하면 트위스트 방향을 유지한 채로 액정분자들의 틸트 성분이 제거되므로 오른손방향 180°트위스트 상태가 안정화된다. 이때, 고주파 전압을 너무 빨리 인가하면 충분한 오른손방향의 트위스트 성분이 나타나

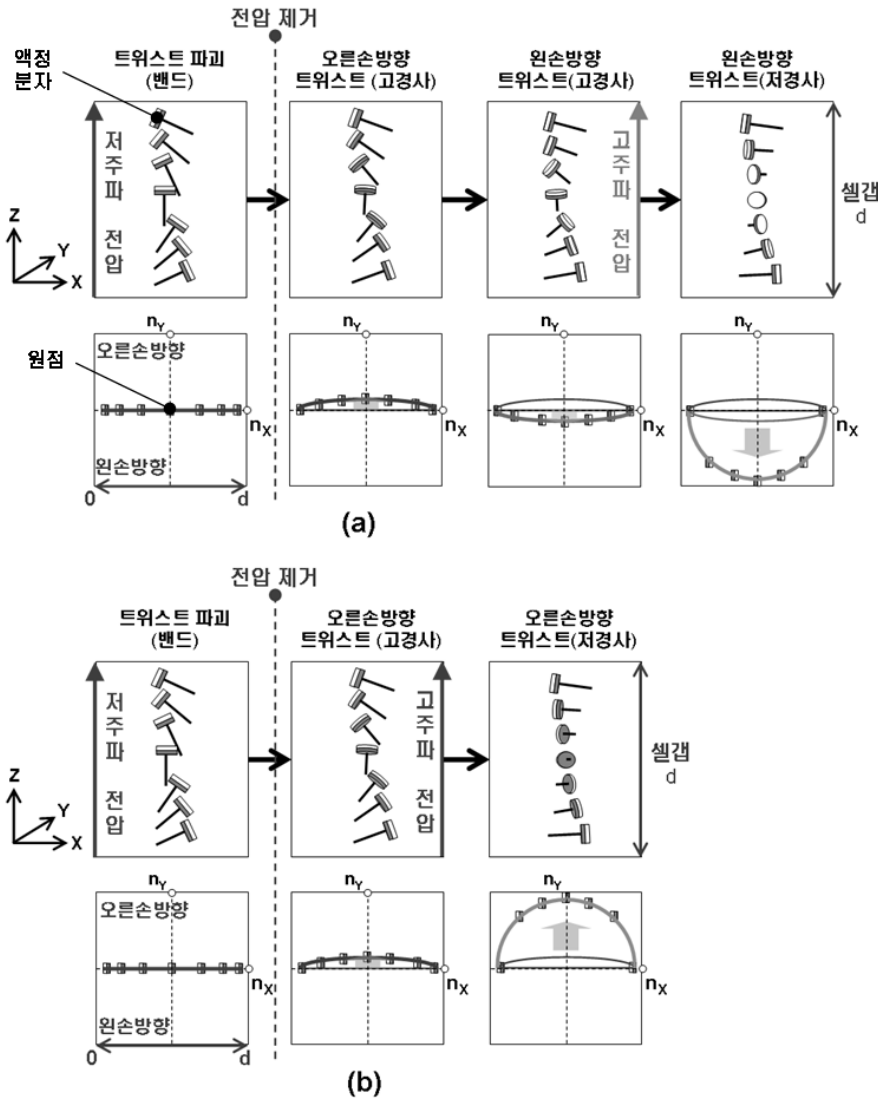


그림 7. 인가전압의 이중주파수 파형에 의한 쌍안정 스위칭의 원리에 대한 간단한 도식: (a) 왼손방향 180°트위스트 상태, 및 (b) 오른손방향 180°트위스트 상태로의 스위칭.

지 않고, 너무 느리게 인가하면 왼손방향 트위스트 성분이 나타나므로, 모든 픽셀에서의 안정된 스위칭을 위해서는 고주파 전압을 인가하는 적절한 시간(액정완화 구간)을 확보해야 한다. 계산결과에서는 액정완화 구간( $T_{Relax}$ )이 1 ms일 때, 오른손방향 트위스트 성분이 가장 컸으며, 실험결과에서도 1 ms에 근접한 0.7 ms와 1.2 ms 사이의 값으로 액정완화 구간을 정했을 때, 가장 안정된 스위칭 특성을 보였다.

### V. 제작된 액정셀의 쌍안정 특성

화소 전체가 스위칭된 경우 각각의 안정상은 우수한 유지 특성을 보인다. 이것은 액정상이 가지는 탄성에너지를 이용해서 설명할 수 있다. 아래 식은 프랑크-오센(Frank-Oseen) 방정식으로,<sup>[14,15]</sup> 화소내의 액정분자 배열에 따른 탄성 자유 에너지를 나타낸다.

$$F_{elastic} = \int \frac{1}{2} K_{11} (\text{div } \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\mathbf{n} \cdot \text{rot } \mathbf{n} \pm q_0)^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\mathbf{n} \times \text{rot } \mathbf{n})^2 + F_{wall}$$

$\mathbf{n}$ 은 액정분자 방향을 나타내는 단위벡터이며,  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ 는 각각 스플레이, 트위스트, 밴드에 대한 탄성 상수를 나타낸다.  $q_0$ 는 액정이 가지는 고유의 카이랄 피치를 나타내며 양과 음의 부호는 각각 오른손과 왼손방향으로 꼬이는 성질을 나타낸다.  $F_{wall}$ 은 격벽의 앵커링에 의한 부근의 액정분자들의 배열상태에 대한 탄성에너지의 합을 나타낸다.

기존의 격벽이 없는 파이셀에서는  $F_{wall}$ 값이 포함되지 않으며, 셀갭에 비해 카이랄 피치가 매우 크기 때문에  $q_0$ 값은 거의 0에 가깝다. 이때, 스플레이, 왼손 및 오른손방향 180°트위스트 상태가 가지는 탄성에너지를 계산하면 스플레이 상태가 두 트위스트 상태보다 매우 낮은 값을 가지게 된다.<sup>[4]</sup> 그림 8은 이중주파수 액정을 사용한 파이셀에 저주파 수직 전압을 인가하여 밴드 상태로 전이시킨 후 전압을 제거하여 왼손방향 180°트위스트 상태로 만들고, 다시 이중주파수 구동파형을 사용하여 오른손 180°트위스트 상태로 스위칭시킨

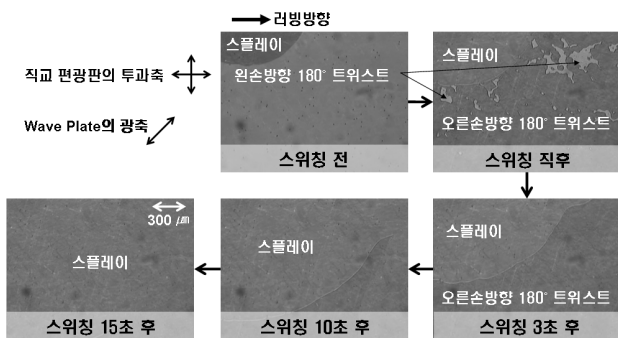


그림 8. 이중주파수 액정을 사용한 기존의 파이셀에서의 쌍안정 스위칭 특성.

후 액정셀을 관찰한 편광편미경 사진이다. 왼손방향에서 오른손방향 180°트위스트 상태로 스위칭되더라도 결국 가장 안정된 스플레이로 전이가 일어나서 초기상태로 돌아가는 것을 확인할 수 있다. 만약, 기존의 파이셀에 카이랄 도펀트를 적절하게 첨가하여  $q_0$ 값을 변화시키므로써 왼손방향 180°트위스트 상태를 가장 안정하게 만든다면, 오른손방향 180°트위스트 상태가 오히려 높은 탄성에너지를 가지므로 이중주파수 구동파형을 이용하여 왼손방향에서 오른손방향 180°트위스트로 스위칭되더라도 결국 안정된 왼손방향 180°트위스트 상태로 돌아간다. 하지만, 화소분리 격벽을 가진 액정셀의 경우,  $q_0$ 값은 기존의 파이셀과 마찬가지로 거의 0에 가까우며,  $F_{wall}$ 에 의해 180°트위스트 상태가 안정화됐으므로, 결국 스플레이, 왼손 및 오른손방향 180°트위스트 상태가 거의 비슷한 탄성에너지를 가진다. 더욱이, 전압인가 없이 왼손방향에서 오른손방향 180°트위스트 상태로 전이되기 위해서는 스플레이 상태를 거쳐야 하는데, 180°트위스트와 스플레이는 위상학적으로 서로 다른 액정상이므로 왼손방향과 오른손방향 180°트위스트 사이에 전이가 발생할 확률이 낮아져 우수한 유지특성을 가질 수 있다.

### VI. 제작된 액정셀의 투과형 광학 보상

제작된 쌍안정 액정셀은 시인성 확보를 위해서 명암비의 개선이 필요하다. 우리는 셀갭과 위상지연필름의 파라미터를 최적화하여 정면 명암비가 개선된 투과형 액정셀을 제작하였다. 최적설계에 의한 액정셀의 셀갭은 3.8 μm이며, 그림 9(a)와 9(b)는 각각 위상지연필름 1장과 2장을 사용한 구조

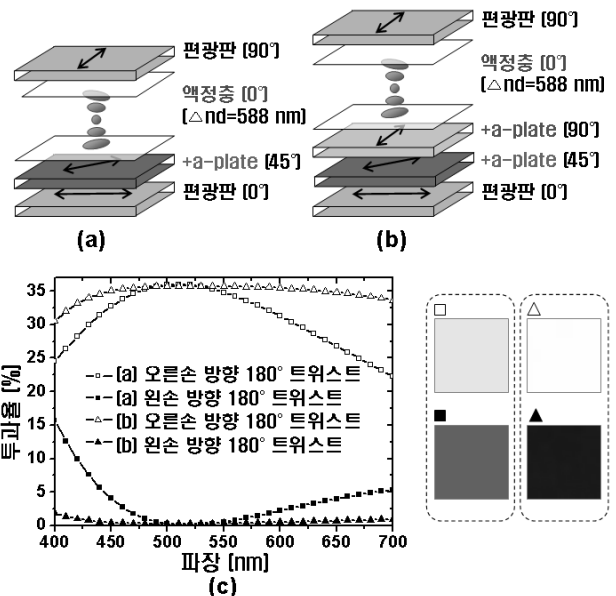


그림 9. 명암비 향상을 위한 필름보상: (a) 1장의 positive a-plate를 사용한 구조, (b) 2장의 positive a-plate를 사용한 구조, 및 각각의 구조에 대한 (c) 쌍안정 액정상의 분광특성 계산결과.

를 나타내고 있다. 그림 9(a)에 사용된 위상지연필름은 138 nm의 위상지연값을 가지며 액정셀과 하부편광판 사이에 45° 방향으로 광축이 놓여 있다. 그림 9(b)는 그림 9(a)의 구조에서 액정셀과 위상지연필름 사이에 광축이 액정셀의 러빙방향과 수직이 되도록 270 nm의 위상지연필름을 한장 더 삽입한 구조이다. 그림 9(c)는 각각의 구조에 대한 분광특성을 계산한 결과이며, 그래프 오른쪽은 실제 제작한 액정셀의 현미경 사진을 보여주고 있다. 그림 9(a) 구조에서는 계산결과 4:1 정도의 정면 명암비 특성을 얻었으며, 그림 9(b)의 구조에서의 50:1 이상의 높은 명암비 특성을 얻을 수 있었다. 후자의 구조로 제작된 실제 액정셀에서도 계산결과와 마찬가지로 우수한 블랙 및 화이트 상태를 구현할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

우리는 왼손방향과 오른손방향 180°트위스트 상태를 두 개의 안정된 액정상으로 가지는 새로운 구조의 쌍안정 액정 디스플레이를 제작했다. 전압을 인가한 상태에서 이중주파수 액정과 자외선경화 폴리머 물질의 혼합물의 비등방성 상분리 방법으로 형성된 화소분리 격벽을 형성하였고, 격벽이 가지는 앵커링에 의해 초기 왼손방향 180°트위스트 상태가 안정화됐다. 이중주파수 구동파형을 이용해서 안정된 두 상간의 스위칭이 가능하며, 왼손방향에서 오른손방향 트위스트 상태로의 스위칭과 오른손방향에서 왼손방향 트위스트 상태로의 스위칭에서 각각 2.5 ms와 60 ms의 응답시간을 보였다. 두 안정상은 모두 10시간 이상의 유지시간을 보였으며, 상온에서 최소 15일까지도 액정상의 변화가 없는 우수한 메모리 특성을 가지고 있다. 또한, 투과형 광학설계를 통해 50:1 이상의 높은 명암비를 구현할 수 있음을 확인하였다. 형성된 화소분리 격벽은 외부의 압력이나 힘에 의한 변형으로부터 셀갭 및 액정의 배열상태를 안정화시키고 기관의 기계적 강도를 향상시킬 수 있으므로,<sup>[6,8]</sup> 플렉서블(flexible) 디스플레이로의 적용이 용이할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 정보디스플레이 기술개발 사업(F0004052)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

[1] D. W. Berreman and W. R. Heffner, "New bistable cholesteric liquid-crystal display," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 37,

- pp. 109-111, 1980.
- [2] S. H. Lee, K. -H. Park, T. -H. Yoon, and J. C. Kim, "Bistable chiral-splay nematic liquid crystal device using horizontal switching," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, pp. 4215-4217, 2003.
- [3] I. Dozov, M. Nobili, and G. Durand, "Fast bistable nematic display using monostable surface switching," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, pp. 1179-1181, 1997.
- [4] S. R. Lee, J. H. Shin, J. -I. Baek, M. -C. Oh, T. -H. Yoon, and J. C. Kim, "Initially  $\pi$ -twisted nematic liquid crystal cell stabilized by a fluorinated polymer wall," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 163513-1~163513-3, 2007.
- [5] S. -J. Jang, J. -W. Jung, H. -R. Kim, M. Y. Jin, and J. -H. Kim, "Stability-Enhanced Pixel Isolation Method for Flexible Liquid Crystal Displays," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 6670-6673, 2005.
- [6] J. -W. Jung, M. Y. Jin, H. -R. Kim, Y. -J. Lee, and J. -H. Kim, "Mechanical Stability of Pixel-Isolated Liquid Crystal Mode with Plastic Substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 8547-8551, 2005.
- [7] J. -I. Baek, J. -H. Shin, M. -C. Oh, J. C. Kim, and T. -H. Yoon, "Pixel-isolation walls of liquid crystal display formed by fluorinated UV-curable polymers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 161104-1~161104-3, 2006.
- [8] M. Y. Jin, T. -H. Lee, J. -W. Jung, and J. -H. Kim, "Surface effects on photopolymerization induced anisotropic phase separation in liquid crystal and polymer composites," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 193510-1~193510-13, 2007.
- [9] C. Z. van Doorn, "Dynamic behavior of twisted nematic liquid crystal layers in switched field," *J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 3738-3745, 1975.
- [10] S. -H. Chen and C. -L. Yang, "Dynamics of twisted nematic liquid crystal pi-cells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 3721-3723, 2002.
- [11] C. G. Jhun, J. H. Choi, T. -H. Yoon, and J. C. Kim, "Optical Bouncing in Bistable Chiral Splay Nematic Liquid Crystal Device," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, pp. 128-132, 2006.
- [12] J. L. Ericksen, "Conservation laws for liquid crystals," *Trans. Soc. Rheol.*, vol. 5, pp. 23-34, 1961.
- [13] F. M. Leslie, "Some constitutive relations for liquid crystals," *Arch. Rat. Mech. Anal.*, vol. 28, pp. 265-283, 1968.
- [14] F. C. Frank, "On the Theory of Liquid Crystals," *Faraday Soc. Disc.*, vol. 25, pp. 19-28, 1958.
- [15] J. Stelzer, R. Hirning, and H. R. Trebin, "Influence of surface anchoring and viscosity upon the switching behavior of twisted nematic cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 74, pp. 6046-6052, 1993.

## **Electro-optical Characteristics of the Dual-frequency Bistable Nematic Liquid Crystal Cell with Pixel-isolating Polymer Wall**

Seong Ryong Lee, Joong Ha Lee, Jae Hoon Shin, Dong Han Song, Tae-Hoon Yoon,  
and Jae Chang Kim<sup>†</sup>

*School of Electrical Engineering, Pusan National University San 30 Jangjeon-Dong, Keumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: jckim@pusan.ac.kr*

(Received March 18, 2008; Revised manuscript April 25, 2008; Accepted April 28, 2008)

We propose a novel bistable nematic liquid crystal cell, which has a dual-frequency liquid crystal material and pixel-isolating polymer wall formed by an anisotropic phase separation of a mixture of liquid crystals and UV-curable pre-polymers. The proposed cell has two stable states of left- and right-handed  $\pi$ -twist. The switching between the two states is achieved by using a sequential waveform of low and high frequencies. A transmissive bistable liquid crystal display is designed, which achieves high contrast ratio by using the proposed cell and optical films.

OCIS codes: (050.0050) Diffraction and gratings; (330.1710) Color measurement; (160.3900) Metals; (240.6680) Surface plasmons.