

## 쌍안정 TN 액정셀의 스위칭 특성 해석

김병석 · 김양수 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과

(1998년 1월 21일 받음, 1998년 3월 30일 수정본 받음)

쌍안정 TN LCD의 스위칭 특성을 Berreman 에 의해 제시된 backflow를 고려한 이론적 모델을 적용하여 해석하였다. 그리고 이 모델을 적용하여 180° 쌍안정 TN 액정셀이 쌍안정 특성을 갖기 위해서는 두 유리기판을 서로 반대 방향으로 러빙해야 하고 d/p 도 중요한 요소임을 확인하였다.

### I. 서 론

현재의 표시 소자 시장에서 주류를 이루고 있는 CRT (Cathode Ray Tube)는 표시 품질이 높은 장점이 있으나 부피가 크며, 소비 전력이 높은 단점으로 인해 휴대 통신이나 정보통신기기에의 응용이 힘들다는 단점이 있다. 이러한 CRT의 단점을 극복하고 이를 대체해 나갈 평판 디스플레이 소자로 액정 디스플레이, 플라즈마 디스플레이, 전계 발광 디스플레이 등 여러 가지가 있으나, 상품화되어 널리 보급되어 있는 것은 액정 디스플레이이다. 액정 디스플레이는 CRT에 비해 부피가 작고 전력 소모가 적어 휴대용 통신기와 휴대용 컴퓨터 등 대부분 표시소자로 사용되고 있으며 점차 TV와 컴퓨터용 모니터로까지 그 시장을 넓혀가고 있다. 현재 상품화되어 널리 보급된 액정 디스플레이는 크게 STN(Super Twisted Nematic)을 채용한 수동 구동 LCD와 TN을 이용한 능동 구동인 TFT(Thin Film Transistor) LCD 두 종류이지만, 이 외에도 여러 방식의 액정 디스플레이가 활발히 연구되고 있다. 그 중 쌍안정 TN(Bistable Twisted Nematic) LCD는 Seiko-Epson사가 1995년 Asia Display에서 640×480 화소의 6.3 인치 패널을 시제품으로 선보인 후 큰 관심을 모으고 있는 액정 디스플레이 방식이다.<sup>[1]</sup>

쌍안정 TN 액정은 네마틱(nematic) 액정에 카이랄(chiral) 물질을 첨가한 액정으로 셀의 초기 트위스트 각이  $\Phi$ 일 때 인가 전압에 의해 꼬임 각이  $\Phi-180^\circ$ 와  $\Phi+180^\circ$ 가 되는 두 가지 준안정상태를 갖는 쌍안정 특성이 있다.<sup>[1-3]</sup> 또한 직교한 편광판 사이에 위치한 쌍안정 TN 액정셀은 콘트라스트 비가 높으며, 스위칭 속도가 빠르며, 저 전력동작이 가능하고 시야각이 넓은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Berreman에 의해 제안된 유체의 흐름을 고려한 모델<sup>[4,5]</sup>에 쌍안정 TN LCD의 동특성을 해석하고, 셀이 쌍안정 특성을 갖기 위해서는 180°쌍안정 TN 액정셀의 경우 두 유리기판을 서로 반대 방향으로 러빙해야 함을 보이고자 한다.

### II. 동특성 해석방법

쌍안정 TN 액정은 네마틱 액정에 카이랄 물질을 첨가하여 원하는 꼬임각을 갖도록 한 액정으로 동작 원리는 아래와 같다. 전압을 인가하지 않은 초기 상태에서 꼬임각 180°인 쌍안정 TN 액정셀의 액정 분자의 분포 상태는 그림 1(a)과 같다. 이러한 초기상태에서 Fredericks 전압 이상의 전압을 인가하면 액정 분자는 전계와 평행한 방향으로 서게 되어 유리기판 근처를 제외한 대부분의 액정 분자가 유리기판 면에 대해 거의 90°로 서게 된다. 이러한 상태를 reset 상태라 하고, 이 때 인가한 전압을 reset 전압이라 한다. 그림 1(b)에 reset 상태에

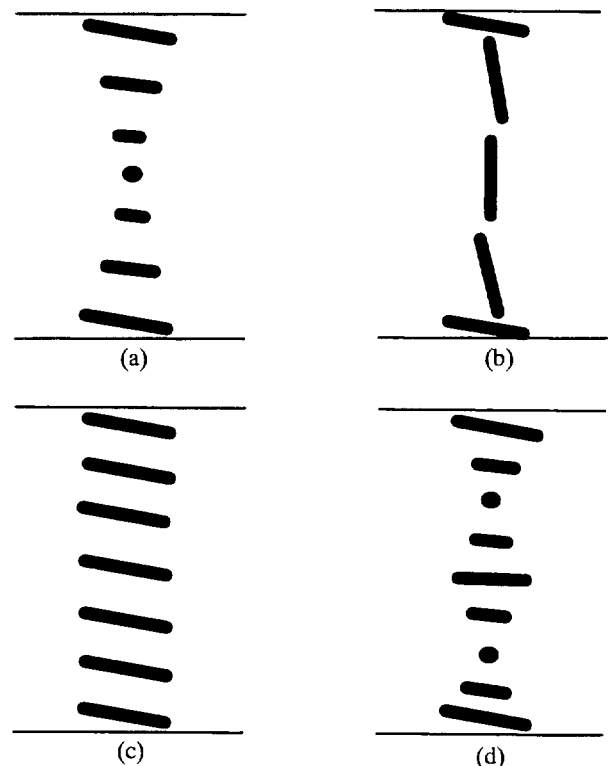


그림 1. 180° 쌍안정 TN 셀의 (a) 초기상태, (b) reset 상태, (c) 0° 준안정 상태, (d) 360° 준안정 상태.

\*이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

서의 액정 분자들의 분포를 나타내었다. Reset 상태에서 다음에 인가해주는 전압의 크기에 따라 셀은 서로 다른 두 가지의 준 안정 상태가 된다. 이 전압을 selection 전압이라 하며, 두 가지 준 안정상태를 선택하기 위한 경계가 되는 전압을 임계 전압이라 한다. 임계전압 이상의 selection 전압을 인가할 경우 꼬임 각이 0°인 준 안정상태로 전이하게 되며, 액정 분자의 분포는 그림 1(c)과 같다. 임계전압 이하의 selection 전압을 인가할 경우 꼬임 각이 360°인 준 안정상태로 전이하며, 액정 분자의 분포를 그림 1(d)에 나타내었다. 이러한 두 가지의 준 안정상태는 직교한 편광판 사이에서 각각 on과 off상태가 되며, 두 준 안정 상태에서 액정 분자가 유리기판의 표면에 대해 평행하기 때문에 쌍안정 TN LCD는 시야각이 넓은 특성을 가진다.<sup>[6-8]</sup>

유체의 흐름을 고려하여 쌍안정 TN 액정셀의 동특성을 해석하기 위해서 Erickson Leslie의 액정 유체 방정식을 이용하였다. 이 방정식은 액정셀에 작용하는 shear force와 전계토크, 탄성토크, 점성토크의 평형관계를 기술한 식이며, 동특성 해석을 위해 셀을 다음과 같이 가정한다. 액정은 네마틱(nematic) 또는 콜레스테릭(cholesteric)이며, 탄성특성은 Oseen Frank의 탄성계수와 natural twist항으로 나타내어진다. 유리기판에 평행한 방향으로의 경사각과 꼬임 각의 변화는 없다고 가정한다. 즉, 동일한 층의 액정 방향자는 같은 배향 상태를 가진다. 표면 고정력이 무한히 커서 유리 기판 표면에서의 액정분자는 움직이지 않는다. 위의 가정을 적용하여 액정 유체 방정식을 풀면

$$\sigma_{xz} = T_{11} V'_x + T_{12} V'_y + T_{13} \theta + T_{13} \phi \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = T_{21} V'_x + T_{22} V'_y + T_{23} \theta + T_{23} \phi \quad (2)$$

$$\lambda_1 = T_{31} V'_x + T_{32} V'_y + \gamma_1 \theta \quad (3)$$

$$\lambda_2 = T_{41} V'_x + T_{42} V'_y + \gamma_1 \phi \quad (4)$$

와 같은 4개의 식을 얻을 수 있다. 그림 2와 같이 유리기판에 수직인 축을 z 축으로 하고 극각  $\theta$ 는 z축에서 측정하며  $\pi$ 는 방위각이다.  $\sigma_x, \sigma_y$ 는 액정 셀에 작용하는 shear force 이며  $V_x, V_y$ 는 액정의 유체속도의 x 성분과 y 성분이다. 식 (1)-(4)을 이용하여 유체속도의 변화율  $V'_x, V'_y$ 에 관한 식을 구하고, 이 식에 경계조건을 적용하여 적분하여 shear force  $\sigma_x, \sigma_y$ 에 관한 식을 구한다. 액정 셀의 초기 액정 분자의 분포를 가정하면 위에서 구한 식들을 이용하여  $V'_x, V'_y, \sigma_x, \sigma_y$ 을 알 수 있고, 식 (1)-(4)로부터 구한 식

$$\theta = \frac{1}{\gamma_1} (\lambda_1 - T_{31} V'_x + T_{32} V'_y) \quad (5)$$

$$\phi = \frac{1}{\gamma_1} (\lambda_2 - T_{41} V'_x + T_{42} V'_y) \quad (6)$$

에 대입하여 액정분자의 극각과 방위각의 시간에 대한 변화율을 구할 수 있으며,<sup>[4,9,10]</sup> 4차 Runge Kutta 방법을 이용하여

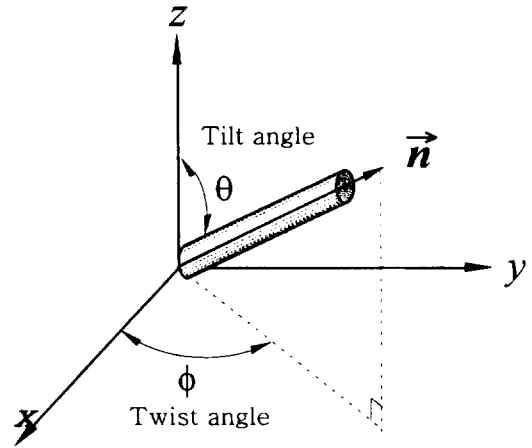


그림 2. 직각 좌표계에서 액정 분자의 극각과 꼬임각.

시간에 대한 액정분자의 방향자 분포를 구할 수 있다. 본 논문에서는 일반적으로 네마틱 액정 분자는 좌우 대칭이므로 막대 모양의 액정 분자의 양 끝 부분 중에서 위의 유리기판을 향하고 있는 부분으로 극각과 방위각을 정의하므로, 액정 분자의 극각은 항상 90°보다 작다. 예를 들면 극각이 92°이며 방위각이 95°인 액정 분자는 극각 88°, 방위각 275°인 경우로 계산하였다. 또한 backflow 현상으로 인해 액정분자가 z축을 지날 때 극각과 방위각이 불연속적으로 변하므로  $\theta$ 와  $\phi$ 를  $\Psi_1 = \frac{2\theta}{\pi} \cos \phi, \Psi_2 = \frac{2\theta}{\pi} \sin \phi$ 로 변환하여 해석하였으며,  $\Psi_1, \Psi_2$ 를 축으로 하는 좌표평면에 액정분자를 표시하였다. ( $\Psi_1, \Psi_2$ ) 평면에 액정분자의 분포를 표시하면 액정 분자를 유리기판에 정사영한 것과 유사하므로 극각과 방위각으로 액정분자를 표시하는 것보다 동적 움직임을 더욱 쉽게 알 수 있다.

### III. 쌍안정 TN셀의 동특성

동특성 해석에 사용한 파라미터는 표 1과 같다. ZLI-1557 액정의 점성계수는 알려져 있지 않아서 점성계수가 알려진 액정을 고려하여 적절히 가정하였다. 인가 전압은 30 V의 reset 전압을 1 ms, 0 V 또는 5 V의 selection 전압을 0.5 ms 동안 인가하였다. 초기 꼬임 각이 180°인 셀의 경우 두 유리기판의 러빙 방향에 따라 액정분자는 그림 3과 같이 서로 다른 초기 상태를 가지게 되며, 초기상태의 액정분자 분포를 그림 4(a)에 나타내었다. 쌍안정 TN 액정셀은 그림 3(a)와 같이 두 유리기판을 서로 반대 방향으로 러빙한 셀이며 reset 전압을 인가했을 때 액정분자의 분포를 그림 5에 나타내었다.

표 1. ZLI-1557액정과 셀의 파라미터

$\gamma_1$ [dyne s/m <sup>2</sup> ]	1.045	$K_{11}$ [10 <sup>-7</sup> dyne]	9.5
$n_e$	1.6140	$K_{22}$ [10 <sup>-7</sup> dyne]	5.1
$n_o$	1.4993	$K_{33}$ [10 <sup>-7</sup> dyne]	11.5
$\epsilon_1$	7.9	Pretilt angle	4°
$\epsilon_2$	3.7	d/p	0.6
Cell gap	2 $\mu$ m		

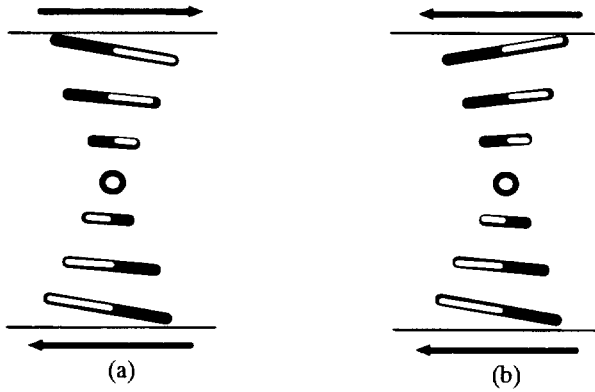


그림 3. 180° TN 셀의 두 유리기판을 (a) 서로 반대 방향으로 러빙했을 때와 (b) 서로 같은 방향으로 러빙했을 때의 초기상태. 화살표는 러빙 방향을 나타낸다.

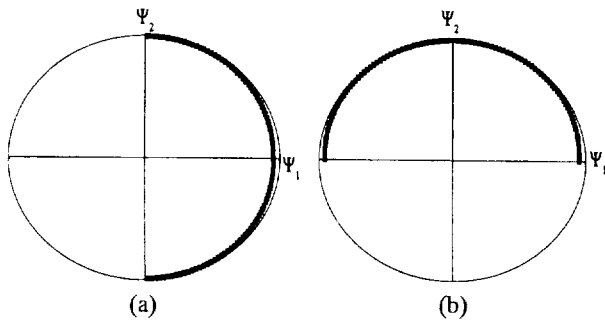


그림 4. ( $\Psi_1, \Psi_2$ )평면에 표시한 180° TN 셀의 두 가지 초기 상태. (a) 두 유리 기판을 서로 반대 방향으로 러빙했을 때. (b) 두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙했을 때.

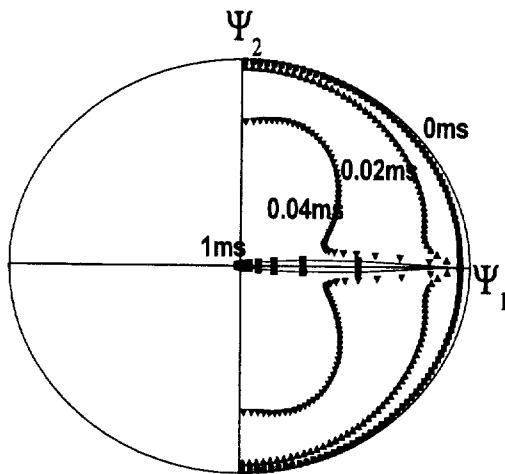


그림 5. 쌍안정 TN 액정셀에 30 V의 reset 전압을 1 ms 동안 인가했을 때의 액정분자의 분포.

Reset 상태에서 대부분의 점들은 ( $\Psi_1, \Psi_2$ )평면의 원점 근처에 위치하고 있는데, 이는 대부분의 액정분자들이 reset 전압에 의해 유리기판에 수직하게 서 있음을 의미한다.  $t=0.02$  ms와  $t=0.04$  ms에서 보면, 유리기판 근처의 액정 분자들이 인가된 전계에 더 빨리 반응함을 알 수 있다.

코임 각이 360°인 준 안정상태로의 스위칭 과정을 그림

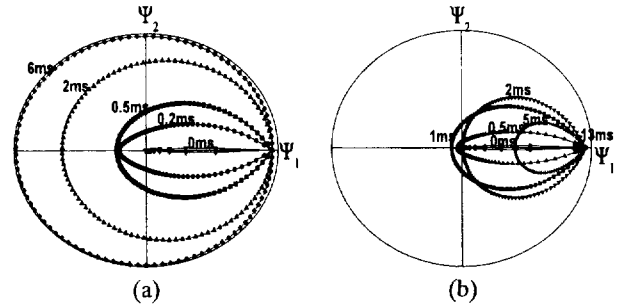


그림 6. 쌍안정 TN 액정셀에 reset 전압 인가 후, (a) 0 V의 selection 전압을 인가했을 때와 (b) 5 V의 selection 전압을 인가했을 때의 액정분자의 분포.

6(a)에 나타내었다. Reset 전압을 제거한 후,  $t=0.2$  ms와  $t=0.5$  ms에서 셀의 가운데 위치한 액정분자들은 backflow 효과가 크게 발생하여 음의  $\Psi_1$  방향으로 기울어지게 된다. 그리고 시간이 경과하면서 액정분자들은 더욱더 기울어지게 되어  $t=6$  ms에서는 360° 준 안정상태로 전이하게 된다.

코임 각이 0°인 준 안정상태로의 스위칭 과정을 그림 6(b)에 나타내었다. Reset 전압을 제거한 후 5 V의 selection 전압을 0.5 ms 동안 인가해 주었다. 360° 준 안정상태로의 스위칭 과정에서와 같이 reset 전압이 제거된 후에 액정분자들은 backflow 효과에 의해 음의  $\Psi_1$  방향으로 기울어지게 되지만,  $t=0.5$  ms에서 selection 전압에 의해 셀의 가운데 위치한 액정분자들은 유리기판에 수직하게 선다. Selection 전압을 제거한 후 backflow 효과가 줄어들어, 액정분자들은 다시 원점으로 되돌아가서 양의  $\Psi_1$  방향으로 기울어  $t=13$  ms에서 0° 준 안정상태로 전이하게 된다.

#### IV. 실험결과와의 비교

해석 결과와의 비교를 위해 180° 쌍안정 TN 액정셀을 다음과 같이 제작하였다. 유리 기판 위에 투명전극(Iidium-Tin-Oxide), 절연막(isolation layer), 배향막(PI layer)을 차례로 입히고 원하는 방향으로 액정 분자가 배열하도록 서로 반대 방향으로 러빙하였다. 스페이서를 사용해 셀의 두께를 2  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 유지하고, 카이랄 물질 S-811을 첨가한 액정 ZLI-1557을 셀에 주입한 후 자외선 경화제를 사용하여 주입구를 봉합하였다. 결정회전법<sup>11,12</sup>에 의해 측정된 두 유리기판의 선경사각은 4°이며, 콘트라스트 비를 최대로 하기 위해 직교한 편광판과 러빙방향이 45°가 되도록 하였다. 직교한 편광판 사이에 위치한 쌍안정 TN 셀의 0° 준안정 상태는 광학 활성으로 인해 on 상태가 되고, 360° 준 안정상태는 광학적으로 등방 상태가 되어 off 상태가 된다. 위에서 구한 시간에 따른 액정 분자의 분포에 Extended Jones의 행렬 방법을 적용하여 셀의 광스위칭 특성을 계산하였다. 측정된 광스위칭 특성과 계산한 특성을 그림 7에 나타내었다. Reset 전압을 인가한 후 5 V의 전압을 인가했을 때 광투과 특성은 그림 7(a)와 같으며, 0 V의 selection 전압을 인가했을 때는 그림 7(b)과 같다. Turn-on time 과 turn-off time 은 해석한 결과가 약 5 ms와 24  $\mu\text{s}$

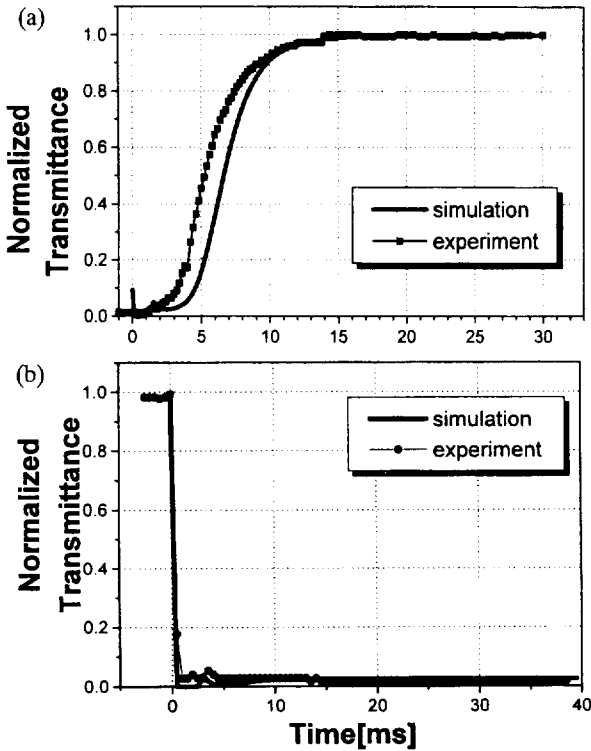


그림 7. 쌍안정 TN 액정셀의 광스위칭 특성 (a) on. (b) off.

로, 실험결과인 4 ms와 20  $\mu$ s와 비슷한 결과를 얻었다. 이런 오차는 ZLI-1557액정의 파라미터 중 점성계수가 알려져 있지 않으므로 적절히 가정할 값을 사용하면서 발생한 것으로 보인다.

두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙했을 때 셀은 그림 3(b)와 같은 초기 상태를 가지며, 그림 4(b)에 액정분자의 분포를 ( $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ )평면에 나타내었다. Reset 전압을 인가하였을 때 액정 분자의 분포를 그림 7에 나타내었다.  $t=1$  ms에서 대부분의 점들은 원점 부근에 위치하고 있으며, 이는 대부분의 액정 분자들이 유리기판에 수직하게 서 있음을 나타낸다. Reset 전

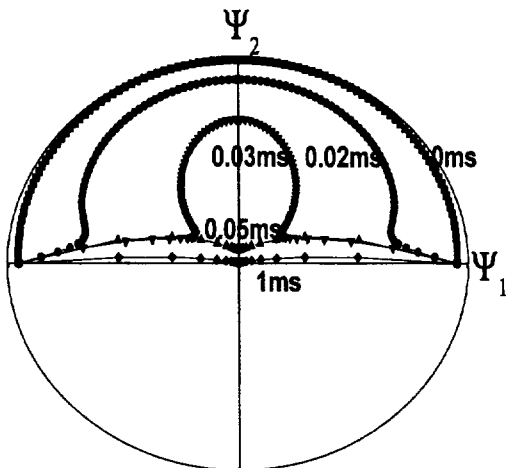


그림 8. 두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 셀에 30 V의 reset 전압을 1 ms 동안 인가했을 때의 액정분자의 분포.

압을 제거한 후 액정분자들의 시간에 따른 분포는 그림 9(a)와 같다. Reset 전압을 제거한 후 backflow 효과에 의해 액정 분자들은 음의  $\Psi_2$  방향으로 기울어지지만, 다시 방향을 전환하여 360° 꼬인 상태로 전이하지 않고 초기의 180° 꼬인 상태로 되돌아간다. Reset 전압을 제거한 후 selection 전압을 인가하였을 때의 액정분자들의 분포를 그림 9(b)에 나타내었다 selection 전압을 인가하여도 셀은 0° 준 안정상태로 전이하지 않으며 처음의 초기 상태로 되돌아가는 것을 볼 수 있다. 즉, 두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 셀은 쌍안정 특성을 가지지 않는다.

두 유리 기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 후, 위와 동일한 방법으로 셀을 제작하였다. 직교한 편광판 사이에 위치한

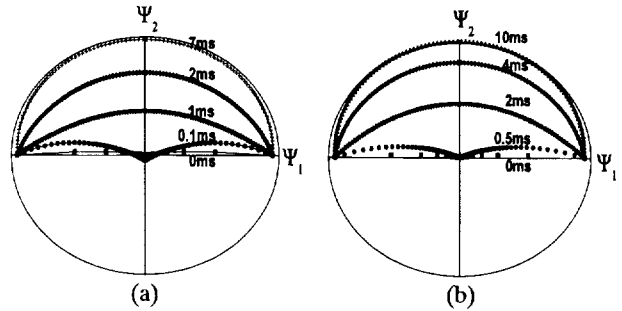


그림 9. 두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 셀에 reset 전압을 인가 후, (a) 0 V의 selection 전압을 인가했을 때와 (b) 5 V의 selection 전압을 인가했을 때의 액정분자의 분포.

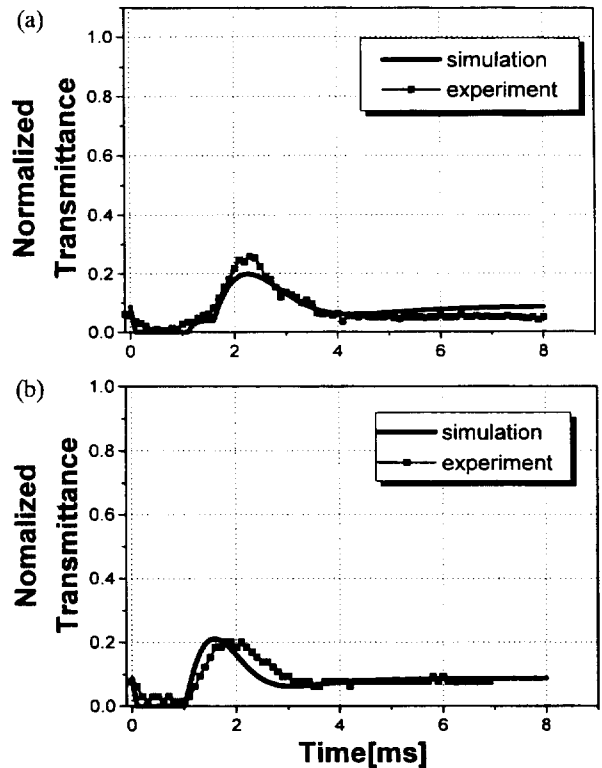


그림 10. 두 유리기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 셀의 광스위칭 특성. Reset전압 인가 후, (a) 5 V의 selection 전압을 인가했을 때와 (b) 0 V의 selection 전압을 인가했을 때.

셀의 광스위칭 특성을 그림 10에 나타내었다. Reset 전압을 인가 후 5 V의 selection 전압을 인가한 경우 광스위칭 특성은 그림 10(a)와 같으며, 0 V의 selection 전압을 인가했을 때는 그림 10(b)와 같다. Selection 전압의 크기에 상관없이 광투과량이 증가하다가, on 되지 못하고 off 상태가 된다.

### V. 결 론

본 논문에서는 Berreman의 액정의 유체 흐름을 고려한 모델을 적용하여 쌍안정 TN 액정셀의 동특성을 해석하였다. 쌍안정 TN 액정셀이 두 가지의 준안정상태로 전이하는 과정에서 backflow현상이 중요한 역할을 함을 확인하였다. 즉, reset 전압을 제거한 후 인가하는 selection 전압의 크기로 backflow의 크기를 조절하여 두 가지 준안정상태 중 하나를 선택하게 된다. 여섯 가지 점성계수가 알려져 있지 않아서 적절히 가정했음에도 불구하고 실험의 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 또한, 180° 액정셀은 러빙 방향에 따라 두 가지의 초기 상태를 가지게 되며, 서로 다른 스위칭 특성을 가지게 됨을 확인하였다. 두 유리 기판을 서로 같은 방향으로 러빙한 셀은 일반적인 STN과 같이 쌍안정 특성을 가지지 않으며, 전계를 인가하면 인가된 전계에 평행하게 액정분자들이 서며, 전계를 제거한 후에는 다시 초기의 상태로 돌아가게 된다. 하지만 두 유리기판을 서로 반대 방향으로 러빙한 셀은 인가 전압에 따라 쌍안정 특성을 나타낸다. 따라서, 쌍안정 특성을 갖기 위해서는 꼬임 각이 180° 일 경우 두 유리 기판을 서로 반대 방향으로 러빙해야 한다.

### Appendix

액정 유체 방정식에 사용된 파라미터를 다음과 같이 첨부하였다.

$$\begin{aligned} T_{11} &= W_1 \cos^2 \phi W_2, \\ T_{12} &= W_1 \cos \phi \sin \phi, \\ T_{13} &= W_3 \cos \phi, \\ T_{14} &= W_4 \sin \phi, \\ T_{21} &= T_{12}, \\ T_{22} &= W_1 \sin^2 \phi + W_2, \\ T_{23} &= W_3 \sin \phi, \\ T_{24} &= -W_4 \cos \phi, \\ T_{31} &= W_5 \cos \phi, \\ T_{32} &= W_5 \sin \phi, \\ T_{41} &= W_6 \sin \phi, \\ T_{42} &= -W_6 \cos \phi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= A_1 \theta'' + A_2 (\theta')^2 + A_3 (\phi')^2 + A_4 \phi' \phi'_0 + A_5 (D_z^2 / 4\pi), \\ \lambda_2 &= B_1 \theta'' + B_2 \theta' \phi' + B_3 \theta' \phi'_0, \\ W_1 &= \sin^2 \theta \left[ \alpha_1 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} (\alpha_3 + \alpha_6) \right], \\ W_2 &= \frac{1}{2} [\alpha_4 + (\alpha_5 - \alpha_2) \cos^2 \theta], W_3 = \alpha_2 \cos^2 \theta - \alpha_3 \sin^2 \theta, \\ W_4 &= -\alpha_3 \cos \theta \sin \theta, \\ W_5 &= \frac{1}{2} [\gamma_2 (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - \gamma_1], \\ W_6 &= \frac{1}{2} (\gamma_2 - \gamma_2) \cot \theta \\ \gamma_1 &= \alpha_3 - \alpha_2, \\ \gamma_2 &= \alpha_6 - \alpha_5, \\ A_1 &= K_{11} \sin^2 \theta + K_{33} \cos^2 \theta, \\ A_2 &= \sin \theta \cos \theta (K_{11} - K_{33}), \\ A_3 &= \sin \theta \cos \theta [2K_{22} \sin^2 \theta - K_{33} (\cos^2 - \sin^2)], \\ A_4 &= 2K_{22} \sin \theta \cos \theta, \\ A_5 &= -\sin \theta \cos \theta (\epsilon_1 - \epsilon_2) (\epsilon_1 \cos^2 \theta + \epsilon_2 \sin^2 \theta)^{-2}, \\ B_1 &= K_{22} \sin^2 \theta + K_{33} \cos^2 \theta, \\ B_2 &= 4K_{22} \sin \theta \cos \theta + 2K_{33} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \cot \theta, \\ B_3 &= -2K_{22} \cot \theta \end{aligned}$$

### 참고문헌

- [1] T. Tanaka, Y. Sato, A. Inoue, Y. Momose, H. Nomura, and S. Iino, Proc. Asia Display '95, 259 (1995).
- [2] J. C. Kim, G.-J. Choi, Y.-S. Kim, K. H. Kang, T.-H. Yoon, K. G. Nam, E.-S. Lee, and H. S. Kim, SID '97 Digest, 33 (1997).
- [3] C. D. Hoke, J. R. Kelly, J. Li, and P.J. Bos, SID '97 Digest, 29 (1997).
- [4] D. W. Berreman, J. Appl. Phys. **46**, 3746 (1975).
- [5] C. Z. van Doorn, J. Appl. Phys. **46**, 3738 (1975).
- [6] 최길재, 김양수, 강기형, 정태혁, 윤태훈, 김재창, 남기곤, 이응상, 한국광학회지 **3**, 218 (1997).
- [7] Y.-S. Kim, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, OECC '97, 688 (1997).
- [8] G.-J. Choi, K. H. Kang, T.-H. Yoon, J. C. Kim, K. G. Nam, H. S. Kim, and E.-S. Lee, OECC '97, 549 (1997).
- [9] D. W. Berreman, Appl. Phys. Lett. **25**, 12 (1975).
- [10] D. W. Berreman, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A **309**, 203 (1983).
- [11] T. J. Sheffer and J. Nehring, J. Appl. Phys. **48**, 1783 (1977).
- [12] K.-Y. Han, T. Miyashita, and T. Uchida, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L277 (1993).

## **Numerical modeling of dynamic switching behavior in a bistable TN LCD**

Byoung-Suk Kim, Yang-Soo Kim, Tae-Hoon Yoon and Jae Chang Kim  
*Department of Electronics Engineering, Pusan National University*  
*Pusan, 609-735, Korea*

(Received January 21, 1998, Revised manuscript received March 30, 1998)

We modeled the dynamic switching behavior of a bistable twisted-nematic liquid crystal cell by employing the Berreman's backflow model. Although viscosity parameters of the liquid crystal material are not known, numerically calculated optical switching characteristics shows good agreement with experimental results. With this model we also have shown that bistable switching can be observed in a  $180^\circ$  twisted cell only when two alignment layers are rubbed in the opposite direction.