

흐름효과를 고려한 IPS-LCDs, VA-LCDs의 전기광학적 특성 시뮬레이션

Simulation of Electro-optical Properties of IPS-LCDs and VA-LCDs Considering Flow Effect

김훈배¹, 박우상^{1,a}

(Hoon-Bae Kim¹ and Woo-Sang Park^{1,a})

Abstract

In this paper, we analyzed the molecular behavior of IPS-LCDs and VA-LCDs by using numerical simulation. The numerical simulation was performed on the basis of Ericksen-Leslie continuum theory. To improve the accuracy of the calculation, we considered fluid balance equation and director balance equation at the same time. thus, we calculated the flow effect for both switching on and off states. As the results of simulation, we confirmed abnormal twist in IPS-LCDs and fast molecular behavior in VA-LCDs which could influence response time.

Key Words : Flow effect, In-plane switching(IPS), Vertically aligned(VA), Abnormal twist

1. 서론

현대 정보화 사회에서 디스플레이 디바이스는 정보전달의 수단으로써 그 중요성이 강조되고 있다. 이 중 TFT(Thin Film Transistor)-LCD(Liquid Crystal Displays)는 저전압, 고휘도, 경량, 박형등의 장점으로 각광을 받고 있으며, 특히 IPS(In-Plane Switching)-LCDs[1], VA(Vertically Aligned)-LCDs의[2] 경우는 넓은 시야각과 높은 대비비, 고휘도 등으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 연구 활동의 여러 가지 방법 중 시뮬레이션 기법은 직접적인 실험에 비해 시간적인 소요가 적고 실험도구가 계산에 필요한 장비 이외에 따로 필요 없다는 용이성 그리고 이론을 바탕으로 계산되어진 데이터를 얻을 수 있다는 점에서 그 효율성이 높게 여겨지고 있다.

일찍이 D. W. Berreman은 액정의 시간에 따른 운동을 연구하기 위한 방법으로 시뮬레이션 기법을

제시하였다. 그 중에서도 Ericksen-Leslie의 연속체 이론을 근간으로 C. Z. Van Doorn과 D. W. Berreman은 흐름효과를 고려하여 TN(Twisted Nematic)-LCs를 모델링 하였으며 그 결과를 통해 흐름효과 중요성을 지적 하였다[3,4].

본 연구에서는 Ericksen-Leslie의 연속체 이론으로부터 fluid balance 식과 director balance 식을 동시에 고려하여 TN-LCDs를 통해 제시된 모델링 식을 IPS-LCDs, VA-LCDs로 확대해 새로이 모델링하고 switching off 상태에서 시간에 따른 흐름속도 분포와 흐름효과가 고려된 분자 배열 분포를 시뮬레이션 하여 IPS-LCDs, VA-LCDs의 과도상태(dynamic state) 응답을 해석하였다.

2. 시뮬레이션

2.1 IPS-LCDs, VA-LCDs의 과도상태 모델링

본 연구는 액정의 내부 관성(inertial momentum)을 무시한 Ericksen-Leslie 연속체 이론을 기초로 모델링 되어 졌다. 이러한 이론 하에서 액정의 운동을 정의하기 위해 방향자 개념을 도입한다. 방향자는 미소 체적 내에 존재하는 액정분자의 평균 방향

1. 인하대학교 전자공학과
(인천시 남구 용현 4동)

a. Corresponding Author : wspark@inha.ac.kr

접수일자 : 2006. 12. 15

1차 심사 : 2007. 1. 19

심사완료 : 2007. 1. 23

을 시간과 공간의 함수 $\hat{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 으로 표시한다. 다음으로 시뮬레이션을 하기위한 모델링 식을 유도 하였다. IPS-LCDs, VA-LCDs의 모델링은 차이를 보인다. 각각의 전극의 위치에 따라 IPS-LCDs는 x 축으로, VA-LCDs는 z 축으로 전기장을 형성한다. 흐름효과는 전기장에 비해 상대적으로 분자의 거동에 미치는 영향이 매우 작다. 이에 따라 IPS-LCDs에서는 전기장의 방향인 x 축 방향의 흐름속도 $v_x = 0$ 으로 놓아도 무방하다. 또한 IPS-LCDs에서는 분자의 거동이 전기장에 따라 $x-y$ 평면에서 이루어지므로 $v_z = 0$ 이 된다. VA-LCDs에서는 전기장의 방향이 z 축으로 형성됨에 따라 $v_z = 0$ 이 되고 분자 거동은 $x-z$ 평면에서 이루어지므로 $v_y = 0$ 된다. 또한 표면의 anchoring 에너지는 일반적인 strong anchoring을 적용하여 앵커링의 영향을 고려하지 않았다. 경계 조건으로 cell 간격을 d 라 했을 때 cell의 경계면의 상, 하판 각각 $z = 0, z = d$ 이며, 유체의 착벽조건(no slip condition)에 의해 경계에서의 흐름속도성분이 IPS-LCDs, VA-LCDs 각각 $v_y, v_x = 0$ 이다. 위의 가정들과 경계조건 등을 Ericksen-Leslie의 fluid balance 식에 도입해 tensor 계산을 통해 풀면 다음과 같은 모델링 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha_2 n_z \frac{\partial n_y}{\partial t} + \alpha_3 n_x \frac{\partial n_z}{\partial t} + \frac{1}{2} [2\alpha_1 n_x n_y n_z^2 + (\alpha_5 - \alpha_2) n_z^2 + \alpha_4 + (\alpha_3 + \alpha_6) n_y^2] \frac{\partial v_y}{\partial z} = c \quad (1)$$

$$\alpha_2 n_z \frac{\partial n_x}{\partial t} + \alpha_3 n_x \frac{\partial n_z}{\partial t} + \frac{1}{2} [2\alpha_1 n_x n_y n_z^2 + (\alpha_5 - \alpha_2) n_z^2 + \alpha_4 + (\alpha_3 + \alpha_6) n_x^2] \frac{\partial v_x}{\partial z} = c \quad (2)$$

여기서 식 (1)은 IPS-LCDs에 관한식이며, 식 (2)는 VA-LCDs에 관한식이다. c 는 유도과정에서 파생되는 적분상수이다. 같은 방법으로 방향자 성분에 관한 식을 유도하는데 있어서, 과도상태에 적합한 자유에너지의 정의가 필요하다. 과도상태 계산방법은 단위 화소 내의 전위 분포를 계산한 뒤, 계산된 전위분포를 일정 시간 동안 동일하게 두고, 이 전위 분포에 적합한 분자 배열 분포를 계산하는 방법이 기 때문에, 고정 전위 모델에서의 전기 에너지 밀도

가 적용되어야 한다. 따라서, 과도상태 해석법의 경우에는 전기에너지 밀도가 음의 부호로 되기 때문에, 결과적으로 액정의 자유에너지 밀도가 탄성에너지 밀도와 전기에너지 밀도의 차($f_s - f_e$)로 표현되며, 이 경우를 Gibbs 자유 에너지 밀도라 하고 f_g 로 표현한다[5]. 또한, 방향자 \hat{n} 을 적용한 f_g 의 Euler-Lagrange 식을 $[f_g]_{n_i}$ 라 한다면, 1차원적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial f_g}{\partial n_i} - \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial f_g}{\partial n_{i,z}} = [f_g]_{n_i}, \quad i = \{x, y, z\} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여, 풀면 IPS-LCDs, VA-LCDs 각각 다음과 같이 3개씩의 방향자 성분에 관한 식이 유도된다.

$$\gamma \frac{\partial n_x}{\partial t} = - [f_g]_{n_x} + \lambda n_x \quad (4)$$

$$\gamma \frac{\partial n_y}{\partial t} = - [f_g]_{n_y} + \lambda n_y - \alpha_2 n_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (5)$$

$$\gamma \frac{\partial n_z}{\partial t} = - [f_g]_{n_z} + \lambda n_z - \alpha_3 n_y \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (6)$$

$$\gamma \frac{\partial n_x}{\partial t} = - [f_g]_{n_x} + \lambda n_x - \alpha_2 n_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad (7)$$

$$\gamma \frac{\partial n_y}{\partial t} = - [f_g]_{n_y} + \lambda n_y \quad (8)$$

$$\gamma \frac{\partial n_z}{\partial t} = - [f_g]_{n_z} + \lambda n_z - \alpha_3 n_x \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad (9)$$

여기서 (4)~(6)은 IPS-LCDs에 관한식이며 (7)~(9)는 VA-LCDs에 관한 식이다. γ 는 rotational viscosity, $\lambda = |\hat{n}| = 1$ 과 같이 \hat{n} 을 단위벡터로 만들어 주기 위한 lagrange multiplier이다. 자유 에너지 밀도 계산에 있어서, 기존에 주로 사용하였던 등방탄성계수 벡터표현으로 근사한 식 대신에 결과의 정확성과 2차원, 3차원 시뮬레이션으로의 확장의 용이성을 고려하여 이방탄성계수 텐서 모델을 사용하였으며, Gibbs 자유 에너지 밀도의 Euler-Lagrange 식은 다음과 같이 유도된다[6].

$$\begin{aligned}
 -[f_g]_{n_i} = & \frac{1}{3}(-K_{11} + 3K_{22} + K_{33})(n_j Q_{j,ii}) \\
 & + (K_{11} - K_{22})n_j(Q_{i,ij} + Q_{j,ii}) \\
 & + \left(\frac{K_{33} - K_{11}}{2}\right)n_j(2Q_{i,m,n}Q_{j,i} + 2Q_{jm}Q_{j,im} - Q_{m,i}Q_{m,j}) \\
 & + 2q_0K_{22}n_j(e_{iml}Q_{j,m} + e_{jml}Q_{i,m}) + c_0(\epsilon_{\perp} - \epsilon_{\parallel})n_j\phi_{,j}\phi_{,i}
 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 K_{11}, K_{22}, K_{33} 는 각각 splay, twist, bend 탄성계수이며, q_0 는 액정의 chirality 이다. 위 식의 아래 첨자는 아인슈타인 표기법(Einstein notation)에 따른 것으로 반복되는 첨자는 x, y , 그리고 z 에 대한 합으로 계산된다. Q_{ij} 는 방향자 \hat{n} 에 대해 다음과 같이 정의 된다[7].

$$Q_{ij} = n_i n_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (11)$$

e_{ijk} 와 δ_{ij} 는 각각 순열 기호(permutation symbol)과 Kronecker's delta를 나타낸다[8]. 위와 같은 tensor notation을 이용하여, 식 (10)을 각각의 성분 즉, x, y, z 에 대해 1차원적으로 풀어 시뮬레이션 하였다. 또한 전위분포함수 $\phi(x, y, z)$ 는 Maxwell 방정식으로부터 유도되는 다음의 Laplace 방정식에 경계조건을 적용하여 시뮬레이션 함으로서 얻을 수 있다.

$$(\epsilon_{ij}\phi_{,ij})_{,i} = 0 \quad (12)$$

2.2 시뮬레이션을 위한 수치해석

과도상태의 분자 배열 분포와 흐름 속도 분포를 얻기 위한 수치해석적 방법으로는 유한차분법(FDM : Finite Difference Method)의 Explicit 방법을 사용하였다. 시간과 공간에 대한 차분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{n_i^{t+1} - n_i^t}{\Delta t} \quad (13)$$

$$Q_{ij,z} = \frac{Q_{ij}^{i+1} - Q_{ij}^{i-1}}{2h} \quad (14)$$

$$Q_{ij,zz} = \frac{Q_{ij}^{i+1} - 2Q_{ij} + Q_{ij}^{i-1}}{h^2} \quad (15)$$

$$V_{,z} = \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2h} \quad (16)$$

액정층을 z 축을 따라 n 개의 sublayer로 나누고, 각 sublayer의 간격을 h 로 하였다. 특히 전위분포를

계산함에 있어서 Voltage에 대한 Euler-Lagrange를 풀면 V_z 의 이차 미분방정식이 유도된다. 이 미분방정식을 차분방정식으로 근사시켜 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 -\left(\frac{\epsilon_{z,i+1} - \epsilon_{z,i-1}}{4h^2} - \frac{\epsilon_{z,i}}{h^2}\right)V_{i-1} - \frac{2\epsilon_{z,i}}{h^2}V_i \\
 + \left(\frac{\epsilon_{z,i+1} - \epsilon_{z,i-1}}{4h^2} - \frac{\epsilon_{z,i}}{h^2}\right)V_{i+1} = 0
 \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 $n+1$ 개의 미지수를 가지는 반면, 방정식은 $n-1$ 개 존재하기 때문에, pixel 전극과 공통전극에 대한 추가적인 두 개의 정보를 초기조건으로 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이와 같이 얻은 전위 분포를 이용하여 앞 절의 모델링식을 시뮬레이션 하기 위해 먼저, 식 (4)~(6)을 식 (1)대입하고 식 (7)~(9)는 식 (2)대입하여, 시간에 대한 미분항을 소거하였다. 다음은 cell gap에 $z = 0$ 에서 $z = d$ 까지를 앞서 설명한 유체의 경계조건(착벽조건)을 적용하여 적분함으로써, 적분상수 c 를 구할 수 있다. 따라서 c 는 z 에 대해서 일정하며, 매시간(t)마다 다시 계산되어 진다. 본 연구에서는 시간차분의 간격(Δt)을 $0.1\mu sec$ 로 하였다. 시뮬레이션에 필요한 각 파라미터값은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션에 필요한 물질 상수 값.

Table 1. Values of material constants for simulation.

Quantity (unit)	Value	
	IPS-LCDs	VA-LCDs
K_{11} (pN)	10.4	15.9
K_{22} (pN)	7.5	10.0
K_{33} (pN)	14.0	18.4
α_1 (mPa s)	-18.0	-18.0
α_2 (mPa s)	-101.0	-123.5
α_3 (mPa s)	-11.0	11.5
α_4 (mPa s)	82.0	82
α_5 (mPa s)	89.0	66.5
α_6 (mPa s)	-23.0	-45.5
n_e	1.5626	1.5866
n_o	1.4778	1.4848
ϵ_{\parallel}	14.5	3.6
ϵ_{\perp}	4.3	7.4
Cell Gap (μm)	4.5	4.5
Pretilt (degree)	0	90
Twist (degree)	45	0

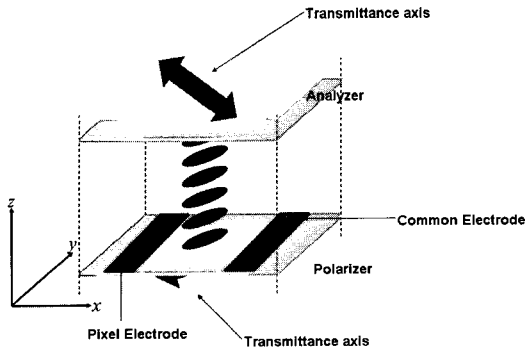


그림 1. IPS-LCDs 시뮬레이션을 위한 좌표계의 정의 및 초기조건.

Fig. 1. Definition of coordinate systems and initial condition for IPS-LCDs simulation.

3. 시뮬레이션 결과 및 해석

3.1 IPS-LCDs의 결과 및 해석

LCDs에서의 흐름효과는 고체의 상,하판과 유체의 액정 분자 사이에 상호 속도차이에 의해 생기는 변형력 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 변형력은 액정분자가 상,하판에 대해 수직적인 움직임 보다는 수평적인 움직임에 더 영향을 받는다. 이로부터 본 연구에서는 z축을 따라 x-y평면 상에서의 흐름효과에 대한 분석을 시도 하였다. 먼저 IPS-LCDs에서의 흐름효과 대한 시뮬레이션을 하기 위해 그림 1과 같이 좌표 설정을 하였다.

시뮬레이션 결과 switching on 상태에서는 흐름속도가 최대 수 $\mu m/s$ 로서, 분자배열분포에 매우 작은 영향을 주게 된다. 응답 또한 그 영향력이 매우 작으며, 흐름효과를 고려하지 않을 때와의 차이가 거의 없는 결과를 보였다. switching off 상태는 분자배열분포가 완전히 saturation된 이후 인가된 전압을 제거하여 시뮬레이션 하였다. 그림 2는 전체 layer를 200개의 sublayer로 나누고 switching off 상태에서 시간에 따른 cell내의 각 위치에서의 분자배열분포를 나타낸다. switching off 된 직후에는 흐름효과를 고려했을 경우에도 분자배열분포가 흐름효과를 고려하지 않았을 경우와 크게 다르지 않았다.

그러나 충분한 시간이 지나 분자가 다시 초기 배열상태인 twist 45° 로 돌아가기 전에 45° 보다 많게는 대략 0.5° 정도 미세하게 더 진행 하였다가 정렬되는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 3은 이러한 흐

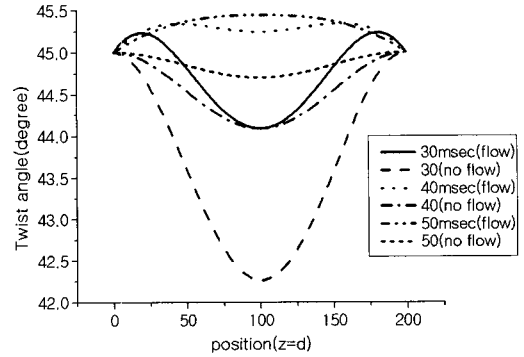


그림 2. IPS에서 switching off이후 30~50 msec 사이에 분자 배열 분포.

Fig. 2. After switching off in IPS molecular director distribution at 30~50 msec.

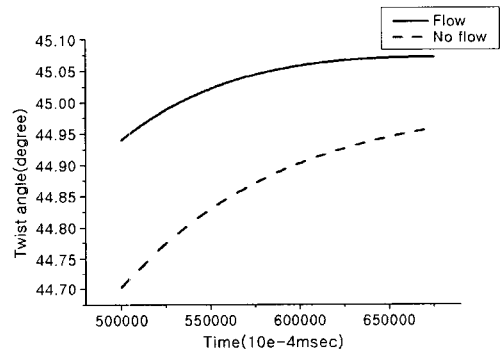


그림 3. IPS에서 switching off 이후 50~65 msec 사이에 100번째 sublayer에서의 분자 배열 분포.

Fig. 3. Molecular director distribution in 100 th sublayer at 50~65 msec after switching off.

름효과에 의한 분자배열분포를 좀 더 정확히 보여 주기 위해 전체 layer를 200개로 나누고 그 중 100번째 sublayer에서 switching off 이후 50~60 msec 사이에 분자 배열분포를 보이고 있다. 흐름이 고려됐을 경우 분자의 twist가 45° 보다 더 진행함을 확인할 수 있다.

이와 같은 흐름효과는 switching off 상태에서 분자 배열 분포에 가시적인 영향을 주게 된다. 그림 4에서는 위의 그림 2와 그림 3을 토대로 하여 switching off 이후 대략 50 msec 이후의 흐름효과에 의한 분자 거동모식도를 나타내었다.

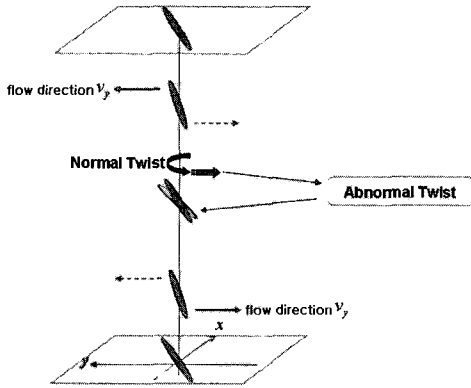


그림 4. Switching off 상태에서 흐름효과를 고려한 IPS-LCDs의 액정 분자 거동 모식도.
Fig. 4. Schematic drawing IPS-LCDs considering flow effect.

Switching off이후 충분히 시간이 지나고 나서 흐름효과로 인해 정상적인 분자배열의 twist상태 보다 더 많이 진행하게 된다. 그 크기가 매우 작기는 하지만 abnormal twist가 존재함을 확인 할 수 있다.

3.2 VA-LCDs의 결과 및 해석

VA-LCDs에서는 IPS-LCDs에서와는 달리 전계에 따른 분자의 움직임이 상, 하판에 대해 수직적인 움직임을 한다. 이로 인해 $x-y$ 평면상에서의 움직임은 매우 작게 될 것이다. 이를 시뮬레이션하기 위해 그림 5와 같이 VA-LCDs에 대한 좌표계를 설정 하였다.

Switching on 상태에서 흐름효과는 IPS-LCDs에서와 마찬가지로 그 크기가 매우 작아 분자배열분포나 응답에 있어 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나 IPS-LCDs와 같은 방법으로 시뮬레이션한 switching off상태에서는 switching on 상태와는 다른 결과를 보였다. IPS-LCDs만큼의 흐름효과에 대한 영향은 나오지 않았으나, 흐름효과가 나타나는 것은 확인 할 수 있었다.

그림 6은 VA-LCDs의 전체 layer를 200개의 sublayer로 나누고 각 sublayer 별로 나타나는 분자배열분포를 switching off 이후 30msec에서의 보이고 있다. 흐름효과로 인한 영향은 IPS-LCDs에 비해 아주 미세하기는 하지만 좀 더 빠른 분자의 거동을 보임을 확인 할 수 있었다. 그러나 수평적인 움직임인 twist와 달리 유체와 고체사이에 수직적 변화를 갖는 tilt로 구동되는 VA-LCDs에서는 IPS-LCDs에 비하여 흐름효과의 영향이 미미하여 IPS-LCDs에서 나타나는 abnormal twist와 같은 abnormal tilt가 존재하지는 않았다.

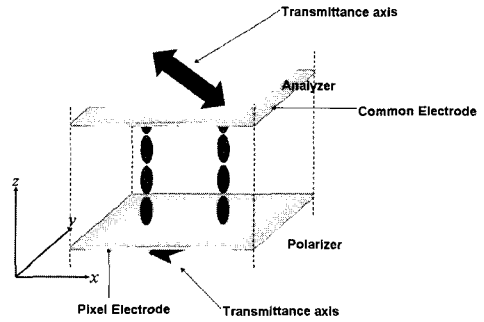


그림 5. VA-LCDs 시뮬레이션을 위한 좌표계의 정의 및 초기조건.
Fig. 5. Definition of coordinate systems and initial condition for VA-LCDs simulation.

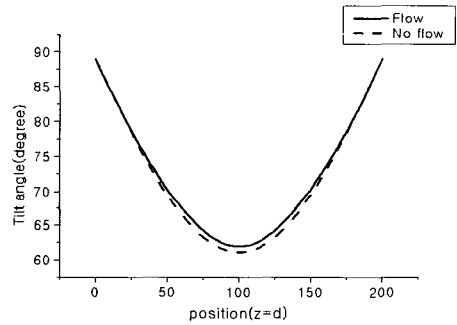


그림 6. VA-LCDs에서 switching off 이후 30 msec에서의 분자배열 분포.
Fig. 6. Molecular director distribution in VA-LCDs at 30 msec after switching off.

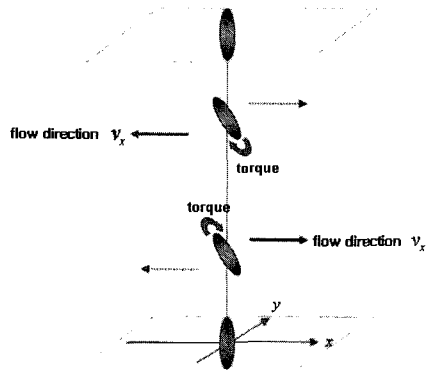


그림 7. Switching off 이후 흐름효과를 고려한 VA-LCDs의 액정 분자 거동 모식도.
Fig. 7. Schematic drawing VA-LCDs considering flow effect.

그림 7에서는 시뮬레이션의 결과를 통해 VA-LCDs에서 나타나는 흐름효과가 분자거동에 미치는 영향을 액정 분자 거동 모식도를 통해 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Ericksen-Leslie의 연속체 이론의 fluid balance식과 director balance의 식을 동시에 고려하여 C. Z. Van Doorn과 D. W. Berreman이 제시한 모델링 식을 IPS-LCDs, VA-LCDs로 확장하고 이를 바탕으로 수치 해석적으로 분자배열분포를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 IPS-LCDs, VA-LCDs 모두에서 switching on 상태에서는 전기장이 흐름효과에 비해 상대적으로 강하여 흐름효과가 미세하게 나타나 분자의 거동에 크게 영향을 주지 않았다. 이와 달리 switching off 상태에서는 흐름효과가 분자의 거동에 영향을 주게 된다. 이러한 흐름효과는 유체와 고체상의 속도차이에 의한 변형력으로 작용하는 것으로써 분자의 수평적인 움직임에 더 영향을 받게 된다. 이러한 근거를 바탕으로 IPS-LCDs, VA-LCDs를 z 축을 따라 $x-y$ 평면상에 시뮬레이션 하였다. 분자의 수평적 움직임인 twist로 구동되는 IPS-LCDs에서는 초기배향상태로 돌아가기 전에 흐름효과로 인한 abnormal twist의 존재를 확인 할 수 있었다. 이와는 달리 분자의 수직적 움직임인 tilt로 구동되는 VA-LCDs에서는 흐름효과가 IPS-LCDs에 비해 미약하여 abnormal tilt가 존재 하지 않았으며, 이는 VA-LCDs가 IPS-LCDs에 비해 응답속도가 빠를 수 있게 하는 이론적 근거로 생각된다. 그러나 이에 대한 대한 구체적인 타당성 여부는 향후 좀더 심도 있게 다루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M. Oh-e, M. Ohta, S. Aratani, and K. Kondo, "Principles and Characteristics of Electro-Optical Behaviour with In-Plane Switching Mode", *Asia Displays'95*, p. 577, 1995.
- [2] J. F. Clerc, "Vertically Aligned Liquid-Crystal Displays", *SID'91 Digest*, p. 758, 1991.
- [3] C. Z. van Doorn, "Dynamic behavior of twisted nematic liquid crystal layer in switched fields", *J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 9, p. 3738, 1975.
- [4] D. W. Berreman, "Liquid crystal twist cell dynamics with backflow", *J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 9, p. 3746, 1975.
- [5] S. Dickmann, J. Eschler, O. Cossalter, and D. A. Mlynski, "Simulation of LCDs Including Elastic Anisotropy and Inhomogeneous Field", *Proc. SID '93 Digest*, p. 638, 1993.
- [6] S. M. Jung and W. S. Park, "Study on the validity of the vector and tensor approaches through a 3-dimensional simulation", *ILCC 2002*, p. 455, 2002.
- [7] S. Dickmann, J. Eschler, O. Cossalter, and D. A. Mlynski, "Simulation of LCDs Including Elastic Anisotropy and Inhomogeneous Field", *Proc. SID '93 Digest*, p. 638, 1993.
- [8] P. G. de Gennes, "The Physics of Liquid Crystal", Clarendon, Oxford, U.K., 1974.