

論文2002-39SD-4-2

유한요소법을 이용한 IPS 모드의 액정 분자 거동 해석 연구

(A Study on the director distribution of In-Plane Switching liquid crystal cell by finite element method)

鄭柱滉*, 尹相鎬*, 李喆洙*, 元太映*

(Joosick Jung, Sang-Ho Yoon, Cheolsoo Lee, and Taeyoung Won)

요 약

본 논문에서는 IPS모드의 액정 셀에서 전압에 따른 액정 거동을 수치 해석적으로 계산하는 방법을 보고한다. 액정 거동을 해석하기 위해 복잡한 구조에 적용이 용이한 3차원 유한요소법을 사용하여 액정 셀 내부의 전압 분포와 전계 분포를 계산하였다. 전기 에너지와 액정 분자의 탄성 에너지로 이루어지는 액정 셀 내부의 자유에너지 밀도를 고려하였으며, 에릭슨-레슬리(Ericksen-Leslie) 방정식과 라플라스(Laplace) 방정식을 해석함으로써 액정 셀의 스위칭 특성을 계산하였다. $24\mu\text{m}\times 12\mu\text{m}\times 4.5\mu\text{m}$ 사이즈의 IPS 모드 액정 셀에 대하여 1,859개의 노드와 8,640개의 사면체 요소를 생성하여 16ms까지 과도 해석하였다. 그 결과, 전극 위 부분을 제외한 영역에서 횡방향의 전계가 형성되었고, 전극 위 영역에서 전경선(disclination)이 발생하는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper reports a methodology for calculating distribution of the director in an In-plane switching liquid crystal cell by a numerical technique. To calculate distribution of the director, we developed a three dimensional finite element method (FEM) and calculated the distribution of electric potential and electric field in the liquid crystal cell. We have considered the free-energy density composed of electric potential and strain energy in the bulk of liquid crystal cell and calculated the switching property of liquid crystal cell by the Ericksen-Leslie equation and the Laplace equation. We generated 1,859 nodes and 8,640 elements for IPS mode cell with $24\mu\text{m}\times 12\mu\text{m}\times 4.5\mu\text{m}$ and performed transient analysis until 16ms. As a result, horizontal electric field occurred at cell region except liquid crystal region above electrodes and the disclination occurred on electrodes.

Key words : finite element method, liquid crystal, In-plane switching, Ericksen-Leslie equation

I. 서 론

최근 액정 셀의 응답 속도 개선을 위해 횡전계 인가 방식의 액정 셀에 대한 연구가 진행되고 있다. IPS (In-plane Switching)모드의 경우 빠른 동작특성과 광

시야각에 의해 TV등의 대면적 및 동영상의 구현이 필수적인 디스플레이 장치에 적용하기 위해 연구가 진행 중이다.^[1-3]

횡전계 인가 방식에서는 액정 배향을 위한 표면 유전체 막에서의 액정의 거동이 상대적으로 중요하게 된다. 기존의 액정 셀의 특성분석을 위한 액정거동 해석에서는 강한 앵커링(strong anchoring)을 적용하여 표면 영역의 액정 거동을 정확히 예측하는데 문제가 있었다. 또한, 유한차분법을 이용함으로써 상대적으로 복

* 正會員, 仁荷大學校 電子電氣工學部
(School of Electrical Engineering, Inha University)
接受日字:2001年11月16日, 수정완료일:2002年2月18日

잡한 IPS모드의 액정 셀의 특성을 분석하는데 어려움이 있었다.^[4]

본 논문에서는 복잡한 구조에 적용이 용이한 3차원 유한요소법을 사용하여 IPS모드의 액정 셀에서 전압에 따른 액정 거동을 수치 해석적으로 계산하였다. 액정 셀의 픽셀 전극 및 공통 전극에 인가된 전압에 의한 전압 분포를 계산하였고, 전계 분포를 해석하였다. 또한, 액정 분자의 방향자 단위벡터 \vec{n} 을 이용하여 \vec{n} 의 x, y, z성분으로 액정 분자의 거동을 나타내는 방법인 벡터 방법을 사용하여 네마틱(nematic) 액정에 대한 자유에너지 밀도를 고려하였고, 라플라스 방정식을 해석하여 전위 분포를 얻었다. 표면의 앵커링을 고려하기 위해 표면에서의 Rapini-Papoular potential을 고려하였다. 시간 과도해석을 위해서 외삽법(explicit scheme)을 사용하였다.

후술하는 제II장에서는 본 연구에서 개발된 시뮬레이터에서 적용된 액정거동 방정식에 대한 모델에 대해 설명하고, 이어서 제III장에서는 3차원 유한요소법을 적용하기 위한 수치해석 방법을 설명한다. 제IV장에서는 본 해석기를 이용한 시뮬레이션 결과를 논의한다.

II. 액정 거동 지배 방정식

전압이 인가됨에 따라 변화하는 액정 방향자의 분포를 계산하기 위해서 에릭슨-레슬리 방정식을 3차원 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 에릭슨과 레슬리의 연속체 이론^[5]에 의하면 네마틱 액정의 동작 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma n_i - \frac{\partial F}{\partial n_i} - \gamma_1 N_i - \gamma_2 n_j A_{ji} + \left(\frac{\partial F}{\partial n_{i,j}} \right)_{,j} = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 n_i 는 액정의 방향자로 $|\vec{n}| = 1$ 인 단위 벡터이고, F 는 액정분자의 자유에너지 밀도이며, γ 는 라그랑지 승수(Lagrange multiplier), γ_1 은 회전점성계수이다. 라그랑지 승수는 단위 벡터인 n_i 의 크기를 항상 1로 만족 시켜주기 위해 사용된다. A_{ji} , N_i 는 액정 분자의 이동에 의한 흐름 성분을 나타내는 것으로 액정 분자의 속도를 v_i 라하면, 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$A_{ji} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

$$N_i = \dot{n}_i - \frac{1}{2} (v_{i,j} - v_{j,i}) n_j \quad (3)$$

첨자 i, j는 직각좌표계의 x, y, z를 나타내며, 텐서 표기법을 따른다. 속도의 변화율인 $v_{i,j}$ 을 0으로 가정하면 식 (1)은

$$\gamma_1 \dot{n}_i = \gamma n_i - \frac{\partial F}{\partial n_i} + \left(\frac{\partial F}{\partial n_{i,j}} \right)_{,j} \quad (4)$$

으로 표현된다.

액정 분자의 자유에너지 밀도는 액정 분자의 변형에 의한 탄성 에너지와 인가되는 전압에 의한 전기장 에너지로 구성되는데, 액정 분자의 탄성에너지는 프랭크-오신(Frank-Ossen)에 의해^[6]

$$F_s = \frac{1}{2} k_{11} (\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_{33} (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{2\pi}{p_0} k_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n}) \quad (5)$$

으로 표현된다. 식 (5)의 k_{11}, k_{22}, k_{33} 는 프랭크 탄성계수이고, p_0 는 자연 피치(natural pitch)이다. 인가된 전압에 의한 전기장에너지는

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \nabla V \cdot \epsilon \cdot \nabla V \quad (6)$$

으로 표현된다. 식 (6)의 ϵ 은 액정분자의 이방성 유전 특성을 표현한 것으로

$$\epsilon = \epsilon_{\perp} \delta_{ij} + (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) n_i n_j \quad (7)$$

이며, ϵ_{\parallel} 와 ϵ_{\perp} 은 막대기 형태의 액정 분자의 평행 방향과 수직 방향의 유전 상수이다. 따라서, 액정 셀의 자유에너지 밀도는

$$F = F_s - F_e = \frac{1}{2} k_{11} (\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_{33} (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{2\pi}{p_0} k_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n}) - \frac{1}{2} \epsilon_0 \nabla V \cdot \epsilon \cdot \nabla V \quad (8)$$

으로 표현된다. 식 (8)에서의 액정 셀 내부의 전압 분포는 식 (9)로 표현되는 라플라스 방정식을 통해서 구할 수 있는데,

$$\nabla \cdot (\epsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)) = 0 \quad (9)$$

ϕ 는 전위를 나타내고, 이방성 액정 분자의 유전율 ϵ

을 행렬 형태로 표현하면 식 (10)으로 표현되는데, 액정 분자의 이방성 유전 특성을 텐서(tensor) 형태로 표현한 것이다.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_x n_x & \Delta\epsilon n_x n_y & \Delta\epsilon n_x n_z \\ \Delta\epsilon n_y n_x & \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_y n_y & \Delta\epsilon n_y n_z \\ \Delta\epsilon n_z n_x & \Delta\epsilon n_z n_y & \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_z n_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

표면 앵커링 효과를 표현하기 위한 에릭슨 레슬리 방정식의 오일러-라그랑지 형태는 다음과 같이 표현된다.^[7]

$$\begin{aligned} \partial \frac{F^S}{\partial n_i} - \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial n_i} &= 0, \quad z=0 \\ \partial \frac{F^S}{\partial n_i} + \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial n_i} &= 0, \quad z=d \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 F^S 는 표면 영역에서의 앵커링에 의한 위치 에너지이고, F^B 는 액정영역 내부의 탄성 에너지이고, D^S 는 표면 소산 함수이다.

표면 영역에서 앵커링에 의한 에너지는

$$\begin{aligned} F^S &= \frac{1}{2} C_{\theta} [n_z^2 \cos^2 \theta_r + (1 - n_z^2) \sin^2 \theta_r - n_z \sqrt{1 - n_z^2} \sin 2\theta_r] \\ &+ \frac{1}{2} C_{\phi} \left[\frac{n_y^2}{1 - n_z^2} \cos^2 \phi_r + \frac{n_x^2}{1 - n_z^2} \sin^2 \phi_r - \frac{n_x n_y}{1 - n_z^2} \sin 2\phi_r \right] \end{aligned} \quad (12)$$

으로 표현되고, C_{θ} 와 C_{ϕ} 는 θ , ϕ 방향의 앵커링의 정도를 나타내며, θ_r , ϕ_r 는 프리틸트, 프리트위스트 앵글을 나타낸다.

표면 영역의 소산 함수 D^S 는 다음과 같이 표현되고,

$$\begin{aligned} D^S &= \frac{1}{2} \alpha_{\parallel}^s (n_r \cdot n)^2 \dot{n}^2 + \frac{1}{2} \alpha_{\perp}^s (n_r \cdot \dot{n})^2 \\ &+ \frac{1}{2} \alpha_{\text{mix}}^s (n_r \cdot \dot{n})^2 (n_r \cdot n)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 n_r 은 액정 분자의 표면 배열 방향, α_{\parallel}^s 는 평행 점성도, α_{\perp}^s 는 수직 점성도, α_{mix}^s 는 혼합 점성도를 나타낸다.

III. 수치 해석 방법

액정 거동을 해석하기 위해서는 식 (4)와 식 (9), 식 (11)로 구성되는 커플링 방정식을 해석해야 한다. 에릭

슨 레슬리 방정식은 비선형 편 미분 방정식으로 수치 해석을 수행하기 위한 방법으로 초기 액정 분포에 의한 전압 분포를 해석하고, 전압분포를 이용하여 액정 내부의 액정 거동을 해석한 후 내부의 액정 분포를 이용하여 표면에서의 액정분포를 해석하는 순차적인 방법을 사용하였다.

1. 내부 영역에서의 액정 분자 거동 해석

액정 분자의 스위칭 특성을 지배하는 식 (4)을 3차원 유한요소법으로 해석하기 위한 정식화 방법으로 갤러킨 방법(Galerkin method)을 사용하였다. 갤러킨 방법은 가중 잔여법의 하나로서 가중함수로 절점의 값을 내삽하기 위한 기저함수를 사용한다. 식 (4)의 잔여치 γ' 는

$$\gamma' = \gamma n_i - \frac{\partial F}{\partial n_i} + \left(\frac{\partial F}{\partial n_{i,j}} \right)_{,j} - \gamma_1 \dot{n}_i \quad (14)$$

표현되며, 가중함수로 기저함수를 곱한 가중 잔여치는

$$R_i^e = \int_V N_i^e \gamma' dV, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

으로 표현된다. 식 (14)을 식 (15)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$R_i^e = \int_V N_i^e \left[\gamma n_i - \frac{\partial F}{\partial n_i} + \left(\frac{\partial F}{\partial n_{i,j}} \right)_{,j} - \gamma_1 \dot{n}_i \right] dV \quad (16)$$

식 (16)을 행렬 형태로 정리하면

$$[R_i^e] = [K^e][n_i^e] - [M^e][\dot{n}_i^e] \quad (17)$$

으로 정리되고, 식 (17)의 우변의 성분은

$$[K^e][n_i^e] = \int_V N_i^e \left[\gamma n_i - \frac{\partial F}{\partial n_i} + \left(\frac{\partial F}{\partial n_{i,j}} \right)_{,j} \right] dV \quad (18)$$

$$[M^e][\dot{n}_i^e] = \int_V N_i^e \gamma_1 \dot{n}_i dV \quad (19)$$

으로 표현된다. 가중함수를 곱한 식 (17)이 0이 되도록 하는 n_i 가 액정 방향자의 해이므로 식 (4)는 식 (20)로 정리되어 진다.

$$[R_i] = [K][n_i] - [M][\dot{n}_i] = [0] \quad (20)$$

시간과도 해석을 위해서 시간에 대한 이산화를 오일러 방법으로 수행하였다. 식 (20)에서 시간에 대한 방향자의 변화율 \dot{n}_i 는

$$\dot{n}_i = \frac{n_i^m - n_i^{m-1}}{\Delta t} \quad (21)$$

으로 표현되는데, 위첨자 m은 현재 구하고자 하는 시간 단계를 나타내고, m-1은 이미 구하여 알고 있는 전 시간 단계를 의미하고, Δt는 미소시간을 나타낸다. 식 (20)에 식 (21)을 대입하고, Δt를 곱하여 정리하면

$$[M][\dot{n}_i^m] = [M][n_i^{m-1}] - \Delta t[K^e][n_i^{m-1}] \quad (22)$$

으로 재구성 할 수 있다. 식 (22)을 계산함으로서 시간에 따른 액정 방향자의 분포를 해석하였는데, 해의 안정성을 위하여 $|\vec{n}| = 1$ 을 만족시켜 주기 위한 라그랑지 승수 γ 대신 매 시간 단계에서 $|\vec{n}| = 1$ 로 정규화 해주는 방법을 사용하였다. 경계조건으로 액정 분자는 러빙에 의해 표면에서 움직일 수 없다고 가정하였다.

2. 표면 영역에서의 액정 분자 거동 해석

액정 셀의 표면 영역에서의 액정분자의 거동을 지배하는 식 (11)을 3차원 유한요소법으로 해석하기 위한 정식화 방법으로 갤러킨 방법(Galerkin method)을 사용하였다. 식 (14)의 잔여치 γ'는

$$\begin{aligned} \gamma' &= \partial \frac{F^S}{\partial n_i} - \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial \dot{n}_i}, \quad z=0 \quad (23) \\ \gamma' &= \partial \frac{F^S}{\partial n_i} + \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial \dot{n}_i}, \quad z=d \end{aligned}$$

표현되며, 가중함수로 기저함수를 곱한 가중 잔여치는

$$R_i^e = \int_V N_i^e \gamma' dV, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (24)$$

으로 표현된다. 식 (23)을 식 (24)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_i^e &= \int_V N_i^e \left[\partial \frac{F^S}{\partial n_i} - \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial \dot{n}_i} \right] dV, \quad z=0 \\ R_i^e &= \int_V N_i^e \left[\partial \frac{F^S}{\partial n_i} + \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} + \partial \frac{D^S}{\partial \dot{n}_i} \right] dV, \quad z=d \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)을 행렬 형태로 정리하면

$$[R_i^e] = [K^e][n_i^e] - [M^e][\dot{n}_i^e] \quad (26)$$

으로 정리되고, 식 (25)의 우변의 성분은

$$[K^e][n_i^e] = \int_V N_i^e \left[\partial \frac{F^S}{\partial n_i} - \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} \right] dV, \quad z=0$$

$$[K^e][n_i^e] = \int_V N_i^e \left[\partial \frac{F^S}{\partial n_i} + \partial \frac{F^B}{\partial \left(\frac{\partial n_i}{\partial j}\right)} \right] dV, \quad z=d \quad (27)$$

$$[M^e][\dot{n}_i^e] = \int_V N_i^e \partial \frac{D^S}{\partial \dot{n}_i} dV \quad (28)$$

으로 표현된다. 가중함수를 곱한 식 (27)이 0이 되도록 하는 n_i가 액정 방향자의 해이므로 식 (11)은 식 (29)로 정리되어 진다.

$$[R_i] = [K][n_i] - [M][\dot{n}_i] = [0] \quad (29)$$

3. 액정 셀의 전위·전계 분포 해석

액정 셀 내의 전압분포를 계산하기 위한 식 (9)을 3차원 유한요소법으로 해석하기 위하여 리츠 방법(Ritz method)으로 정식화하였다.

식 (9)에 변분 원리를 적용하면 라플라스 방정식의 범함수 ϕ^e는 식 (30)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi^e}{\partial \phi_i^e} &= \sum_{j=1}^4 \phi_j^e \int_V \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dV \end{aligned} \quad (30)$$

식 (30)에서 N_i, N_j는 내삽을 위한 기저함수이다. 식 (30)을 행렬로 표현하면

$$\left[\frac{\partial \phi^e}{\partial \phi^e} \right] = [K^e][\phi^e] \quad (31)$$

으로 표현되고, 범함수 ϕ^e는 최소가 되어야 하므로,

$$[K^e][\phi^e] = 0 \quad (32)$$

식 (32)을 만족하는 ϕ^e를 계산함으로써 전위 분포를 구할 수 있다.

요소의 강성 행렬 [K^e]는

$$K_{ij}^e = \int_V \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \epsilon \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dV \quad (33)$$

으로 표현된다. 경계조건으로는 도체 내부에는 전기장이 존재하지 않고, 전위가 일정하다고 가정하여 도전체 표면에서 디리클리트 경계조건(Dirichlet boundary

condition)을 적용하였다.

앞에서 구한 전위 분포를 가지고 전압과 전계의 관계식에 따라 액정 셀 내부의 전계 분포를 구할 수 있다.

$$E = -\nabla\phi \tag{34}$$

$$E_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{35}$$

식 (34)를 x, y, z 에 대해 미분하면

$$\phi^e = N_1^e \phi_1^e + N_2^e \phi_2^e + N_3^e \phi_3^e + N_4^e \phi_4^e \tag{36}$$

$$\begin{aligned} E_x^e &= \frac{\partial\phi^e}{\partial x} = \frac{\partial N_1^e}{\partial x} \phi_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial x} \phi_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial x} \phi_3^e + \frac{\partial N_4^e}{\partial x} \phi_4^e \\ E_y^e &= \frac{\partial\phi^e}{\partial y} = \frac{\partial N_1^e}{\partial y} \phi_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial y} \phi_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial y} \phi_3^e + \frac{\partial N_4^e}{\partial y} \phi_4^e \\ E_z^e &= \frac{\partial\phi^e}{\partial z} = \frac{\partial N_1^e}{\partial z} \phi_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial z} \phi_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial z} \phi_3^e + \frac{\partial N_4^e}{\partial z} \phi_4^e \end{aligned} \tag{37}$$

와 같이 되고 앞에서 구한 전위 분포를 이용해 각 요소에서의 전계 E_x^e, E_y^e, E_z^e 를 구할 수 있다. 이때 식 (34)에서 구한 전계 값은 하나의 요소 내에서 모두 같기 때문에 어떤 노드에서의 전계는 그 노드를 포함하는 요소들의 전계의 평균으로 구하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 논의

그림 1은 액정 셀에서 표면 앵커링(surface anchoring)을 고려해야 하는 영역을 표현하는 개략도이다. 강한 앵커링을 가정하는 기존의 방법에서는 표면의 액정 분자는 러빙에 의해 고정되어 있다고 가정하고, 벌크 영역에서의 전기에너지와 액정 분자의 탄성 에너지를 고려하여 액정 분자 거동을 해석하였다. 하지만 많은 보고에 의하면 표면 영역의 액정 방향자는 액정 셀에

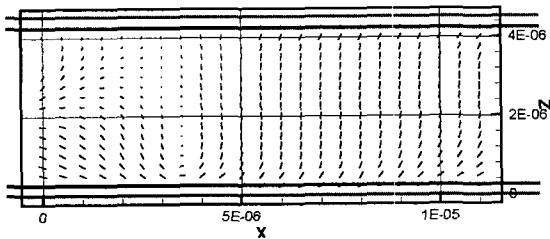


그림 1. 표면 앵커링 효과를 고려해야 하는 영역의 개략도

Fig. 1. Schematic diagrams illustrating consideration region of surface anchoring effect.

전압이 인가되면 미소한 움직임이 보이고 이는 광투과 특성 및 문턱전압에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 표면영역의 액정 분자의 거동을 해석하기 위해서는 벌크 영역의 액정 분자를 경계조건으로 하여 표면에서의 액정 분자의 거동을 해석하였다.

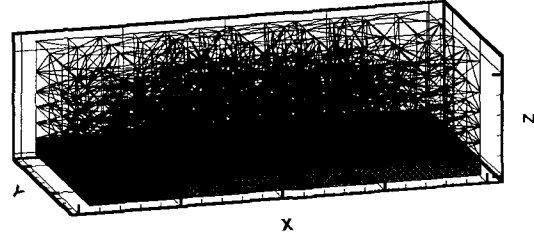
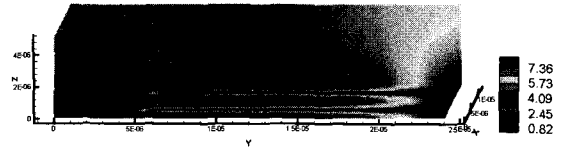


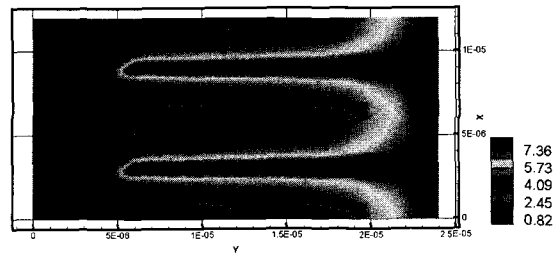
그림 2. 시뮬레이션을 수행하기 위해 구성한 IPS 모드의 액정 셀

Fig. 2. Schematic diagrams illustrating mesh structures of liquid crystal cell for a IPS-LC.

그림 2는 시뮬레이션을 수행하기 위해 구성한 IPS 모드의 액정 셀을 나타낸 것이다. 핑거(finger) 모양으로 픽셀 전극과 공통전극이 존재하는 형태이고 액정 셀의 영역은 $5\mu\text{m}$ 이다. 유한요소법 수치해석을 위해 사면체 메쉬를 사용하였고, 1,859개의 노드와 8,640개의



(a)



(b)

그림 3. IPS 모드 액정셀의 전위 분포 (a) 3차원 전위 분포, (b) x-y평면($z=0.0\mu\text{m}$)의 전위 분포

Fig. 3. Schematic diagrams illustrating IPS-LC cell:(a) three-dimensional electric potential distribution, (b) electric potential distribution on the x-y plane ($z=0.0\mu\text{m}$).

사면체 요소로 구성되었다. 시뮬레이션을 위해 사용한 액정은 $k_{11} = 15.0 \times 10^{-12}$, $k_{22} = 15.7 \times 10^{-12}$, $k_{33} = 15.0 \times 10^{-12}$, $\epsilon_{\parallel} = 8.3$, $\epsilon_{\perp} = 3.1$ 의 특성을 가지며, 회전 점성도는 $\gamma_1 = 0.1$ 을 사용하였다. 시간과도 해석을 위해 타임스텝은 5×10^{-2} ms를 사용하여 16ms까지 수행하였다.^[8]

그림 3(a)는 IPS 모드의 액정 셀 구조의 전위 분포를 나타낸 것으로 액정 셀의 하판 영역에 서로 교차하는 평거와 인가된 전압에 의한 전위 분포를 볼 수 있다. 내부의 두 개의 평거에는 9V의 전압이 인가되었고, 외부로 감싸고 있는 평거에는 0V가 인가되어 있다. 그림 3(b)는 액정 셀의 전위 분포 형태를 자세히 관찰하기 위해 액정 셀이 시작되는 $z=0.0\mu\text{m}$ 에서의 x-y 평면도이다.

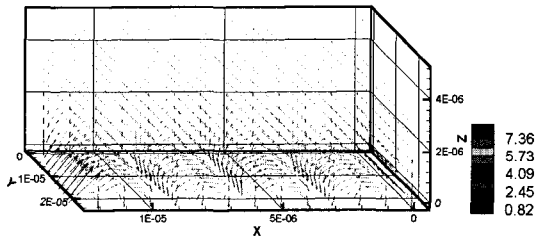


그림 4. 액정 셀의 3차원 전기 분포
Fig. 4. Schematic diagrams illustrating three-dimensional electric field distribution.

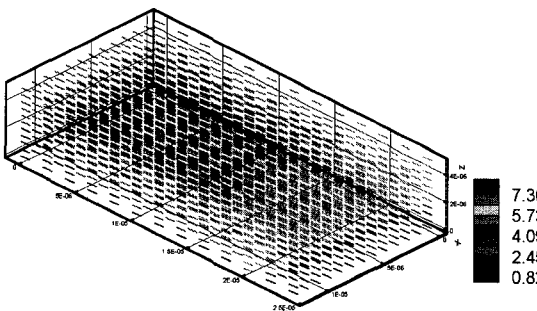


그림 5. 시뮬레이션을 수행하기 위한 초기 액정 배향
Fig. 5. Schematic diagrams illustrating three-dimensional view of director orientation and electric potential distribution at initial condition.

그림 4는 액정 셀 내부의 전기장의 크기와 방향을 벡터 형태로 표현한 것으로, 전압이 직접 인가된 하판 영역의 전기장의 크기가 상판 영역에서 보다 상당히 크다는 것을 알 수 있고, 액정 셀의 전체 영역에서 횡방향

의 전기장을 가짐을 확인하였다. 시뮬레이션을 위해 구성된 액정 셀이 횡전계 인가 방식의 IPS 모드 액정 셀의 특성을 잘 표현하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 $t=0\text{ms}$ 일때의 액정 셀 내부의 액정 방향자 분포를 나타낸 것으로, 프리트위스트 앵글과 프리틸트 앵글은 0° 로 초기화하였다.

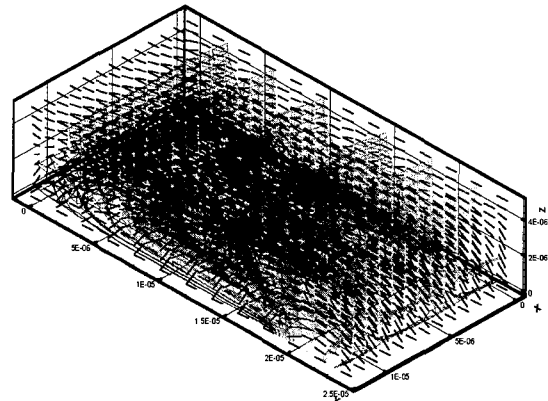


그림 6. $t=16.0\text{ms}$ 에서의 액정 방향자 및 전위 분포
Fig. 6. Schematic diagrams illustrating three-dimensional view of director orientation and electric potential distribution at $t=16.0\text{ms}$

그림 6은 16ms까지 시간과도 해석을 마치고 액정 방향자의 변화가 없을 때의 시뮬레이션 결과이다. 인가 전압과 전기장의 크기와 방향에 따라 액정 분자의 거동이 이루어 졌음을 알 수 있다.

그림 7(a)는 $z=1.0\mu\text{m}$ 에서의 x-y 평면도로 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. $z=1.0\mu\text{m}$ 는 전압이 직접 인가된 하판 영역과 근접한 영역으로, 직접 픽셀 전극과 공통 전극이 교차하는 중앙 영역은 급격한 전압의 차에 의해 강한 전기장이 형성되어지는 영역으로, 액정 방향자가 횡 방향으로 이동하였음을 알 수 있고, $y=0.0\sim 4.0\mu\text{m}$ 의 영역과 $y=20.0\sim 24.0\mu\text{m}$ 의 영역에서는 액정 방향자의 분포는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 7(b)는 $z=2.5\mu\text{m}$ 에서의 x-y 평면도로 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. $z=2.5\mu\text{m}$ 에서는 그림 8에서 보이는 전위와는 상대적으로 작은 변화를 보이고 있으며, 횡 방향으로 이동하는 액정 방향자의 모습은 볼 수 있지만 회전 정도가 작음을 알 수 있다. 또한, $y=0.0\sim 4.0\mu\text{m}$ 의 영역과 $y=20.0\sim 24.0\mu\text{m}$ 의 영역에서는 액정 방향자의 분포는 역시 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 7(c)는 $z=4.0\mu\text{m}$ 에서의 x - y 평면도로 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. 횡방향으로의 전위 분포의 변화는 거의 없으며, 16ms의 시간이 지난 후에도 방향자의 변화는 미비하였다. 전위 분포의 차이에 의해 크기가 결정되는 전계의 크기가 작아서 전기적 에너지가 액정 방향자가 움직이기에 충분한 에너지를 공급하지 못하기 때문에 사료된다.

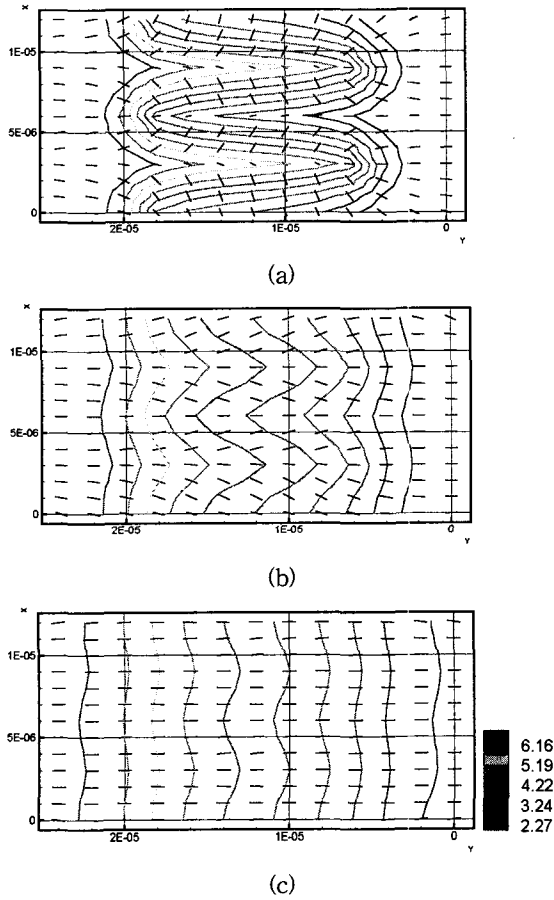


그림 7. IPS mode 액정셀의 방향자 및 전위 분포 (a) $z=1.0\mu\text{m}$ 인 x - y 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포, (b) $z=2.5\mu\text{m}$ 인 x - y 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포, (c) $z=4.0\mu\text{m}$ 인 x - y 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포

Fig. 7. Schematic diagrams illustrating director orientation of IPS-LC cell: (a) director orientation and electric potential distribution on the x - y plane ($z=1.0\mu\text{m}$), (b) director orientation and electric potential distribution on the x - y plane ($z=2.5\mu\text{m}$), (c) director orientation and electric potential distribution on the x - y plane ($z=4.0\mu\text{m}$).

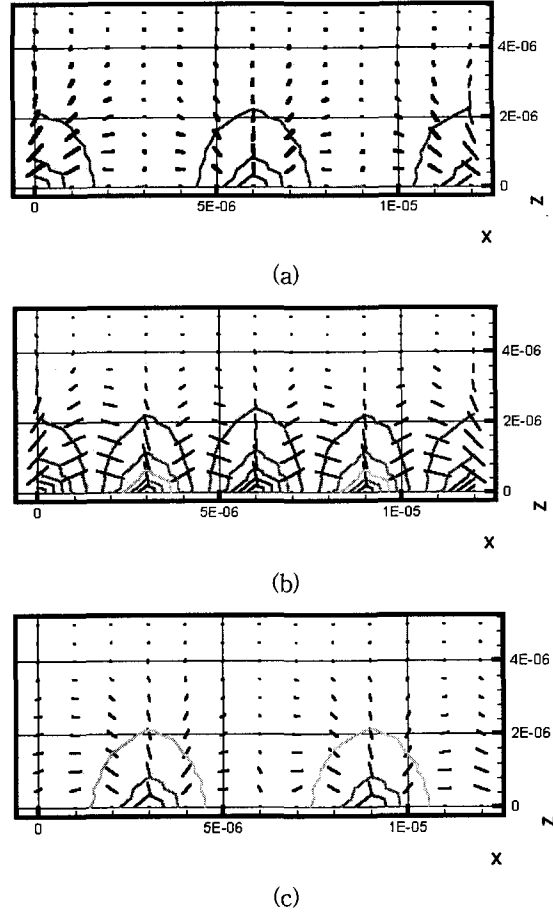


그림 8. IPS mode 액정셀의 방향자 및 전위 분포 (a) $y=4.0\mu\text{m}$ 인 x - z 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포, (b) $y=12.0\mu\text{m}$ 인 x - z 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포, (c) $y=20.0\mu\text{m}$ 인 x - z 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포

Fig. 8. Schematic diagrams illustrating director orientation of IPS-LC cell: (a) director orientation and electric potential distribution on the x - z plane ($y=4.0\mu\text{m}$), (b) director orientation and electric potential distribution on the x - z plane ($y=12.0\mu\text{m}$), (c) director orientation and electric potential distribution on the x - z plane ($y=20.0\mu\text{m}$).

그림 8(a)는 $y=4.0\mu\text{m}$ 에서 다른 x - z 평면에서의 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. 0V로 인가된 공통 전극의 핑거가 3개 보이는데, 주변영역에는 9V로 인가되어진 픽셀전극의 영향에 의해 전계가 분포하고 이 전계에 의해 액정 방향자의 배향이 이루어 졌다고 사료된다. $x=3.0\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ 인 영역의 액정 방향자는 픽셀전극에 인가된 전압에 의해 y 축 방향으로 향해 있음을

알 수 있다.

그림 8(b)는 $y=12.0\mu\text{m}$ 에서 자른 $x-z$ 평면에서의 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. $x=4.0\mu\text{m}$, $9.0\mu\text{m}$ 영역에는 9V로 인가된 픽셀 전극이 존재하고 주변 영역에는 0V로 인가된 공통전극의 핑거가 3개 존재하는 형태이다. 액정 방향자의 분포를 보면 각 전극과 전극 사이의 영역에서는 횡방향으로 배열되었는데 비해서 전극위의 액정 방향자는 수직 방향으로 배열되었음을 알 수 있다. 또한, 하판 영역에서의 액정 방향자의 변화가 큼을 알 수 있다.

그림 8(c)는 $y=20.0\mu\text{m}$ 에서 자른 $x-z$ 평면에서의 액정 방향자 분포와 전위 분포를 나타낸다. 강한 전계가 걸리는 영역이어서 횡 방향의 액정 방향자 분포가 크게 나타나는데, $x=6.0\mu\text{m}$ 에서는 전경선이 나타남을 확인할 수 있다.

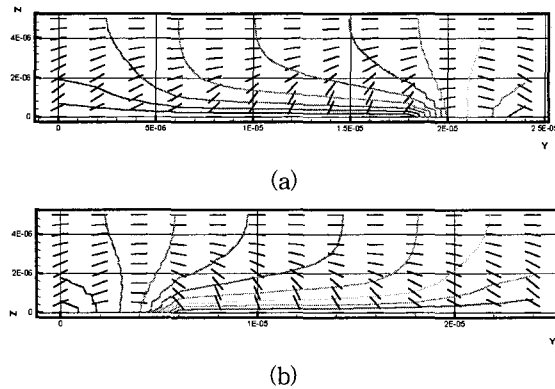


그림 9. IPS mode 액정셀의 방향자 및 전위 분포 (a) $x=6.0\mu\text{m}$ 인 $y-z$ 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포, (b) $x=9.0\mu\text{m}$ 인 $y-z$ 평면에서의 액정 방향자 및 전위 분포

Fig. 9. Schematic diagrams illustrating director orientation of IPS-LC cell: (a) director orientation and electric potential distribution on the $y-z$ plane ($x=6.0\mu\text{m}$), (b) director orientation and electric potential distribution on the $y-z$ plane ($x=9.0\mu\text{m}$).

그림 9(a)와 그림 9(b)는 $x=6.0\mu\text{m}$, $9.0\mu\text{m}$ 에서의 $y-z$ 평면을 나타낸 것이다. 두 개의 그림을 보면 픽셀 및 공통 전극 위에서의 액정 방향자의 변화가 더 큼을 알 수 있다. 픽셀 및 공통전극의 핑거가 끝나고 시작하는 영역에서의 방향자의 분포는 액정 방향자의 초기 배향 분포에서 거의 달라지지 않았으며, 전위의 변화가 거의 없는 위치이다.

V. 결 론

액정 디스플레이소자의 시야각 및 동영상 구현을 위해서 사용되는 IPS 모드 액정 셀에서의 인가 전압에 따른 액정거동 해석을 수행하였다. 액정 셀의 특성을 분석하기 위해서는 인가 전압과 셀 구조에 따른 정확한 액정 거동의 해석이 반드시 필요한 것이라 사료된다. 액정 셀 내부의 전위 및 전계 분포를 해석하였으며, 전기적 에너지와 액정 분자의 탄성 에너지를 이용하여 시간에 따른 액정 방향자의 분포를 해석하였다. 3차원 유한차분법과 비교하여 작은 노드의 개수로 임의의 액정 셀을 표현 할 수 있으므로, 계산 시간 및 메모리 사용량에 유리 할 것으로 사료된다. 또한, MVA(Multi-domain Vertical alignment) 모드나 FFS(Fringe-field Switching) 모드 같이 셀 특성 개선을 위해 복잡한 구조를 가지는 셀에 대한 정확한 분석을 위하여 3차원 유한요소법을 이용한 수치 해석 방법이 반드시 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] J. O. Kwang, K. C. Shin, J. S. Kim, and S. S. Kim, "Implementation of a New Wide Viewing Angle Mode For TFT-LCDs," Society for Information Display 2001 Digest of Technical Papers, pp. 256~259, June 2000.
- [2] W. Liu and J. Kelly, "Multidimensional Modeling of Liquid Crystal Optics Using a Ray-Tracing Technique," Society for Information Display 2001 Digest of Technical Papers, pp. 847~849, June 2000.
- [3] S. H. Hong, T. H. Jeong, H. Y. Kim, H. M. cho, W. G. Lee, and S. H. Lee, "Electro-optic characteristics of 4-domain vertical alignment nematic liquid crystal display with interdigital electrode," J. Appl. Phys. 87, pp. 8259~8263, 2000.
- [4] J.B. Davies, S. Day, F. Di Pasquale, and F.A. Fernandez, Finite-element modeling in 2-D of nematic liquid crystal structures, Electronics

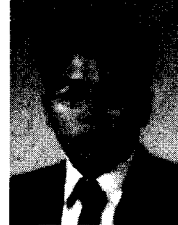
- Letters, Vol. 32, No. 6, 1996.
- [5] S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [6] M. Kitamura, "Computer Simulation of Director Profile in Three-Dimensional Electric Field," Society for Information Display 1995 Digest of Technical Papers, pp. 540~543, June 1995.
- [7] 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. 70, pp. 6046~6052, 1993.
- [8] C. -J. Chen, "Finite-cell-gap correction to the capacitance analysis of liquid crystal display with periodic interdigital electrodes", J. Appl. Phys. 87, pp. 5~9, 2000.

저 자 소 개



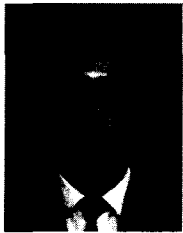
鄭柱湜(學生會員)

1975년 2월 22일생. 2000년 인하대학교 전자재료공학과(공학사). 2002년 인하대학교 전자재료공학과(공학석사). <주관심분야: 반도체 소자 및 공정 시뮬레이션, LCD 모델링 등임>



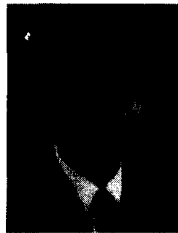
李喆洙(學生會員)

1977년 7월 15일생. 2001년 인하대학교 전기공학과(공학사). 2001년~현재 인하대학교 전자재료공학과 석사과정. <주관심분야: 반도체 소자 및 공정 시뮬레이션, LCD 모델링 등임>



尹相鎬(學生會員)

1969년 11월 20일생. 1995년 인하대학교 전자재료공학과(공학사). 1997년 인하대학교 전자재료공학과(공학석사). 1997년~현재 인하대학교 전자재료공학과 박사과정. <주관심분야: 반도체 소자 및 공정 시뮬레이션, 메쉬 generation, LCD 모델링 등임>



元太映(正會員)

1959년 2월 21일생. 1981년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1989년 미국 University of Illinois at Urbana Champaign 전자공학과(공학박사). 1989년~1990년 미국 State University of New York 조교수. 1990년~1991년 삼성전자(주) 수석 연구원. 1991년~현재 인하대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 교수. <주관심분야: 반도체 소자 및 공정, 시뮬레이션 등임>