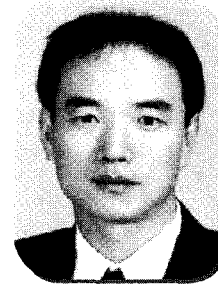


## LCD의 3차원적 Simulation 이론 및 기법



· 정성민 ·  
인하대  
전자전기공학부 박사과정



· 박우상 ·  
인하대  
전자전기공학부 부교수

### 1. 서론

TFT-LCD의 전기광학 특성을 해석하고 이를 최적화하는 데 있어서, 다양한 액정의 물성 및 공정 파라미터 등에 대한 영향을 분석하기 위한 가장 효율적인 방법으로 컴퓨터에 의한 시뮬레이션 기법이 적용되어 왔다. 이에 따라, 학문적 혹은 응용의 목적으로 액정의 1차원적 해석은 물론, 유한 전극 크기와 각종 버스라인으로 인한 측면전장을 고려한 2차원 혹은 3차원적인 해석이 폭넓게 수행되고 있다 [1, 2]. 이로부터 TN-LCD의 측면 전장에 의해 형성되는 액정의 disclination line과 함께, 불균일 전기장에서 방향자 분포가 시뮬레이션 됨으로써, 화소 전체에 걸친 광투과 특성 해석이 가능하게 되었다 [3, 4].

그러나, 보다 고성능의 전기적 특성을 보이는 새로운 형태의 다양한 액정 모드, 특히 multi-domain 기술이나 patterned electrode 혹은 유전체 구조물등의 삽입 기술등을 이용한 모드들에 대해, 현재 대부분의 상용 시뮬레이터에 의한 2차원 혹은 3차원적 해석에 있어서는 복잡한 구조의 정의가 자유롭지 못할 뿐만 아니라, 각각의 시뮬레이터가 계산한 결과가 일치하지 않는 등 많은 한계를 가지고 있다 [5]. 이와 함께, 대부분의 2차원 혹은 3차원적 해석이 다양한 모드에서 불균일 전장에 의한 방향자 분포 해석과 함께, 이

를 통한 disclination line의 생성, 이동, 그리고 소멸 등에 의한 빛의 누설과 같은 전기광학적 특성에 대한 해석만을 제공하고 있으며, 측면전장이나 불균일 전장이 전기적 특성에 미치는 영향을 분석한 보고는 거의 찾아볼 수 없다.

한편, 액정의 모델링 방법에 대해 벡터 접근법과 텐서 접근법에 의한 1차원적 시뮬레이션 결과가 상이한 경우가 확인됨에 따라, 액정 모델링 방법에 대한 새로운 비교 검증이 필요하게 되었다 [6, 7]. 이러한 두 접근법은 특히, 복잡한 기하학적 구조에 기인한 disclination line, singular point등에서 서로 상이한 동적 특성을 보일 것으로 예측된다. 그러나 현재까지, 2차원 혹은 3차원적 시뮬레이션 기법들에서 벡터 접근법과 텐서 접근법에 대한 물리, 수학적 비교 연구 또한 거의 이루어져 있지 않은 실정이다 [8~10].

본 논문에서는 액정의 전기광학 특성 분석을 위한 3차원적 시뮬레이터를 개발함에 있어서, optically compensated bend (OCB) mode에서의 벡터 접근법과 텐서 접근법에 기초한 동적 시뮬레이션을 수행, 그 결과들을 비교, 검토 함으로서 물리적으로 타당한 결과를 보이는 접근법이 어떠한 것인지를 제시하고자 한다. 이때, 벡터 및 텐서 접근법에 있어서 액정의 탄성에너지 밀도는 각각 평균방향으로 정의되는 방

항자  $n$  및 네마틱액정의 대칭성을 고려한 order 텐서  $Q_{ij}$ 에 의해 표현된다. 또한, 전기에너지의 계산을 위한 전위분포는 맥스웰 방정식으로부터 유도된 비등방, 불균일 매질에서의 Laplace 방정식이 적용된다. 이러한 액정의 탄성에너지 밀도와 전기에너지 밀도를 Ericksen-Leslie 이론에 적용함으로써 액정의 운동 방정식을 구할 수 있다. 한다. 미분 방정식에 대한 시뮬레이션의 수치해석적 방법으로, 본 연구에서는 유한차분법(Finite Difference Method : FDM)을 적용하며, 광학적 투과율 계산을 위해서 Berreman의  $4 \times 4$  행렬법을 적용한다 [11~14].

또한, 본 논문에서는 이러한 액정의 3차원적 시뮬레이션 방법을 도입하여, *multi-domain vertically aligned liquid crystal displays(MVA-LCDs)*나, 보다 복잡한 형태의 *in-plane swtiching liquid crystal displays (IPS-LCDs)* 등, 각종 다양한 모드에 대한 전기광학적 특성을 해석함으로써 3차원적 simulator의 실용성과 범용성을 보이고자 한다 [15, 16]. 이와 함께, 각각의 모드에 대한 분자배열 분포와 전위분포 등을 이용하여 전기적 특성 파라미터인 단위 화소의 화소 용량 및 각종 전극간 용량을 엄정하게 계산할 수 있는 방법도 소개하고자 한다 [17, 18].

## 2. 시뮬레이션의 기본 이론

### 2.1 액정 방향자 및 전위 분포 시뮬레이션

액정에 있어서, 미소 체적 내에 존재하는 액정 분자의 평균 방향으로 기술되는 director  $n$ 은 단위 벡터로써 시간과 공간의 함수이다. 액정의 운동과 director의 분포를 해석하기 위하여, 여기서 적용된 이론적 모델은 액정의 inertial momentum을 무시한 Ericksen-Leslie theory에 기초한다. 액정 매질 내부의 Gibbs 자유에너지 밀도  $f_s$ 를 Ericksen-Leslie 방정식에 적용하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다 [7].

$$\gamma \frac{\partial f_s}{\partial n_i} = -[f_s]_{,i} + \lambda n_i, i \in \{x, y, z\} \quad (1)$$

여기서,  $\gamma$ 는 회전 점성계수를,  $n_i$ 는 방향자의 직교

성분을,  $\lambda$ 는  $|\lambda|=1$ , 즉 방향자가 단위벡터임을 내포하는 Lagrange 승수를, 그리고  $[f_s]_{,i}$ 는 Euler-Lagrangian 방정식으로써, 다음과 같이 표현된다.

$$[f_s]_{,i} = \frac{\partial f_s}{\partial n_i} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial f_s}{\partial n_{i,x}} \right) - \frac{d}{dy} \left( \frac{\partial f_s}{\partial n_{i,y}} \right) - \frac{d}{dz} \left( \frac{\partial f_s}{\partial n_{i,z}} \right) \quad (2)$$

이때, Gibbs 자유에너지 밀도  $f_s$ 는 strain 에너지 밀도  $f_e$ 와 전기에너지 밀도  $f_e$ 에 대하여  $f_s = f_e - f_e$ 로 주어진다. 액정의 strain 에너지밀도는 Oseen-Frank의 탄성체 이론에 기초한 벡터 접근법에서는 액정의 방향자  $n$ 에 의해 다음과 같이 표현된다 [6].

$$f_s = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot n)^2 + \frac{1}{2} K_{22} (n \cdot \nabla \times n + q_0)^2 + \frac{1}{2} K_{33} (n \times \nabla \times n)^2 \quad (3)$$

여기서,  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  그리고  $K_{33}$ 는 각각 splay, twist 그리고 bend 탄성계수를,  $q_0$ 는 액정의 chirality를 의미한다. 이에 반하여, 액정의 strain 에너지밀도를 표현하는 또 다른 방법으로는 방향자의 네마틱 대칭성을 고려하여 order 텐서  $Q_{ij}$ 를 이용한 텐서접근법으로 다음과 같이 주어진다 [7].

$$f_s = \left( -\frac{K_{11}}{12} + \frac{K_{22}}{4} + \frac{K_{33}}{12} \right) G_1^{(2)} + \left( \frac{K_{11} - K_{22}}{2} \right) G_2^{(2)} + \left( \frac{K_{33} - K_{11}}{4} \right) G_6^{(3)} + q_0 K_{22} G_4^{(2)} \quad (4)$$

이때,  $G$ 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$G_1^{(2)} = Q_{ij, i} Q_{ij, i}, \quad G_2^{(2)} = Q_{ij, i} Q_{ji, i}, \\ G_4^{(2)} = e_{ijk} Q_{ij} Q_{jk, i}, \quad G_6^{(2)} = Q_{ij} Q_{kl, i} Q_{kl, j} \quad (5)$$

여기서, 아래첨자의 반복되는 index는 Einstein의 표기법에 따른 것이다.  $e_{ijk}$ 는 permutation symbol을 의미하며,  $Q_{ij}$ 는 order tensor로써, 방향자  $n$ 에 대해  $Q_{ij} =$

$n_i - \delta_{ij}/3$ 로 표현된다.

한편, 주어진 화소내의 전극에 인가되는 전압에 의하여 형성되는 전기에너지밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \phi_{,i} \epsilon_{im} \phi_{,m} \quad (6)$$

이때,  $\phi(x, y, z)$  액정의 화소 및 각종 전극에 인가된 전압에 의해 형성된 전위분포를 나타내며,  $\epsilon_0$ 는 자유공간에서의 유전율을 의미한다.  $\epsilon_{im}$ 은 비유전율 텐서로써, 액정의 방향자  $n$ 에 대하여  $\epsilon_{im} = \epsilon_i \delta_{im} + (\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}) n_i n_m$ 으로 표현된다.  $\epsilon_{||}$ 과  $\epsilon_{\perp}$ 는 각각 액정의 장축 및 단축 방향의 비유전율을 의미한다. 여기서, 전위분포함수  $\phi(x, y, z)$ 는 맥스웰 방정식으로부터 유도되는 다음의 Laplace 방정식에 적절한 경계조건을 적용하여 시뮬레이션 함으로써 얻을 수 있다 [6].

$$[\epsilon_{ij}(x, y, z) \phi_{,j}(x, y, z)]_{,i} = 0 \quad (7)$$

이로부터, 식 (3)과 (6)을 식(1)에 대입함으로써, 벡터 접근법에 기초한 액정 방향자의 운동방정식을 얻을 수 있다. 그러나, 벡터 접근법에 대한 운동방정식은 매우 복잡하기 때문에 편의상 탄성계수가 등방인 모델, 즉  $K_{11} = K_{22} = K_{33} = K$ 로 단순화 하면, 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 n_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} \right) + \epsilon_0 (\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}) n_i \phi_{,j} \phi_{,j} + \lambda n_i \quad (8)$$

반면, 텐서 접근법으로부터 유도되는 액정 방향자의 운동 방정식은 이방 탄성계수 모델에 대하여, 텐서 표기법으로 나타낼 수 있기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{1}{3} (-K_{11} + 3K_{22} + K_{33}) (n_i Q_{jj}) + (K_{11} - K_{22}) (Q_{ii,ij} + Q_{ii,ji})$$

$$+ \frac{1}{2} (K_{33} - K_{11}) n_i (2Q_{im,m} Q_{ji,i} + 2Q_{im} Q_{ji,im} - Q_{im,i} Q_{jm,j}) + 2q_0 K_{22} n_i (e_{im} Q_{ji,m} + e_{jm} Q_{ji,m}) + \epsilon_0 (\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}) n_i \phi_{,j} \phi_{,j} + \lambda n_i \quad (9)$$

한편, 액정의 광투과 특성을 얻기 위하여, 본 연구에서는 패널에 수직인 z 방향에 대하여, 액정을 얇은 층이 쌓여 있으며, 각각의 층이 광학적으로 균일한 비등방 매질인 것으로 가정하여, Berreman의 4×4 행렬법으로부터 광투과율을 계산하였다 [11~14].

### 2.2 화소 및 전극간 정전 용량 계산

본 절에서는 계산된 3차원적 방향자 분포를 이용하여 TFT-LCD의 단위 화소 내부에 존재하는 모든 종류의 화소 용량 및 각종 전극간 용량을 계산하는 방법에 대하여 기술하고자 한다. 주어진 특정 방향자 분포에 대하여, 가상의 전압이 계산 영역 내의 모든 전극에 인가되어 있다고 가정할 때, 전기적 에너지는 각 전극의 가상 전압과 주어진 시간에 대한 고정된 방향자 분포로부터 결정되는 가상의 전위 분포  $\phi(x, y, z)$ 에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다 [18].

$$W_R = \frac{1}{2} \int_{vol} (\phi_{,i} \epsilon_{im} \phi_{,m}) dv - \frac{1}{2} \int_S \phi (\epsilon_{im} \phi_{,m}) ds_i \quad (10)$$

여기서, 부피 Vol와 표면 S는 계산 영역의 전체 부피와 그 부피를 감싸고 있는 전체 면적을 의미한다. 식 (10)의 우변의 두 번째 항은 계산 영역이 단위 화소인 유한 영역으로 제한되었기 때문에 추가된 항이다. 가상의 전위 분포  $\phi(x, y, z)$ 는 식 (7)과 주어진 경계조건, 그리고 가상의 전압으로부터 시뮬레이션 함으로써 얻을 수 있다.

이와 함께 총 전기 에너지를 얻는 또 다른 접근법은 계산영역 내에서 화소 및 각종 전극간 정전용량을 이용하는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N C_{ij} V_{ij}^2 \quad (11)$$

여기서, N은 계산 영역 내에 존재하는 전극의 개수

를, 그리고  $V_{ij} = V_i - V_j$ 이며,  $V_i$ 와  $V_j$ 는  $i$ 와  $j$ 번째 전극에 인가된 가상의 전압을,  $C_{ij}$ 는  $i$ 와  $j$ 번째 전극간 정전용량을 의미한다. 따라서, 식 (10)로부터 가상의 전압에 대한 총 전기에너지가 계산되면, 식 (11)로부터, 전극간 모든 정전용량을 얻을 수 있다.

### 3. 수치 해석

#### 3.1 액정의 방향자 및 전위분포 시뮬레이션

액정의 방향자 분포를 얻기 위하여, 방향자와 전위 분포에 의해 서로 결합된 식 (6)과 (7)을 동시에 시뮬레이션 하여야 한다. 방정식들이 매우 비선형적이기 때문에, 그림 1에서 묘사된 것과 같이 두 단계로 나누어 반복적 process를 적용하였다. 즉, 정상상태가 될 때까지, 주어진 방향자 분포에 대한 전위 분포 해와 그에 따른 방향자 분포를 서로 교번하여 계산을 수행한다.

수치해석 방법으로는 액정의 유전율 이방성이 기인한 비선형적이고 복잡한 방정식을 풀기 적합한 유한차분법이 적용되었다. 계산에 적용된 복잡한 구조와 비선형성 때문에 본 연구에서는 균일 격자간격을

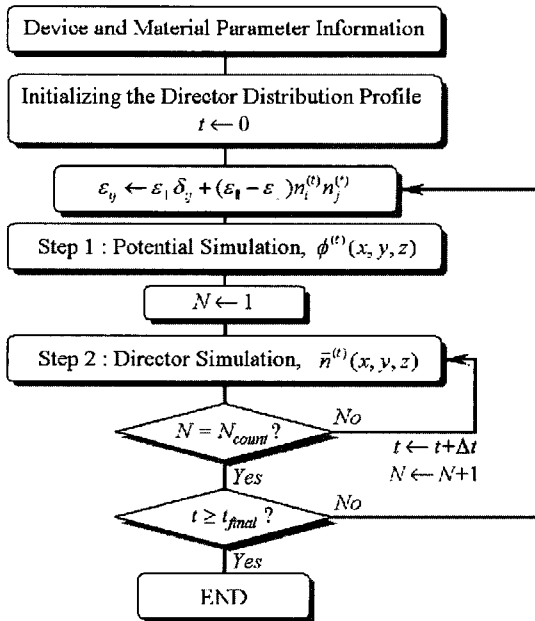


그림 1. Simulation procedure.

적용하였으며, 공간적으로 중앙차분화 기법이 적용되었다. 시간 적분에 있어서는, implicit한 방법의 경우 방향자 운동방정식의 비선형성이 복잡한 문제를 유발하기 때문에, 본 연구에서는 explicit한 방법이 적용되었다.

한편, 식 (7)은 비선형적 타원형 방정식이기 때문에, 이를 이용한 전위 분포의 시뮬레이션에서는 적절한 경계조건에 대하여 successive over relaxation (SOR) 방법이 적용되었다. 이때, 보다 정확한 계산을 위하여 전위 분포 시뮬레이션은 매 time step에 대하여 수행되어야 하지만, 계산에 요구되는 시간이 방대하기 때문에, 매 0.5ms마다 전위분포를 계산함으로써, 소요되는 시뮬레이션 시간을 절감하였다.

경계조건으로 본 연구에서는 strong anchoring을 가정하였기 때문에, 경계 면에서의 방향자는 고정됨은 물론, rubbing 방향과 pretilt각에 의하여 정의된다(그림 2 참조). 계산시의 메모리와 시간을 절감하기 위

표 1. 액정 및 insulator의 물질 파라미터 리스트.

Parameters	Values
Liquid Crystals	
splay elastic constant $K_{11}$	$13.0 \times 10^{-12} [\text{N/m}]$
twist elastic constant $K_{22}$	$7.0 \times 10^{-12} [\text{N/m}]$
bend elastic constant $K_{33}$	$10.0 \times 10^{-12} [\text{N/m}]$
parallel dielectric constant $\epsilon_{\parallel}$	10.0
perpendicular dielectric constant $\epsilon_{\perp}$	3.0
Insulator	
dielectric constant $\epsilon_i$	5.0

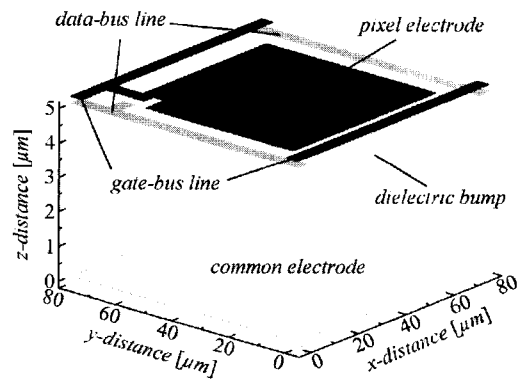


그림 2. 시뮬레이션에 적용된 구조(TN-LCD).

하여, 전위분포를 계산할 때 z방향의 끝에서는 Neumann 경계조건을 적용하였으며, 또한 x와 y방향에 대해서는 xy-평면으로 화소들이 무한히 반복되어 있는 것으로 가정하는 주기 경계조건을 적용하였다. 그림 2에 계산에 적용된 TFT-LCD의 화소 구조를 모식적으로 표현하였다. insulator와 액정 등 물질 파라미터는 표 1에 정리하였다.

### 3.2 화소 및 각종 전극간 정전용량 계산

화소 및 각종 전극간 정전용량을 계산함에 있어서는, xy-평면을 따른 경계조건이 주기경계조건으로 정의되었기 때문에, 계산 영역 내부의 실질적인 전극이 개수는 4개로 적어지면서 그림 3에서 보여지는 바와 같이, 6개의 전극간 정전용량이 발생한다. 따라서, 6개의 미지수인 정전용량 값들을 얻기 위하여, 식 (10) 과 (11)로부터 6개의 서로 독립적인 연립방정식을 세워야 한다.

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^4 C_{ij} V_{ij}^2 \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \int_{\text{vol}} (\varphi_i \cdot \epsilon_{lm} \varphi_j) dv - \frac{1}{2} \int_s \varphi (\epsilon_{lm} \varphi_j) ds_i \quad (12)$$

식 (12)의 우변으로 표현된 총 전기에너지를 계산하기 위하여, 우선 4개의 전극에 임의의 전압을 인가한다고 가정하고 이로부터 전위 분포를 계산한다. 이러한 가상의 전압들은 6개의 미지수  $C_{ij}$ 의 계수를 이루게 되며, 동일한 절차를 6번 반복함으로써,  $V_{ij}$ 로

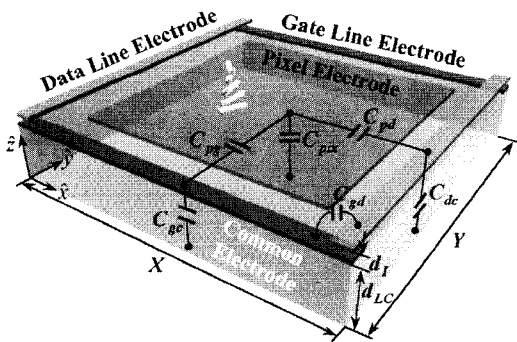


그림 3. 단위 화소 내의 화소 용량 및 전극간 정전용량.

구성된 6×6 계수 행렬과 6×1에 너지 행렬을 얻을 수 있다.

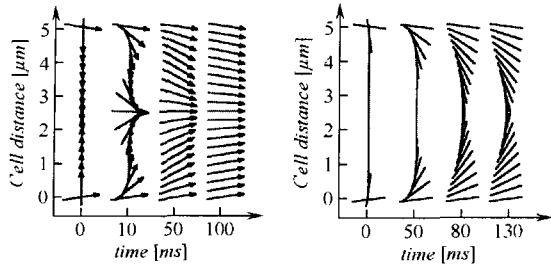
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 벡터 접근법과 텐서 접근법 간 비교

본 절에서는 액정의 두가지 모델링 방법, 즉 벡터 접근법과 텐서 접근법을 통하여 OCB 모드에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과들을 비교, 검토함으로써 두 방법의 타당성을 검토하기로 한다 [9]. 우선 천이과정의 복잡한 물리적 현상을 배제하기 위하여 일단 bend 상태로 천이한 후 전압을 제거하였을 때 방향자의 자유이완 시의 동적 특성을 비교하였다.

먼저, 벡터 접근법의 경우, 액정의 머리와 꼬리가 구분되는 특성상, cell의 중심에서 방향자 분포가 불연속적이기 때문에 중심부에 strain 에너지가 매우 크게 집중되어 있다. 따라서, 전압제거 후 이완 시, strain 에너지가 집중되어 있는 bend cell의 중심에서 먼저 방향자의 분자배열 분포가 이완 된 뒤, 이에 따라 방향자 분포의 이완이 전체 cell로 퍼져 가며, 결과적으로 수십 ms 내에 최종적으로 splay cell로 전이됨을 알 수 있다(그림 4 (a)). 그러나, 텐서 접근법에 의하면 액정의  $n$ 과  $-n$ 의 등가성으로 표현되는 액정 분자의 대칭성으로 인하여, cell의 중간층에서는 strain 에너지가 존재하지 않으며, 이에 따라 cell 중심에서는 동적 변화가 없음을 알 수 있다. 반면, 표면부근에서는 strong anchoring에 따른 액정분자들의 평행 배향으로 인하여 표면 부근에 strain 에너지가 집중되어 있음을 알 수 있고 이로부터 자유이완 시 표면에서 이완이 시작되어 cell 중심부로 이완이 이루어져, 궁극적으로 안정된 bend 상태가 지속됨을 볼 수 있다(그림 4 (b)).

그러나, nematic 액정의 대칭성에 따라 물리적으로  $n$ 과  $-n$ 이 서로 등가이기 때문에 실제로 벡터 접근법에서 보이는 것과 같이 cell 중심부에 strain 에너지가 집중되어 있는 bend cell은 존재할 수 없다고 할 수 있다. 더욱이 bend cell에서의 on/off 제어는 high bend와 low bend 사이의 분자배열 분포로부터 결정되기 때문에, 벡터 접근법에서와 같이 수십 ms 내에서



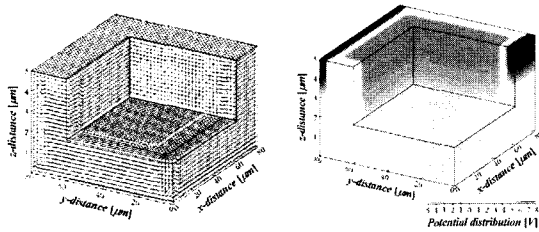
(a) 벡터 접근법. (b) 텐서 접근법.

그림 4. bend cell에서의 자유 이완 시 동적 특성 비교.

bend cell이 splay cell로 전이되게 되면 on/off 제어의 불가능하다고 할 수 있으며, 실제로도 이러한 현상은 발견되지 않는다. 따라서, 텐서 접근법이 보다 복잡한 비선형성으로 인하여 수치해석적 접근은 어렵지만, 물리적으로 타당한 결과를 보인다는 것을 알 수 있다.

### 4.2 Application to TN-LCDs

그림 5의 (a)와 (b)는 5V의 화소 전압 하에 계산된 단위 화소 내에서의 3차원적 액정의 방향자 분포와



(a) 분자배열 분포 (b) 전위 분포.

그림 5. (a) 분자배열 분포와 (b) 전위 분포.

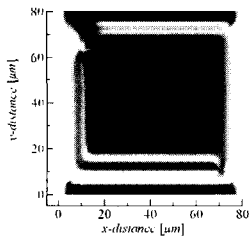


그림 6. 광투과율 분포.

전위 분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보여지는 바와 같이 x와 y방향을 따라, 화소전극의 가장자리 주변에서 정상 tilt 영역과 반전 tilt 영역의 경계면이 나타나면서, 그림 6에서 보여지는 바와 같이, pixel 좌, 하단을 따라 L 모양의 disclination line이 형성됨을 확인할 수 있다.

### 4.3 Application to IPS-LCDs

IPS-LCD는 화소 전극 및 공통 전극의 patterning 형상이 매우 복잡하기 때문에 3차원적 시뮬레이션이 필수적이라 할 수 있다 [19~24]. 그림 7은 계산된 분자배열 분포와 투과율 분포를 보이고 있으며, 이를 바탕으로 구동전압, 응답속도, 그리고 개구율등을 고려한 cell gap, 화소 전극 및 공통 전극간 간격, 그리고 전극의 폭 등에 대한 최적화를 수행할 수 있다. 투과율과 응답속도, 개구율 그리고 구동 전압등을 동시에 고려하면 러빙 각도 22.5°, 전극간격 10 $\mu$ m등과 같은 최적화 조건을 얻을 수 있다. 이 경우, 액정의 응답 속도는 15ms정도로 기존의 IPS-LCD에 비교하여 매우 빠른 특성을 보이고 있다.

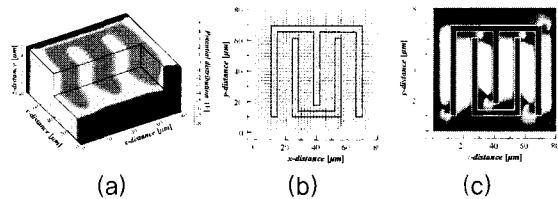


그림 7. IPS-LCD의 (a)전위 분포 및 (b)분자배열 분포 (c)광투과율 분포.

### 4.4 Application to MVA-LCDs

MVA-LCD에서는 멀티도메인을 형성하기 위하여 여러 가지 방법이 제안되어 왔는데 [25~29], 본 논문에서는 dielectric rib를 적용하여 전장을 왜곡시키는 방법을 채택, 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 전기광학 특성에 따른 설계 및 물성 파라미터를 최적화하였다. 계산에 적용된 화소는 상하판에 부착된 dielectric rib들이 직교하면서 cell gap을 유지할 수 있도록 되어 있고, 이로부터 유전율 차에 의한 전장 왜곡으로 4 도메인이 형성될 수 있도록 구성되어 있

다(그림 8). 물론 보다 현실적인 상황을 고려하기 위하여, data 및 gate 버스 라인 등을 고려하였다.

그 결과, 액정과 dielectric rib의 유전율 차에 의한 왜곡 전장으로부터 4 도메인을 형성할 수 있음을 확인하였으며, 이로부터 광시야각과 빠른 응답속도, 고 명암대비등을 실현하기 위하여 dielectric rib를 이용한 MVA-LCD의 설계 조건을 제시할 수 있었다.

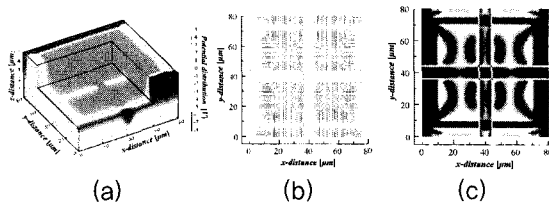


그림 8. MVA-LCD의 (a) 전위분포 및 (b) 분자 배열 분포 (c) 광투과율 분포.

#### 4.5 화소 및 전극간 정전 용량 계산

그림 9는 각종 전극에 전압이 인가된 뒤 시간에 따른 화소 및 각종 전극간 정전용량의 변화를 보이고 있다. 이로부터, 시간이 증가함에 따라 3차원적으로 계산된 화소 정전용량은 1차원적으로 계산된 결과와 비교하여 매우 크게 다른 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 다음과 같은 이유로부터 설명될 수 있다. 우선, 기존의 1차원적 방법에 있어서는 화소 전극 외부의 방향자의 분포와 측면 전장에 의한 동적 특성을 예측할 수 없으며, 따라서 화소 정전용량의 계산에 이러한 효과들을 정량적으로 고려할 수 없기

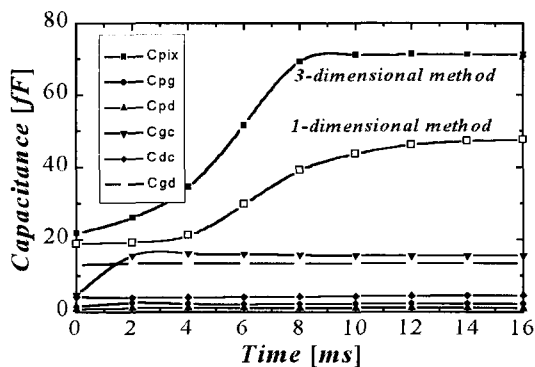


그림 9. 시간에 따른 단위화소의 용량 및 기생 용량의 변화.

때문이다. 더욱이, 화소 전극 외부의 액정이 화소 전극 부근에 형성된 측면 전장에 의하여 일어서기 때문에 이러한 효과들이 고려된 3차원의 경우 시간이 지남에 따라 1차원과의 차이가 더욱 커지는 것으로 생각할 수 있다.

정상상태에 있어서는, 3차원적 방법으로부터 얻은 화소의 정전용량은 1차원적인 결과와 40% 가량의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 이 밖에 다른 정전용량들도 그림 9에 나타내었다. 이들 중 특히, gate-common 그리고 gate-data 전극간 정전용량은 비교적 큰 값을 보임을 알 수 있다. 이에 따라, 이러한 정전용량들은 미세한 구조의 TFT-LCD와 구동파형 등의 최적화 설계에 있어 반드시 고려되어야 할 것으로 생각된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 액정의 전기광학 특성 분석을 위한 3차원적 시뮬레이터에 대하여 기술하였다. 시뮬레이터의 모델링 방정식은 물리적으로 보다 타당성이 있는 텐서 접근법을 사용하였으며, 이러한 시뮬레이터는 매우 복잡한 기하학적 구조에 기인한 특이점, disclination line 등에서의 동적 특성 계산에 있어서 타당한 결과를 보임을 확인하였다. 각 미분 방정식에 대한 수치해석적 방법으로는 유한차분법을 적용하였다. 또한 MVA나 IPS 모드등, 단위 화소내의 복잡한 구조를 쉽게 정의할 수 있는 알고리즘을 개발함으로써 본 시뮬레이터의 실용성과 범용성을 확보하였다.

한편, 각종 모드에 대한 분자배열 분포와 전위분포 등을 이용하여, 액정의 전기적 특성 파라미터인 화소 및 전극간 정전 용량을 3차원적인 방법으로 엄정하게 계산하는 새로운 알고리즘을 개발하였다. 이로부터, 유한전극의 크기에 의한 측면전장이나 disclination line 등이 화소 및 각종 전극간 용량에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 본 방법에 의해 정확히 계산된 각종 정전용량 값들은 고정세, 고해상도 panel의 TFT 및 구동파형의 설계에 대단히 유용할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] G. Haas, S. Siebert, and D. A. Mlynski, "Simulation of inhomogeneous electric field effects in liquid crystal displays", *Japan Display '89*, p. 524, 1989.
- [2] G. Haas, M. W. Fritsch, H. W hler, and D. A. Mlynski, "Simulation of reverse-tilt disclinations in LCDs", *SID '90 Digest*, p. 102, 1990.
- [3] A. Lien and R. A. John, "Lateral field effect in twisted nematic cells", *IBM. J. Res. Develop.*, Vol. 36, No. 1, p. 51, 1992.
- [4] 정성민, 박우상, "2차원 simulation에 의한 LCD의 광투과 특성 해석", *전기전자재료학회지*, Vol. 12, No. 8, p. 719, 1999.
- [5] M. Kitamura, T. Ozawa, and S. Inoue, "Pseudolattice method for dynamic 3-D liquid crystal director simulation", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E83-C, No. 3, p. 513, 2000.
- [6] M. Kitamura, "Computer simulation of director profiles in three-dimensional elastic fields", *SID '95 Digest*, p. 540, 1995.
- [7] S. Dickmann, J. Eschler, O. Cossalter, and D. A. Mlynski, "Simulation of LCDs including elastic anisotropy and inhomogeneous fields", *SID '93 Digest*, p. 638, 1993.
- [8] J. E. Anderson, D. Watson, and P. J. Bos, "Shortcomings of the Q tensor method for modeling liquid-crystal devices", *SID '99 Digest*, p. 198, 1999.
- [9] S. M. Jung and W. S. Park, "Study on the validity of the vector and tensor approaches through a 3-dimensional simulation", *ILCC2002*, p. 455, 2002.
- [10] J. H. Woo, S. M. Jung, and W. S. Park, "Simulation of dynamic behavior of liquid crystal molecules in OCB modes", *JLCC2001*, p. 525, 2001.
- [11] D. W. Berreman, "Optics in stratified and anisotropic media:  $4 \times 4$  matrix formulation", *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 62, No. 4, p. 502, 1972.
- [12] H. Wöhler, G. Haas, M. Fritsch, and D. A. Mlynski, "Faster  $4 \times 4$  matrix method for uniaxial inhomogeneous media", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 5, No. 9, p. 1554, 1988.
- [13] G. Haas, H. Wöhler, M. Fritsch, and D. A. Mlynski, "Polarizer model for liquid crystal devices", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 5, No. 9, p. 1571, 1988.
- [14] S. M. Jung and W. S. Park, "Improved method for electro-optical simulation of liquid crystal displays", *J. Kor. Phys. Soc.*, Vol. 34, p. S546, 1999.
- [15] S. M. Jung, I. H. Park, and W. S. Park, "3-dimensional simulation of the electro-optical properties of in-plane switching liquid crystal displays", *ILCC2002*, p. P454, 2002.
- [16] S. M. Jung and W. S. Park, "3-dimensional simulation of multi-domain vertically aligned liquid crystal displays with dielectric ribs", *ILCC2002*, p. P453, 2002.
- [17] S. M. Jung and W. S. Park, "Novel method to calculate pixel and inter-electrode capacitances of thin-film transistor liquid crystal displays", *J. Kor. Phys. Soc.*, Vol. 41, No. 6, p. 1041, 2002.
- [18] S. M. Jung and W. S. Park, "Rigorous calculation of pixel and inter-electrode capacitances of TFT-LCDs", *Asia Display/IDW '01*, p. 411, 2001.
- [19] A. Lien, C.-J. Chen, "2-D simulations of in-plane switching-mode LCDs", *SID '96 Digest*, p. 175, 1996.
- [20] F. Di Pasquale, F. A. Fernandez, S. E. Day, and J. B. Davies, "Two-dimensional modeling of nematic LCD cells using the in-plane-switching mode", *SID '97 Digest*, p. 695, 1997.
- [21] R. Kiefer, B. Weber, F. Windscheid, and G. Baur, "In-plane switching of nematic liquid crystals", *Japan Display '92*, p. 547, 1992.
- [22] S. H. Lee, J. G. You, H. Y. Kim, D. S. Lee, S. K.



Kwon, H. S. Park, and C. K. Lim, "Influence of rubbing direction on the electro-optic characteristics of in-plane-switching-mode LCDs", SID '97 Digest, p. 711, 1997.

[23] T. Suzuki, S. Nishida, M. Suzuki, and S. Kaneko, "Analysis and control of extraordinary domains in wide-viewing angle in-plane-switching mode TFT-LCDs", SID '97 Digest, p. 184, 1997.

[24] M. Oh-e, M. Ohta, S. Arantani, and K. Kondo, "Principles and characteristics of electro-optical behaviour with in plane switching mode", Asia Display '95, p. 577, 1995.

[25] V. A. Konovalov, A. A. Muravski, S. N. Timfeev, and S. Ye Yakovenko, "Mechanism and electro-optic properties of multi-domain vertically aligned mode", Asia Display '98, p. 379, 1998.

[26] V. A. Konovalov, A. A. Muravski, C. N. Timofeev, and S. Ye Yakovenko, "Multi-domain vertically aligned mode", SID '98 Digest, p. 1127, 1998.

[27] A. Lien, C. Cai, R. Nunes, S. L. Wright, R. A. John, E. Galligan, and J. Wilson, "Wide viewing angle TFT-LCD based on ridge and fringe-field multi-domain homeotropic structure", Asia Display '98, p. 375, 1998.

[28] A. Lien, R. Nunes, R. A. John, E. Galligan, E. Colgan, J. Wilson, and C. Cai, "Ridge and fringe-field multi-domain homeotropic LCD", SID '98 Digest, p. 1123, 1998.

[29] J. E. Anderson, P. J. Bos, C. Cai, and A. Lien, "Three-dimensional modeling of ridge-fringe-field LCDs", SID '99 Digest, p. 628, 1999.

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

**성명: 정성민**

❖ 학력

- 1998년  
인하대 공과대학 전자재료공학과 공학사
- 1999년  
인하대 공과대학 전자재료공학과 공학석사
- 현재  
인하대 공과대학 전자전기공학부 미디어 시스템 전공 박사과정

❖ 주 관심분야

- Thin-Film Transistor Liquid Crystal Displays

**성명: 박우상**

❖ 학력

- 1981년  
경북대 공과대학 전자공학과 공학사
- 1983년  
경북대 대학원 전자공학과 공학석사
- 1989년  
Tohoku Univ. 대학원 전자공학전공 공학박사

❖ 경력

- 1984년 4월-1994년 6월  
LG전자 연구원/선임연구원/책임연구원/부장
- 1994년 7월-1995년 8월  
LG전자 LCD 연구소장
- 1995년 1월-1995년 8월  
(겸)LG전자 일본법인(Frontec) 대표이사/법인장
- 1995년 9월-현재  
인하대 전자전기공학부 전자공학전공 부교수

❖ 주 관심분야

- Liquid Crystal Displays