

## TFT-LCD 3차원 시뮬레이션에서의 광 경로에 대한 고려

### Study for the Real Optical Path in the TFT-LCD 3-dimensional Simulation

최경욱<sup>1</sup>, 김기범<sup>1</sup>, 박우상<sup>1,a</sup>  
(Kyoung-Uk Choi<sup>1</sup>, Gee-Bum Kim<sup>1</sup>, and Woo-Sang Park<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

We report a novel simulation method to calculate optical transmission considering the real paths of optic introduced in a unit pixel of TFT-LCDs using three-dimensional molecular director simulation of the tensor model. The simulation of optical path transmission profile was carried out by calculating new permittivity considered the real paths of optic in liquid crystal cell. As a result, it was clarified that the electro-optic characteristics such as movement of disclination line, contrast ratio and transmittance profile show a large difference according to the viewing angle compared with the conventional method.

**Key Words** : Simulation, TFT-LCD, Berreman, Transmittance

#### 1. 서 론

액정의 광 투과율 계산에 있어서는 불균일한 비등방 액정 셀을 이산화 된 다층으로 나누어 각 부층(sub-layer)을 균일한 비등방 매질로 간주한 뒤, 각 층에 대한 전파 행렬을 계산하여 전체 투과 행렬로부터, 투과율을 계산하는 방법이 적용되고 있다.

액정의 동적인 움직임을 표현하기 위한 수식들이 복잡하고 난해한 관계로 유한차분법 (FDM : Finite Difference Method) 방법을 사용한 대부분의 상용 simulator 또한 이러한 원리를 적용한 Berreman 4x4 방법이 많이 쓰이고 있다[1].

하지만, 이러한 방법은 각 부층(sub-layer)을 균일한 비등방 매질로 간주 하였으므로, 각각의 부층 내에서는 입사하는 빛의 경로에 상관없이 동일한 유전율 정보를 이용하게 된다.

결과적으로, 매질에 대하여 수직으로 진행하는 빛과 경사져 입사한 빛과의 투과율을 계산할 때, 각 부층내에서 경로가 다른 빛에 대해서 같은 유

전율 정보를 이용하게 되어, 각 부층내에서도 불균일(inhomogeneous)한 유전율을 보이는 액정 셀에 대한 광 투과율 계산에 부적합 하게 된다.

본 연구에서는 각 부층내에서도 불균일한 분자 배열 분포를 가진 액정 셀에서 경사져 입사한 빛의 실제적인 경로에 따른 유전율 정보를 이용하여 정확한 투과율 정보를 계산하였으며, 이러한 방법을 통해 액정 셀의 시야각에 따른 전기 광학적 특성을 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 광 경로를 고려한 모델링

Berreman 방법에 의하면 전체 투과율을 계산할 때, 액정의 z축에 대한 유전율 비등방성만을 보고 전체 투과 행렬을 계산하였다[그림 1]. n번째 layer 에서의 투과율을 계산할 때, 빛의 입사각에 해당하는 x축(혹은 y축)의 전파 상수( $\xi$ )와 각 부층에 해당하는 유전율 정보인 M matrix로부터 시작하여, 단계적인 계산과정을 거쳐 n번째 매질에서의 입사하는 빛의 정보인  $\Psi_n$  matrix로부터 n번째 매질을 투과되어 나온  $\Psi_{n+1}$  matrix를 얻게 된다. 이러한 matrix 정보로부터 n번째 매질에 대한

1. 인하대학교 전자공학과

(인천시 남구 용현4동 253)

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

접수일자 : 2005. 10. 7

심사완료 : 2005. 12. 16

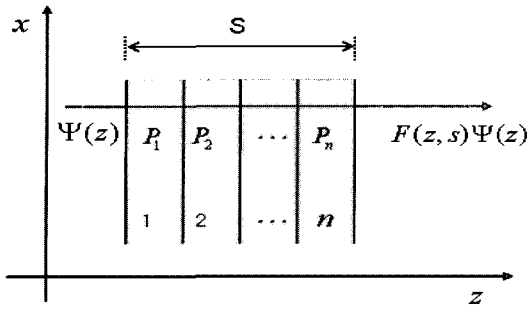


그림 1. Berreman 방법에 의한 투과행렬 계산.  
Fig. 1. Propagation matrix in the Berreman matrix method.

투과 행렬  $P_n$  matrix를 얻어내고, 이러한 각 부층에 해당되는 투과 행렬  $P$  matrix의 곱으로써, 전체 투과 행렬  $F = P_1 P_2 \dots P_n$ 을 얻어내게 된다.

하지만, 이러한 원리를 적용한 대부분의 투과율 계산 방법에 의하면 그림 2와 같이 경사각( $\theta$ )을 가지고 빛이 진행하였을 때, 각각의 부층내에서는 같은 유전율 정보를 이용하게 되며, Berreman 방법에서는  $x$ 축에 대한 전파상수인  $\xi$  값만의 변화와 각 부층의 동일한 유전율 정보를 이용하여 해당매질에서의 전파행렬  $P$ 를 계산하게 된다.

결과적으로, 실선(AB)과 같이 빛이 진행하더라도 점선(AC)과 같은 경로로 빛이 진행하였을 때와 같은 유전율 정보(동일  $M$  matrix)를 이용하게 되므로,  $x$ 방향 전파상수 ( $\xi$ ) 값만의 변화에 의한 투과율의 차이를 보이게 된다. 그 때의 전체 투과 matrix는  $F = P_1(\epsilon_1, \xi) P_2(\epsilon_2, \xi) \dots P_n(\epsilon_n, \xi)$  이다.

그러나, 대부분의 액정 셀에서는 각 부층의 이웃하는 노드(node)와도 유전율 이방성(inhomogeneous)을 보이므로,  $n$ 번째 부층에서의 투과 행렬  $P_n$ 을 계산하기 위해서는 입사하는 빛의  $x$ 방향 전파상수 ( $\xi$ ) 뿐만 아니라, 해당 노드에서의 유전율 정보에 대한 경신을 해 주어야 한다.

그러므로, 그림 3에서처럼 빛은 직진성을 가지고 진행하고, 빛의 경로에 따른  $a$  노드의 유전율 정보를 이용하여 전파행렬  $P_1$ 을 계산하며, 다시  $b$  노드의 유전율 정보를 이용하여  $P_2$ 를 계산하여야 한다. 그때의 전체 투과matrix는  $F = P_1(\epsilon_a, \xi) P_2(\epsilon_b, \xi) \dots P_n(\epsilon_n, \xi)$  이다.

이러한 유전율 계산 방법을 적용하기 위해서는 매질 내에서 빛의 경로를 추적하는 알고리즘이 선

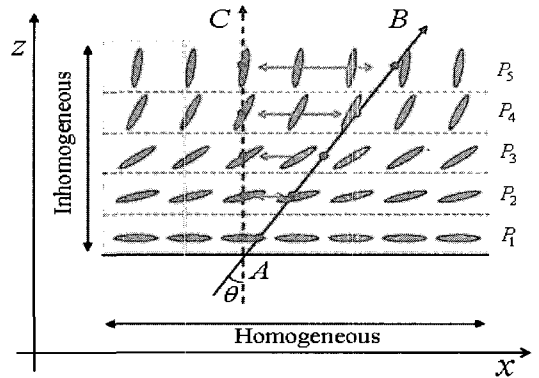


그림 2. 기존 방법에 의한 유전율 계산.  
Fig. 2. Calculation of dielectric constant using conventional method.

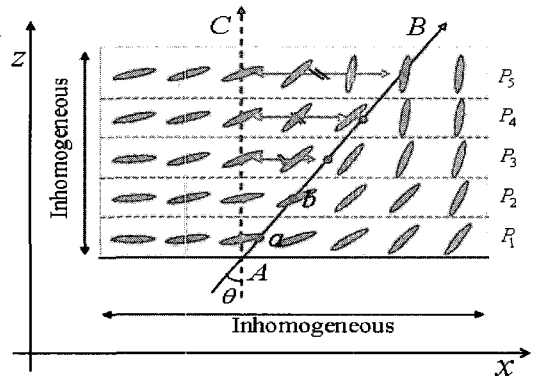


그림 3. 광경로를 고려한 유전율 계산.  
Fig. 3. Calculation of dielectric using optical path method.

행되어야 하며, 정사각형 형태의 격자 노드를 적용한 FDM 방법을 사용하였으므로, 이러한 빛의 경로와 노드가 일치하지 않을 경우, interpolation 방법을 적용함으로써 이웃하는 노드로부터 유전율 정보를 얻어와 전체 투과 행렬을 계산 할 수 있다.

## 2.2 시뮬레이션에 대한 모델링

액정의 동적인 움직임을 분석하기 위해 Gibbs 자유 에너지 밀도를 적용하고 액정 분자의 내부 momentum을 무시한 Ericksen-Leslie 이론을 바탕으로 식 (1)을 얻을 수 있다.

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

여기서,  $\gamma$  는 rotational viscosity,  $n_i$ 는 액정 분자 방향자의 Cartesian component,  $\lambda$ 는  $n$ 을 다음과 같은  $|n| = 1$  단위 벡터로서 만들어 주기 위한 Lagrange multiplier이며,  $[f_g]_n$ 는 식 (2)에 의해 정의된 Euler-Lagrangian equation 이다.

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

위 식에서 콤마 위의  $x, y, z$  첨자는  $x, y, z$  에 대한 부분미분을 표시한다. Gibbs 자유 에너지 밀도  $f_g$  는  $f_g = f_s - f_e$  와 같이 주어지며 여기서  $f_s$  와  $f_e$ 는 각각 strain energy 밀도와 electric energy 밀도를 의미한다. strain energy 밀도에서 surface term을 무시하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다[2].

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

Strain energy는 nematic crystal에서 방향자  $\hat{n}$  과 그 반대인  $-\hat{n}$ 의 평형을 유지하는 텐서 형태로 표현할 수 있다. 식 (3)에서  $K_{11}, K_{22}, K_{33}$ 는 각각 splay, twist, bend 탄성계수를 표현하며,  $q_0$ 는 액정의 chirality를 의미한다. 그리고  $G$ 는 반복된 index에 대한 convention summation이 적용되어 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} G_1^{(2)} &= Q_{ij,k} Q_{ij,k} & G_2^{(2)} &= Q_{ij,j} Q_{ik,k} \\ G_4^{(2)} &= e_{ijk} Q_{il} Q_{jl,k} & G_6^{(3)} &= Q_{ij} Q_{kl,i} Q_{kl,j} \end{aligned} \quad (4)$$

$e_{ijk}$ 는 permutation symbol이고 order tensor  $Q_{ij}$ 는 방향자  $\hat{n}$ 에 대해  $Q_{ij} = n_i n_j - \delta_{ij}/3$ 와 같이 표현된다[4]. electric energy 밀도  $f_e$ 는 식 (5)와 같이 표현된다[5].

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \phi_{,i} \epsilon_{lm} \phi_{,m} \quad (5)$$

위 식에서  $\Phi(x, y, z)$ 는 구동전압이 인가 된 상

태에서의 전위 분포이며,  $\epsilon_0$  공기중의 유전율,  $\epsilon_{lm}$ 는 액정의 유전율 텐서로서  $\epsilon_{lm} = \epsilon_{\perp} \delta_{lm} + (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) n_l n_m$ 와 같이 표현된다. 여기서  $\epsilon_{\parallel}$ 과  $\epsilon_{\perp}$ 는 각각 액정의 장축, 단축에 대한 유전율이다.

식 (3)과 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 우리는 방향자에 대한 dynamic equation of continuum theory를 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} &= \left\{ \frac{1}{3} (-K_{11} + 3K_{22} + K_{33})(n_j Q_{ji}, i) \right. \\ &\quad + (K_{11} - K_{22}) n_j (Q_{il, j} + Q_{jl, i}) \\ &\quad + \left( \frac{K_{33} - K_{11}}{2} \right) n_j [2Q_{lm, m} Q_{ji, l} + 2Q_{jm} Q_{ji, lm} \\ &\quad - Q_{lm, i} Q_{lm, j}] + 2q_0 K_{22} n_j (e_{ml} Q_{ij, m} + e_{jm} Q_{li, m}) \\ &\quad \left. + \epsilon_0 (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) n_j \phi_{,j} \phi_{,i} \right\} + \lambda n_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 전위 분포  $\Phi(x, y, z)$ 는 Maxwell's equation 으로부터 유도된 Laplace equation 식 (7)에 의해 얻을 수 있다.

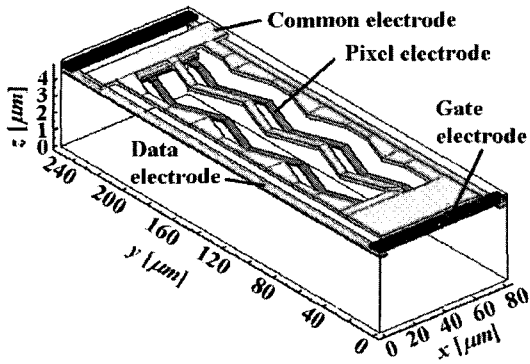
$$(\epsilon_{ij} \phi_{ij})_{,i} = 0 \quad (7)$$

수식들이 비선형적이고 액정 탄성계수의 비등방성으로 인해 매우 복잡하기 때문에 수치해석 방법으로서 유한 차분법(FDM : Finite Difference Method)을 적용하고 있다. 우리는 FDM 방법에서 계산공간과 경계조건이 복잡하기 때문에 공간미분에 대해 균일한 정사각형 형태의 grid를 사용하였다. 그리고 수치해석적 time domain에 대해 implicit method를 적용했을 때 액정의 운동 방정식의 비선형성으로 인한 몇 가지 문제점이 있기 때문에 explicit method를 사용하였다[3,6].

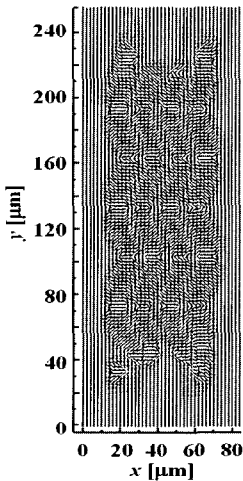
### 3. 결론

#### 3.1 S-IPS TFT-LCD의 구현과 분자배열 분포

우리는 그림 4-(a)에서처럼 매우 큰 시야특성을 가지고 있는 Super-IPS TFT-LCD model을 구현하여, 액정의 동적인 움직임을 마이크로세컨드 단위로 계산함으로써 그림 4-(b)와 같이 액정의 방향자 분포를 얻어내고 이로부터 Berreman 방법을 이용한 투과율을 계산하였다[7]. 전극의 중심 부근에서 전장의 왜곡이 생기게 되고 분자 배열 분포 또한 전기장 방향으로 충분히 정렬되지 못함을 확인할 수 있다.



(a) Super IPS-LCD의 전극 구조



(b) 액정 중간층에서의 분자 배열 분포

그림 4. S-IPS LCD의 전극 구조와 액정 중간층에서의 분자 배열 분포.

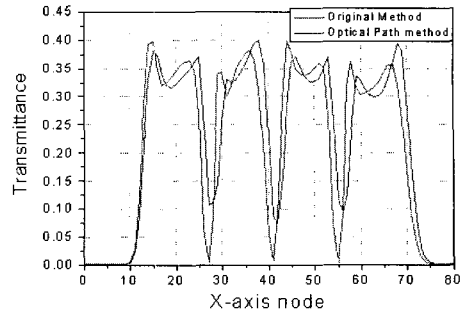
- (a) Super IPS-LCD의 전극 구조
- (b) 액정 중간층에서의 분자 배열 분포

Fig. 4. Electrode Structure of S-IPS LCD and director distribution at middle layer.

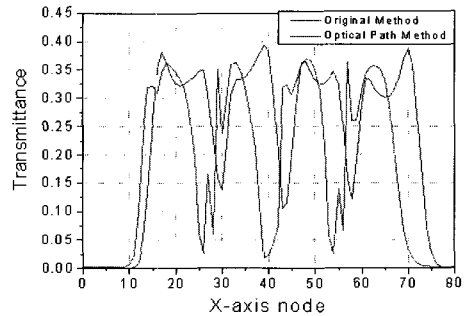
- (a) Electrode structure of Super IPS-LCD
- (b) Molecule director distribution at middle layer of the liquid crystal

### 3.2 광 경로를 고려한 시뮬레이션 결과

그림 5는 입사각  $20^\circ$  일때의 transmittance를 비교한 것이다. 분자 배열의 deformation이 크게 일어나는 부분인  $y=120\mu m$  지점에서  $x=0\mu m$ 로부터  $x=80\mu m$ 까지의 노드에 해당하는 광 경로를 추적하여 투과율을 계산하였다.



(a) 입사각  $20^\circ$



(b) 입사각  $45^\circ$

그림 5. 액정의 중간층에서의 투과율 비교.

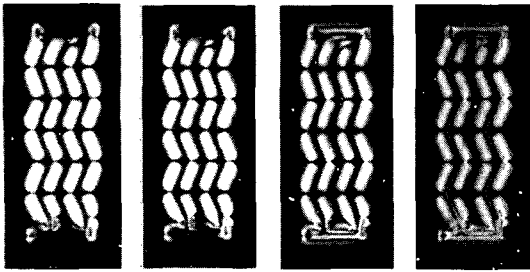
- (a) 입사각  $20^\circ$  (b) 입사각  $45^\circ$

Fig. 5. Comparison of transmittance at middle layer.

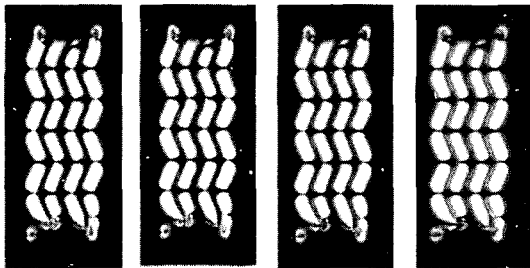
- (a) incident angle  $20^\circ$  (b) incident angle  $45^\circ$

광 경로를 고려한 방법이 기존 방법과 비교하여 투과율의 차이를 보여줌을 확인할 수 있다. 기존 방법에서는 분자 배열의 왜곡이 크게 일어나지 못하는 전극의 중심 부근에서는 투과율이 0에 가깝게 떨어지는 반면, 광 경로를 고려한 시뮬레이션 방법에서는 투과율이 0.1 이상으로 높이 나옴을 확인할 수 있다[그림 5].

그림 6은 기존 방법과 광 경로 방법에 대하여 수직입사,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 로 입사각을 변화시켰을 때의 투과율 분포를 나타낸 그림이다. 투과율 분포에서 보여주는 것처럼, 수직입사( $\theta=0^\circ$ )에서는 이론상으로도 그렇고, 기존 방법과 광경로 방법이 차이가 없음을 확인할 수 있지만, 입사각이 커짐에 따라 transmittance profile이 기존 방법과 뚜렷한 차이를 보여줌을 확인할 수 있다.



(a) 기존 방법에 의한 투과율 분포



(b) 광 경로 방법에 의한 투과율 분포

그림 6. 입사각에 따른 투과율 비교.

(a) 기존 방법에 의한 투과율 분포

(b) 광 경로 방법에 의한 투과율 분포

Fig. 6. Comparison of transmittance distribution at various incident angle.

(a) Transmittance profile using original method

(b) Transmittance profile using optical path method

이와 같이 광 경로를 고려한 시뮬레이션 방법이 시야각에 따른 disclination line의 이동을 보여주며, 특히 액정분자의 deformation이 큰 부분에서의 contrast ratio에 대한 또 다른 factor가 되며, 입사각에 따른 투과율 변화에도 영향을 미침을 확인할 수 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 Berreman 4x4 matrix method, Yeh 4x4 matrix method, Extended Jones matrix method 와 같은 matrix 방법을 적용하여 시뮬레이션을 하는 대부분의 TFT-

LCD 시뮬레이터에서 광 경로를 고려한 투과 특성의 계산이 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미침을 알 수 있고, 이 후에 개발되는 시뮬레이터 또한 이러한 특성을 고려하여야 할 것이다.

## 감사의 글

이 결과물은 정보통신부에서 지원하는 정보처리 단말기용 영상신호 구동 및 입력 IC개발 과제에 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] D. W. Berreman, "Optics in stratified and anisotropic media : 4x4 matrix formulation", J. Opt. Soc. Am., Vol. 62, p. 502, 1972.
- [2] S. Dickmann, J. Escher, O. Cossalter, and D. A. Mlynski, "Simulation of LCDs Including Elastic Anisotropy and Inhomogeneous Fields", SID' 93 DIGEST, p. 638, 1993.
- [3] 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, 2003.
- [4] D. W. Berreman and S. Meiboom, "Tensor representation of Oseen-Frank strain energy in uniaxial cholesterics", Phys. Rev. A, Vol. 30, p. 1955, 1984.
- [5] M. Kimura, T. Ozawa, and S. Inoue, "Pseudo-lattice method for dynamic 3-D liquid crystal director simulation", IEICE Trans. Electron., Vol. E83-C, No. 3 p. 513, 2000.
- [6] S. M. Jung and W. S. Park, "Novel method to calculate pixel and inter-electrode capacitance of thin-film transistor liquid crystal displays", J. Kor. Phys. Soc., Vol. 41, No. 6, p. 1041, 2002.
- [7] 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", ILCC '2002, p. 454, 2002.