Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 12, No. 8, pp. 719-723, 1999.

2차원 simulation에 의한 LCD의 광투과 특성 해석

12-8-8

Analysis on the Optical Transmission Characteristics of LCDs by 2-dimensional Simulation

정성민*, 박우상**

(Sung-Min Jung*, Woo-Sang Park**)

Abstract

We analyzed 2-dimensional transmittance characteristics of Liquid Crystal Displays such as disclination line, response time and so on. To analyze these 2-dimensional effects, governing equation of the potential and the director profiles must be established for adequate boundary conditions. These equations given by general forms of partial differential equations, are solved from Finite Difference Method. Moreover, Alternative Direction Implicit method is utilized in adopting FDM to reduce the calculation time. From the calculation results, it is revealed that the response time is greatly affected by the material parameters of liquid crystals such as viscosity, dielectric anisotropy, elastic constants and so on. Also we confirmed that the pretilt angle must be more than 3° to locate the disclination around the edge of a pixel.

Key Words(중요용어) : LCD, FDM, 2-D simulation, optical transmittance, resopnse time, disclination line

1. 서 론

1974년 Berreman은 액정의 시간에 따른 분자거동을 규명하기 위하여 제안한 1차원적 simulation [1]을 수행하였다. 1차원 simulation은 전극을 무한 평면이라 가정하고, 수직한 전장에 대한 분자배열 해석 및 광투과율해석을 의미한다. 그러나 이런 가정은 현재 통용되고 있는 복합전극 구조에 따른 측면 전기장에 의한 disclination을 해석이 불가능 하다. 따라서 보다 실제적인 TFT-LCD를 design 하기 위해 2차원 혹은 3차원 simulation에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 1989년 독일 Haas 등은 공통전극과 화소전극만을 고려한 시뮬레이션 결과를 발표하였으며[2, 3], 1990년 Lien 등도 왜곡된 전기장에 의한 시뮬레이션 결과를 잇따라 발표하였다[4].

이러한 2차원 simulation은 disclination 뿐만 아니라, 액정의 동특성에 있어서 측면 전기장에 의한 효과가 pixel 내부까지 깊숙히 파급되는 현상등에 대해 1 차원 simulation보다 전계에 의한 반응시간등을 비교적 정확히 계산할 수 있다.

본 연구에서는 자체개발한 2차원 simulator을 통하여 각종 액정 물성 paramater가 액정의 응답속도에 기여하는 정도 및 pretilt각에 따른 disclination line의 발생 mechanism을 정량적으로 해석하였다. 2차원적 simulation을 수행함에 있어서는, 2차 편미분 방정식으로 표현되는 전위방정식 혹은 분자배열 방정식을 FDM(Finite Difference Method)으로 풀이하였다. 전위분포방정식은 SOR(Successive Over Relaxation)법을 적용하였고, 분자배열 방정식은 ADI(Alternative Direction Implicit)법을 적용하였다[5, 6]. 특히 본 연구에서는 분자배열 방정식에 수치해석적인 기법을 적용함에 있어서 변형된 확산방정식의 형태를 보다 정확히 계산하는 알고리

* : 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부
(인천광역시 남구 용현동 253, Tel : 032-860-7762 E-mail : g1981171@inhavision.inha.ac.kr)
** : 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부
(인천광역시 남구 용현동 253, Tel : 032-860-7762 E-mail : wspark@inha.ac.kr)

1999년 5월 19일 접수, 1999년 7월 7일 심사완료

즘을 제시한다.

2. 본 론

2. 1. LCD 구조 및 계산영역 정의

계산영역으로써 좌측과 우측의 bus 전극의 절반 영역을 경계 영역으로 설정하였으며, x 방향으로 주기경계조건을 적용하였다. 그림 1은 계산에 적용된 단위화소의 단면이다.

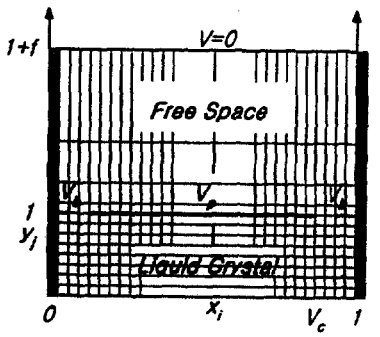

그림 1. 계산 영역의 정의
Fig. 1. Definition of calculation domain

2. 2. 전위분포 및 분자배열 분포 지배방정식

유전율이 텐서 형식으로 표현되는 액정 cell 내의 전위분포 방정식은 Laplace 방정식으로 주어진다.

$$\nabla \cdot (\tilde{\varepsilon}(x, y)\nabla V(x, y)) = 0 \tag{1}$$

여기서 $\tilde{\varepsilon}$은 액정의 유전율 텐서로서 director로 정의되는 분자방향에 대하여 다음과 같다.

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon n_x^2 & \Delta\varepsilon n_x n_y \\ \Delta\varepsilon n_x n_y & \varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon n_y^2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

n_x, n_y 및 n_z는 tilt 각 θ와 twist 각 ϕ로부터 $n_x = \cos\theta\sin\phi$, $n_y = \sin\theta$, $n_z = \cos\theta\cos\phi$가 되며, 따라서, 식(1)은 다음과 같이 풀이된다.

$$\varepsilon_{11}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \varepsilon_{22}\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + 2\varepsilon_{12}\frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial y}\right)\frac{\partial V}{\partial x} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial y}\right)\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

전위 계산에 있어서, 계산 영역은 액정 cell 내부뿐만 아니라 외부 영역까지 포함되므로, 자유 공간 내에서의 Laplace 방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) V = 0 \tag{4}$$

한편, 분자배열 또는 director 분포에 대한 지배방정식은 Haas model을 이용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\gamma\frac{\partial}{\partial t} n_i n_j = K\nabla^2 n_i n_j + \Delta\varepsilon\varepsilon_0 E_i E_j \tag{5}$$

여기서 γ는 점성계수를 의미하고, K는 등방 탄성계수, $\Delta\varepsilon$은 유전율 이방성, 그리고 E_i와 E_j는 각각 지역점에서의 전장 성분을 의미한다. 아래첨자는 모두 텐서 표기법으로 $i, j \in \{x, y, z\}$ 이다[7]. n_i 혹은 n_j는 위에서 밝힌 director의 좌표성분별 크기이다. 또한 액정의 director의 크기가 항상 1 이 되기 때문에 식(6)과 같은 조건이 주어지며 이러한 조건으로부터 식(5)는 식(7)과 같이 변형된다.

$$n_i n_i = 1 \tag{6}$$

$$\gamma\frac{\partial n_j}{\partial t} = K\nabla 2n_j + K(n_i\nabla 2n_i)n_j + \Delta\varepsilon\varepsilon_0 n_i E_i E_j \tag{7}$$

2. 3 수치해석

편미분방정식의 계산에는 FDM의 차분화법중 중앙차분화법(Central Space Scheme)을 적용하였다. 전위 및 director 방정식은 이러한 차분화를 통하여 linear system으로 변형된다. Laplace 방정식을 계산함에 있어서는 SOR 법을 적용하였으며, director 방정식은 ADI(Alternating Direction Implicit)법을 적용하였다. 우선 (7)식의 계산을 단순화 하기 위하여 식(6)의 조건을 포함하고 있는 우변의 두 번째 항을 제거하는 대신, 시간 변화에 대한 계산된 director의 각 성분을 재정규화 하는 방법을 적용한다[8]. 만약 $\vec{T} = \frac{\Delta\varepsilon}{\gamma}\varepsilon_0(\vec{n}\cdot\vec{E})\vec{E}$ 라고 정의하면, ADI법에 의한 차분화 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left(1 - \frac{\Delta t}{2}\frac{K}{\gamma}\delta_x^2\right)\vec{n}_j^{k+1/2} = \left(1 + \frac{\Delta t}{2}\frac{K}{\gamma}\delta_x^2\right)\vec{n}_j^k + \vec{T}(\vec{n}_{ij}^k)$$

$$\left(1-\frac{\Delta t}{2}\frac{K}{\gamma}\delta_y^2\right)\vec{n}_{ij}^{k+1} = \left(1+\frac{\Delta t}{2}\frac{K}{\gamma}\delta_x^2\right)\vec{n}_{ij}^{k+1/2}+\vec{f}(\vec{n}_{ij}) \quad (8)$$

여기서 δ^2는 FDM의 차분화 연산자이며, Δt는 시간 간격을 나타낸다. 이 경우, 차분화를 통한 행렬연산이 필요하며, ADI 법을 적용함에 있어서 시간 차분화는 simple implicit 법을 적용하였다. 이 경우 만약 식의 두 번째 항을 $k+1$ 단계로 설정하게 되면 행렬식의 주 대각요소에 첨가되어 불안정한 해를 유발할 수 있다. 이에 대한 해결책으로는 $\vec{n}_{ij}^{k}$을 $\vec{n}_{ij}^{k}$으로 설정하여 단순히 one step으로 계산하는 방법이 있으나, 본 연구에서는 $\vec{n}_{ij}^{k}$를 $\vec{n}_{ij}^{k+1}$으로 설정하여 iteration을 적용함으로써 위에서 제시된 문제를 해결할 수 있었다.

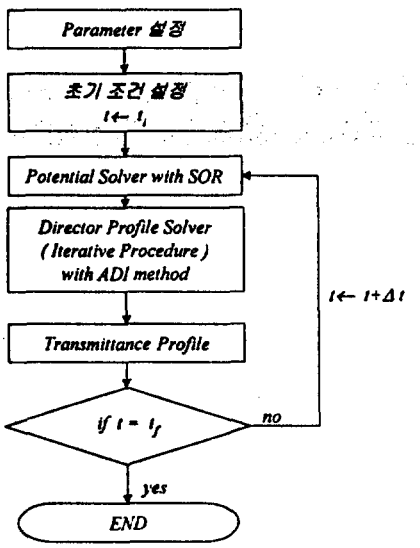

그림 2. 계산 과정 흐름도
Fig. 2. Flowchart of simulation process

그림 2는 전위 및 분자배열분포 방정식을 교대로 계산하는 과정에 대한 흐름도를 나타낸다. 우선 simulation parameter들을 정의한 뒤, 초기시간 t_i에서 t_f까지 Δt 시간 간격으로 증가시 가면서 전위를 계산하고 그 전위로부터 계산된 전기장을 이용하여 director 분포를 계산한다.

3. 계산 결과 및 논의

각종 cell parameter가 액정의 광 투과응답 속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 90° TN-LCD에 5V의 pulse 파를 5ms에서 35ms 사이에 인가하였다.

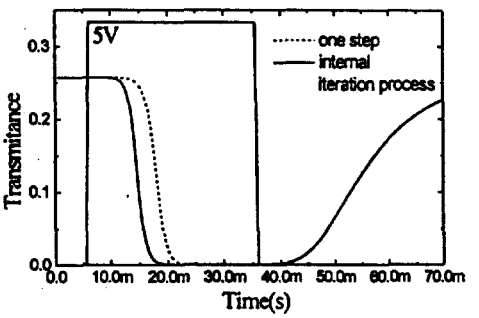

그림 3. one step calculation과 내부 iteration 간 결과 비교
Fig. 3. Comparison of the results from internal iteration process and one step calculation

그림 3은 내부 iteration과 one step calculation을 통한 계산 결과를 나타낸다. 동일하게 ADI 법을 적용할 경우에도 internal iteration을 통한 계산이 약 5ms 가량 적은 지연시간을 보였으며, 이는 순수하게 계산시에 발생하는 error로 확인되었다. 두 계산 결과를 비교할 때 지연시간을 제외한 전계반응시간은 완전히 일치함을 확인하였다. 본 simulator를 이용하여 각종 액정 물성 parameter가 전기광학 특성에 미치는 영향을 그림 4~그림 7에 나타내었으며, 본 연구에서는 액정의 반응 시간을 각각 지연시간과 전계반응시간, 그리고 relaxation 시간으로 나누어 해석하였다.

먼저 그림 4는 탄성계수가 투과특성에 미치는 영향을 보인 것으로써 그림에서 보는 바와 같이 액정의 탄성계수는 전계반응시간보다 인가전압 제거시 액정분자가 원래 상태로 relaxation 할 때, 그 영향이 큼을 알 수 있다.

그림 5는 액정의 점성계수가 투과특성에 미치는 영향을 보인 것이다. 점성계수가 적을수록 더욱 빠른

응답특성을 보였으며, 이는 전압인가시와 제거시에 모두 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

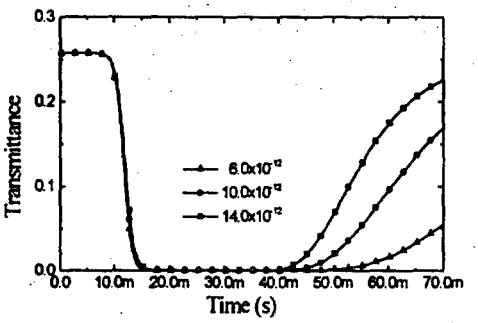

그림 4. 탄성계수에 대한 투과 특성
Fig. 4. Dependence of transmission characteristics on the various elastic constants

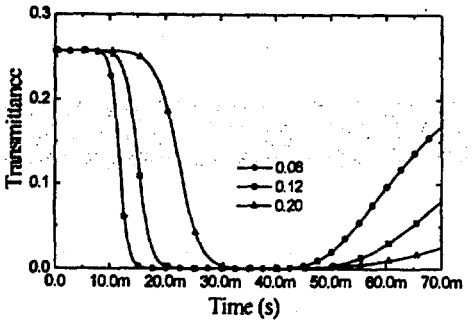

그림 5. 점성계수에 대한 투과 특성
Fig. 5. Dependence of transmission characteristics on the various viscosity

그림 6은 액정의 유전율 이방성이 투과특성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 유전율 이방성이 클수록 전압인가시에 더욱 빠른 응답특성을 보였으며, 위의 점성계수와 함께 응답시간을 결정하는 중요한 parameter가 됨을 알수 있다.

그림 7은 다양한 pretilt 각에 따른 응답곡선이다. pretilt각이 0.5° 이상의 값을 가질 경우 지연 시간에는 비교적 적은 효과를 보였으며, 특히 지연 시간을 제외한 전계반응시간은 어느 경우나 거의 일치함을 알 수 있었다. 그러나 그림 8에서 보여지는 바와 같이 disclination line은 pretilt 각에 크게 영향을 받음을 확인할 수 있다. 이는 개구율(Aperture Ratio)를 높이기 위해 disclination line을 가능한 화소전극 모서리에 위치시켜 black matrix로 누설광을 차단할 때 pretilt 각이 적어도 3° 이상은 되어야 함을 보여준다. 본 실험에서 twist 각은 90° 이다.

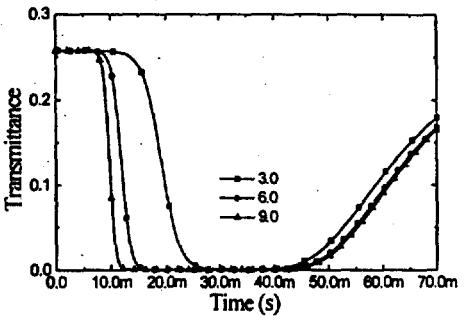

그림 6. 유전율 이방성에 대한 투과특성
Fig. 6. Dependence of transmission characteristics on the various dielectric anisotropy.

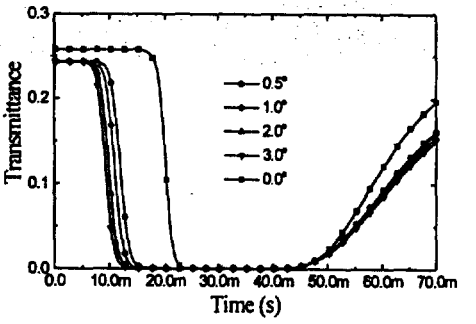

그림 7. pretilt 각에 대한 투과특성
Fig. 7. Dependence of transmission characteristics on the various pretilt angle

그림 8는 pretilt 각에 따른 광투과분포를 나타낸다. pixel 전극은 normalized distance가 0.1에서 0.9인 위치에 걸쳐 있으며, 실제 길이는 67㎛ 이다. disclination line은 pretilt각이 1°에서 3°까지 증가함에 따라 disclination line은 약 3.4㎛ 가량, 그리고 0°에서 0.5°까지 증가함에 따라 21.3㎛ 점차 이동하였다.

이는 LCD cell 내에서 pretilt 각이 커짐에 따라 균일한 정상영역의 폭이 점차 넓어지고, 반전영역이 점차 협소해지며 그 경계가 점차 우측으로 이동해 나아가기 때문인 것으로 파악된다.

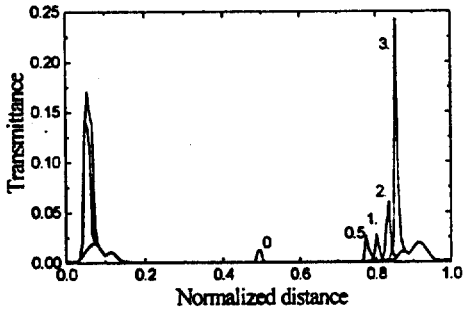

그림 8. 다양한 pretilt 각에 따른 투과율 분포
Fig. 8. Spatial distributions of transmission at various pretilt angle

4. 결 론

본 연구에서는 disclination line의 위치 및 액정 응답시간에 미치는 물성 parameter의 영향을 분석하기 위하여 2차원 simulation을 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1. 동일하게 ADI 법을 적용할 경우에도 internal iteration을 통한 계산이 one step calculation 보다 지연 시간에 있어서 약 5ms 가량 적게 나타났으며, 이는 순수하게 계산시에 발생하는 error로 확인되었다. 두 계산 결과를 비교할 때 전계반응시간은 완전히 일치함을 확인하였다.
2. 액정 응답의 지연 시간에 있어서는 점성계수, 유전율 이방성, 그리고 pretilt각이 지배적이었으며 또한 전계반응시간에 있어서는 점성계수, 유전율 이방성이 지배적이었고, relaxation 시간에는 탄성계수, 점성계수 등이 주로 영향을 미침을 확인하였다.
3. disclination line은 pretilt 각이 커질수록 pixel의 가장자리으로 이동하였으며, 계산 결과 pixel의 가장자리에 disclination을 위치시키기 위해서는 적어도 3° 이상의 pretilt 각을 주어야 함을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구에서 적용된 모델식은 액정의 탄성계수를 등방으로 가정한 것으로서, 향후 보다 정확한 해석을 위하여는 이방성 탄성계수 및 order parameter등을 고려한 model 식이 정립되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 과학기술부에서 시행한 G-7사업(차세대 평판표시장치기반기술 개발사업)과 1999년 인하대학교 교내연구비의 지원하에 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] D. W. Berreman, "Dynamics of liquid crystal twisted cells", Appl. Phys. Lett., Vol. 25, pp. 12-15, 1974.
[2] G. Haas, S. Siebert, D. A. Mlynski, "Simulation of Inhomogeneous Electric Field Effecs in Liquid Crystal Displays", Japan Display 89, pp. 524-527, 1989.
[3] G. Haas, M. W. Fritsch, H. Wohler, D. A. Mlynski, "Simulation of Reverse-Tilt Disclinations in LCDs", SID 90 DIGEST, pp. 102-105, 1990.
[4] A. Lien, "Two Dimensional Simulation of the Lateral Field Effects of a 90° TN LCD cell", 10th IDRC, p. 248, 1990.
[5] J. C. Strikwerda, *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*, Wadsworth & Brooks, 1989.
[6] D. A. Anderson, J. C. Tannehill, R. H. Pletcher, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1984.
[7] G. A. Hawkins, *Multilinear Analysis for Students in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, 1963.
[8] S. Dickman, J. Eschler, O. Cossalter, D. A. Mlynski, "Simulation of LCDs Including Elastic Anisotropy and Inhomogeneous Fields", SID 93 DIGEST, pp. 638-641, 1993.