

Calculation of Pixel and Inter-Electrode Capacitance of In-Plane Switching Liquid Crystal Displays using Three-dimensional Simulation

*Woo-Sang Park, Sung-Min Jung and Sang-Han Jang

School of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

E-mail : wspark@inha.ac.kr

Abstract

본 연구에서는 정전계 에너지를 이용하여 IPS-LCD의 화소와 각 전극간 정전용량을 엄정한 방법으로 계산하였다. 정전계 에너지는 전극의 유한한 크기로 인해 발생하는 측면 전장효과를 고려한 3차원 방향자와 전위분포를 시뮬레이션 함으로써 얻을 수 있었다. 수치해석 방법으로는 유한차분법을 사용하였다. 그 결과 IPS-LCD의 화소 정전용량과 게이트-공통전극간 정전용량은 구조적 특성으로 인해 기존의 TN-LCD와 비교하여 1/16배 가량으로 훨씬 더 작은 값을 나타냄이 확인되었다.

I. 서론

최근 TFT-LCD(Thin-Film Transistor Liquid Crystal Displays)가 데스크탑 PC, 워크스테이션, TV와 같은 대면적 디스플레이에 적용됨에 따라 광시야각의 특성을 가지는 TFT-LCD에 대한 요구가 증가되어 왔다. IPS-LCD(In-Plane Switching Liquid Crystal Displays)는 넓은 시야각을 확보할 수 있는 고성능 디스플레이로써 20인치 이상 되는 대부분의 TFT-LCD에 폭넓게 사용되고 있다 [1]. 그러나 IPS-LCD의 구조적 특성상 화소전극과 공통전극이 동일 평면에서 서로 맞물리는 등 복잡한 형태를 가지며, 그로 인해 화소와 각 전극간 정전용량을 쉽게 예측할 수 없는 문제가 있다. 알려진 바와 같이 화소의 정전용량은 TFT의 충전 특성에 큰

영향을 미치며, 주변 전극간 정전용량은 TFT의 게이트와 데이터 전극에 인가된 전압파형을 심각하게 왜곡 시킨다. 따라서, TFT 구조와 구동파형, TFT-LCD의 물질 변수들과 디바이스 구조 등을 최적화 하는데 있어, 각종 정전용량의 예측이 무엇보다 중요한 문제라 할 수 있다.

본 연구에서는 3차원 방향자와 전위분포를 사용하여 IPS-LCD의 화소와 각 전극간 정전용량을 구하는 새로운 방법을 제시한다. 화소 및 각 전극간 정전용량을 보다 엄정하게 계산하기 위해, 먼저 IPS-LCD의 3차원 방향자와 전위분포를 시뮬레이션하고, 그로부터 얻어진 방향자와 전위분포를 사용하여 화소 내에 저장된 정전계 에너지를 계산함으로써, 최종적으로 정전계 에너지를 가지고 화소와 각 전극사이의 정전용량을 얻어낸다.

II. 본론

액정의 방향자 분포 $n(x,y,z)$ 는 Erickson-Leslie 이론으로부터 운동방정식을 시뮬레이션 함으로써 얻을 수 있다 [2].

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial n_i}{\partial t} = & \left\{ \frac{1}{3}(-K_{11} + 3K_{22} + K_{33})(n_j Q_{ji,il}) \right. \\ & + (K_{11} - K_{22})n_j(Q_{il,jj} + Q_{jl,ii}) \\ & + \left(\frac{K_{33} - K_{11}}{2} \right) n_j \times [(2Q_{lm,m} Q_{ji,l} + 2Q_{lm} Q_{ji,lm} - Q_{lm,i} Q_{lm,j})] \\ & \left. + 2q_0 K_{22} n_j (\epsilon_{iml} Q_{lj,m} + \epsilon_{jml} Q_{li,m}) + \epsilon_o \Delta n_j \phi_j \phi_i \right\} + \lambda n_i \end{aligned} \quad (1)$$

$$Q_{ij} = n_i n_j - \delta_{ij} / 3$$

여기에서, γ 은 회전 점성계수, n_i 는 방향자 n 의 직각좌표 성분, λ 는 단위벡터 $|n|=1$ 이 되도록 방향자를 유지시켜 주기 위한 라그랑지 승수이다. 그리고 K_{11} , K_{22} 와 K_{33} 는 각각 액정의 splay, twist, bend 탄성계수이며, q_0 는 액정의 chirality를 나타낸다. 전위분포 $\phi(x, y, z)$ 는 맥스웰 방정식으로부터 유도된 다음의 라플라스 방정식을 시뮬레이션 함으로써 얻을 수 있다 [2].

$$(\epsilon_{lm}\phi_{,m})_{,l} = 0, \quad \epsilon_{lm} = \epsilon_{\perp}\delta_{lm} + (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})n_l n_m \quad (2)$$

여기서, ϵ_{\parallel} 와 ϵ_{\perp} 는 각각 액정의 수평 방향의 유전율과 수직 방향의 유전율 상수이다.

비등방 탄성계수 모델 및 네마틱 대칭성을 만족시키기 위한 텐서 모델이 동시에 적용된 다소 복잡한 형태의 비선형 거동 방정식을 시뮬레이션 하기 위하여, 수치해석 방법으로 본 연구에서는 유한 차분법을 사용하였다.

IPS-LCD의 단위 화소 구조 및 각 전극간 정전용량을 그림 1에 나타내었다. 화소와 공통전극은 TFT와 같은 기판 위에 배치되어 있다. 그림 2에서는 IPS-LCD의 3차원적 액정의 방향자 분포 및 전위분포를 나타내었다. 그림 2 (a)에서 보여지는 바와 같이, TFT 기판 위의 화소와 공통전극 사이에서 수평 전계는 액정의 중간층보다 더 강한 전계가 형성된 것을 알 수 있으며, 또한 그림 2 (b)에서는 교차전극의 가장 자리 부근에서 방사형의 전계분포로 인해 화소와 공통전극 사이에서 관찰 되는 액정의 배열과 상이한 방향으로 액정이 정렬됨으로써, 비정상 영역이 형성됨을 확인하였다.

한편, 액정의 거동 중, 특정 시간에 대해 주어진 방향자 분포를 이용하여 주어진 시간에서 전체 화소에 저장된 총 정전계 에너지는 계산영역 내에서 주어진 전위분포를 통해 다음의 식으로 계산된다 [3].

$$W_E = \frac{1}{2} \int_{Vol} (\varphi_{,l} \epsilon_{lm} \varphi_{,m}) dv - \frac{1}{2} \int_S \varphi (\epsilon_{lm} \varphi_{,m}) ds_l \quad (3)$$

여기에서 Vol 은 계산영역의 체적이고 S 는 Vol 로 둘러싸인 전체 표면적이다. 식 (3)에서 우변의 두 번째

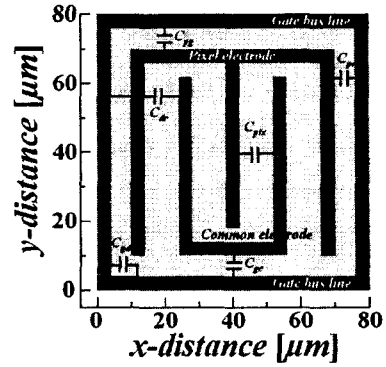
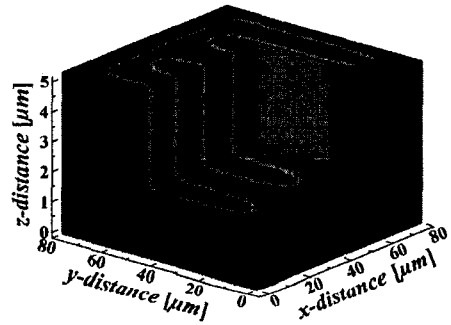
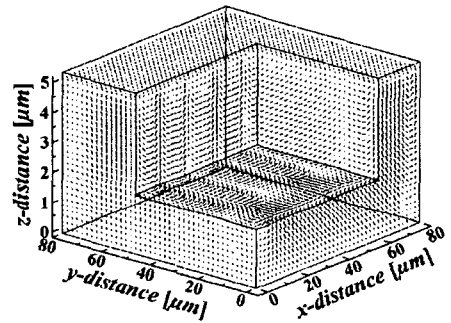


그림 1. 시뮬레이션에서 사용된 단위 화소 구조



(a) 전위분포



(b) 방향자 분포

그림 2. IPS-LCD의 3차원 방향자 분포와 전위분포

항은 계산영역을 무한 영역에서 유한 영역으로 제한함으로써 그 경계조건으로 추가된 항이다. 이러한 영역에서 총 정전계 에너지를 정의하는 또 다른 방법은, 계산 영역 내에서 화소와 각 전극 사이에 존재하는

모든 종류의 정전용량에 저장된 에너지를 그 합으로 표현하는 것이다 [3].

$$W_E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N C_{ij} V_{ij}^2 \quad (4)$$

N 은 계산영역 내의 전극수이며, C_{ij} 는 i 와 j 번째 전극간 정전용량이고, $V_{ij} = V_i - V_j$ 이다. V_i 와 V_j 는 i 와 j 전극에 인가된 전압이다. 따라서 계산영역 내의 모든 정전용량은, 정전계 에너지를 구하는데 필요한 전위분포를 얻으면 계산할 수가 있다.

주기적으로 반복된 화소 구조로부터 주기 경계조건이 적용 되었으며, 이에 따른 실제적인 전극의 수는 4개로 절감된다. 정전용량의 값을 구하기 위해, 계산영역 내의 전계 밀도에 의해 저장된 총 에너지는 전극간 캐패시터에 저장된 총 저장 에너지와 등가라는 원리를 적용하여 식 (3)과 (4)를 결합함으로써 얻을 수 있다.

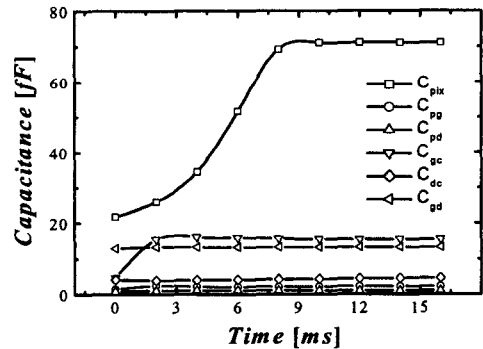
$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^4 C_{ij} V_{ij}^2 = \frac{1}{2} \int_{Vol} (\varphi_i \epsilon_{im} \varphi_m) dv - \frac{1}{2} \int_S \varphi (\epsilon_{im} \varphi_m) ds_i \quad (5)$$

이로부터 6개의 정전용량을 계산하기 위한 6개의 연립방정식을 다음과 같은 방법으로 얻을 수 있다. 우선 식 (5)의 우변에 있는 전체 정전계 에너지를 계산하기 위해서 4개의 전극에 서로 다른 전압세트를 6번 인가하고, 이 전압하에서 전위분포를 각각 계산한다. 이러한 전압세트는 미지수 C_{ij} 의 계수로 구성되며, 이 과정을 6번 반복함으로써 V_{ij}^2 으로 구성된 6×6 계수 행렬과 6×1 에너지 행렬을 얻을 수 있다. 결과적으로 얻은 행렬은 다음과 같다 [4].

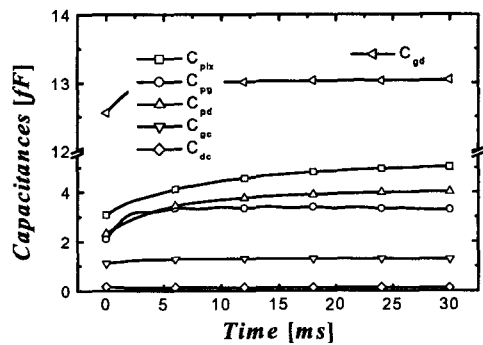
$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1)V_{12}^2 & (1)V_{13}^2 & (1)V_{14}^2 & (1)V_{23}^2 & (1)V_{24}^2 & (1)V_{34}^2 \\ (2)V_{12}^2 & (2)V_{13}^2 & (2)V_{14}^2 & (2)V_{23}^2 & (2)V_{24}^2 & (2)V_{34}^2 \\ (3)V_{12}^2 & (3)V_{13}^2 & (3)V_{14}^2 & (3)V_{23}^2 & (3)V_{24}^2 & (3)V_{34}^2 \\ (4)V_{12}^2 & (4)V_{13}^2 & (4)V_{14}^2 & (4)V_{23}^2 & (4)V_{24}^2 & (4)V_{34}^2 \\ (5)V_{12}^2 & (5)V_{13}^2 & (5)V_{14}^2 & (5)V_{23}^2 & (5)V_{24}^2 & (5)V_{34}^2 \\ (6)V_{12}^2 & (6)V_{13}^2 & (6)V_{14}^2 & (6)V_{23}^2 & (6)V_{24}^2 & (6)V_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1)W_E \\ (2)W_E \\ (3)W_E \\ (4)W_E \\ (5)W_E \\ (6)W_E \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서 $(k)V_{ij}^2$ 는 4개의 전극에 k 번째로 동시에 적용시킨 전압이고, $(k)W_E$ 는 k 번째 전압에 대한 에너지를 의미한다.

그림 3은 TN-LCD와 IPS-LCD에 전압이 인가된 후 시간에 따른 정전용량을 보여 주고 있다. IPS-LCD의 화소, 공통, 데이터, 게이트 전극은 TFT와 같은 기판 위에 배치되어 있기 때문에 화소 정전용량과 게이트-공통전극간 정전용량은 TN-LCD의 결과보다 약 1/16 정도로 매우 작은 값을 보였으며, 특히 주변 전극간 정전용량과도 거의 비슷한 값을 가짐을 확인함으로써 주변 전극에 의해 심각한 신호 왜곡현상이 나타날 것으로 예측되었다.



(a) TN-LCD



(b) IPS-LCD

그림 3. 시간에 따른 화소와 각 전극간 사이의 정전용량

III. 결 론

본 연구에서는 3차원 방향자와 전위분포를 이용하여 IPS-LCD의 화소와 각 전극간 사이의 정전용량을 엄정하게 계산하였다. 액정의 Gibbs 자유에너지 밀도에 대한 모델은 네마틱 액정의 방향자 n 과 그 반대방향 $-n$ 이 등가라는 것을 내포하기 위한 텐서접근법에 기초하였다. 또한 보다 실제적인 상황을 묘사하기 위하여 액정을 비등방 탄성계수를 가지는 물질로 다루었다. 수치해석 방법으로, 비선형성과 복잡한 문제를 다루는데 있어서 효과적인 유한차분법을 사용하였다.

그 결과, IPS-LCD의 화소 정전용량과 게이트-공통전극간 정전용량은 TN-LCD의 결과보다 약 1/16정도로 매우 작은 값을 보였으며, IPS-LCD의 게이트-데이터 전극간 정전용량은 TN-LCD와 거의 같은 것으로 확인되었다. 이에 따라, TFT의 구동파형을 설계함에 있어서 IPS-LCD의 보조 정전용량은 화소와 각 전극간 정전용량의 값들이 매우 작음을 고려하여 보다 엄정하게 설계 되어야 함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Kiefer, B. Weber, F. Windscheid and G. Baur, JAPAN DISPLAY, 547 (1992).
- [2] S. Dickman, J. Escher, O. Cossalter and D. A. Mlynski, SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers, 638 (1993).
- [3] S. M. Jung and W. S. Park, J. Korean Phys. Soc. **41**, 1041 (2002).
- [4] S. M. Jung and W. S. Park, Liquid Crystals, **30**, 1 (2003).