

3차원 유한요소법을 이용한 TFT-LCD 액정에서의 공간 전기장 분포 특성 분석

정상식 · 김남경 · 김동훈*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 산격동 1370, 702-701

노민호 · 이규상

LG Display, 경기 파주시 월롱면 덕은리 1271, 413-779

(2012년 3월 26일 받음, 2012년 5월 11일 최종수정본 받음 2012년 5월 14일 게재확정)

복잡한 전극 구조를 갖는 TFT-LCD 패널의 픽셀 사이의 간섭효과를 고려하여 액정에서의 공간 전기장 분포를 정밀하게 예측할 수 있는 멀티 픽셀 기반의 3차원 유한요소 수치해석 모델을 구축하였다. 이를 토대로 패널 내 다양한 전극 불량 조건에 대한 액정에서의 공간 전기장 분포 특성을 정상 상태와 비교 분석 하였다. 이러한 수치모사 결과와 기존 광학적 패널 검사장비의 불량검출 결과를 간접 비교함으로써 제안한 3차원 유한요소 수치모델의 타당성을 검증하였다.

주제어 : 전기장, 불량 검출, 유한요소법, TFT-LCD

I. 서 론

최근 고해상도, 넓은 시야각, 빠른 응답속도, 경량, 저 전력 등의 장점을 지닌 TFT-LCD(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display)는 다양한 전자 기기의 주요 디스플레이로 각광 받고 있다. 기존 브라운관(cathode-ray tube)에서 패널(panel)로의 디스플레이 방식의 전환은 단순한 공간 활용도의 증가 뿐 아니라 사회, 문화, 정치, 경제 등의 모든 분야에서 편리함과 더불어 다양한 변화를 유도하고 있다. 근래 TFT-LCD의 전기적, 광학적 특성 향상을 통한 고해상도 디스플레이를 구현하기 위하여 보다 복잡한 전극 구조를 가지는 액정 패널과 이에 대한 불량검출 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

대부분 LCD 패널에 대한 불량 검출은 광원에서 인가한 빛이 액정을 투과하여 나온 상대적인 양을 측정하여 불량을 검출하는 광학적인 기법이 주로 사용되고 있다[2]. 그러나 이러한 광학적인 방식은 패널 내부에 존재하는 다양한 전극 불량 조건들에 따라 액정에서 형성되는 공간 전기장 분포 특성 변화를 유출할 수 없어 패널 불량에 대한 정확한 원인 규명에는 한계를 나타낸다. 따라서 정확한 패널 불량 원인을 규명하기 위해서는 패널 내 전극 구조의 불량에서 야기되는 공간상의 전기장 분포에 대한 정확한 예측 기술이 요구된다.

이에 대한 초기 연구로 패널 내의 공간 전기장 분포를 수치모사하기 위하여 유한차분법(finite difference method)이 적용되었다[3]. 유한차분법은 계산 속도는 빠르지만 경사구조를 갖

는 복잡한 3차원 전극 구조에 대한 모델링이 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 유한요소법(finite element method)을 이용한 2차원 또는 3차원 모델에 대한 공간 전압/전계의 해석이 시도되었다[4-6]. 그러나 기존 유한요소법을 이용한 연구는 TFT-LCD에 사용되는 전체 전극이 아닌, 일부 전극을 이용한 단일 픽셀(pixel)에 대한 연구가 주로 수행되어 전체 전극에 대한 공간 전기장 분포의 영향도를 고려할 수 없을 뿐만 아니라 불량 시 인접 픽셀 간의 간섭효과를 예측할 수 없다.

본 논문에서는 복잡한 전극 구조를 갖는 TFT-LCD 액정에서의 공간 전기장 분포를 정밀하게 예측하기 위하여 멀티 픽셀 기반의 3차원 유한요소 해석 모델을 구축하였다[7]. 이를 토대로 패널 내 다양한 불량 조건에 대한 액정에서의 공간 전기장 분포 특성을 정상 상태와 비교 분석하였고 그 결과를 기존 광학적 패널 검사장비의 불량검출 결과와 간접 비교함으로써 3차원 유한요소 모델의 타당성을 검증하였다.

II. 3차원 수치모델

3차원 전기장 해석에 사용되는 지배방정식에 대한 간략한 기술과 더불어 TFT, 화소(finger) 및 ITO 등의 모든 전극과 적층을 고려한 단일 픽셀에 대한 3차원 유한요소 모델을 구축한다. 이를 바탕으로 이웃하는 픽셀에 대한 고장 픽셀의 간섭효과를 충분히 고려할 수 있는 멀티 픽셀에 대한 수치모델을 확립한다.

1. 정전계 지배방정식

전자기 응용 소자 및 시스템을 설계하기 위해서는 주어진

*Tel: (053) 950-5603, E-mail: dh29kim@ee.knu.ac.kr

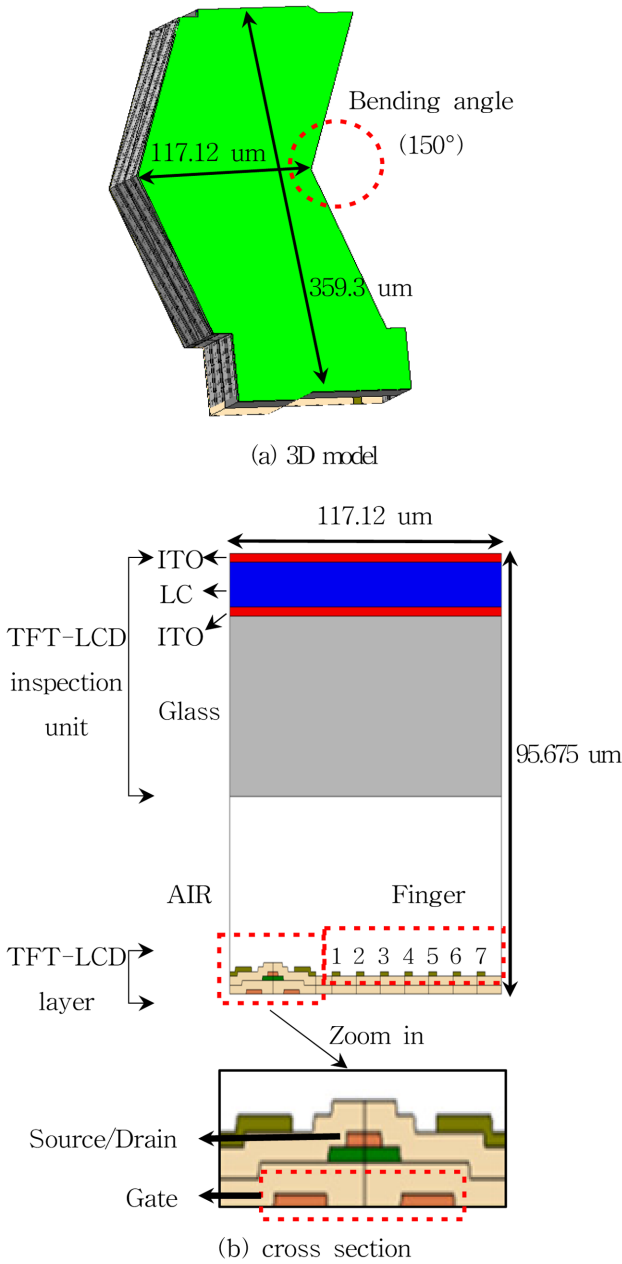


Fig. 1. (Color online) One-pixel model of TFT-LCD.

설계 대상에 대한 정확한 전자기적 동작 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 본 연구의 대상인 Fig. 1에서 제시한 TFT-LCD 패널의 경우, 하부전극 구조(TFT와 화소)와 ITO 전극에서 발생한 전기장이 공기와 유전체를 통해 액정 내에 형성되는 공간 전기장 분포 특성에 따라 해당 픽셀의 정상 동작여부가 결정 된다. 따라서 액정 내의 공간 전기장 분포 특성 즉, 하부 전극 구조의 이상에 따른 공간 전기장 분포 변화를 정확히 예측하기 위해서는 전하량, 전계 및 전위 등의 관계를 결정하는 정전계(electrostatics) 지배방정식에 대한 고찰이 요구된다. 일정 폐곡면을 통하여 흘러나오는 전속(electric flux)의 수

는 그 폐곡면으로 둘러싸인 입체 내의 전하량의 합(Q)과 동일하다.

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_{vol} \rho_v dv = Q \quad (1)$$

여기서 \vec{D} 는 전속밀도 벡터, ρ_v 는 체적전하 밀도이다.

식(1)에 대한 미분 형태의 표현은

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2)$$

이고 전속밀도와 전계세기(electric intensity) 사이의 관계는 구성방정식, 식(3)에 의해 정의 된다.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (3)$$

여기서 \vec{E} 는 전계세기이고, ϵ 는 유전율(permittivity)을 의미한다. 보존장(conservative field) 하에서 전위와 전계의 관계는

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

이고 유전율이 상수인 경우에는 식(5)와 같이 푸아송 방정식 형태의 정전계 지배방정식이 도출된다.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

해석 대상인 TFT-LCD 패널 내의 공간 전기장 분포를 수치적으로 예측하기 위해서는 경계조건을 포함하여 식(5)를 기저함수를 이용하여 이산화 과정을 통해 얻어진 시스템 행렬을 풀면 된다. 여기서는 일반적인 유한요소법에 의거한 이산화 과정은 생략하기로 한다[7].

2. 단위 픽셀 모델링

실제 모델에서는 TFT-LCD 레이어(layer) 위에, 액정, Glass순으로 적층이 된다. 하지만 본 논문에서는 검사장비와 TFT-LCD 사이의 공간 전압 분석을 위하여, Fig. 1과 같은 단위 픽셀의 3차원 유한요소 모델링을 도입하였다.

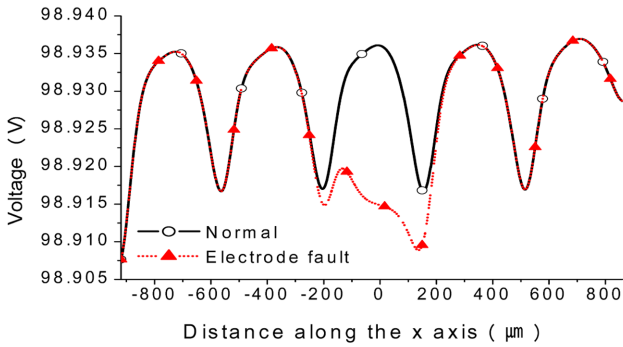
Fig. 1(a)는 단위 픽셀의 적층된 구조를 위에서 본 Fig. 1(a) 픽셀의 꺾인 각도(bending angle)는 150°이다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 표시된 사선을 따라 생성되는 2차원 단면을 나타낸 것으로 단위 픽셀 내 전극 구조 및 적층 구조를 볼 수 있다. 단일 픽셀은 화소 전극을 형성하는 4개의 핑거(finger: Fig. 내 1, 3, 5, 7), 공통 전극을 형성하는 3개의 핑거(Fig. 내 2, 4, 6) 그리고 TFT 전극을 형성하는 게이트/소스/드레인 및 액정 위에 위치한 상부 ITO 전극으로 구성된다.

3. 멀티 픽셀 모델링

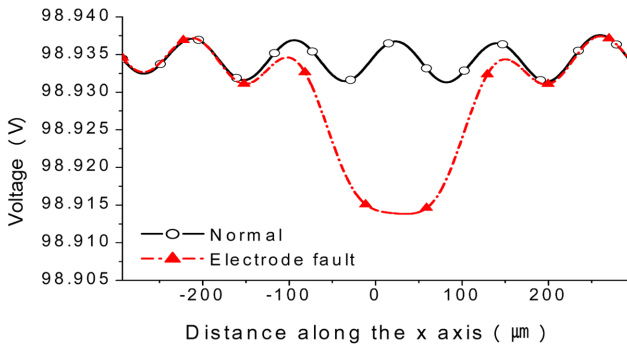
픽셀 불량 발생 시 주위의 인접 픽셀 사이의 간섭 효과를

Table I. Normal and fault voltages supplied to electrodes.

	상부 ITO	소스/드레인	게이트	공통	화소
정상전압(V)	100	-8	-5	-5	7
불량전압(V)	100	-8	-5	-5	0



(a) Vertical model



(b) Horizontal model

Fig. 2. (Color online) Comparison of voltage waveforms between normal and fault conditions.

고려한 3차원 유한요소 모델을 확립하기 위하여 수직, 수평 적층 모델을 고려하였다. 먼저 수직 간섭 효과를 고려하기 위해서 수평으로 1개의 픽셀, 수직으로 5개의 픽셀을 적층하였다. 또한 수평 간섭 효과를 고려하기 위해서 수평으로 5개의 픽셀, 수직으로 1개의 픽셀을 적층하였다.

불량 픽셀이 발생할 경우, 인접 픽셀에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 5개의 픽셀로 이루어진 두 모델 내에서 각각 중앙에 위치한 픽셀 3번에 불량 조건을 인가하였다. Table I 에서와 같이 불량을 모의한 픽셀의 화소 전극에는 불량 전압 0 V를 인가하여, 정상인 경우와 값을 비교하였다. 수평, 수직의 픽셀 적층 모델을 가로지르는 지점의 액정 하단에서의 전압을 Fig. 2에 제시하였다. 픽셀간의 경계점에서의 정상전압과 불량전압 인가 시 발생하는 전압 차를 Table II에 나타내었다. 수직적층 모델의 경우, 불량을 모의한 픽셀 3번과 정상인 픽셀 4번 경계에서 전압 차는 6.74 mV이고 픽셀 4번과 5번 경계에서는 거의 전압차가 발생하지 않았다. 반면, 수평

Table II. Voltage differences on the pixel boundaries between normal and fault conditions (Unit : mV)

위치	픽셀1 시작점	픽셀1-2 경계	픽셀2-3 경계	픽셀3-4 경계	픽셀4-5 경계	픽셀5 끝지점
수직 적층	0.00	5.15×10^{-8}	1.79	6.74	1.26×10^{-8}	0.000
수평 적층	0.02	0.14	6.94	18.91	1.03	0.02

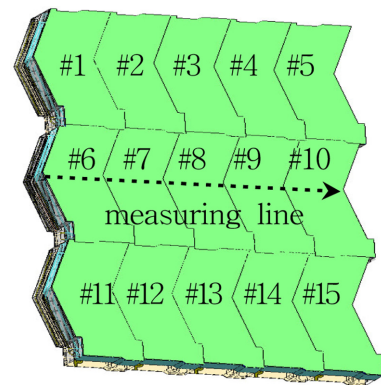


Fig. 3. (Color online) Multi-pixel model for 3D finite element analysis.

적층 모델의 경우, 불량을 모의한 픽셀 3번과 정상인 픽셀 4번 경계에서 전압 차는 18.91 mV이고 픽셀 4번과 5번 경계에서는 1.03 mV가 발생 하였다.

현 광학적 기법을 이용한 LCD 패널의 불량검사 장비 수준에서는 정상과 불량 전압의 차이가 10 mV 이상인 경우 불량 검출이 가능하다. 이러한 현 장비의 검사수준과 불량 픽셀에 의한 인접 픽셀의 간섭 효과를 수치 모사한 결과를 바탕으로 수평으로 5개의 픽셀, 수직으로 3개의 픽셀을 적층한 Fig. 3 과 같은 3차원 정밀 유한요소 해석을 위한 멀티 픽셀 모델을 확립하였다.

수치 모사는 중앙처리장치가 Intel core i7, 3.07 GHz, 메모리 20 Gbyte인 개인용 컴퓨터를 이용하여 상용 전기장 해석 도구인 ElecNet(ver.7.2)을 활용하여 수행되었다[8].

III. 모의시험 결과

본 장에서는 확립된 멀티 픽셀 모델에 대하여 픽셀 내 다양한 불량 조건이 발생 시 나타나는 액정 내에서의 공간 전기장 분포 특성을 3차원 유한요소법을 사용하여 비교/분석하였다.

1. 정상 상태의 공간 전압 분포

2.2절에서 제시한 3차원 모델의 정의 및 해석 조건을 적용

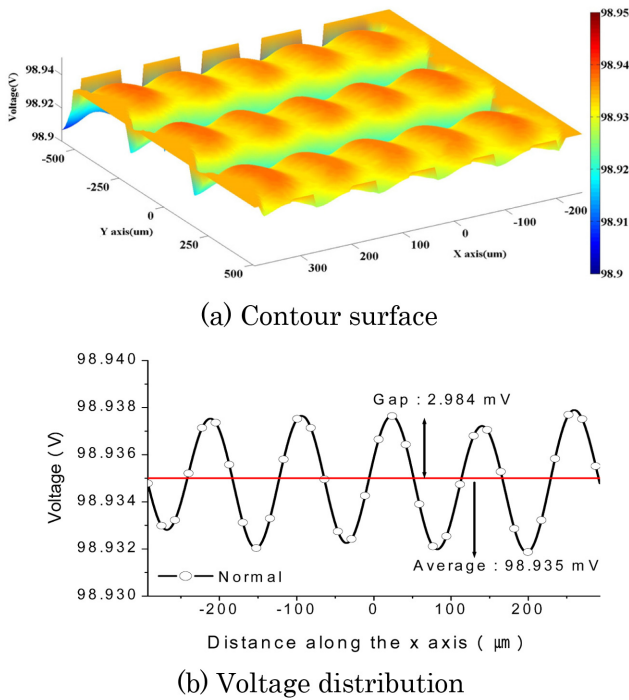


Fig. 4. (Color online) Voltage distribution in normal condition.

하여 수치해석을 수행하였다. 화소 전극 불량이나 핑거 부분 유실에 의한 공간 전압 분포 특성을 분석하기에 앞서 정상 상태인 경우의 공간 전압 분포 특성을 분석하였다. 수치 모사를 위해 2,849,588개의 사면체 요소가 생성되었으며, 해석 시간은 11분 30초 정도 소요되었다. 각 전극의 전압에 의하여 형성되는 액정 하단에서의 전압 분포는 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(b)는 Fig. 3에 표시된 측정라인(measuring line)을 따라 액정 하단에서 측정한 값이다. 이 때 측정라인에서의, 공간 전압의 평균은 약 98.935 V이고 최대 전압과 평균 전압의 차이(Gap)은 약 2.994 mV이다.

공간 전압의 분포는 주기적으로 변화하며 정현 곡선 형태로 나타나는데, 이는 수평방향으로 +7 V가 인가되는 화소 전극과 -5 V가 인가되는 공통 전극이 교대로 적층되어 있기 때문이다.

2. 화소 전극 불량을 고려한 공간 전압 분포

화소 전극 불량 개수에 따른 공간 전압 분포를 분석하기 위하여, 화소 전극 불량 1개, 2개, 4개인 경우, 중앙 픽셀 8번에 대해 전극 불량 조건을 모의하였다. 불량 화소 전극 개수에 따른 액정 하단에서의 전압 분포를 Fig. 5에 제시하였다. 화소 전극에 불량이 발생한 경우, 불량인 영역의 전압이 정상인 경우와 비교해서 상대적으로 낮게 나타나고 화소 전극 불량 개수가 증가할수록 공간전압 왜곡이 증가한다.

불량 화소 전극 개수에 따른 영향 이외에, 불량 화소 전극

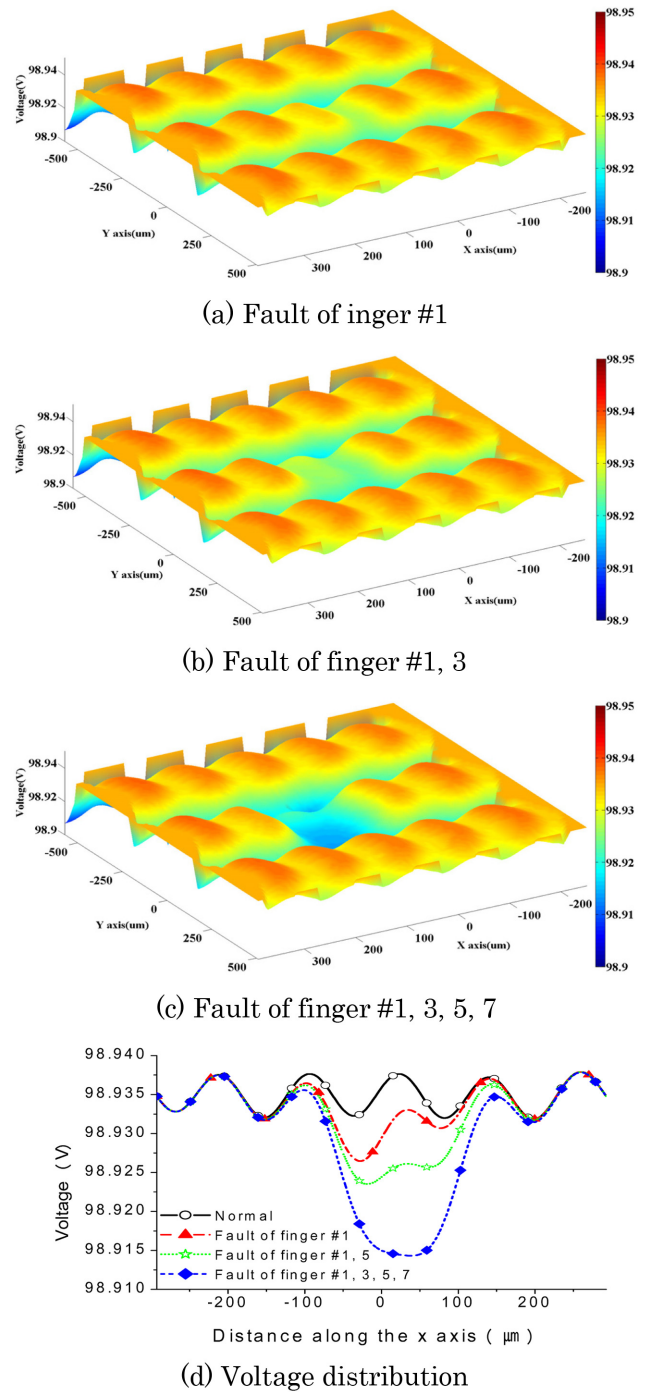


Fig. 5. (Color online) Voltage distribution due to the fault electrodes.

의 위치에 따른 공간 전압 분포의 변화를 확인하기 위해서 중앙에 위치한 픽셀 8번의 핑거7번에 대해서 불량을 Fig. 6에서 추가로 모의하였다. 화소 전극 불량 위치에 따라서 Fig. 6(b)와 같이 공간 전압 왜곡의 차이가 확연히 나타남을 확인하였다.

불량 화소 전극 개수에 따른 정상과 불량 조건 사이의 전압 최대 차이는 Table III과 같다. 정상과 불량 전압 최대

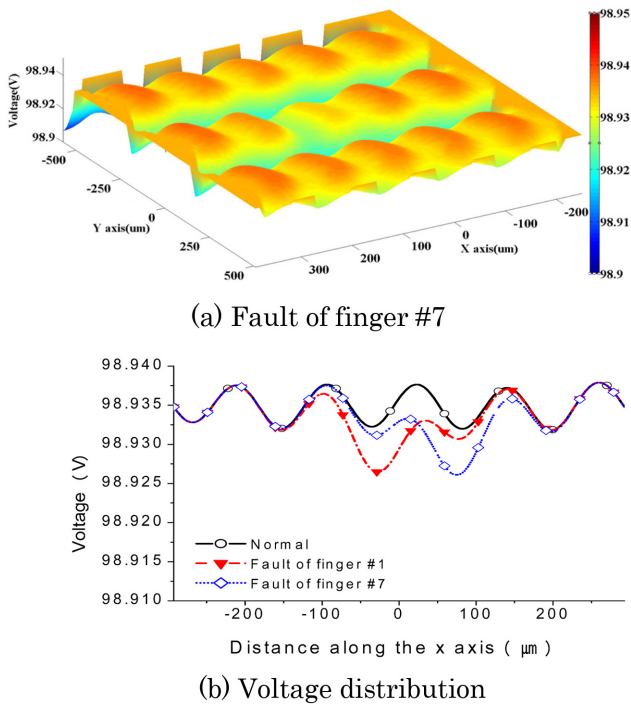


Fig. 6. (Color online) Voltage distribution due to the location of fault electrode.

Table III. Voltage differences when increasing the number of fault electrodes.

불량 화소 전극 개수	1개	2개	4개
정상 · 불량 전압 최대 차이(mV)	6.872	11.915	23.270

차이는 불량 화소 전극이 1개인 경우 6.872 mV, 2개인 경우 11.915 mV이고, 4개인 경우 23.270 mV이다. 모의시험 결과에서는 핑거가 1개 불량인 경우라도 위치에 상관없이 검출이 가능하다. 그러나 현재 사용되는 광학적 불량 검출 장비 수준으로는 정상과 불량 전압의 최대 차이가 10 mV 이상에서만 불량 검출이 가능하다. 따라서 현 검출 장비로는 화소 전극 불량 개수가 2개 이상인 경우부터 검출이 가능하다는 사실을 유추할 수 있다.

3. 핑거 부분 유실을 고려한 공간 전압 분포

핑거 부분 유실에 의한 공간 전압 분포 특성을 고찰하기 위하여, 중앙에 위치한 픽셀 8번의 핑거 1, 2, 3번에 대해 전체 길이의 5/6인 지점에서 유실을 모의하였다. Fig. 7(a)는 정상인 경우의 전극 형상을, Fig. 7(b)는 핑거 1, 2, 3번이 유실된 경우를 나타낸다. 이 경우 핑거 2번은 전극 유실과 함께 단선이 동시에 발생한 상태로, 공통전극의 정상전압이 인가되지 않는다.

부분 유실을 고려한 경우의 전압 분포는 Fig. 8과 같다.

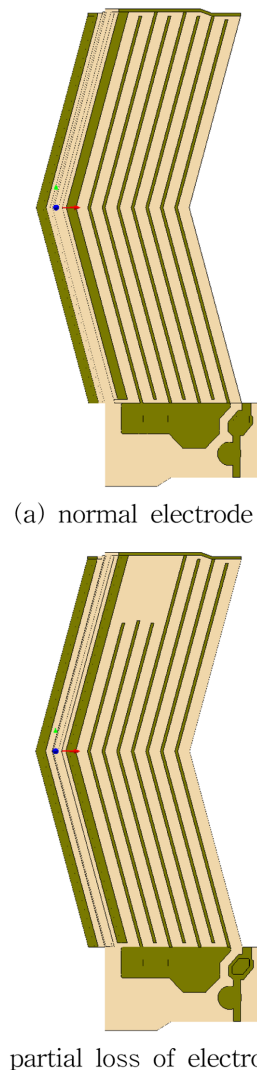
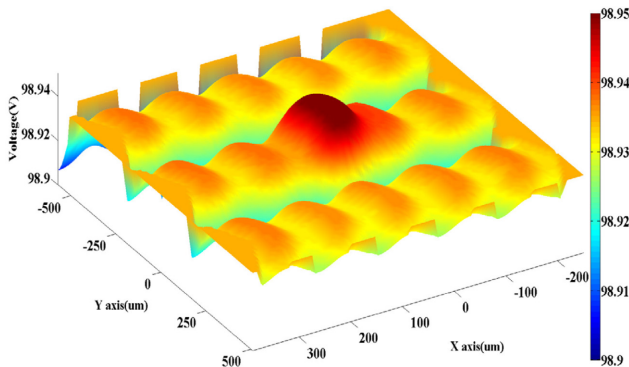


Fig. 7. (Color online) Configuration between normal and partial loss of electrodes.

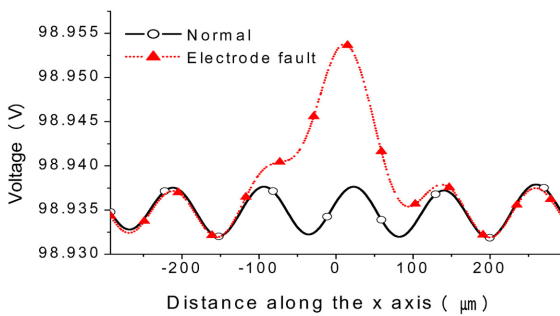
Fig. 8(b)는 Fig. 4의 측정라인의 액정 하단에서의 공간 전압 파형이다. 공간 전압이 전극 유실 부분에서 정상인 경우에 비해 18.51 mV만큼 높게 나타난다. 이는 화소 전극과 더불어 공통 전극을 모의하는 핑거 2번의 일부가 유실되어 단선이 발생했기 때문이다. 핑거 부분 유실인 경우에는 정상과 유실의 전압 최대 차이가 18.51 mV로서, 현 광학적 장비의 검출 가능 수준인 10 mV를 초과하므로 불량 검출이 가능하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 복잡한 전극 구조를 갖는 TFT-LCD 패널의 픽셀 사이의 간섭효과를 고려하여 액정에서의 공간 전기장 분포 특성을 모사할 수 있는 멀티 픽셀 기반의 3차원 유한요소 수치해석 모델을 구축하였다. 이를 토대로 패널 내 다양한 전



(a) Contour surface



(b) Voltage distribution

Fig. 8. (Color online) Voltage distribution due to the partial loss of electrodes.

극 불량 조건에 대한 액정에서의 공간 전기장 분포 특성을 정상 상태와 비교 분석 하였다. 또한 이러한 수치모사 결과와 기존 광학적 패널 검사장비의 불량검출 결과를 간접 비교함으로써 제안한 3차원 유한요소 수치모델의 타당성을 검증

하였다. 논문에서 도출된 연구결과는 향후 현 광학적 패널 불량 검사 장비의 검사 성능향개 검토 및 불량 검출 최적조건 도출에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0029721).

참고문헌

- [1] J. Jang, S. Lim, and M. Oh, Proceedings of the IEEE **90**, 501 (2002).
- [2] L.-F. Chen, C.-T. Su, and M.-H. Chen, Electronics Packaging Manufacturing **32**, 1 (2009).
- [3] M. Kitamura, Society for Information Display, 1995 Digest of Technical Papers, 540 (1995).
- [4] Fabrizio Di Pasquale, F. Anibal Fernandez, Sally E. Day, and J. Brian Davies, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **2**, 128 (1996).
- [5] Ruibo Lu, Shin-Tson Wu, Zhibing Ge, Qi Hong, and Thomas X. Wu, Journal of Display Technology **1**, 207 (2005).
- [6] Zhibing Ge, Thomas X. Wu, Ruibo Lu, Xinyu Zhu, Qi Hong, and Shin-Tson Wu, Journal of Display Technology **1**, 194 (2005).
- [7] 전만수, 이형일, 연속체역학에서 유한요소법까지, 피어슨 에듀케이션 코리아, 서울 (2002), pp. 419~437.
- [8] ElecNet 7 User's Guide, Infolytica Corporation, Quebec Canada (2010).

Characteristic Analysis of Spacial Electric Field Distribution in Liquid Crystal of TFT-LCD Panel

Sang-Sik Jung, Nam-Kyung Kim, and Dong-Hun Kim*

Department of Electrical Eng., Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Min-Ho Noh and Kyu-Sang Lee

LG Display Co., Paju-si, Gyeonggi-do, 413-779, Korea

(Received 26 March 2012, Received in final form 11 May 2012, Accepted 14 May 2012)

In this paper, a three-dimensional finite element model based on the multi-pixel was constructed to accurately predict electric field distributions including an interference phenomenon between adjacent pixels in the liquid crystal of a complicated TFT-LCD panel. Utilizing the elaborate numerical model, the characteristics of spatial electric field distributions depending on various fault-electrode conditions are thoroughly examined on the basis of the field distribution of a normal electrode condition. The validity of the proposed model is proved by comparing the simulation results with those of the existing optical inspection equipments.

Keywords : electric field, fault detection, finite element method, TFT-LCD