

Electro-wetting Display의 오일의 움직임 제어 방법에 대한 연구

Study on Controlling Oil Movement in Electro-wetting Display

김연식¹, 김수영¹, 김태현¹, 송은경¹, Palanivelu Sureshkumar¹, 이승희^{1,a}

(Youn Sik Kim¹, Su Young Kim¹, Tae Hyun Kim¹, Eun Gyoung Song¹, Palanivelu Sureshkumar¹, and Seung Hee Lee^{1,a})

Abstract

Electro-wetting display (EWD) that displays information by controlling movement of fluid is one of the strong candidates for electronic paper display (EPD). In EWD cell, the movement of oil which locates between hydrophobic insulation layer and deionized water is rather random, which makes it difficult to realize gray scale, fast response time, and good color characteristics. In this paper, we investigated how to control the oil movement in specific one direction by surface treatment and patterned electrodes. From these experiments, we could control oil movement in a desired direction.

Key Words : Electro-wetting display, Oil movement, Surface treatment, Patterned electrodes

1. 서론

최근 유비쿼터스 환경을 위하여 디스플레이가 추구해야 할 연구방향으로 기존의 무겁고 공간을 차지하는 기존의 디바이스를 대체할 수 있는 디스플레이가 활발히 연구되고 있다. 이러한 연구방향으로 인해 FPD(Flat Panel Display)를 좀 더 경량, 박형으로 만들기 위한 연구가 경쟁적으로 이루어지고 있는 가운데 전자종이 디스플레이는 차세대 디스플레이로 책이나 신문등 종이로 된 매체를 대체하기 위한 디스플레이 소자로써 최근에 활발히 연구되고 있다. 전자종이 디스플레이로는 극성 입자가 전기장에 의해 움직이는 것을 이용한 전기영동형 디스플레이와[1-3] 각각 다른 전하와 색깔을 띤 입자를 에어로졸 상태로 기판 사이에 주입하고 전기장에 따라 이동시키는 건식이동식 디스플레이[4]와 유체를 이용하는 EWD[5]가 대표적이다. Electro-wetting 현상은 몇몇 분야에 응용되었는

데 미량의 유체를 수평으로 이동시키거나 액체방울의 곡률반경을 변화시켜 초점이 전압에 의해 변하는 유체렌즈 등이 실례이다[6-8]. 일반적으로 입자를 이용한 전자종이들은 반응속도가 느려 동영상 구현하는데 어려움이 있고 충전연색을 표현하는데도 어려움을 있다. 하지만 기존의 인쇄매체와 비교해서 나쁘지 않은 가독성과 정지화상의 경우 사진과 같은 고화질을 보여줄 정도에 이르렀다.

EWD는 다른 전자 종이 디스플레이에서 구현하기 어려운 빠른 응답성과 색 표현이 쉽게 가능한 디스플레이로 다른 전자종이 디스플레이가 가지지 못한 장점을 가지고 있다. EWD의 구동원리는 유체의 접촉각이 전압이 인가되면서 낮아지는 현상을 이용한 것으로 전압이 인가되면 물이 오일을 한쪽 방향으로 밀어내어 빛을 투과시키거나 반사시키고 다시 전압을 제거해주면 오일이 다시 제자리로 돌아가 빛을 흡수하여 명암을 표현해주는 방식이다. 일반적인 EWD는 오일이 물에 의해 밀려나게 되어 픽셀의 한쪽으로 이동될 때 방향이 정해지지 않고 불규칙적으로 오일이 수축되어 균일한 화질을 표현하는데 어려운 단점을 지니고 있었다. 이것을 개선하기 위해서 본 연구에서는 LCD 공정에서 액정을 한 쪽 방향으로 배향 시켜주는 러빙 방법[9]과 다양한 모양으로 부분 식각된 전극

1. 전북대학교 고분자 BIN 융합연구 사업팀, 신소재개발연구센터

(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)

a. Corresponding Author : lsh1@chonbuk.ac.kr

접수일자 : 2007. 1. 3

1차 심사 : 2007. 1. 22

심사완료 : 2007. 1. 23

[10]을 이용하여 전해질의 움직임을 제어하여 그 것으로 오일이 균일하게 수축되도록 하는 것에 초점을 두고 본 연구를 진행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 EWD의 스위칭 기본 원리

실제의 EWD의 유체 움직임을 가리키는 수식은 다음과 같다[11].

$$\cos\theta(V) = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon_0\epsilon_r}{2\gamma_{ow}d} V^2$$

θ 와 θ_0 는 전압이 인가된 후와 인가되기 전의 접촉각, ϵ_r 은 절연막의 유전상수, d 는 절연체의 두께, V 는 인가전압, γ_{ow} 는 오일과 물의 유체간 계면 장력을 나타낸다. 위의 수식에서 절연체의 유전율과 두께 그리고 유체간 계면 장력이 EWD의 구동에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

EWD의 동작원리를 자세히 살펴보면 EWD의 off시에는 물, 오일, 소수성 절연체의 순서대로 층을 이루어서 안정한 상태를 유지하고 있으며 전압이 인가되면 물과 소수성 절연체와의 계면장력이 줄어들어, 에너지 상태가 불안정해져 결국 물이 오일을 밀어내어 on 상태가 된다. 이 상태에서 전원이 사라지면, 절연체와 물 사이에 존재하던 이온이 물 전체로 퍼지면서 사라지고 그 결과 계면 에너지 상태는 초기 상태로 돌아간다.

2.2 EWD의 오일 제어의 어려움

EWD셀의 오일 움직임 제어의 어려움을 확인하기 위해 본 연구에서는 기존의 제안된 방식으로 EWD셀을 제작하였다. 그림 1의 EWD셀은 상하판 전체에 전극이 존재하고 절연막으로는 대표적으로 쓰이는 소수성 절연막인 테플론 계열인 AF1600 (dupont)을 사용하였다. 오일은 silicone oil(Sigma-Aldrich)과 oil blue N(Sigma-Aldrich)을 섞은 청색오일을 사용하였고 물은 탈이온수를 사용하였다. 방과 방사이의 고분자 벽은 점도가 520cP인 포지티브 포토레지스트(AZ electronic materials(Korea) Ltd.)를 사용하여 벽 높이를 17 μm 로 세웠다. 전체 상하판 셀갭은 110 μm 이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 전압인가 전에는 청색오일이 셀 전체에 고르게 퍼져 있다가 전압인가 시 한쪽 구석으로 오일이 움직인 것을 볼 수 있다. 이러한 단위셀 결과를 통해 종래의 EWD 셀의 접근 방식으로는 각 화소마다 오일이 움직임이 불규칙한 것을 알 수 있었다.

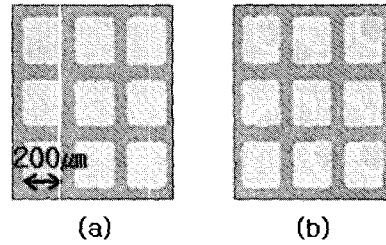


그림 1. EWD 단위셀의 (a) 전압인가 전과 (b) 전압인가 후의 오일의 움직임을 보여주는 사진.

Fig. 1. Operating picture of electro-wetting display test cell that use no patterned ITO: (a) before and (b) after the apply voltage.

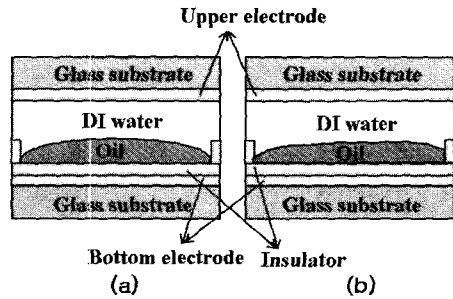


그림 2. 탈이온수와 오일의 접촉 단면도: (a) 이상적인 경우 및 (b) 실제 경우.

Fig. 2. Cross-sectional view of contact between deionized water and oil: (a) ideal state, and (b) real state.

이렇게 오일의 움직임이 불규칙한 이유를 분석해 보면 다음과 같이 설명할 수 있다. 그림 2에서 보면 각 방을 채우고 있는 탈이온수, 오일, 절연막의 접촉 형태가 동일한 형태를 가지고 있지 않기 때문에 오일을 밀어내는 양상이 각 픽셀마다 달라질 수 있음을 알 수 있다.

3. EWD의 오일 제어 셀 제작 및 관찰

3.1 EWD의 오일 제어 방안

앞에서 설명한 EWD의 오일 제어의 어려움을 해결하기 위해서는 오일이 수축하는 방향을 일정하게 정해주어야 한다. 본 연구에서는 이러한 목적을

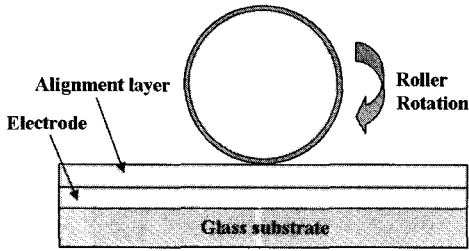


그림 3. 배향막 표면 처리를 러빙 방법.
Fig. 3. Rubbing method for surface treatment of alignment layer.

달성하기 위해 두 가지 접근방법을 연구하였다. 첫 번째로는 절연막 표면에 나노 또는 마이크로 크기의 비등방적 홈을 주어 전압 인가시 미세한 표면 에너지 차이로 인해 홈 방향으로 오일이 수축되게 하는 것이고 둘째는 한 방 즉 한 개의 화소 내에 있는 전극의 일부를 식각해 전압 인가시 전극이 있는 영역과 없는 영역의 에너지 차이로 인해 전극이 없는 영역으로 오일을 밀어내는 원리이다.

3.2 표면 처리를 통한 오일 제어 방법

러빙법은 액정디스플레이에서 쓰이는 대표적인 액정 배향 방법이다. 고분자막을 천으로 문지르게 되면 표면에 스크래치가 생기게 되고 고분자 사슬들이 한쪽 방향으로 늘어지게 되는데, 이것은 물리, 화학적 이방성을 띄게 되는 원인이 된다. 절연막이 물리, 화학적 이방성을 가지면 계면 장력에도 영향을 줄 것으로 예상이 된다.

그림 3은 러빙 공정을 나타낸 그림이다. 앞의 실험에서 언급된 AF1600 절연막은 고가로 EWD를 대량 생산시 사용하기는 불리한 점이 있다. 이러한 재료를 대체하기 위해 비저항이 높은 다른 절연막의 평가가 필요하다. 액정디스플레이에서 쓰이고 있는 고분자 배향막은 일반적으로 비저항이 높아 AL60101(Japan Synthetic Rubber)을 평가하였다. 스핀 코팅 방법을 이용하여 0.5 μm 두께로 코팅한 후 러빙을 10회 시켜주고 유체의 접촉각에 대한 러빙의 영향을 측정하기 위하여 Tantec사의 접촉각 측정기로 측정하였다. 측정 방법은 러빙 처리한 기판 위에 탈이온수를 떨어뜨린 후 러빙 방향의 수평한 방향과 수직한 방향으로 측정하였다.

탈이온수의 접촉각을 측정한 결과 러빙 처리가 되지 않은 기판에서의 러빙 방향에 따른 접촉각은 수평방향은 69.1°, 수직 방향은 68.8°이고, 러빙 처리한 기판 위에서 탈이온수의 접촉각을 측정할 결

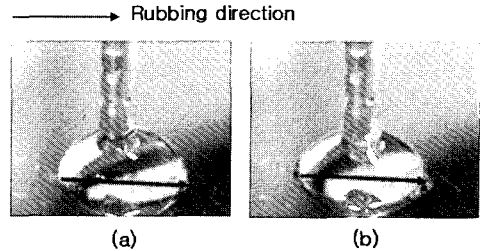


그림 4. 러빙 처리한 기판 위에서의 전압 인가에 따른 탈이온수의 접촉각 변화: (a) 전압 인가 전 및 (b) 전압 인가 후.
Fig. 4. Contact angle variation of deionized water on substrate which has rubbing treatment: (a) before and (b) after the applied voltage.

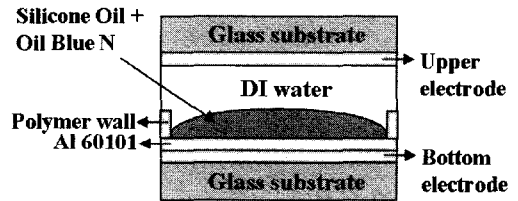


그림 5. 러빙 처리가 된 EWD 단위셀의 구조.
Fig. 5. Configuration of EWD test cell with rubbing treatment.

과 수평 방향은 70.5°, 수직 방향은 64.1°로서 러빙을 하지 않은 기판에서의 접촉각의 차이는 0.3°, 러빙 처리한 기판에서의 접촉각의 차이는 6.4°로서 러빙 처리한 기판에서의 접촉각의 차이가 크게 나타났다. 이 결과로부터 탈이온수와 러빙 처리한 기판 사이에 전압을 인가하면 이와 같은 계면 장력의 이방성이 영향을 미칠 것으로 판단하여 전압을 인가하는 실험을 진행하였다. 실험 결과는 그림 4와 같으며 러빙 방향으로 탈이온수가 길게 퍼진 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 러빙 처리한 기판을 사용한 단위셀을 그림 5와 같이 제작하였다. 제작된 단위셀의 구조는 기존의 제안된 방식과 같으나 러빙 처리된 하부 기판을 사용하였다. 이와 같은 구조로 단위셀을 제작하여 오일 제어에 러빙의 영향을 살펴보았다. 제작된 셀의 관찰 결과 오일 움직임이 한 방향으로 발생하지는 않았고 구동 자체가 잘 구현되지 않았다. 이러한 이유로는 AL60101

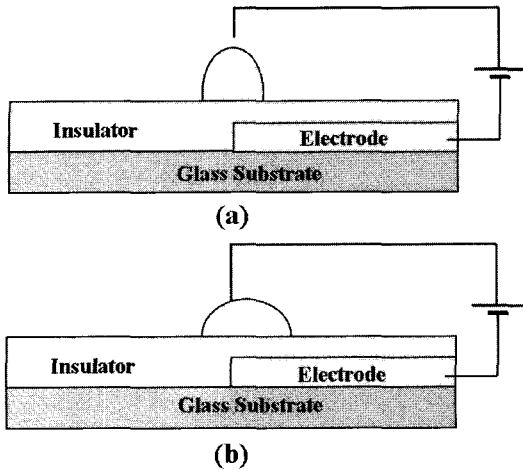


그림 6. 부분 식각된 전극 위에서 유체의 이동:
(a) 전압 인가 전 및 (b) 전압 인가 후.
Fig. 6. Liquid movement on patterned electrode:
(a) before and (b) after the applied voltage.

의 경우 초기 접촉각이 90도 이하로 AF1600의 110도에 비해 너무 낮았고 미세한 표면 차이는 오일과 탈이온수가 이루는 접촉면의 차이에 비해 영향이 적은 것으로 판단될 수 있다. 효과를 재확인하기 위해서 AF1600를 코팅한 후 러빙 처리를 시도하였으나 접착력이 부족하여 박막이 벗겨지는 경우가 발생하였다.

3.3 전극의 부분 식각을 통한 오일 제어 방법

그림 6은 부분 전극 식각을 이용한 유체이동을 나타낸 그림이다. 유체를 전극이 있는 곳과 전극이 식각되어서 없는 부분의 경계 부분에 위치시키고 전압을 가해주게 되면 유체는 전극이 있는 부분으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이런 결과는 계면을 경계로 이온들이 모여들기 때문에 계면장력이 줄어드는 것과 전기장의 분포가 유체의 위치에 따라 달라지기 때문인 것으로 분석된다.

이러한 물리적 현상의 이해를 바탕으로 그림 7과 같이 두 종류의 형태로 전극을 식각하였다. 한쪽 구석을 식각시킨 경우 유체의 이동거리가 최대한 방의 대각선 거리가 될 수 있는데 반해 네 구석을 식각 시킨 경우 최대 유체의 이동거리가 대각선 방향의 거리의 반으로 줄어 응답 시간 및 오일제어에 효과적일 것으로 예상되어 다양한 모양으로 식각된 전극이 오일 제어에 어떤 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 제작 되었다.

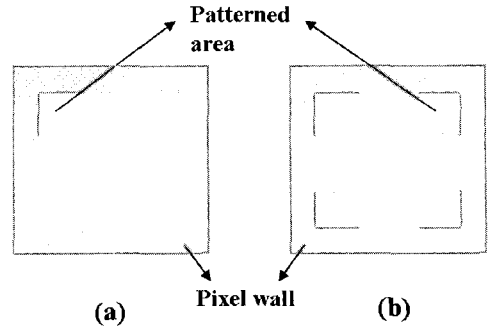


그림 7. 다양한 모양으로 부분 식각된 전극과 고분자 벽의 구조: (a) 한 구석 식각 및 (b) 네 구석 식각.
Fig. 7. Configuration of various patterned electrode and polymer wall: (a) patterned electrode at one side corner and (b) patterned electrode at four corners.

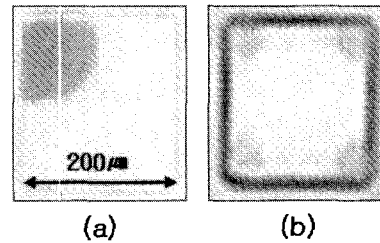


그림 8. 부분 식각된 전극을 사용한 단위셀의 구조: (a) 한 구석이 부분 식각된 전극 과 (b) 네 구석이 부분 식각된 전극.
Fig. 8. Operation of EWD test cells using patterned electrode: (a) partial etched electrode at one corner, and (b) partial etched electrode at four corners.

부분 식각된 전극이 EWD에서 오일의 움직임에 영향을 주는지 측정하기 위하여 부분 식각된 전극을 이용해서 단위셀들을 만든 후 DC전압을 0 V에서부터 1 V씩 전압을 인가하면서 셀을 관찰하였다.

셀 조건은 전극 식각 부분을 제외하면 그림 5의 구조와 같다. 한 구석과 네 구석이 부분 식각된 전극으로 만들어진 단위셀을 제작한 결과 그림 8에서 보여주는 것과 같이 약 60 V에서 오일이 전극이 부분 식각된 곳으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 전극이 있는 부분으로 이온이 모여들어서 계면 장력이 줄어들게 되어서 전극이 있는 부분에서부터 탈이온수가 계면 부분으로 침투하게 되어

서 오일이 전극이 식각된 곳으로 이동하는 것으로 생각되어 진다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 EWD에서 오일 이동 제어의 어려움을 해결하기 위해서 러빙 방법과 부분 전극 식각 방법을 이용한 실험을 하였다. 그 결과 접촉각이 90도 이하인 절연막에 러빙 방법을 사용하여 기판 위에서 접촉각을 측정할 결과 유체의 접촉각이 이방성을 주어지기는 하였지만 단위셀 결과에서는 오일이 움직임이 제어되지는 않았다. 접촉각이 큰 절연막에 추가적인 연구를 더 진행한다면 EWD 뿐만 아니라 electro-wetting 현상이 이용되는 다른 소자에서도 응용 가능할 것이라고 생각된다. 또한 부분 전극 식각 방법을 사용하여 단위셀을 만든 결과 전극이 식각된 부분으로 오일이 이동하는 것을 볼 수 있었다. 이 결과로서 부분 전극 식각 방법이 EWD에서 오일 제어에 효과가 있는 것을 확인하였고 부분 전극 식각 모양에 따른 구동 전압과 응답 속도 등 전기광학 특성의 변화가 생길 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 좀 더 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 KRF-2005-202-D00233.

참고 문헌

[1] C. A. Kim, M. J. Joung, D. G. Yu, S. D. Ahn, S.-Y. Kang, K. S. Suh, and C. H. Kim, "Multi-color electrophoretic display technique through the microcapsules", IDW'03, p. 1633, 2003.

[2] T. Whitesides, M. Walls, R. Paolini, S. Sohn, H. Gates, M. McCreary, and J. Jacobson "Towards video-rate microencapsulated dual-particle electrophoretic displays", SID'04 Digest, p. 133, 2004.

[3] J. Hou, Y. Chen, Y.-S. Li, X. Weng, H. Li, and C. Pereira, "Reliability and performance of flexible electrophoretic displays by roll-to-roll manufacturing processes", SID'04 Digest, p. 1066, 2004.

[4] R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda, N. Nihei, and R. Sakurai, "Ultra thin and flexible paper-like display using QR-LPD[®] technology", SID'04 Digest, p. 136, 2004.

[5] R. A. Hayes and B. J. Feenstra, "Video-speed electronic paper based on electro-wetting", Nature, Vol. 425, p. 383, 2003.

[6] Wim J. J. Welters and Lambertus G. J. Fokink, "Fast electrically switchable capillary effects", Langmuir, Vol. 14, No. 7, p. 1535, 1998.

[7] S. Kuiper and B. H. W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras", Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 7, p. 1128, 2004.

[8] S. K. Cho, H. J. Moon, and C. J. Kim, "Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation for digital microfluidic circuits", J. Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No. 1, p. 70, 2003.

[9] Y. B. Kim, H. Olin, S. Y. Park, J. W. Choi, L. Komitov, M. Matuszczyk, and S. T. Largewall, "Rubbed polyimide films studied by scanning force microscopy", Appl. Phys. Lett., Vol. 66, No. 17, p. 2218, 1995.

[10] B. J. Feenstra, R. A. Hayes, I. G. J. Camps, L. M. Hage, T. Roques-Carnes, L. J. M. Schlangen, A. R. Franklin, and A. Valdes, "Video-speed response in a reflective electrowetting display", IDW'03, p. 1633, 2003.

[11] R. A. Hayes, B. J. Feenstra, I. G. J. Campus, L. M. Hage, T. Roques-Carnes, and L. J. M. Schlangen, "A high brightness colour 160 ppi reflective display technology based on electrowetting", SID'04 Digest, p. 1674, 2004.