

## 3전극형 전자종이 디스플레이에서 하부전극 간격이 패널의 광특성에 미치는 영향

이상일<sup>1</sup>, 홍연찬<sup>1</sup>, 김영조<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 인천대학교 전자공학과

<sup>2</sup> 청운대학교 전자공학과

### Effect of Electrode Space on Optical Property in Three-Electrode Type E-paper Display

Sang-il Lee<sup>1</sup>, Youn-Chan Hong<sup>1</sup>, and Young-cho Kim<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Electronic Engineering Incheon national University, Incheon 22012, Korea

<sup>2</sup> Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 22100, Korea

(Received January 18, 2016; Revised February 11, 2016; Accepted March 17, 2016)

**Abstract:** A three-electrode type reflective display (electronic paper) is designed to apply an independent electric field to each three electrodes of the cell including two electric-type of particles and electrically neutral color fluid, so single color realization is possible. In particular, the movement of particles and optical properties are decided by the electric field between two electrodes on the lower substrate. So, the effect of electric field by the distance between two electrodes on the lower substrate is studied with electrode spacing with 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , and 25  $\mu\text{m}$ . By our experimentation, the driving voltage induces more reliable movement of charged particles and the optical properties as compared with the threshold voltage. We ascertain the single color realization and non-inverted particle separation is possible. So the more desirable optical properties are observed in case of the short electrode like 10  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** Three-electrode type, Single color, Pixelation, Electronic ink, Electrophoresis

#### 1. 서 론

반사형 디스플레이로서 전자종이는 저전력소비, 높은 대조비, 쌍안정성, 플렉서블화 구현에 가장 적합한 디스플레이 소자이다. 전자종이는 신문, 잡지, 책 등을

대체할 수 있고 실시간 광고판 등 게시판용으로도 구현이 가능하며 발광형 디스플레이와는 달리 외부의 광원을 반사하여 이미지를 표시하기 때문에 외부의 광량이 매우 큰 옥외에서 용이하게 사용할 수 있다는 장점을 가진다 [1,2].

전자종이는 크게 전기영동방식, 트위스트볼 방식, 토너방식, 전기습윤방식, 액정방식 등이 있는데, 특히 서로 다른 극성을 가진 두 종류의 입자에 전계를 형성하여 구동시키는 전기영동방식은 앞서 언급한 쌍안정성, 저전력, 플렉서블화 등 반사형 디스플레이의 장점을 모두

a. Corresponding author; [yckim@chungwoon.ac.kr](mailto:yckim@chungwoon.ac.kr)

가지고 있는 대표적인 방식이다 [3,4]. 대전입자를 유체에 혼합해 만든 전자잉크를 사용하는 전기영동 방식은 유체내에서 서로 다른 극성을 가진 대전입자들이 존재하기 때문에 유체를 사용하지 않는 방식에 비해 비교적 안정된 특징을 가진다 [5,6].

기존의 전기영동형 반사형 디스플레이는 대부분 흑백의 2컬러를 구현하고 있기 때문에 신문이나 책 같은 e-beek 형태로 다양한 컬러를 표현해야 하는 제품으로 상품화하기에는 한계가 있으며, 따라서 지속적으로 컬러화의 필요성이 대두되어왔다 [7,8]. 대부분의 전자종이를 컬러화하는 방법으로 LCD 디스플레이에서 사용하는 컬러필터를 적용하는 방식이 주류를 이루었으나 이는 반사형 디스플레이에 적합하지 않은 방식이다 [9,10]. 내부에 광원을 가지고 있는 LCD 디스플레이에서는 백라이트를 통해 큰 광도의 광원이 컬러필터를 통과하기 때문에 컬러를 표현하는데 바람직하지만, 반사형 디스플레이는 외부광원이 입사하고 그 광원을 입자 표면에서 다시 반사하게 되어 컬러를 표현하기 때문에 컬러필터방식을 사용하게 되면 반사형 디스플레이의 광원인 외부광이 소자에 들어올 때 컬러필터에 의해 외부광의 손실이 발생하고, 소자에 들어온 외부광이 반사되어 나갈 때에도 마찬가지로 손실이 발생한다 [11]. 컬러필터를 적용할 경우 sub-pixel화 방식이기 때문에 3컬러를 표현하기 위해서는 한 개의 셀에 1/3만이 표현하고자 하는 컬러를 표현할 수 있다. 나머지 2/3는 흑색 또는 백색이 표현되기 때문에 한 개의 셀에 단일컬러를 표현할 수 없다. 하지만 3전극형 전자종이 디스플레이는 한 개의 셀에 모두 단일컬러의 구현이 가능한 패널구조이다 [12].

3전극형 전자종이 디스플레이는 상부기판에 전극이 한 개, 하부기판에 전극이 두 개 있어 세 개의 전극에 독립적으로 전압을 인가할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서 완전한 단일컬러 구현이 가능하다. 컬러필터를 사용하지 않기 때문에 광원인 외부광의 광량을 최소의 손실로 반사할 수 있고 컬러를 표현할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 본 연구팀에서 연구한 3전극형 전자종이 디스플레이의 개선점과 3전극형 전자종이 디스플레이 구조에서 소자의 픽셀화 구조에 의한 컬러 표현 시 두 개의 하부기판전극의 간격이 입자운동에 미치는 영향 및 광특성을 알아보려고 한다.

## 2. 실험 방법

3전극형 전자종이 디스플레이는 한 개의 셀에 3가지

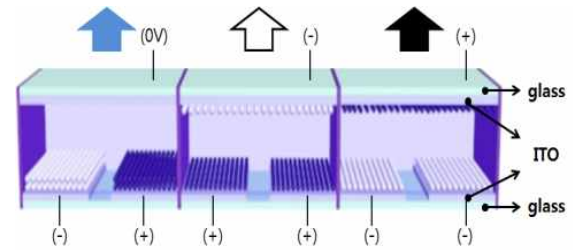
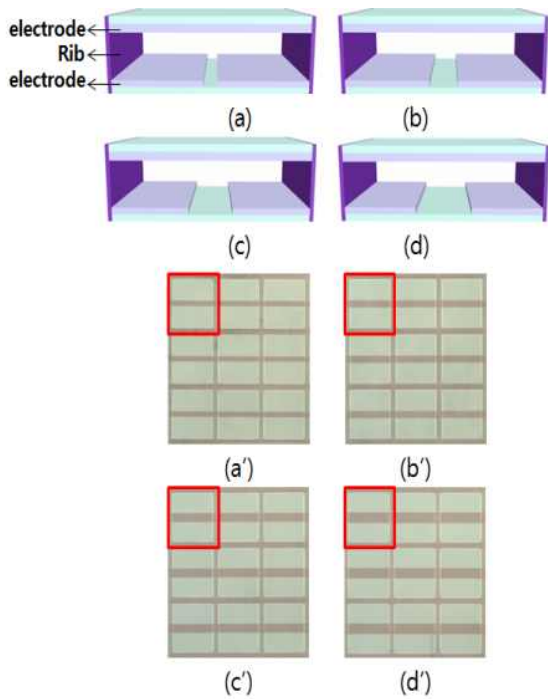


Fig. 1. Driving principle of three-electrode type reflective display.

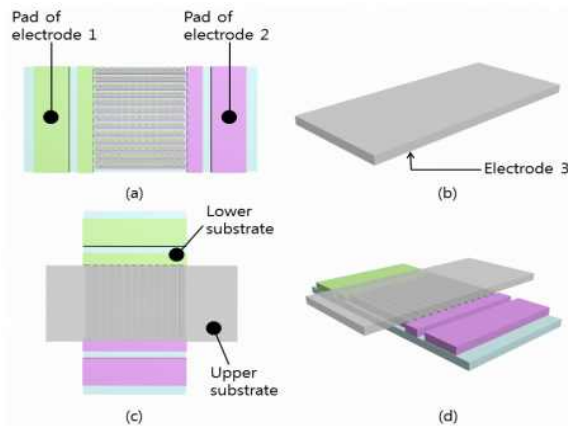
컬러 요소를 가지는 입자와 유체를 주입하여 컬러이미지를 구현하는 pixel화 방식으로 서로 다른 컬러를 가지는 두 종류의 입자와 컬러유체를 혼합하여 컬러전자잉크를 제조하고 패널에 주입하여 컬러이미지를 구현하는 방식이다. 컬러잉크는 Poly(methyl 2-methylpropenoate)로 제작하였고 백색(+), 흑색(-)의 극성을 띤 대전입자와 color 유체를 혼합하였다. 유체의 컬러는 청색이며 점도는 3 cP이고 혼합된 전자잉크의 점도는 10 cP이다.

본 연구에서는 백색, 흑색, 청색으로 실험을 진행하였으나 유체와 입자의 컬러를 다르게 하면 다른 컬러 구현도 가능하다. 한 개의 셀에서 3가지 컬러를 각각 단일컬러로 구현하기 위해서는 세 개의 전극에 전압을 다르게 주어 전계를 다르게 형성해야 한다. 3전극형 전자종이 디스플레이의 구동은 전기영동방식에 기초하며, 하부기판에 두 개의 전극, 상부기판에 한 개의 전극을 가지는 전극구조와 셀 내부에 서로 다른 전하와 컬러를 가지고 있는 제 1 및 제 2컬러입자와 제 3컬러를 띠는 컬러유체를 동시에 주입한 3전극형 구조이다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 하부기판 전극에 각각 (+), (-)전압을 인가하여 제 1 및 제 2컬러를 띠는 입자가 전극에 부착되도록 하면 유체의 컬러를 구현할 수 있다. 그리고 하부기판 전극에 공통으로 (+) 전압을 인가하여 제 1컬러를 부착시키고 상부기판 전극에 (-) 전압을 인가하여 제 2컬러를 부착시키게 되면 제 2컬러를 구현할 수 있다. 제 1컬러를 눈으로 보기 위해서는 위와 같은 방법으로 전압을 서로 바꿔주기만 하면 된다. 이러한 원리로 한 개의 셀에서 하나의 컬러, 즉 단일컬러 구현이 가능하다. 실험에 사용한 패널조건은 셀의 크기  $220 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$ , 셀 높이  $25 \mu\text{m}$ 이다. 그리고 하부기판전극의 간격은  $10 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 서론에서 언급한바와 같이 하부기판전극의 간격이 패널 내부 전계형성 및 입자운동에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 다수개의 하부기판 전극을 가지는



**Fig. 2.** Panel structure of various electrode spaces (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 15  $\mu\text{m}$ , (c) 20  $\mu\text{m}$ , (d) 25  $\mu\text{m}$ , (a')~(d') photomicroscopic image showing each electrode spaces.



**Fig. 3.** Fabrication process of three-electrode type reflective display. (a) 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> electrode of lower substrate (b) 3<sup>rd</sup> electrode of upper substrate (c) panel assembly (d) packaged panel.

패널을 제작하였다. 패널 내부 전계형성에 영향 및 입자운동에도 영향을 미치는지 확인하기 위해서이다.

그림 2에서 보인 바와 같이 하부 전극간의 간격은 그림 2(a)는 10  $\mu\text{m}$ , 그림 2(b)는 15  $\mu\text{m}$ , 그림 2(c)는

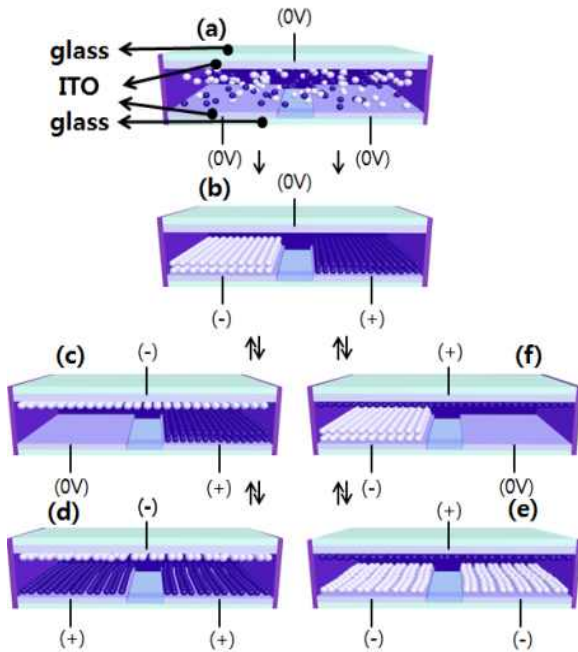
20  $\mu\text{m}$ , 그림 2(d)는 25  $\mu\text{m}$ 이며 (a')~(d')는 하부기판을 현미경으로 관찰한 사진이다. 빨간색 테두리로 표시된 부분은 하부기판의 한 셀을 나타낸다. 하부기판에 전극과 격벽을 형성하기 위해 포토공정을 수행하였으며 소자제작에 사용된 상부기판은 ITO가 코팅된 유리를 사용하였다.

잉크 주입을 제외한 소자의 제작과정은 그림 3에 보였다. 그림 3(a)는 포토공정으로 전극을 형성한 하부기판의 모식도이며 그림 3(b)는 ITO 전극이 코팅되어 있는 상부기판의 모식도다. 하부기판에는 2개의 전극(ITO)을 형성하였고 상부기판에는 1개의 전극을 형성하였다. 그림 3(a)에 보인 하부기판에 3컬러의 잉크를 주입하고 상부기판인 그림 3(b)를 정합하면 그림 3(c)와 같이 두 기판이 정합된다. 정합을 한 후 소자내부의 전자잉크를 외부와 차단하기 위해 실리콘으로 소자패킹 공정을 진행하였다. 전자종이 디스플레이는 습도, 온도에 민감하기 때문에 패키징공정이 완벽하지 않을 경우 소자특성의 신뢰도가 떨어진다. 따라서 실리콘을 사용하여 소자의 테두리를 밀봉하는 방법으로 패키징 하였으나 향후 좀 더 간단하고 기밀성이 우수한 공정이 개발되어야 할 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단일컬러 구현방법

3전극형 전자종이 디스플레이 소자의 완전한 단일컬러 구현을 위해서는 구동순서에 따라 소자를 구동해야 한다. 구동순서에 따라 소자를 구동할 경우 광 특성이 가장 우수하다. 그림 4는 각 전극에 전압을 인가하여 구동순서에 따라서 소자 구동을 보인 모식도이다. 본 연구에서는 하부기판에 제 1컬러와 제 2컬러가 제대로 부착되었는지를 확인하고 상부기판에서는 유체의 컬러인 제 3컬러의 표현여부를 확인하기 위해 투명한 유체를 사용하였다. 투명한 유체를 사용함으로써 하부기판에 각각 제 1컬러와 제 2컬러를 부착하였을 때 상부기판에서도 그 모습을 확인할 수 있다. 그림 4(a)는 초기 잉크를 주입하고 전압을 인가하지 않은 초기상태이다. 그림 4(b)는 두 개의 하부기판전극에 각각 (+), (-) 전압을 인가할 때 입자의 구동을 보인 것이다. 그리고 제 1컬러인 백색 및 제 2컬러인 흑색입자를 분리시켜 하부기판전극 양쪽에 위치하게 하면 상부기판에 유체의 컬러인 제 3컬러 청색 이미지를 표현할 수 있다.

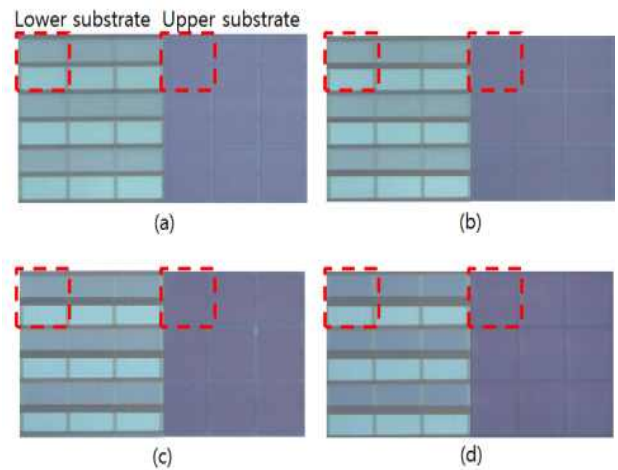


**Fig. 4.** Single color implementation by a driving algorithm of three-electrode type reflectiv display (a) initial state (b) blue image (c) imperfect white (d) white image (e) black image (f) imperfect black image.

그림 4(c)는 백색입자가 부착된 하부기판전극에 전압을 접지시키고 상부기판에 (+)전압을 인가하여 상부기판에 제 1컬러인 백색을 표현할 수 있음을 보인 것이다. 그림 4(c)는 두 개의 하부전극 중 한 개의 하부전극에만 흑색입자가 몰려있기 때문에 그림 4(d)와 같이 나머지 하부기판 전극에도 (-)전압을 인가하여 상부기판에서 완전한 백색을 단일컬러로 표현할 수 있음을 보인 것이다. 그림 4(e) 및 그림 4(f)도 같은 방법으로 상부기판전극에는 (+)전압을, 하부기판전극에는 (-)전압을 인가하여 상부기판에서 흑색을 단일컬러로 표현할 수 있음을 보였다.

**3.2 하부기판전극 간격의 영향**

그림 5는 하부기판 전극 간격에 따라 입자가 동작하기 시작하는 문턱전압에서 구동된 모습을 현미경으로 관찰한 모습이다. 문턱전압을 인가하여 구동하였을 경우 전계는 0.04 V/μm이며 각 그림에서 왼쪽은 하부기판에서의 촬영 모습이고 오른쪽은 상부기판에서 촬영된 모습이다.



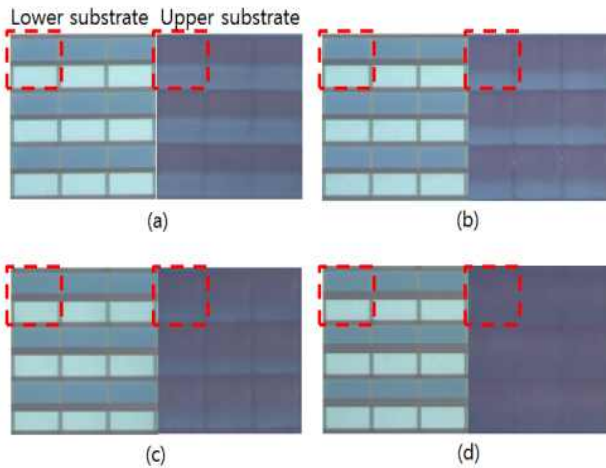
**Fig. 5.** Comparison of the particle motion at  $V_{th}$  according to the lower electrode spacing (At each photomicroscopic image, left side is on lower substrate and right side is on upper substrate) (a) 10 μm (b) 15 μm (c) 20 μm (d) 25 μm.

그림 5(a)부터 그림 5(d)까지의 순서는 하부기판전극의 간격이 각각 10 μm, 15 μm, 20 μm, 25 μm인 패널의 현미경 사진을 보인 것으로, 각각의 그림에서 왼쪽은 하부기판, 오른쪽은 상부기판을 나타낸 모식도이다. 점선으로 표시된 부분은 한 셀을 나타낸다.

그림 5(a)에 보인 바와 같이 하부기판전극에 (+), (-) 전압을 따로 인가하여 제 1컬러 및 제 2컬러가 부착되어 있는 것을 확인할 수 있으며 상부기판에서는 문턱전압에서 아직 움직이지 않는 입자들이 뒤섞여있는 혼합된 잉크의 컬러를 확인할 수 있다.

그림 5(b)에서도 그림 5(a)에서 보이는 바와 같이 상부기판에서 입자들이 혼합된 컬러를 볼 수 있다. 하지만 그림 5(a)에 비해 상대적으로 컬러가 진해지는 것도 확인할 수 있다. 두 경우보다 전극간격이 큰 그림 5(c), 그림 5(d)의 경우에서 점점 혼합된 잉크의 컬러는 짙어지는데 이는 두 하부기판전극의 간격이 멀어질수록 두 개의 하부기판전극에서 생성되는 전계의 영향이 작아지는 것으로 판단된다.

두 개의 하부기판 전극 사이에 발생하는 좌, 우 전계보다 상부기판 전극과 하부기판 전극 사이에 발생하는 상, 하 전계의 영향이 상대적으로 커짐으로써 좌, 우 전계의 영향으로 하부전극에 위치해야 하는 입자들이 상, 하 전계의 영향으로 하부기판에 위치하지 못하고 유체에 떠있는 상태가 된 것으로 보인다.



**Fig. 6.** Comparison of the particle motion at  $V_d$  according to the lower electrode spacing (At each photomicroscopic image, left side is on lower substrate and right side is on upper substrate) (a)  $10 \mu\text{m}$  (b)  $15 \mu\text{m}$  (c)  $20 \mu\text{m}$  (d)  $25 \mu\text{m}$ .

그림 6은 그림 5와 같은 조건의 패널에 대해 포화전압에서의 구동된 모습을 현미경으로 관찰한 모습이다. 포화전압을 인가하였을 경우 소자 내부에 형성되는 전계는  $0.08 \text{ V}/\mu\text{m}$ 이다.

그림 6(a)는 동일조건의 문턱전압을 인가한 그림 5(a)와 비교했을 때 보다 하부기판전극에 제 1컬러 백색 및 제 2컬러 black이 상대적으로 선명한 것을 확인할 수 있고 상부기판에서는 앞서 언급한바와 같이 유체가 투명한 컬러이기 때문에 하부기판전극에 부착되어 있는 제 1컬러 및 제 2컬러를 확인할 수 있다.

그림 5와 같이 점선으로 표시된 부분은 한 개의 셀을 나타내며, 그림 6(b)에서도 상부기판에서 하부기판전극에 부착된 제 1컬러 및 제 2컬러를 확인할 수 있으나 그림 6(a)보다는 선명하지 않은 것을 볼 수 있다. 그림 6(c)는 보다 선명하지 않음을 확인할 수 있으며, 그림 6(d)에서는 상부기판에서 하부기판전극에 부착된 컬러를 확인할 수 없을 정도로 혼합된 잉크의 컬러가 나타난다. 이는 문턱전압을 인가했을 경우와 마찬가지로 하부기판전극의 간격이 멀어질수록 전계의 영향이 작아보다는 상하의 영향을 많이 받는다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

포화전압보다 더 큰 전계를 형성시켰을 때에는 하부기판전극에 부착되어있는 입자와 반대극성의 입자가 접지상태인 상부기판전극에 부착되는 반전현상이 발견되었다.

지금까지 살펴본 바와 같이 본 연구에서는 3전극형 전자종이 디스플레이 패널 구조에서 하부기판전극간격이 입자운동에 영향을 미치며, 하부기판의 전극 간격은 패널의 대조비, 반전현상, 컬러화 개선 등을 위하여 작아야 하나, 패널 제조공정 및 셀 갭 등의 변수를 동시에 고려해야한다.

#### 4. 결론

3전극형 전자종이 디스플레이는 컬러필터를 사용하지 않고 컬러를 표현할 수 있으며, 단일컬러 구현이 가능한 패널 구조이다.

본 연구는 3전극형 전자종이 디스플레이의 단일컬러 구현을 위해 소자를 구동할 경우 두 개의 하부기판전극 사이 간격의 영향을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 실험을 위해 하부기판전극의 간격을  $10 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ 로 제작하였고 제 1컬러 및 제 2컬러는 서로 다른 극성을 가진 입자와 컬러를 띠고있는 유체를 혼합한 전자잉크를 주입하여 소자를 제작하였다. 두 개의 하부기판전극에는 제 1 및 제 2컬러가 부착되도록 각각 다른 극성의 전압을 인가하였고 상부기판은 접지하였다.

그 결과 하부전극간격이 입자운동에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 전극간격이  $10 \mu\text{m}$ 인 경우에는 상부기판과 하부기판 상, 하에 형성되는 전계의 영향보다 두 개의 하부기판전극 사이에 형성되는 전계의 영향이 강해 입자들이 정상적으로 움직이지만 하부기판전극간의 간격이 넓어질수록 좌, 우 전계의 영향보다 상, 하 전계의 영향이 커지기 때문에 입자들이 완전히 제대로 된 위치에 부착되지 않는다.

이는 좌, 우 전계의 영향보다 상, 하 전계의 영향이 상대적으로 커질수록 나타나는 현상으로 하부기판전극에 전압을 인가하여 전극에서 입자를 끌어당기는 인력보다 하부전극 각각에 인가된 전압의 극성과 같은 극성의 전하를 띠는 입자들을 상부기판전극으로 밀어내는 척력이 더 크게 작용하였기 때문에 나타났다고 판단된다.

추후 전자기 해석과 실험을 통해 하부기판전극의 간격이  $10 \mu\text{m}$  미만일 경우와 셀 갭을 다르게 한 패널에 대해서 구동전압 및 패널특성의 개선여부를 알아보기 위한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 129 (2012).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.3.129>]
- [2] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.1.48>]
- [3] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **8**, 1376 (2007).
- [4] K. Y. kwon and Y. C. Kim, *J. Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **9**, 35 (2007).
- [5] I. H. Kim and Y. C. Kim, *J. Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **10**, 1175 (2009).
- [6] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 63 (2008).
- [7] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 669 (2011).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.8.669>]
- [8] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. H. and Y. C. Kim, *SID DIGEST*, **11**, 1523 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.3621149>]
- [9] C. W. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 691 (2010).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.9.691>]
- [10] R. sakurai, S. G. Lee, W. K. Cho, B. G. Ryu and M. B. Song, *IMID DIGEST*, **05**, 423 (2005).
- [11] S. I. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 109 (2015).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.109>]
- [12] Y. K. Shin and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 21 (2015).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.1.21>]