

3전극형 전자종이 디스플레이의 이미지 반전현상에 관한 연구

신용관, 김영조^a

청운대학교 전자공학과

A Study on Image Reversal Phenomenon of Three-Electrode Type Electronic Paper Display

Yong-Kwan Shin and Young-Cho Kim^a

Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 402-803, Korea

(Received July 13, 2015; Revised July 24, 2015; Accepted July 24, 2015)

Abstract: We propose a three-electrode type electronic paper display and its fabrication process to realize single color at the same display panel. We establish a fabrication process with the mixing of electronic ink, loading of this ink, electronic ink assembly, packaging and driving. Also, we discuss an operating principle of this panel and the induced image reversal phenomenon by electric field area of the lower electrodes. This phenomenon is not occurred for the panel having 10 μm electrode space. By this pixelation structure like this three-electronic paper display, a single color realization without color filter is possible and various kind of color is defined by a dye selection for charged particles and electrically neutral fluid.

Keywords: Single color, Color realization, Electronic ink, Three electrode structure

1. 서론

언제 어디서든 정보를 읽거나 전송할 수 있는 유비쿼터스 시대로 접어들면서 많은 종류의 디스플레이 장치와 다양한 기술들이 연구되어 왔다. 그 중 평판 디스플레이의 단계를 넘어서는 차세대 기술인 플렉서블 디스플레이는 유연한 기판을 적용하여 사용자가 원하는 대로 휘거나 구부릴 수 있는 디스플레이이며 유리대신 필름 또는 플라스틱 소재 등을 기반으로 하여 모바일기기, 생활용품 등과 접목할 수 있는 디스플레이이다 [1,2].

플렉서블 디스플레이의 대표적인 예로는 전자종이가

있다. 전자종이는 종이처럼 시간과 장소에 구애받지 않고 쉽게 정보를 기록하거나 저장할 수 있는 장치를 말한다 [3]. 구동형태에 따라 빛의 반사 및 흡수가 일어나며 이미지를 표시하게 되고, 반사된 빛을 눈으로 인식하기 때문에 종이를 볼 때와 마찬가지로 눈의 피로감이 적고, 야외에서 가독성이 뛰어나다. 또한 무게가 가벼워서 휴대가 용이하며 플렉서블 기판적용으로 내구성이 좋으며 저전력 구동이 가능하고 쌍안정성에 의해 추가적인 전력소모 없이 구현한 이미지를 유지할 수 있다는 장점이 있으며, 간단한 구조로 인해 롤투를 공정 적용이 가능하여 대량생산으로 인한 시장 형성을 기대할 수 있다는 장점이 있다 [4,5].

전자종이는 e-book과 같은 형태로 출시 및 상용화되어 시장이 형성되어 있으며, 추후 대형 광고판, 의료기기 등 다른 분야에서 많은 활용도를 보일 것으로 전망된다. 현재 전자종이를 구동하는 방식은 전기영동 방식, 마이크

^a Corresponding author; yckim@chungwoon.ac.kr

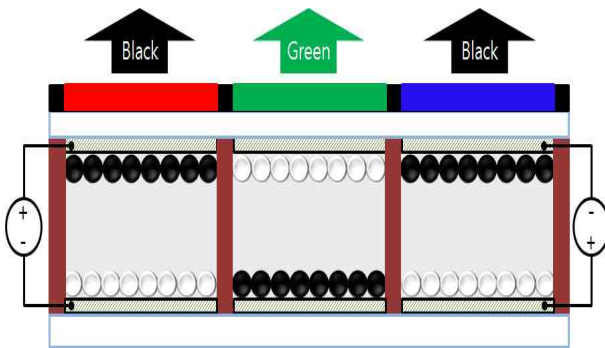


Fig. 1. Driving principle of e-paper display with color filter.

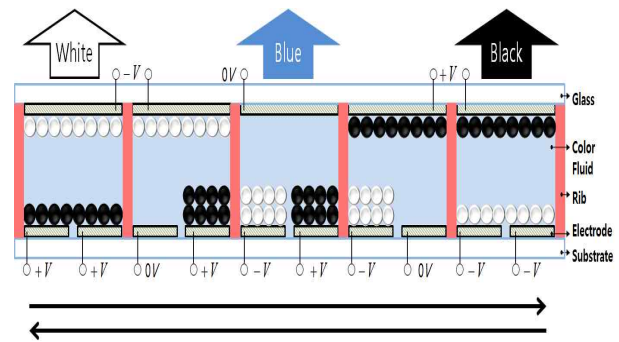


Fig. 2. Driving principle of three-electrode structure.

로캡슐 방식, 전기습윤 방식 등이 있는데 유체와 입자를 이용하여 이미지를 표시하는 전기영동 방식이 대표적이다. 전기영동 방식은 유체 내에 상반된 전하 및 컬러를 띠는 입자들이 존재하고 상부전극과 하부전극에 인가되는 전압에 의해 형성된 전기장에 의해서 입자들이 상하로 움직이며 상판에 위치한 입자의 컬러에 의해 이미지를 표현하는 방식이다 [6,7]. 기존의 전자종이는 투명유체와 흑색 및 백색입자를 이용하여 흑색과 백색 이미지를 표현하였으나 컬러 표현에는 한계가 있기 때문에 다양한 컬러 표현을 위해서는 컬러 필터를 사용해야 한다 [8,9].

그림 1은 컬러 필터를 적용한 기존전자종이의 모식도이다. 하지만 컬러 필터는 반사광을 이용하여 이미지를 표시하는 반사형 디스플레이에서는 서브픽셀화 원리에 의해 컬러 이미지를 구현하는 동작을 수행하기 때문에 단일컬러 구현을 포함한 컬러화 구조로는 적합하지 않으며 광의 투과율 및 반사율 감소, 컬러왜곡 등의 문제가 있다 [10,11].

따라서 본 연구에서는 컬러유체와 흑색과 백색의 입자를 이용하여 컬러 필터를 사용하지 않고 컬러구현을 할 수 있는 픽셀화 구조인 3전극 구조를 제안하며 이 때 나타나는 입자의 반전현상의 원리와 개선 방법을 다루고자 한다. 그 결과로 반사형 디스플레이의 단일컬러 구현의 가능성을 보이고자 한다. 이와 같은 3전극형 구조 및 반전현상에 대한 연구는 타 기관에서 연구된 적이 없음을 밝힌다.

2. 실험 방법

2.1 3전극형 전자종이 디스플레이의 구성

2.1.1 구동 원리

그림 2는 3전극형 전극구조를 가지는 전자종이의 구동 원리를 나타낸 모식도이다. 그림에서 보인 바와 같이 컬러유체 내에 (+)전하를 띠는 백색입자와 (-)전하를 띠는 흑색입자가 혼합된 전자잉크를 이용하여 상부전극과 하부전극에 인가하는 전압에 따른 전기장에 의해 전자종이의 이미지가 결정된다. 상부전극에 $-V$ 를 인가하여 (+)전하를 띠는 백색입자가 상부에 위치하게 되면 외부광원이 상판에 위치한 백색입자에 의해서 반사되며 백색 이미지가 구현되며 이 때 (-)전하를 띠는 흑색입자는 하부전극에 인가된 $+V$ 의 전압에 의해서 하부전극에 위치하게 된다.

또한 하부에 위치한 두 개의 전극에 각각 $+V$ 와 $-V$ 의 전압을 인가하여 전극 각각에 (-)전하를 띠는 흑색과 (+)전하를 띠는 백색입자를 위치시키게 되면 상부에서 관찰하였을 때 하부에 위치한 입자가 보이지 않고, 순수한 유체의 컬러만이 보이게 되어 유체의 색에 해당하는 컬러 이미지가 구현된다. 그리고 백색 이미지 구현과는 반대로 상부전극에 $+V$ 를 인가하여 (-)전하를 띠는 흑색입자가 상부에 위치하게 되면 외부광원이 상판에 위치한 흑색입자에 의해서 흡수되며 흑색 이미지가 구현된다.

이와 같이 컬러 필터를 사용하지 않기 때문에 반사율 감소 및 컬러 왜곡, 광 투과율 감소와 같은 문제점들을 해결할 수 있고 유체를 이용해 단일컬러 구현이 가능한 픽셀화 구조이기 때문에 전자종이를 포함하여 다른 반사형 디스플레이에서도 고려할 컬러구현 방식이다 [12,13]. 하지만 유체의 색을 이용하여 컬러 이미지를 구현할 때 입자의 반전현상이 발생할 수 있는데, 입자반전 현상은 하부전극의 각각에 위치하여야 할 백색과 흑색입자들이 상부전극에서 관찰되는 현상을 말한다. 이는 3전극 구조와 같은 픽셀화 구조의 전자종이 디스플레이가 해결해야 하는 문제이다.

반전현상이 일어나면 순수한 유체색의 컬러 이미지가

아닌 부분적으로 어둡거나 밝은 컬러 이미지가 구현되므로 완벽한 3전극형 구조의 구동을 위해서는 반전현상을 해결할 수 있는 연구가 반드시 선행되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 실험을 통하여 이러한 반전현상의 개선 가능성을 확인하였으며 반사형 디스플레이에 적합한 구조인 3전극형 구조의 단일컬러 구현의 가능성을 보이고자 한다.

2.2 반전현상

3전극형 전자종이의 구동에서 나타나는 반전현상에 대한 모식도 및 현미경사진을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 왼쪽은 반전현상이 발생할 때 패널 내 입자의 움직임 및 전계에 대한 모식도이고, 오른쪽은 패널의 상판과 하판을 관찰한 현미경 사진이다. (-)전하를 띠는 흑색입자가 +V가 인가된 하부의 전극에 위치하고 (+)전하를 띠는 백색입자가 -V가 인가되어 있는 하부의 전극에 위치하는 것이 정상적인 구동모습인데 모식도에서 볼 수 있듯이 하부에 위치하지 않은 나머지 입자들이 상부에 잔류하게 되고 잔류 입자들이 상부에서 관찰된다.

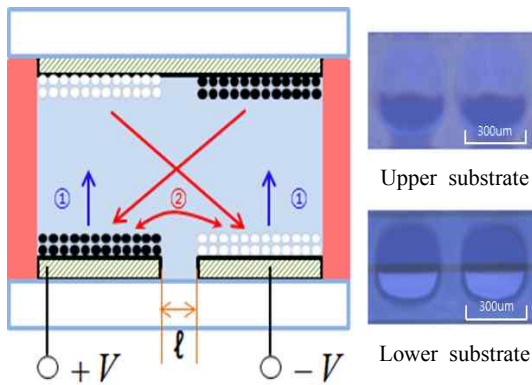


Fig. 3. Reversal phenomenon of 3-electrode structure.

반전현상이 일어날 때 패널의 상판과 하판을 현미경으로 관찰한 사진을 그림 3에 보였다. 하판 사진에서 중앙의 검은 선이 하부전극들 사이의 간격에 해당하며 위쪽이 흑색, 아래쪽이 백색 입자들이 위치하여 이미지를 구현하고 있다. 이 때 상판에서는 입자의 색이 관찰되지 않고 유체의 컬러가 관찰되거나 투명유체의 경우 하판과 같이 위쪽이 흑색이고 아래쪽이 백색인 상태가 구현되어야 한다. 하지만 상판 사진에서 볼 수

있듯이 하판사진과 반대로 위쪽은 백색이고 아래쪽은 흑색의 이미지가 구현되는 것을 확인할 수 있다.

반전현상은 유체 내에 존재하는 (-)전하를 띠는 흑색 입자와 (+)전하를 띠는 백색입자를 인가된 바이어스에 따라 하판전극으로 끌어오는 인력과 2개의 하부전극 사이에서 발생하는 전계에 의한 인력(②)보다 하부전극 각각에 인가된 전압의 극성과 같은 극성의 전하를 띠는 입자들을 상부전극 쪽으로 밀어내는 척력(①)의 영향력이 더 강하기 때문에 발생한다. 반전현상이 일어나게 되면 컬러이미지를 구현할 때 이미지의 반사율 감소 및 색 재현율이 떨어지게 되며 다른 이미지를 구현하기 위한 입자의 움직임이 불안정해지며 결과적으로 패널의 수명 단축 및 단일컬러 구현이 불가능해진다.

따라서 반전현상은 3전극 구조의 이미지 구현에 있어서 반드시 개선되어야 될 문제이며 하판전극들 사이의 간격을 조절하여 인력(②)이 척력(①)보다 입자들에게 영향력을 더 강하게 작용할 수 있도록 하여 개선할 수 있으며 이를 확인하기 위해 실험을 진행하였다.

2.3 전극 간격이 다른 기판 제작

반전현상 개선 가능성에 대한 실험을 진행하기 위하여 하부 기판의 전극 간격이 다른 기판을 제작하였다.

그림 4는 제작한 기판의 모식도이다. 하부의 전극은 ITO 투명전극이며 하부전극 각각 바이어스를 다르게 인가할 수 있도록 하고, 이때 입자의 움직임을 현미경으로 관찰할 수 있도록 하였다.

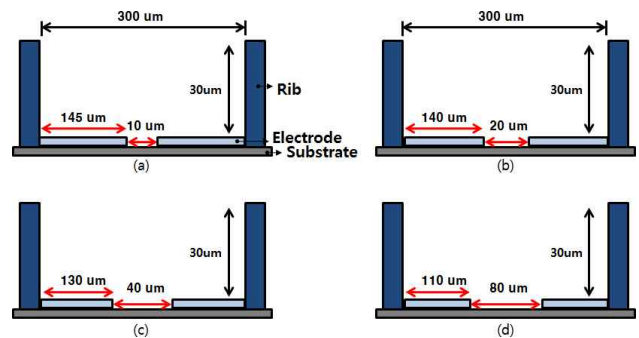


Fig. 4. Lower substrate of wide electrode spacing. (a) 10 µm, (b) 20 µm, (c) 40 µm, and (d) 80 µm.

기판 (a)~(d)는 동일한 셀 사이즈와 셀 갭을 가지지만 하부전극의 간격이 10 µm, 20 µm, 40 µm, 80 µm으

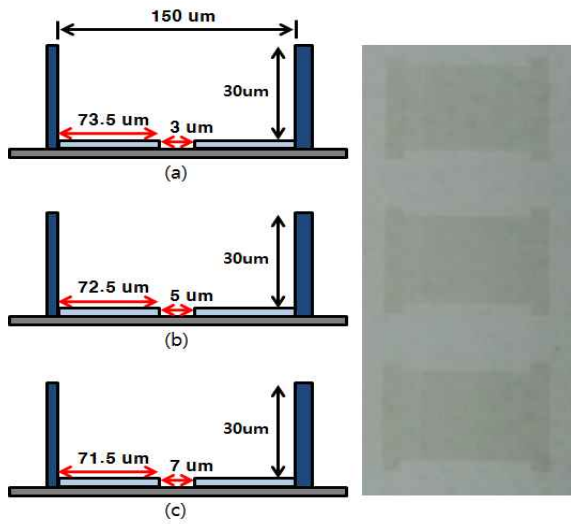


Fig. 5. Lower substrate of narrow electrode spacing. (a) 3 μm , (b) 5 μm , and (c) 7 μm .

로 구성되어 있다. 전극 간격이 10 μm 인 (a)기판을 제외하고 나머지 (b), (c), (d)기판은 간격이 셀 갭의 크기인 30 μm 와 비슷하거나 그 이상인 넓은 전극 간격을 가지게 제작되었다. 또한 넓은 전극 간격을 가지는 기판의 실험 결과를 바탕으로 좁은 전극 간격을 가지는 기판도 제작하였다. 이를 그림 5에 나타내었고, 그림의 왼쪽이 모식도이며 오른쪽이 실제 기판의 사진이다. 넓은 전극 간격을 가지는 기판과 마찬가지로 ITO 투명전극으로 제작되었다.

그림 5의 (a), (b), (c)기판들은 하부기판의 전극 간격이 10 μm 이하의 기판들로서 그림 4의 기판들에 비하여 비교적 좁은 간격을 가진 패널들이다. 그림 4의 기판들에 비해 셀 사이즈 및 전극 폭이 작게 설계되었는데, 이는 10 μm 의 간격을 가지는 전극 기판의 실험 결과를 반영하였으며 패널의 구동 특성에는 큰 변화가 없었으며 전자잉크 주입 전의 패널 사진을 보인 우측의 사진은 현미경으로 보았을 때 식별이 불가능함을 보인다.

2.4 실험 패널의 제작

전극 간격을 다르게 하여 패널의 제조공정이 가능함을 보인 2.3의 실험은 그 가능성을 사진과 함께 보였으며 반전현상을 평가하기 위한 패널 제조는 일부 패널에 대해 진행하였다.

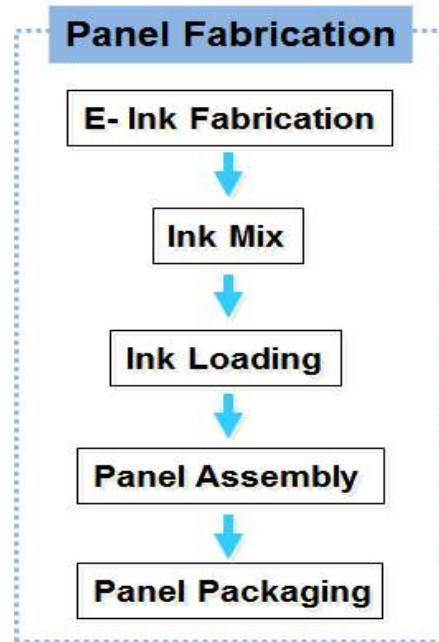


Fig. 6. Panel fabrication process of three electrode structure.

그림 6은 제작한 ITO 투명전극 기판들을 하판으로 사용하여 만든 패널의 제작과정을 보인 것이다. E-ink fabrication은 전자잉크를 만드는 과정이며 (-)전하를 띠는 흑색입자가 들어있는 흑색잉크와 (+)전하를 띠는 백색입자가 들어있는 백색잉크를 질소가스를 이용하여 먼지와 이물질을 제거한 샘플 혼합용기에 혼합한 후 스포이드를 이용하여 일정량을 블루컬러를 띠는 블루유체와 1:1의 비율이 되도록 혼합한다. 이후 ink mixing을 위해 볼텍스 입자믹서를 이용하여 물리적으로 입자들끼리 잘 섞일 수 있도록 약 5분가량 혼합한다. 혼합된 전자잉크를 하부기판의 active 영역에 해당하는 셀들에 골고루 도포해주는 것이 ink loading 과정이며, 전자잉크가 도포된 하부기판을 ITO glass를 이용하여 각각의 셀들에 전자잉크가 가득 차있는 상태로 만드는 과정이 panel assembly 과정이다. 정합된 패널은 외부의 먼지 및 불순물의 유입을 차단하고 패널 내부에서 유체의 증발 및 입자의 유출을 방지하기 위하여 패널을 패키징하였다.

이러한 제조 과정을 걸쳐 넓은 하부전극 간격을 가지는 패널과 좁은 하부전극 간격을 가지는 패널을 제작하였으며 완성된 패널들의 상부전극 및 2개의 하부전극 각각에 전압을 인가하여 인가된 전압에 의해 입자들이 운동하게 되고, 하부전극 간격에 의한 반전현상

유무에 대하여 실험하였다. 이 때 사용한 넓은 간격의 패널은 셀 사이즈가 300 μm 이고, 하부전극 폭은 각각 110 μm 이며, 하부전극 간격이 80 μm 이고, 셀 갭은 30 μm 이다. 그리고 좁은 간격의 패널은 셀 사이즈가 150 μm 이고 하부전극 폭은 각각 72.5 μm 이며, 하부전극 간격이 5 μm 이고, 셀 갭은 30 μm 이다. 패널에 인가되는 구동전압은 상부전극과 하부전극 사이의 거리인 셀 갭에 의해 결정되는데 두 실험 패널 모두 셀 갭이 같으므로 같은 구동전압인 +1 V와 -1 V를 상부전극과 하부전극에 인가하며 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반전현상의 발생

그림 7은 상부전극에 +0 V를 인가하고 2개의 하부전극 각각에 -1 V와 +1 V를 인가하였을 때 패널의 현미경 사진으로 반전현상을 개선하기 위한 방법을 예시한 것이기 때문에 고배율의 광학현미경 사진이기 때문에 상부 이미지는 원리적으로 명확하지 않다. 그림 7(a)는 넓은 전극 간격(80 μm)을 가지는 패널을 상판에서 관찰한 현미경 사진이며, 그림 7(b)는 반대로 하판에서 관찰한 현미경 사진이다. 그림 7(b)에서 4개의 셀 각각의 중간 검은색 부분이 사이 간격을 나타내며 검은색 부분을 기준으로 위쪽이 인가된 -1 V에 의해 (+)전하를 띠는 백색입자들이 모여 구현된 백색상태이며, 아래쪽은 인가된 +1 V에 의해 (-)전하를 띠는 흑색입자들이 모여 구현된 흑색상태이다. 이 때 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 순수한 유체의 색인 블루가 나타나지 않고 하부에 있어야 할 입자들이 상판에서 같이 관찰되어 반전현상이 일어난 것을 알 수 있다.

그림 7(c)는 좁은 사이 간격(5 μm)을 가지는 실험패널을 상판에서 관찰한 현미경 사진이며, 그림 7(d)는 반대로 하판에서 패널을 바라본 현미경 사진이다. 그림 7(d)는 하판전극에 그림 7(b)와 같은 전압이 인가되어 셀 중앙의 작은 검은색 부분을 기준으로 위쪽이 백색, 아래쪽이 흑색 상태가 구현되고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 7(c)는 그림 7(a)처럼 반전현상이 일어나지 않아 상부에서 입자들이 관찰되지 않았으며 순수한 유체의 색을 표현할 수 있었다.

3.2 반전현상 개선원리

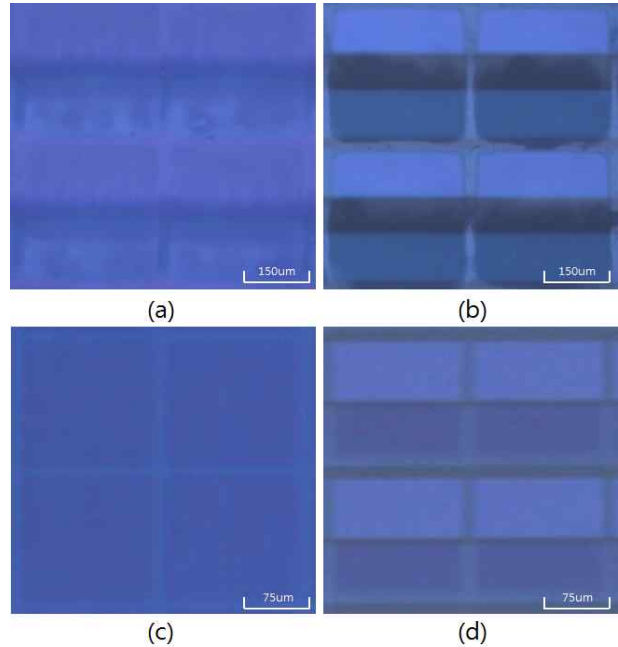


Fig. 7. Photomicrograph of three-electrode panel. (a) upper substrate of wide electrode spacing, (b) lower substrate of wide electrode spacing, (c) upper panel of narrow electrode spacing, and (d) lower panel of wide electrode spacing.

반전현상의 유무에 있어서 하부기판의 전극 간격이 영향을 미친다는 것을 실험을 통해서 확인하였고 구동원리에 대해 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 넓은 하부전극 사이 간격을 가지는 패널이고 그림 8(b)가 좁은 하부전극 사이 간격을 가지는 패널의 모식도이다. 하부전극의 간격은 전자기적으로 셀 갭 및 셀 사이즈의 크기와 상관관계가 있기 때문에 절대적인 수치는 의미가 없으며 다만 그 비율과 관련이 있는 것으로 판단된다. 이에 대한 연구는 향후 진행되어야 할 것이다.

하부전극에 인가된 -1 V와 +1 V에 의해서 (+)전하를 띤 백색입자와 (-)전하를 띤 흑색입자가 하부전극 각각에 위치하게 된다. 이 때 그림 8(b)에 비해 그림 8(a)는 하부전극에 인가된 전압에 의한 척력에 의해 밀려 올라간 흑색과 백색의 입자들이 있는 것을 확인할 수 있고 반전현상이 일어났음을 알 수 있다. 이렇게 상부전극에 위치한 입자들이 하부전극에 인가된 바이어스에 의해 올바른 위치에 있기 위해서는 하부전극에서 입자에 미치는 인력이 하부전극에 의해 입자가 밀려나는 척력보다 강해야 한다.

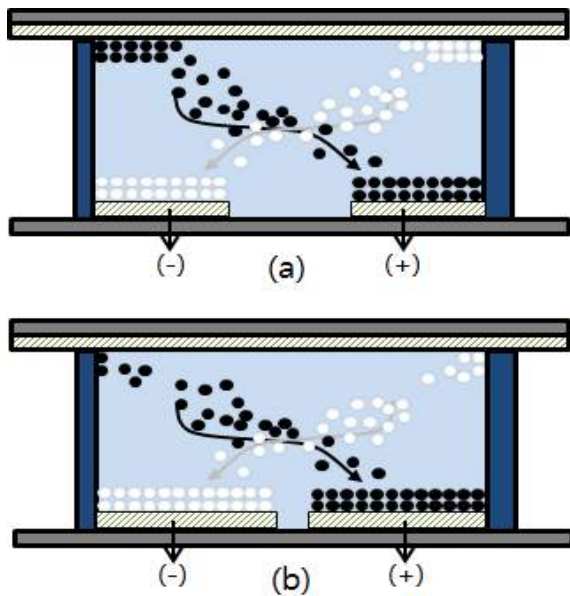


Fig. 8. Improvement principle of reversal phenomenon. (a) panel of wide electrode spacing and (b) panel of narrow electrode spacing.

하지만 그림 8(a)와 같이 넓은 하부전극 간격으로 인하여 하부전극에 인가된 전압에 의한 영향력이 상부전극에 미치지 않는 영역이 발생하게 되고 그에 따라 입자들이 잔류하게 되는 것이다. 또한 척력에 의해 입자들이 불규칙하게 밀려 올라가게 되며 추가적인 유체의 흐름을 형성하여 입자의 운동이 불안정해질 가능성이 있다. 하지만 그림 8(b)와 같이 좁은 전극 간격으로 인해 하부에 인가된 전압의 영향력이 패널 전체에 골고루 미칠 수 있게 되면 상부에 잔류하던 입자 및 척력에 의해 밀려 올라가던 입자들이 인가된 바이어스에 의해 올바른 위치에 위치하게 되면 반전현상이 해결되며 유체의 색을 이용하여 컬러를 구현할 수 있다.

4. 결론

기존의 전자종이와 같은 반사형 디스플레이는 구조적으로 컬러 표현에 한계가 있으며 컬러 표현을 위하여 컬러 필터를 사용해 왔다. 하지만 컬러 필터는 광투과율 및 반사율 감소와 컬러왜곡 등 반사형 디스플레이에는 적합하지 않기 때문에 컬러 필터를 사용하지 않고 컬러를 표현할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 3전극 구조를 위하여 하부의 전극이 2개이며, 넓은 전극 간격을 가지는 기판과 좁은 전극 간격을 가지는 기판을 제작하였고, 제작된 기판과 흑색 및 백색입자와 블루유체를 섞어서 만든 전자잉크를 사용하여 3전극형 구조의 패널을 제작하였고, 하부전극에 각각 극성이 다른 구동전압을 인가하여 구동실험을 하는 도중에 반전현상이 일어남을 확인할 수 있었다.

반전현상은 하부전극에 인가된 바이어스의 극성과 같은 극성의 입자에게 발생하는 척력이 반대 극성의 전압이 인가된 다른 하부전극에서의 인력보다 강하기 때문에 입자가 상부전극으로 이동하며 발생하게 된다. 따라서 하부전극끼리 넓은 간격을 가지게 되면 하부전극에 인가된 전압에 의한 영향력이 패널 내에서 미치지 않는 공간이 생기게 되어 반전현상이 발생하는 반면 좁은 하부전극 간격을 가진 패널은 하부에 인가된 전압의 영향력이 상부전극 및 패널 내부에 골고루 작용하게 되어 반전현상이 발생하지 않게 된다. 이로써 하부전극들의 사이 간격을 조절하여 반전현상을 개선할 수 있음을 알 수 있었고 유체의 색을 이용하여 블루 컬러의 구현이 가능하였으며 컬러 필터를 사용하지 않고 반사형 디스플레이의 단일컬러 구현가능성에 대하여 확인하였다. 추후 다양한 전극구조와 입자의 구동전압 조절 및 유체와의 혼합 비율에 따른 반전현상 유무 및 구동 특성에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012R1A1A2044210). 또한 본 연구는 중소기업청 기술혁신개발사업(S2128870)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] C. W. Kim, Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 691 (2012).
- [2] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 129 (2012).
- [3] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012).
- [4] S. S. Lee, M. Park, S. H. Lim, and J. K. Kim, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **13**, 1 (2010).
- [5] C. H. Chen, F. C. Lin, Y. T. Hsu, Y. P. Huang, and

- H.P.D. Shieh, *J. Display Technology*, **5**, 34 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JDT.2008.2001578>]
- [6] K. S. Kim, *Thesis*, p. 1, Chungwoon University, Hongseong (2011).
- [7] A. D. Arnold, T. K. Hatwar, M. V. Hettel, P. J. Kane, M. E. Miller, M. J. Murdoch, J. P. Spindler, and S. A. Van Slyke, *IMID '04 DIGEST*, 810 (2004).
- [8] B. W. Lee, K. K. Song, Y. C. Yang, C. W. Park, J. H. Oh, C. C. Chai, J. G. Choi, N. S. Roh, M. P. Hong, and K. H. Chung, *IMID '04 DIGEST*, 1103 (2004).
- [9] M. K. Kim, Y. J. Lim, S. S. Bhattacharyya, M. H. Lee, and S. H. Lee, *Curr. Appl. Phys.*, **11**, 7 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2010.06.019>]
- [10] D. J. Lee, B. E. Park, and Y. C. Kim, *J. Display Technology*, **8**, 534 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JDT.2012.2199280>]
- [11] K. Y. Kwon, S. W. Kim, I. S. Hwang, and Y. C. Kim, *Journal of Academia-Industrial Technology*, **9**, 35 (2008).
- [12] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 63 (2008).
- [13] Y. C. Kim, *Patent*, 10-1392583 (2014).