

## 3전극형 반사형 컬러 디스플레이의 제작 및 구현

신용관<sup>1</sup>, 김영조<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 청운대학교 전자공학과

### Fabrication and Realization of Three-Electrode Type Color Reflective Display

Yong-Kwan Shin<sup>1</sup> and Young-Cho Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 402-060, Korea

(Received October 8, 2014; Revised October 15, 2014; Accepted December 8, 2014)

**Abstract:** We propose a fabrication process of a 3-electrode type reflective display and ascertain the realized color panel. The first design is proceeded with basis on Ti electrode for fast panel fabrication, easy align process, and high reflection of a white image. To observe the particle movement at the lower electrodes and optimize the space between electrodes, we design the second patterns, from which we establish a fabrication process with the mixing of electronic ink, loading of this ink, electronic ink assembly, driving, and packaging. After aging process, we ascertain a normally driving panel with black, white, and blue color.

**Keywords:** Full color, Color filter, Color realization, Electronic ink fabrication, Three electrode structure

#### 1. 서론

21세기에 접어든 이후 정보화시대가 급속도로 진행되면서 멀티미디어를 통하여 시간과 장소에 구애받지 않고 커뮤니케이션이 이루어지고 있으며 이에 따라 디스플레이 기술에도 많은 변화가 있었으며 그 중요성이 강조되고 있다 [1].

디스플레이는 발광형 디스플레이와 반사형 디스플레이로 나눌 수 있다. 소자 내부의 광원을 이용하여 이미지를 표시하는 발광형 디스플레이는 외부광원이 강한 야외에서는 이미지의 확인이 어려우며 눈에 피로감을

쉽게 주고 휴대성이 떨어진다. 이에 따라 휴대성과 외부에서의 가독성이 우수한 반사형 디스플레이의 필요성이 강조되고 있다 [2].

대표적인 반사형 디스플레이인 전자종이는 플렉서블 디스플레이의 한 종류로 기존의 디스플레이의 장점과 종이의 특성을 접목하여 만들어진 반사형 디스플레이이다. 소자의 동작 형태에 따라 반사된 외부광원을 눈에서 인식하기 때문에 종이를 볼 때와 마찬가지로 눈에 피로감이 적으며 야외에서의 가독성이 발광형 디스플레이에 비해 뛰어나고 넓은 시야각을 가진다 [3]. 또한, 저전력으로 구동이 가능하며 별도의 소모 전력 없이 이미지를 유지하는 쌍안정성의 성질을 가지고 플렉서블한 기관 적용이 용이하여 내구성 및 디자인 면에서 유리하며 간단한 구조로 인해 가볍기 때문에 휴대성이 뛰어나다 [4]. 전자종이의 구동방식은 전기영동방식이 대표적인데 전기영동방식은 유체 내에 상반된 전하를 띠는 입

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

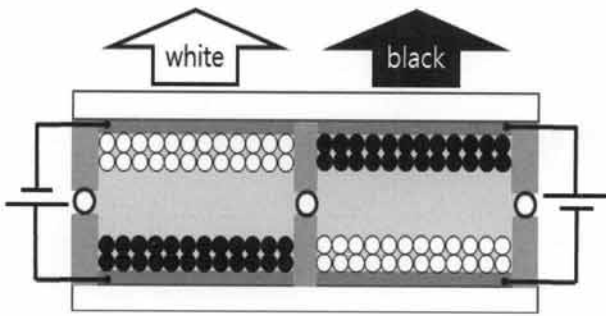


Fig. 1. Driving principle of reflective electronic paper.

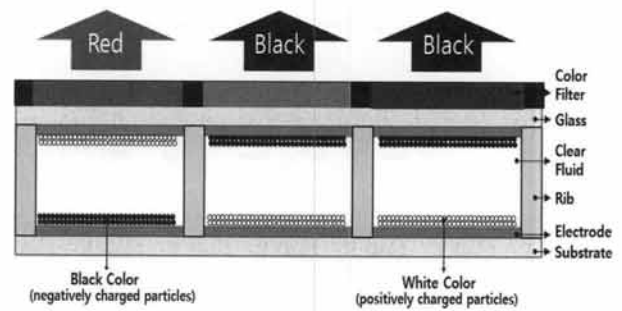


Fig. 2. Color realization by color filter.

자가 외부에서 인가된 전계에 의해 각각 이동하게 되며 이를 이용하여 이미지를 구현하는 방식이다.

그림 1은 투명유체 내에 (-)전하를 띠는 Black 입자와 (+) 전하를 띠는 White 입자가 들어있는 전자잉크를 격벽이 있는 하부와 상부기판 사이에 주입하고 하부와 상부의 ITO 전극에 각각 인가되는 극성이 다른 전압에 의해 형성된 전계에 따라 Black 입자와 White 입자가 상부 전극과 하부 전극으로 각각 이동하여 이미지를 표시하는 전기영동방식을 나타낸 그림이다 [5,6]. 하지만 투명유체 속에 포함된 Black 입자와 White 입자를 사용하여 이미지를 표현하기 때문에 구조적으로 다양한 컬러 표현에는 한계가 있고, 컬러 표현을 위해 기존의 많은 반사형 디스플레이들이 컬러필터를 사용하고 있다. 그러나 컬러필터는 반사율 감소, 컬러 왜곡, 서브 픽셀화 구조 등의 단점을 가지고 있기 때문에 반사형 디스플레이에는 적합하지 않은 구조로 알려져 있다 [7].

따라서 본 연구에서는 기존 전자종이 컬러화 기술의 문제점을 분석하고, 이의 개선을 위해 제안하고, 제안된 기술이 단일컬러의 구현 및 디스플레이의 풀컬러 구현이 가능함을 확인하고자 한다. 이러한 3전극형 구조를 이용한 컬러 구현은 타 연구기관에서 전혀 시도된 바 없으며 따라서 보고된 바가 없음을 밝힌다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 전자종이의 컬러화 구현

#### 2.1.1 기존 전자종이의 컬러화기술

전기영동방식을 사용한 기존의 전자종이는 대부분 Black 입자와 White 입자를 투명유체와 같이 사용하여

Black 및 White 이미지를 구현하는데 RGB와 같은 컬러를 구현하기 위해서 컬러필터를 사용하고 있으며 이를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서와 같이 외부에서 인가된 전압에 의한 전계에 의해서 Black 입자와 White 입자가 상부와 하부의 각 전극에 위치하게 되며 White 입자가 상판으로 이동하였을 때는 외부의 빛이 컬러필터를 통해 패널로 들어오게 되면 패널의 상부 전극에 위치해 있는 White 입자에 의해 다시 반사되어 컬러필터를 빠져나가며 컬러필터의 RGB 부분에 해당하는 특정 컬러를 구현하게 된다. 이와 반대로 Black 입자가 상부에 위치하였을 때는 컬러필터를 통해 들어온 빛이 Black 입자에 의해 흡수되어 다시 반사되어 나오는 빛이 없기 때문에 검은색 이미지가 표현되는 것이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 두 격벽 사이의 투명 유체 내에 Black 입자와 White 입자가 들어있는 하나의 셀에서 컬러필터를 사용하여 구현되는 RGB 및 Black의 이미지를 이용하여 전체적인 이미지를 구현하는 서브 픽셀화 기술은 반사형 디스플레이에 적용하기는 적합하지 않으며 만약 적용할 경우 컬러필터에 의한 반사율 감소 및 컬러 왜곡, 그리고 서브 픽셀화 구조라는 문제점이 발생한다 [8]. 외부에서 유입된 빛이 컬러필터를 통과하며 상부 전극에 위치한 입자들에 의해서 반사 또는 흡수가 일어나며, 반사된 빛이 다시 컬러필터를 통해 밖으로 빠져 나갈 때에는 상당한 반사율 감소가 일어나게 된다. 또한 이러한 서브 픽셀화 구조는 원리적으로 단일컬러 표현이 불가능하다는 단점이 있다. 예를 들어 RGB 중 하나의 컬러를 구현하고자 할 때 전체 이미지의 1/3에 해당하는 부분만 단일컬러가 되고 나머지 2/3의 부분은 Black 상태가 구현되면서 전체적인 이미지가 어두워지게 되므로 단일 컬러 표현에 있어서 한계를 가진다. 어두운 이미지를 개선하고자 E-Ink사에서 White 입자를 서브 픽셀로 추

가하는 RGBW를 추진하였지만 반사율이 증가한 대신 색 재현율이 감소되어 전체적인 이미지의 채도가 떨어지는 결과가 나타났다 [9,10]. 이와 같이 반사형 디스플레이는 컬러필터를 사용하여 단일컬러 및 디스플레이의 풀컬러를 구현하기에는 원리적으로 한계를 가진다. 그러므로 전자종이를 비롯한 다른 형태의 반사형 디스플레이는 컬러필터의 사용이 바람직하지 않으며 하나의 픽셀에서 Black과 White 컬러를 제외한 또 다른 컬러를 구현할 수 있어서 자체적으로 단일컬러 구현이 가능하며, 이러한 픽셀들이 모여 하나의 이미지를 구현할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존에 사용하던 2전극 구조와 다르게 하판의 전극을 2개로 나누어서 전극의 개수가 모두 3개인 3전극형 구조의 패널을 설정 및 제작하였고, 컬러유체 속에 서로 다른 전하를 띠는 Black과 White 입자가 포함된 전자잉크의 구동실험을 통하여 하나의 셀에서의 단일컬러 표현이 가능함을 확인함으로써 디스플레이의 풀컬러 구현의 가능성을 보이고자 한다.

**2.2 3전극형 구조를 이용한 전자종이의 컬러화 기술**

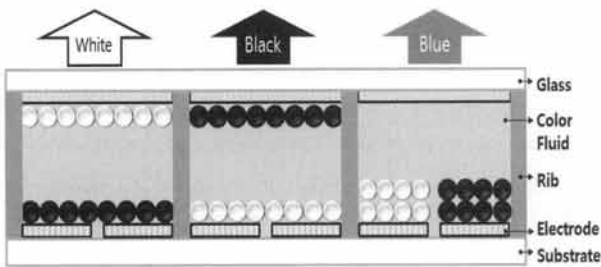


Fig. 3. Color realization by a 3-electrode structure.

그림 3은 컬러필터를 사용하지 않고 하판의 전극이 2개가 되도록 하여, 상부 전극을 포함하며 전극의 개수가 모두 3개인 3전극 구조를 보인 것이다. 또한 기존에 사용해왔던 투명유체 대신 Blue 컬러 유체를 적용한 패널을 단면도로 보인 것이다.

본 연구에서 사용한 Black 입자는 (-) 전하를 띠며 White 입자는 (+) 전하를 띠고 외부에서 인가된 전압에 따라 상부 전극과 하부 전극들 사이에 형성된 전기장에 의해 입자들이 각각 제어된다 [11,12]. 특히 상부 전극에 0 V의 전압이 인가되고 하부의 왼쪽과 오른쪽 전극 각각에 +V와 -V의 전압이 인가될 경우

Black과 White 입자들이 하판의 왼쪽과 오른쪽 전극으로 각각 이동하게 되고 패널의 상부에서는 하부에 위치해 있는 입자들이 보이지 않고 유체의 컬러인 Blue가 보이게 된다. 셀 하나에서 Black과 White, 그리고 Blue 표현이 가능하며 전체적으로 이미지가 어두워지거나 White 계열이 강한 컬러가 아닌 Blue 자체의 단일컬러 표현이 가능하다. 이와 같이 컬러필터를 사용하는 서브 픽셀화 기술과는 달리 컬러필터를 사용하지 않기 때문에 투과율이 우수하여 반사율 감소에 유리하며 컬러 왜곡이 줄어들어 색 재현성이 전체적으로 개선되며 단일컬러를 구현할 수 있다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 하판패널 제작**

3전극형 구조의 실험을 위하여 하부기판을 제작하였다. 전극마스크와 격벽 마스크의 제작을 위하여 패턴설계를 하였고 사진식각 공정을 이용하여 하부기판을 제작하였다 [13]. 하판전극 초기 공정상의 편의와 입자간의 간격사이를 투과하는 광의 반사율을 높이기 위하여 티타늄을 이용하였으며, 또 다른 실험에서는 하부 전극에 의한 전자잉크의 운동을 분석하기 위하여 투명전극인 ITO를 사용하였다. 티타늄 및 ITO 전극을 이용한 패턴은 셀 크기, 전극 폭, 전극 간격을 고려하여 설계되었으며 제작된 하부기판의 설계 조건을 표 1에 보였다.

Table 1. Electrode conditions.

Substrate number	Cell size ( $\mu\text{m}$ )	Electrode width ( $\mu\text{m}$ )	Electrode spacing ( $\mu\text{m}$ )	Electrode material
1	300	145	10	Titanium
2	300	140	20	
3	300	130	40	
4	150	72.5	5	
5	150	71.5	3	ITO
6	150	72.5	5	
7	150	73.5	7	

기판 번호 1, 2, 3, 4번은 1차로 설계된 티타늄 전극이며 1, 2, 3번은 동일한 셀 크기에서 전극 간격에 따른 구동 특성의 차이를 보기 위해 설계한 하판이

고, 4번은 셀 크기와 전극 간격 및 전극 폭이 2배가량 작아졌을 때의 구동 특성을 보기 위해 설계한 하판이다. 그리고 5, 6, 7번 하판을 설계할 때, 셀 크기와 전극 폭 및 전극 간격은 4번 하판의 실험 결과를 반영하였으며 하부 전극에서의 입자 운동의 분석을 위하여 2차로 설계된 ITO 투명전극 하부 기판들이다.

**3.2 실험패널의 제작**

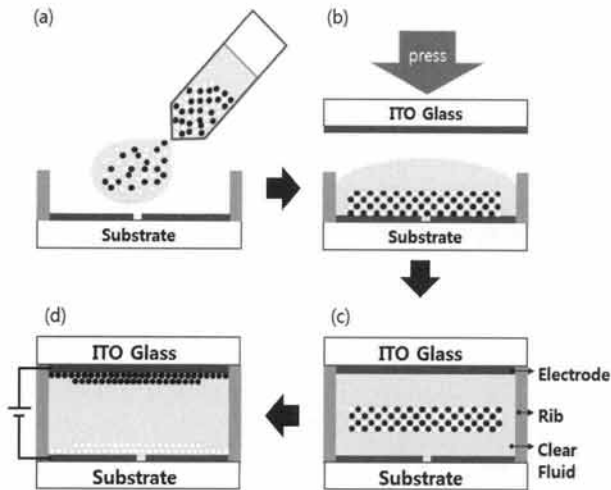


Fig. 4. Fabrication process of the 3-electrode type color reflective display. (a) ink loading, (b) panel assembly, (c) panel packaging, and (d) applied voltage.

그림 4는 티타늄 전극 하판을 사용하여 만든 실험 패널의 제작과정을 나타낸 모식도이다. 4(a)는 하판에 잉크를 로딩하는 과정으로 투명유체 내에 서로 다른 전하를 띠는 Black 입자와 White 입자가 존재하는 전자잉크를 주사기를 이용하여 전극이 2개인 하판에 충분히 로딩한 것이고, 4(b)는 전자잉크가 로딩된 하판을 상판인 ITO Glass를 이용하여 수직방향으로 눌러주어 하부기판 각각의 셀에 골고루 전자잉크가 도포된 것을 나타낸 것이며 [14], 이렇게 상판과 하판의 정합이 완료된 패널을 외부의 불순물 유입 또는 내부 잉크의 유실이 발생하지 않도록 하기 위하여 실리콘을 이용하여 패키징하는 과정을 4(c)에 나타내었으며, 4(d)는 패키징까지 완료된 패널 내부의 입자 움직임을 관찰하기 위해 외부에서 파워 서플라이를 이용하여 상부 전극과 하부 전극에 전압을 인가하는 것을 나타낸 것이다. 상부 전극과 하부 전극에는 각각 +5

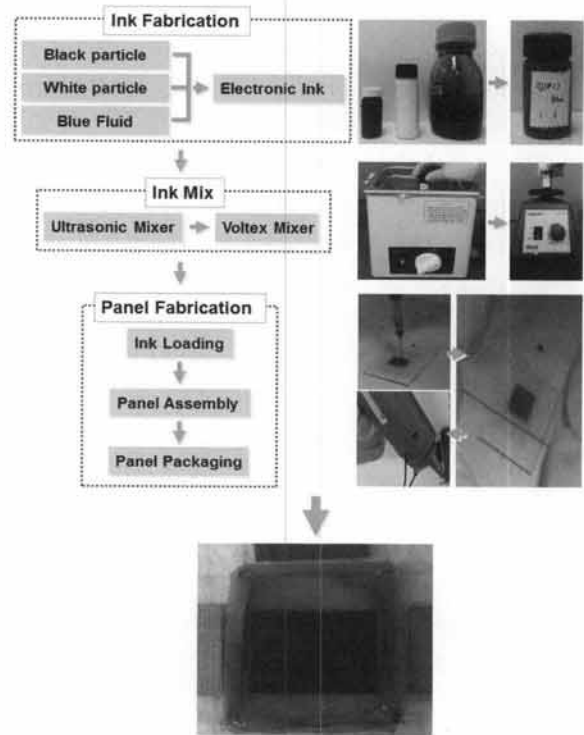


Fig. 5. Fabrication process of three-electrode type of color display.

V와 -5 V 또는 +1 V와 -1 V를 인가하며 현미경을 이용하여 패널의 변화를 관찰했다. 여기에서 구동전압은 잉크의 종류 및 셀갭 (상부 및 하부 전극의 거리)에 의해 정해진다 [15].

전극에서의 입자의 움직임을 분석하기 위해 ITO 전극을 사용하여 설계를 진행하였다. ITO를 사용한 투명전극으로 인한 얼라인 공정상의 어려움은 설계과정에서 별도의 얼라인 마크를 추가하여 해결하였으며 각 하판 패널은 셀 사이즈는 150  $\mu\text{m}$ 으로 모두 같고, 전극 폭은 71.5  $\mu\text{m}$ , 72.5  $\mu\text{m}$ , 73.5  $\mu\text{m}$ 이며 하판전극 간격은 7  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ 이며 3개의 하판 패널이 각각 20  $\mu\text{m}$ 과 30  $\mu\text{m}$ 의 2가지의 셀갭으로 구성되어 총 6개의 투명전극 하판 패널을 제작하였다. Active영역이 25 mm \* 25 mm인 티타늄 전극에 비해 패널의 active 영역을 반사율 및 색 좌표 측정 장비의 광원이 들어올 수 있는 최소 사이즈인 13 mm \* 13 mm으로 설계하였고, 그에 따라 전체적인 패널의 크기가 작아졌으며 전체적인 capacitance가 2배 정도 줄어들어 패널 구동에 불필요한 영향력을 미치는 요소가 줄어들었다. 그리고 전극이 투명하기 때문에 하부 전극

에서의 입자 움직임을 분석할 수 있었으며 1차 설계에서 발생하였던 반전 현상을 해결할 수 있었고, 컬러 구현 실험을 하기 위한 2차 실험패널 제작 과정을 그림 5에서 나타내었다.

그림 5의 좌측에 해당하는 플로 차트는 전체 제작 공정이며 우측의 사진들은 플로 차트 항목의 실제 사진이고, 아래는 완성된 실험패널의 사진이다. Black 입자와 White 입자가 섞인 잉크와 Blue 컬러의 유체를 1:1의 비율로 섞어 실험에 사용할 전자잉크를 제조하였다. 전자잉크를 제조한 후 전자잉크 내에 분리되지 않고 서로 붙어 있는 입자들이 존재할 수 있기 때문에 5분 동안 초음파 믹서를 이용하여 붙어있는 입자들을 분리시켜 주는 공정을 진행한 후 볼텍스 믹서를 이용하여 2분 동안 분리된 입자들과 유체를 골고루 섞어 준 전자잉크를 주사기를 이용하여 하판에 충분히 떨어뜨린 후 상판과 정합하였다. 이때 사용된 하판의 셀 크기는  $150\ \mu\text{m}$ 이고, 전극 폭은  $72.5\ \mu\text{m}$ 이며 하판전극 간격은  $5\ \mu\text{m}$ 이며 상판 패널은 ITO glass이다. 정합 후 패키징을 하였으며 외부에서 패널 내부에 불순물이나 공기가 유입되지 않도록 막아주고 패널 내부에서 잉크나 유체가 새어나가지 않도록 하기 위하여 신뢰성이 확보된 실리콘으로 패키징을 하였다. 완성된 실험패널의 하부 전극과 상부 전극에 +1 V와 -1 V를 Black, White, Blue 이미지 구현을 위하여 인가하였다.

### 3.3 티타늄 전극과 ITO 전극 비교

티타늄 전극은 육안으로 전극의 형태를 확인하기 용이하기 때문에 격벽과 전극 마스크의 얼라인 공정상 유리하며 대량 생산이 이루어질 경우에 큰 장점이 있을 것으로 판단된다. 또한 실험패널을 만들 때 하판패널에 잉크를 충분히 로딩한 후 로딩된 하판의 확인이 편하고 신속하게 상판을 정합할 수 있기 때문에 유체의 증발과 외부 불순물의 유입이 발생하지 않는 장점이 있다.

그림 6은 셀 크기가  $300\ \mu\text{m} * 300\ \mu\text{m}$ 이고, 전극 폭은  $145\ \mu\text{m}$  전극 간격은  $20\ \mu\text{m}$ 인 하판을 사용하여 만든 실험패널의 상부 전극과 하부 전극에 각각 +5 V와 -5 V의 전압을 인가하였을 때 현미경 사진이다. 그림 6(a)는 패널의 상부를 현미경으로 관찰한 것이다. 상부 전극에 존재하는 Black 입자로 인해 Black 이미지가 구현됨과 동시에 하판의 티타늄 전극이 함께 관찰되는 것을 볼 수 있다. 그림에서 빛나는 흰색

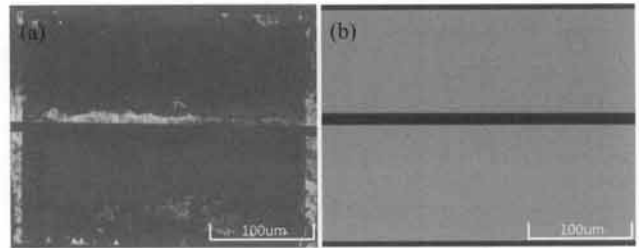


Fig. 6. Photomicrograph of a titanium-electrode panel for (a) upper panel and (b) lower panel.

부분이 티타늄 전극이다. 이와 같이 티타늄전극이 입자와 함께 상부에서 관측되게 되면 패널의 반사율 측정 시 영향을 미치게 되어 전체적인 반사율 측정값이 높게 나오게 되어 whiteness가 향상된다. 하지만 티타늄 전극은 그림 6(b)와 같이 패널을 하부에서 현미경으로 관측하였을 때 티타늄으로 인하여 입자의 움직임을 관찰할 수 없다는 단점이 있다.

그에 비해 ITO 투명전극을 사용한 패널은 패널의 구동 전압 및 패널 내의 잉크의 운동이 티타늄 전극을 사용한 패널과 차이가 없지만 하부 전극에서의 입자의 움직임이 확인 가능하다. 티타늄 전극 패널과 마찬가지로  $\pm 5\ \text{V}$ 와  $\pm 1\ \text{V}$ 의 구동전압에서 동작하며 Black 입자와 White 입자가 2개의 하부 전극에 의해 제어되는 것을 확인할 수 있으며 패널의 상부에서 관찰 시 하부에 있는 입자들이 아닌 유체의 색인 Blue 이미지가 나타나게 되는 3전극형 구조의 가능성을 확인하였다.

### 3.4 단일컬러 구현

3.2절에서 그림 5의 과정을 통하여 제작한 실험패널의 단일컬러 구현 실험 결과를 그림 7에 보였다. 그림 7은 패널의 상태를 상부에서 관찰한 사진과 현미경 사진을 순서대로 나열해 놓은 그림이다. (a), (b), (c), (d)의 각 상태의 왼쪽 사진은 육안으로 관찰할 때의 패널 사진이며 오른쪽 사진은 현미경으로 관찰할 때의 사진이다. (a)는 패널을 제작한 직후 전압이 인가되기 전의 상태이고 (b)는 상부 전극에 +1 V를 인가하고 하판전극 2개에 -1 V를 인가하였을 때 Black 입자가 상부 전극에 위치하여 Black 이미지가 구현된 상태이며 (c)는 상부 전극과 하부 전극에 (b)와는 반대되는 극성의 전압을 인가하여 상부 전극에

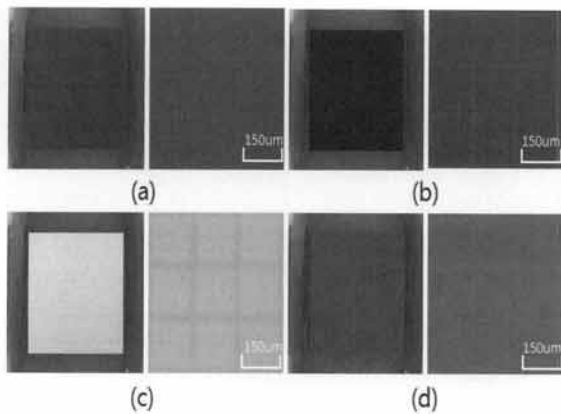


Fig. 7. Color realization by the three-electrode. (a) before applied voltage, (b) black image, (c) white image, and (d) blue image.

White 입자가 위치하게 되어 White 이미지가 구현되었으며 마지막으로 (d)는 상부 전극에 +0 V가 인가되고 하부 전극 각각에 +1 V와 -1 V가 인가되면 2개의 하부 전극에 각각 Black 입자와 White 입자가 위치하게 되고 상부에서는 유체의 색인 Blue 이미지가 구현된 상태를 나타낸 것이다. 하판전극 간격이 7  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ 인 패널 모두 반전현상이 발생하지 않았으며 컬러 유체의 개선을 통하여 더욱 선명한 컬러 구현이 가능하였다. Black 이미지의 반사율은 1% 이하이며, White 이미지의 반사율은 20%이고, Blue 이미지의 반사율은 8%이며, 대조비가 20:1 이상으로 높은 수치를 보이는 것을 확인함으로써 3전극형 구조를 통해 하나의 픽셀에서 단일 컬러 표현이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었고, 컬러필터를 사용하지 않음으로써 컬러필터에 의한 반사율 감소 및 컬러 왜곡의 문제점 등의 해결 가능성을 보았으며 반사형 디스플레이의 풀컬러 구현을 위한 구조 및 방향성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

컬러필터를 이용한 서브 픽셀화 기술은 컬러필터에 의한 반사율 감소 및 컬러 왜곡이라는 단점을 가지며 단일컬러 표현에 있어 원리적으로 한계를 가진다. 따라서 반사형 디스플레이 구조에서 컬러필터를 사용하지 않는 3전극형 구조를 이용하여 하나의 픽셀에서 최소 3가지의 컬러를 표현함으로써 단일컬러의 구현

이 가능하여 전체이미지를 나타낼 수 있어야 한다.

본 논문에서는 하부의 전극을 2개로 나누어서 3전극형 구조의 패널을 제작하였고 2개의 하부 전극에서 다른 극성의 전압을 인가하여 각각 반대의 전하를 띠는 입자들의 움직임을 제어하고 Blue 컬러유체를 이용하여 하나의 픽셀 내에서 3가지 컬러의 표현이 가능함을 확인함으로써 반사형 디스플레이의 풀컬러 구현 가능성에 대해 확인하였다. 컬러필터를 사용하지 않았기 때문에 컬러필터로 인해 발생하는 단점들을 개선할 수 있으며 이후 다른 컬러의 유체를 사용하여 다양한 컬러를 구현할 수 있다. 추후 입자와 유체의 혼합 비율을 변화시키는 것과 반전현상에 대해 연구할 것이며 컬러 표현에 있어 최적의 구동모드에 대한 연구를 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A2044210)

#### REFERENCES

- [1] L. S. Park, Y. S. Han, and Y. H. Kwon, *KIC News*, 7, 54 (2004).
- [2] C. W. Kim, Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 23, 691 (2012).
- [3] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 25, 129 (2012).
- [4] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 25, 48 (2012).
- [5] A. A. Terry, *Library Hi Tech*, 4, 376 (2001).
- [6] S. S. Lee, M. Park, S. H. Lim, and J. K. Kim, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 1 (2010).
- [7] C. H. Chen, F. C. Lin, Y. T. Hsu, Y. P. Huang, and H.P.D. Shieh, *J. Display Technology*, 5, 34 (2009).
- [8] K. S. Kim, *Thesis*, p. 1, Chungwoon University, Hongseong (2011).
- [9] 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).
- [10] 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).

- [11] M. K. Kim, Y. J. Lim, S. S. Bhattacharyya, M. H. Lee, and S. H. Lee, *Current Appl. Phys.*, 11, 7 (2011).
- [12] D. J. Lee, B. E. Park, and Y. C. Kim, *J. Display Technology*, 8, 534 (2012).
- [13] K. Y. Kwon, S. W. Kim, I. S. Hwang, and Y. C. Kim, *Journal of Academia-industrial Technology*, 9, 35 (2008).
- [14] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 21, 63 (2008).
- [15] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Display Technology*, 9, 972 (2013).