

3전극형 전자종이 디스플레이의 전자잉크 주입 방법에 따른 광학 특성 분석

이상일¹, 홍연찬¹, 김영조^{2,a}

¹ 인천대학교 전자공학과

² 청운대학교 전자공학과

Analysis of Optical Characteristics According to Electronic Ink Loading Method of Three-Electrode Type E-Paper Display

Sang-Il Lee¹, Youn-Chan Hong¹, and Young-Cho Kim^{2,a}

¹ Electronic Engineering Incheon National University, Incheon 22012, Korea

² Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 22100, Korea

(Received November 30, 2017; Revised January 15, 2018; Accepted January 18, 2018)

Abstract: An electronic paper display was fabricated by injecting electronic ink, including white and black particles coated by positive and negative charge control agents (CCA), respectively, into closed cells surrounded by micro-barriers. These two types of charged, colored particles are easily damaged or their charging value can be changed by the injection process; therefore, the electrical and optical properties of the image panel fabricated by the injection method were estimated in this study. The active particle-loading method, proposed as a new electronic ink injection process, was applied, and the electro-optical properties of the resulting three-electrode-type e-paper image panel were analyzed. The reflection rate of the white image-panel fabricated with our new injection method was 24.7%, while that of the same panel fabricated with a previously reported injection method was 19.8%. In addition, the response time was improved by about five times compared to those reported in other publications.

Keywords: Three-electrode type e-paper, Ink loading, Active particle-loading, Electronic ink, Electrophoresis

1. 서론

스마트폰과 같은 모바일 기기에 대한 관심과 사용이 증가함에 따라 기기에 사용되는 디스플레이에 대한 개발이 끊임없이 진행되고 있다. 전자종이 디스플레이는 신문, 잡지, 책 등 전자책으로써 활용이 가능하며 광고

판, 가격표시라벨 등 게시판용으로도 사용되고 있다 [1]. 전자종이 디스플레이는 백라이트로 빛을 발산하여 이미지를 표시하는 발광형 디스플레이와는 달리 자연광을 흡수하고 반사하여 이미지를 표시하기 때문에 외부의 광량이 매우 큰 옥외에서 용이하게 사용할 수 있다는 장점을 갖는다 [2,3]. 전자종이 디스플레이는 유리나 플라스틱으로 제작된 상부 및 하부기판 사이에 서로 다른 극성을 가진 대전입자를 유체에 혼합한 전자잉크를 주입하고 전기영동현상을 이용해 대전입자를 운동시켜 이미지를 표시하는 전기영동방식을 주로 사용한다 [4,5].

a. Corresponding author; ykim@chungwoon.ac.kr

전기영동 현상을 이용한 전자종이 디스플레이는 흑, 백과 같이 2개의 컬러를 이용하여 이미지를 표시하는 것은 용이하지만 3가지 이상의 컬러를 표시하기엔 원리적으로 한계가 있다 [6,7]. 전자종이 디스플레이의 컬러 구현을 위한 방법으로 주로 이용되는 방법은 컬러필터 방법과 컬러입자 방법 등이 있다. 컬러필터 방법은 서브픽셀 개념의 컬러 기술이기 때문에 이미지를 표시하기 위한 광원이 충분히 반사되지 않고 원리적으로 단일컬러의 표시가 불가능하다. 또한, 컬러입자 방법은 입자의 문턱전압을 조절하여 컬러를 표시하기 때문에 구동전압이 복잡하다는 단점이 있다 [5,6].

이와 같은 전자종이의 컬러 표현 시 단점을 보완하고 단일컬러를 구현하기 위해 고안한 3전극형 전자종이 디스플레이는 그림 1에서 보이는 바와 같이 하부기판에 전극이 2개로 형성되어 있는 특수한 구조로 픽셀화 방식을 이용하기 때문에 컬러필터방식과 컬러입자방식의 단점을 극복할 수 있는 구조이다 [7,8].

3전극형 전자종이 디스플레이는 서브픽셀 개념이 아닌 픽셀화 방법이며, 한 개의 셀에서 3가지 컬러를 구현하는 것이 가능하며, 단일컬러 구현을 위해서는 세 개의 전극에 전압을 다르게 인가하여 다른 전계를 형성해야 한다. 한 개의 셀에 제1 및 제2 컬러 입자와 제3 컬러를 띠는 컬러유체를 동시에 주입한 3전극형 구조이기 때문에, 2개의 하부기판 전극에 상반된 전압을 인가하면 제1 및 제2 컬러를 띠는 입자가 모두 하부전극에 부착되어 유체의 색을 구현할 수 있다. 또한 입자의 색을 구현하기 위해서는 2개의 하부기판 전극에 같은 극성의 전압을 인가하고 상부기판 전극에 하부전극과 상반된 전압을 인가한다. 이러한 원리로 한 개의 셀에서 3개의 컬러 구현이 가능하다 [9].

3전극형 전자종이 디스플레이는 마이크로캡슐 방식이 아닌 하부기판에 형성되어 있는 격벽으로 셀을 나누고 그 안에 전자잉크를 주입하기 때문에 전자잉크를 주입하는 방법에 따라 셀 내부에 존재하는 대전입자의

농도가 달라지며, 대전입자의 농도가 달라지면 소자의 광학 특성에 영향을 미치는 것을 선행연구를 통해 확인하였다 [10,11]. 따라서 전자종이 디스플레이에 전자잉크를 주입하는 방법은 소자의 광학 특성을 결정하는 중요한 역할을 한다 [12].

본 연구에서는 전자종이 디스플레이에 전압을 인가하여 전자잉크를 주입하는 방법을 이용하여 소자의 광학 특성을 분석하였다. 본 연구에서 다루고자 하는 방법은 한 셀에 3개의 전극이 형성되어 있는 구조에서만 가능한 방법이기 때문에 이를 이용해 소자에 주입되는 전자잉크의 농도를 제어하여 광학 특성을 개선하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 3전극형 패널의 제작

3전극형 전자종이 디스플레이는 하부기판에 2개의 전극을 형성하는 방법으로 제작하기 때문에 전극구조를 설계하고 마스크를 제작하여 포토공정에 의해 패널을 제작하였다. 그림 2(a)는 3전극의 구조를 위한 하부기판 패널의 전체 설계도이며, 그림 2(b)는 한 셀에 3개의 전극이 배치되어 있는 패널의 모습이다. 하부기판에 형성하는 전극은 2개 이상인 3개로 제작하는 것이 가능하며 본 연구에서는 active particle-loading method

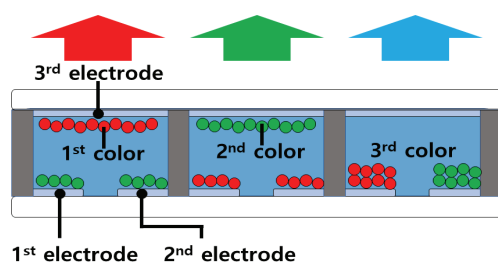


Fig. 1. Color expression three-electrode type e-paper.

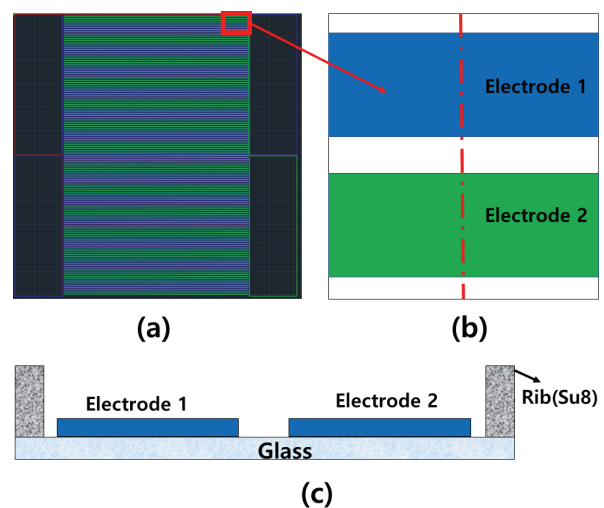


Fig. 2. Structure of three electrode type e-paper. (a) Whole design drawing of lower substrate, (b) two electrodes in one cell of lower substrate, and (c) cross sectional view of (b).

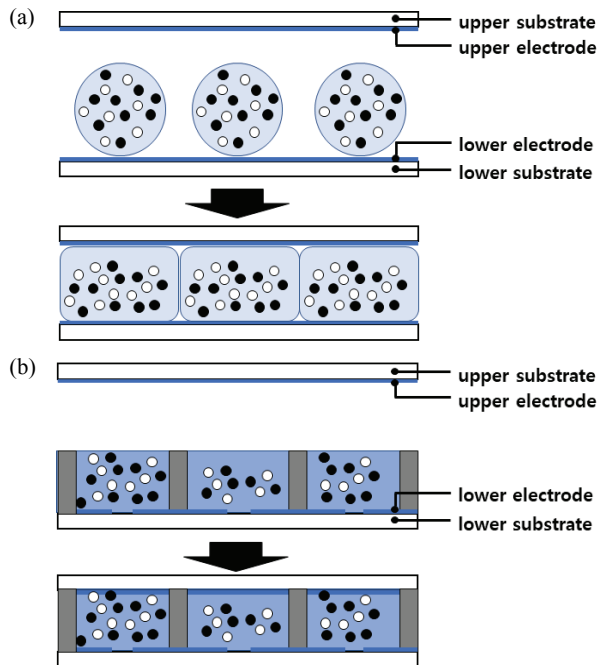


Fig. 3. Injection method of electronic ink. (a) Capsule type e-paper and (b) barrier type e-paper.

를 이용한 전자잉크 주입에 대한 실험을 하기 위해 하부기판에 2개의 전극을 형성한 패널을 제작하였다. 그림 2(c)는 2개의 전극을 형성하고 격벽을 형성한 패널의 단면도를 보인 것이다. 제작한 패널의 한 셀의 크기는 $150 \times 150 \mu\text{m}$, 전극 1과 전극 2의 크기는 $65 \mu\text{m}$, 그리고 셀 높이는 $23.4 \mu\text{m}$ 이다.

3전극형 전자종이 디스플레이는 그림 3(a)와 같이 전자잉크를 셀과 같은 역할을 해주는 마이크로캡슐에 가두어 패널상에 주입하는 마이크로캡슐 방식과는 달리 그림 3(b)와 같이 하부기판에 직접 격벽을 도포하여 셀을 형성하기 때문에 전자잉크를 전자종이 디스플레이 격벽사이 셀에 직접 주입한다.

2.2 전자잉크 충전 방법

격벽형 전자종이 디스플레이에 전자잉크를 주입하는 방법으로는 그림 4(a)와 같이 하부기판상에 전자잉크를 로딩하고 상부기판을 정합시켜주는 방법을 주로 이용하는데 이 주입방법은 셀 하나하나에 전자잉크를 주입하는 것이 아니고 패널 전체에 전자잉크를 로딩하고 상부기판으로 전체 셀에 전자잉크가 주입되도록 물리적인 압력을 가하는 방법이기 때문에 전자종이 디스플

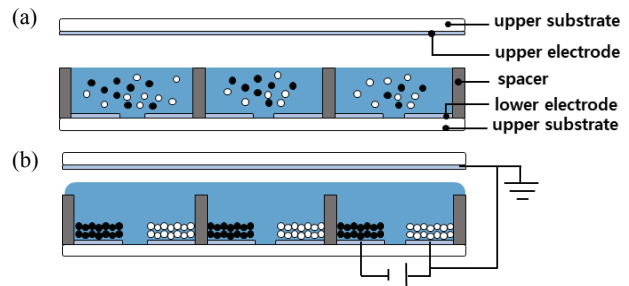


Fig. 4. Injection method at three-electrode type e-paper. (a) Reported method and (b) active particle loading method.

레이 셀 내부에 전자잉크의 농도를 고르게 주입하기 어렵다. 셀 전체에 주입되는 전자잉크의 농도가 다르면 전자종이 디스플레이의 광학 특성을 저하한다는 것은 선행 연구를 통해 확인된 바 있다 [13]. 본 연구에서는 전자종이 디스플레이 패널의 광학 특성을 저하하는 요인이 되는 전자잉크 농도의 편차 없이 주입하기 위해 전자잉크 주입 시 전계를 인가하는 active particle-loading method를 이용하였다. 그림 4(b)는 active particle-loading method를 도시한 것으로 active particle-loading method는 3전극형 전자종이 디스플레이의 하부기판에 3개의 전극이 형성되어 있는 특징을 이용해 전자잉크를 주입하는 방법이다.

하부기판에 2개의 전극이 형성되어 있는 형태의 패널에 active particle-loading method를 이용한 주입 방법을 예로 들면 먼저 하부기판에 전자잉크를 로딩하고 하부기판에 있는 2개의 하부전극에 각각 +, - 전압을 인가한다. 전압을 인가한 상태에서 상부기판을 접지한 상태로 하부기판과 정합하면 전하를 잃거나 과충전 상태의 대전입자들은 셀 내부에 주입되지 않고 셀 외부로 걸러내는 필터링 역할을 한다. 따라서 패널 내부에 운동하지 않는 입자들이 최소로 주입되며, 패널의 광특성이 향상된다.

Active particle-loading method가 3전극형 전자종이 디스플레이 패널의 광학 특성을 개선하는지를 확인하기 위해 active particle-loading method를 이용하지 않고 전자잉크를 주입한 패널과 active particle-loading method를 이용하여 전자잉크를 주입한 패널의 반사율과 응답 시간을 측정하여 비교 분석하였다. 반사율 측정용 반사율 측정장비인 RT-200 (쉴레이앤씨테크)을 이용하여 측정하였다.

측정 방법은 3전극형 전자종이 디스플레이 패널에 1~3 V의 전압을 0.1 V 간격으로 상부전극과 2개의 하

부전극에 모두 전압을 인가하여 백색 및 흑색 입자를 분리시켜 상부기판과 하부기판에 위치하게 한 후 상부기판에서 나타내는 이미지의 반사율을 측정하였다. 응답 시간의 측정은 응답 시간 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 응답 시간 측정 시스템은 (주)이엘피 ELP Corporation에 의뢰하여 주문/제작 하였다. 응답 시간 측정을 위해 반사율 측정과 동일 방법으로 패널을 구동하면서 응답 시간을 측정하였으며, 이때 하부전극에서 상부전극까지 입자가 이동하는 시간을 측정하였다. 응답 시간 측정 시스템은 적분구에서 광을 전자총이 패널에 입사하고 구동한 전자총이 패널의 입자가 이동하는 시간을 실시간으로 적분구에 있는 포토다이오드가 이를 감지하여 오실로스코프(agilent technologies-DSO-X 2022A)에 데이터화한다. 실험은 active particle-loading method 유무에 따른 광학 특성의 비교가 필요하기 때문에 충전전압을 0~3 V 구간에서 서로 다르게 한 4개의 샘플을 제작하여 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응답 시간 및 반사율 측정 결과

그림 5(a)는 active particle-loading method에 따른 반사율을 그래프로 보였다. 샘플 1부터 샘플 4까지 0~3 V의 active particle-loading method로 제작한 패널을 나타낸다. 그림 5(a)에 #1~#4는 샘플 1~4를 나타낸다. 충전전압이 0 V인 샘플 1(#1)의 최대 백색 반사율은 19.8%로 충전전압이 3 V인 샘플 0 V의 충전전압으로 잉크를 주입한 샘플은 #1, 1 V의 충전전압으로 주입한 샘플은 #2, 2 V의 충전전압으로 주입한 샘플은 #3, 그리고 3 V의 충전전압으로 잉크를 주입한 샘플은 #4로 나타냈다. 4(#4)의 최대 백색반사율이 24.7%와 비교했을 때 약 5%의 차이를 보였으며, 흑색 반사율은 약 0.5% 정도의 차이를 보였다. 이는 충전전압이 높아짐에 따라서 하부전극이 입자를 끌어당기는 힘이 강해지고 이에 따라 셀 안의 전자잉크의 농도가 짙어지며, 농도가 짙어짐에 따라 패널 구동 시 상부기판에 위치하는 입자의 양이 많아지고 빈 공간이 최소화되면서 패널의 반사율이 향상된 것이다. 또한, active particle-loading method를 이용하여 전자잉크를 주입하면 전하를 잃거나 과충전 상태인 대전입자들이 셀 내부에 위치하지 않게 되는 필터링 역할을 하기 때문에 운동하지 않는 입자들이 감소하며, 입자응집현상을 최소화한

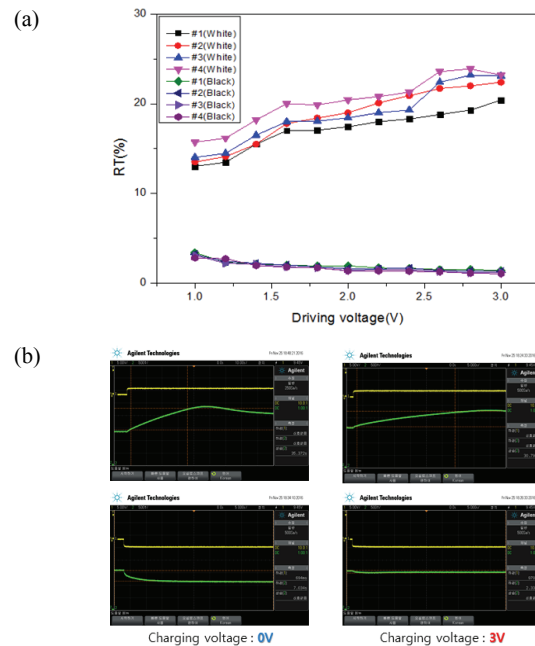


Fig. 5. Electro-optical properties. (a) Reflection rate according to various injection voltages and (b) response time.

다. 반대로 충전전압 없이 전자잉크를 주입하거나 낮은 충전전압으로 주입했을 경우에는 셀 자잉크를 주입한 패널의 경우에는 하부기판 전극 표면에 부착된 대전입자들이 운동하기 시작한 전압이 1.2 V로 차이를 보였다. 이는 응답 시간 측정 데이터에서도 확인할 수 있다.

응답 시간 측정 결과 active particle-loading method를 이용하지 않은 패널의 rising time은 35.37s, falling time은 7.03s로 측정되었으며, 충전전압을 3 V 인가하여 전자잉크를 주입한 패널의 rising time은 30.78s, falling time은 2.33s로 약 5초 정도의 응답 시간 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 차이를 보인 것은 각 셀에 주입된 전자잉크의 농도 때문이다. 충전전압을 인가하지 않은 경우 각 셀의 농도를 같게 전자잉크를 주입하는 것이 불가능하기 때문에 한 셀에 주어진 공간에 비해 많은 입자가 주입되거나 적은 입자가 주입되며, 많은 입자가 주입된 셀에서는 입자들끼리 서로 운동을 방해하기 때문에 패널의 응답 시간을 저하시키는 원인이 된다. 이때 입자들끼리 충돌이 발생하여 전하를 잃거나 과충전 되는 입자가 발생하고 이 입자들이 서로 응집하는 현상이 발생한다.

입자 응집 현상은 전자총이 패널을 구동할 경우 간섭을 발생시켜 반사율과 응답 시간 저하에 영향을 미치며, 이미지 구현 시 완전한 색을 표현하는 데 한계를

갖는다. 하지만 active particle-loading method를 이용하여 전자잉크를 충전한 패널의 경우 각 셀에 주입된 전자잉크의 농도가 고르게 분포하여 입자들 간의 충돌을 최소화하며, 입자들이 전하를 잃거나 과충전 되는 현상이 감소한다. 따라서 반사율과 응답 시간을 저하시키지 않으며, 입자들의 응집 현상이 최소화되어 이미지 구현 시 상반되는 색의 간섭을 최소화한다.

3.2 3전극형 전자종이의 컬러 구현 결과

그림 6은 충전전압을 인가하지 않은 패널과 충전전압을 3 V 인가한 패널을 구동하여 컬러를 구현한 모습을 현미경으로 관찰한 모습이다. 그림 6(a)는 충전전압을 인가하지 않은 패널로 백색 이미지를 구현한 사진을 보면 부분적으로 검은색 반점이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 각 셀에 전자잉크의 농도가 고르게 분포하지 못해 공간보다 많은 양의 입자가 주입된 셀에 입자들이 뭉쳐 있는 입자 응집 현상이 발생한 것이다. 흑색 이미지를 표현한 모습에도 마찬가지로 백색 반점들이 발생하여 흑색 이미지를 표현하는 데 방해하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 청색을 나타낸 모습에서도 백색과 흑색 입자들 때문에 청색이미지가 탁해진 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 그림 6(b)에서는 백색과 흑색, 그리고 청색 이미지를 표현하는 데 상반되는 입자들의 간섭이 최소화되어 그림 6(a)에 비해 이미지를 선명하게 나타내고 있다. 이는 반사율 결과와 비례한 것으로 입자가 응집된 패널의

반사율이 그렇지 않은 패널의 반사율보다 저하되는 것을 확인할 수 있다. 응답 시간을 측정한 데이터도 마찬가지로 입자가 뭉친 셀이 발생한 패널의 입자들이 운동하는 응답 시간이 저하되는 것을 볼 수 있다. Active particle-loading method를 이용하여 전자잉크를 주입한 패널의 각 셀에 입자의 농도가 고르게 분포하여 입자들이 서로 운동을 방해하거나 뭉치지 않고 운동하는 것으로 판단된다. 그림 7은 그림 6에서 보인 패널을 현미경이 아닌 외부에서 본 모습이다. 그림 7(a)는 충전전압을 인가하지 않은 패널의 컬러구현을 관찰한 것이며, 그림 7(b)는 3 V의 충전전압을 인가하여 패널의 컬러구현을 한 모습을 관찰한 것이다. 위에서부터 순서대로 백색, 흑색, 청색을 나타낸 모습으로 충전전압을 인가한 패널의 이미지가 상대적으로 더 선명한 이미지를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 위의 실험결과들에 의하면 3전극형 전자종이 디스플레이에서만 활용이 가능한 active particle-loading method는 전자잉크를 패널의 각 셀에 전자잉크의 농도를 균등하게 분포시키는 것이 가능한 방법이며, 이는 active particle-loading method를 이용하지 않은 패널과 비교할 경우 상대적으로 광학 특성이 개선되는 것을 확인하였다. 또, 전압을 조절하여 각 셀에 주입되는 전자잉크의 농도를 조절하는 것이 가능하기 때문에 이미지의 투명도 조절이 가능하며, 인가하는 전압에 따라서 대조비를 조절하는 것도 가능하다고 판단된다. 예를 들어, 양쪽 하부전극 중

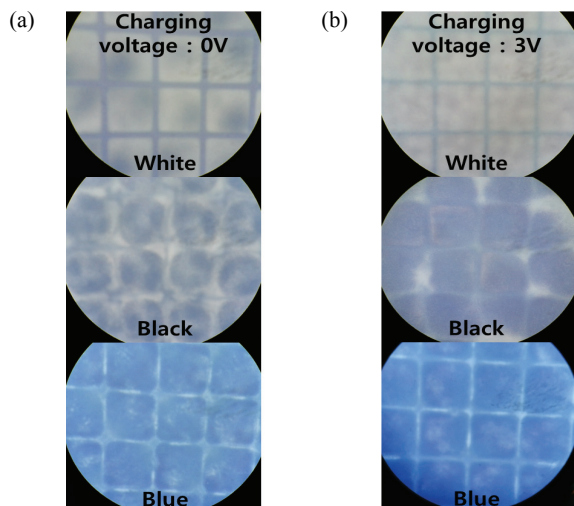


Fig. 6. Microscope photograph according to injection method. (a) Reported method and (b) active particle-loading method.

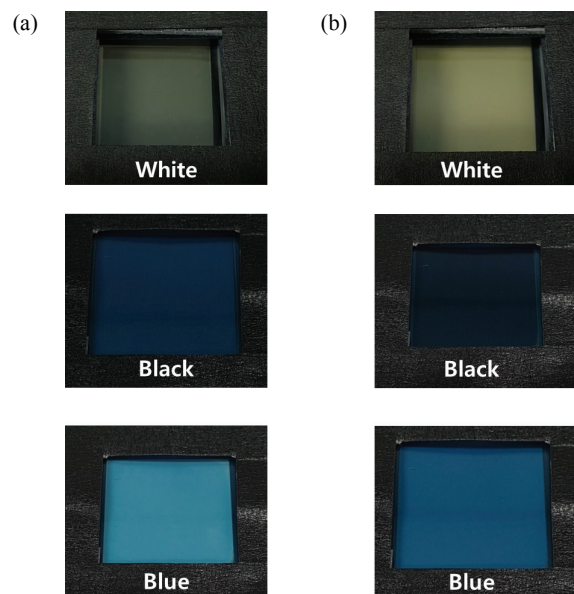


Fig. 7. Color images of fabricated e-paper panel. (a) Using reported method and (b) using Active particle-loading method.

한 개의 전극에는 +3 V를 다른 한 개의 전극에는 -1 V를 인가하여 전자잉크를 주입하는 식으로 대조비를 자유롭게 조절할 수 있다.

4. 결론

3전극형 전자종이 디스플레이 패널의 전기 및 광학 특성에 직접적인 영향을 주는 요소인 전자잉크의 농도는 주입하는 방법에 따라서 패널의 전기 및 광학 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 기존의 전자잉크 충전방법을 보완하고 패널의 광학 특성을 개선하기 위한 방법으로 active particle-loading method를 제안하였으며, active particle-loading method가 패널의 전기 및 광학 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 충전전압을 다르게 한 4개의 샘플을 제작하여 실험을 진행하였다. 실험은 반사율 측정과 응답속도 측정을 실시하였으며, active particle-loading method를 이용한 패널이 active particle-loading method를 이용하지 않은 패널과 비교할 경우 상대적으로 광학 특성이 개선되고 컬러 구현 시 이미지가 선명하게 표현되는 것을 확인하였다. 이로써 active particle-loading method를 이용한 전자잉크 주입방법은 패널의 광학 특성을 개선시킬 수 있음을 확인하였고 전자잉크의 농도를 조절하여 입자를 주입할 수 있음을 확인하였다. 추후 3개 이상의 3개의 하부전극을 형성한 패널에 active particle-loading method를 이용하여 전자잉크를 주입하는 경우 전기 광학적 특성을 평가하고 투명디스플레이 연구에 적용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 청운대학교 학술연구 조성비 및 2017년도 한국연구재단의 중견연구사업 지원을 받아 연구되었음(No.2017R1A2B1010310).

REFERENCES

- [1] R. Sakurai, S. G. Lee, W. K. Cho, B. G. Ryu, and M. B. Song, *IMID Digest*, **5**, 423 (2005).
- [2] S. W. Park, K. Y. Kwon, S. K. Chang, and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **22**, 844 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2009.22.10.844>]
- [3] I. H. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **10**, 1175 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.6.1175>]
- [4] C. W. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 691 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.9.691>]
- [5] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 669 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.8.669>]
- [6] S. I. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 109 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.109>]
- [7] Y. K. Shin and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 21 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.1.21>]
- [8] D. J. Lee, B. E. Park, and Y. C. Kim, *J. Disp. Technol.*, **8**, 534 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2012.2199280>]
- [9] S. I. Lee, Y. C. Hong, and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 231 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.4.231>]
- [10] D. J. Lee, Y. M. Oh, S. W. Park, B. E. Park, and Y. C. Kim, *J. Disp. Technol.*, **8**, 361 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2012.2190135>]
- [11] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.1.48>]
- [12] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Disp. Technol.*, **9**, 972 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2013.2273125>]
- [13] H. L. Kang, C. A. Kim, S. I. Lee, Y. K. Shin, Y. H. Lee, Y. C. Kim, and B. K. Ju, *J. Disp. Technol.*, **12**, 747 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2016.2524023>]