

투명 디스플레이로써 활용 가능한 다수전극형 전자종이 필름 제안

이상일¹, 홍연찬¹, 김영조² 

¹ 인천대학교 전자공학과

² 청운대학교 전자공학과

Suggestion of Multi-Electrode Type Electronic Paper Film to Can be Used as a Transparent Display

Sang-il Lee¹, Youn-Chan Hong¹, and Young-cho Kim²

¹ Department of Electronic Engineering, Incheon national University, Incheon 22012, Korea

² Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 22100, Korea

(Received February 14, 2019; Revised March 21, 2019; Accepted April 8, 2019)

Abstract: A multiple-electrode-type electronic paper film can implement a single color and control the transparency, as it has multiple electrodes in one cell. Therefore, it can be used as a transparent display. In this paper, we explain the structure and driving method of a transparent electronic paper display, and then propose a control method of transmittance. Subsequently, we verify the theory by measuring the transmittance via experiment. Thus, by changing the manner of applying the voltage to three lower electrodes and one upper electrode, transmittance in eight cases could be realized. It was confirmed that the transmittance derived from the experiment could be controlled from a minimum of 6.75% to a maximum of 71.18%.

Keywords: Multi-electrode type e-paper, Color electronic ink, Transparent display, Transmittance, Driving voltage

1. 서론

평판 디스플레이의 등장으로 디스플레이 시장의 급격한 성장을 이루었지만, 새로운 디스플레이 기술 개발의 고갈로 성장이 정체되어 있다. 정체된 시장을 활성화하기 위해 플렉시블 디스플레이와 투명 디스플레이에 대한 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다 [1-3]. 이에 따라 플렉시블 디스플레이와 투명 디스플레이로 개발이 가능한 디스플레이 소자에 관한 관심이 증가하였으며 [4-7], 전자종이 디스플레이는 두 조건을 모두

충족할 수 있는 차세대 디스플레이이다 [8,9]. 전자종이 디스플레이는 높은 쌍안정성으로 낮은 소비전력을 가지고 있으며, 종이와 가장 비슷한 가독성을 가지고 있다. 또한, 2장의 필름 사이에 전자잉크를 주입하는 형태이기 때문에 디스플레이의 두께가 얇고 가벼워 다양한 용도의 디스플레이로 개발하는 것이 용이하다 [10,11]. 특히 2장의 필름 사이에 주입하는 전자잉크의 성질과 형태에 따라 용도에 맞는 디스플레이로 개발하는 것이 가능한데, 이러한 특징을 이용한 전자종이 투명 디스플레이는 투과도 제어가 가능한 투명 디스플레이의 형태로 개발하는 것이 가능하다 [12-15].

투명 디스플레이는 이미지를 표시하는 화면 뒤의 배경이 비춰 보이는 디스플레이로서 개발 초기에는 투명한 유리에 이미지를 투사하는 방식으로 구현하였으나, 현재는 디스플레이 자체에 화면을 표시하면서 투명한

✉ Young-cho Kim; yckim@chungwoon.ac.kr

화면을 구현하는 방식으로 개발되고 있다. 그림 1은 디스플레이에 직접 화면을 표시하는 투명 디스플레이의 종류와 구동 방법을 나타낸 평면도다. 그림 1(a)는 투명 LCD로, 그림에서 보이는 바와 같이 편광판 사이에 TFT와 컬러필터 등 6겹의 층을 이루고 있다. 투명 LCD는 자체적으로 발광이 불가하여 백라이트를 사용하기 때문에 투명 디스플레이로 사용하기 위해서는 측면에 백라이트를 배치해야 한다. 또한, 투과도가 6~7%에 머물기 때문에 투명 디스플레이로 활용하기가 어렵다. 그림 1(b)는 OLED 투명 디스플레이로 투과도는 70~80%이며, 총 5개 층으로 이루어졌다. 투명 OLED는 black을 구현할 수 없으며, 밝은 환경에서 시인성이 저하되는 한계를 가지고 있다. 그림 1(c)는 다수전극형 전자종이 디스플레이를 이용한 투명 디스플레이로 투과도를 5~70%까지 선형적으로 제어하는 것이 가능하며 2장의 필름 사이에 전자잉크가 위치한 형태로 구조가 간단하다. 또한, 5 V 이하의 구동전압을 가지고 있어 소비전력이 낮은 장점이 있다. 이러한 다수전극형 전자종이는 투과도를 제어하여 빛의 투과와 차단이 가능하며 이는 보안필름, 스마트윈도우 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.

본 연구에서는 투명 디스플레이로서 활용이 가능한 다수전극형 전자종이 디스플레이의 구조를 제안하고 제작 방법 및 구동 방법을 제안하고자 한다.

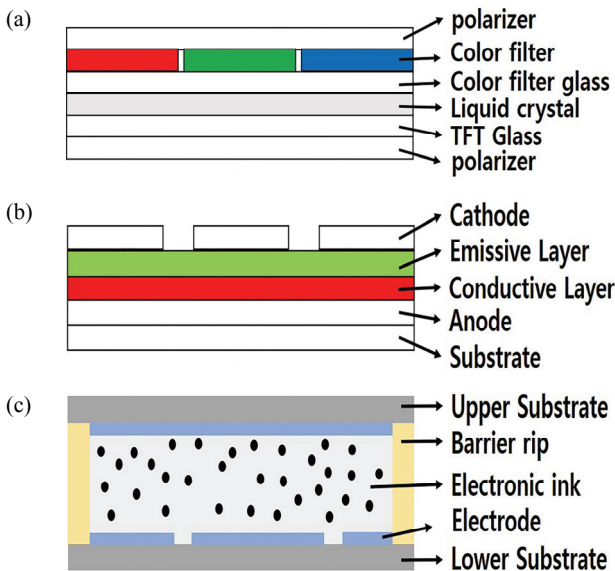


Fig. 1. Types of transparent displays using flat panel displays. (a) LCD transparent display, (b) OLED transparent display, and (c) multi-electrode type electronic paper transparent display.

2. 실험 방법

2.1 다수전극형 전자종이 필름 제작

투명 디스플레이로서 다수전극형 전자종이를 활용하는 데 있어서 가장 큰 장점은 투과도 제어가 가능하다는 것이다. 다수전극형 전자종이의 투과도 제어는 하부 기판에 위치한 다수개의 하부전극을 이용한다. 또한, 흑색입자와 유체를 혼합한 one particle 전자잉크를 주입하여 하부전극에 전압을 인가하는 방법에 따라 투과도를 제어하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 하부에 3개의 전극을 형성하기 위해 패널을 설계하였다. 그림 2는 다수전극형 전자종이 필름의 하부기판에 형성되는 하부전극의 설계 레이아웃이다. 1개의 셀에 3개의 전극이 있는데 3개의 전극은 구분을 위해 적색(1번 전극), 청색(2번 전극), 녹색(3번 전극)으로 표현하였다. 그림 2를 보면 1번 전극, 2번 전극, 그리고 3번 전극의 면적을 다르게 설계하였는데 이는 다양하게 투과도를 제어하기 위함이다. 다수전극형 전자종이 필름 한 셀의 크기는 $230 \mu\text{m}^2$ 이며, 1번 전극의 면적은 $45 \mu\text{m}^2$, 2번 전극은 $85 \mu\text{m}^2$, 그리고 3번 전극은 $20 \mu\text{m}^2$ 로 설계하였으며, 전극 간의 간격은 $20 \mu\text{m}$ 로 동일하게 하였다. 설계한 도면을 바탕으로 다수전극형 전자종이 필름을 제작하기 위해 상부기판은 ITO glass를 사용하였으며, 하부기판은 설계도면대로 제작하였다. 하부전극은 ITO 투명 전극을 사용하였고 셀을 나누기 위한 격벽은 SU-8을 사용하여 제작하였다.

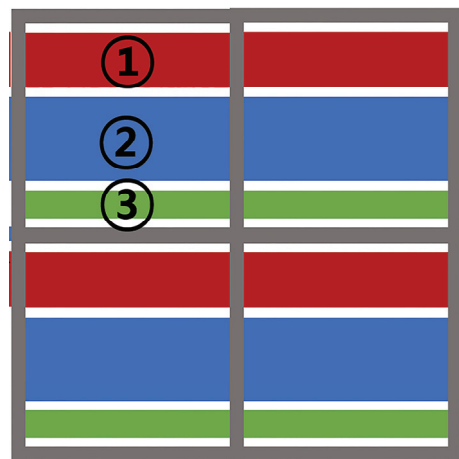


Fig. 2. Electrode placement of multi-electrode type electronic paper display.

2.2 투과도 제어 및 측정 방법

앞서 언급한 바와 같이 다수전극형 전자종이 필름의 투과도를 제어하기 위하여 3개의 하부전극 크기를 모두 다르게 하여 패널을 제작하였다. 다수전극형 전자종이 필름의 투과도 제어 방법은 흑색입자와 유체를 혼합한 전자잉크를 주입한 패널의 하부전극에 인가하는 전압에 따라 입자들의 위치를 다르게 하는 방법을 사용한다. 그림 3은 다수전극형 전자종이 필름의 투과도 제어방법을 나타낸 단면도다. 먼저 그림 3(a)는 3개의 하부전극에 모두 +1 V 인가하여 흑색입자들을 하부기판에 위치시킨 모습이다. 3개의 하부전극이 형성된 면적으로는 흑색입자들이 도포되어 있기 때문에 전극과 전극 사이 공간을 제외한 나머지 부분에는 빛이 투과할 수 없다. 그림 3(b)는 면적이 가장 큰 2번 전극에만 전압을 인가하여 흑색입자를 2번 전극 위에만 위치하게 하고 하부기판의 나머지 면적으로는 빛을 투과하게 한 것이다. 그림 3(c)는 1번 전극에만 전압을 인가하여 흑색입자를 위치시켜 1번 전극이 위치한 면적을 제외한 나머지 하부기판 면적에서는 빛이 투과할 수 있으며, 그림 3(d)는 3번 전극을 제외한 나머지 부분에 빛이 투과할 수 있다. 이와 같은 방법으로 패널의 투과도를 제어하는 것이 가능하며, 최대 16가지의 투과도를 제어할 수 있다. 이는 1번, 2번, 그리고 3번 전극의 면적을 달리하여 패널을 제작하였기 때문에 가능한 것이다.

투과도 제어가 가능한 다수전극형 전자종이 필름의 투과도를 측정하기 위해 광학 측정 장비인 F2-RT를 사용해 측정을 진행하였다. 그림 4는 F2-RT의 측정방법을 나타낸 모식도이다. 그림 4(a)는 F2-RT의 투과도 측정원리를 나타낸 그림으로 샘플을 측정판 위에 올려

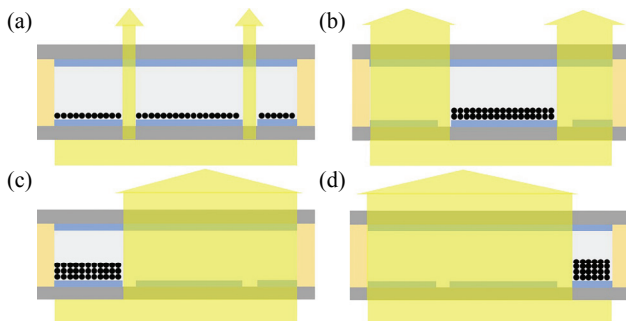


Fig. 3. Method for controlling the transmittance of a multiple electrode type electronic paper film. (a) Sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

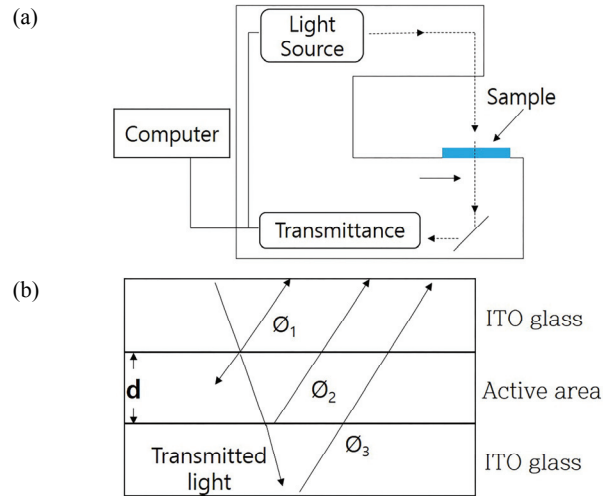


Fig. 4. How to measure transmittance. (a) Transmittance measurement system and (b) principle of transmittance measurement.

놓고 광원을 투사하면 샘플을 투과한 광을 수광부에서 감지하여 컴퓨터에서 수치상으로 나타낸다. 그림 4(b)는 샘플에 투사된 입사광이 투과되기까지의 과정을 보인 것이다. 광원이 샘플에 입사되면 상부 ITO glass에서 active area로 광이 투과되는 경계 면에서 굴절하여 반사되는 θ_1 이 발생한다. 이때 θ_1 과 흡수되는 광을 제외한 나머지 광은 경계 면을 지나 active area로 투과되며 이 과정에서 흡수되는 흡수광과 active area와 하부 ITO glass에서 굴절하여 반사되는 θ_2 가 추가로 발생한다. 샘플에 입사된 광이 상부기판과 하부기판을 거치는 과정에서 반사와 흡수된 광을 제외한 나머지 광이 투과되어 그 광원의 양을 측정한다. 본 연구는 다수전극형 전자종이 필름에 전압을 인가하여 입자를 운동시키는 구동 방법에 따라 투과율을 제어하는 것이 가능한지 확인하기 위해 샘플의 투과율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 투과도를 다르게 한 다수전극형 전자종이 필름의 단면도와 투과도 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 3개의 하부기판에 모두 +1 V를 인가하여 흑색입자를 하부기판 전체에 고르게 분포한 모습으로, 투과율 측정 결과 6.75%로 측정되었다. 그림 5(b)는 하부전극 중 가장 큰 면적의 가운데 전극에만 +1 V를 인가하고 다른 전극은 접지한 모습이며, 투과율은 13.5%로 측정되었다. 또한, 그림 5(c)는 두 번째로 면

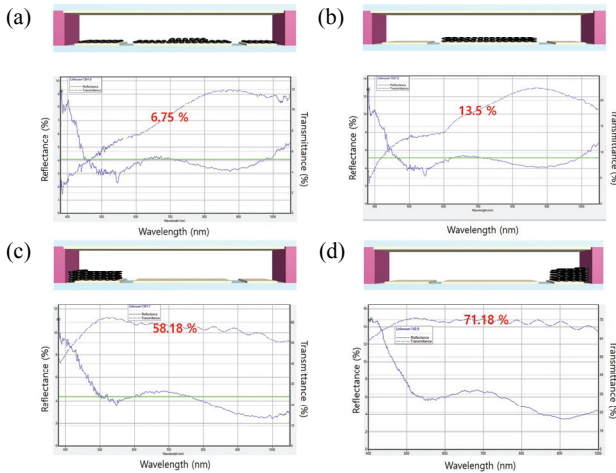


Fig. 5. Transmittance measurement result. (a) Sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

적이 넓은 왼쪽 전극에만 +1 V를 인가해 58.18%의 투과율이 측정되었으며, 그림 5(d)는 가장 면적이 좁은 하부전극에만 +1 V를 인가하여 71.18%의 투과율이 측정되었다. 이는 하부기판 전극 전체에 전압을 인가한 그림 5(a)와 비교할 경우 약 65%의 투과율 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 하부기판에 위치한 흑색입자의 분포도가 원인이다. 흑색입자가 하부기판에 분포한 분포도에 따라 필름의 개구율이 정해지며, 개구율에 따라 투과율이 정해진다. 그리고 각 전극의 면적을 다르게 제작했기 때문에 어떤 전극에 전압을 인가하느냐에 따라 개구율과 투과율이 정해지기 때문에 필름의 투과율을 원하는 대로 제어하는 것이 가능하다.

표 1은 필름의 개구율을 계산하여 나타낸 것으로 3개의 전극에 전압 인가 유무에 따른 개구율의 변화를 보인 것이다. 앞서 그림 2에 보인 바와 같이 1~3번 전극으로 3개의 전극을 구분하여 나타내었으며, (a)~(d)는 그림 5의 (a)~(d)를 나타낸 것이다. 3개의 전극 면적을 다르게 하여 모두 8가지 경우의 다른 개구율을 가지고 있기 때문에 투과율도 8가지 경우로 나타내는 것이 가능하다. 표 1에서 보인 개구율과 투과율이 같지 않은 이유는 광이 샘플을 투과하면서 발생하는 흡수광과 반사광 때문이다. 개구율과 투과율의 실제 측정값은 다르지만 같은 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전극의 수나 면적에 따라 개구율이 달라지며, 이에 따라 투과율이 달라진다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 다수전극형 전자종이 필름 제작 시 전

Table 1. Aperture ratio according to driving method.

	1 st electrode (45 μm)	2 nd electrode (80 μm)	3 rd electrode (20 μm)	Aperture ratio (%)	Transmittance (%)
(a)	on	on	on	34.78	6.75
(b)	off	on	off	56.52	13.5
(c)	on	off	off	67.39	58.18
(d)	off	off	on	89.13	71.18
-	off	on	on	45.65	
-	on	on	off	67.39	
-	on	off	on	78.26	
-	off	off	off	100	

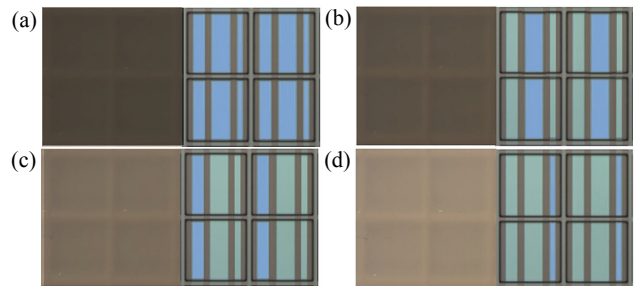


Fig. 6. Microphotograph of sample with different transmittance. (a) Sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

극의 수나 면적을 다르게 하고 개구율 계산을 통해 샘플을 제작하면 투과율을 원하는 대로 제어하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전극에 전압을 인가하여 구동하는 방법에 따라 개구율을 제어하는 것이 가능하며, 투과율 또한 제어 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 샘플을 구동하여 그림 5(a)~(d)의 상태를 현미경을 통해 관찰한 모습이다. 그림의 좌측은 다수전극형 전자종이 필름의 상부기판에서 관찰한 모습이며, 우측은 하부기판에서 관찰한 모습이다. 그림 6(a)는 3개의 전극에 모두 전압을 인가한 상태로 하부기판에 3개의 전극에 흑색입자들이 하부기판에서 관찰되었기 때문에 상부기판에서는 불투명한 색이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 투과율이 6.75%의 모습으로 반대편의 이미지를 확인하기 어려운 수준의 투과율이다. 그림 6(b)는 면적이 80 μm²인 2번 전극으로 3개의 전극 중 가장 큰 면적의 전극에만 전압을 인가한 샘플의 모습으로 하부기판 가운데에만 흑색입자



Fig. 7. The image of the opposite side was observed by varying the transmittance. (a) Sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

가 위치한 것이 확인되며, 상부기판에서는 그림 6(a)와 비교할 경우 약간 투명한 것을 확인할 수 있다. 이는 투과율이 13.5%인 경우의 모습으로 반대편이 약간 비치는 정도의 투과율이다. 그림 6(c)는 면적이 $45 \mu\text{m}^2$ 인 1번 전극에만 전압을 인가하여 샘플을 구동한 모습으로 투과율이 58.18%로 반대편의 이미지가 식별 가능한 정도의 투과율을 가지고 있다. 또한, 그림 6(d)는 면적이 $20 \mu\text{m}^2$ 로 가장 좁은 3번 전극에만 전압을 인가한 상태로 투과율이 71.18%로 측정되며, 반대편이 잘 보일 정도의 투과율이다. 그림 7은 전자종이 필름의 투과율을 눈으로 확인하기 위해 이미지(KIEEME)를 인쇄하고 그 위에 전자종이 디스플레이 필름을 올려놓고 투과율에 따라 인쇄한 이미지가 어떻게 관찰되는지 확인한 모습이다. 또한, 관찰된 이미지를 촬영하여 matlab을 이용해 이미지의 엣지를 검출하였다. 그림 7(a)의 경우 전자종이 디스플레이 필름의 투과율이 6.75%로 이미지의 엣지검출이 뚜렷하게 되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 그림 7(d)의 경우 투과율이 71.18%로 이미지의 엣지검출이 비교적 뚜렷하게 된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

투과도 제어가 가능한 다수전극형 전자종이 필름은 하부기판에 위치한 면적이 $20 \mu\text{m}^2$, $45 \mu\text{m}^2$, $80 \mu\text{m}^2$

로 다른 3개의 전극에 전압을 인가하여 구동하는 구동 방법에 따라 최대 8가지 경우의 투과율 제어가 가능하다. 다수전극형 전자종이 필름의 투과율 제어를 확인하기 위해 투과율을 측정한 결과 약 6~71%까지의 투과율 제어가 가능한 것을 확인하였다. 이는 흑색입자가 하부기판을 차지하는 면적에 따라 투과율이 달라지는 것이며, 다수전극형 전자종이 필름은 흑색입자가 하부기판을 차지하는 면적을 제어하는 것이 가능하므로 투과율을 원하는 대로 제어하는 것이 가능하다. 또한 현미경 사진과 관찰을 통해 투과율의 차이를 직접 확인하였다. 현미경 사진을 통해 하부기판을 관찰한 결과 하부전극에 인가하는 전압에 따라 흑색입자의 위치가 달라졌으며, 흑색입자의 위치에 따라 샘플의 투과도가 달라지는 것을 확인하였다. 본 연구에 사용된 다수전극형 전자종이 필름은 하부기판에 3개의 전극을 형성하여 투과율을 제어했기 때문에 최대 8가지 경우의 투과율 제어가 가능한데, 하부기판의 전극 수에 따라 더 많은 경우의 투과율 제어가 가능하다. 향후 연구를 통해 하부기판에 4개 이상의 전극을 형성하여 투과율 제어 실험이 필요하며, 다수전극형 전자종이 필름에 컬러 잉크를 주입하여 컬러 투과율 제어 필름의 연구가 필요하다.

ORCID

Young-cho Kim

<https://orcid.org/0000-0002-2813-3038>

감사의 글

본 연구는 2018년도 청운대학교 학술연구 조성비 및 한국연구재단(2017R1A2B1010310) 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] R. Sakurai, S. G. Lee, W. K. Cho, B. G. Ryu, and M. B. Song, *IMID Digest*, **5**, 423 (2005).
- [2] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J. S. Yeo, and T. Koch, *J. Soc. Inf. Disp.*, **19**, 129 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1889/jsid19.2.129>]
- [3] H. Koga, M. Nogi, N. Komoda, T. T. Nge, T. Sugahara, and K. Sukanuma, *NPG Asia Mater.*, **6**, e93 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/am.2014.9>]
- [4] W.K.T. Coltro, D. P. de Jesus, J.A.F. da Silva, C. L. do

- Lago, and E. Carrilho, *Electrophoresis*, **31**, 2487 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1002/elps.201000063>]
- [5] H. K. Park, *J. Korea Des. Knowl.*, **28**, 33 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.17246/jkdk.2013..28.004>]
- [6] J. M. Sim and S. H. You, *Journal of Integrated Design Research*, **2**, 9 (2016).
- [7] B. S. Moon and S. H. You, *Archives of Design Research*, **2**, 183 (2014).
- [8] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. Huh, and Y. C. Kim, *Dig. Tech. Pap. - Soc. Inf. Disp. Int. Symp.*, **42**, 1523 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3621149>]
- [9] 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>]
- [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] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Disp. Technol.*, **9**, 972 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jdt.2013.2273125>]
- [12] Y. K. Shin and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 524 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.8.524>]
- [13] 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>]
- [14] S. I. Lee, Y. C. Hong, and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 171 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.3.171>]
- [15] 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>]