

# 대전입자형 디스플레이에서 전자 잉크 주입 방법에 따른 전류 및 광특성 분석

안형진, 김영조 

청운대학교 전자공학과

## Analysis on Current and Optical Characteristics by Electronic Ink Loading Method in Charged Particles Type Display

Hyeong-Jin An and Young-cho Kim

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

(Received November 7, 2019; Revised December 18, 2019; Accepted December 19, 2019)

**Abstract:** We analyzed the drift current by charged particles according to the loading methods applied into a closed cell by electronic ink at a reflective-type display panel using an electrophoretic mechanism. For this experiment, various panels were fabricated with injection voltages for electronic ink taking values in the range  $-4\sim 0$  V. The size of each cell was  $220\ \mu\text{m} \times 220\ \mu\text{m}$  and height of the barrier rib was  $54.28\ \mu\text{m}$ . The electronic ink was fabricated by mixing electrically neutral fluid and single-charge white particles. Drift current was measured by moving charged particles. A biasing voltage of 6 V was applied to the display panel. As a result, the drift current was proportional to the injection voltage for electronic ink, but it decreased in case of an injection voltage above  $-3$  V. Our experimentation ascertained that the concentration of charged particles injected into closed cells is controlled by the injection voltage and the selective injection of charged particles above movable  $q/m$  is possible.

**Keywords:** Barrier ribs type electronic paper, Drift current, Electrophoresis, Charged particle

### 1. 서론

최근 스마트폰과 태블릿 PC의 보급형 제품이 많이 출시되어 소비자의 부담감이 줄었다. 이로 인해 스마트폰과 태블릿 PC로 영상을 보거나 SNS를 즐기는 모습은 남녀노소 어디서든 볼 수 있다. 이러한 스마트폰과 태블릿 PC는 대부분 발광형 디스플레이를 사용한다. 발광형 디스플레이는 빛을 인간에 눈에 직접 투사하여 정보를 표시하는 방식이다. 이러한 특징은 그림과 문자

를 종이에 표현하던 인간에게는 안구의 피로도를 주는 단점이 있다.

전자종이는 종이의 특징을 전자 디스플레이에 접목한 장치로 반사형 디스플레이이다 [1,2]. 반사형 디스플레이는 외부 광원을 반사하여 정보를 표시하는 장치로 인간이 사용하던 종이와 가장 비슷한 특징을 가지고 있다. 반사형 디스플레이는 직접 눈에 빛을 투사하지 않기 때문에 피로도가 적은 장점이 있다 [3,4]. 이러한 특징으로 인해 옥외나 실내가 밝은 곳에서 활용성이 우수하다 [5].

전자종이는 상부전극을 형성한 상부기판과 하부전극을 형성한 하부기판 사이의 공간에 전하를 띤 입자인 대전입자를 주입한 후 전기적 신호에 따라 대전입자를 운동시켜 정보를 표시하는 전기영동방식을 주로 사용

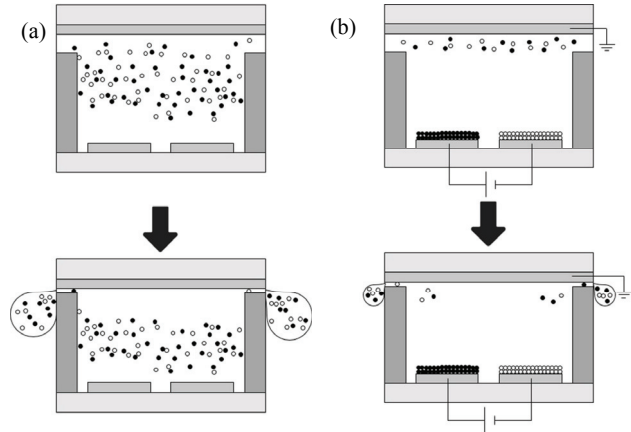
✉ Young-cho Kim; [ykim@chungwoon.ac.kr](mailto:ykim@chungwoon.ac.kr)

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다 [6,7]. 전기영동은 전계의 영향권 안에 있는 대전 입자가 상반되는 극성을 띤 전극으로 이동하는 현상을 말한다. 전기영동을 이용한 대전입자형 디스플레이는 대전입자의 컬러나 유체의 컬러를 이용해 정보를 표시한다. 예를 들어 양전하를 띤 백색 대전입자와 음전하를 띤 흑색 대전입자가 전기적으로 중성인 투명 유체와 패널 내에 주입된 경우 백색을 구현하고자 할 때 백색 대전입자와 상반되는 극성인 음의 전압을 상부전극에 인가하고 하부전극은 접지한다. 이에 따라 백색 대전입자는 전계의 영향을 받아 상부전극에 부착되고 흑색 대전입자는 하부전극에 부착되어 외부광이 상부기판에 조사되면 패널이 백색으로 보인다. 반면, 흑색을 구현하고자 할 때는 흑색 대전입자와 상반되는 극성인 양의 전압을 상부전극에 인가하고 하부전극은 접지한다. 이에 따라 흑색 대전입자가 상부전극에 부착되고 백색 대전입자가 하부전극에 부착되어 외부광이 상부기판에 조사되면 패널이 흑색으로 보인다 [8,9]. 이러한 대전입자의 전계에 의한 운동은 패널 내의 표동전류를 발생시키고 반사율의 변화를 가져온다 [10].

대전입자형 전자종이는 capsule형과 본 연구에서 사용된 격벽형이 있다. 두 방식은 대전입자를 패널 내에 골고루 분산시키기 위한 방법의 차이로 capsule형은 하부기판과 상부기판 사이에 대전입자를 주입한 capsule이 있고 격벽형은 격자무늬 격벽을 형성한 하부기판과 상부기판 사이에 대전입자를 주입한 것이다. Capsule형 전자종이는 이미 capsule에 대전입자를 주입한 상태이기 때문에 대전입자의 농도는 capsule을 만드는 과정에서 결정된다 [11]. 격벽형 전자종이는 전자잉크를 혼합하는 과정에서 대전입자의 농도가 결정되기도 하지만 주입하는 방법에 따라 광특성을 개선할 수 있고 대전입자의 농도를 조절할 수 있다.

격벽형 전자종이에서 대전입자를 패널 내에 주입하는 방법으로는 전자잉크를 하부기판에 도포 후 상부기판을 하부기판에 덮는 방식이 있으며, 이를 그림 1(a)에 보였다. 이때 상부기판을 하부기판에 덮는 과정에서 전자잉크의 유출이 있다. 이로 인해 유체 내에 부유하고 있는 대전입자도 패널의 외부로 유출된다. 최근 그림 1(b)와 같은 공정을 이용하여 전자잉크 내 대전입자 농도를 제어하는 active particle-loading method(APLM)이 연구되었다 [12]. APLM은 격벽형 전자종이에서 전자잉크를 주입할 때 하부전극과 상부전극에 전압을 인가하여 전자잉크를 하부기판에 주입하는 방식이며, 이를 그림 1(b)에 보였다. 기존의 APLM은 상반되는 전하를 띤 두 종류의 대전입자를



**Fig. 1.** Injection method of electronic ink at three-electrode type e-paper. (a) Reported method and (b) active particle loading method.

하부기판에 충전하기 위해 하부에 전극이 두 개 있고 상부에 전극이 한 개 있는 3전극형 전자종이 디스플레이에서 행해지는 방식이다. 예를 들어 양의 전하를 띤 백색 대전입자와 음의 전하를 띤 흑색 대전입자가 중성인 투명 유체에 혼합된 전자잉크일 경우 우선 하부기판에 전자잉크를 투하한다. 이후 하부의 두 전극에 상반되는 전압을 인가하면 형성된 전계에 의해 움직이는 두 종류의 대전입자가 하부의 두 전극에 충전된다. 이후 상부전극을 접지한 상태에서 하부기판에 덮으면 하부전극에 충전되지 않은 대전입자가 외부로 유출된다.

본 연구는 격벽형 전자종이에서 전자잉크 주입 방법에 따른 표동전류를 분석하였고 APLM에 의한 패널 제조 시 전자잉크를 충전하는 전압의 크기가 표동전류에 미치는 영향을 확인하기 위해 표동전류를 측정하여 그 관계를 보이고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 입자 혼합 방법

본 연구에서는 양의 전하를 띤 대전입자와 음의 전하를 띤 대전입자 간의 상호작용을 제거하고 입자의 움직임에 의한 표동전류만 측정하기 위해 single particle만 사용하였다. 실험에 사용된 백색 대전입자는  $\text{TiO}_2$ 에 분산중합공정(dispersion polymerization process)을 이용하여 methylmethacrylate와 acrylamide가 주성분인 고분자 shell을 공중합(copolymerization)하

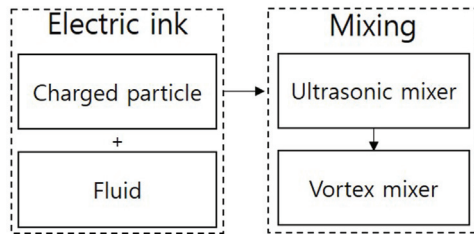


Fig. 2. Mixing method of electronic ink.

였다. acrylamide는 전자가 결핍된 상태(electron-poor state)를 만들어 주는 단분자 물질로 실험에 사용된 백색 대전입자에 (+) 전하를 띠게 한다. 이때, 백색 대전입자의 전하를 이루는 물질을 CCA (charge control agent)라 지칭한다. 이로 인해 CCA가 이탈되지 않는 전하를 잃지 않는다. 만일 CCA가 이탈되면 전하를 잃게 되며, 이탈된 CCA가 다른 대전입자에 부착되어 전하를 더 얻는 경우가 발생하거나 발생할 가능성을 내포하게 된다. 대전입자의 전하량 대 질량비( $q/m$ )는 구동전압을 결정하는 매우 중요한 요인으로 전하를 잃은 경우에는  $q/m$ 이 줄어들어 인가전압에 운동 속도가 느려지거나 움직이지 않게 되고, 영상력이 줄어들어 메모리 효과도 떨어진다 [13,14]. 반면, 전하를 얻은 경우에는  $q/m$ 이 증가해 인가전압에 의한 대전입자의 운동 속도가 증가하고 이에 따라 대전입자의 운동 에너지가 높아지게 된다. 이는 전극이나 다른 대전입자와 충돌 시 CCA를 이탈하게 만들거나 전극을 파괴할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 전극 위에 완충 작용을 하는 절연층을 형성하였으나, 본 연구에서는 중성인 유체가 대전입자의 운동 에너지를 제한하기 때문에 절연층을 형성하지 않았다.

그림 2는 실험에 사용된 전자잉크의 혼합 방법을 보인 것이다. 본 실험에서 사용된 중성 유체는 halocarbon 0.8과 isopar M을 1:2의 비율로 혼합하여 사용하였고 이를 백색 대전입자와 1:5의 질량비율로 혼합하여 전자잉크를 제조하였다. 유체와 대전입자의 혼합비 선정 기준은 앞선 연구에서 전계에 의한 표동전류가 가장 높은 것으로 선정하였다. 이는 전계에 의해 운동하는 대전입자의 수가 많아서 표동전류가 높은 것으로 패널 제작 시 APLM에 의해 cell 내로 주입되는 백색 대전입자의 농도를 높이기 위함이다.

그림 2에서 보인 것처럼 대전입자를 유체 내에 균일하게 분포시키기 위해 초음파 mixer로 30분간 혼합한 후, vortex mixer로 한 번 더 혼합하였다. 이때 초음파 mixer는 전자잉크에 열에너지를 전달하여 뭉친 대

대전입자를 떨어뜨리는 역할을 하며, vortex mixer는 대전입자 분포를 고르게 하는 역할을 한다.

## 2.2 패널 제작 방법

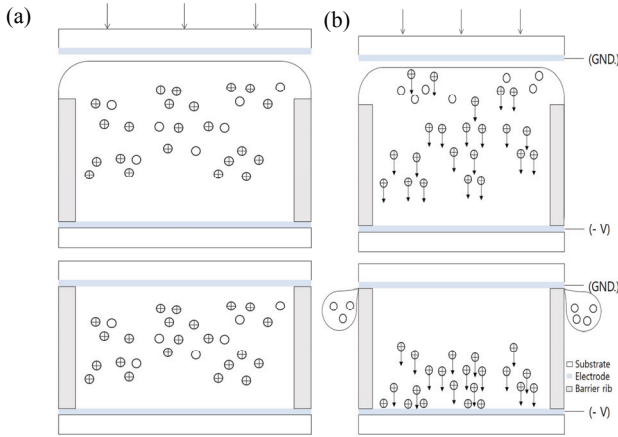
대전입자형 전자종이는 외부의 광을 대전입자로 반사시켜 정보를 표시한다. 이 때문에 외부의 광이 패널 내의 대전입자까지 도달할 수 있게 패널의 기판은 투과성이 클수록 정보를 표시하는 데 유리하다 [15]. 따라서 본 연구에서 사용된 패널의 기판은 soda-lime glass를 사용하였으며, 전극 또한 투과성이 높은 ITO를 사용하였다. 그리고 상부기판과 하부기판 사이의 공간을 유지해 주는 격벽을 투과성이 있는 su-8으로 사용하였다. 격벽은 하부기판에 patterning하였으며, 상부기판에는 별도의 pattern이 없는 ITO glass를 사용하였다. 격벽의 patterning은 photolithography로 진행하였다. 이때 su-8은 negative photoresist로 빛에 반응하면 응력이 강해지는 특징이 있다. 이는 상부기판과 하부기판 사이의 공간을 지탱하기에 적합하다. 이때 격벽의 높이는  $54.28 \mu\text{m}$ 이며, 셀의 넓이는  $220 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$ 이다.

## 2.3 Active particle loading method

그림 3(a)는 격벽형 전자종이에서 전자잉크를 주입하는 방법으로 하부기판에 전자잉크를 충전한 후 상부기판을 하부기판에 덮는 방식을 보인 것이다. 이때 전하를 잃은 대전입자는 (+) 기호가 없는 입자로 표현하였고 전하를 잃지 않은 대전입자는 (+) 기호가 있는 입자로 표현하였다. 상부기판을 하부기판에 덮는 과정에서 대전입자가 cell에 loading되지만, 전하를 잃은 입자 또한 cell에 loading된다. 전하를 잃은 대전입자는 전계에 의한 움직임이 느리거나 반응하지 않아 cell 내의 활발하게 움직이는 대전입자의 운동을 방해한다. 이는 격벽형 전자종이의 광특성을 저하시킨다고 보고된 바 있다 [16].

그림 3(b)는 격벽형 전자종이에서 APLM으로 하부기판에 전자잉크를 충전한 후 하부전극에 대전입자와 상반되는 전압을 인가하며 상부기판을 하부기판에 덮는 방식을 보인 것이다. 이때, 상부전극은 접지한 상태에서 하부기판에 덮인다. 이로 인해 인가한 전압에 의해 움직이는 대전입자만 cell 내로 유입되고 움직이지 않는 대전입자는 cell 외부로 걸러진다.

본 연구에서는 APLM의 전자잉크 충전 시 인가하는 전압이 대전입자의 운동에 의한 표동전류에 미치는 영



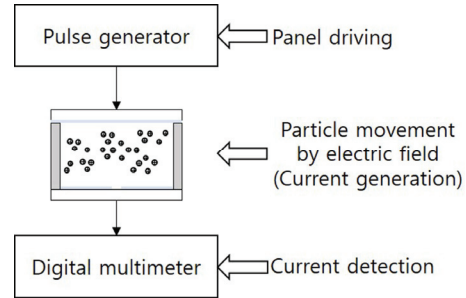
**Fig. 3.** Injection method of electronic ink at barrier rib type e-paper. (a) Reported method and (b) active particle loading method.

향을 실험을 통해 확인할 것이다. 이를 위해 기존의 방법인 그림 3(a) 방법과 APLM을 이용한 방법으로 패널을 제작하여 전류 및 광특성을 비교하고자 한다. APLM으로 제작한 패널의 경우 전자잉크를 충전하는 전압을 6가지 경우로 제작하였고, 그 전압은 -1 V, -2 V, -2.5 V, -3 V, -3.5 V, -4 V이다. 이때 전자잉크를 충전하는 전압이 음의 전압인 이유는 백색 대전입자가 양의 전하를 띠고 있어 음의 전압으로 충전하였다. 본 연구에서는 그림 3(a) 방법으로 제작한 패널의 경우 #1로 표기하였고 APLM으로 제작한 패널은 -1 V에서 -4 V 순으로 #2에서 #7로 표기하였다.

## 2.4 측정 방법

각 sample의 대전입자의 운동에 의한 표동전류 측정을 위해 그림 4에 보인 전류 측정 시스템을 이용하였다. 그림 4의 펄스발생기는 패널을 구동하는 기능을 수행하고 digital multimeter는 대전입자의 운동에 의해 발생하는 표동전류를 측정하는 기능을 수행한다. 전류 측정 시스템에 사용된 장비는 ELP사의 펄스발생기 (EEC-650)와 Agilent사의 digital multimeter (34461A)이다. 두 장비는 컴퓨터로 제어가 가능하며, digital multimeter의 경우 Agilent사의 소프트웨어인 BenchVue (2018 version)로 측정된 전류 값을 컴퓨터에 전송하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 하부전극을 접지하고 상부전극에 (+) 전압을 인가하여 백색 대전입자가 하부전극으로 이동할 때 발생하는 표동전류를 측정하였다. 전류 측정을



**Fig. 4.** Current measurement system by charged particle movement.

위해 우선 패널을 구동해야 한다. 패널 구동은 컴퓨터로 패널에 인가할 전압을 펄스발생기에 입력하여 구동한다. 이로 인해 패널 내의 전계가 형성되고 이에 영향을 받는 대전입자는 하부전극으로 이동하게 된다. 이때 대전입자가 가진 전하량만큼 하부전극으로 이동했기 때문에 표동전류가 발생한다. 전류 발생은 오로지 대전입자에 의한 표동전류로 유체는 전기전도에 기여하지 못한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전류 측정 결과

그림 5는 패널을 구동하여 백색 대전입자가 하부기판으로 이동할 때 발생하는 표동전류를 보인 것이다. 모든 sample에서 초기에 전류 값이 급격하게 상승한 후, 다시 급격하게 하강하며 점차 하강률이 줄어드는 것을 보인다. 이는 초기에 형성된 전계에 의해 빠르게 반응하는 대전입자에 의한 것으로 초기에는 순간적으로  $q/m$ 이 높아 빠르게 운동하는 대전입자와  $q/m$ 이 낮아 느리게 움직이는 대전입자가 함께 이동하여 가장 많은 표동전류를 발생시킨다. 이후  $q/m$ 이 높은 대전입자는 우선적으로 하부전극에 부착되어 운동이 불가능해진다. 이로 인해 전기전도에 기여하지 못하여 표동전류 값이 줄어들게 된다. 이는 시간이 지날수록  $q/m$ 이 높은 순으로 하부전극에 대전입자가 더 많이 부착되기 때문에 점차 표동전류 값이 하강되는 것으로 이해된다.

각 sample의 표동전류 최댓값은 #1의 경우 3.828  $\mu\text{A}$ , #2의 경우 4.456  $\mu\text{A}$ , #3의 경우 5.284  $\mu\text{A}$ , #4의 경우 20.878  $\mu\text{A}$ , #5의 경우 39.143  $\mu\text{A}$ , #6의 경우 32.632  $\mu\text{A}$ , 그리고 #7의 경우 5.752  $\mu\text{A}$ 로 측정되었다.

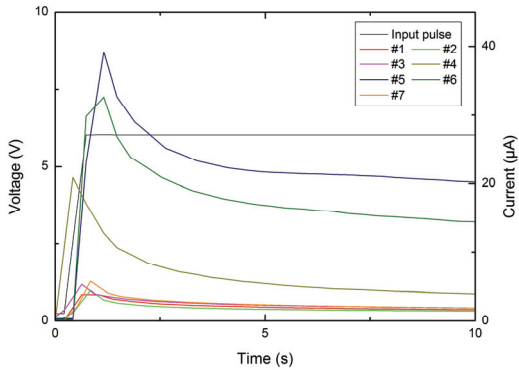


Fig. 5. Drift current according to various injection voltages.

#1의 경우는 앞서 설명한 바와 같이 APLM으로 제작한 방법이 아닌 그림 3(a) 방법으로 제작한 패널로 표동전류 최댓값이 다른 sample에 비해 가장 적다. 대전입자의 운동에 의한 표동전류는 패널 내의 대전입자의 농도가 클수록 크기 때문에 그림 3(a) 방법으로 제작한 패널이 APLM으로 제작한 패널에 비해 패널을 제작할 때 대전입자의 유출이 많은 것으로 판단된다. 그리고 APLM으로 제작한 패널의 경우 전자잉크 충전 전압의 크기가 -3 V까지는 전자잉크 충전 전압의 크기가 클수록 표동전류 값이 증가하였다. 이는 더 강한 전계에 의한 것으로 하부전극에 전자잉크 충전 전압을 인가하면 이로 인해 전계가 발생되어 대전입자가 하부기판에 주입된다. 이때 전계가 약하면 q/m이 높아 움직임이 빠른 대전입자만 하부기판에 주입되지만 전계가 강하면 q/m이 낮아 움직임이 느린 대전입자도 하부기판에 주입되어 전계가 강할 때 더 많은 입자가 패널 내에 주입된다. 이에 따라 대전입자의 운동에 의한 표동전류가 증가하게 된다. 반면, #6과 #7의 경우 전자잉크 충전 전압의 크기가 증가해도 전류 값이 증가하지 않고 오히려 감소하였다. 이는 과도한 전계에 의해 q/m이 상대적으로 작은 입자도 포함하여 유입된 것으로 판단된다. 대전입자가 하부기판에 주입되는 과정에서 q/m이 상대적으로 큰 대전입자는 우선적으로 하부기판에 주입된다. 이때 과도한 전계에 의해 q/m이 작은 입자도 하부기판에 주입된다. 이에 따라 cell 내의 대전입자 농도가 과도한 상태가 되어 전계에 의한 대전입자의 운동이 방해된다. 이로 인해 대전입자의 운동에 의한 전기전도가 어려워져 표동전류가 감소한 것이다.

표동전류가 최댓값을 가진 후 하강하여 가장 낮은 전류 값을 보이는 10s에서의 전류 값은 #1의 경우 1.658  $\mu\text{A}$ , #2의 경우 1.464  $\mu\text{A}$ , #3의 경우 1.906  $\mu\text{A}$ ,

Table 1. Drift current according to various injection voltages.

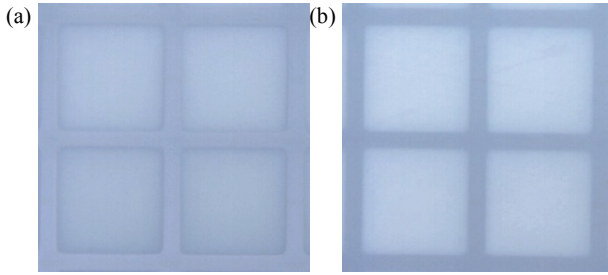
Sample	Injection voltage	Maximum current (rank)	Current at 10s (rank)
#1	0	7	6
#2	-1	6	7
#3	-2	5	5
#4	-2.5	3	3
#5	-3	1	1
#6	-3.5	2	2
#7	-4	4	4

#4의 경우 3.935  $\mu\text{A}$ , #5의 경우 20.231  $\mu\text{A}$ , #6의 경우 14.363  $\mu\text{A}$ , 그리고 #7의 경우 1.916  $\mu\text{A}$ 로 측정되었다. 표동전류가 최댓값을 갖은 후 하강하여 가장 낮은 전류 값을 보이는 10s에서는 최댓값에서와 달리 #1의 경우보다 #2의 경우가 전류 값이 낮다. 이는 #2의 경우 -1 V로 전자잉크 충전 전압을 하부전극에 인가하여 상대적으로 q/m이 큰 대전입자가 하부기판에 주입된다. 반면 상대적으로 q/m이 작은 입자는 -1 V로 전자잉크 충전 전압을 하부전극에 인가하여 생긴 전계에 반응하지 않거나 느리게 반응하여 상부기판을 하부기판에 덮는 과정에서 패널 외부로 유출된다. 이로 인해 초기에 갖는 전류 peak 값은 #2가 #1보다 더 크지만, 시간이 지난 10s일 때에는 q/m이 낮아 느리게 움직이는 대전입자의 농도가 #1보다 #2가 적어 #1의 전류 값이 #2의 전류 값보다 높게 측정된 것이다. 또한 10s에서도 앞서 언급한 바와 같이 APLM으로 제작한 패널의 경우 전자잉크 충전 전압의 크기가 -3 V까지는 전자잉크 충전 전압의 크기가 클수록 표동전류 값이 증가하고 전자잉크 충전 전압의 크기가 -3 V부터 -4 V까지 증가할 경우 표동전류 값이 감소하였다. 이는 앞서 설명한 바와 같은 이유에 의한 것으로 판단된다.

표 1은 본 연구에서 측정한 평가항목을 순위로 나열한 것이다. 표 1에 보인 것처럼 전자잉크의 충전 전압을 -2.5 V 이하로 인가하면 패널 구동 시 전류 값이 상대적으로 낮다. 이는 전자잉크의 충전 전압을 -3 V 이상 인가한 패널보다 -2.5 V 미만으로 인가한 패널이 대전입자가 하부기판에 적게 주입되어 표동전류 값이 낮은 것이다. 반면 전자잉크의 충전 전압을 -3 V 이상 인가하면 cell 내에 q/m이 커서 운동이 활발한 대전입자가 고농도로 주입되어 표동전류 값이 크다.

따라서 전자잉크 충전 전압은 크기가 클수록 대전입자가 패널 내에 많이 주입되어 표동전류가 높아진다.





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

그러나 전자잉크 충전 전압을  $-3.5\text{ V}$  이상 인가한 경우에는  $q/m$ 이 큰 대전입자와  $q/m$ 이 작은 대전입자가 패널에 주입된 것이 cell 내 대전입자의 과도한 농도 상태를 만들어 대전입자의 운동을 방해해 표동전류가 낮아진다. 또한 APLM을 하지 않은 패널과 전자잉크 충전 전압을  $-1\text{ V}$ 로 인가한 패널의 표동전류 차이를 보아, APLM은  $q/m$ 이 작아 움직임이 느린 대전입자를 걸러낼 수 있다.

그림 6은 패널을 구동한 후 현미경으로 관찰한 모습으로 그림 6(a)는 기존의 방법인 그림 3(a) 방법으로 제작한 패널의 현미경 사진이고 그림 6(b)는 전자잉크 충전 전압을  $-3\text{ V}$ 로 인가하여 제작한 패널의 현미경 사진이다. 그림 6에서 보인 바와 같이 그림 6(a)는 그림 6(b)보다 어두운 색을 보인다. 이는 농도 차이에 의한 것으로 그림 6(a)는 전자잉크 충전 전압을 인가하지 않아 상부기판과 하부기판을 덮는 과정에서 전자잉크가 유출되고 이 과정에서 대전입자도 유출된다. 반면, 그림 6(b)는 상부기판을 하부기판에 덮는 과정에서 전자잉크 충전 전압을  $-3\text{ V}$ 로 인가한 것이 전계에 의해 반응하는 대전입자를 하부기판에 주입시켜 그림 6(a)보다 그림 6(b)가 cell 내의 대전입자 농도가 높다.

$$q = \int_0^{10} i_{\text{drift}}(t) dt \quad (1)$$

표 2는 모든 패널 구동 시 움직인 대전입자가 띤 총 전하량을 나열한 것이다. 이때 전하량은 식 (1)에서 보인 것과 같이 표동전류 값을 적분하여 측정하였다. 각 sample의 패널 구동 시 이동한 전하량은 #1의 경우  $20.25\text{ }\mu\text{C}$ , #2의 경우  $17.38\text{ }\mu\text{C}$ , #3의 경우  $23.58\text{ }\mu\text{C}$ , #4의 경우  $64.9\text{ }\mu\text{C}$ , #5의 경우  $209.8\text{ }\mu\text{C}$ , #6의 경우  $165.7\text{ }\mu\text{C}$ , 그리고 #7의 경우  $23.61\text{ }\mu\text{C}$ 으로 측정되었다. 앞서 설명한 바와 유사하게 전자잉크의 충전 전압

**Table 2.** The quantity of capacitive charges by the moved particles.

Sample	Shifted quantity of electric charge ( $\mu\text{C}$ )
#1	20.25
#2	17.38
#3	23.58
#4	64.9
#5	209.8
#6	165.7
#7	23.61

을  $-2.5\text{ V}$  이하로 인가하면 패널 구동 시 이동하는 대전입자가 상대적으로 적다. 또한, 전자잉크의 충전 전압을  $-3\text{ V}$ 로 인가하면 패널 구동 시 이동하는 전하량이 증가하지만, 전자잉크의 충전 전압을 그 이상 인가하면 패널 구동 시 이동하는 전하량이 감소한다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 패널 내 대전입자의 고농도에 의해 패널 구동 시 대전입자의 움직임이 방해받아 감소한 것으로 판단된다. 표 2에서 sample #1의 경우와 #2의 경우를 보면 패널 구동 시 이동한 전하량이 #2의 경우보다 #1의 경우가 더 크다. 이는 앞서 설명한 바와 같이  $-1\text{ V}$ 로 전자잉크 충전 전압을 하부전극에 인가하여 패널을 제작한 것이  $q/m$ 이 작은 입자를 패널 외부로 배출시켜 대전입자의 농도가 줄어들게 되고 이로 인해 패널 구동 시 이동한 전하량이 작은 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

대전입자형 디스플레이에서 대전입자의 운동에 의한 표동전류는 전자잉크 주입방법에 따라 다른 특성을 보인다. 본 연구에서는 APLM을 하지 않은 패널 1가지와 전자잉크 충전 전압을 다르게 하여 제작한 패널, 6가지 sample을 제작하여 실험을 진행하였다. 실험은 대전입자의 운동에 의한 표동전류를 측정하였다. 그 결과 중 표동전류 측정 결과로부터 전자잉크 충전 전압은 크기가 클수록 대전입자의 농도가 높아 패널 구동 시 표동전류가 높았다. 하지만 전자잉크 충전 전압의 크기가  $-3\text{ V}$ 를 초과하면 오히려 표동전류가 줄어드는 것을 확인하였다. 이를 통해 전자잉크 충전 전압은 최적의 크기가 필요하고 대전입자의 고농도 주입은 대전입자의 운동을 방해한다는 것을 확인하였다.

본 연구는 대전입자형 디스플레이에서 패널 구동에

다른 대전입자의 응답특성 개선과 전자잉크 충전 전압 및 대전입자의 충전량 최적화 연구에 기여할 수 있을 것이며, 향후 상반되는 전하를 띤 두 종류의 하전입자 운동에 관한 연구가 필요하다.

## ORCID

Young-Cho Kim

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

## 감사의 글

이 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B1010310).

## REFERENCES

- [1] Y. Park, H. M. Lee, and S. H. Lee, *Korean Soc. Emotion Sensibility*, **18**, 119 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.14695/KJSOS.2015.18.4.119>]
- [2] G. R. Jo, K. Hoshino, and T. Kitamura, *Chem. Mater.*, **14**, 664 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cm010664n>]
- [3] W. M. Chim, *M.S. Thesis*, p. 1-86, Delft University of Technology, Delft (2009).
- [4] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **22**, 169 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2009.22.2.169>]
- [5] S. H. Kwon, S. G. Lee, W. K. Cho, B. G. Ryu, and M. B. Song, *IMID Digest*, **5**, 423 (2005).
- [6] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J. S. Yeo, and T. Koch, *J. Soc. Inf. Disp.*, **19**, 129 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1889/jssid19.2.129>]
- [7] R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda, N. Nihei, and R. Sakurai, *J. Soc. Inf. Disp.*, **35**, 136 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.1825765>]
- [8] B. Comiskey, J. D. Albert, H. Yoshizawa, and J. Jacobson, *Nature*, **394**, 253 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/28349>]
- [9] R. Wisniewski, *Nature*, **394**, 225 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/28278>]
- [10] 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>]
- [11] 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>]
- [12] 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>]
- [13] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. Huh, and Y. C. Kim, *J. Soc. Inf. Disp.*, **42**, 1523 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3621149>]
- [14] R. J. Nash, H. Associates, J. T. Bickmore, M. L. Grande, T. Vasta, and R. N. Muller, *NIP24 and Digital Fabrication*, 21, (2008).
- [15] D. J. Lee, I. H. Kim, and Y. C. Kim, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, 167 (2008).
- [16] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **10**, 1186 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.6.1186>]