

전기영동형 전자종이 디스플레이에서 전자잉크의 주입 방법 및 구동파형에 따른 전류 특성 분석

이주원, 김영조 

청운대학교 전자공학과

Analysis on Current Characteristics According to Injection Method and Driving Waveform in Electrophoretic-Type E-Paper Display

Joo-Won Lee and Young-Cho Kim

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

(Received June 15, 2020; Revised July 15, 2020; Accepted July 15, 2020)

Abstract: In this study, the drift current characteristics of charged particles are analyzed for panels fabricated by varying the waveform biasing of the active particle loading method (APLM), which is a method driven by the electrophoretic principle of loading charged particles into a cell of a barrier rib-type electronic paper. We prepare 3 panels using APLM and 1 panel without APLM. The waveform of APLM uses square wave and ramp wave, and the step voltage wave is applied to the driving voltage. The drift currents measured from the square wave and ramp wave with the same period applied by APLM are $4.872 \mu\text{C}$ and $5.464 \mu\text{C}$, respectively, and the ramp wave is shown to be relatively advantageous for loading charged particles that have a large q/m . The time-current curve results confirm that the abrupt movement of charged particles is occurring. When the step form wave signal with a short time of 1s is first applied, initial large movement of the charged particles is confirmed to occur in all samples, which is understood as the effect of applying the voltage necessary to remove the imaging force. The results of this study are expected to improve the loading of charged particles into the electronic paper cell, driven by the electrophoretic principle and optimization of the driving conditions.

Keywords: Charged particle, Active particle loading method, Driving voltage, Barrier rib-type electronic paper, Drift current

1. 서론

전자종이(electronic paper)는 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 책 또는 신문과 같은 종이의 특성을 지니면서, 디스플레이 기능을 할 수 있는 전자장치이다. 전자종이는 여러 디스플레이 기술들로 정보를 표시할 수 있지만, 대표적으로 전기영동의 원리로 운동하는 전

자잉크를 동작시켜서 정보를 표시하는 방법을 들 수 있다. 또한, 전자종이는 반사형 디스플레이로 외부 광원의 세기에 비례하여 명암비가 크게 개선되는 특성을 가지고 있다 [1,2].

현재 상용화되어 있는 전자종이의 디스플레이 기술은 앞서 설명한 바와 같이, 정보를 표시하기 위하여 전기영동 원리를 사용한다 [3,4]. 전기영동이란 중성유체 내에 혼합되어 있는 하전입자들이 외부에서 인가된 전압에 대응하여 이동하는 현상을 의미한다 [5,6]. 전기영동 원리를 사용하여 정보를 표시하는 전자종이 디스플레이는 컬러를 표현하기 위하여 하전입자의 컬러를 이용하여거나, 중성유체의 컬러를 사용하여 정보를 표시할

✉ Young-cho Kim; yckim@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.

수 있다 [7,8]. 전기영동 원리를 사용하여 정보를 표시하는 방법은 마이크로 캡슐형과 격벽형이 있다 [9,10].

마이크로 캡슐형은 작은 캡슐 내에 하전입자를 포함시키는 방법으로 구성되며, 격벽형은 격벽으로 공간을 분리하여 만든 폐쇄된 공간에 하전입자를 주입하여 패널을 구성한다 [11,12]. 격벽형 전자종이에서 양의 전하를 띤 백색 하전입자와 음의 전하를 띤 흑색 하전입자를 중성인 투명 유체 내에 혼합한 후 제조한 전자잉크를 셀 내에 주입하였을 때, 백색 이미지를 상부기판에 표시하기 위하여 상부기판의 전극에 백색 하전입자의 극성과 반대인 음의 전압을 인가하고 하부기판의 전극은 접지한다. 이를 통하여, 백색 하전입자는 상부기판의 전극으로 이동한 후 image force로 인하여 부착되고, 흑색 하전입자는 하부기판의 전극으로 이동한 후 image force로 인하여 부착되게 된다. 이때, 외부 광원이 상부 기판으로 입사한 후 반사되면서 백색 이미지를 표시할 수 있다. 다음으로 흑색 이미지를 상부기판에 표시하기 위하여 상부기판의 전극에 흑색 하전입자의 극성과 반대인 양의 전압을 인가하고 하부기판의 전극은 접지한다. 이를 통하여, 흑색 하전입자는 상부기판의 전극으로 이동한 후 image force로 인하여 부착되고, 백색 하전입자는 하부기판의 전극으로 이동한 후 image force로 인하여 부착되게 된다. 이때, 외부 광원이 상부 기판으로 입사하게 되면 흑색 이미지를 표시하게 된다.

전기영동의 원리로 이미지를 표시할 때는 외부에서 인가되는 전압에 대응하여 셀 내에는 전계가 형성되고, 하전입자들이 지닌 극성과 상반되는 극성을 갖고 있는 전극으로 이동하게 되는데, 이러한 하전입자들의 이동으로 셀 내에는 표동 전류가 흐르게 된다. 여기서 검출되는 전류를 측정하여 셀 내에 주입되어 있는 하전입자의 특성을 분석할 수 있다 [13,14].

마이크로 캡슐형 전자종이와 다르게 격벽형 전자종이는 셀 내에 주입되는 하전입자의 농도를 제어할 수 있다. 하전입자의 농도를 제어하기 위하여 active particle loading method (APLM)을 사용하는 방법이 연구된 바 있다 [15].

APLM을 사용하지 않은 격벽형 전자종이는 패널을 제작할 때 하부기판에 전자잉크를 주입하여 상부기판과 합착한 후 패키징을 진행하는 동안 전자잉크의 유출이 발생하게 된다. 이렇게 제작한 패널의 셀 내에는 다양한 q/m 값을 지닌 하전입자들이 주입되게 된다. 이러한 하전입자의 특성은 패널의 구동 전압 상승 및 반사율 저하의 원인이 된다.

반면, APLM으로 패널을 제작하면 다양한 q/m 값을 지닌 하전입자들이 아닌 일정 전하량 이상의 하전입자들이 선택되어 순차적으로 패널의 셀 내에 주입될 수 있다. 이를 통하여, APLM으로 제작한 패널은 APLM으로 제작하지 않은 패널과 비교하여 구동 전압 및 반사율 측면에서 향상된 것을 연구한 바 있다 [15].

본 연구에서는 하전입자 농도를 제어할 수 있는 APLM의 파형 종류에 따라서 각 sample을 제작한 후 표동 전류를 비교하여 APLM 파형에 따른 하전입자의 운동을 분석하고, 계단파를 구동파형으로 인가할 경우 image force 제거에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 패널 제작

본 연구를 위하여 양의 전하를 띤 백색 하전입자와 음의 전하를 띤 흑색 하전입자를 중성 유체에 혼합하여 실험을 진행하였다. 각 sample의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 특성을 비교하기 위하여 비교 대상인 백색 하전입자를 흑색 하전입자보다 4배의 질량비를 가지도록 중성 유체 내에 고농축으로 혼합하였다 [16]. 이때, 백색 하전입자의 중심물질은 TiO_2 이고, 흑색 하전입자의 중심물질은 carbon black인 고분자-셀 구조로 제조하였고, 중성 유체는 isopar M과 halocarbon oil 0.8을 2:1 비율로 혼합하여 사용하였다 [17]. 혼합 비율은 고농축 백색 하전입자 5 g, 저농축 흑색 하전입자 1 g, 중성 유체 1.5 g의 비율로 혼합하였고, 이는 백색 하전입자가 운동할 때 흑색 하전입자의 영향을 최소화시키기 위한 것이다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이 백색 하전입자와 흑색 하전입자의 최종적인 혼합비는 20:1이 되며, 중성 유체 내에 혼합되어 있는 하전입자들의 입자 뭉침 현상을 제거하기 위하여 MUJIGAE사에서 제작한 Ultrasonic dispersing machine을 사용하여 하전입자들을 분산시킨 후, DAIHAN Scientific사에서 제작한 Vortex mixer을 사용하여 혼합하였다. 이상의 공정으로 제조한 전자잉크의 순서를 그림 1에 보였다. 하전입자의 뭉침 현상은 하전입자들이 지닌 고유 전하량 대 질량비 (q/m) 값의 변형을 야기하여 하전입자들의 정상적인 이동을 방해 및 저하시킨다. 이러한 입자 뭉침 현상을 제거하기 위해서는 하전입자들을 혼합한 뒤 분산 과정을 진행하는 것은 매우 중요하다.

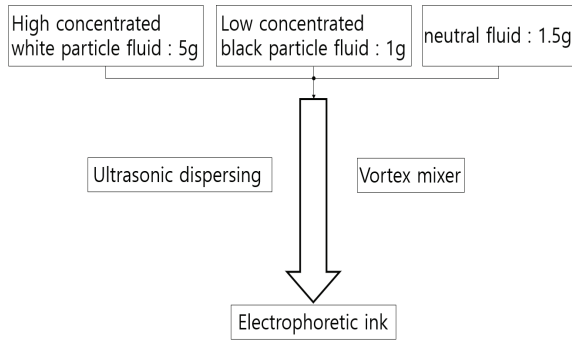


Fig. 1. Fabrication process of electronic ink.

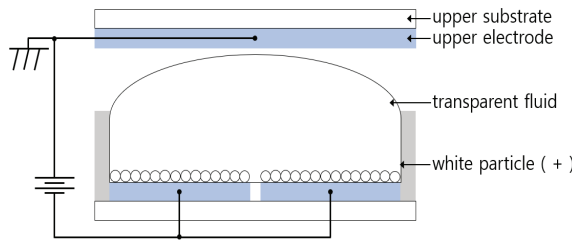


Fig. 2. White charged particle injection method of image panel.

본 연구를 위하여 격벽형 전자종이를 제작하였다. 격벽형 전자종이는 하부 기판과 상부 기판에 인가되는 전압에 의해서 하전입자들의 이동이 발생하게 되는데, 이때 하전입자들이 이동하는 공간을 형성하기 위해서 하부 기판의 각 셀에 격벽을 패터닝하였다. 격벽의 높이는 $53.57\ \mu\text{m}$ 로 제조하였고, 하나의 셀은 $210 \times 210\ \mu\text{m}^2$ 가 되도록 격벽을 패터닝하였다. 하부 기판의 활성 영역은 $200 \times 210\ \mu\text{m}^2$ 이며 하부 기판 및 상부 기판의 전극은 높은 전기 전도도와 외부 광의 투과성을 지니고 있는 ITO를 사용하였다 [18].

각 셀 내에 전자잉크를 충분히 주입한 후 패키징하였으며, 본 실험에서는 선택적인 입자 주입 방법으로 제안되고 사용하였던 APLM을 개선하여 4개의 sample을 제작한 뒤 실험을 진행하였다. 그림 2는 APLM으로 하부기판 셀 내에 백색 하전입자의 주입공정을 보인 것이다. #1 패널은 APLM을 인가하지 않고 제작한 패널이며, #2~4의 패널들은 APLM을 이용하여 셀 내에 백색 하전 입자들을 주입한 패널들이다.

2.2 패널 특성 평가 및 측정 방법

그림 3(a)는 #2에 인가하는 APLM 파형을 나타낸 것이다. 그림 3(b)는 #3및 #4에 인가하는 APLM 파형

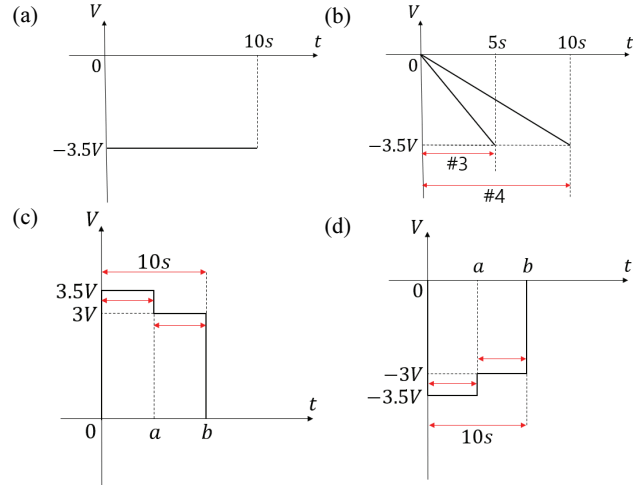


Fig. 3. Voltage waveform applied at APLM and driving (a) APLM waveform applied to #2, (b) APLM waveform applied to #3 and #4, (c) driving waveform of positive half-cycle, and (d) driving waveform of negative half-cycle.

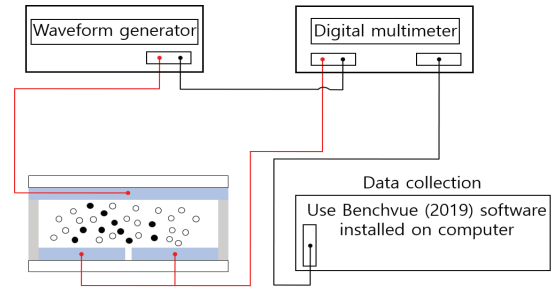


Fig. 4. Current measurement system.

을 나타낸 것이다. #3은 5s동안 백색 하전입자들을 주입하고, #4는 10s동안 백색 하전입자들을 주입한다. 그림 3(c), (d)는 각 sample에 인가되는 구동 파형을 나타낸 것이다. 각 sample을 구동하기 위해서 인가하는 파형은 계단파(staircase waveform)를 사용하였다. 계단파를 인가하기 위해서 Agilent사의 waveform generator를 사용하였다. 각 sample에 인가되는 파형의 총 주기는 20s로 동일하게 설정하고, 반주기에서 인가되는 전압의 주기를 변화시켰다. 인가되는 구동 파형의 시간은 2개의 조건으로 나누어서 각 sample에 인가하였다.

조건 ①은 a=1s, b=9s, 조건 ②는 a=5s, b=5s로 설정하였다. 그림 4는 각 sample들의 특성을 비교하기 위해 사용된 측정 시스템을 보인 것이다. 각 sample의 전류를 측정하기 위해 사용되어진 장비는 KEYSIGHT사의 digital multimeter이다. 각 sample에 전압이 인

가되었을 때 패널 내부에는 전압에 비례하여 전계가 형성되고, 이 전계에 의하여 셀 내에 주입되어 있는 하전입자들의 이동이 발생하게 된다. 하전입자들의 이동에 의해서 drift current와 saturation current가 발생하게 되는데, 이 값은 μA 단위의 값으로 출력이 된다. 측정된 전류 값들은 KEYSIGHT사의 software인 BenchVue (2019)를 통하여 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하전입자의 특성에 따른 영역 정의

제작된 이미지 패널에 인가되는 반주기마다 변화하는 전압에 의하여 패널 내부에 생성된 전계의 세기 및 방향도 변화하면 이에 따라 셀 내에 주입되어 있는 하전입자들의 이동이 발생하게 된다. 각 sample의 셀 내에 주입되어 있는 하전입자의 비율은 흑색 하전입자가 백색 하전입자의 운동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 백색 하전입자의 비율이 매우 높게 제작되었다. 셀 내에 주입된 백색 하전입자들의 특성을 비교하기 위하여 인가되는 전압의 전체 주기에서 음의 반주기에 해당하는 전류 특성을 예로 들어 분석하고자 한다. 2가지의 구동조건에서 모든 주기의 전류 특성은 각 sample에서 거의 비슷하기 때문에 이 주기의 파형과 sample을 선택한 것은 특별한 경우가 아니며 단지 편의성 때문임을 밝힌다. 그림 5는 조건 ①로 #4를 구동하였을 때 이동하는 백색 하전입자의 특성을 I, II 영역으로 구분하여 나타낸 것이다.

양의 반주기를 포함하여 전체적인 특성이 유사하므로 편의상 #4를 택하였다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 전류의 변화량이 큰 영역과 전류의 변화량이 적은 영역으로 나누어진다. 초록색으로 표시한 영역 I은 drift 영역, 영역 II는 saturation 영역으로 정의하였다. 각 sample에 구동 파형이 인가될 때 백색 하전입자가 운동하는 음의 반주기에서 출력된 전류 값을 root mean square (RMS)로 계산한 평균값과 전류 그래프가 중첩되는 시점을 기준으로 I, II 영역을 구분하였다. Drift 영역은 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자 중에서 우선적으로 운동한 백색 하전입자들이 이동하는 영역을 의미한다. Saturation 영역은 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자 중에서 먼저 이동한 백색 입자의 운동 후 남은 백색 입자가 이동한 영역을 의미한다. 각 sample에서 측정된 전류 데이터를 해당 구간으로 나

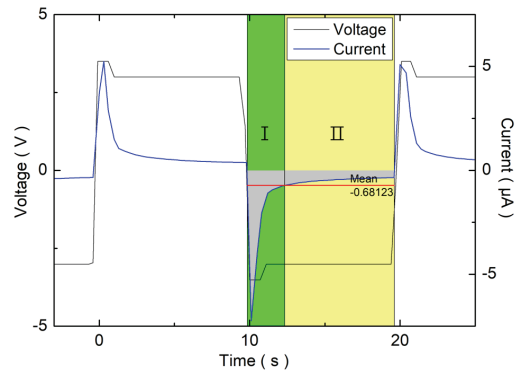


Fig. 5. Area classification according to the characteristics of charged particles.

누어서 시간에 대하여 적분하게 되면 각 구간에서 이동한 백색 하전입자의 전하량을 알 수 있다. 전하량을 비교하여 각 sample의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 특성을 알 수 있다.

$$Q_I = \int_{T/2}^{x_o} i_I(t) dt [C] \tag{1}$$

먼저, 각 sample에 전압이 인가되었을 때 영역 I에서 이동한 백색 하전입자의 전하량을 계산하기 위하여 위에 보인 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)의 적분구간은 drift 영역에 대한 구간으로, $T/2$ 에서 x_o 까지 적분구간을 정하였다. 적분 구간에서 x_o 는 계산한 RMS 값과 출력된 전류 그래프가 교차하는 지점의 시점을 의미한다.

$$Q_{II} = \int_{x_o}^T i_{II}(t) dt [C] \tag{2}$$

각 sample에 전압이 인가되었을 때 영역 II에서 이동한 백색 하전입자의 전하량을 계산하기 위하여 위에 보인 식 (2)를 사용하였다. 식 (2)의 적분구간은 saturation 영역에 대한 구간으로, x_o 에서 T 까지 적분구간을 정하였다.

3.2 전류 측정 결과

그림 6(a)는 조건 ①의 구동파형을 각 sample에 인가하였을 때 출력되는 전류를 보인 것이다. 그림 6(b)는 조건 ②의 구동파형을 각 sample에 인가하였을 때

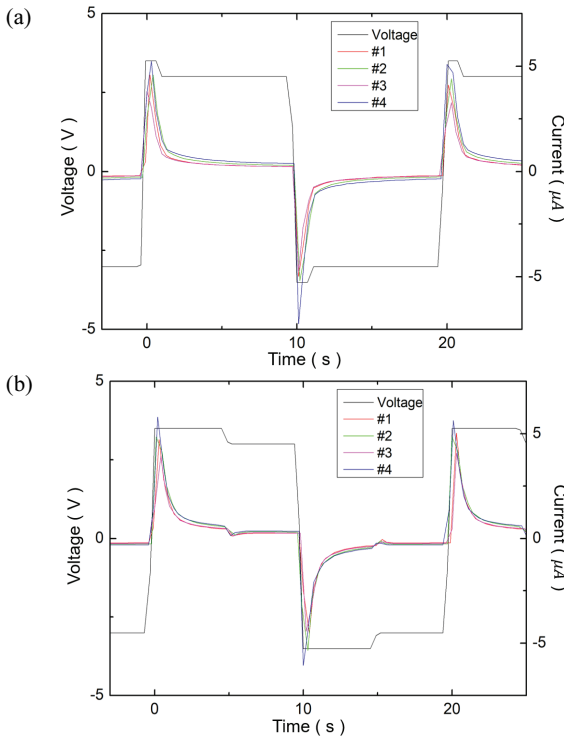


Fig. 6. Sample 1~4 output current. (a) When driven under condition ① and (b) when driven under condition ②.

출력되는 전류를 보인 것이다. 그림 6에 보이는 바와 같이 #4는 다른 sample들과 비교하여 2개의 구동조건에서 출력된 전류 값이 가장 높다는 것을 알 수 있다. 전류 값이 가장 높다는 것은 그에 대응하여 이동하는 백색 하전입자들이 많음을 의미한다.

표 1은 2개의 구동조건을 각 sample에 인가하였을 때 이동하는 백색 하전입자의 전하량을 I, II 영역으로 구분하여 나타낸 것이다. 표 1에 보이는 바와 같이 모든 sample의 셀 내에 주입된 백색 하전입자의 특성을 비교했을 때, 패널 내에 생성된 전계에 의하여 일시에 가장 많이 이동하는 백색 하전입자의 전하량은 #4인 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 6에 보인 전류 그래프를 같이 논의하는 것이 바람직하다. 즉, #1~3에 비하여 #4는 상대적으로 큰 q/m 값을 지니고 있는 백색 하전입자들이 셀 내에 많이 주입되어 있음을 의미한다. #3과 #4는 같은 RAMP 파형을 이용하여 백색 하전입자를 셀 내에 주입하였지만, 하전입자의 특성을 비교하였을 때 현격한 차이를 발견할 수 있다. 이러한 차이가 존재하는 이유는 #3을 제작하기 위하여 인가되는 APLM 전압 파형의 전력이 #4를 제작하기 위하여 인가되는 APLM 전압 파형의 전력보다 적기

Table 1. Charge amount of white charged particles in each sample under various driving conditions.

Sample	Driving condition	Q_I [μC]	Q_{II} [μC]
1	①	4.805	2.993
	②	4.208	1.954
2	①	4.872	2.793
	②	4.959	1.976
3	①	4.631	2.863
	②	4.368	2.159
4	①	5.464	3.138
	②	5.108	2.945

때문이다.

#2와 #4를 제작하기 위하여 인가되는 APLM 전압 파형을 전력 측면에서 비교하였을 때, #2의 전력이 #4의 전력보다 2배 크게 인가되었다. 따라서 #2의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자가 #4보다 더 많아야 함에도 불구하고 하전입자의 특성을 비교하였을 때 #4의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자가 더 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 #2의 셀 내에 백색 하전입자들을 주입할 때 적용하는 인가 파형의 특성에 기인하는 것으로, #2를 제작할 때 인가하는 APLM 전압 파형은 DC 전압 파형으로 큰 q/m 값을 지닌 하전입자뿐 아니라 작은 q/m 값을 지닌 하전입자도 셀 내에 동시에 주입되기 때문이며, 이는 #4와 같은 RAMP 파형 인가에 의해 개선됨을 앞서 언급한 바와 같이 확인하였다. 반면, APLM으로 셀 내에 백색 하전입자들을 주입하지 않은 #1은 다양한 q/m 값을 지닌 하전입자가 무작위로 셀 내에 주입되어 있으며 #2의 경우와 거의 유사한 표동 특성을 확인할 수 있다.

그림 6 및 표 1을 참고하여 구동조건 ①에서 #4와 나머지 sample들의 전하량 Q_I 를 비교하면 #4는 #1과 $0.659 \mu C$, #2와 $0.592 \mu C$, #3과 $0.833 \mu C$ 의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 구동조건 ②에서 #4와 나머지 sample들의 전하량 Q_I 를 비교하면 #4는 #1과 $0.9 \mu C$, #2와 $0.149 \mu C$, #3과 $0.74 \mu C$ 의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 APLM으로 제작하지 않은 #1을 포함하여 APLM으로 제작한 #2, #3 그리고 #4 중에서 #4의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자가 영역 I에서 가장 많이 이동한 것을 확인할 수 있다.

Q_I 와 Q_{II} 의 전하량 중에서 패널 특성을 결정하는 데 가장 중요한 것은 drift 영역에서 이동한 전하량 Q_I 이

다. Q_f 의 전하량이 높다는 것은 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 많이 주입되어 있기 때문에 초기에 형성되는 전계에 빠르게 대응하여 이동할 수 있다고 판단된다. 앞서 설명한 바와 같이, 4개의 sample들에 대하여 영역 I에서 이동한 전하량을 비교해보면 #4가 다른 sample들에 비하여 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 q/m 값이 상대적으로 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 많이 주입되어 있는 것으로 판단된다. #1~3은 #4에 비하여 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 셀 내에 적게 주입되어 초기에 형성되는 전계에 빠르게 대응하여 이동하는 하전입자들이 적은 것으로 판단된다. 패널을 제작할 때 인가하는 APLM 파형 중 전력 측면에서 볼 때 RAMP 파형이 구형파보다 일시적으로 구동하는 데 유리한 것을 확인하였다. 결과적으로 각 sample에 인가되는 구동조건에 따른 백색 하전입자의 특성을 비교해 보면, 앞서 설명한 것과 같은 이유로 판단할 수 있다. APLM으로 제작한 sample의 경우 영역 I, II에서 이동한 전하량은 구동조건 ①이 구동조건 ②보다 크다. 특히 #4의 경우 Q_f 은 다른 sample들과 비교하였을 때 가장 큰 값을 보이는데 이는 일시에 하부의 하전입자가 이동할 수 있음을 의미한다.

계단파의 주기는 표 1에 보인 바와 같이 image force를 극복하기 위해서 인가하는 전압의 주기가 긴 조건보다 짧은 조건이 오히려 더 큰 전하량의 이동을 야기함으로써 입자이동이 상대적으로 더 활성화되어 있음을 알 수 있다.

4. 결론

하전입자를 제조하는 과정에서 하전입자들의 고유 전하량 대 질량비(q/m)가 균일하게 제조되는 것은 제조원리상 불가능하며, 따라서 일정한 불균일성을 가진다. 본 연구에서는 APLM으로 제작하지 않은 1개의 sample과 APLM의 방식을 다르게 하여 3개의 sample을 제작하였다. 각 sample의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 특성을 비교하기 위하여 2가지의 구동 조건을 인가한 후 표동전류 및 포화전류를 측정하였다. 각 구동 조건에서 모든 sample의 출력전류를 비교한 결과로부터 #4의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 전류특성을 다른 sample들과 비교할 때 상대적으로 큰 q/m 값을 가지는 것을 확인하였다. 대표적으로 구동조건 ①을 각 sample에 인가하였을 때 영역 I에서 이동한 전하량을 비교하면, #1은 $4.805 \mu C$, #2는

$4.872 \mu C$, #3은 $4.631 \mu C$ 으로 $5 \mu C$ 을 넘지 못하지만 #4는 $5.464 \mu C$ 으로 백색 하전입자의 전하량이 상대적으로 크며, 하전입자를 동시에 이동하는 데 유리함을 확인하였다. APLM으로 DC 파형을 사용하게 되면 불균일한 q/m 값을 지닌 전하들 중에서 작은 q/m 값을 지니고 있는 전하들이 셀 내에 주입되어서 구동 전압을 낮추는 데에는 한계가 있다. 기존에 사용하였던 방식과 달리 APLM으로 RAMP 파형을 사용하여 상대적으로 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들을 셀 내에 주입하여 구동 전압을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 하전입자의 일시적 운동을 유기할 수 있다. 또한, 모든 sample에 인가한 구동 전압은 구형파가 아닌 계단파를 사용하였다. Image force를 제거하는 전압의 주기는 짧은 쪽이 긴 쪽보다 전류 특성을 개선하는 것으로 판단되며, 이는 좀 더 정밀한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 전기영동 원리로 구동되는 격벽형 전자종이 디스플레이에서 하전입자 주입 방법 개선 및 구동 전압의 최적화 연구에 기여할 수 있을 것이며, 향후 하전입자의 반사율 및 응답시간에 관한 연구가 필요하다.

ORCID

Young-Cho Kim

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

감사의 글

본 연구는 2020년도 청운대학교 학술연구조성비 및 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2017R1A2B1010310).

REFERENCES

- [1] Y. Chen, K. Denis, P. Kazlas, and P. Drzagic, *J. Soc. Inf. Disp.*, **32**, 157 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.1831820>]
- [2] W. C. Kao, J. J. Liu, and M. I. Chu, *J. Disp. Technol.*, **6**, 625 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jdt.2010.2068035>]
- [3] S. J. Telfer and M. D. McCreary, *J. Soc. Inf. Disp.*, **47**, 574 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sdtp.10736>]
- [4] S. Mukherjee, W. L. Hsieh, N. Smith, M. Goulding, and J. Heikenfeld, *Appl. Opt.*, **54**, 5603 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.54.005603>]
- [5] I. Ota, J. Ohnishi, and M. Yoshiyama, *Proc. IEEE.*, **61**, 832

- (1973). [DOI: <https://doi.org/10.1109/proc.1973.9173>]
- [6] 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>]
- [7] J. Heikenfeld, *Proc. Advances in Display Technologies; and E-papers and Flexible Displays* (SPIE OPTO, San Francisco, USA, 2011) p. 795608. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.874294>]
- [8] S. Mukherjee, N. Smith, M. Goulding, C. Topping, S. Norman, Q. Liu, L. Kramer, S. Kularatne, and J. Heikenfeld, *J. Soc. Inf. Disp.*, **22**, 106 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.225>]
- [9] A. Gao, M. Cao, J. Yan, L. Li, X. Li, S. Jiao, and T. Zhao, *Adv. Graphic Commun. Print. Packag.*, **543**, 788 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3663-8_106]
- [10] B. Comiskey, J. D. Albert, H. Yoshizawa, and J. Jacobson, *Nature*, **394**, 253 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/28349>]
- [11] S. K. Eshkalak, M. Khatibzadeh, E. Kowsari, A. Chinnappan, W.A.D.M. Jayathilaka, and S. Ramakrishna, *Opt. Laser Technol.*, **117**, 38 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.003>]
- [12] R. Qiao, X. L. Zhang, R. Qiu, and Y. S. Kang, *Colloids Surf.*, **A**, **313**, 347 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.04.146>]
- [13] W. C. Kao and J. C. Tsai, *IEEE Trans. Electron Devices*, **65**, 1023 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/ted.2018.2791541>]
- [14] Y. C. Kim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, In press (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00206-y>]
- [15] 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>]
- [16] 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>]
- [17] H. J. An and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 31 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.1.31>]
- [18] 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>]