

전기영동 디스플레이에서 전자 잉크의 전류 특성 및 평가

안형진, 김영조 

청운대학교 전자공학과

Current Properties and Evaluation of Electronic Ink in Electrophoretic Display

Hyeong-Jin An and Young-cho Kim

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

(Received September 17, 2019; Revised October 7, 2019; Accepted October 10, 2019)

Abstract: An investigation was conducted to determine whether the ratio of the fluid to the charged particles affects the panel reflexivity rate and the drifting current flowing in the panel, in electrophoretic-based electronic paper. In this regard, three panels were produced in this study with the ratio of the charged particles to the fluid set as 1:5, 1:1, and 5:1. Each sample was driven using an identical input pulse, for which the current flowing in the panel and the output voltage of the photodiode were measured for the panel reflexivity rate. Consequently, the drifting current initially exhibited a peak value and a saturated value at a later point. This value was proportional to the ratio of the charged particles, and it was similar to this ratio when it is higher than 1:1. The output voltage of the photodiode due to the panel reflexivity rate was proportional to the ratio of the charged particles. However, the response speed decreased if the ratio was higher than 1:1. It is expected that the results of this study will contribute to the analysis of the charging of charged particles in electrophoretic-based electronic paper, and the selection of an appropriate concentration.

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

1. 서론

디스플레이의 발달로 도심 속은 LED, LCD, OLED의 컬러풀하고 화려한 발광형 디스플레이가 인간의 실생활에 어디든 빠지지 않고 옥외 광고판, 가게 간판 등으로 인간의 구매 욕구를 증진시키고 마케팅에 활용하고 있다. 그러나 이는 밤, 낮을 가리지 않아 인간의 눈은 밤이 되어도 쉬지 못하여 피로함을 느끼기 쉽다. 특히, 청색광은 약 440 nm 파장인 빛이며, 에너지로 변환하면 2.81 eV로 안구의 시신경을 이루는 분자들의 결합에너지보다 높으므로 분자결합을 끊어 안구의 시

신경을 손상시킨다. 이와 달리 전자종이 디스플레이는 발광형 디스플레이가 아닌 반사형 디스플레이로 디스플레이 장치에서 안구로 광을 직접 비추지 않고 외부 광원을 반사하여 정보를 표시하는 디스플레이 장치이다 [1]. 전자종이 디스플레이는 종이와 가장 비슷한 전자 디스플레이 장치로 시야각이 넓으며, 반사하는 파장의 색이 아닌 파장의 색은 대부분 흡수하고 반사하는 파장의 색만 반사하여 정보를 표시하며, 외부 광을 반사하여 정보를 표시하기 때문에 안구의 피로도가 적은 장점이 있다 [2,3].

이러한 전자종이 디스플레이를 다방면으로 실생활에 응용하기 위해 컬러화에 관한 연구가 진행되고 있다. 전자종이 디스플레이는 전기습윤 방식, 전기변색 방식, twist ball 방식, cholesteric 방식 등 다양하게 연구되었으나, 최근에는 전기영동현상을 이용한 방식이 주로 사용되고 있다 [4,5].

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

여기서 전기영동이란 현탁액 내의 전하를 띤 입자가 전기장의 영향을 받아 상반되는 극성을 띤 전극으로 이동하는 현상을 지칭한다. 이러한 전기영동현상을 이용한 전자종이 디스플레이로는 capsule에 대전입자를 충전한 방식인 micro capsule형과 대전입자를 격벽에 충전한 격벽형 전자종이가 있다. 두 방식은 대전입자의 분포를 전체적으로 고르게 하기 위해 각각 micro capsule과 격벽으로 공간을 나누어 준 것이다. micro capsule형과 격벽형 전자종이는 투명 전극을 형성한 상부기판과 하부기판 사이에 대전입자를 주입한 구조로 전기적 신호에 따라 대전입자가 상반되는 극을 띤 전극으로 이동하여 정보를 표시한다 [6,7]. 예를 들어서 백색을 표시하고자 할 때에는 백색을 띤 대전입자의 전하와 상반되는 전압을 상부기판의 상부전극에 인가한다. 이로 인해 백색을 띤 대전입자는 전기장의 영향을 받아 상부기판으로 이동하게 된다. 이에 따라 패널 외부에서는 백색으로 인지하여 백색을 표시할 수 있다.

이때 전기영동방식 전자종이 디스플레이는 공통적으로 대전입자가 전기장에 영향을 받아 운동할 때 표동전류를 발생시킨다 [8]. 전기장의 영향으로 인해 대전입자가 이동할 때 대전입자가 보유한 전하도 함께 이동한다. 이로 인해 표동전류가 발생한다. 대전입자의 이동으로 인한 표동전류는 측정이 가능하며, 측정을 통해 명확한 규명이 필요하다.

그림 1은 격벽형 전자종이의 한 셀에서 (+) 전하를 띤 백색 대전입자의 운동에 의한 표동전류 발생 메커니즘을 보인 것으로 백색 대전입자와 전기적으로 중성인 투명 유체가 패널에 주입되어 있고 하부전극은 접지한 상태이다. 패널의 기판과 전극, 그리고 격벽의 재료는 투과도가 높은 재료를 선호한다. 상부기판과 하부기판은 패널 내의 공간을 형성하기 위해 처짐이 발생해선 안 된다. 그리고 격벽은 상부기판과 하부기판의 사이를 지탱할 수 있는 경도(hardness)가 요구되며, 전기적으로 절연되어야 한다. 그림 1(a)에서는 상부전극에 양의 전압을 인가하여 전기장의 방향이 상부전극에서 하부전극으로 수직하게 발생된다. 이로 인해 (+) 전하를 띤 대전입자가 전위가 낮은 하부전극으로 이동한다. 결과적으로 (+) 전하가 하부전극으로 이동했기에 양의 표동전류를 발생시킨다. 반면, 그림 1(b)에서는 음의 전압을 상부전극에 인가하여 전기장의 방향이 하부전극에서 상부전극으로 수직하게 발생된다. 이로 인해 대전입자가 그림 1(a)와 반대 방향인 상부전극으로 운동한다. 이는 (+) 전하가 상부전극으로 이동했기에 음의 표동전류를 발생시킨다.

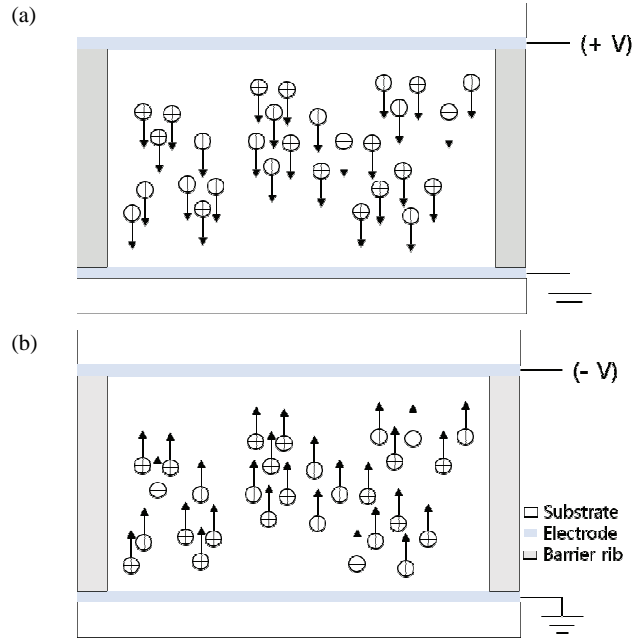


Fig. 1. Mechanism of drift current induced by charged particles; (a) positive drift current and (b) negative drift current.

본 연구에서는 격벽형 전자종이에 주입되는 전자 잉크의 대전입자 운동에 따른 표동전류와 반사율을 해석하였으며, 대전입자와 유체의 비율을 다르게 혼합하여 대전입자의 농도에 따른 표동전류와 반사율에 관한 관계를 실험을 통해 보이고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 패널 조건과 패널 제작

격벽형 전자종이는 전극 사이에 대전입자가 운동할 수 있는 공간이 필요하다. 이처럼 전극 사이에 공간을 유지하기 위해 격벽을 형성하였으며, 격벽의 높이는 $53.57\ \mu\text{m}$ 를 만족하게 형성하였고, 한 셀의 active 영역은 $220\ \mu\text{m} \times 210\ \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 격벽형 전자종이의 하부기판 제작은 photolithography로 제작하였고 하부전극 patterning은 positive PR (photoresist), 격벽 patterning은 negative PR을 사용하였으며, negative PR의 현상 특성상 응력이 강하여 격벽의 재료로 su-8을 사용하였다. 또한, 격벽형 전자종이는 외부 광을 패널 내의 대전입자가 반사하여 정보를 표시하므로 기판과 전극의 투과도가 높을수록 유리하기 때문에 각각

soda-lime glass와 ITO를 채택하였다. 그리고 실험에 사용된 패널은 3 전극형 반사형 디스플레이에 관한 연구에 사용한 패널을 이용했기 때문에 하부전극이 분리되어 있지만 본 실험에서는 공통 전극으로 사용하였다.

그림 2(a)는 전자잉크 혼합 방법에 대한 흐름도이다. 실험에 사용된 전자잉크는 (+) 전하를 띤 백색 대전입자와 중성인 투명 유체를 혼합하여 제작하였고 대전입자의 농도가 표동전류와 반사율에 미치는 영향을 연구하기 위해 대전입자와 유체의 질량비율은 1:5, 1:1, 5:1로 혼합하였다. 대전입자와 유체의 혼합은 대전입자의 뭉침을 해소하고 유체 내 균일하게 분산시키기 위해 MUJIGAE사의 ultrasonic mixer인 SD-120H로 30분간 분산시키고 WireMix사의 vortex mixer인 VM-10로 혼합하였다. 이때, 대전입자의 재질은 TiO₂를 사용하였고, 유체는 isopar M과 halocarbon 0.8을 2:1 비율로 혼합하여 사용하였다.

대전입자의 뭉침은 고유의 전하량 대 질량비(q/m)를 손상시켜 입자의 운동을 저하시키기 때문에 대전입자의 뭉침을 해소하고 유체 내 균일하게 분산시키는 것은 매우 중요하다 [9]. 본 연구에서는 대전입자에 의한 표동전류를 측정하고 그 움직임을 이해하기 위해 single particle만 사용하였고 photodiode의 출력전압은 매우 작아 반사율 변화를 확인하기 어렵기 때문에 보다 반사율 변화가 확실한 백색 대전입자를 사용하였다.

대전입자는 전하를 이루는 물질인 CCA (charge control agent)로 코팅되어 있기 때문에 전하를 잃거나 얻지 못한다. 실험에 사용된 백색 대전입자는 TiO₂를 중심부 물질로 하여 methylmethacrylate와 acrylamide를 주성분으로 하는 고분자 shell을 분산중합공정(dispersion polymerization process)으로 공중합(copolymerization)하여

제조한다.

다만 CCA가 탈락하거나 더 입혀지는 경우 전하를 잃거나 얻을 수도 있다. 선행연구에 의하면 CCA가 탈락하여 전하를 잃은 경우에는 대전입자의 전하량 대 질량 비(q/m)가 작아져 인가전압에 의한 대전입자의 운동 속도가 느려지고 영상력 또한 줄어들게 되는 것을 확인했다. 반대로 q/m이 커지면 인가전압에 의한 대전입자의 운동 속도가 빨라져 대전입자의 운동 에너지가 높아지는 것을 확인했다. 대전입자의 높은 운동 에너지는 전극이나 다른 대전입자와 충돌 시 CCA를 이탈시키거나 전극의 파괴를 야기한다. 따라서 표동 전류 발생에 의해 전하를 잃거나 얻게 되는 상황은 발생하지 않으며, 이에 따라 전자잉크로의 성능을 잃어버리지 않는다.

앞서 설명한 바와 같이 대전입자의 높은 운동 에너지는 전극과 대전입자의 파괴를 야기해 투명 유체가 없는 토너 입자를 사용했던 경우에는 전자잉크와 전극이 직접 충돌하지 않게 절연층을 전극 위에 증착시켜 완충층을 형성하였다. 그러나 본 연구에서 사용된 전자잉크는 유체의 점도에 의해 대전입자의 운동 에너지가 제한된다. 이로 인해 불필요해진 완충층을 제거하고 전자잉크와 전극을 직접 닿게 구성하였다.

패널 제작 방법에 대한 과정은 그림 2(b)에 보였다. 우선, 전자잉크를 하부기판의 모든 cell에 충전할 수 있도록 충분히 충전하였다. 이후, 상부기판과 정합하고 packaging하여 패널을 제작하였다. 본 실험에서 사용된 sample #1은 대전입자와 유체의 비가 1:5, #2는 1:1, 그리고 #3은 5:1이다.

2.2 측정 방법

본 실험에서 대전입자에 의한 표동전류를 측정하기 위해 패널 구동은 컴퓨터로 제어가 가능한 ELP사의 pulse generator인 EEC-650를 사용하였고, 전류 측정은 Agilent사의 digital multimeter인 34461A로 측정하였다. 그림 3은 격벽형 전자종이의 전류 측정 시스템을 보인 것이다. 우선, computer로 패널에 인가할 전압을 pulse generator에 입력하여 구동하면 패널에 입력된 전압이 인가된다. 이에 따라 패널 내에 전계가 형성되고 대전입자는 전계의 영향을 받아 전기영동하게 된다. 이때, 대전입자의 이동은 전하의 이동으로 간주할 수 있다. 따라서 대전입자의 이동에 의해 표동전류가 발생하게 된다. 이는 매우 낮은 전류 값으로 이를 측정하기 위해 미세 전류 측정이 가능한 digital

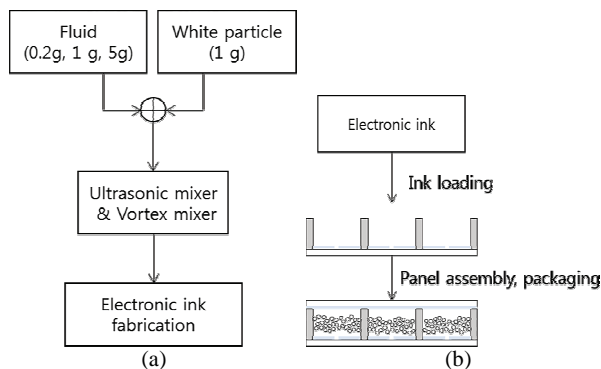


Fig. 2. Panel fabrication and electronic ink mixing method (a) Electronic ink mixing method and (b) Panel fabrication method.

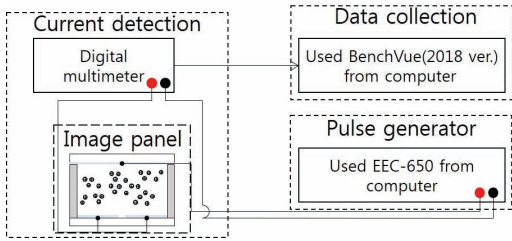


Fig. 3. Current measurement system of barrier rib type electronic paper.

multimeter로 측정하였다.

Digital multimeter에서 측정된 data는 computer를 구동하여 Agilent사의 software인 BenchVue (2018 ver.)로 수집하였다. 수집한 전류 값은 유효 면적으로 나누어 전류 밀도로 표기하였다. 또한, ROI (region of interest)를 조절해 원하는 구간을 적분할 수 있는 OriginPro (8.5 ver.)의 기능을 사용하여 계산된 전류 밀도 값을 0s부터 25s까지 적분해서 전하밀도 값을 구하였다. 전하밀도는 단위면적당 흐르는 전하량으로 대전입자의 전하량을 알면 패널 내에 운동한 대전입자의 수를 유도할 수 있다.

그리고 반사광 측정은 본 연구팀이 제작한 응답시간 측정 시스템을 사용하였다 [10]. 그림 4는 격벽형 전자 종이의 반사율에 의한 photodiode 출력전압 측정 시스템을 보인 것이다. 전류 측정 시스템과 마찬가지로 우선 computer로 패널에 인가할 전압을 pulse generator를 통해 패널에 전압을 인가하였다. 이에 따라 대전입자는 패널에 형성된 전계에 의해 운동하게 된다. 이로 인해 패널이 반사할 수 있는 광의 양인 반사율이 변화하게 된다. 이를 측정하기 위해 적분구의 laser를 패널에 향하게 조사하여 반사되는 광을 적분구의 photodiode가 검출하였다. photodiode 출력전압은 시간에 따라 Agilent사의 oscilloscope인 DSOX2012A를 통해 최종출력을 얻었다. 측정된 data는 앞서 언급한 BenchVue (2018 ver.)를 computer로 구동하여 수집하였고 전류 측정과 반사율에 의한 photodiode 출력전압 측정은 동시에 이루어졌다.

패널 구동은 하부전극을 접지하고, 상부전극에 음의 전압을 인가하여 구동하였고 이로 인해 발생한 전계에 의해 백색 대전입자가 상부기판으로 이동하게 된다. 이때, 백색 대전입자가 이동하면서 발생하는 표동전류와 반사율 변화에 의한 photodiode의 출력전압을 측정하였다. 이를 통해 본 연구에서는 대전입자와 유체의 비를 다르게 혼합하여 만든 패널로 대전입자에 의한 표

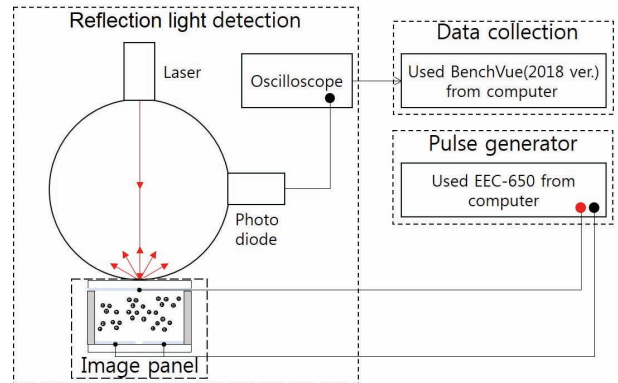


Fig. 4. Photodiode output voltage measurement system by reflectance of barrier rib type electronic paper.

동전류와 photodiode 출력전압을 비교하여 격벽형 전자 종이의 구동 특성을 비교 분석하여 대전입자와 유체의 비에 대한 관계를 논의하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전류 측정 결과

그림 5는 대전입자가 상부기판으로 이동할 때 발생한 표동전류를 전하 밀도로 변환한 그래프이다. 그림 5를 보면 모든 sample에서 전류 값이 순간적으로 peak 값을 갖고 하강한 상태에서 포화되는 전류 값을 보인다. 그 peak 값은 #1의 경우 -233.56 nA/cm^2 이고, #2와 #3의 경우 각각 -314.76 nA/cm^2 , -356.32 nA/cm^2 이고 포화 값은 #1의 경우 -21.59 nA/cm^2 이고, #2와 #3의 경우 각각 -40.46 nA/cm^2 , -41.4 nA/cm^2 이다. 이는, 형성된 전계에 반응하는 대전입자에 의한 것으로 초기에 빠르게 반응하는 대전입자들이 상부기판으로 이동하여 매우 짧은 시간에 운동 에너지를 얻게 된다. 이때, 상부기판으로 이동한 대전입자는 상부기판에 점유하게 되어 이동하지 않고 부착된 상태가 된다.

패널에 흐르는 전류는 유체 내 대전입자의 이동에 의한 것으로 상부기판에 점유한 대전입자는 이동이 불가능해 전기전도에 기여하지 못하게 된다. 그럼에도 일정한 표동전류 값을 보이는 것은 느리게 반응하거나 반응하지 않는 대전입자들이 상부기판으로 느리게 움직이거나 유체 내에 부유하고 있어 전하가 운동하게

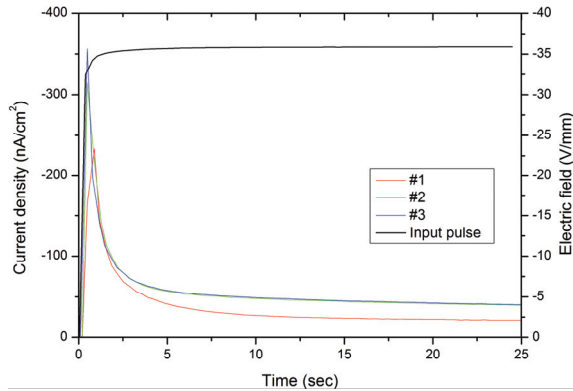


Fig. 5. Drift current of charged particles with various mixing ratios for input pulses.

되고 이는 표동전류를 발생시키기 때문이다.

또한, 그림 5에서 보는 바와 같이 sample 간 표동전류 값의 차이를 보이는 것은 대전입자의 농도에 의한 것으로 농도가 높을수록 전계에 의해 이동하는 대전입자의 농도가 높아 전기전도를 증가시키는 것으로 이해된다. 그러나 #2와 #3의 표동전류 값은 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 #3의 경우에 셀 내에 빠르게 움직이는 대전입자의 농도가 높지만 느리거나 움직이지 않는 대전입자 또한 농도가 높아 빠르게 움직이는 대전입자의 이동을 방해하고 지속적인 충돌과 마찰에 의해 본래 가진 q/m 의 변형을 유발하여 대전입자의 운동이 어려워지는 것으로 판단된다. 이로 인해 #3의 포화 표동전류가 #2의 포화 표동전류와 비슷하게 된다.

또한, 각 전류 밀도 값의 적분 값은 전하 밀도 값으로 패널 구동 시 전계에 의해 움직인 대전입자가 띠 총 전하량을 뜻한다. 이를 계산한 결과 #1은 944.3 nC/cm^2 , #2는 $1,438 \text{ nC/cm}^2$, #3은 $1,465 \text{ nC/cm}^2$ 으로 계산되었다. 이는 높을수록 패널 내의 이동한 대전입자가 많은 것으로 전계에 반응하는 대전입자의 농도와 연관 지을 수 있다. 마찬가지로 #2와 #3의 적분 값에서 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 앞서 설명한 바와 같은 이유에 의한 것으로 판단된다.

3.2 대전입자형 디스플레이의 반사율에 의한 photodiode 출력전압 및 응답 시간 측정 결과

그림 6은 250초 동안 전계를 형성하여 대전입자가 상부기판으로 이동할 때 변화하는 반사율을 photodiode로 측정하여 반사율 변화를 photodiode의 출력전압으로 보인 것이다. 패널 구동 초기에 대전입자가 유체 내에

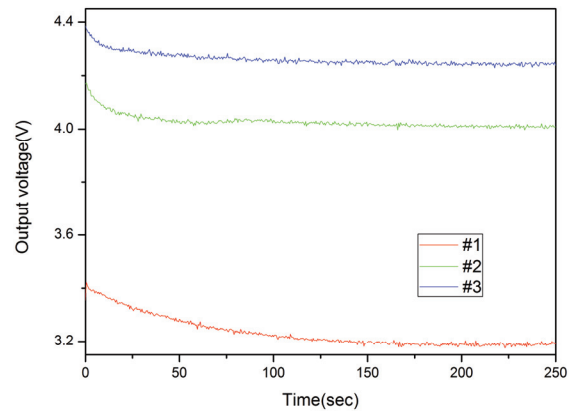


Fig. 6. Output voltage measured from photodiode of integrating sphere by reflectance of barrier ribs type electronic paper.

부유할 때보다 대전입자가 상부기판에 점유할 때 photodiode의 출력전압이 낮아지는 경향을 보인다. 이는 패널 구동 초기에 대전입자가 상부기판을 충분히 점유하지 않은 것에 기인한다. 패널 구동 초기에는 대전입자가 전계의 영향을 받아 상부기판으로 이동하고 있다. 이때, 패널로 입사하는 광은 상부기판에 점유한 대전입자에 의해 반사되기도 하지만 대전입자가 상부기판에 충분히 점유하지 못해 상부기판에 점유한 대전입자의 틈과 격벽으로 산란과 투과가 발생한다. 이 때문에 패널 중심부에 위치한 이동 중이거나 전하를 잃어 부유한 대전입자에 의해서도 광이 반사된다. 반면, 시간이 충분히 지나 대전입자가 상부기판에 대부분 점유했을 때는 상부기판에서 하부기판으로 투과하는 광이 대전입자에 의해 대부분 차단되어 산란이 매우 적게 발생한다. 이로 인해 패널 구동 초기보다 시간이 지난 후가 photodiode의 출력전압이 줄어든다.

Photodiode의 출력전압의 하강시간은 대전입자의 응답시간으로 간주하여 측정할 수 있다. 그 결과, #1은 93.55s, #2는 43.24s, #3은 77.06s로 측정되었다. 이는 앞서 언급한 표동전류 값과 마찬가지로 오히려 대전입자의 농도가 지나치게 높은 경우에는 전계에 의해 빠르게 반응하는 대전입자의 이동을 느리게 반응하는 대전입자와 반응하지 않는 대전입자가 방해한 것으로 이해할 수 있다. 또한, #1의 경우 #2와 #3에 비해 매우 photodiode의 출력전압이 포화되는 시간이 느리다. 이는 #2와 #3의 경우 #1에 비해 상대적으로 빠르게 반응하는 대전입자의 농도가 높아 빠르게 반응하는 대전입자만 상부전극에 점유해도 상부기판에서 하부기판으로 투과하는 광을 대부분 차단할 수 있지만 #1의

경우 photodiode의 출력전압이 포화되려면 대전입자의 농도가 낮은 것 때문에 느리게 움직이는 대전입자까지 상부기판에 위치해야 해서 포화되는 시간이 느린 것으로 판단된다.

그리고 반사광에 의한 photodiode의 출력전압은 입자의 농도가 가장 높은 경우에 높게 측정되었다. 이를 본 연구팀이 보유한 (주)제이앤씨테크사의 반사율 측정기(RT-200)를 사용해 반사율을 측정한 결과 #1의 경우 21%로 측정되었고, #2의 경우 30%로 측정되었으며, #3의 경우 31%로 측정되었다. 이는 #2와 #3의 경우 대전입자가 패널 내에 충분히 충전되어 미미한 차이를 보이는 것이고 #1의 경우 대전입자가 패널 내에 부족하게 충전되어 #1이 #2와 #3보다 반사율이 작은 것이다. 따라서 격벽형 전자종이에서 높은 대전입자의 농도는 높은 반사율과 빠른 응답시간을 초래하지만, 과도한 대전입자의 농도로 인하여 응답시간을 느리게 한다.

4. 결론

전계에 의한 대전입자의 운동은 전기전도에 기여하고, 그 크기는 대전입자의 농도가 결정한다. 본 연구에서는 대전입자와 유체의 비를 다르게 하여 3가지 sample을 제작하였고, 대전입자의 운동에 의한 표동전류와 반사율 변화에 따른 photodiode 출력전압을 측정하였다. 그 결과인 표동전류 측정 결과로부터 대전입자의 농도는 높을수록 전계에 의해 이동하는 대전입자의 농도가 높아 전기전도에 유리하였다. 그렇지만 대전입자의 과도한 농도는 오히려 대전입자의 운동을 방해하여 최적의 농도가 필요하다는 것을 확인하였다. 그리고 반사율에 의한 photodiode의 출력전압은 대전입자의 농도가 높을수록 높게 측정되었지만 #2와 #3의 반사율로 비교했을 때 미미한 차이인 것을 확인하였다. 이로써 격벽형 전자종이의 구동 시 전류 측정과 반사율에 의한 photodiode의 출력전압 측정을 통해 격벽형 전자종이의 반사율은 대전입자의 농도에 비례하고 응답시간은 비율이 1:1까지 비례하지만 그 이상으로 농도가 높아지면 반비례하는 것을 확인하였다.

본 연구는 전기영동을 이용한 격벽형 전자종이 디스플레이에서 대전입자의 충전량 및 농도의 최적화 연구에 기여할 수 있을 것이며, 향후 두 종류의 하전입자 운동에 관한 연구가 필요하다.

ORCID

Young-Cho Kim

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

감사의 글

본 연구는 2019년도 청운대학교 학술연구조성비 및 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2017R1A2B1010310).

REFERENCES

- [1] G. R. Jo, K. Hoshino, and T. Kitamura, *Chem. Mater.*, **14**, 664 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cm010664n>]
- [2] W. M. Chim, *M.S Thesis*, p. 1-86, Delft University of Technology, Delft (2009).
- [3] 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>]
- [4] 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>]
- [5] 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>]
- [6] B. Comiskey, J. D. Albert, H. Yoshizawa, and J. Jacobson, *Nature*, **394**, 253 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/28349>]
- [7] R. Wisnieff, *Nature*, **394**, 225 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/28278>]
- [8] 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>]
- [9] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 129 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.2.129>]
- [10] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Disp. Technol.*, **9**, 972 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2013.2273125>]