

격벽형 전자종이의 하전입자 필터링 방법 및 구동조건에 따른 응답시간 및 반사율 분석

이주원, 김영조 

청운대학교 전자공학과

Analysis of Response Time and Reflectivity According to Driving Conditions of Barrier Rib-Type E-Paper Fabricated by Charged Particle Filtering Method

Joo-Won Lee and Young-Cho Kim

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

(Received August 6, 2020; Revised September 9, 2020; Accepted September 9, 2020)

Abstract: For electronic paper displays using electrophoresis, the response time and reflectivity of the image panel fabricated by filtering are analyzed. For the filtering process, a square wave and ramp wave are applied to white charged particles with a unique q/m value. We divide the sample panels into #1 to #4 according to the applied waveform in the filtering process. Step waves comprising two steps are used to drive the panel; therefore, we divide the driving conditions into D1~D4. The applied voltage at the first stage of the half cycle of the driving waveform moves the charged particles attached via the image force from the electrode, and the applied voltage at the second stage moves the floating charged particles by detaching. As mentioned, four types of driving conditions (D1 to D4) classified according to the half cycle of the driving waveform are applied to the samples #1 to #4), which are classified according to four types of filtering process. When driving condition D1 is applied to the four types of sample panels, the rise time of #1 is 1.59s, #2 is 1.706s, #3 is 1.853s, and #4 is 1.235s, resulting in #4 being relatively faster compared with other sample panels, and showing the same trend in other driving conditions. As a result, we confirm that applying the driving condition D1 causes abrupt movement of the white charged particles injected into the cell. When the same driving waveform (D1) is applied to each sample, reflectivities of 32.1% for #1, 31.4% for #2, 27.9% for #3, and 63.4% for #4 are measured. From the experiment, we confirm that the driving condition D1 (1s of 3.5 V, 9s of 3.0 V) and ramp wave #4 in filtering are desirable for good reflectivity and response time. Our research is expected to contribute to the improvement of the filtering process and optimization of the driving waveform.

Keywords: Charged particles, Reflectivity, Response time, Driving voltage, Barrier rib-type electronic paper

1. 서론

일상에서 흔히 사용하고 볼 수 있는 종이와 같은 가

✉ 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.

독성을 특징으로 하는 전자종이는 눈의 피로감을 줄여 줄 수 있는 반사형 디스플레이이다 [1,2]. 반사형 디스플레이는 패널에 입사되는 외부 광을 흡수 및 반사하여 대중들에게 이미지를 표현할 수 있다. 이러한 반사형 디스플레이에서 전기영동의 원리를 기반으로 이미지를 표현하는 구조는 대표적으로 두 가지로 구분할 수 있다 [3]. 첫 번째는 E-ink사에서 개발한 구조로 마이크로캡슐 내에 투명한 중성유체와 극성이 다른 두

종류의 하전입자를 분산시켜서 제조하여 이미지를 표현한다. 이러한 구조는 구조 특성상 하전입자의 전하량 대 질량비(q/m)가 다양한 값으로 마이크로캡슐 내에 분산되어 있으므로 표현하고자 하는 컬러 및 이미지를 구현할 때 하전입자를 일시에 운동시킬 수 없으므로 구동전압이 상승하는 문제점을 가지고 있다 [4-6]. 두 번째는 Sipix사의 마이크로캡 구조와 비슷한 구조로 격벽을 동일한 간격으로 제작한 후 투명한 중성 유체와 극성이 다른 두 종류의 하전입자를 주입시켜서 제작하여 이미지를 표현하는 구조이다 [7-9]. 이러한 구조는 구조 특성상 하전입자의 q/m 값을 제어할 수 있어 표현하고자 하는 컬러 및 이미지를 구현할 때 하전입자를 일시에 운동시켜 구동전압을 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다 [10,11].

앞서 언급한 바와 같이 마이크로캡슐형 전자종이와 격벽형 전자종이는 셀 내에 주입되어 있는 하전입자의 q/m 값에 따라 패널 특성이 결정된다. 큰 q/m 값을 지닌 하전입자가 셀 내에 많이 주입되어 있으면 내부에 형성된 전계에 대응하여 빠르게 운동하는 하전입자가 많아진다. 즉, 일시에 다수의 하전입자가 운동하여 패널의 구동전압 및 응답시간 등의 패널 특성을 향상시킬 수 있다 [12]. Active particle loading method (APLM)는 격벽형 전자종이의 셀 내에 주입되는 하전입자의 q/m 값을 일정범위로 제어할 수 있는 방법으로 본 연구팀에서 연구된 바 있다 [13]. 패널의 이미지를 전환하기 위해서 구동전압을 인가하면 이에 대응하여 전계가 형성되고 셀 내의 하전입자들은 전계의 영향으로 상반되는 전극을 향해 운동하게 된다. 이때, 상부기판에 외부 광을 입사하면 상부전극을 점유하고 있는 하전입자의 종류에 따라 반사율이 변화하게 된다 [14]. 셀 내에 극성이 다른 두 종류의 하전입자를 주입하였을 때, 패널의 상부전극에 음의 전압을 인가하면 상부전극으로 양의 전하를 띤 백색 하전입자가 운동하여 상부기판에서 반사하는 외부 광이 시간에 따라 증가하게 된다 [15,16]. 그러나 패널의 상부전극에 양의 전압을 인가하면 상부전극을 점유하고 있는 백색 하전입자가 하부전극으로 운동하여 상부기판에서 반사하는 외부 광이 시간에 따라 감소하게 된다 [17].

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 패널 특성을 결정지을 수 있는 하전입자를 필터링하는 조건을 달리 하여 패널을 제작한 후, 상부기판에서 반사하는 외부 광의 반사율을 측정하여 백색 하전입자의 응답시간을 비교하고, 패널을 구동하기 위해서 두 단계로 구분해서 인가할 수 있는 계단파의 효율적인 구동조건 및 이에

따른 전기·광학적 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 전자잉크 및 패널 구조

두 종류의 하전입자를 셀 내에 주입하여 제작한 패널은 이미지를 전환할 때 운동하는 하전 입자의 응답시간을 상부기판에 외부 광을 입사시켜 시간에 따라 변화하는 반사율을 통하여 측정할 수 있기 때문에, 본 실험에서는 두 종류의 하전입자를 사용하는 것이 바람직하다. 본 실험에서 패널 특성의 비교 대상이 되는 백색 입자의 질량비를 흑색 입자의 4배가 되도록 고농축으로 혼합하였다. 이때, 백색 입자는 이산화 타이타늄(TiO_2)을 중심부로 하고, 흑색 입자는 카본 블랙(carbon black)을 중심부로 한 고분자-셀 구조로 제조하였다 [18]. 이와 같이 제조한 백색 입자는 양의 전하를 띠고, 흑색 입자는 음의 전하를 띤다. 그리고 투명한 중성 유체는 halocarbon oil 0.8과 isopar M을 혼합하였으며, 혼합 비율은 1:2이다. 결과적으로, 전자잉크의 혼합 비율은 고농축 백색 하전입자 5 g, 저농축 흑색 하전입자 1 g, 투명한 중성 유체 1.5 g의 비율로 혼합하였고, 앞서 언급한 바와 같이 질량비를 고려하면 백색 하전입자와 흑색 하전입자의 최종 혼합비는 20:1이 된다. 제작한 전자잉크는 초음파 분산기를 통하여 하전입자들을 분산시킨 후, 볼텍스 믹서를 이용하여 혼합하였다 [19]. 앞선 연구에서 이용한 하부기판의 구조를 본 실험에서 패널을 제작할 때 이용하였다 [20]. 그림 1은 하부기판의 구조를 현미경으로 촬영한 사진으로 ①은 셀의 가로길이, ②은 셀의 세로길이를 나타낸 것이다. 즉, 하나의 셀이 $210 \mu m \times 210 \mu m$ 가 되도록 격벽을 제조하였다. 그리고 하전입자가 운동하는 공간을 형성하기 위하여 격벽의 높이는 $53.57 \mu m$ 로 제조하였다. 그림 1에서

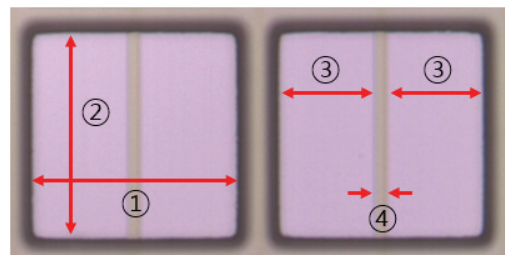


Fig. 1. Microscope image of the lower substrate.

③은 하부전극의 폭, ④은 하부전극의 간격을 나타낸 것이다. 이때, 하전입자가 운동하는 활성영역은 $200 \mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$ 가 된다.

2.2 패널 제작 및 구동파형

표 1은 각 샘플들의 조건 및 구동파형의 조건에 대하여 정리한 것이다. 표 1에 보인 바와 같이 본 실험에서는 4개의 샘플을 제작하여 패널 특성을 비교하였다. #1은 백색 하전입자를 필터링하지 않고 제작한 패널이고, #2~4의 패널들은 백색 하전입자를 필터링하여 제작한 패널들이다. 제작한 패널을 구동하기 위해서 Agilent사의 함수 발생기를 이용하였다. 구동파형의 총 주기에서 반주기는 10초로 설정하고 전압을 두 단계로 구분해서 인가하였다. 표 1에 보인 바와 같이 반주기에 첫 번째 전압을 인가하는 주기는 a, 두 번째 전압을 인가하는 주기는 b로 정의하였다. 그리고 반주기는 4개의 조건으로 구분하여 패널에 인가하였다. 구동 조건 D1은 a=1초, b=9초이고, 구동조건 D2는 a=3초, b=7초이고, 구동조건 D3은 a=5초, b=5초이고, 구동조건 D4는 a=7초, b=3초로 설정하였다.

Table 1. Summary table of image panel and its driving condition.

Sample	Filtering	Waveform type	Voltage	Cycle	Driving condition	Half-cycle condition	
						a	b
#1	Not	-	-	-	D1	1s	9s
#2	White particle	DC	-3.5 V	10s	D2	3s	7s
#3	White particle	RAMP	0~3.5 V	5s	D3	5s	5s
#4	White particle	RAMP	0~3.5 V	10s	D4	7s	3s

2.3 패널 특성 평가 및 측정 방법

그림 2는 전자잉크 및 샘플 제작과 구동파형의 인가에 따라 패널 특성을 비교하기 위해서 진행되는 실험의 흐름도를 나타낸 것이다. 그림 2에 보인 바와 같이 샘플에 구동파형을 인가하면 하전입자들이 전기영동의 원리를 기반으로 운동하게 된다. 이때, 2가지의 실험을 통하여 패널 특성을 판단할 수 있다. 첫 번째로 전류 측정 실험은 패널에 구동전압을 인가하면 셀 내에 주

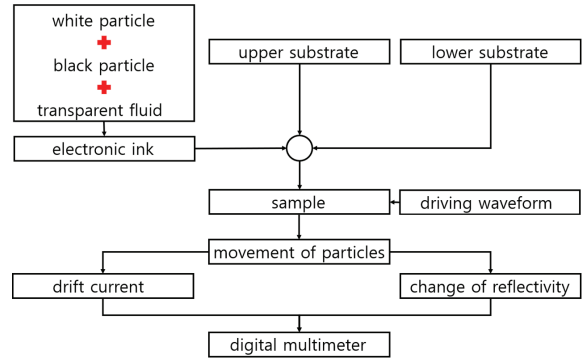


Fig. 2. Flow diagram of panel fabrication and characteristic evaluation.

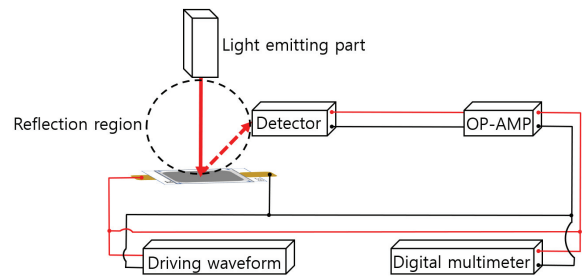


Fig. 3. Response time measurement system.

입되어 있는 하전입자가 전기영동의 원리를 기반으로 운동하여 발생하는 미세 표동전류를 측정하여, 운동한 하전입자의 전하량을 판단할 수 있다. 두 번째로 응답 시간 측정 실험은 패널에 구동전압을 인가하면 시간에 따라 변화하는 전계로 인하여 하전입자가 상반되는 전극으로 전기영동의 원리를 기반으로 운동하게 되어, 패널의 상부기판에 입사된 외부 광의 반사를 변화를 측정하여 전압에 대한 하전입자의 응답시간을 판단할 수 있다. 본 실험에서는 각 샘플의 응답시간을 측정하여 패널의 특성을 비교하였다.

그림 3은 패널의 응답시간 측정 방법을 나타낸 것이다. 제작한 샘플의 상부기판에 발광부 역할을 하는 적외선과 광을 검출할 수 있는 포토다이오드를 내장한 적분구를 위치시킨 후, 외부 빛이 투과할 수 없도록 샘플과 적분구 주변은 암실을 유지한다. 패널의 광학적 특성은 샘플의 상부전극에 구동파형을 인가하면 이에 대응하여 셀 내에 전계가 형성되고 주입되어 있는 하전입자는 전계에 영향을 받아 상반되는 전극으로 운동하여 상부기판의 이미지가 백색일 때는 입사된 적외선을 반사시키고, 상부기판의 이미지가 흑색일 때는 입사된 적외선을 흡수하게 된다. 이때, 상부기판에서 반사된 광은 적분구를 통하여 램버시안 반사를 하게 되고

포토다이오드가 이 광을 수신하여 전류로 출력하게 된다. 이때, 포토다이오드에서 출력된 미세한 전류 값으로 시간에 따라 변화하는 반사율을 비교할 수 없기 때문에, 반사율의 변화를 비교할 수 있는 데이터의 범위로 증폭기(OP-AMP)를 통하여 증폭하였다. 샘플에 인가하는 구동전압과 증폭기에서 출력된 값을 KEYSIGHT사의 디지털 멀티미터로 측정하였고, 측정된 데이터는 실시간으로 KEYSIGHT사의 BenchVue(2019)를 통하여 데이터화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구동파형

전자종이는 이미지를 유지할 때 영상력에 의해 전력 소모가 발생하지 않고, 이미지를 전환할 때에만 패널에 구동파형을 인가하여 전력소모가 발생하는 큰 장점을 가지는 반면에, 이미지를 변환할 때 응답시간이 느린 단점을 가진다. 이미지를 전환하기 위해서 인가하는 파형으로 기존에는 구형파를 사용하였다. 이와 같은 파형으로 패널을 구동하게 되면 구동전압을 상승시켜서 앞서 언급한 전자종이의 가장 큰 장점인 전력소비 감소 효과가 상쇄됨과 동시에 강한 전계로 인하여 하전입자의 충돌이 발생하게 되어 하전입자의 수명을 단축시키는 단점을 가진다. 본 실험에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 앞서 언급한 바와 같이 전압을 구분해서 인가할 수 있는 계단파를 사용하였다. 구동전압은 두 단계로 구분할 수 있다. 그림 4는 식 (1), (2)의 전압에 대한 하전입자의 운동을 나타낸 것이다.

$$V = \int_a^{d+\infty} \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r(2-x)^2} dx \quad [V] \quad (1)$$

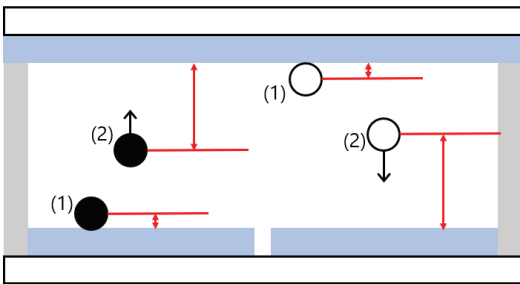


Fig. 4. Image force and electrophoresis of charged particles.

$$V = \frac{6\pi\eta vd}{\epsilon_0\epsilon_r\zeta} \quad [V] \quad (2)$$

식 (1)은 그림 4에 (1)로 표시한 것처럼 하부전극에 부착되어 있는 흑색 하전입자와 상부전극에 부착되어 있는 백색 하전입자를 영상력의 영향에서 극복시킨 후 유체에 부유시키기 위해서 필요한 전압을 나타낸 것이다. 이 전압은 본 실험에서 사용한 구동파형의 반주기에서 첫 번째 전압을 의미하며, 하전입자의 전하량이 크거나 하전입자와 전극의 간격이 가까울수록 높은 전압이 필요함을 의미한다. 식 (2)는 그림 4에 (2)로 표시한 것처럼 영상력을 극복한 후 유체 내에 부유하고 있는 흑색 하전입자를 상부전극으로, 백색 하전입자를 하부전극으로 운동시키기 위해서 필요한 전압을 나타낸 것이다. 이 전압은 본 실험에서 사용한 구동파형의 반주기에서 두 번째 전압을 의미하며, 하전입자의 전하량이 크거나 하전입자와 상반되는 전극의 간격이 가까울수록 낮은 전압이 필요하다는 것을 의미한다. 즉, 패널의 이미지를 전환할 때 인가하는 구동파형은 구형파가 아닌 두 단계로 구분할 수 있는 계단파를 사용하는 것이 유리하다고 판단된다.

3.2 응답시간 측정 결과

그림 5는 4개의 구동전압을 각 샘플에 인가하였을 때 셀 내 하전입자들의 운동으로 상부기판에서 반사하는 적외선을 포토다이오드로 측정된 출력전압을 4개의 구동조건으로 구분해서 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 구동조건 D1, 그림 5(b)는 구동조건 D2, 그림 5(c)는 구동조건 D3, 그림 5(d)는 구동조건 D4를 각 샘플에 인가하였을 때 출력전압을 나타낸 것이다. 이때, 출력전압은 시간에 따라 변화하는 패널의 반사율을 의미한다. 이를 통하여, 이미지를 전환할 때의 응답시간을 알 수 있다. 셀 내에 두 종류의 하전입자를 주입하였을 때 흑색 이미지에서 백색 이미지로 전환될 때를 상승시간, 백색 이미지에서 흑색 이미지로 전환될 때를 하강시간으로 정의한다. 이때, 상승시간과 하강시간을 합친 것이 패널의 응답시간이 된다.

각 샘플에 주입되어 있는 흑색 하전입자는 필터링 공정을 하지 않았기 때문에 셀 내에 다양한 q/m 값을 지닌 흑색 하전입자들이 주입되어 상부전극을 점유하고 있는 백색 하전입자가 하부전극으로 운동하고 흑색 하전입자가 상부전극을 점유하는 하강시간을 통하여 패널의 광학적 특성을 비교할 수 없기 때문에, 본 실험

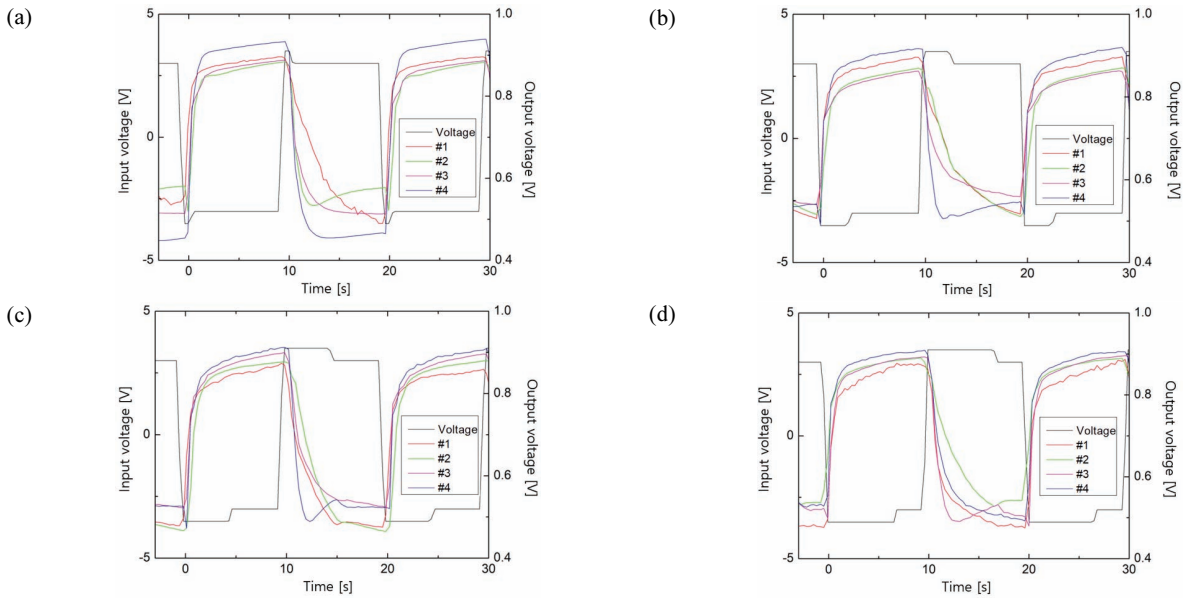


Fig. 5. Characteristics of response time measured by integral sphere for the samples (#1~4) according to driving condition D1~D4.

힘에서 제작한 샘플들은 백색 하전입자를 필터링한 것이므로 응답시간 중 상승시간에 대하여 패널의 광학적 특성을 비교하였다. 상승시간은 앞서 언급한 바와 같이 상부전극으로 운동하는 백색 하전입자의 변화를 측정하는 것으로 이를 통하여, 각 샘플의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 특성을 분석할 수 있다. 표 2는 4가지의 구동조건에 따른 상승시간을 각 샘플들로 구분해서 나타낸 것이다.

그림 5와 표 2를 참고하여 각 샘플의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 특성을 비교하였다. 모든 샘플은 4가지의 구동조건에서 측정한 상승시간이 동일한 경향을 보였고, 다른 구동조건들보다 구동조건 D1에서 모든 샘플의 상승시간이 상대적으로 더 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 이때, 각 샘플의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자의 q/m 값이 다르기 때문에 동일한 전계 내에서 일시에 운동하는 하전입자의 차이로 인하여 상승시간의 차이가 있다. #1은 APLM으로 백색 하전입자를 필터링하지 않아 셀 내에 다양한 q/m 값을 지니고 있는 하전입자들이 분포하게 된다. 그러나 #2~4는 일정범위 이상의 q/m 값을 지니고 있는 백색 하전입자를 필터링하여 셀 내에 주입한 샘플들이다. 이때, APLM으로 인가한 파형을 비교하면 #2는 #3, #4보다 높은 전력을 인가하여 큰 q/m 값을 지니고 있는 백색 하전입자를 셀 내에 상대적으로 더 많이 주입하여 패널의 응답시간이 개선되어야 함에도 불구하고 #4

Table 2. Rising time of white charged particles according to driving conditions D1~D4 for the image panels (#1~4).

Sample	Driving condition	Rising time [s]	Reflectivity [%]
#1	D1	1.590	32.1
	D2	2.644	
	D3	3.870	
	D4	3.492	
#2	D1	1.706	31.4
	D2	3.097	
	D3	2.205	
	D4	2.467	
#3	D1	1.853	27.9
	D2	3.377	
	D3	3.541	
	D4	2.442	
#4	D1	1.235	63.4
	D2	2.147	
	D3	2.475	
	D4	2.021	

보다 패널의 응답시간이 상대적으로 느린 것을 확인할 수 있는데, 이는 APLM으로 인가하는 파형 조건에 따라 필터링 되는 하전입자의 q/m 값이 달라지기 때문이다. DC파형으로 백색 하전입자를 필터링하게 되면 큰 q/m 값을 지닌 하전입자뿐 아니라 상대적으로 작은 q/m 값을 지닌 하전입자들도 셀 내에 동시에 주입되어 응답시간 및 구동전압을 개선하는 데 제한이 있지만 ramp파형으로 백색 하전입자를 필터링하게 되면

큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 dc파형과 비교하였을 때 상대적으로 셀 내에 많이 주입되어 응답시간 및 구동전압을 개선할 수 있다. 즉, #4는 #2와 비교하였을 때 절반이 되는 전력으로 큰 q/m 값을 지니고 있는 백색 하전입자를 셀 내에 상대적으로 더 많이 주입하여 상승시간을 개선할 수 있다. 그러나 #3은 #4와 비교하였을 때 절반이 되는 전력으로 큰 q/m 값을 지니고 있는 백색 하전입자를 셀 내에 상대적으로 많이 주입할 수 없어 상승시간을 개선할 수 없는데, 이를 통하여 상승시간을 개선하기 위한 APLM은 #4의 조건이 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한, #4는 #1과 비교하였을 때 백색 하전입자의 q/m 값을 필터링하면 상대적으로 큰 q/m 값을 지닌 하전입자가 셀 내에 많이 주입되어 동일한 전계 내에서 일시에 운동하는 하전입자가 많아 상승시간을 개선할 수 있다. 즉, #4는 다른 샘플들과 상승시간을 비교하였을 때 모든 구동조건에서 상승시간이 상대적으로 더 빠르다는 것을 확인할 수 있는데 이는 ramp파형을 10초 동안 인가하여 제작한 #4의 셀 내에 주입되어 있는 백색 하전입자가 다른 샘플들과 비교하였을 때 q/m 값이 큰 하전입자들이 상대적으로 많이 주입되어 패널의 특성을 개선할 수 있다. 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 셀 내에 많이 주입되어 있으면 내부에 형성된 전계에 빠르게 반응하여 상반되는 전극으로 일시에 운동하는 하전입자들이 많아져서 패널의 응답시간을 개선할 수 있다. 이와 같이 #4는 #2와 비교하면 백색 하전입자를 필터링하기 위해서 인가하는 파형의 전력을 1/2로 줄일 수 있고 패널의 응답시간도 개선할 수 있는 적합한 조건임을 확인할 수 있다.

각 샘플의 반사율을 측정하기 위하여 이용한 장비는 J&C Technology사에서 제작한 RT-200S로 측정하였다. 본 연구에서는 백색 하전입자를 필터링하여 패널을 제작하였기 때문에 백색 하전입자의 반사율을 측정하여 각 샘플들을 비교하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 백색 이미지의 반사율을 비교하면 #4는 #1과 31.3%, #2와 32%, #3과 35.5%의 차이를 확인할 수 있다. #4의 반사율이 다른 샘플들보다 높은 이유는 큰 q/m 값을 지닌 백색 하전입자들이 셀 내에 상대적으로 많이 주입되어 있기 때문이다. 즉, 큰 q/m 값을 지닌 백색 하전입자가 셀 내에 많이 주입되면 전계에 빠르게 대응하여 상반되는 전극을 향해 일시에 운동하는 하전입자가 많아 전극을 점유하는 하전입자 비율이 높아지기 때문에 이에 대응하여 반사율이 높아지는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 #4는 다른 샘플들과 비교하였을 때

큰 q/m 값을 지닌 백색 하전입자가 상대적으로 많이 주입되어 동일한 전계 내에서 전극을 점유하는 하전입자 비율이 높기 때문에 반사율이 높은 것을 확인할 수 있다. 즉, #4는 패널의 광특성을 개선할 수 있는 APLM의 적합한 조건임을 알 수 있다.

각 샘플을 구동하기 위해서 인가하는 구동파형의 조건은 반주기에서 정의하였던 a의 주기가 짧을 때 상승시간이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 모든 샘플들은 4가지의 구동조건에서 조건 D1이 다른 조건들과 비교하였을 때 셀 내의 백색 하전입자가 전계에 빠르게 반응하여 일시에 운동하는 하전입자가 많다는 것을 알 수 있다. 그리고 앞서 연구에서도 각 샘플에 인가하였던 구동파형의 반주기에서 하전입자가 영상력을 극복하기 위하여 인가하는 전압의 주기가 짧을 때 일시에 운동하는 하전입자가 많다는 것을 확인하였다. 이와 같이 구동파형으로 구형파를 사용하여 패널을 구동하는 것보다 계단파를 사용하여 패널을 구동하는 것이 패널 특성을 결정하는 하전입자를 활성화시키기에 가장 적합하다. 또한, 계단파의 반주기에서 영상력으로 인하여 전극에 부착되어 있는 하전입자를 유체 내에 부유시키기 위해서 인가하는 전압의 주기는 짧은 것이 전력 측면에서 하전입자를 운동시키기에 최적의 조건이라고 판단된다.

4. 결론

격벽형 전자종이의 셀 내에 주입되어 있는 하전입자는 패널의 특성을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 셀 내에 대부분 주입되어 있으면 동일한 전압이 인가되었을 때 응답시간 및 반사율이 개선되고 일시에 운동하는 하전입자들이 많아져서 구동전압을 낮출 수 있다. 본 연구에서는 백색 하전입자를 필터링하지 않고 제작한 1개의 패널과 필터링하여 제작한 3개의 패널의 응답시간 및 반사율을 비교하였다. 모든 샘플들은 4가지의 구동조건 중 구동조건 D1을 인가하였을 때 백색 하전입자가 전계에 빠르게 대응하여 일시에 많은 하전입자들이 운동하여 상대적으로 상승시간이 빠르다는 것을 확인하였다. 이때, 구동조건 D1에서 각 샘플의 상승시간을 비교하면 #4는 다른 샘플들보다 빠른 것을 확인하였고, 나머지 구동조건에서도 #4가 다른 샘플들과 비교하였을 때 상승시간이 빠르다는 것을 확인하였다. 추가적으로, 각 샘플에 동일한 구동파형을 인가하여 백색 이미지의 반

사율을 측정하였을 때 #1~3은 평균 30% 정도의 반사율이 측정되었지만, #4는 다른 샘플들의 두 배 넘는 반사율이 측정되었다. 결과적으로 개선된 APLM으로 제작한 #4는 기존 APLM으로 제작한 #2와 비교하였을 때 적은 전력소모로 큰 q/m 값을 지닌 하전입자들이 셀 내에 많이 주입되어서 패널 특성을 향상시킬 수 있다. 또한, 전자종이는 영상력으로 인하여 이미지를 유지할 수 있는 메모리 효과를 가지게 되는데, 앞서 언급한 바와 같이 이러한 영상력을 하전입자가 극복한 후 유체에 부유하기 위해서는 높은 전압이 필요하기 때문에 전압을 구분해서 인가할 수 있는 계단파를 구동파형으로 사용하였다. 이때, 전극에 부착되어 있는 하전입자를 유체에 부유시키기 위해서 인가하는 전압의 주기가 길어질수록 강한 전계로 인하여 하전입자들의 충돌이 발생하여 응답시간이 느려지는 것을 모든 샘플에서 동일하게 확인하였다. 이를 통하여, 패널의 구동파형은 계단파를 사용하는 것이 유리하고, 하전입자가 영상력을 극복하기 위해서 인가하는 초기 전압의 주기가 짧을 때 셀 내의 하전입자가 전계에 빠르게 대응하여 일시에 많이 운동하기 때문에 응답시간이 빨라지는 것을 확인하였다.

본 연구는 메모리 효과의 특징을 갖고 있는 전자종을 전력 측면에서 최적의 조건으로 구동할 수 있는 구동파형 및 패널 특성을 향상시킬 수 있는 하전입자를 최적의 조건으로 셀 내에 주입하는 APLM의 최적화 연구에 기여할 수 있을 것이며, 향후 두 종류의 하전입자를 동시에 필터링하여 제작한 패널에 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 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2017R1A2B1010310).

REFERENCES

- [1] W. C. Kao, C. H. Liu, S. C. Liou, J. C. Tsai, and G. H. Hou, *J. Disp. Technol.*, **12**, 129 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jdt.2015.2469539>]
- [2] M. G. Pitt, R. W. Zehner, K. R. Amudson, and H. Gates, *J. Soc. Inf. Disp.*, **33**, 1378 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.1830204>]
- [3] T. Bert and H. D. Smet, *Displays*, **24**, 223 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2004.01.009>]
- [4] G. X. Li, S. C. Qin, Y. Q. Feng, S. Fang, and S. X. Meng, *J. Disp. Technol.*, **12**, 1145 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jdt.2016.2560519>]
- [5] C. M. Lu and C. L. Wey, *J. Disp. Technol.*, **7**, 434 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2011.2142173>]
- [6] J. S. Song and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 518 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.8.518>]
- [7] B. R. Yang, Y. C. Wang, and L. Wang, *Proc. Advances in Display Technologies VII* (SPIE OPTO, San Francisco, USA, 2017) p. 1012602. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2249474>]
- [8] C. M. Chang, C. H. Chiu, and Y. Z. Lee, *J. Soc. Inf. Disp.*, **42**, 1545 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3621156>]
- [9] Z. C. Yi, P. F. Bai, L. Wang, X. Zhang, and G. F. Zhou, *J. Cent. South Univ.*, **21**, 3133 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2285-9>]
- [10] L. Wang, G. S. Liu, Y. C. Wang, J. Su, X. D. Wang, X. Zeng, Z. S. Zhang, S. Z. Deng, H.P.D. Shieh, and B. R. Yang, *J. Soc. Inf. Disp.*, **25**, 384 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.562>]
- [11] K.M.H. Lenssen, P. J. Baesjou, F.P.M. Budzelaar, M.H.W.M. van Delden, S. J. Roosendaal, L.W.G. Stofmeel, A.R.M. Verschuieren, J. J. van Glabbeek, J.T.M. Osenga, and R. M. Schuurbiens, *J. Soc. Inf. Disp.*, **17**, 383 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1889/JSID17.4.383>]
- [12] W. C. Kao, W. T. Chang, and J. A. Ye, *J. Disp. Technol.*, **8**, 596 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jdt.2012.2205896>]
- [13] 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>]
- [14] T. Bert, H. D. Smet, F. Beunis, and K. Neyts, *Displays*, **27**, 50 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2005.10.001>]
- [15] F. Duan, P. Bai, A. Henzen, and G. Zhou, *Proc. 2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)* (IEEE, Beijing, China, 2016) p. 498. [DOI: <https://doi.org/10.1109/SIPROCESS.2016.7888312>]
- [16] I. H. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **22**, 93 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4313/jkem.2009.22.1.093>]

- [17] M. T. Johnson, G. Zhou, R. Zehner, K. Amundson, A. Henzen, and J. van de Kamer, *J. Soc. Inf. Disp.*, **14**, 175 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.2176120>]
- [18] X. Meng, L. Qiang, J. Wei, and H. Shi, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **14**, 1617 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9136>]
- [19] 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>]
- [20] J. W. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 386 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.5.386>]