

병렬 전극 사이의 하전 입자의 천이 특성

김승택^{***}, 이상호^{*}, 김용권^{**}
한국생산기술연구원^{*}, 서울대^{**}

Transition characteristics for charged particles between parallel electrode

Seungtaek Kim^{***}, Sangho Lee^{*}, Yong-Kweon Kim^{**}
Korean Institute of Industrial Technology^{*}, Seoul National University^{**}

Abstract - 건식 전자 종이는 평행한 병렬 전극 사이에 하전 입자들이 놓인 구조로 전극간의 입자 천이 특성은 전자 종이의 동작에 직접적인 영향을 주게된다. 따라서, 하전 입자를 이용하여 제작된 전자 종이 샘플에 인가 전압에 따른 입자의 전극간의 천이를 통해서 전자 종이의 동작 특성을 살펴 보고자 한다. 입자의 천이 특성을 제작된 샘플의 조명에 의한 반사율 분석을 통해서 살펴 보았다. 입자의 천이 특성은 히스테리시스 특성을 나타냈으며 이러한 특성은 색상의 변화시켜야만 할때에만 전력 소비가 이루어지기 때문에 소비 전력이 작으며, 저비용의 수동 매트릭스 구동을 가능하게 함을 실험을 통해서 확인하였다. 6개 샘플의 특성 분석을 통해서 회색톤의 그림 또는 하이 콘트라스트의 글씨를 구현하기 위한 특성을 고찰하였다.

1. 서 론

전자 종이는 하전 입자를 기반의 반사형 디스플레이 중의 하나이다. 특히, 흑색의 양으로 하전된 입자와 백색의 음으로 하전된 입자의 두 입자 기반의 전자 종이[1]는 미디어를 공기로 사용하기 때문에 미디어를 유체로 사용하는 E-ink[2], Microcup[3], Twist Ball[4]에 비해서 빠른 응답속도와 낮은 소비 전력으로 전자 종이 가운데 주목 받고 있는 타입 중의 하나이다. 전자 종이는 그림1과 같이 색상과 하전 부호가 다른 두 입자를 기반으로 두 평행 전극 사이에 전압을 인가하여 생성되는 전계를 이용하여 입자들의 위치 천이를 유발하는 반사형 디스플레이라 할 수 있다[1]. 이러한 전자 종이에서 입자의 천이 특성은 전자 종이 디스플레이 패널의 동작 특성을 좌우되기 때문에, 인가 전압에 따른 하전 입자의 동작 특성의 분석은 전자 종이의 설계와 동작 특성 예측에 필수적이라 할 수 있다. 전자 종이의 동작은 입자에 작용하는 여러 가지 힘에 결정되는데, 이에 관여되는 주요 힘은 van der Waals force, electrostatic image force, Coulomb force, gravitational force로 구분 할 수 있다. 이러한 힘들은 입자의 전하량, 직경, 밀도와 두 전극 사이의 거리에 따라 크게 달라지게 되며 전자 종이의 동작 특성에 큰 영향을 주게 된다.

본 논문에서는 두 그룹의 입자 샘플을 이용하여 6개의 샘플을 제작하였다. 인가 전압별 입자의 천이 현상이 샘플의 전면부에 표시되는 색상이기 때문에 각 샘플에 외부 조명에 대한 반사율을 측정하여 그 천이 특성을 확인하여 보고자 한다. 또, 측정된 반사율 특성 곡선을 기반으로 입체 전압 및 전계에 대하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 실험 셋업

2.1.1 샘플 제작

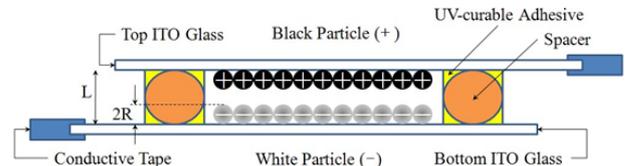
그림 1 제작된 샘플의 단면도이다. 인가 전압에 따른 입자의 천이로부터 기인한 색상의 변화를 관찰하기 위해서 투명전극 재료로 ITO Glass를 이용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 두 투명 전극간의 간격(L)을 더욱 일정하게 유지하기 위해서 라인 스페이서로 유리광섬유를 이용하였다. 이 유리 광섬유는 두 전극사이에 UV경화 접착제를 이용하여 약 30분동안의 노광을 통해 고정되었으며, 노광시에 샘플이 받는 하중을 일정하게 하기위해서 105g의 stainless steel 볼록을 샘플의 중앙에 위치시켰다. 샘플제작에 사용된 입자는 두 그룹으로 나눌 수 있는데, 첫 번째 그룹(그룹 A)은 입자의 직경이 6 μ m, charge to mass ratio (Q/m)는 23 μ C/g, 입자의 밀도는 1.1였으며, 두 번째 그룹은 직경이 20 μ m, Q/m은 4.5 μ C/g, 밀도는 1.1였다. 이러한 두 그룹(그룹 B)의 입자들과 70, 130, 250 μ m의 직경을 갖는 유리광섬유를 이용하여 한 입자당 세 종류의 전극 간격(L)을 구현하여 총 6개의 샘플을 제작하고, 이렇게 제작된 샘플의 전극 간격을 Keyence사의 레이저 변위 센서(LK-G10)를 이용하여 측정하여 표 1에 6개의 샘플에 대한 제작 조건을 나타내었다.

〈표 1〉 샘플별 제작 조건

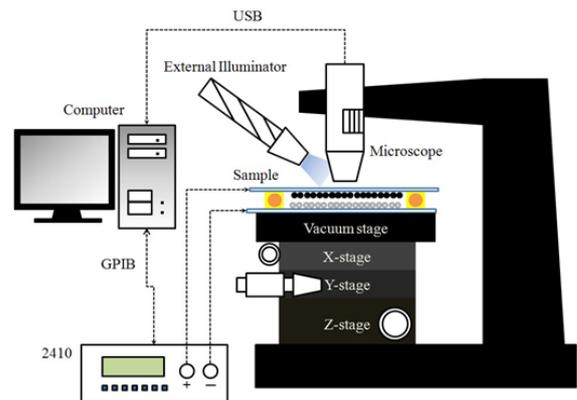
그룹	샘플 번호	전극 간격, L(μ m)	입자의 직경 (μ m)	흑색 입자 Q/m (μ C/g)	백색 입자 Q/m (μ C/g)
A	1	120	6	+15	-15
A	2	170	6	+15	-15
A	3	270	6	+15	-15
B	4	130	20	+4.5	-4.5
B	5	170	20	+4.5	-4.5
B	6	290	20	+4.5	-4.5

2.1.2 실험 셋업

그림 2는 제작된 샘플의 반사율을 측정하기 위한 실험 셋업이다. 전압 발생 소스로 Keithley사의 2410이 이용되었고, GPIB 인터페이스를 통해서 컴퓨터의 GUI와 연결되어 제어되었다. 입자의 색상 변화를 관찰하기 위해서 USB Microscope가 사용되었으며, 외부 조명을 이용하여 샘플에 인가되는 전압에 따라 샘플의 표면 상태를 관찰하고 이미지를 저장하였다. 각 전압에서의 측정된 이미지를 개발된 분석 프로그램을 통해서 반사율을 측정하였고, 픽셀의 최대값과 최소값을 이용하여 정규화하였다. 제작된 전자 종이 샘플의 고정과 정밀한 이동을 위해서 진공 스테이지 및 3축(xyz-axis)의 매뉴얼 정밀 스테이지가 그림 2와 같이 이용되었다.



〈그림 1〉 Cross-sectional view for e-paper sample



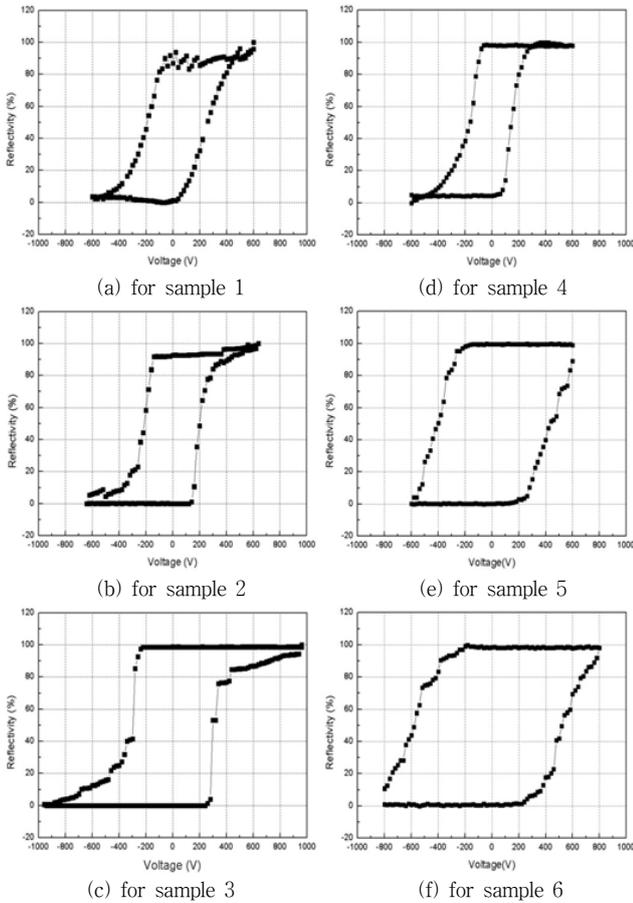
〈그림 2〉 Experimental setup

2.2 실험 측정 결과

2.2.1 반사율 측정 결과

그림 3의 (a)~(f)는 각 샘플에서 측정된 인가전압별 반사율을 나타낸 그래프이다. 직경이 6 μ m인 입자를 사용한 샘플 (a), (b), (c)의 반사율을 비교해보면, 전극간의 간격이 커짐에 따라서 입자의 천이가 발생하기 시

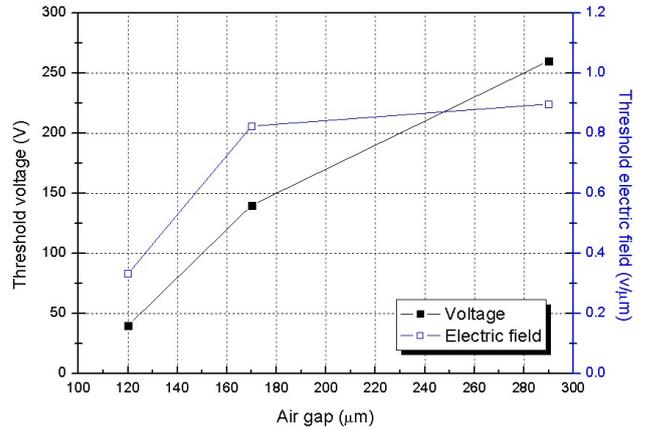
작하는 임계 전압이 증가하게 된다. 마찬가지로 직경이 $20\mu\text{m}$ 인 입자 샘플 (d), (e), (f)에서도 같은 현상이 관찰되었다. 이는 전극간의 간격이 증가함에 따라서 입자에 작용하는 전계의 세기가 약해지기 때문이다. 임계 전압보다 큰 인가 전압에 대해서 반사율이 선형적으로 증가되는 부분과 반사율 포화 현상이 발견되었다. 종합적으로 이는 히스테리시스 특성을 나타내게 되며, 이는 건조 입자 기반의 전자 종이의 특성이다. 특히, 인가 전압이 제거 되어도 입자의 전극에 대한 부착력이 중력과 같은 탈착력보다 크게 되어 여전히 입자는 전극에 붙어 있을 수 있어 일정한 색상을 유지 할 수 있다. 따라서, 이와 같은 종류의 전자 종이는 색상을 바꾸어 줄때만 에너지가 필요하게 되므로 저전력 반사형 디스플레이라 할 수 있다. 동일한 입자를 사용한 샘플 1,2,3과 샘플 4,5,6을 각각 비교해 보면, 샘플 1,2,3에서는 전극간의 간격이 커짐에 따라서 상승 및 하강 기울기가 점차 커짐을 알 수 있었으며, 샘플 4,5,6에 대해서는 전극간의 간격이 커짐에 따라 상승 및 하강 기울기가 점차 작아짐을 알 수 있다. 따라서 회색톤을 표현하기 위해서는 같은 입자가 이용된 샘플간의 비교에서 샘플1과 샘플6이 비교적 유리함을 알 수 있으며, 글자 같은 하이 콘트라스트가 요구되는 응용에서는 샘플3과 샘플4가 비교적 유리함을 알 수 있다.



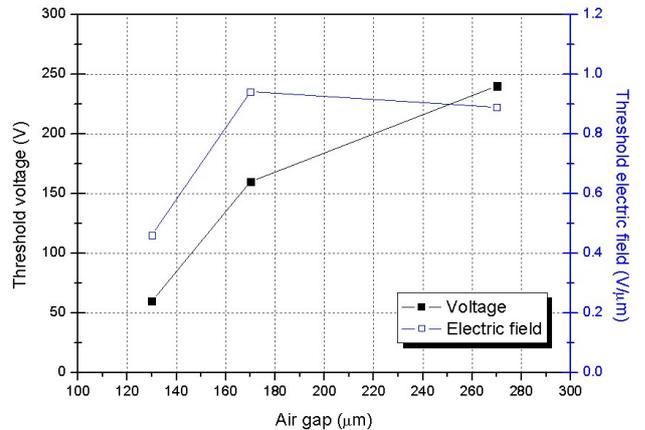
〈그림 3〉 The reflectivity vs. voltage for each sample

2.2.2 임계 전압 및 전계

그림 4는 그림3에서 나타난 반사율 특성 곡선으로부터 동일한 $6\mu\text{m}$ 직경의 입자를 사용한 샘플들의 전극간의 간격 (Air gap)을 기준으로 임계 전압과 전계를 나타낸 그래프이다. 전극간의 간격이 $120\mu\text{m}$ (샘플1), $170\mu\text{m}$ (샘플2), $290\mu\text{m}$ (샘플3)까지 변화 할 때 임계 전압은 전극간의 간격이 커짐에 따라 증가하는 특성을 갖으며 임계 전계값은 $170\mu\text{m}$ (샘플2)와 $290\mu\text{m}$ (샘플3)에서 0.8과 $1.0\text{ V}/\mu\text{m}$ 사이에 존재하지만 $120\mu\text{m}$ (샘플1)에서는 다소 감소됨이 관찰되었다. 그림 5는 그림4와 마찬가지로 동일한 $20\mu\text{m}$ 의 직경을 사용한 샘플 4,5,6에 대한 임계 전압과 전계에 대한 그래프이다. 전극간의 간격이 증가함에 따라 임계 전압은 마찬가지로 증가함을 알 수 있었고, 임계 전계에 대해서도 $170\mu\text{m}$ (샘플5), $270\mu\text{m}$ (샘플6)은 0.8과 $1.0\text{ V}/\mu\text{m}$ 사이에 존재하지만 $130\mu\text{m}$ (샘플4)에서는 다소 감소되는 현상이 관찰되었다.



〈그림 4〉 The threshold voltage and electric field vs. air gap for sample 1, 2, 3 (그룹 A)



〈그림 5〉 The critical voltage and electric field vs. air gap for sample 4, 5, 6 (그룹 B)

3. 결 론

본 논문에서는 평행 전극 사이의 하전 입자가 인가 전압에 따른 천이 특성을 기반으로 하는 전자 종이의 동작 특성 예측을 위해 6개의 샘플을 제작하였고, 각 샘플에 대해서 외부 조명에 의한 반사율을 인가 전압에 따라 나타내었다. 인가 전압별 입자 천이는 그림 3에서 보는바와 같이 히스테리시스 곡선이 나타남을 실험을 통해서 확인하였다. 측정된 데이터들 바탕으로 샘플의 전극간의 간격을 기준으로 입자가 천이를 시작하는 임계 전압과 전계에 대해서 나타내었다. 전극간의 간격이 커짐에 따라 임계 전압은 증가하였고, 임계 전계는 제작된 샘플의 그룹별 전극간의 간격이 가장 작은 샘플을 제외하고는 특정 범위내에서 제한되었다. 이러한 현상은 전극 가늀이 줄어들때 따라 약화된 electrostatic image force의 영향에 의한 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Reiji Hattori, Shuhei Yamada, Yoshitomo Masuda, Norio Niehi, "A novel bistable reflective display using quick-response liquid powder," Journal of the Society for Information Display, vol.12, no.1, pp.75-80, 2004.
- [2] Y.Chen, J. Au, P. Kazlas, A. Ritenour, H. Gates, M. McCreary, "Flexible active-matrix electronic ink display," Nature, vol.423, no.8, pp.136, 2003.
- [3] Zang H.M., Liang, R.C. "Microcup electronic paper by roll-to-roll processes," Spectrum, vol.16, issue.2, pp.16-21, 2003.
- [4] Joseph M. Crowley, Nicholas K. Sheridan, Linda Romano, "Dipole moments of gyron balls," Journal of Electrostatics, vol.55, no.3-4, pp.247-259, 2002.