

# 대전입자형 전자종이의 구동 메카니즘 분석

김기원\*, 조상엽\*\*, 장성근\*\*\*, 김영조\*\*\*

## 요약

대부분의 디스플레이 소자가 주로 자발광형으로 개발되고 있음에도 불구하고, 눈의 피로를 감소시키며 쌍안정성으로 인하여 저전력으로 구동되며 생산설비를 줄일 수 있는 반사형 디스플레이로서 전자종이가 개발되고 있다. 본 연구에서는 구동전압, 응답속도, 패널조건 등으로부터 대전입자의 제조에서 중요한 파라미터인  $q/m$ 을 추출할 수 있음을 보인다. 또한 응답시간과 인가전압간의 관계를 실험적으로 보이고 각 구간에서 입자의 상태를 평가한다. 구동전압 이상의 전계가 인가될 경우 입자는 운동에너지가 증가하여 전극에 큰 에너지로 충돌하게 되며 이 충돌은 다시 입자의 전하량을 감소시켜 결국 입자뭉침현상으로 이르게 하는 운동원리를 규명하고자 한다.

## A Driving Mechanism Analysis of Charged Particle Type Electronic Paper

Gi-Weon Kim\*, Sang-Yeop Cho\*\*, Sung-Keun Chang\*\*\*, Young-Cho Kim\*\*\*

## ABSTRACT

A Electronic paper as a reflective display which is driven low power consumption by bistability and is fabricated with low cost production equipments has been developed, although most display devices are developed mainly with emissive type. In this study we show the feasibility of extraction for the quantity of  $q/m$  which is one of the most important parameters in production from driving voltage, response time, and panel conditions. We show the relation between response time and driving voltage and estimate the particle state at each range. When the electric field over a driving voltage are biased, the kinetic energy increase, the particles crash into the electrode and induce bombardment with large energy, this bombardment decrease quantity of electric charge, and resultantly these processes force particle lumping, which are defined by kinetic principle.

Key Words : e-paper, reflective display,  $q/m$ , response time, driving mechanism

---

\* 초당대학교 컴퓨터과학과(✉kwkim@chodang.ac.kr)

\*\* 청운대학교 인터넷학과

\*\*\* 청운대학교 전자공학과

· 제1저자(First Author) : 김기원 · 교신저자(Correspondent Author) : 김영조

· 접수일(2011년 8월 26일), 수정일(1차 : 2011년 9월 26일), 게재 확정일(2011년 9월 29일)

## I. 서론

최근 국내외의 디스플레이산업은 전자산업의 발달과 더불어 더욱 발전하고 있으며 특히 LCD 및 OLED 등이 그 중심을 이루고 있다. 특히 인간의 눈은 본래 불빛이나 태양광 등 자발광 이미지에겐 적응이 힘들며 쉽게 눈의 피로를 가져오는 단점이 있음에도 불구하고 이를 이용한 디스플레이가 크게 보급되고 있다. 그 대표적인 디스플레이는 최근 수년간 크게 보급되어 온 LCD이다. 그러나 이러한 자발광형 광원을 사용한 디스플레이는 눈의 피로뿐 아니라 전력소모, 높은 가격, 대규모 설비등의 단점을 가지고 있다. 따라서 이와 같은 자발광형 디스플레이와 달리 반사형 디스플레이로서 전자종이도 점차 상품으로 판매되면서 그 영역을 확보해나가고 있다. 전자종이는 전기영동원리를 이용한 방식, 전기습윤 방식, 대전입자를 이용한 방법 등 다수의 방법이 제안되었고 일부는 시제품 단계를 넘어서 상품으로 영역을 확보하고 있다. 전자종이의 장점으로는 눈의 피로가 적을 뿐 아니라, 쌍안정성으로 인한 메모리효과로 낮은 소비전력, 낮은 제조단가, 저가격의 제조설비 등을 들 수 있다. 이러한 장점을 이용해 전자종이산업의 한 분야인 전자책(E-Book) 시장은 점점 성장되고 있는 추세이며 POP(point of purchase), 대형 광고판, 휴대폰 등 여러 분야에 응용될 수 있다. 조금 더 폭넓은 응용분야로 건축설비, 의료기기, 우주산업 등에 적용될 수 있을 것이라 예상된다.[1-3]

장기적인 전자종이 분야의 기술개발을 위해서는 재료, 신호처리, 구동, 광특성 분석 등 많은 분야의 연구개발이 필요하며 그 기술들을 대부분 LCD에 의존하고 있음도 사실이다. 따라서 이미지 구현방식이 전혀 다른 원리에 의해 이루어지고 있음에도 불구하고 대부분의 기술이 적절하게 적용되고 있지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 빠른 이미지 변환 및 비선형 문턱전압 특성으로 주목받고 있는 대전입자형

전자종이의 구동 메커니즘을 분석하고자 하며, 응답시간의 이론치와 실험치를 비교하여 타당성을 밝히고자 한다.

## II. 구동이론

### 2.1 운동에너지 분석

대전입자형 전자종이는 상부 및 하부전극, 주변의 부도체 재료인 격벽에 둘러싸인 대전입자가 상하운동에 의해 투명전극의 내부표면에 형성된 이미지를 표현하는 방식이다. 그러나 모든 물체는 전하를 띠고 있기 때문에 상대적으로 강한 전하를 띤 대전입자의 거동을 해석을 위해 많은 파라미터를 가진다. 셀 내부에서 대전입자는 여러 종류의 힘을 받고 있다. 대표적인 힘으로 상하전극에 인가된 전압에 의한 수직방향의 전기력과 전극표면에 부착되게 하는 영상력(Image Force)이 있다. 그리고 정상상태에서 입자의 구동에 크게 영향을 미치지 않는기 때문에 본 논문에서는 상세한 언급을 하지 않고자 하는 힘으로 부도체인 격벽 사이에 작용하는 분자간 결합(Van der Waals)의 힘이 있다. 이 힘은 입자의 지름이 마이크로 단위 이상으로 형성되면 크게 작용하지 않는다.[4-5]

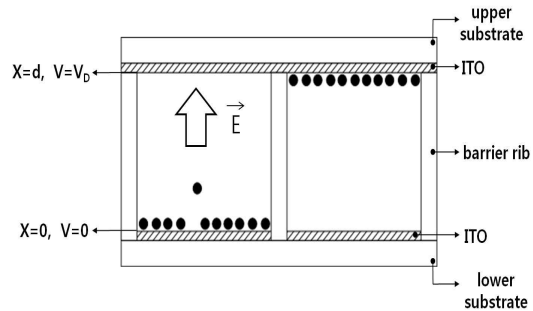


그림 1. 대전입자형 전자종이의 셀구조

Fig. 1. cell structure of charged particle type display

본 절에서는 전계에 의해 입자에 운동에너지를 부여하는 힘에 대한 분석을 하고자 하며 관련된 내용을 그림 1에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 전극표면에 부착되어 있는 10 $\mu$ m 내외의 흰색입자는 (-)로 대전되어 있으며, 검정색입자는 (+)로 대전되어 있으며 상부 및 하부전극 사이에 인가되는 전계의 방향에 따라 이 입자들은 서로 자리를 바꾸게 되어 이미지를 형성할 수 있으며 그림에서 한 개의 셀은 한 개의 화소를 구성한다. 한 개의 입자가 운동을 하기 위한 에너지는 전극 간에 인가된 전계에 의해 공급되며 다음의 식 (1)로 표현된다. 대전입자형 전자총이는 매개물이 공기이기 때문에 그 응답속도는 정상상태에서 1ms 이하의 값을 가지며 따라서 낮은 수준의 화질은 수동구동이 가능한 장점이 있다. 인가전압에 의한 에너지와 운동에너지는 다음의 관계가 있다.[6-7]

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

여기에서 q는 전하량이며, V는 인가전압, m은 입자 한 개의 질량, 그리고 v는 운동하는 입자의 속도이다. 좌변의 전계에 의한 에너지는 입자가 운동할 수 있는 구동전압(V)의 형태로 공급된다. 우변은 그림 1에서 보인 x=0에서 x=d 지점까지 운동하는데 에너지이다. 입자가 상부 및 하부 전극 사이를 운동할 때 과도한 속도는 입자의 기계적인 손상을 가져오기 때문에 최소한의 운동에너지가 요구되며 과도한 전압인가는 수명을 감소시킨다. 이 식은 일반적으로 사용되는 관련식을 적용할 수 있으며 특히 전계의 방향과 입자의 방향이 일치하기 때문에 인가전압은 다음의 식으로 표현된다.[8]

$$\vec{d} \cdot \vec{E} = V \quad (2)$$

이 식에서 d는 전극간의 거리(cell gap)이며 E는 전

계이다. 위의 두 식을 정리하면 다음과 같은 응답시간 식이 유도된다.

$$\tau^2 = \frac{a \cdot d^2}{(q/m) \cdot V}, \quad (a \cong 2) \quad (3)$$

여기에서  $\tau$ 는 응답시간이며 a는 2에 근사한다. 따라서 이상적인 입자운동이 적용된다면 셀구조와 입자의 q/m, 구동전압을 알면 응답시간을 예측하는 할 수 있다. 본 연구에서는 그 값을 확인하였으며 다음 장에서 다루고자 한다.

## 2.2 영상력 분석

전자총의 장점인 영상력(Image Force)에 의한 쌍안정성(Bistability)효과는 전자총이를 평가하는 가장 중요한 파라미터 중의 하나이다. 입자가 가지는 전하량에 의한 영상력은 다음의 식으로 표현된다.

$$F = q^2 / 16\pi\epsilon x^2 \quad (4)$$

이 식에서 F는 영상력이며,  $\epsilon$ 은 유전률, x는 실제 전하와 영상전하간의 거리이다. 이 식에서 보는 바와 같이 입자의 표면으로 판단되는 위치에 존재하는 전하가 클수록 영상력은 커지며 따라서 메모리 효과가 커진다. 즉, 중력이 영향을 미치는 입자의 질량을 고려하면 결국 q/m 값이 클수록 메모리 효과는 커진다. 그러나 영상력이 커지면 현재의 이미지를 유지하는 효과는 개선되나 영상력을 극복하고 반대편 전극으로 운동하는데 필요한 에너지가 더 증가하며 결국 구동전압을 증가시키게 된다. 이는 q/m과 구동전압의 반비례관계를 보여준 식 3과 반대되는 결과를 가져온다. 따라서 q/m 값은 앞에서 보인 식을 모두 고려해서 최적화된 값을 가져야 한다. 이는 향후 전자총이 재료를 선택함에 있어서 중요한 정보를 제공할 것이다.[9-10]

### III. 실험방법

본 연구를 위해 입사광에 대해 반사광의 광신호를 추출하기 위해 광원으로 레이저를 사용하였으며 수광장치로 포토다이오드를 이용하였다. 간단한 이 장치에 대한 개략도를 그림 2에 보였다.

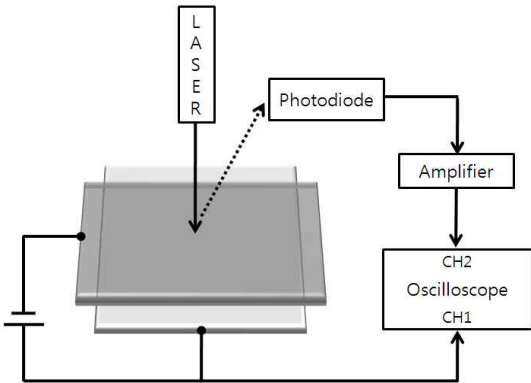


그림 2. 입출력특성 분석을 위한 실험장치  
Fig. 2. experimental apparatus for input and output property analysis

그림에서 보는 바와 같이 레이저(laser)로부터 입사된 광은 전자종이의 표면에서 반사하게 되어 영상을 볼 수 있게 되는데 그 신호를 포토다이오드(photodiode)로부터 받아 증폭하여 오실로스코프에 확인하게 된다.

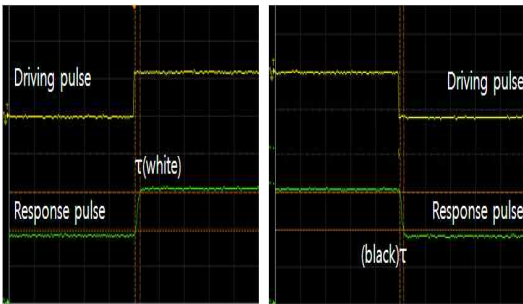


그림 3. 구동펄스로부터 얻어진 광의 응답펄스  
Fig. 3. response pulse obtained by driving pulse

그림 3은 위의 실험장치로부터 얻어진 광의 응답신호를 오실로스코프로부터 추출한 신호이다. 그림에서 왼쪽은 검정색 이미지로부터 흰색이미지로 변환되는 응답신호이며 오른쪽 그림은 그 반대의 경우이다. 이 그림은 여러 응답신호 중 한 경우를 예로 보인 것이다.

### IV. 결과 및 토의

앞에서 유도한 식 3을 검증하기 위한 실험, 즉 성능 평가를 하였다. 이 식에서 보는 바와 같이 일단 운동을 시작한 입자의 응답시간은 구동전압에 반비례한다. 그러나 구동전압으로 판단되는 전압이 인가되기 시작하면 모든 입자가 운동을 완료하기 때문에 더 이상의 응답시간이 줄어들지는 않는다. 구동전압 이상의 전압이 인가될 때는 지연시간(delay time)이 단축되는 효과는 있지만 이 경우는 입자가 과도하게 큰 운동에너지를 가지게 되어 물리적으로 파괴되어 수명을 단축시키게 된다.[11]

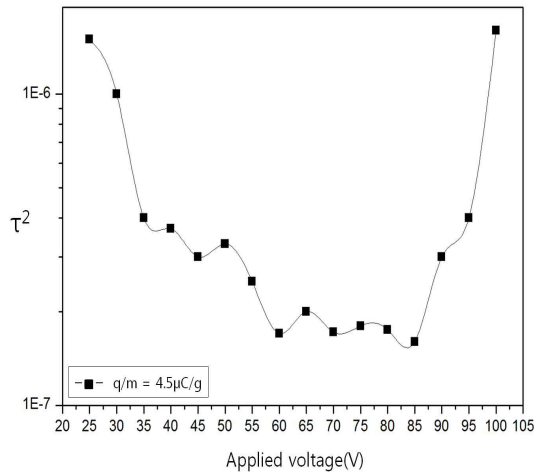


그림 4. 인가전압에 대한 응답시간 특성  
Fig. 4. response time according to biased voltage

그림 4는 그림 2의 실험장치에 의한 검정색 입자에 대한 응답시간 특성을 보인 것이다. 이 그림에서 20V 이하의 전압에서는 입자가 거의 움직이지 않기 때문에 무의미하며 응답시간이 포화상태가 시작되는 55V 나 60V가 구동전압이 된다. 한편 60V에서 80V정도까지는 입자가 과도한 운동에너지를 가지는 구간이며 빠른 속도를 가지고 움직이고 있으나 이는 위에서 보인 바와 같이 지연시간을 단축시키지만 응답시간을 단축시키지는 않는다. 한편 이러한 과도한 운동에너지를 입자가 전극이나 주변의 입자와 충돌을 야기하게 되어 자신의 전하(CCA, Charge Controlled Agent)를 잃게 된다. 따라서 자신의 전하량이 감소하여 결국 위에서 언급한  $q/m$ 값을 감소시켜 응답시간을 감소시키게 된다. 또한 급격하게 감소된 전하량의 입자는 부도체에 가깝게 되면서 Van der Waals' Force에 의한 입자몽침을 야기하게 되어 더욱 입자가 운동하기 힘들게 되며 이러한 현상은 90V 이상의 전압에서 관찰된다. 즉 과도한 인가전압은 입자몽침의 원인을 제공하기 때문에 가능한 최소한의 전압으로 구동하는 것은 매우 중요한 구동요건이 된다고 판단된다.

한편 식 3에서 구동전압, 구동조건, 패널구조가 정해졌을 때 입자의 적정한  $q/m$ 을 계산할 수 있는데 그림 4에서 구동전압을 60V, 응답시간을 0.41ms, 셀간격을  $145\mu\text{m}$  라고 하면, 영상력을 계산에서 무시하면  $q/m$ 은  $4.1\mu\text{C/g}$ 로 계산되는데 실제 사용된 입자가  $4.5\mu\text{C/g}$ 임을 감안하면 매우 근사한 값으로 보인다. 즉 실제 제작하고자 하는 패널조건에 적합한 입자제조에 관한 정보를 미리 제공할 수 있으며 그 예측은 어느정도 타당성을 가진다고 보여진다. 영상력을 실제 계산에 적용하기 위해서는 입자표면의 부도체의 두께를 측정해야 하는데 이는 실제로 측정하는 것은 불가능하기 때문이다. 부도체의 두께는 입자 내에서 전하가 위치하는 깊이를 알아야 하는데 이는 입자의 운동으로부터 측정되는 지연시간 및 응답속도를 분석하여 계산되어진다. 결론적으로 입자를 제조하는 단계에서

이러한 예측은 전자종이에서는 아직 시도되지 않은 개념이며, 그 가능성을 보였다.

## V. 결론

본 연구에서는 이미지 변환 및 비선형 문턱전압 특성으로 주목받고 있는 대전입자형 전자종이의 구동 메카니즘을 입자의 전계와 운동에너지, 영상력에 기초하여 분석하였으며, 응답시간의 이론치와 실험치를 비교하여 이론적 접근이 타당성을 가짐을 밝혔으며 또한 전압에 따른 응답시간의 반비례 관계를 실험결과로부터 검증하였다. 또한 응답시간의 구간별 해석을 하였으며 본 연구로부터 패널조건을 만족하는 최적의 입자제조조건, 특히 이미지 형성에 가장 큰 영향을 미치는  $q/m$ 을 예측가능하게 함을 검증하였다. 따라서 이러한 연구결과를 토대로 향후 입자개발 및 구동에 활용할 경우 바람직한 연구가 이루어질 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] T.Z. Kosc, "Particle Display Technologies Become E-Paper", Optics & Photonics News, Vol.16 pp. 18-23, 2005
- [2] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J-S. Yeo and T. Koch, "A critical review of the present and future prospects for electronic paper", Journal of the SID, Vol.19, pp. 135-153, 2011
- [3] Koshimizu, "The past, present, and future of electronic paper", Vol. 24, pp. 23-242008.
- [4] R. Hattori, Y. Masuda, N. Nihei, A. Yokoo and S. Yamada, "High-voltage and low power consumption driver for an electronic paper", IMID/IDMC 06 DIGEST, pp.222-223, 2006
- [5] R. Lee-Desautels (2005). Theory of van der Waals Forces as Applied to Particulate Materials. [Online]. Available:
- [6] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H.

Choi, W. H. and Y. C. Kim, "Analysis of Fully Driving Electronic Paper Fabricated Using Particle-Transfer Method", *SID 11 DIGEST*, pp. 1523-1524, 2011.22-25: OK

[7] D. J. Lee, I. S. Hwang and Y. C. Kim, "Fabrication and Addressing Method of Charged Particle Type Display", *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol.21, pp. 64-65, 2008

[8] V.M. Moreno-Villa, M.A. Ponce-Velez, E. Valle-Jaime and J.L. Fierro-Chavez, "Effect of surface charge on hydrophobicity levels of insulating materials," *IEEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution*, Vol.145, pp. 675-681, 1998

[9] Korea Institute of Industrial Technology, "Method for injecting particles in electrical paper display", KOR Patent, Application Number: No.10-2008-0052909, 2008

[10] D. J. Lee and Y. C. Kim, "A study on a moving characteristics of charged particle in uniform electric field of Charged particle type Display", *Journal of the KAIS*, Vol. 10, No. 6, pp. 1186-1190, June, 2009

[11] D. J. Lee and Y. C. Kim, "Response Characteristics of Charged particle type Display", *Journal of the KIEEME*, Vol. 22, No. 2, pp. 169-173, February, 2009

### 감사의 글

본 연구는 2011학년도 청운대학교 학술연구조성비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 저자소개



김기원(Gi-Weon Kim)

1989년 숭실대학교 전자계산학과  
공학석사  
2001년 한남대학교 컴퓨터공학과  
공학박사

1996년 ~ 현재 초당대학교 컴퓨터과 교수  
※ 관심분야: 멀티미디어, 실시간영상처리, 음성인식



조상엽(Sang Yeop Cho)

1988년 중앙대학교 전자계산학과  
(이학석사)  
1993년 중앙대학교 전자계산학과  
(공학박사)

1995년 ~ 현재 청운대학교 인터넷학과 교수  
※ 관심분야: 인공지능, 퍼지이론, 페트리네트 응용



장성근(Sung-Keun Chang)

1984년 경북대학교 전자공학과  
(공학사)  
1993년 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
1996년 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

1996년 ~ 2000년 현대전자 메모리연구소 책임연구원  
2000년 ~ 현재 청운대학교 전자공학과 교수  
※ 관심분야: 반도체소자, 디스플레이(구동회로설계)



김영조(Young-Cho Kim)

1989년 서울시립대학교 전자공학과  
(공학사)  
1991년 서울시립대학교 전자공학과  
(공학석사)  
1994년 서울시립대학교 전자공학과  
(공학박사)

1995년~현재 청운대학교 전자공학과 교수  
※ 관심분야: 디스플레이공학, 반도체 소자 및 재료