

## 전자 종이용 하전 입자의 부착력 분석

김승택<sup>†</sup> · 김형태 · 이상호 · 김종석

<sup>†</sup>한국생산기술연구원 생산시스템연구부

### Adhesion Force Analysis of Charged Particles for the E-paper

Seungtaek Kim<sup>†</sup>, Hyungtae Kim, Sang-Ho Lee and Jongseok Kim

<sup>†</sup>Korea Institute of Industrial Technology Manufacturing System R&D Department

#### ABSTRACT

Charged micro-particles are widely used as the key components for many electrical applications such as an e-paper, a touch panel, a printer toner and an electronic ink. Among them, the e-paper is an emerging reflective type display using the charged particles that has the advantages of the extremely low power consumption and sunlight readability. To create images on the e-paper, we confine black positively-charged and white negatively-charged particles between bottom and top electrodes and selectively apply the electric field. When the Coulomb force by an applied electric field is greater than the adhesion force between the charged particle and the electrode, the particles' transition happens resulting in the change of color between black and white. Therefore, the adhesion force is a very important factor for designing and estimating e-paper's operation. In this study, we constructed a basic model for particle's transition and an adhesion force equation describing particle's transition with three different forces: electrostatic image force, Van der Waals force and gravitational force. The simulation results showed that the gravitational force is negligible for the interesting range for the charge and the radius, and the adhesion force can be strongly dependent on the particle's charge and radius.

**Key Words** : Charged particle, Adhesion force, E-paper

#### 1. 서 론

하전된 마이크로 입자는 전자종이, 터치패널, 전자잉크, 레이저프린터의 토너 등의 다양한 응용 분야를 갖는 핵심 재료라 할 수 있다. 특히, 하전된 입자를 이용하는 반사형 타입의 전자 종이는 저전력, 광 시야각, 태양 빛 아래에서도 잘 보이는 우수한 시인성 때문에 모바일 응용분야에 적합한 디스플레이 분야 중 하나라고 할 수 있다[1-5].

하전 입자를 이용한 전자 종이는 미디어가 유체인 microcapsules 방식 [2], twist-ball 방식 [3], microcup 방식 [4]과 공기인 liquid powder display 방식[5]으로 나누어 볼 수 있는데, 공기를 미디어로 이용하는 방식이 유체를 이용하는 방식과 비교하여 빠른 동작 특성과 bi-stability 특성으로 passive matrix구성이 가능하고,

용이한 제작 공정 등의 여러 가지 장점으로 인해 구동을 위한 임계 전압치가 다소 상승하는 단점에도 불구하고, 디스플레이로서의 빠른 응답 특성을 갖기 때문에 더욱 주목 받고 있다.

이러한 공기 미디어 타입의 하전된 입자를 기반으로 한 전자 종이[5]는 투명 전극 기반의 기관에 구성된 셀에 백색의 음(-)으로 하전된 입자와 흑색의 양(+)으로 하전된 입자가 같은 비율로 전자 종이 패널의 각 셀에 주입하여 제작된다. 따라서, 상판과 하판의 두 투명 전극에 인가된 전계의 방향에 따라 입자들이 서로 분리되어 각각 반대편 전극으로 향하여 두 투명 전극의 표면에 각기 다른 색의 입자가 모여 원하는 흑색 또는 백색을 표시하게 된다. 두 전극간의 입자의 이동인 입자의 전이(transition)는 인가 전계에 의한 하전 입자의 쿨롱력(Coulomb force)이 하전 입자와 전극 사이에 존재하는 부착력(Adhesion force)보다 클 경우에 일어나 색상을 변화시킨다. 그러므로, 하전 입자와 평판 전극 사이에

<sup>†</sup>E-mail : stkim@kitech.re.kr

존재하는 부착력에 대한 모델링과 수식적인 접근은 전자 종이 설계와 동작 예측에 중요한 요소이다. 따라서, 본 논문에서는 하전 입자와 전극 사이에 존재하는 부착력을 구성하는 여러 가지 힘을 이용하여 수식화하고 관심 영역의 전하량과 입자의 반지름에 대해서 시뮬레이션을 통해, 전자 종이의 핵심 재료인 입자의 전하량과 크기의 변화에 따른 부착력의 크기 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 모델링 및 부착력 분석

### 2.1. 단일 입자 천이 모델링

전자 종이는 매우 많은 수의 다른 두 종류의 입자들이 하나의 셀에 주입되고 두 전극 사이에 인가해주는 전계에 따라서 입자의 천이가 발생하여 색상을 변화시키는 구조이다. 많은 수의 입자가 모여 있을 때 발생하는 여러 가지 비선형적인 집단 현상들(파티클 클라우딩, 파티클-파티클 인터랙션 등)은 주로 두 전극 사이에 놓인 입자의 유효 거리를 줄여 주는 방향으로 영향을 준다. 그러므로, 전자 종이의 안정적인 동작을 위해서 입자와 전극 사이의 부착력의 세기가 가장 큰 경우인 입자가 전극에 모노레이어로 존재 할 때를 고려하여 전자 종이를 설계하면, 앞서 언급한 비선형적인 현상들에 대해서 강인한 동작 특성을 갖게 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다수의 입자에 대한 해석에 앞서 두 평판 전극 사이에 놓인 하나의 하전 입자의 해석에 한정하고 입자에 작용하는 여러 가지 힘을 분석하고 그 크기를 비교하여 입자의 크기와 전하량의 변화에 따른 입자의 부착력 및 구동 전압에 대한 영향에 대해 살펴보기 위해서 두 전극 사이에 놓인 하전 입자를 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

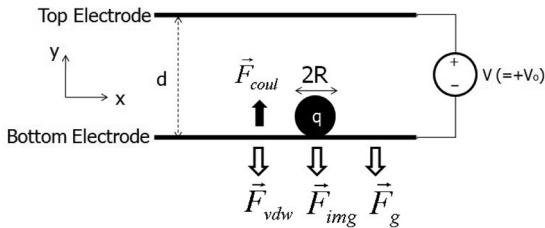


Fig. 1. A simplified model for single particle's transition between two electrodes.

전자 종이는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상판전극(top electrode)와 하판 전극(bottom electrode) 사이에 셀간의 독립적 동작을 위해 일정한 두께의 격벽으로 구성되며, 이 격벽으로 인해 두 전극간의 간격d를 일정

하게 유지한다. 반지름이 R인 입자가 갖는 전하량이 q, 두 전극 사이의 인가 전압이  $V_0$ 이면, 전극 사이에 형성되는 전계에 의해서 하전 입자는 쿨롱력( $\vec{F}_{coul}$ )에 영향을 받게 된다. 하전 입자와 전극 사이에 형성되는 부착력보다 큰 쿨롱력이 인가되는 경우 하전 입자는 두 전극간을 천이 하게 되고, 그 결과 패널의 표면에 나타나는 색상이 달라 지게 된다. 따라서 입자와 하판 전극 사이에 존재하는 부착력을  $\vec{F}_{ad}$  라 하면 입자의 천이는 아래와 같은 식 (1)을 만족하는 경우에 발생하게 된다.

$$\vec{F}_{coul} > \vec{F}_{ad} \quad (1)$$

Fig. 1에서와 같이 하전 입자와 전극간의 부착력은 영상 전하에 의한 Electrostatic image force ( $\vec{F}_{img}$ ), Molecular interaction에 의한 Van der Waals force ( $\vec{F}_{vdw}$ ), Gravitational force ( $\vec{F}_g$ )의 3가지로 나누어 볼 수 있다.

### 2.2. 부착력 분석

#### 2.2.1 Electrostatic image force

하전된 입자가 전극위에 존재할 경우 전기적 특성을 해석하기 위해서 Fig. 2와 같이 영상 전하 해석법[6]이 주로 이용되는데, 이는 평판 전극 아래에 전하의 극성이 반대이고 크기가 같은 영상전하를 이용하여 필드를 해석하는 방법이다.

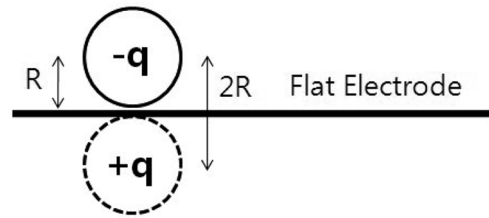


Fig. 2. Electrostatic image method [6].

따라서, Fig. 2와 같이 반지름이 R인 하전 입자를 전하량 -q인 점 전하로 가정하고 영상 전하 해석법을 기반으로 한 Electrostatic image force ( $\vec{F}_{img}$ )의 표현은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_{img} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r(2R)^2} \hat{y} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율(vacuum permittivity)이고,  $\epsilon_r$ 은 미디어의 상대 유전율(relative permittivity)이

다. 식 (2)를 입자의 반지름( $R$ )과 전하량( $q$ )에 대하여 살펴보면  $\bar{F}_{img}$  는  $(q/R)^2$ 에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 고정된  $q$ 값에 대해 입자의 반지름  $R$  값이 클수록 감소하게 됨을 알 수 있다. Fig. 3은 식 (2)를 이용하여 관심 영역에서의 Electrostatic image force에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

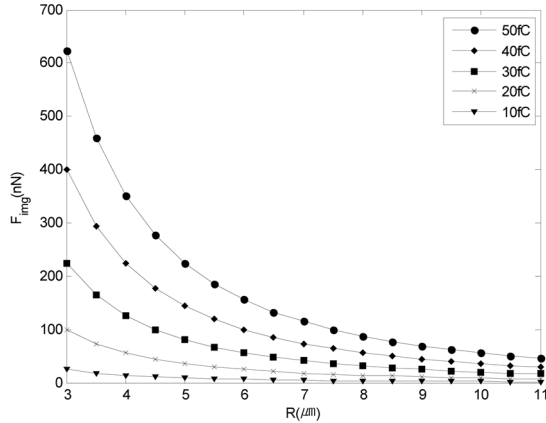


Fig. 3. Electrostatic image force vs. particle radius,  $R$ .

2.2.2 Van der Waals force

Fig. 4은 구형 입자가 평판 재료에 가까이 존재 할 때 갖는 두 재료 사이에 존재하는 Molecular interaction에 의한 Van der Waals force ( $\bar{F}_{vdw}$ )의 구조를 나타낸다.

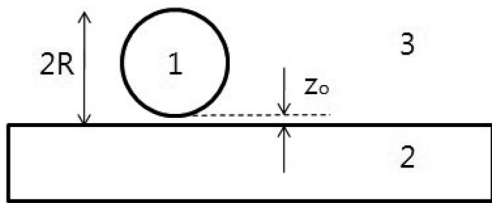


Fig. 4. Van der Waals molecular interaction at sphere-planar surface [7].

식 (3)은 Van der Waals force를 나타내는 식으로,  $z_0$  는 입자(1)와 평판(2)에 미디어(3)을 기준으로 입자와 평판 사이의 가장 가까운 거리를 나타내며,  $A_{132}$ 는 Fig. 4에 보는 바와 같이 입자와 평판, 미디어를 기준으로 한 Hamaker's constant이다 [7].

$$\bar{F}_{vdw} = \frac{A_{132}R}{6z_0^2} \hat{y} \tag{3}$$

식 (3)을 살펴보면,  $\bar{F}_{vdw}$  는 입자의 반지름  $R$ 에 따라 증가 함을 알 수 있으므로, 입자의 반지름  $R$ 이 증가함

에 따라서  $\bar{F}_{vdw}$  는 커짐을 예상 할 수 있다. Fig. 5는 식 (3)을 이용하여 입자의 반지름의 변화에 따른 Van der Waals force의 시뮬레이션 결과이다.

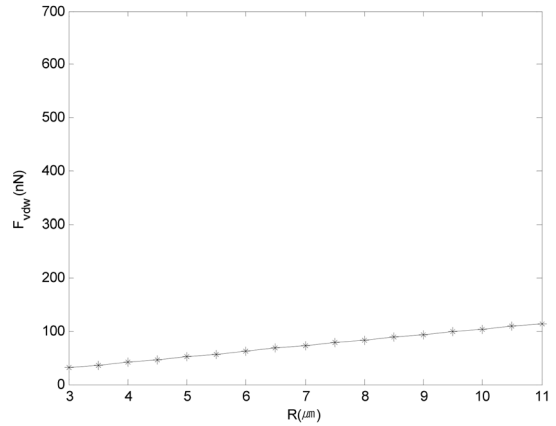


Fig. 5. Van der Waals force vs. particle radius,  $R$ .

2.2.3 Gravitational force

마이크로 입자는 일정한 비중을 갖는 재료로 구성되므로 질량을 가지며, 평판 전극위에서 중력 방향으로 힘을 받게 된다. 따라서, 하전된 마이크로 입자를 구형의 점 전하로 가정하면, 중력에 의해 작용하는 힘( $\bar{F}_g$ )에 대한 식은 식 (4)와 같이 쓸 수 있으며, 은 입자를 구성하고 있는 재료의 비중이다.

$$\bar{F}_g = -\frac{4}{3}\pi\rho_p R^3 g \hat{y} \tag{4}$$

식 (4)로부터  $\bar{F}_g$  는  $R^3$ 에 따라 비례하여 증가 함을 알 수 있으며, Fig. 6은 식 (4)를 이용한 시뮬레이션 결과이다.

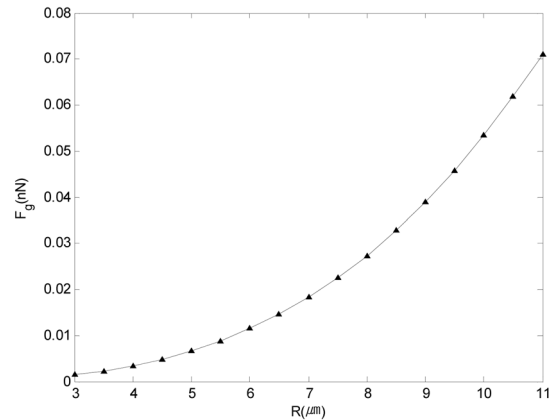


Fig. 6. Gravitational force vs. particle radius,  $R$ .

Fig. 6에서 보는 바와 같이 Gravitational force의 힘의 크기는 관심영역에서 Electrostatic image force와 Van der Waals force에 비해서 수 % 정도로 매우 작은 값을 갖기 때문에 관심 영역에서의 Gravitational force의 영향은 미비함을 알 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

#### 3.1. Adhesion force

Fig. 1에서 보는 바와 같이 입자가 하판 전극 위에 존재 할 때의 부착력을 앞서 살펴본 3 가지 힘에 대한 수식으로 다시 써 보면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{F}_{ad} = \bar{F}_{img} + \bar{F}_{vdw} + \bar{F}_g \tag{5}$$

위의 식 (5)를 각각의 힘을 식 (2), (3), (4)를 이용하여 다시 쓰면, 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{F}_{ad} = \left( -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r(2R)^2} - \frac{A_{132}R}{6z_0^2} - \frac{4}{3}\pi\rho_p R^3 g \right) \dot{y} = F_{ad}\dot{y} \tag{6}$$

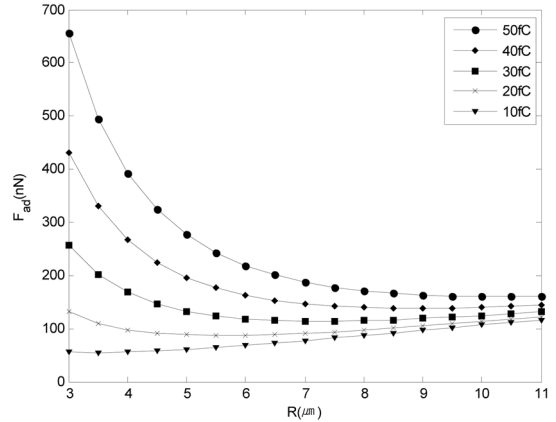
식 (6)에서와 같이 부착력은 입자의 반지름 R과 입자의 전하량 q (10, 20, 30, 40, 50 fC)에 대한 함수임을 알 수 있다. 따라서, 특정 전하량 q값에 대해서 입자의 반지름 R이 3부터 11 μm까지 변화할 때의 입자와 전극간의 부착력을 아래의 Table 1의 값들을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

**Table 1.** Parameters for numerical calculation

Parameter	Symbol	Value (Unit)
Vacuum permittivity	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)
Relative permittivity of air	$\epsilon_r$	1 (-)
Particle density	$\rho_p$	1.3 (g/cm <sup>3</sup> )
Hamaker's constant	$A_{132}$	$1 \times 10^{-20}$ (J)
Minimum distance	$z_0$	4 (Å)
Gravitational acceleration	$g$	9.8 (m/s <sup>2</sup> )

Fig. 7의 시뮬레이션 결과를 보면 입자의 전하량이 작은 경우(10, 20 fC)의 경우 부착력( $\bar{F}_{ad}$ )의 크기는 입자의 반지름에 대하여 비례하여 증가하는 특성을 나타내어 Van der Waals force에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있고, 입자의 전하량이 커지는 경우(30, 40, 50 fC)에는 반지름이 7μm 이하의 영역에서는 Electrostatic image force가 지배적이고, 반지름이 7μm 이상의 영역

은 Van der Waals force와 Electrostatic image force의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 또, 전하량이 큰 경우에 있어서 입자의 크기에 따라서 부착력의 매우 크게 변화 함을 알 수 있으므로, 전자 종이 설계 시 종이의 패널의 구동 전압과 격벽의 높이와 함께 입자의 크기와 전하량에 대한 고려가 함께 이루어져야 부착력의 변화에 따른 구동 전압의 영향을 줄여 줄 수 있을 것으로 판단한다.



**Fig. 7.** Adhesion force vs. particle radius for each charge value (10, 20, 30, 40, 50 fC).

### 4. 결 론

본 연구에서는 앞서 언급하였던 여러 가지 장점을 갖는 전자 종이의 동작 특성에 대한 하전 입자의 영향을 살펴보기 위해서 두 전극 사이에 놓인 단일 입자에 대한 간단한 모델링을 통해 하전 입자와 전극간에 작용하는 부착력을 3가지 힘으로 분석하고 그 크기를 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서 Gravitational force는 Electrostatic image force와 Van der Waals force에 비해 매우 작음을 알 수 있었다. 또, 입자의 전하량과 반지름에 따라서 큰 차이를 갖는 부착력으로 인해서 구동 전압에 영향을 주는 핵심적인 인자임을 확인하였다. 본 연구 결과는 전자 종이의 제작을 위한 하전 입자의 전하량과 입자의 크기에 대한 구동 전압과의 상관 관계를 도출 할 수 있으며, 이를 바탕으로 전자 종이 설계 및 동작 특성 예측에 활용 할 수 있을 것으로 판단한다.

### 감사의 글

본 연구는 2010지식경제부 정보통신 산업원천기술

개발사업(KI002102)에 의해서 지원 되었습니다.

### 참고문헌

1. Gug-rea Jo, Katsuyoshi Hoshino, and Takashi Kitamura, "Toner display based on particle movements," *Chemistry of Materials*, vol. 14, no. 2 pp. 664~669, 2002.
2. Y. Chen, A. Au, P. Kazlas, A. Ritenour, H. Gates, and J. Goodman, "Ultra-thin high-resolution flexible electronic ink displays addressed by a-Si active matrix TFT backplanes on stainless steel foil," *IEEE International Electron Device Meeting (IEDM) 2002*, pp. 389~392, 2002.
3. Omodani makoto, "Next generation display, e-paper. Technological trend and possibility of the electronic paper," *Electronic Parts and Materials*, vol. 42, no. 4, pp. 18~23, 2003.
4. R.C. Liang, Jack Hou, and HongMei Zang, "Micro-cup electrophoretic displays by roll-to-roll manufacturing processes," *International Display Workshops (IDW) 2002*, pp. 1337~1340, 2002.
5. Sakurai Shingo Ohno, Shin-ichi Kita, Yoshitomo Masuda, and Reiji Hattori, "Color and flexible electronic paper display using QR-LPD technology," *The Society for Information Display (SID) 2006*, pp. 1922~1925, 2002.
6. Dan A. Hays, "Advances in particle adhesion," *Cordon and Breach Publishers*, pp.41~48, 1995.
7. H.C. Hamaker, "The London-Van der Waals attraction between spherical particles," *Physica IV*, no.10, pp. 1058~1072, 1937.

접수일: 2010년 11월 30일, 심사일: 2010년 12월 11일  
 게재확정일: 2010년 12월 17일