

대전입자의 동작특성 분석

권순형, 김영훈, 김원근, 한정인
전자부품연구원 디스플레이연구센터

Analysis of Force Acting on a Charged Particle

S-H Kwon, Y-H Kim, W-K Kim, J-I Han
Korea Electronics Technology Institute, Information Display Research Center

Abstract

전계가 있는 밀폐된 공간에서의 대전입자에 작용하는 힘에 대한 수식들을 정의하고 구동 전압을 추출할 수 있는 상관 관계를 살펴 보았다. 입자의 크기, 전하량 등 여러 가지 실험적인 factor들을 변화시켜본 결과 구동 전압에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 구동 전압의 추출을 위해 도입된 여러 가지 factor들은 구동 전압에 독립적으로 작용하는 것이 아니라 서로 복합적인 작용을 하는 것으로 결과가 얻어졌다.

1. 서 론

1.1. 대전입자의 동작특성 분석

전계가 존재하는 공간 하에서 charged particle에 영향을 주는 힘(force)은 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 우선 아래 방향으로 표시된 접착력(adhesion force, (F_{ad}))를 보면, 접착력은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉, particle의 전기적 특성이나 전계와 관련 없는 힘인 Van der Waals force(F_v)와 gravity force(F_g)의 합인 non-electric force(F_{ne}), 그리고 particle 및 하부 plate의 charge와 관련 있는electrostatic image force(F_i)가 있다.^{1,2)} 이 접착력은 particle이 기판 표면에서 떨어지지 않게 하는 힘이며 외부 전계를 가하지 않는 이상 particle은 기판 표면에 붙어 있게 된다. 여기서 gravity force(F_g)를 접착력의 한 성분으로 생각하였지만 셀의 공간적 배치에 따라 접착력으로 작용할 수도 있고 오히려 반대 방향으로의 힘으로도 작용할 수가 있다. 하지만 그 크기가 다른 힘들에 비해 매우 작아 크게 고려하지 않아도 되는 성분이라 할 수 있다. 다음으로 그림 1에서 위 방향으로 표시된 힘은 외부 전계에 의해서 발생하는 힘, 즉 상판의 전극과 하판의 전극에 걸여주는 전압 차이에 의해 발생하는 electric force(F_a)이다. 이 electric force는 상판과 하판의 전압 차이에 비례하게 된다.

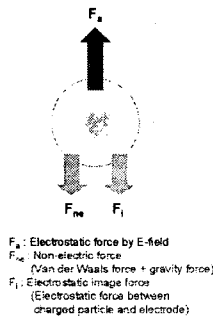


그림1. Charged Particle에 작용하는 힘의 정의

그림 1과 같은 상황에서 하부 기판 표면에 접착되어 있는 particle을 분리시켜 상부 기판으로 이동시키기 위해서는 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$F_a \geq F_{ad} = F_{ne} + F_i \quad (식 1)$$

즉, 외부 전압에 의해 결정되는 힘, F_a가 non-electric force와 electrostatic image force의 합인 접착력(F_{ad})보다 커야 하며 두 힘이 같은 상황에서 외부에 걸여주는 전압을 구동 전압(driving voltage)로 정의할 수 있다. Charged particle에서는 다양한 힘이 작용하게 되는데 궁극적으로 셀의 구동 전압을 낮추기 위해서는 접착력을 낮추는 방향으로 연구를 진행해야 한다. 다만 접착력을 너무 낮추게 되면 particle과 기판에 작용하는 힘이 너무 작아 전계를 가하지 않아도, 혹은 작은 외부 충격에도 particle들이 떨어질 수 있는

가능성이 높아지기 때문에 적절한 값을 찾아야 한다. 또한, particle 간의 interaction도 반드시 고려해야 할 점이다.

2. 본 론

2.1. Analysis of force acting on a charged particle

2.1.1. Electric force by E-field (Detaching force)

상-하판 전극에 외부 전압을 가해주게 되면 전계에 의해 force(F_a)가 발생하게 된다. Charged particle에서의 전계에 의한 force는 다음과 같이 나타낼 수 있다. (particle이 conductive하고 가정).

$$F_a = QE = (\alpha\epsilon SE) \cdot E = \alpha\epsilon(4\pi R^2)E^2 \quad (식 2)$$

- α : particle polarization correction factor
- ε : permittivity of free space
- R : particle radius
- E : Electric field

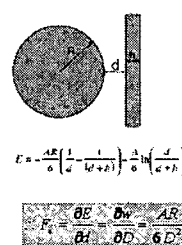
식 2에서 알 수 있듯이 반경 R을 가진 charged particle에 전계를 가해주게 되면particle에 전계 방향으로 F_a가 가해지고 이는 전계의 제곱에 비례하게 된다.

2.1.2. Adhesion force (F_{ad})

2.1.2.1. Van der Waals force (F_v)

Van der Waals force는 어떤 두 물체가 서로 근접하게 되면 서로 간에 발생하는 힘으로서 그림 2에서는 구형을 가진 particle과 semi-infinite wall 간의 interaction energy에 관한 식을 보여준다. 식에서 알 수 있듯이 Van der Waals force는 Hamaker constant(물질과 관련된 factor)와 particle의 반지름에 비례하며 particle과 wall 사이 거리의 제곱에 반비례하게 된다.³⁾ 즉, particle의 사이즈가 클수록 Van der Waals force는 커지며 간격이 멀어질수록 그 힘은 감소하게 된다.

A sphere and a wall



Examples of Hamaker constant in air or vacuum

SiO ₂	8.55 - 50.0 × 10 ⁻²⁰ J	Polystyrene	9.6 - 43.9 × 10 ⁻²⁰ J
Al ₂ O ₃	16.5 × 10 ⁻²⁰ J	Cu	28.4 × 10 ⁻²⁰ J

그림 2. Charged particle과semi-infinite wall에서의 Van der Waals force

2.1.2.2. Gravity force (F_g)

gravity force는 질량을 가진 물체이면 가해지는 힘으로써 그 방향은 앞서 언급했듯이 셀의 공간적 배치에 따라 접착력으로도 작용할 수 있고, 그 반대로 작용할 수 있다. 하지만 식 3에서 알 수 있듯이 gravity force는 물체의 질량에 비례하고 particle의 질량은 매우 작기 때문에 그 값이 다른 force에 비해 상대적으로 매우 작다.

$$F_g = m \cdot g \quad (식 3)$$

2.1.3. Electrostatic image force (F_i)

Electrostatic image force란 charged particle과 전극 사이에 작용하는 attractive force로서 식 4처럼 될 수 있다. 식 4에서 보면

Electrostatic image force는 particle의 charge의 제곱에 비례하기 때문에 particle의 적절한 q/m을 결정하는데 있어 중요한 factor라 할 수 있다. 그리고 역시 particle의 반경의 제곱에 반비례하게 된다.⁴⁾ Electrostatic image force는 Van der Waals force와 더불어 접착력에 있어 매우 중요한 두 가지 변수로서, 두 가지 force를 모두 고려해 particle의 크기 또한 q/m 등을 적절히 조절해야 한다.

$$F_i = \alpha(\kappa, f_m) \frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 R^2} \quad (식 4)$$

Q : particle charge
 α : particle polarization correction factor
 κ : dielectric constant of particle
 ε₀ : permittivity of free space
 R : particle radius
 f_m : fraction monolayer coverage

2.2. Charged particle에서의 force balance

상기에서 언급되었듯이 charged particle과 기관의 전극 사이에는 non-electric force와 electrostatic image force의 합으로 이루어진 접착력이 존재하여 외부의 충격이나 전계를 가하지 않는 한 원래 상태를 계속 유지하게 된다. 이 particle을 기관의 전극으로부터 분리시키기 위해서는 접착력보다 더 큰 힘을 줘야 하는데 이는 상판과 하판의 전극에 일정 전압 이상의 전압을 걸어주면 된다. 이와 같은 charged particle에서의 각종 힘의 balance를 그림 3에서 나타내었다.

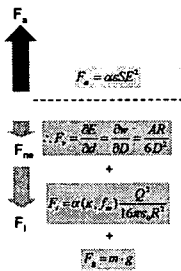


그림 3. Charged particle에 작용한 force balance

2.3. 구동 전압 (Driving voltage)

그림 3에서 제시된 식을 이용하여 현재 사용하고 있는 시스템에서의 셀 구동 전압을 계산하고자 그림 4와 같은 조건을 가정하였다. 우선 particle의 경우 구형으로 가정하였으며 기본적으로 직경은 5μm, q/m은 20μC/g으로 가정하였다. 그리고 particle의 고유 상수는 PMMA을 기준으로 설정하였다. 셀의 'gap'은 50μm로 가정하였으며, Van der Waals force를 계산하는데 필요한 particle과 기관과의 간격은 0.4nm로 설정하였다.

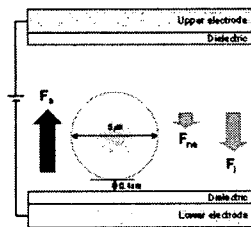


그림 4. 구동전압계산을 위한 셀 모델

3. 결 론

3.1. Particle의 크기 및 전하량(q/m) 영향

그림 5에서는 상기에서 제시된 식들과 고유 상수들을 이용해 계산한 접착력(F_{ad})과 electrostatic force(F_a)를 보여주고 있다. 여기서 x축은 기관 상하 전극에 가해주는 외부 전압이며 y축은 force를 나타낸다. 그림에서 표시되었듯이 F_{ad}와 F_a가 교차하는 점이 구동 전압이다. 교차점 이하에서는 F_{ad}가 F_a보다 크기 때문에 전압을 가하여도 particle은 계속 기관에 붙어 있는 상태로 존재하고 교차점이 되면 그 힘의 크기가 같아지고 교차점 이상의 전압 하에서는 F_a가 F_{ad}보다 크기 때문에 particle은 기관으로부터 떨어지게 되고 전계의 방향에 따라 이동하여 반대 기관에 도달하게 된다.

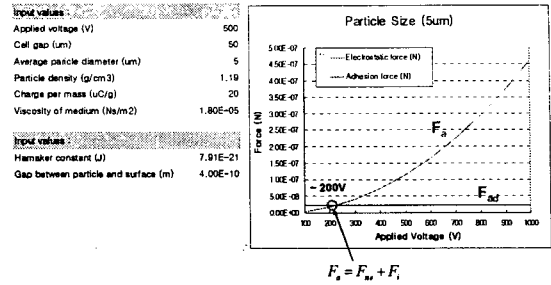


그림 5. 제시된 모델로 계산한 전압에 따른 F_a 및 F_{ad} 변화

구동 전압은 앞서 언급 했듯이 particle의 크기, 전하량, 재료, 표면 상태, 그리고 셀의 구조 등이 복합적으로 작용하게 된다. 그림 6(좌)에서는 particle의 전하량이 각각 5μC/g, 20μC/g 일 경우, particle 크기에 따른 구동 전압의 변화를 보여주고 있다. Particle의 크기는 최소 3μm에서 최대 40μm로 설정하였다. 하지만 해상도를 고려해 볼 때 실제 적용할 수 있는 최대 크기는 10 ~ 15μm 정도로 추정된다. 각각의 경우 particle의 크기에 따른 구동 전압의 변화를 보면 구동 전압이 최소가 되는 particle 크기가 존재한다. 전하량이 5μC/g인 경우에는 particle의 크기가 약 10μm일 때 구동 전압이 최소가 되며, 전하량이 20μC/g일 경우에는 particle의 크기가 약 25μm일 때 최소값을 가지게 된다. 하지만 전하량에 따라서 최소 구동 전압은 달라지는데, 5μC/g인 경우 최소 구동 전압은 173V, 20μC/g인 경우 108V의 최소 구동 전압을 나타내었다.

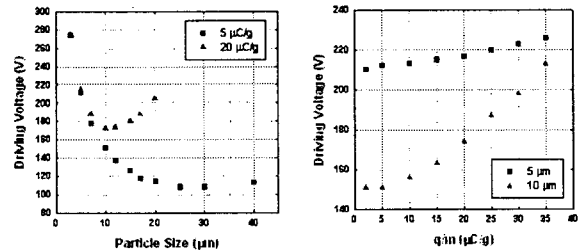


그림 6. 우: Particle 크기에 따른 구동 전압 변화, 좌: Particle의 전하량(q/m)에 따른 구동 전압 변화

그림 6(우)에서는 particle의 전하량에 따른 구동 전압을 비교하고 있다. 여기서 particle의 크기는 각각 5μm, 10μm로 고정하고 q/m을 변화시켜 구동 전압을 계산하였다. 계산 결과 일반적으로 q/m이 감소할수록 구동 전압이 낮아지는 것으로 나타났다. 특히 particle의 크기가 10μm인 경우에서 q/m의 효과가 더 명확히 나타났다. Particle 크기가 10μm이고 q/m이 5μC/g일 때 약 151V 정도의 구동 전압을 나타냈으며 particle의 크기가 5μm인 경우에는 상대적으로 구동 전압이 높았으며 최소값이 약 210V 정도로 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Tadmor, "The London van der Waals interaction energy between objects of various geometries", J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 13 pp. L195, 2001.
- [2] D. S. Rimai, D. S. Weiss, D. J. Quesnel, "Particle adhesion and removal in electrophotography", J. Adhesion Sci. Technol., Vol. 17, pp. 917, 2003.
- [3] J. P. Sonnenberg, E. Schmidt, "Numerical calculation of London-van der Waals Adhesion force distributions for different superquadric shaped particles", Part. Part. Syst. Charact. Vol. 22, pp. 45, 2005.
- [4] L.B. Schein, W. S. Czarnecki, B. Christensen, T. Mu, G. Galliford, "Experimental verification of the proximity theory of toner adhesion", Journal Of Imaging Science And Technology, Vol.48, p p. 417, 2004