

비접촉 방식 레이저 프린터 현상롤러 위에 부착된 마이크로 토너 입자의 부착힘 측정

Measurements of Adhesion Force of Micro-Sized Toner Particles Deposited on the Developing Roller Surface in a Non-contact type Laser Printer

김상윤[†], 이대영*, 신서원**, 은종문** . 황정호***
Sang-Yoon Kim[†], Dae-Young Lee*, So-Won Sheen**,
Jong-Moon Eun** and Jung-Ho Hwang***

ABSTRACT

Study for toner adhesion is known as an important role in electrophotography. In this research, a centrifugal detachment method was used to measure the adhesion force of several hundred particles simultaneously and to determine its sensitivity to particle size. For uncharged toner particles, we estimated the van der Waals force based on the centrifugal force experiments. Then for charged toner particles, the centrifugal force experiments were carried out. The difference between the results for charged toner particles and the results for uncharged toner particles was compared with the image force calculated from a model which assumed that the toner charge was located at the center of the particle. In the calculations, experimental data obtained by E-SPART (Electrical-Single Particle Aerodynamic Relaxation Time) analyzer were used. The adhesion force of micro-sized toner particles deposited on the DR surface was found to be approximately 1~3 nN.

Key Words : Toner Particle(토너 입자), Adhesion Force(부착힘), Micro-sized(마이크로 크기), Non-contact type(비접촉 방식)

1. 서 론

레이저 프린터는 정전 기술 및 감광체를 이용한 전자 사진 방식의 출력 기기이며, 대전, 노광, 현상, 전사, 정착, 청소 등을 순차적으로 수행하여 종이에 원하는 텍스트나 화상을 출력하는 기기이다. 이 중 현상 과정의 질을 좌우하는 토너 입자의 거동은 레이저 프린터 기술의 핵심 중의 하나이다. 비접촉식 레이저 프린터에 사용되는 토너 입자의 현상 메커니즘에 대해 살펴보면 다음과 같

다. Figure 1과 같이 토너 입자들을 블레이드와 마찰 대전시켜 균일한 단위 질량당 대전량을 갖게 한다. 대전된 토너 입자들은 현상롤러(Developing Roller)표면에 블레이드에 의해 일정치의 균일한 층 두께로 도포된다. 이와 같이 현상롤러 위에 도포된 토너 입자들은 감광드럼(OPC Drum: Organic Photoconductive Drum)으로 이동하여 부착된다. 노광(Exposure)된 감광드럼 부위로 토너 입자들이 부착되며, 노광 되지 않은 감광드럼 부위의 부착은 방지해야 한다. 이때 현상롤러 표면의 전기장, 감광드럼 표면의 전기장 상호간의 인력과 반발력이 탈착에 영향을 준다. Figure 2는 현상롤러와 감광드럼에 인가되는 전기장을 보여준다. 이러한 현상 과정에서 중요한 변수로는 블레이드의 길이와 현상롤러의 표면 조도, 전기장, 토너 입자의 재질 및 형상, 현상롤러 위의 토너층, 토너 입자의 부착력 등이 있다.

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : yonin@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4680

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 삼성전자 디지털미디어 디지털프린팅 사업부

*** 연세대학교 기계공학과

논문접수일(2005년 10월 6일)

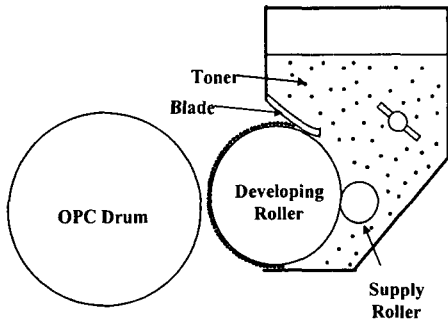


Fig. 1 Development process

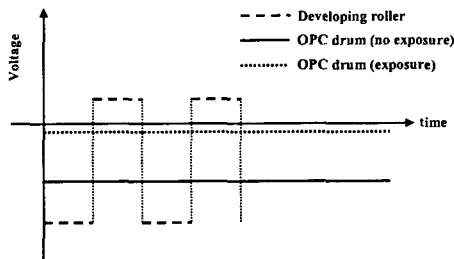
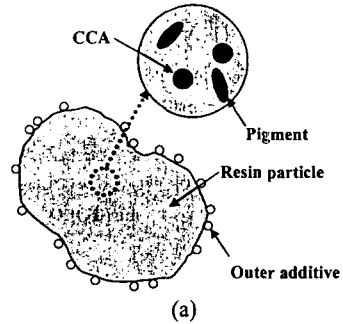


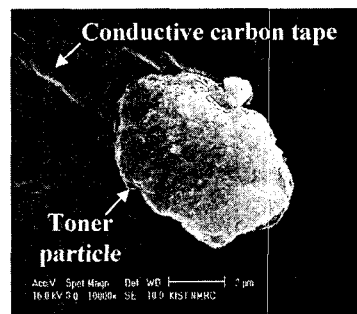
Fig. 2 Operating conditions for developing process

그 중 토너 입자의 부착력은 현상물로부터의 탈 부착 제어에 가장 중요한 역할을 한다.

레이저 프린터에 사용하는 토너 입자는 현상 방식에 의해 분류하면 두 가지로 분류할 수 있다. 일 성분 방식(Single Component System)과 토너 입자를 이송해주는 이송체(Carrier Bead)를 함께 사용하는 이 성분 방식(Two Component System)이 있다. 또한, 토너 입자 제조 방법에 의해 분류하면 분쇄에 의한 토너 입자 제조 방법과 화학적으로 토너 입자를 성장시키는 토너 입자 제조 방법으로 분류할 수 있다. Figure 3과 같은 일 성분 방식 분쇄 토너 입자의 혼합 성분에 대해 살펴보면 80~90 % 정도의 폴리에스테르로 구성된 수 μm 직경의 수지(Resin)입자에 수십 nm 직경의 5~15 % 정도의 착색제(Pigment)와 1~5 % 정도의 대전제어제(Charge Control Agent)를 내침시키고, 0~5 % 정도의 외첨가처리제(SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 등)를 레진 입자 주위에 부착시키게 된다. 수지의 경우 토너 입자의 결합성, 열특성, 마찰대전성의 기능을 가지고 있으며, 착색제의 경우 인쇄 시 원하는 색상을 얻고자 하는 기능과 마찰대전성의 기능을 가지고 있다. 대전제어제의 경우 마찰대전을 높이기 위한 기



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Components (b) SEM image of a toner particle

능을 가지며, 외첨가처리제의 경우 응집력을 약화시켜 유동성을 부여하며, 마찰대전성의 기능을 가지고 있다.

입자의 부착력은 반도체 공정, 제약학, 화장품 제조, 항공학 등 다양한 분야에서 연구되고 있다. 그 중 레이저 프린팅 시스템에서는 토너 입자의 거동 제어를 위해 부착력에 대한 연구가 필요하다. 현상 과정은 모든 토너 입자의 크기 범위에 대해서 일정한 부착력을 가지고, 적절하게 탈착, 부착이 가능한 것이 좋다.

토너의 부착력에 대한 선행 연구에 대해 살펴보면 다음과 같다. 입자의 부착력은 크게 정전기력과 비정전기력으로 나눌 수 있다. [1] 비정전기력의 경우 반 데르 발스 힘과 모세관 힘 등으로 이루어져 있다. 하지만 프린팅 시스템에서는 토너 입자의 물질이 소수성(Hydrophobicity)이므로 모세관 힘은 제외한다. 정전기력의 경우 토너 입자를 구형으로 가정하고 그 중심에 전하가 위치하였을 때 전하에 의해 생성되는 이미지력으로 근사값을 구한다. 결론적으로 토너 입자 부착력의 지배적 힘은 반 데르 발스 힘과 이미지력의 합력으로 볼 수 있다.

부착력을 측정하는 방법으로는 원심력을 이용한 측정법[2-5], AFM(Atomic Force Microscopy)을 이용한 측정법[6], 전기장을 이용한 측정법[7-8] 등이 있다. 원심력을 이용한 측정법과 AFM을 이용한 측정

법의 경우 대전 토너 입자, 미대전 토너 입자를 이용해 각각 정전기력과 비정전기력을 측정할 수 있고, 전기장을 이용한 측정법은 대전 토너 입자를 이용해 정전기력을 측정할 수 있다. AFM의 경우 구형 입자에 대해서 측정하는 것이므로 비구형 토너 입자의 경우 측정이 어렵고, 전기장을 이용하는 방법의 경우 측정하고자 하는 토너 입자가 완전히 전도성을 띠는 물질로 이루어져 있지 않기 때문에 측정이 어렵다. 반면, 원심력을 이용한 측정법의 경우 이전 방법에 비해 상대적으로 간단한 방법으로 수 백 개의 토너 입자에 대한 측정이 가능하다.

본 연구에서는 비접촉 방식 레이저 프린터에서 사용되는 대전 토너 입자의 이미지력은 E-SPART analyzer를 이용하여 얻은 토너의 크기와 하전량 분포를 통해 계산하였다. 또한 대전, 미대전 토너 입자의 부착힘은 원심력을 이용하여 측정하였다. 계산된 이미지력과 실험을 통해 얻은 부착힘에 대한 비교 분석을 실시하였다.

2. 단일 토너 입자의 부착힘 이론

Figure 4와 같이 토너 입자를 구형으로 가정하고 구의 중심에 점 전하가 위치하는 것으로 고려하였을 때 이미지력은 다음과 같다. [9]

$$F_i = \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{d^2} \quad (1)$$

Q 는 토너 입자의 하전량이고, d 는 토너 입자의 입경을 말하고, ϵ_0 는 자유 공간에서의 유전율을 말한다. α 는 토너 입자의 유전 상수와 관련되어 있는 보정 계수이다. 식 (1)은 토너 입자 중심에 하전이 집중되어 있는 경우이지만 실제의 경우는 하전량이 토너 입자 표면에 분포되어 있다. 이와 같은 차이를 보정하고자 Schein과 Czarniecki[10]의 경우 식 (1)과 식 (2)의 합으로 수정된 이미지력을 제시하였다.

실제 토너 입자의 하전량 분포와는 차이가 있다는 것을 보정하고자 하는 힘을 Proximity force라고 한다.

$$F_p = \frac{4}{\pi} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{d^2} \quad (2)$$

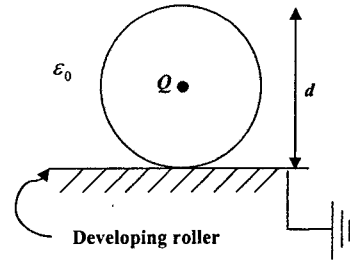


Fig. 4 Image force model by placing a single charge in the center of a spherical toner particle

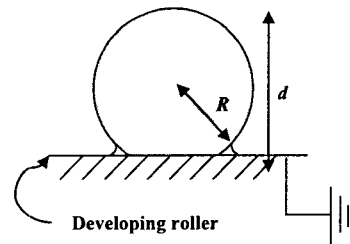


Fig. 5 van der Waals force of a spherical toner particle

앞의 두 제안과는 달리 토너 입자의 전하량과 무관한 반 데르 발스 힘(van der Waals force)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{vw} = \frac{3}{2} w\pi R \quad (3)$$

$$w = \gamma_t + \gamma_s - \gamma_{ts} \quad (4)$$

(γ : surface energy, t : toner, s : substrate)

w 는 토너 입자와 접촉면간의 표면 에너지를 통해 계산된 부착힘에 대한 단위 면적당 열역학적 일을 말하고, R 은 Fig. 5와 같이 토너 입자가 접촉하였을 때 표면의 거칠기에 대한 유효 반지름을 말한다. 토너 입자와 접촉면이 가까워지면 분자들이 쌍극자 상호 작용(dipole-dipole interaction)에 의해 서로 영향을 준다.

3. E-SPART analyzer 이용 정전기력 측정

현상롤러 표면에 부착되어 있는 토너 입자들의 입경 분포와 하전량 데이터를 얻기 위해서 E-SPART analyzer(Electrical-Single Particle Aerodynamic Relaxation Time, Hosokawa Micron Co., EST-II)를 사용하였다. 이 기기는 공기역학경으로 0.4~20 μm 범위 내의 사이즈 분포와 0~ ± 20 $\mu\text{C/g}$ 범위 내의 하전량을 측정할 수 있다. 블레이드와 현상롤러간에 마찰 대전에 의해 토너 입자를 대전시켰다. 이와 같이 얻어진 대전 토너 입자들에 대해 블로우 오

프(Blow-off) 방식을 통해 강제적으로 비산시켰다. 비산된 토너 입자들을 E-SPART analyzer를 이용하여 토너 입자들의 크기분포와 하전량 분포를 동시에 측정할 수 있었다. 공기역학적 d_A 는 입자의 스토크 입경(Stokes' diameter) d_s 와 다음과 같은 관계를 갖는다. 공기역학적(Aerodynamic Diameter)은 단위 밀도(1 g/cm^3)를 갖는 구형 입자의 직경을 뜻하며 스토크 입경은 알고자 하는 입자와 동일한 밀도 및 침강 속도를 갖는 구형 입자의 직경을 뜻한다.

$$d_A = \rho_p^{1/2} d_s \quad (5)$$

여기서 ρ_p 는 토너입자의 밀도이며, 이는 평균적으로 $1.1\sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 이기 때문에 1.2 g/cm^3 으로 계산하였고, 동역학적 형상계수는 1로 계산하였다. 단일 토너 입자에 대한 스토크 입경과 하전량을 각각 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 두 식의 합으로 수정된 이미지력 분포를 구하였다.

4. 원심력 이용 토너 입자 부착힘 측정

선행 연구[2-5]의 경우 감광드럼 표면의 감광 필름과 토너 입자간의 부착힘을 측정한 것과 달리 본 연구에서는 현상롤러 표면과 토너 입자와의 부착힘을 측정하였다. 블레이드와 현상롤러간의 마찰 대전에 의해 토너 입자를 대전시킨 경우와 블레이드를 사용하지 않아 토너 입자가 미대전 된 두 경우에 대하여 실험을 수행했다. Figure 6과 같이 토너 입자들이 부착된 현상 롤러 표면을 1 cm^2 의 크기로 샘플링 한 후 그 위에 링을 놓고 셀로판 테이프로 덮었다. 주어진 rpm에 대해 60 초 동안 모터를 구동시켜 시편이 놓여있는 디스크를 회전시켰다. 이 동안 원심력에 의해 시편 표면에서 떨어져 셀로판 테이프로 포집 된 토너 입자들을 광학 현미경으로 관찰했다. 이 과정을 rpm을 변화시키며 반복 수행하였다. 토너 입자에 작용하는 원심력은 다음과 같다.

$$F_c = mr\Omega^2 = \frac{\pi d_s^3}{6} \rho_p \times r \times \left(\frac{2\pi \times rpm}{60} \right)^2 \quad (6)$$

m 은 토너 입자의 질량이고, ρ_p 는 토너 입자의 밀도로 1.2 g/cm^3 으로 계산하였다. r 은 시편과 모터의 중심축까지의 거리이고, Ω 는 각속도이다.

토너 입자가 탈착 되었을 때의 rpm에 대한

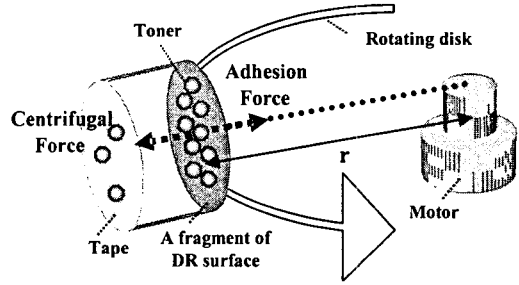


Fig. 6 Centrifugal detachment method

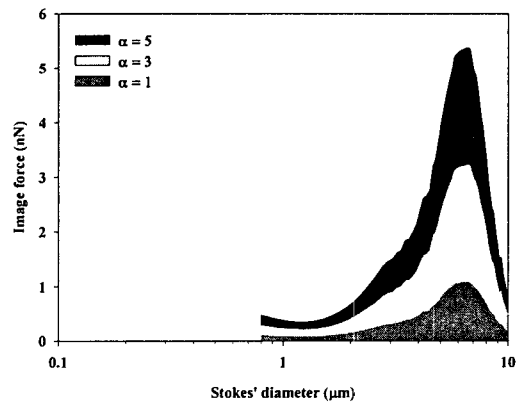


Fig. 7 Image force distribution of charged toner particles

원심력을 부착력이라고 가정하면 미대전 토너의 원심력은 식 (3)에 해당하는 반 데르 발스 힘과 같다고 볼 수 있었다. 대전 토너 입자의 원심력은 식 (1)과 식 (2)와 식 (3)의 합과 동일하므로 미대전 토너 입자의 실험 결과와 조합하면 수정된 이미지력을 예측할 수 있었다. 본 연구에서는 반 데르 발스 힘 측정은 수행하지 않고 미대전 토너의 원심력으로 예측하였다.

5. 결과 및 고찰

Figure 7은 현상롤러 표면에 부착되어 있는 대전 토너 입자를 강제적으로 비산시켜 E-SPART analyzer로 측정된 결과를 통해 얻은 수정된 이미지력 분포 그래프이다. 보정 계수의 변화에 따른 이미지력 분포 변화를 확인할 수 있다.

Figure 8은 셀로판 테이프로 포집 된 미대전 토너 입자의 이미지를 광학 현미경으로 관찰한 모습이다. 1478 rpm, 2925 rpm, 4400 rpm, 5860 rpm, 7300 rpm, 8800 rpm, 10250 rpm, 11700 rpm의 경우에 대해 측정하였다. 그 중 변화가 급격한 4가지의 경우를

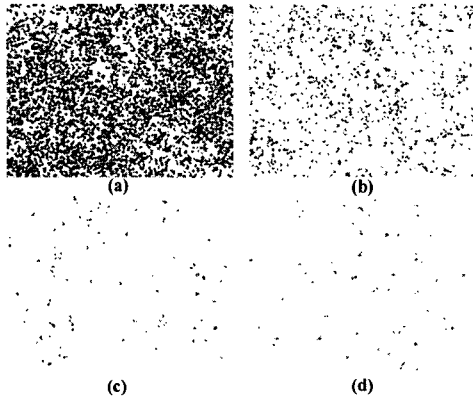


Fig. 8 Images of uncharged toner particles on cellophane tape (a) 1478 rpm (b) 2925 rpm (c) 4400 rpm (d) 5860 rpm

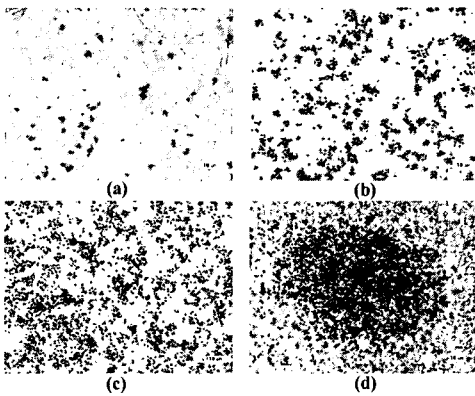


Fig. 9 Images of charged toner particles on cellophane tape (a) 1478 rpm (b) 4400 rpm (c) 7300 rpm (d) 11700 rpm

보여준다. 1478rpm에서 테이프가 검게 보임으로 토너 입자들이 이 회전 수에서 시편에서 탈착하여 테이프에 대부분 포집 되었음을 확인할 수 있었다. 그런 뒤에 새로운 테이프를 사용하여 회전 수를 증가시켰다. 2925, 4400, 5860rpm에서는 테이프에 토너 입자가 많이 부착되지 않았음을 보여준다. 즉 시편에서 토너 입자들이 1478rpm에서 이미 탈착 되었기에 회전 수를 증가시켜도 더 이상 추가적인 큰 탈착은 없었다. Figure 9는 셀로판 테이프에 포집 된 대전 토너 입자의 이미지를 광학 현미경으로 관찰한 모습을 보여준다. 앞의 미대전 토너 입자에 대한 측정과 동일한 rpm에서 실험을 수행하였다. 실험 결과 11700rpm에서 급격히

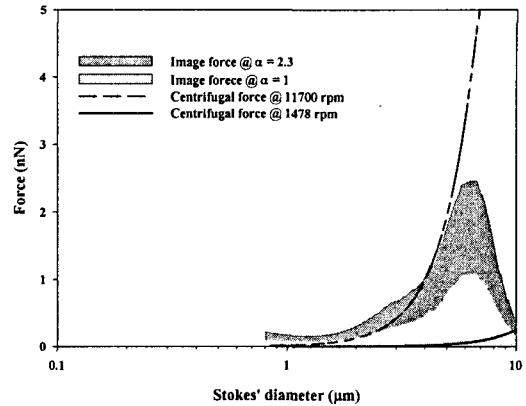


Fig. 10 Comparison between image force ($\alpha = 1, 2.3$) and centrifugal force

Table 1 Image force and van der Waals force

Stokes diameter (μm)	Image force (nN)	van der Waals force (nN)
4	1.022	0.017
5	1.968	0.032
6	3.369	0.055

포집 되는 것을 확인할 수 있었다.

위의 두 경우에 대한 rpm에서의 원심력을 통해 토너 입자의 이미지력과 반 데르 발스 힘을 구하면(식 (6)) Table 1과 같이 반 데르 발스 힘에 비해 이미지력이 우위를 가지는 것을 알 수 있었다. 현상롤러 위에 부착된 토너 입자들의 경우 1~3 nN의 부착힘을 가지는 것을 확인하였다.

앞서 얻은 원심력을 이용한 토너 입자의 부착힘 측정 실험 결과에 대해 단일 토너 입자의 부착력 이론과 비교해보면 다음과 같다. Figure 10은 E-SPART analyzer에서 얻은 대전 토너 입자의 데이터를 이용하여 식 (1)에서 보정 계수를 1, 2.3으로 계산한 이미지력과 토너 입자의 포집 되는 양이 급격히 증가하는 rpm에서의 원심력을 비교하는 그래프이다. 보정 계수를 1로 계산한 이미지력과 원심력을 비교하였을 때 마이크로 크기의 입경에 대해서 살펴보면 한 차수(Order) 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. Proximity force를 고려한 식 (1)과 식 (2)의 합은 식 (1)의 보정 계수를 2.3으로 계산한 것과 같다. 이때 이론 치와 실험 치에 대한 마이크로 토너 입자의 이미지력 오차를 줄일 수 있었다. 그러나 6 μm 이상의 토너 입자 경우 이미지력과 원심력이 잘 맞지 않음을 확인하였다. 결론적으로, 본 실험에서 측정된 분쇄에 의해 제조된 일 성분 방식의 비구형 토너 입자의 경우 이미지력이 우세한 것을 확인할 수 있었으며,

마이크로 크기에 대해서 수정된 이미지력과 반 데르 발스 힘의 합을 토너 입자의 부착힘으로 볼 수 있었다.

6. 결론

본 실험은 원심력을 이용하여 대전, 미대전 토너 입자의 부착힘을 측정하였다. 또한, E-SPART analyzer를 통해 이미지력을 계산하였고 이론식과 실험 결과와의 비교를 통해 토너 입자의 부착힘을 설명할 수 있었다.

(1) E-SPART analyzer를 이용하여 대전, 미대전 토너 입자의 입경 분포와 하전량을 동시에 구하고, 이를 이용하여 토너 입자를 구로 가정하고 중심에 전하가 분포한다고 가정한 이미지력을 계산하였다.

(2) 원심력을 이용하여 대전, 미대전 토너 입자의 부착힘을 측정하였을 때, 반 데르 발스 힘에 비해 이미지력이 우세한 것을 확인하였고, 현상롤러 위에 부착된 마이크로 토너 입자의 부착힘은 1~3 nN 임을 확인하였다. 6 μm 이상의 토너 입자의 경우 이미지력과 원심력이 잘 맞지 않음을 확인하였다.

(3) 토너 입자를 구로 가정하고 중심에 전하가 분포한다고 가정한 이미지력에 보정 계수를 적용하거나 Proximity force를 고려하는 수정된 이미지력을 통해 비구형 마이크로 토너 입자의 정전기력을 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 삼성전자 디지털 프린팅 사업부의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

[1] H. Mizes, M. Ott, E. Eklund and D. Hays, 2000, "Small Particle Adhesion: Measurement and Control", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol.165, pp.11-23.

[2] B. Gady, D. J. Quesnal, D. S. Rimai, S. Leone, and P. Alexandrovich, 1999, "Effects of Silica Additive Concentration on Toner Adhesion, Cohesion, Transfer, and Image Quality", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol.43, pp.288-294.

[3] H. Limura, H. Kurosu and T. Yamaguchi, 2000, "Effects of an External Additive on Toner Adhesion", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol.44, pp.457-461.

[4] D. S. Rimai, M. Ezenyilimba, W. K. Goebel, and S. Cormier, 2002 "Toner Adhesion: Effects of

Electrostatic and Van Der Waals Interactions", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol.46, pp.200-207.

[5] H. Iimura, 2000, "Study of Toner Adhesion – Effect of an External Additive", *Richo Technical Report*, No.26, pp.34-41.

[6] H. Zhou, M. Götzinger, and W. Peukert, 2003, "The Influence of Particle Charge and Roughness on Particle-Substrate Adhesion", *Powder Technology*, Vol.135-136, pp.82-91.

[7] D. S. Rimai, and D. J. Quesnel, 2002, "The Adhesion of Spherical Particles: Contributions of Van Der Waals and Electrostatic Interactions", *Journal of Adhesion*, Vol.78, pp.413-429.

[8] N. Ito, J. Hirayama, T. Maeyama, and H. Fukuda, 2004, "The Size Dependence of Toner Adhesion Force and Field Detachment Properties", *Konica Minolta Tech. Report*, Vol.1, pp.15-18.

[9] D. A. Hays, 1995, "Toner adhesion," *Journal of Adhesion*, Vol.51, pp.41-48.

[10] L. B. Schein and W. S. Czarnecki, 2004, "Proximity Theory of Toner Adhesion", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol.48, pp.412-416.