

프린터 토너의 점착력 특성 및 평가 기법

Characteristics and Assessment of Printer Toner Adhesion

이정은*, 김광일*, 김현준*, 김대은†

Jung-Eun Lee, Kwang-Il Kim, Hyun-Joon Kim and Dae-Eun Kim

(2009년 8월 24일 접수; 2009년 9월 21일 심사완료; 2009년 9월 22일 게재확정)

Abstract

Understanding the adhesion behavior and characteristics of toner film is required to achieve image and text printing with high quality resolution. Toner can be considered as a thin film coating on a media such as paper or polymer film. Quantitative measurement of adhesion characteristics of the thin film is important to assess the reliability of the system. In this work the main objective was to investigate the adhesion characteristic between the toner and the media by ramp loading scratch test method. The scratch test may be used to obtain quantitative information about the adhesion of the film to the substrate. In the scratch test a diamond tip was used to scratch the surface of the toner film under an increasing normal load until the toner detached or fractured. The critical load (LC) was obtained from the experimental results. Also, the relationship between the critical load and the adhesive strength of the interface between the substrate and the toner was obtained by measuring the normal and tangential forces during the scratch test. Finally, theoretical analysis of the toner scratch characteristics was performed based on Benjamin and Weaver theory, Plowing model, and Laugier model.

Key Words : Adhesion, Critical load, Ramp loading scratch test, Toner film

1. 서론

인쇄물의 품질은 일반적으로 활자의 해상도와 토너의 점착력으로 평가된다. 즉, 작은 활자도 선명하게 나타나야 하며 토너가 오랜 시간과 다양한 환경 속에서 잘 부착되어 있어야 한다. 특히 토너는 기계부품의 표면 특성 확보를 위하여 실시하는 코팅과 유사한 개념으로 생각할 수 있으며 이러한 코팅과 마찬가지로 외부 환경 및 접촉으로 인한 상호작용을 견딜 수 있는 내구성이 요구된다. 즉, 코팅과 표면 사이의 점착력은 그 제품의 전체적인 내구성과 신뢰성에 밀접한 관계를 가지고 있다[1-4]. 만약 코팅과 표면의 점착력이 너무 약하면 코팅이 쉽게 박리되어 그 기능을 원활히 수행할 수 없기 때문에 코팅의 점착력을 정량적으로 평가하는 것은 코팅뿐만 아니라 제품 전체의 신뢰성에 중요한 영향을 가

지게 된다.

현재 많은 인쇄산업 분야에서는 인쇄물의 내구성과 신뢰성을 효과적으로 평가하기 위한 다양한 방법을 연구하고 있다. 레이저 프린터에 의해 만들어진 인쇄물은 수많은 토너 입자들에 의해 종이나 폴리머 표면 위로 옮겨지게 되고 그 표면에 전사(transfer)된 토너 입자는 높은 온도와 압력에 의해 필름 형태로 점착(fuse)된다. 이러한 과정은 1937년 Chester Carlson에 의해 처음 발명되었으며 현재 전자인쇄술(Electrophotography)이라고 불리어지고 있다. 또한 현재까지 대부분의 레이저 프린터에 사용되고 있는 방법이다[5-6]. Fig. 1은 위의 과정을 통해 만들어진 토너 필름의 광학 이미지를 보여준다. 그림과 같이 레이저 프린터에 의해 만들어진 토너 필름의 표면 형상은 상당히 거칠고 그 표면 특성은 토너 입자의 성분에 따라 매우 다르게 나타난다. 이러한 요인들은 산업 현장에서 토너 필름의 점착력을 측정하는데 주요 변수들로 작용할 수 있으며 현재 이러한 토너 입자의 표면 특성에 대한 연구와 신뢰성을 평가

† 연세대학교 기계공학과
E-mail : kimde@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123-2822, Fax : (02) 365-0491
* 연세대학교 기계공학과

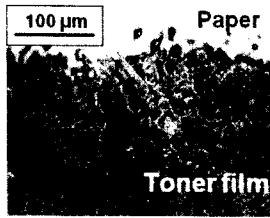


Fig. 1 Optical image of toner film formed during printing

할 수 있는 점착력 측정 방법의 개발이 매우 필요한 실정이다[7].

특히 지금까지 산업 현장에서의 토너 필름의 점착력 측정은 tape peel off test[8]를 통해 평가 되어 왔다. 이 측정 방법은 토너 필름의 표면, 실험에 사용되는 테이프의 점착 특성, 그리고 작업자의 성향에 따라 점착력 특성이 변한다는 문제를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 tape peel off test 대신 ramp loading scratch test [9-10] 기법을 이용하여 토너의 점착력 특성을 평가하였다. 토너 필름의 scratch 파손현상은 광학 현미경과 Scanning Electron Microscopy (SEM)을 이용하여 관찰하고 그 발생 메커니즘을 분석하였다. 또한 토너 필름의 점착력 측정에 대한 실험결과를 다양한 이론적 모델에 적용하고 평가함으로써 그 활용 가능성에 대해 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 시편

2.1 실험 장치

토너 필름의 스크래치 특성을 관찰하기 위하여 Fig. 2 와 같은 마이크로 스크래치 테스터를 구성하였다. 본 장치는 정밀 스테이지(precision stage), 리니어 액츄에이터(liner actuators), 다이아몬드 팁(diamond tip), 미세정밀저울 그리고 로드셀(load cell)로 구성되어 있다. 리니어 액츄에이터는 C 프로그래밍에 의해 X-Y-Z 축으로 3 축 상대 운동이 가능하며 토너 필름에 작용하는 수직하중을 미세정밀저울을 이용하여 측정할 수 있다. 그리고 미세정밀저울의 정보는 제어 컴퓨터에 의해 feedback 작용이 가능하도록 하였다. 본 실험에서 사용한 다이아몬드 팁은 Fig. 3 과

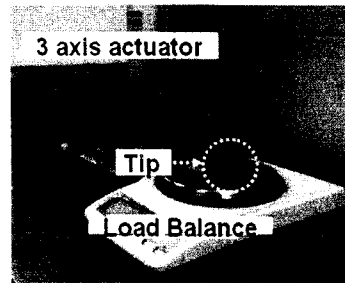


Fig. 2 Micro-scratch tester with load cell

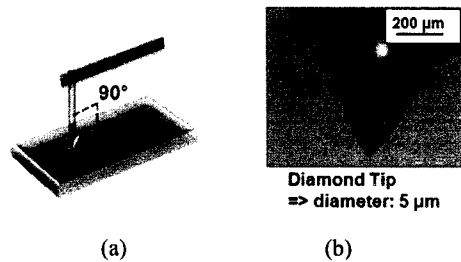


Fig. 3 (a) Schematic of tip/surface angle and (b) optical image of tip used for scratching

Table 1 Experimental conditions

Type	Ramp loading method
Load	0~98mN
Tip	Diamond tip (R:5μm)
Sliding velocity	2.5 μm/s
Specimen	Toner/OHP film

같이 끝단 반경이 약 5 μm 이며 그 팁과 실험 표면 사이의 각도는 90° 로 유지하여 실험하였다. 여기서 다이아몬드 팁을 선택한 이유는 전체 실험이 진행되는 동안 팁의 변형에 대한 영향력이 없을 정도의 높은 경도와 내구성을 가지고 있기 때문이다. 본 연구에서는 토너 필름 위에 scratch track 을 발생하기 위해 수직하중을 0~98mN 까지 서서히 증가시키면서 수평방향의 미끄럼 속도를 2.5 μm/s 로 설정하는 방법의 ramp loading 방식을 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1 과 같다.

2.2 실험 시편

2.2.1 토너 필름의 점착각

본 연구에서는 실험에 사용 될 토너 필름의,

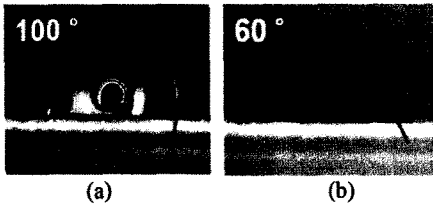


Fig. 4 Contact angle of toner film (a) contact angle measured instantly (b) contact angle measured after 10 minutes

표면 특성을 알아보기 위하여 증류수와의 접촉각 (contact angle)을 측정하였다. 여기서 contact angle 은 고체 표면 위에 액체 방울을 떨어뜨린 후 에너지 평형을 이룰 때 가지는 각도를 말하는 것으로서 이는 표면에너지의 상대적인 차이를 말한다[11]. 즉, 높은 접촉각은 소수성과 낮은 표면 에너지를 뜻하고 낮은 접촉각은 친수성과 높은 표면 에너지를 뜻한다. Fig. 4(a)는 프린트된 후 즉시 토너 필름의 접촉각을 측정한 것으로서 그 각도는 약 100° 였다. 따라서 본 실험에서 사용된 토너 필름의 표면은 소수성에 가까우며 낮은 표면 에너지를 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 접촉각은 시간이 경과함에 따라 표면에 흡수되거나 증발 함으로써 접촉각이 빠르게 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 접촉각 측정을 액체 방울의 생성 후 10 분 이내에 측정하는 것으로 실시하였다

2.2.2 OHP 표면

토너 필름의 파손 메커니즘을 명확하게 파악하기 위하여 종이 대신 OHP 표면 위에 토너 필름을 생성하였다. 여기서 OHP 표면을 실험 표면으로 사용한 이유는 종이 위에 토너 필름을 사용할 경우에는 Fig. 5 와 같이 종이 표면의 섬유조직 구조 때문에 토너 입자들이 종이 표면 안으로 침투하여 종이와 토너 필름 사이의 경계면을 명확하게 구분하기 어려웠기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 실험 표면과 토너 필름의 경계면이 명확하게 분리 될 수 있고 그 정략적인 파손 메커니즘을 파악할 수 있는 OHP 표면을 실험 표면으로 사용하였다. Fig. 6은 OHP 표면 위에 생성된 토너 필름의 두께를 Atomic Force Microscope(AFM)를 사용하여 측정한 이미지를 보여준다. 그 결과, 실험에 사용된 토너 필름의 두께는 약 4.9μm 였다.

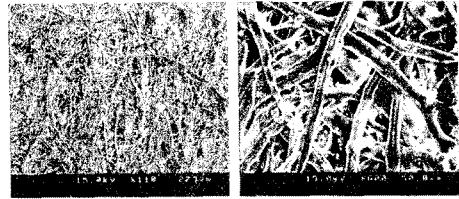


Fig. 5 SEM image of paper substrate

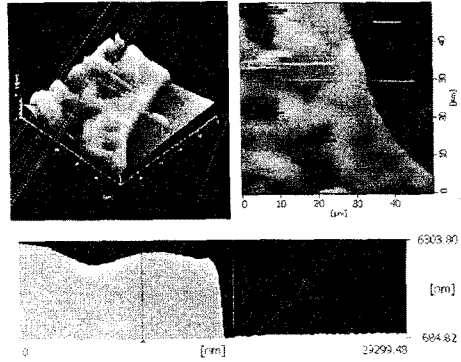
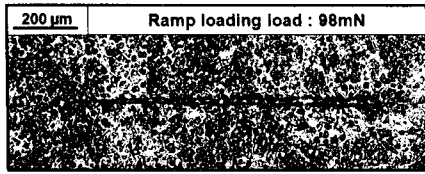


Fig. 6 AFM image of toner film

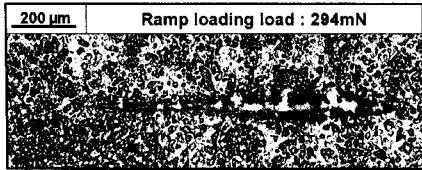
3. 실험결과 및 고찰

3.1 Scratch track 의 분석

Fig. 7 은 종이 위의 토너 필름을 대상으로 다이아몬드 팁을 이용하여 ramp loading 방법으로 최대하중 98mN 와 294mN 를 적용하여 생성된 scratch track 를 광학 현미경으로 촬영한 이미지이다. 일반적으로 토너 필름이 완전히 파괴된 시점에서의 하중을 임계하중(critical load)이라고 하는데 Fig. 7 (a)와(b)에서는 토너 필름의 파괴 시점을 명확하게 구분하기가 어렵다. 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 토너 입자들이 종이 표면의 섬유조직 속으로 침투하여 그 경계면을 불명확하게 하기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 OHP 표면 위에 토너 필름을 인쇄하여 그 scratch track 과 점착력 특성을 정량적으로 분석하였다. Fig. 8 과 9 는 OHP 표면 위에 만들어진 토너 필름의 표면에 발생한 scratch track 을 보여주는 이미지이다. Fig. 9(c)의 SEM 이미지를 통해서 확인할 수 있듯이 그 파괴되는 시점을 명확하게 구분할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 토너 필름이 완전히 파괴된 시점에서의 critical load 는 39mN 였다.



(a)



(b)

Fig. 7 Optical image of scratch track for different ramp loading (a) 98mN and (b) 294mN

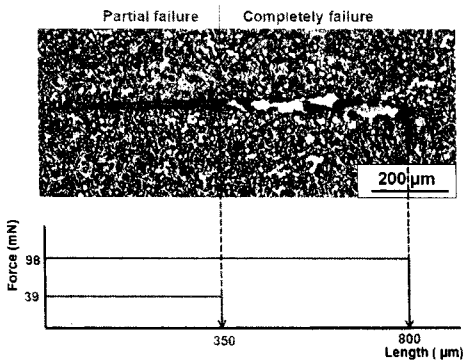


Fig. 8 Optical image of scratch track of toner film on OHP substrate

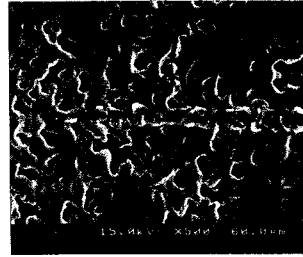
3.2 토너 필름의 경도 측정

3.2.1 Vickers hardness

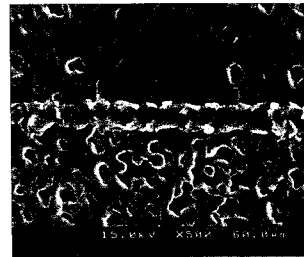
토너 필름의 경도를 측정하기 위하여 마이크로 경도 실험을 실시하였다. 본 경도 실험에는 비커스 경도 측정방법을 사용하였으며 팁의 대면각이 136° 인 사각뿔 형상의 다이아몬드 팁을 이용하여 일정 하중으로 토너 필름의 표면에 압입한 후, 표면에 생성된 마름모꼴의 대각선의 길이를 측정하였다. Fig. 10 은 비커스 경도 실험 후 토너 필름 표면에 형성된 압입 자국을 광학 현미경으로 촬영한 것이다. 그 결과, 토너 필름의 압입 깊이와 경도는 약 2.1μm 와 2.74GPa 으로 측정되었다.

3.2.2 Scratch hardness

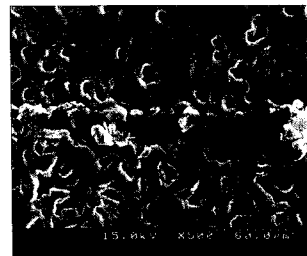
본 실험을 통해 발생한 scratch track 을 이용



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 SEM image of scratch track (a) mild wear track, (b) Severe wear track, and (c) delamination of toner film

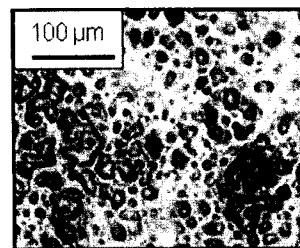


Fig. 10 Optical image of toner film after micro-hardness test

하여 박막의 변형 정도를 나타내는 scratch hardness[12-14]를 유도하였다. Fig. 9 는 SEM 을 사용하여 측정한 scratch track 을 보여준다. Scratch hardness 는 Fig. 9 (a), (b)의 경우와 같이 토너 필름의 파손 발생시점부터 완전히 적

용할 수 있으며 그 정의는 식(3.1)과 같다.

$$H_s = q \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (3.1)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Where, d : width of scratch track

Scratch hardness 는 스크래치 하중(W)과 하중에 의한 트랙의 일정한 면적(A)에 의해 구할 수 있다. 여기서 변수(q)는 폴리머 계열의 재료가 가지는 고유의 회복력에 관한 것으로서 탄성 변형을 넘어선 소성변형 하에서의 변형 정도를 측정하므로 재료자체의 회복력이 거의 발생하지 않는다는 가정하에 1의 값으로 사용할 수 있다 [14]. 그 결과 하중 9.8mN 일 때의 scratch hardness 는 $41 \times 10^{-2} \text{ mN}/\mu\text{m}^2$ 임을 알 수 있다. 이 때 스크래치 트랙의 넓이는 $5.5 \mu\text{m}$ 이다.

3.3 토너 필름의 점착력 분석

박막과 표면 사이의 점착력에 대해 연구한 Benjamin 과 Weaver 이론 [3]에 의하면, Fig. 11 에 나타낸 그림과 같이 스크래치 실험에서 발생하는 힘은 vertical force(F_v)와 horizontal force(F_H)로 나눌 수 있다. 여기서 vertical force 는 scratch 시점에서의 수직으로 가해주는 힘이고 horizontal force 는 다이아몬드 팁이 토너 필름을 수평으로 가해주는 힘을 나타낸다. 또한 horizontal force 는 OHP 필름의 변형에 의해 발생하는 plowing force(P₁), 토너 필름을 수평방향으로 밀어내기 위한 plowing force(P₂) 그리고 토너 필름과 OHP 필름 사이에서 발생하는 전단력(T) 으로 구분할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 critical load 가 작용하는 시점에서의 수평 방향의 힘에 대해 분석하고자 하며, 이 경우 박리가 일어날 때 P₁ 은 0 이 되고, 오직 박막을 밀어내는 힘인 P₂ 만이 남게 된다. 기존의 실험을 토대로 수평방향의 두 힘인 P₁ 과 P₂ 를 plowing 모델로 대체하는 것이 더 실제 데이터에 근접한 결과를 얻을 수 있다는 사실을 확인할 수 있었으므로 P₂ 를 Bowden 과 Tabor 에 의한 제시된 갈림 현상에 대한 Plowing model 로 대체하여 계산하였다. [15] 그리고 이 때 발생하는 전단력(T)은 Laugier model 를 사용하여 구하였다 [16-17]. 먼저 horizontal force 의 경우, 토너 필름을 수

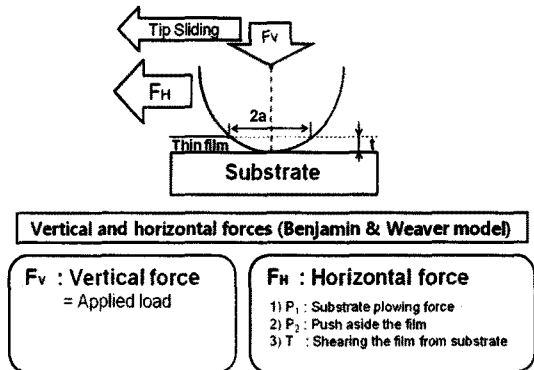


Fig. 11 Evaluation of vertical force(F_v) and horizontal force(F_H) for toner film using Benjamin and Weaver model

평방향으로 밀어내기 위해 필요한 힘을 Plowing model 을 이용하여 식 (3.2)와 같이 유도하여 계산할 수 있다. 여기서 토너 필름을 밀어내기 위한 힘을 P₂ 라고 하면, 이 때, 미끄럼이 진행되는 방향으로 투영된 접촉면을 팁의 형상에 따라 삼각형으로 가정하여 계산하였고 토너 필름에 작용하는 수직 하중에 대응하는 수직방향의 투영된 접촉면의 단면적은 Fig. 11 에서와 같이 토너 필름의 전면 부분에서 작용하기 때문에 반원으로 가정하여 계산하였다. 또한 토너 필름은 모든 방향에서 작용하는 경도가 같은 등방성 재료로 가정하면 식 (3.2)에서와 같이 소거될 수 있다.

Force for pushing aside the film (P₂)

$$P_2 = H \cdot A_h = H \cdot a \cdot t$$

$$L = H \cdot A_v = H \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{2}$$

$$\mu = \frac{P_2}{L} = \frac{2 \cdot t}{\pi \cdot a}$$

$$P_2 = L \cdot \frac{2 \cdot t}{\pi \cdot a} \quad (3.2)$$

- Where, H : hardness of toner film
 A_h : contact area between tip and substrate in the horizontal direction
 A_v : contact area in the vertical direction
 μ : coefficient of friction
 L : critical load
 t : penetration depth
 a : contact radius

그리고 토너 필름과 OHP 표면 사이의 전단력은 식(3.3)에 의해 구할 수 있다.

Shearing force (T)

$$T = \frac{1}{4} \tau \pi d^2 \quad (3.3)$$

Where, τ : shear stress
 d : width of scratch track

Table 2 는 본 연구를 통해 얻어진 결과를 정리한 것이다. 하지만 임계하중에서 측정된 실제 마찰력은 약 59mN 으로서 이론적으로 얻어진 horizontal force 와 비교할 때 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9(c)에서 보이는 것처럼 토너 필름의 경우에는 그 파괴되는 파손 형태가 균일하지 않고 주변 토너 필름과의 영향을 받기 때문에 이론적인 수치보다 차이가 발생했다고 사료된다. 이러한 차이는 스크래치의 특성상 불가피하다고 생각되며 이를 보정하기 위하여 horizontal force 를 식 (3.4)와 같이 개선하였다. 식 (3.4)는 실제 마찰력과 이론적으로 계산된 수평방향의 힘(P_2+T)을 비교하여 보정계수 2.8 를 적용한 식이다.

Modified horizontal force (P_2+T)

$$F_M = \frac{1}{2.8} (P_2 + T)$$

$$F_M = L \frac{0.71 \cdot t}{\pi \cdot a} + \frac{1}{11.2 \cdot \tau \cdot \pi \cdot a^2} \quad (3.4)$$

4. 결론

본 연구에서는 토너 필름과 OHP 필름 사이의 점착력을 측정하기 위하여 ramp loading scratch 방법을 사용하였다. 그리고 토너 필름의 scratch track 을 광학현미경과 SEM 을 이용하여 분석하고 force 센서를 이용하여 그 힘을 측정하였다. 또한 이를 이론적 모델에 적용하여 다음과 같은

Table 2 Scratch vertical load-horizontal force data (using Plowing model)

Vertical force (critical load)	32mN
P_2 (push aside the film)	21mN
T (shearing the film from substrate)	144mN
Horiontal force(F_M)	165mN

연구 결과를 도출하였다.

1. 토너 필름의 scratch test 결과, 필름이 완전히 파괴되는 시점에서의 임계하중은 32mN 이다.
2. Critical load 가 작용하지 않은 시점에서의 scratch hardness 는 $41 \times 10^{-2} \text{ mN}/\mu\text{m}^2$ 이다.
3. 이론적인 모델인 Plowing model 과 Laugier model 을 적용하여 토너 필름을 OHP 표면으로부터 분리하기 위해 필요한 힘 horizontal force 와 전단력을 계산하였다. 결과적으로 그 horizontal force 와 전단력은 21mN 와 144mN 임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] F. P. Bowden and D. Tabor, 1950, "Friction and Lubrication of Solids", Oxford: Clarendon press, pp. 90.
- [2] B. Bhushan, 1999, "Principles and Applications of Tribology", John Wiley & Son, pp. 1~8.
- [3] P. Benjamin and C. Weaver, 1960, "Measurement of Adhesion of Thin Films", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 254, pp. 163-176.
- [4] K. L. Mitta, 1976, "Adhesion Measurement of Thin Films", Electro component Science and Technology Vol. 3, pp. 21-42.
- [5] L.B. Schein, 1992, Electrophotography and Development Physics, Springer, New York.
- [6] M. Scharfe, 1984, Electrophotography Principles and Optimization, Wiley, New York.
- [7] H. Mizes. et al., 2000, "Small Particle Adhesion: Measurement and Control", Colloids and Surfaces A, Vol. 165, pp. 11-23.
- [8] ASTM D3330/D3330M-01, "Standard Test Method for Peel Adhesion of Pressure-Sensitive Tape", ASTM international.
- [9] I-S Shin, Y-T Kim, J-H Han, D-E Kim and T-S Kang, 2006, "Study on Scratch Reduction of HDD using Rounded-edge Slider", Journal of the SISS, Vol. 2, No. 3, pp184-188.
- [10] J-E Lee, L-Y Lin, D-E Kim, 2008, "Study on Scratch Characteristics of HDD Media and ZnO Thin Films by Ramp Loading Scratch Method", Journal of the KSTLE, Vol. 24, No.2, pp. 77-81.
- [11] N. Jacob, Israelachvili, 1991, "Intermolecular and Surface Forces", Academic press, pp.149.
- [12] Brian J. Briscoe, Enrico Pelillo, And Sujeet K. Sinha, 1996, "Scratch hardness and deformation maps

- for polycarbonate and polyethylene”, *Polymer Engineering And Science*, Vol. 36, pp. 2996-3005.
- [13] ASTM G171-03, 2009, “Standard test method for scratch hardness of materials using a diamond stylus”, ASTM international.
- [14] ASTM D7027-05, 2005, “Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine”, ASTM international.
- [15] F. P. Bowden, D. Tabor, 1986, “The Friction and Lubrication of Solids”, Clarendon Press.
- [16] M. Laugier, 1981, “The development of the scratch test technique for the determination of the adhesion of coatings”, *Thin Solid Films*, Vol. 76, pp. 289-294.
- [17] D. E. Coghill, D. H. Stjohn, 1990, “Scratch adhesion testing of soft metallic coatings on glass”, *Surface and Coating Technology*, Vol. 41, pp.135-146.