

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.11.1567

ISSN 1226-4873

토너 박막의 신뢰성 평가를 위한 Peel-off Test의 주요인자[§]

김 광 일* · 김 대 은*[†]

* 연세대학교 기계공학과

Key Parameter of Peel-off Test for Reliability Assessment of Toner Film

Kwang Il Kim* and Dae Eun Kim*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received December 28, 2009 ; Revised August 10, 2010 ; Accepted August 13, 2010)

Key Words: Toner Film(토너 박막), Interfacial Strength(계면력), Peel-off Test(필 오프 테스트), Taguchi Experimental Design Method(다구찌 실험계획법), Peeling Rate(필링 속도)

초록: 레이저 프린터에 의해 만들어진 인쇄물 및 활자는 토너 박막과 종이 사이의 계면력에 따라 그 품질과 신뢰성이 크게 좌우된다. 현재 토너 박막의 계면력을 측정하기 위한 방법은 peel-off test로써 이는 토너 박막의 표면 특성, 테이프의 점착특성, 그리고 실험을 수행하는 작업자의 성향과 같은 여러 복합인자들에 따라 측정되는 계면력 특성이 변한다는 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 peel-off test에서 측정된 계면력에 영향을 미치는 주요인자에 따른 토너 박막의 계면력과 박리 정도의 기여도를 다구찌 실험계획법을 사용하여 알아보았다. 그 결과, 토너 박막의 계면력은 주요인자들의 수준이 커질수록 그 영향력이 크게 증가하지만 토너 박막의 박리 정도는 그렇지 않았다. 또한, 본 연구의 주요인자들에 대한 조건에서 가장 큰 기여도를 가지는 인자는 시편의 이송속도로 나타났다.

Abstract: In printing systems, the reliability of printed material depends on the ability of the toner film to remain adhered to the paper surface. In order to measure the strength between the toner film and the paper surface, a peel-off test is often performed. After conducting the test, the amount of toner film remaining on the paper is measured in order to determine the interfacial strength. The results of this test can be affected by many factors such as the peeling rate, weight of the roller used, and dwell time of tape. Sensitivity analysis was performed with respect to peeling rate, weight of roller and dwell time of tape at different levels. It was found that the interfacial strength increased with an increase in these main parameters. On the other hand, the trend with respect to the percentage of toner loss was different. Further, the interfacial strength and percentage of toner loss were significantly affected by the peeling rate.

- 기호설명 -

CT : 수정항
 T_{SN} : SN비의 총합
 N : 총 실험 횟수
 SS_A : A 인자의 SN비 제곱합
 m_A : A 인자의 반복횟수
 L_A : A 인자의 수준수
 T_{Ai} : A 인자의 i수준인 경우 SN비의 합
 DOF_A : 각 인자의 자유도 수

F_{O, A} : A 인자의 평균 제곱비
 V_A : A 인자의 제곱평균
 V_{error} : 오차분산
 P_A : A 인자의 공정에 대한 기여도

1. 서론

레이저 프린터(laser printer)에 의한 인쇄 과정은 토너 입자가 여러 단계를 거쳐 최종적으로 종이에 정착(fusing)되는 과정으로 이루어진다. 종이의 위의 토너 박막(toner film)은 토너 입자의 거동에 의해 결정되어지며 이 과정에서 가장 중요한 특성이 바로 토너 입자의 점착력이다. 이 특성은

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, kimde@yonsei.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

인쇄물의 품질과 수명에 크게 영향을 미친다.⁽¹⁻³⁾ 즉, 작은 활자도 선명하게 나타나야 하며 토너가 오랜 시간과 다양한 환경 속에서 잘 부착되어 있어야 하기 때문이다.

토너 박막이 종이에 정착되는 과정을 간단히 살펴보면, 롤러에 의한 열과 압력을 토너 입자가 묻은 종이에 가함으로써 토너를 종이에 완전히 정착시키게 된다.^(4,5) 지금까지 위 과정으로 종이 위에 정착된 토너 박막의 계면력(interfacial strength)을 측정하기 위한 방법으로는 rubbing test,⁽⁶⁾ scratch test 그리고 peel-off test와 같은 방법⁽⁷⁾이 사용되어 왔다. 여기서 계면력은 토너와 종이간의 점착 정도를 나타내는 인자로 볼 수 있다. 그 중에서 peel-off test는 다양한 박막의 계면력을 평가하기 위해 사용되고 있는 방법으로서 일정한 넓이를 가진 점착 테이프(adhesive tape)를 이용하여 박막의 표면에 붙였다가 다시 떼어낼 때 발생하는 힘과 남아있는 토너 박막의 양을 측정하는 것이다. 이 방법은 비교적 간단하고 빠른 시간에 박막의 점착 특성을 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 토너 박막의 표면 특성, 실험에 사용되는 테이프의 점착 특성, 그리고 실험을 수행하는 작업자의 성향과 같은 여러 복합인자들에 따라 측정되는 값이 변한다는 문제를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 peel-off test를 이용하여 종이와 토너 박막 사이의 계면력을 일관성 있게 측정하기 위한 기초 연구의 일환으로서 그 실험 결과에 영향을 미치는 주요인자(key parameter)와 그 기여도(percentage of contribution)를 파악하는데 궁극적인 목적이 있다.

먼저 peel-off test에 의한 토너 박막의 계면력과 그 박리 정도를 측정할 수 있는 peel-off tester와 CCD 카메라를 이용하여 이미지 정보 분석 장치를 제작하였다. 그리고 다구찌 실험계획법을 이용하여 peel-off test에 있어서 토너 박막의 계면력 특성과 박리 정도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세가지 주요 인자와 그 수준을 선정하고 각 인자의 수준에 따른 영향력과 각 인자에 따른 기여도를 알아보았다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 Peel-off tester

실험 장치는 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 리니

어 레일(linear rail)과 블록(block)으로 구성된 시편 이송부, 로드 셀(load cell)을 사용한 센서부 그리고 모터와 모터 컨트롤러로 구성된 제어부로 구성되어 있다. 그리고 실험장치는 진동에 대한 영향을 최소화하기 위해 방진 테이블 위에 설치하여 사용하였다. Peel-off test의 실험 절차는 기본적으로 ASTM 규격⁽⁸⁾에 따라 진행하였으며 그 절차는 다음과 같다. 먼저 레이저 프린터에 의해 생성된 토너 박막을 이송부의 블록 위에 움직이지 않도록 고정한 후 12mm의 폭을 가진 점착 테이프를 토너 박막 위에 올린다. 다시 그 위를 스틸 롤러(steel roller)를 이용하여 왕복 2회 하중을 가한 후 점착 테이프의 반대쪽 끝을 로드 셀에 연결된 지그(jig)에 고정시킨다. 그리고 이송부를 이용하여 점착 테이프를 180°각도로 유지하면서 반대쪽 방향으로 잡아 당긴다. 이 때 로드 셀에서 측정된 힘은 측정 장치(DAQ, data acquisition)에 의해 실시간으로 컴퓨터로 저장된다.

Fig. 2는 위의 방법에 의해 측정된 전형적인 계면력 측정 데이터를 보여준다. 일반적으로 peel-off test에 의해 측정된 힘은 실험에서 이용된

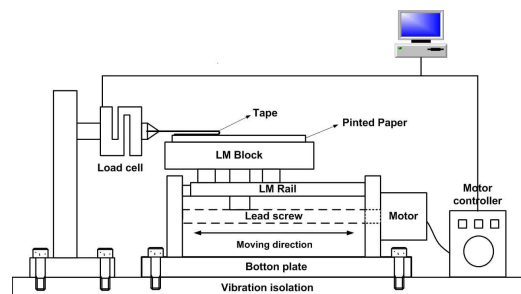


Fig. 1 Schematic of peel-off tester

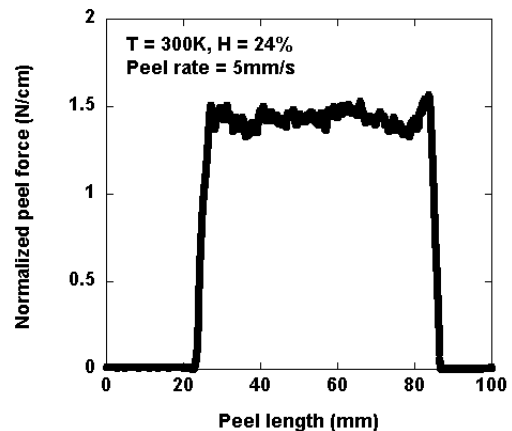


Fig. 2 Typical normalized peel force curve

점착 테이프의 폭으로 나눈 값을 그 표준화된 값으로 사용한다.⁽⁹⁾ 이 때 단위는 N/cm이다. 측정된 데이터는 측정 초기 점착 테이프의 점착 상태를 고려하여 25mm부분까지의 데이터는 제거하고 비교적 균일하게 측정된 그 후 20mm까지의 데이터를 평균값으로 사용하여 그 표준화된 계면력을 계산하였다.

2.1.2 Percentage of toner loss

Fig. 3 은 peel off test 를 통해 형성된 토너 박막의 박리 형태를 보여준다. 광학 현미경을 통해 관찰된 박리 형태는 토너 박막 전체 부위에서 일어나지 않고 부분적으로 박리가 발생하였다. 이러한 박리 형태를 정량적으로 측정하기 위하여 200만 화소급의 상업용 CCD카메라를 이용하여 Fig. 4와 같이 peel-off test 전(a)과 후(b)의 표면 이미지를 촬영하여 그 픽셀(pixel) 면적 데이터를 검정과 흰색의 이진 데이터로 검출하여 분석하였다. 토너 박막의 박리 정도는 실험 전과 후의 블랙 픽셀 데이터의 상대적인 차이를 이용하여 아래의 식 (1)에 의해 백분율(percentage)로 계산하였다.

Percentage of toner loss (%)

$$= (A_{\text{before}} - A_{\text{after}}) / A_{\text{before}} \times 100 \quad (1)$$

Where, A_{before} : Black pixel area before test

A_{after} : Black pixel area after test

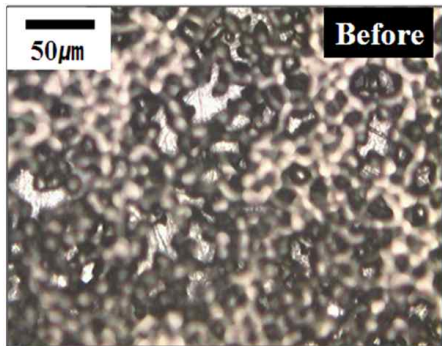
2.2 실험 방법

2.2.1 인자 및 수준의 선정

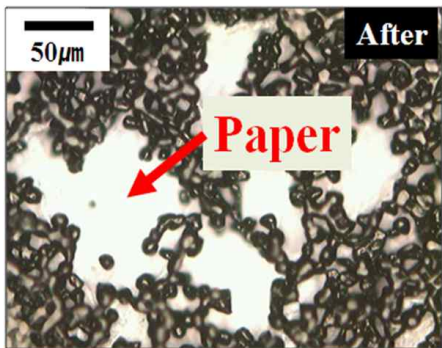
Peel-off test에 의해 측정된 계면력 특성은 다양

Table 1 Levels of selected factors

Factor & symbol	Levels		
	0	1	2
Peeling rate (A)	1mm/s	5mm/s	9mm/s
Weight of roller (B)	1500g	2000g	2500g
Dwell time of tape (C)	Instantly	15min	30min

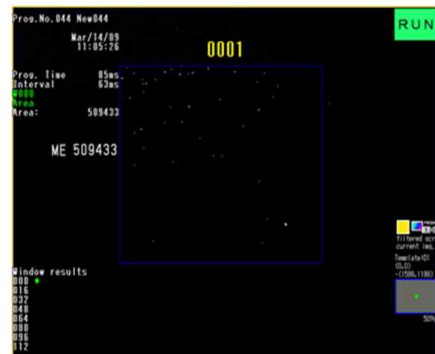


(a)

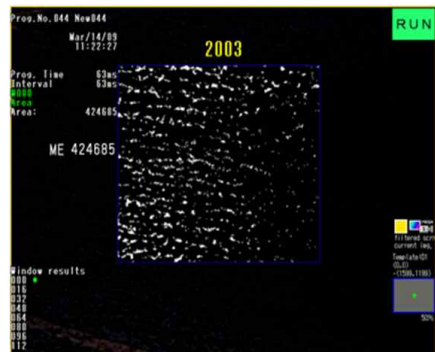


(b)

Fig. 3 Optical image (a) before and (b) after the peel-off tester



(a)



(b)

Fig. 4 CCD camera image (a) before and (b) after the peel-off test

한 인자들에 의해 결정된다. 이러한 여러 인자들의 영향력을 정량적으로 파악하는 것은 실험에 있어서 일관성 있는 데이터를 확보하기 위한 기초자료가 될 수 있다. 본 연구에서는 예비실험을 통하여 peel-off test의 결과에 영향을 미칠 수 있는 인자와 수준을 선정하고 Table 1과 같이 정리하였다. Peel-off test에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자는 시편의 이송속도(peeling rate), 점착 테이프의 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게(weight of roller), 점착 테이프의 점착시간(dwelling time of tape)이다. 실제로 온도, 습도와 같은 외부 환경에 대한 인자들도 계면력 특성에 영향을 미칠 수 있으나 본 연구에서는 내부 환경이 일정한 실험용 챔버 속에서 실험을 수행하였기 때문에 이를 배제하였다.

다구찌 실험계획법은 위에 설명한 인자들의 대한 실험횟수를 크게 줄이고 그 상대적인 기여도를 정량적으로 파악할 수 있다. 즉, 선정된 주요 인자들의 영향력을 최대화 하고 잡음의 영향력을 최소화한다는 개념으로 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. 이 SN비는 신호 대 잡음의 비율을 말하는 것으로, 신호 입력의 힘과 잡음이 주는 영향에 대한 힘의 비율로서 나타낸다.

SN비는 목적함수로서 원하는 특성치에 따라 세가지로 분류된다. 즉, 특정한 특성치가 있는 경우는 망목 특성(normal is best), 특성치가 작으면 작을수록 좋은 망소 특성(lower is better), 그리고 특성치가 크면 클수록 좋은 망대 특성(higher is better)으로 나누어진다. 본 연구에서는 높은 계면력과 많은 박리 정도를 파악하는데 영향을 미치는 주요인자를 파악하는 것이기 때문에 망대 특성을 사용하였다.

망대특성의 경우 SN비는 아래 식 (2)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

여기서, n 은 측정값의 수를 나타내고 y_i 는 측정된 특성치를 나타낸다. 이 SN 값을 나타내는 단위는 데시벨(dB)을 사용한다.⁽¹¹⁾

다구찌 실험계획법에서는 실험횟수는 적고 실험계획을 간단히 할 수 있는 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 사용한다. 이 직교배열표를

사용하면 실험데이터로부터 인자변동의 계산이 용이하고 분산분석표 작성이 간단할 뿐만 아니라 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 2와 같이 총 9번의 실험횟수를 가지는 4인자 3수준계 직교배열표(L₉3⁴)를 적용하였다.⁽¹¹⁾ 여기서 peel-off test에서 발생하는 오차에 대한 영향을 고려하기 위해 error항에 대한 인자가 추가 되었다.

2.2.2 분산분석

식 (2)로부터 얻어진 SN비를 이용하여 peel-off test의 영향을 미치는 주요인자의 기여도를 통계적 분석법인 분산분석(analysis of variance; ANOVA)을 사용하여 계산하였다. 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 선정된 인자마다 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자를 찾아내는 방법이다. 각 인자의 제곱합을 그 인자의 자유도(degree of freedom)로 나누면 그 인자의 제곱평균(mean square)이 되며, 오차와 분산을 비교할 수 있다. 이 때 F-검증은 얻어진 값들의 확률적 유의 수준을 이용하여 평가한다. Table 3, 4의 분산분석표에서 SS는 제곱합, DOF는 자유도, V는 제곱평균, P는 기여도(percentage of contribution), Fo는 평균값의 비로서 F-검증에 사용된다. 본 분석에 사용된 식들은 식 (3) ~ (8)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$CT = \frac{T_{SN}^2}{N} \quad (3)$$

$$SS_A = \frac{1}{m_A} \sum_{i=1}^{L_A} T_{A_i}^2 - CT \quad (4)$$

$$DOF_A = L_A - 1 \quad (5)$$

$$V_A = \frac{SS_A}{DOF_A} \quad (6)$$

$$F_{o,A} = \frac{V_A}{V_{error}} \quad (7)$$

$$P_A(\%) = \frac{V_A}{V_{total}} \times 100 \quad (8)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 각 인자의 수준에 따른 SN비

Table 2는 각 실험조건에 따른 9개의 측정 결과와 식 (2)을 이용하여 측정된 계면력과 토너 박리 정도에 대한 SN비를 구한 것이다. 또한 각 인자의 수준에 따른 계면력과 토너 박리 정도를 파악하기 위하여 식 (9)⁽¹²⁾을 통해 각 인자의 수준별 SN비의 평균을 Fig. 5와 6에 나타냈다. Fig. 5는 계면력에 대한 인자의 수준별 차이를 보여주는 것으로서 각 인자에 따라 그 강도가 커질수록 계면력에 크게 기여하고 있다는 것을 보여준다. 그리고 Fig. 6는 토너 박막의 박리 정도에 대한 인자의 수준에 따른 차이를 보여주는 것으로서 점착 테이프의 점착시간의 경우에는 계면력의 결과와 유사한 경향을 보여주지만 시편의 이송속도와 롤러의 무게의 경우에는 그 인자의 중간 수준에서 가장 작은 영향력을 보여주고 시편의 이송속도는 9mm/s 일 때, 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게는 1500g일 경우에 가장 큰 영향력을 보여준다는 것을 알 수 있다.

$$M_{Ai} = \frac{1}{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} [(SN)_{Ai}]_j \quad (9)$$

여기서, M_{Aj} 는 A인자가 j수준인 경우 SN비의

평균이고 n_A 는 직교배열표 상에서 A인자의 해당 수준 출현수를 나타낸다.

3.2 각 인자에 따른 기여도

각 인자에 따른 계면력과 토너 박막의 박리 정도에 대한 기여도를 파악하기 위해 식 (3) ~ (8)을 이용하여 분산분석을 수행하였다. Table 3과 4는 분산분석에 의해 계산된 결과를 보여준다. 이에 따르면 시편의 이송속도는 62.8%, 점착 테이프의 점착시간은 33.97%, 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게는 2.71%, 오차항(Error)은 0.34%의 비율로 peel-off test에 의해 측정된 토너 박막의 계면력에 영향을 미치며, 박막의 박리 정도의 경우에는 시편의 이송속도는 47.72%, 점착 테이프의 점착시간은 32.61%, 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게는 8.68%, 오차항 Error는 15.98%의 비율로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히 Table 4에서 나타낸 것과 같이 정해진 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게에 대한 인자는 peel-off test에서 발생하는 오차에 대한 Error의 기여도와 비교하여 그 값이 상당히 작기 때문에 본 연구에서 토너 박막의 박리 정도에 지배적인 영향을 주는 주요인자가 아님을 확인할 수 있다.

이상과 같이 살펴본 바에 의하면, 계면력과 토너 박막의 박리 정도에 영향을 미치는 주요인자는 서로 비례적인 상관 관계를 보이며 실제 peel-off test에 대한 토너 박막의 계면력 특성은

Table 2 Table of orthogonal arrays and experimental results

Exp. No.	Factors				Characteristic value			
	A	B	C	Error	Normalize peel force (Higher is better)		Percentage of toner loss (Higher is better)	
					N/cm	SN ratio	%	SN ratio
1	0	0	0	0	1.32	2.35	3.75	10.02
2	0	1	1	1	1.45	3.22	5.03	10.72
3	0	2	2	2	1.50	3.50	7.99	11.21
4	1	0	1	2	1.60	4.08	6.85	16.60
5	1	1	2	0	1.63	4.22	2.50	6.06
6	1	2	0	1	1.49	3.45	7.35	4.56
7	2	0	2	1	1.74	4.80	5.53	14.11
8	2	1	0	2	1.54	3.75	5.61	14.53
9	2	2	1	0	1.80	5.09	10.23	18.86

Table 3 ANOVA results for normalize peel force

Factor	SS	DOF	V	Fo	P(%)
A	3.50	2	1.75	185.66	62.98
B	0.15	2	0.08	7.99	2.71
C	1.89	2	0.94	100.12	33.97
Error	0.02	2	0.01		0.34
Total	5.55	8	2.78		100.00

Table 4 ANOVA results for percentage of toner loss

Factor	SS	DOF	V	Fo	P(%)
A	75.08	2	37.54	2.67	42.72
B	15.26	2	7.63	0.54	8.68
C	57.31	2	28.65	2.04	32.61
Error	28.09	2	14.05		15.98
Total	175.74	8	87.87		100.00

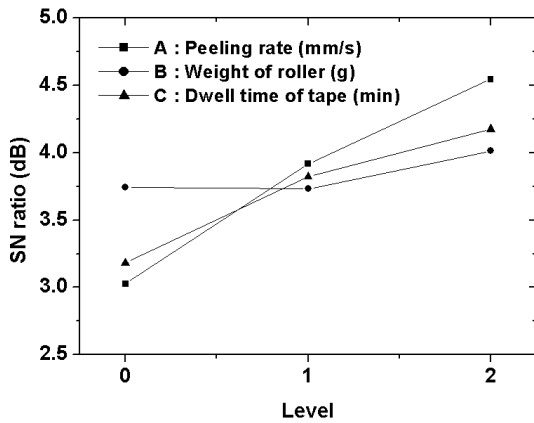


Fig. 5 Variation of SN ratio for normalize peel force

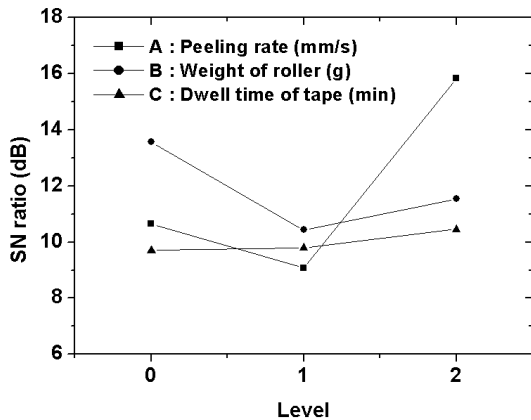


Fig. 6 Variation of SN ratio for percentage of toner loss

시편의 이송속도에 따라 크게 좌우됨을 실험을 통해 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 토너 박막에 있어서 peel-off test의 계면력 특성과 그 박리 정도에 영향을 미치는 세가지 주요인자를 선정하고 각 인자의 수준에 따른 SN비와 각 인자에 따른 기여도를 파악하였다. 이를 바탕으로 그 실험 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 토너 박막의 계면력에 대하여 각 주요 인자는 그 수준이 커질수록 그 영향력이 크게 작용한다는 것을 확인하였다.

(2) 토너 박막의 박리 정도에 대하여 점착 테이프의 점착시간의 경우는 그 수준이 커질수록 그 영향력이 증가하는 경향을 보이지만 나머지 두 인자의 경우는 상대적으로 시편의 이송속도는 9mm/s 일 때, 초기 하중을 가해주는 롤러의 무게는 1500g일 경우에 가장 큰 영향력을 보여준다.

(3) Peel-off test에 있어서 측정된 토너 박막의 계면력과 박리 정도에 영향을 미치는 인자의 기여도는 시편의 이송속도, 점착 테이프의 점착시간, 롤러의 무게의 순으로 나타났다.

(4) 향후 본 연구에 결과는 산업 현장에서 peel-off test에 대한 토너 박막의 계면력 측정에 관한 표준화 연구에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Oittinen, P., Saarelma, H., 1998, "Printing, Papermaking Science and Technology," book 13, Fapet Oy, Helsinki.
- Hartus, T., 2001, "Adhesion of Electrophotographic Toner on Paper," *Graphic Arts in Finland*, Vol. 30, No. 2, pp. 14~19.
- Maher, J. C., Chatfield, R., Aponte, F. and Charles, D., 2001, "MICR Performance and the Relationship to MICR Toner Adhesion," Inter. Conference on Digital Printing Technologies.
- Scharfe, M., 1984, "Electrophotography Principles and Optimization," Wiley, New York.
- Schein, L. B., 1992, "Electrophotography and Development Physics," Springer, New York.
- Scott, C. T., Gleisner, R., Jeanne, D. B., 2000,

- “Method for Evaluating Toner Adhesion on Copier Paper,” *TAPPI Recycling Symposium*, pp. 241~250.
- (7) Borch, J., 1991, “Thermodynamics of Polymer-Paper Adhesion: a Review,” *J. Adhesion Sci. Techno.*, Vol. 5, No. 7, pp. 523~541.
- (8) ASTM D3330/D3330M-01, “Standard Test Method for Peel Adhesion of Pressure-sensitive Tape,” ASTM International.
- (9) McGuiggan, P. M., Chiche, A., Filliben, J. J. and Yarusso, D. J., 2008, “Peel of an Adhesive Tape from a Temperature-Gradient Surface,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 28, pp. 185~191.
- (10) Park, S. H., 2000, “Modern Design of Experiments,” Minyoungsa, Seoul, Korea.
- (11) Baek, N. K., Kim, D. E., 2002, “Optimization of Laser Lithography Micropatterning Technique based on Taguchi Method,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 59~63.
- (12) Ahn, J. Y., Kim, D. E., Choi, J. Y., Choi, J. Y. and Shin, K. H., 2003, “Friction Properties of Carbon Coated Ultra-thin Film using Taguchi Experimental Design,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 143~150.