

롤투롤 전자인쇄 시스템에서 Nip Roll의 특성에 따른 인쇄 패턴의 품질에 대한 매칭기술 연구[§]

최재원* · 신기현*[†] · 이창우**

* 건국대학교 기계공학부, ** (주)토바 기술연구소

Matching Technology Between Nip Roll Characteristics and Quality of Print Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics Systems

Jeon Won Choi*, Kee Hyun Shin*[†] and Chang Woo Lee**

* Department of Mechanical Engineering, Konkuk Univ.,

**Research Center, Toba Co.

(Received June 21, 2011; Revised December 3, 2011; Accepted December 5, 2011)

Key Words : Roll to Roll Printed Electronics System(롤투롤 전자인쇄 시스템), Nip Roll(넵 롤), Matching Technology (매칭기술), DOE(실험계획법)

초록: 최근 RFID, 유연디스플레이, 태양전지, 전자 종이 등의 소자를 프린팅 방식을 이용하여 생산하려는 연구가 활발하게 진행 되고 있다. 이런 방식이 기존의 노광기술과 식각기술에 의존하는 반도체 공정에 비해 가격 경쟁력에서 우수하기 때문이다. 특히 RFID, 유연디스플레이, 태양전지, 전자 종이 등은 유연성과 대량생산을 필요로 하기 때문에 롤투롤(roll to roll)공정과 같은 저가격화, 대형생산화에 관심이 집중되고 있다. 이 롤투롤 기술을 사용하기 위해서는 인쇄 패턴의 빠른 구현, 표면 균일도, 두께 등의 높은 인쇄 품질이 보장 되어야 한다. 본 연구는 실험계획법(Design of Experiment)을 적용하여 인자들의 주효과와 교호작용 효과를 분석하고, 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 넵 롤의 특성에 따른 인쇄 품질의 영향과 인쇄 품질의 향상 방안을 찾기 위한 매칭기술을 제안 하였다.

Abstract: Currently, active research is being performed on printing of electronic devices such as RFID devices, flexible displays, solar cells, and e-paper. This technique has several advantages over existing technologies such as lithography and etching. In particular, RFID devices, flexible displays, solar cells, and e-paper require flexibility and a mass production system. Thus, attention is being focused on the roll-to-roll process. High quality should be guaranteed in the roll-to-roll printed electronics systems, and good thickness and roughness qualities must be ensured. Experimental design was applied to this problem to analyze the main effects and interaction effects of various factors. Matching technology between the nip roll characteristics and the quality of the print pattern in roll-to-roll printed electronics systems was proposed to improve the printing quality.

1. 서 론

1.1 서론

인쇄전자소자 산업은 급속도로 성장하고 있는 분야이다. 오늘날 인쇄기술은 문자 인쇄만이 아닌 전자소자공정, 바이오 분야, 재료 등에서도 핵심기

술로 여겨지고 있고 연구가 활발히 이루어지고 있다. 아직까지는 태양전지나 유연디스플레이, 인쇄 전자소자는 기존의 노광과 식각기술을 이용하여 주로 만들어 지고 있다. 그러나 디스플레이, RFID 등의 복잡하고 다양한 패턴을 필요로 하는 인쇄전자 시스템이 가격인하와 유연한 기관의 적용, 대량 생산을 위해서는 기존보다 발전된 공정이 필요하다. 이러한 기술의 핵심인 롤투롤 전자인쇄 기술은 패턴의 빠른 구현, 표면의 균일도, 인쇄패턴의 두께 등의 높은 인쇄 품질의 구현이 가능하며, 고속, 대량생산이 가능하고 시설비용의 절감, 원가

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2011.6.30-7.1, 라마다프라자 제주호텔)발표논문임

† Corresponding Author, khshin@konkuk.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

절감으로 각광받고 있다. 이러한 롤투롤 시스템에서 인쇄 패턴의 두께와 거칠기와 같은 특성은 인쇄전자소자의 성능을 결정하는 중요한 요인이다.⁽²⁾

종래의 기술은 인쇄 패턴롤과 유연소재를 눌러주는 닙 롤(nip roll)의 특성을 고려하지 않고, 인쇄 공정에서 장비의 운전 속도, 운전 장력, 전자 소자 인쇄용 잉크의 점도 등을 고려하여 인쇄를 하는 것이 일반적이었다. 그러나 닙 롤(nip roll)에 대한 영향으로 인하여 인쇄 패턴의 두께에 오차가 생길 수 있기 때문에 원하는 인쇄 패턴의 두께를 얻기 위해서는 닙 롤(nip roll)의 특성을 고려하여 정밀도를 좀 더 높이는 기술이 필요하다.

본 연구는 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 인쇄 패턴의 품질에 영향을 주는 인자 중에 하나인 닙 롤(nip roll)의 특성에 따른 각 인자들 사이에서의 전자인쇄 영향에 대하여 실험계획법(Design of Experiment)을 적용하여 주 효과와 교호작용 효과를 분석하고, 롤투롤 인쇄 패턴이 요구되는 두께와 표면 거칠기 품질을 향상 시킬 수 있는 방안을 찾는 데 목적을 두고 있다.⁽⁶⁾

1.2 실험계획법(Design of Experiment)

실험계획법(Design of Experiment)이란 시스템의 입력변수에 임의의 변화를 가하여 출력결과의 변화에 대한 원인을 관찰할 수 있는 방법으로 새로운 공정을 개발하거나 기존의 공정을 개선하기에 유용하며 개발시간과 총 경비를 감소시킬 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 위의 실험계획법을 이용하여, 롤투롤 인쇄 전자 시스템에서 이미 연구가 진행되어 있는 기존의 패턴의 두께에 영향을 미치는 인자들과 닙 롤(nip roll)의 특성인 재질, 경도, 압력을 선정하였다. 패턴의 두께에 영향을 미치는 인자인 닙 롤(nip roll)의 특성과 인쇄 장비의 운전속도 등과 같은 다른 인자들 간의 주효과와 교호작용 효과를 분석하여 목표로 설정한 최적화된 인쇄 두께를 얻기 위한 기준을 얻을 수 있다.

2. 주요 공정변수 선정

2.1 Nip Roll의 선정

인쇄두께 및 표면조도 등은 소재, 잉크 등의 단일 특성에 의해 결정되는 것이 아니라, 시스템의 운전조건, 소재의 유연성, 그리고 사용되는 물질의 특성 등이 복합적으로 영향을 미치게 된다. 각각의 인자들에 대한 상관관계를 분석하기 위해, 롤투롤 다층인쇄시스템에서 인쇄품질(두께, 표면조

도)에 영향을 미치는 주요 공정변수를 선정하는 것이 우선적으로 요구된다.

닙 롤(nip roll)은 그라비아 인쇄에서 인쇄 롤 패턴에 있는 잉크를 소재로 전이 시켜주기 위해 눌러주는 역할을 하는 롤이다. 전자인쇄에 있어서 닙 롤(nip roll)의 재질과 경도, 닙 압력(nip pressure)이 인쇄품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 닙 롤(nip roll)의 재질, 경도, 닙 압, 운전속도를 주요 공정변수로 선정하였다.

2.2 Nip Roll의 재질

다양한 고무 재질의 종류를 조사하고 각 고무의 특성과 실제 산업 현장에서 사용되는 용도를 비교하여 인쇄 전자에 가장 적합한 고무로 NBR Rubber와 실리콘 고무를 선정하였다.

NBR Rubber는 아크릴로니트릴부타디엔고무(Acrylonitrile Butadiene Rubber)로 일반적으로 니트릴 고무라고 불린다. 부타디엔과 아크릴로 니트릴과의 공중합물로 비결정성, 불규칙성의 고무이며, 장점으로는 내유성, 내마모성, 내열노화성, 인장응력, 인장강도가 좋고, 내화학약품성이 좋다. 인쇄 롤에 특히 많이 사용되며, 현재 전자인쇄에서 닙 롤(nip roll)로 많이 사용되고 있다.

실리콘 고무는 4족 원소로서 도체와 부도체의 성질을 동시에 구현할 수 있는 독특한 물질임과 동시에 여타 어느 재료와 비교하여도 손색이 없을 만큼의 우수한 기계적인 성질을 지니고 있다. 실리콘 고무의 특징은 내열성, 내한성이 우수하고 내후성, 내유성, 내약품성 등이 우수하다. 실리콘 고무는 NBR 고무보다 넓은 온도 범위에서 우수한 고무 탄성을 유지할 수 있다. 하지만 일반 물리적 특성 중 인장강도 및 인열강도는 일반 유기 고무에 비하여 좀 떨어지는 단점이 있다. 실리콘 고무는 산, 알칼리 등의 극성 유기화합물에 거의 침해를 받지 않으며 장시간 물에 침전되거나 스티프에 노출되어도 거의 물성변화가 일어나지 않는다.

실리콘은 돌이나 유리와 같이 취성이 크기 때문에 압축하중에는 강하나, 반복적인 충격하중에는 약하다. 뿐만 아니라 이러한 취성과 더불어 실리콘은 여타 금속재에 비해 상대적으로 높은 경도를 가진다.

본 연구에서는 닙 롤의 경도와 재질에 따른 인쇄 패턴의 경향에 대한 다른 요인들과의 상관관계를 알아보기 위해서 경도 75(쇼어 A), 경도 85(쇼어 A)의 각기 다른 경도를 가진 NBR 고무 롤과 같은 경도 85(쇼어 A)의 재질이 다른 NBR 고무 롤과 실리콘 롤을 준비하였다.

3. 실험

3.1 실험 조건

전도성 잉크를 사용하며, 점도는 624cp로 하였다. 운전 장력은 소재의 탄성변형을 고려하여 2kgf로 하였다. 드라이 온도는 사용하는 소재가 열에 약한 PET 소재이기 때문에 유리기관과는 달리 온도를 높게 올리면 웹의 변형이 많이 생기게 된다. 따라서 웹의 변형을 막아주고 전도성 잉크가 충분히 경화될 수 있는 100℃의 온도에서 드라이를 하였다. 앞의 잉크의 점도, 운전 장력, 드라이 온도를 고정시키고, 닙 롤(Nip Roll)의 재질, 닙 압력, 운전 속도를 실험 변수로 설정하여 실험을 하였다. 운전속도는 요구되는 전도성 잉크의 경화 시간을 충분히 보장하기 위해 3m/min 과 6m/min으로 하였으며, 닙 롤(Nip Roll)의 닙 압력은 0.2MPa 과 0.4MPa로 하였으며, 마지막으로 닙 롤(Nip Roll)의 경도와 재질에 따른 인쇄 패턴의 경향에 대한 상관관계를 알아보기 위해서 경도 75(쇼어 A), 경도 85(쇼어 A)의 각기 다른 경도를 가진 NBR 고무 롤과 같은 경도 85(쇼어 A)의 재질이 다른 NBR 고무 롤과 실리콘 롤을 준비하였다. 인쇄 장치는 패턴이 음각으로 가공된 롤에 잉크를 채우고 웹에 압력을 가하여 인쇄하는 방식인 그라비아 프린팅 장치를 사용하였다.⁽¹⁾ Table 1은 실험에 적용한 조건을 나타낸다.

3.2 주요 공정변수와 인쇄품질 간의 상관관계 분석

실험을 통해 얻은 결과 값을 이용하여 주요 공정 변수와 인쇄품질(인쇄두께, 표면조도)간의 DOE (Design of Experiment)를 적용하여, 각 인자들이 인쇄패턴의 품질에 미치는 주 효과(main effect)와 교호

Table 1 Factors of the experiment

Factor	Level		Unit
Viscosity of conductive ink	624		cp
Tension of substrate	2		kgf
Drying of temperature	100		℃
Velocity	3	6	m/min
Press of Nip	0.2	0.4	MPa
Nip Roll	NBR 75	NBR 85 Silicon85	Shore A

Table 2 Experimental results on the Thickness and Roughness

Run	Factors			Thickness(um)				
	x ₁	x ₂	x ₃	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4	Rep.5
1	-1	-1	-1	0.78	0.72	0.85	0.76	0.82
2	-1	-1	1	0.84	0.93	0.85	0.93	0.87
3	-1	1	-1	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80
4	-1	1	1	0.76	0.68	0.79	0.77	0.76
5	0	-1	-1	0.85	0.74	0.73	0.83	0.81
6	0	-1	1	0.73	0.79	0.87	0.91	0.87
7	0	1	-1	0.71	0.79	0.78	0.75	0.78
8	0	1	1	0.84	0.80	0.82	0.77	0.79
9	1	-1	-1	0.83	0.97	0.79	0.94	1.00
10	1	-1	1	0.87	0.86	0.89	0.85	0.84
11	1	1	-1	0.83	0.77	0.82	0.83	0.77
12	1	1	1	0.83	0.78	0.82	0.81	0.80

Run	Factors			Roughness(um)				
	x ₁	x ₂	x ₃	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4	Rep.5
1	-1	-1	-1	0.551	0.559	0.480	0.586	0.578
2	-1	-1	1	0.605	0.541	0.445	0.490	0.528
3	-1	1	-1	0.670	0.833	0.718	0.522	0.422
4	-1	1	1	0.733	0.862	0.528	0.664	0.639
5	0	-1	-1	0.501	0.589	0.599	0.501	0.365
6	0	-1	1	0.831	0.399	0.457	0.361	0.461
7	0	1	-1	0.797	0.812	0.774	0.390	0.520
8	0	1	1	0.607	0.499	0.509	0.541	0.626
9	1	-1	-1	0.426	0.323	0.806	0.424	0.317
10	1	-1	1	0.858	0.718	0.593	0.501	0.584
11	1	1	-1	0.572	0.829	0.739	1.000	0.820
12	1	1	1	0.931	0.685	0.422	0.545	0.497

Factors	Unit	Range		
Rubber(x ₁)	shore A	NBR75(-1)	NBR85(0)	silicone85(1)
Velocity(x ₂)	m/min	3.0(-1)	to	6.0(1)
Nip pressure(x ₃)	Mpa	0.2(-1)	to	0.4(1)

작용 효과(interaction effect)에 대한 분석을 하였다.

Table 2 는 실험한 데이터를 조건 별로 정리한 표이다.

Table 2 에서 두께와 거칠기의 실험 결과는 최대 값을 1 로 변환하여 표로 정리한 값이다. 이 결과 값을 바탕으로 DOE(Design of Experiment)를 적용 하여서 각각의 인자들이 인쇄패턴의 품질에 주는 영향을 알 수 있었다.

Fig. 1 은 NBR 75 Rubber roll 과 NBR 85 Rubber roll 에 대한 인쇄 두께의 분석 플롯이다. 주 효과 플롯을 보면, 높은 경도(NBR 85)의 닢 롤에서는 인쇄할 때 잉크와 소재의 접촉각이 증가하기 때문에 잉크 전이율이 감소하여 전체적인 두께가 감소한 것으로 보인다.⁽⁴⁾ 여기서의 접촉각은 인쇄 롤과 기관 사이의 잉크 전이를 설명하기 위하여 사용되었으며, 인쇄 롤의 패턴 안에 있는 잉크가 기관에 전이될 때의 각도를 의미한다. 닢 롤의 경도가 높을 경우 상대적으로 낮은 경도의 닢 롤 보다 인쇄할 때 같은 닢 압력에서 압축되는 정도가 다르다. 높은 경도의 닢 롤이 낮은 경도의 닢 롤 보다 압력을 가했을 때 소재와 접촉하는 표면적이 작다. 그러므로 넓은 표면적으로 프린팅 롤과 소재를 눌렀을 때 와 좁은 표면적으로 프린팅 롤과 소재를 눌렀을 때 패턴 내부의 잉크와 소재의 접촉각이 차이를 보이게 된다. 넓은 면적일 때 접촉각은 작아지고 좁은 면적일 때 접촉각은 높아지므로, 경도가 높아지면 상대적으로 낮은 경도의 닢 롤 보다 좁은 면적으로 접촉하게 되고 접촉각이 높아지게 된다. 속도가 증가하면 패턴의 두께가 감소하는 것을 볼 수 있고, 닢 압력의 증가에 따라 두께도 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 압력이 클 경우에는 소재와 잉크의 부착이 더 강하게 되어 전이되는 잉크의 양에 영향을 주는 것으로 보인다.⁽⁵⁾

NBR Rubber 의 경도는 주 효과 보다는 다른 인자와 상호작용을 할 때 효과가 더 나타나는 것을 볼 수 있다. 속도의 주 효과 플롯에서 볼 수 있듯이 속도가 낮으면 두께가 높아지는데, 경도가 높은 닢 롤을 사용하게 될 경우, 속도에 대한 두께의 변화 정도가 낮아지게 된다. 닢 압력과 닢 롤의 경도에 대한 상호작용에서는 경도가 낮은 닢 롤을 사용하게 될 때, 두께의 변화 정도가 더 낮아진다.

Fig. 2 는 NBR 75 Rubber roll 과 NBR 85 Rubber roll 에 대한 인쇄 표면 거칠기의 분석 플롯이다. 높은 경도(NBR 85)의 닢 롤에서는 경도 증가로 인한 효과로 거칠기가 낮아진 것을 볼 수 있다.⁽³⁾ 속

도에 대한 효과로는 고속에서 인쇄 패턴의 표면 거칠기가 높아지는 것을 볼 수 있고, 닢 롤의 경도와 닢 압력의 상호작용에서의 표면 거칠기는 경도가 높은 닢 롤에서 닢 압력에 대한 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3 은 NBR 85 Rubber roll 과 Silicone 85 Rubber roll 에 대한 인쇄 두께 분석 플롯이다. 주 효과 플롯에서 볼 수 있듯이 실리콘 고무 롤이 NBR 고무 롤 보다 인쇄 두께가 더 높다. 동일한 경도(85, 쇼어 A)의 NBR 고무와 실리콘 고무를 사용하여 실험을 하였지만, 실리콘 고무가 NBR 고무 보다 반발탄성이 좋기 때문에 동일한 닢 압력에서 인쇄를 할 때 에너지의 손실이 상대적으로 적고 압력이 가해진 이후에 복원되는 성질이 더 크기 때문에 실리콘 고무가 NBR 고무 보다 잉크 전이율이 더 좋다는 것을 알 수 있고 그로 인해서 인쇄 두께가 더 높아졌다. 주 효과 플롯에서 속도에 의한 영향은 Fig. 1 의 NBR Rubber 에서 속도에 대한 주 효과와 같은 경향을 볼 수 있다. 닢 롤의 재질과 속도의 상호작용 효과에서는 실리콘 재질의 닢 롤이 NBR 고무의 재질 보다 더 높은 두께 결과가 나왔으며, 실리콘 재질이 속도에 대하여 두께 변화 폭이 더 큰 것을 볼 수 있다.

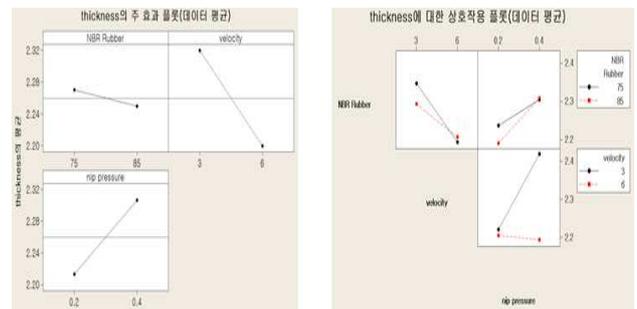


Fig. 1 The thickness(um) of the print pattern analysis plot(NBR75&NBR85)

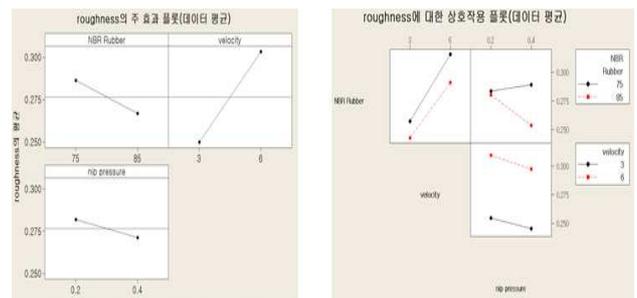


Fig. 2 The roughness(um) of the print pattern analysis plot(NBR75&NBR85)

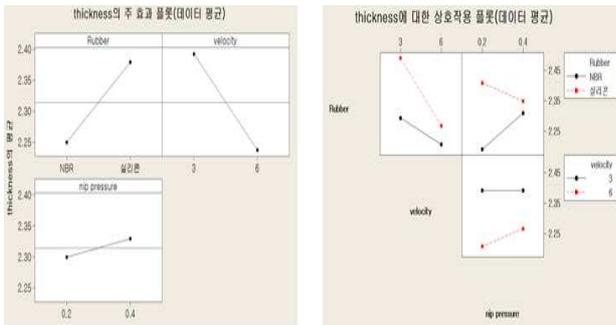


Fig. 3 The thickness(um) of the print pattern analysis plot(NBR85&Silicone85)

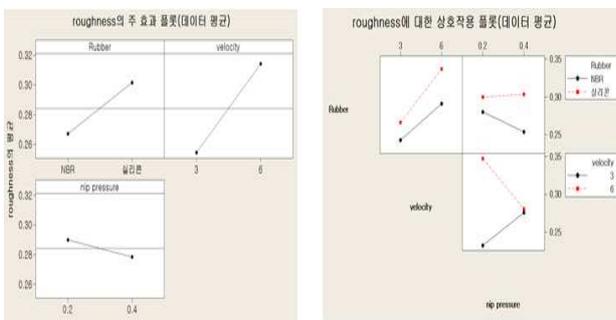


Fig. 4 The roughness(um) of the print pattern analysis plot(NBR85&Silicone85)

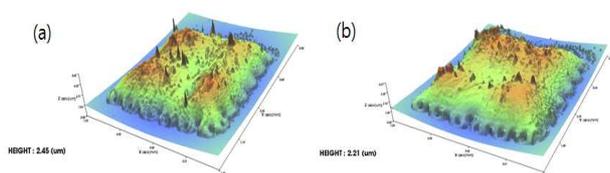


Fig. 5 (a) Nano CAM measurements on the print pattern with Silicone Nip Roll. (b) Nano CAM measurements on the print pattern with NBR Nip Roll

Fig. 4는 NBR 85 Rubber roll 과 Silicone 85 Rubber roll 에 대한 인쇄 표면 거칠기 분석 플롯이다. 실리콘 고무 롤이 NBR 고무 롤 보다 인쇄 두께는 더 높아졌지만 표면 거칠기는 증가하였다. 표면 거칠기에 대한 상호작용 효과에서는 표면 거칠기가 속도에 많은 영향을 받는다는 것을 볼 수 있다.

좀 더 높은 두께를 얻기 위해서는 실리콘 고무 롤을 이용하여 인쇄하는 방법이 좋지만, 표면 거칠기를 줄이기 위해 닢 압력을 증가 하고, 속도를 줄이는 것이 인쇄 패턴의 품질에 도움이 될 것이라는 것을 실험과 분석을 통해 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 인쇄 패

턴의 품질에 영향을 주는 인자 중에 하나인 닢 롤 (nip roll)의 특성에 따른 각 인자들 사이에서의 전자인쇄 영향에 대하여 실험계획법(Design of Experiment)을 적용하여 주 효과와 교호작용 효과를 분석하고, 인쇄 패턴의 품질을 향상 시킬 수 있는 방안을 찾는데 목적을 두고 있다.

실험을 통해서 닢 롤의 경도의 증가는 표면 거칠기의 개선에 영향을 주고, 닢 롤의 재질은 실리콘 고무가 NBR 고무 보다 잉크 전이율에서 이점이 있어 더 높은 두께로 인쇄된다는 것을 알 수 있었다. 좀 더 높은 두께를 얻기 위해서는 실리콘 고무 롤을 이용하여 인쇄하는 방법이 NBR 고무 보다 더 좋아 보이지만, 실험을 통해 실리콘 고무 롤은 인쇄 패턴의 표면 거칠기 에서 NBR 고무보다 불리하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 실리콘 고무의 닢 롤로 인쇄를 할 때, 표면 거칠기를 줄이기 위해서는 닢 압력을 증가 시키고, 속도를 줄여서 인쇄 하는 것이 인쇄 패턴의 품질에 도움이 된다. 하지만 닢 롤의 재질이 표면 거칠기에 영향을 주는 정도와 그에 대한 원인을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서 제시한 닢 롤의 경도와 재질을 포함하여 운전 속도, 닢 압력 등과 같은 인쇄 패턴의 품질에 영향을 미치는 인자들과의 매칭기술 개발이 필요하다. 이러한 인자들 간의 매칭기술을 통한다면, 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 원하는 인쇄 패턴의 품질을 얻기 위한 기준을 마련하는 방법에서 도움을 줄 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2010-0007588) 및 “서울시 산학협력사업(10848)”의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, C.W., Kim, N.S., Shin, K.H. and Kim, C.W., 2009, "Statistical Analysis for an Estimation of Printed Pattern in Roll to Roll Printed Electronics System," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 235~236.
- (2) Kim, N. S., Lee, C. W. and Kim, C. W., 2010, "Statistical Analysis for Thickness and Surface roughness of Printed Pattern in Roll to Roll Printed Electronics System," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineering Conference*, pp.

- 356~357.
- (3) Lee, S., Lee, H. L. and Park, S. K., 2000, "Evaluation of the Nip Pressure Profile and Analysis of Heat Transfer in Soft Nip Calender," *Journal of Korea TAPPI*, Vol. 32, No. 2, pp. 26~34.
- (4) Kang, H. W., Huang, W.-X., Sung, H. J., Lee, T.-M. and Kim, D.-S., 2008, "Study of Liquid Transfer Process for micro-Gravure-Offset Printing," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineering Conference*, pp. 1098~1102.
- (5) Park, S. J., Lim, S. M. and Youn, J. T., 2007, "A Study on the Computer Simulation in the Changing Velocity and Pressure in Gravure Printing," *Journal of Korea TAPPI*, Vol. 25, No 1, pp. 53~64.
- (6) Lee, C. W., Kang, H. K., Kim, C. W. and Shin, K. H., 2010, "A Novel Method to Guarantee the Specified Thickness and Surface Roughness of the Roll-to-Roll Printed Patterns Using the Tension of a Moving Substrate," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 19, No 5, pp. 1243~1253.