

## 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 관한 통계적 분석<sup>§</sup>

이창우\* · 김남석\*\* · 김창완\*\*\*†

\* 창원대학교 기계설계학과, \*\* 건국대학교 기계설계학과

### Statistical Analysis for Thickness and Surface Roughness of Printed Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics System

Chang Woo Lee\*, Nam Seok Kim\*\* and Chang Wan Kim\*\*\*†

\* Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Changwon Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk Univ.

(Received May 14, 2010 ; Revised September 13, 2012 ; Accepted January 25, 2013)

**Key Words** : Roll to Roll Printed Electronics System(롤투롤 인쇄전자 시스템), Design of Experiment(실험계획법), Thickness of Printed Pattern(인쇄패턴의 두께), Surface roughness of Printed Pattern(인쇄패턴의 표면조도), Effect(효과), Significant Effect(유의한 효과)

**초록**: 롤투롤 인쇄전자 시스템은 높은 생산성과 낮은 원가를 이점으로 인쇄전자 산업에서 가장 각광을 받고 있는 인쇄기술 중 하나이다. 이러한 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 인쇄패턴의 특성은 인쇄물의 기능적 성질을 결정짓는 중요한 문제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인쇄패턴의 특성을 결정짓는 주요 인자들이 특별히 인쇄패턴의 두께와 표면 조도에 미치는 영향성에 대한 분석이 수행되었다. 실험계획법을 적용하여 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 대한 각 인자의 주효과 및 교호작용 효과를 정량적으로 제시하였고, 분산분석을 통해 유의한 인자를 찾아내었다. 또한 이에 따르는 통계적 모델이 주요 인자의 함수로서 개발되었다. 이러한 결과는 롤투롤 전자인쇄 시스템의 특징에 따라 요구되는 인쇄패턴의 특성을 얻는데 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract**: The roll-to-roll (R2R) printed electronics system is one of the most promising technologies for the printed electronics industry because of several advantages in terms of productivity and cost. In the R2R printed electronics system, the characteristics of the printed patterns are an important issue that determines the functional quality of the printed matter. This study analyzed how several main factors may affect the characteristics of printed patterns, especially the thickness and surface roughness. The statistical model for estimation of the printed pattern was developed as a function of the main factors using the design of experiment (DOE) methodology. Based on the statistical analysis results, the R2R printed electronics system can be designed to control the characteristics of printed patterns.

### 1. 서 론

인쇄전자소자(Printed electronics) 산업은 높은 생산성을 바탕으로 급속도로 성장하고 있는 분야이다. 인쇄전자소자 산업의 핵심이라 할 수 있는 전자 프린팅 기술 중 롤투롤 인쇄전자 시스템(Roll to Roll printed electronics system)의 프린팅 기술은 기존의 전자소자 개발 공정에 비하여 공정수 절감

으로 인한 시설투자가 대폭 절감되어 우수한 원가 경쟁력을 갖는다는 장점<sup>(1,2)</sup>과 함께 고속·대량 생산이 가능함으로써 센서(Sensor), 광전지(Photocell), RFID(Radio-Frequency Identification), 컴퓨터 메모리(Computer memory) 등의 산업 분야에서 빠르게 적용되어 지속적인 연구가 진행되고 있다.

이러한 롤투롤 방식의 인쇄전자 공정에서 전자소자를 대량으로 생산하기 위해서는 기존의 신문, 잡지 등의 인쇄와 달리 전자적인 기능을 하는 인쇄물을 프린팅 한다는 점에서 인쇄패턴의 정밀도가 더 좋아져야 하고 균일해야 하며 또한 오차가 발생해서는 안 된다. 즉 인쇄전자 공정에 있어서

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2010.4.22-23, 라마다프라자 제주호텔)발표논문임

† Corresponding Author, goodant@konkuk.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers



Fig. 1 Roll to roll printing system

인쇄패턴의 특성은 인쇄물의 기능적 성질에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 이슈(Issue)라 할 수 있으며, 특히 인쇄패턴의 두께(Thickness) 컨트롤이 중요하고<sup>(3)</sup> 여러 층이 인쇄될 것이므로 인쇄패턴의 표면조도(Surface roughness) 또한 주요 논점의 대상이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 인쇄 패턴의 특성을 결정짓는 주요 인자(Main factor)들이 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 개별적인 영향뿐만 아니라 각 인자들 사이에서 발생하는 상호작용에 의한 영향을 분석 하는데 그 목적으로 두고 있다. 실험계획법(Design Of Experiment, DOE)을 적용하여 인자들이 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 주효과(Main effect)와 교호작용 효과(Interaction effect)에 대한 분석이 이루어졌으며, 그에 대한 통계적 모델이 주요 인자의 함수로서 도출되었다.

## 2. 롤투롤 인쇄전자 시스템

롤투롤 인쇄전자 시스템 공정에서 인쇄패턴의 특성과 시스템 변수들(System parameter)간의 상관관계를 규명하기 위한 기존 연구에서는 주로 각 변수들이 인쇄패턴에 미치는 개별적 영향을 분석하여 주요한 영향을 미치는 변수들을 밝혀내는 것에 연구의 초점이 맞춰져 있었다. 피 인쇄체에 인쇄된 패턴의 특성을 결정함에 있어서 잉크의 점도(Viscosity), 잉크의 고체 함유량(Solid content), 잉크 및 소재의 표면 장력(surface tension) 그리고 회석 용매의 특성 등의 인자들이 중요한 영향을 미치는 것으로 보고 되었으며,<sup>(4,5)</sup> B. He 와 J. Lee 는 실험 결과를 통해 소재 표면 거칠기 특성의 기계적인 변화가 잉크 및 소재의 젖음성(Wettability)에 영향을 미치는 것을 파악하였다.<sup>(6)</sup> 그러나 롤투롤 인



Fig. 2 Direct gravure printing equipment

쇄 전자 시스템 연속 공정에서 인쇄패턴의 특성에 영향을 미치는 변수들은 기계적·화학적·재료적 요소 등 매우 다양할 뿐만 아니라<sup>(7)</sup> 각 변수의 아주 미세한 변화에도 인쇄패턴의 특성은 매우 크게 달라질 수 있으며, 각 변수들 사이에 발생하는 상호작용 또한 간과할 수 없다. 따라서 시스템 변수들과 인쇄패턴의 특성과의 관계를 명확하게 규명하기 위해서는 모든 가능한 영향이 고려된 통합적인 분석이 필요하다.

유연한 소재(Flexible substrate)의 적용성이 우수한 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 인쇄패턴의 두께 및 표면조도는 최종 인쇄물의 성능을 결정하는 주요한 특성이 된다. 이러한 특성에 영향을 미치는 주요 시스템 변수로서 운전 장력(Operating tension)은 유연소재의 연신율(Elongation)을 변화시켜 소재의 표면 거칠기에 영향을 미치며, 결과적으로 잉크전달의 주요 변수인 소재 표면에너지의 변화를 유발시킨다. 또한 시스템의 운전 속도(Operating speed), 전도성 잉크(Conductive ink)의 점도(Viscosity), 셀 깊이(Cell depth) 등은 다양한 인쇄패턴의 두께를 얻게 하는 주요 변수가 된다. 그러나 이러한 인자들이 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 영향성에 대한 연구는 현재까지 보고된 바가 없으며, 잉크전달에 대한 수학적 모델 또한 매우 제한적이다. 이에 본 연구에서는 수학적 접근의 한계점을 극복하고자 실험계획법을 적용하여 인쇄품질(인쇄패턴의 두께 및 표면조도)과 이에 영향을 미치는 주요 인자(장력, 속도, 점도, 셀 형상)들 간의 상관관계를 통계적으로 규명하고자 한다. Fig. 1 은 본 연구의 실험에 사용된 롤투롤 인쇄전자 시스템 장비를 나타낸 것으로 언와인딩(Unwinding), 인피딩(Infeeding), 예열(Preheating), 프린팅(Printing), 건조(Drying), 아웃피딩(Outfeeding), 리와인딩(Rewinding) 공정으로 구성되어 있다. 프

린팅 기법으로는 인쇄품질 및 인쇄속도 등을 고려해 Fig. 2 와 같이 범용적으로 적용되고 있는<sup>(8,9)</sup> 다이렉트 그라비아어 프린팅(Direct gravure printing)방식을 사용하였다.

### 3. 실험계획법의 적용

실험계획법은 통계적 해석법을 기반으로 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 인자(Factor)를 선정하고 실험을 통하여 그 효과(Effect)를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그 주요 목적은 유의한 인자(Significant factor)를 선정하여 반응변수(Response variable)의 예측을 위한 통계적 모델을 수립하고 이러한 통계적 모델을 토대로 한 최적조건을 도출하는 것이다. 이와 같은 실험계획법을 롤투를 인쇄전자 시스템 공정에 적용하기 위해 장력·속도·점도·셀 형상 등을 반응변수에 영향을 미치는 주요 인자로 선정하고, 인쇄패턴의 두께와 표면조도를 반응변수로 하는 실험 디자인(Experimental design)을 계획하고 실험을 수행하였다.

#### 3.1 인자수준의 선정

실험계획법에서 효과란 인자를 낮은 수준에서 높은 수준으로 변경했을 때 반응변수의 평균 변화치를 나타내는 것으로 이를 측정하기 위해서는 각 인자의 특정한 조건을 의미하는 인자 수준(Level)을 선정해야 한다. 따라서 롤투를 인쇄전자 시스템의 운전 장력, 운전 속도, 전도성 잉크의 점도, 셀 형상의 적절한 인자 수준을 설정하였다. 여기서 유의해야 할 점은 수준을 변화시키는 인자(Allowed-to-vary factor) 이외에 반응변수에 영향을 주어 고려할 인자의 정확한 효과 측정을 혼동시킬 수 있는 닥터 블레이드 각도(Doctor blade angle), 경화온도(Curing temperature), 압화력(Nip force) 등의 나머지 롤투를 인쇄전자 시스템 변수들은 고정 인자(Held-constant factor)로서 모든 실험에 대해 일정한 수준으로 고정시켜야 한다는 점이다. Table 1 은 실험에 고려된 인자와 그 수준을 나타낸 것이다. 운전 장력의 수준은 인쇄 공정 중 다양하게 존재

**Table 1** Allowed to vary factors and levels of experiment

Factor	Level	Unit
Tension ( $x_1$ )	2.0(-) to 4.5(+)	Kgf
Speed ( $x_2$ )	3.0(-) to 5.0(+)	m/min
Viscosity ( $x_3$ )	100(-) to 150(+)	mPa·s
Cell depth ( $x_4$ )	12(-) to 20(+)	$\mu\text{m}$

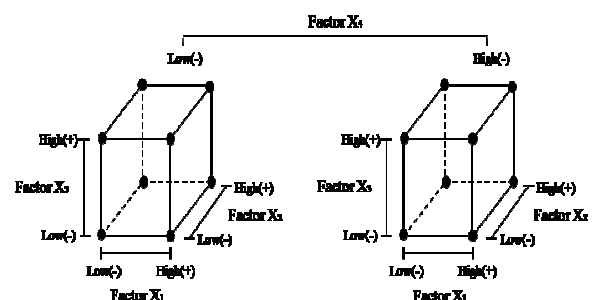
하는 장력 외란(Tension disturbance)에 대해 소재의 항복응력(Yield stress)의 10~30% 범위에서 설정이 가능하므로<sup>(10)</sup> 실험에 사용된 소재(Heat stabilized PET)의 단위 폭당 항복응력(1200 N/m)에 따라 결정 하였으며, 시스템의 운전 속도는 건조 기의 길이(약 5m)와 사용된 전도성 잉크의 건조 시간(60초)을 보장할 수 있는 수준으로 설정하였다. 또한, 전도성 잉크의 점도 수준은 잉크의 고체 함유량을 고려하여 그라비아어 인쇄방식에 유효한 잉크의 점도로 설정하였으며, 셀 형상은 요구되는 최종 두께를 고려하여 그 수준을 설정하였다.

#### 3.2 완전요인 배치법 및 실험디자인

실험계획법 중에서 요인 배치법(Factorial design)은 실험변수들을 인자와 수준으로 나누어 이들의 모든 가능한 조합에 대하여 실험을 수행하고 그

**Table 2** Standard order for the  $2^4$  full factorial design

Order	Factor				Label
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
1	-	-	-	-	(1)
2	+	-	-	-	$x'_1$
3	-	+	-	-	$x'_2$
4	+	+	-	-	$x'_1x'_2$
5	-	-	+	-	$x'_3$
6	+	-	+	-	$x'_1x'_3$
7	-	+	+	-	$x'_2x'_3$
8	+	+	+	-	$x'_1x'_2x'_3$
9	-	-	-	+	$x'_4$
10	+	-	-	+	$x'_1x'_4$
11	-	+	-	+	$x'_2x'_4$
12	+	+	-	+	$x'_1x'_2x'_4$
13	-	-	+	+	$x'_3x'_4$
14	+	-	+	+	$x'_1x'_3x'_4$
15	-	+	+	+	$x'_2x'_3x'_4$
16	+	+	+	+	$x'_1x'_2x'_3x'_4$



**Fig. 3** Geometric view for  $2^4$  full factorial design

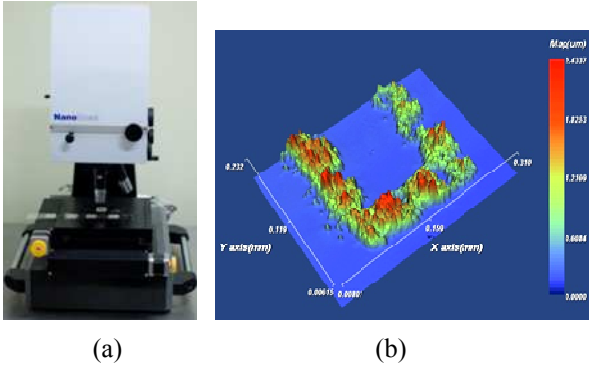


Fig. 4 Measuring equipment (a) interferometer (b) image of Roll to Roll printed pattern

결과를 분산분석(Analysis of variance, ANOVA) 기법에 의하여 분석하는 방법으로 2 수준 요인 배치법이 가장 일반적이다. 요인 배치법 중에서 특히 완전 요인 배치법(Full factorial design)은 각 인자의 주효과(Main effect) 및 두 개 이상의 인자가 서로 결합되어 나타나는 교호작용 효과(Interaction effect)의 결과를 누락 없이 분석할 수 있고, 각 인자들의 특성을 파악하거나 최적수준 조합을 구하는데 적합한 특징을 가지고 있어 본 연구에서 적용하였다. Fig. 3은 인자가 네 개이고 각 인자마다 두 개의 수준을 가지는  $2^4$  완전 요인 배치법에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 각 인자는 낮은 수준(Low level)과 높은 수준(High level)을 가지며, 각 육면체(Hyper cube)의 구석점(Cube point)은 인자들의 수준이 조합된 점으로 이 점에서 실제 실험이 실시된다. 이 경우 실험은 총 16 번 실시되며, Table 2에 보인바와 같이 직교성(Orthogonality)을 만족하는 Yates' algorithm에 의한 인자간의 수준 조합으로 실험의 처리(Treatment) 조건이 구성된다. 또한 각 인자의 수준은 서로 다른 단위를 가지므로 계산을 단순화하고 결과의 효과적인 분석을 위해 낮은 수준(-1)과 높은 수준(+1)을 코드화된 단위(coded unit)로 나타내었다.

### 3.3 실험의 수행 및 결과의 측정

실험은 Table 2에 나타낸 각 인자 수준의 모든 가능한 조합에 대해 총 8 번을 반복(Replication)하였으며, 실험순서는 랜덤화(Randomization)하였다. 실험계획법에서 실험순서의 랜덤화가 중요한 이유는 실험과정에 잠복해 있는(Lurking) 장애인자(Nuisance factor)들의 효과를 최소화할 수 있기 때문이며, 이를 통해 고려하고자 하는 인자 이외에 잘 알려지지 않은 기타 원인들의 효과가 결과에 포함되는 것을 방지할 수 있다. 또한 반복실험을 통해 실험의 오차를 추정할 수 있을 뿐만 아니라

실험결과의 신뢰성을 높일 수 있다. 반응 변수인 인쇄패턴 두께와 표면조도의 측정은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 인터페로미터(Interferometer) 장비를 통해 이루어졌으며, 측정에 따른 오차를 최소화하기 위해 5 번의 반복 측정을 한 후 그 값을 평균하였다.

## 4. 결과 분석 및 고찰

### 4.1 주효과 및 교호작용 효과

측정된 반응변수 값을 이용하여 주효과와 교호작용 효과를 산출할 수 있다. 일반적으로 2 수준 완전요인 배치법에서 각 효과는 인자가 4 개 이상일 경우 실험 디자인의 직교성과 대조(Contrast)의 정의를 이용한 식 (1)과 Table 2에 나타낸 기호  $((1), x'_1, x'_2, \dots, x'_1 x'_2 x'_3 x'_4)$ 를 통해 계산된다. Table 2의 기호는 각 처리 조합에서 모든 반복실험에 대한 반응변수의 합산 값을 의미하고, 식 (1)에서  $n$ 은 실험의 반복횟수를 뜻한다.

$$\begin{aligned}
 Contrast_{x_1 x_2 \dots x_k} &= (x'_1 \pm 1)(x'_2 \pm 1) \dots (x'_k \pm 1), \\
 Contrast_{x_1} &= (x'_1 - 1)(x'_2 + 1)(x'_3 + 1)(x'_4 + 1) \\
 Contrast_{x_2} &= (x'_1 + 1)(x'_2 - 1)(x'_3 + 1)(x'_4 + 1) \\
 &\vdots \\
 Contrast_{x_1 x_2 x_3 x_4} &= (x'_1 - 1)(x'_2 - 1)(x'_3 - 1)(x'_4 - 1), \\
 (x_1 x_2 \dots x_k)_{effect} &= \frac{2}{n 2^k} (Contrast_{x_1 x_2 \dots x_k})
 \end{aligned} \tag{1}$$

Table 3과 4에 두 반응 변수에 대한 주효과와 교호작용 효과의 계산 결과를 나타내었다. 각 수치는 코드화된 단위로 나타내어 그 수치가 클수록 반응변수에 큰 효과를 보인다 할 수 있다. 따라서 인쇄패턴의 두께에는 잉크의 점도가 가장 큰 영향을 미치며, 표면조도에는 셀 형상이 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 5와 6은 두 반응변수에 대한 주효과도를 나타낸 것으로 운전 장력이 두께에 미치는 효과는 미비하나 운전 속도와 잉크의 점도는 두께와 음의 상관관계를 보이며 셀 형상은 양의 상관관계를 보임을 알 수 있다. 또한 운전 장력과 셀 형상은 표면조도와 음의 상관관계를 가지나 운전 속도와 잉크의 점도는 그 영향이 미비함을 알 수 있다.

### 4.2 분산분석

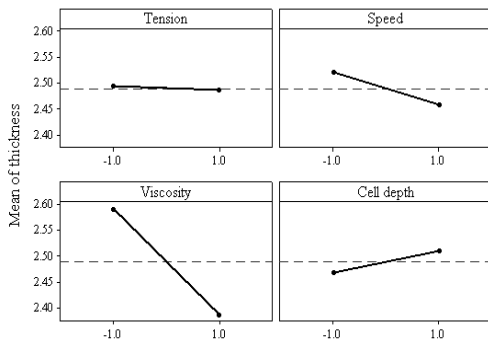
계산된 주효과와 교호작용 효과가 실제로 반응변수에 유의한 영향을 미치는가는 분산분석을 통해 파악할 수 있다. 분산분석의 절차는 먼저 식 (2)를 통해 반응변수의 산포를 변동(Variability) 또

**Table 3** Factor effects for thickness (coded unit)

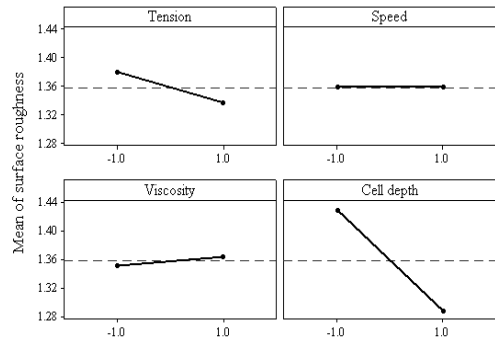
Item	Result
Main effect	$x_1 = -0.0075, x_2 = -0.0625, x_3 = -0.2028, x_4 = 0.0416$
2-way Interaction effect	$x_1x_2 = 0.0800, x_1x_3 = -0.0078, x_1x_4 = 0.0109, x_2x_3 = -0.0541, x_2x_4 = 0.0072, x_3x_4 = 0.0269$
3-way Interaction effect	$x_1x_2x_3 = -0.0059, x_1x_2x_4 = -0.0266, x_1x_3x_4 = -0.0406, x_2x_3x_4 = 0.0069$
4-way Interaction effect	$x_1x_2x_3x_4 = 0.0050$

**Table 4** Factor effects for surface roughness (coded unit)

Item	Result
Main effect	$x_1 = -0.04231, x_2 = -0.00012, x_3 = 0.01294, x_4 = -0.14075$
2-way Interaction effect	$x_1x_2 = 0.04925, x_1x_3 = 0.01356, x_1x_4 = 0.05300, x_2x_3 = -0.02050, x_2x_4 = -0.01169, x_3x_4 = 0.03263$
3-way Interaction effect	$x_1x_2x_3 = 0.00450, x_1x_2x_4 = -0.01356, x_1x_3x_4 = -0.02425, x_2x_3x_4 = 0.01856$
4-way Interaction effect	$x_1x_2x_3x_4 = 0.00231$



**Fig. 5** Main effect plots of thickness



**Fig. 6** Main effect plots of surface roughness

는 제곱합(Sum of squares, SS)으로 나타내고 이것을 식 (3)과 같이 각 요인의 제곱합으로 분해시킨다. 분해된 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 제곱평균(Mean of squares, MS)이 되며, 식 (4)에 의해 각각의  $F_0$  값이 구해지게 된다. 최종적으로 각 요소의  $F_0$  값을 주어진 유의수준에 대한 F 분포로부터 얻을 수 있는 F 값과 비교함으로써 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 파악할 수 있게 된다. 식 (2)에서  $i, j, l$ 은 각 인자의 수준을 의미하고,  $y_{grand total}$ 은 측정된 전체 반응변수의 총 합산 값을 의미한다. 또한 각 요소의 제곱합은 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dots \sum_{l=1}^2 y^2_{ij\dots l} - \frac{(y_{grand total})^2}{n2^k} \quad (2)$$

$$SS_{total} = SS_{x_1} + SS_{x_2} + \dots + SS_{x_1x_2\dots x_k} + SS_{error} \quad (3)$$

$$F_0 = \frac{MS}{MS_{error}} \quad (4)$$

$$SS_{x_1x_2\dots x_k} = \frac{1}{n2^k} (Contrast_{x_1x_2\dots x_k})^2 \quad (5)$$

Table 5 와 6 은 각 반응변수에 대한 분산분석의 결과를 나타낸 것으로  $F_0$  값이 클수록 반응변수에 유의한 효과를 가짐을 나타낸다. 이는 곧 효과가

유의수준( $\alpha=0.05$ ) 범위 안에 있다는 것으로 p 값에 따라 각 반응변수에 유의한 영향을 미치는 효과 ( $p<0.05$ )를 선별할 수 있다. 이 결과는 Fig. 7 과 8 에서 보인 효과의 정규 확률도의 결과와 일치하며, 두께에 대해서는 속도, 점도, 셀 형상의 주효과와 장력·속도, 속도·점도, 장력·점도·셀 형상의 교호작용 효과가 유의하고, 표면조도의 경우엔 장력, 셀 형상의 주효과와 장력·속도, 장력·셀 형상, 점도·셀 형상, 장력·점도·셀 형상의 교호작용 효과가 유의함을 알 수 있다. 각 경우에 대해서 유의한 교호작용 효과가 존재한다는 사실에 주목할 필요가 있는데, 이는 주효과가 유의하지 않은 인자라 할지라도 다른 인자의 수준의 변화에 따라 반응변수에 미치는 효과의 크기가 달라질 수 있다는 것을 말한다. 이것은 Fig. 9 와 10 에서 확인할 수 있다.

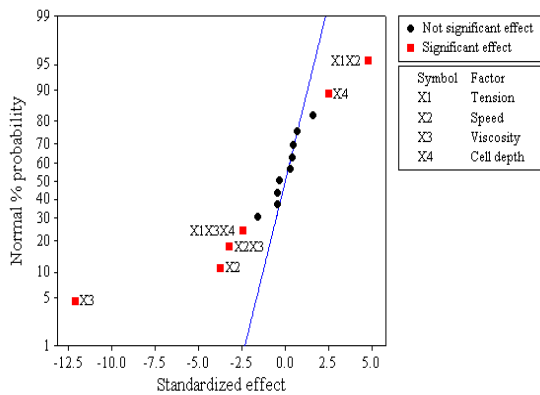
Fig. 9 는 두께에 가장 큰 주효과를 나타내는 점도와 속도에 대한 등고선도를 나타낸 것으로 (a)에서 속도와 점도의 변화에 따른 인쇄패턴의 두께가 민감하게 변화하는 것과는 달리 (b)의 경우엔 여전히 점도는 두께에 큰 영향을 주지만 속도는 수준의 변화에 따라 그 영향이 작음을 알 수 있다. 이는 속도가 장력과의 교호작용으로 인해 장력의 수준의 변화에 따라 두께에 미치는 실질적인 효과

**Table 5** Analysis of variance table for thickness

Source	SS	DF	MS	F <sub>0</sub>	P <sub>value</sub>
$x_1$	0.00180	1	0.00180	0.2	0.655
$x_2$	0.12500	1	0.12500	13.96	0.000
$x_3$	1.31625	1	1.31625	146.96	0.000
$x_4$	0.05528	1	0.05528	6.17	0.014
$x_1x_2$	0.20480	1	0.20480	22.87	0.000
$x_1x_3$	0.00195	1	0.00195	0.22	0.641
$x_1x_4$	0.00383	1	0.00383	0.43	0.515
$x_2x_3$	0.09353	1	0.09353	10.44	0.002
$x_2x_4$	0.00165	1	0.00165	0.18	0.668
$x_3x_4$	0.02311	1	0.02311	2.58	0.111
$x_1x_2x_3$	0.00113	1	0.00113	0.13	0.723
$x_1x_2x_4$	0.02258	1	0.02258	2.52	0.115
$x_1x_3x_4$	0.05281	1	0.05281	5.90	0.017
$x_2x_3x_4$	0.00151	1	0.00151	0.17	0.682
$x_1x_2x_3x_4$	0.00080	1	0.00080	0.09	0.766
Error	1.00315	112	0.00896	.	.
Total	2.90918	127	.	.	.

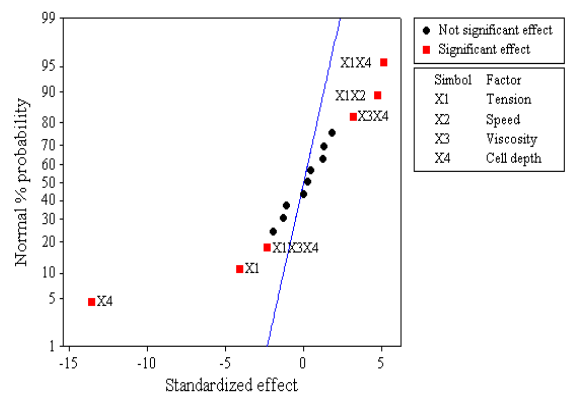
**Table 6** Analysis of variance table for surface roughness

Source	SS	DF	MS	F <sub>0</sub>	P <sub>value</sub>
$x_1$	0.057291	1	0.057291	16.54	0.000
$x_2$	0.000000	1	0.000000	0.00	0.990
$x_3$	0.005356	1	0.005356	1.55	0.216
$x_4$	0.633938	1	0.633938	182.99	0.000
$x_1x_2$	0.077618	1	0.077618	22.40	0.000
$x_1x_3$	0.005886	1	0.005886	1.70	0.195
$x_1x_4$	0.089888	1	0.089888	25.95	0.000
$x_2x_3$	0.013448	1	0.013448	3.88	0.051
$x_2x_4$	0.004371	1	0.004371	1.26	0.264
$x_3x_4$	0.034060	1	0.034060	9.38	0.002
$x_1x_2x_3$	0.000648	1	0.000648	0.19	0.666
$x_1x_2x_4$	0.005886	1	0.005886	1.70	0.195
$x_1x_3x_4$	0.018818	1	0.018818	5.43	0.022
$x_2x_3x_4$	0.011026	1	0.011026	3.18	0.077
$x_1x_2x_3x_4$	0.000171	1	0.000171	0.05	0.825
Error	0.388011	112	0.003464	.	.
Total	1.346416	127	.	.	.



**Fig. 7** Normal probability plot of the effects for thickness

가 달라지기 때문이다. 마찬가지로 Fig 10 에서는 장력과 속도의 교호작용으로 인해 속도의 수준이 달라짐에 따라 장력이 표면조도에 미치는 실질적 효과가 달라지게 됨을 알 수 있다. 또한 분산분석의 결과를 통해 두 반응변수에 대해서 장력·점도·셀 형상의 3 차 교호작용 효과가 공통적으로 유의함을 알 수 있다. 이는 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 인쇄패턴의 두께와 표면조도가 결정되는데 있어서 한 인자의 수준의 변화가 다른 두 개의 인자의 효과에 영향을 미친다는 의미로 해석할 수 있다. 특히 운전 장력의 경우에 다른 인자들과의 상호작용효과가 눈에 띄게 나타난다. 실제로 롤투롤 인쇄전자 시스템 연속공정에 있어서 소재의 단면에 따른 장력의 차이(Tension variation)를 안정적으



**Fig. 8** Normal probability plot of the effects for surface roughness

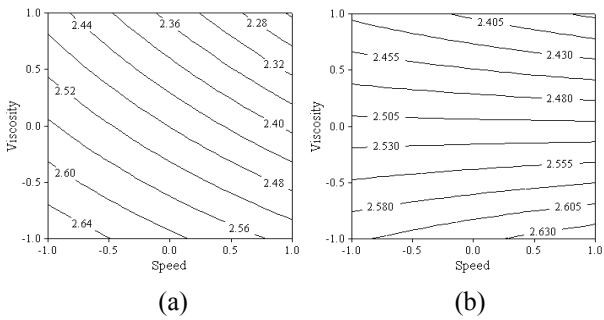
로 컨트롤 하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다는 점은 이 사실을 잘 뒷받침 해주고 있다.

### 4.3 수학적 모형

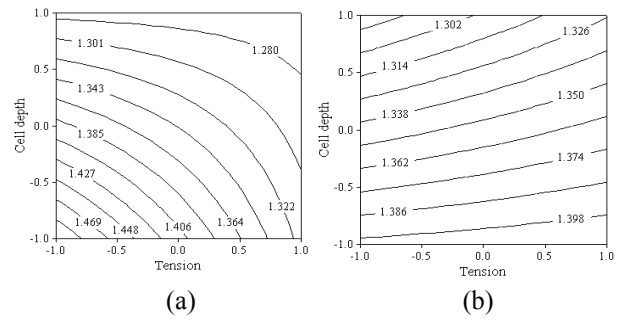
요인 배치법은 기본적으로 식 (6)과 같이 반응 변수가 각 인자의 수준의 범위 내에서 선형적으로 변화한다는 것을 가정하고 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_{12\dots k}x_1x_2 \dots x_k + \varepsilon \quad (6)$$

$$\beta_0 = \frac{y_{\text{grand total}}}{n2^k}, \quad \beta_1 = \frac{(x_1)_{\text{effect}}}{2}, \beta_2 = \frac{(x_2)_{\text{effect}}}{2}, \dots, \beta_{12\dots k} = \frac{(x_{1\dots k})_{\text{effect}}}{2} \quad (7)$$



**Fig. 9** Contour plots of thickness according to speed versus viscosity (a) hold value : low level of tension and cell depth, (b) hold value : high level of tension and cell depth



**Fig. 10** Contour plots of surface roughness according to tension versus cell depth (a) hold value : low level of speed and viscosity, (b) hold value : high level of speed and viscosity

식 (6)에서 각 요소 앞의 계수는 일반적으로 최소자승법(Least squares)을 이용하여 구하지만 2 수준 완전 요인 배치법은 그 실험 디자인의 특성상 각 반응변수의 측정값과 각 요소의 효과값을 식 (7)에 대입해서 쉽게 구할 수 있다. 하지만 여기서 유의해야 할 점은 분산분석을 통해 선별된 유의한 효과만 모델에 포함시켜야 한다는 점이다. 또한 인자의 주효과가 유의하지 않더라도 다른 인자와 상호작용 효과가 있을 때는 주효과를 포함시켜야 한다. 결과는 두께와 표면조도에 대해서 각각 식 (8)과 (9)에 나타내었다.

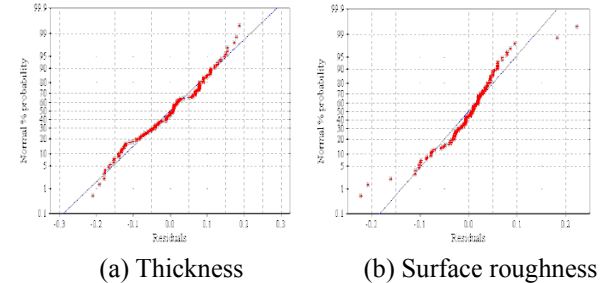
$$y_{th} = 2.4897 - 0.0037x_1 - 0.0313x_2 - 0.1014x_3 + 0.0208x_4 + 0.04x_1x_2 - 0.027x_2x_3 - 0.0203x_1x_3x_4 \quad (8)$$

$$y_{sr} = 1.35822 - 0.02116x_1 - 0.00006x_2 + 0.00647x_3 - 0.07037x_4 + 0.02462x_1x_2 + 0.0265x_1x_4 + 0.01631x_3x_4 - 0.01213x_1x_3x_4 \quad (9)$$

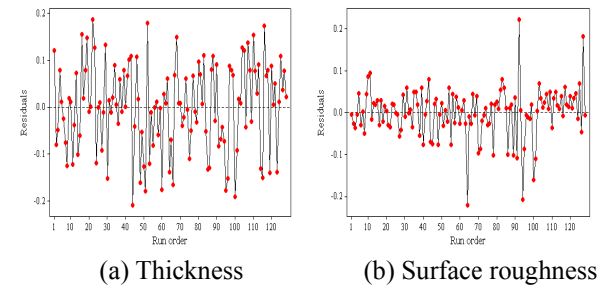
도출된 각 반응 변수에 대한 수학적 모형은 비록 선형을 가정하고 있지만 인자 수준 범위의 적절한 조절을 통해 최종 반응변수가 선형반응을 보이는 구간에서는 충분히 근사화된 모델이라 할 수 있을 것이다.

#### 4.4 모델의 적합성 검증

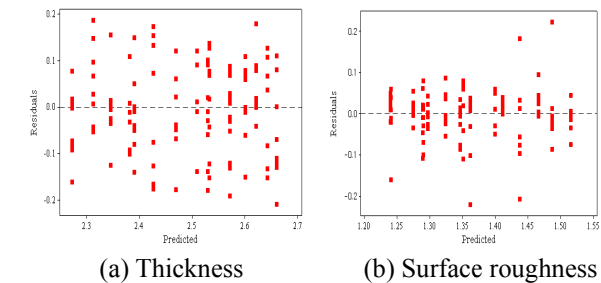
일반적으로 분산분석을 통한 유의한 효과의 선별에 과정에서 측정된 반응변수의 데이터가 모델에 적합한가는 잔차분석(Residual analysis)을 통해 이루어지는데, Fig. 11 과 12 그리고 13 에 나타난 것처럼 잔차의 정규확률도, 잔차 대 순서, 잔차 대 적합치의 그래프를 이용하여 각각 정규성, 독립성, 등분산의 가정을 만족하는지 확인 할 수 있다. Fig. 11 에서 각 반응변수의 잔차가 정규분포를 크게 벗어나고 있지 않음을 확인할 수 있으며, Fig. 12 에서는 실험 순서에 따라 각 잔차가 특정



**Fig. 11** Normal probability plot of residuals



**Fig. 12** Plot of residuals versus run order



**Fig. 13** Plot of residuals versus fitted values

한 패턴을 보이고 있지 않으므로 독립성을 만족함을 알 수 있다. 또한 Fig 13 에서 잔차가 전체적으로 상·하 대칭인 형태를 띠는 것으로 보아 등분산을 만족함을 알 수 있다. 따라서 반응변수의 측정 데이터는 분석 모델에 적합하다는 결론을 얻을 수

있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 롤투롤 인쇄전자 공정에서 운전 장력, 운전 속도, 전도성 잉크의 점도, 셀 형상 등의 인자들이 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 영향을 실험계획법을 적용하여 분석하였다.

실험을 통해 측정된 자료를 바탕으로 각 인자가 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 주효과와 교호작용 효과를 정량적으로 제시하였고, 분산분석을 통해 각 주효과와 교호작용 효과 중 우연에 의한 원인에 비해 실제로 특정한 원인에 의해 발생할 확률이 큰 유의한 효과를 선별하였다. 이를 통해 롤투롤 인쇄전자 시스템에서 운전 장력, 운전 속도, 전도성 잉크의 점도, 셀 형상의 네 인자가 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 개별적 영향을 파악했을 뿐만 아니라, 인자간의 교호작용에 의한 효과가 유의함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 측정된 반응변수의 잔차분석을 통해 그 타당성을 입증하였다. 또한 선별된 유의한 인자들의 조합으로 이루어진 수학적 모형을 제시하였다.

## 후 기

이 논문은 건국대학교 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Chin, B. D. and Shin, K. H., 2007, "Device Technology of Flexible Organic Devices and Continuous Printing Process," *Polymer Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 246~252.
- (2) You, I. K., Koo, J. B. and Lee, Y. k., 2007, "Printed RFID Technology," *ETRI, Analysis of Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 22, No. 5, pp. 1~11.
- (3) Pudas, M., Hagberg, J. and Leppavuori, S., 2004, "Printing Parameters and Ink Components Affecting Ultra-Fine-Line Gravure Offset Printing for Electronic Applications," *J. European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2943~2950.
- (4) Benkreira, H. and Patel, R., 1993, "Direct Gravure Roll Coating Operations," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 48, pp. 2329~2335.
- (5) Kolouoma, T., Tuomikoski, M., Makela, T., Heimann, J., Haring, J., Kallioiene, J., Harberg, J., Kettunen, I., and Kopola, H., 2004, "Towards Roll to Roll Fabrication of Electronics, Optics and Optoelectronics for Smart and Intelligent Packaging," *Proceedings of SPIE, Emerging Optoelectronic Applications*, pp. 77~85.
- (6) He, B. and Lee, J., 2003, "Dynamic Wettability Switching by Surface Roughness Effect," *Proceeding of IET Conference*, pp. 120~123.
- (7) Onda, T., Shibuichi, S., Satoh N. and Tsujii, K., 1996, "Superhydrophobic Fractal Surface," *Langmuir*, Vol. 12, pp. 2125~2127.
- (8) Pudas, M., Hagberg, J. and Leppavuori, S., 2002, "The Absorption Ink Transfer Mechanism of Gravure Offset Printing for Electronic Circuitry," *IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 25, pp. 335~343.
- (9) Pudas, M., Hagberg, J. and Leppavuori, S., 2004, "Printing Parameters and Ink Components Affecting Ultrafine-Line Gravure-Offset Printing for Electronics Applications," *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2943~2950.
- (10) Dubois, G. B., 1993, "Selecting Proper Winding Tension for Various Web Substrate," *Tappi Journal*, Vol. 76, pp. 91~93.
- (11) Douglas, C. M., 2009, *Design and Analysis of Experiments*, No. 7, John Wiley & Sons, Inc., pp. 207~256.