

# 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 인쇄패턴의 예측을 위한 통계적 분석

## Statistical Analysis for an Estimation of Printed Pattern

### in Roll to Roll Printed Electronics System

\*이광우<sup>1</sup>, 김남석<sup>2</sup>, 신기현<sup>3</sup>, 김강원<sup>4</sup>

\*C. W. Lee<sup>1</sup>, N. S. KIM<sup>2</sup>, K. H. Shin<sup>3</sup>, #C. W. Kim(goodant@konkuk.ac.kr)<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 건국대학교 유연디스플레이 연속공정연구센터, <sup>2</sup> 건국대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 건국대학교 기계설계과, <sup>4</sup> 건국대학교 기계설계과

Key words : Roll to Roll(R2R), Design of experiment(DOE), Thickness of printed pattern, Significant effect

### 1. 서론

인쇄전자소자(Printed electronics) 산업은 높은 생산성을 바탕으로 급속도로 성장하고 있는 분야이다. 이러한 인쇄전자소자 산업의 핵심이라 할 수 있는 전자 프린팅 기술 중 롤투롤 전자인쇄 시스템(Roll to roll printed electronics system)의 프린팅 기술은 기존 전자소자 개발 공정에 비하여 공정수 절감으로 인한 시설투자가 대폭 절감되어 우수한 원가 경쟁력을 갖는다는 장점과 함께 고속·대량 생산이 가능함으로써 가장 유망한 전자 프린팅 기술로서 주목을 받으며 지속적인 연구가 진행되고 있다. 이러한 롤투롤 전자인쇄 시스템에서 인쇄 패턴의 특성은 인쇄물의 기능적 성질을 결정하는 중요한 이슈라 할 수 있으며, 그 중 인쇄 패턴의 두께(Thickness of printed pattern)는 주요 논점의 대상이다.

본 연구는 R2R 전자인쇄 시스템에서 인쇄 패턴을 결정짓는 몇 가지의 인자(factor)에 대하여 인쇄 패턴의 두께에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고 이를 통해 인쇄 패턴의 두께를 예측할 수 있는 수량적 모델을 정립하는데 그 목적을 두고 있다.

실험계획법(Design of experiment, DOE)을 적용하여 R2R 전자인쇄 시스템에 있어서 요구되는 인쇄패턴의 두께를 얻기 위한 통계적 모델이 주요 인자의 함수로서 개발되었으며 추가적인 실험 데이터를 통해 그 타당성을 검증하였다.

### 2. R2R 전자인쇄 시스템

R2R 전자인쇄 시스템에 있어서 인쇄 패턴의 두께는 그 수치가 증가하게 되면 인쇄물의 전기적 저항이 감소되는 역비례관계를 가지고 있어 제품의 기능적 성질을 결정짓는 중요한 변수라 할 수 있다. 하지만 이러한 인쇄패턴의 두께에 영향을 미치는 요소들은 기계적·화학적·재료적 요소 등 아주 다양하여 각 요소들이 미치는 효과(effect)를 수량적으로 파악해 요구되는 인쇄 패턴의 두께를 유지하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존의 많은 연구를 통해 잘 알려진 주요 인자들에 대하여 인쇄패턴의 두께에 미치는 효과를 엄밀히 분석하기 위해 실험계획법을 적용하였다. 이에 따른 실험에 있어서는 오목한 홈에 잉크를 채우고 피 인쇄체에 인쇄압을 가하여 인쇄하는 방식으로 높은 효율성의 장점을 가지고 있는 다이렉트 그라비아(Direct gravure) 프린팅 장치를 사용하였다.

### 3. 실험계획법

실험계획법은 통계적 해석법을 기반으로 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하고 실험을 통하여 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그 주요 목적은 유의 인자(Significant Factor)를 선정하여 반응변수(Response variable)의 예측을 위한 통계적 모델을 수립하고 이러한 통계적 모델을 토대로 한 최적조건을 도출하는 것이다.

Table 1 Factors and levels of the experiment

Factor	level	Unit
Tension of substrate( $x_1$ )	2.0(-) to 4.5(+)	Kgf
Speed of R2R printing system( $x_2$ )	3.0(-) to 5.0(+)	m/min
Viscosity of conductive ink( $x_3$ )	100(-) to 150(+)	mPas

실험계획법에서 요인 배치법(Factorial design)은 실험변수들을 인자와 수준으로 나누어 이들의 모든 가능한 조합에 대하여 실험을 수행하고 그 결과를 분산분석(Analysis of variance, ANOVA) 기법에 의하여 분석하는 방법으로 2수준 요인 배치법이 가장 일반적이다. 따라서 인쇄패턴의 두께를 반응변수로 하는 2수준 3인자 요인배치법을 적용 하였으며 Table 1은 실험에 적용된 인자와 그 수준을 나타낸다.

Table 2 Experimental run order for the 2<sup>3</sup> full factorial design

Run	Factor			Run	Factor			Run	Factor			Run	Factor		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-	+	+	17	-	-	+	33	-	+	+	49	-	+	-
2	+	+	-	18	+	-	-	34	+	-	+	50	-	+	-
3	+	+	-	19	-	-	-	35	+	+	-	51	-	-	-
4	+	+	-	20	+	+	+	36	-	-	+	52	+	+	-
5	+	-	-	21	-	+	+	37	+	-	-	53	+	-	+
6	+	+	+	22	-	-	+	38	-	+	-	54	+	-	+
7	-	+	+	23	+	-	-	39	-	-	+	55	-	-	-
8	+	-	-	24	+	-	+	40	-	-	-	56	+	+	-
9	-	-	-	25	+	-	+	41	-	+	+	57	+	+	+
10	-	+	+	26	+	+	-	42	-	-	+	58	-	-	-
11	+	-	+	27	+	-	-	43	+	-	+	59	+	+	+
12	-	-	-	28	-	-	+	44	-	+	+	60	-	+	-
13	-	-	+	29	+	-	+	45	+	+	+	61	+	-	-
14	+	+	+	30	+	+	+	46	-	-	-	62	-	+	-
15	-	+	-	31	-	-	+	47	+	-	-	63	-	+	-
16	-	+	-	32	+	+	+	48	+	+	-	64	-	+	+

요인배치법 중에서 완전요인 배치법(Full factorial design)은 각 인자의 주 효과와 교호작용 효과를 분석 할 수 있고 인자들의 특성을 파악하거나 최적수준 조합을 구하는데 적합한 특징을 가지고 있어 본 연구에서 사용하였으며, 각 인자와 수준의 모든 가능한 조합에 대하여 8번의 반복실험을 수행하였다. Table 2에 실험에 사용된 2<sup>3</sup> 완전요인 배치법의 실험 순서와 이에 따른 각 인자의 수준을 나타내었다.

### 4. 통계적 분석 및 고찰

실험에 따른 인쇄패턴의 두께를 측정하고 통계적 분석 절차에 따라 결과 데이터를 분석 하였다. Table 3은 그 분석 결과를 나타낸다. 인쇄 패턴의 두께에 영향을 미치는 인자의 주 효과와 2차, 3차 교호작용 효과를 수량적으로 확인할 수 있는데 주 효과에서는 점도가 가장 큰 효과를 보이며 2차 교호작용에서는 인장력과 속도의 교호작용 효과가 가장 큰 효과를 보임을 알 수 있다. 또한 각 효과의 통계적 유의성을 검증할 수 있는데 주 효과와 2차 교호작용 효과는 유의하지만 3차 교호작용 효과는 유의하지 않음을 알 수 있다.

궁극적으로 인쇄 패턴의 두께를 예측하기 위해서는 정확한 수학적 모델이 필요하다. 이에 최소 자승법을 이용하여 Table 3에 나타난 바와 같이 통계적 모델을 도출하였으며 이는 임의의 인자수준을 대입하였을 때 인쇄패턴의 두께 값을 구할 수 있는

Table 3 Statistical analysis result for the 2<sup>3</sup> full factorial design

Item	Result
Main effects (coded unit)	$x_1 = -0.0153$
	$x_2 = -0.0928$
	$x_3 = -0.2672$
Interaction effect (coded unit)	$x_1x_2 = 0.1178$
	$x_1x_3 = 0.0584$
	$x_2x_3 = -0.0616$
	$x_1x_2x_3 = -0.0222$
Significant effects	Main effect 2-way interaction
Not significant effects	3-way interaction
Confidence level	95%
Statistical model (natural unit)	$4.28862 - 0.489x_1 - 0.189875x_2 - 0.0080725x_3 + 0.0915x_1x_2 + 0.002355x_1x_3 - 0.0000775x_2x_3 - 0.000355x_1x_2x_3$

1차 다항식의 형태로 나타난다. 하지만 여기서 앞서 언급한 통계적으로 유의하지 않은 효과는 모델에서 제거되어야 한다. 따라서 유의하지 않은 3차 교호작용 효과를 제거하여 모델을 축소하였다. 최종적인 인쇄 패턴의 두께에 대한 통계적 모델은 상수항과 주 효과 그리고 각 인자의 조합으로 이루어진 2차 교호작용 효과의 함수로서 나타나며 다음과 같다.

$$\text{Thickness} = 3.71175 - 0.3115x_1 - 0.0456562x_2 - 0.0034575x_3 + 0.047125x_1x_2 + 0.000935x_1x_3 - 0.00123125x_2x_3$$

이러한 통계적 모델의 검증을 위해 추가적인 실험을 실시하였다. 이때 속도와 점도는 일정한 값으로 고정시키고 인장력에 따른 인쇄패턴의 두께를 측정하였으며 이를 통계적 모델에 의해 계산되어진 값과 비교하였다. Fig 1과 2는 그 결과를 나타내며 Fig 3은 그에 따른 상대오차를 나타낸다. Fig 3에서 나타나듯이 인쇄 패턴의 두께에 대한 통계적 모델과 실제 실험 데이터의 상대 오차는 0% ~ 0.2%의 분포를 보이고 있다. 이는 실험 시 장애인자(nuisance factor)의 효과가 발생 할 수 있다는 점을 고려한다면 도출된 통계적 모델이 적합하다는 것을 보여주고 있는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 R2R 전자인쇄 시스템에서 제품의 기능적 특징에 영향을 미치는 인쇄 패턴의 두께를 예측하기 위하여 실험계획법을 적용해 인자의 수준에 따라 인쇄 패턴의 두께를 수량적으로 계산할 수 있는 통계적 모델을 도출 하였다. 또한 추가적인 실험을 통해 실험데이터와 통계적 모델과의 상대 오차가 0% ~ 2%의 분포를 보임을 확인함으로써 고안된 통계적 모델의 정확성과 효용성을 입증하였다. 따라서 본 연구에서 고안된 통계적 모델을 이용해 고려된 세 가지 인자를 적절히 조절한다면 R2R 전자인쇄 시스템에서 요구되는 인쇄 패턴의 두께를 얻을 수 있을 것이다.

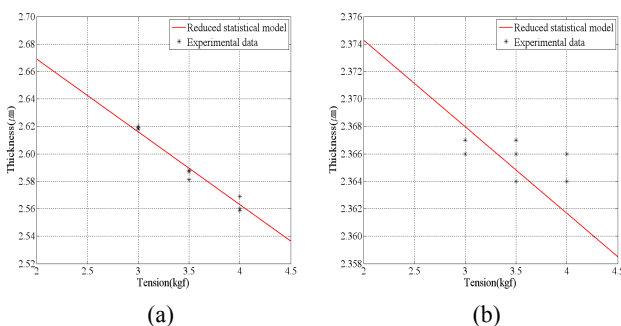


Fig. 1 Comparison between Reduced statistical model and experimental data (specific value : speed = 3.5 m/min, (a) viscosity = 100 mPa·s, (b) viscosity = 150 mPa·s)

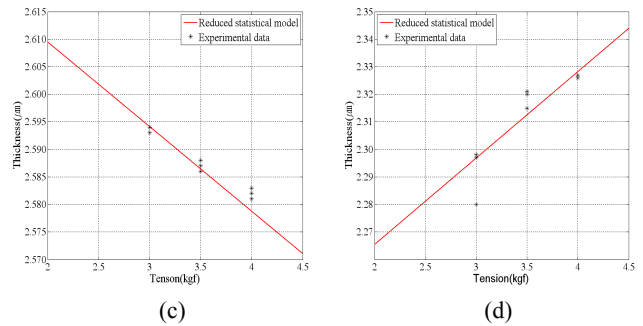


Fig. 2 Comparison between reduced statistical model and experimental data (specific value : speed = 4.3 m/min, (c) viscosity = 100 mPa·s, (d) viscosity = 150 mPa·s)

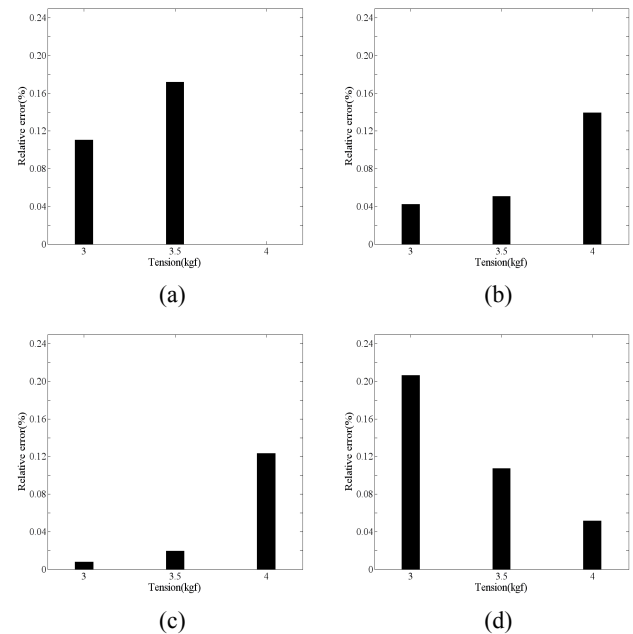


Fig. 3 Relative error of reduced statistical model and experimental data : The factor level equal to those used for Fig 1 and Fig 2, respectively(The average value of experimental data)

#### 후기

본 논문은 2009년도 “서울시 산학연 협력사업(10848)” 및 2009년도 “정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제 과학기술 협력재단(No. K20701040597-09A0404-05110)”의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고문헌

1. M. Pudas, J. Hagberg and S. Leppavuori, "Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications," Journal of European Ceramic Society, 24, 335-343, 2004
2. G. Vicente, A. Coteron, M. Martinez, and J. Aracil, "Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production," Industrial Crops and Products, 8, 29-35, 1998.
3. Douglas C. Montgomery, "Design and analysis of experiments," John Wiley & Sons, 7, 162-226, 2009
4. 이승표, 하성규, "실험계획법을 이용한 3차원 좌표 측정기의 성능 평가," 한국공작기계학회 논문집, 17, 133-139, 2008.