



Technology for Roll-to-Roll e-Printing

Matching Technology for Roll-to-Roll e-Printing

신기현 / 건국대학교 기계공학부 교수

1. Matching in R2R(Roll-to-roll) e-printing systems

전자소자, 박막 태양전지, 터치스크린, 플렉스블디스플레이 등의 R2R 인쇄방식을 통한 생산방식은 기존의 에칭, 증착 공정을 이용한 전자소자 생산방식에 비해 선택적 인쇄에 의한 재료 절감, 연속공정을 통한 대량생산성, 제조된 소자의 유연성 측면에서 이점을 가진다. 예를 들면, 연속공정 인쇄방식으로 그라비아(gravure) 프린팅 공정은 이송중인 유연 기판(substrate)의 장력제어(tension control), 중첩인쇄 제어(register control), 인쇄 실린더의 품질·평탄도, 셀 스타일러스, 셀 깊이, 망점크기 및 형상, 접압력, 닥터링 등·잉크 조성 및 전이과정·잉크 점도, 표면장력, 점착력, 입자 크기, 질량백분율(weight percent), 소재 표면 에너지 및 거칠기·등의 요소에 의해 인쇄품질이 좌우되며 인쇄품질은 완성된 소자의 기능에 영향을 미친다. 매칭 기술은 위와 같은 다양한 인쇄공정 요소 및 시스템간의 주요 인쇄공정 상호원리(inter-mechanics)를 이해하여 연속인쇄를 통

한 전자소자의 제작 및 R2R 프린팅 시스템을 디자인하는 기술이라 할 수 있다. 본 기사에서는 크게 인쇄 공정상호원리 및 인쇄 중첩도와 관련한 매칭기술을 소개한다.

2. Developing the matching technology using inter-mechanics in R2R printing

잉크의 전이와 소재의 표면에너지, 소재의 장력 등과 같은 프린팅 공정의 상호원리를 이해함으로써 국부적인 매칭 기술을 개발 할 수 있다. 본 절에서는 그 한 예로 매칭 기술을 개발하는 하나의 과정을 소개하려 한다. 예를 들면, 인쇄된 패턴의 표면거칠기는 TFT등의 전자소자의 성능에 영향을 미친다. 또한 전극의 저항은 다음 수식과 같이 프린팅된 패턴의 단면적에 의해 결정된다.

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\rho: \text{비저항}, R: \text{저항}, A: \text{단면적}, l: \text{길이})$$

인쇄되지 않은 유연기판의 표면 거칠기는 잉크 전이에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이며

기존 연구에서 기판의 접촉각이 잉크 전이에 영향을 미친다는 보고가 있었다. 유연 기판의 경우 [그림 1]과 같이 표면 거칠기가 장력과 관계가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 기판이 연속적으로 이동되는 R2R 프린팅 공정에서 기판의 동적 표면거칠기를 고려해야 한다.

실험을 통하여 인쇄되지 않은 기판 표면의 표면에너지, 다양한 표면 거칠기를 접촉각 측정, Young-Dupre 방정식을 이용하여 구하였다. 그 결과 시약방울의 접촉각이 고 장력에서 더 작아지는 것을 확인하였으며 기판의 표면에너지가 증가한다고 결론지을 수 있다. 그리고 [그림 2](a)에서 보듯, 인쇄 전 기판의 표면 거칠기는 장력 요동이 있을 경우 눈에 띄게 증가한다. 따라서 인쇄 전 기판의 표면상태는 [그림 2](b)에서와 같이 잉크 전이량에 영향을 준다.

연속공정에서 운전장력은 유연기판 항복응력의 10~50%로 정해야 하는데 기판의 표면 거칠기는 이 범위내의 장력의 영향을 받는다고 할 수 있다. 결론적으로 이러한 과정을 통하여, 소재의

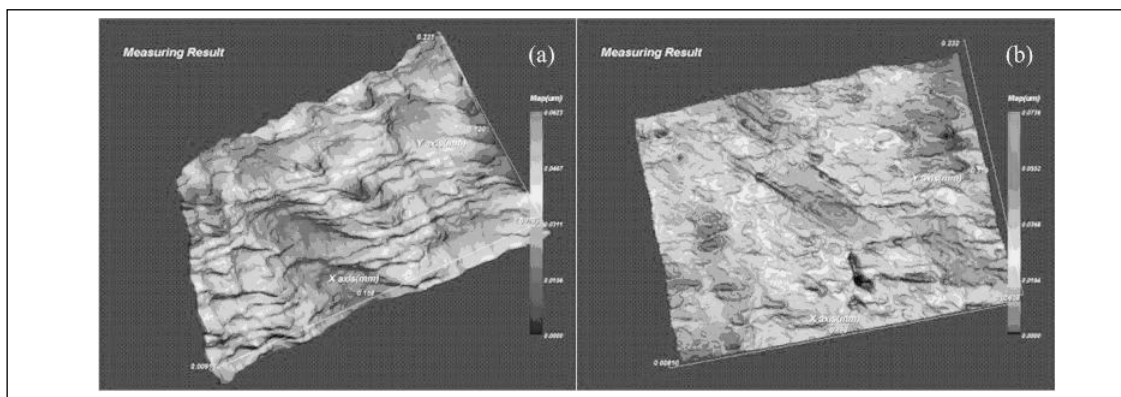
장력과 표면거칠기, 인쇄된 패턴의 형상간의 매칭로직을 찾을 수 있다고 하겠다.

3. Developing the matching technology using DOE

잉크, 기판, 시스템의 관계를 명확히 밝히기 위해 실험계획법 (design of experiment, DOE) 을 이용하여 매칭 로직을 개발할 수도 있다. 예를 들어 인쇄속도를 4m/min으로 설정했을 때 인쇄두께 분포를 [그림 3](a)에 도시하였으며 이는 R2R 그라비아 방식으로 인쇄된 패턴의 두께가 운전장력이 2kgf에서 4.5kgf로 증가했을 때 10% 이상 감소하는 것을 나타낸다. 그리고 고속인쇄(4.3m/min 이상)에서는 운전장력의 영향이 상대적으로 작았다. 그러나 Fig. 3(b)에 도시하였듯 인쇄 패턴의 두께는 고점도 (150mPa·s), 고속(4.3m/min 이상)조건에서 민감하다.

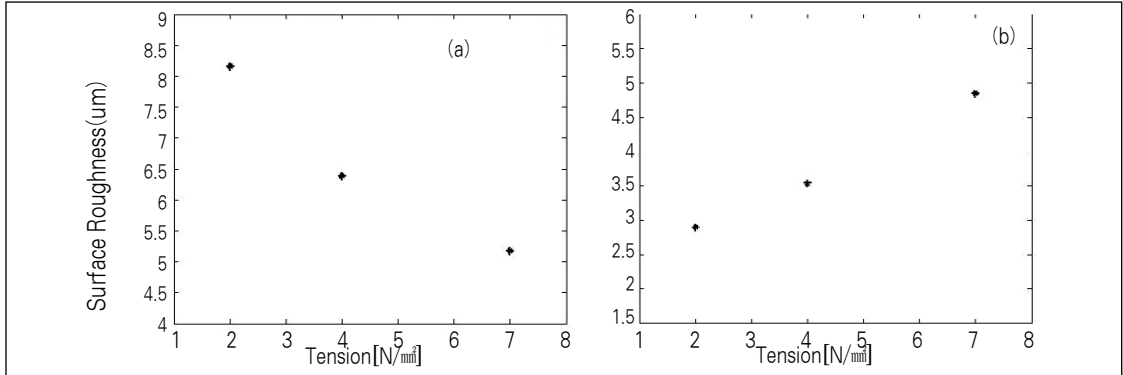
실험결과로부터 full factorial method를 이용

[그림 1] Surface roughness images of a heat-stabilized film by interferometer (scan area: 234 um x 232 um): (a) tensile stress of 2 N/mm², (b) tensile force of 7 N/mm².





[그림 2] Heat-stabilized bare substrate with respect to tension: (a) surface roughness, and (b) surface energy.



하여 간단한 메타모델을 도출하였다. 수식에서 “Th”는 두께를, x_1 은 장력, x_2 는 운전속도, x_3 는 잉크의 점도를 의미한다. 수식으로부터 운전장력 x_1 의 영향을 받는 항이 인쇄두께에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} Th = & 4.28862 - 0.489x_1 - 0.189875x_2 \\ & - 0.0080725x_3 + 0.0915x_1x_2 + 0.02355x_1x_3 \\ & - 0.0000775x_2x_3 - 0.000355x_1x_2x_3 \end{aligned}$$

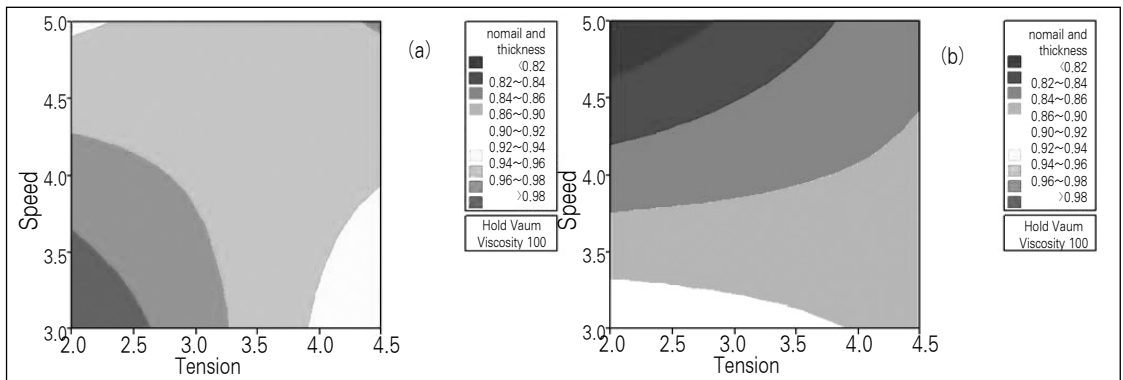
이러한 연구결과에 기초하여 건국대학교에 보유 중인 R2R 실험장비를 통해 [그림 4]의 RLC

회로를 인쇄하고 매칭로직을 실험적으로 검증하였다. 실험을 통하여 공정 일부에 대한 매칭 로직을 검증하여 적용하였으나 R2R 인쇄전자에 적용하기 위해 더 심도 있는 연구가 진행되어야 한다.

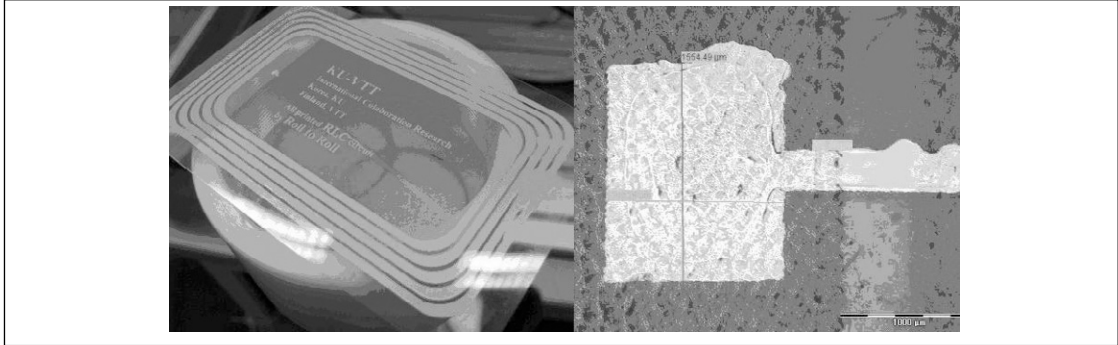
4. Cross directional register modeling and control

전자소자는 R2R시스템에서, 여러 번의 중첩

[그림 3] Contour plot of normalized thickness via tension and speed: (a) viscosity of 100 mPa·s, and (b) viscosity of 150 mPa·s.



[그림 4] All printed RLC resonator printed by FDRC Konkuk University

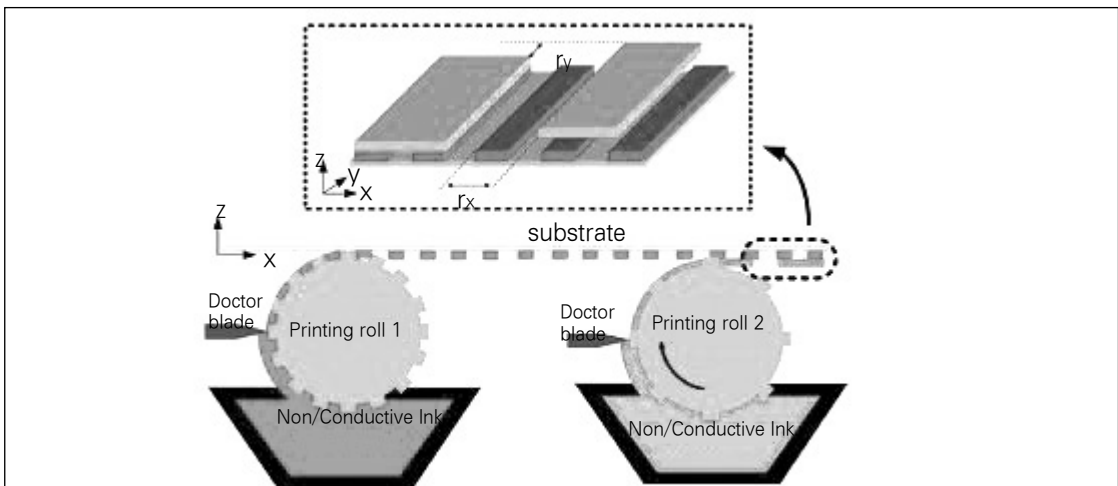


인쇄를 통하여 제작될 수도 있다. R2R 인쇄장비에서 기판 이송방향을 MD(machine direction)라 칭하며 기판의 폭방향을 CMD(cross machine direction), 또는 줄여서 CD로 칭한다. 고 성능 전자소자 제작을 위해서는 인쇄된 패턴의 MD및 CMD방향 양측의 정밀한 중첩위치제어가 필요하다. [그림 5]에서와 같이 길이방향을 레지스터 에러 Rx는 변형율, 즉 장력의 함수라는 것이 이미 알려져 있으며,

복수 이상의 인쇄 공정을 거칠 때 중첩 오차가 발생한다. 따라서 중첩 오차를 측정후 인쇄구간의 장력(롤의 상)을 미세하게 제어하여 이송 방향의 중첩 정밀도를 향상시킬 수 있다. 그러나 다수의 프린팅 공정을 지나면서 프린팅 롤의 상 변화 뿐 아니라 기판의 사행 오차도 누적되므로 정밀 인쇄를 위해서는 CD 레지스터 Ry를 고려할 필요가 있다.

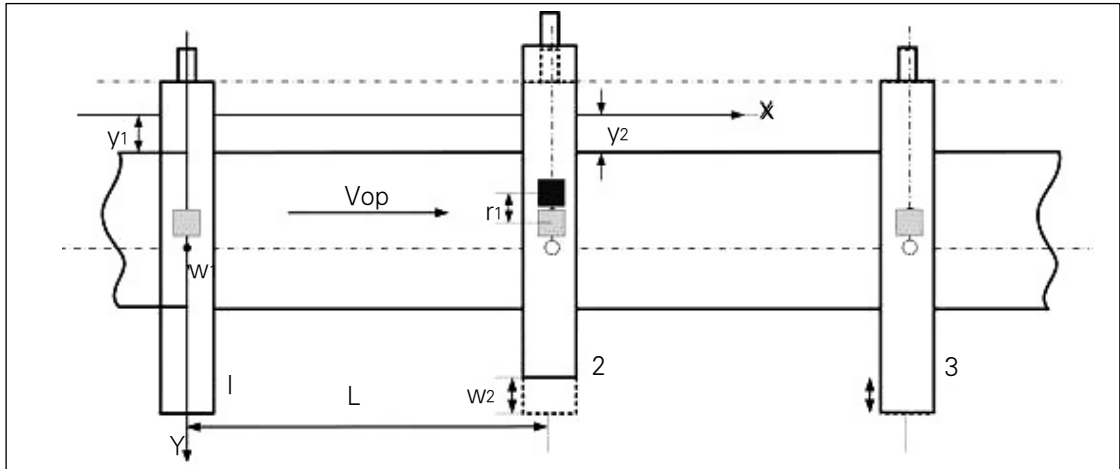
[그림 6]와 같이 기판이 w2만큼 CD방향으로

[그림 5] Schematics of the register errors





[그림 6] 6 Two-dimensional register errors



이동할 때 기관은 y_2 와 같이 사행이 발생하며, 이때 beam theory를 적용한 2차 사행모델을 이용하여 이송중인 기관의 사행량 및 사행속도를 알 수 있으며 이를 레지스터 에러에 적용하면 다음과 같은 수학적 모델을 얻는다.

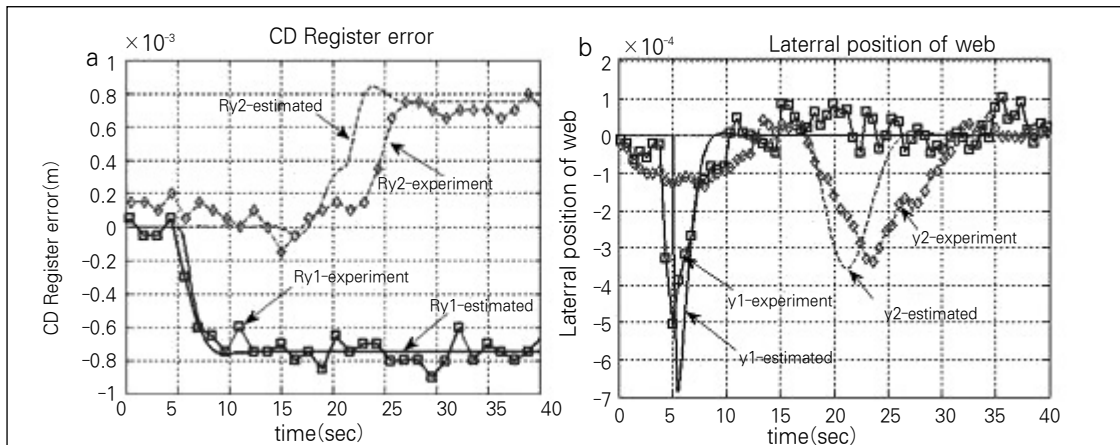
유도된 상기의 수학적 모델 CD방향으로 발생하는 레지스터 에러를 예측하고 제어하는데 활

용이 가능하다.

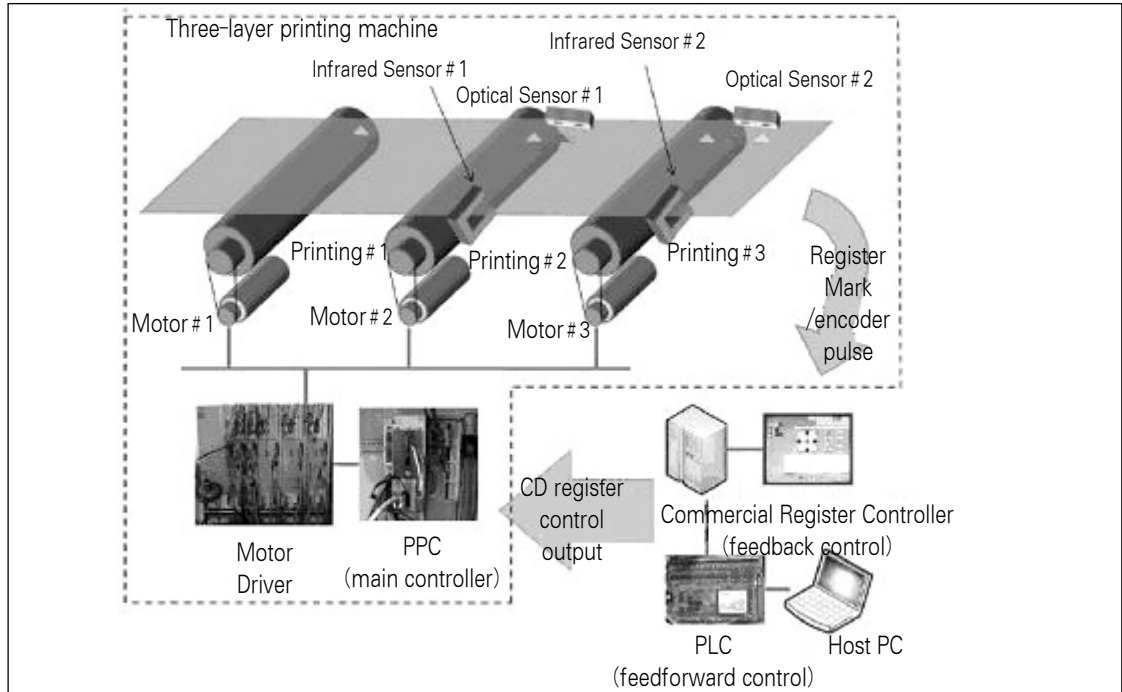
아래의 [그림 7]은 시뮬레이션(점선)과 실험 결과(실선+마킹)가 비교적 정확히 일치하는 것을 보여주고 있다.

따라서 외란에 의해 에러가 발생할 것을 사전에 예측하여 앞먹임 제어를 통해 정밀한 중첩인쇄를 가능하게 할 수 있다. [그림 8]은 이러한

[그림 5] Simulation and experimental results



[그림 8] Experimental setup for the register control



$$R_{y,n}(s) = A(s)^{m-1} [A(s)B(s) + C(s)] W_{n-m}(s) + B(s)W_n(s) - W_n(s) + W_{n-m}(s)e^{-rms} - B(s)W_{n-m}(s)e^{-rms}$$

$$A(s) = \frac{a_3s + a_4}{s^2 a_1 s a_2} \quad B(s) = \frac{b_1 s^2 + b_2 s}{s^2 a_1 s a_2} \quad C(s) = \frac{b_3 s}{s^2 a_1 s a_2}$$

레지스터제어 로직검증을 위한 실험장치이다. 이러한 장력 및 레지스터제어에서는 동적특성을 엄밀하게 매칭시켜야 하며 이는 동적매칭 (Dynamic Matching)이라고 분류할 수 있다.

5. Conclusion

R2R 인쇄 장비를 이용한 전자소자, 박막형 태양전지, 터치스크린, 플렉스블 디스플레이 등의 생산은 매우 큰 가능성을 보여주고 있으나 상용

화를 위하여는 R2R시스템 부품, 모듈, 잉크, 소재, 장비에 대한 종합적이고도 더 근본적인 기술 개발이 필요하다.

이러한 기술을 융합하기 위한 매칭로직의 개발은 아직 국부적으로 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

인쇄전자소자의 성능 및 수율 향상을 위해서는 잉크, 소재, 패턴, 인쇄공정, 인쇄장비 등에 대한 전반적인 이해를 통한 글로벌 매칭 기술의 개발이 매우 중요하다고 하겠다. [ko]