

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 VIII

롤투롤 인쇄 전자 시스템에서 건조 온도와 유연기판의 열변형간 상관관계에 대한 연구

A Study on the Correlation between Curing Temperature and Thermal Deformation of a Moving Web in Roll-to-Roll Printed Electronics

이종수¹, 이창우^{2,✉}
Jongsu Lee¹ and Changwoo Lee^{2,✉}

¹ 건국대학교 기계설계학과 (Department of Mechanical design and production Engineering, Konkuk Univ.)

² 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon Nat'l Univ.)

✉ Corresponding author: leecw@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3618

Manuscript received: 2014.6.5 / Revised: 2014.7.15 / Accepted: 2014.7.18

Roll-to-Roll printing process has become a great issue as a breakthrough for low cost and mass production of electronic devices such as organic thin film transistor, and etc. To print the electronic devices, multi-layer printing is essential, and high precision register control is required for this process. Unlike stop-and-repeat printing process, it is impossible to control the register in a static state since the roll-to-roll process is a continuous system. Therefore, the behavior of web such as polyethylene terephthalate (PET) and polyimide (PI) by the tensile and thermal stress generated in the roll-to-roll process as well as motor control of driven rolls has to be considered for a high precision register control. In this study, the correlation between curing temperature and thermal deformation of PET web is analyzed. Finally, it is verified experimentally that the temperature disturbance generates the more serious register error under the higher curing temperature.

Key Words: Roll-to-Roll Printing Process (롤투롤 인쇄 공정), Curing Temperature (건조 온도), Thermal Strain (열변형)

기호설명

$R(t)$ = register error

$\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ = strain in infeed and printing section

v_{10}, v_{20} = velocity of 1st and 2nd printing roll

V_1, V_2 = velocity variation of 1st and 2nd printing roll

L_2 = span length between 1st and 2nd printing roll

L_1 = span length between infeed and 1st printing roll

A = cross sectional area

E = elastic modulus of web

τ = time constant (L/v)

E_{eq} = equivalent elastic modulus of web considering the temperature variation

1. 서론

유연 전자 소자 인쇄 기술(flexible electronics printing technology)은 유연 디스플레이(flexible display) 및 태양전지(flexible OPV)와 같은 차세대 전자 소자 개발에 요구되는 필수적인 기술이다.

본 기술은 전자 소자의 경량화 및 유연화뿐 아니라 생산 공정 관점에서도 친환경 및 원가 절감의 이점이 있어 반도체 소자 생산 기술의 대안으로 각광받고 있다.¹ 유연 전자 소자 인쇄 기술은 크게 재료(material),² 공정(process)³ 및 소자(device)⁴ 기술로 분류되며, 각 분야에서 유연 전자 소자 대량 생산 및 성능 향상을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 유연 전자 소자 인쇄를 위해서는 소자 특성에 적합한 다양한 잉크를 이용한 다층 인쇄(multi-layer printing)가 필수적이다. 다층 인쇄에서 인쇄된 패턴과 그에 겹쳐 인쇄되는 패턴 간 중첩 기술, 즉, 레지스터(register) 기술은 소자 성능을 결정하는 중요한 요소이며, 인쇄 공정 개발 시 레지스터 정밀도 유지 기술은 필수적으로 고려되어야 한다.⁵ 패턴 중첩 인쇄 시 소재 이송을 멈춘 상태에서 레지스터 에러(register error)를 보상하는 stop-and-repeat 공정⁶과 달리 다층 패턴을 연속적으로 인쇄하는 롤투롤(roll-to-roll) 인쇄 공정 (Fig. 1)에서는 정적(static) 상태에서의 레지스터 에러 보상이 불가능하다. 롤투롤 공정에서는 소재 이송 및 건조 공정에서 발생하는 레지스터 에러가 실시간으로 보상 되어야 하며, 따라서, 구동 롤을 포함한 모터 속도 제어뿐 아니라 공정 조건에 따른 소재 특성을 고려한 레지스터 제어 기술이 요구된다. 레지스터 에러는 소재에 인가되는 장력 거동에 의한 탄성 변형과, 인쇄 패턴 건조 시 소재 온도 변화에 의한 열변형에 의해 발생한다. 소재의 탄성 변형은 롤의 편심 등에 의한 구동롤 간 속도 차이에 의해 발생하며, Brandenburg 모델을 기반으로 소재 변형에 따른 레지스터 예측 및 제어에 대한 연구가 수행되어왔다.^{5,7} 열변형에 의한 레지스터 에러를 추정하기 위해 시스템 모델 정의(system identification) 기반의 레지스터 모델 설계에 대한 연구 또한 수행된 바 있다.⁸ 기존 연구를 통해 레지스터 제어 시, 운전조건 및 소재특성에 따라 적합한 레지스터 모델이 선정 되어야 함을 알 수 있으며, 이는 제어 로직 설계 시 소재 인장 및 온도 변화에 따른 소재 특성 변화 분석이 선행 되어야 함을 시사한다.



Fig. 1 Roll-to-roll printing process

본 연구에서는 동일한 온도 외란에서 건조 온도(curing temperature)에 따른 소재 열변형 및 레지스터 에러를 분석하였다. 인장 탄성계수 및 열팽창계수 측정 표준을 적용하여 PET(poly-ethylene terephthalate) 소재 열적 특성을 분석하였고, 소재 표면 온도가 소재 탄성 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 소재 표면 온도와 열변형의 상관관계를 분석하였고, 동일 온도 외란 발생 시 건조 온도 증가에 따라 더 심각한 레지스터 에러가 발생할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

2. 소재 표면 온도에 따른 열변형 및 레지스터 거동 분석

2.1 소재 열적 특성 분석

소재 열적 특성 분석을 위해 80, 100, 120°C의 건조 온도에서 탄성계수 및 열팽창 계수가 측정되었다. 측정 소재는 PET (Sh34, SKC)로 상온에서의 탄성계수는 3.1 GPa, 두께는 100 μm 이다. 측정된 소재 물성치의 신뢰성 확보를 위해 인장시험 및 coefficient of thermal expansion(CTE) 시험 표준에 기반한 3회 이상의 반복 측정이 수행되었다. Table 1은 시험 표준 및 조건을 보여준다. 인장시험에서 strain rate은 소재 인장 속도를, load cell size는 로드셀 측정 최대치를 의미하며 gauge length는 연신 측정 기준 선정을 위한 표점거리를 의미한다. Temperature rate은 CTE 시험 시 소재 승온 속도를 의미한다. Fig. 2는 소재 온도에 따른 탄성계수 (a) 및 열팽창계수 변화 (b)를, Fig. 3은 온도 증가에 따른 소재 팽창 및 수축 거동을 보여준다. 소재 온도 증가에 따라 탄성계수는 3.1 GPa에서 0.82 GPa까지 감소하며, 80 - 120°C 구간에서는 선형에 가까

Table 1 Measurement standards and conditions

Property	Elastic modulus	CTE
Standard	KS M 3054	ASTM E 831
Temperature of substrate	80, 100, 120 °C	50, 80, 100, 120 °C
Load cell size	100 kgf	-
Strain rate	1 mm/s	-
Gauge length	100 mm	-
Temperature rate	-	5 °C/min

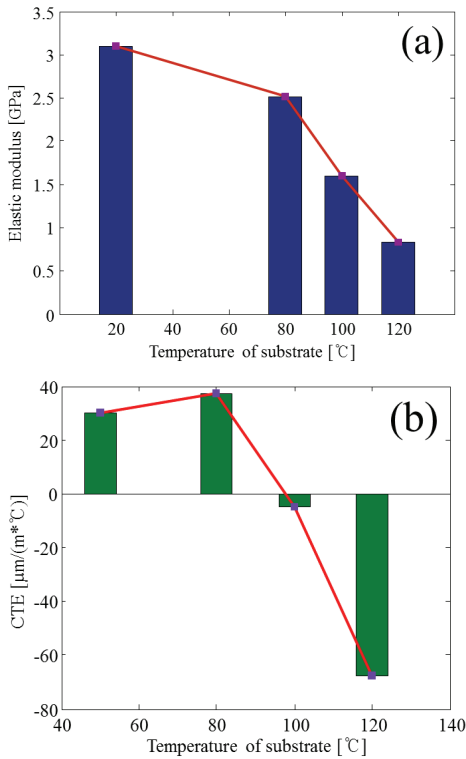


Fig. 2 Elastic modulus (a) and CTE (b) by temperature

운 거동을 보인다. 열팽창 계수의 경우 80°C 이하에서는 천천히 증가하는 반면, 이후 소재 온도 증가에 따라 급격하게 감소하는데 이는 Fig. 3에서와 같이 PET 소재의 경우, 온도 증가에 따라 거의 일정한 기울기로 팽창하다가 100°C 이후, 급격히 수축하기 때문이다. 측정 결과를 통해 80, 100, 120°C에서 탄성계수는 각각 상온 대비 19, 49, 73% 감소함을 알 수 있다. 열 팽창 계수는 80°C의 경우, 50°C 대비 25% 증가하나, 100, 120°C의 경우, 각각 116, 326% 감소한다. 특히, 건조온도가 80°C 이상일 경우, 온도 증가에 따른 소재 수축 기울기가 급격

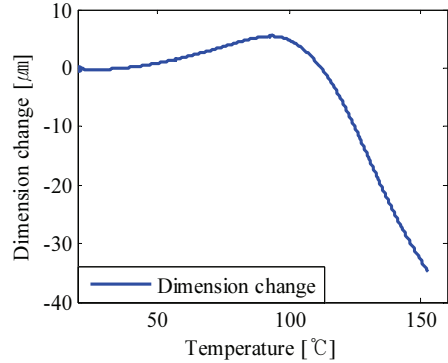


Fig. 3 Behavior of thermal deformation by temperature of substrate

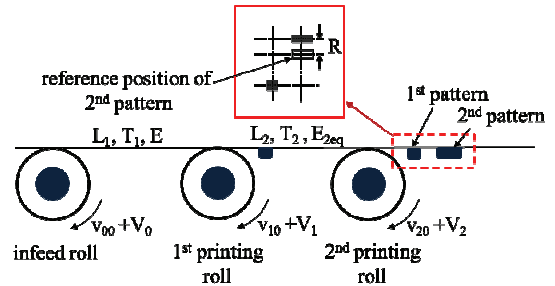


Fig. 4 Schematics of register error

하게 증가하는데 이는 동일한 온도 외란에서도 건조 온도에 따라 열변형량이 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

2.2 소재 온도가 탄성 변형에 미치는 영향

소재 표면 온도에 따른 소재 탄성 계수 변화가 탄성 변형에 의한 레지스터 에러에 미치는 영향은 Brandenburg 모델을 이용하여 분석할 수 있다.^{5,7}

$$\dot{R}(t) = v_{20} \varepsilon_2(t) - v_{10} \varepsilon_1(t - \tau) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_2(t) &= \frac{\dot{T}_2(t)}{AE_{eq}} \\ &= -\frac{v_{20}}{L_2} \varepsilon_2(t) + \frac{v_{20}}{L_2} \varepsilon_1(t) + \frac{(V_2(t) - V_1(t))}{L_2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1(t) &= \frac{\dot{T}_1(t)}{AE} \\ &= -\frac{v_{10}}{L_1} \varepsilon_1(t) + \frac{v_{10}}{L_1} \varepsilon_0(t) + \frac{(V_1(t) - V_0(t))}{L_1} \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 4는 레지스터 에러의 개략도를 보여준다. 소재 변형률과 레지스터 에러의 관계는 식(1)과 같으며, 구동률 속도 에러에 따른 변형률은 식(2), (3)과 같다.^{5,7} 식(1)-(3)을 통해 레지스터 에러는 1,2도 인쇄를 사이 구간과 1도 인쇄 이전 구간에서 발생하는 소재 변형에 의해 발생함을 알 수 있다. 또한, 소재 변형은 구동률 편심 등에 의해 발생하는 속도 외란에 가장 민감함을 알 수 있다. 그러나 식(2)-(3)에서 변형률 계산 시 탄성계수 항이 소거됨에 따라 탄성계수 변화가 레지스터 에러에는 영향을 미치지 않는데, 이는 소재 탄성 변형이 소재 온도와 관계없이 구동률 속도 차이에 의해 발생하는 변위에 의존하기 때문이다. 단, 소재 온도 증가는 탄성계수를 감소시킴에 따라 탄성변형 발생 시 더 큰 장력 외란을 발생시키는데, 이는 소재 인쇄성 악화의 원인이 될 수 있다.⁹

2.3 건조기 온도가 열변형 및 레지스터 거동에 미치는 영향

건조기 승온 과정에서 소재는 팽창 또는 수축하며, 이에 따라 소재에 인가되는 장력은 변화한다. 그러나, 실제 레지스터 에러에 영향을 미치는 요소는 소재 표면 온도가 정상상태에 도달한 이후 발생하는 온도 외란에 의한 열변형이다. 이를 고려하여, 소재 표면 온도와 열변형 간의 상관관계 분석 시, 소재 표면 온도 외란에 따른 열변형 뿐 아니라 동일한 온도 외란 조건에서 소재 표면 온도에 따른 열변형량이 분석되었다. 온도 외란은 각각 ± 7.5 , 2.5°C 로 설정하였으며, 소재 온도가 80, 100, 120°C 일 때, 온도 외란에 따른 열변형률을 측정하였다. Table 2는 설정된 온도 외란에서 소재 표면 온도에 따른 열변형률을 보여주며, Fig. 5는 ± 2.5 (bold line) 및 7.5°C (dot line) 온도 외란 발생 시 소재 표면 온도 대비 열변형률 차이를 보여준다. 동일한 온도에서 온도 외란에 의한 열변형률은 소재 표면 온도 증가에 따라 최대 0.0013 차이를 보이며, $\pm 7.5^\circ\text{C}$ 온도 외란의 경우, $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 대비 최대 3배 (0.0039) 차이를 보인다. 소재 표면 온도가 높을 경우, 온도 증가에 따라 소재 수축량이 급격히 증가하는데 이는 건조 온도가 높을 경우 온도 외란이 레지스터 에러에 더 민감하게 작용할 수 있음을 의미한다. Fig. 6은 $\pm 7.5^\circ\text{C}$ 의 온도 외란에서 건조기 온도 (a) 및 소재 열변형에 의한 레지스터 에러를 보여준다. 측정 시 소재에 인가되는 장력은 2 kgf, 운전 속도는 5 m/min이며, 건조기 셋

Table 2 Thermal strain under the various curing temp

Curing temperature [°C]	Thermal strain (10^{-3})				
	Temperature disturbance				
	-7.5	-2.5	0	2.5	7.5
80	1.72	1.89	1.90	1.84	1.47
100	0.813	-0.149	-0.741	-1.39	-2.84
120	-4.35	-5.77	-6.43	-7.05	-8.20

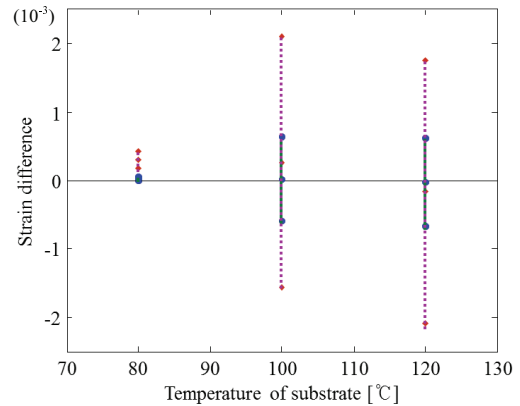


Fig. 5 Thermal strain differences by temp. disturbances (± 2.5 (bold line) and 7.5°C (dot line))

팅 온도는 80, 120°C 이다. 건조기 온도에 의한 열변형과 레지스터 에러 관계를 분석하기 위해 건조기 온도와 2도 인쇄 이후의 레지스터가 동시에 측정되었다. Fig. 6에서 온도와 레지스터 에러 데이터 사이 시간 차는 약 60초이며, 이는 건조기 온도 변화에 따라 변형된 소재가 2도 인쇄 구간에 도달하는 시간에 의해 결정된다. 또한, 건조기 온도가 증가할 경우 레지스터 에러는 증가하는데, 이는 2도 레지스터 마크가 1도 레지스터 마크보다 앞에 있을 경우, 온도 증가에 따라 소재가 팽창 하면서 1도와 2도 레지스터 마크 간격이 더 멀어지기 때문이다. 건조기 온도가 120°C 인 경우에도 온도 증가에 따라 소재 팽창 구간이 존재하는데 이는 건조 시 소재 표면 온도는 건조 공기 온도보다 낮기 때문인 것으로 분석된다. 건조 노즐(curing nozzle)을 이용한 소재 건조 시 소재 표면 온도는 건조 온도, 시간 및 건조 공기의 유속에 의해 결정되는데 일반적으로 건조 공기 온도보다 낮다.¹⁰ 건조기 온도가 120°C 일 때 최대 레지스터 에러는 80°C 대비 100%이상 증가하며, 이는 높은 건조온도에서 발생하는 온도 외란은 레지스터 에러에 더 치명적인 영향을 미침을 시사한다.

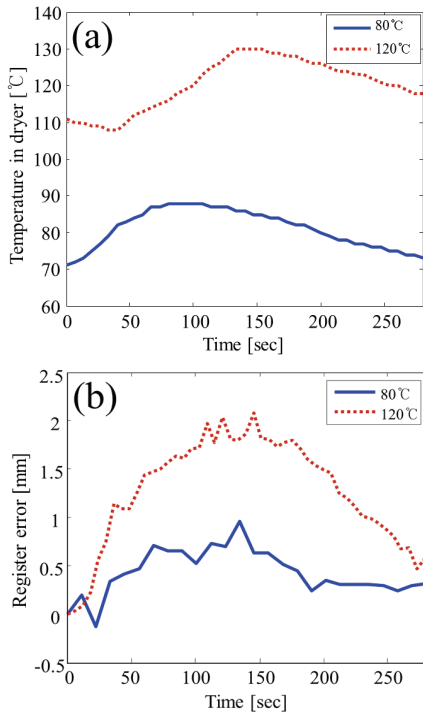


Fig. 6 Temperature in dryer (a) and register error (b) by thermal deformation of PET web (setting temperature in dryer: 80 (bold line) and 120°C (dot line), temp. disturbances: 7.5°C)

3. 결론 및 고찰

롤투롤 인쇄 전자 시스템에서 다층 전자 소자 인쇄를 위해서는 구동롤 모터 제어뿐 아니라 운전 조건에 따른 소재 특성을 고려한 레지스터 제어가 필수적이다. 본 연구에서는 소재 표면 온도에 따른 소재 특성 변화를 측정하고, 이를 바탕으로 건조기 온도와 소재 열변형간 관계를 분석하였다. 그리고 건조기 온도 변화에 의한 열변형이 레지스터 에러에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 소재 온도 증가에 따른 탄성계수 변화는 소재에 인가되는 장력 거동에는 영향을 미치나 구동롤 속도 외란에 의한 소재 변형에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 반면, 온도 증가에 따라 소재 열팽창계수는 급격하게 변화하며 온도 외란이 일정한 경우에도 열 변형량이 큰 폭으로 증가함을 확인하였다. 결과적으로 고온에서 발생하는 건조기 온도 외란은 레지스터 에러에 더 치명적인 영향을 미침을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2014년도 한국연구재단 (NRF-2014 R1A1A1003477)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Noh, J., Yeom, D., Lim, C., Cha, H., Han, J., et al., "Scalability of Roll-to-Roll Gravure-Printed Electrodes on Plastic Foils," Proc. of the IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 33, No. 4, pp. 275-283, 2010.
2. Bollströma, R., Määttäna, A., Tobjörka, D., Ihalainen, P., Kaihovirta N., et al., "A Multilayer Coated Fiber-Based Substrate Suitable for Printed Functionality," Organic Electronics, Vol. 10, No. 5, pp. 1020-1023, 2009.
3. Shin, K.-H., "Tension Control," GA: TAPPI Press, 6th Ed., pp. 35-42, 2000.
4. Allen, M., Lee, C., Ahn, B., Kololuoma, T., Shin, K., et al., "R2R Gravure and Inkjet Printed RF Resonant Tag," Microelectronic Engineering, Vol. 88, No. 11, pp. 3293-3299, 2011.
5. Kang, H., Lee, C., and Shin, K., "Modeling and Compensation of the Machine Directional Register in Roll-to-Roll Printing," Control Engineering Practice, Vol. 21, No. 5, pp. 645-654, 2013.
6. Noh, J.-H., Kim, I., Park, S. H., Jo, J., Kim, D. S., et al., "A Study on the Enhancement of Printing Location Accuracy in a Roll-to-Roll Gravure Offset Printing System," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 68, No. 5-8, pp. 1147-1153, 2013.
7. Brandenburg, G., "New Mathematical Models for Web Tension and Register Error," Proc. of the IFAC International Conference on Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industries, pp. 411-438, 1976.
8. Lee, J. S. and Lee, C. W., "Analysis of Thermal Effect on Tension of a Moving Web in Roll-to-Roll Printed Electronics," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, pp. 9-15, 2013.
9. Lee, C. W., Kang, H.-K., Kim, C.-W., and Shin, K.-H., "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,” *Microelectromechanical Systems*, Vol. 19, No. 5, pp. 1243-1253, 2010.

10. Atakan, A., Muhiddin, C., and Etemoğlu, A. B., “A Theoretical Approach to the Drying Process of Thin Film Layers,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 465-479, 2001.