

# 소재의 기계적 특성과 패턴롤 사이의 매칭을 고려한 레지스터 제어 Mechanical Matching of Register Error in Curing Section

\*강현규<sup>1</sup>, #신기현<sup>2</sup>

\*H. K. Kang<sup>1</sup>, #K. H. Shin(khshin@konkuk.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 건국대학교 기계설계학과, <sup>2</sup> 건국대학교 기계공학부

Key words : Roll-to-Roll, Register Control, Residual Stress, Matching, Printed Electronics

## 1. 서론

웹이란 필름, 종이, 철강, 섬유 등과 같이 유연하고 길 이 방향으로 연속적인 소재를 의미한다. 대면적, 저가격 패 터닝방식인 R2R 인쇄 기술로 알에프아이디 태그(RFID tag), 사이니지(signage), 올레드/이엘 조명(OLED/EL lighting), 플렉 서블 디스플레이(flexible display)용 오티에프티 백플레인 (OTFT-backplane)등을 생산하기 위한 인쇄전자 (printed electronics) 기술이 개발 중이다.<sup>1</sup> 전통적 인쇄의 레지스터 에러는 100 마이크로(micron)이하 이지만, 인쇄전자는 25 마이크로 이하의 패턴 폭을 요구하므로 10 마이크로 이하의 레지스터 에러 제어가 필수적이다.<sup>2</sup> 이를 위해서는 R2R 기초연구 를 통한 각 부분별 수학적 모델 개발 및 제어이론에 대한 연구, 전체 시스템을 고려한 제어기 설계가 필요하다.

다층 인쇄시의 종방향 레지스터 에러는 이전 인쇄물에서 인쇄된 패턴과 현재 인쇄물에서 인쇄하는 패턴의 상대 적 위치에러로서 Fig. 1 과 같이 정의된다. Brandenburg<sup>3</sup> 는 최초로 종방향 레지스터 에러의 선형 모델을 제안하였고, Yoshida<sup>4</sup> 는 비선형 장력모델과 선형 종방향 레지스터 모델을 사용한 비선형 제어기법을 제안하였다. 그 외의 추가적 인 연구는 보고된 바 없다.

인쇄전자의 제작시, 기존 R2R 인쇄 기술의 정밀도 향 상만으로는 미세패턴의 인쇄 및 기능성 소재의 인쇄와 제 작이 어렵다. 매칭(Matching)이란 R2R 공정과 인쇄 공정 상 호간의 원리(mechanics)를 분석하여 모델링을 수행하고, 최 중 인쇄 소재의 성능을 보장하는 기술로 정의한다.

인쇄전자 제작을 위한 R2R 시스템은 언와인더(unwind-er), 와인더(winder), 인피더 (infeeder), 아웃피더 (outfeeder)로 구성되며, 인피더와 아웃피더 사이에서 인쇄 및 경화 공정이 수행된다. 최종 경화 공정 후에 소재는 실온으로 냉각 되며, 이때 메탈 잉크와 웹 소재의 열팽창계수 차이로 인 하여 인쇄 패턴에 잔류응력이 발생하게 된다.<sup>5</sup> 과도한 잔류 응력은 전자소재 손상의 원인이 될 수 있으며, 이는 인쇄 공정 중의 스트레인의 함수로 표현된다. 레지스터 에러 또 한 스트레인의 함수이므로 레지스터 제어시에 잔류응력의 영향을 고려하여 스트레인을 조절해야 한다. 단순히 레지 스텐터 제어의 성능 향상만을 위해서 소재의 과도한 스트레 인 변화를 일으킬 경우, 기 인쇄된 패턴의 결함 발생 원인이 될 수 있으며, 현 인쇄패턴의 열변형 스트레인과 중첩 된 잔류응력이 발생하여 냉각 후에 패턴의 결함이 발생하 게 될 수 있다. 결국 레지스터 제어는 이뤄지나 최종 인쇄 소재의 기능성 요구조건을 만족하지 못하게 된다.

본 논문에서는 온도 변화를 포함하는 종방향 레지스터 에러에 대한 모델링과 패턴 잔류응력의 관계를 분석한다.

## 2. 온도변화를 고려한 레지스터 에러

인쇄물을 통과한 소재는 잉크의 건조 및 경화를 위하여 경화 챔버(curing chamber)를 통과하게 된다. 대표적 메탈잉 크인 나노 실버 잉크는 150°C 에서 180 초이상 가열하여 경 화시킨다. 다음의 Fig. 2 는 경화 챔버를 포함하는 인쇄 구 간에서 온도 및 종탄성 계수를 나타낸다.

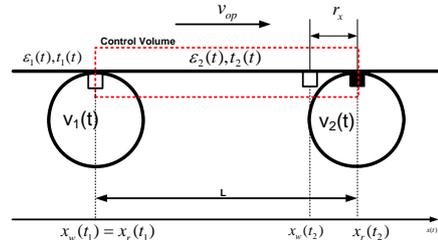


Fig. 1 Register error( $r_x$ ) in machine direction

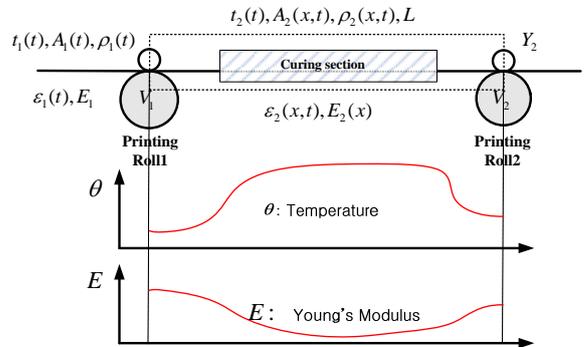


Fig. 2 Profile of temperature and Young's modulus in printing section

이때, Fig. 1 에서 종방향 레지스터 에러는 식(1)와 같이 정의된다.

$$r_x(t) = x_w(t) - x_r(t) \quad (1)$$

소재의 스트레인은 온도변화로 인한 스트레인( $\epsilon^{\theta}$ )과 장 력변화로 인한 스트레인( $\epsilon^e$ )의 선형 중첩이며, 온도는 시간 에 대해 변하지 않는다고 가정할 때, 식(2)를 만족한다.

$$\epsilon^e(x,t) = \frac{t(t)}{AE(x)}$$

$$\epsilon^{\theta}(x) = \alpha(x)\Delta\theta(x) \quad (2)$$

$$\epsilon_2(x,t) = \epsilon^e(x,t) + \epsilon^{\theta}(x)$$

Fig. 2 의 검사체적 내의 질량변화율은 질량보존의 법칙 에 의해 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_0^L \frac{\rho_0 A_0}{1 + \epsilon_2(x,t)} dx = \frac{\rho_0 A_0 v_1(t)}{1 + \epsilon_1(t)} - \frac{\rho_0 A_0 v_2(t)}{1 + \epsilon_2(L,t)} \quad (3)$$

이때, 검사체적내의 첫번째 인쇄물 통과 후, 이송된 소 재의 위치  $x_w(t_2)$  는 시정수( $L/v_{op} = t_2 - t_1$ )동안 이송한 소재의 위 치를 의미하며, 시정수동안 검사체적 내부로 입력된 소재 의 질량과 이송된 질량의 관계인 식(4)로 계산되는데, 식(2) 의 가정을 통해 식(4)는 식(5)와 같이 표현된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\rho_0 A_0 v_1(t)}{1 + \epsilon_1(t)} dt = \int_{x_w(t_1)}^{x_w(t_2)} \frac{\rho_0 A_0}{1 + \epsilon_2(x,t)} dx \quad (4)$$

$$\int_{x_w(t_2-\tau)}^{x_w(t_2)} \left\{ 1 + \frac{t_2(t)}{AE_2(x)} + \alpha(x)\Delta\theta(x) \right\} = \int_{t_2-\tau}^{t_2} \frac{\rho_0 A_0 v_1(t)}{1 + \epsilon_1(t)} dt \quad (5)$$

4. 결론

$t_2$  시점일 때의 식(5)의 양변을  $t_2$  에 대해 미분하고, 종방향 레지스터 에러의 정의인 식(1)과 질량변화율 식(3)을 대입, 선형화하면 식(6)의 온도 변화를 고려한 종방향 레지스터 모델을 얻는다.

$$\dot{R}_x(t) = - \left\{ \alpha_o(L)\Delta\theta_o(L) + \frac{t_{20}}{AE_2(L)} \right\} + T_2(t) \left\{ \frac{1-v_{20}}{AE_2(L)} - \frac{1}{AE_2(0)} \right\} + \frac{t_{20}}{A} G(\Delta x_w(t)) + \alpha_o(L)\Delta\Theta(\Delta x_w(t)) + \Delta\theta_o(L)A(\Delta x_w(t)) + v_{10} \epsilon_1(t-\tau) \quad (6)$$

단,  $G(\Delta x_w(t)) = \frac{1}{E_2(\Delta X_w(t))}$

또한 구간별 종탄성계수 ( $E(x)$ )와 열팽창계수 ( $\alpha(x)$ )는 온도별 스트레스-스트레인 곡선인 Fig. 3 을 통해 얻는다.

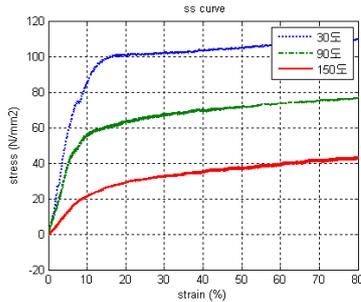


Fig. 3 Stress-strain curve at each temperature

3. 잔류응력과 스트레인

인쇄물을 통해 인쇄된 소재가 경화 챔버내부로 진입하게 되면 메탈 잉크의 경화가 이루어진다. 이때, 소재는 경화온도로 인한 열팽창 및 장력으로 인한 탄성 변형이 이루어진 상태에서 소재 위의 잉크가 건조 및 경화된다. 소재가 경화 챔버외부로 노출되면 냉각 및 수축이 발생한다. 이때 소재와 메탈 잉크의 열팽창 계수 차이로 인하여 수축 길이의 차이가 발생하고, 소재와 잉크의 점착으로 인해 응력이 발생한다. 다음의 Fig. 4 는 경화 챔버를 나온 소재의 수축 길이 차이 및 잔류응력을 나타낸다.

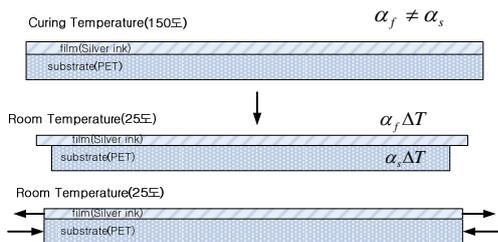


Fig. 4 Residual stress by CTEs(Coefficient of Temperature Expansion) difference between substrate and metal film

온도변화와 잔류 응력의 관계는 다음의 식 (7)과 같다. 경화 챔버 내부에서 소재에 발생한 장력은, 소재의 탄성 변형을 일으키므로 최종 잔류응력은 열변형의 영향과 탄성 변형의 영향의 중첩으로 나타난다. 경화 챔버 내부의 온도가 균일하다고 할 때, 챔버 내부에 위치한 소재의 탄성 변형률을  $\epsilon_c(c,t)$  라 하면, 최종 잔류응력은 식(8)과 같이 결정된다. 결국 식(6)에서 레지스터 제어를 위한  $T_2(t)$  혹은  $\epsilon_1(t-\tau)$ 의 변화는 식(8)의  $\epsilon_c(c,t)$ 의 변화로 나타난다.

$$\frac{d\sigma}{dT} = (\alpha_s - \alpha_f)E \quad (7)$$

$$\sigma(t) = \left\{ (\alpha_s - \alpha_f)\Delta T + \epsilon_c(c,t) \right\} E \quad (8)$$

대면적, 저가 패터닝 방식인 R2R 인쇄 기술의 인쇄전자 적용을 통해 알에프아이디 태그, 올레드/이엘 조명 등을 생산하기 위해서는 레지스터 제어의 정밀도 향상이 요구된다. 하지만 기존의 R2R 인쇄 기술의 정밀도 향상만으로는 미세패턴의 인쇄 및 기능성 소자의 인쇄, 제작이 어렵다. 매칭이란 R2R 공정과 인쇄 공정 상호간의 원리를 분석하여 모델링을 수행하고, 최종 인쇄 소자의 성능을 보장하는 기술로 정의한다.

다층 인쇄시의 레지스터 에러를 제어하기 위해서는 인쇄물의 속도가 변화게 되며, 이는 웹 소재의 스트레인 변화를 일으킨다. 이때 레지스터 제어의 성능 향상만을 위해서 소재의 과도한 스트레인 변화를 일으킬 경우, 기 인쇄된 패턴의 결함 발생 원인이 될 수 있으며, 현 인쇄패턴의 열변형 스트레인과 중첩된 잔류응력이 발생하여 냉각 후에 패턴의 결함이 발생하게 된다. 결국 레지스터 제어는 이뤄지나 최종 인쇄 소자의 기능성 요구조건을 만족하지 못하게 된다.

본 논문에서는 온도 변화를 포함하는 종방향 레지스터 에러에 대한 모델링을 수행하고 온도 변화 및 탄성 변형률로 인한 인쇄 패턴의 냉각 후의 잔류응력의 관계를 분석하였다. 레지스터 제어를 위한 현 스펀의 장력 변화는 경화 챔버 내의 탄성 변형률을 변화시키며, 이는 인쇄 후 소재의 잔류응력에 영향을 발생시킴을 모델을 통하여 확인하였다.

후기

이 논문은 2007 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-511-D00019) 및 “서울시 산학연 협력사업(10848)”의 지원을 받아 수행된 연구임

참고문헌

1. Gregory P. Crawford, “Flexible Flat Panel Displays,” John Wiley & Sons, Ltd. 2005.
2. W. Mildner, “OE-A – The international network for the organic and printed electronics industry,” 1st Int. Conference on R2R Printed Electronics , 49~67, 2008
3. Brandenburg, G, “New Mathematical Models for Web Tension and Register Error,” Proc. of third international IFAC conference on instrumentation and automation in the paper, rubber and plastics industry, Vol.1, 411-438, 1977.
4. T. Yoshida, S. Takagi, Y. Muto and T. Shen, “Register Control of Sectional Drive Rotogravure Printing Press,” The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 417-420, 2008
5. Julia R. Greer and Robert A. Street , “Mechanical characterization of solution-derived nanoparticle silver ink thin films,” Journal of applied physics 101, 103529, 2007