

R2R 시스템의 2-D 레지스터 에러 모델링 Mathematical Modeling of 2-Dimensional Register Error

*강현규¹, 이재민¹, #신기현²

*H. K. Kang¹, J. M. Lee¹, #K. H. Shin(khshin@konkuk.ac.kr)²

¹ 건국대학교 기계설계학과, ² 건국대학교 기계공학부

Key words : Roll-to-Roll, Register Error, Modeling, Printed Electronics

1. 서론

웹이란 필름, 제지, 철강, 섬유등과 같이 유연하고 길이 방향으로 연속적인 소재를 의미한다. 대면적, 저가격 패터닝방식인 R2R 인쇄 기술로 알에프아이디 태그(RFID tag), 사이니지(signage), 올레드/이엘 조명(OLED/EL lighting), 플렉서블 디스플레이(flexible display)용 오티에프티 백플레인(OTFT-backplane)등을 생산하기 위한 인쇄전자 (printed electronics) 기술이 개발 중이다.¹ 전통적 인쇄의 레지스터 에러는 100 마이크로(micron)이하 이지만, 인쇄전자는 25 마이크로 이하의 패턴 폭을 요구하므로 10 마이크로 이하의 레지스터 에러 제어는 필수적이다.² 이를 위해서는 R2R 기초연구를 통한 각 부분별 수학적 모델 개발 및 제어이론에 대한 연구, 전체 시스템을 고려한 제어기 설계가 필요하다.

인쇄전자 제작을 위한 R2R 시스템은 언와인더(unwind-er), 와인더(winder), 인피더 (infeeder), 아웃피더 (outfeeder)로 구성되며, 인피더와 아웃피더 사이에서 인쇄 및 경화 공정이 수행된다. 다층 인쇄시의 레지스터 에러는 이전 인쇄물에서 인쇄된 패턴과 현재 인쇄물에서 인쇄하는 패턴의 상대적 위치에러로서 Fig. 1 과 같이 종방향(r_x)과 횡방향(r_y)의 에러로 정의된다. Brandenburg 는 최초로 종방향 레지스터 에러의 선형 모델을 제안하고 장력과 종방향 컷오프(cut-off) 레지스터 에러의 decoupling 기법을 제시하였다.³ Yoshida 는 비선형 장력모델과 선형 종방향 레지스터 모델을 사용한 비선형 제어기법을 제안하였다.⁴ 그 외의 추가적인 연구는 보고된바 없으며 기존의 연구는 모두 종방향의 1-D 선형 레지스터 에러의 모델링에 국한되어 있으며, 종-횡방향의 2-D 레지스터 에러의 비선형 모델은 보고된바 없다. 전자소자 인쇄를 위해서는 비선형성을 고려한 종, 횡방향 레지스터 에러 모델링 및 제어기법의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 2-D 레지스터 에러에 대한 비선형 모델링을 제시하고 시뮬레이션을 통해 동특성을 분석한다.

2. 횡방향 레지스터 에러의 모델링

Fig. 2 에서 횡방향 레지스터 에러는 첫번째 인쇄물에서 인쇄된 패턴의 y 방향 위치와 두번째 인쇄물 인쇄패턴의 y 방향 위치의 상대적 차이로서 식 (1)과 같이 정의된다. Shelton 의 사행모델을 사용하여 횡방향 레지스터 에러를 모델링한다. 횡방향의 웹 거동은 Fig. 3 과 같이 웹을 2 차원 빔으로 가정하여 스펠 양단의 경계조건으로 정역학적 평형 방정식의 해를 구하여 예측하며 식(2)와 같다.⁷

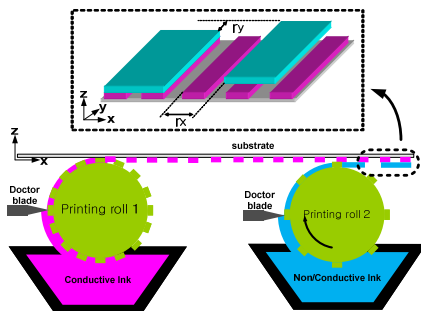


Fig. 1 Two-dimensional register error in multi-layer printing

$$r_y(t) = y_2(t_2) - y_1(t_1) - \{w_2(t_2) - w_1(t_1)\} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 y_L(t)}{dt^2} = a_1 \frac{dy_L(t)}{dt} + a_2 y_L(t) + a_3 \frac{dy_0(t)}{dt} + a_4 y_0(t) \quad (2)$$

$$+ a_5 u_L(t) + a_6 u_0(t) + b_1 \frac{d^2 w_L(t)}{dt^2} + b_2 \frac{dw_L(t)}{dt} + b_3 \frac{dw_0(t)}{dt}$$

$$\theta = \frac{\partial y}{\partial x}, \theta_r = \frac{u}{c}, \tau = \frac{L}{V}, a_1 = -\frac{f_2(KL)}{\tau}, a_2 = -\frac{f_1(KL)}{\tau^2},$$

$$\text{단, } a_3 = -\frac{f_3(KL)}{\tau}, a_4 = \frac{f_1(KL)}{\tau^2}, a_5 = \frac{V^2}{Lc} f_2(KL), a_6 = \frac{V^2}{Lc} f_3(KL)$$

$$b_1 = 1, b_2 = \frac{f_2(KL)}{\tau}, b_3 = \frac{f_3(KL)}{\tau}$$

식(1), (2)를 이용, 출력의 인쇄물은 병진운동만 한다고 가정 후, 라플라스 변환하여 정리하면, 식(3)과 같은 횡방향 레지스터 에러를 얻는다.

$$R_y(s) = \frac{(a_3 s + a_4)}{(s^2 - a_1 s - a_2)} \{Y_1(s) - Y_0(s)e^{-\tau s}\}$$

$$+ \frac{(b_1 s^2 + b_2 s)}{(s^2 - a_1 s - a_2)} \{W_2(s) - W_1(s)e^{-\tau s}\} - W_2(s) \quad (3)$$

$$+ \frac{b_3}{(s^2 - a_1 s - a_2)} s \{W_1(s) - W_0(s)e^{-\tau s}\} + W_1(s)e^{-\tau s}$$

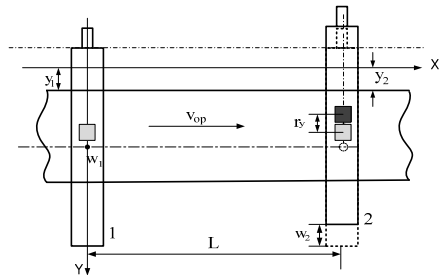


Fig. 2 Register error(r_y) in axial direction

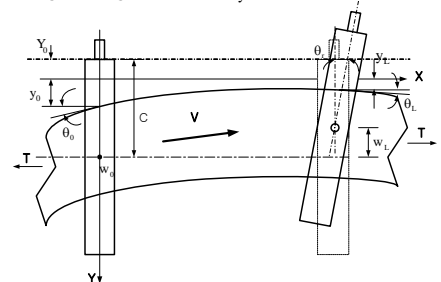


Fig. 3 Boundary conditions of Shelton's lateral model

3. 종방향 레지스터 에러의 모델링

종방향 레지스터 에러는 첫번째 인쇄물에서 인쇄된 패턴과 두번째 인쇄물 인쇄패턴의 x 방향 위치 오차이며, Fig. 4 에서 r_x 를 의미한다. 이는 식(4)와 같이 정의된다.

$$r_x(t) = x_w(t) - x_r(t) \quad (4)$$

Fig. 4 의 검사체적 내의 질량변화율은 질량보존의 법칙에 의해 식(5)와 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_0^L \rho_o A_o v_1(t) dx = \frac{\rho_o A_o v_1(t)}{1 + \epsilon_1(t)} - \frac{\rho_o A_o v_2(t)}{1 + \epsilon_2(t)} \quad (5)$$

이때, 검사체적내의 첫번째 인쇄물 통과후 이송된 소재의 위치 $x_w(t_2)$ 는 시정수($L/v_{op}=t_2-t_1$)동안 이송한 소재의 위치

를 의미하며, 시정수 동안 검사체적 내부로 입력된 소재의 질량과 이송된 질량의 관계인 식(6)으로 계산된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\rho_o A_o v_1(t)}{1 + \varepsilon_1(t)} dt = \int_{x_w(t_1)}^{x_w(t_2)} \frac{\rho_o A_o}{1 + \varepsilon_2(t)} dx \quad (6)$$

횡방향 레지스터 에러 발생시에 소재의 y 방향 위치 변화로 인한 x 방향의 변위는 다음의 식(7)과 같다.

$$l_{12}(t) = \sqrt{\{y_L(t) - y_0(t)\}^2 + L^2} \quad (7)$$

t_2 시점일 때의 식(6)의 양변을 t_2 에 대해 미분하고, 종방향 레지스터 에러의 정의인 식(4)와 횡방향 레지스터 에러로 인한 종방향 변위인 식(7)를 대입 정리하면 식(8)의 종방향 비선형 레지스터 모델을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{r_x(t)}{1 + \varepsilon_2(t)} \right\} = \frac{v_1(t)}{1 + \varepsilon_1(t)} + \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\int_0^{t-\tau} V_1(t) dt - \int_0^t V_2(t) dt - L}{1 + \varepsilon_2(t)} \right\} \quad (8)$$

$$= \frac{v_1(t-\tau)}{1 + \varepsilon_1(t-\tau)} - \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\sqrt{L^2 + \{y_2(t) - y_1(t)\}^2} - L}{1 + \varepsilon_2(t)} \right\}$$

4 시뮬레이션

중, 횡방향의 레지스터 에러에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 두번째 인쇄롤의 종방향 위상(phase)을 10 초에서, 10 마이크로 변화시의 종방향 레지스터 에러는 Fig. 5 와 같다. 또한 두번째 인쇄롤의 횡방향 위치가 10 초에서, 10 마이크로 변화할 때의 소재의 측방향 위치와 종방향 레지스터 에러, 횡방향 레지스터 에러는 Fig. 6, 7 과 같다.

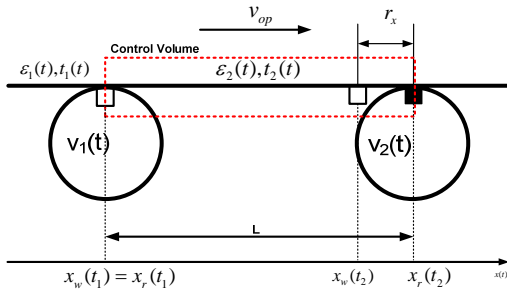


Fig. 4 Register error(r_x) in machine direction

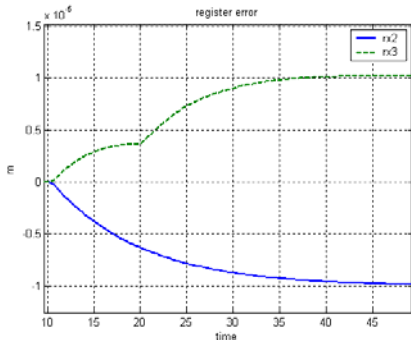


Fig. 5 Register error (r_x): step response of 2nd printing roll phase change 10 micron at $t=10$ sec

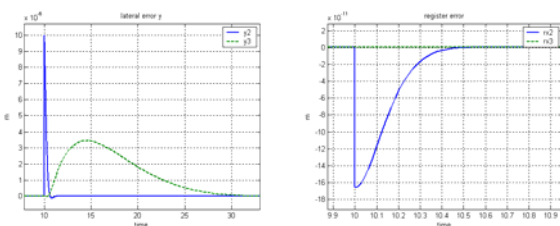


Fig. 6 Lateral position and register error(r_x): step response of 2nd printing roll lateral position change 10 micron at $t=10$ sec

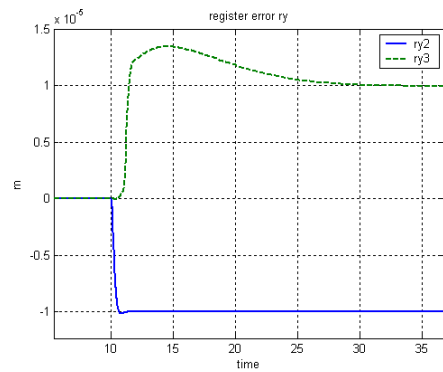


Fig. 7 Register error (r_y): step response of 2nd printing roll lateral position change 10 micron at $t=10$ sec

5. 결론

대면적, 저가 패터닝방식인 R2R 인쇄 기술의 인쇄전자 적용을 통해 알에프아이디 태그, 올레드/이엘 조명 등을 생산하기 위해서는 레지스터 제어의 정밀도 향상이 요구된다.¹ 전통적 인쇄의 레지스터 에러는 100 마이크로이나, 인쇄 전자는 25 마이크로 이하의 패턴 폭을 요구하므로 10 마이크로 이하의 레지스터 에러 제어가 필수적이다.²

기존의 레지스터에 대한 연구는 모두 종방향의 1-D 선형 레지스터 에러의 모델링에 국한되어 있으며, 중, 횡방향의 2-D 레지스터 에러의 비선형 모델은 보고된바 없다. 전자소자 인쇄를 위한 10 마이크로급 레지스터 제어의 구현을 위해서는 비선형성을 고려한 모델링 및 제어기법의 개발이 필수적이다. 본 논문은 중, 횡방향의 비선형 2-D 레지스터 에러에 대한 모델링을 제시하고 시뮬레이션을 통해 레지스터 에러의 동특성을 분석하였다.

후기

이 논문은 2007년 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. Kee-Hyun Shin, Soon-Oh Kwon, “The Effect of Tension on the Lateral Dynamics and Control of a Moving Web,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, Issue 2, 403-411, 2007