

롤투롤 인쇄전자에서의 횡방향 레지스터 동적 특성 모델링

강현규 · 안진현 · 이창우 · 신기현[†]

건국대학교 유연디스플레이 연속공정연구소, [†]건국대학교 기계공학부

A Study on the Dynamic Analysis on the Cross Directional Register in Roll-to-roll e-Printing Systems

Hyun-Kyoo Kang, Jin-Hyun Ahn, Chang-Woo Lee and Kee-Hyun Shin[†]

*FDRC, Konkuk University

[†]School of Mechanical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

For the adaption of roll-to-roll printing method to the printed electronics, it is mandatory to increase the resolution of register errors. Therefore it is desired to derive the mathematical modeling of register error or to develop controller design. The cross direction register error was derived considering both lateral motion of moving web and transverse position of printing roll. The mathematical modeling was validated and the relationship between the lateral motion and register error was analyzed by numerical simulations in various operating conditions using multi-layer direct gravure printing machine. The results could be used for a design of the CD register in the multi-layer printing and the lateral motion caused by translation.

Key Words : Lateral motion, Register, Dynamics, Printed electronics, Roll-to-roll

기호설명

T = operating tension [N]
V = operating velocity [m/s]
L = length of span [m]
t = time constant (L/V) [sec]
y = lateral displacement [m]
E = Young's modulus [N/m²]
I = moment of inertia [m⁴]
x = machine direction
 $\theta, \partial y / \partial x$ = deflection angle [degree]
w = translation of a roll [m]
u = rotation of a roll [degree]
c = half length of a roll [m]
m = number of span between two printing rolls

1. 서 론

롤투롤(roll-to-roll) 인쇄기법을 이용한 유연 전자소자의 저가격, 대량 생산에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이는 전도성 잉크를 사용한 많은 인쇄시도로 이어지고 있다[1]. 롤투롤 인쇄를 위한 연구들은 주로 작은 크기의 불연속적인 기판을 사용하여 잉크젯(inkjet), 스펀코팅(spin coating)과 같은 인쇄기술을 개발하고 있다. 이는 불연속적인 인쇄기술의 높은 접근성과 적은양의 소재로도 인쇄가 가능하기 때문이다. 다른 한편으로 실험실 단위의 작은 크기의 연속 기판을 사용한 그라비어(gravure), 플렉소(flexography), 오프셋(offset) 인쇄기술의 개발이 이뤄지고 있다[2-8].

대면적, 연속 기판의 롤투롤 인쇄를 위해서는 인쇄물과 소재의 움직임에 고려한 레지스터 에러의 연구가 요구된다. 언와인더(unwinder)와 리와인더(rewinder)사이에 위치한 연속적인 인쇄물을 통과하며 기판이 인쇄될 경우, 인쇄물 간의 위상변위가 발생할 뿐만 아니라

[†]E-mail : khshin@konkuk.ac.kr

이송되는 기관은 장력과 변형률, 사행 변위를 겪게 된다. 이러한 위상과 변형률, 사행변위는 종방향과 횡방향의 레지스터 에러의 원인이 되므로 롤투롤 연속 인쇄를 위해서는 레지스터 에러를 최소화 시키기 위한 변형률과 사행변위의 제어가 요구된다.

실시간으로 이송되고 있는 기관에 발생하는 레지스터 에러는 두개의 인쇄롤 사이에서 정의되는데, 이는 이전 스펀에서 인쇄되어 이송된 패턴과 현스팬에서 인쇄되는 패턴사이에서 발생하는 상대적인 위치차이를 의미하며, Fig. 1과 같이 종방향과 횡방향의 2차원으로 정의된다. 이러한 레지스터 에러는 인쇄된 패턴의 표면 지형학적 중요도를 갖는다. 태양전지나 플렉서블 디스플레이(flexible display)와 같은 다층 인쇄 전자소자에서 패턴의 표면상태는 다음 층과의 단락 혹은 누전의 원인이 된다. 레지스터 에러 또한 이러한 전기적 결함의 원인이 될 수 있다. 그러므로 연속적인 인쇄물을 통과하는 기관의 레지스터 에러는 반드시 정밀 제어되어야 한다.

Brandenburg는 인쇄물을 통과하는 기관의 질량평형을 이용하여 1차 미분 방정식의 종방향 선형 레지스터 모델을 유도하였다[9]. 그리고 장력과 컷오프(cut-off) 레지스터 에러 사이의 비간섭 제어기법을 제안하였다[10]. Yoshida는 상류스팬의 장력외란으로 인한 하류스팬의 레지스터 에러를 보상하기 위한 비선형 종방향 레지스터 제어기를 제안하였고, Komatsu는 시간 지연 요소를 고려한 비선형 종방향 레지스터 제어기를 제안하였다[11].

이상의 연구들은 모두 소재이송 방향에 대한 레지스터 제어만을 다루고 있다. 이는 이송되는 기관의 횡방향 외란, 즉 사행 운동이 없다는 가정하에 수행되었기 때문이다. 하지만 다수의 롤러를 통과하는 소재는 특정 범위 이내에서 사행 변위를 갖게 되고, 이는 횡방향 레

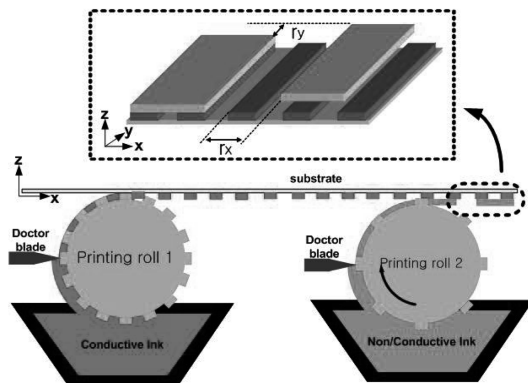


Fig. 1. Register errors between two printing rolls.

지스터 에러의 원인이 된다. 본 논문에서는 이송하는 소재의 사행운동과 기관과 인쇄롤간의 측방향 위치 에러를 이용하여 횡방향 레지스터의 모델을 유도하고, 운전속도 및 인쇄롤의 회전운동과 병진운동에 따른 레지스터 에러의 동특성을 분석하였다.

2. 수학적 모델링

2.1. 측방향 소재의 운동에 대한 모델링

Shelton은 롤 사이의 이송되는 웹을 빔으로 가정하여 롤의 수평 및 정렬오차가 있을 때의 웹의 동적 사행 모델을 유도하였다[12]. 연속공정시스템에서는 Fig. 2와 같이 스펀의 양단에 장력이 가해진 경우 웹을 빔으로 가정할 수 있으며 식(1)의 일반해와 식(2)의 경계조건을 이용하여 식(3)과 같은 탄성 곡률식을 얻을 수 있다.

$$y = C_1 \sinh(Kx) + C_2 \cosh(Kx) + C_3 x + C_4 \quad (1)$$

$$y(0) = y_0, \theta(0) = \theta_0, y(L) = y_L, \theta(L) = \theta_L \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = \frac{f_1(KL)}{L^2} (y_0 - y_L) + \frac{f_2(KL)}{L} \theta_0 + \frac{f_3(KL)}{L} \theta_L \quad (3)$$

단, $K^2 = T/EI$,

$$f_1(KL) = \frac{(KL)^2 (\cosh(KL) - 1)}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

$$f_3(KL) = \frac{KL (\sinh(KL) - KL)}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

$$f_2(KL) = \frac{KL (KL \sinh(KL) - \sinh(KL))}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

Fig. 2는 웹의 탄성곡률을 고려한 웹의 사행 동적 모

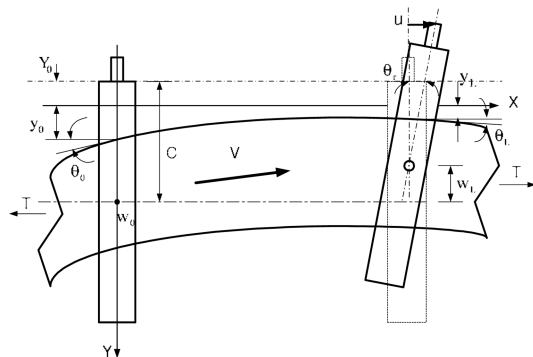


Fig. 2. Boundary condition of Shelton's model.

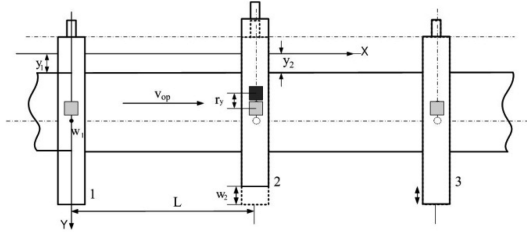


Fig. 3. Schematic of three printing rolls.

델이며, 식(4)로 표현된다. 식(4)를 통해 두 점 사이의 속도 차를 이용하면, 식(5)의 소재의 측방향 가속도식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dy_L}{dt} = V \left(\theta_r - \frac{\partial y_L}{\partial x} \right) + \frac{dw_L}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{d^2 w_L}{dt^2} \quad (5)$$

식(3)을 식(5)에 대입 정리하면 웹 사행에 대한 동적 모델 식(6)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_L}{dt^2} = & a_1 \frac{dy_L}{dt} + a_2 y_L + a_3 \frac{dy_0}{dt} + a_4 y_0 + a_5 u_L + a_6 u_0 \\ & + b_0 \frac{d^2 w_L}{dt^2} + b_1 \frac{dw_L}{dt} + b_2 \frac{dw_0}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \theta = \frac{\partial y}{\partial x}, \quad \theta_r = \frac{u}{c}, \quad \tau = \frac{L}{V}, \quad a_1 = \frac{f_2(KL)}{\tau}, \\ a_2 = -\frac{f_1(KL)}{\tau^2}, \quad a_3 = -\frac{f_3(KL)}{\tau}, \quad a_4 = \frac{f_1(KL)}{\tau^2}, \\ a_5 = \frac{V^2}{LC} f_2(KL), \quad a_6 = \frac{V^2}{LC} f_3(KL), \quad b_1 = 1 \\ b_2 = \frac{f_2(KL)}{\tau}, \quad b_3 = \frac{f_3(KL)}{\tau} \end{aligned}$$

이때, 인쇄구간에서의 횡방향 레지스터 제어는 인쇄롤의 병진운동으로 제어되므로 식(6)은 식(7)과 같이 정리할 수 있으며, 식(7)을 라플라스 변환 하여 y_L 을 출력으로, y_0 와 w_0 , w_L 를 입력으로 갖는 전달함수를 식(8)과 같이 정리 하였다.

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = a_1 \frac{dy_L}{dt} + a_2 y_L + a_3 \frac{dy_0}{dt} + a_4 y_0 + b_1 \frac{d^2 w_L}{dt^2} \quad (7)$$

$$+ b_2 \frac{dw_L}{dt} + b_3 \frac{dw_0}{dt}$$

$$Y_L(s) = A(s)Y_0(s) + B(s)W_L(s) + C(s)W_0(s) \quad (8)$$

단, $A(s) = [a_3 s + a_4] / [s^2 - a_1 s - a_2]$, $B(s) = [b_1 s^2 + b_2 s] / [s^2 - a_1 s - a_2]$, $C(s) = b_3 s / [s^2 - a_1 s - a_2]$.

2.2. 횡방향 레지스터 모델링

레지스터 에러는 Fig. 1에서 2개의 인쇄롤을 통해 인쇄된 패턴의 상대적인 위치차이를 의미하며, 종방향과 횡방향의 에러를 각각 R_x , R_y 로 나타내고 있다. Fig. 3의 개략도에서 3개의 인쇄롤을 통과하는 기관을 살펴보자. 첫번째 인쇄롤에서 인쇄된 패턴이 웹 경로를 따라서 두번째 인쇄롤로 이송되어 온다. 이때 두번째 인쇄롤을 통해 패턴이 인쇄될 때에, 이전에 인쇄된 패턴과 현재 인쇄하는 패턴 사이에서 발생하는 측방향 상대 거리 차이로 인해 횡방향 레지스터 에러가 발생한다.

만약 기관이 하류 스펜으로 측방향의 움직임 없이 이송된다면, 횡방향 레지스터 에러는 인쇄롤 간의 측방향 거리 차이 만큼 발생할 것이다. 하지만 하류로 이송되는 기관은 측방향 움직임, 즉 사행 외란이 존재하며, 이는 횡방향 레지스터 에러의 원인이 된다. 결국, 인쇄구간에서는 이전스펜 인쇄 패턴의 이송위치를 비교하여 횡방향 레지스터 에러가 최소화 되도록, 이송되는 기관의 사행변위와 인쇄롤의 횡방향 위치를 제어 해야 한다. 상류스펜에서 인쇄된 패턴이 현 스펜까지 이송될 때의 시간 지연은 시정수 L/V 만큼 소요되므로, 횡방향 레지스터 에러는 식(9)와 같이 정의한다.

$$r_{y,n}(t) = [y_n(t) - w_n(t)] - [y_{n-1}(t - \tau) - w_{n-1}(t - \tau)] \quad (9)$$

단, $r_{y,i}(t) = i$ 번째 롤에서의 횡방향 레지스터 에러, $y_i(t) = i$ 번째 롤 위에서의 소재의 측방향 위치, $w_i(t) = i$ 번째 롤의 측방향 위치이다.

이때, 식(9)에서 횡방향 레지스터 에러는 인접하는 인쇄구간에서 시간지연을 갖고 인쇄된 두 개의 패턴간의 상대 위치차이를 의미한다. 소재의 측방향 위치는 식(8)을 통해 계산되며, 인쇄롤의 측방향 위치는 입력 값이다. 식(9)를 라플라스 변환하면 식(10)과 같다.

$$R_{y,n}(s) = [Y_n(s) - W_n(s)] - [Y_{n-1}(s) - w_{n-1}(s)]e^{-s\tau} \quad (10)$$

인쇄구간 내에서 모든 스펜의 길이가 동일하다고 가

정한다면, 식(8)은 식(11)로 확장할 수 있다. 식(11)을 식(10)에 대입하면, 식(12)를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 Y_{n-1}(s) &= A(s)Y_{n-2}(s) + B(s)W_{n-1}(s) + C(s)W_{n-2}(s) \\
 Y_n(s) &= A(s)Y_{n-1}(s) + B(s)W_n(s) + C(s)W_{n-1}(s) \quad (11) \\
 R_{y,n}(s) &= A(s)[Y_{n-1}(s) - Y_{n-2}(s)e^{-\tau_s}] \\
 &+ B(s)[W_n(s) - W_{n-1}(s)e^{-\tau_s}] \\
 &+ C(s)[W_{n-1}(s) - W_{n-2}(s)e^{-\tau_s}] \\
 &- [W_n(s) - W_{n-1}(s)e^{-\tau_s}] \quad (12)
 \end{aligned}$$

또한 롤투롤 인쇄시스템은 많은 아이들롤들이 인쇄 롤 사이에서 존재하는데, 이는 주름방지 혹은 요구되는 소재의 이송경로를 만들기 위함이다. 결국 식(9)의 횡방향 레지스터 에러는 아이들롤을 포함한 식(13)으로 확장된다. 이때 식(11)을 식(13)에 대입하고 라플라스 변환하면 식(14)를 얻는다.

$$r_{y,n}(t) = [y_n(t) - w_n(t)] - [y_{n-m}(t - \tau_m) - w_{n-m}(t - \tau_m)] \quad (13)$$

$$R_{y,n}(s) = [Y_n(s) - W_n(s)] - [Y_{n-1}(s) - W_{n-1}(s)]e^{-\tau_s} \quad (14)$$

단, m 은 두 개의 인쇄롤 사이에서 아이들 롤을 통해 구성되어 있는 스펠의 개수이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

수치적 시뮬레이션을 통하여 횡방향 레지스터와 사행의 관계를 분석한다. 식(14)를 통해 유도된 레지스터 모델을 사용하고, 인쇄롤의 병진운동을 입력으로 할 때의 레지스터와 사행의 관계를 살펴보았다. MATLAB SIMULINK를 사용하여 Fig. 3과 같은 세개의 인쇄롤을 갖는 모델링을 구현하였다. 이에 대한 블록선도는 Fig. 4와 같으며, 시뮬레이션에서 사용된 조건은 Table 1에 나타내었다.

두번째 인쇄롤의 병진운동을 5초에서 0.75 mm만큼 계단 입력으로 발생시킬 때의 횡방향 레지스터와 사행 움직임의 응답을 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 6에서 인쇄롤의 병진운동은 5초에서 과도 상태의 소재 사행 변위를 일으키며, 이는 시간지연(L/V)을 갖고 다음 스펠으로 전달되어 세번째 인쇄롤위에서의 소재의 사행 외란으로 작용한다.

Table 1. The Simulation conditions

Parameter	Value
Operating tension (N)	100
Operating velocity (m/min)	30
Length of span between idle rolls (m)	1
Length of span between printing rolls (m)	8
Proportional gain of CD register controller	0.01
Derivative gain of CD register controller	0.15
Young's modulus of OPP substrate (GPa)	3.6
Width of OPP substrate (m)	1
Thickness of OPP substrate (micron)	12

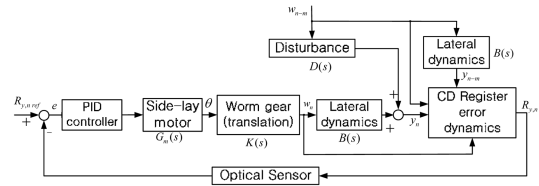


Fig. 4. Block diagram of CD register and lateral motion.

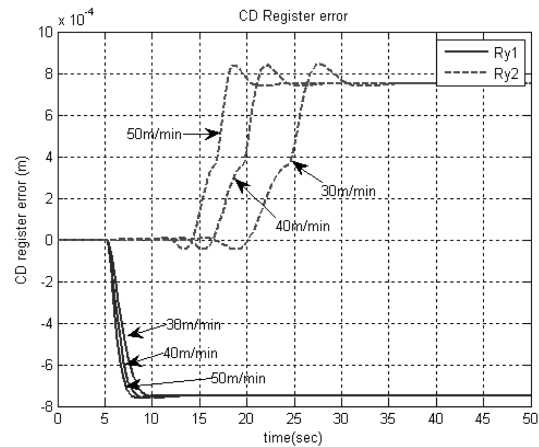


Fig. 5. CD registers error at the second and third printing roll.

또한 이러한 소재의 사행변위는 Fig. 5에서 횡방향 레지스터 에러의 원인이 되어, 같은 크기와 반대 방향을 가지는 횡방향 레지스터 에러가 인접하는 인쇄롤 사이에서 발생하게 된다. 또한 이송속도가 증가할수록 시정수가 감소하므로, 외란의 전달 시간이 감소함을 알 수 있다.

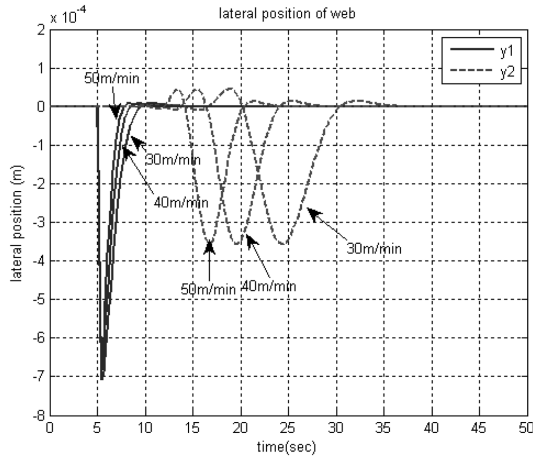


Fig. 6. Lateral positions of web at the second and third printing roll.

4. 결 론

전자소자 롤투롤 인쇄를 위한 횡방향 레지스터의 수학적모델을 유도하고, 사행 움직임과의 관계를 분석하였다. 레지스터는 상대적인 위치오차로서 인접한 인쇄물 간에 발생하므로 연속 인쇄물을 통한 전자소자의 제작을 위해서는 이송되는 소재의 사행 움직임과 인쇄물의 측방향 위치를 고려하여 횡방향 레지스터 에러를 최소화 해야 한다. 또한 한번 발생한 레지스터 에러는 다음스펜으로 전달 되므로 이에 대한 제어기의 개발이 추후 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원(No. K2070 1040600-09A0404-05410) 및 “서울시 산학연 협력사업(10848)”의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Yan, Z. Chen, Y. Zheng, C. Newman, J. Quinn, F. Dotz, M. Kastler, A. Facchetti, “A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors,” Nature, Vol. 447, pp. 679-687, 2009.
2. S. Forrest, “The path to ubiquitous and low-cost

- organic electronic appliances on plastic,” Nature, Vol. 428, pp. 911-918, 2004.
3. T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, T. Sakurai, T. Someya, “A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches,” Nature, Vol. 6, pp. 413-417, 2007.
4. A. Briseno, S. Mannsfeld, M. Ling, S. Liu, R. Tseng, C. Reese, M. Roberts, Y. Yang, F. Wudl, Z. Bao, “Patterning organic single-crystal transistor arrays,” Nature, Vol. 444, pp. 913-917, 2006.
5. S. Moller, C. Pelov, W. Jackson, C. Taussig, S. Forrest, “A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory,” Nature, Vol. 426, pp. 166-169, 2003.
6. Mildner, W., “OE-A The international network for the organic and printed electronics industry,” 1st Int. Conference on R2R Printed electronics 2008, Vol.1, pp. 49-67, 2008.
7. Kang, H. K. and Shin, K. H., “Matching Design of a Tension Controller with Pendulum Dancer in Roll-to-Roll Systems,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 26, No.6, pp. 81-89, 2009.
8. O.S. Lee, D.H. Kim, “Effects of crack geometries on reliabilities using probability theories.” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 3, pp. 119-126, 2009
9. G. Brandenburg, “New mathematical models for web tension and register error,” in Proc. 3rd Int. IFAC Conf. Instrum. Autom. Paper, Rubber Plastics Und., pp. 411-438, 1977.
10. G. Brandenburg, S. Geibenberger, A. Klemm, “Non-interacting control of web force and cut-off register errors in rotary printing presses with electronic line shafts,” EPE Journal, Vol.16, No.2, pp.38-44, 2006.
11. H. Komatsu, T. Yoshida, S. Takagi, T. Shen, Y. Muto, “Improvement of Printing Accuracy via Web Handling Control in Multi-Colors Printing Machines,” International Conference on Control, Automation, and Systems, pp.953-956, 2007.
12. J. J. Shelton, “Lateral Dynamics of a Moving Web”, Ph. D. thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1968.

접수일: 2010년 5월 28일, 심사일: 2010년 6월 10일
 게재확정일: 2010년 6월 15일