

◆ 특집 ◆ 차세대 기능성 유연필름 제조기술

데이터 보상을 통한 롤투롤 인쇄 장비의 레지스터 오차 인식 개선 및 제어

Improvement of Recognition of Register Errors and Register Control in Roll-to-roll Printing Equipment by Data Compensation

전성웅¹, 박종찬², 남기상², 김 철³, 김동수⁴, 김충환^{1,✉}
Sung Woong Jeon¹, Jong-Chan Park², Ki-Sang Nam², Cheol Kim³,
Dong Soo Kim⁴, and Chung Hwan Kim^{1,✉}

¹ 충남대학교 융합시스템공학과 (Department of Convergence System Engineering, Chungnam National University)

² 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

³ 충남대학교 기계금속공학교육과 (Department of Mechanical & Metallurgical Engineering Education, Chungnam National University)

⁴ 한밭대학교 글로벌융합학부 (School of Global Convergence Studies, Hanbat National University)

✉ Corresponding author: mech@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-8584

Manuscript received: 2014.9.2 / Revised: 2014.10.13 / Accepted: 2014.10.13

Register control of roll-to-roll printing system for printed electronics requires accurate measurement of register errors. The register marks used for the recognition of patterns position between layers have inherently defects due to low printability of register marks themselves, which brings out inaccurate register accuracy and consequently low performance of printed electronics devices. In this study, the compensation methods for the unrecognized or missing register data are proposed to improve the recognition and consequently the control performance of register accuracy in roll-to-roll printing equipment. The compensation methods using the prior data and the linear interpolation are proposed and compared with the case without compensation for the simulation as well as experiment. Only the linear interpolation method could successfully compensate the missing data and consequently improve the register control performance. We should apply the compensation process of the register errors to improve the register control accuracy in the roll-to-roll printing equipment.

Key Words: Printed electronics (인쇄전자), Register error (레지스터 에러), Data compensation (데이터 보상), Register control (레지스터 제어)

기호설명

Δx_i = i -th CD register error

Δy_i = i -th MD register error

a = slope of register error

b = offset of error errors

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

b' = mean of offset error
 n = number of register data

1. 서론

인쇄전자(printed electronics)는 기능성 잉크를 기판에 적층, 중첩 인쇄하여 전자소자를 제조하는 기술로, 잉크의 전기적 성능, 인쇄성(printability), 중첩(register) 정밀도에 따라 생산되는 전자소자의 성능과 신뢰성, 수율이 결정된다. 따라서, 이러한 인자들의 성능 향상을 위해 연구가 진행된다. 이 중에서 중첩 정밀도는 장비에서 해결해야 하는 문제로, 특히 연속 공정인 롤투롤(roll-to-roll) 인쇄 장비에서는 매우 어려운 기술 중 하나이다.¹⁻³ 롤투롤 인쇄 장비는 폴림부, 인쇄부, 감김부로 나뉘며 인쇄부에서의 중첩 인쇄 시 발생하는 레지스터 오차는 건조부의 높은 온도에 의한 소재의 수축, 팽창과 같은 변형에 의해 발생할 수 있고, 각 인쇄부 패턴 롤의 가공 정밀도에 의한 롤 지름의 차이 등에 의해 발생할 수 있다.^{2,4} 레지스터 오차는 소재 이송 방향(machine direction: MD)과 소재 이송 방향과 수직 방향(cross direction: CD)으로 발생한다.^{5,6} 중첩 인쇄 시 레지스터 오차를 줄이기 위한 레지스터 제어(register control)는 정밀한 중첩 정밀도를 위해 인쇄부의 패턴 롤에 위상 보상을 통한 제어, 속도에 의한 제어, 장력 변화에 의한 제어 등을 통해 이루어진다.

레지스터 오차 제어 시, 일반적으로 중첩 인쇄 시 각 층을 구성하는 패턴과 함께 레지스터 마크(register mark)를 인쇄하고, 이렇게 각 층에서 인쇄된 레지스터 마크의 상대적인 위치 오차를 레지스터 오차(register errors)로 정의한다. 즉, 마크의 레지스터 오차를 각 층간의 패턴 위치 오차로 정의하고, 이러한 레지스터 마크의 오차를 줄이는 것이 패턴 간의 위치 오차를 줄이는 것에 해당한다.^{2,3} 따라서, 정밀한 중첩 인쇄를 위해서는 정확한 레지스터 오차 측정이 필수적이며, 정확한 레지스터 오차 측정을 위해서는 정확한 레지스터 마크의 인식이 필수적이다. 그러나, 패턴 롤에 각인된 레지스터 마크가 기판(substrate)에 인쇄되고, 인쇄된 레지스터 마크가 카메라와 같은 마크 인식 장치에 인식되어 정확한 오차가 얻어져야 하지만, Fig. 1과 같이 레지스터 마크의 인쇄성이 떨어져 인식이 안되거나 레지스터 마크가 인식 장치의 인식 범위에 벗어날 경우 정확한 레지스터 오차를

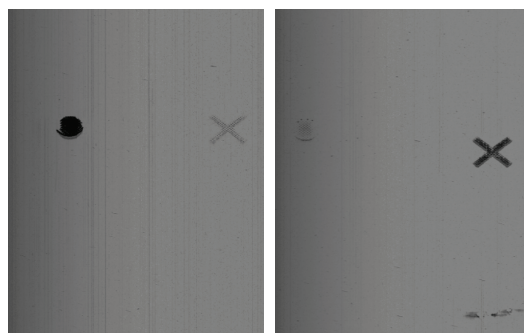


Fig. 1 Examples of unrecognized register marks

측정할 수 없게 된다.⁷ 인쇄전자용 롤투롤 장비의 정밀한 레지스터 제어를 위한 연구는 스펀의 장력, 건조기의 건조온도 등의 공정 변수가 웹이 미치는 영향 등, 주로 인쇄 공정과 관련된 연구가 주를 이루고 있으며, 레지스터 오차 인식 시 발생하는 문제점 및 해결 방안에 대해서는 연구가 미미하다.

본 연구에서는 롤투롤 인쇄 장비에서 레지스터 마크가 인식되지 않은 경우, 데이터 보상(data compensation)을 통해 인식되지 않은 마크의 레지스터 오차를 처리하는 예외 처리 기법(exception process)에 대해 제안하고, 실험적으로 데이터 보상의 효과를 검증한다.

2. 레지스터 오차 데이터 보상

레지스터 오차는 1도 인쇄부에서 인쇄된 1도 레지스터 마크와 2도 인쇄부에서 인쇄된 레지스터 마크의 위치 차이로 정의되며, 2차원 평면 상에서 정의되므로 Fig. 2와 같이 CD 오차 Δx 와 MD 오차 Δy 로 나타낼 수 있다. Δx 는 주로 웹의 사행이 주원인이고, Δy 는 웹의 열 변형, 장력 변화 등이 주 원인으로 제어를 하지 않을 경우 기울기를 가진 선형적인 오차 형태로 나타난다.^{2,3}

따라서, MD 레지스터 제어는, 오차의 기울기를 보상해주는 기울기(slope) 제어와 오차의 위상을 보상해주는 오프셋(offset) 제어가 수행되어야 한다. 기울기 제어는 패턴 롤과 블랭킷 롤의 선속도 차를 발생시켜 오차의 기울기를 보상하고, 오프셋 제어는 패턴 롤에 펄스 신호를 보냄으로써 인위적으로 위상을 이동시켜 오차를 감소시킨다.³

일정량의 레지스터 오차 데이터 행렬에서 수치 해석적 방법인 최소 자승법(least square method: LSM)을 이용해 각각의 기울기 값 a 와 오프셋 값 b

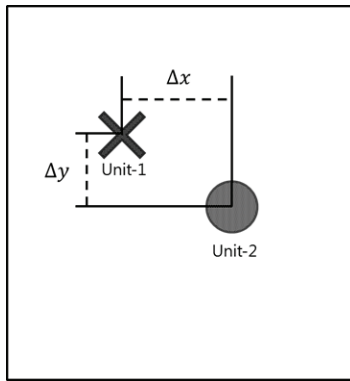


Fig. 2 Register marks and MD, CD register errors

를 획득하고, 각각의 a 와 b 는 식(1)-(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{(n \sum (i * y_i) - \sum i \sum y_i)}{(n \sum (i^2) - (\sum i)^2)} \quad (1)$$

$$b = \frac{(\sum (i * y_i) \sum i - \sum i^2 \sum y_i)}{(n \sum i^2) - n \sum i^2} \quad (2)$$

최소 자승법을 이용해 구한 읍셋 값 b 는 y 축 절편 값을 나타낸다. 읍셋 값 b 를 이용한 위상 제어는 레지스터 오차의 기울기가 클 경우, 제어 시간이 길다는 단점을 갖고 있다. 이를 보완하기 위한 위상 제어 방법으로 MD 축 레지스터 오차의 평균을 읍셋 값 b' 으로 사용하였으며 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$b' = \frac{\sum y_i}{n} \quad (3)$$

여기서 y_i 는 i 번째 오차, n 은 데이터의 개수를 나타낸다.

Fig. 1과 같이 1도, 2도 레지스터 마크의 인쇄성이 떨어질 경우 비전 시스템에서 정확한 오차를 획득할 수 없으며 마크의 왜곡이 심할 경우 오차를 획득하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 임의로 정한 오차 값이 출력되며, 결과적으로 최소 자승법을 이용해 구해진 기울기 값 a 와 읍셋 값 b' 의 정확한 값을 계산하지 못해 정밀한 제어가 이루어지지 않게 된다.

레지스터 오차 획득 결과의 한 예로서, Fig. 3과

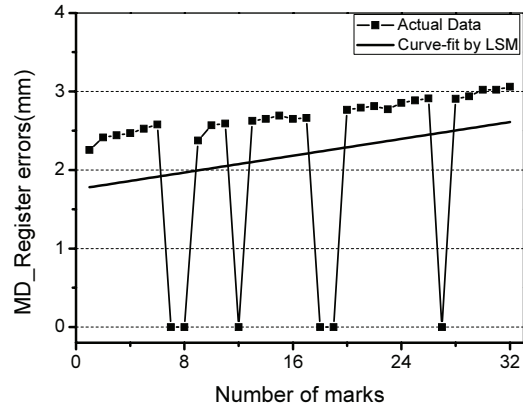


Fig. 3 Register errors and linear curve-fit by least square method

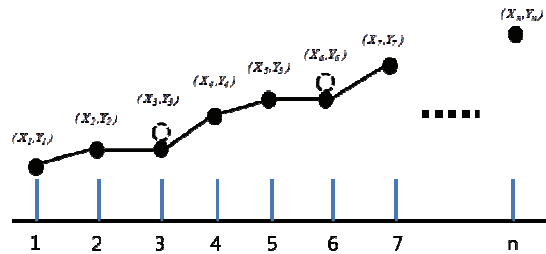


Fig. 4 Compensation of missing data using prior data

같은 그래프를 얻었다. 획득 불가 데이터 값은 임의의 값 0으로 정하였다. 획득한 레지스터 오차 결과 값을 이용해 최소 자승법을 수행한 결과, a 는 0.0268, b' 는 2.1954를 얻었다. 이는 실제와 차이를 나타내며, 정확한 제어가 이루어지지 않는다. 이를 해결하기 위해 레지스터 오차 획득이 불가능할 경우, 직전 오차 값으로 대체하는 방법이 있을 수 있으며, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(\Delta x_{i-1}, \Delta y_{i-1}) = (\Delta x_i, \Delta y_i) \quad (4)$$

이 데이터 보상 방법은 Fig. 4와 같이 도식적으로 나타낼 수 있다. 하지만 이 방법은 연속적으로 레지스터 오차 미 획득 시, 결과에 대한 왜곡이 발생하게 되고, 기울기 값 a 와 읍셋 값 b' 를 정확하게 획득하는 것이 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 수치 해석 방법인 1차 선형 보간법(linear interpolation)을 사용한다.

이 방법은 이전 오차 데이터와 이후 오차 데이터를 이용한 방법으로, 실제 오차 값과 가장 근사

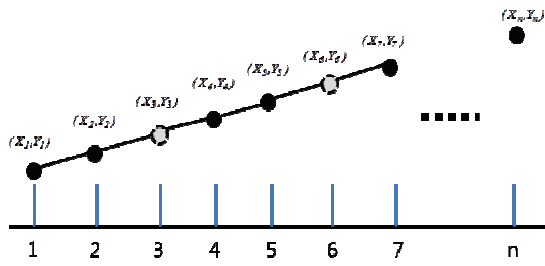


Fig. 5 Compensation of missing data using linear interpolation

한 보상 값을 획득하는 것이 가능하다. 이 방법은 식(5)-(7)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 5와 같이 표현 가능하다.

$$(\Delta x_{i+1}, \Delta y_{i+1}) = \left(\frac{\Delta x_{i+n+1} - \Delta x_i}{n+1} + \Delta x_i, \frac{\Delta y_{i+n+1} - \Delta y_i}{n+1} \right) \quad (5)$$

$$(\Delta x_{i+2}, \Delta y_{i+2}) = \left(\frac{2(\Delta x_{i+n+1} - \Delta x_i)}{n+1} + \Delta x_i, \frac{2(\Delta y_{i+n+1} - \Delta y_i)}{n+1} \right) \quad (6)$$

$$(\Delta x_{i+M}, \Delta y_{i+M}) = \left(\frac{M(\Delta x_{i+n+1} - \Delta x_i)}{n+1} + \Delta x_i, \frac{M(\Delta y_{i+n+1} - \Delta y_i)}{n+1} \right) \quad (7)$$

제안한 방법의 비교를 위해 레지스터 오차 미 획득이 없는 일정량의 데이터를 임의의 미획득 데이터를 추가하여 제안한 방법을 적용한 데이터 보상 결과를 시뮬레이션 하였다. 실제 레지스터 오차는 Fig. 6과 같고, Fig. 7은 실험적으로 얻어진 Fig. 6의 데이터에 임의의 미획득 데이터를 추가한 보상 전 결과, 전(previous) 데이터를 이용한 보상, 선형 보간을 수행한 결과이다. Table 1은 보상 전, 전 데이터를 이용한 보상, 선형 보간에 의해 얻어진 a와 읍셋값 b'를 보여준다.

시뮬레이션 결과, 실제 데이터에서 획득한 기울기 값 a는 선형 보간법을 이용해 보상한 경우와 가장 유사한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 기울기가 레지스터 오차의 가장 큰 비중을 차지하는 것을 고려할 때, 이 기울기의 값을 정확히 추정하는 것이 중요하므로, 선형 보간법을 이용한 경우가 가장 정확한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.

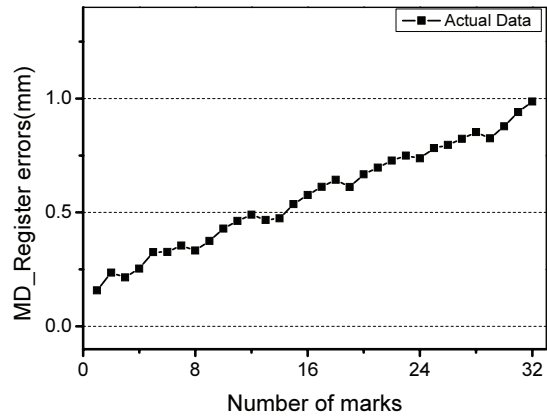


Fig. 6 Experiment result of register errors

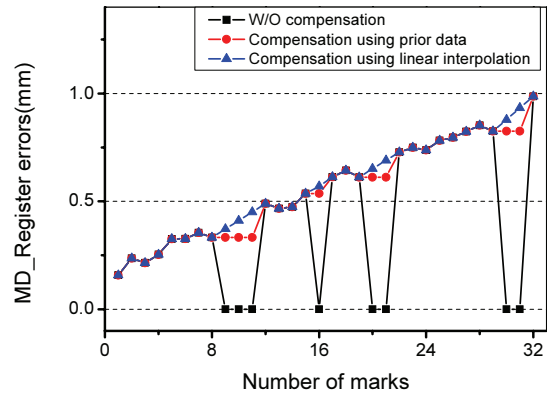


Fig. 7 Data compensation results of register errors

3. 레지스터 제어의 실험적 검증

이전 데이터를 이용한 데이터 보상, 선형 보간법을 이용한 데이터 보상을 제시하였으며 시뮬레이션을 통해 선형 보간법을 이용한 데이터 보상이 실제 데이터를 가장 유사하게 재현하는 것을 확인하였다. 실제 실험에서는 동일한 레지스터 데이터를 이용하지는 못하지만, Table 2와 같이 동일한 장비 및 실험 조건 하에서 데이터 보상 없는 경우, 이전 데이터를 이용한 경우, 선형 보간을 이용한 경우의 세 가지에 대해 레지스터 제어 실험을 수행하였다.

Fig. 8의 결과는 보상을 사용하지 않고 레지스터 제어를 수행한 결과로 획득하지 못한 데이터를 0으로 처리하였다. 제어에 영향을 미치는 32개의 레지스터 마크 중 평균적으로 7개의 마크가 인식되지 못했다. 따라서 기울기, 읍셋 제어 시 정확하

Table 1 Slope and offset values of register data before and after data compensation

| Processing Type | Slope(a) | Offset(b') |
|--|----------|------------|
| Actual data (Fig.6) | 0.0245 | 0.5599 |
| W/O compensation (data w/ intended missing ones) | 0.0162 | 0.4162 |
| Compensation using prior data | 0.0240 | 0.5540 |
| Compensation using linear interpolation | 0.0245 | 0.5711 |

Table 2 Experimental condition of register control

| Experimental condition | Value |
|-------------------------|-------|
| Web velocity(mm/s) | 20 |
| Dry temperature(°C) | 140 |
| Number of register mark | 32 |

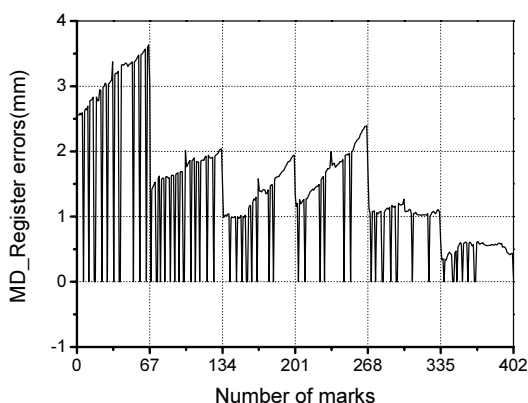


Fig. 8 Register error control result w/o data compensation

지 않은 a 와 b' 값의 획득으로 인해 목표값에 도달하는 시간이 오래 걸리며 정밀한 제어가 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 획득하지 못한 데이터 개수가 많을수록 제어 성능이 감소한다. Fig. 9의 결과는 데이터 획득을 못 할 경우 이전 데이터를 사용하는 보상 방법을 사용한 레지스터 제어 결과로, 기울기 에러가 점점 감소하고 있으나 기울기가 평탄화 되는 시간이 길며 정확하지 않은 데이터로 인해 제어 성능이 일정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 특히, 이전 데이터를 이용한 보상 방법은 이전 레지스터 오차가 잘못된 값이 인식될 경우 정밀한 제어가 어렵다. 예로써, 제어가 이루어진 첫 번째 단계인 67개의 데이터 부근부터 감소했던 기울기가 두 번째 제어 단계인 134개의 데이터 이후에는 오히려 증가하여 불안정해지는 것

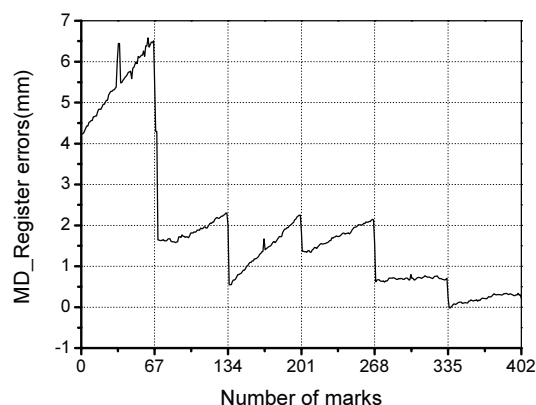


Fig. 9 Register error control result w/ data compensation using prior ones

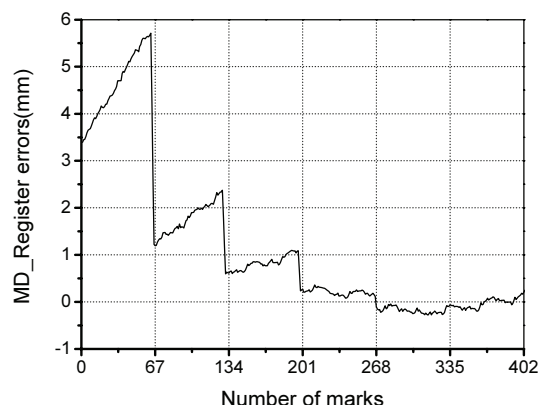


Fig. 10 Register error control result w/ data compensation using linear interpolation

을 볼 수 있다. Fig. 10의 결과는 선형 보간법을 이용한 레지스터 제어 결과로 안정적인 기울기, 오프셋 제어를 확인할 수 있다. Fig. 9와 비교할 경우, 제어가 수행되는 단계마다 기울기가 점차 감소하여 0으로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 즉, 획득하지 못한 데이터에 대해 가장 정확한 값을 통해 제어했기 때문에 기울기 제어 시 보상을 하지 않은 경우, 이전 데이터를 사용한 경우와 비교했을 때 빠른 시간에 기울기가 안정화 되며, 비교적 정밀한 오프셋 제어가 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 정밀한 레지스터 제어를 위해 비전 시스템에서 인식하지 못한 레지스터 오차 데

이더를 처리하는 데이터 보상 기법을 제안하였다. 레지스터 마크의 인쇄불량으로 인해 오차 데이터 획득이 안될 경우 정밀한 기울기 오차와 옵셋 오차를 획득하기 어렵다. 따라서 이전 데이터를 사용하는 방법과 선형 보간을 통한 데이터 보상을 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 두 가지 방법에 대해 비교하였다. 시뮬레이션 비교 결과 선형 보간을 통한 데이터 획득이 실제 데이터와 비슷한 것을 확인하였다. 또한 데이터 보상을 하지 않은 경우, 두 가지 보상 방법을 적용한 경우에 대해 실제 레지스터 제어 실험을 진행하였으며 그 결과 이전 데이터를 사용하는 보상 방법 사용 시 레지스터 제어는 가능하나 제어 시간이 오래 걸리고 정밀한 제어가 어려웠으며, 선형 보간법을 이용한 결과가 기울기 제어와 옵셋 제어에서 가장 제어 성능이 뛰어난 것을 확인하였다. 정밀한 레지스터 제어를 위해서는 데이터 보상 기법 적용이 필수적이며 특히 선형 보간법을 이용한 예외처리 기법 사용 시 정밀한 중첩인쇄가 가능할 수 있음을 보여주었다.

후 기

이 연구는 2104 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

REFERENCES

1. Kim, C. H., Jo, J., and Lee, S. H., "Design of Roll-to-Roll Printing Equipment with Multiple Printing Methods for Multi-Layer Printing," *Review of scientific instruments*, Vol. 83, No. 6, Paper No. 065001, 2012.
2. Kim, C. H., You, H. I., and Lee, S. H., "Register Control of Roll-to-Roll Gravure-offset Printing Equipment Considering Time Difference between Measurement and Actuation," *Proc. IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*, Vol. 226, No. 11, pp. 2726-2738, 2012.
3. Kim, C. H., You, H. I., and Jo, J., "Register Control of Roll-to-Roll Printing System Based on Statistical Approach," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 5S1, Paper No. 05DB08, 2013.
4. Seong, J. W., Lee, J. S., Hämäläinen, H., Lee, D., and Shin, K. H., "A Study on the Tension Model Considering the Changes in the Thermal Characteristics of Polymer Film in Roll-to-Roll Systems," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 275-276, 2012.
5. Kang, H. K., Lee, C. W., and Shin, K. H., "A Novel Cross Directional Register Modeling and Feedforward Control in Multi-Layer Roll-to-Roll Printing," *Journal of Process Control*, Vol. 20, No. 5, pp. 643-652, 2010.
6. Kang, H. K., Lee, C. W., Lee, J. M., and Shin, K. H., "Cross Direction Register Modeling and Control in a Multi-layer Gravure Printing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 391-397, 2010.
7. Nam, K. S., "Precise Register Control of Roll-to-Roll Continuous Process System using Image Processing," M.Sc. Thesis, School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 2014.