

롤투롤 인쇄전자공정에서 중첩정밀도 향상을 위한 정렬패턴과 위치 측정시스템

서영원* · 임성진** · 오동호*†

* 충남대학교 기계공학과, ** 서울대학교 차세대융합기술연구원

Alignment Patterns and Position Measurement System for Precision Alignment of Roll-to-Roll Printing

Youngwon Seo*, Seongjin Yim** and Dongho Oh*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Advanced Institutes of Convergence Technology, Seoul Nat'l Univ.

(Received July 27, 2012 ; Revised August 10, 2012 ; Accepted August 15, 2012)

Key Words: Printed Electronics(인쇄전자), Roll-to-roll Printing(롤투롤 인쇄), Multi-layer Printing(다층 인쇄), Alignment Pattern(정렬 패턴), Web Position Measurement(웹 위치 측정)

초록: 인쇄전자는 RFID 나 유연 디스플레이 등의 전자회로나 소자를 인쇄방식으로 제작하는 공정이다. 특히 롤투롤과 같은 웹 이송방식 프린팅은 얇은 필름형태의 웹(Web)에 그라비아 인쇄나 고속 잉크젯과 같은 방법으로 이송중인 웹 상에 회로를 형성하는 공법이다. 이 공정은 생산단가가 저렴하고 고속생산이 가능하다는 이점이 있다. 다층구조를 가지는 회로나 디바이스를 생산할 때, 층과 층을 얼마나 정확하게 중첩시켜 인쇄하는가 하는 것은 인쇄된 전자회로의 집적도와 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 인쇄전자공법을 상용화하기 위해서 높은 중첩정밀도 구현이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 롤투롤 인쇄방식에서 중첩정밀도의 향상을 위한 위치측정 시스템을 제안하고 신뢰성을 확인하였다. 또한 웹이 변형되었을 때의 측정 강인성도 실험적으로 확인하였다.

Abstract: Printed electronics is a technology used for forming electronic circuits or devices, and it is used in the manufacture of many products such as RFID tags, solar cells, and flexible display panels with a much lower cost than in the case of semiconductor process technology. Web-guide-type printing such as roll-to-roll printing is a method used to produce printed electronic devices in a large volume. To commercialize such products, highly precise alignment between printed layers is required. In this study, a highly precise alignment system is proposed, and some experimental results are compared with those obtained using a laser surface vibrometer to illustrate the reliability of the proposed system. The robustness of the proposed system to web deformation is also considered experimentally.

- 기호설명 -

L : 웹의 이송거리
 L_p : 정렬패턴의 폭
 K_p : 정렬패턴의 수
 l_s, l_c : 광학 엔코더의 출력 신호
 X_s, X_c : 정현파 신호의 크기
 V : 웹의 이송속도

m : 주파수 체배 수
 K_{comp} : 보간에 의해 보상되는 수
 L_{comp} : 보간된 이송거리
 L_1, L_2 : 웹 양단의 이송거리
 L_w : 웹의 폭
 θ : 웹의 사행각

1. 서론

† Corresponding Author, dongho@cnu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

인쇄전자(Printed Electronics)에서 웹 이송방식 프린팅은 플라스틱이나 금속으로 된 얇은 필름 형태

의 웹(Web)에 그라비아(Gravure) 인쇄나 고속 잉크젯과 같은 방법으로 회로를 형성하는 공법이다.^(1,2) 이는 반도체 공정에 의한 제품 중 집적도가 상대적으로 낮은 제품들을 대상으로 하며, 기존의 노광공정, 성막공정, 에칭공정 등 생산단가가 높은 공정을 대체 할 수 있다. 인쇄전자는 전도성 잉크를 웹 위에 직접 인쇄하여 여러 층의 회로를 형성하는 방법으로 전자소자를 비교적 경제적이고 고속으로 제조하는 것을 말한다. 웹 이송방식의 인쇄공법을 통해 다층의 회로를 형성하는데 가장 중요한 기술 중 하나가 인쇄 층간의 중첩정밀도이다. 예를 들어 Field-effect transistor의 게이트 전극은 소스와 드레인 전극 사이에 위치하는데, 만약 게이트 전극의 위치가 잘못되면 채널상의 field-effect에 영향을 주므로 소자의 특성 열화가 일어난다. 그러므로 이러한 다층구조에서 층들 사이를 정확하게 위치 정렬하는 것은 인쇄된 전자회로의 성능을 결정짓는 중요한 요소이다.^(3,4)

인쇄 공정에서 중첩정밀도는 웹의 이송거리와 위치 측정의 정밀도, 제어기 설계의 최적화 정도,

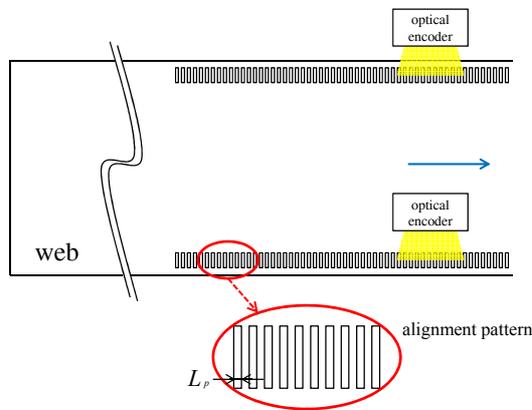


Fig. 1 Alignment patterns and web position measurement system

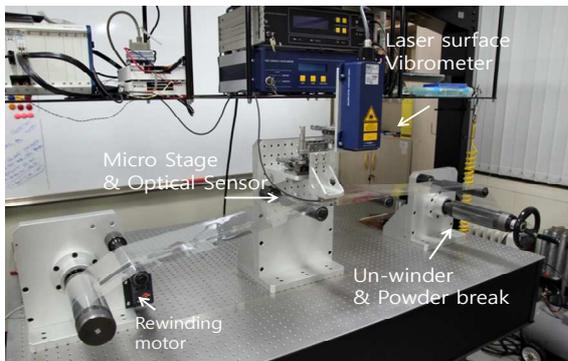


Fig. 2 Experimental setup for web position measurement system

기계적 작동의 정밀 구현에 의해 결정된다. 그 중 웹의 측정 정밀도 확보가 가장 선행되어야 한다. 현재의 측정 시스템으로는 CCD 비전시스템을 이용하여 웹의 중첩정밀도와 인쇄품질을 측정하는 방식과, 적외선 센서 또는 초음파 센서를 이용하여 인쇄될 웹의 모서리를 검출하는 방식이 있다. 이와 같은 방법으로 측정된 데이터는 웹의 사행방향(진행의 수직방향) 제어에 이용된다.⁽⁵⁻⁷⁾ 하지만 비전시스템의 경우 영상처리속도에 의한 신호처리 시간지연이 고속의 대량생산에 제한요소가 될 수 있고, 초음파 및 적외선센서를 이용한 웹의 모서리 검출방법은 웹의 가공정밀도에 의존하게 된다. 따라서 시간지연이 비교적 적으며, 웹의 가공정밀도에 의존하지 않는 측정방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 신뢰도와 정밀도가 높은 측정시스템을 구성하기 위해서 광학측정시스템의 설계 및 평가를 수행하였다.

제안된 광학측정시스템은 Fig. 1에서와 같이 웹의 양단에 직접 인쇄한 정렬패턴과 광학 측정을 통하여 실시간으로 웹의 진행방향 변위와 속도 그리고 사행각을 측정하는 시스템이다. 적외선 센서 또는 초음파 센서를 이용해 웹의 모서리를 검출하는 방식이 웹의 끝 단 가공정밀도에 의존하는 반면 제안한 방법은 정렬패턴을 직접 광학스캐닝하기 때문에 가공정밀도와는 독립적이다. CCD 비전시스템을 이용하는 기존 측정 시스템은 영상처리 시간으로 인한 시간지연이 있었으나 제안한 광학측정시스템은 별도의 처리시간 없이 바로 데이터를 받을 수 있다. 그리고 현재 사용되고 있는 비전시스템과 달리 2도 인쇄부터는 인쇄과정 전에 정렬패턴을 검출하고 그 결과를 피드포워드(feedforward) 제어하여 인쇄에 반영할 수 있으므로, 보다 정밀한 시스템을 구현할 수 있다. 또한 제안한 측정 시스템은 단순한 정렬패턴의 세어읽기(count)가 아닌 보간(interpolation) 신호처리과정을 통해 정렬패턴의 크기보다 높은 해상도로 웹을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 웹의 가공 정밀도 등에 의존하지 않고 신뢰도가 높은 정밀측정 시스템을 구성하기 위하여 광학 측정시스템을 설계 및 평가를 수행하였다. 또한, 측정의 신뢰성을 검증하기 위하여 레이저 표면 진동계를 이용하여 비교 측정하였다. 여기서 사용한 레이저 표면 진동계는 레이저의 도플러효과를 이용해 속도나 이송거리를 측정하는 장비이며, 측정 정밀도는 측정거리의 0.02%이며, 이송속도 7200m/min의 물체까지 측정할 수 있다.

Table 1 Specifications of optical encoder

Light Source	Infrared
Wave Length	750~800nm
Traversing Speed	≤ 600 m/min
Signal Period	200 μm/V

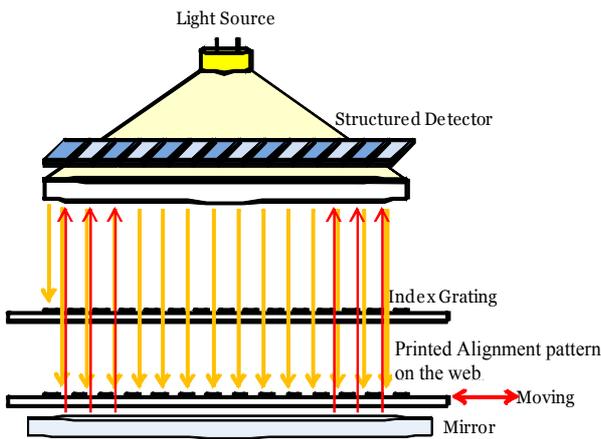


Fig. 3 Measurement principle of optical encoder

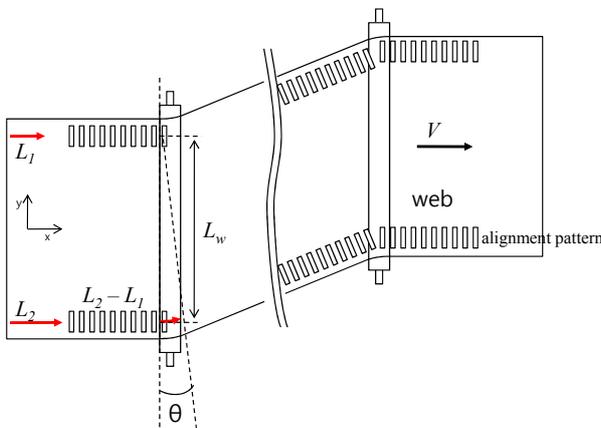


Fig. 4 Web with lateral bias angle

2. 설계 및 측정

2.1 웹 이송 장치와 측정시스템 설계

웹 이송방식 인쇄 시스템에서 광학 측정 기법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 웹 이송 장치를 설계한다. Fig. 2는 광학 측정 시스템과 이를 검증할 레이저 표면 진동계를 장착할 수 있도록 설계된 웹 이송 시스템을 보여준다. 웹을 일정한 속도로 진행시키기 위해 속도 조절이 가능한 모터가 장착된 리와인더(Rewinder)를 장착하였다. 웹 롤이 장착되는 부분에는 브레이크를 장착하여 일정한

제동력을 갖도록 하였다. 그리고 중앙의 프레임에 광학 엔코더 및 레이저 표면진동계를 장착할 수 있도록 마이크로 스테이지를 설치하였다.

2.2 광학 측정 시스템

2.2.1 광학 측정 시스템의 측정원리

웹 위치의 광학측정에서 측정의 기본 원리는 격자간 상대운동이다. 웹에 인쇄된 정렬패턴은 같은 간격의 반사, 무 반사 격자로 이루어진다. 광학 엔코더 내부의 격자(Index grating)를 통과한 빛이 웹에 새겨진 정렬패턴에 의해 반사되고, 엔코더 내부의 광학 센서를 통해 이 빛의 세기를 측정한다. 이 때 두 격자의 상대운동 때문에 빛의 세기가 달라지는데 이를 전기신호로 변환하여 출력하면 이 신호는 정현파의 형태를 가진다. 이에 대한 그림과 설명이 Fig. 3에 있다. 광학 엔코더의 신호는 별도의 신호처리 장치를 필요로 하지 않기 때문에 신호지연이 거의 없다는 장점이 있다. 또한 광원의 파장에 의해 측정 가능한 웹의 이송속도가 제한되나, Table 1의 내용에서 실제 인쇄전자 환경에 비해 충분히 크므로 적용 가능한 측정법이라는 것을 알 수 있다. Table 1은 광학 엔코더의 제원이다. 광학 측정 시스템을 통하여 정렬패턴을 단순히 카운팅한다면 정렬패턴이 100μm 인 경우 해상도는 200μm 단위로 웹의 위치 측정이 가능하다. 웹의 이송거리 L은 다음과 같이 표현된다.

$$L = 2L_p \cdot K_p \tag{1}$$

여기서 L_p 는 정렬패턴의 폭으로 정렬패턴의 간격은 정렬패턴의 폭의 2 배이고, K_p 는 카운팅한 정렬패턴의 수이다. 광학 엔코더의 두 출력신호는 이론적으로 크기가 같고 위상차가 90도가 되므로 아래와 같이 l_s, l_c 로 표현할 수 있다.

$$l_s = X_s \cdot \sin\left(m \frac{\pi V}{L_p} t\right) \tag{2}$$

$$l_c = X_c \cdot \cos\left(m \frac{\pi V}{L_p} t\right) \tag{3}$$

여기서 X_s, X_c 는 각 정현파 신호의 크기이고 V 는 웹의 속도이며, m 은 주파수의 체배 수이다. 이로부터 웹의 위치 측정값을 보정하기 위한 추가적인 카운팅 수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_{comp} = \tan^{-1}(l_s / l_c) \tag{4}$$

결과적으로 보간된 이송거리 L_{comp} 은 다음과 같이 표현된다.

$$L_{comp} = 2L_p \cdot K_p + \frac{2L_p}{m} \cdot K_{comp} \quad (5)$$

그러므로, 정렬패턴을 단순히 카운팅하는 방법보다는 주파수 체배와 간단한 신호처리를 이용하여 측정하는 방법이 수 배에서 수 백배 정도까지 정밀한 위치검출이 가능하다.

웹의 사행각은 Fig. 4 에 설명되어 있고, 정렬패턴이 웹의 양단에 인쇄되어 있을 때 사행각 θ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\theta = \frac{L_2 - L_1}{L_w} \quad (6)$$

여기서 L_1 은 왼쪽 끝 단의 이송거리이고 L_2 는 오른쪽 끝 단의 이송거리이다. 그리고 L_w 는 웹의 폭이다. 계산된 사행각은 웹의 사행제어에 오차신호로 사용할 수 있다.

2.2.2 광학 측정을 위한 정렬패턴 인쇄

광학 엔코더만 사용할 경우 해상도는 정렬패턴의 간격인 $200\mu\text{m}$ 이며, 노광공정으로 정밀하게 제조된 상용 리니어 스케일과 신호체배기를 사용할 경우 광학 엔코더의 해상도는 백 배 정도 정밀한 $2\mu\text{m}$ 까지의 정밀한 해상도를 가질 수 있다. 그러나 상용 리니어 스케일은 인쇄공정상 웹 위에 적용할 수 없으므로 상용 리니어 스케일을 대체할 패턴을 웹에 직접 인쇄를 한다. 직접 인쇄된 패턴을 사용하게 되면 광학 엔코더의 출력이 상용 리니어 스케일을 사용할 때 보다 일반적으로 약해지므로 상용 체배기가 아닌 별도의 신호처리를 통하여 해상도를 수 내지 수 십 배 정도 향상시킬 수 있다. 여기서 인쇄된 정렬패턴의 폭은 $100\mu\text{m}$ 으로, 현재 수준의 볼투를 인쇄시스템에서 구현 가능한 폭이다.⁽⁸⁾ 이 때 인쇄에 사용된 잉크는 은 계통의 잉크를 사용하였다.

2.3 측정 및 검증

정렬패턴이 인쇄된 웹을 일정 속도로 진행시키며 광학 엔코더로 측정해 본 결과 두 개의 정현파 신호가 나타남을 확인하였고, 주파수 분석결과 Fig. 5 에서와 같이 두 신호의 주파수와 크기가 일치함을 알 수 있었다. 측정된 두 신호는 Fig. 6 에서와 같이 리사주 도형이 원형으로 나타나 두 신호의 위상차가 90° 도임을 알 수 있었다. 이때, 정현파 신호의 한 파장은 정렬패턴 간격인 $200\mu\text{m}$ 을

의미한다. 이러한 신호를 단순히 카운트하면 $200\mu\text{m}$ 의 해상도를 갖지만 체배와 신호 처리를 통하여 보다 세분화된 해상도로 웹의 위치를 측정할 수 있다.^(9~11) 이에 대한 검증을 위해 광학 엔코더를 이용하여 웹의 위치를 측정하는 동안 레이저 표면 진동계를 이용하여 동시에 웹의 위치를 측정한다.

Table 2 Measured transportation distances and their errors

Trial number	Interpolated counter	Interpolated distance [mm]	Laser Surface Vibrometer [mm]	Error [%]
1	1995	99.75	99.483	-0.26
2	2010	100.50	100.419	-0.08
3	2021	101.05	100.969	-0.08
4	2017	100.85	100.794	-0.05
5	2019	100.95	100.943	-0.00
6	2019	100.95	100.947	-0.00
7	2021	101.05	101.05	0.00
8	1992	99.60	99.612	0.01

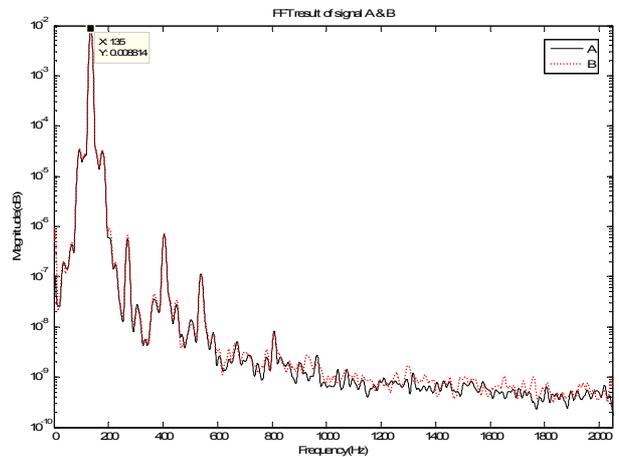


Fig. 5 Spectral analysis of measured signals

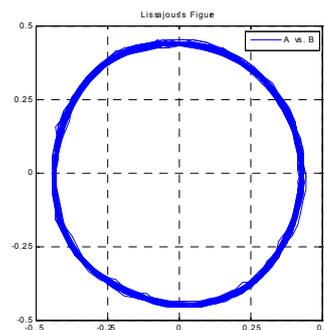


Fig. 6 Lissajous plot from measured signals

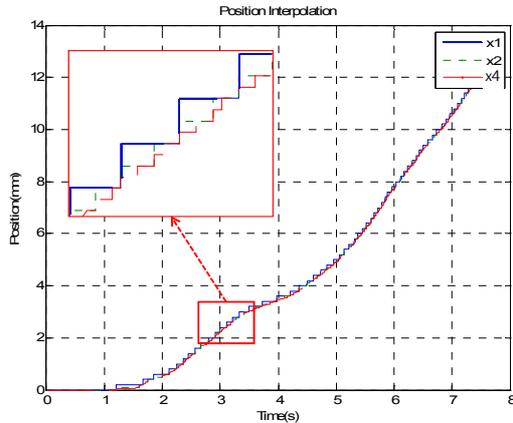


Fig. 7 Estimated position by interpolation

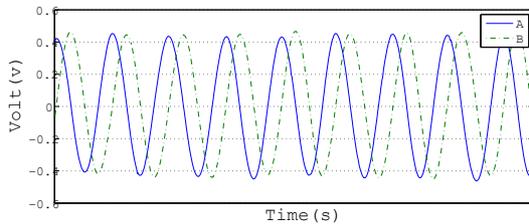


Fig. 8 Measured signals for normal patterns

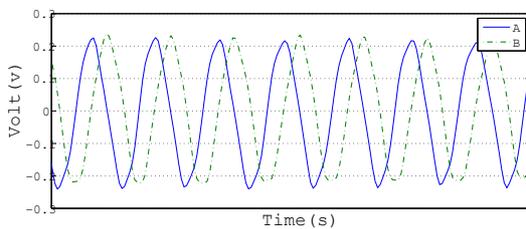


Fig. 9 Measured signals for 1% deformed patterns

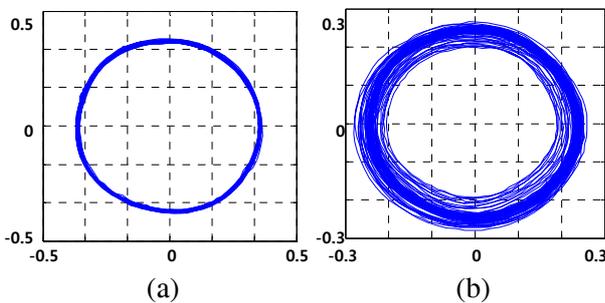


Fig. 10 Comparison of Lissajous plots

Fig. 8 에서 실선으로 표현된 데이터는 단순 카운트에 의한 위치 측정값(x1)이고, 점선은 2 체배에 의해 보간된 측정값(x2), 1 점 채선으로 표현된 데이터가 4 체배에 의해 보간된 측정값(x4)을 나타내고 있다. 각 체배에 따른 해상도는 $200\mu\text{m}$,

$100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ 로 LabVIEW 프로그램으로 동일 길이를 동시에 측정한 결과를 보여준다. Table 2 는 제안한 4 체배 광학 측정시스템과 레이저 표면 진동계를 이용하여 측정한 결과를 비교한 것이다. 시도한 이송거리는 일반적인 인쇄전자 제품의 길이를 100mm 로 가정하여 이를 기준으로 정하였다. 측정된 결과로부터 약 0.03% (약 $30\mu\text{m}$) 평균 오차가 있는 상당히 정확한 측정임을 알 수 있었다.

2.4 웹의 변형을 고려한 실험

인쇄전자에 주로 사용되고 있는 전도성 잉크는 나노입자 형태로 전자소자나 회로를 형성하기 위해 각 인쇄단계에서 인쇄된 것들에 대해 적절히 건조시키는 과정이 필요하다. 만약 이전 단계에 인쇄된 웹 상의 잉크가 건조되지 않은 상태에 중첩인쇄가 되면 이미 인쇄된 형상마저 변형될 수 있기 때문이다. 현재 가장 널리 사용되는 열풍 건조 방식은 열풍의 열이 장력과 함께 웹에 변형을 일으킬 수 있고, 웹의 변형으로 인한 정렬 패턴의 변형은 제안된 측정방법에 의한 측정을 불가능하게 할 수 있다. 따라서 일정 장력이 작용하는 웹에 열이 가해졌을 때 생기는 웹의 변형에 대해서 이송거리 측정이 가능한지 실험하였다. 실험은 열에 의한 변형을 조절하기 위해 열풍기를 사용하고 일정한 장력이 주어진 조건에서 패턴이 인쇄된 웹이 늘어나게 하여 측정하였다.

Fig. 8 은 정상적인 정렬패턴에 대해 실제로 측정한 광학 엔코더의 정현파 신호이고, Fig. 9 는 웹의 원래 길이에서 이송방향으로 1%만큼 늘어난 웹에 대한 측정 결과로 1% 변형 시에도 비교적 정상적인 정현파가 측정되는 것을 볼 수 있다. Fig. 10 은 (a) 정상상태와 (b) 2% 변형 상태에 대한 Lissajous plot 을 비교한 것이다. 2% 변형된 실험 데이터도 Lissajous plot 에서 원형을 구성하고 있는 것을 확인하였다. 단지, 원형의 선 폭이 두껍게 보이는 것은 실험결과의 신호 크기가 시간이 지남에 따라 일정하지 않음을 의미하지만, 짧은 시간 동안에는 위상이 90° 도이고 크기가 같아 Lissajous plot 에서도 원형을 유지하기 때문에 측정에는 무리가 없었다. 그리고 실제 장력과 건조환경 조건에서는 약 1% 이하의 변형이 일반적으로 일어나므로 이 측정 방법이 실제환경에 적용할 수 있음을 확인하였다.

실험에 사용된 롤투롤 시스템은 브레이크만을 사용한 장력 조정장치를 가지고 있어 열에 의한 웹의 구김을 줄이는 데 제한적이었다. 그리고 레이저 표면 진동계는 투영된 거리만을 측정하기 때문에 웹의 구김에 대해서는 측정 비교가 어려웠다. 능동형 장력 제어기를 적용하면 웹의 구김을 줄일

수 있어 제안한 측정 시스템의 정확성 향상은 물론 레이저 표면 진동계의 측정결과와도 비교할 수 있을 것이다.

3. 결 론

인쇄전자 기술에 높은 중첩정밀도 구현이 가능하다면 정밀도가 높은 제품을 대량으로 낮은 단가에 생산할 수 있다. 웹을 정밀하게 제어하기 위해서는 제어하고자 하는 정밀도보다 수 내지 수십 배 이상의 측정 정밀도를 필요로 한다. 일반 미디어를 인쇄하는 기술에서는 중첩오차가 최소 100 μm 정도이지만, 태양전지나 유연액정패널과 같은 전자부품 제작을 상용화하기 위해서는 보다 향상된 중첩정밀도를 구현하는 것이 필수적이다.^(12,13) 따라서 정밀한 시스템을 이루기 위하여 시스템의 각 요소에 대한 측정 및 제어 시스템의 성능과 신뢰성이 우선적으로 확보되어야 한다.

본 연구에서는 웹에 직접 인쇄되는 정렬패턴을 제시하였고, 이를 이용하여 광학 측정 방법에 의한 웹 위치 측정시스템도 제시하고 적용 가능성을 알아보았다. 웹 위치 측정시스템은 웹의 이송거리, 위치와 속도 그리고 사행각을 측정할 수 있었다. 검증을 위해 레이저 표면 진동계와 비교 측정을 하여 이송거리의 0.03%(약 30 μm)인 매우 작은 측정오차를 얻을 수 있었다.

또한, 실험을 통해 웹의 변형에 대한 측정 강인성을 확인했다. 실험결과로부터 웹의 이송방향 길이의 2% 변형에서도 실험결과와 신호가 짧은 시간 동안에는 위상이 90 도이고 크기가 같아 Lissajous plot에서 원형을 유지하기 때문에 측정에는 무리가 없었다. 그리고 실제 장력과 건조환경 조건에서는 일반적으로 약 1% 이하의 변형이 일어나므로 이 측정 방법이 실제환경에 적용할 수 있음을 확인하였다.

그러므로 본 연구에서 제안하고 있는 정렬패턴과 웹 위치 측정시스템은 실제 롤투롤 인쇄전자공정에 신뢰성을 가지고 적용할 수 있을 뿐 아니라 변형에 의한 영향에도 강인하게 측정됨을 확인하였다.

후 기

이 논문은 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

참고문헌

(1) Shin, K. H., 2006, "Roll to Roll Technology for

- Display Manufacturing," *Journal of KSME*, Vol. 45, No.12, pp. 62~66.
- (2) Kim, D. S. and Lee, T. M., 2006, "Technical Trend of Printed Electro-Mechanical System," *Journal of KSME*, Vol. 46, No. 12, pp. 38~41.
- (3) Kim, C. H., Lee, Y. S., Kim, Y. K., Kim, D. S. and Choi, B. O., 2007, "Characteristics of Resonant Frequency of Printed RFID Tag Antenna," *KSME International Conference*, pp. 228~230.
- (4) Kim, C. H., Lee, Y. S., Shin, D. Y. and Kim, D. S., 2008, "Effect of Printing Qualities on the Performances of Printed UHF RFID Tag Antennas," *KSPE International Conference*, pp. 969~970.
- (5) Kang, H. K., Lee C. W. and Shin, K. H., 2010, "Compensation of Machine Directional Register in a Multi-Layer Roll-to-Roll Printed Electronics," *International Conference on Control, Automation and Systems 2010*, pp. 2494~2497.
- (6) Kang, H. K., Lee, C. W. and Shin, K. H., 2010, "A Novel Cross Directional Register Modeling and Feedforward Control in Multi-Layer Roll-to-Roll Printing," *Journal of Process Control*, Vol. 20, pp. 643~652.
- (7) Kim, J. C., Kim, J. M., Kim, C. U. and Choi, C., 2006, "Ultra Precise Position Estimation of Servomotor Using Analog Quadrature Encoders," *APEC '06. Twenty-First Annual IEEE*, pp. 930~934.
- (8) Kim, C. H., Choi, B. O., Ryu, B. S. and Kim, D. S., 2008, "Gravure Offset Printing for Printed Electronics," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 96~102.
- (9) Mayer, J. R. R., 1994, "High-Resolution of Rotary Encoder Analog Quadrature Signals," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol.43, No.3, pp. 494~498.
- (10) Tan, K. K., Zhou, H. and Lee, T. H., 2002, "New Interpolation Method for Quadrature Encoder Signals," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol.51, No.5, pp. 1073~1079.
- (11) Kim, J. C., Hwang, S. H., Kim, J. M., Kim, C. U. and Choi, C., 2006, "Ultra Precision Position Estimation of Servomotor Using Analog Quadrature Encoder," *Journal of power electronics*, Vol.6, No.2, pp. 139~145.
- (12) Mildner, W., 2008, "OE-A - International Network for the Organic and Printed Electronics Industry," *1st International Conference on R2R Printed Electronics*, pp. 49~67.
- (13) Kang, H. K. and Shin, K. H., 2008, "Mechanical Matching of Register Error in Curing Section," *KSPE Autumn Annual Meeting*, pp. 23~24.