

정렬패턴과 광량을 이용한 롤투롤 인쇄전자공정의 횡 방향 웹 위치 측정 시스템

정민규* · 김현기* · 오동호*†
* 충남대학교 공과대학 기계공학과

Lateral Position Measurement System for Precision Alignment of Roll-to-Roll Printing Using Alignment Patterns and Quantity of Light

Minkyu Jung*, Hyungi Kim* and Dongho Oh*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received March 17, 2015 ; Revised July 16, 2015 ; Accepted July 28, 2015)

Key Words: Printed Electronics(인쇄전자), Roll-to-roll Printing(롤투롤 인쇄), Alignment Patterns(정렬패턴), Quantity of Light(광량), Web Position Measurement(웹 위치 측정)

초록: 인쇄전자는 필름과 같이 유연한 웹 위에 기능성 잉크를 인쇄하여 전자소자 및 회로를 만들어내는 기술로써, 대면적 및 고속 대량 생산에 적합하며 유연소재의 전자소자를 만들어 낼 수 있는 차세대 공정기술이다. 이러한 롤투롤 인쇄전자 공정의 상용화를 위해서는 웹의 정밀 위치 측정이 요구되므로 본 연구의 선행연구를 통해 수 마이크로미터 측정 정밀도를 가진 광학 측정 시스템을 제안하였다. 하지만 선행연구의 횡 방향 측정은 웹 전체가 횡 방향으로 밀립 현상이 발생한 경우 이를 인지 할 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 선행연구의 이송방향 웹 위치 측정 정밀도는 유지하며 웹의 횡 방향 위치에 따라 정렬패턴에서 반사되는 광량 차이를 이용한 웹의 횡 방향 위치 측정 시스템을 제안하였고 신뢰성을 확인하였다.

Abstract: Printed electronics is a technology that produces electronic devices and circuits by printing functional ink on a web, which is a film-like flexible material. This technology is suitable for large-scale and high-speed mass production, and is a next-generation process technology that can fabricate electronic devices from flexible materials. As precise measurement of the positions of the web is required in order to commercialize such a printed electronics process, a measurement system with an optical encoder with a precision of micrometers had been proposed in the preceding research of this study. However, the lateral positions of the web could not be measured in the preceding research as the phenomenon of the entire web being moved in the lateral direction could not be detected. In this study, a measurement system that utilizes the differences in the amount of light reflected from the alignment patterns depending on the web positions in the lateral direction was proposed for measuring the lateral positions of the web. In addition, its reliability was verified and then the effect when measuring printed alignment patterns was analyzed by experiments.

- 기호설명 -

W_p : 정렬패턴 폭
 L_p : 정렬패턴 길이
 L_{r1} : Case 1 일 때 반사되는 정렬패턴 길이

L_{r2} : Case 2 일 때 반사되는 정렬패턴 길이
 L_e : 횡 방향 위치 오차
 V : 웹의 이송속도
 x_i : 측정값
 x_a : 보정된 측정값
 Y_a : 측정값 x 의 이산 미분 값
 h : 샘플링 시간

† Corresponding Author, E-mail: dongho@cnu.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

인쇄전자는 인쇄기술을 통해 전자소자, 회로 및 부품을 만들어내는 기술이다.^(1,2) 특히 롤투롤(Roll-to-roll) 공정은 필름과 같은 유연한 재료를 활용하여 회전롤에 감아 기능성, 도전성 잉크를 사용하여 인쇄하므로 대면적 및 고속 대량 생산에 적합하며 기존 노광 공정에서 쓰고 버리는 재료나 독성 물질의 사용량, 에너지 소비 등도 대폭 줄일 수 있다. 이러한 인쇄전자 기술을 상용화하기 위해서는 기존 노광 공정에 해당하는 정밀도 및 신뢰성이 요구된다. 대부분의 전자소자는 제조할 때 다층 회로를 형성하게 되는데 인쇄 층간의 중첩정밀도 따라 전자소자의 성능이 좌우된다.⁽³⁾ 중첩정밀도 향상을 위해서는 정밀 웹 위치 측정에 대한 연구가 선행되어야 한다.

기존의 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 웹 제어에 이용되는데 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 가능한 적으며, 웹의 가공정밀도에 의존하지 않는 측정방법이 필요하다. 따라서 이러한 한계를 해결하고자 본 연구의 선행연구⁽⁴⁻⁶⁾에서는 광학엔코더를 활용한 측정 시스템을 제안하였다.

선행연구에서 제안되었던 광학측정시스템은 Fig. 1에서와 같이 웹의 양단에 직접 인쇄한 정렬패턴을 광학 측정으로 웹의 진행방향 변위와 속도 그리고 사행 각을 측정하는 시스템이다. 1도 인쇄과정에서 정렬패턴을 인쇄하며 2도 인쇄부터는 인쇄과정 전에 정렬패턴을 검출하고 결과를 피드포워드 제어하여 인쇄에 반영할 수 있으므로, 보다 정밀한 시스템을 구현할 수 있다. 또한 단순히 정렬패턴의 세어 읽기(count)가 아닌 보간(interpolation) 신호처리과정을 통해 정렬패턴의 크기보다 높은 해상도로 웹을 측정할 수 있다. 웹의 사행방향 위치 오차가 발생할 때 웹 양단의 이송방향 위치 차이를 통해 사행 각을 산출하고 그 값으로 웹의 횡 방향 오차를 측정하였다. 하지만 이러한 방식은 양단의 이송방향 위치 차이를 이용하여 사행 각을 산출하기 때문에 사행 각 없이 웹전체가 횡 방향으로 밀림현상이 발생하면 이를 인

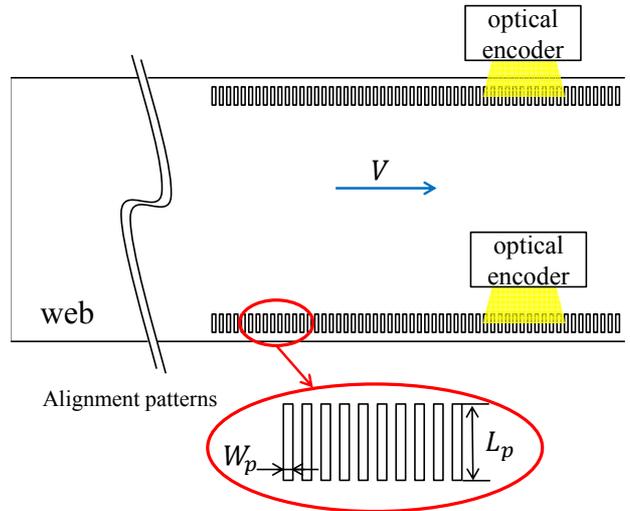


Fig. 1 Alignment patterns and web position measurement system

지할 수 없어 횡 방향 중첩정밀도에 영향을 미치며 두 개의 광학엔코더를 사용해야 하는 한계를 가지고 있다.

이러한 기존 측정 한계를 극복하기 위해서는 웹의 횡 방향 위치를 직접 측정하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구의 광학엔코더 측정 시스템을 활용하여 측정 되는 신호의 값으로부터 웹의 횡 방향 위치를 직접 측정하는 시스템을 제안하였으며 이를 통해 기존의 웹 이송방향 위치 측정에 대한 장점을 유지하면서 사행방향 측정의 한계를 해결하여 정밀한 웹의 위치 측정 시스템을 구현하였다.

2. 측정

2.1 웹의 횡 방향 위치 측정시스템

2.1.1 측정원리

광학엔코더를 사용한 측정의 기본 원리는 정렬패턴(alignment patterns)과 광학엔코더 내부격자간 상대운동이다. 웹에 인쇄된 정렬패턴은 같은 간격의 반사, 무 반사 격자로 이루어진다. 광학엔코더 내부의 격자를 통과한 빛이 웹에 인쇄된 정렬패턴에 의해 반사되고, 광학엔코더 내부의 광학 센서를 통해 이 빛의 세기를 측정한다. 반사패턴 전체에 빛이 반사될 때 신호의 크기가 최대가 되며 무 반사 패턴 전체에 빛이 들어올 때 신호가 최소가 된다. 따라서 웹이 이송방향으로 이동하면 패턴 간격마다 신호의 최대, 최소가 반복되는 정현파 형태의 신호로 측정된다. 웹이 이송방향으로 이동

하면서 웹의 횡 방향 위치 오차가 발생하게 되면 광학엔코더 내부의 격자와 정렬패턴의 횡 방향 위치 차이가 발생하며, 따라서 광학엔코더 내부의 격자를 통과한 빛은 정렬패턴의 반사되는 면적에 따라 변화하게 되어 광학 센서를 통해 측정되는 광량이 변한다.

Fig. 2의 Case 1에서 L_{r1} 의 길이를 가진 패턴이 반사되고 있으며 이때 반사되는 패턴의 면적에 해당하는 신호의 진폭 크기로 표현된다. Case 2와 같이 정렬패턴이 횡 방향으로 L_e 만큼 이동하게 되면 반사되는 패턴의 길이 L_{r2} 로 늘어나며 신호의 진폭의 크기는 커지게 된다. 따라서 횡 방향 위치 변화만큼 신호가 변하므로 신호의 진폭 크기 차이를 측정하면 횡 방향 위치 변화값을 계산할 수 있다.

2.1.2 웹의 횡 방향 위치 측정을 위한 신호 검출

웹의 횡 방향 위치 측정 시스템에서는 광학엔코더를 통해 측정되는 정현파 신호의 최대값을 기준으로 웹의 횡 방향 위치를 계산한다. 따라서 신호의 최대 값을 측정하기 위하여 측정값을 신호처리하여 최대값을 검출한다.

최대값은 신호의 순간 기울기 값이 양에서 음으로 바뀌는 지점의 측정값이다. 하지만 측정 잡음에 의한 불필요한 최대값이 검출되어 오차가 발생할 수 있으므로 식 (1)과 같이 측정값 n 개를 이동평균(moving average)하여 잡음의 영향을 최소화 시킨 보정된 측정값 x_a 을 구한다.

$$x_a = \frac{x_i + x_{i-1} + \dots + x_{i-(n-1)}}{n} \quad (1)$$

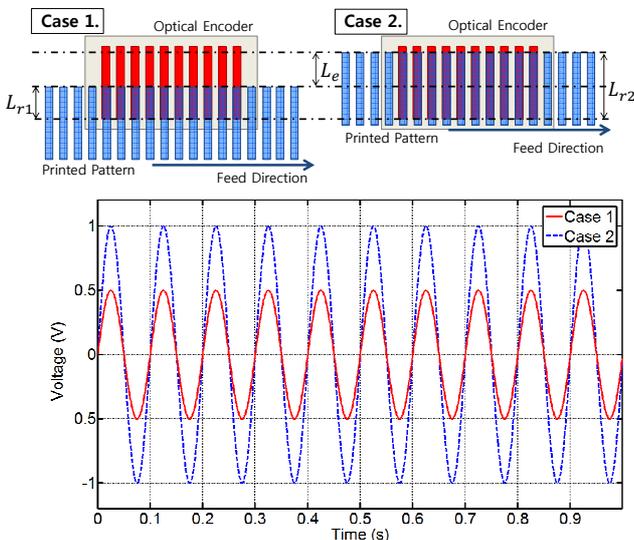


Fig. 2 Examples of lateral web position measurement

보정된 측정값 x_a 의 미분 값의 부호가 양에서 음으로 바뀌는 지점을 검출하기 위해 식 (2)와 같은 이산 미분 과정을 거친다.

$$Y_a = \frac{x_{a+1} - x_{a-1}}{2 \cdot n \cdot h} \quad (2)$$

h 는 샘플링 시간, Y_a 는 x_a 의 이산 미분값이다. 따라서, Y_a 값이 양에서 음으로 바뀔 때 보정된 측정값 x_a 는 극대값이 되며 이 값으로 웹의 횡 방향 위치를 산출한다. 실제 신호처리를 통한 측정에서 정밀한 극대값 검출을 위해 평균구간 n 값은 되도록 작아야 하지만 잡음의 영향, 샘플링 시간을 고려하여 적합한 평균 구간 n 을 정하여 극대값을 검출한다.

2.2 측정 및 검증

제한한 측정시스템을 인쇄전자에 활용하기 위해서는 웹의 횡 방향 위치 변화에 따른 신호가 선형성을 가지며 수 마이크로미터의 반복능을 가지고 있어야 한다. 따라서 측정 신호의 선형성 및 반복능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 웹이 이송방향으로 2m/min의 일정한 속도로 움직이는 상태에서 광학엔코더를 마이크로 스테이지를 이용하여 웹의 횡 방향으로 움직이면서 웹의 위치 값을 측정하였다. 광학엔코더로 측정된 값을 데이터 수집장비로 수집하고 LabVIEW 프로그램으로 극대값 검출을 위한 신호처리 후 웹의 횡 방향 위치를 구하였다.

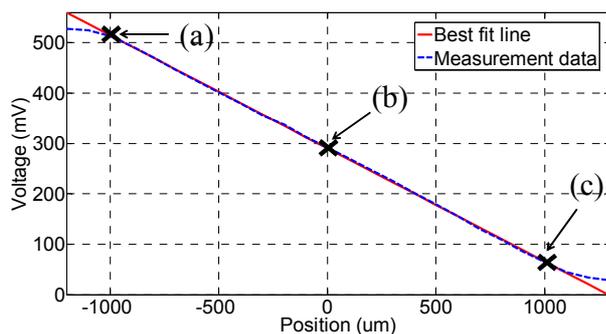
2.2.1 선형성 확인

정렬패턴의 인쇄 품질에 의한 변수를 제거하고자 포토리소그래피 공정(photolithographic process)을 통해 제작된 정밀한 정렬패턴을 이용하여 실험을 하였다. Table 1의 결과는 웹이 이송방향으로 2m/min의 일정한 속도로 움직이는 상태에서 광학엔코더를 마이크로 스테이지로 100 μ m 씩 이동하면서 측정된 결과이다. 'Position' 값은 마이크로 스테이지의 값을 말하며 'Voltage' 값은 해당 위치에서 광학엔코더로 받은 신호를 5회 측정해 얻은 값의 평균이다.

Fig. 3은 Table 1의 측정값을 점선으로 표현하였으며 측정값과의 편차를 최소화하는 최적선(best fit line)을 최소사승법으로 구하고 실선으로 표시하였다. 여기서 선형 구간은 -1000~1000 μ m로 판단되며 최적선을 기준으로 100 μ m 이동 시 마다 22.45mV 선형적인 신호 크기 변화가 측정된다. 이 범위 내에서 최적선을 기준으로 한 최대오차는 2.79mV 이므로 비선형성은 0.54% FS(Full Scale)이다.

Table 1 Averaged measurement results for the photolithographic process patterns

Position (μm)	Voltage (mV)	Position (μm)	Voltage (mV)
-1200	527.42	100	270.6
-1100	524.21	200	247.2
-1000	513.44	300	225.8
-900	492.75	400	201.8
-800	469.96	500	179.1
-700	446.75	600	155.5
-600	423.83	700	130.8
-500	401.61	800	109.0
-400	378.92	900	85.85
-300	356.47	1000	65.16
-200	337.42	1100	44.94
-100	313.59	1200	34.01
0	292.04	1300	28.14

**Fig. 3** Measurement sensitivity and its linearity for the photolithographic process patterns

2.2.2 반복능 확인

제안한 시스템은 일정한 횡 방향 위치를 유지하는 것이 목적이므로 제어하고자 하는 위치에서의 반복능을 확인하였다. 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 의해 표본의 크기가 충분히 크면 측정값이 정규분포에 근사하므로 한 위치마다 48 회 측정하였다. Table 2 는 제어하고자 하는 위치인 Fig. 3 의 (b) 위치를 웹이 이송방향으로 2m/min 의 일정한 속도로 움직이는 상태에서 반복 측정한 결과이다.

측정 평균값은 292.19 mV 이며 표준편차는 0.286 mV 로 나타났다. 따라서 95% 신뢰수준에서 신뢰구간이 292.19 ± 0.572 mV 이다. 이전의 선형성 확인 실험으로 100 μm 위치 변위가 22.45mV 이므로 동일한 위치를 측정할 때 95% 신뢰수준으로 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 의 반복능을 확인할 수 있었다.

동일한 방법으로 선형구간에서 일정한 반복능을 확인하기 위하여 선형구간 양끝에서도 반복능 측정

Table 2 Measurement repeatability for the photolithographic process patterns

Trial number	Voltage (mV)	Trial number	Voltage (mV)	Trial number	Voltage (mV)
1	297.34	17	297.34	33	297.34
2	296.45	18	297.47	34	296.45
3	297.22	19	296.84	35	297.22
4	297.17	20	297.36	36	297.17
5	297.47	21	296.84	37	297.47
6	296.94	22	297.52	38	296.94
7	297.51	23	297.19	39	297.51
8	297.25	24	297.41	40	297.25
9	297.36	25	297.25	41	297.36
10	296.84	26	297.36	42	296.84
11	297.52	27	296.84	43	297.52
12	297.19	28	297.52	44	297.19
13	297.41	29	297.19	45	297.41
14	296.78	30	297.41	46	296.78
15	297.31	31	297.31	47	297.11
16	297.24	32	297.24	48	296.94

실험을 수행하였다. Fig. 3의 (a) 위치에서 표준편차가 0.259mV로 95% 신뢰수준으로 $\pm 2.3\mu\text{m}$ 의 반복능을 확인하였고 Fig. 3의 (c) 위치에서는 표준편차가 0.272mV로 95% 신뢰수준으로 $\pm 2.4\mu\text{m}$ 의 반복능을 확인하였다. 이러한 결과로 선형구간 내에서는 비슷한 수준의 반복능을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

2.2.3 웹에 인쇄된 정렬패턴을 이용한 측정

제안한 웹의 횡 방향 위치 측정 시스템에서는 웹에 인쇄된 패턴을 활용하여 웹의 위치를 측정하게 된다. 실제 시스템과 동일한 환경에서 실험하기 위해서는 롤투롤 공정에서 웹의 인쇄된 패턴으로 웹의 횡 방향 위치 측정이 이루어져야 한다. 실험에 사용된 정렬패턴은 투명 필름 웹에 Ag 계열 잉크로 인쇄한 패턴이며 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 정렬 패턴을 사용한 실험과 동일한 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 선형성 확인 결과로 1700 μm 의 선형구간을 확인하였으며 최적선을 기준으로 100 μm 위치 간격마다 9.98 mV 의 신호 크기 차이를 확인하였다. 이 범위 내에서 최적선을 기준으로 한 최대오차는 2.49mV 이고, 비선형성은 1.19% FS이다.

Fig. 4의 (b) 위치에서 반복능 확인 결과는 Table 3과 같으며 평균값은 131.57 mV이며 표준편차는 0.844 mV로 나타났다. 95% 신뢰수준에서 신뢰구간은 131.57 ± 1.688 mV 이며 선형구간 실험에서 100 μm 위치

Table 3 Measurement repeatability for the printed patterns

Trial number	Voltage (mV)	Trial number	Voltage (mV)	Trial number	Voltage (mV)
1	130.23	17	132.26	33	132.41
2	131.45	18	131.24	34	132.12
3	131.27	19	131.44	35	131.37
4	130.17	20	131.12	36	131.93
5	132.41	21	132.46	37	132.22
6	130.94	22	130.21	38	131.31
7	131.51	23	131.78	39	132.48
8	132.25	24	130.91	40	131.41
9	132.36	25	131.58	41	132.13
10	130.84	26	132.22	42	132.21
11	129.52	27	132.35	43	132.34
12	130.19	28	131.26	44	131.22
13	131.41	29	130.17	45	132.45
14	131.78	30	131.72	46	132.12
15	132.31	31	132.33	47	132.36
16	130.24	32	130.21	48	131.21

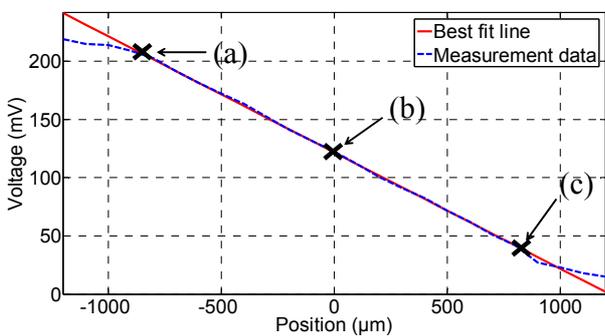


Fig. 4 Measurement sensitivity and its linearity for the printed patterns

변위가 9.98mV였으므로 95% 신뢰수준으로 $\pm 16.91\mu\text{m}$ 의 반복능을 가진다. 또한, Fig. 4의 (a) 위치에서 95% 신뢰수준으로 $\pm 15.74\mu\text{m}$ 의 반복능을 확인하였고 Fig. 4의 (c) 위치에서 95% 신뢰수준으로 $\pm 16.76\mu\text{m}$ 의 반복능을 확인하였다. 따라서, 웹에 인쇄된 정렬패턴을 이용하는 경우에도 선형구간 내에서는 비슷한 수준의 반복능을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

2.2.3 인쇄 품질에 의한 영향

인쇄 품질에 의해 정렬패턴의 경계가 불균일하거나 패턴 폭의 오차가 발생할 수 있다. Fig. 5, 6은 각각 실험에 사용한 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 패턴과 웹에 직접 인쇄된 패턴을 같은 배율로 확대한

사진이다. 웹에 인쇄된 패턴의 경우 낮은 인쇄 품질의 문제로 원하고자 하는 선폭 $100\mu\text{m}$ 보다 큰 선폭으로 인쇄되었고 패턴 경계도 균일하지 않은 것을 확인할 수 있다. 광학엔코더는 정렬패턴을 통해 반사되는 빛의 양을 측정하는 방식이기 때문에 인쇄 품질에 의해 정해지는 패턴 폭은 신호의 크기에 직접적인 영향을 미치게 된다.

광학엔코더는 Fig. 7에서와 같이 센서가 0도와 180도 위상으로 배치되어 있으며 두 위상에 위치한 센서로 측정되는 신호의 차로 정현파를 만들게 된다. 따라서 0도 위상의 센서와 반사패턴이 완벽히 일치하여 빛이 전부 반사되어 0도 위상의 센서에 최대신호가 측정되고 이와 동시에 180도 위상의 센서와 무 반사패턴이 일치하여 빛이 반사되지 않아 180도 위상의 센서에는 신호가 측정되지 않는 패턴을 가지는 경우에 신호는 최대진폭을 가지는 정현파로 측정된다.

Fig. 7(a)는 반사패턴과 무 반사패턴의 폭이 $100\mu\text{m}$ 로 같은 경우로 0도 위상 센서로 측정 시 ①의 시점에서 반사패턴 전체에 빛이 반사되어 최대신호가 측정되며 패턴이 이동하여 ②의 시점이 되면 무 반사패턴 전체에 빛이 들어가 신호가 측정되지 않는다. 한편, Fig. 7(b)는 인쇄 품질이 낮아 인쇄된 반사패턴의 폭이 $100\mu\text{m}$ 넘어 $150\mu\text{m}$ 인쇄되고 그에 따라 무 반사패턴이 $50\mu\text{m}$ 로 된 경우이다. ③의 경우 Fig. 7(a)와 마찬가지로 반사패턴 전체가 측정되어 최대신호로 되지만 ④의 시점이 된 경우에는 반사 패턴의 절반이 포함되어 신호가 최대신호의 절반이 측정된다. 결국 신호의 진폭 변화가 적어져 Fig. 7(a) 경우의 절반의 진폭 크기를 가진 정현파로 측정된다. 따라서 반사패턴과 무 반사패턴의 폭에 따라 신호의 진폭 크기가 결정되며 반사패턴의 폭이 넓어지면 신호의 진폭 크기는 감소한다.

인쇄 품질의 영향으로 Fig. 6 같이 패턴 폭이 넓어져 신호의 진폭 크기가 감소하면 신호에 대한 잡음의 영향이 커지므로 신호 측정에 어려움이 있다. 하지만 패턴 평균 폭이 비교적 일정하고 패턴이 동일한 간격으로 위치하고 있어 선형 측정영역에서는 일정한 크기의 선형적인 신호변화를 측정할 수 있다. 따라서 패턴의 인쇄 품질이 떨어져 패턴 선폭의 오차가 존재하는 경우에도 제안한 웹의 횡 방향 위치 측정 시스템은 강인한 측정특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

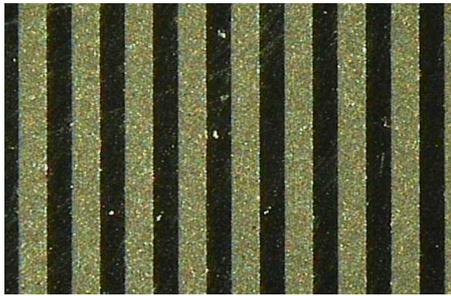


Fig. 5 Alignment patterns by photolithographic process

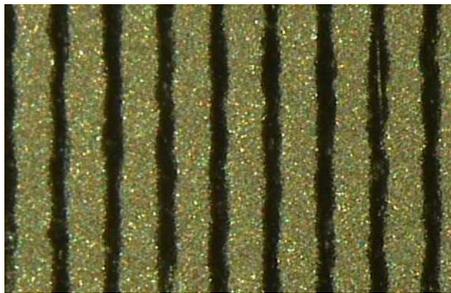


Fig. 6 Printed alignment patterns on the web

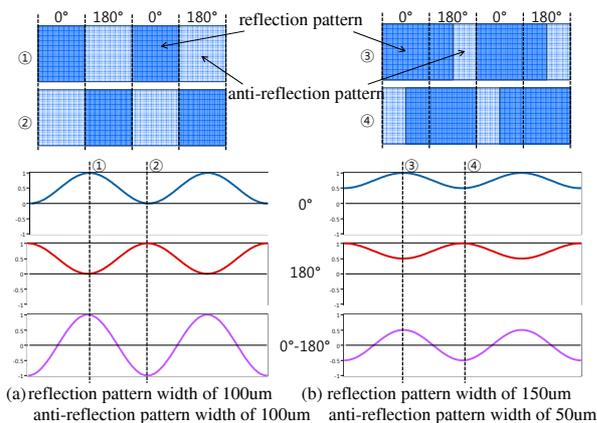


Fig. 7 An example of the measures in accordance with the pattern width size

3. 결론

본 연구에서는 광학엔코더를 활용하여 웹의 횡 방향 위치에 따라 정렬패턴에서 반사되는 광량의 변화를 측정하여 웹의 횡 방향 위치를 측정하는 방법을 제안하였다. 측정 시스템의 신뢰도를 확인하기 위하여 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 100µm 선폭의 정렬패턴을 사용하여 횡 방향 위치를 측정한 결과 2000µm 선형구간에서 비선형성 0.54% FS 를 확인하였고 95% 신뢰수준으로 ±2.5µm 의 반복능을 확인하였다. 만약 보다 정밀한 롤투롤 공정으로 정렬패턴의 폭을 줄일 수 있다면 위치측정정밀도를 비례하여 향상시킬 수 있다.

한편, 웹에 인쇄된 패턴을 이용한 측정실험에서는 1700µm 의 선형구간에서 비선형성 1.19% FS 을 확인하였고 95% 신뢰수준으로 ±16.91µm 의 반복능을 확인하였다. 포토리소그래피 공정을 통해 제작된 정렬패턴에 비해 인쇄 품질이 제한되어 측정 신호 크기가 감소하고 이것으로 인한 반복능과 비선형성의 차이를 보인다. 하지만 선형 측정구간에서 일정한 신호 변화를 확인할 수 있어 인쇄 품질이 떨어지는 조건에서도 웹의 위치 측정이 가능하다.

따라서 본 논문에 사용된 실험실 수준의 장비보다 정밀한 인쇄 장비를 사용한다면 웹에 인쇄되는 정렬패턴의 품질을 개선할 수 있어 10 마이크로미터 이하 수준의 측정정밀도를 확보할 수 있고, 제안한 측정방법을 적용하여 인쇄전자공정의 횡 방향 중첩정밀도를 향상할 수 있다.

후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원 되었음

참고문헌 (References)

- (1) Shin K. H., 2006, "Roll to Roll Technology for Display Manufacturing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 45, No.12, pp. 62~66.
- (2) Kim, D. S. and Lee, T. M., 2006, "Technical Trend of Printed Electro-Mechanical System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 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) Oh, D., 2013, "Method and Apparatus for Providing Precise Printing Using Linear Encoder," *Korea Patent*, No. 10-1294358.
- (5) Seo, Y., Kim, Y. M. and Oh, D., 2012, "Alignment Patterns and Position Measurement System for Precision Alignment of Roll-to-Roll Printing" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No.12, pp. 1563~1568.
- (6) Seo, Y., Kim, Y. M. and Oh, D., 2013, "A Position Measurement System for Precision Alignment of Roll-to-Roll Printing and Sensitivity Analysis of Thermal Deformation," *Microsystem Technologies-Micro and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, Vol.19(9), pp. 1548~1549.