

평판 스크린을 이용하는 롤투롤 연속 스크린 인쇄 시스템의 개발

김가을^{a,b}, 전용호^b, 이문구^b, 홍민성^b, 이택민^a, 권신^{a*}

Development of Continuous Roll-to-Roll Screen Printing System Using a Flat Screen

Ga Eul Kim^{a,b}, Yong Ho Jeon^b, Moon Gu Lee^b, Min Sung Hong^b, Taik Min Lee^a, Sin Kwon^{a*}^a Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials,
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea^b Department of Mechanical Engineering, Ajou University,
206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	15	April	2016
Revised	19	May	2016
Accepted	27	May	2016

Keywords:

Roll-to-Roll
Screen printing
Printed electronics
Flat screen
Overlay alignment

ABSTRACT

In this research, a continuous roll-to-roll screen printing system was developed using a flat screen. It has a newly devised sliding mechanism of screen printing module, which can be controlled accurately in sync with a moving web, driven by a roll-to-roll tension control and web-guiding system. In addition, the real-time precision alignment module that consists of a vision camera and an X-Y- Θ alignment stage was implemented. With this developed system, the feasibility of continuous printing with minimum pattern width below 60 μm was verified, and an overlay of $\pm 60 \mu\text{m}$ between the laser-patterned reference mark and the printed mark on a 300-mm-wide film was achieved.

1. 서론

스크린 프린팅 기술은 미세 패턴을 형성하는 대표적인 인쇄 기술 중의 하나로, 과거 미디어 인쇄 산업으로부터 최근 인쇄전자 분야로의 활용까지 산업계에 널리 활용되고 있다. 스크린 프린팅은 얇은 선으로 이루어진 메쉬구조 하부에 마스크 역할을 하도록 선택적으로 패터닝된 유제막으로 구성된 제판을 이용하여, 제판 상부에 잉크를 도포하고, 고무나 우레탄 소재의 스퀴지로 밀어서 유제막이 제거된 형상의 패턴이 하부 기판에 형성되도록 하는 인쇄 기법으로, 최근 인쇄전자 분야에서는 태양전지^[1,2], RFID 안테나^[3,4], NFC 태그^[5,6], 스마트 센서^[7] 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 현

재까지 스크린 인쇄는 단독 구동방식의 평판 스크린 타입의 장비가 주를 이루며^[1-8], 유연전자 제품에 적용하기 위한 롤투롤(roll-to-roll) 형태의 스크린 인쇄 장비도 개발되어 활용되고 있다^[9-11]. 대표적인 형태의 롤투롤 스크린 인쇄 장비는 평판 제판을 이용하며 유연기판의 이송을 불연속적으로 수행하는 stop and go 형태로 연속공정 및 고속 생산이 불가능한 단점이 있으며, 연속공정이 가능한 로터리(rotary) 스크린을 이용하는 경우, 원형 제판 제작의 고비용 문제와 패턴 정밀도, 패턴 위치 정밀도 등의 한계가 있다^[11].

이에, 본 연구에서는 고정밀도 미세패턴 대용이 가능한 평판 제판을 활용하며, 유연기판의 롤투롤 정밀 이송 중에 연속 인쇄가 가능하도록 동기화된 슬라이딩 구조의 인쇄 모듈과 롤투롤 정밀 장력

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7219

Fax: +82-42-868-7176

E-mail address: skwon@kimm.re.kr (Sin Kwon).

제어, 속도제어, 얼라인 성능을 갖춘 고정밀 롤투롤 연속 스크린 인쇄 시스템을 개발하고 그 성능을 검증하였다.

2. 롤투롤 스크린 프린터 개발

2.1 웹 연속이송이 가능한 스크린 인쇄 시스템 개발

2.1.1 롤투롤 연속 슬라이딩/동기제어 방식 스크린 인쇄 시스템 설계

유연기판 미세 패터닝을 위한 롤투롤 고속/고정밀 웹(web) 이송을 위한 언와인더(un-winder)/리와인더(re-winder) 모듈 및 장력제어를 위한 피더(feeder), 사행제어를 위한 웹 가이드(web guide), 레퍼런스 마크(reference mark) 형성을 위한 레이저 마킹(laser marking) 모듈, 정밀 중첩 인쇄를 위한 제판 이송식 인쇄 모듈, 제판 정밀 얼라인(alignment) 시스템, multi-layer 인쇄 시 중첩 정밀도 확인 및 피드백을 위한 비전 카메라를 이용한 검사 장치 모듈 등으로 구성된 롤투롤 스크린 인쇄 시스템을 개발하였고, 시스템 layout을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서와 같이 언와인더 모듈에는 정밀 얼라인 수행을 위한 레이저 마커(laser marker)가 포함되어있으며, 레이저 마커는 K2 Laser사의 비금속 CO₂레이저(laser)를 사용하였다. 또한 웹 사행 제어를 위한 웹 가이드 및 장력제어를 위한 피더가 언와인더 모듈에 포함되어 있고 웹 가이드는 독일 업체인 BST사의 시스템을 사용하였다. 리와인더는 레이저 마커를 제외하고 언와인더와 동일한 형태로 구성하였으며, 인쇄 모듈 전단에 중첩 인쇄를 위한 비전 카메라(vision camera)를 설치하고, 인쇄 제판은 XYθ 스테이지를

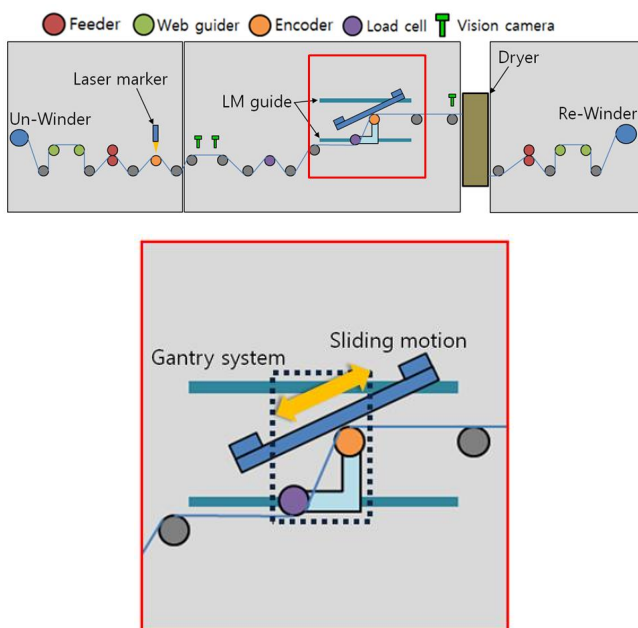


Fig. 1 System configuration of roll-to-roll screen printing system

적용하여, 정밀 얼라인 기능을 수행하며, 추가로 인쇄 후 중첩 인쇄의 정밀도를 확인/피드백하기 위한 비전 검사시스템을 포함하였다. 또한, 제판과 웹 이송의 정확한 동기제어를 위한 엔코더 롤 및 인쇄 시 균일한 장력 유지를 위한 장력 제어용 텐션 로드셀(load cell)이 적용되었다.

개발된 롤투롤 스크린 인쇄 장비는 웹의 이송과 인쇄 제판의 슬라이딩의 동기화를 통해 인쇄가 되는 공정 메커니즘으로 구성되어 있으며 (Fig. 1 참조), 기존의 평판 스크린 인쇄 메커니즘으로 구성되어 있으나 롤투롤 시스템과의 접목 및 정밀 얼라인 기술까지 포함된 새로운 형태의 롤투롤 스크린 인쇄 장비이다 (Fig. 2 참조).

2.1.2 제판 이송식 정밀 스크린 인쇄 모듈 개발

적용 가능한 평판 스크린 제판의 크기는 600 mm×600 mm이며, 인쇄 가능 영역은 최대 300 mm×300 mm로 설정하였다. 정밀 얼라인을 위해 3축으로 구동 가능한 구조로 설계하였고 (Fig. 3 참조), 스크린 인쇄의 주요 공정 변수인 제판과 기재 사이의 이격거리는 매뉴얼 조정이 가능하도록 제작하였다.

또한 롤투롤 정밀 구동을 위하여, 구성되는 롤러들은 양단지지 형태로 구성하였으며, Fig. 3에서와 같이 인쇄 제판은 평판 스크린 인쇄에 적용하는 스크린 제판을 사용하며 제판을 고정하기 위한

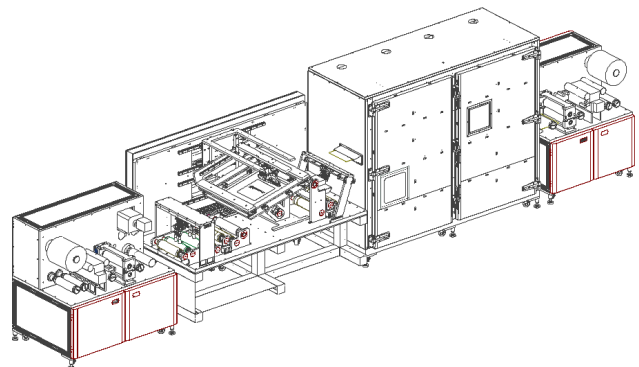


Fig. 2 Design of roll-to-roll screen printer

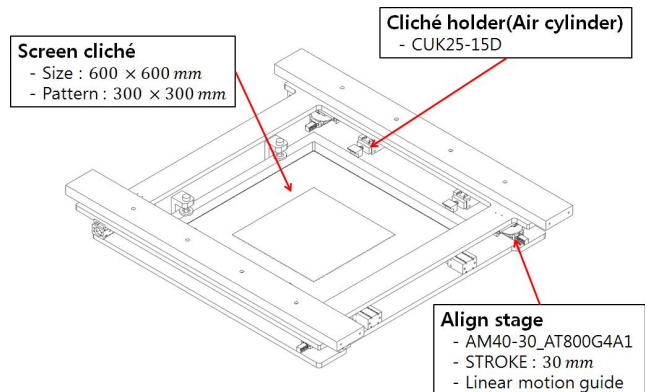


Fig. 3 Design of alignment stage

에어실린더 및 XYθ 얼라인 구동을 위한 정밀 스테이지로 구성되어 있다.

2.2 고속/고정밀 롤투롤 웹 이송 장비 기술 개발

평판 제판을 이용하는 기존의 롤투롤 스크린 인쇄 장비는 stop & go 형태로, 롤투롤 성능이 인쇄에 미치는 영향이 크지 않았다. 생산성 향상을 위하여 적용하는 롤투롤 연속이송 중 동기제어를 통한 스크린 인쇄 방식에서는 롤투롤 유연기관 이송 성능이 패턴 인쇄 특성 및 중첩 인쇄 성능을 결정하므로 매우 중요한 기술이다. 정밀하게 유연기관 이송을 제어하기 위해서는 일정한 장력을 부가하기 위한 장력제어, 스크린 인쇄 속도의 기준이 되는 롤투롤 기관 이송 속도제어, 기관 진행 방향의 좌우 흔들림이 없어야 하는 사행 제어가 핵심 요소 기술이며, 각 모듈간의 상호 영향을 고려한 시스템 최적화가 필요하다.

롤투롤 스크린 인쇄 장비에서 웹의 이송 속도와 스크린 제판의 슬라이딩 속도가 동기화 되어 인쇄될 때 웹의 장력을 일정하게 유지시켜야 최적의 인쇄 조건을 도출할 수 있다 (Fig. 4 참조). 장력은 기본적으로 언와인더/리와인더에 의해 웹이 이송될 때 인피더(in-feeder)에 의해 조절되며 웹의 사행으로 인해 발생하는 장력 변화를 제어하기 위해 웹 가이드를 설치하였다. 웹의 사행이 발생할 경우 웹의 한쪽 방향으로만 큰 장력이 작용할 수 있고 이로 인해 웹의 변형이 발생하며 웹의 변형으로 인해 중첩 인쇄 시 중첩 인쇄 시 중첩 정밀도에 영향을 미칠 수 있으므로 장력 제어에 웹 가이드를 활용하여 웹의 인쇄 유닛 진입 시 균일한 장력을 유지할 수 있도록 장비를 설계하였다. 인쇄 유닛 진입 전/후에 장력 측정을 위한 로드셀이 설치되고, 취득한 장력을 피드백(feedback)하여 인피더에서 속도를 조절하는 것으로 인쇄 구간에서 장력을 제어한다.

사행 제어 모듈은 상용 모듈인 BST web guide 시스템을 이용하여 구성하였으며 이 시스템은 초음파 센서 두 개가 장착되어 있어 웹의 양쪽 끝이 초음파 센서의 중앙부를 지나갈 수 있도록 하며 웹이 한 쪽 방향으로 틀어져 초음파 센서를 벗어날 경우 웹 이송 제어 유닛이 회전하여 웹의 이동 경로를 조정하며 초음파 센서의 중앙을 통과할 수 있도록 유도한다.

웹의 이송 방향이 틀어질 경우 웹의 전체적인 장력에 영향을 미칠 수 있고 리와인더에서 웹을 다시 감았을 때 균일하게 감기지 않을 수 있기 때문에 장력제어 및 리와인딩(re-winding)에 필수적인 모듈이라고 할 수 있다.

2.3 Multi-layer 인쇄를 위한 정밀 중첩 인쇄 기술 개발

2.3.1 Laser marking을 이용한 정밀 reference register mark 제작 시스템 개발

Multi-layer 인쇄를 위한 정밀 중첩 인쇄 기술 개발을 위해서는 인쇄 공정 시 스퀴지에 의한 변형된 스크린 제판 내 패턴 부분과 리와인더와 피더, 사행제어 모듈의 구동으로 인한 장력변화에 의한 유연기관 간의 정확한 위치 오차 보상은 가장 중요한 기술 중 하나이다.

인쇄 위치 오차를 줄이기 위해서는 고정밀도의 얼라인 시스템이 요구되며, 롤투롤 스크린 프린터의 고정밀 얼라인을 위한 비전 시스템을 적용하기 위해서 유연기관 상에 절대 위치정밀도가 확보된 레퍼런스 마크가 필요하다. 롤투롤 인쇄 공정을 이용하여 레퍼런스 마크를 제작하는 방법으로는 공정 변수들에 의한 절대 위치정밀도 확보의 정밀도 문제가 발생할 수 있다. 본 장비에서는 유연기관의 정확한 이송위치를 롤에 장착된 엔코더를 이용하여 취득하고, 정확한 위치에서의 레이저 마킹 트리거 신호를 발생하여 패턴링 하는 것으로 유연기관상의 절대 위치정밀도가 확보된 레퍼런스 마크를 형성하였다. 형성된 마크의 형상은 Fig. 12에서 확인할 수 있다.

레이저 마킹을 통해 제작된 마크는 비전 카메라를 통해 인식하여, 인쇄 위치 및 틸트 등 타겟 위치를 산출하여, 이 정보를 이용해 얼라인 스테이지를 구동함으로써, 정확한 위치에 인쇄할 수 있도록 하였다.

위치 오차 보상을 위한 레퍼런스 마크의 경우 인식하는 형태와 크기(width)가 균일해야 하며, 비전 시스템의 인식 방법이 가장자리(edge)를 기준으로 패턴의 중앙부(center)를 찾아 인식하는 방법으로 패턴의 가장자리 부분이 직선의 형태를 인식해야 한다. 또한 마크의 위치 간격은 유연 기관의 이송 속도에 상관없이 일정해야 하므로 엔코더(encoder)를 이용한 유연 기관의 이송 속도 및 위치 측정이 매우 중요하다.

2.3.2 제판 정밀 alignment system 기술 개발

비전 시스템과 얼라인 스테이지를 이용한 얼라인 보정 알고리즘을 Fig. 5에 나타내었다. 인쇄 후 레이저 마커에서 형성된 타겟 마크와 인쇄 마크 간의 거리를 비전 프로세싱(vision processing)을 통해 측정하고, 측정된 오프셋(offset)만큼 제판 위치를 추가로 보정한다. 또한 인쇄 전에 다음 단계를 위한 레퍼런스 마크를 다시 인식하여 이전 마크와의 차이 값을 보상하여 추가로 제판 위치에 대한

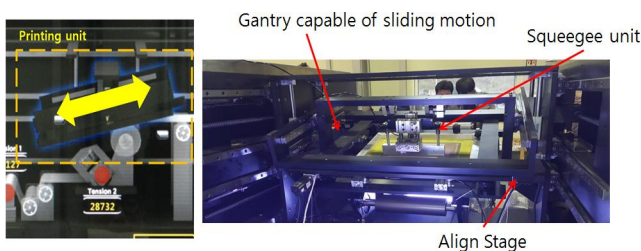


Fig. 4 Printing module for continuous printing

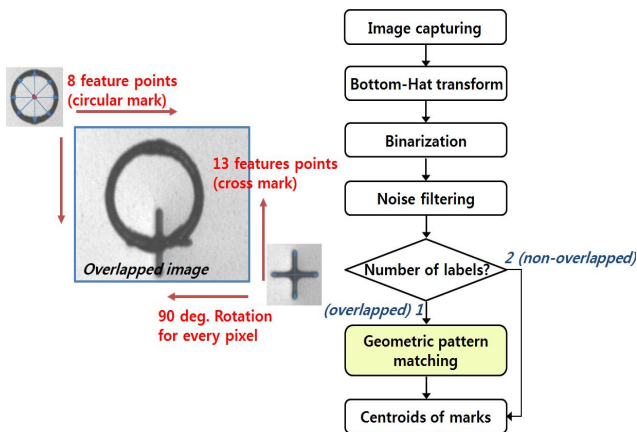


Fig. 5 Flowchart for alignment system by using vision camera

Table 1 Printing process parameters of fine line patterning test

Web speed / Printing speed	1 m/min
Separation distance	2 mm
Scraper speed	30 mm/s
Paste particle size	Micro (Ag)
Screen mesh size	640 mesh/inch (2.54 cm)

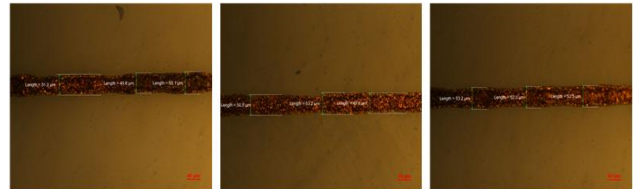


Fig. 7 Printed fine line pattern measured by CCD camera

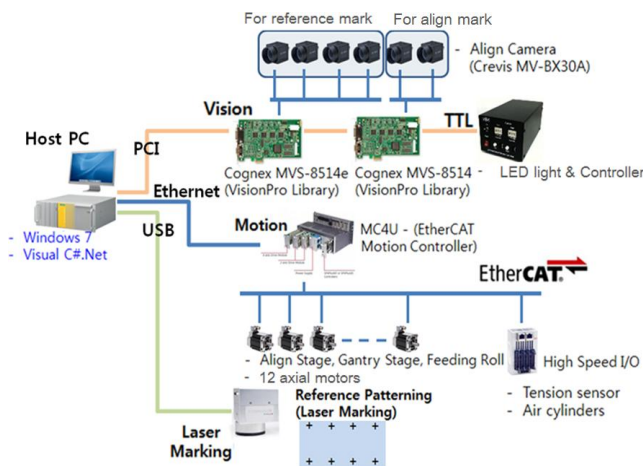


Fig. 6 Information systems control alignment

Table 2 Fine line patterning measurement result (μm)

Printed pattern width	
Point 1	50.5
Point 2	53.2
Point 3	49.6
Point 4	53.2
Point 5	52.3
Point 6	52.3
Point 7	51.0

보정 모션을 지령한다.

얼라인 기능 수행을 위한 핵심 제어 기술인 비전 시스템과 모션 시스템을 제어하기 위한 톨투를 제어 시스템을 Fig. 6과 같이 설계하였고, 비전 시스템은 PC기반의 COGNEX 사의 라이브러리(library)를 사용하였다. 카메라는 CREVIS사의 MV-BX30A 모델을 적용하였으며, 얼라인 스테이지 구동을 위한 고정밀 모션제어기는 ACS 사의 MC4U 모델을 적용하여 구성하였다. 제판 및 스테이지의 하중 등을 고려하여 모터 부하를 계산하여 모터를 선정하였으며, 총 4개의 100 W급 정밀 서보모터로 구동된다. 언와인딩, 리와인딩을 포함한 전체 시스템은 단일 PC에서 통합된 제어 환경에서 구동되도록 구성하였으며, EtherCAT 기반의 고속 I/O 모듈을 활용하여 엔코더 및 로드셀 신호 등의 제어입력 데이터를 실시간으로 취득하여 시스템 제어에 활용하였다.

3. 실험

3.1 미세 패턴 인쇄를 위한 공정 셋업 및 인쇄성 평가

제작된 장비의 성능을 확인하기 위하여 다양한 선폭의 패턴이

포함된 스크린 제판을 제작하고 스크린 인쇄용 구리 페이스트 (Asahi Kasei사 상용제품)를 이용하여 인쇄 실험을 수행하였다. 스크린 제판의 메쉬는 미세패턴이 가능하도록, 기존의 로터리 스크린 제판의 메쉬 수 보다 조밀한 640 mesh/inch로 국내 제판 제작 업체인 삼본스크린 사를 통해 제작을 진행하였으며, 패턴의 형태는 패턴 영역 250 mm×250 mm로 다양한 각도의 패턴 인쇄 특성을 확인하기 위해 MD(machine direction), CD(cross machine direction), 대각선 방향으로 디자인 하였다. 스크린 인쇄 스퀴지는 MicroTec사의 해머형 스퀴지를 적용하였으며, 상세한 인쇄 공정 조건을 Table 1에 정리하였다.

측정은 제판 기준 선폭 40 μm 패턴 인쇄 결과를 측정하였으며, Table 2에서와 같이 인쇄 실험 후 무작위 7개 지점 미세패턴 측정 결과 최소선폭은 평균 약 51.7 μm로 측정되어, 60 μm 이하의 미세패턴 인쇄가 가능함을 확인하였다. 일반적인 스크린 인쇄에서와 마찬가지로 타겟 기관의 wetting 특성에 따라, 인쇄 잉크의 퍼짐으로 인하여, 실제 인쇄된 패턴의 선폭은 일부 증가하는 것이 관찰되었다.

3.2 연속 스크린 인쇄 공정 셋업 및 인쇄성 평가

톨투를 연속 스크린 인쇄 공정 평가를 위해 패턴 인쇄 영역 간

Table 3 Printing process parameters of continuous printing test

Web speed / Printing speed	5.4 m/min
Separation distance	2.5 mm
Scraper speed	45 mm/s
Paste particle size	Micro+nano (Cu)
Screen mesh size	460 mesh/inch

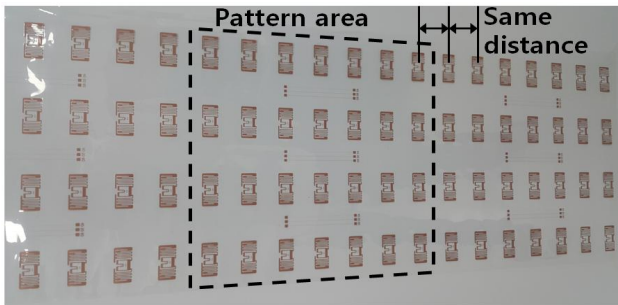


Fig. 8 Continuous pattern printing test (RFID tag)

의 간격이 존재하지 않는 제로 갭(zero gap) 인쇄를 진행하였다. RFID tag 제판을 이용하였으며, 인쇄 공정조건은 3.1절과 같다. 인쇄 모듈과 웹 이송 모듈의 동기제어를 통해 제로 갭 인쇄 실험을 진행하기 위해 웹 이송속도와 인쇄 속도는 약 5 m/min 이상의 속도로 진행하였다. 패턴 영역 간의 간격 조절은 인쇄 공정에서 인쇄 후 스크래퍼를 이용한 페이스트를 재 도포하는 과정에서 결정되며, 스크래퍼의 속도에 따라 간격이 결정된다. 인쇄 조건은 Table 3과 같으며, Fig. 8과 같이 패턴영역 간의 거리 조절을 통해 단위 인쇄 영역 간 공백 영역이 발생하지 않도록 연속적인 인쇄가 가능함을 확인하였다.

3.3 롤투롤 시스템에서 속도제어

롤투롤 연속이송 중에 인쇄 공정이 수행되는 본 장비의 성능에서 가장 중요한 부분은 스크린 인쇄부에서 제판의 슬라이딩 인쇄 속도의 기준이 되는 웹 이송 속도의 제어이다. 이에 대한 인쇄 모듈의 동기화 속도에 따라 인쇄 결과(인쇄 품질 및 인쇄 위치정확도)에 큰 영향을 미치게 된다. 속도제어는 기본적으로 회전하는 아이들 롤러에 외부 엔코더를 장착하여 엔코더에서 나오는 신호를 감지하여 모터의 속도를 검출하고, 인퍼터 롤의 속도를 제어하는 것으로 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 제어 방법은 ACS사에서 제공하는 모션제어 라이브러리의 PID 제어를 적용하였으며, 개인 튜닝을 거쳐 이송 속도 5.4 m/min에 대한 테스트 결과, 전 구간에서 속도 변화량은 $\pm 1.3\%$ 이내로 보이는 것을 확인하였다.

3.4 얼라인 정밀도 평가

얼라인 시스템 구현 방법은 비전 시스템과 인쇄부 얼라인 스테이

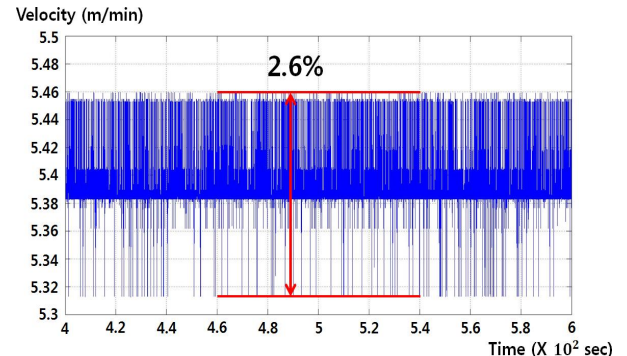
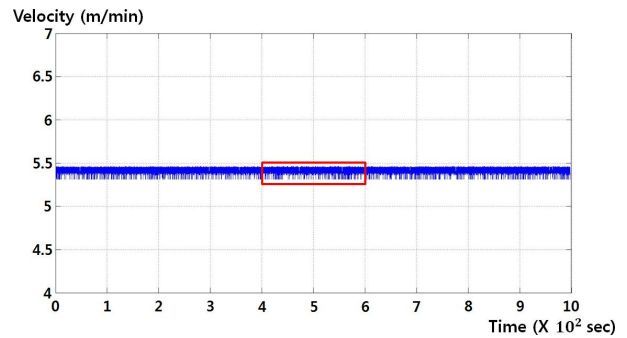


Fig. 9 Roll-to-Roll speed and ripple long run test

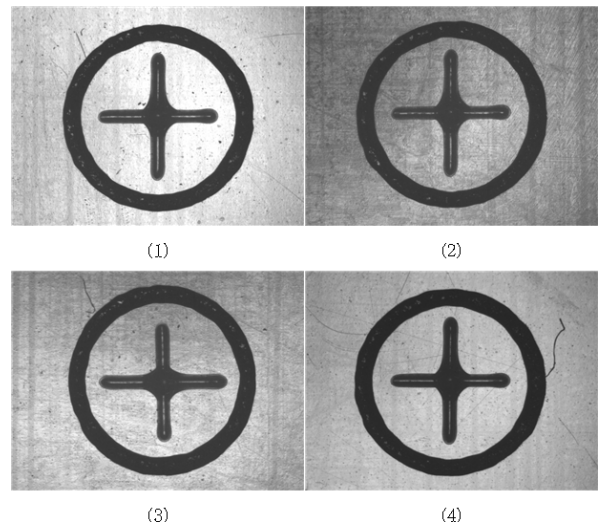


Fig. 10 Alignment test measured by CCD camera

지를 이용한다. 인쇄 후, 레이저 마커를 통해 형성한 타겟 레퍼런스 마크와 인쇄된 얼라인 마크 간의 거리를 비전 프로세싱을 통해 측정하고, 측정된 옵셋 양만큼 제판 위치를 보정한다. 또한, 인쇄 전에 다음 패턴 인쇄를 위한 레퍼런스 마크를 다시 인식하여 이전 마크와의 차이 값을 보상하여 추가로 제판 위치에 대한 보정 모션을 지령함으로써 연속적인 얼라인 인쇄가 가능함을 보였다.

얼라인 상태를 확인하는 비전 카메라를 이용한 검사 장치를 통해 정밀도를 측정하였으며, 측정 알고리즘은 비전 카메라를 이용해 얼라인 마크의 이미지를 촬영 후, Cognex 라이브러리를 이용하여 패턴 인식 및 위치를 계산하였다. Fig. 10에 4쌍의 레퍼런스 마크

Table 4 ‘O’ Alignment mark pixel coordinate value

No.	X-coordinate	Y-coordinate
(1)	478.709	344.511
(2)	480.964	402.882
(3)	478.819	358.981
(4)	477.179	381.127

Table 5 ‘+’ Reference mark pixel coordinate value

No.	X-coordinate	Y-coordinate
(1)	487.774	351.554
(2)	488.007	404.904
(3)	487.884	364.003
(4)	485.222	391.192

Table 6 Distance between alignment and reference mark (μm)

No.	X-coordinate	Y-coordinate
(1)	41.7	32.4
(2)	32.4	9.3
(3)	41.7	23.1
(4)	37	46.3

Table 7 Accuracy of alignment (μm)

No.	Distance
(1)	52.8
(2)	33.7
(3)	47.7
(4)	59.3

및 인쇄 마크의 샘플 이미지를 나타내었다. 그림에서 ‘+’ 마크는 레이저 마커에 의해 형성된 레퍼런스 마크이고, ‘O’ 마크는 롤투를 스크린 인쇄를 통해 형성된 인쇄 마크이다. Tables 4-6에 각 마크의 인식된 센터 위치를 정리하였다. Table 7에 최종 얼라인 정밀도 평가 결과를 정리하였으며, 얼라인 정밀도 60 μm 이하 수준을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 인쇄전자용 저비용 대량생산에 적합한 연속적인 인쇄가 가능한 새로운 개념의 롤투를 스크린 인쇄 장비의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 롤투를 웹 이송과 인쇄 제판의 슬라이딩 모션의 동기화를 통해 인쇄가 되는 공정 메커니즘을 제안하였으며, 기존의 평판 스크린 인쇄 메커니즘으로 구성되어 있으나, 롤투를 시스템과의 접목 및 정밀 얼라인 기술까지 포함된 고성능, 고정밀도

의 롤투를 스크린 인쇄 공정 장비를 개발하였다. 롤투를 웹 이송 속도 정밀 제어를 구현하여, 실험을 통해 이송속도 5.4 m/min에 대해, 전 구간에서 $\pm 1.3\%$ 이내의 속도 변화량을 확인하였다.

또한, 롤투를 로터리 스크린 인쇄와 비교하여, 평판 스크린 인쇄 공정을 적용함으로써, 60 μm 이하 수준의 미세패턴 인쇄가 가능함을 확인하였으며, 중첩 인쇄 정밀도 확보를 위해 얼라인 시스템을 구성하여 60 μm 이하의 얼라인 인쇄 정밀도를 구현하였다. 미세패턴 인쇄가 가능한 평판 스크린 인쇄 공정의 장점과 연속적인 고속 인쇄 구현이 가능한 롤투를 로터리 스크린 인쇄 공정의 장점을 결합한 본 시스템을 이용하여 미세패턴/정밀중첩 연속 인쇄가 가능함을 확인하였고, 향후 FPCB는 물론, RFID, NFC 등 다양한 인쇄 전자 응용 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 국가과학기술연구회 융합실용화 연구사업으로 수행한 연구 과제(CCP-13-15-KIMM) 및 기계연구원 주요사업(NK194C)의 결과입니다.

References

- [1] Scardera, G., Inns, D., Wang, G., Dugan, S., Dee, J., Dang, T., Bendimerad, K., Lemmi, F., Antoniadis, H., 2015, All-screen-printed Dopant Paste Interdigitated Back Contact Solar Cell, Energy Procedia, 77: 271-278.
- [2] Chen, Y., Yang, Y., Zhang, X., Xu, G., Marmon, J. K., Li, Z., Feng, Z., Verlinden, P. J., Shen, H., 2015, Forming Aluminum Electrodes by Screen Printing and Electron-beam Evaporation for High Performance Interdigitated Back Contact Solar Cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 143 205-211.
- [3] Kim, Y., Lee, B., Yang, S., Byun, I., Jeong, I., Cho, S. M., 2012, Use of Copper Ink for Fabricating Conductive Electrodes and RFID Antenna Tags by Screen Printing, Current Applied Physics, 12:2 473-478.
- [4] Virkki, J., Bjorninen, T., Kellomaki, T., Merilampi, S., Shafiq, I., Ukkonen, L., Sydanheimo, L., Chan, Y. C., 2014, Reliability of Washable Wearable Screen Printed UHF RFID Tags, Microelectronics Reliability, 54:4 840-846.
- [5] Choi, E. K., Park, J., Kim, B. S., Lee, D., 2015, Fabrication of Electrodes and Near-field Communication Tags based on Screen Printing of Silver Seed Patterns and Copper Electroless Plating, Int. J. of Prec. Eng. Manuf., 16:10 2199-2204.
- [6] Yoon, S. H., Park, H. H., 2015, Fabrication of All Printed NFC Tags

- using a Screen Printing Technique, KSMTE Annual Autumn Conference, 47.
- [7] Lu, W., Jing G., Bian, X., Yu, H., Cui, T., 2016, A Quartz-based Micro Catalytic Methane Sensor by High Resolution Screen Printing, *J. Micromech. Microeng.*, 26 025021.
- [8] Lee, Y., Cheon, S. U., Kwag, D. G., Park, J. H., Lee, N. K., Kim, J. B., Lee, H. J., 2013, Experimental Study for Improving the Yield Rate in Solder Paste Screen Printing Process, KSMTE Annual Spring Conference, 49.
- [9] Zichner, R., Baumann, R. R., 2013, Roll-to-Roll Screen Printed Radio Frequency Identification Transponder Antennas for Vehicle Tracking Systems, *Japanese J. of Appl. Phys.*, 52:5 05DC24.
- [10] Keranen, K., Korhonen, P., Rekila, J., Tapaninen, O., Happonen, T., Makkonen, P., Ronka, K., 2015, Roll-to-Roll Printed and Assembled Large Area LED Lighting Element, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81:1/4 529-536.
- [11] Hosel, M., Sondergaard, R. R., Angmo, D., Krebs, F. C., 2013, Comparison of Fast Roll-to-Roll Flexographic, Inkjet, Flatbed, and Rotary Screen Printing of Metal Back Electrodes for Polymer Solar Cells, *Adv. Eng. Mat.*, 15:10 995-1001.