

# 전자소자 인쇄를 위한 레지스터 제어기술

강 현 규 | 건국대학교 기계설계학과, 박사과정 | e-mail : hyunkyoo@konkuk.ac.kr

롤투롤(Roll-to-roll) 기술을 이용한 전자 소자의 대량 인쇄기법이 많은 주목을 받으며 활발한 관련 연구가 이뤄지고 있다. 하지만 전자소자 인쇄를 위해서는 기존의 전통적 그래픽 인쇄에서 사용되던 인쇄기술의 도약이 필요하다. 그 중 대표적인 레지스터 제어기술을 통해 다층 구조로 이루어지는 인쇄형 전자소자의 인쇄공정간의 초정밀 위치제어 기술에 대하여 소개한다.

## 롤투롤 인쇄전자와 레지스터 에러

그라비어(gravure), 플렉소(flexography), 오프셋(offset), 그라비어-오프셋(gravure-offset), 잉크젯(ink-jetting)과 같은 인쇄기법을 통하여 전자소자를 생산하는 인쇄전자(printed electronics) 기술이 주목을 받으며 많은 연구가 진행되고 있다. 인쇄전자(Roll-to-roll printed electronics) 기술의 성공적인 개발을 위해서는 잉크, 기판(substrate), 패턴롤(pattern roll), 인쇄 공정(printing process), 디바이스 설계(device design) 등의 연구가 요구된다. 인쇄물을 통한 유기잉크 및 금속잉크의 전이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있는데, IGT 사의 F1장비와 같은 하나의 인쇄물을 이용하여 기판과 잉크의 인쇄 상관 관

계 등이 연구되고 있다<sup>(23)</sup>. 기판에 전이된 잉크의 표면상태, 즉 표면 거칠기, 인쇄 두께, 공극의 분포 정도 등과 함께 전도도 향상을 위한 연구결과들이 발표되고 있다<sup>(1~12)</sup>. (그림 1~4)

이러한 인쇄공정 자체에 대한 연구뿐 아니라, 다음 단계의 연구로서 폴리머와 감김롤 사이에 위치한 다수의 인쇄롤을 통한 연속공정 롤투롤 프로세스의 개발이 요구된다. 다수의 롤이 소재 진행 방향으로 매우 길고 유연한

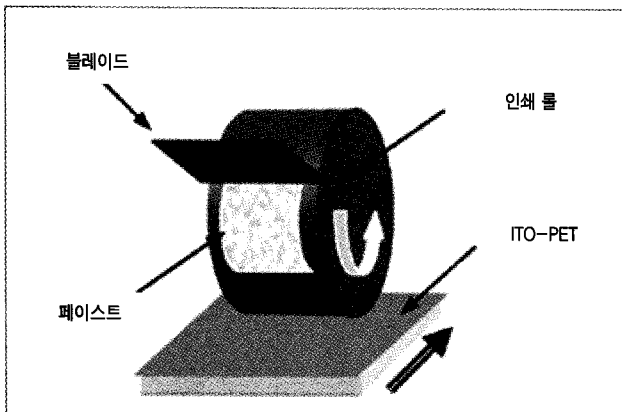


그림 1 IGT장비를 이용한  $TiO_2$  페이스트의 인쇄<sup>(7)</sup>

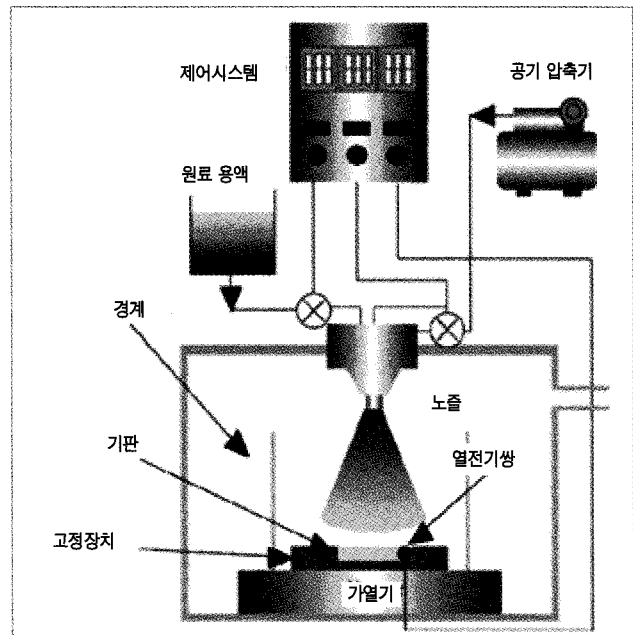


그림 2 스프레이를 이용한  $TiO_2$ 의 인쇄<sup>(11)</sup>

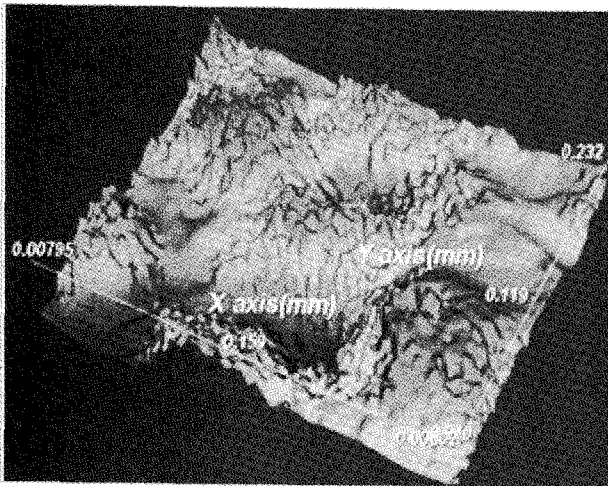


그림 3 그래비어 인쇄된 나노 은 페이스트의 지형도(topography)

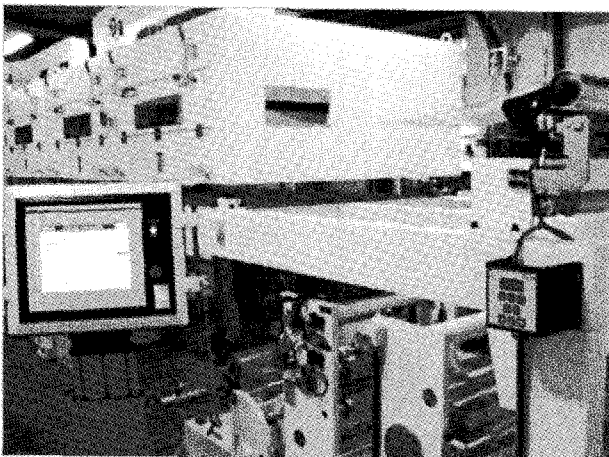


그림 4 FDRC(Flexible Display Roll-to-Roll Research Center)의 그래비어 인쇄 장비



그림 5 그래픽 인쇄에서의 레지스터 에러: 뉴질랜드 화폐에 나타난 레지스터 에러<sup>(13)</sup>

(flexible) 기판을 인쇄할 경우에, 인접한 인쇄물 간의 위상 변위(phase variation), 소재의 사행변위(lateral motion) 등으로 인해 다층인쇄 패턴의 레지스터 에러가 발생하게

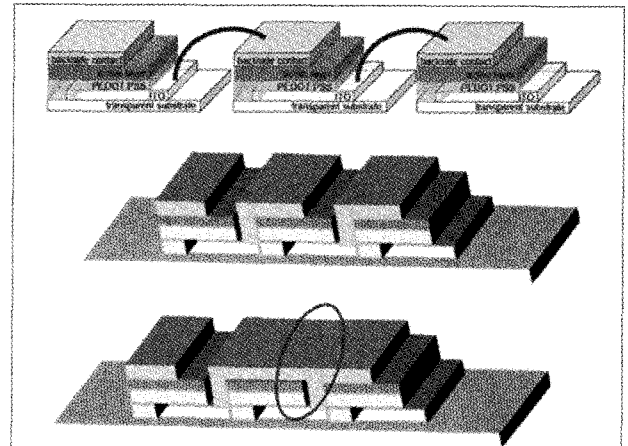


그림 6 태양전지 모듈의 개략도(상), 인쇄형태의 태양전지 모듈(중), 레지스터 에러로 인한 태양전지의 단락(하)<sup>(14)</sup>

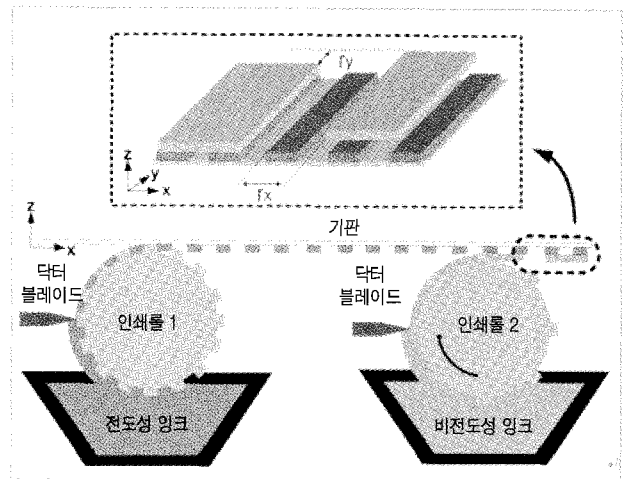


그림 7 2차원 레지스터 에러의 발생<sup>(15)</sup>

된다<sup>(20)</sup>. 레지스터란 인접하는 인쇄물 사이에서 발생하는 인쇄패턴간의 위치를 의미한다. 2개의 인쇄물을 통하여 전자소자를 인쇄할 경우에 첫 번째 인쇄패턴과 두 번째 인쇄패턴 사이에 2차원 위치오차가 발생하게 되며 기준위치와의 오차를 레지스터 에러로서 정의한다.(그림 5~7)

하나의 롤을 통한 인쇄공정에서의 레지스터 제어는 기판의 초기위치를 정확히 맞춘 후에 인쇄 롤러를 통과함으로써 이뤄지게 된다. 하지만 연속적인 다수의 롤을 이용하는 인쇄공정에서의 레지스터 제어는 고려할 사항들이 증가하게 된다. 이는 다수의 인쇄롤을 지나면서 인쇄되는 소재의 위치는 인쇄물의 위상과 직접적인 상관관계를 갖게 되기 때문이다. 인쇄물과 소재 사이의 미끄러짐이 존재하

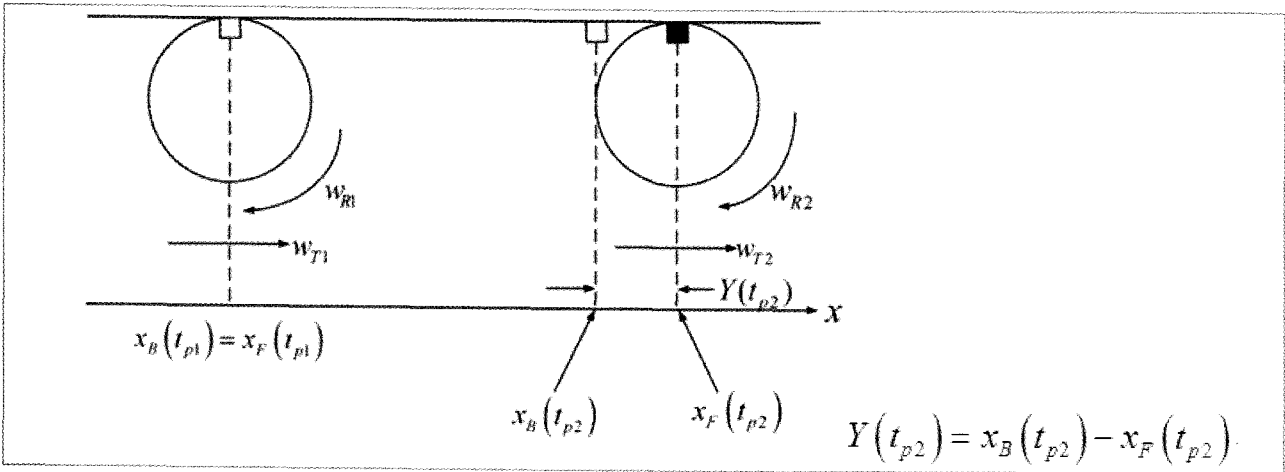


그림 8 레지스터 에러 정의-이전 인쇄물에서 인쇄되어온 패턴과 현재 인쇄물에서의 패턴과의 위치 차이를 의미함<sup>(16)</sup>

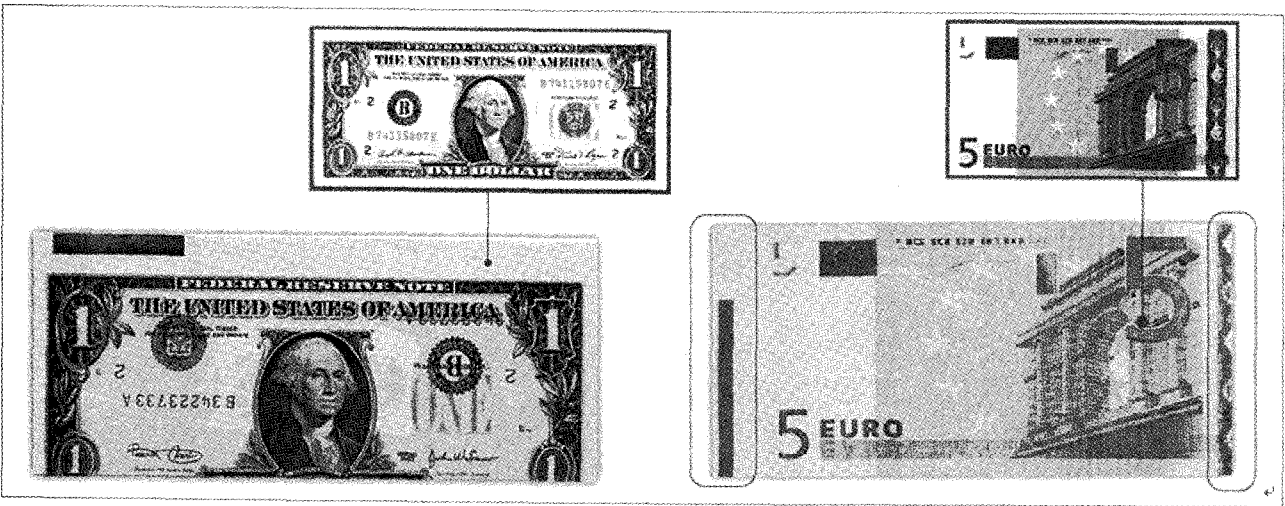


그림 9 달러화 및 유로화에 나타난 절단면(cut-off) 레지스터 에러<sup>(13)</sup>

지 않을 경우에, 소재에 발생하는 장력(tension) 변위, 즉 스트레인(strain) 변위는 이전 인쇄물에서 인쇄되어 이송되고 있는 패턴의 위치를 변화시키게 되므로 인쇄하게 되는 롤의 위상이 정확하더라도 스트레인의 크기만큼 레지스터 에러가 발생하게 된다. 또한 소재는 일정한 범위 내에서 진행방향과 수직인 방향으로 사행 운동(lateral motion)을 하게 되므로 횡방향의 레지스터 에러 또한 발생하게 된다. 이러한 레지스터 에러는 인쇄과정 중에 발생하게 되므로 즉각적인 오차제어에 어려움이 존재한다.

### 레지스터 제어의 역사

1978년 Brandenburg에 의해서 최초로 소재 진행방향의 선형 레지스터 모델이 발표되었다<sup>(16)</sup>. 그 후 추가적인 연구들을 살펴보자. 신문을 인쇄하는 윤전기와 같은 인쇄기에서 최종 프로세스로서 커팅구간(cutting section)이 존재하게 된다. 이는 길이방향으로 연속적인 패턴을 잘라내어 낱장형태(sheet type)로 만들기 위함이다. 이때 실제 잘리지는 위치와 기준 위치 간에 발생하는 위치에러를 컷 오프(cut-off)레지스터 에러라 한다. 이러한 컷오프 레지스터 에러와 소재에 발생하는 장력의 비간섭 제어에 대한

연구가 Brandenburg에 의해 수행되었다<sup>(17)</sup> 또한 비선형 레지스터 제어를 통해서 제어 동특성을 향상시키는 연구가 Yoshida에 의해 수행되었다<sup>(18,19)</sup>. 지금까지 언급한 연구는 모두 그래픽 인쇄를 위한 레지스터 제어로서 제어 정밀도가 100미크론으로 맞춰져 있는데, 이는 사람의 눈으로 구분할 수 있는 최소 크기가 100미크론이기 때문이다. 최근 인쇄형 전자소자 제작을 위한 레지스터의 제어 정밀도는 20미크론 이하를 목표로 하고 있다. 이는 미세 선폭을 갖는 패턴인쇄 시, 각 인쇄층 사이의 위치제어를 통해 다층 소자를 제작하기 위함이다. 인쇄형 전자소자 제작을 위한 레지스터 제어에 대한 연구는 FDRC(Flexible Display Roll-to-Roll Research Center)를 중심으로 활발히 전개되고 있다. FDRC는 기존의 길이방향에 대한 1-D(dimensional) 레지스터 제어모델링을 확장하여, 길이방향뿐만 아니라 횡방향을 포함한 2-D 레지스터 모델을 유도하고 이를 제어하기 위한 2-D 레지스터 제어기법을 개발하였다<sup>(15)</sup>. 연속적인 롤을 통과하는 소재는 횡방향 운동(lateral motion)을 하게 되는데, 이는 2-D 레지스터 에러 발생의 원인이 되므로 이를 고려한 피드포워드(feedforward) 제어기 설계를 통하여 제어정밀도 향상을 달성하였다<sup>(20)</sup>. (그림 8, 9)

### 레지스터 제어기의 종류

레지스터 에러의 제어방법은 크게 보상률 제어 방식과 위상 제어 방식으로 구분된다.

보상률 방식의 레지스터 제어는 하나의 메인 모터와 기어박스를 통하여 각 인쇄롤에 동력이 전달되며, 각 인쇄롤은 하나의 중심축으로 연결되어 동일한 속도와 위상으로 회전 운동하게 된다. 이때 각각의 인쇄롤의 출구측에 광센서

(optical sensor)를 설치하여, 각 인쇄롤에서 인쇄된 패턴의 위치를 측정한다. 레지스터 제어기에서는 각 인쇄롤에서 인쇄된 레지스터 마크를 입력 받아 레지스터 에러를 계산한다. 이때 레지스터 에러는 '첫 번째 인쇄 패턴과 두 번째 인쇄패턴', '두 번째 인쇄패턴과 세 번째 인쇄패턴'과 같이 인접한 인쇄롤 사이(unit-to-unit)에서 계산하게 되며, 이렇게 계산된 레지스터 에러는 각 인쇄롤의 상대적인 위상차이를 의미하게 된다. 각 인쇄롤 사이에서의 위상 차이를 조정하기 위하여 보상률의 위치 변화를 통해 소재의 스펠 길이를 변화시키는 방법을 사용한다. 이는 메인모터와 기어박스를 통해 각 인쇄롤을 동일한 속도로 구동시키기 때문에 스펠길이의 조정을 통해서 인쇄롤 사이의 위상

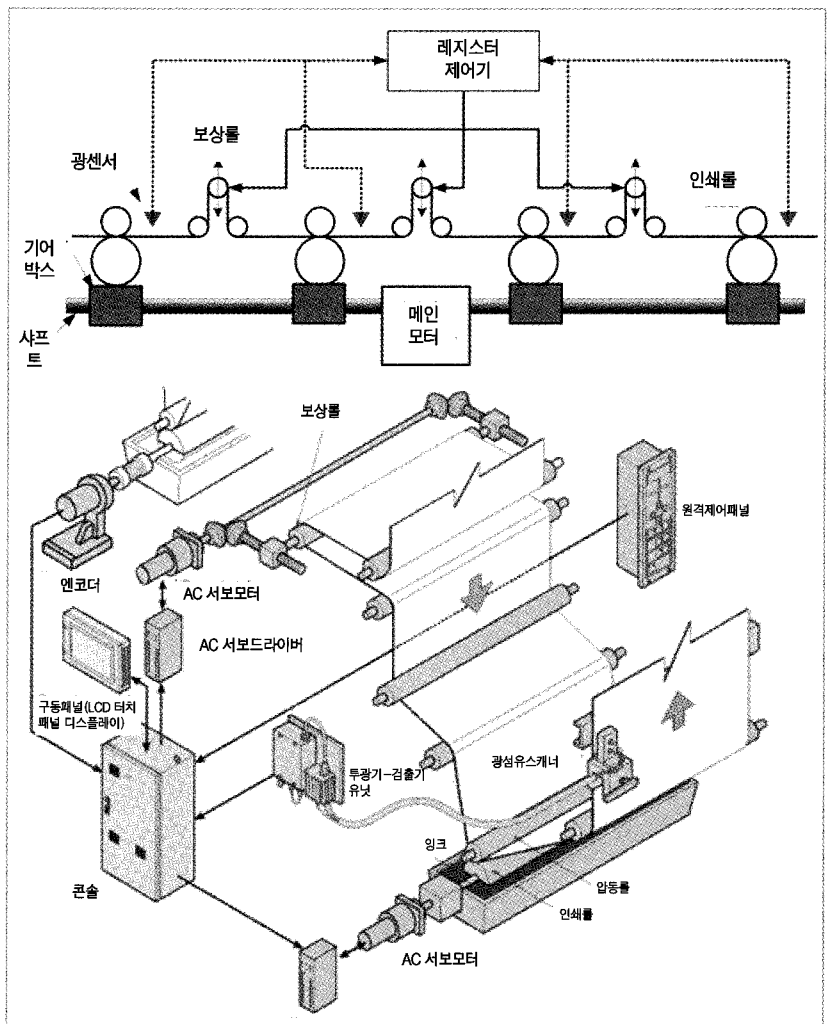


그림 10 보상률 방식의 레지스터 제어기의 라인 개략도 및 시스템 구성도<sup>(21)</sup>

을 제어하기 위함이다. 보상롤을 통한 스펠길이 변화는 한 스펠의 장력변화의 원인이 되며 장력의 변화로 인하여 원단의 장력이 변하게 되고, 이는 소재의 위치 변화를 가져오게 됨으로써 원하는 위치로 소재를 이송하는 원리이다.

섹셔널(sectional) 혹은 샤프트리스(shaftless)방식으로 명명되는 위상제어 방식의 레지스터 제어에 대해 살펴보자. 메인 모터 하나로 구동력을 전달하는 보상롤 방식과 다르게 메인축과 기어박스를 제거하고, 각각의 인쇄롤을 개별적인 모터로 구동하여 레지스터 에러를 제어하게 된다. 개별모터를 사용하게 될 경우, 인쇄롤의 독립적인 속도 및 위상제어가 가능하므로 별도의 보상롤 없이 직접적인 인쇄롤의 위상제어를 통하여 레지스터를 제어하게 된다.

두 가지 방식 모두 인쇄롤 사이의 상대적인 레지스터 에러를 위상변화로써 제어하는 방식으로 각각의 장단점이 존재한다. 보상롤 방식의 레지스터 제어는 한 스펠 내에서 레지스터 제어를 위한 보상롤의 위치변화가 하류에 위치한 인쇄롤과의 위상변화를 일으키지 않으므로 보다 안정적인 레지스터 제어가 가능하다. 하지만 메인축과 기어박스, 보상롤, 보상롤 제어모터 등 추가적인 장비설치가 요구되므로 가격적인 증가 및 장비의 공간활용상의 단점이 존재한다.

위상제어 방식에서는 특정 인쇄롤의 위상변위는 상류스펠과 하류스펠에 위치한 인쇄롤에 직접적인 위상변위를 유발하므로 하나의 스펠에서 독립적인 레지스터 제어가 불가능하다. 하지만 레지스터의 수학적 모델링 및 비간섭 제어, 앞섬보

상제어 등의 제어 이론의 개발을 통해 이러한 단점을 해소시키고 있다<sup>(17~20)</sup>. 또한 메인 축 및 기어박스, 보상롤과 이의 구동장비 등이 없이 각각의 인쇄롤을 직접 구동시키므로 추가적인 장비설치가 불필요하고 공간의 여유가 있으므로 장비 사용자 측면에서 장점이 존재한다.(그림 10, 11)

### 레지스터 에러의 측정

레지스터에러는 기판의 좌,우에 인쇄되는 레지스터 마크를 이용하여 계측된다. 인쇄롤에는 인쇄패턴뿐 아니라 롤의 좌,우에 레지스터 마크를 위치시켜 각 인쇄롤에서의 기준위치를 설정한다. 연속적인 인쇄롤을 통과하는 소재는 각 인쇄롤의 기준위치를 알려주는 레지스터 마크를 통하여 각 인쇄롤간의 위상차이를 계산한다. 또한 레지스터 마크의 측정에는 광센서(optical sensor)를 사용하는 방법과 비전시스템을 이용하는 방법으로 구분된다. 광센서를 이용하는 방법은 두 개의 레지스터 마크를 통과하는 광센서의 펄스(pulse)신호 간격과 소재

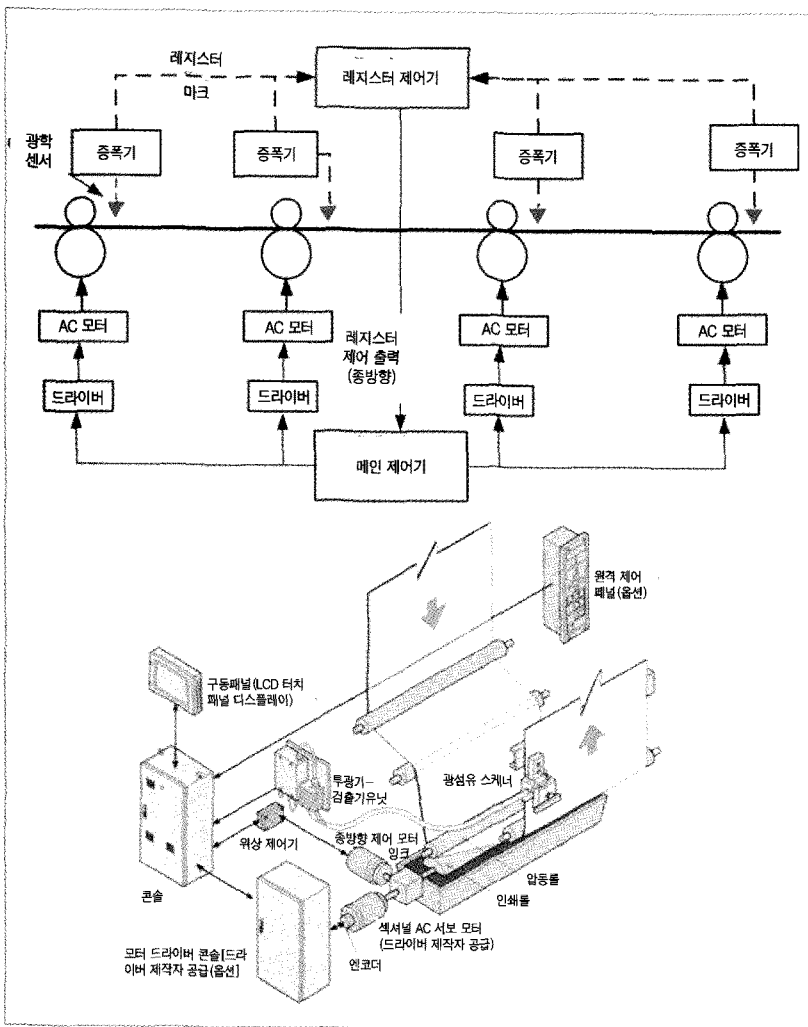


그림 11 위상제어 방식의 레지스터 제어기의 라인 개략도 및 시스템 구성도<sup>(21)</sup>



그림 12 광센서를 사용한 레지스터 마크의 계측



그림 13 비전시스템을 이용한 레지스터 마크의 측정<sup>(22)</sup>



의 이송속도를 이용하여 마크의 간격을 계측한다. 이에 반하여 비전시스템을 이용하는 방법은 공정 속도에 무관하게 직접 레지스터 마크를 CCD카메라를 통해 계측하고 마크간격을 연산하는 방법이다. 이러한 카메라를 통한 계측은 레지스터뿐 아니라 인쇄상태(색, 농도)를 동시에 연산할 수 있으므로 보다 정밀한 인쇄에 적합하다.

#### 참고문헌

- (1) H. Yan, Z. Chen, Y. Zheng, C. Newman, J. Quinn, F. Dotz, M. Kastler, A. Facchetti, Nature 2009, 447, 679-687.
- (2) T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, T. Sakurai, T. Someya Nature 2007, 6, 413-417.
- (3) S. Forrest, Nature 2004, 428, 911-918.
- (4) A. Briseno, S. Mannsfeld, M. Ling, S. Liu, R. Tseng, C. Reese, M. Roberts, Y. Yang, F. Wudl, Z. Bao, Nature 2006, 444, 913-917.
- (5) H. Kang, H. Sung, J. Michromech. Microeng. 2009, 19, 1-9.
- (6) A. Vombrock, J. Ding, D. Sung, H. Tseng, V. Subramanian Proc. Conf. Flexible Electronics & Displays 2009.
- (7) H. Nokki, J. Kallioinen, T. Kololuoma, V. Tuboltsev, J. Tommola, J. of Pho. & Pho 2006, 182, 187-191.
- (8) M. Pudas, J. of Eur. Cer. Soc., 2004, 24, 2943-2950.
- (9) M. Pudas, J. Hagverg, S. Leppavuori, IEEE Tran. on Ele. Pac. Man., 2002, 25, 335-343.
- (10) A. Huebler, Organic Electronics, 2007, 8, 480-486.
- (11) M. Okuya, K. Nakade, D. Osa, T. Nakano, G.R. Kumara, S. Kaneko, J. of Pho. and Pho. 2004, 164, 167-172.
- (12) <http://www.igt.nl>.
- (13) <http://www.komsco.com/>.
- (14) T. Aernouts, OEC 2007, Frankfurt.
- (15) H.K. Kang, J.M.Lee, C.W.Lee, K.H.Shin, ICMDT, 2009.
- (16) G. Brandenburg, Proc. 1. 3rd Int. IFAC Conf. on Ins. and Aut. in the pap. 1976.
- (17) G.Brandenburg, S.Geibenberger, A.Klemm, EPE, 2006, 16, 38-44.
- (18) H.Komatsu, T. Yoshida, S. Takagi, T. Shen, Y. Muto Int. Conf. on Control, Automation, and Systems 2007, 953-956.
- (19) T.Yoshida, S.Takagi, Y.Muto, T.Shen, The 41st CIRP Conf. on Man. Sys. 2008, 417-420.
- (20) H.K. Kang, J.M.Lee, C.W.Lee, K.H.Shin, LOPE-C, 2009.
- (21) <http://main.nireco.com>.
- (22) <http://www.druckueberwachung.de>.
- (23) <http://www.igt.nl>.