

◆ 특집 ◆ 인쇄전자 공정장비기술

# 오프셋 인쇄에서의 동기화 오차 정밀 계측 및 보정 연구

## Measurement and Compensation of Synchronization Error in Offset Printing Process

강동우<sup>1,✉</sup>, 김현창<sup>1</sup>, 이연석<sup>1</sup>, 최영만<sup>1</sup>, 조정대<sup>1</sup>, 이택민<sup>1</sup>  
Dongwoo Kang<sup>1,✉</sup>, Hyunchang Kim<sup>1</sup>, Eonseok Lee<sup>1</sup>, Young-Man Choi<sup>1</sup>, Jeongdai Jo<sup>1</sup>, and Taik-Min Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 인쇄전자연구실 (Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials)  
✉ Corresponding author: dwkang@kimm.re.kr, Tel: +82-2-868-7237

Manuscript received: 2014.4.28 / Revised: 2014.5.21 / Accepted: 2014.5.22

*Flexible electronics have been to the fore because it is believed that flexibility can add incredible value such as light weight and mobility into the existing electronic devices and create new markets of large-area and low-cost electronics such as wearable electronics in near future. Offset printing processes are regarded as major candidates for manufacturing the flexible electronics because they can provide the patterning resolution of micron-size effectively in large-area. In view of mechanics, the most important viewpoint in offset printing is how to achieve the synchronized movement of two contact surfaces in order to prevent slip between two contact surfaces and distortion of the blanket surface during ink transfer so that the high-resolution and good-overlay patterns can be printed. In this paper, a novel low-cost measurement method of the synchronization error using the motor control output signals is proposed and the compensation method is presented to minimize the synchronization error.*

Key Words: Offset printing (오프셋 프린팅), Printed electronics (인쇄 전자), Synchronization error (동기화 오차), Fine patterning (미세 선폭), Overlay accuracy (중첩 정밀도)

### 기호설명

$F_{syn}$  = Friction force caused by the synchronization error  
 $F_{nc,l}$  = Control input of stage in non-contact condition  
 $F_{nc,R}$  = Control input of roll in non-contact condition  
 $F_{c,l}$  = Control input of stage in contact condition  
 $F_{c,R}$  = Control input of roll in contact condition  
 $F_{bearing}$  = Friction load in rotational bearing in the blanket roll  
 $F_{rail}$  = Friction load in linear guide in stage  
 $\omega$  = Rotational speed of the blanket roll  
 $v$  = linear speed of the stage

### 1. 서론

최근 휴대성, 편의성 등이 강조된 플렉서블 전자 소자들이 주목을 받으면서 이를 제조할 수 있는 새로운 공정들에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다.<sup>1-5</sup> 인쇄전자 기술은 기능성 전자 잉크를 인쇄 방식을 통해 패터닝함으로써 전자 소자들을 제작하는 기술로 기존의 반도체 기술에 비해 대면적 공정으로의 적용이 용이하고 재료 손실이 적어 친환경적이며 공정 단가에서도 유리한 장점이 있어 차세대 전자소자 제작 공정으로 많은 관심을 받고 있으며, 디스플레이,<sup>1</sup> 유기 태양 전지(OPV),<sup>6</sup> RFID (Radio frequency identification),<sup>7</sup> OLED (Organic

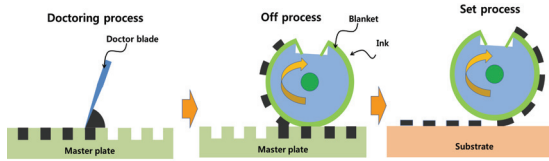


Fig. 1 Schematic of the gravure offset printing process: In the off step, patterns are generated on the blanket's surface and the patterned ink is transferred to the substrate in the set step

light emitting diodes),<sup>8</sup> 투명 전극<sup>9</sup> 등 인쇄 전자 기술을 이용한 다양한 소자의 제작 연구가 진행 중이다. 하지만 이와 같은 인쇄 전자 소자들의 경우 아직 시작단계로 인쇄전자 기술의 성공적인 상용화를 위해서는 아직 넘어야 할 기술적 장벽이 많다. 우선적으로 전자 잉크들의 성능 개선이 필수적이며 인쇄 패턴의 미세화 및 대면적 인쇄에서의 중첩 정밀도 향상을 위한 장비 기술 개발, 인쇄 공정의 신뢰성 개선 등의 연구들이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 기존의 인쇄 공정들 중 미세 패턴 인쇄에 유리한 오프셋 인쇄 장비에서의 동기화 오차 계측 및 보정에 대한 연구 결과가 제시된다. 오프셋 인쇄는 잉크 전이를 용이하게 해주는 PDMS (Poly-dimethylsiloxane) 블랑켓 롤을 보조적으로 사용하여 다른 접촉식 인쇄 공정들 대비 패턴의 미세화가 가능한 장점이 있다. 주로 그라비아 오프셋 인쇄 및 리버스 오프셋 인쇄가 주로 사용되며, Fig. 1에 롤투플레이트 방식의 그라비아 오프셋 인쇄 공정의 개념도가 제시된다. 우선 닥터링 공정에서 잉크가 제판의 오목 형상에 채워지고 오프 공정에서 제판에 채워진 잉크가 블랑켓 표면으로 전이된 후 셋 공정에서 다시 블랑켓 표면에서 기관으로 전사되게 된다. 블랑켓으로 사용되는 PDMS는 제판에 비해 강성이 낮아 쉽게 변형이 가능해 오프 공정에서 오목 형상에 채워진 잉크를 떼어 오는데 용이하며 잉크 용제(Solvent) 흡수를 통해 셋 공정에서 기관으로의 전사에도 도움을 주게 된다.

기계적인 관점에서 오프 공정의 잉크 전이는 Fig. 2에서 보이는 것처럼 인압에 의해 발생하는 닙(Nip)으로 불리는 롤과 플레이트 사이의 접촉면에 의해서 발생하게 되며, 롤의 회전 및 직선 운동에 의해 닙이 블랑켓 롤의 표면과 제판 표면을 이동하면서 제판의 잉크가 블랑켓 롤 표면으로 전이된다. 셋 공정에서도 같은 기계적 메커니즘이

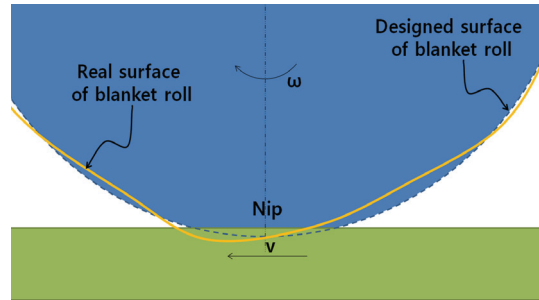


Fig. 2 Schematic of ink transfer in the nip

사용되어 블랑켓 표면의 잉크가 기관으로 전사된다. 이러한 잉크 전이 과정에서 롤의 회전 운동에 의한 블랑켓 표면의 속도와 직선 이송 속도의 동기화 제어가 중요하다. 두 속도 사이의 동기화 오차가 발생할 경우 두 접촉면 사이의 미끄러짐(Slip) 혹은 상대적으로 강성이 약한 블랑켓 표면의 변형이 발생해 인쇄 품질에 직접적인 영향을 주게 된다. 두 접촉면 사이의 미끄러짐은 잉크 전이 시 패턴의 블러링 혹은 끊어짐을 유발하여 미세 선폭 인쇄에 문제가 발생하며, 블랑켓의 변형은 패턴 인쇄 위치 오차를 야기해 중첩 정밀도에 영향을 주게 된다.<sup>10</sup> 하지만 접촉식 인쇄에서의 동기화 조건은 인압, 장비 제작 오차 등 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 정확한 동기화 조건을 알기 어렵다. Dongwoo Kang et al.<sup>10</sup>은 접촉면들 사이의 동기화 오차가 발생할 경우 이에 비례하는 마찰력이 두 접촉면 사이에 발생하는 것에 착안하여 정밀 공구동력계(Dynamometer)를 사용한 동기화 오차 계측 방법을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 고가의 공구동력계를 대체하여 인쇄 장비에서 사용되는 모터의 제어 입력을 이용한 저가 동기화 오차 계측 방법을 제안한다. 또한 Fig. 2에서 제시된 것처럼 블랑켓 롤의 런아웃(Run-out) 오차 등으로 인해 발생할 수 있는 롤 회전 위치에 따른 동기화 오차의 보정 방법이 제시된다.

## 2. 동기화 오차 계측 방법

### 2.1 오프셋 인쇄 시스템

동기화 오차 계측 및 보정 기술 개발을 위한 오프셋 인쇄 시스템이 Fig. 3에 제시된다. 정속 제어를 위해 롤의 회전 운동은 DDR (Direct drive rotary) 모터에 의해 구동되며, 직선 운동은 에어 베어링과 선형 모터로 구성된 갠트리 스테이지 시

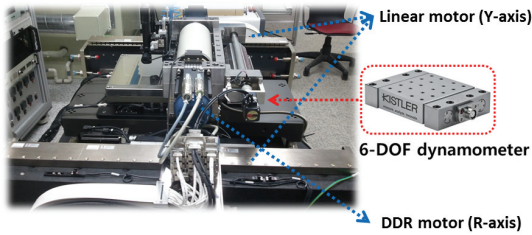


Fig. 3 Gravure offset printing system which is used to evaluate the proposed measurement method of the synchronization error

시스템에 의해 구현되어 롤 회전 시스템 전체를 이송하는 구조로 제작되었다. 인압 제어를 위해 롤 회전 시스템의 양단은 두 개의 스텝 모터를 통해 높이 제어가 되고 있으며 양단의 인압은 개별적인 로드셀을 통해 모니터링 된다. 블랑켓 롤 하단에는 제판과 시편을 고정할 수 있는 진공척 시스템이 위치해 있으며 본 연구에서 제안된 동기화 오차 계측 방법의 정합성 평가를 위해 진공척 하단에 롤과 제판 사이의 마찰력을 직접적으로 계측할 수 있는 공구동력계가 설치되어 있다.

2.2 동기화 오차 계측 방법

일반적인 접촉식 인쇄 장비는 롤의 회전 운동과 직선 운동을 독립적인 SISO(Single input single output) 시스템으로 간주하고 개별적인 피드백 제어기에 의해 구동된다. Fig. 4(a)의 롤과 시편 사이의 접촉이 없는 경우 대비 Fig. 4(b)와 같이 접촉이 발생하는 경우 롤과 시편 사이의 동기화 오차에 의해 발생하는 마찰력은 각 제어 시스템에서 외란으로 작용하게 되며 이는 제어 입력의 변화를 야기하게 된다. 즉, 비접촉시와 접촉시의 각 구동 시스템의 제어 입력의 차이는 동기화 오차에 의해 발생된 마찰력을 의미하기 때문에 이를 이용해 고가의 공구동력계를 사용하지 않고 동기화 오차를 계측할 수 있다.

제안된 방법은 공구동력계를 이용한 직접적인 마찰력 계측 결과와 비교함으로써 실험적으로 검증된다. 블랑켓 롤과 유리 기판을 8kgf의 인압으로 접촉시킨 후 롤의 회전 속도를 변경시켜 동기화 오차를 증가하면서 공구동력계에서 계측된 마찰력과 블랑켓 롤 회전 시스템의 제어 입력과의 비교를 통해 본 연구에서 제안된 동기화 오차 계측 방법의 정합성을 평가하였다. 스테이지 속도는 100mm/s로 설정되었고, 롤 회전 속도의 변화는 동

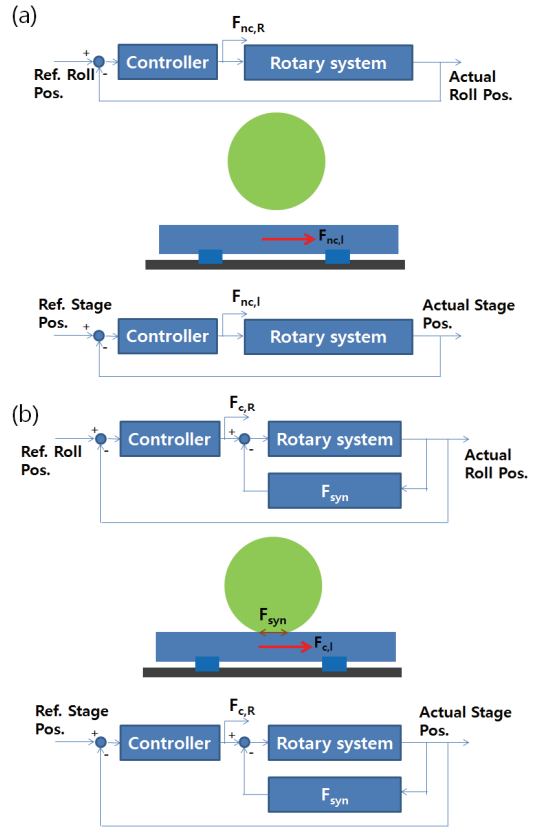


Fig. 4 (a) Control block diagram in non-contact condition (b) Control block diagram in contact condition

기화 조건을 설정하기 위한 장비 변수인 롤 회전 반경 ( $R_s$ )의 조절을 통해 인가된다.

Fig. 5는 두 방법에 의한 계측 결과를 보여주고 있으며, 롤 회전 속도 변화에 따른 공구동력계 계측 결과가 Fig. 5(a)에 제시되고 Fig. 5(b)는 본 논문에서 제안된 제어 입력을 이용한 마찰력 계측 결과를 도시한다. 본 연구에서 제안된 모터 제어 입력을 통한 계측 결과와 공구동력계 계측 결과가 유사한 경향을 보이는 것이 확인되며, 두 계측 방법의 정량적인 비교를 위해 정속 구간에서의 동기화 조건을 만족하는 롤 회전 반경의 대표값을 구하는 과정이 Fig. 6에 도시된다. X축은 각 테스트에서 롤 회전 속도를 변경하기 위한 롤 회전 반경 설정치이며, Y축은 각 방법에서 계측된 정속 구간 내의 평균적인 동기화 오차 계측치로써 각 그래프가 0점을 교차하는 지점의 반경 설정치를 통해 장비를 동기화 조건에서 구동할 수 있는 대표 반경

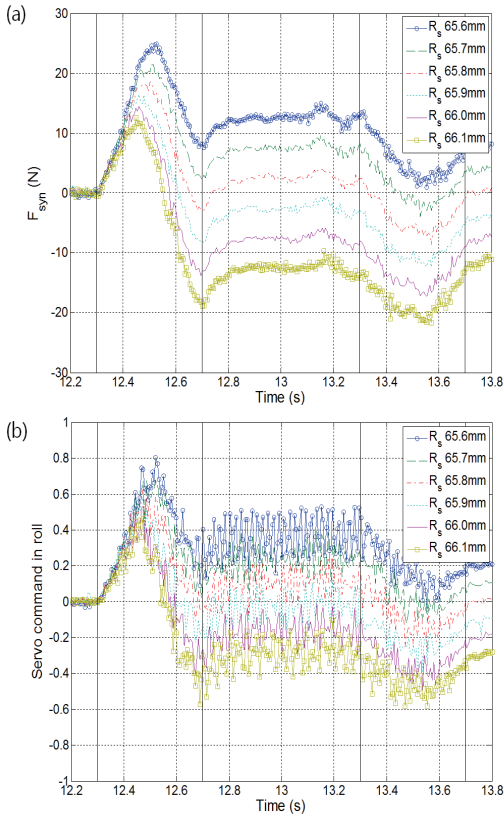


Fig. 5 Measurement results of synchronization error: (a) by dynamometer (b) by servo command

값을 산출할 수 있다. 두 방법에서 구해진 반경 설정치의 차이를 통해 정밀 공구동력계를 사용한 방법 대비 제안된 제어 입력 기반 계측 방법의 정확성을 정량적으로 비교할 수 있다. 공구동력계를 통해 산출된 대표 반경값이 65.85mm인데 반해 제안된 방법은 65.88mm의 값을 보이고 있으며, 제안된 방법은 공구동력계를 사용한 방법에 비해 30 $\mu$ m 수준의 정확도를 보이고 있음이 확인된다.

### 3. 동기화 오차 보정

Fig. 5에서 확인되는 것처럼 동기화 오차는 블랭킷 롤의 제작 반경 오차 등에 의해서 롤 회전 위치에 따라서 변하는 특성을 보이고, 경우에 따라서 Fig. 6과 같은 정속 구간 내의 대표 회전 속도 설정을 통한 동기화 오차 보정은 충분하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 계측된 동기화 오차의

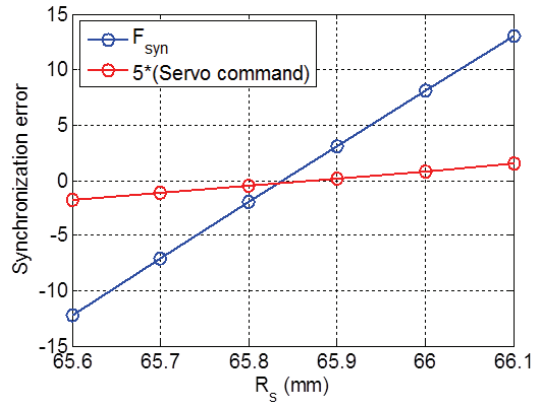


Fig. 6 Averaged synchronization error during region of constant velocity

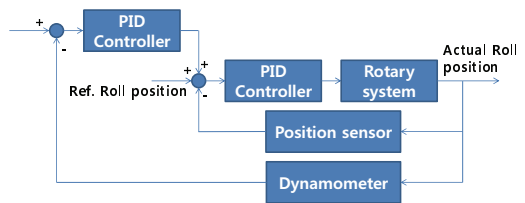


Fig. 7 Control block diagram of the rotation system to reduce the synchronization error

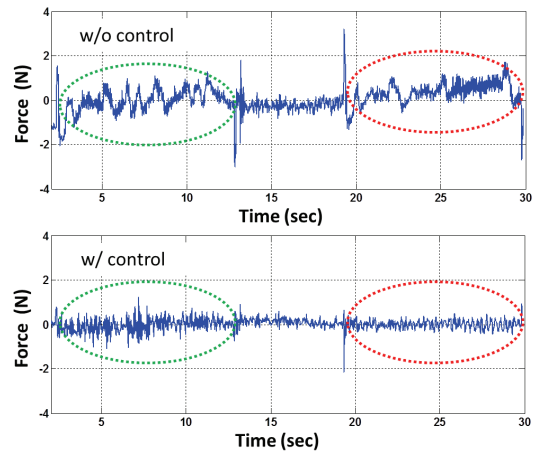


Fig. 8 Compensation result of the synchronization error

피드백 제어를 통해 동기화 오차를 실시간 보정할 수 있는 방법을 제시한다. 제안된 제어 방식은 Fig. 7에 제시되며 스테이지의 경우 기존과 동일하게 인쇄 구간에서 정속 제어를 수행하고, 롤 회전 시스템은 기존의 정속 제어가 아닌 동기화 오차에 의한 마찰력을 최소화하도록 위치 제어 루프를 구

성한다. 최종적인 제어 정도를 높이기 위해 공구 동력계 계측 결과를 피드백 제어를 위해 사용했으며, 제어 전후 공구동력계를 통한 동기화 오차 계측 결과는 Fig. 8에 제시된다. 평가 조건은 오프 공정과 셋 공정 모두 13kgf 인압과 10mm/s의 정속 구간 속도가 사용되었다. 그래프에서 보듯이 제안된 피드백 제어를 통해  $\pm 2N$  수준이던 접촉면 사이의 동기화 오차에 의한 마찰력은  $\pm 0.5N$  수준의 마찰력으로 개선할 수 있음이 확인되었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 오프셋 인쇄에서 잉크 전이 정밀도를 개선하기 위한 동기화 오차의 계측 및 보정 방법이 제안되고 실험적으로 검증되었다. 제안된 제어 입력기반 동기화 오차 계측 방법의 경우 고가의 정밀 센서를 사용하지 않고 기존에 제안된 정밀 공구동력계를 이용한 계측 방법 대비 0.05% 정밀도 수준의 동기화 오차 계측이 가능함이 검증되었다. 또한 기존의 롤 반경 대표값을 사용한 동기화 오차 보정 방식 대비 공구 동력계 계측 결과를 기반으로 한 피드백 제어를 사용함으로써 인쇄 구간에서의 동기화 오차를 25% 수준으로 개선할 수 있음이 확인되었다.

#### 후 기

본 논문은 산업기술연구회 주요사업 및 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 지식경제 R&D 전략기획단 미래선도산업기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

#### REFERENCES

1. Rogers, J., Bao, Z., Baldwin, K., Dodabalapur, A., Crone, B., and et al., "Paper-like Electronic Displays: Large-area Rubber-stamped Plastic Sheets of Electronics and Microencapsulated Electrophoretic Inks," Proc. of the National Academy of Sciences, Vol. 98, No. 9, pp. 4835-4840, 2001.
2. Noh, J., Yeom, D., Lim, C., Cha, H., Han, J., and et al., "Scalability of Roll-to-roll Gravure-printed Electrodes on Plastic Foils," Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on, Vol. 33, No. 4, pp. 275-283, 2010.
3. Kobrin, B., Barnard, E. S., Brongersma, M. L., Kwak, M. K., and Guo, L. J., "Rolling Mask Nanolithography: The Pathway to Large Area and Low Cost Nanofabrication," Proc. of SPIE 8249, Vol. 8249, Paper No. 824900, 2012.
4. Bartzsch, M., Fuegmann, U., Fischer, T., Hahn, U., Kempa, H., and et al., "All-printed Electronics and Its Applications: A Status Report," Proc. of NIP & Digital Fabrication Conference, pp. 13-16, 2006.
5. Lee, T. M., Han, H. S., Kim, B., Kwak, S. W., Noh, J. H., and et al., "Roll Offset Printing Process based on Interface Separation for Fine and Smooth Patterning," Thin Solid Films, Vol. 548, pp. 566-571, 2013.
6. Yu, J. S., Jung, G. H., Jo, J., Kim, J. S., Kim, J. W., and et al., "Transparent Conductive Film with Printable Embedded Patterns for Organic Solar Cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 109, pp. 142-147, 2013.
7. Jung, M., Kim, J., Noh, J., Lim, N., Lim, C., and et al., "All-printed and Roll-to-roll-printable 13.56-mhz-operated 1-bit RF Tag on Plastic Foils," Electron Devices, IEEE Transactions on, Vol. 57, No. 3, pp. 571-580, 2010.
8. Nakajima, H., Morito, S., Nakajima, H., Takeda, T., Kadowaki, M., and et al., "30.2: Flexible Oleds Poster with Gravure Printing Method," SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 34, No. 1, pp. 1196-1199, 2005.
9. Lee, T. M., Noh, J. H., Kwak, S. W., Kim, B., Jo, J., and et al., "Design and Fabrication of Printed Transparent Electrode with Silver Mesh," Microelectronic Engineering, Vol. 98, pp. 556-560, 2012.
10. Kang, D. W., Lee, E. S., Kim, H. C., Choi, Y. M., Lee, S. H., and et al., "Investigation on Synchronization of the Offset Printing Process for Fine Patterning and Precision Overlay," Journal of Applied Physics (Accepted)