

## 전자소자용 Zn 코팅된 프린팅 롤 레이저 미세 패터닝

손현기, 서정

한국기계연구원 광응용생산기계연구실

### Laser micro-patterning of Zn-plated printing roll for electronic devices

Hyonkee Sohn, Jeong Suh

Department of High Density Energy Beam Processing and System, KIMM

#### Abstract

In printed electronics, printing rolls are used to transfer electronic ink onto a flexible substrate. Generally printing rolls are being made by the indirect laser method which is based on the etch process, thus not environment-friendly and not suitable for making a large printing roll. For the pursuit of making a large printing roll for mass printing of electronic devices, we have directly engraved micro-patterns into a Zn plated printing roll using a 30W pulse-modulated fiber laser. We have successfully engraved line patterns ranging from about 15-30 $\mu$ m in width.

**Keywords:** Printed electronics, laser engraving, printing roll, Zn-coated roll

#### 1. 서론

향후 도래할 유비쿼터스(ubiquitous) 시대에 대비하기 위해서는 전자소자를 저가로 대량생산할 수 있는 공정기술의 개발이 필수적이다. 이를 위해 R2R(roll-to-roll) 프린팅 공정으로 전자소자를 대량생산하는 공정개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>1-4</sup> R2R 프린팅 공정에는 플렉소(flexo) 프린팅, 오프셋(offset) 프린팅, 그라비아(gravure) 프린팅 등이 있으며,<sup>5-7</sup> 이와 같은 전자소자 프린팅 공정에서 프린팅 롤 패터닝 기술은 핵심요소기술 중 하나이다.

그라비아 프린팅 공정용 롤의 가공은 현재 대부분 간접식 레이저 각인(engraving) 공정이 활용되고 있으며, 이 공정에서는 롤 표면에 광경화성 폴리머 또는 블랙 래커(lacquer)를 코팅한 후 레이저 빔을 이용하여 전자소자 회로를 패터닝한 후 에칭공정으로 롤 표면에 회로 패턴을 식각하게 된다.<sup>8-11</sup> 레이저 패터닝 공정과 습식 에칭공정이 순차적으로 이루어지는 간접식 레이저 각인 공정은 가공 가능한 패턴의 최소 선폭이 대략 20  $\mu$ m으로 알려져 있어, 소자의 집적화를 위한 패턴 미세화에 대응하기 어려우며, 인쇄전자소자의 생

산성을 향상하기 위한 대형 프린팅 롤의 제작 시 패턴 균일도를 유지하기 어렵다.

직접식 레이저 각인 공정에서는 롤 표면에 직접 조사된 레이저 빔이 금속재료를 용발(ablation)하여 미세 패턴을 가공하게 되므로, 공정이 단순하고 건식 공정으로 친환경적이다. 또한, 프린팅 롤의 대형화에 쉽게 대응할 수 있으나, 금속재료를 용발시키는 공정으로 높은 출력의 레이저 빔이 요구되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 용융점이 낮아 용발 시 낮은 출력의 레이저 빔으로 가공이 가능한 Zn를 코팅한 롤에 전자소자용 패턴을 가공하는 공정을 개발하고, 기초 패터닝 실험을 수행한다.

#### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 직접식 레이저 패터닝 장치를 보여주고 있다. 프린팅 롤을 회전시키는 회전축(Y)과 objective lens를 수평 이송하는 이송축(X)으로 구성되어 있으며, 가공할 롤의 직경 변화에 대응하기 위해 X축 위에 objective lens의 높이를 조절할 수 있는 소형 이송축(Z)이 있다. Y축을 구동하는

회전모터 엔코더(encoder) 분해능은 131,073이며, X축의 분해능은 1 $\mu$ m이다. 패터닝이 사용되는 레이저 발전기는 파이버 레이저로 평균 최대 출력이 30W, 펄스 반복률은 30kHz, 펄스폭은 100ns이다.

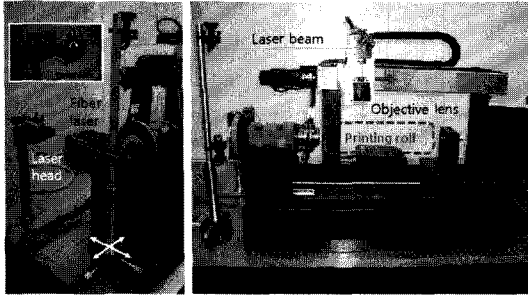


Fig. 1 Experimental setup for direct laser patterning of printing roll.

패턴을 가공할 롤은 SM45C 소재를 연마하고, 구리를 도금한 후, Zn을 도금하여 제작하였다 (Fig. 2). 구리층 위에 도금된 Zn층의 두께는 약 30 $\mu$ m이다. Zn는 용융점이 낮아 저출력의 레이저 빔을 이용하여 패터닝이 가능하며, 열전도 계수가 낮아 열영향이 최소화될 수 있는 장점이 있다.<sup>12</sup> 가공한 프린팅 롤의 직경은 125mm, 길이는 200mm이다. 실험에서 공정 변수는 레이저 출력으로, 출력 변화에 따른 패턴 선폭 변화를 측정하였다. 프린팅 롤에 조사되는 레이저 빔의 중첩률은 레이저 빔의 펄스 반복률과 프린팅 롤의 회전속도의 함수이다. 실험에서 펄스 반복률은 30kHz로 하였으며, 중첩률이 80% 이상이 되도록 프린팅 롤의 회전수를 고정하였다.

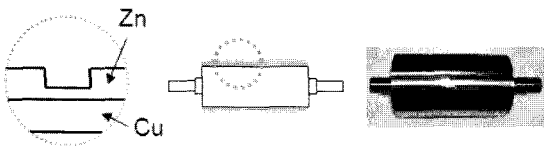


Fig. 2 Zn-coated roll (30 $\mu$ m thick).

실험에 사용된 롤의 직경이 125mm이고, Y축 구동 모터의 엔코더 분해능이 131,073이므로, 입력 파일을 프린팅 롤 표면 위에 픽셀(pixel)기반으로 맵핑(mapping)하면 회전축 방향 즉 Y축 방향으로의 단위 픽셀의 최소 길이는 약 3 $\mu$ m이다 (Fig. 3). X축의 분해능은 1 $\mu$ m이므로, 입력 파일을 맵핑하는 경우 단위 픽셀의 폭은 3 $\mu$ m로 설정하게 된다.

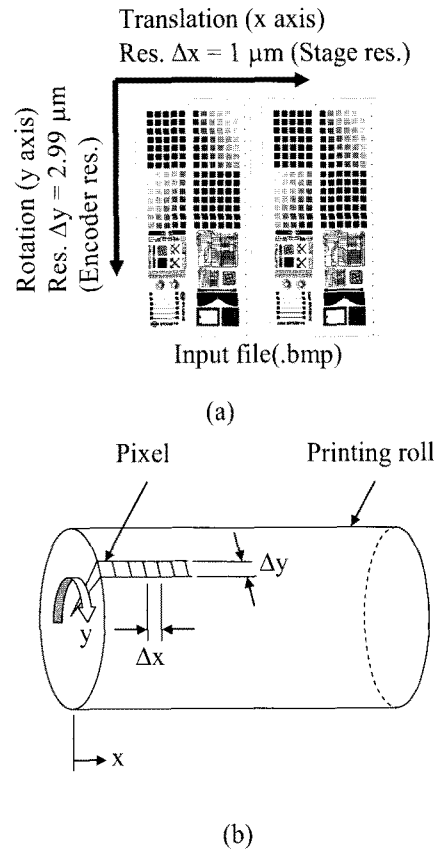


Fig. 3 (a) input file and (b) input file mapping onto a printing roll.

### 3. 실험결과 및 고찰

패터닝 장치에 설치된 반사경, objective 렌즈 등 광학계의 영향을 제거하기 위해 가공에 사용된 레이저 출력은 objective 렌즈 이후에서 측정하였다. Fig. 4에서 프린팅 롤 패터닝 실험 장면을 보여 주고 있으며, 이때 레이저 출력은 1-3W로 설정하였다.

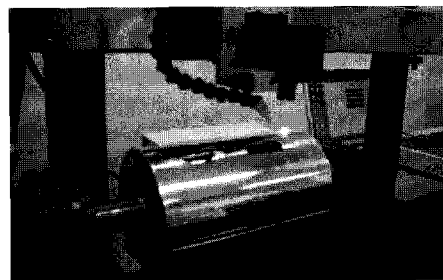


Fig. 4 Patterning of a printing roll.

Fig. 5에서 레이저 출력에 따른 패턴 선폭의 변화를 나타내었으며, Table 1에 평균선폭과 최대 및

최소 선폭을 정리하였다. 최소 출력 조건에서 평균 선폭 대비 선폭오차가 가장 작으며, 최대 출력 조건에서 평균선폭 대비 가장 큰 14.6%의 치수 오차를 보이고 있다. 평균출력과 패턴 선폭은 대략적으로 선형적인 관계를 보이고 있다. 이는 설계하고자 하는 패턴 선폭을 가공하기 위해 필요한 초기 레이저 출력을 설정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

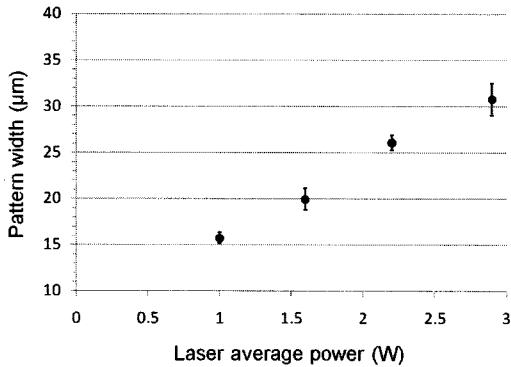


Fig. 5 Laser average power vs. pattern width.

Table 1 Laser average power vs. pattern width

레이저 출력(W)	1	1.6	2.2	2.9
평균 선폭(µm)	15.7	19.9	26.1	30.8
최대 선폭(µm)	16.4	21.1	27.4	35.3
최소 선폭(µm)	14.8	18.0	25.0	28.3

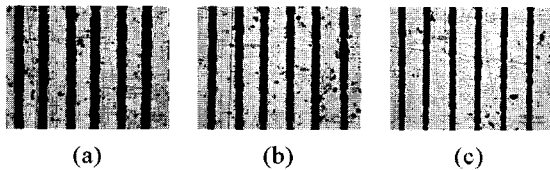


Fig. 6 Average widths of fabricated line patterns: (a) 30.8µm at 2.9W, (b) 26.1µm at 2.2W, (c) 19.9µm at 1.6W.

Fig. 6에서 각 레이저 출력 조건 하에서 가공된 패턴을 보여 주고 있다. 실제 전자소자의 인쇄에 적용하기 위해서는 가공된 패턴을 후처리하고 그 위에 크롬 도금을 하여 사용하게 된다. 이때 크롬 도금의 두께는 조건에 따라 5-8µm이므로, 최종 프린팅 롤의 선폭은 레이저 가공된 패턴의 선폭에서 크롬 도금 두께를 뺀 값이 된다. 따라서 Table 1에서 레이저 출력이 2.2W일 때 패턴의 치수 오차가 최대 5%이하로 정밀한 패턴 가공이 가능하므로, 이를 크롬 도금하면 15µm이하의 선폭을 얻을 수 있다. 최종적으로 전자소자의 프린터를 위해 설계된 패턴 선폭을 얻기 위해서는 레이저 패턴닝 공

정 및 크롬 도금 공정의 최적화가 필요하다. 인쇄 전자소자의 단가를 낮추기 위해서는 생산성을 높여야 하며, 이를 위해서는 프린팅 롤의 길이와 직경을 늘이는 방안이 가장 효과적이다. 프린팅 롤의 길이를 늘이기 위해서는 프린팅 롤의 길이 방향으로의 패턴 정밀도 오차를 유지하여야 한다. 실험에서 사용된 프린팅 롤의 직경은 125mm이고, 길이(유효 패턴닝 길이)는 200mm이다. Fig. 7과 Table 2에서 프린팅 롤의 좌우 끝단과 중심에서 패턴 선폭의 오차 분포를 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 패턴닝 가공이 시작된 왼쪽(pattern location = 0)부터 오른쪽으로 갈수록 패턴의 오차가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 가공시간 경과에 따른 레이저 변수의 변화를 포함하여 여러 가지 요인이 있으나, 초기 프린팅 롤의 고정 상태에서 발생하는 오차 요인이 가장 지배적일 것으로 생각된다. 패턴 선폭을 측정할 세 지점 간의 상대적인 오차는 크지 않으므로 패턴닝 가공 시작 전 프린팅 롤의 정렬오차를 줄인다면, 프린팅 롤의 길이 방향으로의 패턴 오차는 크게 개선될 수 있을 것이다.

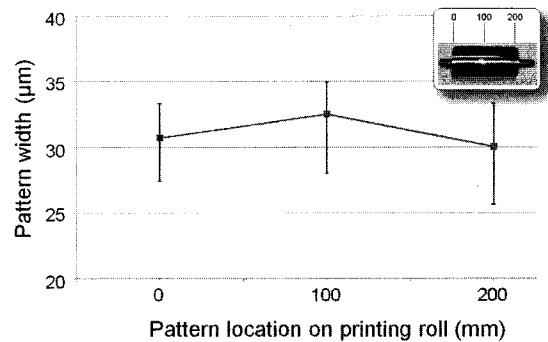


Fig. 7 Pattern width vs. pattern location on printing roll.

Table 2 Pattern width variation along the axis of printing roll

측정 위치	left end	center	right end
평균 선폭(µm)	30.7	32.5	30.0
최대 선폭(µm)	33.3	34.9	33.3
최소 선폭(µm)	27.4	27.9	25.6

프린팅 롤의 축 방향으로의 패턴은 회전 방향으로의 패턴에 비해 정밀도(진직도)를 유지하기가 어렵다. 그것은 원점 정렬 방식에 기인한다. 실험에서 프린팅 롤이 1회 회전할 때마다 매번 회전축 모터에 장착된 엔코더 신호를 기준으로 원점

을 감지하고, 이 원점을 기준으로 입력 파일에서 주어진 위치에 레이저 빔을 조사하게 된다. 원점으로 감지하는 영역이 있어서 원점이 일정 오차 범위 내에서 계속 바뀌게 된다. 원점 감지 영역은 엔코더의 분해능과 프린팅 롤의 회전속도에 직접적인 영향을 받게 된다.

Fig. 8에서 가로 세로 간격이 각각 200 $\mu$ m인 행렬(array) 패턴을 가공하였다. Y축(회전축) 방향으로 각 점의 진직도 오차는 무시할 만하지만, X축(수평축) 방향으로의 각 점의 진직도 오차는 측정결과 최대 20 $\mu$ m이다. 이는 엔코더의 분해능을 개선하고, 동시에 패터닝 장치의 각 부품의 정렬을 개선함으로써 줄일 수 있다.

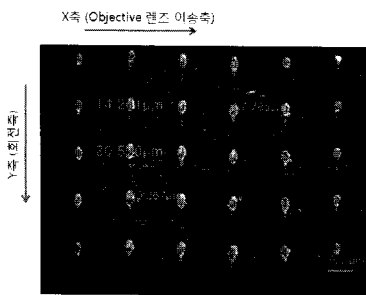


Fig. 8 Dot array pattern.

#### 4. 결론

전자소자의 저가/대량생산을 위한 R2R 프린팅 공정에서 프린팅 롤 패터닝 기술은 핵심요소기술 중 하나이다. 현재 프린팅 롤의 가공은 현재 대부분 간접식 레이저 각인 공정이 활용되고 있으나, 예칭공정이 필수적이며, 가공 가능한 패턴의 최소 선폭이 대략 20 $\mu$ m으로 알려져 있어, 소자의 집적화를 위한 패턴 미세화에 대응하기 어려우며, 대형 프린팅 롤의 제작 시 패턴 균일도를 유지하기 어렵다.

본 논문에서는 용융점과 열전도도가 낮은 Zn을 코팅한 롤에 파이버 레이저를 이용하여 전자소자용 패턴을 가공하는 공정을 개발하기 위해 레이저 출력을 공정변수로 한 패터닝 실험을 수행하였다. 실험에서 레이저 출력이 2.2W일 때 평균 패턴 선폭 26.1 $\mu$ m(최대 오차 <5%)를 얻었으므로, 이를 최종적으로 크롬 도금하면 패턴 선폭은 약 15 $\mu$ m가 될 것이다. 프린팅 롤의 대형화를 위해 필수적인 길이 방향으로의 패턴 선폭 오차 분포와 진직도 오차를 실험적으로 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 기관고유사업(임무형)인 “프린팅 롤 광응용 미세 패터닝 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) 진병두, “인쇄형 유기태양전지 기술,” 기계저널, Vol. 49, No. 8, pp. 51-55, 2009.
- 2) O. Satoshi, “Printable Electronics Used for Products,” Nikkei Electronics Asia, March 2007.
- 3) 글로벌동향브리핑(GTB), KISTI, 2007-12-20
- 4) 윤성철, 임종선, 이창진, “인쇄전자소자 : 고해상도 인쇄공정기술의 현황 및 전망,” 고분자과학과 기술, Vol. 18, No. 3, pp. 238-245, 2007.
- 5) B.Y. Ahn, “Printing Engineering,” Sejinosa, Korea, 1997.
- 6) J.S. Shin, “Gravure Printing & Flexible Packaging,” Insoegaesa, Korea, 1989.
- 7) “Gravure Process and Technology,” Gravure Association of America, 1991.
- 8) H.H. Xiao, Proc. SPIE Vol. 2118, pp. 209-212, 1994.
- 9) P. Ayraas, G.E. Jabbour, S. Honkanen and N. Peyghambarian, Optical Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 575-576, 2000.
- 10) G. Witzgal, R. Vrijen and E. Yablonoitch, Optics Letters, Vol. 23, No. 22, pp. 1745-1747, 1998.
- 11) E. Saint Christophe, H. Fremont, G. N’kaoua and Y. Danto, Electronics Letters, Vol. 33, No. 12, pp. 1049-1051, 1997.
- 12) C. Jagadish: Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications (Elsevier Science Ltd, 2006)