

인쇄 전자소자(printed electronics)용 그라비아 인쇄롤의 레이저 제판 기술 현황

이제훈, 서정, 손현기, 김정오 | 한국기계연구원

1. 서론

현재 사회의 정보화 추세로 볼 때 향후 도래할 것으로 예측되는 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대에는 모든 사물에 개별적 ID(Identification)가 부여되며, 이를 필요에 따라 정보화/상품화할 수 있도록 중앙 관리체제가 구축되어 인류의 생활에 커다란 변화가 있을 것으로 전망되고 있다. 이러한 새로운 시대를 실현하기 위해 여러 분야에서 다양한 기술발전이 필요하며, 그 중에는 RFID 통신 기술, 컴퓨팅 알고리즘, RFID Tag 제작 기술, 표준화 기술 등의 개발이 필수적이다.

현재 대부분의 전자소자는 웨이퍼 기반의 반도체 공정으로 생산되고 있으며, 노광기술을 이용하는 반도체 공정은 고가의 장비와 극한의 공정기술을 필요로 하고 있다. 따라서 유비쿼터스화를 위해서는 기존의 반도체 공정을 대신하여 전자소자를 저가로 대량생산할 수 있는 공정의 개발이 필수적이다. 이를 위해 최근 기존의 대량 인쇄방식인 롤투롤(roll-to-roll) 프린팅 공정을 기반으로 전자소자를 대량생산하는 공정개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

롤투롤 프린팅 공정에서는 상온에서 회로가 각인된 인쇄롤(printing roll)을 이용하여 전도성 잉크(유기물, 폴리머 등)를 기판(종이, 플라스틱 등) 위에 전사(transfer)하여 정밀도 수~수십 마이크로(micron)급의 전자소자를 직

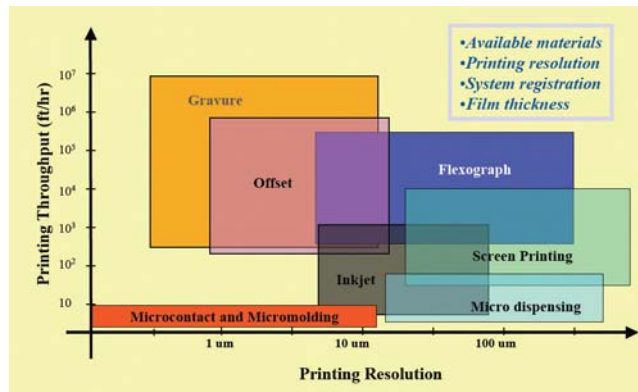


그림 1. 프린팅 공정별 해상도 및 생산성 비교(Motorola's Printed Electronics Technology Team)

접 인쇄하기 때문에 이 공정으로 생산된 전자소자는 인쇄 전자소자(Printed electronics)라 일컬어지고 있다. 예측되는 대표적인 제품으로는 RFID Tag, E-paper, Solar Cell 등이 있으며, 이들 제품의 시장규모는 2010년 기준 각각 80조원(STEMI 2004), 2조원(STEMI 2004), 11조원(US. PV Industry Roadmap)에 이를 것이며 그 성장률 또한 매우 높을 것으로 전망되고 있다.

인쇄물을 이용하여 전자소자를 프린팅하는 공정에 있어 선행되어야 하는 기술은 인쇄물을 가공하는 기술의 개발이다. 인쇄물을 사용하는 인쇄공정에는 플렉소(Flexo) 인쇄, 오프셋(Offset) 인쇄, 스크린 프린팅(Screen printing), 그라비아(Gravure) 인쇄 등이 있다. 그림 1은 모토롤라사의 인쇄 전자소자 기술팀에서 발표한 자료로써, 공정별 프린팅 해상도와 생산성(throughput)을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전자소자를 인쇄하기 위해서는 그라비아와 오프셋 공정이 가장 유리한 것을 볼 수 있다.

그라비아 인쇄공정용 인쇄물을 제작하는 데는 Electromechanical 각인, 직접식 레이저 각인(direct laser engraving), 간접식 레이저 각인(indirect laser engraving) 등 세 가지 방식이 있다^[1-4]. 현재 인쇄물 표면에 폴리머 또는 블랙 래커(lacquer)를 코팅한 후 레이저 빔을 이용하여 전자소자 회로를 패터닝한 후 에칭공정에서 롤 표면에 회로를 식각하는 방식이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 간접식 레이저 각인 공정에서는 가공 가능한 최소선폭은 $20\ \mu\text{m}$ 로 알려져 있다. 인쇄 전자소자의 고집적화, 소형화 추세로 볼 때 선폭 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 회로 패턴을 가진 인쇄물을 가공할 수 있는 레이저 제판 기술의 확보가 반드시 필요하다.

본 글에서는 그라비아 인쇄물의 직접식 및 간접식 레이저 각인 공정과 관련한 최근 업계 동향과 한국기계연구원의 기술개발 현황에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

2. 관련 기술의 현황

레이저를 이용한 인쇄판 또는 인쇄물 각인방식은 레이저 제판기술로 총칭된다. 레이저 제판기술은 전자제판 조각기와 같이 필름없이 직접 제판하는 방식으로 컴퓨터에서 화상처리된 그래픽 데이터를 이용하여 레이저 빔을 인쇄판에 직접 조사하여 제판하는 방식이다. 일명 CTP(Computer To Plate)라고 하는 장비는 평판 오프셋 인쇄에 있어 컴퓨터 데이터(이미지)를 직접 PS판에 레이저로 노광을 하여 제판이라는 공정을 자동으로 수행하는 출력장비이다. CTP는 필름제작에 따른 시간, 노력, 비용을 절감하며 제판에 사용되는 필름 및 현상용 액체들의 사용을 배제함으로써 공해발생 요인을 제거할 수 있다. CTP는 독일 하이델베르크/클레오, 아그파, 헬 등 7~8개 제품이 있다.

CTP는 감광판 또는 감열판을 드럼에 붙여 레이저 노광하여 인쇄판을 만들며, 제판된 인쇄판을 인쇄기 판통에 걸어 인쇄하게 되며, 평판 오프셋 인쇄용으로 한정되어 있다. 그러나 그라비아 인쇄에서는 금속롤(또는 실린더)을, 플렉소 인쇄의 경우에는 고무롤(블록판)을 직접 제판하고, 이 인쇄물을 인쇄기에 걸어 사용하게 된다. 플렉소 고무판과 같이 유연성이 있는 인쇄판의 경우 드럼에 감아서 부착한 상태로 제판할 수도 있다.

그라비아 또는 플렉소 인쇄물의 레이저 제판기술은 CTR(Computer To Roll)이라 일컫는다. CTR에서는 롤 표면에 도포한 광경화성 또는 광분해성 폴리머에 레이저빔을 조사하여 폴리머와 레이저빔의 광화학적 반응으로 이미지를 만든 후 에칭하여 각인하는 간접식 각인과, 롤 표면에 레이저를 조사하여 롤 재료와 레이저빔 간의 반응으로 이미지가 각인되는 직접식 각인 방법이 있다.

간접식 레이저 각인 방법은 자외선(UV) 레이저와 광경화성 폴리머(photoresist)를 사용하는 방법과 적외선(IR) 레이저와 광분해성 폴리머를 사용하는 방법으로 구분될 수 있다⁵⁻⁸⁾. 두 방법은 사용되는 레이저와 폴리머의 차이로 인해 네거티브(negative) 패턴 또는 포지티브(positive) 패턴이 형성되는 점에서 차이가 있을 뿐 원리는 동일하다. 전자의 경우 레이저 빔이 조사된 부위의 폴리머는 광경화가 되어 남게 되고 조사가 되지 않은 부분은 현상(development)시 제거된다. 이 방법에서는 기존의 인쇄를 사진제판업체에서 사용하는 광경화성 폴리머를 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 대표적으로 일본 Think사 제품이 있다(그림 2 참조). 이 장비는 (주)웅덕산업에서 보유하고 있으며 그라비아 인쇄를 가공에 사용하고 있다. 후자의 경우 가공 메커니즘은 Laser Ablation이며, 빔이 조사된 부위의 폴리머가 분해되어 제거되는 원리를 이용한 것으로 일명 black polymer인 광분해성 폴리머가 도포된 롤을 사용한다. Schepers-Ohio사의 Digilas가 이에 속하며⁹⁾, 그라비아와 플렉소 인쇄를 가공에 모두 사용할 수 있다(그림 2 참조). 사용되는 레이저의 최소 스폿 및 해상도는 10 μ m 이하이며, single 또는 multi-beam을 사용할 수 있다. 이 장비는 (주)한일레이저조각에서 수입하여 사용하고 있다. 그림 3은 간접식 레이저 각인 방법으로 제작된 인쇄를 패턴을 보여주고 있다.



그림 2. Think사의 Laser Stream(좌)과 Schepers-Ohio사의 Digilas(우)



그림 3. 간접식 레이저 각인 방식으로 제작된 그라비아 인쇄를 표면(100 ℓ /cm)

직접식 레이저 각인 방법에서는 집속된 열원에 의해 기화(vaporization), 용융 또는 화학분해(chemical degradation)가 일어나므로 집속렌즈의 보호 및 용융방울 등을 붙어내기 위해 보조가스 또는 활성가스가 함께 사용된다. 예를 들어, 플라스틱, 유리 등을 각인할 때는 기화와 용융이 발생하므로 공기 또는 불활성 가스가 필요하다. 나무, 폴리머 등의 각인에서는 화학적 산화 또는 분해가 일어나 잔류 카본(Carbon)이 퇴적되므로 공기로 붙어내어야 한다. 유리, 대리석, 세라믹 등의 각인에서는 열응력에 의한 손상이 일어날 수도 있다. 스테인리스, 구리 등과 같은 금속의 직접식 레이저 각인의 경우는 비금속에 비해 가공이 어려우므로 에너지 밀도를 높이고, 발열반응(exothermic reaction)을 일으키기 위하여 수 kW급 고출력의 레이저 빔과 산소와 같은 반응가스가 필요하게 된다. 현재 그라비아 인쇄물의 직접식 레이저 각인에 사용되는 시스템은 Daetwyler사의 Laserstar가 있으며(그림 4 참조), 일반적으로 그라비아 인쇄물에 사용되는 구리 대신 저융점의 zinc가 코팅된 실린더를 사용하고 있다¹⁰⁾. 레이저 헤드를 2개 사용하며, 레이저의 반복율(repetition rate)은 140 kHz, 해상도는 175 lpi(line per inch)이다.



그림 4. 직접식 레이저 각인 장비(Laserstar, Daetwyler사, 스위스)

3. 한국기계연구원의 기술개발 현황

3.1 복합 레이저 제판 시스템 구성

신문, 잡지 등 일반 인쇄물을 제판하기 위해 개발한 광경화 방식의 레이저 제판장치를 수정·보완하여 간접식 레이저 각인(광경화) 방식과 직접식 레이저 각인 방식으로 인쇄물을 가공을 할 수 있는 복합 레이저 제판 시스템을 구성하였다(그림 5 참조)^[11,12]. 간접식 각인 방식에서는 아르곤 이온 레이저(UV 파장)를 제어하여 인쇄물 표면에 코팅된 광경화성 폴리머(photoresist)를 패터닝하게 되며, 직접식 각인 방식에서는 Nd:YAG(IR 파장) 레이저를 제어하여 인쇄물을 직접 각인하게 된다.

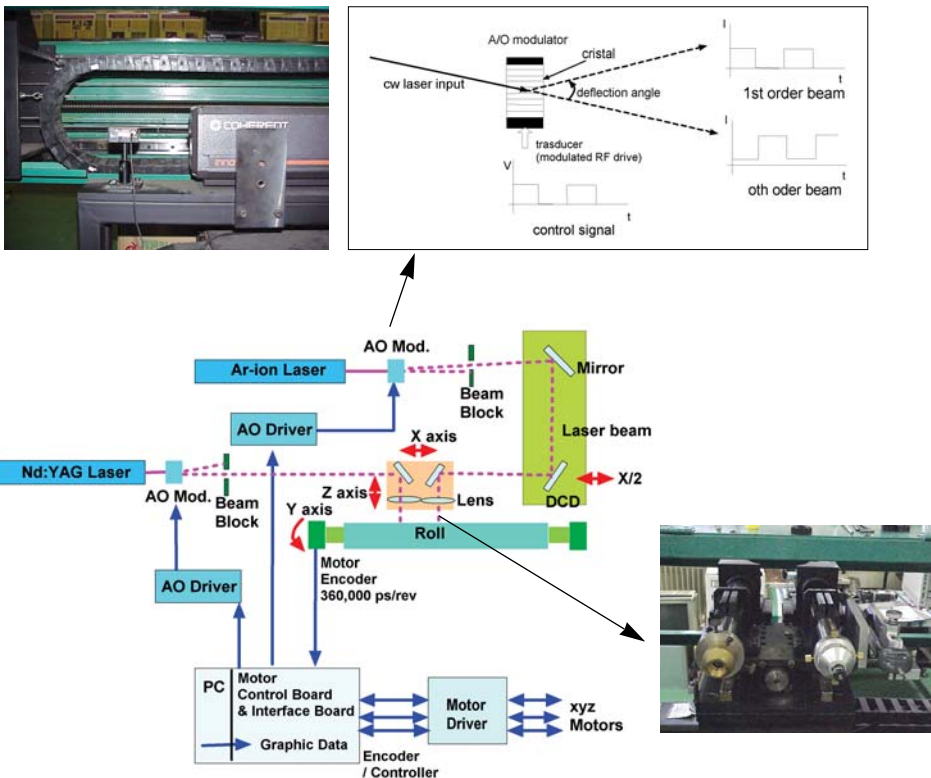


그림 5. 복합 레이저 제판 시스템 개략도(광학계 및 제어구성도)

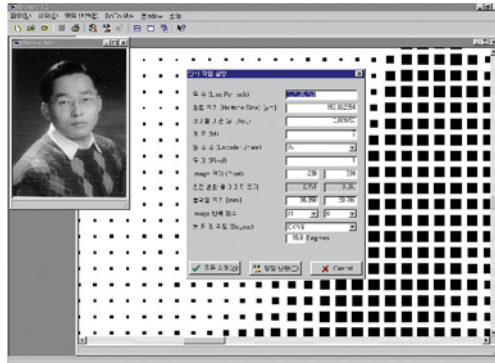


그림 6. 망점 변환 소프트웨어

그라비아 인쇄용 롤에는 화상의 계조를 나타내기 위해 오목형 망점(halftone dot)이 형성되어 있으며, 망점들이 잉크를 전이하여 화상을 피인쇄물에 재현하게 된다. 망점 데이터는 그림 원고로부터 망점 변환 소프트웨어를 통하여 생성되며, 이 데이터 신호와 레이저 빔을 on/off 제어하는 A/O 모듈레이터가 동기됨으로써 레이저 빔 조사에 의한 직접 패터닝 작업이 이루어진다^[13]. 이미지로부터 연속계조의 망점을 만드는 망점변환용 상용 소프트웨어들은 다수가 있으나, 이들은 대부분 평판 오프셋 인쇄용에 적합하고, 그라비아 인쇄용으로 사용하기 위해서는 프로그램의 수정이 필수적이다. 그림 6은 개발된 망점변환 소프트웨어를 보여주고 있다^[14]. 망점 변환된 데이터를 복합 제판 시스템에 입력하면, 망점 데이터는 각인작업을 수행하는 제어부와 인터페이싱되므로, 전체 공정은 PC에서 하나의 운영 소프트웨어로 운용된다.

그림 7은 이미지 데이터를 인코더 신호에 동기하여 FIFO를 이용한 AO 모듈레이터 제어신호 발생까지의 과정을 보여주는 타이밍 차트이다. 그림의 높이(화소수)와 폭(화소수)은 롤의 길이방향으로 주사되는 레이저 빔의 수와 1회전 당 데이터 버퍼에서 내보내어지는 비트(bit) 수(분주 CLOCK 수)와 같게 된다. 즉, 롤의 원주 둘레를 분주된 CLOCK 수로 나눈 값을 1회전 당 진행거리로 한다. 따라서 이 진행거리와 원주 둘레를 따라 분주된 위치로 나누어진 작은 격자들에 대해 레이저 빔을 on/off할 것인지를 결정할 수 있다. 롤의 회전 인코더 신호를 2분주하여 사용한다면, 이때 CLOCK 신호는 SCOP와 같게 된다. SO(serial out)는 0x92f2와 같은 순차적인 16 bit의 parallel 데이터를 CLOCK 신호에 맞춰 내보내는 신호이다. 그림 8은 공구강을 이용하여 간접식 레이저 식각 방식으로 제작한 인쇄롤이다.

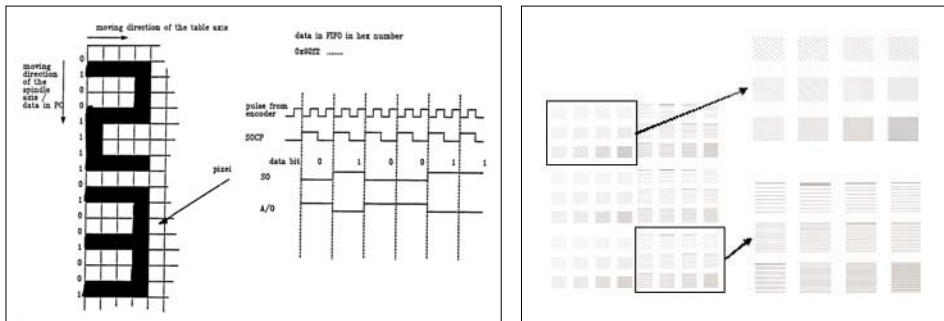


그림 7. 데이터와 AO 모듈레이터 제어(좌) 및 감광지 위에 가공된 패턴

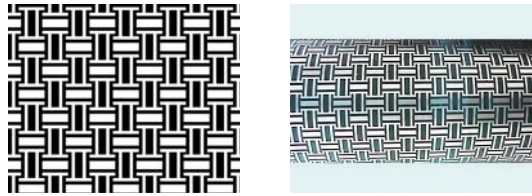


그림 8. 인쇄 패턴(좌) 및 인쇄물에 가공된 패턴(우)

3.2 인쇄롤의 직접식 레이저 각인 기술에 대한 기초 연구

3.2.1 나노초 레이저(Nd:YAG)를 이용한 인쇄롤 각인

Nd:YAG 레이저와 스캐너를 이용하여 선폭 $100\ \mu\text{m}$ 급의 망점가공 방식으로 인쇄롤을 가공하였다. 시스템의 전체적인 구성은 그림 9와 같으며, 시스템은 크게 Q-switched Nd:YAG 레이저, 스캐너, 구동 모터 및 드라이버, 제어용 PC, 그리고 광학계 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 2×10^{-6} 초, 반복율은 5 kHz, 첨두출력은 1.2 kW이다. 인쇄롤의 회전축(X축)은 정속운전이 용이한 서보모터 구동방식이며, 테이블 이송축(Y축)은 위치제어 방식이다. 인쇄롤이 정지된 상태에서 스캐너에 의한 빔이송으로 가공이 이루어진다.

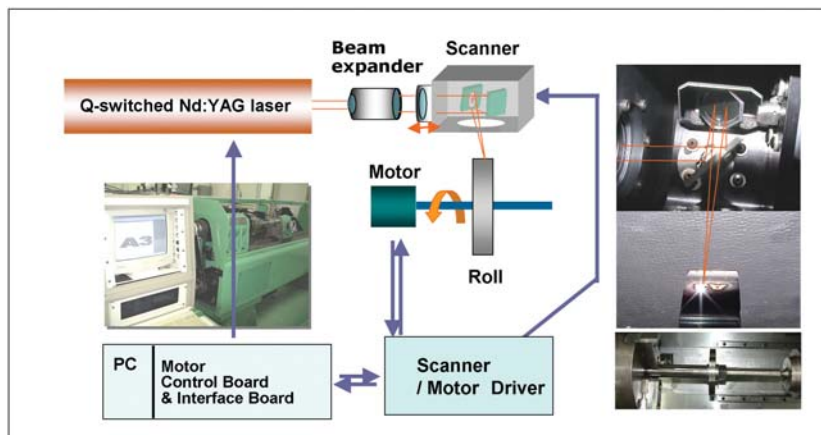


그림 9. 인쇄롤 가공 시스템의 구성도

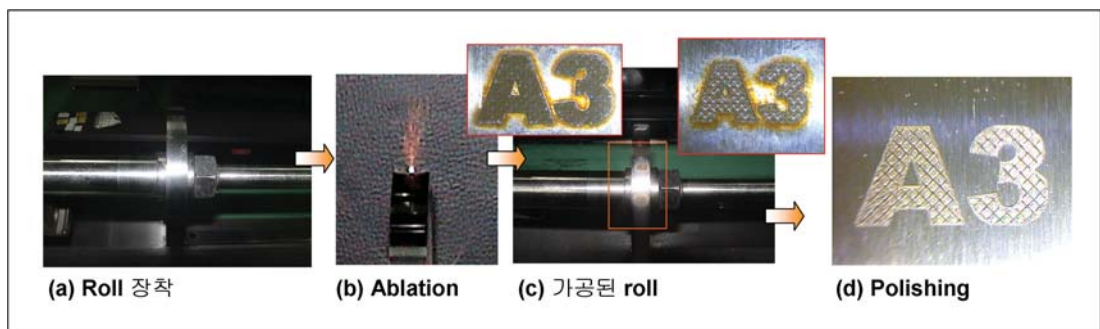


그림 10. 레이저를 이용한 인쇄롤 가공 순서

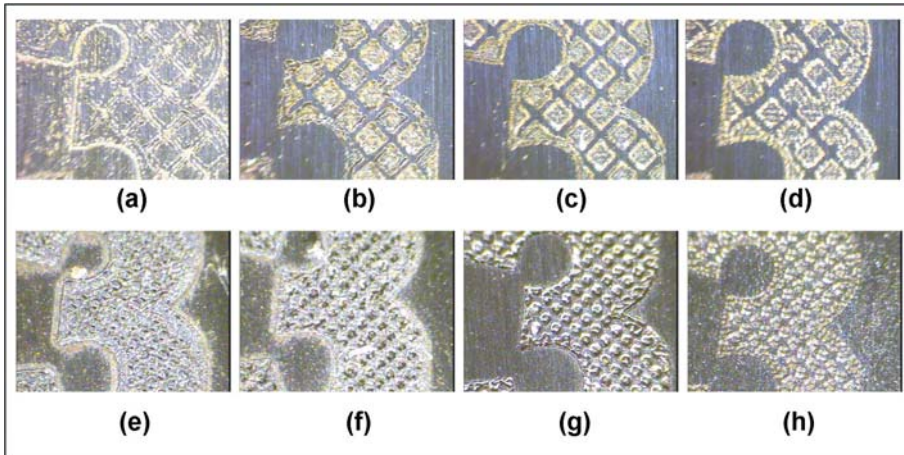


그림 11. 레이저의 입력 변수에 따른 가공 현상

그림 10은 인쇄물의 가공 순서로서 지그에 롤을 장착하고 난 후, 어블레이션 가공을 하고 연마(polishing)를 거쳐 완성품이 제작되어지는 일련의 공정을 나타내고 있다. 실험 결과는 그림 11에 나타나 있으며, 각각 사각형 패턴과 원형 패턴으로 나뉘어 실험을 수행하였다. 실험에서 잉크 포켓의 제작 시 내부의 채움 무늬는 BMP 화일의 변환 형태인 Raster 스캐닝으로 제작하였고, 문자 외곽선 처리기술을 개발하여 양질의 제품을 제작할 수 있었다.

3.2.2 극초단 펄스 레이저의 특성 비교

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저 빔과 재료 간의 상호반응 시 발생하는 열이 재료의 내부에 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 열적 손상이나 구조변화를 발생시키지 않는다는 것이다. 특히 금속재료의 경우 레이저의 에너지가 금속 내부로 전달될 때 준자유전자, 원자 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10 피코초(10^{-12} 초) 가량의 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다. 극초단 펄스 레이저의 펄스폭(재료-빔 반응시간)이 15피코초 이하이므로 레이저빔과 재료의 상호반응 시 발생하는 열이 내부 또는 주변으로 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는 장점이 있다. 열확산은 취성이 높은 재질인 경우 미소크랙(micro-crack)을 유발하므로 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료에도 유리하다고 할 수 있다. 이와 같이 극초단 펄스 레이저는 열확산을 방지하는 효과 외에 가공물의 주변에 형성되는 용융물(melt) 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고, 발생된다 하더라도 매우 미세한 파우더 형태이며 쉽게 제거할 수 있어 미세가공이 요구되는 전자소자용 프린팅 롤을 가공하기에 적합한 레이저로 판단된다.

극초단 펄스 레이저로는 Nd:YVO₄를 매질로 하는 피코초 레이저를 사용하였으며, 펄스폭은 12 ps, 최대 반복율은 500 kHz이다. 그림 12는 실험에서 사용한 피코초 레이저를 나타낸다. 피코초 레이저를 이용한 금속가공의 기초 실험에서 레이저 조사 속도, 펄스 반복율 변화에 따른 가공깊이를 측정하

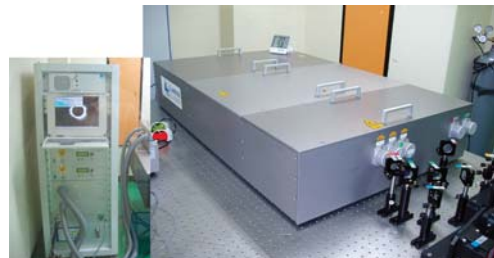


그림 12. 피코초 레이저 시스템 (한국기계연구원)

였다. 레이저 조사 속도는 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 및 5 mm/sec, 펄스 반복율은 100 kHz로 설정하였으며, 주변 온도 변화의 영향을 배제하기 위해 항온(24℃) 분위기에서 가공하였다. 피코초 레이저와 비교하기 위해 사용된 레이저는 펄스 레이저(Coherent: 100 fs)와 나노초 레이저(Lee: 235 ns)이며, 가공재료는 미세 금형 재료로 많이 사용되고 있는 니켈을 이용하였다. 사용한 광학렌즈는 객관적인 비교를 위해 동일한 N.A. 값(0.4)을 가지는 대물렌즈(mitutoyo, Japan)를 사용하였으며 레이저 빔의 출력은 렌즈를 통과한 후의 측정값을 기준으로 하였다. 피코초 레이저의 경우 나노초 레이저에 비하여 깊게 가공되었으며 주변에 금속의 분해된 입자인 잔유물(debris)이 산포되어 있었다. 반면 나노초 레이저 가공의 경우 재료 표면에서 별도의 어블레이션 현상이 발견되지 않은 채 용융의 흔적이 발견되었다. 이는 피코초 레이저의 경우 나노초 레이저에 비하여 열적영향이 현저하게 적어 정밀가공에 유리하다는 것을 보여주는 것이다.

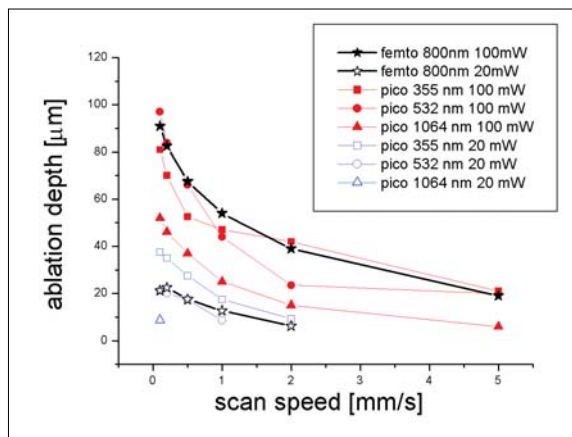


그림 13. 피코초 레이저와 펄스 레이저 가공성 비교

그림 13은 피코초 및 펄스 레이저에 의해 가공된 니켈의 가공깊이를 나타내는 그래프로서 800 nm의 파장을 가지는 펄스 레이저의 경우 100 mW 영역에서 피코초 1064 nm 파장의 경우보다는 깊게 가공되었으며, 355 및 532 nm의 파장을 조사하는 피코초 레이저와 비슷한 가공경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 비교적 열적영향이 적은 355 nm 피코초 레이저 빔은 저출력 영역인 20 mW영역에서 펄스 레이저에 비해 가공성이 다소 뛰어난 결과를 보였다.

그림 14는 출력 및 파장에 따른 니켈의 단일 펄스 가공 시 직경을 나타내는 그래프로서 500 mW의 출력에서는 355 nm 파장의 빔을 조사한 경우가 가장 작게 가공되었다는 것을 보여주고, 상대적으로 저출력 영역인 5 mW의 355 nm 파장을 가지는 레이저 빔인 경우 주변부에 용융물이 전혀 생기지 않은 2 μm 직경의 홀이 가공되었는데 이는 355 nm 파장의 저출력영역은 정밀가공에 유리한 영역으로서 전자소자용 프린팅 롤의 가공시 적합한 파장은 UV 영역이라는 것을 의미하는 것이다.

4. 고찰

인류의 생활을 편리하게 변화시킬 것으로 예상되는 유비쿼터스 시대가 본격화되기 위해서는 앞서 밝힌 바와 같이 RFID 통신 기술, RFID Tag 제작 기술, 표준화 기술 등이 필수적이다. 특히 RFID 등 필요한 전자소자를 저가에

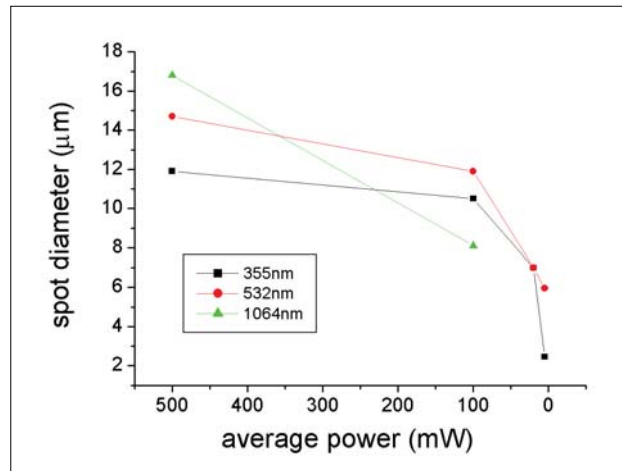


그림 14. 파장과 평균출력 변화에 따른 스폿 직경의 변화

대량 공급할 수 있는 기술 체계의 구축이 요구되고 있다. 이를 위해서 전자소자를 인쇄 기법을 통해서 제작하는 기술은 RFID 등을 저가에 대량 공급하는데 강점이 있으나, 공정기술, 재료기술이 개발단계에 있으므로 전세계적으로 아직은 상용화가 많이 이루어지지 않은 실정이다.

현재 전자소자를 인쇄하는 인쇄물을 제작하는 데는 간접식 레이저 각인 방식이 주로 사용되고 있으나, 에칭공정을 포함하고 있어서 환경문제를 야기시킬 수 있다는 점과 전자소자의 소형화, 고집적화 추세로 미루어 볼 때 회로 패턴의 선폭이 지속적으로 감소될 것으로 예측되어 직접식 레이저 각인 방식에 대한 연구도 활발하게 진행 중이다.

한국기계연구원에서는 그라비어 인쇄물 가공용 복합 레이저 시스템을 구축하였으며, 직접식 레이저 각인 공정으로 그라비어 인쇄물 가공 실험을 수행하였다. 실험에서는 최근 개발된 극초단(피코초) 펄스 레이저와 기존에 사용되어오던 나노초 레이저의 특성을 비교 실험하였으며, 나노초 레이저에 비해 펄스폭이 짧아 미세한 패턴의 각인이 가능한 피코초 레이저를 이용하면 더욱 미세한 패턴의 정밀가공이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다. 이에 대한 지속적인 연구를 통해 공정을 개발하고, 이를 장비화하여 향후 인쇄 전자소자 시장에서 국내 전자산업계가 경쟁력을 확보하는데 기여하고자 한다.

❖ 참고 문헌

- [1] Ahn B. Y., "Printing Engineering," Sejinosa, Korea, 1997.
- [2] Shin J. S., "Gravure Printing & Flexible Packaging," Insoegaesa, Korea, 1989.
- [3] Xiao H. H., "Laser Technology Application in Gravure Printing," Proc. SPIE Vol. 2118, pp.209-212, 1994.
- [4] "Gravure Process and Technology," Gravure Association of America, 1991.
- [5] Äyräaas P., Jabbour G. E., Honkanen S. and Peyghambarian N., "Self-aligned Photoresist Patterning for Integrated Optics," Optical Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 575-576, 2000.

- [6] Baumann B. and Bargon J., "Conducting polymer pattern via Laser Processing," Applied Surface Science 106 pp.287-292, 1996.
- [7] Witzgall G., Vrijen R. and Yablonovitch E., "Single-shot Two-photon exposure of Commercial Photoresist for the production of Three-dimensional Structures," Optics Letters, Vol. 23, No. 22, pp.1745-1747, 1998.
- [8] Saint Christophe E., Frémont H. N' kaoua G. and Danto Y., Application of the Theoretical Model for Line Width Control in Photoresists Sensitized by a Laser Beam, Electronics Letters, Vol. 33, No. 12, pp.1049-1051, 1997.
- [9] www.schepers-mcd.com
- [10] www.daetwyler.com
- [11] 한국기계연구원, 정밀인쇄용 레이저 제판시스템 설계기술개발, 1차년도 보고서(UCN088-830 · M), 2001. 2.
- [12] 한국기계연구원, 정밀인쇄용 레이저 제판시스템 설계기술개발, 2차년도 보고서(UCN100-897 · M), 2002. 1.
- [13] Ihrig S and Ihrig Emil, "Preparing digital image for print," McGraw-Hill book Co., Singapore, 1996.
- [14] Suh J., Bae S. H. and Han Y. H., "Gravure 1.2," S/W Registration No. 99-01-12-6264 (Korea), 1999.



이 제 훈

- 한국기계연구원 정보장비연구센터 센터장
- 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- E-mail : jaeholee@kimm.re.kr



서 정

- 한국기계연구원 정보장비연구센터 책임연구원
- 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- E-mail : jsuh@kimm.re.kr



손 현 기

- 한국기계연구원 정보장비연구센터 선임연구원
- 관심분야 : 레이저 미세가공 기술
- E-mail : hsohn@kimm.re.kr



김 정 오

- 한국기계연구원 정보장비연구센터 기술원
- 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- E-mail : jokim@kimm.re.kr