

LDS를 이용한 폴리머상의 전도성 패턴 형성 연구

백병만*, 이제훈*, 신동식*, 이건설**

*한국기계연구원 광응용생산기계연구실, **국민대학교 기계자동차공학부

A Study on Formation of Conductive Pattern on Polymer Using LDS

Byoung-Man Paik*, Jae-Hoon Lee*, Dong-Sig Shin*, Kun-Sang Lee**

*Department of High Density Energy Beam Processing and System, KIMM

**School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

Abstract

The LDS(Laser Direct Structuring) process uses thermoplastic polymers with a additive compound that serves as plating seed after the activation by laser. It can realize industry requirement such as miniaturization of electrical component, design flexibility and reduction of production steps. The purpose of this study is to introduce LDS, and to investigate the fundamental mechanism. Also the characteristics of conductive patterns were investigated with respect to laser fluence and intensity. We have used a pulsed fiber laser (wavelength : 1064nm) and copper electroless plating to fabricate conductive patterns. The result showed that laser induced metal-organic complex was caused metalization by electroless copper plating, the critical laser fluence was 1.41 J/cm^2 at a scan speed of 1 m/s.

Key Words: LDS(Laser Direct Structuring), electroless copper plating, polymer, pulsed fiber laser

1. 서론

오늘날 반도체 산업과 전기·전자 산업에서는 고집적화, 소형화 및 경량화를 이루기 위해 미세 패터닝(patterning)과 패키징 공정 개발이 활발히 진행되고 있다.

대표적인 기존의 미세 패터닝 기술인 리소그래피(lithography) 기술은 미세선폭 구현이 가능하나 고가의 마스크(mask)가 필요하고, 에칭(etching)액 사용으로 인한 환경문제를 가지고 있다.¹ 그러나 레이저를 이용한 미세 패터닝 기술은 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술로 많은 관심을 받고 있다.

레이저를 이용한 미세 패터닝 기술은 공정의 방법에 따라 크게 subtractive, additive 그리고 semi-additive로 나뉜다. Subtractive 공정은 기판 표면에 전도층을 형성한 후 불필요한 부분을 제거하여 패턴을 제작하는 공정이며, semi-additive 공정은 기판 전체에 수 나노미터(nm) 두께의 금속층을 도포하고 전도층 위에 리소그래피 공정과 도금공정으로 패턴을 형성한 후, 불필요한 나노미

터 두께의 금속층을 에칭공정으로 제거하는 공정이다.

반면 additive공정은 subtractive와는 달리 반드시 필요한 부위에만 전도층을 형성하는 공정으로 다른 공정에 비해 공정의 높은 유연성, 친환경적, 공정 단계 및 재료의 절감 등의 많은 장점을 가지고 있다.²

본 연구에서 사용한 LDS(Laser Direct Structuring)는 레이저를 이용한 additive 기술의 대표적인 방법으로,² 현재 반도체 및 전기전자 산업에서 다양하게 적용되고 있으나 국내에서는 LDS의 도입기로 정확한 LDS 메커니즘 규명이 제대로 되어 있지 않아 소재 및 가공장비를 수입에 의존하고 있고 현재 휴대폰 안테나 모듈에만 일부 적용되고 있을 뿐 산업 전반에서 광범위하게 사용되고 있지 않다.^{3,5}

따라서 본 논문에서는 LDS를 소개하고, 메커니즘 규명을 위한 기초 연구를 진행하였다. 또한 LDS를 이용한 전도성 패턴 구현 시 레이저 공정 변수가 전도성 패턴 형성에 미치는 영향과 문제점을 도출하여 LDS 적용 가능성을 제시하고자 한다.

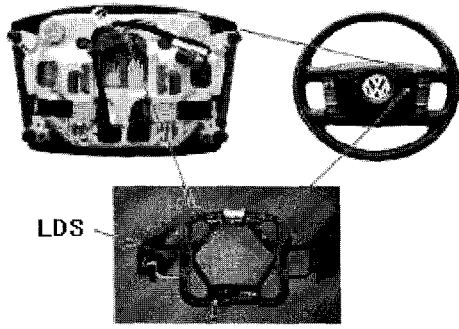


Fig. 1 LDS replacing the wiring of steering wheel.⁷

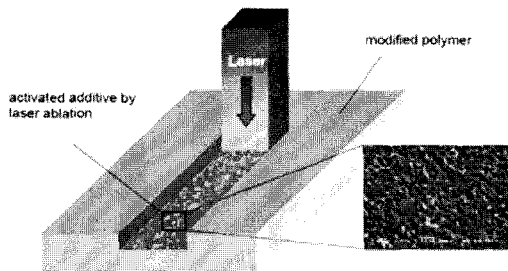


Fig. 2 Principle of LDS mechanism with exposed filler particles to obtain a strong plastic/metal adhesion.

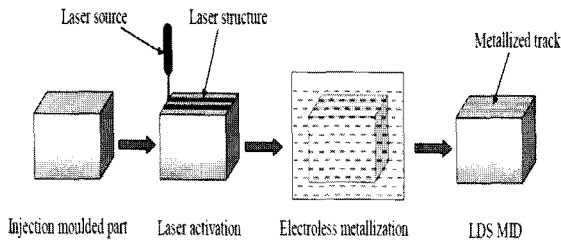


Fig. 3 Schematic illustration of LDS procedure.⁶

2. Laser Direct Structuring

LDS란 플라스틱 사출품에 직접 패터닝한 후 무전해도금을 이용하여 전도성 패턴을 형성시킬 수 있는 레이저 다이렉트 패터닝 방법이다. LDS는 레이저를 이용하여 직접 플라스틱 제품에 회로를 패터닝 함으로써 다양한 3차원 형상의 회로 형성이 가능하고, 기존의 PCB 등을 생략할 수 있어 부품 수와 제품의 단가를 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 1은 LDS를 이용하여 제작한 자동차 steering wheel로 사출품에 다양한 회로를 직접 형성하여 복잡한 전선을 없앤 제품이다.

Fig. 2는 LDS의 개념을 간략하게 도식화 한 것이다. 레이저의 반응에 의해 폴리머에 포함되어 있는 금속유기화합물(metal-organic complex)은 도금 seed로 형성되며 이러한 원리는 레이저 에너지가 금속유기화합물을 광화학적 반응에 의해 화학결합을 분해시키며 이중 금속원소는 레이저 패터닝된 부분에만 형성되어 무전해도금 시 도금 seed 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 레이저에 의해 ablation된 폴리머 표면은 도금층과 폴리머 층간에 강한 기계적 결합이 생성되어 기존 폴리머 무전해도금 시 필요한 에칭 공정을 대체할 수 있다.

LDS의 공정 순서는 Fig. 3과 같이 ① 금속유기 산화물이 첨가된 열가소성수지의 사출성형, ② 제품 표면에 레이저를 조사하여 원하는 회로기판의 활성화, ③무전해 도금등의 3단계 과정을 통해 전도성 패턴을 생성시킨다.

3. 실험 방법

본 연구에 사용된 레이저는 1064nm의 파장을 가지는 Fiber 레이저(IPG, YLPM20)를 사용하였으며, 펄스 폭(pulse duration)과 펄스 반복율(pulse repetition)의 조절이 가능하다. 또한, 고속으로 다양하고 복잡한 패턴을 생성하기 위해 스캐너를 사용하였다. 폴리머에 레이저 패터닝 후 무전해도금(electross copper plating)을 이용하여 전도성 패턴을 형성하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 무전해도금액 조성을 나타낸 것이다.

메커니즘 분석과 공정연구에 사용된 재료는 LANXESS사에서 LDS용으로 개발한 사출성형용 열가소성 수지이며, 각 수지의 조성은 Table 2와 같다.

Table 1 Composition of electroless copper formulations

동화합물	CuSO ₄ (15 g/L)
착화제	EDTA (35 g/L)
환원제	HCHO (10 g/L)
pH조정제	NaOH (pH 12.6)
안정제	2,2dipyridyl (10 mg/l)
도금온도	70℃
도금시간	20분

Table 2 Composition of sample polymers

No.	base resin	contents
sample 1	PET/PBT	mineral+glass fiber 40%
sample 2	PBT	mineral 25%

Table 3 Composition of developed polymers

No.	base resin	class of metal organic complex
A1	PC	Ti, Cr
A2	PC	Mg
A3	PC	Cr, Al
A4	PC	Fe
A5	PC	Cu, Cr

Table 4 Composition of developed polymer

No.	base resin	contents
B1	PBT	mineral (25%)
B2	PBT	mineral (25%), metal organic complex (5%)
B3	PBT	mineral (25%), metal organic complex (10%)

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 LDS 메카니즘 분석

일반적으로 폴리머 표면의 무전해도금은 도금 seed가 되는 촉매(catalyst)금속을 부여하기 위해 Sn-Pd 착화와 액셀레이터 공정을 통하여 도금 seed인 Pd (palladium)를 만들어 낸다. 이러한 Pd는 무전해도금 시 석출물이 Pd를 중심 성장하여 도금층을 형성한다. 그러나 LDS는 이러한 공정을 없애고 레이저에 의해 도금 seed를 형성하기 위해 폴리머에 금속유기화합물을 첨가하여 레이저 조사 후 바로 seed 생성 및 무전해도금 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 본 연구에서 사용한 1064 nm 파장의 레이저 빔은 거의 모든 폴리머에서 빛이 투과되며 단지 금속유기화합물과 반응한다. 따라서 레이저에 의한 도금 seed 생성을 위해서는 금속유기화합물의 레이저 흡수성을 고려해야 한다. 금속유기화합물은 레이저의 에너지에 의해 금속과 산소가 분리되어 패터닝된 부분에 Fig. 2와 같이 도금 seed로 남게 된다. 따라서 이런 금속유기화합물에 포함된 금속원소들은 LDS 메카니즘 분석에 가장 중요한 인자이다. 실험을 통하여 레이저와 반응하여 도금 seed를 생성할 수 있는 금속유기화합물을 알아보았다.

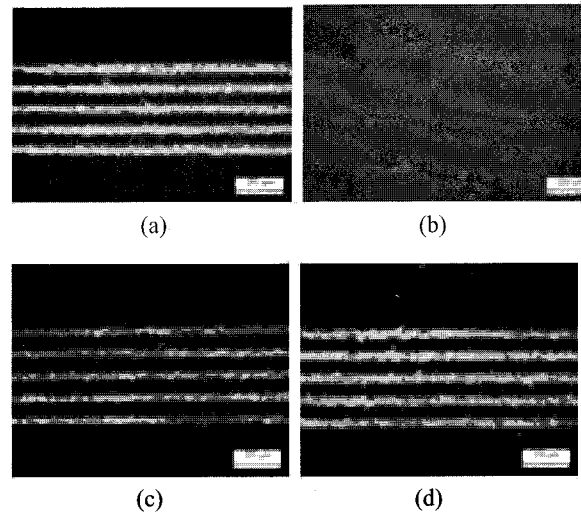


Fig. 4 Optical micrograph of conductive patterns on polymer (a) sample 2, (b) B1, (c) B2 and (d) B3; laser fluence: 2.35 J/cm², intensity: 4.72 × 10⁷ W/cm².

선행실험에서는 Table 3과 같이 Cr, Cu, Fe, Ti 그리고 Al 등이 포함된 금속유기화합물을 PC(poly-carbonate)에 첨가하여 LDS를 적용하였다. 실험 결과 Cu와 Cr계의 금속유기화합물이 첨가된 폴리머(A5)만 레이저 조사 후 무전해도금을 통한 전도성 패턴이 형성되었다.

좀 더 명확한 결과를 얻기 위해 선행실험결과로부터 얻어진 Cu와 Cr계의 금속유기화합물만을 이용하여 폴리머를 제작하였다.

기본 폴리머는 sample 2와 동일한 PBT(poly-butylene terephthalate)를 사용하였으며, Table 4와 같이 mineral과 금속유기화합물의 함유량을 변화하여 사출 성형 후 동일한 레이저 공정변수와 Table 1과 같은 무전해도금 조건을 적용하였으며 sample 2를 비교 대상으로 하여 같이 실험을 진행하였다. 실험결과 Fig. 4와 같이 금속유기화합물이 포함된 B2(Fig. 4(c))와 B3(Fig. 4(d))에서 전도성 패턴이 형성되었으며, 함유량이 높은 B3(Fig. 4(d))의 경우가 좀 더 명확한 패턴이 형성되었다. mineral만 포함된 B1(Fig. 4(b))의 경우 전도성 패턴 형성이 이루어지지 않았다. 이 결과로 mineral의 주성분인 Mg와 Si는 레이저를 흡수하지 못하여 도금 seed를 형성할 수 있는 역할을 하지 못하는 금속원소임을 알 수 있었다. 따라서 Cu와 Cr계의 금속유기화합물은 레이저를 흡수한 후 도금 seed 역할을 하는 금속원소를 만들어 내며, 금속유기화합물의 함량은 전도성 패턴 형성에 미친다는 것을 알 수 있었다.

본 실험 결과를 검증하기 위해 EDX(energy dispersive x-ray spectroscopy)를 이용하여 LANXESS사에서 LDS용으로 개발한 sample 1과 2에 포함된 금속원소들을 분석 하였다.

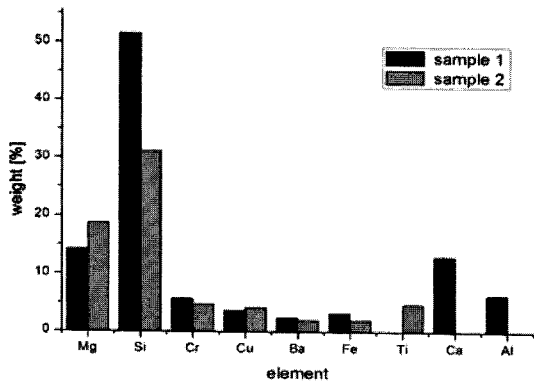


Fig. 5 Analysis of EDX according to polymer surface (sample 1 and 2).

Fig. 5는 sample 1, 2에 포함된 금속원소를 보여 주고 있다. 분석 결과 sample 1 과 2 에서는 Mg, Si, Cr, Cu, Fe, Ba, Ti, Ca 그리고 Al 등의 다양한 금속이 검출되었다. 특히 sample 1과 2에서 높은 함유량을 보인 Mg와 Si는 충전제인 mineral과 glass fiber를 이루는 주성분으로 특히 sample 1의 경우는 Table 2에 나타난 것처럼 충전제가 40% 포함되어 있기 때문에 함유량이 증가된 것이다. 또한 선행실험(시편 A2)을 통하여 Mg가 포함된 금속유기화합물은 도금 seed의 역할보다는 단순한 충전제를 구성하는 원소임을 알 수 있었다. 다른 금속원소(Fe, Ti, Al)들도 선행실험(시편 A1, A3, A4) 결과를 통하여 레이저 조사에 의한 도금 seed형성과는 무관하며 폴리머의 색상을 나타내는 안료(pigment) 성분이라고 판단된다.

EDX 분석결과 sample 1과 2에서도 Cu 와 Cr이 모두 검출되었다. 이러한 결과는 본 연구 실험을 통하여 확인된 Cu 와 Cr계의 금속유기화합물의 금속성분과 일치 하였다. 따라서 LDS 메카니즘의 중요 인자인 금속유기화합물은 Cu 와 Cr이 포함된 것으로, 이 금속유기화합물만이 레이저와 반응하여 도금 seed로 생성됨을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 4와 같이 직접 금속유기화합물을 첨가하여 만든 폴리머는 아직 sample 2 의 경우 보다는 깨끗한 패턴형상이 이루어지지 않은 것으로 보아 금속유기화합물의 입자 크기와 처리 상태에 따른 연구가 계속 진행되어져야 한다.

4.2 레이저 공정변수에 따른 전도성 패턴

레이저 공정변수와 전도성 패턴 형성관계를 알아보기 위하여 레이저의 fluence와 intensity를 변화하여 실험하였다.

Fig. 6은 fluence 및 intensity에 따른 sample 1 과 2의 선폭 및 전도성 패턴 형성 관계를 나타낸 것이다. 실험결과 레이저 패턴닝에 의한 선폭은 최소 18.2 μm 까지 가능하였으나 fluence; 1.41 J/cm^2 , intensity; $1.41 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 이하에서는 전도성 패턴이 형성되지 않았다. 이러한 이유는 임계값 이하의 fluence(1.41 J/cm^2)에서는 금속유기화합물에서 금속원소가 완전히 분리되지 못하여 도금 seed를 형성이 어려우며, 이 결과 전도성 패턴이 형성되지 않는 것이다.

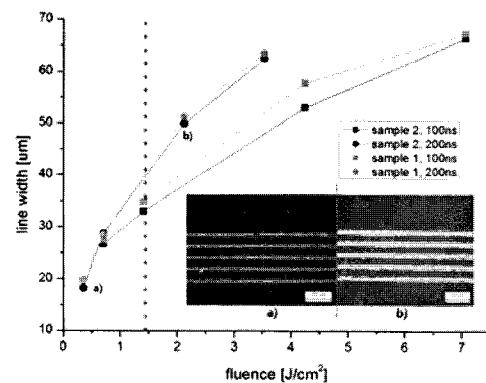


Fig. 6 Line width as a function of laser fluence; scan speed 1000 mm/s.

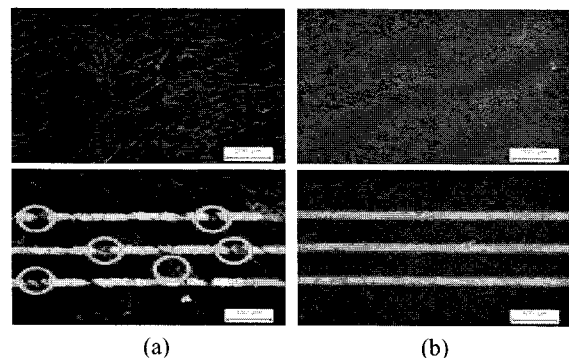


Fig. 7 Optical micrographs of surface after injection molding and fabricated pattern by laser; (a) sample 1 and (b) sample 2.

또한 sample 1 보다 sample 2에서 좀 더 미세한 선폭이 형성되었다. 이는 sample 1에는 mineral 뿐만 아니라 glass fiber가 첨가되어 있어 폴리머 성형 시 Fig. 7과 같이 glass fiber가 폴리머 표면에 형성되어 선폭 형성에 영향을 미침을 의미한다.

전도성 패턴 형성 시 레이저 공정변수에 따른 무전해도금 시 폴리머 상의 도금두께(copper thickness)를 알아보았다. 이를 위해 전자주사현미경과 광학현미경을 통해 실험 후 단면과 도금 두께를 측정하였다. 실험 결과 Fig. 8과 같이 동일한 평균출력에서는 첨두출력이 감소할수록 도금 두께가 점차 증가하는 경향을 보였다. 동일한 첨두출력에서는 평균출력이 5 W에서 7 W로 40% 증가함에 따라 도금 두께는 3.76 μm 에서 4.52 μm 로 약 20% 증가하였다. 또한 도금 후 단면 관찰 결과 주입되는 레이저 에너지가 증가할수록 Fig. 9와 같이 ablation이 증가하여 표면거칠기가 변함을 도금 후 단면 형상으로 알 수 있었다.

실험결과 레이저 공정변수의 변화에 따라 레이저 조사 후 폴리머 표면거칠기가 변하며 이에 따라서 도금 두께 및 도금 형태가 변하는 것으로 판단된다.

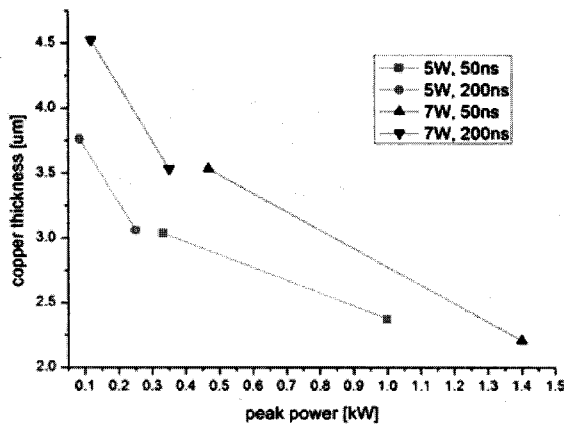


Fig. 8 Copper thickness as a function of peak power and average power.

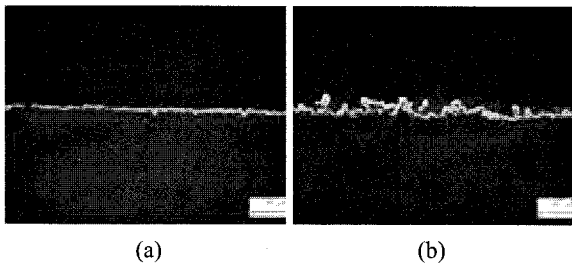


Fig. 9 Optical micrographs of cross section after electroless Cu plating; (a) 2.35 J/cm^2 and (b) 7.07 J/cm^2 .

향후, 레이저 공정변수에 따른 도금 seed 및 표면거칠기의 형성 관계와 전도성 패턴 형성 후 시험평가를 위한 도금 접착력 테스트 및 비저항 측정을 통한 좀 더 명확한 실험이 이루어져야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 LDS 메카니즘 규명을 위한 기초연구로서, LDS 메카니즘을 분석하고 폴리머를 시험 제작 하였다. 또한 레이저 공정변수가 폴리머 상의 전도성 패턴 형성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저에 의해 활성화 되는 도금 seed는 Cu, Cr계의 금속유기화합물이었다.
- 2) 레이저 fluence 1.41 J/cm^2 이하에서는 패턴링 선폭이 미세하게 형성 될지라도 무전해도금이 이루어지지 않았다.
- 3) 두 개의 재료를 비교한 결과 사출 성형된 폴리머의 표면 품질이 우수한 sample 2에서 더욱 미세한 전도성 패턴이 형성되었다.
- 4) 이러한 실험적 연구결과를 바탕으로 폴리머와 레이저와 반응에 대한 정확한 규명 및 다양한 도금공정 변수의 영향 분석 등 지속적인 연구가 이루어질 예정이다.

후기

본 연구는 지식경제부의 산업핵심기술 개발 사업인 “레이저를 이용한 고정밀 전극형성 패턴링 장비개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) K.K.B. Hon, L. Li, I.M. Hutchings, Direct writing technology-Advances and developments CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57, pp. 601-620, 2008.
- 2) 이제훈, 서정, 한유희, 레이저 직접묘화법에 의한 AIN 기판상의 전도성 패턴 제작에 관한 연구, 한국레이저가공학회지, 제3권 제2호, 25-30, 2000.
- 3) M. Huske, J. Kickelhain, J. Muller, and G. Eber, Laser Supported Activation and Additive Metallization of Thermoplastic for 3D-MIDS, Proceeding of the 3rdLANE2001, 2001.
- 4) G. Naundorf, A Fundamentally new mechanism for additive metalization of polymeric

- substrates in ultra fine line technology illustrated for 3D-MIDs, Galvanotechnik D-88348 Bad Saulgau 91, 2449-2451, 2000.
- 5) T. Leneke, S. Hirsch, and B. Schmidt, A Multilayer Process for Fine-Pitch Assemblies on Molded Interconnect Devices (MIDs), Circuit World Vol35, Number 2, 23-29, 2009.
 - 6) A. Islam, "Two Component Micro Injection Moulding for Moulded Interconnect Devices," Ph.D. Thesis.