

# DPSSL을 이용한 3차원 마이크로 형상 조각기술

## Micro-sculpting technology using DPSSL

한국기계연구원 나노공정그룹 장원석, 신보성, 김재구, 황경현

### I. 서론

최근 정보, 전자, 광, 반도체 등 각종 첨단산업에서는 다양한 형태와 재료의 가공방법이 요구되고 있으며 요구되는 부품의 정밀도도 마이크로 단위에서 서브 마이크로 단위까지의 고도의 정밀도를 요하는 기술들이 점차 늘어가고 있다. 또 이에 의한 제품의 미세화, 정밀화에 따라 상품의 부가가치는 소형화에 따른 Performance 향상, Power 절감, Price 감소의 3P효과가 있어 더욱 높아지게 된다.[1]

더욱 더 소형화 되어가고 있는 마이크로 부품은 기존의 2차원 및 준 3차원에서 완전한 3차원 형태의 기술로 발달하고 있으며 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 MEMS 분야에서 구동부 부품이라든가 또는 그를 지지하는 구조체로 쓰일 수 있어 그 활용 가치는 응용에 따라 폭이 넓다고 할 수 있다. 마이크로 부품을 제작하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 1) X-ray를 이용하는 LIGA 공정기술, 2) 건·습식에 의한 식각방법, 3) 레이저를 이용하여 형상가공을 행한 후 무전해나 전주를 이용하여 제조하는 방법을 예로 들 수 있다. 앞선 LIGA 및 건·습식의 방법에 의한 형상제조는 소량의 다양한 형태를 값싸고 빠르게 가공하는데 있어 많은 단점을 가지고 있으며 완전한 3차원 입체형상으로 그 제조공정을 확장하는데 있어 한계를 가지고 있다. 이러한 이유로 레이저를 이용한 3차원 미세형상 제조방법이 꾸준히 연구되고 있으며 그 접근 방법으로는 크게 폴리머의 부가적 응고방법을 이용하는 SLA(Stereolithography)와 어블레이션(ablation)을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 최근 안정성과 고효율성으로 인하여 미세 가공에 있어 응용이 활발히 이루어지고 지고 있는 DPSS(Diode Pumped Solid State) 3고주파 Nd:YOV<sub>4</sub> 레이저를 이용하여 레이저 어블레이션을 기본 제거 메커니즘으로 하는 미세 3차원 형상 가공기술을 개발하였으며 그 공정의 정밀성에 의하여 미세 조각기술(micro-sculpting technology)로 명명하였다.

### II. 실험방법

#### 1. 실험장치

본 연구에서 개발한 공정의 기본 메커니즘은 레이저 어블레이션으로 UV 레이저와 폴리머의 미세 가공에 기초를 두고있다. 본 실험에서 사용한 레이저는 Coherent사의 1.5W 3고주파 Nd:YOV<sub>4</sub> 레이저로 파장은 355nm를 가지며 Q-switch되어 펄스폭은 40nm, 2kHz의 펄스반복률을 갖는다. 미세 가공을 위하여 0.1 $\mu$ m의 위치정밀도를 갖는 Aerotec사의 3축 스테이지를 장착하였으며 레이저 펄스의 초기에 강한 파워집중에 의한 가공깊이 불균열을 막기 위하여 빔의

on/off는 외부에 셔터를 설치하여 가공 프로그램에서 제어하도록 하였다. 또 빔이 조사되는 위치의 확인과 가공부의 모니터링을 위하여 CCD camera를 설치하였다. 본 연구에 사용된 시스템을 Fig.1에 도시하였다.

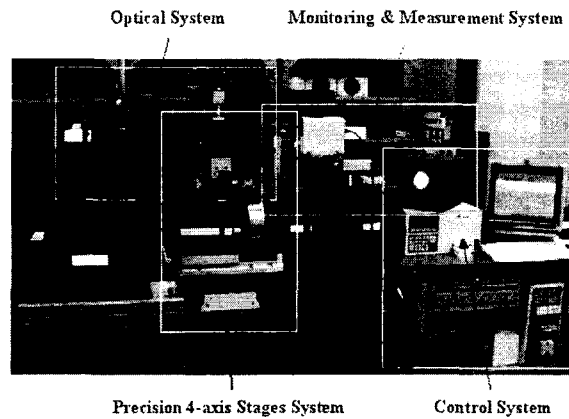


Fig. 1 Experimental setup for laser micro-sculpting

가공부의 선폭 균일성을 유지하기 위하여 빔 소스에서 발진된 선평관된 빔을 원형 편광시키기 위하여  $\lambda/4$  편광기를 설치하였으며 빔의 파워 안정성을 위하여 레이저 소스에서는 안정된 범위의 일정 출력을 조사시키고 파워의 조절을 ND filter set을 이용하여 조절하였다.

## 2. 가공 메커니즘

레이저를 이용하여 3차원 형상가공을 위한 기본 메커니즘은 레이저 어블레이션을 이용한다. 이미 선행연구자들에 의하여 잘 알려진 바와 같이 폴리머의 가공시 입사되는 레이저 빔의 파워에 의하여 가공 깊이 변화가 일정한 관계를 가지고 변화된다. 이러한 특성을 이용하여 기존의 기계가공에서 이용되는 layer-by-layer의 방법을 이용하여 3차원 형상가공에 응용하였다. 가공하고자 하는 형상을 3차원 CAD 데이터로 작성한 후 이것을 레이저 어블레이션에 의한 가공 깊이만큼 형상을 층층이 나누어 가공을 위한 CAM 데이터를 작성한다. 작성된 CAM 데이터 파일에는 빔의 on/off와 최적경로가 설정되게 된다. 본 연구에서 가공 대상으로 선정한 3차원 팬의 형상과 데이터 형성에 관한 부분을 Fig.2에 나타내었다.

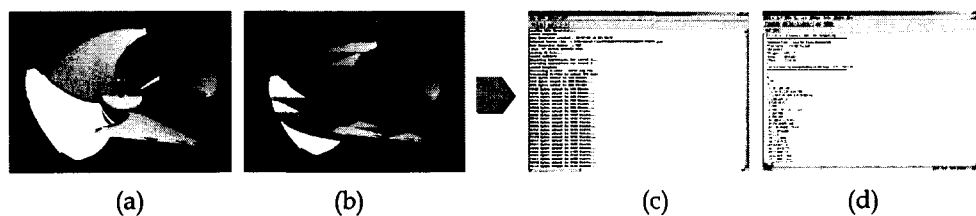


Fig. 2 Rapid manufacturing CAD/CAM program for micro-parts; (a) 3D CAD modeling, (b) sliding of layer-by-layer, (c) CAM data conversion, (d) automatic program for laser microRP process

### III. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 355nm 파장의 레이저에 대한 재료의 가공특성 분석과 함께 가공을 위한 최적의 조건을 선정하기 위하여 기초실험을 수행하였다. 3차원 형상가공에 있어 레이저 에너지 임계값 이상의 조건에서 펄스당 에칭률과 어블레이션에 의한 부산물의 표면증착이 가공재료의 선정에 있어 중요한 요건이 된다. 이를 위하여 기존의 연구자들에 의해 조사된 폴리머의 특성을 조사하였다. 수십 나노초의 펄스폭을 갖는 레이저가 조사되었을 때 폴리머와 레이저의 작용은 광화학(photochemical) 반응과 함께 광열(photothermal) 반응이 일어나며 낮은 에너지 밀도에서는 광화학반응이 가공깊이에 많은 영향을 미치며 높은 에너지 분포에서는 광열반응이 주요 요소가 된다. 레이저 펄스당 에칭깊이에 대한 관계식은 선행연구자들에 의하여 다음과 같이 알려져 있다[2].

$$\begin{aligned}
 X &= X_{pc} + X_{th} \\
 &= \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{E}{E_T}\right) + A_1 \exp\left(\frac{-\epsilon_1}{kT}\right) \\
 &= \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{E}{E_T}\right) + A_1 \exp\left(\frac{-\epsilon_1 \rho C}{k\alpha(E-E_T)}\right) \ln\left(\frac{E}{E_T}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 X는 펄스당 에칭깊이,  $X_{pc}$ 는 photochemical etching rate,  $X_{th}$ 는 photothermal etching rate,  $\alpha$ 는 흡수계수(absorption coefficient), E는 레이저 에너지 밀도,  $E_T$ 는 임계 에너지 밀도를 나타낸다. 식(1)에서 보는 바와 같이 레이저 펄스당 가공 깊이 영향을 주는 가장 큰 인자로는 흡수계수를 들 수 있다. 흡수계수는 재료의 고유한 물성치이며 또한 레이저 파장의 함수이기도 하다. 선행연구자들이 일반적으로 사용되는 UV 레이저 소스의 파장대에서 조사한 폴리머의 흡수계수를 표로 나타내었다[3].

Table 1 Optical absorption coefficients of various polymers

Polymer	Wavelength			
	193nm	248nm	308nm	351nm
Polyimide	$4.2 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	$2.8 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	$1.2 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	$2.6 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$
Polycarbonate	$5.5 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	$1.0 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$	$2.2 \times 10 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$
PMMA	$2.0 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$	$6.5 \times 10 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$
Polyethylene	$6.3 \times 10^2 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$	$< 10 \text{cm}^{-1}$

Table 1에서 보는 바와 같이 각각의 폴리머는 매우 다른 광학적 특성을 보이고 있는데 PMMA의 경우는 대표적인 약흡수체(weak absorber)로 248nm의 파장대를 가는 KrF 엑사이머 레이저를 이용한 경우에는 좋은 가공성을 보이고 있으나 355nm의 파장대에서는 흡수계수가 매우 낮아 대부분의 레이저가 투과되는 특성을 보인다. 반면에 PI의 경우 PMMA에 비해  $10^4$ 이상의 흡수계수를 가지고 있어 여러 파장대에서 강흡수체(strong absorber)의 성질을 보이므로 반도체 리소 및 전자기반에 코팅하여 UV노광을 통한 가공대상체로 폭넓게 사용되고 있다[4].

본 연구에는 355nm의 파장을 가지고 있는 레이저 소스를 이용하여 마이크로 단위의 구조물을 가공하기 위하여 폴리머 시장에서 별크한 재료로 손쉽게 구할 수 있는 PMMA, PEI(Polyetherimide), PC를 이용하여 준 3차원 및 3차원 가공 실험을 수행하였다. 앞의 광학적 물성표에서 보이는 바와 같이 PMMA와 PC는 약흡수체로 투명한 성질을 띠고 레이저 빔의 적은 부분만이 재료에 흡수되어 가공되는 성질을 가지며 PEI의 경우 정확한 광학적 물성치가 알려지지 않으나 PI와 유사한 강흡수체의 성질을 가지고 있어 서로 다른 공정 변수의 선정이 요구되었다. Fig.3에 PEI와 GE사의 흰색으로 착색한 PEI 두 종류의 시편과 PC에 대하여 레이저 어블레이션 실험을 한 결과를 도시하였다.

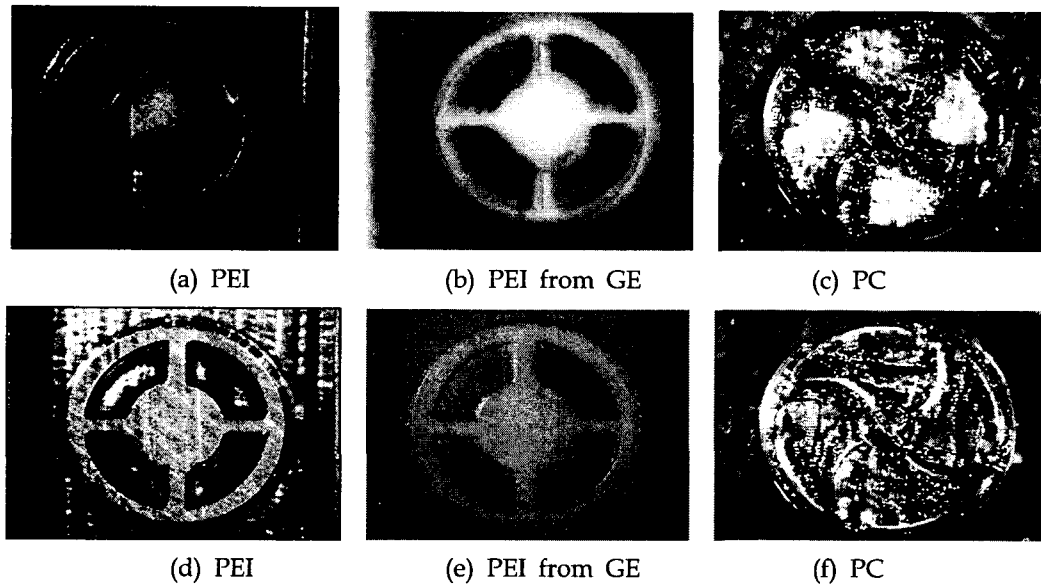


Fig. 3 The results of three dimensional fabrication for PEI and PC  
(a),(b),(c) w/o post processing, (d),(e),(f) w/ post processing

위의 실험결과에서 보는 바와 같이 PEI와 PC 모두 레이저 빔이 조사된 경로에서 탄소증착이 관찰 것을 알 수 있다. 이것은 폴리머의 일반적인 결합인 탄소결합이 레이저 빔에 의한 화학적, 열적반응으로 결합이 끊어지면서 이에 따라 발생하는 부산물들이 표면에서 충격파와 함께 폭발적으로 튀어나오고 레이저와 다시 반응하면서 많은 양의 탄소 클러스터가 발생되어 표면에 다시 증착하는 것으로 보여지고 있다. 탄소증착의 정도는 각각의 폴리머가 가지고 있는 고유한 화학결합에 의하여 많은 영향을 받는데 PEI와 PC의 화학결합을 살펴보면 Fig.4와 같다.

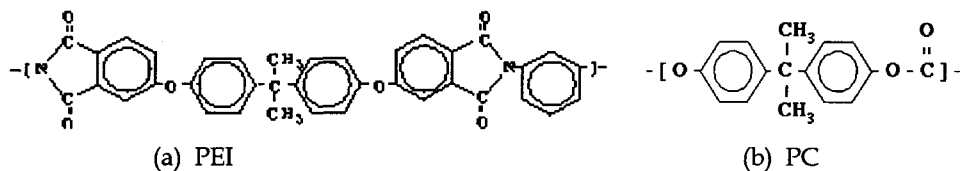


Fig.4 The chemical structure of PEI and PC

위의 두 재료에 대한 화학식에서도 볼 수 있듯이 벤젠 고리를 기본 분자로 가지고 있으며 각각의 방향족 분자들 사이에 탄소 결합이 들어가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 분자 구조로 볼 때 레이저 어블레이션시 발생하는 부산물의 많은 부분이 탄소화합물일 것을 알 수 있으며 또한 완전히 분해되지 못한 벤젠계열의 분자들도 방출되면서 레이저에 의한 반응으로 탄소와 함께 재료 표면을 오염시키는 것으로 생각할 수 있다. 이렇게 표면에 증착한 불순물을 제거하기 위하여 알콜을 이용하여 초음파 세척을 수행한 결과 Fig.4 (d)-(f)에서 볼 수 있듯이 비교적 깨끗한 표면을 얻을 수 있었다. 3차원 형상 조형을 위한 본 연구의 기본 아이디어는 각 층층의 어블레이션을 통한 입체형상가공이므로 각 층을 어블레이션이 오염물이 표면에 증착되면 다음 층의 가공품질에 영향을 미칠 것으로 생각되므로 최종의 후처리 공정이전에 가공하는 동안 He, H<sub>2</sub> 가스를 이용하여 분위기를 만들어 주거나 가공부를 강하게 불어주거나 흡입을 통하여 표면에서 발생하는 오염물을 제거하면 더욱 좋은 품질을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결론

UV레이저를 이용하여 여러 가지 폴리머의 가공특성 분석과 함께 이를 이용한 입체형상가공을 위한 실험을 수행하였다. 폴리머의 가공 특성은 재료의 고유한 성질인 흡수계수에 많은 영향을 받으며 또한 재료 자체의 분해시 발생하는 성분이 레이저와 반응하여 표면에 증착될 때 빔의 다중조사에 의한 정확한 깊이의 표면가공 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 layer-by-layer의 레이저 어블레이션 가공을 통하여 기존의 기계가공으로는 달성하기 어려운 보다 미소한 입체형상을 가공할 수 있었으며 이를 이용하여 MEMS 및 소량 다품종의 마이크로 부품을 빠르고 값싸게 구현할 수 있는 방법을 제시하였다.

#### V. 후기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 지능형마이크로시스템사업 (<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### VI. 참고문헌

1. A. Rognert, J. Eicher, D. Munchmeyer, R. P. Peter and J. Mohr, : The LIGA technique what are the new opportunities, J. Michromech Microeng, 2, pp. 133-140, (1992)
2. V. Srinivasan, M. A. Smrtic and S. V. Babu : Excimer laser etching of polymers, J. Appl. Phys., 59, pp. 3861-3867, (1986)
3. Y. S. Liu, H. S. Cole, H. R. Philipp and R. Guida : Lasers in microlithography, SPIE, 774, (1987)
4. E. Sutcliffe and R. Srinivasan : Dynamic of UV laser ablation of organic polymer surfaces, J. Appl. Phys., 60, pp. 3315-3322, (1986)