

UV 레이저 어블레이션에 의한 3 차원 형상 미세 구조물의 쾌속제작

신보성*, 양성빈#, 장원석**, 김재구**, 김정민**

Rapid Manufacturing of 3D-Shaped Microstructures by UV Laser Ablation

Bo-Sung Shin*, Seong-Bin Yang#, Won-Seok Chang**, Jae-Gu Kim** and Jung-Min Kim**

ABSTRACT

Recently, the lead-time of a product is to be shortened in order to satisfy consumer's demand. It is thus important to reduce the manufacturing time and the cost of 3D-shaped microstructures. Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) and devices are usually fabricated by lithography-based methods. Above method is not flexible for the rapid manufacture of 3D-shaped microstructures because it depends on work's experiences and requires excessive cost and time for making many masks. In this paper, the effective laser micromachining is developed to fabricate UV sensitive polymer microstructures using laser ablation. The proposed process, named by laser microRP, is a very useful method on rapid manufacturing for 3D-shaped microstructures.

Key Words : Rapid manufacturing (쾌속 제작), 3D-shaped microstructures (3 차원 형상 미세구조물), UV laser (UV 레이저), Ablation (어블레이션), Laser MicroRP (레이저 쾌속제작)

1. 서론

현재 연구가 활발하게 진행되고 있는 마이크로전자기계시스템(MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems)분야의 마이크로 부품은 일반적으로 리소그래피(lithography)를 기초로 하는 반도체 공정기술 방법에 의해 제작된다. 이러한 제조공정에 사용되는 공정기술은 크게 입체미세가공기술(bulk micromachining)과 표면 미세가공기술(surface micromachining)로 구별할 수 있다. 이 중 입체미세가공기술은 LIGA, 습식에칭(wet etching), 건식 에칭(dry

etching), DRIE(deep reactive ion etching) 등과 같은 일련의 포토패터닝(photopatterning)공정을 통해 제작된다. 즉, 이러한 미세 부품 제조공정은 기본적으로 에칭공정이 포함되어 있고 여러 장비를 거쳐 제작되고 있다. 또한, 3 차원의 미세 구조물을 제작하기 위해서는 여러 장의 마스크를 이용하여야 하며, 마스크(mask)의 제작시간이 길고 가격이 매우 비싸므로, 일괄처리 할 수 있는 대량 제조에서만 효율적이다.

그렇지만, 대부분의 미세 부품은 대량 제조를 필요로 하지 않는다. 또한, 아직도 많은 미세 부품 응용을 위한 충분한 모델링 방법이 부족하기 때문

접수일: 2003 년 6 월 5 일; 게재승인일: 2004 년 4 월 9 일
* 부산대학교 ERC/NSDM
교신저자: 한국기계연구원 나노공정그룹
E-mail: ysb@kimm.re.kr, Tel: (042) 868-7137
** 한국기계연구원 나노공정그룹

에 미세 부품의 재설계가 불가피한 경우에 신속히 대처할 수 없을 뿐만 아니라 소량 주문의 경우 경제적인 한계가 있다.

따라서 설계 단계에서 빈번히 발생하는 설계 변경에 유연성 있게 대처할 수 있는 공정기술개발의 필요성이 크게 대두되고 있다. 또한, 원형 제품(prototype product)의 재질도 실리콘(silicon)을 기본으로 폴리머(polymer), 금속, 세라믹등 다양한 재질에 대하여 폭넓게 사용되고 있는 추세이다. 이러한 다양한 재질에 대한 주문 적응식(order-adaptive) 패속 제작(rapid manufacturing)을 위한 저가의 제작 기술이 요구된다.¹

또한, 환경 문제가 심각해짐에 따라 환경 저해 공정인 에칭공정을 환경 친화적인 청정공정으로 대체가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 현실적인 요구사항을 충족시키기 위하여 미세부품 제조에 레이저 가공기술을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 레이저 미세가공은 적외선부터 자외선까지 다양한 파장(wavelength)의 레이저를 이용하여 다양한 재료를 가공하는데 사용되고 있다.^{2,3,4,5}

따라서 본 논문에서는 최근 안정성과 고효율성으로 인하여 미세가공에 있어 응용이 활발히 이루어지고 있는 UV 파장을 가진 DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser)의 3 고조파($\lambda_3 = 355\text{nm}$)를 이용하여 UV 파장에 민감한 폴리머(polymer) 재료에 직접적으로 어블레이션(ablation) 시키는 방법으로 3 차원 미세부품을 효과적으로 가공하는 레이저 마이크로머시닝 기술을 개발 하였다. 또한, 레이저 마이크로머시닝 공정 조건에 영향을 주는 레이저 출력(laser power), 가공속도(machining speed), 재료의 특성(material property)등과 같은 변수를 실험적으로 연구하였다. 이러한 방법으로 3 차원 미세부품을 빠른 제작 시간과 저가의 제작비용에 유연하고 효과적으로 제작할 수 있다.⁶

즉, 본 논문은 layer-by-layer 레이저 어블레이션 미세가공 공정을 통하여 3 차원 미세부품을 빠르게 얻고, 마스크 없이 레이저를 직접적으로 이용한 마이크로머시닝에 관한 연구를 위해 제안 되었다.

따라서 본 논문에서는 새로 제안한 공정을 미세가공 공정의 패속시작(Rapid Prototyping) 기본원리에 관한 연구이므로 “laser microRP process”라고 명명하였다.

2. 패속 제작 공정

2.1 레이저 어블레이션

레이저 어블레이션은 레이저를 이용한 직접식 제거방식에 의한 미세 부품을 제작하는 방법의 기본적인 원리이다. 좁은 영역에 조사된 레이저 빔은 수십 나노초(nanosecond)의 아주 짧은 시간 동안에 펄스 형태로 가공 재료에 열과 충격을 전달하게 된다. 이러한 짧은 시간 동안 재료의 분자 결합부에 충격적 분리가 일어나게 된다. 즉, 레이저로부터 방출된 UV 광자는 재료의 분자에 전자적 여기, 결합파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발 등의 여러 가지 프로세스(process)가 복합적으로 일어나게 한다.

이러한 UV 레이저에 의한 어블레이션은 광에 노출된 재질과 상호작용에 의해서 일어나며 재질의 흡수성질에 따라 다르지만⁷ 폴리머의 경우 내부분자결합이 Fig. 1 과 같이 광열반응(photothermal process) 과 광화학반응(photochemical process)이 일어나며 분해된다.

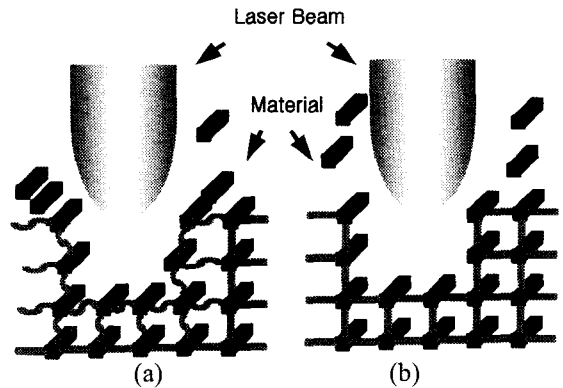


Fig. 1 Principle of ablation (a) photochemical, (b) photothermal

이를 위하여 기존의 연구자들은 레이저에 조사된 폴리머의 특성에 관하여 연구하였다. 폴리머와 레이저의 상호작용은 낮은 에너지 밀도에서는 광화학반응이 가공 깊이에 많은 영향을 미치며 높은 에너지 밀도에서는 광열반응이 주요요소가 된다. 이러한 레이저 가공 깊이는 Srinivasan, Smrtic and Babu(SSB)에 의해 광흡수율로 표현되는 식 (1) 과 같이 SSB 모델로 발표되었다.⁸

$$\begin{aligned}
 X &= X_{pc} + X_{th} \\
 &= \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{E}{E_T} \right) + A_1 \exp \left(\frac{-\varepsilon_1}{kT} \right) \\
 &= \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{E}{E_T} \right) + A_1 \exp \left(\frac{-\varepsilon_1 \rho C}{k\alpha(E - E_T)} \ln \left(\frac{E}{E_T} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 레이저에 의한 가공 깊이 X 는 광화학 반응에 의한 가공 깊이 X_{pc} 와 광열반응의 가공 깊이 X_{th} 의 합으로 이루어진다는 것을 알 수 있으며, α 는 흡수계수(absorption coefficient), E 는 에너지 밀도, E_T 는 임계에너지 밀도, ε 는 활성화 에너지, k 는 볼츠만(Boltzmann) 상수, ρ 는 밀도 그리고 C 는 열용량을 나타낸다.

따라서 UV 광의 높은 흡수율과 짧은 펄스는 정밀하게 제한된 면적에 최소 열영향부를 갖고 에너지를 부여할 수 있는 특징이 있기 때문에, 조사하는 레이저 펄스에 따라서 분해 깊이가 일정하게 조절 가능하며 이는 재료의 광 흡수율에 따라 정해진다.^{9, 10} 일반적으로 펄스 당 분해 깊이는 폴리머의 경우 0.3 ~ 0.7 μm , 세라믹의 0.1 ~ 0.2 μm , 금속의 경우 0.1 ~ 1.0 μm 가 가능하다고 알려져 있다.

이에, Fig. 2 는 UV 레이저에 의한 어블레이션 깊이가 일정하게 가공되는 UV 레이저 어블레이션 공정과 레이저 펄스 수에 따라서 제어되어 가공된 사진을 보여준다.

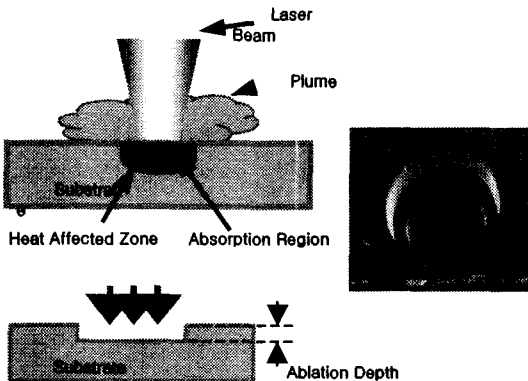


Fig. 2 Laser ablation process

2.2 레이저 마이크로 RP 공정

미세 3 차원부품을 직접식으로 패속제작하기 위해 개발된 공정은 Fig. 3 과 같다. 우선 제작하고자 하는 미세부품의 형상은 CAD 모델러(modeler)를 통하여 형성된다. 그 후, 3 차원 모델은 레이저 가공 깊이만큼 각 층별로 나누어 지고, 이때 각각의 단면데이터를 모두 얻을 수 있다. 이러한 단면 데이터로부터 가공 데이터는 제작 형상의 외부를 제거해야 하므로 가공 원 재료의 윤곽선을 포함하도록 하며 가공 내부(cavity)에는 레이저가 가공할 빔 경로를 생성하고 이를 검증 하였다. 이렇게 생성된 데이터는 레이저 마이크로머시닝 시스템에 보내지기 위해 CAM 데이터로 전환되며, 이때의 변환 프로그램은 레이저 빔 가공 속도 및 레이저 출력 같은 공정 변수를 설정할 수 있게 하였다.

이런 연속적인 처리는 기존의 일반 절삭 가공(machining process)등에 이용되는 layer-by-layer의 방법을 이용하여 3 차원 미세부품가공에 응용하였다. 그러나 일반 절삭가공과의 차이점은 공구가 절입 및 후퇴 시에 해당하는 부분이 레이저의 작동 및 멈춤(on/off) 되도록 하는 것이다.

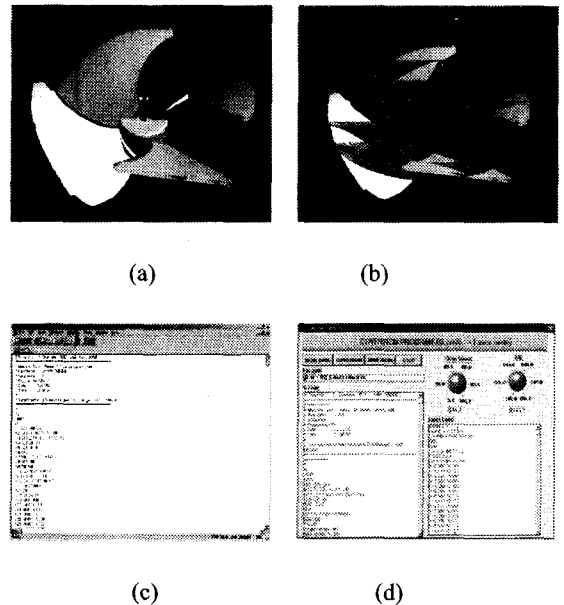


Fig. 3 Rapid manufacturing CAD/CAM program for micro-parts; (a) 3D CAD modeling, (b) slicing of layer-by-layer, (c) CAM data generation, (d) post-process program for laser microRP process

3. 레이저 마이크로 RP 시스템

본 연구의 UV 레이저 어블레이션에 의한 미세 구조물의 제작을 위해 구축된 레이저 마이크로 RP 시스템은 Fig. 4 와 같다. 사용된 레이저는 355nm 의 UV 파장을 가지는 Q-스위칭된 DPSSL 제품이며 주요사양은 Table 1 과 같다. DPSSL 은 고체 레이저이기 때문에 유독 가스를 사용하지 않아 사용하기에 안전하며 저가의 비용으로 크기를 작게 제작할 수 있는 장점이 있다.

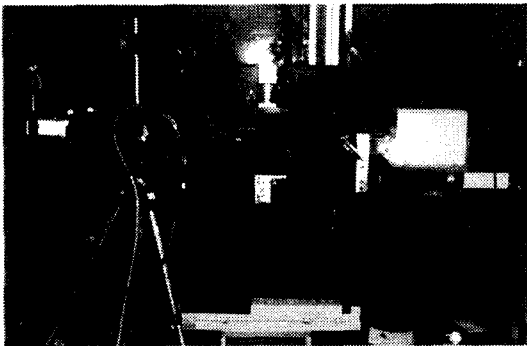


Fig. 4 Photograph of laser microRP system

Table 1 The specifications of DPSSL

Laser source	Nd:YVO ₄
Wavelength	3 rd harmonic($\lambda_3=355\text{nm}$)
Pulse width	40ns
Average power	0.8W (at 60kHz)
Beam diameter	2.4mm
Beam mode	TEM ₀₀ Gaussian

레이저 빔은 펄스의 안정성을 위해 연속 발진 되는 상태에서 Fig. 5 와 같이 외부에 설치된 셔터 (shutter)의 개폐를 통하여 on/off 된다. 또한, 레이저 빔은 $\lambda/4$ 편광기(polarizer)를 통하여 원형 편광되며, 빔의 출력 안정성을 위하여 레이저 소스에서는 안정된 범위의 일정 출력을 조사시키고 출력 조절을 ND(neutral density)필터 세트를 이용하여 조절하였다. 이렇게 조절된 레이저 빔은 대물렌즈를 통하여 가공하고자 하는 재료에 조사하게 된다.

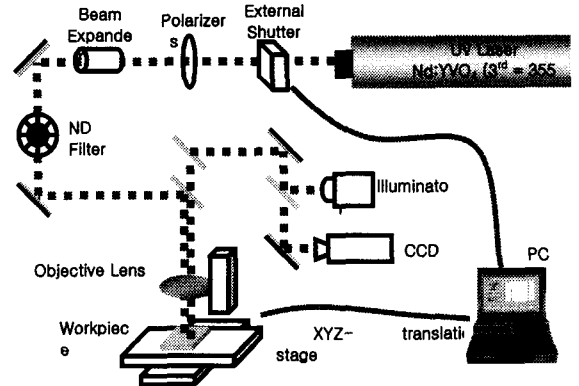


Fig. 5 Schematic diagram of laser microRP system

Nd:YVO₄ 레이저는 파장 1,064nm 을 가지며 펄스 또는 연속적인 모드로 작동 가능하다. 발생된 레이저는 KH₂POH₄(KDP), KD₂PO₄(KD*P)와 같은 비선형 광학 크리스탈(nonlinear optical crystal)등을 사용하면 주파장 $\lambda_1 = 1,064\text{nm}$ 를 제 2 파장 $\lambda_2 = 532\text{nm}$ 로 변환되고 다시 $\lambda_3 = 355\text{nm}$ 로 변환된다.¹¹ 즉, 레이저 빔은 적외선, 가시광선 그리고 여러 가지 재질을 가공하기 적합한 자외선으로 변환된다. 실질적으로 마이크로 RP 공정에 사용하는 레이저 가공 선폭(line width)은 레이저 빔의 파장과 광학 시스템의 NA(numerical aperture)에 의해 얼마만큼 더욱 미세가공이 가능한가 결정된다.

Table 2 The specifications of 3-axis stage

	XY-Axis	Z-Axis
Travel Range	200mm×200mm	50 mm
Resolution	0.2 μm	0.5 μm
Repeatability	$\pm 0.5 \mu\text{m}$	$\pm 0.3 \mu\text{m}$
Position Accuracy	$\pm 1.0 \mu\text{m}$	$\pm 0.5 \mu\text{m}$
Maximum Speed	2000mm/min	1000mm/min

가공부의 스테이지는 초정밀 xyz 3 축 스테이지 (Aerotech Co.)를 사용하였으며 주요사양은 Table 2 와 같다. 여기서, xy 부분은 리니어 모터(liner motor)방식이고, z 축은 스텝모터(step motor)방식으로 정확도(accuracy)는 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 이며, 반복정밀도(repeatability)는 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 를 가지고 있어서 미세부품을 가공하기에 적합하다. 각 스테이지는 unidex

511 컨트롤러(Aerotech Co.)를 통하여 제어 된다. 컨트롤러는 PC 와 RS232C 통신을 하며 NC 코드를 통하여 작동할 수가 있어서 가공 형상에 대한 프로그램을 구성하기에 용이하다.

4. 실험 및 적용사례

4.1 기초실험

미세 3 차원 부품 가공을 하기에 앞서 우선 기본적인 실험을 수행하였다. 355nm 파장을 갖는 레이저 소스를 사용하였으며, 마이크로 단위의 미세 부품을 가공하기 위한 재료는 벌크한 형태인 PC (polycarbonate), PMMA(polymethylmethacrylate)를 사용하였다.

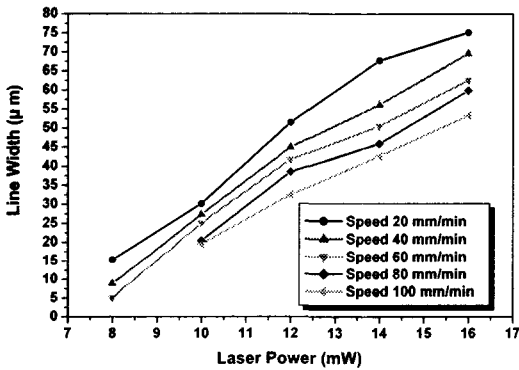


Fig. 6 The curves of PC line width for laser power and scan speed

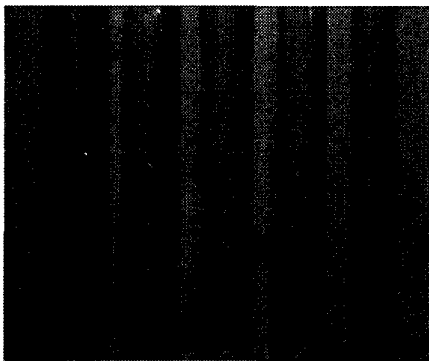


Fig. 7 Photograph of PC line width changes as a function of scan speed 20, 40, 60, 80, 100 mm/min and laser power 10mW

가공 선포는 레이저 마이크로머시닝 공정에서 가장 중요한 요소이다. 따라서 레이저 출력, 가공 속도와 같은 공정 변수들과 선포의 관계를 알아보기 위해 각각의 재료에 관하여 실험을 하였다.

먼저, 시편이 PC 인 경우에 관하여 레이저 출력을 8mW 에서 16mW 로 2mW 씩 변화시켰고, 각각의 속도를 20mm/min 에서 100mm/min 까지 20mm/min 씩 증가 시켜가면서 레이저를 조사하였다. 이 때의 가공 선포는 Fig. 6 과 같이 얻을 수 있으며, 가공 선포는 레이저 출력과 가공 속도의 증가에 따라서 선포적으로 증가하는 현상이 나타났다. 가공 선포의 증가 폭은 가공 속도보다 레이저 출력에 따라서 민감한 반응을 보이는 것을 보아 레이저 미세 가공 시 레이저 출력이 가공 선포에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수가 있다.

또한 레이저 출력 8mW, 가공 속도 60mm/min 으로 가공하였을 경우에 가공 선포는 5.1 µm로 최소가 되었으나 매끄럽지 않은 결과물을 얻었다. 그리고 레이저 출력이 14mW 이상에서는 가공 패턴 주변이 열에 녹아 흘러 내린 현상을 나타났다. 따라서 최소 선포와 가공품질을 함께 고려해야 하므로, 가공물의 형상이 균일하면서 최소가 되는 선포를 레이저 출력이 10mW 일 경우로 선정 하였다. Fig. 7 은 레이저 출력이 10mW 일 경우 각각의 속도에 대한 패턴 실험을 한 결과물의 광학 현미경의 사진이다.

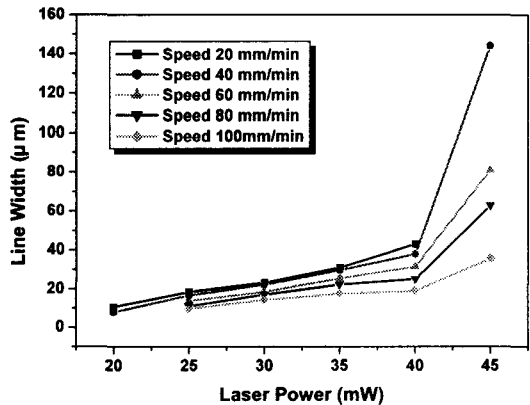


Fig. 8 The curves of PMMA line width for laser power and scan speed

이러한 실험을 약흡수체(weak absorber)로 알려진 PMMA¹²의 경우에도 레이저 출력을 20mW에서 45 mW로 5mW씩 증가 시켰고, 가공 속도를 20mm/min에서 100 mm/min로 20mm/min씩 변화해 가면서 수행하였다. 이때, 각각의 변수에 관한 가공 선폭은 Fig. 8과 같이 얻을 수 있다. PMMA의 경우도 PC와 마찬가지로 레이저 출력이 증가하고 가공속도가 감소함에 따라서 일정하게 가공 선폭이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 가공 속도보다는 레이저 출력에 따라서 변화량이 많은 것을 알 수 있다. 또한, 레이저 출력이 40mW 이상일 경우 열에 의해 주변이 심하게 녹아 내려 가공 선폭을 측정하기 어려울 정도로 급 상승하는 현상이 발생하였다.

4.2 적용 사례

이러한 기초 실험의 결과로부터 간단한 마이크로 기계부품 제작을 위해 마이크로 팬(micro fan)에 적용할 수 있었다. 이 부품 형상은 매우 작고 얇으며 대략 그 크기가 직경 500 μm , 두께 62 μm 이다. 이러한 부품을 빠른 시간 안에 직접적으로 제작하기는 매우 어렵다. 또한 이 부품은 원형제품이고 성능 시험에 따라서 부품의 설계가 변할 수 있다.

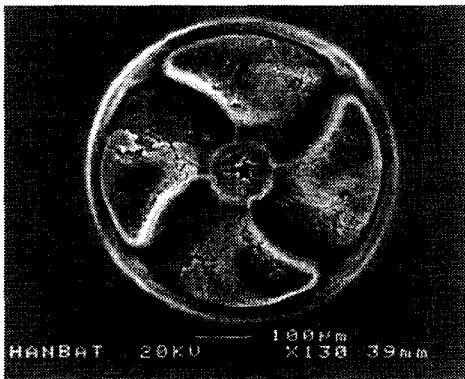


Fig. 9 Finished 3D-shaped micro-fan

따라서, 본 연구에서 제안한 레이저 마이크로 RP 공정을 통하여 제작하였다. 마이크로 부품 제작을 위하여 두께가 1mm인 PC 재료를 사용하였다. 가공시의 레이저 출력은 10 mW로 하였고, 가공 속도는 60mm/min으로 하였다. 이때의 가공 선

폭은 25 μm 의 얻을 수 있다. 또한 레이저 어블레이션 깊이가 62 μm 가 달할 수 있도록 반복적으로 수행하였다. 이러한 조건하에서 가공한 결과물의 사진은 Fig. 9와 같다.

이때, 총 가공시간은 대략 150분 정도가 소요되었으며 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 레이저 마이크로 RP 공정이 3차원 미세부품 제작을 위한 직접가공에 매우 유용하다는 것을 보여준다.

5. 결론

이상의 기초실험의 결과와 적용사례를 통하여 다음과 같이 요약하였다.

첫째, 다중 경로에 의한 UV 레이저 어블레이션에 의한 미세가공 공정을 통하여 3차원 미세부품을 마스크 없이 직접적으로 빠르게 얻을 수 있는 레이저 마이크로 RP 공정은 소량 다품종 생산에 유연하고 쾌속제작을 위한 매우 유용한 방법이었다.

둘째, 폴리머에 대한 레이저 어블레이션에서 레이저 출력과 가공 속도의 최적 조건을 통하여 열전도와 기화에 의한 기포를 막고 안정적이며 균일한 최소 가공 선폭을 구현 하였다. 이 때 최적화된 가공조건은 레이저 출력 10mW, 레이저 펄스율(pulse rate) 60kHz, 가공속도 60mm/min이었으며 최소 가공 선폭은 25 μm 이다.

셋째, 레이저 마이크로 RP 공정을 위해서 개발된 lay-by-layer 방식의 후처리 공정(post-processing) 프로그램은 공정 자동화와 다양한 폴리머 재료에 적용할 수 있었다.

따라서, 레이저 마이크로 RP 기술을 사용하는 레이저 파장대에 보다 민감한 재료의 선정 및 정밀한 XYZ 스테이지의 제어 등에 대해서 추후에 계속 연구할 예정이다. 이러한 연구는 좀더 정밀한 마이크로급 3차원 미세부품을 제작 가능하게 할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Dauer, S., Ehlert, A., Buttgenbach, S., "Rapid prototyping of micromechanical devices using a Q-switched Nd:YAG laser with optional frequency doubling," *Sensor and Actuator* 76, pp.381-385, 1999.
2. Fujita, H., "Recent progress in micromachining and applications to microactuators," *Japan J. Appl. Phys.*, 33 (12B): pp.7163-7166, 1994.
3. Madou, M.J., "Fundamentals of Microfabrication," Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.
4. Yoon, K. K., Lee, S. K., Kim, J. G., Choi, D. S., Whang, K. H., Jung, J. K., Jang, W. S. and Na, S. J., "The UV Laser Ablation of Cr film on Glass Substrate," *J. of KSPE*, Vol. 17, No. 8, pp. 134-139, 2000.
5. Kim, J. M., Shin, B. S., Kim, J. G. and Chang, W. S., "Optical Waveguide Fabrication using Laser Direct Writing Method," *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 12, pp. 42-47, 2003.
6. Mullenborn, M., Dirac, H., Petersen, J., Bouwstra, S., "Fast three-dimensional laser micromachining of silicon for Microsystems," *Sensors and Actuators A* 52, pp.121-125, 1996.
7. Chryssolouris, G., *Laser Machining*, Springer, Berlin, 1991.
8. Srinivasan, R., Smrtic, V., "Excimer laser Etching of polymers," *June, J. Appl. Phys.* 59(11), pp.3861-3867, 1986.
9. Shtcliffe, E., Srinivasan, R., "Dynamics of UV laser Ablation of organic polymer surface," *J. Appl. Phys.*, 60(9), 1986
10. John, C., Miller, "Laser Ablation - principle and applications," Springer-Verlag, 1994.
11. Liming, He, Yoshiharu, Namba, Yuji, Narita, "Wavelength optimization for machining metals with the harmonic generation of a short pulsed Nd:YAG laser," *Precision Eng. J. Intl. Soc. for Precision Eng. And Nano technology* 24, pp.245-250, 2000.
12. Liu, Y. S., Cole, H. S., Philipp, H. R. and Guida, R. : *Lasers in microlithography*, SPIE, 774, 1987.
13. Zhu, X., "A new method for determining critical pulse width in laser material processing," *Applied Surface Science* 167, pp.230-242, 2000.
14. Koechner, W., *Solid-State Laser Engineering*, Springer, Berlin, 1996.