



UV 레이저를 이용한 3차원 미세 형상 쾌속 제작기술 (Rapid Manufacturing of 3D Microstructures by using UV Laser)

■ 신보성, 김재구, 장원석, 황경현 / 한국기계연구원 나노공정그룹

■ 이인환, 조동우 / 포항공대 기계공학과

서 론

마이크로 부품은 현재 연구가 활발하게 진행되고 있는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 분야에서 구동용 부품이라든가 또는 그를 지지하는 구조물로 쓰일 수 있어 그 활용 가치는 응용에 따라 폭이 넓다고 할 수 있다. 이러한 마이크로 부품을 제작하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으며 크게 제거식(subtractive), 부가식(additive) 그리고 혼합식(hybrid) 가공법으로 분류된다[1]. 대표적인 제거식 가공법은 Bulk Micromachining 및 EDM 공정이 있고 부가식 가공법은 LIGA(Litho- graphie Galvanoformung Abformung, 독 어), PDV, CVD 및 Surface Micromachining 등이 있다. 그리고 혼합식(hybrid) 가공법에는 Bonding, Glueing 및 Spin-Coating 등이 있다. 이러한 미세 부품 제조공정은 기본적으로 Etching 공정이 포함된 복잡하고도 여러 장비를 거쳐 제작된다. 이러한 레이저를 이용한 Photolithographic process 공정은 mask 이용법, Laser Direct writing 법 등이 있으며 이에 관한 연구로 일부 공정 시간을 단축시키기는 하였으나 근본적으로 Etching 공정을 그대로 이용하고 있다. 사용하는 에너지원은 주로 이온빔, 레이저 빔 그리고 X-ray 빔 등의 고에너지 빔을 사용하며 가공재질은 실리콘(silicon)을 기본으로 플라스틱, 금속 그리고 세라믹 재료도 점차 폭넓게 사용되고 있다.

그러나 3차원의 미세 구조물을 제작하기 위해서 여러 장의 마스크 이용 방식에 의해 제작되고 있었으나 마스크의 제작시간이 길고 가격이 매우 비싸므로 설계 단계에서 빈번히 발생하는 설계변경에 신속히 대처할 수 없을 뿐만 아니라 소량 주문의 경우 경제적인 한계가 있다. 또한 이러한 원형 제품(prototype product)의 재질도 실리콘 뿐만 아니라 폴리머, 금속, 세라믹 등 다양한 재질에 대한 주문 적응식(order-adaptive) 쾌속 제작(rapid manufacturing)의 요구가 더욱 절실히 요구된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 개발 욕구에 부응하는 하나의 시도로서 현재 과기부 주관 21세기 프론티어 사업의 일환으로 국내에서 연구 진행중인 UV 레이저를

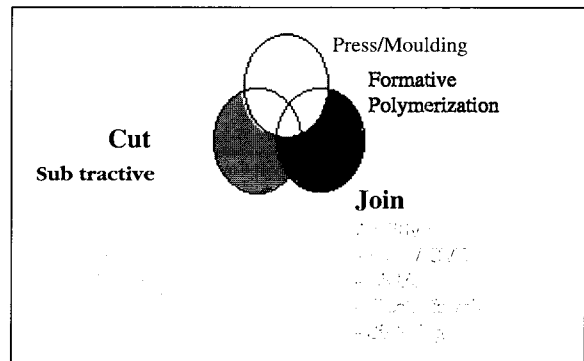


Figure 1. Rapid manufacturing process using UV laser

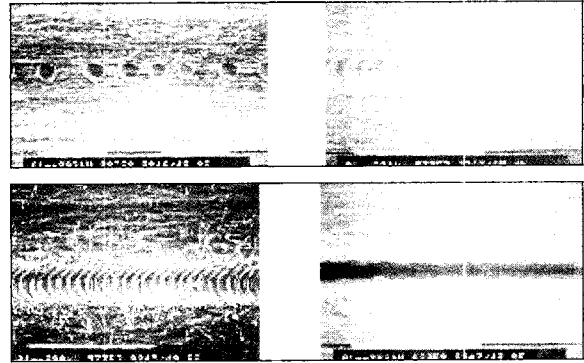


이용한 제거식 가공법과 부가식 가공법의 대표적인 마이크로 RP(micro-RP) 및 극소 광조형(micro-SLA) 공정과 몇가지 적용사례를 기술하고자 한다. 마이크로 RP 공정은 원하는 형상외부(exterior)의 제거에 의해서, 극소 광조형 공정은 원하는 형상내부(interior)만을 폴리머를 고형화시켜 형상을 제작하는 공정상의 차이가 있으며, 마이크로 RP 공정은 가공재질이 다양한 장점이 있는 반면 극소 광조형 공정 또한 부가식 제작 방법의 장점인 내부 형상이 복잡한 구조물도 지지부(support)없이 적층 제작이 가능한 장점이 있다.

마이크로 RP

개요

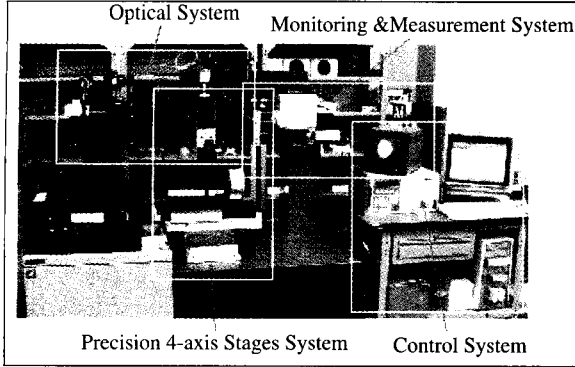
레이저를 이용한 직접식 제거방식에 의한 미세 구조물을 제작하는 방법의 기본적인 원리는 레이저 분해(laser ablation)이다. 그림 2는 이러한 원리를 보여주는 것으로서 좁은 영역에 조사된 레이저 빔은 수십 Nanosecond, 경우에 따라서는 Picosecond 또는 Femtosecond 범위의 아주 짧은 시간동안에 펄스 형태로 가공 재질에 열과 충격을 전달하게 된다. 그러나 이러한 짧은 시간동안은 실질적으로 열전달, 용융, 기화와 같은 현상은 거의 일어나지 않고 순간적인 재질 분자의 결합부에 충격적 분리가 일어나게 된다. 즉, 레이저로부터 방출된 UV 광자는 재료의 분자를 전자적 여기, 결합파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발 등의 여러 가지 프레스스가 복합적으로 작용하여 일어난다. 레이저 분해의 경우 가공대상물의 주변 분위기 가스는 가공프로세스에 큰 영향을 주지 않으므로 응용목적에 따라, 진공중, 대기중, 또는 특별히 제어된 분위기 가스를 사용하기도 한다. 이와 같은 레이저 가공은 1983년 Shrinivasan에 의해 처음 광분해(photoablation)이라 표현되었다. UV광의 높은 흡수율과 짧은 펄스는 정밀하게 제한된 면적에 최소 열영향부를 갖고 에너지를 부여할 수 있는 특징이 있다[2-4]. 따라서 조사하는 레이저 펄스에 따라 분해 깊이(ablation depth)가 일정하게 조정 가능하며 이는 재질에 따라 정해진다. 일반적으로는 분해 깊이는 폴리머의 경우 0.3-0.7 μm , 세라믹의 경우는 0.1-0.2 μm , 다이아몬드는 0.05-0.1 μm 그리고 금속



의 경우 0.1-1.0 μm 가 펄스당 가능하다고 알려져 있다. 그림 2는 엑시머 레이저를 사용하여 분해깊이를 측정 한 결과를 보여주는 것으로서 레이저 출력이 일정할 경우에 펄스 수에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

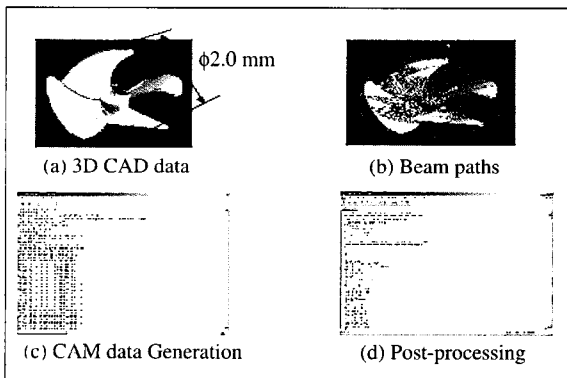
마이크로 RP 시스템(micro-RP system)

레이저를 이용한 직접식 제거방식에 의한 3차원 미세 구조물을 제작하는 시스템은 그림 3과 같다. 사용된 레이저는 Q-switched Nd:YAG solid-state laser(Coherent company) 제품으로 고체 레이저이기 때문에 사용이 안전하고 유독가스를 사용하지 않아도 되며 장치 크기가 또한 작은 장점이 있다. 그림에서 보는 바와 같이 beam expander, mirror, control system 와 galvano scanner와 같은 광학부품과 측정장치 등으로 구성된다. Nd:YAG 레이저는 파장(wavelength) 1,064 nm을 가지며 펄스 혹은 연속적인 모드가 가능하다. 비선형 광학 크리스탈(nonlinear optical crystal)인 KH₂PO₄ (KDP), KD₂PO₄ (KD*P) 등을 사용하여 주파장 $\lambda_1=1,064$ nm는 제2 파장 $\lambda_2=532$ nm로 변환되고 다시 $\lambda_3=355$ nm로 변환된다[5]. 즉 Nd:YAG 레이저 빔은 적외선, 가시광선 그리고 여러 가지 재질을 가공하기 적합한 자외선으로 변환되었다. 실질적으로 마이크로 RP 공정에 사용하는 레이저의 가공 선폭(line width)은 레이저 빔의 파장과 광학 시스템의 NA(numerical aperture)에 의해 얼마만큼 더욱 미세 가공이 가능한가가 결정된다.



마이크로 RP 공정

3차원 미세 형상을 직접식으로 제작하기 위해 개발된 공정은 그림 4와 같다. 우선 제작하고자 하는 3차원 형상을 모델링한 다음 가공을 위한 CAM 데이터로 변환한다. 이때 가공 데이터는 제작 형상의 외부를 제거해야 하므로 가공 원 재료의 윤곽을 포함하여 생성하도록 하였다. 가공 내부(cavity)에는 레이저가 가공할 빔 경로를 생성하고 이를 검증한 후 레이저 가공을 수행한다. 이때 사용되는 파일 형태는 STL, CLI 그리고 NC 코드 형태로 순차적으로 변환된다. 이러한 가공절차는 층과 층간의 제거가공이 반복되므로 layer - by - layer manufacturing이라고도 한다. 밀링기계와 절삭 공구(machining tool)를 사용하는 대부분의 일반 절삭 가공(machining process)등이 이에 해당된다. 다만 일반 절삭가공과의 차이점은 공구가 절입 및 후퇴시 이에 해당하는 레이저 작동 및 멈춤(혹은 서터를 닫음) 작동이 자



동적으로 운전된다는 것이다.

적용 사례

3차원 입체 가공을 위해 우선 기본적인 실험을 수행하였다. 그림 5는 일정한 분해 깊이가 가공된 PEI 폴리머 시편의 측정 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 레이저 가공 속도 50 mm/sec, 레이저 출력 5 mJ인 경우 거의 일정한 분해 깊이 31.81 μm를 얻을 수 있었다. 3차원 미세 형상은 마이크로 진동자를 최종적으로 가공하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 이때 주어진 가공 경로는 깊이 방향으로 수행하였으며 가공 빔과 빔간의 간격은 7.7 μm이었다. 총 가공된 광분해 깊이는 31.2 μm, 이때 설정한 펄스당 광분해 깊이는 30 μm로 프로그램적으로 제어하여 가공하였다.

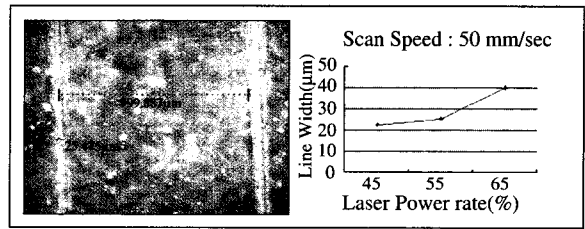


그림 5 가공시편의 측정사진 및 실험 결과

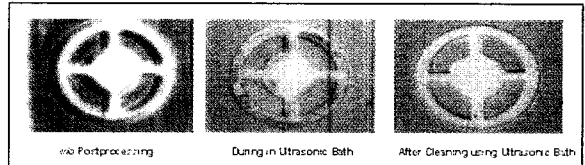


그림 6 최종 가공된 마이크로 진동자

마이크로 SLA

개요

기존의 MEMS(Micro Electric Mechanical System)이나 LIGA(Lithography galvan-iforming Ab-forming) 공정에서는 제조하기 힘든 높은 세장비를 갖는 복잡한 3차원 단면형상을 갖는 극소형 제품을 생산할 수 있는 극소 광조형 기술(Micro Stereo Lithography)은 제품을 대량으로 생산할 수 있는 장점

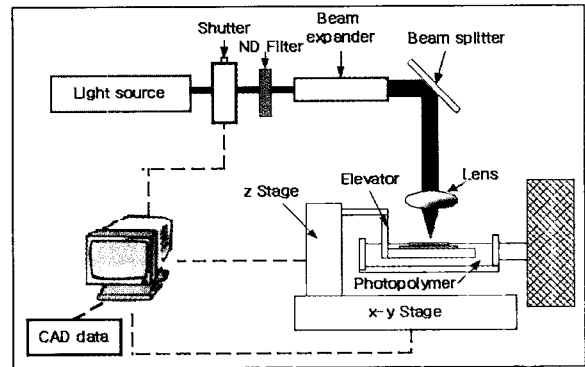


도 가지고 있다. 그러나, 이 방식은 수 μm 의 얇은 슬라 이스를 계속 적층하여 제품을 생산해 내므로, 상대적으로 높은 표면 거칠기를 가지며, 상대적인 치수정밀도 또한 높지 못한 단점을 지닌다. 극소 광조형기술은 일본의 K. Ikuta에 의해서 처음으로 제안되었으며[6], 현재까지 극소 광조형기술과 관련하여 발표되고 있는 연구 결과들의 경우 극소 구조물을 좀 더 정밀하고 안정적으로 제작하는 방안과 관련된 것이 대부분이다. 즉, 주로 레이저에 의한 광 경화성 수지의 반응에 관한 연구, 극소 광조형 장치의 개발과 관련된 연구 그리고 광 경화성 수지 이외의 물질을 극소 광조형 기술에 적용해 보려는 연구 등이다. K. Ikuta등은 1992년경부터 이 기술에 관한 연구를 시작하여 이 분야에서 많은 연구 결과들을 발표하고 있다. 그는 IH(Integrated Harden Polymer Stereo Lithography)공정[6] 및 이를 좀더 발전시킨 Super IH 공정[7]들을 제안하였고, 이를 이용하여 3차원 형태의 굴절 파이프, 코일 스프링, 정맥 벨브 등을 제작하였다. 또한 광섬유를 이용한 대량생산 방안 및 이를 금형으로 한 다른 재질의 극소 구조물 제작방안을 제시하기도 하였다. 또한 A. Bertsch등은 광원을 고정하고 액정을 이용한 패턴발생기를 이용하여 광 경화성 수지에 빛을 가함으로써 제작시간을 단축시키는 방안을 제시하였다[8]. 또한 기존의 LIGA 기술과 극소 광조형 기술을 조합하여 단일 구조물에서 높은 표면 조도와 치수 정밀도 및 복잡한 곡면형상을 동시에 구현하는 기술을 개발하기도 하였다[9]. 그리고 X. Zhang등은 광 경화성 수지 대신 세라믹을 모노머, 광 개시제 등과 혼합하고 여기에 자외선 레이저를 주사하여 세라믹으로 된 극소 구조물을 제작하는 기술을 개발하였다[10].

극소 광조형 장치

극소 광조형 기술은 기본원리에 있어서 기존의 광조형 기술과 유사하다. 즉, 자외선이 조사되면 광 경화성 수지가 굳어지는 원리를 이용, CAD로 만들어진 제품의 형상데이터를 일정한 층 두께를 가진 단면으로 나눈 후, 이 층들을 계속 적층하여 제품을 생산하게 되는 것이다. 하지만 마이크로 단위의 제품에는 "scale effect"가 존재하며 이는 매크로 크기의 제품을 제작하는 기존

의 광조형 기술에서는 무시할 수 있었던 수지의 점성, x-y-z 스테이지(stage)의 정밀도 등과 같은 문제점들의 원인이 된다. 따라서 극소 광조형 기술의 구현을 위한 장치의 개발을 위해서는 자외선 빛에 의한 광 경화성 수지의 반응현상, 정밀한 x-y-z 스테이지의 제어, 그리고 수 μm 크기를 갖는 자외선 빛의 초점 제어 등에 대한 연구 및 기술개발이 필수적이다. 또한 레이저 빛에 반응하는 광 경화성 수지의 특성 및 이에 따른 제작공정의 개발도 필요하다. 그림 8은 본 연구에서 개발된 극소 광조형 장치의 개략도이다.



이 장치의 광원으로는 CW(continuous wave) Ar+레이저가 이용되었으며, 파장 351.1nm에서 약 460mW의 최대출력을 갖는다. 본 연구에서 제작하려는 형상은 수십~수백 μm 단위의 매우 작은 크기를 가지므로 상대적으로 큰 레이저 파워를 적절히 조절하기 위해 ND 필터(neutral density filter)를 셔터(shutter)와 빔 익스펜더(expander) 사이에 장치하였다. 레이저에서 나온 자외선 빛은 빔 스피리터(splitter)를 통해 원하는 방향으로 조절된 후 대물렌즈(objective lens)로 입사되어 광 경화성수지(photopolymer) 위에 초점이 맺히게 된다.

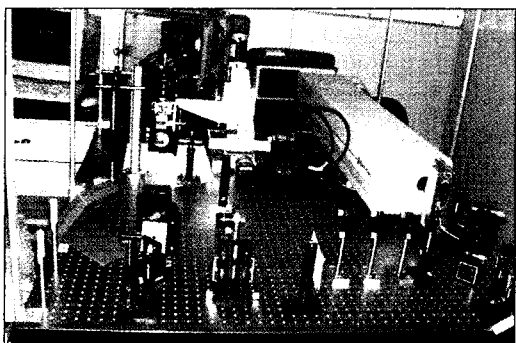
자외선 레이저 빛을 광 경화성 수지에 주사하여 원하는 형상을 만들기 위해서는 경화된 수지를 고정시키는 장치가 필요하다. 이를 위하여 x-y-z 스테이지에 부착되어 광 경화성 수지가 담긴 용기 내에서 x-y-z 방향으로 이동하는 엘리베이터(elevator)를 제작하였다. 엘리



기획 시리즈 ⑤

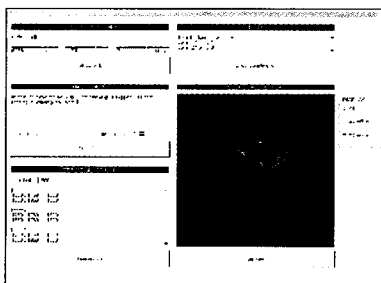
베이터에는 경화된 수지가 부착 될 수 있도록 슬라이드 글라스(slide glass) 로 된 고정판이 부착되어 성형 후에는 슬라이드 글라스만 제거하고 성형품에 묻은 미 경화 수지를 알코올로 세척하여 원하는 형상을 만들 수 있다.

한편, 원하는 단면형상을 제작하기 위해서는 x-y-z 스테이지 및 셔터(shutter)를 적절히 제어하여야 한다. 매 층에서 단면 형상을 제작하기 위해서는 x-y 스테이지가 단면 형상을 따라가며 구동되어야 하며, 연결되지 않는 형상이나 다음 층으로의 이동을 위해서는 셔터의 작동이 필수적이다. 이를 위한 스테이지 및 셔터의 동작은 컴퓨터 프로그램을 작성하고 이를 통해 제어한다. 그림 9는 제작된 극소 광조형 장치의 사진이다.

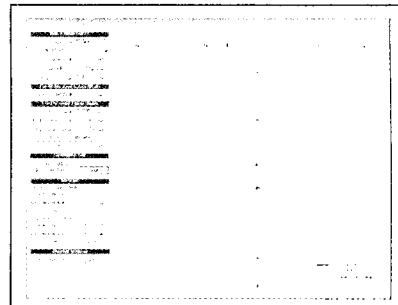


마이크로 SLA 공정

한편 3차원 형상을 만들기 위해서는 CAD를 통해 만들어진 3차원 데이터를 이용하여 단면정보를 생성하여야 하며, 이렇게 생성된 단면정보를 층층이 적층하여 3차원 형상을 만들게 된다. 일반적으로 광조형 장치에서는 CAD데이터를 STL형식의 데이터로 저장하고, 이를 이용하여 단면정보를 생



성하게 된다. 본 연구에서도 STL형식의 3차원 데이터로 단면정보를 만드는 알고리즘을 만들고 이를 컴퓨터 프



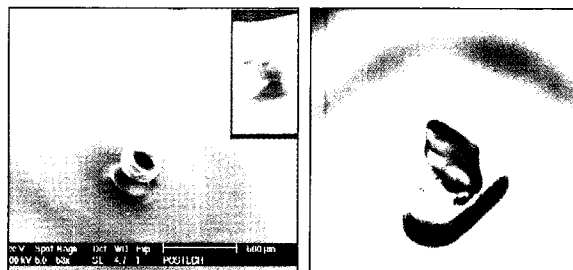
로그램으로 개발하였다. 그림 10은 이 프로그램의 실행 화면이다.

수지 경화 델 및 해석 프로그램

일반적인 광 조형장치에서, 이용되는 레이저 빛은 성형되는 대상 제품의 크기가 상대적으로 크므로 레이저 빛을 매우 작은 초점을 만들지 않고 평행광을 이용하는 것이 대부분이다. 하지만 극소형조형 장치의 경우는 레이저 빛을 렌즈를 이용하여 수 μm 크기의 매우 작은 초점을 만들어 광 경화성 수지에 주사하여야 한다. 따라서 극소 광조형 장치를 이용하여 극소 구조물을 제작하기 위해서는 레이저에 의한 광 경화성 수지의 경화모형을 만들고 이를 이용하여 경화현상을 예측하는 것이 필수적이다. 그러므로 레이저 파워, 이송속도, 파장, 초점 거리에 따라 변하는 광 경화성 수지의 경화 형상을 파악하기 위한 프로그램을 제작하였다. 그림 11은 이 프로그램의 실행 결과의 한 예이다.

극소 구조물의 제작

이상의 결과를 이용하여 그림 11에서 보이는 것처럼



(a) Micro Cup,

(b) Micro Boat



극소형 구조물을 제작하여 보았다. 그림 11(a)는 성형된 “마이크로 컵”의 광학 현미경 사진으로서 높이는 20 μm 로 총 23층을 쌓아 제작하였으며, 컵의 전체 높이는 460 μm 이며 외경은 440 μm 이다. 이 형상을 제작하는데 걸린 시간은 약 3시간이었다. 그림 11(b)는 Micro boat 로서 전체 높이는 900 μm 이고, 길이는 1000 μm 이다. 이 구조물의 폭은 선체의 경우 400 μm 이며 돛의 폭은 600 μm 이다. 총 45층을 쌓아 만든 이 보트의 제작 시간은 약 4시간이었다. (a) 및 (b) 제품을 만드는데 걸린 시간을 고려해 볼 때 따라서 기존의 극소제품 제작기술인 MEMS나 LIGA기술에 비해 제작 시간이 매우 빠른 편이며 자유로운 3차원 곡면 형상을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 기존의 미세 구조물을 제작하는 마이크로 제작기술의 한계를 극복하고 보다 유연한 제작 기술을 제공하고자 여러 가지 시도가 있지만 현재 국내에서 진행 중인 UV 레이저를 이용한 3차원 미세 구조물을 제작하기 위한 마이크로 RP 기술과 마이크로 SLA 기술에 대한 공정과 수지 경화 모델에 관한 소개 및 이를 이용한 제품을 소개하였다.

두 공정은 같은 영역대의 자외선을 이용하지만 공정상의 차이 때문에 각각의 장단점이 있었다. 하지만 두 공정 모두 제작 단가와 제작 시간을 획기적으로 줄이고 주문 적응식 고속 제작하고자 하는 시도로 보인다.

특히 마이크로 RP 기술은 재질에 구애받지 않지만 사용하는 레이저 파장대에 민감한 재질의 선정 및 가공현상 분석 극소 광조형 기술은 기존의 광조형 장치와는 다르게 자외선 빛에 의한 광 경화성 수지의 경화현상 분석, 정밀한 x-y-z 스테이지의 제어, 자외선 빛의 초점 제어 등에 대한 연구 및 기술개발이 필수적이다.

향후 보다 초정밀한 광원 선정, 초점 제어 및 광학계 등이 개발된다면 보다 초정밀, 초극소 3차원 부품 제작이 가능하다고 판단된다.

[참고문헌]

[1] Prentice Hall Burns, M., “Automated

fabrication : improving productivity in manufacturing”, 1993

[2] E. Sutcliffe, R. Srinivasan, “Dynamics of UV Laser Ablation of organic Polymer Surface”, 60(9), J. Appl. Phys., 1986

[3] Laser Ablation-principle and Application, Springer-Verla

[4] R. Srinivasan, V. Smrtic, “Excimer Laser Etching of Polymers”, June, 1986, J. Appl. Phys.

[5] 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 (2000) 245-250

[6] K. Ikuta, K. Hirowatari, “Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding”, Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '93), pp. 42-47, 1993.

[7] K. Ikuta, S. Maruo and S. Kojima, “New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure”, Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '98), pp. 290-295, 1993.

[8] A. Bertsch, J. Y. Jezequel and J. C. Andre, “Study of the spatial resolution of a new 3D micro fabrication process : the microstereolithography using a dynamic mask-generator technique”, J. of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry 107, pp. 275-282, 1997.

[9] A. Bertsch, H. Lorenz and P. Renaud, “Combining microstereolithography and thick resist UV lithography for 3D microfabrication”, Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '98), pp. 18-23, 1998.

[10] X. Zhang, X. N. Ziang and C. Sun, “Microstereolithography of polymeric and ceramic microstructure”, Sensors and Actuators 77, pp. 149-156, 1999.