

UV 레이저를 이용한 3차원 미세 형상 쾌속 제작기술

신보성*·윤경구*·김재구*·황경연*·이인환**·조동우**

(* : 한국기계연구원 자동화연구부, ** : 포항공대 기계공학과)

1. 서론

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 Galvanofornung Abformung, 독일), 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 process공정은 mask 이용법, Laser Direct writing법 등이 있으며 이에 관한 연구로 일부 공정 시간을 단축시키기는 하였으나 근본적으로 Etching 공정을 그대로 이용하고 있다. 사용하는 에너지원은 주로 이온빔, 레이저빔 그리고 X-ray 빔 등의 고에너지 빔을 사용하며 가공재료는 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 시도로써 현재 과기부 주관 21세기 프론티어 사업의 일환으로 국내에서 연구 진행중인 UV 레이저를 이용한 제

거식 가공법과 부가식 가공법의 대표적인 마이크로 RP(micro-RP) 및 극소 광조형(micro SLA) 공정과 몇가지 적용사례를 기술하고자 한다. 마이크로 RP 공정은 원하는 형상의부(exterior)의 제거에 의해서, 극소 광조형공정은 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.

표 1 여러 가지 마이크로 가공 기술

Material	Subtractive techniques	Additive techniques	Other
Silicon	Wet etching Dry etching Dicing	PVD CVD Solgel	Bonding Spin-coation
Plastics	Plasma etching Ion beam etching Laser ablation	LIGA PVD Electroforming	Welding of plastics Glueing
Metal	Wet etching Diamond milling Laser ablation Dicing EDM	LIGA Electroforming PVD Laser CVD	Glueing micro-Welding micro-Soldering
Ceramics	Laser ablation Dicing	LIGA Sintering	Glueing Soldering Bonding

handling, mounting, packaging

2. 마이크로 RP

2.1 개요

표 1에서 보는 바와 같이 레이저를 이용한 직접식 제거 방식에 의한 미세 구조물을 제작하는 방법의 기본적인 원리는 레이저 분해(laser ablation)이다. 그림 1은 이러한 원리를 보여주는 것으로써 좁은 영역에 조사된 레이저 빔은 수십 나노초(nanosec), 경우에 따라서는 Picosecond 또는 Sub Picosecond 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, 결합과파, 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 금속의 경우 0.1-1.0 μm 가 펄스당 가능하다고 알려져 있다. 그림 2는 역시 레이저를 사용하여 분해깊이를 측정한 결과를 보여주는 것으로서 레이저 출력이 일정할 경우에 펄스 수에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

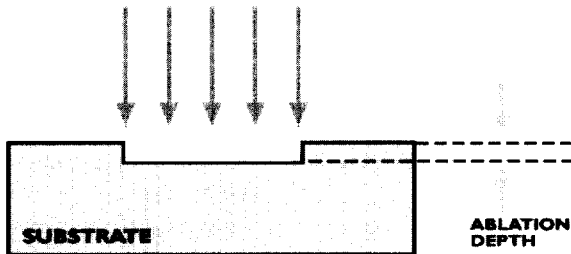


그림 1. 레이저 분해(laser ablation)

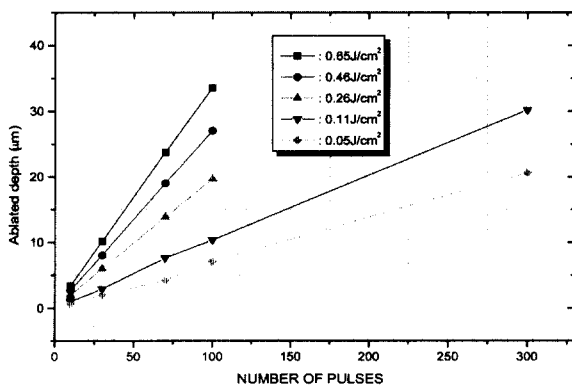


그림 2. 펄스 수에 따른 분해 깊이

2.2 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 system와 galvano scanner와 같은 광학부품과 측정 장치 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 $\lambda_3=532$ 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 더 미세 가공이 가능한가가 결정된다.

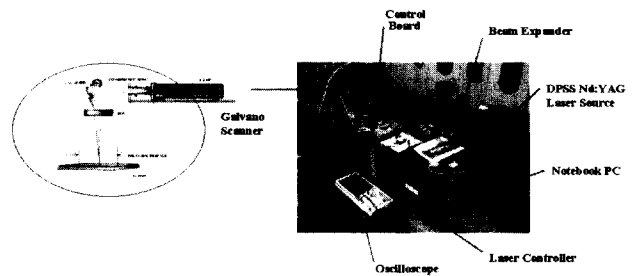


그림 3. 마이크로 RP 시스템

2.3 마이크로 RP 공정

3차원 미세 형상을 직접적으로 제작하기 위해 개발된 공정은 그림 4와 같다. 우선 제작하고자 하는 3차원 형상을 모델링한 다음 가공을 위하여 2차원의 단면 데이터로 변환한다. 이때 단면 데이터는 제작 형상의 외부를 제거해야 하므로 가공 원 재료의 윤곽을 포함하여 생성하도록 하였다. 2 차원 단면 데이터 내부는 레이저가 가공할 빔 경로를 생성하고 이를 검증한 후 레이저 가공을 수행한다. 이때 사용되는 파일 형태는 STL, CLI 그리고 NC(혹은 PLT) 형태로 순차적으로 변환된다. 이러한 가공절차는 층과 층간의 제거 가공이 반복되므로 layer - by - layer manufacturing이라고도 한다. 밀링기계와 절삭 공구(machining tool)를 사용하는 대부분의 일반 절삭 가공(machining process)등이 이에 해당된다. 실제로 이온빔을 이용한 미세 절삭가공의 경우 E-beam milling이라고 하는 것도 같은 맥락을 한다.

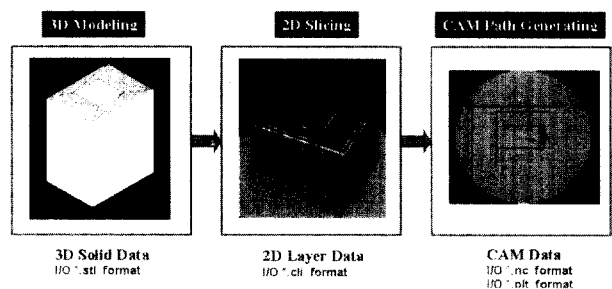


그림 4. 마이크로 RP 공정의 가공 절차



2.4 적용 사례

3차원 입체 가공을 위해 우선 기본적인 실험을 수행하였다. 그림 5는 일정한 분해 깊이가 가공된 시편의 측면과 평면을 보여준다. 그림에서와 같이 레이저 가공 속도 50 mm/sec, 레이저 출력 5 μ J인 경우 거의 일정한 분해 깊이 31.81 μ m를 얻을 수 있었다. 3차원 미세 형상은 마이크로 진동자를 최종적으로 가공하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 이때 주어진 가공 경로는 깊이 방향으로 10회 반복 수행하였으며 가공 빔과 빔간의 간격은 7.7 μ m이었다. 총 가공된 분해 깊이는 315.2 μ m, 펄스당 에너지는 78 μ J이었으며 이때 설정한 펄스당 분해 깊이는 30 μ m로 제어하였다.

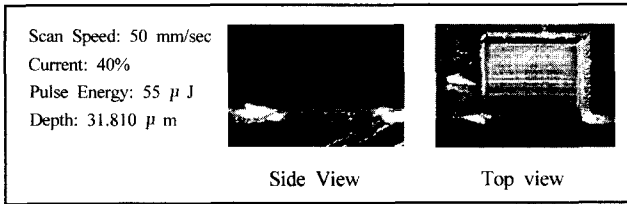


그림 5. 가공시편의 측면과 평면사진

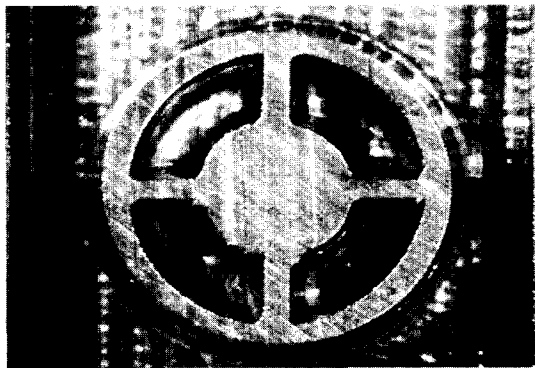


그림 6. 최종 가공 제품(마이크로 진동자)

3. 마이크로 SLA

3.1 개요

광조형기술(Stereo Lithography)을 응용한 극소 광조형기술(Micro Stereo Lithography)은 높은 세장비를 갖는 복잡한 3차원 단면형상을 갖는 극소형 제품을 생산해 낼 수 있으며 또한 제품을 대량으로 생산할 수 있는 장점도 가지고 있다. 하지만, 수 μ m의 얇은 슬라이스를 계속 적층하여 제품을 생산해 내는 방법을 이용하므로, 상대적으로 높은 표면 거칠기를 가지며, 상대적인 치수정밀도 또한 높지 못한 단점도 있다. 극소 광조형기술은 일본의 K. Ikuta에 의해서 처음으로 제안되었으며[6], 현재까지 극소 광조형기술과 관련하여 발표되고 있는 연구 결과들은 대부분 극소 구조물을 좀 더 정밀하고 안정적으로 제작하는 방안과 관련된 것이 대부분이다. 즉, 주로 레이저에 의한 광 경화성 수지의 반응에 관한 연구, 극소 광조형장치의 개발과 관련된 연구

그리고 광 경화성 수지 이외의 물질을 극소 광조형기술에 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 밸브 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 패턴 발생기를 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].

3.2 극소 광조형 장치

극소 광조형 기술은 기본원리가 기존의 광조형 기술과 유사하다. 즉, 자외선이 조사되면 광 경화성 수지가 굳어지는 원리를 이용, CAD로 만들어진 제품의 형상데이터를 일정한 층 두께를 가진 단면으로 나누고, 이 층들을 계속 적층하여 제품을 생산하게 되는 것이다. 하지만 마이크로 단위의 제품에는 "scale effect"가 존재하며 이는 매크로 크기의 제품을 제작하는 기존의 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, 자외선 빛의 초점 제어 등에 대한 연구 및 기술개발이 필수적이다. 그림 7은 본 연구에서 개발된 극소 광조형 장치의 개략도 이다.

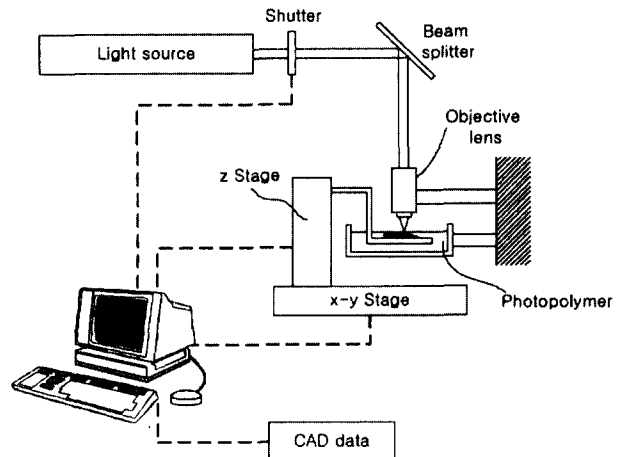


그림 7. 극소 광조형 장치 개략도

광원으로는 CW(continuous wave) Ar+레이저가 이용되었다. 레이저에서 나온 자외선 빛은 빔 스피리터(beam splitter)를 통해 대물렌즈(objective lens)로 입사되어 광 경화성수지(photopolymer) 위에 초점이 맺히게 된다. 한편, 원하는 단면형상을 제작하기 위해서는 x-y-z 스테이지 및 셔터(shutter)를 적절히 제어하여야 하며, 이를 위한 스테이지 및 셔터의 동작은 컴퓨터 프로그램을 작성하고 이를 통해 제어한다. 그림 8는 제작된 극소 광조형 장치의 사진이다.

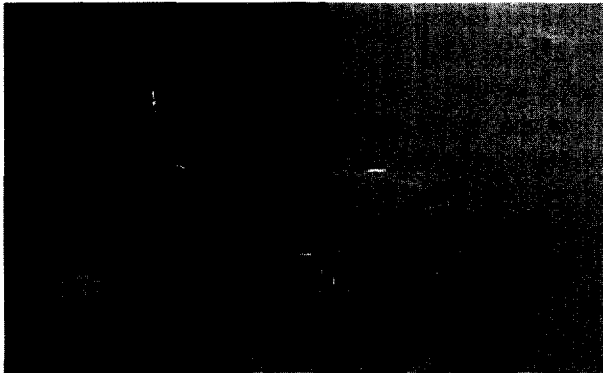


그림 8. 개발된 극소 광조형 장치

3.3 마이크로 SLA 공정

한 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 생성하게 된다. 본 연구에서도 STL형식의 3차원 데이터로 단면정보를 만드는 알고리즘을 만들고 이를 컴퓨터 프로그램으로 개발하였다. 그림 9은 이 프로그램의 실행 화면이다.

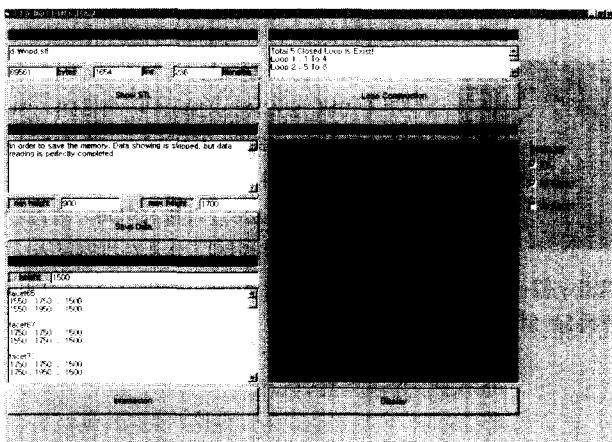


그림 9. 단면정보 변환 프로그램 실행화면

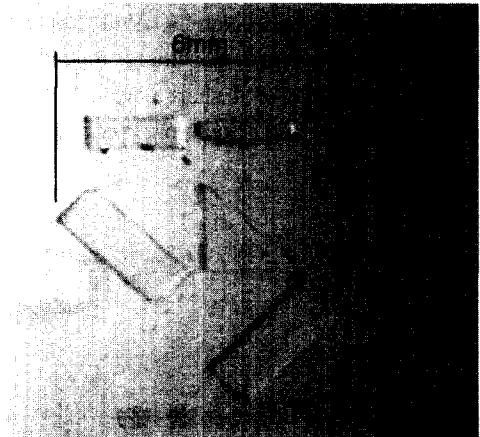
3.4 적용 사례

이상의 결과를 이용하여 그림 10와 같이 간단한 형상의 시제품을 제작하여 보았다. 그림 10(a)는 두 개의 층으로

구성되어 있으며, 첫 번째 바닥형상의 층두께는 약 300 μm 그리고 두 번째 글자형상의 층두께는 약 10 μm 이다. 그리고 글자의 전체 폭은 2 mm, 높이는 400 μm 그리고 선폭은 약 70 μm 이다. 그림 10(b)는 렌즈, 프리즘, 빔 스피리터 등으로 구성된 마이크로 광학계(micro optical system)의 예이다. 이는 총 12개의 층으로 구성되어 있으며, 각 층두께는 100 μm 이고 전체 시스템의 가로 폭은 6mm 그리고 세로 방향의 높이는 7mm 이다. 한편 (a) 및 (b) 각각의 제품을 제작하는데 소요된 시간은 각각 약 20분 그리고 6시간이며, 따라서 기존의 극소제품 제작기술인 MEMS나 LIGA기술에 비하면 제작시간이 매우 빠른 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 10. 극소광 조형기술을 이용하여 제작된 시제품 (a) "POSTECH"글자, (b) 마이크로 광학계

4. 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 공정 소개 및 간단한 사례를 소개하였다.

두 공정은 같은 영역대의 자외선을 이용하지만 공정상의 차이 때문에 각각의 장단점이 있었다. 하지만 두 공정 모두



제작 단가와 제작 시간을 획기적으로 줄이고 주문 적용식 쾌속 제작하고자 하는 시도로 보아진다.

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

향후 보다 초정밀한 광원 선정, 초점 제어 및 광학계등이 개발된다면 보다 초정밀, 초극소 3차원 부품 제작이 가능하다 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] NEXUS Market analysis for microsystem(1996-2002)
- [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, "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructure", Sensors and Actuators 77, pp. 149-156, 1999.

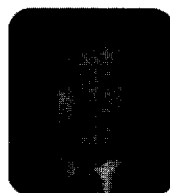
저 자 소 개



신보성 (申普盛)

1962년 7월 3일생. 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업. 1987년 부산대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1990년 육군사관학교 교수부 시간/전임강사. 1990년-현재 기술사. 한국기계연구원 선임연구

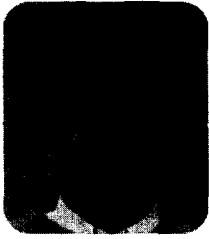
원. 연구관심분야 : 마이크로 RP 기술, CAD/CAM 설계 기술, 레이저 광 설계 기술



윤경구 (尹京九)

1957년 9월 28일생. 1981년 서울대 공대 기계설계학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1998년 한국과학기술원 정밀기계공학과 졸업(공학박사). 1983년-현재 한국기계연구원 책임

연구원. 연구관심분야 : 레이저 미세 가공 기술, 레이저 광응용 설계 기술



김재구 (金在九)

1967년 10월 11일생. 1994년 전북대 공대 기계공학과 졸업. 1994년 전북대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년-현재 한국기계연구원 선임연구원. 연구관심분야 : 레이저 패턴 가공 기술, 미세 천공기술, 레이저 광 설계 기술



이인환 (李仁煥)

1967년 7월 25일생. 1990년 성균관대 공대 기계공학과 졸업. 1992년 성균관대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1992년-1999년 대우자동차 기술연구소 주임연구원. 1999년-현재 포항공과대 대학원 기계공학과 박사과정. 연구관심분야 : 극소 광 조형기술(Micro Stereo Lithography), 3차원 극소구조물 제작



황경현 (黃璟琮)

1952년 7월 23일생. 1976년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1978년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1986년 O.S.U 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년-현재 한국기계연구원 책임연구원. 연구관심분야

: 레이저 광 응용기술, 미세 응용기술, 광기계 부품 개발



조동우 (曹東佑)

1958년 2월 23일생. 1980년 서울대 공대 기계설계학과 졸업. 1982년 서울대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1986년 Dept. of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison 졸업(공학박사). 1986년-현재 포항공과대 기계공학과 교수. 연구관심분야 : 극소 광 조형기술(Micro Stereo Lithography), 가상공작기계, 공작기계 모니터링 및 열변형