

UV 레이저 어블레이션과 상변화 충진을 이용한 3 차원 마이크로 부품의 쾌속 제작

신보성#, 김재구*, 장원석*, 황경현*

Rapid Manufacturing of 3D Micro Products by UV Laser Ablation and Phase Change Filling

B.S. Shin#, J. G. Kim*, W. S. Chang*, K. H. Whang*

ABSTRACT

UV laser micromachining are generally used to create microstructures for micro product through a sequence of lithography-based photopatterning steps. However, the micromachining process is not suitable for the rapid realization of complex 3D micro product because it depends on worker experiences, excessive cost and time to make many masks. In this paper, the more effective micro rapid manufacturing process, which is developed upon the base of laser micromachining, is proposed to fabricate micro products directly using UV laser ablation and phase change filling. The filling process is useful to hold the micro product during the next ablation step. The proposed micro rapid manufacturing process is also proven experimentally that enables to fabricate the 3D micro products of UV sensitive polymer from 3D CAD data to functional micro parts.

Key Words: Micro Rapid Manufacturing (마이크로 쾌속 제작), 3D Micro Products (3 차원 마이크로 제품), UV Laser Ablation (자외선 레이저 어블레이션), Phase Change Filling (상변화 충진)

1. 서론

대표적인 마이크로 제작 공정에는 실리콘 기판 위에 구조물을 더해가는 부가식 공정(additive process), 실리콘 소재로부터 깎아나가는 제거식 공정(subtractive process) 그리고 이들 공정들이 조합된 하이브리드 공정(hybrid process)이 있다. 이들 각각의 대표적인 공정은 표면 마이크로머시닝(surface

micromachining), 몰체 마이크로머시닝(bulk micromachining) 그리고 LIGA 공정이 해당된다. 이러한 모든 공정들은 리소그래픽 공정(lithographic process)을 기반으로 일련의 마스크(mask)를 반복적으로 사용하여 3 차원 미세 부품 혹은 구조물을 제작한다. 따라서 수많은 마스크를 만들기 위하여 과도한 제작시간과 비용이 요구된다. 특히 마스크의 제작비용은 일괄처리에 의해 최소화되기 때문에 대규모의

접수일: 2005년 1월 26일; 게재승인일: 2005년 9월 9일
* 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 (ERC/NSDM)
E-mail bosung@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2787
* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 나노공정그룹

제조방식에는 잘 적용할 수 있다. 그러나 대부분의 마이크로 부품은 대량생산 이전 단계에서 최소 필요 개수만을 값싸고 신속하게 우선적으로 제작되어야 할 필요가 있다. 현실적으로 아직까지 많은 미세기계 부품의 응용을 위한 충분한 설계 및 모델링 방법이 부족하기 때문에 대부분의 미세부품의 재설계 및 설계변경은 불가피하다. 특히 마이크로시스템 개발에서 제작비용과 시간을 절약하기 위해, 패속제작을 위한 새로운 기술이 필요하다.^{1,2} 실제로 레이저 마이크로머시닝 기술을 이용한 3 차원 미세형상의 패속제작 공정에 있어서 마이크로 부품의 셋업(set-up) 절차는 매우 어렵고, 시간이 많이 소요되기 때문에 공작물 고정 자동화 내지는 획기적인 시간 단축방법이 절실히 요구된다. 일반적으로 가공물의 셋업 공정은 크게 3 가지로 분류된다. 첫째 셋업 테이블 자체의 보조 돌기(bed of fingers)를 사용하는 방법과 둘째 셋업 유동체(fluidized bed)를 이용하는 방법 그리고 세 번째의 방법으로 상변화(phase change)를 이용한 가공물 고정 방식(work holding)이 소개되고 있다.³

본 논문에서는 상변화 충진을 응용하여 마이크로 크기의 공작물을 고정하는 방법(workholding)으로서 저융점의 충진물질을 녹여서 마이크로 가공물(micro workpiece)을 감싼 다음 고체화되면서 미세부품을 빠르게 고정하는 방법을 채택하여 3 차원 미세부품을 레이저 마이크로 가공한 사례를 보여준다. 또한 최적의 가공 조건을 얻기 위하여 레이저 파워(laser power), 가공 속도(machining speed), 재료의 특성(material property)과 같은 변수들을 실험적으로 선정하였다. 본 논문에서 제안한 공정은 3 차원 형상의 마이크로 부품을 설계 단계에서 빠르게, 저가격으로 그리고 다양한 재질의 부품을 직접적으로 제작하는 데 매우 유용하다.

2. 실험 장비

본 실험에서 사용된 레이저는 Q-switched Nd:YVO₄ 고체 상태(solid state) 다이오드 펌핑 레이저(diode pumping laser)이며 제조회사는 미국의 Coherent Co.이다. 고체 상태 레이저는 유독한 가

스를 사용하지 않기 때문에 작업자의 환경이 안전하며 대부분의 가스레이저에 비해 적은 비용으로 작은 규모도 구축 할 수 있는 장점이 있다. Fig. 1 은 빔 확대기(beam expander), 반사경(mirrors), 제어 시스템(control system), X-Y 스테이지(stage), 측정장비(measurement equipment), PC 및 레이저 광원(laser source)과 같이 많은 광학 구성요소로 이루어진 레이저 가공 시스템의 구성도를 보여주는 사진이다. 레이저 파장(wavelength)은 1,064nm 의 적외선 영역 부근에서 시준된 가간섭성의 빔을 방출하고, 펄스 또는 연속적으로 작동될 수 있게 장치화되어 있다. KH₂PO₄(KDP), KD₂PO₄(KD*P)와 같은 비선형 광학 크리스탈(crystal)을 사용함으로써, 레이저의 기본 고조파($\lambda_1=1,064\text{nm}$)는 두 번째 고조파($\lambda_2=532\text{nm}$)와 세 번째 고조파($\lambda_3=355\text{nm}$)로 전환될 수 있다.⁴ 적외선부터 가시광선, 자외선까지 스펙트라(spectra)의 파장을 가진 레이저 빔은 갖가지 재료를 가공하기에 적합하다. 대부분의 재료는 파장에 따른 흡수율이 다르기 때문에 파장에 따른 가공 가능한 재료가 선택된다.

본 본문에서 미세가공품을 가공하기 위하여 세 번째 고조파의 파장인 $\lambda_3=355\text{nm}$ 이 레이저 패속 제작 공정을 위해 사용되었다. 레이저 시스템에 장착된 광학 시스템 (optical system)의 개구수 (NA, Numerical Aperture)와 사용 파장에 의해서 최소 스팟직경(spot diameter) 값이 결정되며, 이는 실제 가공에 사용되는 최소선폭(line width)을 의미한다. 즉 $\lambda=355\text{nm}$, $\text{NA}=0.04$ 이면 최소 가공 선폭은 약 $10.83 \mu\text{m}$ 으로 계산되어진다. 따라서 레이저 3 차원 미세가공 CAM 프로그램에서 이러한 최소 빔 선폭을 기준으로 빔 경로(beam path)를 자동 생성하고 제어한다.⁵

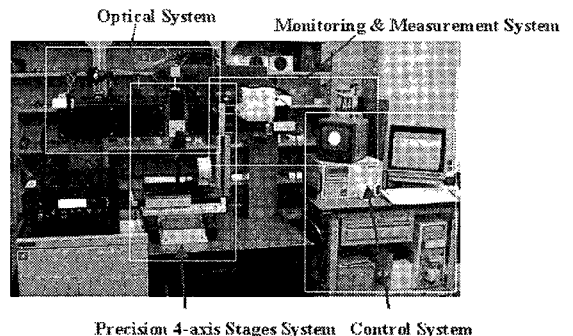


Fig. 1 Laser system with precision alignment unit

3. 마이크로 패속제작 공정

본 논문에서 제안한 마이크로 패속제작공정은 레이저 어블레이션과 저융점 충전소재를 이용한 고정 방법을 결합한 새로운 패속제작 공정이다. 따라서 기존의 마이크로 SLA 공정의 단점인 레이어(layer)간의 단층문제 및 사용재질의 한계를 극복함은 물론 다양한 기능성 폴리머를 직접적으로 다양하게 제작 가능한 장점이 있다. Fig. 2 에서는 본 논문에서 제안한 마이크로 패속제작 공정의 절차를 보여준다.⁶ 그림에서 보는 바와 같이 본 공정은 UV 레이저로 첫번째 면인 상면(upper surface)을 어블레이션 가공한 다음, 그 부분을 왁스와 같은 액체상태의 저융점 충전재로 공작물의 캐비티(cavity) 부분에 녹여 부어서 충전하고 고체상태로 굳혀서 고정된 채로 가공면을 뒤집어서 두번째 면인 하면(lower surface)을 레이저로 깎아내고 최종적으로 고체상태의 충전재를 녹여내어 가공부품과 분리해냄으로써 최종적으로 3 차원 마이크로 제품만을 빠른 시간 내에 제작하는 절차로 이루어져 있다.

이러한 가공방법은 기계적인 절삭가공과 저융점 금속 충전재를 이용한 3 차원 형상부품을 패속 제작하는 기존의 연구와 원리적으로 매우 비슷하다.^{7, 8} 다만 본 연구와의 차이점은 공구에 의한 가공이 레이저 펄스에 의한 미세 가공이란 것과 충전재가 저융점 금속(low melting-point metal)이 아닌 저융점 왁스재료라는 것 만이 다르다. 이러한 차이점은 가공재료가 기계가공의 경우 알루미늄 금속재료인 것에 반하여 레이저 가공의 경우 폴리머 재료를 대상으로 가공하기 위하여 이에 적합한 충전재로 왁스재료가 선정되었다. 즉, 알루미늄의 경우 충전재의 용융점은 140 °C 정도인 비스무스

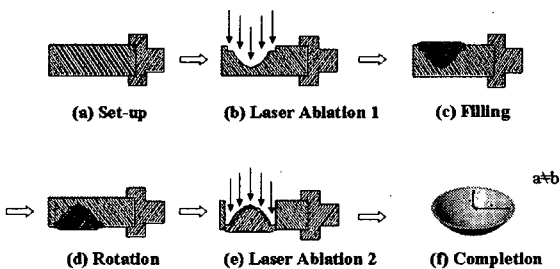


Fig. 2 Laser micro rapid manufacturing process

(bismuth) 합금을 사용 하였으나, 본 연구에서의 폴리머 재질의 경우는 65 °C 의 왁스재료가 충전 고정후 분리에 적합한 재질이라 판단되었다.

3.1 레이저 어블레이션

레이저 마이크로머시닝은 가공영역에서 충분한 레이저 파장의 흡수를 필요로 한다. 즉 흡수율은 파장함수에 따른 재료의 특성이다.⁹ 현재 적외선에서 자외선까지, 다른 파장의 레이저는 갖가지 다양한 재료의 미세가공에 사용되고 있으며, 가공 목적에 따라, 대상재료에 대한 최적의 레이저 파장을 선택하는 것이 가장 중요하다.⁶ 본 실험에서는 355nm 레이저 파장에서 가공특성이 가장 우수한 PC 폴리머 재료를 실험재료로 선택하였다. 폴리머 재료에 레이저와 같이 높은 에너지의 빔을 조사할 때, 재료는 국부적으로 급격히 녹고 부분적으로는 기화된다. 또한 재료 표면에 파편을 남기거나 공기 중에 휘발성으로 머무른다. 이것은 높은 강도에서 레이저 어블레이션의 메커니즘(mechanism)이다. 많은 형태의 재료에는 레이저 어블레이션 조건 하에서 레이저 손상 역치(damage threshold) 대 레이저 펄스 폭 사이에 전환점이 있는 것으로 잘 알려져 있다. Fig. 3 에서는 UV 레이저 어블레이션 깊이와 레이저 펄스 수에 따라 선형적으로 제어되어 가공된 실험결과를 보여준다.

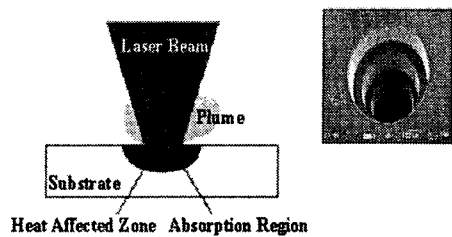


Fig. 3 Principle of UV laser ablation

가공깊이와 펄스와의 관계는 어느 정도 실험적으로 이미 알려져 있어 예측 가능하다. 예를 들면 폴리머 재질의 경우 0.3-0.7($\mu\text{m}/\text{pulse}$), 세라믹(혹은 glass)는 0.1-0.2($\mu\text{m}/\text{pulse}$), 금속은 0.1-1.0($\mu\text{m}/\text{pulse}$) 등으로 이미 실험적으로 알려져 있다.

그러나 최적의 가공조건이 실험적으로 정확히 구해져야 완벽한 3 차원 형상을 자동화된 CAM 프

로그로 가공할 수 있기 때문에 이에 대한 기초실험은 매우 중요하다. 기존의 연구에 의하면 PC 재질의 경우 레이저 에너지 밀도가 $0.053\text{J}/\text{cm}^2$ 의 경우 13 회 연속적인 가공하였을 때 최상의 가공 단면을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 이 때 얻을 수 있는 최소 선폭은 약 $20\ \mu\text{m}$ 이었다. 이는 이론적으로 얻을 수 있는 선폭에 비해 다소 큰 값을 보여준다. 그리고 가공 면의 깨끗한 표면조도를 얻기 위하여 레이저 가공 선폭 간의 중첩가공이 필수적으로 소요되는데, 이 또한 기존의 연구 실험결과를 통해 20% 중복시 가장 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 레이저 어블레이션 과정에 열에 의한 가공 폭이 확장되었음을 알 수 있었다. 따라서 미세 3 차원 가공에서는 최상의 가공 면을 얻기 위하여 레이저 가공 빔 이송 속도를 약 $60\ \text{mm}/\text{min}$ 으로 설정하였다.¹⁰

3.2 상변화 충전공정

UV 레이저 어블레이션에 의한 3 차원 형상의 마이크로머시닝 공정에 있어서 마이크로 제품을 고정하는 방법은 매우 어렵고 시간이 많이 소요되기 때문에 마이크로 공작물 고정의 자동화 방법으로 본 연구에서는 상변화 충전방식을 채택하였다. 이러한 기법은 임의 형상에 대한 액체상태의 충전재가 스며들게 한 후 고체상태로 상변화 하면서 임의 형상에 맞는 공작물을 충전하기 때문에 마이크로 부품의 충전에 적합하였다. 이에 대한 절차는 매우 간단하다. 먼저 펄스에 따라 선형적인 어블레이션 깊이 제어가 가능한 UV 레이저 가공 원리를 사용하여 3 차원 형상의 마이크로 부품의 한 면을 가공한 후 상변화 충전(filling) 방식으로 가공 면을 고정한 후 다른 면을 연속적으로 가공한다. 가공이 끝난 후 고체상태의 충전재를 열을 가하여 녹여서 분리함으로써 완벽한 형상의 3 차원 미세부품을 마스크 없이(maskless) 빠른 시간 내에 제작을 시도하였다. 가공소재는 UV 레이저 파장, 특히 355nm 에 흡수율이 우수한 폴리머 재질 중에 왁스에 비해 높은 용융온도를 가진 폴리카보네이트(PC, Polycarbonate)와 충전재로써는 용융온도가 낮은 왁스(wax) 소재를 선택하여 사용하였다. 실제로 다음 가공 단계의 레이저 가공작업 동안 저융점 충전물은 가공된 캐비티 내부에서 가공재료 간에 고형화(solidification)에 의해 마이크로 가공물을 충분히 고정하고 있는 것으로 확인되었다. 실

제로 레이저 가공동안 미세부품이 왁스에 의한 충전 고정력 이상의 충격내지는 가공력에 의하여 가공품이 분리되는 현상은 발견되지 않았으며 또한 제안된 왁스 충전재는 빠른 시간에 고형화가 가능하고 가공소재와의 결합력이 레이저 가공력에 비해 매우 강하게 작용할 뿐만 아니라 용융온도가 $65\ ^\circ\text{C}$ 로써, 가공물인 PC의 용융온도인 $220\ ^\circ\text{C}$ 와 연화온도 $160\ ^\circ\text{C}$ 에 비해 열적 변형을 미치지 않기 때문에 가공 오차와 품질에 미치는 영향이 매우 적다. 실제로 왁스를 분리하기 위해 왁스의 용융온도 이상의 뜨거운 온수를 사용하여 고체상태의 왁스 충전재를 분리 할 때 온도 차에 의한 가공품의 형상정밀도가 저하되는 현상은 발견할 수가 없었다. Fig. 4는 가공 후 충전재를 분리한 상태의 마이크로 팬의 형상 사진을 보여준다.

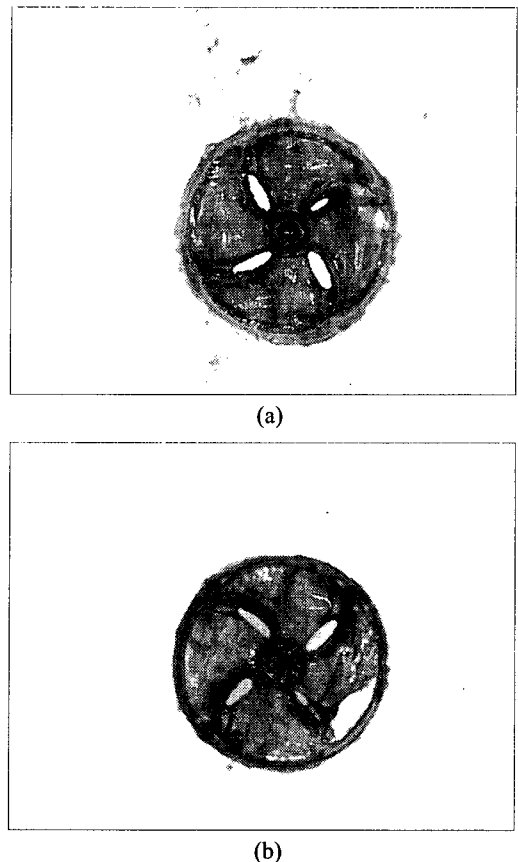


Fig. 4 3D micro-scale fan product before separating the filling material, (a) first-face, (b) second-face

그림에서 보는 바와 같이 앞 뒷면에 약간의 충전 재가 붙어있는 상태로 추가 세정작업이 필요함을 알 수 있다. 따라서 85 °C 가량의 온수 속에서 초음파 세척장치를 이용하여 완전히 충전 왁스를 분리하였다.

4. 실험 및 응용사례

마이크로 3 차원 형상을 제작하기 위한 UV 레이저 어블레이션의 실험은 가공 속도, 레이저출력에 따른 최적의 가공조건을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 실험에서는 가공속도는 50-60mm/sec, 가공 최소 선폭은 15-20 μ m 이고 선폭 간격간의 중첩은 약 20-50 %를 선정하였다. 기초 실험 결과를 바탕으로 3 차원 형상의 마이크로 팬 (fan)의 첫 번째 면인 상면을 가공한 결과가 Fig. 5 와 같다. 보다 직경이 작은 마이크로 팬 형상도 제작이 가능하지만, 이를 위해서는 가공 재질 자체의 성분이 재설계 제작되어야 하는 어려움과 가공 제어 프로그램의 한계가 있었다. 본 논문에서는 본 공정의 가능성을 입증하는 단계로써, 1차적으로 직경이 약 1.0mm 이내의 마이크로 팬만을 대상으로 완벽한 3 차원 형상을 구현하는 것을 목표로 하였다. 특히 앞, 뒷면의 가공 정렬을 위해서는 광학 현미경에 의한 정렬장치가 별도로 제작되어 본 실험에 사용되었다. 총가공 시간은 7시간이 소요되었으며 마지막 단계에서 왁스 충전 물질을 분리하기 위해서는 85 °C 가량의 뜨거운 물속에서 초음파 세척함으로써 최종 제품을 쉽게 분리할 수 있다.

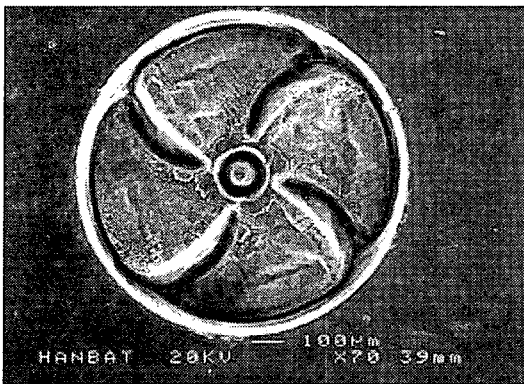


Fig. 5 3D micro-scale fan product after first-face micromachining

지금까지의 기존의 연구 결과들로부터 알 수 있는 사실은 레이저 어블레이션에 의한 마이크로머시닝은 기능성 재질의 마이크로 부품의 소규모 생산에 매우 유용한 방법이었으나 완전한 3 차원 형상을 얻기에는 마이크로 부품 고정방법이 마땅하지 않았으며 어떠한 해결방안이 반드시 필요하였다는 것이었다. 따라서 본 연구에서 제안한 저융점 왁스 상변화 충전공정을 결합함으로써 마이크로 3 차원 부품제작에 필요한 충분한 공작물 고정력이 발생함과 열변형에 의한 형상오차가 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 6 는 본 논문에서 제안한 레이저 마이크로 쾌속 공정으로 제작한 최종 제품이다. 이러한 제작공정은 자유곡면을 갖는 마이크로 3 차원 형상의 제품을 폴리머 재료를 사용하여 쉽고 빠르게 제작할 수 있는 가능성을 보여준다.

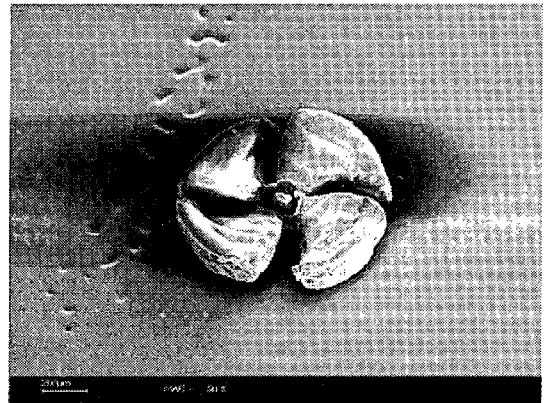


Fig. 6 3D micro-scale fan product

5. 결론

이상의 실험과 응용사례를 통하여 얻는 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 3 차원 마이크로 쾌속제작공정으로서 레이저 어블레이션과 저융점 충전공정을 결합한 새로운 공정을 제안하였다.

둘째, 본 공정을 활용하여 기능성 폴리머를 사용하여 직접적으로 자유곡면을 갖는 팬 형상의 마이크로급의 3 차원 임의 형상을 빠른 시간 내에 제작함으로써 이의 유용성을 확인하였다.

마지막으로, 더 작은 크기의 마이크로 3 차원

형상을 제작하고자 하거나 폴리머 재질의 UV 레이저 어블레이션 공정에서의 다중경로의 중첩에 의해 가공면의 품질을 향상하기 위해서는, 보다 정확한 전용 레이저 마이크로 가공 CAM 및 post CAM 프로그램의 개발이 요구되며, 향후 본 공정의 자동화와 최적가공조건을 확립을 위한 추가 연구가 계속 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제와 부산대학교 교내학술연구비(4년 과제)의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Dauer, S., Ehlert, A., Buttgenbach, S., "Rapid prototyping of micromechanical devices using a Q-switched Nd:YAG laser with optional frequency doubling," *Sensors and Actuator* 76, pp. 381-385, 1999.
2. 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.
3. Gandhi, M. V., Thompson, B. S., Mass, D. J., "Adaptable Fixture Design: An Analytical and Experimental Study of Fluidized Bed Fixturing," *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol.108, pp.155-121, 1986.
4. He, Liming, Namba, Yoshiharu, Narita, Yuji, "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.
5. Shin, B. S., Yang, S. B., Chang, W. S., Kim, J. G., Kim, J. M., "Rapid Manufacturing of 3D-shaped Microstructures by UV Laser Ablation," *J. of the KSPE*, Vol. 21, No. 7, pp. 30-34, 2004.
6. Yoon, K. G., Shin, B. S., Choi, D. S., Lee, S. G., Kim, J. G., Whang, K. H., "Method and Apparatus for Making a Minute Products using UV Laser Beam," *Korea Patent No. 0364195*, 2002.
7. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Kim, K. D., Lee, E.S., Je, T. J., Whang, K. H. , "Development of Automatic Filling Process using Low-Melting Point Metal for Rapid Manufacturing with Machining Process," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 88-94, 2002.
8. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Whang, K. H., "Development of Rapid Manufacturing Process by Machinng with Automatic Filling," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp. 174-178, 2001.
9. W.Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer, Berlin, 1996 "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 Nanotechnology* 24, pp. 245, 2000.
10. Yang, S. B., Chang, W. S., Kim, J. G., Shin, B. S., Jeon, B. H., "Micro Channel Fabrication Technology using UV Laser Micromachining," *Transaction. of Materials Processing*, Vol. 13, No. 3 pp. 216-224, 2004.