

# 펨토초 레이저를 이용한 극미세 광조형 기반공정 개발

박상후\*, 임태우\*, 정창균\*, 양동열#, 이신욱\*\*, 이성구\*\*, 공홍진\*\*\*

## Fundamental Process Development of a Ultramicro-Stereolithography using a Femto-second Laser for Manufacturing Nano-scaled Features

Sang Hu Park\*, Tae Woo Lim\*, Chang-Gyun Jeong\*, Dong-Yol Yang#,  
Shin Wook Yi\*\*, Seong Koo Lee\*\* and Hong Jin Kong\*\*\*

### ABSTRACT

The miniaturization technologies are perceived as potential key technologies of the future. They will bring about completely different ways in which people and machines interact with the physical world. However, at the present time, the primary technologies used for miniaturization are dependent on the microelectronic fabrication techniques. The principal shortcomings associated with such techniques are related to the inability of to produce arbitrary three-dimensional features not only in electronics but also in a wide range of metallic materials. In this paper, a ultramicro-stereolithography system assisted with a femto-second laser was developed to fabricate the arbitrary three-dimensional nano/micro-scaled features. In the developed process, a femto-second laser is projected according to CAD data on a photosensitive monomer resin, it induces polymerization of the liquid resin. After the polymerization, a droplet of ethanol is dropped to remove the liquid resin and then the polymerized nano-scaled features only remain. By a newly developed process, miniature devices for an extremely wide range of applications would become a technologically feasible reality. Some of nano/micro-scaled features as examples were fabricated to prove the usefulness of this study at the fundamental stage.

**Key Words** : Ultramicro-Stereolithography(극미세 광조형법), Femto-second Laser(펨토초 레이저), Two-photon Polymerization(이광자흡수 경화), Nano-scaled Features(나노 정밀도 형상)

### 1. 서론

최근 반도체, 정보통신과 생명공학 등의 기술 혁신형 산업을 육성하기 위하여 각국에서 전략적으로 기술개발 정책에 힘쓰고 있다. 또한 이러한

산업을 위한 핵심기반기술로 나노, 마이크로 공정 기술의 중요성이 대두되고 있다. 그리고 이러한 나노, 마이크로 관련 기술의 발달은 기능성 부품이나 제품이 점차 소형화, 집적화 되어 그 활용 범위가 바이오 산업에서 항공우주 산업까지 다양

접수일: 2003년 6월 3일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

# 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과

Email : dyyang@webmail.kaist.ac.kr, Tel. (042)869-3214

\*\* 한국과학기술원 물리학과 대학원

\*\*\* 한국과학기술원 물리학과

하게 확대되고 있다. 최근까지 초소형 구조물 제작에 관한 공정기술에 대한 대부분의 연구는 반도체 공정을 기반으로 하는 마이크로머시닝 기술에 중심을 두고 있다. 이러한 마이크로머시닝 기술은 지금까지 초소형 제품의 개발에 상당한 역할을 해왔으며 자동차 에어백 센서, 유압센서, 디스플레이 산업까지 다양한 적용사례를 만들었다. 그러나 공정의 특성상 완전한 자유표면을 가지는 3차원 형상제작에는 다소 문제가 있으며, 또한 값비싼 장비의 사용과 클린룸(clean room)과 같은 특별한 환경에서만 제작이 가능하거나 공정이 복잡하고  $\mu\text{m}$  크기 이하의 형상제작이 어려운 단점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 산업에서 널리 활용되고 있는 3차원 패속조형기술<sup>1,2</sup>을 응용하여 마이크로 스케일 형상을 제작하는 연구가 진행되었다. Bertsch 등<sup>3</sup>은 두꺼운 레지스터(resist)에 자외선(ultraviolet beam)을 투과하여 수 mm 크기의 3차원 형상을 제작하였다. 그리고 Kim 등<sup>4</sup>은 초고압 수은 램프를 이용한 광조형 장치를 개발하여 수백  $\mu\text{m}$ 의 형상을 제작하였다. 그러나 서브 마이크로(sub-micron) 크기의 형상을 제작하기 어려운 공정상 한계가 있었다.

최근 바이오 산업, 건축 산업 및 반도체 산업의 발달로 서브 마이크로 크기 이하의 구조물에 대한 요구가 급증하고 있으며 이에 따라 다양한 나노공정에 대한 연구가 급속하게 진행되고 있다<sup>5-7</sup>. 그러나 대다수의 나노공정에 대한 연구는 기존의 실리콘 재료를 이용한 반도체 식각공정을 기본으로 하여 형상을 제작하기 때문에 복잡하거나 자유곡면을 가지는 3차원 형상제작에는 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에 펨토초 레이저를 이용한 이광자 흡수방법(two-photon absorption polymerization)으로 극미세 3차원 형상을 제작하는 공정 개발에 많은 연구<sup>8-11</sup>가 진행되었다. 본 연구에서는 펨토초 레이저(femto-second laser)를 이용하여 나노급 정밀도를 가지는 극미세 광조형 초기 시스템을 개발하였으며, 몇 가지 형상을 제작하여 개발된 시스템의 신뢰성과 향후 가능성을 확인하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

### 2.1 이광자 흡수 현상

이광자 흡수현상은 물질이 두개의 광자를 동시에

흡수하여 마치 두개의 광자에 의해 에너지가 두 배인 광자에너지를 흡수하게 되는 현상을 말한다. 즉, 이광자에 의하여 파장이 반으로 줄어든 하나의 광자처럼 흡수되는 현상을 말한다. 따라서 390nm 에 반응하는 광경화 수지의 경우에 780nm 파장을 가지는 펨토초 레이저의 경우 이광자 발생에 의해서만 경화된다.

레이저 빔이 대물렌즈에 의하여 Fig. 1(a)와 같이 초점이 맺어지게 되면 초점부에는 광자 밀도(photon density)가 높아지게 된다. 그러나 각 빔의 단면에서 광자의 전체수는 일정하므로 Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 재료가 단일광자를 흡수하는 방식에서는 빔의 강도(intensity)의 합산은 일정하기 때문에 광학적인 광자 밀도에는 영향을 받지 않게 된다. 또한 레이저 빔을 조사할 때 최소 초점 크기는 빔의 회절한계에 의하여 결정되어 파장 정도의 크기로 제한되게 된다. 그러나 Fig. 1(c)와 같이 레이저 빔의 강도가 광자 밀도의 제곱에 비례하여 단위 면적당 빔의 강도가 매우 크게 되면 비선형성을 나타나게 되고 이러한 조건에서 두 개의 광자가 동시에 발생된다. 이광자 흡수현상에 의한 초점 크기는 빔의 회절한계와 상관없이 빔의 파장 크기 이하로 만들 수 있다<sup>10,12</sup>.

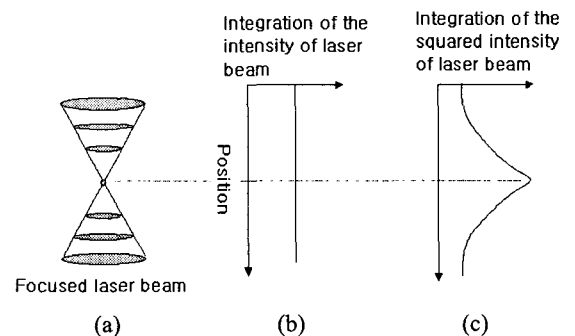


Fig. 1 One-photon absorption and two-photon absorption generated by a focused laser beam. (a) Schematic diagram of a focused laser beam, (b) total one-photon absorption per transversal plane and (c) total two-photon absorption per transversal plane, that is calculated by integrating the squared intensity over the plane<sup>10</sup>.

광경화 수지가 광자를 흡수하게 되면 라디칼(radical)의 밀도( $\rho$ )가 증대되고 임계값( $\rho_{th}$ )보다

클 때 모노머(monomer) 상태에서 폴리머(polymer) 상태로 변환되어 경화된다. 이광자 흡수에 의하여 임계조건 이상에서 만들어지는 최소 형상체적 즉, 복셀(volume pixel or voxel)의 최소 크기를 계산하면 다음과 같다. 초점면의 광자 플럭스(flux,  $N_0$ )는 가우스 함수 분포형태로 나타내어진다<sup>9</sup>.

$$N(r,t) = N_0(t) \exp(-2r^2 / r_0^2) \quad (1)$$

위 식(1)에서  $r$  은 빔 중심에서의 빔 반경을 의미하고,  $r_0$  는 전체 빔의 반경을 나타낸다. 광자 플럭스는 레이저 빔이 조사되는 동안 시간에 따라 일정하다고 가정하면 복셀(voxel)의 직경은 광자 플럭스( $N_0$ )와 시간( $t$ )의 함수로 표현이 된다<sup>9</sup>.

$$d(N_0,t) = r_0 \left[ \ln(\sigma_2 N_2^2 n \tau_L / C) \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $C = \ln[\rho_0 / (\rho_0 - \rho_{th})]$ ,  $n = v t$  로 레이저 펄스의 횟수,  $\tau_L$  은 레이저 펄스의 지속시간,  $\sigma_2$  는 라디칼 생성을 위한 유효 이광자 영역을 나타낸 것이다. 따라서 식(2)에서 레이저 펄스의 지속시간이 작을수록 미세형상의 최소 단위라 볼 수 있는 복셀 단면의 직경이 작아지게 됨을 알 수 있다. 그러므로 펨토초 레이저는 펄스의 지속시간이 수십 펨토초 정도로 극히 작기 때문에 이광자 흡수 현상으로 극미세 형상을 제작하는 것이 가능함을 알 수 있다.

### 2.2 극미세 광조형 시스템 구성

극미세 광조형 시스템의 구성은 기본적인 원리와 개념은 일반적인 산업에 많이 사용되는 패속조형 기기의 하나인 SLA(stereolithography apparatus) 시스템<sup>1,2</sup> 과 상당히 유사하다. 액상의 수지에 레이저광을 시작점과 끝점 좌표, 그리고 스캐너의 스텝간격을 나타낸 CAD 데이터에 따라 선택적으로 조사하여 경화시킨 후 적층하여 형상을 제작하게 된다. Fig. 2 에는 본 연구에서 개발한 시스템의 개략도와 실제 시스템의 셋업 사진을 나타내었는데 스캐너와 z 축 스테이지 그리고 셔터는 CAD 데이터와 연계되어 제어되도록 하였다. 또한 공정조건을 쉽게 제어하기 위하여 형상 데이터, 레이저 조사 속도, 그리고 셔터의 on/off 를 입력 값으로 주도록 하여 그래픽 사용자 환경(GUI)을 구성하였다. Table 1 에는 개발된 시스템의 주요 구성요소에 대

한 사양을 기술하였다.

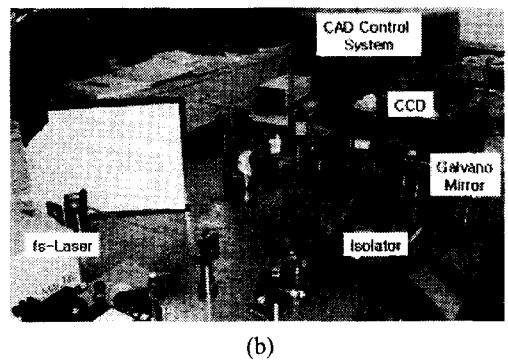
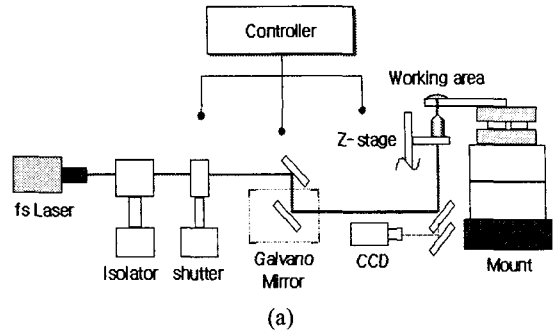


Fig. 2 (a) Schematic diagram and (b) photograph of a developed ultramicro stereolithography system.

Table 1 Principal specification of an ultramicro stereolithography system.

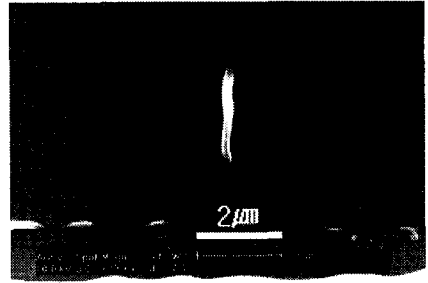
ITEMS	MODEL	MAKER
fs Laser	Mai Tai	Spectra-Physics
Isolator	BB8-51	Electro-Optic Tech
Galvano mirror	Scanjet 2	Scanlab
Shutter	845HP	Newport
Z-stage	P-762.ZL	PI
X/Y stage	X/Y stage	Namil
Objective lens	100X NA 1.2	China
Working plate	Cover glass	Fischer

전체적인 시스템의 작동원리에 대하여 살펴보면, 이광자 흡수(two-photon absorption)에 의한 경화를 위하여 펨토초 펄스를 갖는 티타늄-사파이어 레이저(Ti:Sapphire mode-locked laser)를 사용하였다. 작동 주파수는 80MHz, 펄스 폭은 80fs 이며, 파장은 780nm 정도로 나타났다. 이러한 레이저 빔의 초점

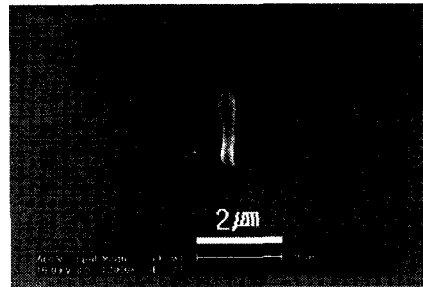
은 CAD 데이터에 따라 x, y 축 경로가 스캐너에 의하여 10nm 분해능으로 제어되고 이때 초점의 z 축은 고정된다. 시편은 100nm의 분해능을 가진 z 축 피에조 타입의 스테이지(piezo-stage)에 올려져서 층간의 간격을 제어하게 된다. 그리고 레이저가 조사되는 과정을 CCD 카메라에 확대 렌즈를 부착하여 모니터링 할 수 있도록 하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 광경화 수지는 광경화성 우레탄계 아크릴레이트(acrylate)계 수지를 사용하였는데, 광경화 수지는 z 축 스테이지 위에 올려진 0.1mm 광학용 커버 유리 표면에 작은 방울 형태로 떨어뜨려서 사용한다. 그리고 극미세 광조형 시스템으로 형상제작이 완료되면 에탄올을 이용하여 경화되지 않은 액상 수지를 완전히 제거한다. 최종 형상의 확인은 SEM에 의하여 확인하였는데 에탄올으로 액상 수지를 제거할 때 제작된 극미세 구조물이 유체의 표면장력, 미세유동 등으로 파손이나 손상이 가지 않도록 주의해야 한다.

### 3. 공정변수 분석

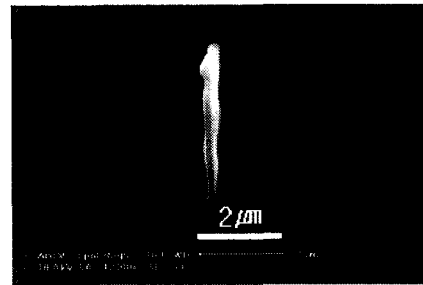
개발된 시스템의 공정조건을 검토를 통하여 극미세 형상을 제작할 수 있는 최적의 조건을 찾기 위하여 예비 실험에서 수지의 경화가 잘 발생한 스캐닝 속도 범위 중에서 평균 속도값(0.0416 mm/s)으로 고정하고 커버 유리면에 레이저의 초점을 맞춘 다음 출력에 따른 선 폭의 두께를 측정하여 비교해 보았다. Fig. 3 에는 레이저 출력에 따라 제작된 선을 나타낸 것이다. 13~20mW의 레이저 출력에 대하여 만들어진 선의 형태는 SEM으로 확대해보면 완전한 직선의 형태는 아니지만 전체적으로 선의 길이는 4 μm 정도이고 선 폭은 서브 마이크로 크기를 가져서 개발된 시스템에서 극미세 형상을 제작하는 것이 실제로 가능함을 보였다. 직선의 형태를 관찰해 보면 시작부분과 마지막 부분에서 형상이 가늘어지는 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에 사용된 레이저 광을 개폐하기 위한 셔터의 특성에 의한 것인데 셔터의 속도가 5ms 이하로 작동하기 어렵기 때문에 셔터가 열리거나 닫히는 과정에서 일부 통과한 레이저 광에 의해서 액상 수지가 경화되어 가는 형상으로 나타났고 완전히 셔터가 열려서 레이저 광이 충분히 통과한 중간부에서는 거의 동일한 굵기의 직선 형상이 제작되었다. 이러한 것을 방지하기 위해서는 고속도로 제



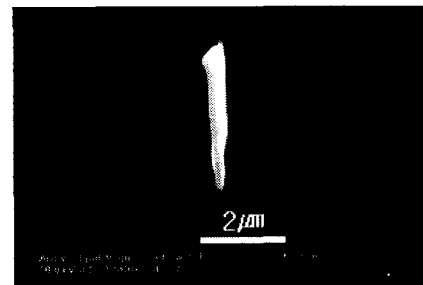
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 SEM images of sub-micro lines fabricated using ultramicro stereolithography system with variation of laser power; (a) 13mW, (b) 15mW, (c) 17mW, and (d) 20mW.

어가 가능한 셔터를 사용하거나 새로운 방법이 요구된다. 레이저 출력에 따른 최소 선 폭 결과는 Fig. 4 에 정리하였다.

Fig. 4 에서 레이저 출력에 따른 선 폭의 최소값은 13mW 에서 180nm 로 나타났으며 출력이 높아질수록 선 폭이 크기가 증가됨을 알 수 있다. 이것은 레이저의 출력이 높을수록 가우스 분포를 가지는 레이저의 강도가 수지가 경화되는 임계값을 넘는 영역이 증가되기 때문이다. 따라서 180nm 이하의 선 폭을 구하기 위해서는 13mW 이하에서 출력조건에서 가능할 것으로 판단된다. 그러나 선 폭이 너무 작게 되면 실제 극미세 형상을 제작할 때 공정의 미소한 불균일성이 발생할 경우 형상제작이 어렵게 되므로 안정된 제작조건을 고려한다면 15~20mW 가 적정수준으로 판단된다.

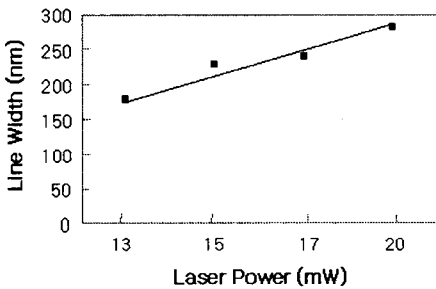
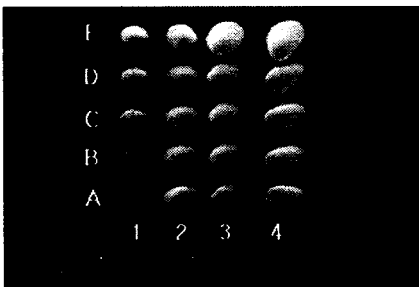
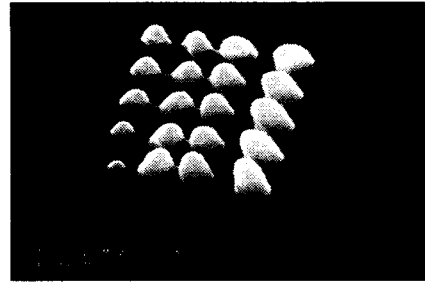


Fig. 4 Minimum line width with the variation of laser powers.

레이저 조사시간에 따른 복셀 형상에 대한 영향을 알아보기 위하여 레이저의 출력이 16mW 로 고정하고 조사시간을 5ms 씩 증가시키면서 100ms 까지 변화시키면서 복셀의 크기변화에 대하여 알아보았다. Fig. 5 에는 실험에서 생성된 복셀의 형상을 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 5 SEM images of voxels in view of (a) top and (b) inclined side.

Fig. 5(a)에서 레이저의 조사시간은 1 번 열에서는 A 행에서 E 행으로 갈수록 처음 5ms 에서 각각 5ms 씩 증가되고 2 열에서는 E 행에서 A 행으로 갈수록 5ms 씩 증가되어 지그재그 형태로 최종적으로 4 열 A 행까지 조사시간이 100ms 이 될 때까지 실험하였다. 조사시간이 길어질수록 광경화 수지가 받는 광자 에너지가 많아져서 복셀의 직경과 높이가 증가됨을 알 수 있는데 조사시간이 일정 수준 이상에서는 복셀의 직경의 변화보다는 높이의 변화가 많아짐을 알 수 있다. 따라서 극미세 3 차원 형상을 제작할 때, 레이저 조사시간은 중요한 공정 변수이며, 식(2)에서 간략하게 검토한 결과와 정성적으로 동일한 결과가 나타났음을 알 수 있었다. 레이저 출력이 16mW 으로 동일한 조건에서 복셀의 최대 직경에 대하여 정리하여 Fig. 6 에 나타내었는데 레이저의 조사시간이 일정 값 이상이 되면 복셀의 직경의 변화가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 40ms 이상에서는 복셀의 직경이 430nm 수준으로 거의 변화가 없었다. 이때를 레이저의 조사속도로 환산하여 나타내면 약 0.01 mm/s 정도 된다.

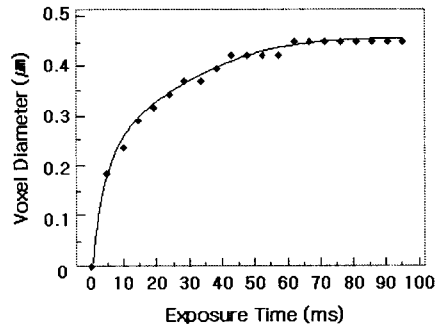


Fig. 6 Exposure time vs. voxel diameter curve.

복셀의 길이는 레이저의 초점 위치에 의하여 영향을 받을 것으로 예측되어 z 축 방향으로 레이저의 초점평면의 위치를 바꿔가면서 복셀 길이 변화를 알아보았다<sup>11</sup>.

Fig. 7 에 나타낸 것처럼 레이저의 초점이 커버 유리면에서 벗어날수록 유리면 내부에 존재하던 레이저 초점길이가 수직쪽으로 이동함에 따라 복셀의 길이가 길게 만들어지게 된다.(Fig. 7(a)의 a~d) 따라서 계속적으로 커버 유리판을 대물렌즈 쪽 방향으로 이동시켜서 레이저의 초점을 커버 유리판면에서 멀어지도록 만들 경우 만들어진 복셀이 유리면에 부착되지 못하고 넘어져서 최종적으로 뭉쳐져 있는 상태를 확인할 수 있다(Fig. 7(a)의 e~g). 이러한 현상은 기존 연구<sup>11</sup>에서도 유사하게 나타났다.

따라서 레이저의 z 축 초점도 중요한 설계 변수임을 알 수 있었다. Fig. 7(c)에서 생성된 복셀이 윗부분에서 서로 붙어있는 것은 경화된 뒤에 에탄올로 액상 상태의 나머지 수지를 제거할 때, 표면장력에 의하여 세장비(aspect ratio)가 큰 복셀이 강성을 견디지 못하고 서로 붙게 되어서 발생된 것이다.

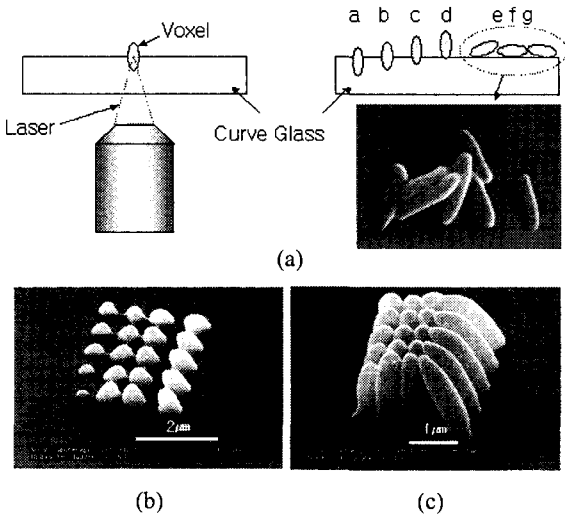


Fig. 7 (a) Schematic ascending-scan process and SEM images of voxels (b) in case of 'a' and (c) 'd' in Fig. 7(a).

#### 4. 극미세 형상제작

본 연구에서 개발된 극미세 광조형 시스템의 안

정성을 확인하기 위하여 한 번의 길이가 4 µm 크기를 가지는 정육면체 모양의 패턴을 제작해 보았다. 제작된 형상은 Fig. 8 에 나타내었는데 패턴 제작은 레이저 출력은 20mW, 조사시간은 한 번의 길이당 5ms 으로 하였다. 그리고 패턴간의 이동은 10 µm의 분해능을 가진 마이크로 x, y 스테이지를 이용하였다. 이것을 통하여 개발된 시스템을 이용하여 다양한 형태의 마이크로 패턴을 직접 제작할 수 있음을 확인할 수 있었다.

또 다른 예제로 시스템의 곡선형태의 제작 능력을 확인하기 위하여 원형 형태의 2 차원 형상을 제작해 보았다. 제작된 형상은 Fig. 9 에 나타내었는데 최대 직경은 6.5 µm 정도 된다. 전체적으로 원의 형상을 잘 나타내었고 맨 가장자리의 원이 개구간으로 만들어진 것은 본 연구에서는 기계식 셔터를 사용하기 때문에 셔터가 열리는 도중에 레이저 빔이 지나가서 결국 일정구간이 조사되지 못하여 경화되지 않음을 알 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 9 의 내부에 위치한 동심원에서는 시작점에서 셔터가 열리는 시간 만큼 감안하여 레이저를 정지시킨 뒤 경로에 따라 이동하도록 하여 셔터속도에 대한 문제점을 해결할 수 있었다.

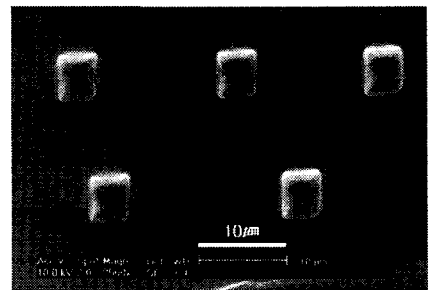
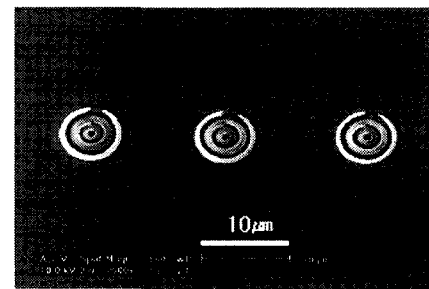
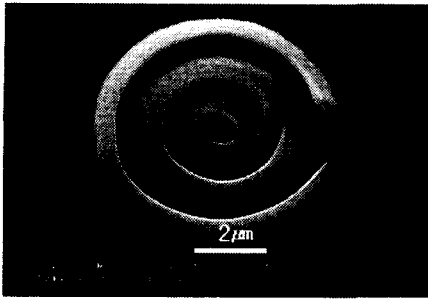


Fig. 8 SEM image of a square pattern using ultramicro-stereolithography system.



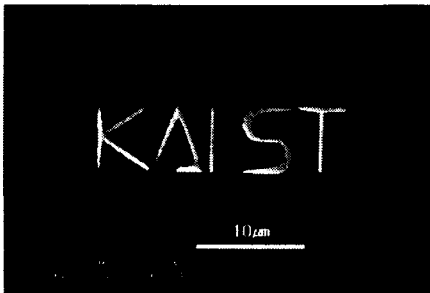
(a)



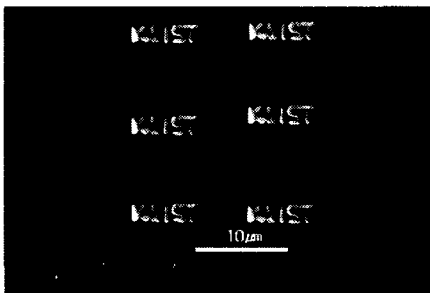
(b)

Fig. 9 SEM images of (a) round shape patterns and (b) enlarged view.

Fig. 10 에는 한국과학기술원(KAIST)의 로고를 제작한 예를 나타내었다. 공정조건으로 레이저 출력은 17mW, 레이저 조사속도는 0.0588 mm/s 으로 계산되었다. Fig. 10(b)의 경우 전체 로고 크기가 7 μm 정도이고 각 알파벳의 평균 크기는 1.4 μm 정도로 나타났다. 따라서 개발된 시스템의 이용하여 복잡한 형상에 대하여 마스크 패턴 없이 직접적으로 형상을 제작할 수 있음을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 10 SEM images of 'KAIST logo' in case of (a) 25 μm and (b) 7 μm length.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 극미세 광조형 초기 시스템 개발과 몇 가지 형상제작을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펄스 레이저를 이용하여 이광자 현상으로 형상을 제작하는 시스템을 개발하였으며, 현재까지의 결과에서는 선 폭의 경우 최소 180nm 정도로 나타났으며 레이저 출력을 13mW 이하로 할 경우 100nm 수준의 선 폭 제작이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 경화된 수지의 최소 크기인 복셀의 직경은 레이저 조사시간에 따라 달라지며 조사시간이 길수록 직경이 증대되지만 일정 값 이상에서는 직경의 변화가 거의 없음을 알 수 있었고 복셀의 높이는 조사시간에 따라 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.
- 3) 레이저의 z 축 초점거리에 따라 복셀의 전체 길이에 영향을 많이 줌을 확인할 수 있으며 초점거리가 커버 유리면에서 일정거리 이상 멀어지면 복셀이 유리면에 부착되지 못하고 쓰러짐을 확인할 수 있었다.
- 4) 경화된 극미세 형상은 에탄올로 액상수지 부분을 제거할 때 표면장력 등의 영향으로 형상이 다소 변형되는 것을 알 수 있는데 이것은 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 5) 몇 가지 극소형 형상을 제작을 통하여 개발된 시스템의 유용성과 향후 개발방향을 확인할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되었고 실험에 사용된 재료는 한남대학교 이광섭 교수가 제공하였으며, 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Yang, D.Y., Sohn, H.K., "Principles of recent rapid prototyping processes," J. of the KSME, Vol.39,

- No.9, pp.28-31, 2000.
2. Yang, D.Y., Ahn, D.G., Lee, C.H., Park, C.H., Kim, T.J., "Integration of CAD/CAM/CAE/CP for the development of metal forming process," J. of Mat. Proc. Tech., Vol.125-126, pp.26-34, 2002.
  3. Bertsch, A., Lorenz, H., Renaud, P., "3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography," Sensor and Actuators, Vol.73, pp.14-23, 1999.
  4. Kim, D.W., Chae, H.C., Kim, N.G., "A study on micromachining using stereolithographic rapid prototyping system," J. of the KSPE, Vol.14, No.6, pp.99-105, 1997.
  5. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," Nature, Vol.417, No.20, pp.835-837, 2002.
  6. Heyderman, L.J., Schiff, H., David, C., Ketter, B., Maur, M.A., Gobrecht, J., "Nanofabrication using hot embossing lithography and electroforming," Microelectronic Eng., Vol.57-58, pp.375-380, 2001.
  7. Koo, K.I., Cho, D.I., Park, J.H., Park, K.D. Choi, B.D., Paik, S.J., "A ultra sharp {111} nano tips utilizing the sharpest <111> crystallography of silicon single crystal," The 5<sup>th</sup> Korean MEMS Conf., Jeju, pp.404-408, 2003.
  8. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," Nature, Vol.412, No.16, pp.697-698, 2001
  9. Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A., Chichkov, B.N., "Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics," Optics letters, Vol.28, No.5, pp.301-303, 2003.
  10. Maruo, S., Kawata, S., "Two-photon-absorbed near-infrared photopolymerization for three-dimensional microfabrication," J. of Microelectromechanical Systems, Vol.7, No.4, pp.411-415, 1998.
  11. Sun, H. B., Tanaka, T., Kawata, S., "Three-dimensional focal spots related to two-photon excitation," App. Physics letters, Vol.80, No.20, pp.3673-3675, 2002.
  12. Kong, H.J., Yi, S.W., Lee, S.K., "Nano scale three-dimensional lithography using two-photon absorption of a repetitive high power laser," The Optical Society of Korea, Workshop on the advanced lasers and their applications, pp.77-78, 2003.