

# 레이저 빔 단면확대를 이용한 나노 복화(複畵)공정의 패턴 정밀도 향상에 관한 연구

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

## Fabrication of Precise Patterns using a Laser Beam Expanding Technique in Nano-Replication Printing (nRP) Process

Sang Hu Park\*, Tae Woo Lim\*, Dong-Yol Yang#, Shin Wook Yi\*\* and Hong Jin Kong\*\*\*

### ABSTRACT

A laser beam expanding technique is employed to fabricate precise nano-patterns in a nano-replication printing (nRP) process. In the nRP process, some patterns can be fabricated in the range of several microns inside on a polymerizable resin by using a volume-pixel (voxel) matrix that is transformed from a two-tone bitmap figure file. The liquid monomers are polymerized by means of a two-photon-absorption (TPA) phenomenon that is induced by a femtosecond (fs)-pulse laser. The voxels are generated consecutively to merge into adjoining voxels in the process of fabricating a pattern. The resolution of a fabricated pattern can be obtained under the diffraction limit of a laser beam by the two-photon absorbed polymerization (TPP). In this work, a beam-expanding technique has been applied to enlarge a working area and to fabricate precise patterns. Through this work, a working area is expanded by the technique as much as 2.5 times compared with a case of without a beam expanding technique, and precision of outside patterns is improved.

**Key Words :** Nano Replication Printing Process (nRP) (나노 복화공정), Two-photon absorbed Polymerization (이광자 흡수 고화), Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Beam Expansion (빔확대)

### 1. 서론

최근에 다양한 분야에서 나노 기술을 이용한 고부가가치의 제품개발에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 그 중에서도 높은 패턴 정밀도를 가지며 저비용으로 대량생산이 가능한 나노/마이크로 공정기술 개발에 많은 연구들이 진행되고 있으며 이러한 공정들의 대표적인 사례로는 UV 광을 이용한 나노 임프린트 공정<sup>1</sup>과 PDMS (poly-

dimethylsiloxane) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피 (soft lithography) 공정<sup>2-6</sup>, 패턴이 새겨진 스탬프에 금속 박막을 도포하여 냉압접 (cold-welding) 방법을 이용하여 금속 박막을 전사하여 패터닝 하는 공정<sup>7,8</sup>, 또는 PDMS 스탬프에 모세관 효과를 이용하여 패턴을 제작하는 방법<sup>9</sup> 등이 있다. 이러한 스탬프 제작시 필수적으로 정밀한 마스터 패턴 제작 공정이 요구되는데 현재까지는 대부분 기전 시스템 (MEMS) 또는 반도체 제작에서 사용되는

접수일 2004년 7월 9일, 게재승인일 2004년 11월 19일

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
# 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과  
Email : dyyang@kaist.ac.kr, Tel. (042)869-3214  
\*\* 한국과학기술원 물리학과 대학원  
\*\*\* 한국과학기술원 물리학과

마스크 (mask)를 이용한 노광 공정을 이용하여 패턴을 제작한다. 이러한 마스크 노광 공정은 초소형 제품의 개발에 상당한 역할을 해 왔으며 자동차 에어백 센서, 유압센서, 반도체, 디스플레이 산업까지 다양하게 응용되고 있다. 그러나 공정의 특성상 마스크를 이용한 노광과 에칭(etching) 공정을 반복적으로 사용하기 때문에 재료의 손실이 크다는 단점과 나노급 정밀도 구현이 다소 어려운 문제점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 마스크 없이 직접적으로 패턴을 제작하는 공정에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 장비가 고가인 단점이 있지만 전자 빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 이용하여 수십 나노의 정밀도를 가지는 패턴을 제작할 수 있는 방법이 있다. 또한, 펨토초 레이저와 근접 광 (near field)을 이용한 광학현미경 팁 (NSOM tip)을 결합시켜 빔의 회절한계 이하의 정밀도를 가지는 패턴을 직접적으로 제작하는 공정에 대한 연구도 진행되고 있다. AFM (atomic force microscope) 프로브 (probe)를 이용하여 자기조립 분자막 (self assembled monolayer)(SAM)에 직접적으로 패턴링을 하거나 프로브를 잉크에 묻혀서 패턴링하는 방법도 개발되었다<sup>10</sup>. 그러나 이러한 방법은 x, y 축 스테이지를 이용하여 구동하기 때문에 곡선을 가진 복잡한 패턴을 제작하기에는 다소 문제점이 있다. 최근 5 년 전부터 펨토초 레이저의 이광자 흡수 (two-photon absorption; TPA) 현상을 이용하여 직접적으로 패턴을 제작하거나 완전한 3 차원 형상을 제작하는 방법에 대한 연구가 진행되었다. 이광자 흡수 고화현상은 펨토초 레이저의 높은 침투출력 부근에서 광자 두 개를 동시에 흡수하여 광경화 수지가 고화되는 현상으로 빔의 회절한계 이하의 정밀도로 제작이 가능하다. 선행 연구에서 반도체 에칭 공정으로 제작하기 어려운 완전한 3 차원 형상에 대한 제작이 가능함을 보였으며<sup>11-15</sup>, 마스크 없이 200 nm 정밀도를 가지는 복잡한 형태의 2 차원 패턴을 제작하고 이것을 이용한 후속 공정을 개발하여 다양한 적용 가능성을 보였다<sup>16-19</sup>. 이러한 복화공정의 응용으로는 나노 임프린팅, 엠보싱 공정 등에 사용되는 초정밀 스탬프 제작 또는 다양한 패턴링 공정에 활용 등이 있다.

본 연구에서는 펨토초 레이저의 이광자 흡수 현상을 이용하여 비트맵 그림 파일을 이용하여 직접

적으로 패턴링을 할 수 있는 나노 복화공정 (nano replication printing process; nRP)의 정밀화에 관한 것이며, 빔 확대 방법 (laser beam expanding technique)을 이용하여 패턴링 영역을 넓히고, 또한 가장자리 부근의 패턴 정밀도를 향상시키는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 나노 복화(復畵) 공정

### 2.1 나노 복화공정의 실험장치

Fig. 1 에는 본 연구에서 개발한 장치의 전체구성에 대하여 나타내었는데, 사용된 레이저는 80 fs 이하의 펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저 (Ti-Sapphire mode-locked laser)이며, 작동주파수는 80 MHz, 파장은 780 nm 이다. 레이저 빔의 x, y 축의 제어는 갈바노 스캐너 (galvano mirror; model-Scanjet2, Scanlab Co.)를 이용하여 2.5 nm 분해능을 가지도록 하였다. z 축 방향에 대한 제어는 피에조 (piezo) 타입의 스테이지를 이용하였다. 또한, 레이저 빔의 조사시간을 제어하기 위하여 갈바노 셔터와 핀홀 (pin hole)을 결합하여 1 ms 수준의 제어가 가능하도록 하였다. 또한 셔터와 스캐너, z 축 스테이지는 자체 개발한 프로그램에 의하여 제어되도록 하였다. 그리고 패턴링 작업과정을 시각적으로 확인하기 위하여 1000 배까지 확대 가능한 고배율 렌즈가 부착된 CCD 카메라를 이용하여 모니터링하도록 하였다.

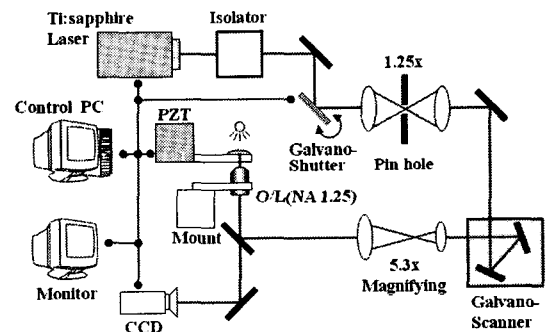


Fig. 1 Schematic diagram of nano replication printing (nRP) system.

본 연구에 사용된 광경화 수지는 일본합성 고무사 (Japan Synthetic Rubber Co.)의 우레탄 아크릴계

단량체와 올리고머 (oligomer)가 혼합된 SCR 계열의 레진에 0.1 % (w/w)의 이광자 흡수 색소인 TP-Flu-TP2 를 섞어 사용하였다. 이러한 광경화 수지는 커버 글래스 위에 극소량 방울 형태로 묻혀서 사용하였다. 그리고 대물렌즈 (NA 1.25, × 100)와 커버 글래스 사이에 개구수 (numerical aperture) (NA)를 높이기 위해 오일(immersion oil)을 사용하였다.

**2.2 이광자 흡수에 의한 고화현상**

이광자 흡수현상은 광경화 수지가 레이저 빔 초점부의 빔 강도가 높은 중심부 영역에서 두 개의 광자를 동시에 받아 고화되는 현상을 말한다. 즉 파장이 400 nm 에 반응하는 광경화 수지의 경우에는 800 nm 파장대를 가지는 펄스초 레이저의 이광자 흡수 조건에서만 경화된다. 레이저 빔이 대물렌즈에 의하여 초점이 맺어지게 되면 초점부의 중심부에는 광자 밀도 (photon density)가 매우 높아지게 되어 다광자가 발산된다. 이러한 영역에서 광경화 수지가 두 개의 광자를 동시에 흡수하여 고화가 될 확률이 높아진다. 따라서 빔의 회절한계 이하의 정밀도를 확보가 가능하다.

광경화 수지는 광 개시제 (initiator)와 단량체 그리고 올리고머로 구성되어 있는데 이 중에서 광 개시제가 두 개의 광자를 동시에 흡수하게 되면 라디칼 (radical)로 변환이 되고, 라디칼의 탄소 이중결합 (double bonds of carbon)이 끊어져서 모노머와 결합이 발생하게 된다. 이러한 과정은 연속적으로 계속 일어나서 사슬구조의 폴리머 형태로 고화가 진행하게 된다. Fig. 2 에는 광중합 과정을 간략하게 나타내었다<sup>20</sup>.

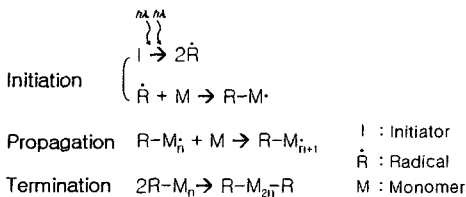


Fig. 2 Photochemical reaction of two-photon-absorbed polymerization for the micro-fabrication.

이광자 흡수로 인하여 생성되는 단위 복셀 (voxel)은 식 (1), (2)와 같이 레이저의 출력과 조사

시간에 영향을 받게 된다<sup>16, 17</sup>. 따라서 레이저의 출력과 조사시간을 최적으로 하여 패턴의 정밀도 향상을 위한 최소의 복셀을 얻을 수 있다. 개발된 시스템을 이용하여 레이저 출력 5 mW, 조사시간 2 ms 으로 약 200 nm 의 직경을 가진 복셀을 제작하였다<sup>19</sup>.

$$d(P, t) = 2r_{z=0} = w_0 \left\{ \ln \left( \frac{4P^2 t}{\pi^2 w_0^4 E'_{th}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$l(P, t) = 2z_{r=0} = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \left\{ \left( \frac{4P^2 t}{\pi^2 w_0^4 E'_{th}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, *d* 는 복셀의 직경, *l* 은 복셀의 길이를 의미하며, *P* 는 레이저 광의 출력 (power), *t* 는 조사시간 (exposure time), *w*<sub>0</sub> 는 레이저 광의 초점부의 반경, *E'*<sub>th</sub> 는 이광자 흡수에 의하여 고화가 발생하는 임계에너지 (threshold energy)를 의미한다.

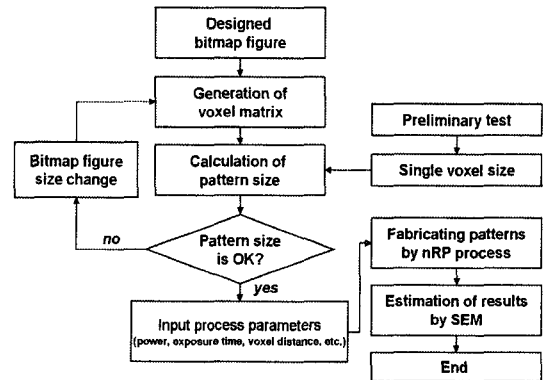


Fig. 3 Schematic flowchart of nRP process

나노 복화공정에서 이광자 흡수 현상을 이용한 패턴 제작은 이산적으로 단위 복셀을 생성하여 생성된 복셀이 서로 연속적으로 이어져서 2 차원 형상을 제작하는 방법인 복셀 매트릭스 스캐닝법 (voxel matrix scanning method)을 이용하였다<sup>19</sup>. 이 방법은 흑백의 비트맵 (bitmap) 형태의 그림파일을 데이터로 활용하는데 비트맵 형태 그림을 0 과 1 로 표현된 아스키 형태 (ASCII format)로 변환시켜

복셀 매트릭스 (voxel matrix)를 생성한다. 복셀 매트릭스에서 그림이 있는 흑색 부분은 1 이 되고 흰색부분은 0 으로 나타내도록 하였다. 0 인 경우에 셔터를 닫아서 레이저 빔을 차단하여 복셀이 생성되지 못하도록 하고, 1 일 때는 셔터를 열어서 이광자 흡수 현상에 의해 복셀이 생성되도록 하였다. 또한, 복셀간의 간격과 매트릭스의 크기를 조절하여 제작되는 패턴의 크기를 조절하도록 하였다. 따라서 나노 복화공정은 형상에 대한 CAD 데이터 없이 비트맵의 형태의 그림 파일로 직접적으로 나노급 형상을 제작할 수 있는 특징이 있다. Fig. 3 에는 나노 복화공정의 개략적인 프로세스를 나타내었다.

### 3. 정밀도 향상을 위한 빔 확대 방법

#### 3.1 패턴 정밀도에 대한 빔 단면크기 영향

개발된 시스템은 스테이지 방식이 아닌 갈바노스캐너를 이용하여 레이저의 빔을 x, y 축으로 제어하도록 되어 있다. 따라서 패턴을 제작할 때 빔이 대물렌즈의 중심부로 항상 들어가는 것이 아니고 x, y 축 데이터에 따라 임의의 위치에 들어가게 된다. Fig. 4 에 나타낸 것처럼 대물렌즈의 가장자리로 들어갈 경우 빔의 강도 (beam intensity)가 낮은 부분이 대물렌즈로 들어가고 나머지 부분은 대물렌즈 입구 부분에서 모두 반사되므로 빔의 강도가 약하여 이광자 흡수 현상이 발생하지 않거나 미약하여 패턴이 잘 생성되지 않게 된다. 이와 반대로 대물렌즈의 중심부로 빔이 유입되는 경우에는 빔의 강도가 충분하여 패턴이 잘 생성된다.

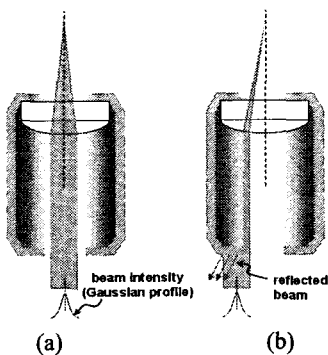


Fig. 4 Schematic diagram of beam intensity (a) in the case of centric input and (b) offset input.

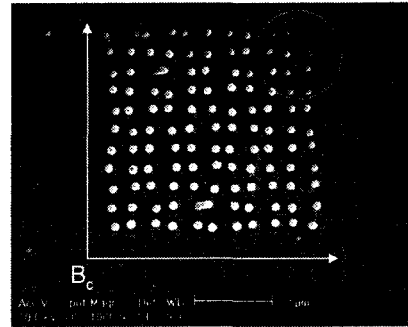


Fig. 5 Experimental results of voxel test to estimate working area with the condition of laser power, 5 mW and exposure time, 2ms. In the dotted circle, voxels were not fabricated exactly due to the insufficiency of beam intensity. ( $B_c$  is the center of working area)

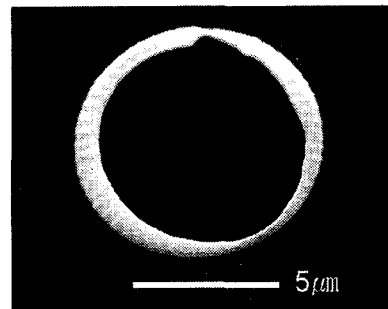
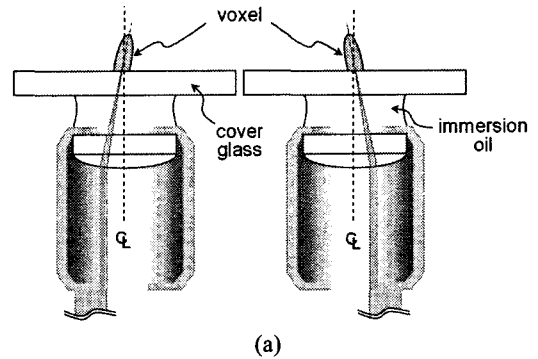


Fig. 6 (a) Schematic diagram of the cause of inclined patterns and (b) an inclined circle pattern due to the input angle of a beam.

따라서 제작할 수 있는 패턴의 크기는 레이저 빔

의 강도가 높은 부분이 대물렌즈로 들어가는 것에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 빔이 펌토초 레이저에서 처음 나온 상태 (직경, 약 2 mm)로 사용할 경우 제작할 수 있는 패턴의 크기가 최대  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$  수준으로 나타났다.

빔이 대물렌즈의 가장자리로 들어갈 때 빔의 강도가 약해져서 발생하는 현상을 파악하기 위하여 복셀 실험을 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 안정되게 패턴제작이 가능한 영역은 가로, 세로 약  $8 \mu\text{m}$  수준으로 분석되며, 가장자리에 점선으로 표시된 원 안의 영역에서는 빔의 강도가 약하여 복셀이 약하게 생성되어 실제 패턴을 제작할 때 제대로 제작이 되지 않은 가능성이 높은 영역이다. 또한, 빔의 단면크기가 작은 경우에는 패턴 제작이 가능한 작업영역 (working area) 안에서도 빔의 조사방향에 영향을 받아서 패턴이 수직으로 생성되지 못하고 Fig. 6에 나타낸 것처럼 기울어지는 현상이 있다. 따라서 빔 단면크기는 제작되는 패턴의 크기뿐만 아니라 정밀도에도 상당한 영향을 주는 것으로 판단되며 정밀한 패턴 제작을 위해서 반드시 해결해야 될 부분이다.

### 3.2 빔 단면크기 변화에 대한 해석

가우시안 (Gaussian) 분포를 가지는 레이저 빔이 렌즈로 입사할 때 빔의 세기에 따라서 최대 크기가 달라지기 때문에 빔 단면크기 변화에 따른 초점부의 빔 세기 변화를 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. Fig. 7과 같이 빔이 z축과 평행하게 진행하여 입사된다는 가정하에서 빔의 강도가 가장 큰 부분이 광축에 있지 않는 경우 (offset Gaussian beam)에 x-z 평면상에서 빔의 세기는 식 (3)과 같이 표현된다<sup>21</sup>.

$$U(x, z) = -ikU_0 e^{\frac{\pi^2}{\lambda^2} \alpha} \int_0^{\alpha} e^{-ik \cos \theta} \frac{\sin^2 \theta}{\mu^2} J_0(\sin \theta(x - 2\sigma i / \mu^2)) \cos^{1/2} \theta \sin \theta d\theta \quad (3)$$

여기서  $U$ 는 빔 세기,  $U_0$ 는 빔 세기가 가장 큰 값,  $f$ 는 렌즈의 초점거리,  $\mu$ 는 가우시안 분포를 가진 빔의 폭을 나타낸 것이다. 또한,  $\sigma$ 는 빔의 중심축과 광축 (z축)의 벗어난 거리를 초점거리  $f$ 로 나누어준 값이다.  $J_0$ 는 원기동함수 (Bessel function)를 나타낸 것이다.

NA가 1.25 ( $\alpha = 56^\circ$ )인 조건에서 빔의 단면크기를 나타내는  $\mu$  값이 각각 0.2, 1, 5일 때 광축과 벗어난 정도 ( $\sigma = 0, 0.5, 0.8$ )에 따른 빔 초점 부근에서 발생하는 빔 강도의 분포를 Mathematica로 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 해석된 결과에서 빔의 크기가 증가할수록 광축과 빔의 중심축간의 거리에 상관없이 빔의 강도분포가 일정함을 알 수 있다.

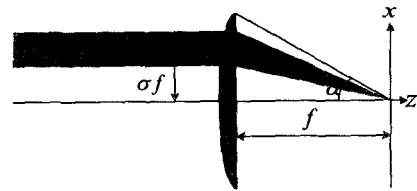


Fig. 7 Optical arrangement showing the offset beam in relation to an optical system. ( $\alpha$  is the angle of numerical aperture.)

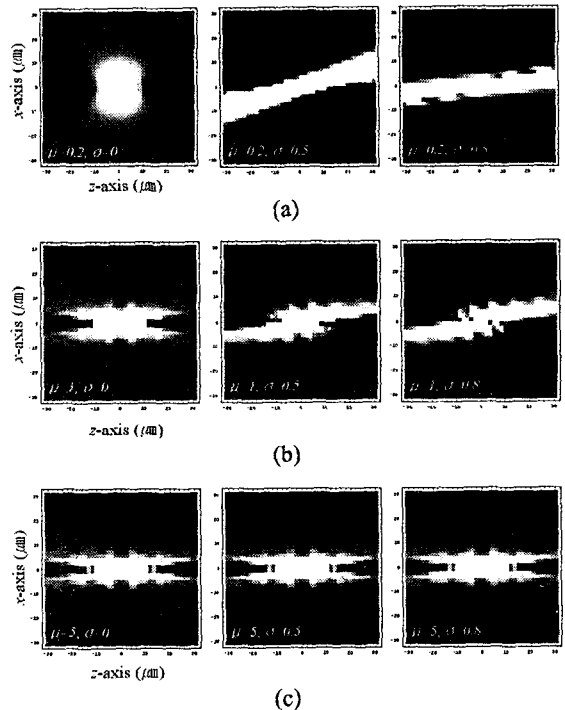


Fig. 8 Field intensity profiles in the conditions of various beam size; (a)  $\mu=0.2$ , (b)  $\mu=1$ , (c)  $\mu=5$ .

따라서, 나노 복화공정에서 빔 확대 방법을 적용할 경우 빔이 대물렌즈에 조사되는 위치에 관계없이 빔의 강도가 일정하여 제작되는 패턴의 가장자리 정밀도가 향상될 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 것처럼 갈바노 스캐너에서 나온 레이저 빔을 5.3 배로 확대하였다.

#### 4. 패턴 제작

본 연구에서 제안된 빔 확대 방법이 적용된 나노 복화공정을 이용하여 2 차원 단면형상을 제작해 보았다. Fig. 10 에는 제작된 다양한 형태의 패턴형상을 나타낸 것인데, 빔이 확대된 경우에는 대물렌즈로 조사되는 빔의 직경이 대물렌즈의 입구 구경보다 크기 때문에 대물렌즈로 완전하게 들어가지 못하고 손실로 발생하는 부분이 존재하게 된다. 따라서 레이저 출력을 빔 확대 이전보다 더 높여서 제작을 하였는데 본 연구에서는 레이저 출력이 12 mW, 조사시간을 2 ms 로 하여 제작하였다. Fig. 10 에 나타낸 실험 결과에서 약 20  $\mu\text{m}$  길이의 패턴 제작이 가능하며, 패턴 가장자리의 정밀도도 빔의 강도가 충분하여 향상되었음을 알 수 있다.

또한 Fig. 10 (a), (b)에 나타낸 것처럼 제작되는 패턴의 가장자리 형상이 빔 확대로 인하여 가우시안 빔의 강도가 높은 영역이 확대되어 빔 확대 이전보다 Fig. 9 과 같이 빔의 중심축이 거의 수직으로 유지되어 수직벽이 잘 생성됨을 알 수 있다. 따라서 나노 복화공정에서 빔 확대 방법은 레이저 빔이 광축과 벗어난 정도에 큰 상관없이 거의 일정한 강도를 유지하기 때문에 패턴 정밀도 향상에 있어 상당히 효과적임을 알 수 있었다.

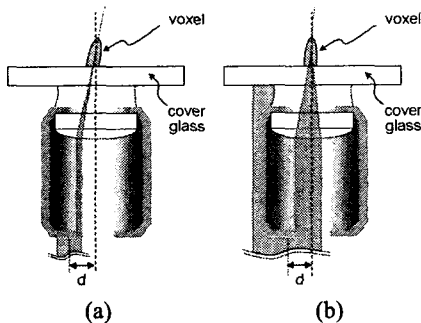


Fig. 9 Schematic diagram for an explanation of precise patterning; (a) without a beam expansion, (b) with a beam expansion.

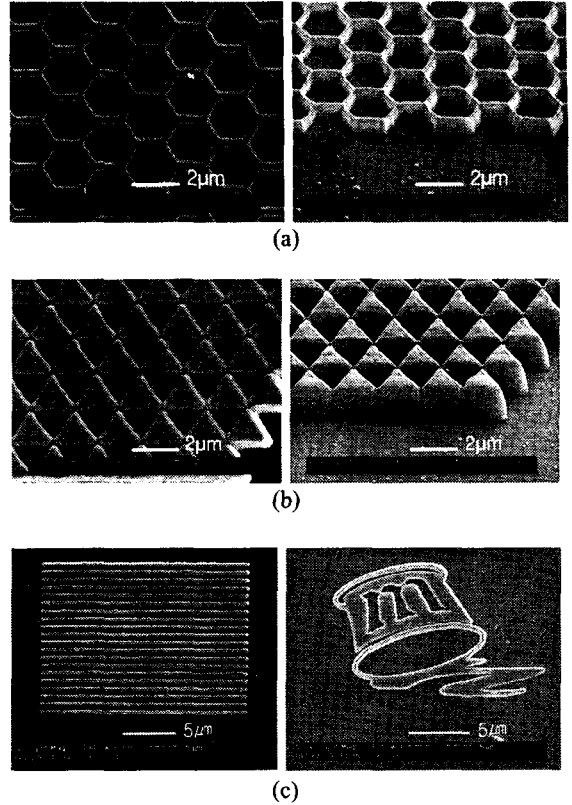


Fig. 10 SEM images of fabricated patterns; (a) honeycomb structure, (b) triangular structure, (c) line pattern and a logo of the center for nanoscale mechatronics & manufacturing.

#### 5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 나노 복화공정을 이용하여 그림파일을 나노급 정밀도를 가지는 형상으로 복제가 가능함을 보였다.
- (2) 복제된 형상의 정밀도는 레이저의 출력과 조사시간의 함수로 나타낼 수 있다. 또한, 광학적인 특성으로 레이저 빔의 직경에 따라 영향이 있음을 해석을 통하여 평가해 보았다.
- (3) 대물렌즈로 조사되는 빔의 단면크기가 작은 경우에 빔의 조사방향이 렌즈의 광축과 일치할 경우와 벗어난 경우에 초점부의 강도변화가 발생하여 제작되는 패턴의 가장자리 정밀도가 저하되고 패턴크기가 제한됨을 알 수 있었다. 또한 직경이 작은 빔이 렌즈의 광축과

벗어날 경우 제작되는 패턴이 수직으로 생성되지 못하고 기울어지는 형상이 발생한다.

- (4) 빔을 확대하여 대물렌즈로 조사될 때 광축과 벗어난 거리에 큰 관계없이 초점부에서 빔의 강도가 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 이 방법을 나노 복화공정에 적용한 경우에 제작되는 패턴의 가장자리와 중심부의 형상이 균일하게 제작되어 정밀도가 향상됨을 실험적으로 확인하였다. 또한 빔을 5.3 배로 확대하여 실험한 결과 빔 확대 이전보다 패턴 제작영역이 2.5 배 정도 넓어짐을 알 수 있었다.

### 후기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," *Nature*, Vol.417, No.20, pp.835-837, 2002.
2. Xia, Y., Whitesides, G.M., "Soft lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol.37, pp.550-575, 1998.
3. Loo, Y.L., Lang, D.V., Rogers, J.A., Hsu, J.W.P., "Electrical contacts to molecular layers by nanotransfer printing," *Nano Letters*, Vol. 3, No. 7, pp.913-917, 2003.
4. Aizenberg, J., Black, A. J., Whitesides, G. M., "Control of crystal nucleation by patterned self-assembled monolayers," *Nature*, Vol. 398, No. 8, pp.495-198, 1999.
5. Schaper, C.D., "Patterned transfer of metallic thin film nanostructures by water-soluble polymer templates," *Nano Letters*, Vol.3, No.9, pp.1305-1309, 2003.
6. Schmid, H., Michel, B., "Siloxane polymers for high-resolution, high-accuracy soft lithography," *Macromolecules*, Vol. 33, pp.3042-3049, 2000.
7. Kim, C. S., Shtein, M., Forrest, S. R., "Nanolithography based on patterned metal transfer and its application to organic electronic devices," *Appl. Phys. Letters*, Vol. 80, No. 21, pp.4051-4053, 2002.
8. Kim, C. S., Burrows, P. E., Forrest, S. R., "Micropatterning of organic electronic devices by cold-welding," *Science*, Vol. 288, pp.831-833, 2000.
9. Kim, Y.S., Suh, K.Y., Lee, H.H., "Fabrication of three-dimensional microstructures by soft molding," *Applied Physics Letters*, Vol.79, No.14, pp.2285-2287, 2001.
10. Hong, S.H., Zhu, J., Mirkin, C.A., "Multiple ink nanolithography: toward a multiple-pen nano-plotter," *Science*, Vol. 286, pp.523-525, 1999.
11. Sun, H.B., Maeda, M., Takada, K., Chon, J.W.M., Gu, M., Kawata, S., "Experimental investigation of single voxels for laser nanofabrication via two-photon photopolymerization," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 5, pp.819-821, 2003.
12. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 16, pp. 697-698, 2001.
13. 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.
14. 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.
15. Sun, H. B., Tanaka, T., Kawata, S., "Three-dimensional focal spots related to two-photon excitation," *Applied Physics Letters*, Vol. 80, No. 20, pp.3673-3675, 2002.
16. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong, H.J., "Development of a nano replication printing (nRP) process using a voxel matrix scanning scheme," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 2, pp.210-217, 2004.
17. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., "Directly nano-precision feature patterning on thin metal layer using top-down building approach in nRP process," *J. of KSPE*, Vol.21, No.6, pp.153-159, 2004.
18. Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong,

- H.J., "Development of contour offset algorithm in nRP process for fabricating nano-precision features," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp.160-166, 2004.
19. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., "Fabrication of a PDMS (poly-dimethylsiloxane) stamp using nano-replication printing process," *J. of KSME*, Vol.28, No.7, pp.999-1005, 2004.
20. Sun, H.B., Matsuo, S., Misawa, H., "Three dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin," *Applied. Phys. Letters*, Vol. 74, No. 6, pp.786-788, 1999.
21. Cronin, P. J., Torok, P., Varga, P., Cogswell, C., "High-aperture diffraction of a scalar off-axis Gaussian beam," *J. Opt. Soc. Am. -A*, Vol. 17, No. 9, pp.1556-1564, 2000.