

# 복셀 차감법에 의한 나노 복화(複畵)공정 정밀화

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

## Development of Contour Offset Algorithm(COA) in nRP Process for Fabricating Nano-precision Features

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

### ABSTRACT

In this study, a new algorithm, named as Contour Offset Algorithm(COA) is developed to fabricate precise features or patterns in the range of several micrometers by nano replication printing(nRP) process. In the nRP process, a femto-second laser is scanned on a photosensitive monomer resin in order to induce polymerization of the liquid monomer according to a voxel matrix which is transformed from the bitmap format file. After polymerization, a droplet of ethanol is dropped to remove the unnecessary remaining liquid resin and then only the polymerized figures with nano-scaled precision are remaining on the glass plate. To obtain more precise replicated features, the contour lines in voxel matrix should be modified considering a voxel size. In this study, the efficiency of the proposed method is shown through two examples in view of accuracy.

**Key Words** : Femto-second Laser(펨토초 레이저), Two-photon Polymerization(이광자흡수 경화), Nano Replication Printing Process(nRP, 나노 복화공정), Contour Offset Algorithm(COA, 복셀 차감법)

### 1. 서론

국가 경쟁력 확보를 위해서 최근 집중 육성산업으로 분류되어 연구 및 투자가 되고 있는 반도체, 정보통신, 바이오산업, 디스플레이 등에서 초정밀화와 저비용, 대량생산을 하기 위해서 기존의 공정을 대체할 수 있는 새로운 나노 공정기술의 요구가 급증하고 있다. 최근에는 극초단파 특성으로 인하여 극미세 형상을 가공할 수 있는 펨토초 레이저(femto second laser)를 나노공정에 적용하는 다양한 연구<sup>1-9</sup>가 진행되고 있다. 특히, 기존의 패

속조형공정<sup>10</sup>을 응용하여 다른 공정으로는 제작이 불가능한 나노 스케일에서 3 차원 자유곡면을 가지는 구조물을 제작할 수 있는 공정개발에 대하여 다양한 연구<sup>1-7</sup>가 진행되고 있다. 최근에는 이러한 기술을 이용하여 오실레이터<sup>3</sup>, 광결정(photonic crystal)<sup>6</sup> 같은 나노 부품제작까지 다양한 응용사례를 만들고 있다.

또한, 마스크 없이 직접적으로 패턴형상을 제작하는 방법으로 나노 임프린팅(nano imprinting)<sup>11</sup>과 자기정렬 고분자를 이용한 소프트 리소그래피(soft lithography)<sup>12</sup> 등의 기술에 대한 연구도 활발

접수일: 2003년 11월 11일; 게재승인일: 2004년 3월 12일  
\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
# 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과  
Email: dyyang@kaist.ac.kr, Tel. (042)869-3214  
\*\* 한국과학기술원 물리학과 대학원  
\*\*\* 한국과학기술원 물리학과

하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 펨토초 레이저에 의한 광경화 현상을 이용하여 마스크 없이 직접적으로 나노 정밀도를 가지는 패턴 및 2 차원 그림을 제작하는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구에서 개발한 장치에서는 CAD 데이터 없이 원하는 그림 또는 패턴에 대한 비트맵 형태의 이미지를 이용하여 직접적으로 복화(replicated figure)를 할 수 있기 때문에 전자빔 리소그래피(electron beam lithography)에 비하여 비교적 저 가격으로 나노 패턴닝이 가능하다.

이러한 나노 복화공정(nano replication printing(nRP))은 펨토초 레이저의 이광자 흡수 경화현상(two-photon absorption polymerization)을 이용한 것으로 최고 120nm 수준까지 정밀도가 보고되고 있다<sup>7</sup>. 이광자 흡수현상은 물질이 두 개의 광자를 동시에 흡수하여 마치 두 개의 광자에 의해 에너지가 두 배인 광자에너지를 동시에 흡수하게 되는 효과를 준다. 따라서 390nm 에 반응하는 광경화 수지의 경우에 780nm 파장을 가지는 펨토초 레이저를 사용하는 경우 한 개의 광 에너지를 받고서는 경화가 발생하지 않고 이광자 발생에 의해서만 경화된다. 따라서 이광자 흡수현상에 의한 초점 크기는 빔의 회절한계와 상관없이 빔의 파장 크기 이하로 만들 수 있다<sup>9</sup>.

본 연구에서는 나노 복화공정의 정밀도를 올리기 위하여 복셀 차감법(contour offset algorithm, COA)을 개발하였다. 기존의 복화공정의 경우 정밀한 형상복화 또는 패턴닝을 위하여 복셀이 형상의 외곽선을 정확하게 묘사하면서 생성되도록 경험적으로 형상을 변경하여 제작하기 때문에 다소 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 복셀 차감법을 적용할 경우에는 미리 예측되는 복셀의 반경만큼을 줄여서 외곽선을 새롭게 정의하여 형상을 제작하기 때문에 상당히 정밀한 형상의 복화가 가능하다.

## 2. 나노 복화공정

나노 복화공정의 장치구성의 기본적인 구성은 마이크로 광조형 장치 (micro stereo-lithography apparatus)와 일부는 유사하다. Fig. 1 에는 본 연구에서 개발한 나노 복화공정 장치의 전체 시스템 구성에 대하여 나타내었는데, 주요 구성부분으로는 펨토초 펄스를 갖는 티타늄-사파이어 레이저

(Ti-Sapphire mode-locked laser)부와 레이저 광의 on/off 를 제어하는 셔터부, 레이저 광의 x, y 축 위치를 제어하는 스캐너부, z 축 방향을 제어하는 z 축 스테이지 그리고 광경화 수지의 경화가 발생하는 나노 패턴닝부, 입력 데이터에 대하여 전체적으로 시스템의 제어를 담당하는 컨트롤부로 이뤄졌다. 사용된 펨토초 레이저는 작동주파수는 80MHz, 펄스 폭은 80fs 이며 파장은 780nm 이다. 그리고 스텝당 0.0003° 분해능(본 연구에서 구성된 시스템의 경우 x, y 축 수평거리로 약 24nm 수준임.)을 가지는 x-y 스캐너(scanner, Galvano mirror)를 사용하였다. z 축의 경우 피에조 파이프로서 100nm 분해능을 가진다. 또한, 셔터와 스캐너 그리고 z 축 스테이지는 자체 개발된 컨트롤 프로그램에 의하여 운용되고 레이저 빔의 거동을 시각적으로

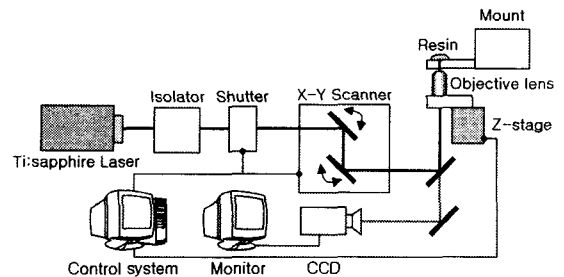


Fig. 1 Schematic diagram of nano replication printing system.

Table 1 Principal specifications of nano replication printing system.

ITEMS	SPEC.	MAKER
fs Laser	780nm, 80MHz, 80fs	Spectra-Physics
Isolator		Electro-Optic Tech.
Galvano mirror	0.0003°	Scanlab
Shutter	~0.1ms	Cambridge Tech.
Z-stage	100nm	PI
X/Y stage	10um	Namil
Objective lens	100X, NA 1.2	China
Working plate	0.1mm (thickness)	Fischer

확인하기 위하여 고 배율 렌즈가 부착된 카메라를 이용하여 모니터링 할 수 있도록 하였다. Table 1 에는 시스템에 사용된 주요부품에 대한 사양을 나타내었다.

나노 복화공정은 이산적으로 단위 복셀을 생성하여 생성된 복셀이 서로 이어져서 2 차원 형상을 제작하는 방법이므로 임의의 비트맵 형태의 그림파일을 나노급 정밀도를 가지는 극미세 형상으로 복제를 하기 위해서 비트맵 형태의 흑백그림 파일을 먼저 0 과 1 로 표현된 아스키 형태(ASCII format)로 변환하게 된다. 이 때 그림이 있는 흑색 부분은 1 이 되고 빈 공간으로 흰색부분은 0 으로 나타내도록 하였다. 0 과 1 로 구성된 복셀 매트릭스에서 0 인 경우에 셔터를 닫아서 레이저 광을 차단하여 복셀이 생성되지 못하도록 하고, 1 일 때는 셔터를 열어서 이광자흡수 현상에 의해 복셀이 생성되도록 하였다. 그리고 복셀 중심의 위치는 1 의 좌표값이 된다.

한편, 실험적으로 복셀간의 간격과 단위 복셀의 크기를 알고 있을 때에는 복셀 매트릭스를 통하여 복화 될 형상의 크기를 예측할 수 있다. 형상이 원하는 크기가 아닐 경우에는 비트맵 그림파일을 그것에 비례적으로 확대, 축소하여 복셀 매트릭스를 재구성하면 원하는 크기의 복화를 얻을

한 개념도를 나타낸 것이다.

따라서, 나노 복화공정을 이용하면 형상에 대한 CAD 파일 없이 비트맵의 형태의 그림 파일만으로 마스크 없이 직접 나노급 형상을 제작할 수 있는 특성이 있다. 그러므로 임의의 주어진 형상 또는 패턴에 대하여 그림파일 형태로 데이터를 만들어서 나노급 정밀도를 가지는 극미세 패턴닝이 가능하다.

### 3. 나노 복화공정 정밀화

#### 3.1 최소 복셀크기 생성에 대한 공정변수

나노 복화공정의 정밀화 방안으로 단위 복셀에 대한 최소 크기를 평가해 보았다. 펄토초 레이저에 의한 단위 복셀 생성에 관한 연구<sup>5</sup>에 의하면 복셀의 크기는 레이저 출력과 조사시간에 의존하게 된다. 펄토초 레이저의 경우에 Fig. 3 에 도시적으로 표현한 것처럼 레이저 광의 강도는 중심에서 가우스 분포를 가지며, 강도(Intensity)가 광자밀도의 제곱에 비례하여 중심부에서는 단위 면적당 빔의 강도가 매우 크게 되어 두 개의 광자가 동시에 발생할 확률이 높게 된다. 따라서, 레이저 광의 강도를 비례함수를 이용하여 표현하면 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

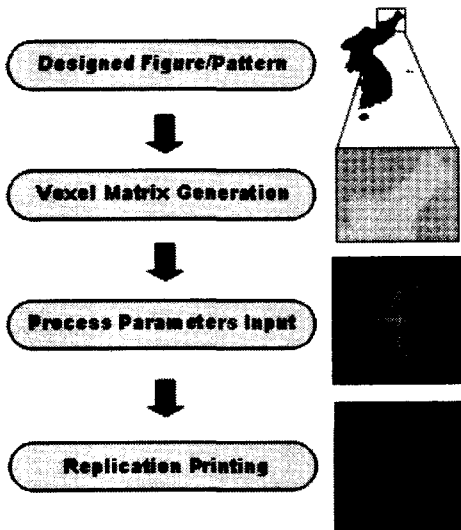


Fig. 2 Flowchart of nano replication printing process

수 있다. Fig. 2 는 나노 복화 공정의 개념을 설명

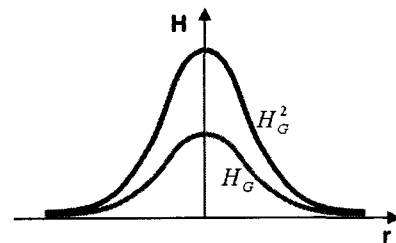


Fig. 3 Total two-photon absorption per transversal plane, that is calculated by integrating the squared intensity over the plane<sup>12</sup>

$$H_G(r) = H(0) \exp(-2r^2 / r_0^2) \quad (1)$$

$$H(0) = \left( \frac{2}{\pi r_0^2} \right) P \quad (2)$$

여기서  $H(0)$ 는 비례상수를 나타낸 것이다. 광경화 수지가 임계에너지를 받아서 경화가 될 조건을 나타내면 식(3)과 같이 표현될 수 있다. 그리고

가우스 광의 기하학적 조건과 식(1), (2)를 식(3)에 대입하여 임계에너지 조건에서 복셀의 직경과 길이에 대한 함수를 식(4), (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$E'_{th}(r, z, t) \leq H^2(0) \exp(-4r^2/r_0^2) \cdot t \quad (3)$$

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

$$l(P, t) = 2z_{r=0} = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \left\{ \left( \frac{4P^2 t}{\pi^2 w_0^4 E'_{th}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서,  $d$ 는 복셀의 직경,  $l$ 은 복셀의 길이를 의미하며,  $P$ 는 레이저 광의 출력,  $t$ 는 조사시간,  $w_0$ 는 레이저 광의 초점부의 반경,  $E'_{th}$ 는 이광자 흡수에 의하여 경화가 되는 임계에너지  $E_{th}$  (threshold energy)에 비례하는 실험값을 의미한다. 따라서, 레이저 광이 작을수록 조사시간이 짧을수록 복셀의 크기가 작아져서 정밀한 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발된 나노 복화공정의 레이저 광 조사시간은 셔터의 특성상 2ms 이 안정된 조건에서 얻을 수 있는 최소의 시간이다. 최소의 조건을 위하여 조사시간을 2ms 으로 두고 복셀의 크기를 예측해 보았다. 이 때, 레이저의 파워는 안정적으로 복셀이 생성되는 파워에 5mW 로 두었다. Fig. 4 에서 생성된 복셀의 SEM 이미지를 나타낸 것인데, 평균적으로 200nm 수준의 직경을 가짐을 알 수 있다.

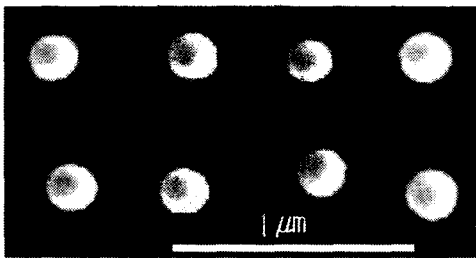


Fig. 4 SEM image of voxels in the condition of exposure time(0.2ms), and laser power(5mW); top view

### 3.2 복셀 차감법

비트맵 그림에서 구한 복셀 매트릭스를 이용하여 복화 형상을 제작할 때, 복셀 매트릭스의 1인 위치에 단위 복셀의 중심이 놓여지게 된다. 따라서, 단위 복셀 크기의 반경만큼 더 과장되게 형상이 제작되게 되어 형상이 다소 복잡한 경우에는 형상의 정밀도가 떨어지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 형상의 외곽선을 따라서 복셀의 반경만큼 차감하는 복셀 차감법(contour offset algorithm, COA)을 제안하였다. Fig. 5 에는 복셀 매트릭스에서 복셀 반경크기에 의한 형상의 문제점을 나타내었다.

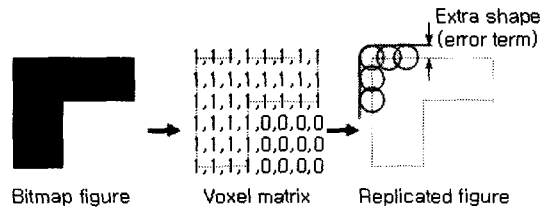


Fig. 5 Replication process and extra shape term.

따라서, 복셀 반경크기에 의하여 발생하는 형상 오차를 제거하기 위하여 Fig. 6 과 같이 복셀 매트릭스에서 외곽선만 추출하여 외곽선 매트릭스를 생성한다. 이것을 상용 CAD 소프트웨어인 I-DEAS 를 이용하여 외곽선을 하나의 섹션(section)으로 정의하도록 한 뒤, 복셀의 반경크기만큼을 축소하여 그림을 다시 구성하도록 하였다. 수정된 그림을 이용하여 복셀 매트릭스를 재 생성한 뒤 공정변수를 입력하고 복화를 하게 된다.

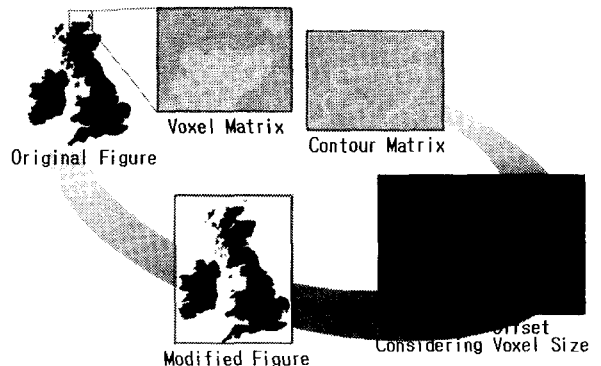


Fig. 6 Schematic diagram of voxel offset algorithm.

#### 4. 나노 정밀도를 가지는 복화제작

본 연구에서 제안한 복셀 차감법의 유용성을 평가하기 위하여 도넛 형태의 그림을 이용하여 알아 보았다. Fig. 7 (a)에 나타난 것처럼 주어진 비트맵 형태의 그림에서 동심원의 반경이 2 대 1 로 주어졌다.

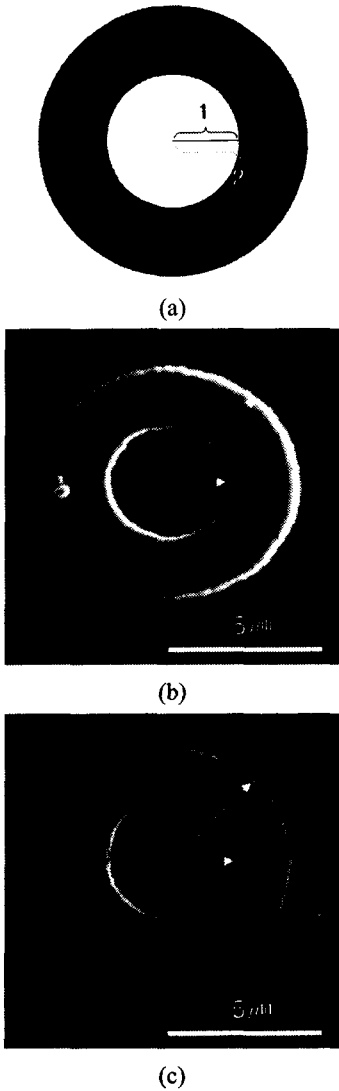


Fig. 7 (a) Bitmap image of doughnut shape, (b) SEM image of replicated doughnut shape without COA, and (c) with COA.

Table 2 Principal parameters of nRP process.

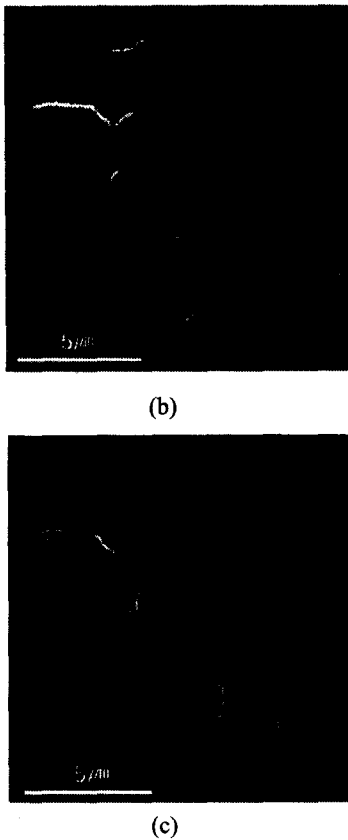
PARAMETERS	VALUES
Distance between voxels	24nm
Laser power	5mW
Exposure time per voxel	2ms

이것을 복셀 차감법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대하여 각각 복화 형상을 제작해 보았다. 공정조건은 Table 2 에 나타내었으며, 복화된 Fig. 7 (b)에서 복셀 차감법을 적용하지 않은 경우 내경과 외경의 길이가 각각 1.87  $\mu\text{m}$ , 3.96  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 길이 비를 구하면 1 대 2.11 정도가 되어서 원래 비율보다 더 증가되었음을 알 수 있다. 이것은 내경과 외경의 외곽선에 복셀의 중심이 위치하여 복셀의 반경만큼 각각 확대 및 축소 되었기 때문에 비율이 달라진 것이다. Fig. 7 (c)에서 복셀 차감법을 적용한 경우 내경, 외경이 각각 1.96  $\mu\text{m}$ , 3.86  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 따라서 길이 비를 구하면 1 대 1.97 으로 나타났다. 원래 주어진 비율보다는 0.03 배 정도 적게 나타났는데 이것은 진동 등의 외부 노이즈에 의한 공정오차로 판단되며 전체적으로 원본 그림과 비율이 거의 유사한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 복셀 차감법이 나노 복화공정의 정밀도 향상에 효과가 있음을 알 수 있었다.

보다 복잡한 형상에 대하여 복셀 차감법을 적용하여 그 유용성을 평가해 보았다.



(a)



(b)

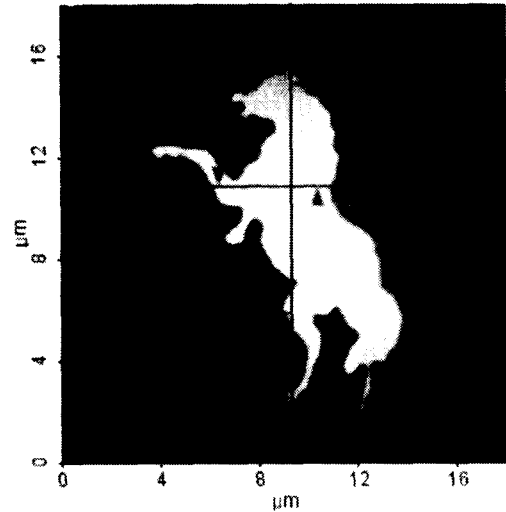
(c)

Fig. 8 (a) Bitmap image of a horse, (b) SEM image of replicated horse figure without COA, and (c) with COA.

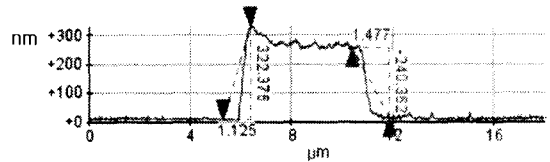
Fig. 8 에서 제작된 형상을 비교해 보면 복잡한 형상에 대해서도 복셀 차감법을 적용한 경우가 형상이 더 정밀하게 복화가 됨을 알 수 있다. 공정 조건으로는 Table 2 과 동일하다.

제작된 형상의 기하학적 정보를 얻기 위해 AFM(PSIA, XE-100)을 통하여 측정된 이미지인 Fig. 9 (a)의 가로선과 세로선에 따른 높이의 분포를 각각 Fig. 9 (b)와 Fig. 9 (c)에 나타내었다. 측정된 형상의 높이는 약 300nm 였으며, 이 높이는 형상제작 시 초점의 높이를 조절 함으로써 형상의 높이를 필요에 따라 높이거나 낮출 수 있다. 거칠기는 전체적으로 고르게 나타났으며 렌즈의 중심축을 기준으로 밖으로 갈수록 높이가 낮아지는 현상이 발생하였는데 이는 레이저의 렌즈에 입사하는 레이저의 양이 감소하여 나타나는 현상으로 입사하

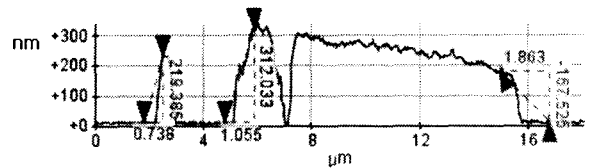
는 빔의 크기를 증가시킴으로써 개선시킬 수 있으리라 판단 된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 (a) AFM image of a horse, (b) profile of the height along the lateral line, and (c) along the longitudinal line

제작된 형상의 기하학적 정보를 얻기 위해 AFM(PSIA, XE-100)을 통하여 측정된 이미지인 Fig. 9 (a)의 가로선과 세로선에 따른 높이의 분포를 각각 Fig. 9 (b)와 Fig. 9 (c)에 나타내었다. 측정된 형상의 높이는 약 300nm 였으며, 이 높이는 형상제작 시 초점의 높이를 조절 함으로써 형상의 높이를 필요에 따라 높이거나 낮출 수 있다. 거칠기는

전체적으로 고르게 나타났으며 렌즈의 중심축을 기준으로 밖으로 갈수록 높이가 낮아지는 현상이 발생하였는데 이는 레이저의 렌즈에 입사하는 레이저의 양이 감소하여 나타나는 현상으로 입사하는 빔의 크기를 증가시킴으로써 개선시킬 수 있리라 판단 된다.

복셀 차감법으로 개선된 정밀도를 바탕으로 하여 제작된 패터닝은 나노 임프린팅 등의 마스터 패턴이 필요한 응용공정에 사용될 수 있으며, 현재 복화공정의 패터닝을 이용한 PDMS(polydimethylsiloxane)몰드제작, 직접적 금속 패터닝 제작 등의 공정에 대한 연구에 적용된 바 있다<sup>13</sup>.

## 5. 결론

본 연구에서 제시한 방법과 예제를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펨토초 레이저를 이용하여 이광자 현상으로 형상을 제작하는 200nm 수준의 나노 복화공정을 개발하였다.
- 2) 복화 공정의 정밀도를 향상시키기 위하여 제시한 복셀 차감법을 적용한 경우 말 형상의 예제를 통하여 확인해 본 결과 효과가 있음을 알 수 있었다.
- 3) 개발된 나노 복화공정의 정밀화를 통하여 확보된 정밀도를 바탕으로 기존의 나노공정과 연계하여 다양한 응용 및 적용사례를 도출할 것으로 판단된다.

## 후기

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

## 참고문헌

1. 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.
2. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," Nature,

Vol.412, No.16, pp.697-698, 2001.

3. Sun, H.B., Takada, K., Kawata, S., "Elastic force analysis of functional polymer submicron oscillators," Appl. Phys. Letters, Vol.79, No.19, 2001.
4. 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.
5. 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.
6. Kaneko, K., Sun, H.B., Duan, X.M., Kawata, S., "Submicron diamond-lattice photonic crystals produced by two-photon laser nanofabrication," Appl. Phys. Letters, Vol.83, No.11, 2003.
7. Sun, S.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," Vol.83, No.5, pp.819-821, 2003.
8. 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," The KSPE Autumn Meeting, pp.424-427, 2003.
9. Yi, S.W., Lee, S.K., Kong, H.J., Park, S.H., Jeong, C.G., Lim, T.W., Yang, D.Y., "Three-dimensional microfabrication with nano resolution using two-photon absorption of femto-second laser," Optical Society of Korea Summer Meeting, pp.64-65, 2003.
10. Yang, D.Y., Sohn, H.K., "Principles of recent rapid prototyping processes," J. of the KSME, Vol.39, No.9, pp.28-31, 2000.
11. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," Nature, Vol.417, No.20, pp.835-837, 2002.
12. Xia, Y., Whitesides, G.M., "Soft lithography," Angew. Chem. Int. Ed., Vol.37, pp.550-575, 1998.
13. Kong, H.J., Yi, S.W., Lee, S.K., Yang, D.Y., Park, S.H., Lim, T.W., "3-dimensional micro-fabrication using two-photon absorption by femtosecond laser," Proc. of SPIE, Vol.5342, pp.137-145, 2004.