

복셀 매트릭스 스캐닝법에 의한 나노 복화(複畵)공정 개발

박상후*, 임태우*, 양동열#, 이신욱**, 공홍진***

Development of a Nano Replication Printing(nRP) Process using a Voxel Matrix Scanning Scheme

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

ABSTRACT

In this study, a new process, named as nano replication printing(nRP) process, is developed for printing any figure in the range of several micrometers by using voxel matrix scanning scheme. In this newly developed process, a femto-second laser is scanned on a photosensitive monomer resin in order to induce polymerization of the liquid resin according to a voxel matrix which is transformed from bitmap format file. After the polymerization, a droplet of ethanol is dropt to remove the unnecessary remaining liquid resin and then the polymerized figures with nano-scaled precision are only remaining on the glass plate. By the nRP process, any figure file of bitmap format could be reproduced as nano-scaled precision replication in the range of several micrometers. Also, nano/micro-scaled patterns for an extremely wide range of applications would become a technologically feasible reality. Some of figures with nano-scaled precision were printed in scaled replication as examples to prove the usefulness of this study.

Key Words : Ultramicro-Stereolithography(극미세 광조형법), Femto-second Laser(펨토초 레이저), Two-photon Polymerization(이광자흡수 경화), Nano Replication Printing Process(nRP, 나노 복화공정)

1. 서론

최근 나노/마이크로 관련 기술을 응용하여 반도체, 정보통신, 바이오산업 등에서 새로운 개념의 제품을 개발하기 위하여 전략적으로 연구하고 있다. 이에 부응하기 위하여 기존의 공정을 대체할 수 있는 신 공정기술의 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 신 공정기술의 개발에서 핵심기반 기술로 저비용, 대량생산을 위한 나노, 마이크로

공정 기술의 중요성이 더욱 대두되고 있다. 또한 나노, 마이크로 관련 기술의 발달로 인하여 기능성 부품이나 제품이 점차 소형화, 집적화 되어 그 활용범위가 점차 확대되고 있는 실정이다.

현재까지 초소형 구조물 제작에 관한 공정기술에 대한 대부분의 연구는 반도체 공정을 기반으로 하는 마이크로머시닝 기술(MEMS)에 중심을 두고 있다. 이러한 기술은 지금까지 초소형 제품의 개발에 상당한 역할을 해 왔으며 자동차 에어

접수일: 2003년 7월 30일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
교신저자, 한국과학기술원 기계공학과
Email: dyyang@kaist.ac.kr, Tel. (042)869-3214
** 한국과학기술원 물리학과 대학원
*** 한국과학기술원 물리학과

백 센서, 유압센서, 디스플레이 산업까지 다양한 적용사례를 만들었다. 그러나 공정의 특성상 완전한 자유표면을 가지는 3 차원 형상이나 세장비 (aspect ratio)가 큰 제품을 저비용으로 제작하기에는 어려움이 있으며, 값비싼 장비의 사용과 클린룸(clean room)과 같은 특별한 환경에서만 제작이 가능하여 여러 가지 문제점을 가지고 있는 실정이다.

최근 몇몇 연구를 통하여 이러한 단점을 극복하기 위하여 시작품 제작 산업에서 널리 활용되고 있는 3 차원 패속조형기술⁽¹⁻²⁾을 응용하여 마이크로 스케일 형상을 제작하는 연구가 진행되었다. Bertsch 등⁽³⁾은 두꺼운 레지스터(resist)에 자외선 (ultraviolet beam)을 투과하여 수 mm 크기의 3 차원 형상을 제작하였다. 그리고 Kim 등⁽⁴⁾은 초고압, 수은 램프를 이용한 광조형 장치를 개발하여 수백 μm 의 형상을 제작하였고, Lee 등⁽⁵⁾은 마이크로 광조형기술로 믹스를 제작하였으나 서브 마이크로 (sub-micron) 크기의 형상을 제작하기 어려운 공정상 한계가 있었다.

최근 바이오 산업, 계측 산업 및 반도체 산업의 발달로 서브 마이크로 크기 이하의 구조물에 대한 요구가 급증하고 있으며 이에 따라 다양한 나노 공정에 대한 연구가 급속하게 진행되고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 이 중에서도 펨토초 레이저를 이용한 이광자 흡수방법(two-photon absorption polymerization)으로 극미세 3 차원 형상을 제작하거나⁽⁹⁻¹³⁾ 레이저로 광경화성 폴리머를 경화시켜서 극미세 패턴을 제작하는 연구⁽¹⁴⁾가 진행되고 있다.

본 연구에서는 펨토초 레이저(femto-second laser)를 이용한 극미세 광조형 시스템⁽¹³⁾으로 비트맵(bitmap) 형태의 그림파일을 나노급 정밀도를 가지는 $\sim 10 \mu\text{m}$ 크기의 그림으로 복제하여 재생산할 수 있는 나노 복화공정(nano replica printing, nRP)을 개발하였다. 그리고 개발된 공정의 정밀도와 신뢰성을 확인하기 위하여 한반도, 눈 결정 등을 제작하여 개발된 시스템의 신뢰성을 평가하였으며 향후 3 차원 형상제작을 위한 기반기술을 확보하였다.

2. 극미세 광조형 장치구성 및 방법

2.1 이광자 흡수 현상에 대한 이론적 연구

이광자 흡수현상은 물질이 두개의 광자를 동시

에 받아들여 광자에너지가 두 배로 큰 에너지로 흡수되는 현상을 말한다. 즉, 이광자에 의하여 파장이 반으로 줄어든 하나의 광자처럼 흡수되는 현상을 말한다. 따라서 390nm 에 반응하는 광경화수지의 경우에는 780nm 파장을 가지는 펨토초 레이저에 의한 이광자 흡수 조건에서만 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 나타낸 것처럼 재료가 단일광자를 흡수하는 방식에서는 빔의 강도(intensity)의 합산은 일정하기 때문에 광학적인 광자 밀도에는 영향을 받지 않게 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 파장크기 이하로 만들 수 있다^(11,13).

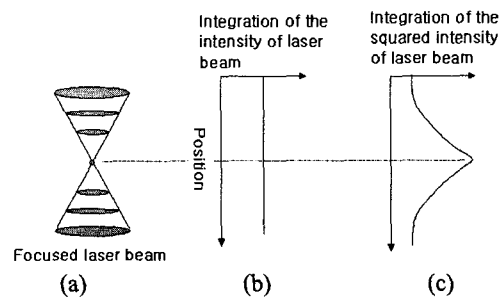


Fig. 1 One-photon absorption and two-photon absorption generated by a focused laser beam. (a) Schematic diagram of a focused laser beam, (b) total one-photon absorption per transversal plane and (c) total two-photon absorption per transversal plane, that is calculated by integrating the squared intensity over the plane⁽¹¹⁾.

광경화 수지가 광자를 흡수하게 되면 라디칼(radical)의 밀도(ρ)가 증대되고 임계값(ρ_{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 식(1)과 같다⁽¹⁰⁾.

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

여기서, $C = \ln[\rho_0 / (\rho_0 - \rho_{th})]$, $n = v t$ 로 레이저 펄스의 횟수, τ_L 은 레이저 펄스의 지속시간, σ_2 는 라디칼 생성을 위한 유효 이광자 영역을 나타낸 것이다. 따라서 식(1)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

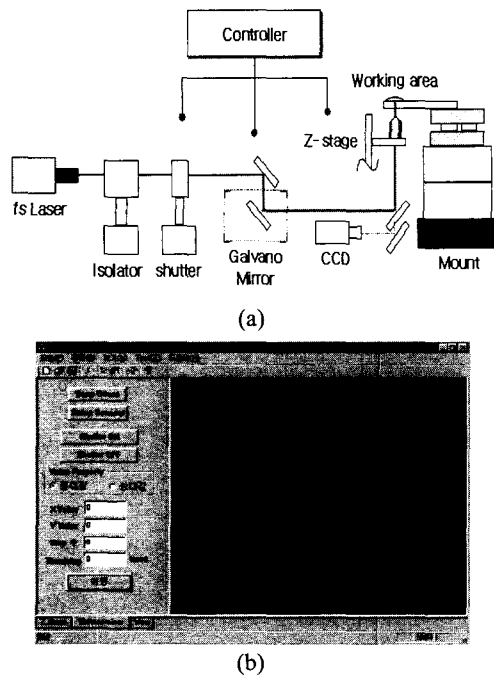


Fig. 2 (a) Schematic diagram of ultra-micro stereolithography system and (b) a photograph of a GUI control system.

극미세 광조형 시스템의 구성은 기본적인 원리와 개념은 일반적인 산업에 많이 사용되는 쾌속 조형기기의 하나인 SLA(stereolithography apparatus)

시스템⁽¹⁾과 거의 유사하다. Fig. 2 에는 본 연구에서 개발한 시스템의 개략적인 구성과 시스템 제어를 위해 구축된 사용자 환경(GUI)의 초기화면을 나타내었다. 스캐너와 z 축 스테이지 그리고 셔터는 입력 데이터와 연계되어 제어되도록 하였다. Table 1 에는 개발된 시스템의 주요 구성요소에 대한 사양을 나타내었다.

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

개략적인 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 사용하였는데 작동주파수는 80MHz, 펄스 폭은 80fs 이며 파장은 780nm 정도로 나타났다. 이러한 레이저 빔의 초점은 입력 데이터에 따라 x, y 축 경로가 스캐너(Galvano mirror)에 의하여 24nm 분해능으로 제어된다. 그리고 형상제작을 위한 광경화 수지는 우레탄계 아크릴레이트(acrylate)계 수지를 사용하였고 레이저가 조사되는 과정을 CCD 카메라에 확대 렌즈를 부착하여 모니터링 할 수 있도록 하였다.

3. 나노 복화공정

3.1 복셀 매트릭스 스캐닝법

본 연구에서 임의의 비트맵 형태의 그림파일을 나노급 정밀도를 가지는 극미세 형상으로 복제를 하기 위해서 복셀 매트릭스 스캐닝법(voxel matrix scanning scheme)을 제안하였다. 나노 복화공정은 이산적으로 단위 복셀을 생성하여 생성된 복셀이 서로 이어져서 2 차원 형상을 제작하는 방법이므로 비트맵 형태의 흑백그림 파일을 먼저 0 과

1로 표현된 아스키 형태(ASCII format)로 변환하게 된다. 이 때 흑색 부분은 1이 되고 흰색부분은 0으로 나타내도록 하였다. 그리고 변환된 아스키 파일은 다시 극미세 광조형 시스템의 공정조건을 고려하여 입력파일로 변환하게 된다.

Fig. 3에는 제안된 방법에 대한 개략적인 프로세스를 나타내었다.

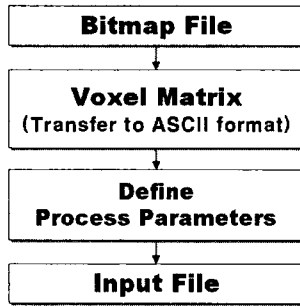


Fig. 3 Schematic diagram of transforming a bitmap file into a voxel matrix format.

그림파일을 복셀 매트릭스 형태로 변환하게 되면 극미세 광조형 시스템에서 x, y 축 스캐너를 이용하여 펄스 레이저를 광경화성 수지에 행 방향으로 스캐닝하여 복셀 매트릭스의 요소(element) 값이 0인 위치에서는 셔터를 닫아서 레이저 빔을 차단하고 1인 경우에는 조사하도록 하여 형상을 제작하게 된다. 따라서, 본 연구에서 제안된 방법에 의하면 형상에 대한 CAD 파일 없이 비트맵의 그림 파일만으로 직접 제작할 수 있는 특성이 있다. 그러므로 임의의 주어진 형상을 개인용 컴퓨터의 보조장치인 스캐너 등을 이용하여 그림파일 형태로 데이터를 얻을 수 있으면 그것을 이용하여 나노급 정밀도를 가지는 극미세 형상으로 복제할 수 있다.

3.2 연속적 복셀 생성에 대한 공정변수

펄스 레이저에 의한 단위 복셀 생성에 관한 기존 연구⁽⁹⁻¹³⁾에 의하면 공정변수로는 크게 레이저의 출력과 조사시간 그리고 시스템의 광학적 특성으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 시스템에서는 레이저 출력 5mW 그리고 조사시간 10ms 조건에서 복셀이 안정적으로 생성됨을 알 수 있었다.

따라서 복화 공정에서는 생성된 단위 복셀이 연속적으로 이어져서 형상을 만들기 때문에 복셀

간의 간격에 따라 제작되는 형상의 정밀도가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 안정된 복셀 생성조건에서 복셀 간의 거리를 변화시키면서 선(line) 형상을 제작하여 복셀 간격에 따른 선의 정밀도를 비교하여 최적의 조건을 알아보았다. Fig. 4에는 SEM 이미지로 각 복셀 간격에 따른 제작된 선 형상을 나타내었다.

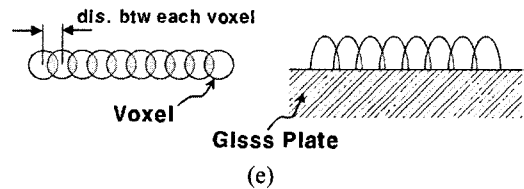
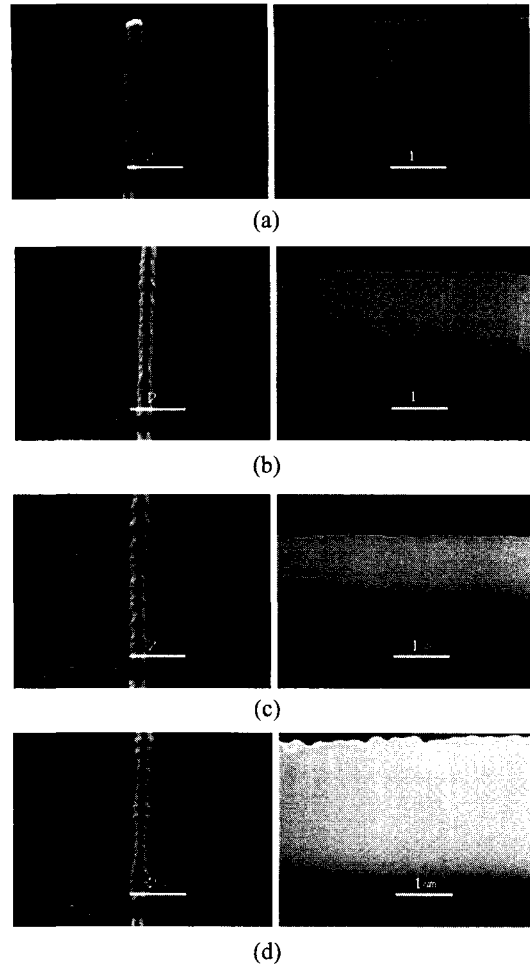


Fig. 4 Comparison of the shapes of line in case of the various distance of each voxel; (a) 24nm, (b) 72nm, (c) 120nm, and (d) 168nm, and (e) the

schematic diagram of a distance of each voxel.
(Left figure : top view, Right figure : side view)

본 연구에서 개발된 극미세 광조형 시스템의 x, y 축 스캐너의 분해능으로 레이저의 1 스텝 이동 거리로 24nm 이다. 따라서, Fig. 4 (a)에서 (d)까지 1 스텝, 3 스텝, 5 스텝, 7 스텝으로 복셀 간격을 넓혀서 선 형상을 제작하였다. 겉보기 거칠기로 보면 5 스텝 이상으로 복셀 간격을 넓히는 경우에 정밀도가 다소 떨어지고, 또한 7 스텝의 경우에 측면에서 보면 제작된 선의 높이가 일정하지 않음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4(e)에서 나타난 바와 같이 복셀의 중심간격이 멀어져서 복셀의 끝단부에서는 상호 중첩이 발생하지 않아서 나타난 현상이다.

제작된 선 형상의 정밀도를 정량적으로 알아보기 위하여 Fig. 5(a)와 같이 제작된 선 형상에서 측정길이 L 값이 4 μm 에서 선의 중심축에서 가장 자리까지의 높이 최고점(h_i^{max})과 최저점(h_i^{min})의 차이의 평균값을 식(2)와 같이 계산하여 비교해 보았다.

$$R_h = \frac{\left(\sum_{i=1}^n h_i^{max} - \sum_{j=1}^n h_j^{min} \right)}{n} \quad (2)$$

식(2)에서 R_h 이 높을수록 복셀로 만들어진 선 형상의 정밀도가 좋지 않다는 것을 의미한다.

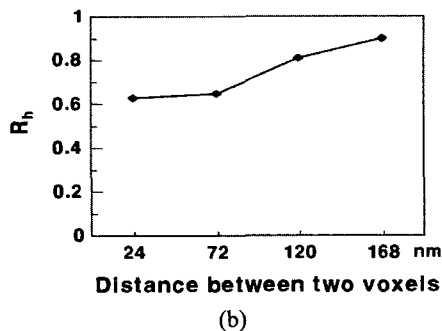
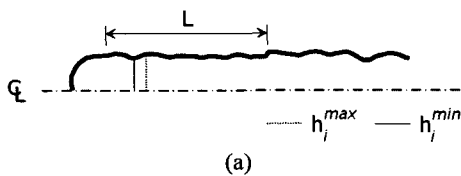


Fig. 5 (a) Experimental approach of the rate of

precision(R_h) of voxel line and (b) its results.

Fig. 5 (b)의 결과에서 복셀 간격을 3 스텝(72nm) 까지 띄울 때까지는 정밀도가 상대적으로 좋음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2 차원 형상을 복제할 때 공정변수로 복셀 간격을 3 스텝으로 하였다.

4. 복화 제작

4.1 극미세 한반도 형상 복화

본 연구에서 개발된 복화 공정을 이용하여 나노급 정밀도를 가지는 극미세 한반도 형상을 제작해 보았다.

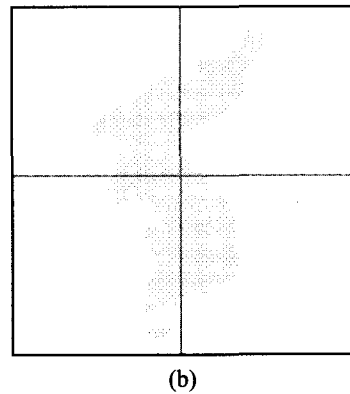
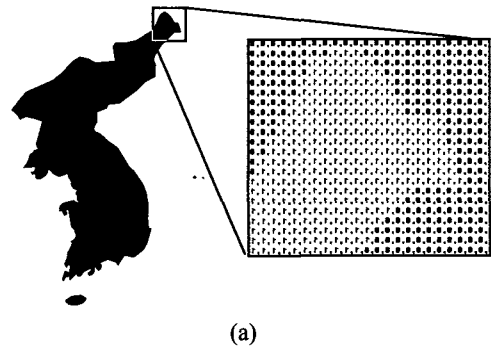


Fig. 6 Schematic process of nRP(nano replica printing); (a) transforming bitmap data to voxel matrix format, and (b) system parameter input mode.

Fig. 3 에 전술한 바와 같이 먼저, Fig. 6 (a)에서 한반도 흑백그림 파일을 이용하여 복셀 매트릭스를 생성하는데, Fig. 6 (a)에서는 변환된 복셀 매트릭스 중에서 한반도의 끝단부 만을 나타내었다.

변환된 복셀 매트릭스를 아스키 형태로 저장한 뒤에 극미세 광조형 시스템의 공정변수를 입력하고 복제될 때의 형상을 Fig. 6 (b)와 같이 미리 컴퓨터 상에서 형상과 전체 크기 등을 확인한 뒤에 문제가 없다고 판단되면 극미세 광조형 시스템의 입력 파일을 만들어서 복화하게 된다. 이때 공정변수로는 복셀 사이의 간격, 레이저의 파워, 조사시간이 있으며, Table 2 에 정리하였다.

Table 2 Principal parameters of nRP process.

PARAMETERS	VALUES
Distance between voxels	120nm
Laser power	5mW
Projecting time per voxel	10ms

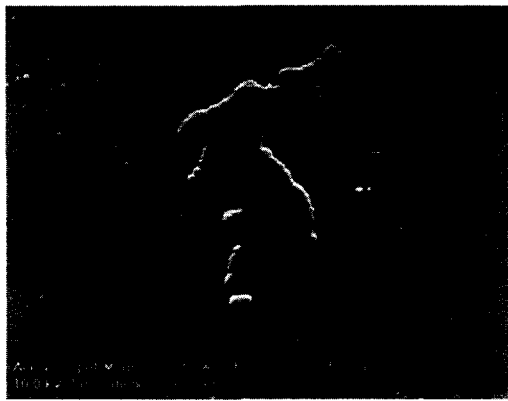


Fig. 7 SEM image of the replication printing of the Korean Peninsula.

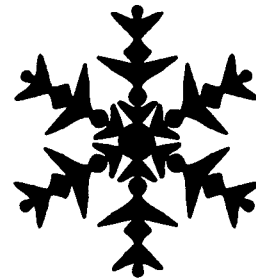
Fig. 7 에는 극미세 형상으로 복화된 한반도 형상을 나타내었다. 한반도의 가로축 크기는 약 9.0 μm 이고, 세로축의 크기는 약 13.6 μm 로 나타났다. 또한, 부분적인 정밀도를 알아보기 위하여 독도의 크기를 계산해 보면 250nm 수준으로 나타났다.

따라서 그림파일에서 복화된 한반도의 부분 정밀도는 나노급 수준으로 판단되며, 향후 극미세 광경화 시스템의 공정변수를 최적화하여 단위 복셀 크기를 줄일 경우 100nm 수준의 정밀도를 가지는 극미세 형상제작이 가능할 것으로 판단된다.

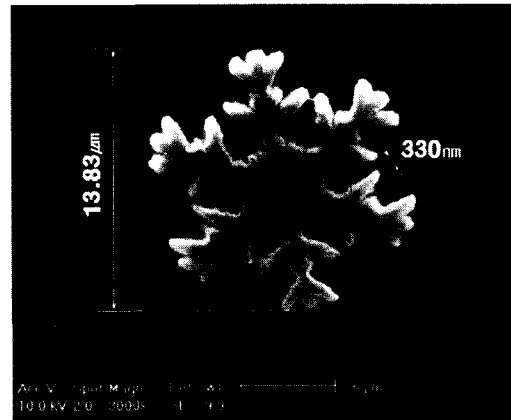
4.2 기타 형상 복화

개발된 복화공정의 신뢰성을 평가하기 위하여

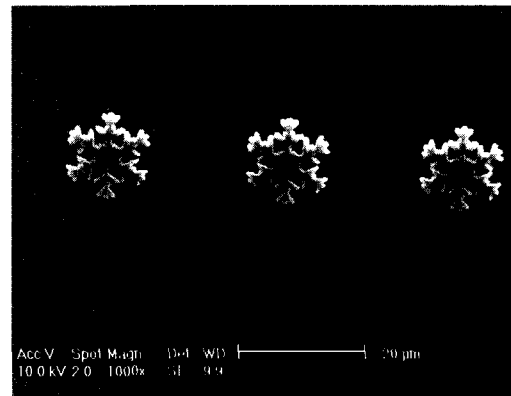
몇 가지 형상에 대하여 추가로 극미세 복화를 제작해 보았다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 (a) Bitmap image of crystalline structure of snow and (b) the SEM image of replication printing and (c) the multi-replication printings.

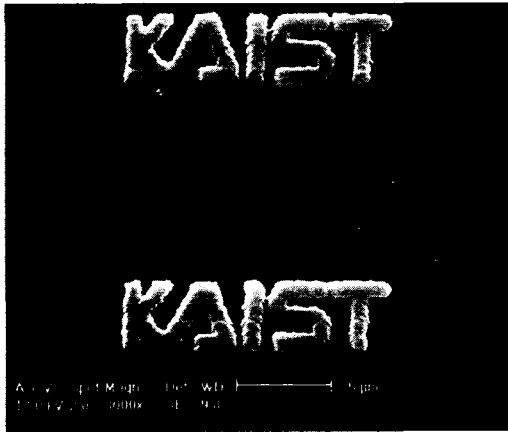
제작공정은 4.1 절과 동일한 절차로 수행하였으며, 공정변수도 Table 2 와 동일한 조건으로 하였다. Fig. 8 에는 눈(snow) 결정 그림을 이용하여 나노 복화

공정으로 제작된 형상을 나타내었다. 부분적인 정밀도는 약 330nm 수준이며, 전체적인 크기는 13.83 μm 로 나타났다. Fig. 8 (c)에서는 눈 결정을 30 μm 간격으로 띄워서 연속적으로 복화한 것을 SEM 이미지로 나타낸 것이다.

Fig. 8 (c)의 연속적으로 복화된 눈 결정 형상으로부터 개발된 나노 복화공정을 이용하여 나노/마이크로 공정에서 많이 사용되는 미세 패턴제작도 가능함을 알 수 있다. 따라서 향후 본 공정을 응용한 다양한 적용사례가 예상된다.

KAIST

(a)



(b)

Fig. 9 (a) Bitmap image of KAIST logo and (b) SEM image of the replication printing.

다른 예제로 Fig. 9 에는 한국과학기술원 로고 (KAIST)를 개발된 나노 복화 공정으로 제작된 것을 나타내었는데, 로고의 크기는 14.4 μm 정도이다. 향후 극미세 광조형 시스템의 공정 최적화와 광학 시스템의 개선 등으로 단위 복셀의 최소화시켜서 보다 높은 정밀도를 가지는 형상제작이 가능한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서 개발된 나노 복화 공정과 몇 가지 예제를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펄스 레이저를 이용하여 이광자 현상으로 형상을 제작하는 극미세 광조형 시스템을 개발하였으며, 현재까지의 결과에서는 선 폭의 경우 180nm 수준으로 나타났다.
- 2) 개발된 나노 복화 공정은 별도의 CAD 데이터 없이 비트맵 형태의 그림 파일이 주어질 때 레이저를 이용하여 직접적으로 극미세 형상으로 복제할 수 있다.
- 3) 나노 복화공정에서 공정변수로 복셀의 간격이 복제된 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 주며, 본 연구에서는 복셀간의 거리가 제작시간을 고려할 때 72nm 수준이 적절함을 알 수 있었다.
- 4) 개발된 나노 복화공정은 연속적인 패턴제작이 가능하므로 향후 나노/마이크로 기술에 적용되는 패턴제작에 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 몇 가지 비트맵 그림 파일들로부터 복셀 메트릭스를 형성하여 나노급 정밀도를 가지는 형상으로 복제해 본 결과 개발된 시스템의 유용성과 향후 개발방향을 확인할 수 있었다.
- 6) 2 차원의 복화공정을 적용하는 방법으로 응용할 경우 3 차원 형상도 제작이 가능하며 향후 지속적인 연구를 통하여 임의의 형상을 가지는 3 차원 나노급 구조물을 제작할 계획이다.

후기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 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/RP 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 micro stereolithography 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. Lee, I.H., Kim, D.S., Cho, D.W., Kwon, T.H., "Development and evaluation of application using micro-stereolithography technology," *KSPE Spring meeting*, pp. 233-236, 2003.
 6. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," *Nature*, Vol.417, No.20, pp.835-837, 2002.
 7. Heyderman, L.J., Schiff, H., David, C., Ketterer, B., Maur, M.A., Gobrecht, J., "Nanofabrication using hot embossing lithography and electroforming," *Microelectronic Eng.*, Vol.57-58, pp.375-380, 2001.
 8. 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 5th Korean MEMS Conf.*, Jeju, pp.404-408, 2003.
 9. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," *Nature*, Vol.412, No.16, pp.697-698, 2001
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Kim, J.M., Shin, B.S., Kim, J.G., Chang, W.S., Yang, S.B., "A study on laser micro-patterning using UV curable polymer," *KSPE Spring meeting*, pp.300-304, 2003.