한국정밀공학회지 제 22 권 제 10 호 (2005 년 10 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 10, October 2005

◆특집◆ 괘속조형공정 및 쾌속생산

나노 스테레오리소그래피 공정을 이용한 3차원 극미세 형상제작

양동열*, 박상후**, 임태우**

Fabrication of Three-dimensional Microstructures using Nano-Stereolithography Process

Dong-Yol Yang*, Sang Hu Park**, Tae Woo Lim**

Key Words : Nano-Stereolithography (나노 입체형상제작공정), Two-photon Polymerization (이광자 흡수 광중합), Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Ceramic Microstructure (세라믹 형상)

1. 서론

최근 몇 년동안 다양한 나노/마이크로 공정기술의 발달로 집적화된 고부가가치 상품개발이 가능하게 되었다. 특히 반도체 식각공정을 이용한 마이크로 공정기술로 에어백 센서, 자이로스코프, micro mirror array (MMA) 등의 다양한 제품이 개발되어 상용화되면서 마이크로 형상제작 분야에 대한 많은 투자와 관심이 집중되었다. 최근에는 다양한 나노 공정기술 (nanotechnology)과 결합하여 그 정밀도가 더욱 향상되어 마이크론 (μm) 이하의 정밀도를 가지는 초정밀 제품 제작에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 나노기술과 연계된 적용분야도 전자/반도체 및 정보통신 분야를 중심에서 바이오/생명공학, 환경, 에너지, 화공분야까지 다양하게 확장되어 발전하고 있으며, 이들 기술은 고집적화, 다기능화, 소형화 등의 특징을 가진다. 따라서 향후 지금까지 시도하지 않은 새로운 형태의 여러기술이 융합된 연구 분야가 도출될 것으로 사료된다.

최근에는 저비용으로 대량생산이 가능한 나노 공정기술 개발에 많은 연구들이 진행되고 있으며 이러한 공정들의 대표적인 사례로는 UV 광을 이용한 나노 임프린트 공정과 polydimethylsiloxane (PDMS) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피 (soft lithography) 공정 등이 있다.[1-3] 정밀한 패터닝 공정에 활용되는 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography) 는 선폭 정밀도가 5 nm 까지 달성되고 있다.[4] 그러나 이러한 방법들은 복잡한 3 차원 형상을 제작하기에는 한계가 있거나 제작비용이 많이 든다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 펨토초 레이저의 이광자 흡수 광중합 (two-photon polymerization; TPP) 현상을 이용하여 100 nm 수준의 정밀도를 가지며 3 차원 형상을 제작할 수 있는 공정에 대한 연구가 최근 몇 년간 진행되고 있다.[5-7] 이광자 흡수 광중합 현상은 고출력 레이저에 의한 비선형 광학현상으로 펨토초 레이저의 높은 첨두출력 부근에서 광자 두 개를 10^{-15} sec 이내에서 동시에 흡수하여 광중합 레진이 중합되는 현상인데 빔의 회절한계 이하의 정밀도로 제작이 가능하여 고정밀도를 요구하는 형상제작 공정에 활

* 한국과학기술원 기계공학과
** 한국과학기술원 대학원 기계공학과
Tel. 042-869-3214, Fax. 042-869-3210
Email dyyang@kaist.ac.kr
생산기술, 쾌속조형, 소성가공, 나노공정개발에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

용이 가능하다. TPP 현상을 이용한 경우 다른 공정으로 제작하기 어려운 3 차원 형상 제작이 가능하며, 마스크 없이 직접적으로 100 nm 수준의 정밀도를 가지는 복잡한 형태의 패턴이 제작 가능하다. 이러한 극미세 3 차원 형상의 예상 응용분야는 3 차원 광결정체 (3D photonic crystal) 제작, 고밀도 정보저장 장치, 나노 반응기등 다양하다. 본 연구에서는 극미세 3 차원 형상 제작이 가능한 다양한 나노 스테레오 리소그래피 (nano-stereolithography; nSL) 공정기술과 응용사례에 대하여 알아보았다.

2. 이광자 광중합 현상

이광자 흡수 현상은 Fig. 1 에 나타낸 것처럼 이광자 흡수 색소 (two-photon photosensitizer)가 동시에 두 개의 광자를 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 된 뒤에 약간의 에너지를 소실한 후 흡수될 때의 파장보다 더 높은 파장을 가진 빛을 방출하고 다시 바닥 상태로 돌아가는 현상을 말한다. 이 때 방출된 단파장의 빛은 광경화 수지속의 광개시제 (photoinitiator)가 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 되고 일반적으로 10^{-6} 초 이내의 짧은 시간에 세가지 형태로 진행하게 된다.[8] 첫째, 들뜬 상태에서 빛을 방출하여 다시 광개시제로 돌아오거나, 둘째로 라디칼로 화학적 분해가 일어난 뒤 바로 광경화수지 내에 존재하는 산소와 같은 라디칼 소광 물질 (radical quenching agent)과 반응하여 단량체와 결합능력을 상실하는 형태로 변환되거나, 셋째로 라디칼을 유지하면서 단량체와 결합하여 사슬성장중합 반응을 통하여 고분자 물질로 변환되는 부분으로 나누어진다.

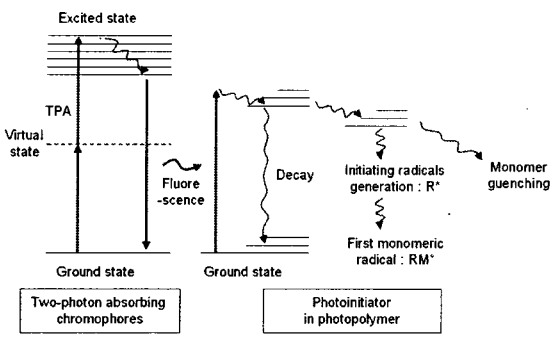

Fig. 1 The transfer process of photon energy in two-photon polymerization

광자 에너지에 의하여 중합반응이 진행되는 과정에서 중요한 역할을 하는 것은 광개시제와 이광자 흡수 색소이다. 광개시제는 중합반응 개시를 위하여 빛에 민감하게 반응하는 케톤계의 저분자 물질이며 식(1)과 같이 이광자 흡수 색소가 발광하는 빛을 받아서 라디칼 (radical)로 변환하게 된다.

$$S \xrightarrow{hv+hv} S^* \cdots \xrightarrow{I} I^* \rightarrow R\cdot \qquad (1)$$

여기서 S 는 이광자 흡수 색소, I 는 광개시제, $R\cdot$ 은 라디칼을 나타낸다. 그리고 *는 각 화합물이 에너지를 받아서 일시적인 들뜬 상태를 의미한다. 생성된 라디칼이 고분자화 되기 위해서는 일정 수준 이상의 충분한 라디칼 밀도를 가져야 하기 때문에 중합반응을 위한 임계 에너지 (threshold energy)가 존재하게 된다. 식(2)는 라디칼이 단량체 (monomer)나 올리고머 (oligomer)와 결합하여 고분자로 진행되는 것을 나타낸 것이다.

$$R\cdot + M \rightarrow RM\cdot \xrightarrow{M} RMM\cdot \rightarrow \cdots \rightarrow RM_n\cdot \qquad (2)$$

여기서 M 은 단량체를 나타낸다. 단량체와 사슬반응으로 결합한 고분자 라디칼은 다른 라디칼과 만나게 되면 식(3)과 같이 중합 반응이 멈추게 된다.

$$RM_n\cdot + RM_m\cdot \rightarrow RM_{n+m}R \qquad (3)$$

이러한 이광자 흡수 현상을 유발하기 위해서는 첨두출력이 MW 급이 되는 펨토초 레이저 (femtosecond laser) 시스템과 빔의 초점크기를 줄이고 위치를 정밀하게 제어하는 광학기술 및 제어기술 그리고 이광자 흡수물질에 대한 고분자 재료개발 기술이 필수적으로 요구된다. 기존의 UV 광을 이용한 단광자 흡수(single-photon absorption)로 형상을 제작하는 마이크로 스테레오리소그래피 공정 (micro-stereolithography)에 비하여 그 정밀도가 100 nm 수준으로 매우 높은 편이다.

3. 나노 스테레오리소그래피 공정개발

3.1 시스템 구성

현재까지 개발된 대부분의 나노 스테레오리소그

래피 공정은 400 nm 대의 자외선 파장에서 반응하는 광중합 수지를 이용하여 극미세 3 차원 형상을 제작할 수 있다. Fig. 2 에는 KAIST 에서 개발한 나노 스테레오리소그래피 공정을 개략적으로 나타낸 것인데, 사용된 레이저는 80 fs 의 펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저이며, 작동주파수는 80 MHz, 파장은 780 nm 이었다. 레이저 빔의 x, y 축 제어는 1.2 nm 분해능을 갖는 갈바노 (Galvano) 스캐너를 이용하였다. z 축 방향에 대한 제어는 피에조 (piezoelectric) 타입의 나노 스테이지를 이용하여 적층 간격을 10 nm 수준으로 조절이 가능하였고, 레이저 빔의 조사시간은 갈바노 셔터를 이용하여 약 1 ms 수준까지 제어가 가능하도록 하였다. 또한 셔터와 스캐너, z 축 스테이지는 자체 개발한 프로그램에 의하여 제어하였다. 그리고 대물렌즈 (NA 1.4, ×100)와 광중합 레진이 올려지는 유리판 사이의 개수구 (numerical aperture; NA)를 높이기 위해 담금 기름(immersion oil)을 사용하였다. 제작되는 과정을 확인하기 위하여 고배율 렌즈가 부착된 CCD 카메라를 이용하여 모니터링 하였다.

3 차원 형상은 2 차원 평면좌표에 따라 복셀을 연속적으로 생성하여 한 층을 제작하고 z 축 방향으로 나노 스테이지를 이용하여 적층 두께만큼 이동한 다음에 다시 다른 층을 제작하여 만들게 된다. 이 때 복셀은 액상의 광경화 수지가 이광자 흡수중합 현상에 의하여 경화가 되는데 개개의 단위 복셀은 3 차원 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 끼치게 된다.

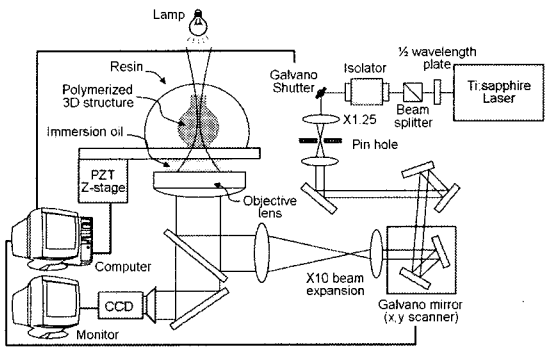

Fig. 2 Schematic diagram of the nano-stereolithography system

3.2 데이터 구성 및 공정변수

나노 스테레오리소그래피 공정은 3 차원 형상을 적층방향의 수직으로 얇게 슬라이싱하여 2 차원 단면 데이터를 만든 다음 레이저의 경로와 조사방법을 선택하여 2 차원 단면을 제작하고 나노 스테이지를 이용하여 연속적으로 높이 방향으로 적층하여 3 차원 형상을 제작하는 방식이다. 따라서 3 차원 형상에서 정확한 단면 데이터를 확보하고 또한 레이저의 경로를 지정하는 방법이 매우 중요하다. 2 차원 단면 데이터와 레이저 빔 경로를 생성하기 위한 위한 프로그램을 자체적으로 각각 개발하여 사용하였다. Fig. 3 에는 나노 스테레오리소그래피 공정의 전체적인 공정 절차를 나타내었다.

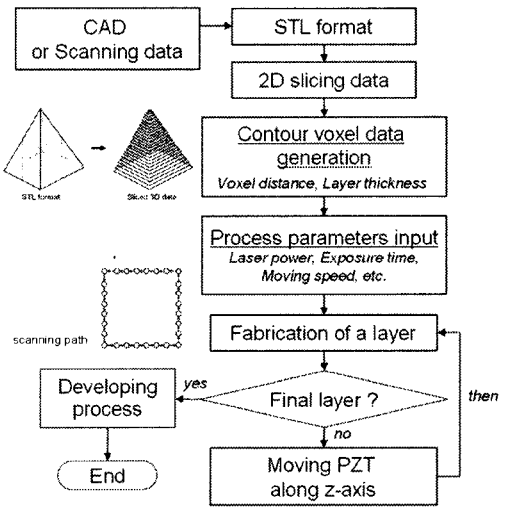

Fig. 3 Schematic diagram of nano-stereolithography process

원하는 형상을 상용 CAD 모델러로 만든 다음, STL 파일로 만들어서 2 차원 단면 데이터 생성을 위한 슬라이싱 작업을 하게 된다. STL 파일은 STereoLithography 파일의 약자로서 1987 년 SLA 광조형 장치를 개발한 미국의 3D System 사에 의해 개발된 파일 포맷으로 3 차원 형상의 외곽을 삼각형 패치와 그 법선 벡터를 이용하여 근사화 시킨 것이며, 현재 대부분의 쾌속조형 (rapid prototyping) 장비의 입력 데이터로 사용되어지고 있다. 슬라이싱 과정은 3 차원 CAD 데이터를 2 차원의 단면 데이터로 변환하여 루프 (loop)를 형성하는 것이다. 변환 과정으로는 슬라이싱 하는 면과 교차하는 삼각형 패치 찾은 다음 교차점을

구한다. 다음으로 구해진 교차점을 이용하여 반시계 방향의 루프를 생성하여 2 차원 단면 데이터를 얻게 된다. 이렇게 만들어진 2 차원 단면들을 이용하여 점 조사방식이 가능하도록 레이저 경로를 생성하여 최종적으로 시스템 제어 프로그램에 입력하게 된다.

나노 스테레오리소그래피 공정에서는 일반적인 쾌속조형 기법에서 사용하는 연속적인 레이저 스캐닝 방식을 사용하지 않고 레이저를 단속적으로 on/off 시켜서 단위 복셀 (voxel; volumetric pixel)을 연속적으로 생성시켜서 형상을 제작하는 방법을 선택하였다. 이것은 연속적으로 레이저를 스캐닝할 때 스캐닝 속도에 따른 레진의 반응과 레이저 빔의 주파수 등의 영향으로 원하는 공정변수로 제어가 어렵기 때문이다. 따라서 이러한 단위복셀 크기에 따라 제작되는 형상의 정밀도가 결정된다. 복셀은 레이저의 조사시간과 출력에 따라 결정된다. 복셀 형상은 이론적으로 식(4)과 식(5)로 표현이 가능하다.[9]

$$d(P_i,t,NA)=\frac{\lambda}{\pi\tan(\sin^{-1}(NA/n))}\left[\ln\left(\frac{4\pi^2P_i^2\cdot t\cdot|\tan(\sin^{-1}(NA/n))|^4}{E_{th}\cdot\lambda^4}\right)\right]^{1/2} \quad (4)$$

$$l(P_i,t,NA)=\frac{2\lambda}{\pi\left[\tan(\sin^{-1}(NA/n))\right]^2}\left[\left(\frac{4\pi^2P_i^2\cdot t\cdot|\tan(\sin^{-1}(NA/n))|^4}{\lambda^4\cdot E_{th}}\right)^{1/2}-1\right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서, d 는 복셀의 직경, l 은 복셀의 길이를 나타내며, λ 는 레이저 빔의 파장, t 는 조사시간을 의미한다. 그리고 NA 는 대물렌즈의 개구수, n 은 오일의 굴절률을 나타낸 것이다. 따라서 레이저의 조사시간과 출력이 클수록 복셀이 크게 만들어져 제작되는 형상의 정밀도가 떨어진다.

또한 복셀의 세장비 (aspect ratio)는 3 차원 형상 제작시 정밀도에 영향을 많이 주며 세장비가 작을수록 정밀한 3 차원 형상제작이 가능하다. 기존연구에서 MPMT (minimum power and minimum time) 방식을 제안하여 세장비를 줄이는 연구가 수행되기도 하였다.[10]

4. 다양한 극미세 형상제작 기술

4.1 이중윤곽선 스캐닝법

3 차원 적층을 위한 2 차원 단면을 제작할 때 제작시간을 단축하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 레이저의 스캐닝 방식을 외곽선을 따라 생성하는 벡터 스캐닝 (vector scanning) 방식을 이용하였다. 이러한 경우에 윤곽선의 선 폭이 레이저의 출력과 조사시간에 따라 약 150 ~ 250 nm 수준으로 나타나기 때문에 형상제작 이후에 에탄올로 고화되지 않은 단량체를 제거할 때 에탄올의 유동에 의하여 제작된 형상이 변형될 수 있다.

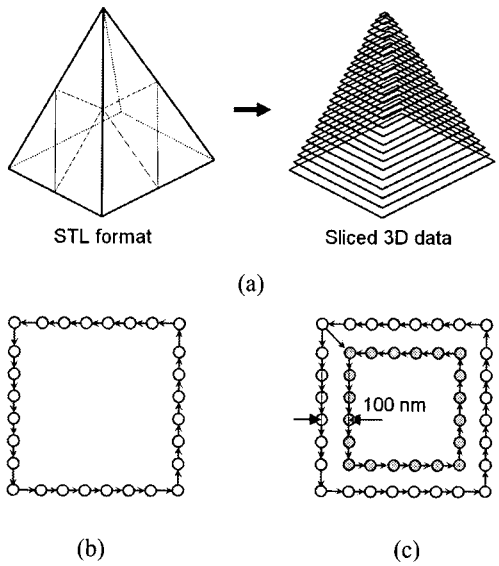

Fig. 4 (a) Sliced 3D data obtained from STL formatted 3D data and comparison of (b) single contour scanning method with (c) double contour scanning method

따라서 이러한 문제를 방지하기 위하여 이중 윤곽선 스캐닝 방법 (double contour scanning method)을 적용하여 강성을 보강하도록 하였다. Figure 5(c)와 같이 3 차원 CAD 형상에서 구한 단면 데이터의 윤곽선에서 법선벡터 (normal vector) 방향으로 100 nm 만큼을 옵셋 (offset)시켜서 윤곽선의 내부에 다시 스캐닝 경로 (loop)를 생성하도록 하였다. 그러므로 제작되는 형상의 윤곽선 두께는 250 ~ 350 nm 로 되어 단일 윤곽선 스캐닝 방법에 비하여 강성이 향상된다. 이중 윤곽선 스캐닝법에 의한 강성증대 효과를 검토하기 위하여 마이크로 포도주잔을 제작하였다. 동일 형상을 단일 윤곽선 스캐닝 방법과 이중 윤곽선 스캐닝 방법을 각각 이용하여 제작한 뒤 제작된 형상의 강성을 비교해 보았다. Fig. 5 에는 레이저 출력 120 mW, 조사시간 2 ms 으로 제작된 폭 8.3 ㎛, 높이 9.8 ㎛의 마이크

로 포도주 잔의 형상을 나타내었는데 단일 윤곽선 스캐닝 방법에 의하여 제작된 것은 강성이 취약하여 에탄올로 고화되지 않은 단량체를 제거하는 현상단계에서 변형이 발생되었음을 보여준다. 그러나 이중 윤곽선 스캐닝에 의하여 제작된 형상은 어떠한 가시적인 변화없이 입력된 설계 형상과 일치함을 확인할 수 있었다.[11, 12]

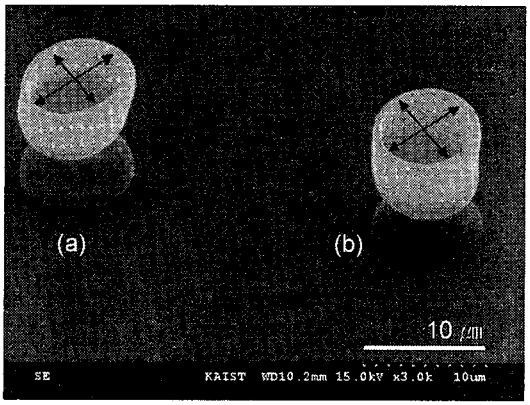

Fig. 5 SEM image of microcup fabricated by (a) single contour scanning method and (b) double contour scanning method [11]

4.2 극미세 형상제작 효율향상에 관한 연구

2 차원 단면을 연속적으로 적층을 하여 3 차원 형상을 구현하는 경우 적층두께가 클수록 제작되는 형상의 정밀도가 떨어지거나 형상제작 자체가 불가능하다. 또한 제작되는 적층두께가 너무 작은 경우 데이터의 수가 너무 많아져서 제작하는 시간이 많이 걸리게 된다.

나노 스테레오리소그래피 공정에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 영역분할 단면법 (subregional slicing method; SSM)를 제안하였다.[13] SSM 은 제작하는 형상의 곡면 기울기를 계산하여 임계 적층두께를 계산하여 임계 적층두께에 따른 영역을 분할하게 된다. 각 분할된 영역에서 적합한 적층두께를 선정하여 슬라이싱한 다음 형상을 제작할 경우 제작 효율을 올릴 수 있다. Figs. 6(a) ~ 6(d)에는 영역분할단면법과 균일 단면법으로 각각 제작하는 사례에 대하여 나타내었다. Fig. 6(d)에 나타낸 제작결과에서 영역분할단면법으로 제작한 경우 유사한 제작시간

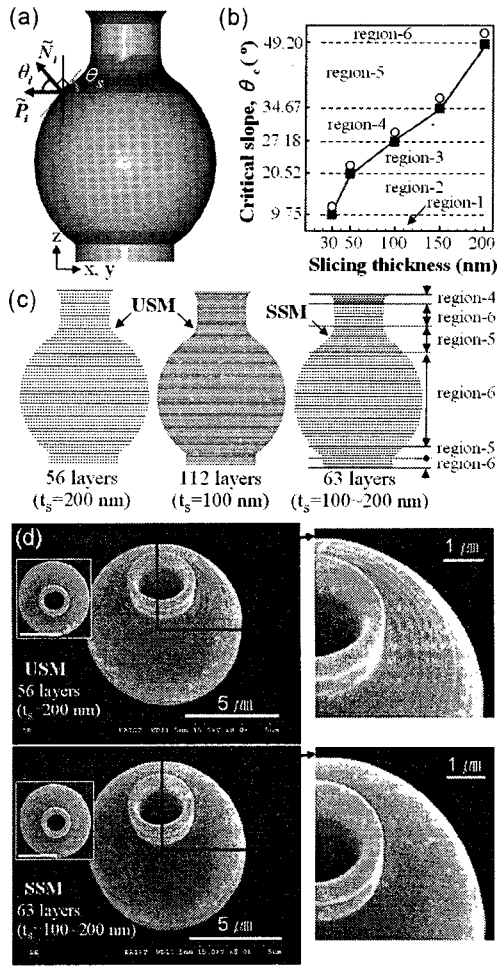

Fig. 6 (a) Designed CAD data and definitions of the normal vector ($\tilde{N}_i$), plane component of the normal vector ($\tilde{P}_i$), and the angle of the slope (θ_s). (b) Variation of the critical slope (θ_c) obtained under the laser power of 60 mW and exposure time of 1 ms (■), and under the laser power of 40 mW and exposure time of 1 ms (○) according to the slicing thickness. (c) Three types of sliced data: 56 layers of uniform thickness 200 nm sliced using the uniform slicing method (USM), 112 layers of uniform thickness 100 nm sliced using the USM; and 63 layers sliced using the subregional slicing method (SSM). (d) SEM images of micro-jars fabricated using the USM with 56 layers, and the SSM with 63 layers (inset images: top-view of

each micro-jar, scale bar is 5 μm) [13]

이 걸리는 균일단면법의 경우와 비교하여 형상표면이 매우 우수하게 제작됨을 알 수 있다. 따라서 영역분할단면법을 이용한 경우 마이크로 렌즈 등의 표면조도가 중요한 디바이스 제작시 짧은 제작시간에 효과적으로 제작할 수 있음을 보였다.

제작효율을 향상시키는 다른 방법으로 마이크로 렌즈배열 (micro-lens array)을 이용하여 동시에 3 차원 형상을 제작하는 방법에 대하여 연구가 진행되었다. Fig. 7(a)에는 마이크로 렌즈배열을 장착한 시스템의 개념도를 나타내었다. 이러한 경우 단일형상을 제작할 때와 달리 조사하는 레이저의 빔 출력을 상당히 높게 하여야 한다.[14]

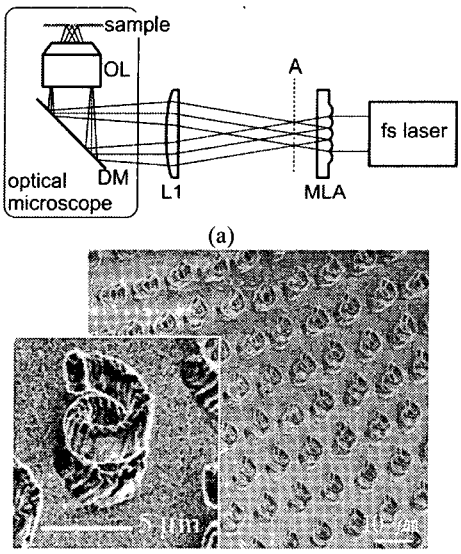

Fig. 7 (a) Basic scheme of optical setup for multi-spot parallel processing; MLA (microlens array), L1 : lens, DM (dichroic mirror), OL (objective lens), A is the plane where multiple focuses are generated. (b) SEM image of the example of 3D fabrication, where the self-standing microspring array was fabricated. The inset give a better view of the individual structures [14]

제작된 형상결과에서 나노 스테레오리소그래피 공정을 이용하여 3 차원 형상을 동시에 제작이 가능함을 보였다. 하지만 빔 분포의 불균일 등으로 제작되는 형상의 정밀도가 문제가 되는 부분이 있기 때문 정밀도 향상을 위한 방안이 필요하다.

4.3 고강성 레진을 이용한 저수축 형상제작

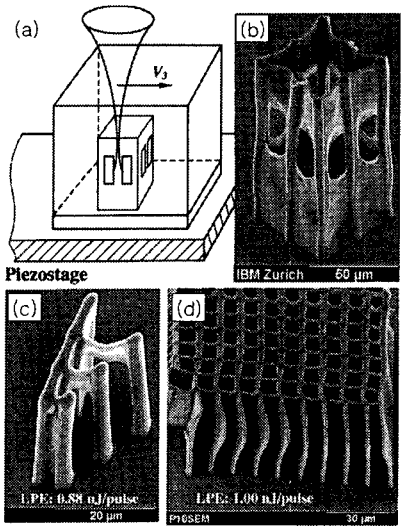

Fig. 8 (a) A 132 x 50 x 50 μm cage structure consisting of high aspect ratio pillars and planes. (b) SEM image of the fabricated cage. (c) Suspended photoplastic bridges of various lengths from 5 μm to 15 μm, and (d) an attempt to realize an SU-8 photonic crystal structure with a periodicity of ~10 μm. [15]

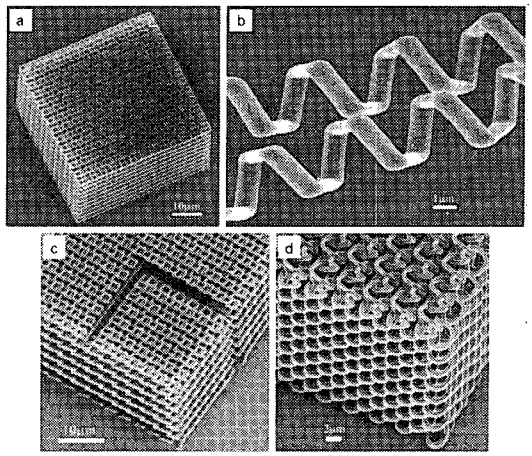

Fig. 9 (a), (c), (d) SEM images of shrinkage-free photonic crystals fabricated using SU-8, and (b) the unit shape of photonic crystals [16]

나노 스테레오리소그래피 공정으로 제작되는 형상은 제작되는 선폭이 100 ~200 nm 수준이다. 따라서 에탄올을 이용한 현상공정에서 표면장력에 의하여 제작된 패턴이 서로 붙어서 형상의 정밀도에 많은 영향을 준다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 MEMS 공정에서 많이 사용하는 SU-8 레진에 이광자 흡수 색소를 첨가하여 고강성 레진을 개발하였다. SU-8 의 광중합과정은 이광자 흡수에 의한 가교공정 (two-photon induced cross-linking) 이기 때문에 단순히 폴리머로 전환되는 기존의 연구와 달리 강성이 매우 높다.[15, 16]

SU-8 레진을 이용한 제작공정은 먼저 SU-8 을 일정 두께로 스핀코팅법을 이용하여 도포한 다음 상온에서 하루정도 두어서 경화를 시키거나 90°C 의 온도 분위기에서 15 min 에서 10 h 정도 두어서 전 열처리 (pre-baking)를 시켜 필름 형태로 만든 다음 이광자 광중합법으로 형상을 제작하게 된다. 형상제작이 완료되면 현상공정을 이용하여 현상하고 다시 95°C 분위기에서 15 min 정도 후 열처리 (post-baking)를 실시한다. 현상액으로는 propylene glycol methyl ether acetone (PGMEA) 과 isopropanol (IPA)를 사용한다. Fig. 8 과 Fig. 9 에는 SU-8 으로 제작된 고세장비의 형상과 3 차원 광결정체를 나타내었다.

5. 극미세 3 차원 형상의 응용사례

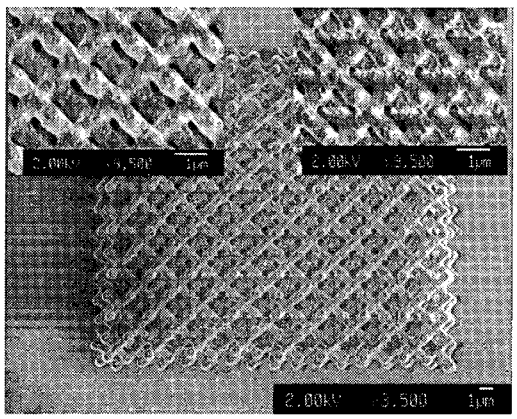

Fig. 10 SEM image of micro-sized 3D diamond photonic crystals structure of inorganic nanoparticles-polymer composite materials produced by two-photon polymerization [17]

극미세 3 차원 형상을 이용하여 새로운 개념의 나노, 마이크로 디바이스 등을 개발하는 연구에 대하여 바이오, 전자, 광학 등 여러분야에서 많은 시도가 진행되고 있다. 그 중에서 3 차원 광결정체는 향후 광반도체, 광컴퓨터 등을 제작할 수 있는 기반 부품이기 때문에 현재 제작공정 및 특성에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근까지 나노 스테레오리소그래피 공정을 이용한 3 차원 광결정체에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그 중에서도 굴절률을 높여서 광 대역폭 (photonic band gap)을 넓히는 응용사례가 발표되었다. Fig. 10 에는 제작된 3 차원 광결정체 형상을 나타낸 것인데 이러한 공정기술을 이용할 경우 전도성을 가지는 3 차원 형상 제작이 가능하기 때문에 새로운 영역의 연구가 창출될 것으로 사료된다.[17]

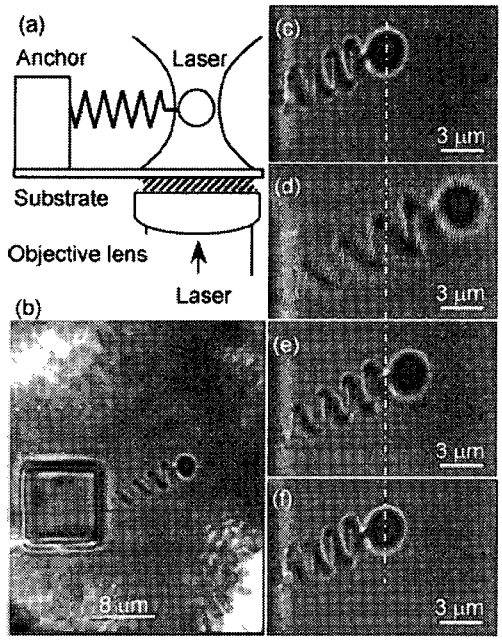

Fig. 11 A functional micro-oscillator system. (a) A designed scheme for mechanically activating the oscillator using a laser trapping force. (b) A photography of a fabricated micro-oscillator, where the ended bead was being trapped by a laser. The micro-spring is (c) in its natural state, (d) pulled by a length, (e) released, and (f) recovered to its original state after 20 s [18]

극미세 기계 부품제작을 위한 연구가 시도되었다. 마이크로 진동자를 제작하여 나노, 마이크로 크기에서 움직임 현상을 알아봄으로써 향후 새로운 나노 디바이스 설계에 활용할 수 있다. 나노 스테레오리소그래피를 이용하여 스프링 형태를 가지는 진동자를 제작한 뒤 레이저를 이용하여 광자 압력 (radiation pressure)으로 작동시켰다.[18] 이러한 연구에서 수 마이크로 크기에서는 질량에 의한 관성력이 거의 영향이 없음을 보였다. Fig. 11 에는 제작된 마이크로 진동자와 실험결과를 나타낸 것이다.

6. 결 론

나노 스테레오리소그래피 공정기술은 차세대 3 차원 형상을 가진 극미세 디바이스 등의 개발에 활용되는 중요한 기술로 평가되고 있다. 현재 정밀도가 sub-100 nm 급까지 제작이 가능하며, 새로운 응용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 응용사례로는 3 차원 광결정체 개발에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있으며, 다른 학문분야로 점차 확대 적용되고 있다. 특히, sub-micron 의 영역에서 3 차원 구조물 제작이 가능하므로 바이오 및 생명공학 기술과 연계하여 세포배양을 위한 구조물 제작 등에 활용될 수 있다.

현재까지 나노 스테레오리소그래피 공정의 효율 향상을 위하여 이중 윤곽선 스캐닝법, 영역분할 단면법, 마이크로 렌즈 배열을 이용한 3 차원 형상 동시제작, 라디칼 퀜처 (radical quencher)를 이용한 sub-50 nm 정밀화 방안 등의 다양한 기술들이 개발되었으며 앞으로도 새로운 응용을 위하여 세라믹, 나노분말 등을 포함한 다양한 재료를 이용한 연구와 관련된 공정기술이 개발될 전망이다.

참고문헌

1. Kumar, A., Whitesides, G.M., "Features of gold having micrometer to centimeter dimensions can be formed through a combination of stamping with an elastomeric stamp and an alkanethiol "ink" followed by chemical etching," Appl. Phys. Lett., Vol. 63, pp. 2002-2004, 1993.
2. Zhao, X.-M., Xia, Y., Whitesides, G.M., "Fabrication of three-dimensional micro-structures: Microtransfer molding," Adv. Mater., Vol. 8, pp. 837-840, 1996.
3. Kim, E., Xia, Y., Whitesides, G.M., "Polymer microstructures formed by moulding in capillaries," Nature, Vol. 376, pp. 581-584, 1995.
4. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanstructures in silicon," Nature, Vol. 417, No. 20, pp. 835-837, 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. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," Nature, Vol.412, No.16, pp.697-698, 2001.
7. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong, H.J., "Direct Fabrication of Micro-Patterns and Three-dimensional Structures using Nano Replication Printing (nRP) Process," Sensors and Materials, Vol.17, No.2, pp.65-75, 2005.
8. Fouassier, J.P., Rabek, J.F., Radiation curing in polymer science and technology –volume III, Polymerization Mechnisms, Elsvier, London, 1993.
9. Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., "Contour Offset Algorithm (COA) for Precise Patterning in Two-photon Polymerization," Microelectronic Engineering, Vol.77(3-4), pp.382-388, 2005.
10. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., " A Scheme to Control Laser Power and Exposure Time for Fabricating Precise 3-Dimensional Microstructures using Two-photon Polymerization," J. Korean Chemical Society, Vol. 49, No. 3, pp. 292-299, 2005.
11. Park, S.H., Lim, T.W., Lee, S.H., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., "Fabrication of Microstructure using Double Contour Scanning (DCS) Method by Two-photon Polymerization," Polymer(Korea), Vol. 29, No. 2, pp. 146-150, 2005.
12. Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong, H.J., Lee, K.S., "Double contour scanning method for enhancing the physical strength of 3D microstructures fabricated using two-photon photopolymerization," Microelectronic Eng., submitted, 2005.

13. Park, S.H., Lee, S.H., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., "Subregional slicing method to increase 3D nanofabrication efficiency in two-photon polymerization," Appl. Phys. Lett., accepted, 2005.
14. Kato, J., Takeyasu, N., Adachi, Y., Sun, H.B., Kawata, S., "Multiple-spot parallel processing for laser micronanofabrication," Appl. Phys. Lett., Vol. 86, pp. 044102(1)-044102(3), 2005.
15. Teh, W.H., Smith, C.G., Guntherodt, H.J., "SU-8 for real three-dimensional subdiffraction-limit two-photon microfabrication," Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 20, pp. 4095-4097, 2004.
16. Seet, K.K., Mizeikis, V., Matsuo, S., Juodkazis, S., Misawa, H., "Three-dimensional spiral architecture photonic crystals obtained by direct laser writing," Adv. Mater., Vol. 17, No. 5, pp. 541-545, 2005.
17. Duan, X.M., Sun, H.B., Kaneko, K., Kawata, S., "Two-photon polymerization of metal ions doped acrylate monomers and oligomers for three-dimensional structure fabrication," Thin Solid Film, Vol. 453-454, pp. 518-521, 2004.
18. Sun, H.B., Takada, K., Kawata, S., "Elastic force analysis of functional polymer submicron oscillators," Appl. Phys. Lett., Vol. 79, No. 19, pp. 3173-3175, 2001.