

극미세 3차원 형상의 정밀제작을 위한 이광자 흡수 광중합 공정의 레이저 출력-조사시간 제어방법

박상후 · 임태우 · 양동열* · 공홍진[†] · 이광섭[‡]

한국과학기술원 기계공학과

[†]한국과학기술원 물리학과

[‡]한남대학교 고분자공학과

(2005. 3. 29 접수)

A Scheme to Control Laser Power and Exposure Time for Fabricating Precise 3-Dimensional Microstructures Using Two-photon Polymerization

Sang Hu Park, Tae Woo Lim, Dong-Yol Yang*, Hong Jin Kong[†], and Kwang-Sup Lee[‡]

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

[†]*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea*

[‡]*Department of Polymer Science and Engineering, Hanyang University, Daejeon 306-791, Korea*

(Received March 29, 2005)

요 약. 본 연구는 나노 스테레오리소그래피(nano-stereolithography) 공정에서 정밀한 3차원 형상을 제작하기 위한 레이저 출력-조사시간 제어방법에 관한 것이다. 이를 위하여 펄스 레이저에 의한 이광자 흡수 광중합(two-photon polymerization)을 이용하여 마이크로 3차원 형상을 제작하는 방법을 제시하였으며, 이광자 흡수현상을 이용할 경우 레이저의 빔 파장 이하의 정밀도를 얻을 수 있기 때문에 나노 수준의 정밀도를 가지는 형상을 제작할 수 있었다. 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정은 3차원 형상데이터에서 2차원 단면 데이터를 추출한 뒤 2차원 단면을 제작하고 높이방향으로 적층하여 임의의 3차원 형상을 제작하게 된다. 따라서 2차원 단면을 제작하는 단위 복셀의 세장비가 3차원 형상제작의 중요한 공정변수가 되므로 본 연구에서는 최소출력 및 최소 조사시간법(minimum power & minimum exposure time: MPMT)을 제안하여 낮은 세장비를 가진 복셀을 제작하도록 시도하였다

주제어: 이광자 광중합, 복셀, 나노 스테레오리소그래피, 3차원 극미세 형상 제작

ABSTRACT. A scheme to control the laser power and the exposure time was studied to fabricate precise microstructures using the nano-stereolithography (nSL) process. Some recent works have shown that a three-dimensional (3D) microstructure can be fabricated by the photopolymerization process which is induced by two-photon absorption (TPA) with a femtosecond-pulse laser. TPA provides the ability to confine photochemical and physical reactions within the order of laser wavelength, so near-diffraction limit features can be produced. In the nSL process, voxels are continuously generated to form a layer and then another layer is stacked in the normal direction of a plane to construct a 3D structure. Thus, fabrication of a voxel with low aspect ratio and small diameter is one of the most important parameters for fabricating precise 3D microstructures. In this work, the mechanism of a voxel formation is studied and the scheme of minimum power & minimum exposure time (MPMT) is proposed to minimizing the aspect ratio of a voxel.

Keywords: Two-Photon Polymerization, Voxel, Nano-Stereolithography, 3-D Microstructures

서 론

반도체 식각공정을 이용한 마이크로 공정기술로 에어백 센서, 자이로스코프, micro mirror array(MMA) 등의 다양한 고 부가가치의 제품이 개발되어 상용화되면서 마이크로 형상제작 분야에 대한 많은 투자와 관심이 집중되었다. 최근에는 다양한 나노 공정기술과 결합하여 그 정밀도가 더욱 향상되어 마이크로(μm) 이하의 정밀도를 가지는 초정밀 제품 제작에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 또한 나노기술과 연계된 적용분야도 전자/반도체 및 정보통신 분야를 중심으로 바이오/생명공학, 환경, 에너지, 화공분야까지 다양하게 확장되어 발전하고 있으며, 이들 기술은 고집적화, 다기능화, 소형화 등의 특징을 가진다. 따라서 향후 지금까지 시도하지 않은 새로운 형태의 융합된 연구 분야가 도출될 것으로 사료된다.

최근에는 저비용으로 대량생산이 가능한 나노 공정 기술 개발에 많은 연구들이 진행되고 있으며 이러한 공정들의 대표적인 사례로는 UV광을 이용한 나노 임프린트 공정과 polydimethylsiloxane(PDMS) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피(soft lithography) 공정 등이 있다.²⁻⁶ 정밀한 패터닝 공정에 활용되는 전자빔 리소그래피(electron beam lithography)는 선풍 정밀도가 5 nm까지 달성되고 있다.⁹ 그러나 이러한 방법들은 복잡한 3차원 형상을 제작하기에는 한계가 있거나 제작 비용이 많이 든다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 펄스 레이저의 이광자 흡수 광중합(two-photon polymerization; TPP) 현상을 이용하여 100 nm 수준의 정밀도를 가지며 3차원 형상을 제작할 수 있는 공정에 대한 연구가 최근 몇 년간 진행되고 있다. 이광자 흡수 광중합 현상은 고출력 레이저에 의한 비선형 광학현상으로 펄스 레이저의 높은 첨두출력 부근에서 광자 두 개를 10^{-15} sec 이내에서 동시에 흡수하여 광중합 레진에 중합되는 현상인데 빔의 회절한계 이하의 정밀도로 제작이 가능하여 고정밀도를 요구하는 형상제작 공정에 활용이 가능하다. TPP현상을 이용한 경우 다른 공정으로 제작하기 어려운 3차원 형상 제작이 가능하며,^{10,11} 마스크 없이 직접적으로 100 nm 수준의 정밀도를 가지는 복잡한 형태의 패턴이 제작 가능하다.^{16,17} 이러한 극미세 3차원 형상의 예상 응용 분야는 3차원 광결정체(3D photonic crystal) 제작, 고밀도 정보저장 장치, 나노 반응기 등 다양할 수 있다.^{22,24}

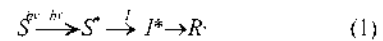
따라서 본 연구에서는 펄스 레이저를 이용한 TPP 현상으로 3차원 형상을 제작하기 위한 나노 스테레오 리소그래피(nano-stereolithography; nSL)를 시도할 때 형상 정밀도 향상을 위하여 레이저의 출력 및 조사시간을 제어하는 방법을 제안하였다.

이론적 배경

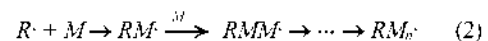
이광자 흡수 광중합 현상

이광자 흡수 현상은 이광자 흡수 색소가 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 광개시제(photoinitiator)가 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 되고 일반적으로 10^{-6} 초 이내의 짧은 시간에 세가지 형태로 진행된다.²¹ 첫째로 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.

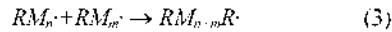
빛 에너지에 의하여 중합반응이 진행되는 과정에서 중요한 역할을 하는 것은 광개시제와 이광자 흡수 색소이다. 광개시제는 중합반응 개시를 위하여 빛에 민감하게 반응하는 케톤계의 저분자 물질이며 식 (1)과 같이 이광자 흡수 색소가 방출하는 빛을 받아서 라디칼로 변환하게 된다.



여기서 S 는 이광자 흡수 색소, I 는 광개시제, R 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 단량체나 올리고머(oligomer)와 결합하여 고분자로 진행되는 것을 나타낸 것이다.



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



광중합에 의해 얻어지는 복셀의 세장비(aspect ratio)에 대한 이론적 접근

이광자 중합을 통한 나노 스테레오리소그래피 공정에서 정밀한 3차원 형상을 제작하기 위해서는 2차원 단면의 정밀도 향상이 중요하며, z축 방향으로 적층시 발생하는 문제점을 최소화하기 위하여 복셀(voxel)의 낮은 세장비가 중요하다. 복셀의 세장비가 큰 경우에는 적층되는 형상이 높이방향으로 길게 생성되어 정밀한 형상제작이 어렵다.

복셀의 세장비에 대한 거동을 이해하기 위하여 공정변수에 대하여 다음과 같은 이론적 연구를 수행하였다. 우선 레이저 빔의 초점부의 빔 세기 분포(intensity profile)를 가우시안 빔(Gaussian beam)으로 가정하여 나타내면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$I(r_0, 0) = \frac{2P_t}{\pi\omega_0^2} \exp(-2r_0^2/\omega_0^2) \quad (4)$$

여기서 ω_0 는 초점부 빔 반경 크기, r_0 는 빔 초점부에서 반경방향의 좌표값, P_t 는 초점부의 빔 출력을 나타낸다. 빔 초점부 형상을 쌍곡선(hyperbola) 형태로 가정하면 빔 진행방향(z축)에 대한 초점부 반경의 변화, $\omega(z)$ 를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

쌍곡선의 점근선(asymptote)과 랜즈의 개구수(numerical aperture; NA)를 이용하여 최소 초점부의 반경 ω_0 을 구하여 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\omega(z) = \frac{\lambda}{\pi \tan[\sin^{-1}(NA/n)]} \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$I(r, z) = \frac{2P_t}{\pi\omega(z)^2} \exp \left[\frac{-2r^2}{\omega(z)^2} \right] \quad (7)$$

여기서 n 은 대물렌즈와 레진사이의 굴절률을 의미하며 오일을 사용한 경우 1.51값을 가진다. 이광자 광중합에

필요한 라디칼 밀도 변화는 식 (8)과 같이 빔 세기의 제곱에 비례한다.¹²

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho_0 - \rho)\sigma_2 I^2 \quad (8)$$

여기서 ρ , ρ_0 , σ_2 는 각각 라디칼 밀도, 광개시제의 초기 밀도, 이광자 흡수 단면값을 의미한다. 따라서 이광자 광중합은 레이저의 조사시간에 비례하고 빔 세기의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 이광자 광중합이 발생할 수 있는 임계 조건(critical condition)을 E_{th} 라고 두고 복셀의 크기와 직경을 구하게 되면 식 (9)와 식 (10)과 같은 표현이 가능하다.

$$d(P_t, t, NA) = \frac{\lambda}{\pi \tan[\sin^{-1}(NA/n)]} \left[\ln \left(\frac{4\pi^2 P_t^2 \cdot t \cdot [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^4}{E_{th} \cdot \lambda^4} \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$l(P_t, t, NA) = \frac{2\lambda}{\pi [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^2} \left[\left(\frac{4\pi^2 P_t^2 \cdot t \cdot [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^4}{\lambda^4 \cdot E_{th}} \right)^{1/2} - 1 \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기서, d 는 복셀의 직경, l 은 복셀의 길이를 나타내며, λ 는 레이저 빔의 파장, t 는 조사시간을 의미한다. 따라서 식 (9)와 (10)으로부터 광중합시 공정조건에 따른 복셀의 세장비 계산이 가능하게 된다.

실 험

물 질

이광자흡수 색소인 TP-Flu-TP2는 2,7-dibromo-9,9-dicylhexyl-9H-fluorene과 diphenyl(4-vinylphenyl) amine의 Heck반응에 의하여 합성하였다.¹⁹ 이광자 흡수 광중합을 위한 단량체는 일본합성 고무사의 우레탄 아크릴계 단량체와 올리고머가 혼합된 SCR 500레진으로 이 레진은 소량의 케톤계 광개시제가 포함되어 있으며,²⁵ 이 레진속에 0.1 wt%의 TP-Flu-TP2를 섞어 사용하였다.

실험 장치

본 연구에서 개발된 나노 스테레오리소그래피법을 이용하여는 400 nm대의 자외선 파장에서 반응하는

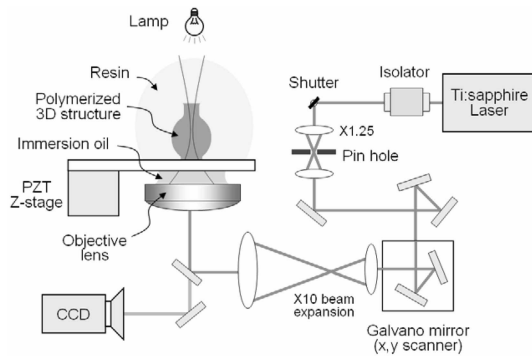


Fig. 1. Schematic diagram of laser set-up for nano-stereolithography.

광중합 수지를 이용하여 극미세 3차원 형상을 제작할 수 있다. Fig. 1에는 나노 스테레오 리소그래피 공정을 개략적으로 나타낸 것인데, 사용된 레이저는 80 fs의 펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저이며, 작동주파수는 80 MHz, 파장은 780 nm 이었다. 레이저 빔의 x, y축 제어는 1.2 nm 분해능을 갖는 갈바노(Galvano) 스캐너를 이용하였다. z축 방향에 대한 제어는 피에조 스테이지(piezoelectric stage)를 이용하여 적층 간격을 10 nm 수준으로 조절이 가능하였고, 레이저 빔의 조사시간은 갈바노 셔터와 핀홀(pin hole)을 결합하여 1 ms 수준까지 제어가 가능하도록 하였다. 또한 셔터와 스캐너, z축 스테이지는 자체 개발한 프로그램에 의하여 제어하였다. 그리고 대물렌즈(NA 1.25, $\times 100$)와 광중합 레진이 울러지는 유리판 사이의 개수구(numerical aperture; NA)를 높이기 위해 담금 기름(immersion oil)을 사용하였다. 제작되는 과정을 확인하기 위하여 고배율 렌즈($\times 1000$)가 부착된 CCD 카메라를 이용하여 모니터링 하였다. 3차원 형상은 2차원 평면좌표에 따라 복셀을 연속적으로 생성하여 한 층을 제작하고 z축 방향으로 피에조 스테이지를 이용하여 적층 두께만큼 이동한 다음에 다시 다른 층을 제작하여 만들게 된다. 이 때 복셀은 액상의 광경화수지가 이광자 흡수중합 현상에 의하여 경화가 되는데 개개의 단위 복셀은 3차원 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 끼치게 된다.

결과 및 고찰

이광자 색소 TP-Flu-TP2의 형광효율은 fluorescein

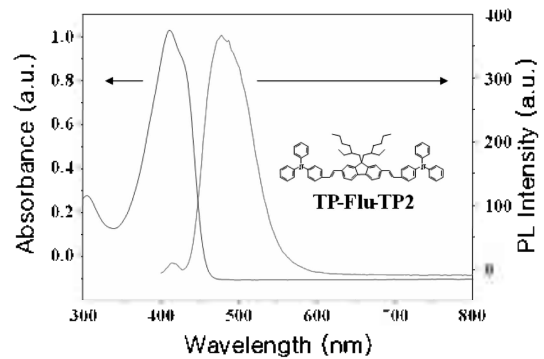


Fig. 2. Absorption and fluorescence spectra of TPA chromophore.

을 기준자료로 하여 측정된 결과 0.78로 매우 높게 나타났으며, 나노초 레이저를 이용하여 측정된 형광소실시간은 0.84 ns이었다. 또한 80 fs 레이저로 측정된 최대 이광자 흡수 횡단면 값은 740 nm에서 $4.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{photon}$ (470 GM) 이었다. Fig. 2에서와 같이 이 색소의 흡수와 형광 스펙트럼을 분석한 결과 최대 흡수 411 nm에서, 그리고 최대 형광방출은 472 nm에서 각각 나타났다. 따라서 색소가 거의 두배의 파장을 갖는 레이저 빔에 노출될 때 여기되고 이어 472 nm 근처의 파장을 갖는 빛이 방출될 때 광경화성 우레탄 계열의 아크릴계 SCR 500 레진속에 있는 케톤계 광개시제가 라디칼을 생성하여 SCR 500 레진이 중합됨으로서 고화가 일어나게 된다. 이로서 800 nm 파장의 레이저 빔을 광경화수지 SCR 500 레진에 조사하게 되면 단일 광자 흡수에서는 중합이 되지 않고 이광자 흡수에 의해서만 중합이 되어 패턴이 형성되는데, 이때 라디칼은 레이저 빔의 초점부에서만 생성되므로 극소 영역에서만 중합반응이 발생하여 회절한 제 이하의 나노급 정밀도를 가진 형상제작이 가능하다.

나노 스테레오 리소그래피 공정을 이용한 형상제작 과정은 제작하려는 형상의 CAD 데이터나 스캐닝 데이터를 컴퓨터에 의하여 레이저 장치에 입력하면 레이저가 조사된 부분이 복셀 형태의 고분자화된 패턴이 생기게 되며 이들이 연결되어 입력된 최종 형상이 얻어진다. 따라서 액상의 SCR 500 레진속에서 광중합 반응으로 제작된 형상은 미반응 레진을 에탄올로 제거하여 현상시킬 수 있다. 선행연구결과에 따르면 타원체 형태의 복셀은 레이저의 출력과 조사시간, 개구수 등의 광학적 특성에 영향을 받아 그 크기가 결

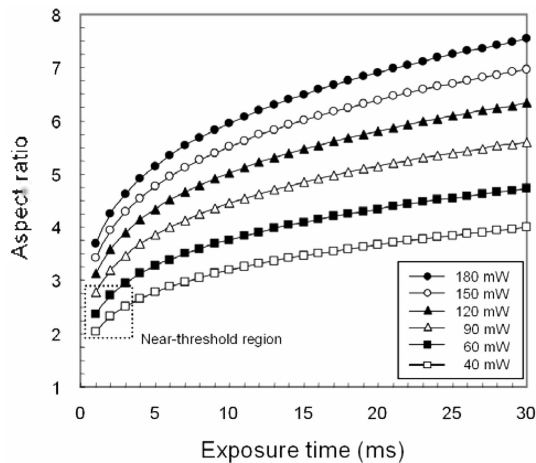


Fig. 3. Laser power and exposure time dependent aspect ratio of voxels.

정된다.¹⁵⁻¹⁹ 그러므로, 정밀한 형상을 얻기 위해서는 공정조건의 최적화가 필요하며 이를 위하여 공정변수에 대한 복셀의 세장비를 계산해 보았다. Fig. 3에는 레이저의 출력과 조사시간에 따른 복셀의 세장비를 알아보기 위하여 대물렌즈 개구수 1.4와 실험적으로 구한 임계조건 $E_{th}=2.03713e^{-12}$ ms·mW²/nm⁴를 식 (9)와 식 (10)에 입력하여 이론적으로 구한 세장비 변화 결과를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체적으로 레이저의 출력과 조사시간이 클수록 복셀의 세장비가 증가함을 알 수 있으며 조사시간이 작은 영역에서 세장비의 변화량이 많이 된다. 또한 실제 정밀한 형상제작에 사용되는 임계 에너지 부근 영역에서 레이저 출력을 줄이는 경우 복셀의 세장비가 획기적으로 줄어든다. 따라서 임계 에너지 영역에서 조사시간에 비하여 레이저의 출력이 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

복셀의 전체 크기와 형상은 레이저의 출력과 조사시간에 모두 영향을 받지만 복셀의 생성 메커니즘은 레이저 출력에 의한 출력제어(P-scheme)와 레이저 조사시간에 영향을 받는 조사시간 제어(T-scheme)로 구별된다.²⁷ Fig. 4에는 레이저 출력과 조사시간에 따른 복셀의 생성과정을 도식적으로 나타낸 것인데 레이저의 출력에 따라 복셀 형상생성이 결정되어 세장비에 직접적인 영향을 주게 된다. 이것은 레이저의 세기가 출력에 비례하고 이광자 흡수 현상은 레이저 세기의 제곱에 비례하기 때문에 비선형적으로 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 레이저의 출력을 고정한 상

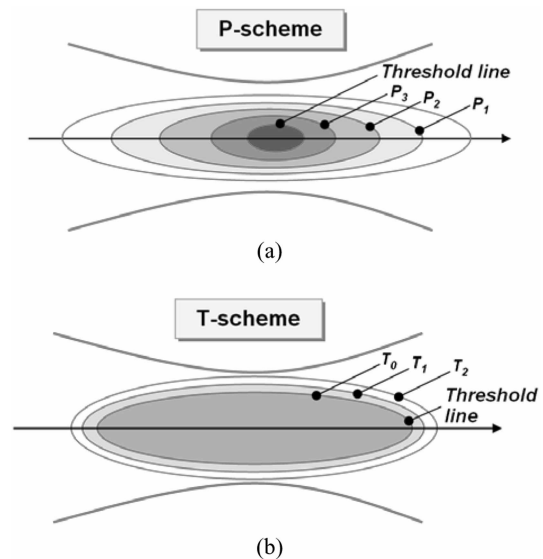


Fig. 4. Schematic diagram of (a) 'P-scheme' for voxel formation ($P_3 < P_2 < P_1$, P is laser power) and (b) 'T-scheme' for voxel growth ($T_0 < T_1 < T_2$, T is laser exposure time).

태에서 조사시간을 증가시킨 경우 복셀의 체적성장이 발생한다. 복셀의 성장 메커니즘은 특정 레이저의 출력에 의하여 결성되는 복셀의 형상영역에서 지속적으로 광자 에너지가 들어가게 됨으로써 생성된 복셀의 생성영역 주변에 이광자 흡수 현상에 의한 라디칼생성 영역이 등방향으로 증가하여 복셀의 부피성장이 되는 것으로 판단된다. 따라서 레이저의 조사시간을 길게 하는 경우에는 복셀의 세장비 자체는 줄어들 수 있지만 복셀의 단면 직경이 증가하여 심민도에 좋은 영향을 주지 못한다. Fig. 5에는 레이저의 출력이 60 mW인 조건에서 조사시간을 5 ms에서 100 ms까지 5 ms씩 증가시켜가면서 제작한 복셀의 형상을 나타낸 것인데 조사시간이 길어질수록 전체적으로 부피변화가 증가함을 알 수 있고 조사시간이 80 ms 이상에서는 이론적 연구와 같이 부피 변화가 크게 발생하지 않음을 알 수 있다.

3차원 형상을 정밀하게 제작하기 위해서는 단위 복셀의 낮은 세장비와 최소 단면직경이 중요한 변수이다. 복셀의 직경에 대한 영향은 식 (9)에 기술한 바와 같이 레이저의 출력과 조사시간이 증가할수록 같이 커지게 된다. 따라서 정밀한 선 패턴을 제작하기 위해서는 광중합이 발생하는 임계 에너지 부근에서 제작해야 한다. 또한 복셀의 세장비는 3차원 형상제작

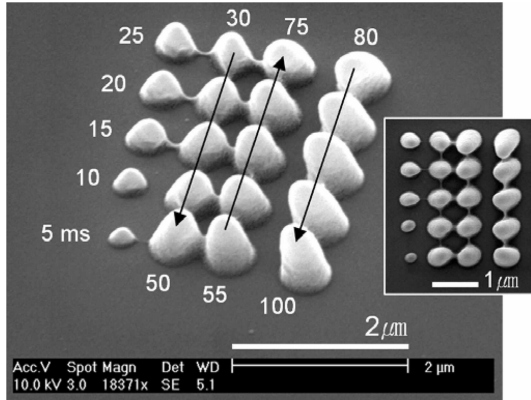
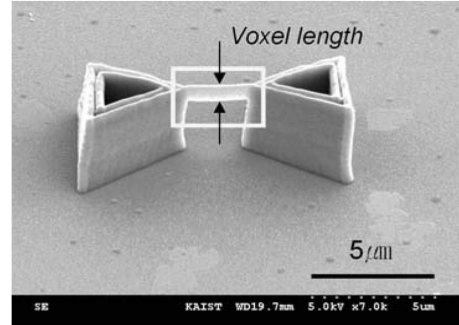


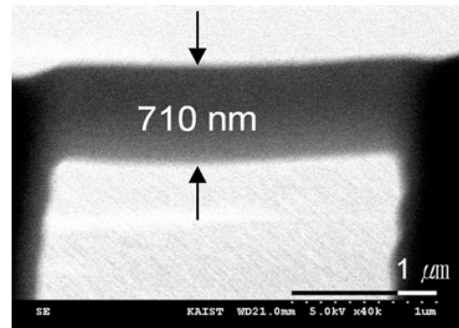
Fig. 5. SEM image of fabricated voxels in conditions of laser power, 60 mW and variational exposure time.

을 위한 적층시 형상왜곡 등 여러 가지 문제점을 가지므로 더 중요한 변수로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 복셀의 세장비를 최소화시키고 단면직경을 줄이는 최소출력-최소조사시간(minimum power and minimum exposure time; MPMT) 법을 제안하여 이를 수행하였다. MPMT법은 레이저 출력에 의한 복셀의 생성 메커니즘에 영향을 주는 P-scheme과 복셀의 부피성장에 영향을 주는 T-scheme을 복합적으로 합친 방법으로, 먼저 10 ms 이상의 조사시간 상태에서 복셀이 안정적으로 생성되는 최소의 레이저 출력을 찾아 복셀의 세장비를 최소화 한 다음에 출력을 고정된 상태에서 조사시간을 줄여서 복셀의 부피를 최소화시키는 두 단계의 과정으로 구성된다. 이러한 MPMT법으로 3차원 형상의 정밀도 향상에 도움이 되는 낮은 세장비와 단면직경을 가지는 단위 복셀을 쉽게 얻을 수 있다. 만일 특정 출력에서 레이저 조사시간을 먼저 최소화하고 다음으로 출력을 줄이는 경우에는 레이저 출력을 줄이는데 한계가 있기 때문에 복셀의 낮은 세장비를 얻기가 상당히 어렵다.

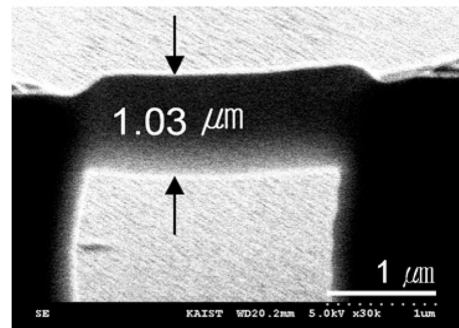
Fig. 6에는 MPMT법의 유용성을 확인하기 위하여 두 개의 삼각기둥 사이에 직선을 만들어서 직선의 높이로 간접적으로 복셀의 높이를 알아 본 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에서 레이저의 출력 120 mW, 조사시간 3 ms인 경우와 레이저 출력 150 mW, 조사시간 1 ms인 경우를 비교할 때 조사시간이 긴 경우에도 레이저 출력이 작을 때 직선의 높이가 약 30% 정도 더 작음을 알 수 있다. 이것은 레이저의 출력이 높은 경우 빔의 진행방향으로 광중합을 위한 입체 에너



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. SEM images of a specimen fabricated (a) 3D test specimen for measuring the height of a voxel; fabrication conditions of (b) 120 mW and 3 ms; (c) 150 mW and 1 ms, respectively.

지 분포가 길게 생성되어 세장비가 높은 복셀이 만들어지기 때문이다. 따라서 높은 출력에서는 조사시간을 줄이더라도 3차원 적층을 위한 심밀도 확보에는 문제가 생기게 된다. 그러므로 제안된 MPMT법에서는 충분히 높은 조사시간의 조건에서 복셀이 안정적으로 만들어지는 최소의 출력을 찾아내고 이후에 조

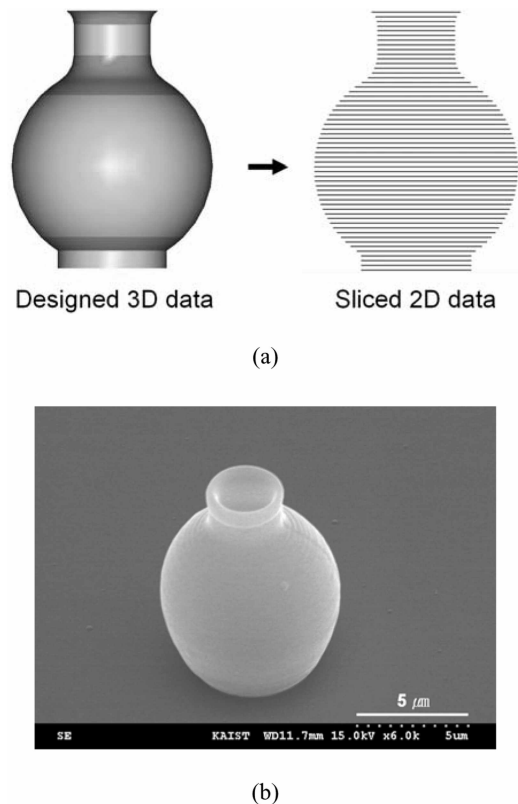


Fig. 7. (a) Schematic diagram of the designed 3D micro-jar model and its sliced 2D data. (b) SEM image of the fabricated micro-jar using the developed nano-stereolithography process.

사시간을 줄이는 방법을 선택하기 때문에 적층을 위한 정밀도의 확보가 용이하게 된다.

이를 바탕으로 나노 스테레오리소그래피 공정에서 MPMT 법을 적용하여 일반적인 마이크로 제작공정으로 구현하기 어려운 완전한 3차원 형상을 적층방식으로 제작해 보았다. Fig. 7에 나타난 항아리 형상은 SCR 500 레진에 0.1 wt%의 이광자 색소 TP-Flu-TP2를 섞은 레진을 사용하여 제작한 것이다. 형상의 제작과정은 3차원 CAD 형상 데이터를 슬라이싱하여 2차원 단면 데이터로 전환한 뒤, 레이저 출력 60 mW, 조사시간 2 ms, 적층간격 50 nm 조건에서 제작한 다음 광중합되지 않은 액체상태의 레진 부분은 에탄올로 세거하여 얻었는데 수 μm 크기의 정밀도가 높은 양질의 패턴 형상을 확인할 수 있다. 이러한 미세 3차원 형상은 광사결정체, MEMS, 3차원 광도파로, 나노반응기 제작 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저 출력에 의하여 복셀의 세장비를 포함한 복셀 형성에 영향을 받으며 낮은 레이저 출력에 의하여 낮은 세장비를 확보할 수 있다.

(2) 레이저 조사시간은 복셀의 부피 성장에 영향을 주며 짧은 조사시간 조건에서 단면 직경이 줄어들 수 있다. 이것은 짧은 조사시간에서는 광자 에너지의 등방향 확산이 어려워져 이광자 흡수에 의한 라디칼 생성이 어렵게 되기 때문이다.

(3) 본 연구에서 제안한 MPMT법은 10 ms 이상의 충분한 조사시간에서 복셀이 안정적으로 생성되는 최소 레이저 출력을 구한 다음에 조사시간을 점차로 줄여나가서 세장비와 단면 직경이 작은 단위 복셀을 얻는 방법으로, 테스트 시편 제작을 통하여 제안된 MPMT법이 복셀의 세장비를 줄이는데 효과가 있음을 검증되었다. 또한 3차원 마이크로 항아리를 제작하여 본 연구에서 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정과 제안된 레이저출력-조사시간 제어방법의 신뢰성을 확보하였다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되어 이에 심심한 사의를 포함합니다. 또한 본 연구의 일원이 K.-S. Lee는 과학기술부 신기술융합사업단과 한국과학재단 기능성고분자 신소재연구센터의 지원에 감사를 포함합니다.

인용문헌

1. Peercy, P. S. *Nature* **2000**, *406*, 1023.
2. Chou, S. Y.; Keimel, C.; Gu, J. *Nature* **2002**, *417*, 835.
3. Xia, Y.; Whitesides, G. M. *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 550.
4. Loo, Y. L.; Lang, D. V.; Rogers, J. A.; Hsu, J. W. P. *Nano Lett.* **2003**, *3*, 913.
5. Aizenberg, J.; Black, A. J.; Whitesides, G. M. *Nature* **1999**, *398*, 495.
6. Schaper, C. D. *Nano Lett.* **2003**, *3*, 1305.
7. Schmid, H.; Michel, B. *Macromolecules* **2000**, *33*, 3042.
8. Kim, Y. S.; Suh, K. Y.; Lee, H. H. *Appl. Phys. Lett.* **2001**, *79*, 2285.

9. Austin, M. D.; Ge, H.; Wu, W.; Li, M.; Yu, Z.; Wasserman, D.; Lyon, S. A.; Chou, S. Y. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *84*, 5299.
10. Sun, H. B.; Maeda, M.; Takada, K.; Chon, J. W. M.; Gu, M.; Kawata, S. *Appl. Phys. Lett.* **2003**, *83*, 819.
11. Kawata, S.; Sun, H. B.; Tanaka, T.; Takada, K. *Nature* **2001**, *412*, 697.
12. Serbin, J.; Egbert, A.; Ostendorf, A.; Chichkov, B. N. *Opt. Lett.* **2003**, *28*, 301.
13. Maruo, S.; Kawata, S. *J. Microelectromech. Syst.* **1998**, *7*, 411.
14. Sun, H. B.; Tanaka, T.; Kawata, S. *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *80*, 3673.
15. Park, S. H.; Lim, T. W.; Lee, S. H.; Yang, D. Y.; Yi, S. W.; Kong, H. J.; Lee, K.-S., *Polymer (Korea)*, **2004**, in press.
16. Park, S. H.; Lim, T. W.; Yang, D. Y.; Yi, S. W.; Kong, H. J. *J. KSPE* **2004**, *21*, 210.
17. Yang, H.-K.; Kim, M.-S.; Kang, S.-W.; Kim, K.-S.; Lee, K.-S.; Park, S. H.; Yang, D.-Y.; Kong, H. J.; Sun, H.-B.; Kawata, S.; Fleitz, P. *J. Photopolym. Sci. Tech.* **2004**, *17*, 385.
18. Park, S. H.; Lim, T. W.; Yang, D. Y.; Kong, H. J.; Lee, K.-S. *Polymer (Korea)*, **2004**, *28*, 305.
19. Park, S. H.; Lim, T. W.; Yang, D. Y.; Kong, H. J.; Lee, K.-S. *Bull. Korean Chem. Soc.*, **2004**, *25*, 1119.
20. Lee, K.-S.; Kim, M.-S.; Yang, H.-K.; Soo, B.-K.; Sun, H.-B.; Kawata, S.; Fleitz, P. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **2004**, *35*, 424.
21. Kim, M.-S.; Yang, H.-K.; Kim, R. H.; Lee, K.-S.; Cha, M.; Choi, H.; Sun, H.-B.; Kawata, S. *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* **2004**, *13*, 467.
22. Sun, H.-B.; Suwa, T.; Takada, K.; Zaccaria, R. R.; Kim, M.-S.; Lee, K.-S.; Kawata, S. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *85*, 3708.
23. Day, D.; Gu, M.; Swillridge, A. *Opt. Lett.* **1999**, *24*, 948.
24. Sun, H.-B.; Kawata, S. *Adv. Polym. Sci.* **2004**, *170*, 169.
25. Maruo, S.; Nakamura, O.; Kawata, S. *Opt. Lett.* **1997**, *22*, 132.
26. Sun, H.-B.; Matsuo, S.; Misawa, H. *Appl. Phys. Lett.*, **1999**, *74*, 786.
27. Sun, H.-B.; Takada, K.; Kim, M. S.; Lee, K.-S.; Kawata, S., *Appl. Phys. Lett.*, **2003**, *83*, 1104.
28. Cronin, P. J.; Torok, P.; Varga, P.; Cogswell, C., *J. Opt. Soc. Am.* **2000**, *A 17*, 1556.