

극미세 3 차원 형상제작의 효율성 향상을 위한 영역분할 단면법에 관한 연구

박상후*(KAIST, 기계공학과 대학원), 임태우(KAIST, 기계공학과 대학원),
양동열(KAIST, 기계공학과), 이신욱(KAIST, 물리학과 대학원),
공홍진(KAIST, 물리학과), 이광섭(한남대학교, 생명·정보신소재공학과)

Sub-regional Slicing Method (SSM) to Fabricate 3D Microstructure Effectively in Nano-Stereolithography Process

S.H. Park (Mechanical Eng., KAIST), T.W. Lim (Mechanical Eng., KAIST),
D.Y. Yang (Mechanical Eng., KAIST), S.Y. Yi (Mechanical Eng., KAIST),
H.J. Kong (Mechanical Eng., KAIST), and K.S. Lee (Mechanical Eng., KAIST)

ABSTRACT

A subregional slicing method (SSM) is proposed to increase the nanofabrication efficiency of a nano-stereolithography (NSL) process based on two-photon polymerization (TPP). The NSL process can be used to fabricate 3D microstructures via the accumulation of layers of uniform thickness; hence, the precision of the final 3D microstructure depends on the layer thickness. The use of a uniform layer thickness means that, to fabricate a precise microstructure, a large number of thin slices is inevitably required, leading to long processing times. In the SSM proposed here, however, the 3D microstructure is divided into several subregions on the basis of the geometric slope, and then each of these subregions is uniformly sliced with a layer thickness determined by the geometric slope characteristics of each subregion. Subregions with gentle slopes are sliced with thin layer thicknesses, whereas subregions with steep slopes are sliced with thick layer thicknesses. Here, we describe the procedure of the SSM based on TPP, and discuss the fabrication efficiency of the method through the fabrication of a 3D microstructure.

Key Words : Nano-Stereolithography process (나노 스테레오리소그래피), 3D-Microstructures (3 차원 형상), Subregional Slicing Method (영역분할 단면법), Two-photon Polymerization (이광자 흡수 광중합)

1. 서론

최근 나노기술 (nanotechnology: NT)에 대한 집중적인 연구에 의하여 바이오, 차세대 반도체 및 디스플레이 산업 등에서 새로운 차원의 공정개발과 상품개발에 진전이 이루어지고 있다. 그 중에서도 특히 신 개념의 상품개발에 응용될 수 있는 초정밀, 저비용 및 대량생산에 적합한 새로운 차원의 나노 공정기술은 매우 중요하여 이에 대한 다각적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위하여 제시된 다양한 패터닝 기술 중 이광자 흡수 중합법을 이용한 나노 및 마이크로 형상제작 방법은 매우 유력한 차세대 패터닝 기술이 될 수 있어 최근 이

분야의 연구 열기가 매우 높아지고 있다.

현재 반도체 공정에 많이 활용되는 리소그래피 공정은 고가의 포토마스크 (photomask)가 필수적으로 요구된다. 포토마스크를 사용하지 않고 직접적으로 패터닝을 제작하는 방법으로는 여러가지 개발되고 있으며, 이러한 방법은 100 nm 이하의 높은 정밀도를 갖는 패터닝의 제조가 가능하지만 장비가 매우 비싸거나 복잡한 형상의 3 차원 패터닝을 제작하기에는 어려운 문제점이 있다. 또한 높은 세장비를 얻기 위해서는 일반적으로 반응성 이온식각 (reactive ion etching: RIE)과 같은 후속공정이 필요하다.

그러나 최근에 관심이 집중되고 있는 레이저를

이용한 이광자 흡수 광중합법은 높은 세장비를 가지는 패턴을 마스크 없이 직접적으로 제작이 가능하다.

본 연구에서는 펨토초 레이저에 의한 이광자 중합과정을 이용하여 단면의 윤곽선을 고화시키고 연속적으로 적층하여 수십 마이크로 크기의 3 차원 형상을 제작하는 나노 입체 리소그래피 (nanostereolithography: NSL) 공정을 개발하였으며, 또한 제작효율을 향상시키기 위하여 적층간격을 형상에 따라 달리하는 영역분할 단면법 (subregional slicing method, SSM)을 개발하였다.

2. 나노 스테레오리소그래피 공정

2.1 이광자 흡수 광중합 현상

이광자 흡수 (two-photon absorption: TPA) 현상은 색소가 한 개의 광자를 받은 후 약 10^{-15} 초 이내에 다른 광자를 받아들여 광자에너지가 두 배로 큰 에너지로 흡수되는 현상을 말한다. 즉, 두 개의 광자를 거의 동시에 흡수하여 이광자 흡수 색소가 들뜬 상태가 되고 약간의 에너지를 소실한 후 흡수될 때의 파장보다 더 높은 파장을 가진 빛을 방출하고 바닥 상태로 돌아오는 현상을 말한다. 여기서 두 개의 광자를 흡수하기 위하여 양자역학적인 가상의 전이상태 (virtual transition state)가 존재한다.¹

Fig. 1 에는 이광자 흡수에 의하여 광반응성 수지가 고분자화 될 때까지의 에너지 변환 과정을 나타낸 것이다. 이광자 흡수 색소가 두 개의 광자를 동시에 받아서 광 에너지를 방출하게 되면 이것을 광 개시제 (photoinitiator)가 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 되고 일반적으로 10^{-6} 초 이내의 짧은 시간에 다음과 같은 3 가지 형태로 분리된다. 첫째, 들뜬 상태에서 빛을 방출하여 다시 광개시제로 돌아오거나 둘째로 광경화수지 내에 존재하는 산소와 같은 소광 물질 (quenching agent)과 반응하여 단량체와 결합능력을 상실하는 부분과 셋째로 라디칼로 변환되어 단량체와 결합하여 중합체로 진행되는 부분으로 나누어진다.

이광자 흡수현상은 레이저의 강도의 제곱에 비례하여 일어나기 때문에 일반적으로 높은 피크 출력 (peak power)을 가지는 레이저를 사용하며 이광자 흡수에 의한 고화현상이 발생할 확률은 레이저의 초점부 모든 영역에서 일정한 것이 아니고 초점부의 중심으로 갈수록 확률이 증가하게 된다. 본 연구에 사용된 Ti:sapphire 펨토초 레이저의 경우 최대출력이 1 W, 펄스의 반복률이 80 MHz 이고 펄스 폭이 약 100 fs 이하이므로 펄스의 피크 출력을 계산해 보면 약 0.1 MW

급이 된다. 따라서 이광자 흡수현상에 의한 초점 크기는 단일 광자 흡수의 경우와 달리 빔의 회절한계와 상관없이 분해능 (resolution)을 빔의 파장크기 이하로 만들 수 있다.²⁻⁷

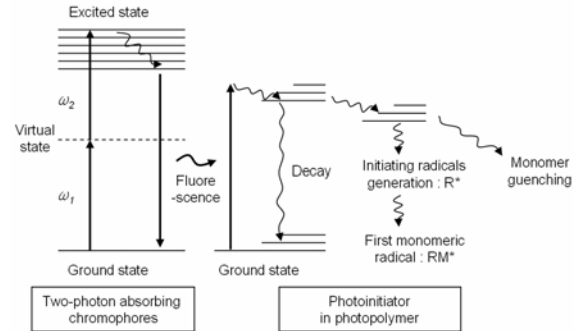


Fig. 1. Schematic diagram of the transforming process of photon energy in two-photon polymerization.

2.2 나노 스테레오리소그래피 시스템 구성

본 연구에서 개발한 나노 입체 리소그래피 공정은 광경화 수지를 이용하여 3 차원 형상을 제작하는 공정이다. Fig. 2 는 개발된 공정을 개략적으로 나타낸 것인데, 사용된 레이저는 80 fs 이하의 펄스 폭을 갖는 티타늄:사파이어 레이저 (Ti:Sapphire mode-locked laser)이며, 레이저 빔의 x, y 축의 제어는 갈바노 스캐너 (galvano mirror)를 이용하여 1.2 nm 분해능을 가지도록 하였다. 또한 z 축 방향에 대한 제어는 피에조 스테이지 (piezoelectric stage)를 이용하여 적층 간격을 10 nm 수준으로 조절이 가능하도록 하였다. 또한 레이저 빔의 조사시간을 제어하기 위하여 갈바노 셔터와 핀홀 (pin hole)을 결합하여 1 ms 수준까지 제어가 하도록 하였다. 여기서 셔터와 스캐너, z 축 스테이지는 자체 개발한 프로그램에 의하여 제어하였다.

또한 대물렌즈 (NA 1.4, $\times 100$)와 커버 글래스 사이에 수광각도를 높이기 위해 침적 오일 (immersion oil)을 사용하였다. 제작되는 과정은 고배율 렌즈 ($\times 1000$)가 부착된 CCD 카메라를 이용하여 모니터링 하였다. 2 차원 평면 윤곽선 데이터에 따라 복셀 (voxel)을 연속적으로 생성하여 한 층을 제작하고 z 축 방향으로 피에조 스테이지를 이용하여 적층 두께만큼 이동한 다음에 다시 다른 층을 제작하여 3 차원 형태의 셸 (shell)

구조를 만들게 된다. 이 때 복셀은 액상의 광반응성 수지가 이광자 흡수현상에 의하여 중합되어 생성된다. 액상 수지 속에서 광경화 반응으로 제작된 3 차원 형상은 에탄올을 이용하여 쉽게 현상시킬 수 있다.²⁻³

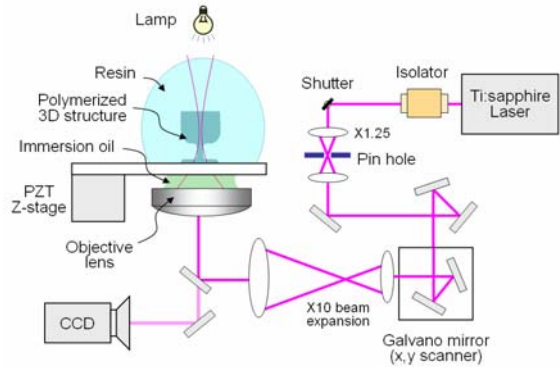


Fig. 2. Schematic diagram of nano-stereolithography apparatus.

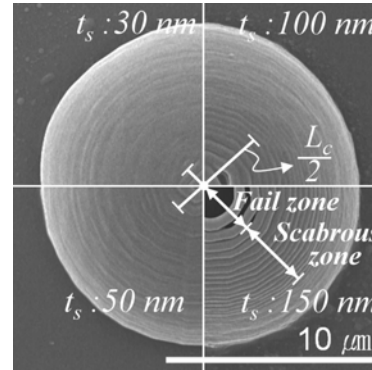
3. 영역분할 단면법

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. 따라서 복잡한 3 차원 형상을 제작하기 위해서는 새로운 방법론이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 영역분할 단면법 (subregional slicing method; SSM)를 제안하였다. 영역분할 단면법은 제작하는 형상의 곡면 기울기를 계산하여 적층이 가능한 임계 적층두께를 계산하고 임계 적층두께 (critical layer thickness)에 따른 영역을 먼저 높이방향으로 분할하게 된다. 이후에 각 분할된 영역에서 적합한 적층두께를 선정하여 슬라이싱한다. 다음 형상을 제작하도록 하였다.

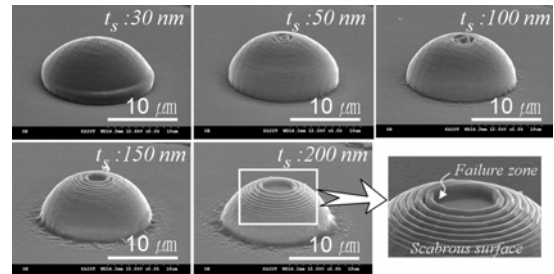
본 연구에서 형상의 기울기에 따른 임계 적층두께를 구하기 위하여 반구형태의 구조물을 제작하였다. Figs. 3(a)와 3(b)에는 레이저 출력 60 mW, 조사시간 1 ms 에서 각 적층간격에 따라 제작된 반구형상을 나타낸 것이다.

Fig. 3 의 결과에서 적층두께가 30 nm 인 경우에 형상이 거의 완전하게 제작이 되었지만 적층두께가 클수록 표면의 상태가 나빠지며, 기울기가 작은 상단부에서는 적층이 되지 않는 현상이 발생한다. 따라서, 이러한 결과로부터 적층각도에 따른 적절한 임계각도를 계산할 수 있다. 이러한 임계각도는 레이저의 출력과 조사시간에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 레이저 출력 60 mW 와 조사시간 1 ms 인 경우에 대하여 임계각도를 계산해 보았다. Fig. 4 에는 계산된 결과를 나타낸 것인데 적층두께에 따라 문제가 발생하지 않는 형상각도 영역을 5 개로 나누었다.

이러한 영역분할을 통하여 적층두께를 조절할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Combined SEM image showing quarter parts of the hemispheres fabricated using four slicing thicknesses, respectively, under fabrication conditions of laser power 60 mW and exposure time 1 ms. Each line on the SEM image represents the half of critical length, $L_c/2$, including the length of failure zone and scabrous zone. (b) SEM images of the fabricated hemispheres with various slicing thicknesses from 30 nm to 200 nm (Inclined view).

Fig. 5 에는 도자기 형상에 대하여 3 차원 형상을 영역분할 단면법과 균일두께 단면법으로 각각 제작한 사례를 나타내었다. 모델링된 도자기 형상은 29.5° 에서 90° 의 형상기울기를 가진다. 따라서 Fig. 4 의 결과에서 적층두께를 100 nm 수준으로 하면 형상제작이 가능하며 이 경우에 적층해야될 데이터는 112 층이다. 그러나 도자기 형상에서 임계 적층두께를 가지도록 형상기울기에 따라 영역을 분할하여 그기에 해당하는 적층두께를 선정하면 전체 적층 데이터의 수가 63 층으로 약 44% 정도 데이터가 줄어들어서 제작시간이 그만큼 단축하게 된다. 균일 분할법으로 적층 데이터 수가 영역분할 단면법의 경우와 유사하도록 200 nm 로 하여 슬라이싱 한 경우와 비교해 보았다.

Fig. 5(b)의 제작된 결과에서 영역분할 단면법으로

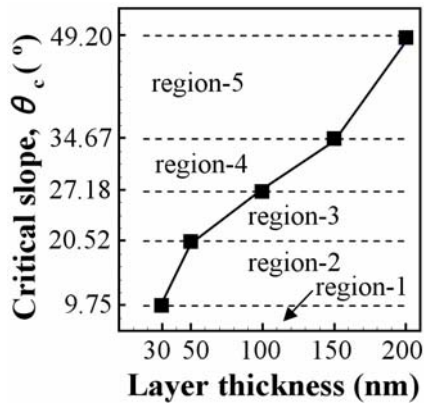
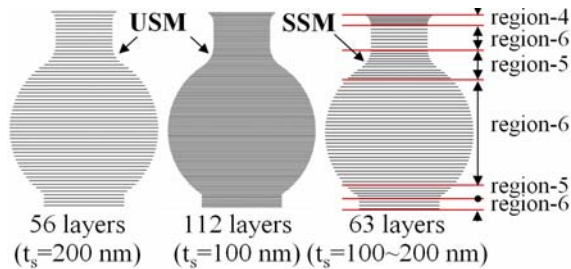
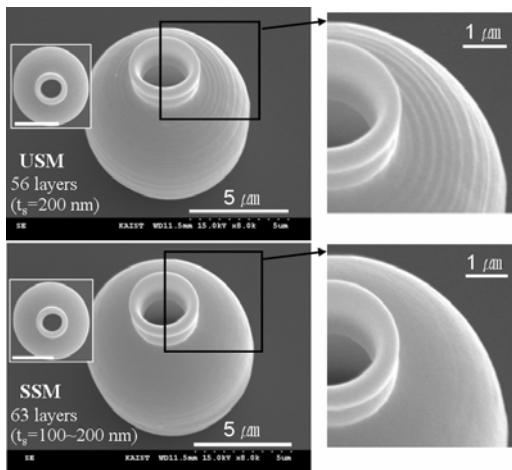


Fig. 4 Variation of the critical slope (θ_c) obtained under the laser power of 60 mW and exposure time of 1 ms.



(a)



(b)

Fig. 5 (a) 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). (b) SEM images of fabricated micro-jars using USM with 56 layers and SSM with 63 layers.

제작한 경우 표면이 매우 균일하면서 잘 제작됨을

알 수 있다. 그러나 적층 데이터 양이 유사한 200 nm 적층두께의 경우에는 표면 거친면이 나타남을 알 수 있다. 따라서 영역분할법을 적은 데이터를 가지고 짧은 시간에 우수한 표면을 가지는 3차원 구조물 제작이 가능함을 보였다.

5. 결론

영역분할 단면법을 이용하여 효과적으로 3차원 형상을 제작할 수 있음을 보였다. 이러한 공정기술을 이용하여 정밀도가 높은 복잡한 3차원 형상을 짧은 제작시간에 만들 수 있다.

후기

본 과제는 과학기술부 주관 나노원천기술개발사업 (과제번호 : M10503000217-05M0300-21710)의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. Fouassier, J.P., Rabek, J.F., Radiation curing in polymer science and technology -volume III, Polymerization Mechanisms, Elsevier, London, 1993.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., "Finer features for functional microdevices," Nature, vol.412, no.16, pp.697-698, 2001.