3 차원 나노 스테레오리소그래피의 정밀화를 위한 펨토초 레이저 출력-조사시간 제어방법

박상후*(KAIST 대학원 기계공학과), 임태우(KAIST 대학원 기계공학과),
양동열(KAIST, 기계공학과)

A Scheme to Control Laser Power and Exposure Time for Fabricating Precise Three-dimensional Microstructures in Nano-stereolithography (nSL) Process

S. H. Park* (Dept. of Mech. Eng., KAIST), T. W. Lim (Dept. of Mech. Eng., KAIST),
D.-Y. Yang (Dept. of Mech. Eng., KAIST)

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 photopolymerizing 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 a scheme on the control of laser power and exposure for minimizing aspect ratio of a voxel is proposed.

Key Words : Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Two-Photon Absorption (이광자 흡수현상), Nano-Stereolithography Process (nSL)(나노 3 차원 광조형공정)

1. 서론

반도체 식각공정을 이용한 마이크로 공정기술로 에어백 센서, 자이로스코프, MMA (micro mirror array) 등의 다양한 고 부가가치의 제품이 개발되어 상용화되면서 마이크로 형상제작 분야에 대한 많은 투자와 관심이 집중되었다. 최근에는 나노 공정기술과 결합하여 그 정밀도가 더욱 향상되어서 마이크로 미터 (micrometer)(μm) 이하의 정밀도를 가지는 초정밀 제품 제작에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 반도체 및 정보통신 분야를 중심으로 급격하게 발전하고 있는 산업분야의 경향은 고집적화, 다기능화, 소형화 등의 특징을 가진다. 나노기술 (nanotechnology)은 이러한 특징을 잘 만족시키는 주도적 역할을 하는 연구분야로 정의할 수 있으며 이 기술을 이용하여 지금까지 알려지지 않은 새로운 형태의 융합된 연구 분야가 도출되고 있다.

최근에는 저비용으로 대량생산이 가능한 나노 공정기술 개발에 많은 연구들이 진행되고 있으며 이러한 공정들의 대표적인 사례로는 UV광을 이용한 나노 임프린트 공정[1]과 PDMS (poly-dimethylsiloxane) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피 (soft lithography) 공정[2,3], 또는 PDMS 스탬프에 모세관 효과를 이용하여 패턴을 제작하는 방법[4] 등이 있다. 전자 빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 이용한 패터닝 방법으로 선폭 정밀도가 5 nm까지 달성하였다[5]. 그러나 이러한 방법들은 복잡한 3 차원 형상을 제작하기에는 한계가 있다. 따라서 펨토초 레이저의 이광자 흡수 (two-photon absorption) (TPA) 현상을 이용하여 수 백 nm 정밀도를 가지며 3 차원

형상을 제작할 수 있는 공정에 대한 연구가 진행되고 있다. TPA현상을 이용한 경우 다른 공정으로 제작하기 어려운 3 차원 형상을 제작[6]하거나, 마스크 없이 200 nm 정밀도를 가지는 복잡한 형태의 패턴이 제작 가능하다[7,8].

본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용한 TPA 현상으로 3 차원 형상을 제작하기 위한 나노 스테레오 리소그래피 (nano-stereolithography) (nSL) 공정에서 형상 정밀도 향상을 위하여 레이저의 출력 및 조사시간을 제어하는 방법을 제안하였다.

2. 나노 스테레오리소그래피 공정

본 연구에서 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정 (nano-stereolithography process) (nSL)은 자외선 (ultraviolet)에 경화가 되는 광경화 수지를 이용하여 3 차원 형상을 제작하는 공정이다. Fig. 1 에는 나노 스테레오리소그래피 공정을 개략적으로 나타낸 것인데, 사용된 레이저는 80 fs 이하의 펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저 (Ti-Sapphire mode-locked laser)이며, 작동주파수는 80 MHz, 파장은 780 nm 이다. 레이저 빔의 x, y 축의 제어는 갈바노 스캐너 (glavano mirror)를 이용하여 1.2 nm 분해능을 가지도록 하였다. z 축 방향에 대한 제어는 피에조 타입의 스테이지 (piezoelectric stage)를 이용하여 적층 간격을 10 nm 수준으로 조절이 가능하도록 하였다. 또한, 레이저 빔의 조사시간을 제어하기 위하여 갈바노 셔터와 핀 홀 (pin hole)을 결합하여 1 ms 수준까지 제어가 가능하다. 또한 셔터와 스캐너, z 축 스테이지는 자체 개발한 프로그램에 의하여 제어된다.

본 연구에 사용된 광경화 수지는 일본합성 고무사 (Japan Synthetic Rubber Co.)의 우레탄 아크릴계 단량체와 올리고머 (oligomer)가 혼합된 SCR 계열의 레진에 0.1 %(w/w)의 이광자 흡수 색소인 TP-Flu-TP2 를 섞어 사용하였다.

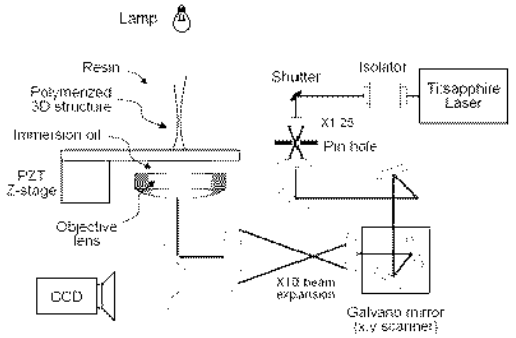


Fig. 1 Schematic diagram of nano-stereolithography apparatus.

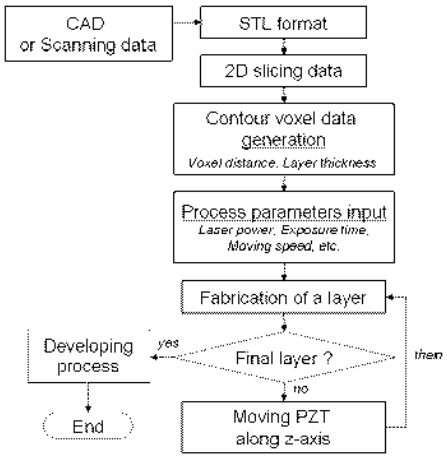


Fig. 2 Schematic flowchart of nano-stereolithography process.

2 차원 평면좌표에 따라 복셀 (voxel)을 연속적으로 생성하여 한 층을 제작하고 z축 방향으로 피에조 스테이지를 이용하여 적층 두께만큼 이동한 다음에 다시 다른 층을 제작하여 3 차원 형상을 만들게 된다. 이 때 복셀은 액상의 광경화 수지가 TPA 현상에 의하여 경화가 발생하며, 단위 복셀의 형상은 3 차원 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 준다. 선행 연구[7,8]에서 타원체 형태의 복셀은 레이저의 출력과 조사시간, 개구수 (numerical aperture) (NA) 등의 광학적 특성에 영향을 받아 그 크기가 결정된다. 따라서 정밀한 형상을 얻기 위해서는 공정조건의 최적화가 필요하다. Fig. 2 에는 나노 스테레오 리소그래피 공정의 형상제작 프로세스를 나타내었다.

3. 레이저 출력 및 조사시간에 따른 복셀 생성 및 성장 메커니즘

나노 스테레오리소그래피 공정에서 정밀한 3 차원 형상을 제작하기 위해서는 2 차원 단면의 정밀도 향상이 중요하며, z축 방향으로 적층시 발생되는 오차를 최소화 하기 위하여 복셀의 낮은 세장비가 중요하다. 따라서 정밀한 3 차원 형상제작을 위하여 복셀의 세장비와 단면 직경을 최소로 하는 것이 중요하며 이전 연구에서 복셀의 형상은 식(1), (2)와 같이 레이저의 출력과 조사시간의 함수로 표현됨을 알 수 있다[7,8].

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

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

여기서, d는 복셀의 직경, l은 복셀의 길이를 나타내며, P는 레이저 광의 출력 (power), t는 레이저의 조사시간 (exposure time), w_0는 레이저 광의 초점부의 반경, E_{th}'는 이광자 흡수에 의하여 고화가 발생하는 임계에너지 (threshold energy)를 의미한다.

복셀의 전체 크기와 형상은 레이저의 출력과 조사시간에 모두 영향을 받지만 복셀의 생성 메커니즘은 레이저 출력을 조절하는 P-scheme 과 레이저 조사시간을 조절하는 T-scheme 으로 구별된다. Fig. 3 에는 레이저 출력과 조사시간에 따른 복셀의 생성과정을 도식적으로 나타낸 것인데 세장비를 결정하는 복셀 형상생성 (voxel formation)은 레이저의 출력에 따라 결정된다.

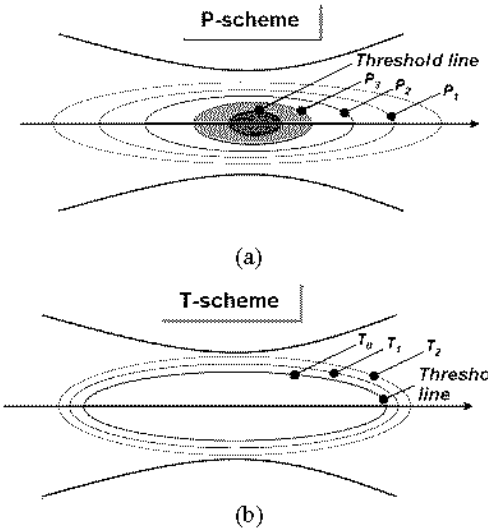


Fig. 3 Schematic diagram of (a) 'P-scheme' for voxel formation (P_3<P_2<P_1, P is laser power) and (b) 'T-scheme' for voxel growth (T_0<T_1<T_2, T is laser exposure time).

레이저의 출력을 고정한 상태에서 조사시간을 증가시킬 경우 복셀의 체적성장 (voxel growth)이 발생한다. 즉, 조사시간이 길수록 복셀의 크기가 거의 균일하게 전 방향으로 성장하게 된다. 복셀의 성장 메커니즘은 특정 레이저의 출력에 의하여 결정되는 복셀의 형상영역에서 지속적으로 광자 에너지가 들어가게 됨으로써 생성된 복셀의 생성영역 주변에 이광자 흡수 현상에 의한 라디칼 (radical)생성 영역이 등방향으로 증가하여 복셀의 부피성장이 되는 것으로 판단된다.

4. 형상 정밀도를 위한 레이저 출력-조사시간 제어방법

레이저의 출력과 조사시간에 따른 2 차원 단면의 정밀도 변화를 알아보기 위하여 나노 스테레오 리소그래피 공정을 이용하여 선 폭 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 레이저 출력의 범위는 선 패턴이 안정적으로 생성되는 90 mW 부터 30 mW 씩 증가시키면서 240 mW 까지로 하였다. 레이저의 조사시간은 핀 홀과 갈바노 셔터를 이용하여 각 레이저 출력에 대하여 1.0 ms, 1.5 ms, 2.0 ms, 4.0 ms, 8.0 ms, 16.0 ms, 32.0 ms 으로 변화시켰다.

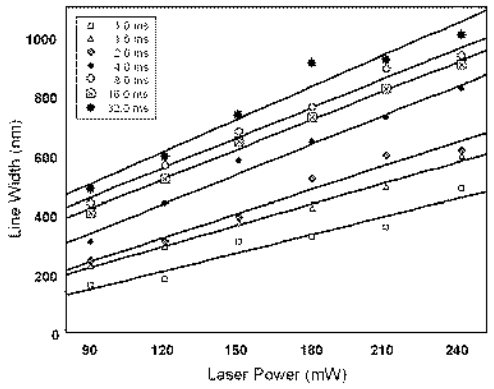


Fig. 4 Experimental results for variation of line-width according to the laser power.

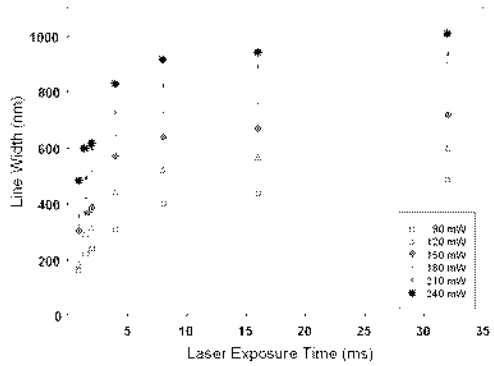
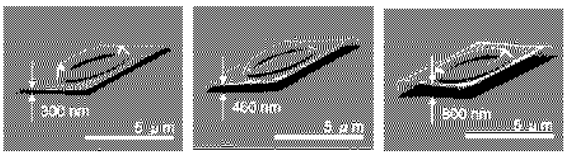


Fig. 5 Experimental results for variation of line-width according to the laser exposure time.

조사시간을 일정하게 두고 레이저 출력에 따른 선 폭의 변화에 한 실험결과를 Fig. 4 에 나타내었는데 직선은 선형 최소 자승 근사법으로 표현한 것이다. Fig. 4 의 결과에서 조사시간을 일정하게 하고 레이저의 출력을 증가시킬 때 선 폭의 변화가 거의 선형적으로 증가하며 조사시간을 변경하여도 유사한 경향이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 레이저의 출력에 따라 선 폭의 변화가 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다. Fig. 5 에는 레이저 출력이 일정할 때 조사시간을 변화시키면서 선 폭을 측정한 결과를 정리한 것인데 동일한 출력에서 조사시간이 증가할수록 전체적으로 선 폭도 같이 증가하지만 조사시간에 따라 선 폭이 선형적으로 변화하지는 않

는다. 이러한 결과는 T-scheme 에 의한 복셀의 부피 성장에 관한 것인데 일정한 출력조건에서 조사시간을 5 ms 이하 영역에서는 선 폭이 급격하게 변화하고 10 ms 이상에서는 광 개시제가 이광자 흡수에 의하여 일정 영역 이상으로 라디칼을 생성하지 못하기 때문에 선 폭의 증가가 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

3 차원 형상을 정밀하게 제작하기 위해서는 앞서 기술한 바와 같이 단위 복셀의 낮은 세장비와 최소 단면직경이 중요한 변수이다. 그 중에서도 복셀의 세장비는 3 차원 형상제작을 위한 적층시 형상왜곡 등 여러 가지 문제점을 가지므로 더 중요한 변수로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 복셀의 세장비를 최소화시키고 단면직경을 줄이는 P&T scheme 을 제안하였다.



(a) (b) (c)

Fig. 6 SEM images of a specimen fabricated in the condition of (a) laser power of 180 mW and exposure time of 3 ms; (b) 230 mW and 2 ms; (c) 230 mW and 3 ms, respectively.

Fig. 6 에는 P&T scheme 의 효과를 확인하기 위하여 몇 가지 레이저 출력과 조사시간 조건에서 간단한 형상에 대한 예비실험 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에서 레이저의 출력이 230 mW 인 경우와 180 mW 인 경우를 비교할 때 3ms 으로 동일한 조사시간에서는 제작되는 사각면의 두께가 출력이 높은 경우에 약 2.6 배 정도 더 증가함을 알 수 있다. 또한 230 mW 출력에서 조사시간을 2 ms 으로 줄이더라도 제작되는 사각면의 두께가 180 mW, 3ms 의 경우와 비교하여 약 1.5 배 정도 더 두꺼운 것으로 나타났다. 이것은 레이저의 출력은 복셀의 생성모양과 관계가 있기 때문에 높은 출력에서는 세장비가 높은 복셀이 만들어 지기 때문에 조사시간을 줄이더라도 3 차원 적층을 위한 정밀도 확보에는 문제가 있음을 나타내기 때문에 P&T scheme 에서 복셀의 세장비를 먼저 줄이고 단면반경을 다음으로 줄이는 방법은 타당하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 3 차원 적층방법을 통한 극미세 3 차원 형상을 제작하는 나노 스테레오리소그래피 공정에서 단위 복셀의 세장비와 단면 직경은 3 차원 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 주는 변수이다.

(2) 복셀은 P-scheme 에 의하여 복셀의 생성이 조절되며 낮은 레이저 출력에 의하여 낮은 세장비를 확보할 수 있다.

(3) 본 연구에서 제안한 P&T scheme 은 10 ms 이상의 충분한 조사시간에서 복셀이 안정적으로 생성되는 최소 레이저 출력을 구한 다음에 조사시간을 점차로 줄여나가서 세장비와 단면 직경이 작은 단위 복셀을 얻는 방법이다. 간단한 실험을 통하여 제안된 P&T scheme 의 효과를 검증하였으며 이 방법으로 3 차원 형상의 정밀도 확보가 용이할 것으로 판단된다.

후기

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

참고문헌

1. Chou, S.Y., Keimel, C., Gu, J., "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," Nature, vol.417, no.20, pp.835-837, 2002.
2. Xia, Y., Whitesides, G.M., "Soft lithography," Angew. Chem. Int. Ed., vol.37, pp.550-575, 1998.
3. Loo, Y.L., Lang, D.V., Rogers, J.A., Hsu, J.W.P., "Electrical contacts to molecular layers by nanotransfer printing," Nano Letters, vol.3, no.7, pp.913-917, 2003.
4. Kim, Y.S., Suh, K.Y., Lee, H.H., "Fabrication of three-dimensional microstructures by soft molding," Applied Physics Letters, vol.79, no.14, pp.2285-2287, 2001.
5. Austin, M.D., Ge, H., Wu, W., Li, M., Yu, Z., Wasserman, D., Lyon, S.A., Chou, S.Y., "Fabrication of 5 nm line width and 14 nm pitch features by nanoimprint lithography," Appl. Phys. Letters, vol.84, no.26, pp.5299-5301, 2004.
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., "Development of a nano replication printing (nRP) process using a voxel matrix scanning scheme," J. of KSPE, vol.21, no.2, pp.210-217, 2004.
8. Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong, H.J., "Development of contour offset algorithm in nRP process for fabricating nano-precision features," J. of KSPE, vol.21, no.6, pp.160-166, 2004.