

단신

다중조사 복셀 매트릭스 스캐닝법을 이용한 이광자 중합에 의한 마이크로 3차원 곡면형상 제작

임태우 · 박상후 · 양동열[†] · 공홍진* · 이광섭**

한국과학기술원 기계공학과, *한국과학기술원 물리학과,

**한남대학교 고분자공학과

(2005년 1월 31일 접수, 2005년 6월 29일 채택)

Fabrication of Three-Dimensional Curved Microstructures by Two-Photon Polymerization Employing Multi-Exposure Voxel Matrix Scanning Method

Tae Woo Lim, Sang Hu Park, Dong-Yol Yang[†],
Hong Jin Kong*, and Kwang-Sup Lee**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Science Town,
Daejeon 305-701, Korea

*Department of Physics, KAIST, Science Town, Daejeon 305-701, Korea

**Department of Polymer Science and Engineering,
Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

(Received January 31, 2005; accepted June 29, 2005)

초록 : 본 연구에서는 나노/마이크로 소자 및 MEMS 제작에 활용가능하고 또한 수십 마이크로미터 크기의 3차원 곡면을 가진 형상을 제작하기 유리한 이광자 광중합을 이용한 다중조사 복셀 매트릭스 스캐닝법(multi-exposure voxel matrix scanning method)에 의한 나노 복화공정을 개발하였다. 이 공정을 통하여는 높이에 따라 14가지의 색을 가진 등고선으로 표현된 3차원 자유곡면 형상을 적층방식이 아닌 단일 층으로 3차원으로 제작할 수 있다. 여기서 수광각도가 1.25인 집광렌즈를 사용하여 레이저의 조사시간에 따라 1.2 μm 에서 6.4 μm 까지 변하는 복셀의 높이 차이를 이용하여 3차원 곡면 제작이 가능하다. 본 연구의 유용성을 검토하기 위하여 몇 가지 3차원 곡면형상을 초미세 입체 패터닝 공정에서 사용하는 일반적인 적층방식을 사용하지 않고 단층으로 제작하여 시간을 단축하였다.

Abstract: Three-dimensional (3D) microfabrication process using two-photon polymerization (TPP) is developed to fabricate the curved microstructures in a layer, which can be applied potentially to optical MEMS, nano/micro-devices, etc. A 3D curved structure can be expressed using the same height-contours that are defined by symbolic colors which consist of 14 colors. Then, the designed bitmap figure is transformed into a multi-exposure voxel matrix (MVM). In this work, a multi-exposure voxel matrix scanning method is used to generate various heights of voxels according to each laser exposure time that is assigned to the symbolic colors. An objective lens with a numerical aperture of 1.25 is employed to enlarge the variation of a voxel height in the range of 1.2 to 6.4 μm , which can be controlled easily using the various exposure time. Through this work, some 3D curved micro-shapes are fabricated directly to demonstrate the usefulness of the process without a laminating process that is generally required in a micro-stereolithography process.

Keywords: nano-stereolithography process, 3D micro-curved structures, two-photon polymerization, multi-exposure voxel matrix.

1. 서론

정보통신, 생체의료, 디스플레이 등의 산업이 고도화됨에 따라 정밀화, 고집적화된 부품의 개발이 절실하게 요구되고 있다. 이를 위한 지금까지 대부분의 나노/마이크로 부품의 제작은 리소그래피법에 의한 2차원 패터닝 공정이 주요하였다. 이와 더불어 최근에는 저비용 및 대량생산을 고려하여 고가의 포토 마스크 없이 직접적으로 패터닝 형상을 제작할 수 있는 공정에 대한 연구로서 수정유리 몰드를 이용하여 패터닝을 직접적으로 찍어서 제작하는 나노 임프린팅 공정(nano-imprinting)과¹ 자기정렬 고분자를 이용하는 소프트 리소그래피 공정(soft lithography) 등을² 중심으로 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 이러한 2차원 패터닝 기술을 바탕으로 하여 보다 부품의 성능을 높이기 위하여 극소형 3차원 소자 제작에 관한 연구도 최근 큰 관심의 대상이 되고 있다.³ 특히 현재까지 진행된 연구에서 극소형의 완전한 3차원 형상을 제작할 수 있는 가장 유리한 방법중의 하나는 이광자 유도 광중합(two-photon initiated photopolymerization)을 이용한 나노 스테레오 리소그래피 공정으로 2차원 단면 형상을 적층하여 임의의 3차원 형상을 제작하는 방식이다.⁴⁻¹⁰ 이 방법은 3차원 광자결정체(3D photonic crystals) 등과 같이 수백 나노미터의 정밀도를 요구하는 정밀한 3차원 형상을 제작할 수 있는 장점이 있으나 반면에 일반적으로 적층방식을 이용하기 때문에 제작시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 렌즈 등과 같이 3차원의 요철형태(concave or convex shape)의 곡면을 갖게 하는 적층방식을 이용하지 않고 이광자 흡수 광중합 현상을 이용하여 단일층으로 제작할 수 있는 공정을 개발하였다. 이 공정은 14가지 색으로 등고선을 표현한 3차원 곡면 형상 비트맵 그림을 이용하여 다중조사 복셀 매트릭스(multi-exposure voxel matrix; MVM)로 변환시킨 다음 각 색깔에 해당되는 조사시간을 할당하여 다양한 형태의 3차원 곡면을 제작하도록 하였다. 본 연구에서 개발된 공정의 유용성을 검토하기 위하여 기본 형상 및 제주소 점 형상을 단층으로 제작해 보았다.

2. 이광자 광중합에 의한 3차원 곡면제작

2.1 광중합에 의한 복셀길이 변화

이광자 흡수 광중합에 의한 고분자화 현상에 대한 연구가 최근 몇 년간 활발하게 진행되고 있다.^{4,13} 레이저의 초점부에 생성되는 복셀의 길이는 식 (1)과 같이 레이저의 출력과 조사시간 그리고 수광각도의 함수로 표현될 수 있다.¹¹

$$I(P, t) = \frac{2\lambda}{\pi\mu^2} \left[\left(\frac{4\pi^2 P^2 t \mu^4}{E_m \cdot \lambda^4} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서 $\mu = [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^2$, I 는 복셀 길이, P 는 레이저 출력, t 는 조사시간, NA 는 수광각도, n 은 굴절률, E_m 는 고분자화가 되기 위한 임계에너지(threshold energy)를 의미한다. 식 (1)에서 복셀의 길이는 레이저의 출력과 조사시간이 클수록 증가하고 수광각도가 작을수록 길이 변화의 폭이 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 수광각도가 1.25인 렌즈를 사용하였다.

복셀길이 변화는 이론적 연구에서 나타낸 바와 같이 3차원 곡면을

[†]To whom correspondence should be addressed. E-mail: dyayang@kaist.ac.kr

가진 형상을 단층으로 제작하기 위해서는 조사시간에 따라 복셀의 길이 차이가 클수록 형상제작이 용이하다. Figure 1에는 실험을 통하여 얻은 공정변수에 대한 복셀길이 변화를 나타내었는데, 복셀은 조사시간이 50 ms 이내에서 가장 급격하게 변화되는 것을 볼 수 있다. 또한 레이저의 여러 출력세기(80~280 mW)에서 조사시간의 변화에 따른 복셀의 길이 변화를 보면 레이저 출력이 높을수록 조사시간에 따른 복셀길이 변화가 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 출력 80 mW에서 형상을 제작하였으며 이때 복셀의 길이 변화는 조사시간에 따라 약 5.2 μm 에 이르는 것으로 나타났다.

2.2 다중조사 복셀 매트릭스 스캐닝법

기존 연구의 2차원 흑백 비트맵 그림으로부터 마이크로 패턴으로 제작하는 나노 복화공정(nano-replication printing process)¹⁴ 개신하여 레이저 조사시간을 복셀단위로 다르게 조절할 수 있는 다중조사 복셀 매트릭스 스캐닝법(MVM scanning method)을 제안하여 14색으로 높이 데이터를 표현한 비트맵 그림으로부터 3차원 곡면형상을 제작하도록 하였다. 이러한 14가지 색을 가진 비트맵 그림은 단위 픽셀 당 해당되는 색을 각각 숫자로 표시한 MVM으로 변환한다. 이때 사용된 MVM의 각 색과 그에 대응되는 숫자는 Figure 2와 같다.

여기서 255 숫자를 가진 흰색에서는 레이저를 차단하여 복셀이 생성되지 않도록 하고 나머지 색상에서는 원하는 조사시간을 입력하여 색깔별로 복셀의 높이가 다르게 생성되도록 하였다(이하 각 색은 ①~⑭으로 표기함). 또한 각 색에 해당하는 높이를 지정하기 위하여 Figure 1의 기초 실험결과를 통하여 얻어진 조사시간에 따른 복셀길이 변화값을 이용하였다.

색깔에 따라 각각의 복셀높이에 대한 조사시간을 입력할 수 있는데 본 연구에서는 검정색(①)을 가장 낮은 높이로 지정하였으며,

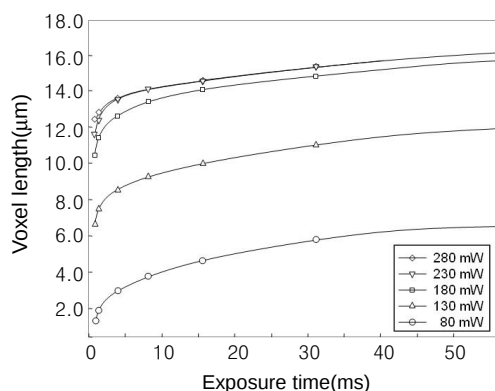


Figure 1. Experimental results on the variation of voxel length dependent on exposure time from 1 ms to 50 ms under various laser power.

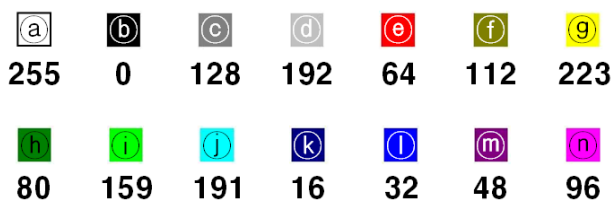


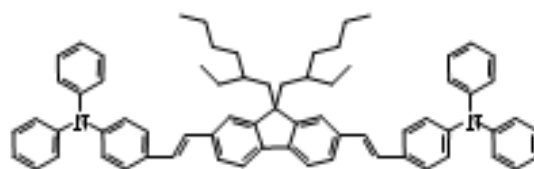
Figure 2. The colors and their corresponding number used in the multi-exposure voxel matrix.

Figure 2 좌측 상단의 검정색(①)부터 시작하여 우측으로 갈수록 높이가 높아지도록 하여 우측 하단 보라색(⑭)의 경우 가장 높은 높이를 가지도록 하였다. 이러한 14가지 색으로 표현된 매트릭스를 이용하여 다양한 3차원 곡면형상을 제작하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 물질

본 연구에 사용된 광중합 레진은 이광자 흡수반응을 향상시키기 위하여 이광자 흡수 색소(photosensitizer) 0.1 %wt와 SCR500 레진을 혼합하여 사용하였다. 이광자 흡수 색소 TP-Flu-TP2는 2,7-dibromo-9,9-diethylhexyl-9H-fluorene과 diphenyl(4-vinylphenyl)amine의 Heck 반응에 의하여 합성하였다.¹⁵



이 색소의 양자효율은 fluorescein을 기준으로 하여 측정한 결과 0.78이었으며, 나노초 레이저를 이용하여 측정된 형광 소실 시간은 0.84 ns이었다. 또한 80 fs 레이저로 측정된 최대 이광자 흡수 횡단면 값은 740 nm에서 954 GM으로 평가되었다. 흡수와 형광 스펙트럼을 분석한 결과 최대 흡수 및 형광 방출 파장은 411과 472 nm에서 각각 나타났다.¹⁶

3.2 단층으로 3차원 곡면형상 제작

본 연구에서 3차원 곡면형상을 단층으로 제작하기 위하여 Figure 3에 개략적으로 나타낸 것처럼 광 조형 시스템을 구축하였다. 광원으로 사용된 레이저는 80 fs 이하의 펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저(Ti:Sapphire mode-locked laser)이며 레이저 빔의 x, y축의 제어는 갈바노 스캐너(galvano mirror)를 이용하고 z축 방향에 대한 제어는 피에조 스테이지(piezoelectric stage)로 수행하였다. 또한 레이저 빔의 on/off 제어를 하기 위하여 갈바노 셔터를 사용하여 조사시간이 1 ms 수준까지 제어하였다.

이 장치를 이용하여 조사시간에 따른 복셀의 길이 차이가 큰 레

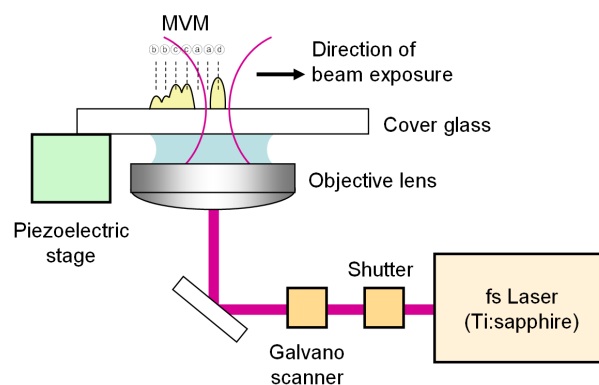


Figure 3. Schematic diagram of system setup and a multi-exposure voxel scanning method.

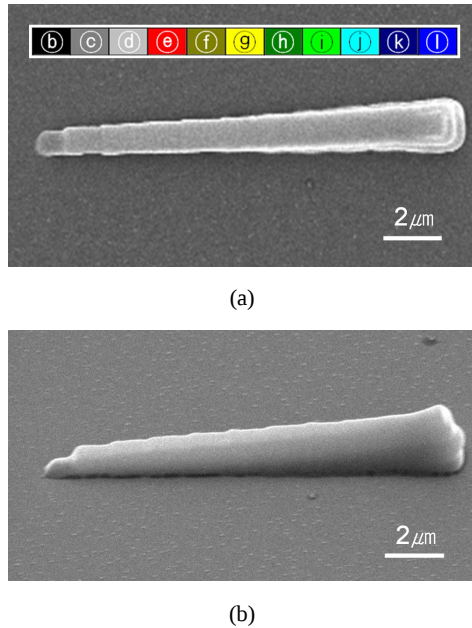


Figure 4. SEM images of a fabricated line using multi-exposure voxel matrix scanning method with (a) a top view and (b) an inclined view.

이저 출력 80 mW에서 조사시간을 변화시키며 복셀의 높이를 조절하여 단층으로 형상을 제작해보았다. Figure 4(a) 와 (b)에는 11가지 색상으로 구성하여 각각의 조사시간을 달리하여 만든 선 형상을 나타낸 것이다. 검정색(㉠)을 가장 낮은 높이로 하고, 보라색(㉡)을 가장 높은 높이로 하여 각 색상의 높이 차이가 0.2 μm 가 되도록 조사시간을 달리하면서 제작하였다. Figure 4(a)에서 조사시간이 증가하는 경우 복셀의 높이도 증가하지만 복셀의 폭도 같이 증가하기 때문에 선 형상이 높이에 따른 폭의 변화도 존재함을 알 수 있다. 따라서 향후 정밀한 제작을 위하여 조사시간에 따른 폭 변화량을 고려한 공정개발이 필요할 것으로 사료된다. 또한 색상간의 높이 차이를 줄여서 조사시간을 변경할 경우 높이의 변화가 부드럽게 증가하는 형태로 제작될 것으로 판단된다.

Figure 5(a)는 각 색깔간의 높이차이를 0.05 μm 로 하여 10가지의 색상으로 등고선을 표현한 제주도 그림 형상이다. 이것을 MVM으로 전환한뒤 실제 제작한 결과를 Figure 5(b)에 나타내었다. 제주도의 전체적 형상은 가로가 길쭉한 타원형태로서 가로폭이 약 74 km, 세로폭이 약 41 km, 한라산 정상이 약 2 km이므로 제작할 형상의 최대 높이 차이를 0.6 μm 로, 가로폭을 약 20 μm 가 되도록 하여 제작이 가능하였다.

4. 결론

본 연구에서는 이광자 흡수 광증합시에 레이저의 조사시간에 따라 복셀의 길이가 달라지는 현상을 이용하여 3차원 곡면형상을 제작하는 방법을 제안하였다. 개발된 공정은 14가지 색상으로 높이를 표현한 비트맵 그림 파일을 이용하여 다중조사 복셀 매트릭스로 전환하여 제작하는데 레이저의 조사시간에 따라 높이가 다른 곡면을 보조 공정없이 단층으로 제작할 수 있기 때문에 기존의 여러 층을 적층하는 방식에 비하여 3차원 형상제작을 빠르게 할 수 있는

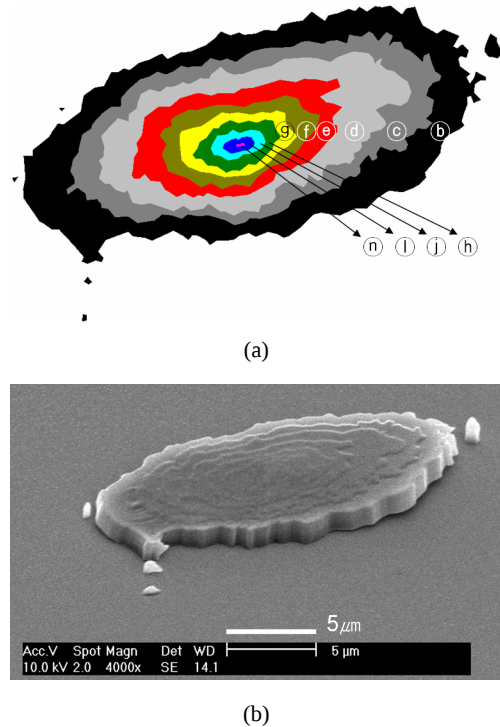


Figure 5. (a) A designed multi-colored bitmap figure and (b) a SEM image of fabricated micro-Jeju-island.

장점이 있다. 선 형상과 제주도 섬 형상의 예제 제작을 통하여 개발된 공정의 유용성을 검토할 수 있었다. 따라서 마이크로 렌즈 등을 제작할 때 본 연구에서 개발된 공정이 활용가능할 것으로 사료된다.

감사의 글 : 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다. 또한 본 연구의 일원인 K.-S. Lee는 과학기술부 신기술융합사업단과 한국과학재단 기능성고분자연구 센터의 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. S. Y. Chou, C. Keimel, and J. Gu, *Nature*, **417**, 835 (2002).
2. Y. Xia, and G. M. Whitesides, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **37**, 550 (1998).
3. M. H. Han, W. S. Lee, S. K. Lee, and S. S. Lee, *Sensors Actuat. A-Phys.*, **111**, 14 (2004).
4. S. Maruo and S. Kawata, *J. Microelectromech. Syst.*, **7**, 411 (1998).
5. S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, *Nature*, **412**, 697 (2001).
6. H. B. Sun, T. Takada, and S. Kawata, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3173 (2001).
7. H. B. Sun, T. Tanaka, and S. Kawata, *App. Phys. Lett.*, **80**, 3673 (2002).
8. J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, and B. N. Chichkov, *Opt. Lett.*, **28**, 301 (2003).
9. K. Kaneko, H. B. Sun, X.M. Duan, and S. Kawata, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2091 (2003).
10. H. B. Sun, M. Maeda, K. Takada, J. W. M. Chon, M. Gu, and S. Kawata, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 819 (2003).

11. H. K. Yang, M. S. Kim, S. W. Kang, K. S. Kim, K.-S. Lee, S. H. Park, D. Y. Yang, H. J. Kong, H. B. Sun, S. Kawata, and P. Fleitz, *J. Photopolymer Sci. & Tech.*, **17**, 385 (2004).
12. S. H. Park, T. W. Lim, D. Y. Yang, H. J. Kong, K. S. Kim, and K.-S. Lee, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **25**, 1119 (2004).
13. S. H. Park, T. W. Lim, D. Y. Yang, H. J. Kong, and K.-S. Lee, *Opt. Eng.*, submitted (2004).
14. T. W. Lim, S. H. Park, D. Y. Yang, S. W. Yi, and H. J. Kong, *KSPE*, **26**, 160 (2004).
15. H. A. Dieck and R. F. Heck, *J. Am. Chem. Soc.*, **96**, 1133 (1974).
16. S. H. Park, T. W. Lim, D. Y. Yang, H. J. Kong, and K.-S. Lee, *Polymer(Korea)*, **28**, 305 (2004).