

3차원 마이크로 디바이스 개발을 위한 나노 스테레오리소그래피 공정 개발에 관한 연구

論 文
55C-1-10

Development of Nano-Stereolithography Process for Precise Fabrication of Three-Dimensional Micro-Devices

朴相厚[†] · 林泰佑^{*} · 梁東烈^{*} · 李伸旭^{**} · 孔弘珍^{**} · 李光燮^{***}

(Sang Hu Park · Tae Woo Lim · Dong-Yol Yang · Shin Wook Yi · Hong Jin Kong · Kwang-Sup Lee)

Abstract - A nano-stereolithography (NSL) process has been developed for the fabrication of three-dimensional (3D) micro-devices with high spatial resolution of approximately 100 nm. In the NSL process, a complicated 3D structure can be created by stacking layer-by-layer, so it does not require any sacrificial layer or any supporting structure. A laminated layer was fabricated by means of solidifying liquid-state monomers using two-photon absorption (TPA) which was induced by a femtosecond laser. When the fabrication of a 3D stacked structure was finished, unsolidified liquid resins were rinsed by ethanol to develop the fabricated structures; then, the polymerized structure was only left on the glass substrate. Through this work, several 3D microstructures such as a micro-channel, shell structures, and photonic crystals were fabricated to evaluate the possibility of the developed system.

Key Words : Two-Photon Polymerization, Nano-Stereolithography, 3D Microstructures, Femtosecond Laser

1. 서 론

최근 고 부가가치의 상품 개발을 위하여 전자/반도체, 정보통신, 바이오/생명과학, 환경/에너지, 및 전통적 기계산업에서까지 나노/마이크로 기술을 응용하기 위한 연구가 지속적으로 추진되고 있으며 관련된 상품을 출시하고 있다. 또한 유비쿼터스 시대로 접어들면서 대용량의 정보를 저장하거나 송신하기 위한 정보저장장치, 극소형 기기에 대한 수요가 급증하고 있으며 이러한 제품의 기반이 되는 반도체는 점차로 더 작은 영역에 많은 소자를 집적하는 고집적화되고 있으며 최근의 연구결과에서는 60 nm 선폭을 가진 반도체 메모리가 개발되었다. 또한 앞으로 수 나노미터 수준에서 반도체 소자들을 제작하고 제어하는 나노기술이 본격화될 전망이다. 이러한 나노기술 중에서도 가장 기반이 되는 기술은 나노 공정기술을 들 수 있다. 나노 공정기술은 나노 크기의 물체를 원하는 형태로 제작하는 기술로 나노 제품개발을 위한 핵심기술이라 할 수 있다. 또한 나노공정 기술이 단순히 형상을 제작하는 생산기술에 그치지 않고 이 기술을 통하여 재료의 새로운 특성과 기능을 유발한다는 점에서 그 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

나노기술에 대한 최근 연구동향은 저비용으로 대량생산이 가능한 나노 공정기술에 초점을 두고 관련된 연구들이 진행되고 있으며, 그 결과로써 대표적인 연구사례로는 UV광을

이용한 나노 임프린트 공정과 polydimethylsiloxane (PDMS) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피 (soft lithography) 공정 등이 있다 [1-4]. 정밀한 패터닝 공정에 활용되는 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography) 경우에는 선풍 정밀도가 5 nm까지 달성되고 있다 [5]. 그러나 이러한 방법들은 복잡한 3차원 형상을 제작하기에는 한계가 있거나 제작 비용이 많이 든다. 따라서 최근 몇 년간 임의의 형상을 가진 극미세 3차원 형상을 제작하기 위하여 펨토초 레이저의 이광자 흡수 광중합 (two-photon polymerization; TPP) 현상을 이용하여 100 nm 수준의 정밀도를 가지며 3차원 형상을 직접적으로 제작할 수 있는 공정에 대한 연구가 진행되었다 [6-11]. 이광자 흡수 광중합 현상은 고출력 레이저에 의한 비선형 광학현상으로 펨토초 레이저의 높은 침투출력 부근에서 광자 두 개를 10^{-15} s 이내에서 동시에 흡수하여 광중합 레진이 중합되는 현상인데 빛의 회절한계 이하의 정밀도로 제작이 가능하여 고정밀도를 요구하는 형상제작 공정에 활용이 가능하다. TPP현상을 이용한 경우 다른 공정으로 제작하기 어려운 3차원 형상 제작이 가능하며, 마스크 없이 직접적으로 100 nm 수준의 정밀도를 가지는 복잡한 형태의 패턴이 제작 가능하다 [12-15]. 또한, 최근에는 고강성을 가진 구조물을 제작하기 위하여 이광자 흡수 가교 공정(two-photon absorbed crosslinking process)과 세라믹 레진을 이용하여 수 마이크로 크기의 3차원 세라믹 형상을 제작하는 공정에 대하여 연구가 진행되고 있다 [16].

이러한 극미세 3차원 형상의 예상 응용분야는 3차원 광결정체 (3D photonic crystal) 제작, 고밀도 정보저장 장치, 나노 반응기 등 다양하다[15]. 따라서 본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용한 TPP 현상으로 3차원 형상을 제작하기 위한 나노 스테레오 리소그래피 (nano-stereolithography; nSL) 공정을 개발하고 개발된 공정의 신뢰성을 평가하기 위하여 3차원 예제를 제작해 보았다.

† 正 會 員 : 韓國科學技術院 機械工學科 박사과정

E-mail : psh1@kaist.ac.kr

* 非 會 員 : 韓國科學技術院 機械工學科

** 非 會 員 : 韓國科學技術院 物理學科

*** 非 會 員 : 韓南大學校 工科大學 生命情報新素材工學科

接受日字 : 2005年 10月 12日

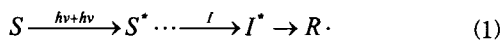
最終完了 : 2005年 10月 31日

2. 이광자 흡수 광중합에 대한 이론적 연구

2.1 이광자 흡수 광중합현상

이광자 흡수현상은 이광자 흡수 색소가 하나의 광자를 흡수한 뒤 $10^{-15} \sim 10^{-18}$ 초 동안에 다른 광자를 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 된 뒤에 약간의 에너지를 소실한 후 빛을 방출하고 다시 바닥 상태로 돌아가는 비선형 광학현상을 말한다. 이 때 광개시제 (photoinitiator)가 방출된 단파장의 빛을 흡수하여 전기적으로 들뜬 상태가 되고 일반적으로 10^{-6} 초 이내의 짧은 시간에 세 가지 형태 중 한 형태로 진행된다 [17]. 첫째로 들뜬 상태에서 빛을 방출하여 다시 광개시제로 돌아오거나, 둘째로 라디칼로 화학적 분해가 일어난 뒤 바로 광경화수지 내에 존재하는 산소 또는 페놀계의 라디칼 소광 물질 (radical quenching agent)과 반응하여 단량체와 결합능력을 상실하는 형태로 변환되거나, 셋째로 라디칼을 유지하면서 단량체 (monomer)와 결합하여 사슬성장 중합반응을 통하여 고분자 물질 (polymer)로 변환된다.

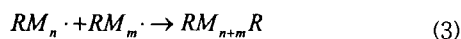
빛 에너지에 의하여 중합반응이 진행되는 과정에서 중요한 역할을 하는 것은 광개시제와 이광자 흡수 색소이다. 광개시제는 중합반응 개시를 위하여 빛에 민감하게 반응하는 케톤계 (ketone)의 저분자 물질이며 식(1)과 같이 이광자 흡수 색소가 발광하는 빛을 받아서 라디칼로 변환하게 된다.



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 고분자화되기 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.



중합개시가 되는 라디칼 생성량 (R_i)은 식(4)와 같이 광개시제에 의해 빛이 흡수되는 확률 (I_{abs})과 광자를 받은 광개시제에서 들뜬 상태로 되어 초기 라디칼로 변환되는 양 (F), 그리고 그러한 라디칼 중에서 단량체와 반응을 하는 양 (f)에 비례하게 된다 [17].

$$R_i = I_{abs} \times F \times f \quad (4)$$

2.2 복셀크기에 대한 이론적 연구

개발된 나노스테레오리소그래피 공정에서 형상을 제작하는 방법은 일반적인 패속조형 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. 따라서 단위 복셀의 크기가 제작되는 형상의 정밀도에 직접적인 영향을 주기 때문에 이론적으로 공정변수에 대한 영향을 알아보았다. 레이저 초점부의 형상을 쌍곡선 (hyperbola) 형태로 가정하고 이광자 흡수 경화현상이 레이저의 조사시간 (exposure time)과 강도 (intensity)의 자승에 비례하는 점을 이용하여 관련 수식을 유도해 보면 복셀의 직경 (d), 복셀의 길이 (l), 그리고 레이저 초점부 반경 (ω_0)은 식(5) ~ 식(7)과 같이 표현된다[12].

$$d(P, t) = \omega_0 \left[\ln \left(\frac{4P^2}{\pi^2 \omega_0^4} \cdot \frac{t}{E_{th}} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$l(P, t) = \frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda} \left[\left(\frac{4P^2 \cdot t}{\pi^2 \omega_0^4 E_{th}} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (6)$$

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan[\sin^{-1}(NA/n)]} \quad (7)$$

여기서 NA 는 수광각도 (numerical aperture), n 은 대물렌즈 사이의 매체의 굴절률을 나타낸 것이고 P 는 레이저 출력, t 는 조사시간, E_{th} 는 이광자 중합이 발생하는 임계 에너지를 나타낸다.

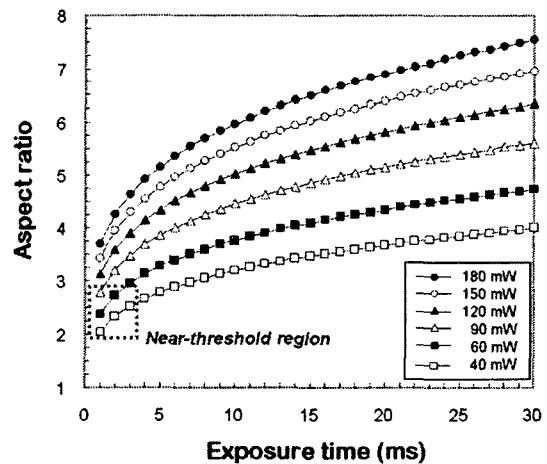


그림 1. 이론적으로 구한 레이저 출력 및 조사시간에 따른 복셀의 종횡비 변화곡선.

Fig. 1. Theoretical prospects on the variation of aspect ratio of a voxel according to laser power and exposure time.

식 (5)-(7)을 이용하여 레이저 출력, 조사시간에 따른 복셀의 크기변화를 알아보면 레이저의 출력과 조사시간이 클수록 복셀의 직경과 길이가 증가함을 알 수 있다. 그리고

레이저의 조사시간이 일정 값 이상으로 큰 경우에 복셀의 길이는 직경에 비하여 레이저의 출력 조건에 따라 증가하는 폭이 커짐을 알 수 있다. 따라서 정밀한 형상을 제작하기 위해서는 레이저의 출력과 조사시간을 최소화 하는 것이 중요하며 이러한 낮은 광에너지 영역에서 이광자 광중합 반응이 일어나는 레진개발에 대한 연구도 중요하다. 그리고 복셀의 종횡비 (aspect ratio)는 적층방식으로 3차원 형상을 제작하는데 상당히 중요하며, 이와 관련된 연구가 최근에 진행되고 있으며 [18], 그림 1에는 공정조건에 따른 종횡비의 변화를 이론적으로 나타내었다.

3. 나노 스테레오리소그래피 공정

3.1 실험장치 구성

본 연구에서 개발한 나노 스테레오리소그래피 장치의 개략적인 구성은 다음과 같다. 사용된 레이저는 펄스 폭을 갖는 Ti:sapphire 레이저를 사용하였으며, 작동주파수는 80 MHz, 펄스 폭은 100 fs 이하이며 중심 파장은 780 nm 이다. x축과 y축의 레이저빔 위치를 제어하기 위해서 갈바노미터 (Galvano-mirror) 타입의 스캐너를 사용하였으며 높이 방향 (z축)의 제어는 압전소자 타입 (piezoelectric nano-stage)의 스테이지를 이용하였다. 그리고 셔터와 스캐너 그리고 z축 스테이지는 제어 프로그램에 의하여 제어되며, 약 1000배의 고 배율 렌즈가 부착된 CCD카메라를 이용하여 제작과정을 모니터링 할 수 있도록 하였다.

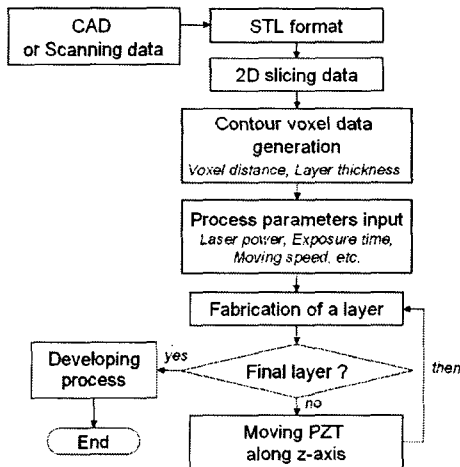


그림 2. 개략적인 나노 스테레오리소그래피 공정절차.
 Fig. 2. Schematic diagram of nano-stereolithography procedures for the fabrication of three-dimensional micro-structures by stacking up layer-by-layer.

그림 2에 나타낸 개발된 시스템의 개략적인 작동원리에 대하여 살펴보면, 레이저 광은 아이솔레이터(isolate)와 셔터를 지나서 입력 데이터에 따라 스캐너에 의하여 x축과 y축 위치를 제어하도록 하였다. 이 때 레이저 광의 초점은 z축 스테이지를 조절하여 CCD카메라를 이용하여 150 μm 두께의 얇은 유리판에 방울 형태로 올려져 있는 레진에 생성

되도록 한 뒤, CAD를 이용하여 모델링된 형상을 시스템 제어 프로그램을 이용하여 2차원 단면을 연속적으로 적층하는 방식으로 제작하도록 하였다. 그림 3에는 나노 스테레오리소그래피 공정의 전체적인 절차를 나타내었다. 설계된 3차원 형상은 stereolithography (STL) 파일형태로 전환하여 2차원 데이터 형태로 슬라이싱하게 된다. 이러한 STL 파일은 약자로서 미국의 3D System 사에 의해 개발된 파일 포맷으로 3차원 형상의 외곽을 삼각형 패치와 그 법선 벡터를 이용하여 근사화 시킨 것이며, 현재 많은 패속조형 (rapid prototyping)장비의 입력 데이터로 사용되어지고 있다. 2차원 데이터 생성은 STL 파일의 삼각형 패치와 슬라이싱 면에서 만나는 점을 연결하여 루프 (loop)를 생성하도록 하였다. 이러한 루프를 따라 복셀간격을 조절하여 점조사 (pin-point) 방식으로 레이저를 조사되도록 하였다.

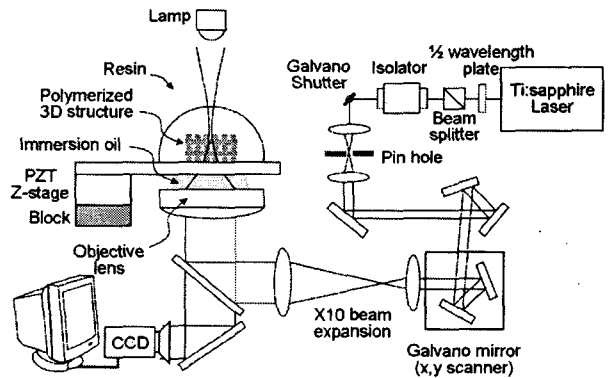


그림 3. 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정.
 Fig. 3. Schematic illustration of nano-stereolithography.

3.2 이광자 흡수 물질

이광자 흡수 색소인 TP-Flu-TP2는 2,7-dibromo-9,9-diethylhexyl-9H-fluorene과 diphenyl(4-vinylphenyl) amine의 Heck반응에 의하여 합성하였다 [12]. 이광자 흡수 광중합을 위한 단량체는 일본합성 고무사의 우레탄 아크릴계 단량체 (urethane acrylate monomer), 올리고머 (oligomer), 그리고 광개시제 (2-benzyl-2-dimethylamino-1-(4-morpholinophenyl)-butanal-1 and 1-hydroxy-chrohexylphenylketone)가 혼합된 SCR 500이며, 이 레진 속에 0.1 wt%의 TP-Flu-TP2를 혼합하여 사용하였다.

4. 극미세 3차원 형상제작

3차원 모델링 형상을 2차원 데이터로 슬라이싱 한 뒤 스캐닝 경로를 설정하게 된다. 이때 2차원 단면을 전면 조사하는 방식 (raster scanning method)과 외곽선만 조사하는 방식 (contour scanning method)이 있다. 여기서 외곽선만 조사하는 방식을 사용할 경우 제작시간을 전면 조사하는 방식에 비하여 90% 이상 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 외곽선만 조사하는 방식을 선택하여 스캐닝 방법을 개발하여 쉘 (shell) 형태로 형상을 제작하도록 하였다. 슬라이싱된 2차원 데이터는 STL 파일에서 슬라이싱 단면과 삼

각형 패치가 만나는 교점 (intersection point)을 이은 것이기 때문에 점조사 방식으로 연속적인 외곽선을 형성하기 위해서 그림 4와 같이 교점 사이의 거리와 공정변수인 복셀간격에 따라 점조사되는 위치를 외곽선상에 재생성 하도록 하였다. 이러한 외곽선을 제작하는 형상의 높이 방향으로 연속적으로 적층하여 3차원 구조물을 제작하였다.

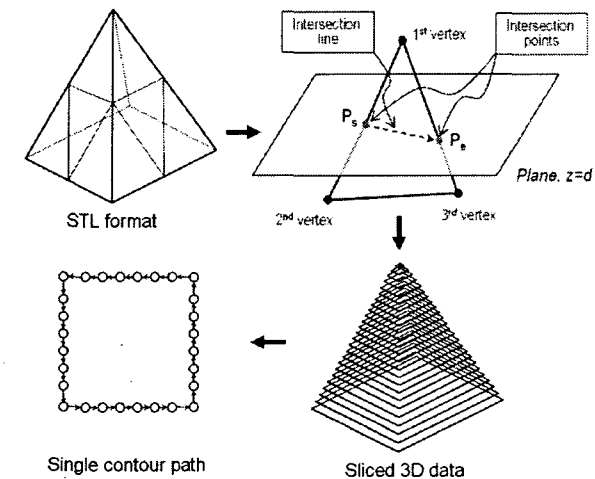


그림 4. STL 파일을 이용한 2차원 단면 데이터 생성과정.
 Fig. 4. Procedure of two-dimensional sliced data generation using STL formatted data.

본 연구에서 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정을 이용하여 마이크로 유체유동 장치 등에 활용가능한 채널, 웰 등 다양한 형상에 대하여 제작해 보았다. 그림 5(a) - 5(d)에는 제작된 형상의 전자현미경 (SEM) 이미지를 나타낸 것이다. 제작된 형상은 레이저 출력 60 mW, 조사시간 1 ms,

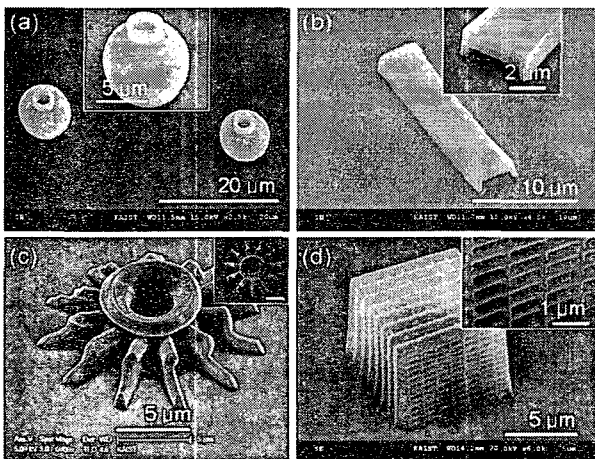


그림 5. 제작된 극미세 3차원 형상사례: (a) 마이크로 단지형상, (b) 마이크로 채널, (c) 마이크로 날개바퀴, (d) 광결정체 형상.

Fig. 5. SEM images of fabricated three-dimensional micro-structures: (a) micro-pots, (b) micro-channel, (c) micro-impeller (scale bar on inset is 5 μm), and (d) photonic crystals. Each insert is a magnified image with different view-angle of the original image.

ms, 적층간격 30 nm 조건으로 제작한 다음 광중합되지 않은 액체상태의 레진 부분은 에탄올 (ethanol)을 이용하여 제거한 뒤 형상을 얻었다. 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정으로 다양한 형태의 극미세 3차원 구조물을 제작할 수 있음을 보였다. 이러한 극미세 구조물은 3차원 채널 내부에 원하는 형태의 패턴이나 구조물을 넣어서 액체의 흐름을 제어하거나 혼합시키는 마이크로 믹서 (micro-mixer) 등에 활용하거나 바이오 칩 (biochip) 개발에 응용할 수 있다. 또한, 그림 5(d)에 나타낸 것처럼 일정한 간격을 가지도록 적층하여 3차원 광결정체 (photonic crystal) 제작에도 활용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 개발한 이광자 광중합을 이용한 나노 스테레오리소그래피 공정은 단광자 흡수와 달리 선풍정밀도가 빛의 회절한계 이하인 100 nm 수준으로 제작이 가능하며 완전한 극미세 3차원 형상을 제작할 수 있는 유일한 나노 공정으로 평가되고 있다. 본 연구의 단위 복셀에 대한 이론적인 연구결과에서 정밀도를 결정하는 복셀의 직경과 높이는 레이저의 조사시간과 출력에 따라 제어가 가능하며, 광중합이 발생하는 임계 에너지 부근에서 복셀형상의 변화가 급격하게 발생함을 알 수 있었다. 따라서 정밀한 복셀을 얻기 위해서는 공정변수인 레이저의 출력과 조사시간을 최소화하는 것이 중요하며, 중형비가 작은 복셀을 얻기 위해서는 레이저의 출력을 최소화하는 것이 더 중요함을 알 수 있다. 그리고 적층방식으로 제작된 다양한 3차원 형상으로부터 개발된 나노 스테레오리소그래피 공정이 나노/마이크로 유체 시스템, 바이오 칩, 그리고 광결정체 제작 등에 활용가능함을 알 수 있다. 또한 기존의 반도체 공정에서 주로 사용하는 광리소그래피 공정으로 제작이 어려운 완전한 3차원 형상제작이 가능하므로 향후 신개념의 극미세 3차원 디바이스 제작이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S.Y. Chou, C. Keimel, J. Gu, Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon, *Nature*, vol. 417, no. 20, pp. 835-837, 2002.
- [2] X.-M. Zhao, Y. Xia, G.M. Whitesides, Fabrication of three-dimensional micro-structures: Microtransfer molding, *Adv. Mater.*, vol. 8, pp. 837-840, 1996.
- [3] E. Kim, Y. Xia, G.M. Whitesides, Polymer microstructures formed by moulding in capillaries, *Nature*, vol. 376, pp. 581-584, 1995.
- [4] S.Y. Chou, P.R. Krauss, P.J. Renstrom, Nanoimprint lithography, *J. Vac. Sci. Techn. B*, vol. 14, no. 6, pp. 4129-4133, 1996.
- [5] M.D. Austin, H. Ge, W. Wu, M. Li, Z. Yu, D. Wasserman, S.A. Lyon, S.Y. Chou, Fabrication of 5 nm linewidth and 14 nm pitch feature by nanoimprint lithography, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 26, pp. 5299-5301, 2004.
- [6] H.B. Sun, M. Maeda, K. Takada, J.W.M. Chon, M.

Gu, S. Kawata, Experimental investigation of single voxels for laser nanofabrication via two-photon photopolymerization, Appl. Phys. Lett., vol.83, no.5, pp.819-821, 2003.

[7] S. Kawata, H.B. Sun, T. Tanaka, K. Takada, Finer features for functional microdevices, Nature, vol.412, no.16, pp.697-698, 2001.

[8] J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, B.N. Chichkov, Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics, Optics Lett., vol.28, no.5, pp.301-303, 2003.

[9] S. Maruo, S. Kawata, Two-photon-absorbed near-infrared photopolymerization for three-dimensional microfabrication, J. of MEMS, vol.7, no.4, pp.411-415, 1998.

[10] H.B. Sun, T. Tanaka, S.Kawata, Three-dimensional focal spots related to two-photon excitation, Appl. Phys. Lett., vol.80, no.20, pp.3673-3675, 2002.

[11] S.H. Park, S.H. Lee, D.Y. Yang, H.J. Kong, K.S. Lee, Subregional slicing method to increase 3D nano-fabrication efficiency in two-photon polymerization, Appl. Phys. Lett., vol 87, pp. 154108, 2005.

[12] S.H. Park, T.W. Lim, D.Y. Yang, H.J. Kong, K.S. Kim, K.S. Lee, Fabrication of Nano-precision PDMS Replica using Two-photon Photopolymerization and Vacuum Pressure Difference Technique, Bulle. Korean Chem. Soc. (communication), vol.25 no.8, pp.1119-1120, 2004.

[13] S.H. Park, T.W. Lim, D.Y. Yang, H.J. Kong, K.S. Lee, Fabrication Process of Nano-precision PDMS Replica using Vacuum Pressure-Difference Technique, Polymer(Korea), vol.28, no.4, pp.305-313, 2004.

[14] S.H. Park, T.W. Lim, D.Y. Yang, H.J. Kong, Fabrication of a PDMS (poly-dimethylsiloxane) Stamp using Nano-Replication Printing Process, J. KSME, vol.28, no.7, pp.999-1005, 2004.

[15] A. Abe et al., Advance in Polymer Science 170-NMR, 3D Analysis, Photopolymerization, Springer, New York, 2004.

[16] T.A. Pham, T.W. Lim, S.H. Park, D.Y. Yang, D.P. Kim, Synthesis of inorganic polymeric photoresistor and its application using lithography techniques, 11th Asian Chemistry Congress (ACC), 24-26 Aug., Seoul Korea, 2005.

[17] J.P. Fouassier, Photoinitiation, Photopolymerization, and Photocuring-Fundamentals and Applications, New York, 1995.

[18] S.H. Park, T.W. Lim, D.Y. Yang, H.J. Kong, K.S. Lee, A Scheme to Control Laser Power and Exposure Time for Fabricating Precise 3-Dimensional Micro-structures using Two-photonPolymerizationJ. Korean Chemical Society, vol. 49, no. 3, pp. 292-299, 2005.

저 자 소 개



박 상 후 (朴 相 厚)

1969년 5월 26일생. 1996년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야: 나노/마이크로 공정개발.
E-mail : psh1@kaist.ac.kr



임 태 우 (林 泰 佑)

1980년 1월 12일생. 2004년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야: 나노/마이크로 세라믹 형상제작 공정.
E-mail : ltwalwalys@kaist.ac.kr



양 동 열 (梁 東 烈)

1950년 11월 30일생. 1973년 서울대학교 기계공학과 졸업(학사), 1975년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 졸업(박사). 1978~현재 한국과학기술원 교수. 관심분야: 소성가공, 패속 조형기술, 나노/마이크로 공정, 창의성 공학.
E-mail : dyyang@kaist.ac.kr



이 신 우 (李 伸 旭)

1977년 2월 11일생. 2004년 한국과학기술원 물리학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야: 레이저 광학 및 미세 레이저 가공.
E-mail : shinwook@kaist.ac.kr



공 홍 진 (孔 弘 珍)

1953년 4월 1일생. 1976년 서울대학교 물리학과 졸업(학사), 1978년 한국과학기술원 물리학과 졸업(석사), 1981년 동 대학원 졸업(박사). 1984~현재 한국과학기술원 교수. 관심분야: 레이저 광학 및 기하 광학. E-mail : hjkong@kaist.ac.kr



이 광 섭 (李 光 燮)

1954년 9월 18일생. 1984년 독일 Freiburg 대학교 화학과 졸업 (이학박사). 1992~현재 한남대학교 생명·정보신소재공학과 교수. 관심분야: 광기능성 고분자, 광자공학용 나노/바이오 신소재.
E-mail : kslee@hannam.ac.kr