

대면적 3 차원 마이크로 형상제조를 위한 스테이지 스캐닝 시스템을 이용한 이광자 흡수 광조형 공정 개발

임태우*, 손 용*, 양동열#, 이신욱**, 공홍진**, 박상후***

Development of Large-area Two-photon Stereolithography Process for the Fabrication of Large Three-dimensional Microstructures

Tae-Woo Lim*, Yong Son*, Dong-Yol Yang#, Shin Wook Yi**, Hong Jin Kong** and Sang-Hu Park***

ABSTRACT

Two-photon stereolithography is recognized as a promising process for the fabrication of three-dimensional (3D) microstructures with 100 nm resolution. Generally, beam-scanning system has been used in the conventional process of two-photon stereolithography, which is limited to the fabrication of micro-prototypes in small area of several tens micrometers. For the applications to 3D high-functional micro-devices, the fabrication area of the process is required to be enlarged. In this paper, large-area two-photon stereolithography (L-TPS) employing stage scanning system has been developed. Continuous scanning method is suggested to improve the fabrication speed and parameter study is conducted. An objective lens of high numerical aperture (N.A.) and high strength material were employed in this system. Through this work, 3D microstructures of 600*600*100 μm were fabricated.

Key Words : Large-area two-photon stereolithography (대면적 이광자 흡수 광조형), 3D microstructures (3 차원 마이크로 형상), Stage scanning system (스테이지 스캐닝 방법)

1. 서론

최근 고집적 및 고기능성을 가진 나노/마이크로 디바이스에 대한 수요증가로 기존의 마이크로 공정기술의 한계가 나타남에 따라 이를 극복하기 위한 새로운 차원의 공정기술이 필요하게 되었다. 이광자 흡수 광경화 현상을 이용한 나노 스테레오리소그래피 공정은 약 100 nm 의 정밀도를 가진 완전

한 3 차원 마이크로 형상 제작에 매우 유리한 공정으로 평가되고 있다.¹⁻³ 최근에는 이광자 흡수 광조형 공정을 이용한 마이크로 오실레이터, 3 차원 광결정, 3 차원 채널, 마이크로 바늘 등의 제작을 통하여 고집적 고효율성 디바이스로서의 응용 가능성이 제시된 바 있다.^{4,7}

지금까지 이광자 흡수 광조형 공정은 제작 공정 개발, 단위 형상 및 제작 정밀도 개선, 고분자,

접수일: 2007 년 7 월 13 일; 게재승인일: 2007 년 11 월 14 일

* 한국과학기술원 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

** 한국과학기술원 물리학과

*** 부산대학교 기계공학부

세라믹, 금속 등 다양한 재료의 개발, 효율적 제작을 위한 제작속도 개선 등 공정개발을 위한 기초 연구 위주로 진행되어왔다.⁸⁻¹⁰ 이 단계에서는 제작이 용이한 갈바노 미러를 이용한 빔 스캐닝 방법이 주로 이루어져왔다. 하지만 빔 스캐닝 시스템의 경우, 그 제작영역이 약 50 μm 이하로 제한되어 다양한 소자제작을 하기에는 불리하다.

따라서, 본 연구에서는 이광자 흡수 광조형 공정을 이용하여 고기능성 3 차원 소자 제작을 위하여 수백 μm 크기의 3 차원 형상을 제작하기 위해 대면적 이광자 흡수 광조형 공정 (L-TPS : Large-area Two Photon Stereolithography)을 개발하였다. 레이저 초점의 미세 위치제어를 위하여 스테이지 스캐닝 시스템을 구성하였으며, 대면적, 고세장비 형상제작을 위하여 고강성 레진과 낮은 개구수 (numerical aperture, N.A.)의 대물렌즈를 이용하였다. 또한, 스테이지 스캐닝 시스템에서의 연속적 스캐닝 방법을 통하여 제작 효율성을 개선하였다.

2. 대면적 이광자 흡수 광조형 공정 개발

2.1 이광자 흡수 광조형 공정의 스캐닝 시스템에 따른 제작특성

기존의 이광자 흡수 광조형 공정에서 이용되어 온 갈바노 미러를 이용한 빔 스캐닝 시스템의 경우 Fig. 1(a)와 같이 레이저빔의 입사각으로 인하여 초점의 2 차원적인 위치를 제어하게 된다. 스캐너의 반응속도가 빨라 정밀한 형상의 빠른 제작에는 유리하지만, 큰 영역의 형상을 제작하기 위하여 갈바노미러의 회전각이 커짐에 따라 대물렌즈에 레이저빔이 입사되지 못하여 제작 가능 영역이 제한되는 단점이 있다. 정사각형의 영역을 가지는 균일한 선 형상의 입력 데이터를 이용하여 제작 가능 영역을 실험한 결과 Fig. 1(b)와 같이 그 제작가능 영역이 약 50 μm 이하로 제한됨을 확인할 수 있다. 또한 빔의 입사각에 따라 입사되는 레이저 빔의 세기가 달라져 위치에 따라 선폭이 달라지는 문제점이 있으며, 균일한 정밀도를 가지는 패턴링 영역이 약 30 μm 이내로 제한된다. 하지만, 실제 응용 소자는 보다 넓은 영역에서의 3 차원 형상을 필요로 하는 경우가 많으므로 대면적 제작에 적합한 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 대물렌즈가 고정된 상태에서 피에조 스테이지를 이용하여 기관을 움직이는 방식

으로 초점의 정밀 위치제어를 하도록 시스템을 구성하였다. 이 경우 Fig. 1(c)와 같이 레이저의 초점은 고정된 상태로 있고 레진이 놓여진 피에조 스테이지가 x,y,z 방향으로 움직이며 제작하게 되므로 스테이지의 특성 및 정밀 제어 기술에 따라 그 제작영역을 넓힐 수 있다.

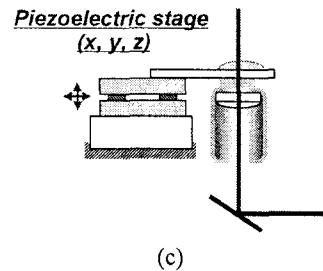
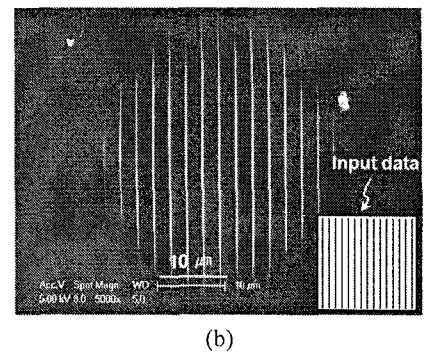
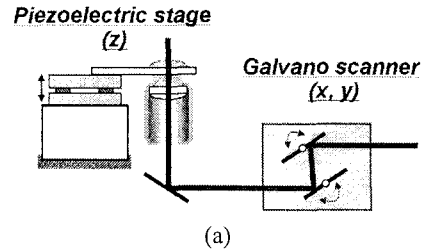


Fig. 1 (a) Schematic diagrams of the Galvano-mirror scanning system and (b) the input data for the test of fabricable area, and the SEM image of the fabricated line pattern at the conditions of 40mW laser power, 1ms exposure time. (c) Schematic diagram of the piezo-stage scanning system

2.2 스테이지 스캐닝 시스템 구성

본 연구에서 개발된 대면적 이광자 흡수 광조형 시스템은 Fig. 2 와 같이 크게 레이저 시스템

부와 레이저 빔 위치 제어부, 그리고 형상제작을 위한 CAD 시스템 제어부로 구성된다.

레이저 시스템부는 레이저 빔의 안정적 공급 및 on/off 를 담당하게 되며 Fig. 3 과 같이 광원 (Laser), 아이솔레이터(Isolator), $\lambda/2$ 플레이트, 셔터 (shutter)로 구성된다. 광원은 모드동기 된 티타늄-사파이어 레이저(Ti:Sapphire mode-locked laser)로서 최대 출력은 1W, 작동 주파수는 80MHz, 펄스 폭은 80fs 이며 파장은 780nm 이다. 광원에서 나오는 펄스 레이저는 아이솔레이터에 의해 반사되어 역행하는 빛이 차단되며 $\lambda/2$ 플레이트를 통하여 레이저의 출력을 조절된다. 셔터는 옵티컬 셔터(optical shutter)로서 최소 회전각에 대하여 약 200 μ s의 반응시간을 가지며 회전할 수 있는 미러를 이용하여 레이저 빔의 방향을 제어함으로써 레이저의 on/off 를 결정한다. 셔터를 지난 빛은 확대되어 대물렌즈 (Objective lens)로 들어가게 되는데 이러한 이유는 입사 빔의 영역을 넓힘으로써 초점 정밀도를 높이기 위한 것이다.¹²

레이저 빔 위치 제어부는 Fig. 4 와 같이 xyz 수동 스테이지, xyz 피에조 스테이지, 지그, 대물렌즈로 구성된다. xyz 수동 스테이지는 지그와 대물렌즈 사이에 시편을 위치시키기 위해 사용된다. xyz 피에조 스테이지는 0.1 nm의 분해능으로 800*800*250 μ m (x,y,z)의 영역을 약 50 ms의 응답속도로 움직인다. 한편, 레이저 조사간격이 30 nm 이하의 경우 형상 정밀도에 영향이 거의 없으므로 본 연구에서는 16bit A/D 보드를 이용하여 800 μ m를 12 nm의 분해능으로 제어하였다.¹³ 피에조 스테이지에 고정된 지그에 커버글래스의 아랫면에 레진이 묻혀진 형태로 되어있는 시편이 놓여지게 되며 커버

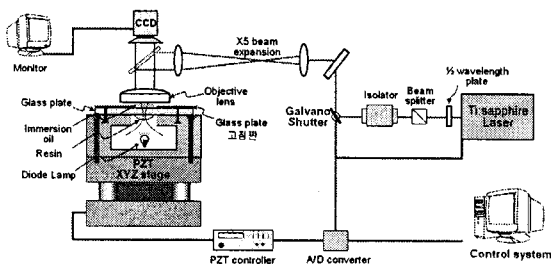


Fig. 2 Schematic diagram of the developed large-area two photon stereolithography apparatus. The system consists of laser system part, positioning system part, and control part

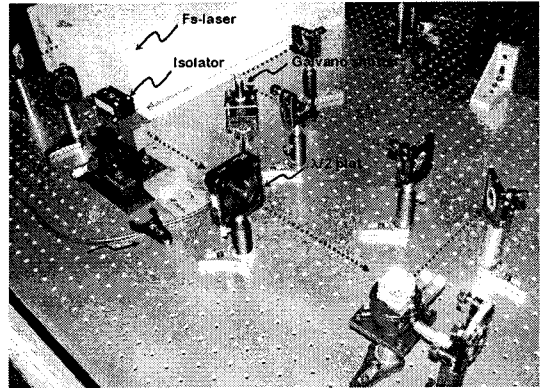


Fig. 3 Laser system part (femto-second laser, isolator, $\lambda/2$ plate and optical shutter)

Table 1 Major components of the developed system and their specification

Components	Model & Specification	Maker
fs laser	Mai Tai (80MHz, 100fs, 780nm)	Spectra-physics
Isolator	BB8-51	Electro-optic Tech
Shutter	Optical scanner (6220H)	Cambridge Tech
X,Y piezo stage	P628.1	PI
Z piezo stage	P622.ZCL	PI
Objective lens	$\times 100$ (NA 1.4), $\times 10$ (NA 0.7)	Olympus
CCD camera	$\times 1000$	Sony
Computer System	Pentium IV	LGE

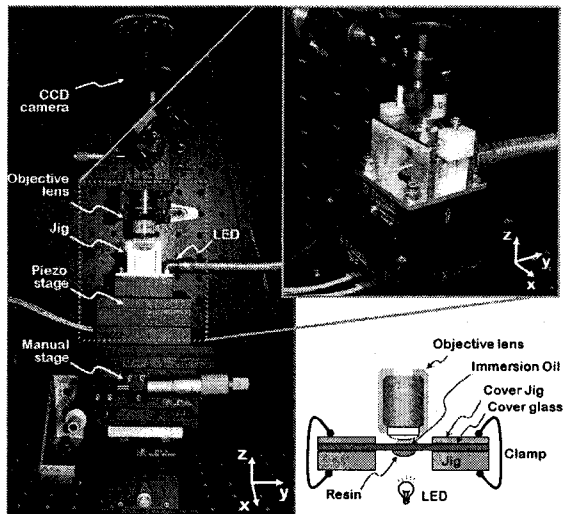


Fig. 4 positioning system of the developed large-area nano-stereolithography

글래스와 대물렌즈 사이에는 집광도를 높이기 위한 이멀전 오일(immersion oil)을 사용하였다. 시스

템에 사용된 대물렌즈는 개구수 1.4 와 0.7 을 사용하였다. 개구수 1.4 의 경우 고 정밀도를 위하여 이 밀전 오일을 사용한 상태에서 사용되며, 이밀전 오일의 표면장력으로 인한 커버글래스의 변형을 막기 위하여 커버글래스 상부를 알루미늄 플레이트로 고정하였다. 개구수가 높을수록 초점거리가 짧아져 제작높이가 제한되게 되므로 수 백 μm 이상의 높이를 가지는 형상을 제작하기 위해서는 개구수 값이 낮은 렌즈를 사용하였다. 식 (1)은 N.A 의 정의를 나타낸다.

$$NA = n \cdot \sin \theta \quad (1)$$

여기서, n 은 렌즈와 빔 초점부 사이의 중간 매질 (intermedium)의 굴절률 (refractive index)을 의미하며, 공기의 경우 1 이 된다. θ 는 렌즈의 광축 (optical axis)과 대물렌즈로 들어가는 빛 중 가장 바깥의 광선으로 이루어지는 각도를 뜻한다. 제작과정은 1000 배의 배율을 가지는 CCD 카메라를 이용하여 모니터링 하도록 구성하였다.

이광자 흡수 광경화 수지로는 SCR500 (Japan Synthetic Rubber)과 SU8 (Microchem Corp.)을 사용하였다. SCR500 은 특별한 전/후처리 없이 공정이 간단하므로 2 차원 패터닝 시에 사용하였으며, 이후 높은 강도를 필요로 하는 3 차원 내면적 형상제작을 위해서는 고강성 레진인 SU8 을 사용하여 제작하였다.¹⁴

2.3 시스템 제작 특성 평가

Fig. 5 는 1 μm 의 선을 복셀을 하나씩 연결하여 선을 형성하는 단속적 스캐닝 방법을 이용하여 제작하였을 경우 갈바노 스캐너 방식과 스테이지 스캐닝 방식의 속도 차를 나타낸다. 갈바노 미러의 경우 이동시간이 0.1 ms 이하로 매우 짧아 단속적 스캐닝 방법이 가능하지만, 스테이지 스캐닝 시스템의 경우 스테이지가 이동한 후 그 위치에서 완전히 안정된 상태로 되는 시간까지 응답속도가 약 수십 ms 이 소요가 되므로 단속적 스캐닝 방법을 적용하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 셔터가 켜진 상태에서 스테이지가 제작할 윤곽선을 스캐닝하는 연속적 스캐닝 방법을 이용하였다.

90 mW 에서 단위거리 1 μm 를 50 ms 의 스캐닝 조건으로, 스테이지 스캐닝 시스템을 이용하여 Fig. 6 과 같이 약 300 μm 크기의 예비형상을 제작해보았다. 제작된 선 형상은 1 μm 의 주기로 요철을 확

인할 수 있는데 이는 단위 이동거리 1 μm 를 스테이지가 이동하는 시간 50 ms 와 정확히 일치하지 않음으로써 발생한 오차로 판단되며, 균일한 레이저 조사가 이루어지도록 스테이지가 등속 운동이 가능한 제작조건에 대한 연구가 필요하다.

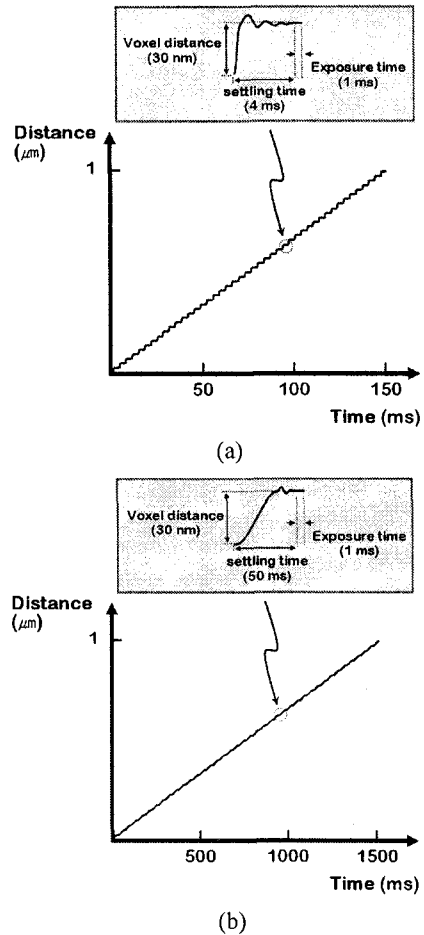


Fig. 5 Characteristics of (a) Galvano-mirror, (b) Piezo-stage in voxel scanning method

한편, Fig. 6(a)에 표시된 x 축 방향의 양 끝부분 ‘ㄱ’, ‘ㄴ’의 확대된 이미지 Fig. 6(b)-(c)와 같이 선 패터ンは 약 200 nm 의 높이 차 (h_a-h_b)를 나타냄을 확인할 수 있다. 위치에 따른 레이저 조사량은 동일하므로 이는 정밀 가공된 스테이지 및 지그의 조립과정에서 발생하는 오차로 사료되며, 스테이지와 시편과는 x 축 방향으로 약 0.0007, y 축 방향으로 약 0.0002 의 기울기를 가지고 있으며 이는

지그의 기울기를 조절함으로써 개선할 수 있다. 본 시스템 최대 제작 영역 800 μm 제작 시 최대 500 nm의 높이 차이를 가지게 되는데, 이는 본 연구에서의 공정조건하에서의 복셀 길이 이하의 작은 값이므로 본 조건에서 연구를 진행하였다.

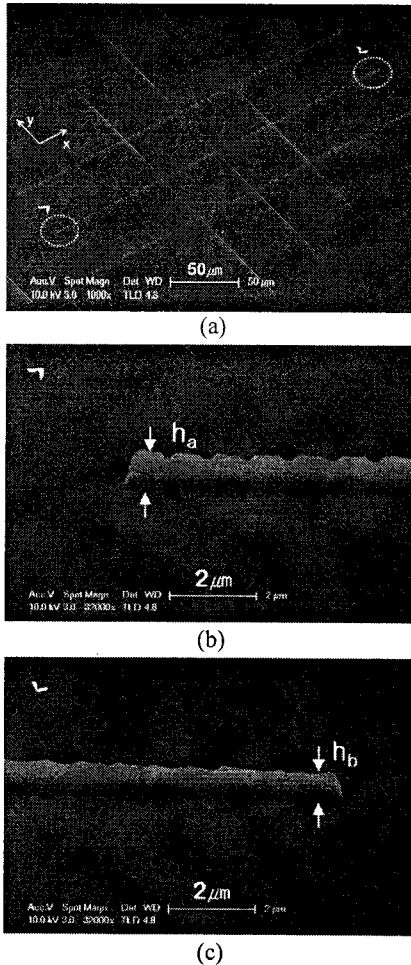


Fig. 6 SEM images of fabricated 2D line pattern. (a)inclined view, (b~c)magnified images of (a)

2.4 연속적 스캐닝 방법

일반적 스테이지는 입력된 단위거리를 최대한 빠른 속도로 이동한 후 남은 시간을 그 위치에 머물렀다가 다음 신호에 따라 움직이는 계단함수(step function) 형태로 구동되게 된다, 이때 스테이지는 레진을 경화시킬 수 있을 만큼 충분히 느린 속도로 움직이므로, 스테이지가 단위거리에 도착하

는 순간 다음 단위거리로 이동하도록 단위거리와 단위시간을 조절하여 등속스캐닝을 가능하게 하는 조건을 조사하였다.

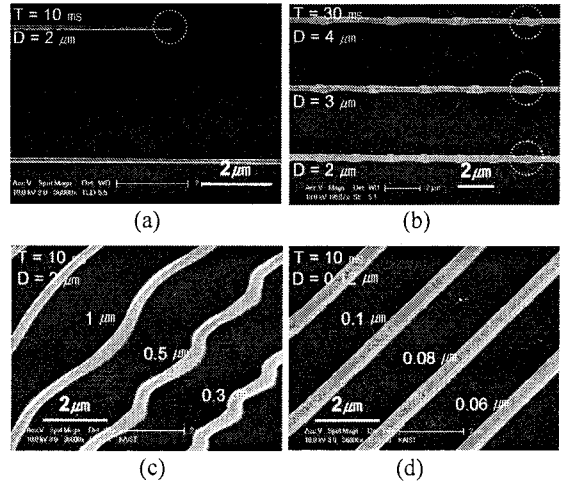


Fig. 7 Line patterns fabricated in the conditions of step time and step distance (a) 10ms, 2 μm (b) 30 ms, 2~4 μm , (c) 10 ms, 0.3~2 μm , (d) 10 ms, 0.06~0.12 μm . The laser power is 60 mW

본 연구에서 구축한 스캐닝 시스템의 단위거리와 단위시간에 대한 스캐닝 특성을 분석 하였다. 단위거리에 대한 단위시간이 짧을 경우 스테이지의 응답속도가 입력신호를 따라가지 못하여 Fig. 7(a)와 같이 미세제작 현상이 발생하게 된다. 단위거리에 대한 입력시간이 길 경우 스테이지는 단위거리만큼 이동한 후 남은 시간을 그 위치에 머무르게 되므로 Fig. 7(b)와 같이 불균일 선폭이 발생하게 된다. 또한, 3 차원 스캐닝을 위해서는 x, y 각각의 스테이지를 동시에 구동하여야 하는데 Fig. 4-7(c)와 같이 각 스테이지의 응답속도 차이에 의한 오차가 발생할 수 있다. 이와 같은 세 가지의 오차영역을 제외한 영역의 단위거리와 단위시간을 입력할 경우 스테이지는 Fig. 7(d)와 같이 등속운동을 통한 균일한 선폭의 스캐닝을 할 수 있게 된다.

본 연구에서 구축한 피에조 스테이지 스캐닝 시스템에서의 단위거리 및 단위 시간에 따른 선형상 제작 실험결과 Fig. 8 과 같은 안정적 제작 조건(SFW : stable fabrication window)을 얻을 수 있었다. 도출된 SFW 내의 영역에서의 적절한 단위거리와 단위시간을 선택함으로써 균일한 정밀도의

형상을 제작할 수 있다. 이때 단위거리가 클수록 그리고 단위시간이 짧을수록 제작 속도가 빠르게 된다. 따라서 제작 시간을 고려한 최적의 제작조건을 얻기 위해서는 제작하고자 하는 형상이 요구하는 정밀도 이하의 값 중에서 SFW 내의 최대값을 단위거리로 정하고 SFW 내의 가장 짧은 단위시간을 입력하면 된다. 한편, x, y 중 하나의 스테이지가 고정된 상태에서 다른 하나의 스테이지가 스캐닝 하는 방식인 래스터 (raster) 스캐닝 방식의 경우 x, y 스테이지 반응속도 차에 대한 오차를 고려하지 않아도 되므로 보다 빠른 속도로 제작 가능하다.

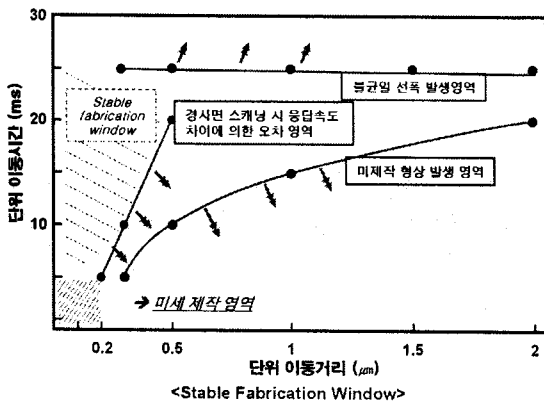
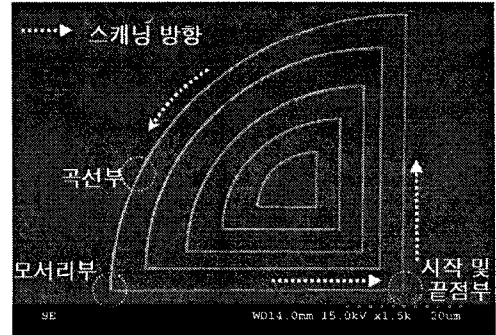
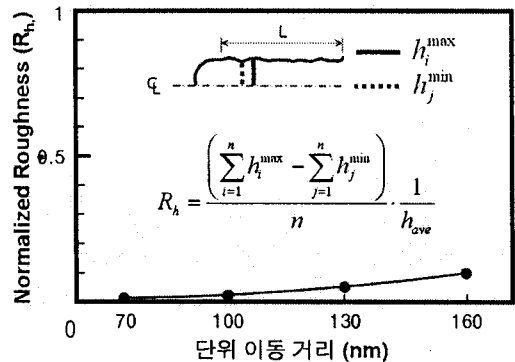


Fig. 8 Stable fabrication window (SFW) in the developed system

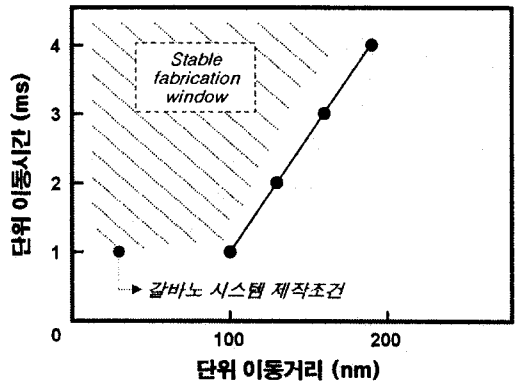
한편, 갈바노 스캐닝 시스템과의 제작 특성 비교를 위하여 200 nm 이하의 단위이동거리, 5 ms 이하의 단위 이동 시간 조건인 미세 제작영역에 대하여 제작 특성을 평가해 보았다. 단위 이동거리를 복셀크기 이하로 입력할 경우, 세 가지 안정적 제작영역 기준인 불균일 선폭 발생, 미제작 영역 발생, 응답속도 차 발생을 구분하기 어려우므로, 제작된 선폭의 거칠기를 평가함으로써 안정적 제작영역을 도출하였다. Fig. 9(a)는 직선운동, 곡선운동의 거칠기를 평가하기 위한 부채꼴 형상의 시험 패턴이다. Fig. 9(b)는 1ms의 단위 이동시간에 대하여 단위 이동거리에 따른 표면 거칠기 (normalized roughness; R_h)의 결과를 나타낸다. 단위 이동거리 100 nm 까지는 거칠기가 0.02로서 매우 균일한 제작이 가능하였으나 130 nm 이상의 단위 이동거리부터 0.05 이상으로 점차 증가하기 시작함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



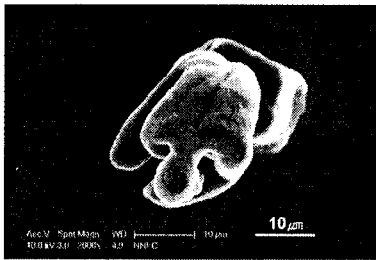
(c)

Fig. 9 (a) Test pattern for the stable fabrication in the precise fabrication region. (b) Normalized roughness vs. step moving distance in the condition of the step moving time(1ms). (c) The stable fabrication window (SFW) in the precise fabrication region

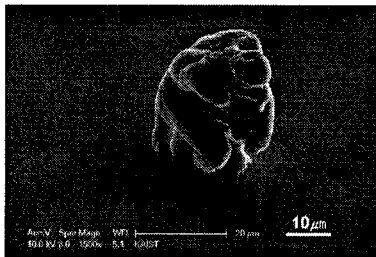
이와 같이 각 단위 이동거리와 단위 이동시간

에 대하여 Fig. 9(c)와 같이 0.05 이하의 거칠기(R_h)로 균일한 패턴링이 가능한 안정적 제작조건을 도출하였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 스테이지 스캐닝 시스템의 연속적 스캐닝 방법의 경우 최대 제작 속도 1 ms, 100 nm 로서, 갈바노 스캐닝 시스템의 최적 제작조건인 조사시간 1 ms, 단위 이동시간 2 ms, 단위 이동거리 30 nm 의 단속적 스캐닝 방법으로 제작 할 경우의 10 배, 조사시간 1 ms, 단위 이동거리 30nm 의 연속적 스캐닝 방법으로 제작할 경우의 3 배의 제작속도로 제작이 가능하다. 즉, 스테이지 스캐닝 시스템의 경우 제작속도 면에서도 대면적 제작에 보다 유리한 공정임을 알 수 있다.

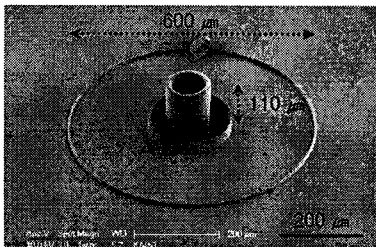
3. 대면적 형상 제작



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 (a) Top view and (b) inclined view of Rodin's thinker fabricated by stage scanning system. (c) Large-area structure of 600*600*110 µ m

스테이지 스캐닝 시스템을 이용한 대면적 3 차원 형상의 예제로서 Fig. 10(a)~(b)와 같이 폭 방향 20 µm, 높이방향 50 µm의 크기의 로댕의 생각하는 사람 형상을 제작하였다. 이 경우 형상의 크기가 커짐에 따라 경화되지 않은 레진을 제거하는 과정에서 현상액의 표면장력에 의해 형상이 변형하기 쉬우므로, 제작된 형상의 강도가 높은 SU-8 레진을 사용하였다. 제작조건은 단위 이동시간 1 ms, 단위 이동거리 100nm 의 연속적 스캐닝 방법을 이용하였다.

한편 높이방향의 제작 영역은 사용되는 대물렌즈의 초점거리에 의해 결정되게 된다. 사용된 렌즈의 경우 개구수 1.4, 초점거리 230 µm 로서 150 µm 두께의 커버글래스 기판을 사용할 경우 약 80 µm 높이까지의 형상제작이 가능하다. 그 이상의 높이를 가지는 형상의 경우 보다 긴 초점거리를 가지는 낮은 개구수의 대물렌즈를 이용하여 제작이 가능하다. Fig. 10(c)는 개구수 0.7, 초점거리 3 mm 의 대물렌즈를 이용하여 제작한 600*600*110 µm 크기의 대면적 고층 3 차원 형상을 나타낸다. 이와 같이 본 공정을 이용하여 대면적의 완전한 3 차원 형상 제작을 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 나노급 정밀도를 가지는 대면적 이광자 흡수 광조형 공정 개발을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 약 100 nm 의 정밀도로 완전한 3 차원 형태의 마이크로 형상을 실제 응용 가능한 수백 µm 크기로 제작 가능한 대면적 이광자 흡수 광조형 공정 (L-TPS : Large-area Two Photon Stereolithography) 을 개발하였다.

2) 제작 속도 향상을 위한 연속적 스캐닝 방법을 제안하였으며 이론적 및 실험적 분석을 통하여 정밀도 및 제작 속도에 있어 기존의 단속적 스캐닝 방법보다 유리함을 보였다.

3) 대면적 스테이지 스캐닝 시스템에서 연속적 스캐닝 방법을 적용하기 위하여 등속운동을 유도하여야 하는데, 이를 위하여 본 시스템에서의 단위 이동거리와 단위 이동시간에 따른 안정적 제작 영역 (SFW: Stable Fabrication Window)를 도출하였다.

4) 개발된 시스템을 이용하여 수백 µm 크기의

완전한 3 차원 형상을 제작하였으며, 낮은 개구수의 렌즈를 이용하여 높이에서도 수백 μm 의 형상 제작이 가능함을 검증하였으며, 고기능성 마이크로 응용소자 제작에 유리한 공정으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 나노원천기술개발사업 (과제번호 M10503000217-05M0300-21700)의 과제결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kawata, S., Sun, H. B., Tanaka, T. and Takada, K., "Finer features for functional microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 16, pp. 697-698, 2001.
2. Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics," *Optics Letters*, Vol. 28, No. 5, pp. 301-303, 2003.
3. Yang, D. Y., Park, S. H., Lim, T. W., Kong, H. J., Yi, S. W., Yang, H. K. and Lee, K. S., "Ultraprecise Micro-reproduction of a Three-dimensional Artistic Sculpture by Multipath Scanning Method in Two-photon Photopolymerization," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 1, p. 013113, 2007.
4. Sun, H. B., Takada, K. and Kawata, S., "Elastic force analysis of functional polymer submicron oscillators" *Applied Physics Letters*, Vol. 79, No.19, pp. 3173-3175, 2001.
5. Kaneko, K., Sun, H. B., Duan, X. M. and Kawata, S., "Submicron diamond-lattice photonic crystals produced by two-photon laser nanofabrication," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 11, pp. 2091-2093, 2003.
6. Coenjarts, C. A. and Ober, C. K., "Two-photon three-dimensional microfabrication of poly (dimethylsiloxane) elastomers," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 126, pp. 5556-5558, 2004.
7. Doraiswamy, A., Jin, C., Narayan, R. J., Mageswaran, P., Mente, P., Modi, R., Auyeung, R., Chrisey, D. B., Ovsianikov, A. and Chichkov, B., "Two photon induced polymerization of organic-inorganic hybrid biomaterials for microstructured medical devices," *Acta Biomaterialia*, Vol. 2, No. 3, pp. 267-275, 2006.
8. Sun, H. B., Maeda, M., Takada, K., Chon, J. W. M., Gu, M. and Kawata, S., "Experimental investigation of single voxels for laser nanofabrication via two-photon photo-polymerization," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 5, pp. 819-821, 2003.
9. Park, S. H., Lim, T. W., Yang, D. Y., Yi, S. W. and Kong, H. J., "Development of a nano replication printing (nRP) process using a voxel matrix scanning scheme," *J. KSPE*, Vol. 21, No. 2, pp. 210-217, 2004.
10. Pham, A. T., Kim, D. P., Lim, T. W., Park, S. H., Yang, D. Y. and Lee, K. S., "Three-dimensional SiCN ceramic structures via nano-stereolithography of inorganic polymer photoresist," *Advanced Functional Materials*, Vol. 16, No. 9, pp. 1235-1241, 2006.
11. Lim, T. W., Park, S. H., Yang, D. Y., Kong, H. J. and Lee, K. S., "Direct single-layered fabrication of 3D concavo-convex patterns in nano stereolithography," *Applied Physics A*, Vol. 84, No. 4, pp. 379-383, 2006.
12. Park, S. H., Lim, T. W., Yang, D. Y., Yi, S. W. and Kong, H. J., "Fabrication of precise patterns using a laser beam expanding technique in nano-replication printing (nRP) process," *J. KSPE*, Vol. 22, No. 1, pp. 175-182, 2005.
13. Lim, T. W., Park, S. H., Yang, D. Y., Yi, S. W. and Kong, H. J., "Development of Contour Offset Algorithm (COA) in nRP Process for Fabricating Nano-precision Features," *J. KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 160-166, 2004.
14. Teh, W. H., Durig, U., Salis, G., Harbers, R., Drechsler, U., Mahrt, R. F., Smith, C. G. and Guntherodt, H. J., "SU-8 for real three-dimensional subdiffraction -limit two-photon microfabrication," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, No. 20, pp. 4095-4097, 2004.