

# 이중 스테이지를 이용한 대면적 3차원 광/유체 마이크로 디바이스 제작에 관한 연구

## Fabrication of Three-Dimensional Micro Optical and Fluidic System Using Dual Stage Nanostereolithography Process

임태우(Tae Woo Lim)<sup>1, 2\*</sup>, 양동열(Dong-Yol Yang)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>카이스트 기계공학과, <sup>2</sup>삼성디스플레이 디스플레이연구소

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Korea

<sup>2</sup>Current Address : The Institute of Display Research, Samsung Display, Yongin-si, 17113, Korea

(Received August 12, 2015; revision received September 15, 2015; Accepted: September 17, 2015)

**Abstract** The nanostereolithography process using a femtosecond laser has been shown to have strong merits for the direct fabrication of 2D/3D micro structures. In addition, a femtosecond laser provides efficient tools for precise micromachining owing to the advantages of a small and feeble heat effect zone.

In this paper, we report an effective fabrication process of 3D micro optical and fluidic devices using nanostereolithography process composed of a dual stage system. Process conditions for additive and subtractive fabrication are examined. The Piezo stage scanning system is used for 3D micro-fabrication in unit area of sub-mm scale, and the motor stage is employed in fabrication on the scale of several mm. The misalignment between the piezo- and motor- stages is revised through rotational transformation of CAD data in the unit domain. Here, the effectiveness of the proposed process is demonstrated through examples using 3D optical and microfluidic structures.

**Key words** Femtosecond laser(펨토초레이저), 3D microstructure(3차원 마이크로형상), Dual Stage(이중스테이지), Two-photon polymerization(이광자흡수 광경화)

† Corresponding author, E-mail: [twalways.lim@gmail.com](mailto:twalways.lim@gmail.com)

### 기호설명

- $D(m, n)$  : 단위 제작영역  
 $x, y$  : 피에조 스테이지의 평면 좌표  
 $X, Y$  : 모터 스테이지의 평면 좌표  
 $X', Y'$  : 기관의 평면 좌표  
 $\theta$  : 피에조 스테이지와 모터 스테이지의 회전 오차  
 $\alpha$  : 기관과 모터 스테이지와의 회전 오차

### 1. 서 론

최근 나노/마이크로 제작기술이 발달함에 따라 광, 유체, 에너지 소자로의 응용을 위한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(1-2)</sup> 고집적, 고기능성을 가진 나노/마이크로 디바이스에 대한 필요성이 높아짐에 따라 기존의 2차원 패터닝 방식을 기반으로 하는 마이크로 공정기술의 한계를 극복하기 위한 새로운 공정기술 개발이 필요하게 되

었다. 이광자 흡수 광경화 현상을 이용한 나노스테레오리소그래피 공정은 약 100 nm의 정밀도로 임의의 3차원 마이크로 형상을 제작할 수 있는 공정이다.<sup>(3-7)</sup>

나노스테레오리소 그래피 공정을 이용한 3차원 형상 제작 공정은 3차원 형상을 여러 등분의 2차원 형상으로 분리하여 각 2차원 형상을 제작 및 적층하는 과정으로 이루어진다. 이때 2차원 스캐닝 방법으로는 갈바노미러를 이용하여 레이저 빔의 초점 위치를 제어하는 빔 스캐닝 방식과, 초점은 고정된 상태에서 기관을 움직여 제작하는 스테이지 스캐닝 방식이 있다.<sup>(6)</sup> 빔 스캐닝 방식의 경우 응답속도가 빠르고 보다 고정밀 형상 제작에 유리하지만 제작 가능한 영역이 약 50  $\mu\text{m}$  이내로 제한되는 단점이 있다. 보다 대면적의 응용형상 제작을 위해서는 스테이지 스캐닝 방식이 유리하며 고정밀 스캐닝을 위해 피에조 스테이지가 사용된다. 피에조 스테이지의 경우 그 응답속도가 약 30 ms으로 갈바노미러에 비해 반응속도가 느리다는 단점이 있다. 하지만 스캐

닝 시간을 효율적으로 줄일 수 있는 연속적 스캐닝 방법을 개발함에 따라 단속적인 스캐닝 방법을 이용하는 갈바노미러 시스템보다 빠르게 형상을 제작 할 수 있으며, 레이저 초점이 고정됨에 따라 조사되는 레이저가 균일하게 되어 정밀한 형상 제작이 가능하다. 한편, 수 cm 단위의 마이크로 시스템을 제작하거나, 기존 디바이스에 3차원 형상을 제작하기 위해서는 피에조 스테이지의 스캐닝 영역보다 큰 영역의 위치제어 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 cm 단위의 위치제어가 가능한 모터 스테이지를 사용한 이중 스테이지 시스템을 구성하고, 이를 이용한 대면적 3차원 마이크로 형상 제작에 관한 연구를 수행하도록 한다. 3차원 형상 제작을 위해 나노스테레오리소그래피 공정을 이용하며, 레이저 출력에 따라 광도화 및 식각 공정 조건을 확보하도록 한다. 수 mm 이상의 대면적 형상을 제작하기 위해 단위 영역으로 분할하여 축방향 오차를 고려한 제작방법을 제시한다. 이러한 방법을 통하여 제작한 3차원 광, 유체 응용 형상을 통해 3차원 마이크로 시스템 제작에 유용한 제작기술임을 검증하도록 한다.

## 2. 나노스테레오리소그래피 공정

### 2.1 나노스테레오리소그래피 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 나노스테레오리소그래피 시스템의 개념도 및 사진이다. 레이저는 펄스폭을 갖는 티타늄 : 사파이어(Ti : sapphire) 레이저이며, 작동 주파수는 80 MHz, 펄스 폭은 80 fs, 중심 파장은 780 nm이다. 반사된 레이저 빛에 의한 레이저 손상을 방지하기 위해 고립계(isolator)를 레이저 앞에 설치하였고, 반파장판(1/2 wavelength plate)과 편광 빔분할기(polarized beam splitter)를 이용하여 레이저 출력을 조절하였다. 광학셔터

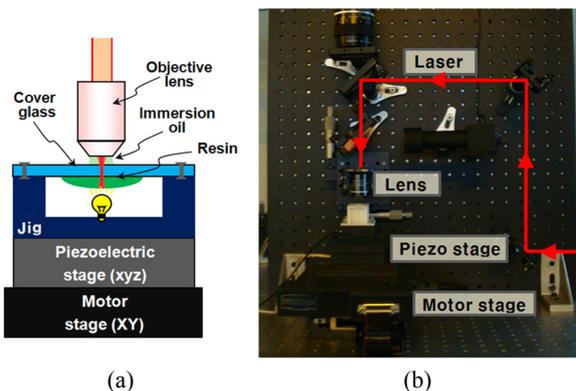


Fig. 1 (a) Schematic diagram and (b) picture of nanostereolithography system using dual stage.

Table 1. Components of dual stage system

Component	Model	Model	Spec.
Piezo stage (z-axis)	Physics Instrument	P-622.ZCL	Travel : 0.4 mm Resolution : 0.1 nm
Piezo stage (x/y-axis)	Physics Instrument	P-628.2CL	Travel : 0.8 mm Resolution : 0.1 nm
Motor stage (x/y-axis)	Aerotech	ALS-130H	Travel : 5 cm Accuracy : 300 nm

(optical shutter)를 이용하여 최소 1 ms의 속도로 레이저의 on/off를 제어 하였다. 옵티컬 셔터를 지난 레이저 빛은 광학렌즈에 의해 확대되어 대물렌즈(Objective lens)로 들어가게 되는데 이러한 이유는 입사 빔의 영역을 넓힘으로써 초점 정밀도를 높이기 위한 것이다. 초점이 고정된 상태에서 짧은 시간동안 경화되는 단위 영역인 복셀의 세장비가 낮게 제작되는 개구수(numerical aperture; NA) 1.4인 오일 대물렌즈(oil immersion objective lens)를 이용하여 레이저를 시편에 집광하였다.

정밀 위치 제어 및 스캐닝에 사용한 스테이지는 Table 1과 같다. 시편이 고정된 압전소자 스테이지(piezoelectric stage)를 이용하여 0.1 nm 정밀도로 800 μm×800 μm×250 μm의 제작영역에 대해 레이저 스캐닝이 가능하도록 하였다. 형상간 정렬과 cm의 제작영역을 위한 이중스테이지 구축을 위해 XY 모터 스테이지를 피에조 스테이지 밑에 설치하여 50 mm×50 mm(X, Y)의 영역을 외부 컨트롤러를 이용하여 제어하였다. 본 공정에 맞는 이중스테이지를 구성하는 데 있어 필요한 모터스테이지 성능으로는 정확도(accuracy), 반복도(repeatability)가 우수해야 하며, 형상 제작 시 모터스테이지 위의 있는 피에조스테이지의 빠른 움직임에 의한 외란에 흔들리지 않는 고정성이 필요하다. 모터스테이지는 Ball-screw 방식의 리니어 가이드와 내부 피드백 시스템을 가지며, 정확도와 반복도는 각각 300 nm, 75 nm를 가진다. 모든 형상 제작 및 형상 간 정렬을 위해 1,000배의 배율을 가지는 디지털 CCD 카메라를 이용하였다.

광경화성 재료로는 SU8 2000(Microchem Corp.)에 이광자 흡수 물질(TPA material)과 광발산제(PAG)를 첨가한 레진을 사용하였다. SU8은 높은 강성을 가지며 가경화 후 고상 상태로서 제작하는 과정에서 스캐닝의 움직임에 유동이 발생하지 않는 장점이 있다. 커버그래스 기판위에 스피코팅을 통해 약 50 μm 두께로 도포하였으며, 제작된 형상의 부착력(adhesion)을 높이기 위해 피라니아(piranha, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 처리한 커버그라스를 사용하였다.

### 2.2 3차원 마이크로 단위 형상 제작

펄스 레이저의 출력에 따라 나노급 정밀도의 고

화 및 식각공정이 가능하다.<sup>(8-9)</sup>

고화공정은 광 밀도의 제공에 비례하여 일어나는 이광자 흡수 현상을 이용한 것으로서, 초점의 중심 일부 영역에서만 고화되는 특성을 이용하여 Fig. 2(a), Fig. 2(b)와 같이 미세 패터닝이 가능하다. 레이저 출력이 감소함에 따라 정밀도를 급격히 높일 수 있으며, 30 mW, 1 ms에 대하여 약 150 nm의 선폭을 얻을 수 있었다.

고화 공정에 비해 식각공정의 경우 약 10배의 레이저 출력이 필요하였다. 가공 영역 주위에 열에 의한 손상 없이 나노급 정밀도의 가공이 가능한 장점이 있으며 레이저의 출력에 따라 Fig. 2(a)와 같은 가공 특성을 나타내었다. 고화 공정에 비해 다소 큰 거칠기를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 제거되는 재료가 주변에 부딪히면서 발생하는 영향으로서 패턴의 높이에 따라 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 식각하고자 하는 패턴의 높이가 높아짐에 따라 거칠기는 증가하며, 이 경우 초점을 패턴의 표면부터 낮은 깊이만큼 가공한 후 더 깊은 깊이로 가공하는 방법으로 거칠기를 개선할 수 있다.

Fig. 3은 나노스테레오리소그래피 공정을 이용하여 제

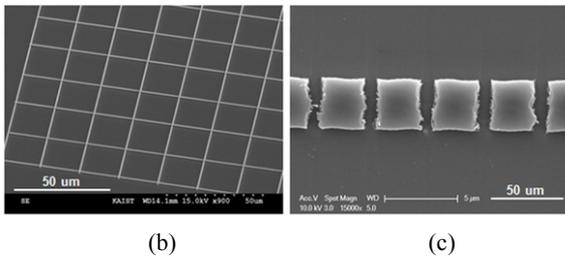
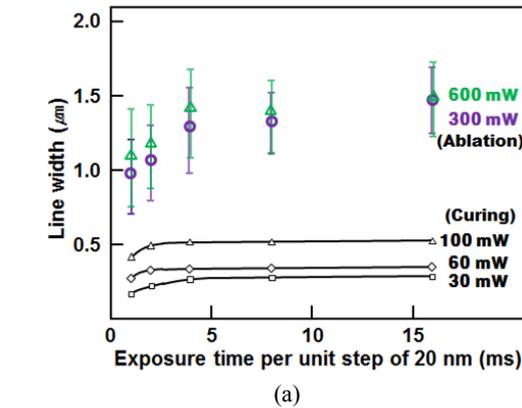


Fig. 2 (a) Parameter study; line width vs exposure time. unit moving distance of stage is 20 nm. (b) Unit line fabricated by two-photon curing process with low power in the range of 30~100 mW. (c) Ablated pattern at high power in the range of 300~600 mW.

작한 3차원 형상의 예이다. Fig. 3(a), Fig. 3(b)의 경우 30 mW, 1 ms의 조건에서 고화공정으로 형성하였으며, Fig. 3(c), Fig. 3(d)는 고화공정으로 제작된 박막의 측면에 500 mW, 2 ms의 조건으로 hole을 형성한 구조이다. 이와 같이 완전한 3차원 마이크로 입체 형상을 제작할 수 있음을 확인 할 수 있다.

### 3. 이중스테이지 시스템

수백 μm 크기의 단위 형상을 가진 3차원 형상을 이용한 디바이스 제작을 위해서는 여러 3차원 형상을 수 mm~수 cm의 영역에 집적화 할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 3차원 단위형상은 피에조 스테이지로 형성하고 여러 단위 형상을 수 mm 이상의 특정 위치에 배치하기 위한 방법으로 Fig. 4(a)와 같이 이중스테이지 시스템을 구성하였다.

수 mm 이상의 형상은 Fig. 4(b)와 같이 단위 영역 D(m, n)으로 나누어 피에조 스테이지로 단위 영역의 형상을 제작한 후 모터스테이지로 다음 영역으로 이동하여 다시 피에조 스테이지 스캐닝을 통해 단위 형상을 제작하는 방식으로 이루어진다. 이때, 모터스테이지와 피에조 스테이지간의 평면 회전방향 오차가 고려되어야 한다. Fig. 4(c)와 같이 피에조 스테이지의 축 x, y와 모터스테이지의 축 X, Y가 이루는 각을  $\theta$ 라 할 때, 모터스테이지의 좌표를 기준으로 두고, 각 단위 영역의 형상을  $-\theta$ 만큼 회전 변환하여 형성함으로써 정밀도를 보정할 수 있다. 기관에 미리 얼라인 되어 있는 패턴이 형성되어 있는 경우 기관의 정밀도를 함께 고려해

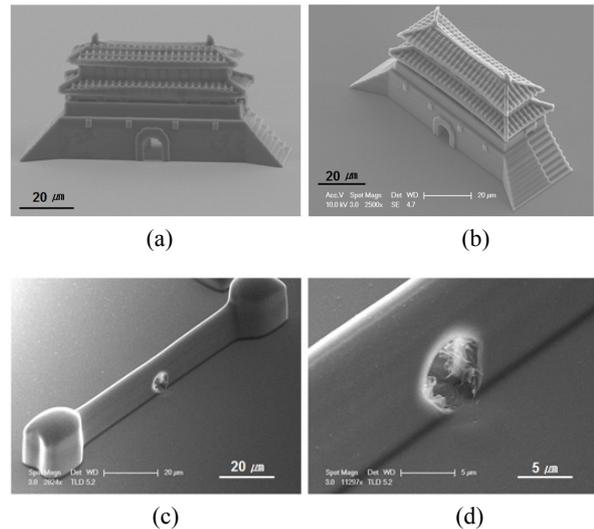


Fig. 3 SEM images of 3D microstructures (Namdae-mun) fabricated by (a), (b) two-photon curing process and (c), (d) ablation process.

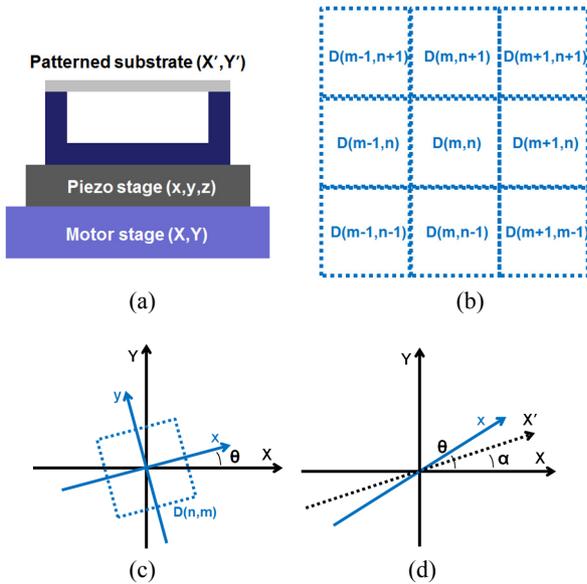


Fig. 4 Schematic illustration of (a) the dual stage system, and (b) sub-domains. Misalignment between (c) the piezo stage vs. the motor stage, and (d) the substrate.

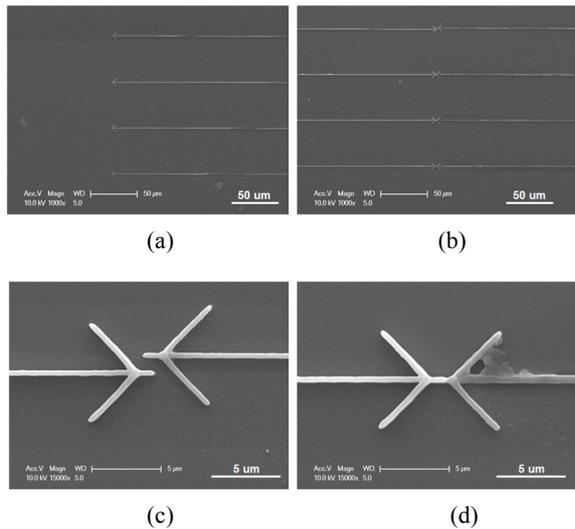


Fig. 5 (a), (b) Index patterns to revise the misalignment. SEM images (c) before and (d) after revision of the misalignment between piezo and motor stages.

야 한다. 이때 절대 좌표는 기관의 축으로 하여 단위 형상 데이터를 회전 변환하고 모터스테이지의 이동 변위를 보정하여야 한다. 즉, Fig. 4(d)와 같이 기관이 모터스테이지와 이루는 각을  $\alpha$ 라 하면, 각 단위영역의 형상은  $-(\theta-\alpha)$  만큼 회전 변환하여 제작하며, 모터스테

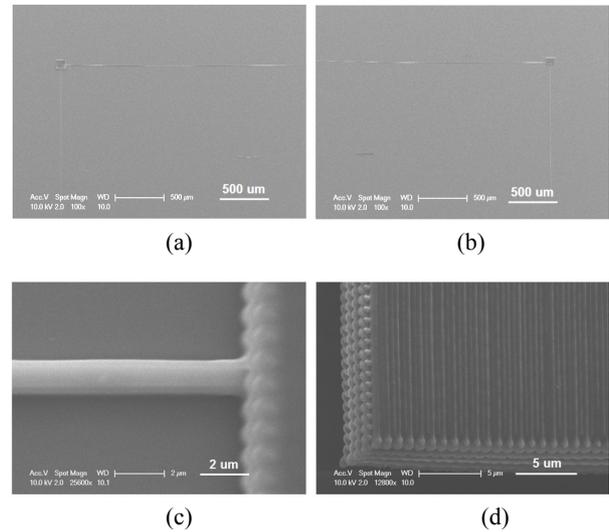


Fig. 6 Example of 3D micro optical system of photonic crystal and waveguide, which is fabricated by dual stage system.

지는  $\alpha$ 만큼 회전한 값으로 변환하여 제작함으로써 회전방향 오차를 보정할 수 있다.

이중스테이지를 이용하여 정렬된 형상을 제작하기 위해 본 연구에서는 이중스테이지가 갖는 회전방향 오차를 평가하였다. 단위 영역을 700  $\mu\text{m}$ 로 두고 인접한 단위 영역간에 축 정렬도를 평가 하였다. Fig. 5(a)와 같이 700  $\mu\text{m}$  길이의 패턴을 단위 영역에 형성 한 후 인접한 단위 영역에 동일 직선을 Fig. 5(b)와 같이 형성 하는 방법으로 Fig. 5(c)와 같이 축 정렬도 오차를 평가하였다. 그 결과 피에조 스테이지와 모터 스테이지가 이루는 오차는 0.103°로 확인 되었다. 이 각에 대한 회전변환을 각 단위영역의 데이터에 적용한 후 Fig. 5(d)와 같이 회전방향 오차를 보정할 수 있었다. 이와 같이 본 연구에서는 대면적 형상 제작 및 다중재료 형상 제작을 위해 고가의 외부 거리측정 센서를 통한 피드백 시스템 없이 이중스테이지의 측정된 오차를 이용한 수정된 데이터를 이용함으로써 본 공정에 적합한 대면적 형상 제작방법을 제시하였다.

## 4. 3차원 마이크로 시스템 제작

### 4.1 3D Micro-optical System

Fig. 6은 본 연구에서 구축한 이중스테이지로 구성된 나노스테레오리소그래피 공정을 이용하여 제작된 1 cm 제작영역을 갖는 대면적 3차원 형상을 나타낸다. 선폭 1.3  $\mu\text{m}$ , 길이 1 cm의 라인 형상은 모터스테이지로 형성하였으며, 각 끝에 피에조 스테이지를 이용

하여 광결정 구조를 형성하였다. 광결정 구조로는 전체 크기  $80 \times 80 \times 10 \mu\text{m}$ , 선폭 250 nm, 선 간격 550 nm의 woodpile을 형성하였다. 제어하고자 하는 광의 종류에 따라 도파로의 폭 및 woodpile의 폭과 간격을 조절하여 광 제어시스템을 형성할 수 있다. 광도파로, 광결정, 반사판, 프리즘 등 다수개의 단위 형상으로 이루어진 마이크로 광 디바이스 제작에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4.2 3D micro-fluidic system

마이크로 채널의 고효율, 집적화를 위한 다양한 소자 개발을 위한 연구가 증대되고 있으며, 최근에는 채널 내부에 고기능성 3차원 소자를 제작하기 위한 방법들이 제안되고 있다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 포토리소그래피 공정으로 형성된 수 cm의 대면적 마이크로 채널 내부에 대면적 3차원 소

자 제작기술을 적용하였다. 기 제작된 채널 패턴과 모터스테이지가 이루는 각을 도출한 후 별도의 회전 스테이지 없이 CAD 데이터의 회전 변환을 통해 채널 패턴과의 일라인을 고려한 3차원 마이크로 구조물을 형성하였다. 넓은 표면적을 가지며 미세 유동을 감지할 수 있는 구조물의 예로 약 300 : 1의 고 세장비를 가지는 박막 구조물을 형성하였다.

한편, 외력에 민감한 구조물일수록 제작과정에서 현상액에 의한 표면장력에 의해 Fig. 7과 같이 구조물이 변형되거나 다른 구조물에 부착되어 손상되는 현상이 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 지지구조와 함께 형성한 후 식각공정으로 분리하는 방법을 이용하였다. Fig. 8과 같이 끝단이 바닥면과 붙어있는 지지구조와 함께 형성하여 현상과정에서도 원래 형상이 유지되도록 형성한 후 식각공정을 이용하여 지지구조로부터 분리하였다. 이와 같이 이중스테이지 시스템을 이용한 나노스테레오리소그래피 공정을 통해 고집적 3차원 마이크로 유체 소자의 제작에 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 cm 단위의 대면적에 3차원 마이크로 광, 유체 디바이스 제작에 관한 연구를 수행하였다.

3차원 단위 형상 제작 공정기술로 피에조 스테이지 스캐닝 방식을 이용한 나노스테레오리소그래피 공정을 이용하였으며, 광 고화 및 식각공정을 수행하기 위한 공정조건을 확보하였다. 레이저 조사량에 따라 고화공정의 경우 약 150 nm의 정밀도로, 식각공정의 경우 약 1  $\mu\text{m}$ 의 공정 정밀도를 가졌으며 임의의 3차원 마이크로 형상을 제작할 수 있었다. 수 mm 이상의 영역에 3차원 형상을 형성하기 위해 모터 스테이지를 이용한 이중스테이지 시스템을 구성하였으며, 피에조 스테이지와 모터스테이지 간의 회전 방향으로 0.103°의 오차를 확인하고 회전 변환된 데이터를 통해 대면적 형상의 분할 제작이 가능함을 제시하였다. 응용 예로서 광결정 형상 및 마이크로 채널 내부의 미세 박막 소자를 형성함으로써 3차원 마이크로 시스템 제작에 유용한 제작기술임을 확인하였다.

#### References

1. Geissler, M. and Xia, Y., 2004, Patterning : Principles and some new developments, *Adv. Mater.*, Vol. 16, No. 15, pp. 1249-1269.
2. Lim, T. S., Davila, A., Wallace, D. C. and Burke, P., 2010, Assessment of mitochondrial membrane poten-

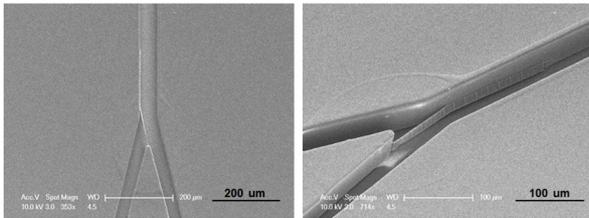


Fig. 7 Stiction of a 3D microstructure in a micro-channel.

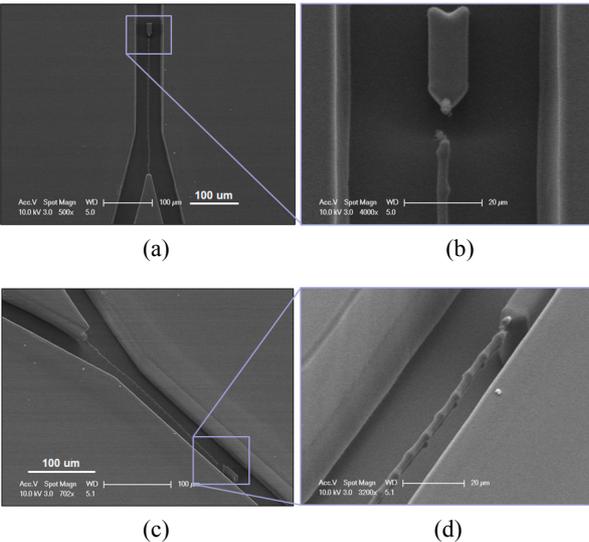


Fig. 8 (a), (b) Top view and ©, (d) inclined view of 3D microstructure in a micro-channel which is fabricated by additive and subtractive process.

- tial using an on-chip microelectrode in a microfluidic device, *Lab. Chip*, Vol. 10, pp. 1683-1688.
3. Lim, T. W., Park, S. H., Yang, D. Y., Kong, H. J. and Lee, K. S., 2006, Direct single-layered fabrication of 3D concavo-convex patterns in a nostereolithography, *Appl. Phys. A*, Vol. 84, pp. 379-383.
  4. Park, S. H., Lim, T. W., Yang, D. Y., Cho, N. C., and Lee, K. S., 2006, Fabrication of a bunch of sub-30 nm nanofibers inside microchannels using photopolymerization via a long exposure technique, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89, Paper No. 173133.
  5. Park, S. H., Kim, K. H., Lim, T. W., Yang, D. Y., and Lee, K. S., 2007, Investigation of three dimensional pattern collapse owing to surface tension using an imperfection finite element model, *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, pp. 432-439.
  6. Lim, T. W., Son, Y., Yang, D. Y., Kong, H. J., Lee, K. S., and Park, S. H., 2008, Highly effective three-dimensional large-scale microfabrication using a continuous scanning method, *Appl. Phys. A*, Vol. 92, pp. 541-545.
  7. Son, Y., Yeo, J. Y., Moon, H. U., Lim, T. W., Hong, S. J., Nam, K. H., Yoo, S. H., Grigo., C. P., Yang, D. Y., and Ko, S. H. 2011, Nanoscale electronics digital fabrication by direct femtosecond laser processing of metal nanoparticles, *Adv. Mater.*, Vol. 23, No. 28, pp. 3176-3181.
  8. Hwang, D. J., Jeon, H. J., Grigoropoulos, C. P., Yoo, J., and Russo, R. E., 2007, Femtosecond laser ablation induced plasma characteristics from submicron craters in thin metal film, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 91, Paper No. 251118.
  9. Miyaji, G. and Miyazaki, K., 2007, Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 91, Paper No. 123102.
  10. Blanco, F. J., Agirregabiria, M., Garcia, J., Berganzo, J. Tijero, M., Arroyo, M. T., Ruano, J. M., Aramburu, I., and Mayora, K., 2004, Novel three-dimensional embedded SU-8 microchannels fabricated using a low temperature full wafer adhesive bonding, *J. Micro-mech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 1047-1056.