

이광자 흡수 광조형 공정을 통한 3차원 광구동 마이크로 구조물 제작 Optically driven three-dimensional microstructures fabricated by two-photon absorbed polymerization process.

*정유진¹, 임태우¹, 손용¹, #양동열¹, 이광섭²

*Y. J. Jeong¹, T. W. Lim², Y. Son³, #D. Y. Yang(dyyang@kaist.ac.kr)¹, K. S. Lee²
¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부, ² 한남대학교 생명정보신소재공학과

Key words : Nano-stereolithography, Two-photon absorption, Optical trapping, 3D microstructures

1. 서론

최근 다양한 나노/마이크로 크기의 소자 제작 기술이 개발됨에 따라 이를 이용하여 전자, 기계, 생명과학, 의학 등 다양한 산업 전반에 걸쳐 기능성 소자 및 마이크로머신이 등장하고 있다. 특히 이광자 흡수 광조형 공정을 이용하면 sub-100nm의 정밀도로 기존 MEMS 공정으로는 제작하기 어려운 복잡한 3차원 형상도 하나의 단일 공정으로 제작할 수 있어 많은 연구가 이루어지고 있다[1].

이와 같은 공정을 이용해 제작된 3차원 미세 소자의 기계적 구동이 가능해지면 보다 다양한 분야로 응용될 수 있는데 이를 위해서는 외부 동력원이 필요하다. 현재까지는 주로 MEMS 공정을 통해 제작된 소자에 정전기력, 압전력 등을 인가하여 선형, 회전 운동을 유도하는 방식을 이용해 왔으나 대부분의 경우 전체 형상이 회전 운동을 하거나 일정 구간에서 선형으로 왕복하는 형태로 작동하므로 구성 요소의 미세한 제어에 한계가 있다. 반면 레이저광의 조사를 통한 광포획(optical trapping) 현상을 이용하면 수십 μm 이내의 입자 또는 형상을 3차원 공간 상에서 원하는 위치로 움직일 수 있을 뿐만 아니라 회전, 선형 운동을 유도할 수 있어 미세 소자의 정밀한 구동에 유용하게 사용될 수 있다. 이 방법은 물리적 접촉이 없이 sub-micron의 정밀도로 위치 제어가 가능하기 때문에 기계적, 생물학적으로 많은 응용 가능성이 있으며 현재 optical tweezers, micropump, microneedle을 비롯한 여러 가지 미세 소자로의 응용이 이루어지고 있다[2-5].

본 연구에서는 이광자 흡수 광경화(two-photon absorbed polymerization) 공정을 이용하여 두 개의 독립된 지지부와 구동부로 이루어진 3차원 미세 구조물을 제작하고 광포획 현상을 이용해 제작된 형상을 2차원 평면 상에서 구동하였다.

2. 이광자 흡수 광경화 공정

이광자 흡수 광경화 공정을 이용한 3차원 미세 형상 제작을 위한 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 레이저 광원으로는 티타늄-사파이어 레이저(Ti:Sapphire femtosecond laser)를 사용하여 이광자 흡수 현상이 일어나도록 하였고 갈바노미터의 회전각을 조절함으로써 레이저 초점의 위치를 제어하였다. 레이저의 on/off 제어를 위해서는 빠른 반응 속도로 회전 가능한 미러를 레이저 경로에 설치하여 빔의 방향을 조절함으로써 셔터로 사용하였다. 대물 렌즈는 레이저의 집광을 높이기 위해 개구수(numerical aperture: NA)가 1.4인 것을 사용하였고, 렌즈와 시편 사이의 굴절률 유지를 위해 굴절률이 1.51인 이멸전 오일을 사용하였다. 3차원 미세 형상의 제작을 위해 먼저 레진을 한 방울 떨어뜨린 커버글래스를 피에조 스테이지에 고정한 후 글래스 표면에 레이저 초점을 맞추어 준다. 제작하고자 하는 형상을 높이 방향으로 슬라이싱한 데이터를 이용하여 형상의 경계를 따라 레이저 초점을 이동시켜 경화시켜주고 이를 한 층씩 쌓아 올리는 방식으로 3차원 형상을 제작할 수 있다. 제작 후 경화되지 않은 부분은 현상액을 이용해 제거해줌으로써 원하는 형상만 커버글래스 위에 남도록 한다. 본 공정은

한 번의 프로세스로 완전한 3차원 형상을 제작하는 공정 이므로 움직일 수 있는 소자의 제작에 있어 지지부와 구동부의 추가적인 조립 단계가 필요 없기 때문에 다양한 형태의 구동 소자를 제작하는 데 매우 유리하다

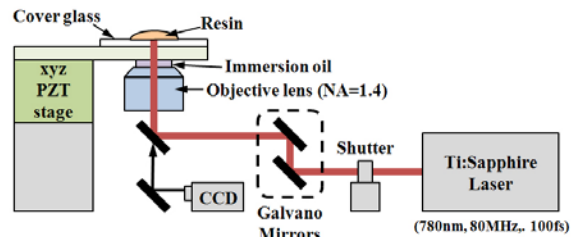


Figure 1. Schematic diagram of the two-photon absorbed polymerization system. A cover glass with a drop of resin is fixed on xyz-piezoelectric stages and the laser path is controlled by the rotation angles of two galvano mirrors.

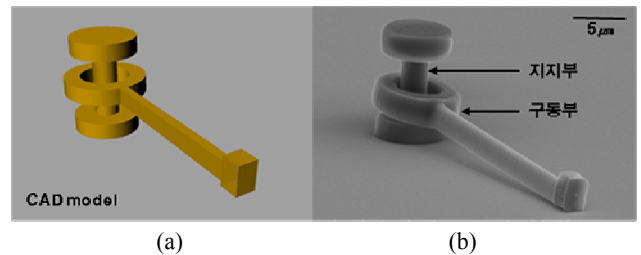


Figure 2. (a) 3D CAD Modeling and (b) its SEM image of 3D micro movable structure.

Figure 2는 위 공정을 이용하여 제작된 3차원 미세 형상으로 2차원 평면 상에서 회전 운동을 할 수 있는 구동부와 이를 커버글래스 상에 고정해주는 지지부로 구성되어 있다. 재료는 SCR-500을 사용하였고 제작 레이저 파워는 100mW였다.

3. 광포획을 이용한 형상 구동

빛이 어떤 입자에 부딪혀 굴절될 때 빛의 진행방향이 바뀔으로써 운동량의 변화가 발생하고, 전체 시스템의 운동량 보존을 위해 입자에 특정 방향으로의 힘이 가해지게 된다[6,7]. 이 때 가해지는 힘의 방향은 레이저광의 초점과 입자의 상대적 위치에 따라 결정되는데 Fig. 3(a)와 같이 빛이 입자의 경계에서 입사할 때와 다시 매질로 입사할 때 각각 경로 변화에 의해 운동량의 변화량이 생기고 그와 같은 양의 F_1 와 F_2 가 입자에 작용하게 된다. F_A 는 각 입사광으로부터 유발되는 힘의 합이며 총 합력 F 는 입사광의 초점 f 를 향한다. Fig. 3(b)와 같이 입자의 중심이 초점의 오른쪽에 위치하고 입사광의 방향이 비대칭인 경우에도 마찬가지로 초점을 향하는 힘을 받는다. 단, 광포획 현상은 입자의 굴절률이 매질의 굴절률보다 클 때만 나타나며, 굴절률의 크기가 반대인 경우에는 입자가 초점 반대쪽을 향하는 힘을 받게 되어 광포획이 불가능하다.

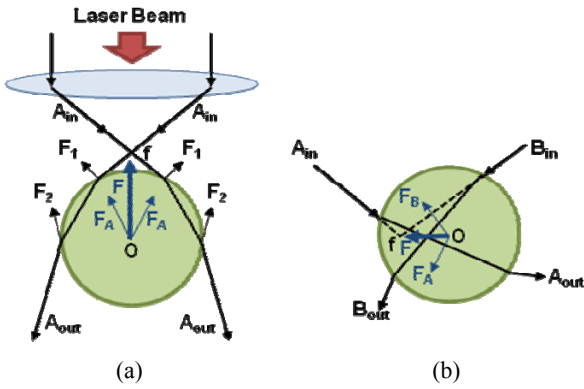
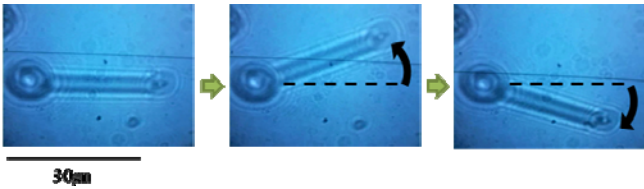


Figure 3. Diagram showing the ray optics of a spherical particle in (a) symmetric and (b) dissymmetric rays. The refraction of a typical pair of rays a and b of the trapping beam gives forces F_A and F_B whose vector sum F restores the sphere to the trap focus f .

Figure 4. Optically driven microstructure with the laser power



of 300mW and at the scanning speed of 20nm/ms.

이와 같은 광포획 현상을 이용하면 하나의 입자를 원하는 위치로 이동시킬 수 있을 뿐만 아니라 3 차원의 형상의 특정 점을 포획하여 이동시켜 줌으로써 기계적 구동이 가능하다. 제작된 형상에서 구동하고자 하는 점에 레이저 초점을 맞춘 뒤 이를 원하는 경로로 스캐닝하면 형상이 그 경로를 따라 움직이게 되며, 구동 과정은 CCD 카메라를 통해 실시간으로 관찰이 가능하다. Figure 4 는 이와 같은 원리를 이용해 앞서 제작한 형상을 300mW 의 레이저 파워에서 20nm/ms 의 속도로 2 차원 평면 상에서 구동한 것이며 최대 40nm/ms 의 속도까지 구동이 가능하였다. 사용된 레이저는 티타늄-사파이어 레이저이며 cw(continuous wave) 모드 로 작동하였고 주변 유체는 에탄올을 사용하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기계적 움직임이 가능한 3 차원 미세 소자 제작을 위해 이광자 흡수 광조형 공정을 이용하였으며 단일 공정으로 독립된 두 부분을 가지는 마이크로 형상을 제작하였다. 이와 같이 제작된 형상을 광포획 현상을 이용하여 2 차원 평면상에서 구동하였으며 최대 40nm/ms 의 속도로 움직일 수 있었다. 이와 같은 레이저광을 이용한 형상 구동은 향후 다양한 능동적 소자로의 응용이 가능할 것으로 예상된다.

후기

This work is supported by Nano R&D program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (20090082831)

참고문헌

1. Yang, D. Y., Park, S. H., Lim, T. W., Kong, H. J., Yi, S. W., Yang, H. K. and Lee, K. S., "Ultraprecise Microreproduction of a Three-dimensional Artistic Sculpture by Multipath Scanning Method in Two-photon Photopolymerization," Applied Physics Letters, **90**, 013113, 2007.

2. Higurashi, E., Ohguchi, O., Tamamura, T., Ukita and H., Sawada, R., "Optically induced rotation of dissymmetrically shaped fluorinated polyimide micro-objects in optical traps," Journal of Applied Physics, **82**, 2773-2779, 1997.
3. Terray, A., Oakey, J., Marr, D. W. M., "Microfluidic Control Using Colloidal Devices," Science, **296**, 1841-1844, 2002.
4. Maruo, S., Ikuta, K., Korogi, H., "Submicron manipulation tools driven by light in a liquid," Applied Physics Letters, **82**, 133-135, 2003.
5. Ikuta, K., Sato, F., Kadoguchi, K., Itoh, S., "Optical driven master-slave controllable nano-manipulator with real-time force sensing," IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 539-542, 2008.
6. Ashkin, A., Dziedzic, J.M., Bjorkhol, J.E., Chu, S., "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," Optics Letters, **11**, 288-290, 1986.
7. Ashkin, A., "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," Biophysical Journal, **61**, 569-582, 1992.