

광방사압을 이용한 3차원 μ -manipulator prototype 개발 Development of 3D μ -manipulator using Optical Radiation Pressure

*#하태호, 박상순, 이창우, 송준엽

*#T. H. Ha(taehoha@kimm.re.kr), S. S. Park, C. W. Lee, J. Y. Song

한국기계연구원 지능형 생산시스템 연구 본부

Key words : Optical radiation pressure, Manipulation, Micro object, Optical tweezers

1. 서론

빛은 물체의 표면에서 굴절률 차에 의해 반사 및 굴절하게 되고 진행방향 변화에 따른 빛의 모멘텀의 변화는 모멘텀 보존의 법칙에 의하여 물체에 그것을 보상해주는 모멘텀의 변화를 가하게 된다. 그 때 작용하는 힘이 광방사압 (Optical Radiation Pressure) 혹은 광압이다. 이와 같이 레이저를 고 N.A. (Numerical Aperture)의 대물렌즈를 통해 포커싱하여 발생시킨 광방사압으로 미소물체의 포획, 조작 등이 가능하게 된다. 1970년 Arthur Ashkin에 의해 행해진 유전체 미립자의 포획실험의 성공 후, 현재 바이오분야의 Cell 조작 및 분류용도, Cell의 특성 평가 및 수술용도, Optical Actuator, Nano-CMM의 프로브 등의 용도에 이르기까지 광범위한 분야에 연구가 진행되고 있다. 이들 연구에 있어서 광방사압으로 물체의 포획, 회전, 진동, 일정 자세 유지와 같은 자유로운 조작을 어떻게 구현하느냐가 중요한 핵심기술 중의 하나이다.

본 논문에서는 하부 및 상부 조사를 동시 혹은 선택적으로 가능하게 하여 Scattering Force 및 Gradient Force를 발생시키는 3차원 μ -manipulation system의 디자인을 제시하였다. 이중 먼저 하부 레이저 조사 타입의 μ -manipulator 모듈을 시제작하여 3차원 Manipulation 실험을 행하여 그 유효성을 검증하였다. 또한, 2축 Galvanometer Scanner를 이용한 레이저 빔의 동적 위치제어 모듈을 구축하여, PC로 획득한 영상에서의 마우스의 위치와 조작에 사용되는 빔 스폿의 위치를 연동시켜 조작의 용이성을 확보하였다.

2. 3차원 μ -manipulation System 디자인

구축 중인 전체 시스템의 3차원 μ -manipulation system의 디자인을 Fig.1에 나타내었다. 크게 상부 μ -manipulator 모듈과 하부 μ -manipulator 모듈로 나누어져, 상부 및 하부에서 동시에 또는 독자적으로 레이저를 도입하여 대상물의 포획 및 조작을 하는 구조로 되어있다. 단일 레이저 빔은 빔 스플리터로 분리되어 각각의 상부 및 하부 조사 광학계로 도입되는데 그 사이에 빔 감쇠장치를 두어 강도를 조절할 수 있도록 설계하였다. 상부 및 하부에서 각각 광방사압 발생과 관측이 가능한 구조로 설계하여 대상물의 상대적인 운동뿐만 아니라 회전, 진동 등과 같은 운동을 가능하도록 하였다.

시스템 디자인을 위해서 고려되어야 될 부분은 크게 광원부, 조작용 광학계, 관측용 광학계, 이송계로 나누어진다. 바이오 셀에 대해 예상되는 광학적 손상은 시료의 가열에 의한 열적 손상, Single-photon 혹은 Two-photon 흡수에 따른 photochemical 영향이며 이중 셀의 손상의 주원인은 산소를 매개로 한 Single-photon 프로세스로 예측되고 있다. 이에 따라 파장은 마이크로 대상을뿐만 아니라 바이오 관련 응용을 고려하여 NIR (Near Infrared)의 레이저를 선정하였다. 이는 가시광의 경우 Hemoglobin에 의해 주로 흡수되며, 적외선 광의 경우 물과 지질 (lipid)에 의해 흡수되는 반면 근적외선 영역에서 가장 낮은 흡수율을 보이기 때문이다. 조작용 광학계는 상부 및 하부에 고 N.A.의 대물렌즈를 사용한다. 효율적인 광방사압 발생을 위하여 빔 사이즈를 대물렌즈의 Back Aperture 보다 약간 큰 크기로 입사하기 위하여 빔 익스펜더를 도입하여 각각의 대물렌즈에 유도하도록 설계하였다. 포획 대상물의 위치 변위측정은 상부에 설치된 QPD (Quadrant Photodiode)를 이용하며, 관측은 상부 및 측면

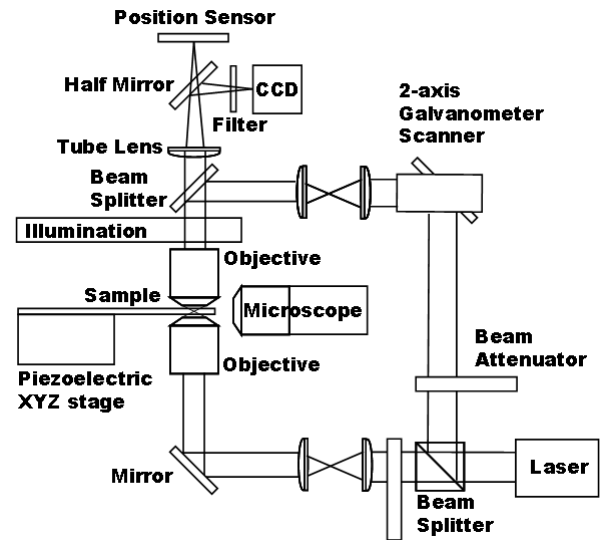


Fig. 1 Total design of 3D μ -manipulation system

관측계를 통하여 행하도록 설계하였다. 3차원 Manipulation을 위하여 XYZ piezo 스테이지와 2축 Galvanometer Scanner를 사용하였다. XYZ piezo 스테이지는 광방사압에 의해 포획된 대상물과 기관과의 상대적 변위발생을 위하여 채용되었으며, Galvanometer scanner는 레이저 빔 스폿 위치 조작을 통해 포획된 대상물에 능동적인 변위를 가하기 위해 사용된다.

3. 하부 조사 타입 3차원 μ -manipulator 모듈

Fig. 2는 진술한 전체 시스템 중에서 하부 레이저 조사에 의한 3차원 μ -manipulator 모듈 부분의 사진을 나타낸다.

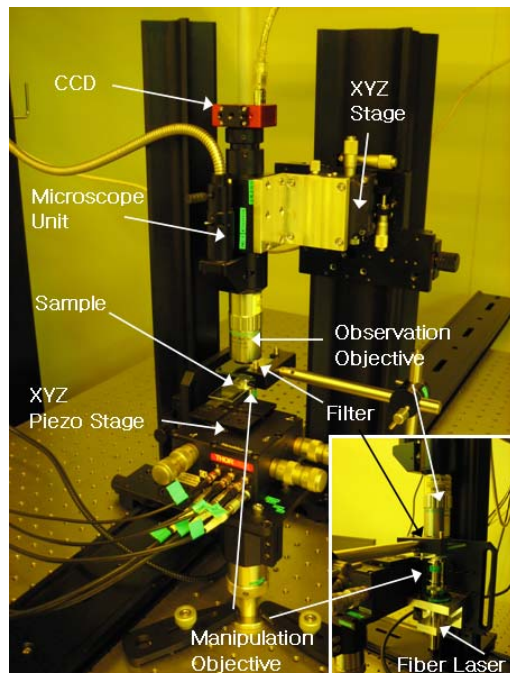


Fig. 2 Picture of 3D μ -manipulator Module (Levitation type)

Scattering Force가 주도적인 영향을 미치는 하부조사에 의한 레비테이션 방식으로 설계되었으며 상부에는 대상물의 관측을 위한 관측부를 두었다. 광원은 NIR 영역의 파장 1064.5nm의 편광유지 싱글모드 파이버 레이저를 사용하였다. 이 레이저는 660nm의 가이드 레이저를 동축으로 발생시킬 수 있어 광축조정 등에 용이성을 확보하였다. 광방사압 발생을 위하여 고 N.A.의 대물렌즈(N.A = 1.25, 100X)를 채용하였으며, 커버 글래스와 대물렌즈 사이에는 immersion oil을 사용하였다. 상부에는 IR-Blocking 필터를 통해 배율 50X의 대물렌즈 (WD = 20.5 mm)를 장착한 현미경 유닛을 이용하여 대상물의 관측을 행하였다. 조작 대상물과 기관의 상대적인 위치 변위발생을 위해서 XYZ 방향으로 각각 20 μm 의 변위를 가지는 Closed-loop 방식의 피에조 스테이지를 사용하였다.

4. Microsphere의 3 차원 μ -manipulation 실험

전술한 하부 레이저 조사에 의한 3차원 μ -manipulator 모듈을 이용하여 Microsphere의 조작 실험을 행하였다. μ -manipulation 용으로 사용하는 Microsphere의 경우, Silica microsphere ($n=1.37$)과 Polystyrene microsphere ($n=1.59$)가 주로 사용된다. Silica microsphere의 경우는 친수성 성질을 가지고 있어 입자간의 뭉침 현상이 덜한 장점이 있고, Polystyrene microsphere의 경우 소수성 성질을 가지고 있어 분산 작업이 필요한 반면, 상대적으로 높은 Reflective Index를 가지고 있어서 레이저에 의한 포획이 용이한 장점을 가지고 있다. 본 실험에서는 수중에 분포시킨 직경 10 μm 의 Polystyrene microsphere를 이용한 3차원 Manipulation 실험을 행하였다.

레이저에 의한 3차원적인 포획 실험 결과 중의 한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 그림의 상단은 상부 관측계에 의한 관측영상의 캡처사진이며, 하단은 측면에서 본 각 영상에 대한 관측계의 포커스 위치와 Microsphere 간의 상관관계를 도시한 것이다. (a), (b)와 (c)는 각각 관측부의 포커스 위치를 커버 글래스 표면에서 상부로 이동시켰을 때 포획된 Microsphere와 기관 상에 존재하는 Microsphere의 영상을 표시한 것이다. Top view에서 흑색점선으로 표시된 부분은 레이저에 의해 포획된 Microsphere의 위치를 나타내며, 흰색점선으로 표시되어진 부분은 커버 글래스 기관 상에 위치하는 Microsphere의 위치를 나타낸다. (a)는 관측부의 포커스가 커버 글래스 기관에 맞춰져 있는 경우를, (c)는 관측부의 포커스가 기관보다 상부에 위치하여 포획된 Microsphere에 맞추어졌을 때 사진을 나타낸다. 이와 같이 하부 레이저 조사에 의하여 Polystyrene microsphere가 3차원적으로 포획되고 있음을 알 수 있다. 또한, 포획된 Microsphere의 평면이동 실험에서도, 포획은 물론 안정된 3차원적인 Manipulation이 가능함을 확인할 수 있었다.

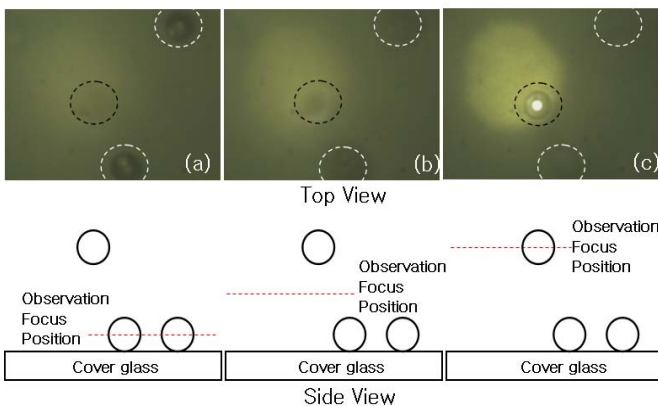


Fig. 3 3D μ -manipulation of microsphere

5. 레이저 빔의 동적 위치제어 모듈

Fig. 4은 3차원 μ -manipulation을 위하여 시료스테이지를 이송시켜 상대적인 위치를 변화시키는 방식에 추가하여, 레이저 빔의 동적인 위치 제어를 구현하기 위해 구축한 레이저 빔 동적 위치제어 모듈을 나타낸다. 유용성 검증실험을 위하여 광원으로 가시광의 LD를 사용하였으며, 2축 Galvanometer Scanner를 이용하여 레이저 빔 스폿의 위치제어를 행하였다. PC 화면상에 CCD 카메라로 부터의 영상이 표시되어지게 되고, 영상의 원하는 부분에 마우스를 위치한 후 클릭 및 드래그를 하면 실제 레이저 스폿도 그에 연동하여 동일하게 조사·이동되도록 프로그래밍 하였다. 이에 따라 관측영상을 보면서 마우스로 자유롭게 원하는 조작 대상물을 선택·포획하여 원하는 소정의 위치로의 이동시키는 등의 조작을 용이하게 행할 수 있다.

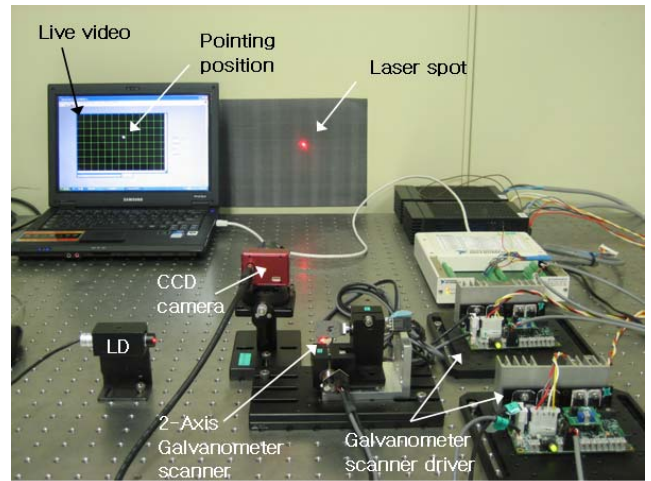


Fig. 4 Beam manipulation using 2-axis galvanometer scanner

6. 결론

본 논문에서는 동시 또는 선택적으로 하부 및 상부조사를 행하여 광방사압을 발생시켜 미세대상물의 3차원 μ -Manipulation이 가능한 시스템 디자인을 제시하였다. 이중 하부 조사를 통한 3차원 μ -Manipulator 모듈을 구성하여 직경 10 μm 의 Polystyrene microsphere의 3차원 Manipulation 실험을 통한 검증을 행하였다. 실험결과 안정된 3차원 Manipulation 결과를 얻을 수 있었다. 또한, XYZ piezo 스테이지와 더불어 Manipulation의 자유도를 높이기 위한 레이저 빔 동적 위치제어 모듈을 구성하여 그 유용성을 확인하였다. CCD 카메라를 통해 얻어진 영상 위의 마우스의 위치와 2축 Galvanometer Scanner를 이용한 레이저 빔의 위치를 연동시켜 단순한 마우스 클릭 및 드래그로 레이저 빔의 위치 즉, Manipulation 대상물을 자유롭게 원하는 위치로 이동가능하게 하였다.

참고문헌

1. Neuman, C., Block, S. M., "Optical Trapping", Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 9, 2787-2809, 2004
2. Ashkin, A., "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure," Appl. Phys. Lett. 24(4), 156-159, 1970
3. Greulich, K. O., "Micromanipulation by Light in Biology and Medicine: The Laser Microbeam and Optical Tweezers," Birkhäuser, 1999.
4. Michihata, M., Takaya, Y., Miyoshi, T., "Measurement of Oscillating Condition for 3D Probing Accuracy of Microparts using Laser Trapping Probe for the nano-CMM," Proceedings of ISMTII, 453-456, 2007.