광방사압을 이용한 마이크로 대상물의 능동형 회전조작에 관한 연구

Active control of micro-object rotation using optical radiation pressure

*#하태호[1], 박상순[1], 이창우[1], 송준엽[1]
*#T. H. Ha[1](taehoha@kimm.re.kr), S. S. Park[1] , C.W. Lee[1] , J.Y. Song[1]
[1]한국기계연구원 지능형 생산시스템 연구본부

Key words : Optical radiation pressure, Rotation, Micro-object, Polarization

1. 서론

1970년 Arthur Ashkin에 의해 광방사압을 이용한 미립자의 포획실험이 성공한 후, 생물학 분야, 화학 분야, 콜로이드 과학, 폴리머 과학, 박막 분야와 같은 다양한 분야에서 Cell manipulation, Cell surgery, Micro fluidics, micro-interaction의 측정, 광회전체, 측정용 프로브의 용도에 이르기 까지 다양한 응용과 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구의 핵심요건 중의 하나는 대상물을 어떻게 포획하며, 자유로운 이송, 회전, 일정 자세유지와 같은 자유로운 조작이 가능한지 여부이다.

본 연구에서는 이전의 제작한 하부조사 타입의 3차원 μ-manipulator 모듈에 이어 Scattering Force보다 Gradient Force가 주도적인 영향을 미치는 상부조사 타입의 μ-manipulator 모듈을 구축하여 3차원 manipulation 실험을 행하였다. 또한, 기존의 대상물의 포획 및 3차원적인 이송과 같은 manipulation에 덧붙여 회전운동의 능동적인 조작에 관한 연구를 진행하였다. 빔의 편광상태로 조사광이 가지는 각 운동량을 이용하여 마이크로 대상물의 회전조작 실험을 행하였으며, 능동적인 회전조작을 위하여 PEM (photoelastic modulator)을 이용한 회전조작을 제시하였으며, 기초 실험을 통하여 그 가능성을 확인하였다.

2. 상부 조사 타입 3차원 μ-manipulator 모듈

Fig. 1은 개발한 상부 레이저 조사 타입의 3차원 μ-manipulator 모듈의 사진을 나타낸다. 이 모듈은 Gradient Force가 주도적인 영향을 미치는 상부조사에 의한 레이저 트랩핑 방식으로 설계하였다. 최대 출력 20mW, 파장 1064.5 nm의 NIR 영역의 편광유지 파이버 레이저를 광원으로 사용하였다. 콜리메이션 되어진 빔은 광방사압을 발생시키기 위하여 N.A 1.25의 고N.A. Oil immersion 타입 대물렌즈 통해 집속되어 manipulation 대상물을 포획하게 된다. 또한, 하부에 조명계를 설치하여 manipulation용 대물 렌즈를 통하여 상부 관측도 행하도록 하였다.

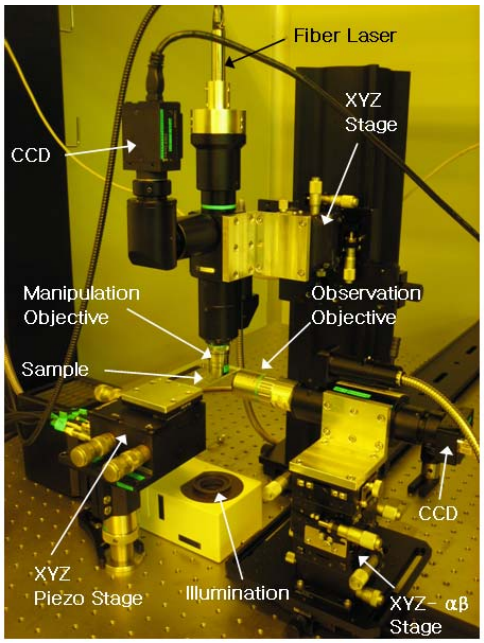

Fig. 1 Picture of 3D μ-manipulator Module (Upright type)

측면에 W.D가 긴 대물렌즈를 장착한 관측용 경통을 설치하여 Z 방향의 관측을 가능하게 하였으며, 광원과의 상대적인 변위 발생을 위해서 Closed-loop 타입의 XYZ piezo 스테이지를 사용하였다.

3. Micro-object의 3차원 manipulation 실험

전술한 상부조사 타입의 3차원 μ-manipulator 모듈을 이용하여 micro-object의 조작실험을 행하였다. 본 실험에서는 상대적으로 높은 Reflective Index를 가지고 있는 Polystyrene microsphere를 이용하여 manipulation 실험을 행하였다. 직경 10μm의 microsphere가 수중에 분포된 액이 커버 글래스와 슬라이드 글래스 사이에 위치하게 되며, manipulation용 대물렌즈를 통해 집속된 레이저 빔은 상부에서 immersion oil과 커버 글래스를 통해서 microsphere를 조사·포획하게 된다.

Fig. 2는 직경 10μm의 microsphere를 상부 조사 타입의 3차원 μ-manipulator 모듈을 이용한 트랩 및 이송 장면의 상부 관측 사진을 나타낸다. 상부의 광원은 고정시킨 후 하부의 XYZ 스테이지를 이송시켜 트랩된 microsphere와 슬라이드 글래스 상의 이물과의 상대적인 변위를 발생시켰다. 그림에서 볼 수 있듯이 레이저 빔에 의해 트랩된 microsphere에서 레이저에 의한 간섭광이 관측되고 있으며, 트랩된 물체는 슬라이드 글래스에 고정된 이물과 달리 A 위치에서 D 위치까지 원하는 위치로 이송되고 있음을 알 수 있다.

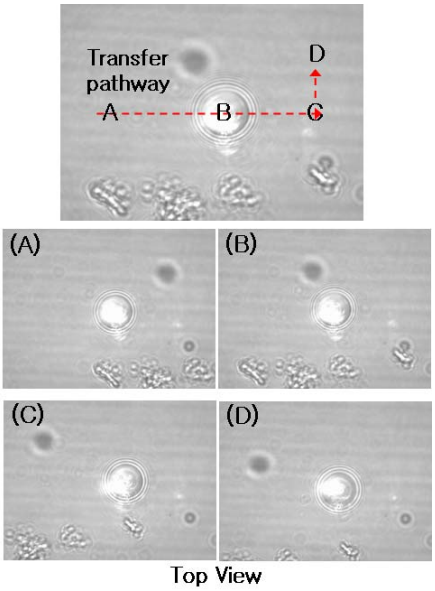

Fig. 2 μ-manipulation of microsphere

4. Micro-object의 회전

Micro-object의 manipulation에 있어서 대상물을 얼마나 자유롭게 다양한 방향으로 조작 가능 하느냐가 중요한 요인이 된다. 보다 자유로운 조작을 위하여 3차원적인 조작 즉, XYZ 방향의 이송은 물론 회전과 같은 동작이 필요하게 된다. Micro-object의 회전력을 가하기 위하여 파이버에서 출사되는 직선편광의 빔과 대물렌즈 사이에 λ/4 판을 배치시켜 편광상태를 원편광 상태로 만들어 manipulation 대상물에 입사시켰다. 다양한 Micro-object의 포획 실험 및 회전실험을 위하여 Polystyrene microsphere 대신

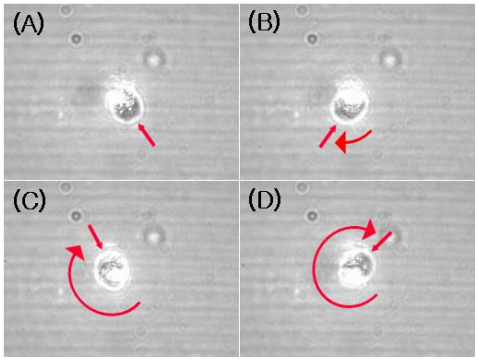

Fig. 3 Rotation of diamond particle

다이아몬드 입자를 이용하였다. Fig. 3은 원편광을 이용한 크기 약 6 μm의 다이아몬드 입자의 포획 및 회전에 대한 실험 결과를 나타낸다. 그림은 회전 시의 캡처영상으로, 보는 바와 같이 타원형의 다이아몬드 입자가 원편광 입사빔에 의하여 반시계 방향으로 회전하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

5. Photoelastic modulator (PEM)를 이용한 동적 회전 제어

전술한 바와 같이 μ-manipulation에 있어서 회전조작이 중요한 요소 중의 하나이며, 편광판을 도입하여 생성한 원편광 빔을 이용한 다이아몬드 입자의 회전 실험 결과를 제시하였다. 그러나 편광판을 이용하는 경우 회전력 자체의 발생은 가능하나 회전력 발생의 능동적인 제어는 곤란하다. 즉, λ/4 판의 도입과 제거와 같은 기계적인 동작을 통해서만 회전력 발생 및 소멸의 조절이 가능하나 현실적으로 적용이 곤란하다.

이에 본 연구에서는 PEM (Photoelastic modulator)를 이용한 동적 회전조작 방법을 제안한다. PEM은 등방성의 투명물질에 piezo-electric 소자를 장착한 것으로, 전기 신호가 piezo-electric 변환기에 인가되면 기계적인 변형을 일으키게 되며 이 변형은 piezo로부터 등방성 투명물질에 전달되게 된다. 이 기계적인 변형이 투명물질에 주기적인 복굴절을 발생시키게 된다. 즉, PEM에 각주파수 p [rad/s]의 고주파의 전계를 가하면 음향진동의 정재파가 발생하여 투명물질에 p [rad/s] 로 진동하는 1축 이방성이 생겨, 이 결과 복굴절이 발생한다. 이에 발생한 상변화에 의해 편광상태가 변화하게 된다. 즉, 선형 편광된 빔이 PEM을 투과할 때 복굴절을 변조함에 따라 투과된 광은 원편광으로 변환이 가능하며, 변조 주기에 따라 원편광 정도도 아무런 기계적인 동작 없이 가능하게 된다. 즉, manipulation용 레이저 경로상에 PEM을 설치함으로 능동적인 회전력의 인가 및 해제를 기계적인 동작 없이 가능하게 될 것으로 기대된다.

먼저 PEM에 의한 입력광의 편광상태 변조 성능 평가를 위하여 Fig. 4와 같은 구성으로 기초 실험을 행하였다. 실험장치는 크게 광원인 레이저 다이오드, 2개의 λ/2 판, PEM 시스템, 파워미터로 구성되어져 있다.

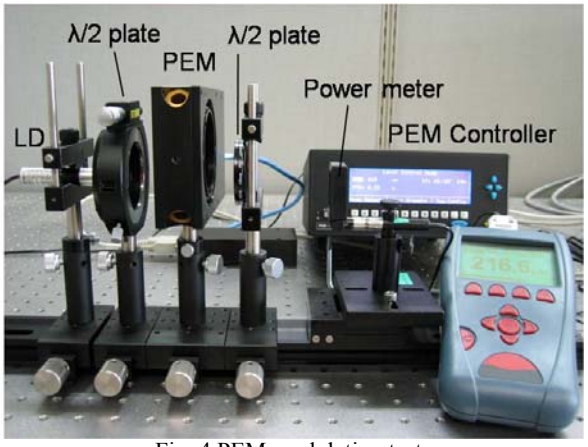

Fig. 4 PEM modulation test

Cross-Nicole 배치로 구성된 λ/2 판 사이에 PEM을 설치하여 PEM 작동시와 미작동시의 최종 투과광 광량을 파워미터로 측정하였다. 즉, 첫번째 λ/2 판을 통해 직선편광 상태로 만들어진 빔은 PEM에 의해서 그 편광상태가 변하게 되고 그에 따라 또 하나의 λ/2 판을 통과해 나오는 최종 광강도의 변화가 발생하게 됨으로 이 광량으로 편광상태의 변화를 검증한다.

PEM을 각각 off 시와 각각 λ/2 판, λ/4 판과 같은 역할을 하도록 주파수를 설정하였을 때의 결과를 비교하였다. PEM 입사전에 약 5 mW의 강도를 가지는 LD는 PEM off시에 Cross-nicole배치의 결과로 최종 끝단에서는 거의 광이 검출되지 않았다. PEM의 설정을 통하여 λ/2 판, λ/4 판과 같은 역할을 할 때는 각각 0.62 mW와 0.18 mW의 광강도가 측정되었다. 이 결과로부터 λ/2 판 설정 시 직선 편광방향이 바뀌었으며, λ/4 판 설정 시 원광으로 편광상태가 바뀌었음을 알 수 있다. 따라서 대상물의 회전이 필요할 때 PEM을 구동시켜 원하는 회전 운동을 시킨 후, PEM을 off 시키거나 일시적으로 반대방향의 회전력을 가하여 회전을 중지시켜 원하는 위치에서 정지 시키는 데 사용 가능하리라 생각된다. 이와 같이 PEM을 이용함으로써 아무런 기계적인 동작의 개입 없이 입사광의 편광상태의 조정을 통한 조사광의 각운동량으로 micro-object의 능동적인 회전조작이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 단지 λ/4 판 설정뿐만 아니라 원편광정도의 다양한 설정을 통하여 회전에 있어서도 다양한 자유도를 부가가 가능할 것으로 기대된다.

6. 결론

본 논문에서는 상부조사 방식의 μ-manipulation 모듈을 제작하여 광방사압을 이용한 micro-object의 조작실험을 행하였다. 구성한 모듈을 이용하여 직경 10 μm의 Polystyrene microsphere의 3차원 manipulation 실험을 통한 검증을 행하였다. 또한, Polystyrene 입자뿐만 아니라 다이아몬드 입자의 포획실험을 행하였으며, λ/4 판의 도입을 통한 원편광 입사로 입사광의 각운동량을 이용하여 직경 6 μm의 다이아몬드 입자의 회전이 가능함을 확인 하였다. 이 결과를 바탕으로 기계적인 동작의 개입 없이 Micro-object의 능동적인 회전조작을 위하여 PEM (Photoelastic modulator)을 이용한 입사광의 편광상태를 조절을 제안하여 기초 실험을 행하였다. PEM은 piezo를 이용하여 등방성 투명물질에 주기적인 복굴절을 발생시켜 입사광의 편광상태를 변화시키는 장치로 PEM을 이용하여 입사광의 편광상태를 조절하여 대상물에 조사함으로써 조사광의 각운동량을 발생시켜 기계적인 동작 없이 Micro-object의 회전운동의 제어가 가능할 것으로 기대된다.

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.
5. 하태호, 박상순, 이창우, 송준엽, "광방사압을 이용한 3차원 μ-manipulator prototype 개발", 성국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 795-796, 2008.
6. Mushfique, H., Leach, J., LEonardo, R.D., Padgett, M., Cooper, J., "An Optically Driven Pump for Microfluidics," Proceedings of SPIE, Vol. 6326, 2006.