

## 레이저 광속의 물매힘과 산란힘을 이용한

## 유전체 미세구의 포획

Dielectric Micro-sphere Trapping with Gradient Force  
and Scattering Force of Laser Beam

전형수, 이재형, 장준성

레이저 및 양자광학 실험실, 서울대학교 물리학과

chonhs@photon.snu.ac.kr

1970년 Ashkin이 레이저 광압을 이용하여 수 마이크로미터 크기(micrometer sized)의 유전체를 광속의 진행 방향으로 가속시킴과 동시에 광속축(beam axis)방향으로 입자를 끌어당기는데 성공함으로써 레이저를 이용한 미세구(micro-particle)의 포획 및 조작에 대한 연구와 실험이 시작되었다<sup>[1]</sup>. 이후에 많은 사람들에 의해 연구가 활발히 이루어졌으며<sup>[2]-[7]</sup>, 이러한 레이저를 이용한 미세구의 포획방법은 광집계(optical tweezer)로써 생물학과 물리학 분야에서의 높은 가능성 때문에 지금도 연구가 계속되고 있다. 특히 물리학에서는 미세구를 산란체(scatterer)로 하는 실험에서 산란체(scatterer)를 개별적으로 조작하는데 사용할 수 있어서 단일 산란체(scatterer)에 대한 산란 실험을 가능하게 하며, 기존에는 다루기가 어려웠던 마이크로미터 크기(micrometer sized)의 입자를 개별적으로 조작하는데 반드시 필요한 도구로 쓰일 수 있다. 또한 이 광압(radiation pressure)을 평평하면서 좌우 비대칭이고 회전 대칭성을 갖는 마이크로미터 크기 물체를 회전시키는데 이용됨으로써 마이크로 모터의 제작 가능성도 보여 주었다.<sup>[8]</sup>

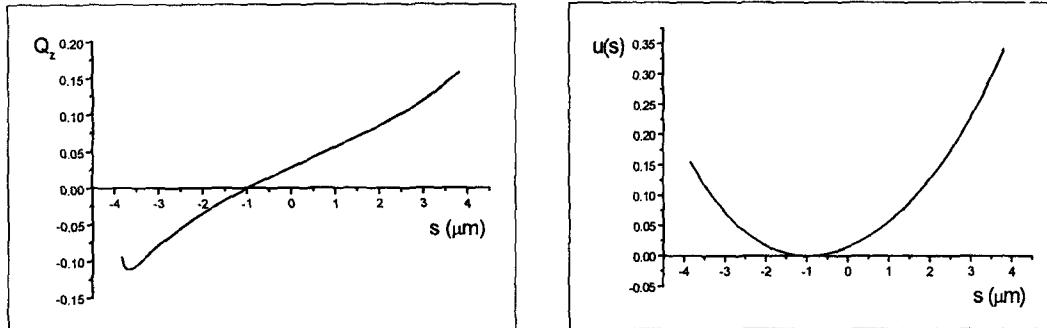
레이저 광선이 미세구에 입사될 때 미세구에 입사되는 광선의 포인팅벡터(Poynting vector)와 미세구를 투과한 후 굴절되어나가는 광선의 포인팅벡터(Poynting vector)는 동일하지 않고 차이가 있는데 이 차이 때문에 레이저 광선으로부터 미세구로 운동량전달(momentum transfer)이 나타나며 이렇게 전달된 운동량이 미세구를 움직이게 하거나 포획할 수 있게 한다. 이때 광선의 진행방향의 힘성분을 산란힘(scattering force)라하고, 진행방향에 수직인 성분힘을 물매힘(gradient force)라 한다. 이번에는 레이저 광속을 대물렌즈를 사용하여 강하게 집속(tight focusing)하여 미세구에 입사시키면 미세구에 입사하는 광속을 구성하는 각 광선들은 산란힘과 물매힘을 개별적으로 형성하는데, 이 개별적인 산란힘(scattering force)의 합은 광속축(beam axis)을 따라 레이저 광속의 진행방향으로 미세구를 밀어내는 역할을 하고, 물매힘(gradient force)의 합은 레이저 광속의 진행방향과 반대방향으로 미세구를 끌어당기는 역할을 한다. 따라서 이 힘이 같아지는 위치에서는 미세구가 안정적으로 포획될 수 있다.

TEM<sub>00</sub> 모드(mode)의 레이저 광속으로부터 광속축(beam axis)에 놓인 미세구가 레이저 광속의 진행방향으로 받는 힘의 크기는 다음과 같이 주어진다. (입사되는 빔의 편광상태를 우(좌)원편광상태로 가정하여 계산한 것이다.)

$$F_z = (F_z)_{TM} + (F_z)_{TE} \quad \text{여기서 } (F_z)_{TM(TE)} \text{는 TM편광과 TE편광 상태에 의한 힘을 나타내며,}$$

$$Q_z = F_z / (n_1 P / c) \text{으로 정의되는 차원이 없는 양인 트랩효율(trapping efficiency)과 퍼텐셜(potential)}$$

$u(s) = -\int Q_z(s) d(-s)$ 을 계산한 결과의 전산시뮬은 다음과 같다.



TEM<sub>00</sub> 모드(mode)의 경우 미세구의 트랩효율과 퍼텐셜

여기서  $s$ 는 광속초점으로부터 미세구 중심까지의 변위이며, 위의 두 그래프에서 알 수 있듯이 미세구 중심의 뒷부분인  $s=-0.99\mu\text{m}$ 방이 평형점이며 이 점에서 미세구가 포획된다.

배율이 60배(N.A=0.80), 40배(N.A=0.65)인 대물렌즈를 사용하여 지름이  $6.4\mu\text{m}$ 인 폴리스티렌 미세구(polystyrene microsphere)를 물 속에서 포획했으며, 또한 초점위치를 바꿔 가면서 미세구를 움직였다. 이 때 필요한 레이저의 출력은 4mW였다. 이 보다도 더 작은 입사출력을 사용하여 미세구를 포획하려면 매질의 상태가 정적인 상태를 계속 유지되어야 하며, 미세구와 다른 물질들이 결합하지 않고 매질 속에서 정지상태로 떠있을 경우에만 가능하다. 또한 미세구에 정확히 초점을 맞추고, 출력을 지나치게 크게 하면, 레이저 광속에 의해 미세구가 파괴되는 것을 볼 수가 있었다.



배율이 60배 laser 출력 16mW, 물속 (화살표가 가리키는 미세구가 포획된 것임)

참고논문.

- [1] A.Ashkin, Phys. Rev. Lett. 24, 156(1970)
- [2] A.Ashkin, J.M.Dziedzic, Appl. Phys. Lett. 19, 283(1971)
- [3] A.Ashkin, J.M.Dziedzic, Appl. Phys. Lett. 28, 333(1976)
- [4] G.Roosen and C.Imbert, Phys. Lett. A59, 6(1976)
- [5] A.Ashkin, J.M.Dziedzic, J.E.Bjorkholm, and Steven Chu, Opt. Lett, 11, 288(1986)
- [6] R.Omori, T.Kobayashi, and A.Suzuki, Opt. Lett. 22, 816(1997)
- [7] K.T.Gahagan and G.A.Swartzlander, Jr, Opt. Lett, 21, 827(1996)
- [8] E.Higurashi, H.Ukita, H.Tanaka, and O.Ohguchi, Appl. Phys. Lett. 64, 2209(1994)