

790 nm의 반도체 레이저를 이용한 미세 입자의 포획*

유석진 · 이진서 · 안지수 · 권남익

한국의국어대학교 물리학과

(1995년 11월 5일 받음)

790 nm의 반도체 레이저를 이용하여 수용액 속에 잠겨있는 3~4 μm 크기의 yeast 입자를 포획하는데 성공하였다. 포획된 입자는 2차원 평면과 3차원 공간의 이동에도 안정된 포획 상태를 유지하였다. 이 실험으로 레이저 광속이 매질과 입자의 표면에서 굴절할 때, 입자의 굴절률과 매질의 굴절률의 차에 의하여 생기는 광압의 존재를 확인하였다. 그리고 레이저 광속에 수직하게 입자를 움직이면서 레이저 광속에 수직인 방향의 포획력을 측정하고 레이저의 출력에 따른 변화를 연구하였다.

I. 서 론

1900년대 초기에 광압의 존재가 실험적으로 확인된 후 1970년에 들어와 A. Ashkin^[1]에 의해 레이저 광속의 광압에 의한 포획 실험이 성공되고 포획 실험 분야에 많은 발전이 있었다. 포획 실험에는 주로 레이저를 이용하는데 레이저 광속은 에너지 밀도가 높고, 단색성, 간섭성이 뛰어나 렌즈 등의 광소자에 의해 1 μm 이하의 크기로 집속할 수 있어 실험에 용이하다.

레이저 광속을 이용해서 입자를 포획할 수 있는 힘은, 광속이 입자에 굴절하기 전과 후의 운동량을 보존하기 위하여 생기는 광압으로 설명되었다.^[1,3] 투명한 입자에 입사된 광속은 입자의 굴절률과 매질의 굴절률 차이에 의하여 굴절되고, 입사 광속과 산란 광속 사이에는 ΔP 만큼의 운동량이 변화한다. 이때 매질의 굴절률이 입자의 굴절률보다 작으면, 운동량을 보존하기 위하여 경사력의 방향은 입사 광속의 초점을 향한다. 그래서 광속이 아래 방향으로 입사하면 위 방향으로 경사력이 작용하며, 이 경사력이 충분히 크면 초점 바로 아래에서 광속의 산란력과 중력의 합과 균형을 이루며 입자를 포획한다. 그리고 광속의 초점이 이동하면 입자는 계속적인 불균형 상태에 놓이게 되며, 이 불균형 상태를 극복하기 위하여 광속 초점 방향으로 반작용이 일어나야 한다.^[4] 이러한 원리에 의하여 입자를 2차원 평면과 3차원 공간 내에서

포획 및 이동하는 것이 가능하다.

레이저를 이용한 미세 입자의 포획은 생물공학 분야에서 많이 응용하고 있다. 과거에는 아르곤 레이저나 Nd:YAG 레이저를 사용해서 세포와 세균의 특성 등을 조사했다.^[5] 생물학적 물질에서 자외선 영역에서의 흡수가 많이 일어나며 물에서는 1.4 μm 이상의 적외선 영역에서의 흡수가 많다.^[6] 따라서 적외선 영역에서 단색성이 뛰어난 반도체 레이저를 이용함으로써 포획 실험을 보다 적절하고 편리하게 할 수 있다. 최근 보고되는 논문에 의하면 두개의 레이저 광속을 이용하여 적외선 광속으로는 입자를 포획하고 자외선 광속으로는 세포를 조작^[7] 하기도 하였다. 이밖에도 레이저 광속 광압을 이용한 입자의 포획 기술은 이방성 입자의 편방향 회전^[8] 및 구형 입자 이외의 위와 바닥이 평평하고 측면이 비대칭인 입자의 회전 각운동량 측정에 이용되고 있다.^[9] 국내에서 행해진 비슷한 실험으로는 아르곤 레이저 광속을 아래에서부터 쏘아 올려 수증기 입자를 밀어 올린 광부양 실험이 있다.^[10,11]

본 실험에서는 파장 790 nm의 반도체 레이저 광속을 아래 방향으로 입사하여 수용액에 잠긴 3~4 μm 크기의 yeast 입자를 포획하고, 수평 방향과 수직 방향으로 이동시켜 보았으며, 레이저 광속에 직각인 수평 방향으로의 포획력을 측정하였다.

이때 고려할 점은 레이저 광속 초점을 이동하는 속도이다. 입자는 2차원 평면과 3차원 공간 내에서 움직일 때 매질에 의한 저항을 받으며 저항은 입자를 포획 상태로부터 벗어나게 할 수 있다. 본 실험에서는 입자를

*본 연구는 교육부의 기초과학 학술 연구 조성비(BSRI-94-2429)의 지원을 받아 수행된 과제입니다.

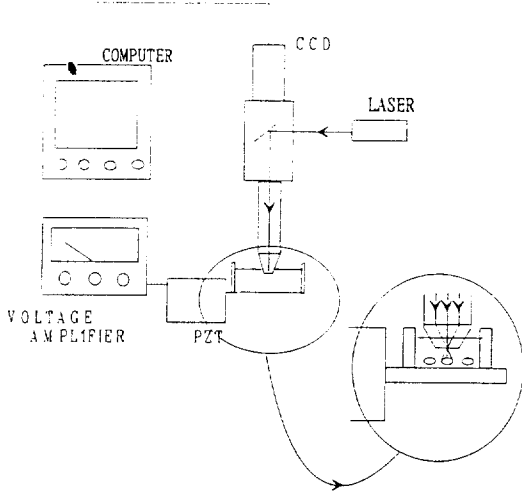


그림 1. 미세 입자의 포획을 위한 실험 구성도.

포획하는 수용액 용기를 움직여서 입자가 포획에서 벗어나는 임계속도를 측정하고 이를 이용하여 포획력을 구하였다. 입자를 포획할 수 있는 포획력의 레이저 광속에 수직인 성분을 Stokes law에 의하여 구하면^[5]

$$D = 6\pi\eta r v_c \quad (1)$$

이다. 여기서 D 는 레이저 광속의 수직 성분 방향으로의 포획력, η 는 수용액의 점성(20°C에서 1.0×10^{-2} poise), r 은 입자의 반지름($4 \mu\text{m}$), 그리고 v_c 는 측정된 입자의 임계속도이다.

II. 실험 및 결과

그림 1은 수용액에 잠겨있는 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 크기의 입자를 레이저 광속으로 포획하기 위한 장치의 구성도이다. 입자를 포획하기 위하여 상용의 금속 현미경을 개조하여 사용하였다. 위 방향에서 입사해 주는 halogen lamp를 제거하고, 그 자리에 소형 거울지지대를 개조하여 부착하였다. 거울지지대의 베어링을 나사로 교체하여 앞판에 집속렌즈를 부착하고 뒷판에 반도체 레이저를 부착하여 광속의 방향과 집속 각도를 동시에 조절할 수 있도록 하였다.

이 레이저 광속은 dichroic 거울에 반사된 후 현미경의 대물렌즈에 의하여 입자에 최대 초점이 모여진다. 레이저의 초점 위치에 포획 되어있는 입자가 CCD화면에 가장 선명한 상태를 나타내도록 화상 초점의 위치를 일치시켰다. 수용액 용기의 바닥에 있는 입자를 포획하기

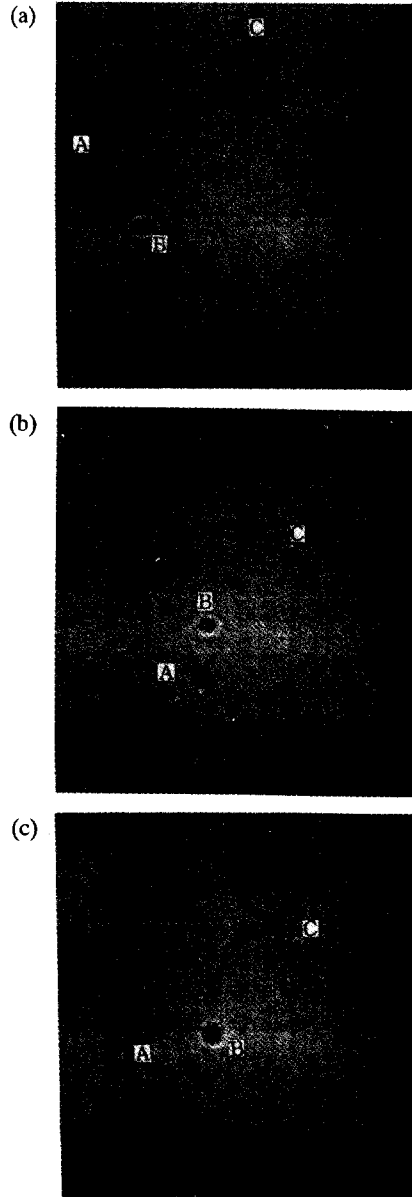


그림 2. (a) 레이저 광속에 의하여 B 입자가 포획된 모습, (b). 입자가 포획되어 2차원 평면상을 움직인 모습: B 입자가 그림2-(a)의 위치에서 화살표 방향으로 움직였다.(c). 입자가 포획되어 3차원 공간상을 움직인 모습: A와 C입자는 화상의 초점에서 벗어나 모습이 흐려졌다.

위해 먼저 현미경의 대물렌즈를 수용액에 닿게 하여 수용액 표면에 의한 레이저 광속의 반사를 제거하였다. 대물대를 수직으로 움직여서 영상이 가장 선명하게 하여

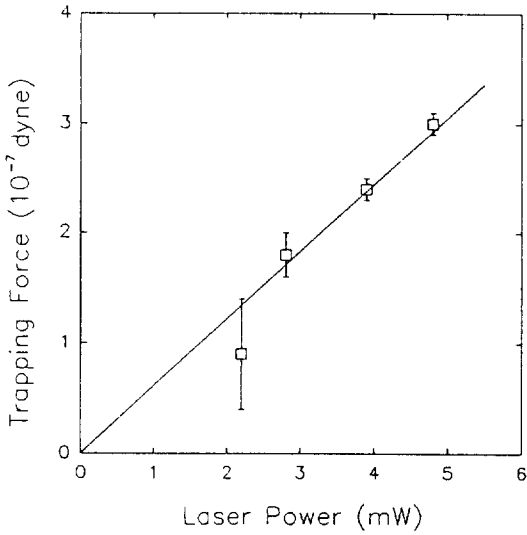


그림 3. 포획력과 레이저 출력의 관계.

입자의 모습을 확인한 후, 다시 수용액 용기를 수평면 상에서 이동시켜 수용액 용기의 바닥에 있는 입자를 포획하였다. 일단 포획된 입자는 수용액 용기를 이동시켜도 수용액 용기의 이동 속도가 임계속도 v_c 를 넘지 않는 한 항상 화면의 중앙(레이저 초점의 위치)에 위치한다. 입자를 들어올리기 위해서는 레이저의 초점이 수용액 용기의 바닥에서 위쪽으로 움직여야 하기 때문에 대물대를 낮춰 주었다.

레이저 광속을 이용한 입자의 2차원 평면과 3차원 공간 내에서의 포획된 모습은 그림 2에 잘 나타난다. 그림 2(a)에 보이는 3개의 입자중 B 입자가 광속에 의하여 포획되어 있다. 그림 2(b)는 B 입자가 포획되어 2차원 평면 내에서 움직인 그림으로서 입자 주위에 입사 레이저 광속의 산란에 의한 빛이 보이고 있다. 여기서 입자 A와 C의 거리는 그림 2(a)와 같으나 A와 B, C와 B의 거리는 변화했음을 알 수 있다. 그림 2(c)는 포획된 입자만 위로 들어올린 것이다. 여기서 B 입자의 크기는 그림 2(b)의 크기와 같으며, 주변의 입자들은 현미경의 초점에서 멀어져 그림 2(b) 크기보다 작아지고 흐려진 것을 알 수 있다.

그리고 포획된 입자가 수용액에 떠 있는 상태에서 수평 방향의 포획력을 측정하기 위하여 입자가 포획을 벗어나는 임계속도를 측정하였는데, 입자를 수평으로 움직이는 대신 공급 전압이 500 볼트일 때 $10 \mu\text{m}$ 늘어나는 압전소자를 이용해서 수용액 용기를 수평으로 이동시켜

주었다. 컴퓨터에서 만들어진 선형으로 증가하는 함수를 DAC(digital to analog converter)를 이용하여 전압이 0~10 V까지 선형으로 변하는 경사의 analog 신호로 변환시킨 후, 이 단일 경사파 신호를 고전압 증폭기(최대 500 V)로 증폭하여 압전소자에 공급하였다. 경사파의 주기가 길면 수용액 용기의 이동 속도가 느려서 입자가 포획된 채로 따라오지만, 주기를 줄여가면서 반복하면 입자가 포획된 상태에서 벗어날 때의 임계속도를 구할 수 있다. 이렇게 측정된 임계속도를 (1)식에 대입하여 광속에 수직한 방향의 포획력을 계산하였다.

그림 3은 포획력과 레이저 광속의 출력에 대한 그래프이다. 이 그래프에서 레이저의 출력은 대물렌즈 경통에 의한 광속의 산란을 제외하고 순수하게 입자의 포획에 사용된 광속의 출력을 나타낸 것이다. 이 그림에서 포획력은 레이저의 출력이 4.8 mW일 때 3×10^{-7} dyne이고 이때의 임계속도는 $62.5 \mu\text{m/s}$ 이다. 이 그림에서 포획력과 레이저 출력과의 관계가 비례함을 알 수 있다.

이번 실험에서 포획된 입자 주위의 입자들이 레이저의 초점으로 모여드는 것도 관찰하였으며, 떠다니던 입자들이 하나둘씩 초점에 모여들어 덩어리를 이루기도 하였다. 한개 이상의 입자가 포획된 경우에는 초점의 미소 이동에서도 쉽게 포획에서 벗어났다. 이밖에도 포획된 입자의 이동을 위하여 대물대의 수평 조절 나사를 이용하여 움직인 경우는 압전소자를 이용한 경우와는 다르게 조금만 움직여도 포획에서 벗어났다. 포획력의 측정에서는 포획된 입자가 $10 \mu\text{m}$ 의 거리를 움직이는 동안 주위의 입자와 충돌하여 포획된 입자는 포획에서 벗어나고 새로운 입자가 포획되기도 하였다.

지름이 $1 \mu\text{m}$ 인 latex bead의 경우, 수평면 상에서 포획하여 이동하는데는 성공하였으나 수직으로 들어올리는데는 실패하였다.

III. 결 론

레이저의 광압을 이용하여 투명한 입자를 포획하고, 포획된 입자를 수평 방향과 수직 방향으로 이동시키면서 현미경으로 관찰하였다. 수직으로 입사하는 광속에 직각인 수평 방향으로의 포획력을 측정하였으며, 이 포획력은 레이저의 출력과 선형적인 관계를 나타내었다.

본 실험의 결과는 세포나 유전체 입자의 상호 작용의 측정에 이용될 수 있으며, 자외선 레이저를 추가로 사용하면 입자의 조작에도 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and Steven, Chu, *Opt. Lett.* **5**, 11(1986).
- [2] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 156(1970).
- [3] A. Ashkin and J. M. Dze, *Ber. Bunsenges, Phys. Chem.* **93**, 254(1989).
- [4] Keiji Sasaki, Masanori Koshioka, Hiroaki Misawa, Noboru Kitamura, and Hiroshi Masuhara, *Appl. Phys. Lett.* **60**(7), 807(1992).
- [5] S. Sato, M. Ohyumi, H. Shibata, H. Inaba, and Y. Ogawa, *Opt. Lett.* **5**, 16(1991).
- [6] T. N. Buican, M. J. Smyth, H. A. Crissman, G. C. Salzman, C. C. Stewart, and J. C. Martin *Appl. Opt.* **26**, 5311(1987).
- [7] Hiroaki Misawa, Noboru Kitamura, and Hiroshi Masuhara, *J. Am. Chem. Soc.* **113**, 7859(1991).
- [8] T. Sagiura, S. Kawata, and S. Minami, *J. Spectrosc. Soc. Jpn.* **39**, 342(1990).
- [9] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi, *Appl. Phys. Lett.* **64**(17), 2209(1994).
- [10] 장 수, 이상수, *새물리* **24**, 387(1984).
- [11] 장 수, 이상수, *새물리* **24**, 380(1984).

Optical Trapping of Microparticles Using a 790 nm Semiconductor Laser

Sok-Jin Yu, Jin-Seo Lee, Jisu An and Namic Kwon

Department of Physics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 449-791, Korea

(Received: November 5, 1995)

We describe the optical trapping of yeast particles of 3~4 μm in water solution using a diode laser operating at 790 nm. The yeast particles are trapped by a laser focus and are moved in 2- or 3-dimensions. This confirms the concept of negative light pressure by the gradient force due to the difference of the index of refractions of solutions and particles. By moving yeast particle vertically to the laser beam axis, we measured the horizontal component of the trapping force and compared it with the laser power.