

집속된 헬륨네온 레이저 광압을 이용한 Mie 입자들의 포획과 이동

송영곤 · 조재홍 · 장 수

한남대학교 물리학과

(2000년 3월 21일 받음, 2000년 5월 30일 수정본 받음)

직경 3~5 μm 크기의 폴리스티렌 라텍스 입자들을 40배 또는 100배의 대물렌즈로 집속하여 조명한 2 mW의 저출력 헬륨네온 레이저 광속의 광압으로 포획하고, 이를 자유로이 이동시키면서 영문자 'A' 형태로 배열하였다. 그리고 수 μm 크기의 미생물도 성공적으로 포획하여 이동시킬 수 있었다. 이 결과 저출력 헬륨네온 레이저의 광압을 이용하여 미립자나 미생물을 자유자재로 이동시키거나 모을 수 있는 광집계로의 가능성을 확인하였다.

OCIS codes : 120.0120, 140.7010.

I. 서 론

1970년 Ashkin은 집속된 레이저 광속을 이용하여 물 속의 유전체 입자의 가속 및 포획 실험에 성공하였고, 또 분자나 원자의 가속과 포획의 가능성도 제시하였다.^[1] 이후로 레이저 광압을 이용하여 유전체 입자뿐만 아니라 금속 입자의 포획 및 이동,^[2,3] 입자의 공중부양,^[4,5] 입자의 회전과 각운동량 측정,^[6] 입자의 결합 및 분리,^[7] 더 나아가 분자나 원자의 광속 방향으로의 가속 및 직각 방향으로의 편향,^[1] 원자나 분자선속의 집속 및 발산,^[1] 단일 원자의 냉각 및 포획,^[7] 미생물이나 세포를 잡는 광집계(optical tweezer)^[8,9] 등에 관한 연구가 보고되었다. 국내에서도 1984년 아르곤 레이저 광속을 아래에서부터 쏘아 올려 수증기 입자(glycerol 10% + 증류수 90%)와 균질 유전체구를 공기 중에서 부양시킨 실험^[10]이 수행되었으며, 1996년에 반도체 레이저의 경사력을 이용한 미립자 포획에 대한 보고가 있었으며,^[2] 1997년에는 반도체 레이저를 이용한 루비덤 원자의 냉각 및 포획^[11]에 성공한 바 있다. 이러한 레이저 광속을 이용한 입자의 포획 및 부양은 입자를 주위와의 기계적 접촉으로부터 완전히 분리시켜 외부의 섭동을 최소로 줄일 수 있으므로 여러가지 정밀한 측정이나 실험에 유용하게 사용될 수 있다. 특히 광집계를 사용하면 미생물이나 생체의 미세한 조직들을 접촉하지 않은 상태에서 아무런 손상을 주지 않은 채로 포획 이동시킬 수 있고 아울러 세포 내에 있는 물체들을 세포막에 구멍을 뚫지 않고도 조작할 수 있을 뿐만 아니라 DNA를 조작함으로써 유전자 복사, 유전자 치료 등에도 기여할 수 있을 것이다. 그리고 수 μm 크기의 입자에 작용하는 광압을 이용한 마이크로 모터나 마이크로 가속도계 등과 같은 광미세기계장치(photomicrodynamic devices)의 제작 가능성도 제시되었다.^[6,12]

한편 광압에 의한 Mie 입자와 미생물의 조작, 또는 광미세기계장치의 제작을 위해서는 광압이 이들 입자나 미세기계장치에 선택적으로 작용하는 것이 필요한데, 이를 위해서 근접장 영역에만 존재하는 에바네스цент파(evanescent wave)의 광압

을 이용하는 것이 광압의 세기조절, 입자를 밀고 당기는 정도 및 입자의 변위조절에 매우 편리할 수 있다. 이러한 에바네스цент파가 가우스형 레이저 광속일 경우에 에바네스цент파 내에 위치한 Mie 입자나 얇은 박막이 받는 힘에 대해서는 S. Chang 등에 의해서 자세히 이론적으로 조사되었다.^[13-15] 그리고 S. Kawata 등은 반원통형 sapphire 프리즘 위에 형성된 에바네스цент파의 광압으로 입자를 이동시킬 수 있음을 보여주었고,^[16] 또한 가느다란 도파관 위에 형성된 에바네스цент파의 경사력 및 산란력을 이용해서도 입자를 선형 가속시켰다.^[17] 그리고 최근에는 에바네스цент파로 2개 내지는 3개씩 결합된 Mie 입자들을 회전시키는 실험이 보고되었다.^[18]

본 논문에서는 직경 3~5 μm 크기의 폴리스티렌 라텍스 입자들에 조명한 2 mW의 저출력 헬륨네온 레이저의 광압으로 이들 입자들을 포획하고, 이를 자유로이 이동시키면서 영문자 형태로 자유로이 배열하고자 한다. 그리고 이로부터 수 μm 크기의 미생물을 포획 및 이동시키고자 한다. 그리고 가격이 저렴한 저출력 헬륨네온 레이저의 광압을 이용하여 미립자나 미생물을 자유자재로 이동시키거나 모을 수 있는 광집계로의 가능성을 확인하고자 한다.

II. 집속된 레이저 광압에 의한 Mie 입자들의 포획 이론

입사 레이저 광속이 물질 입자에 의해 산란될 때는 광파의 에너지 변화뿐만 아니라 운동량의 흐름도 바뀌므로 입자는 이에 대한 반작용으로 광압을 받게 된다. 그림 1과 같이 x 축 방향으로 선형편극되고 z 축 방향으로 진행하는 TEM₀₀ 모드 레이저 광속이 좌표원점에 놓인 반경 a 인 균질 유전체구(대표적인 Mie 입자)에 미치는 레이저 광압에 관한 정확한 표현식이 J. S. Kim과 S. S. Lee에 의해서 유도된 바 있다.^[19] 이때 입사하는 레이저 광속의 최소 광속허리(beam waist)의 반경을 W_0 라고 하고, 최소 광속허리의 광축 중심의 좌표는 (x_0, y_0, z_0) 라고 놓는다. 그리고 복소점구면파(complex-source-point spherical

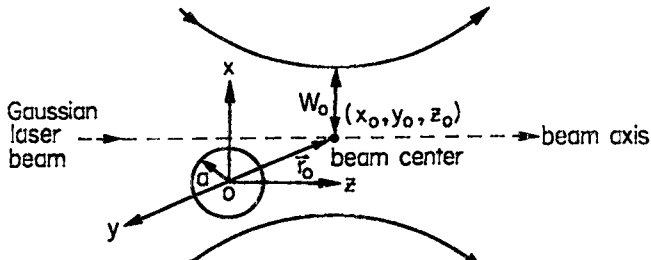


그림 1. z축을 따라 진행하는 TEM₀₀ 모드 가우시형 레이저 광속. 좌표의 원점을 반지름 a인 구의 중심에 두었고, 광속의 중심좌표는(x₀, y₀, z₀)이다.^[20]

wave)의 근축근사 표현식에 대한 구좌표계 표현을 Mie 입자의 구 경계조건에 적용하면, 다음과 같은 레이저 광속에 의한 유전체 구가 받는 광압의 각 x, y, z 성분인 F_x, F_y, F_z를 얻을 수 있다.^[20-22]

$$F_x = \frac{|C|^2}{4k^2} Re \sum_{l,m} \frac{1}{2l+1} \cdot \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \times \left[-i \frac{l(l+2)(l+m+1)(l+m+2)}{(2l+3)} \{ M_{ia} \alpha^{(1)}(l, m) \alpha^{(1)*}(l+1, m+1) + M_{ib} \beta^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l+1, m+1) \} + i \frac{l(l+2)}{2l+3} \{ M_{ia} \alpha^{(1)}(l, m) \alpha^{(1)*}(l+1, m-1) + M_{ib} \beta^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l+1, m-1) \} + (l-m)(l+m+1) M_{ic} \alpha^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l, m+1) + M_{ic} \alpha^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l, m-1) \right] \quad (1-a)$$

$$F_y = \frac{|C|^2}{4k^2} Im \sum_{l,m} \frac{1}{2l+1} \cdot \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \times \left[-i \frac{l(l+2)(l+m+1)(l+m+2)}{(2l+3)} \{ M_{ia} \alpha^{(1)}(l, m) \alpha^{(1)*}(l+1, m+1) + M_{ib} \beta^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l+1, m+1) \} - i \frac{l(l+2)}{2l+3} \{ M_{ia} \alpha^{(1)}(l, m) \alpha^{(1)*}(l+1, m-1) + M_{ib} \beta^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l+1, m-1) \} + (l-m)(l+m+1) M_{ic} \alpha^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l, m+1) - M_{ic} \alpha^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l, m-1) \right] \quad (1-b)$$

$$F_z = \frac{|C|^2}{2k^2} Re \sum_{l,m} \frac{1}{2l+1} \cdot \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \times [-m M_{ic} \alpha^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l, m)]$$

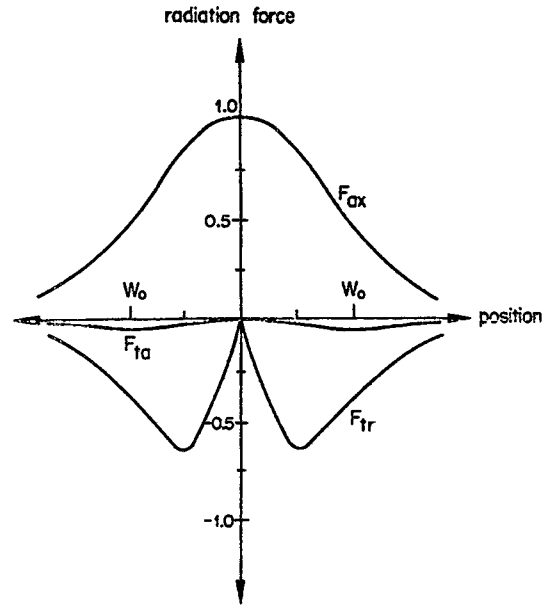


그림 2. 광압의 세 벡터 성분. W₀는 초평면에서의 광속 반경을 나타낸다.^[21]

$$-i \frac{l(l+2)}{2l+3} (l+m+1) \{ M_{ia} \alpha^{(1)}(l, m) \alpha^{(1)*}(l+1, m) + M_{ib} \beta^{(1)}(l, m) \beta^{(1)*}(l+1, m) \} \quad (1-c)$$

여기에서 α⁽¹⁾(l, m)과 β⁽¹⁾(l, m)은 x축 방향 편극파에 대한 전개계수이며, M_{ia}, M_{ib}, M_{ic}는 Mie 산란계수들로 구성된 인자로서 다음과 같이 정의된다.

$$M_{ia} = 2a_l a_{l+1}^* + a_{l+1}^* + a_l \quad (2)$$

$$M_{ib} = 2b_l b_{l+1}^* + b_{l+1}^* + b_l$$

$$M_i = 2a_l b_l^* + b_l^* + a_l$$

이때, (2)식의 산란계수 a_l과 b_l은 유전체 입자의 굴절률과 크기변수의 함수이고, (1)식의 전개계수 α⁽¹⁾(l, m)와 β⁽¹⁾(l, m)는 레이저 광속의 초평면 상에서의 반경과 유전체구에 대한 상대적인 위치의 함수이다.

그림 2는 상대 굴절률이 1 보다 큰 균질구가 TEM₀₀ 모드 레이저 광속의 초평면에 위치했을 때 받는 광압의 벡터 성분의 변화를 (1-a), (1-b), (1-c)식들을 이용하여 나타낸 것이다.^[21] F_{ax}는 광속의 축방향으로 작용하는 광압성분을 F_{tr}은 광속의 횡단면에서의 동경 방향으로 작용하는 광압성분을 나타내며, F_{ta}는 방위각 방향의 광압성분으로 F_x, F_y, F_z로부터 구할 수 있다. F_{ax}는 부호가 양이므로 Mie 입자를 광속방향으로 미는 힘으로 작용하고, 입자의 위치가 광속의 축으로부터 멀어짐에 따라 이 힘은 지수적으로 감소한다. F_{tr}은 부호가 음이므로 Mie 입자를 광속 방향으로 밀고, 이로 인하여 입자는 레이저 광속내에 포획된다. 이 힘의 절대값은 입자의 위치가 광속의 축에서 멀어짐에 따라 처음에는 증가하여 최대치에 도달한 뒤 다시 지수적으로 감소한다. F_{ta}는 F_{tr}과 비슷한 변화를 보이나

그 크기가 F_r 의 1/10 이하이다. 각 광압성분이 지수적으로 감소하는 이유는 입사하는 레이저 광속의 진폭분포가 가우스(Gauss)형이기 때문이다.

III. 실험 장치 및 방법

그림 3은 집속된 가우스형 광속에 의한 Mie 입자의 포획 및 조작을 위한 실험장치이다. 사용한 레이저는 파장이 632.8 nm이고 출력이 2 mW인 헬륨네온 레이저(Uniphase, 1303P)이며, 굴절률이 1.59인 투명한 폴리스티렌 라텍스 입자들을 실험에 사용하였다. 수직으로 조명할 수 있는 금속 현미경(Nikon, Optiphot2-Pol)의 재물대 위에 슬라이드 글라스를 놓고, 그 위에 Mie 입자들인 소량의 폴리스티렌 라텍스 입자나 효모 입자를 증류수에 혼합한 후, 주사기를 이용하여 재물대에 놓여있는 슬라이드 유리에 떨어뜨린다. 이 재물대는 미세한 X-Y-Z의 위치조정을 위하여 DC 모터 및 수동으로 조정하는 X-Y-Z stage에 붙여서 작동시켰다. 그리고 슬라이드 유리 위의 Mie 입자들을 포획하고 조작하기 위하여 40배 및 100배의 대물렌즈를 사용하였으며, 원래 금속현미경의 조명을 위하여 붙여 놓았던 할로겐 램프를 제거한 후에 광 집게용 헬륨네온 레이저를 장착하고 대물렌즈를 통하여 집속시켰다. 물에 잠겨있는 배율이 40배인 현미경 대물렌즈의 초점 부근에 슬라이드 글라스 면이 놓이도록 조절하기 위하여 세기를 가변할 수 있는 할로겐 램프의 조명광을 X-Y-Z stage 아래에서 수직으로 조명한다. 그리고 입자들이 선명하게 보이도록 먼저 수동으로 현미경 재물대를 조정하였다. 입자들의 운동을 배율이 10배인

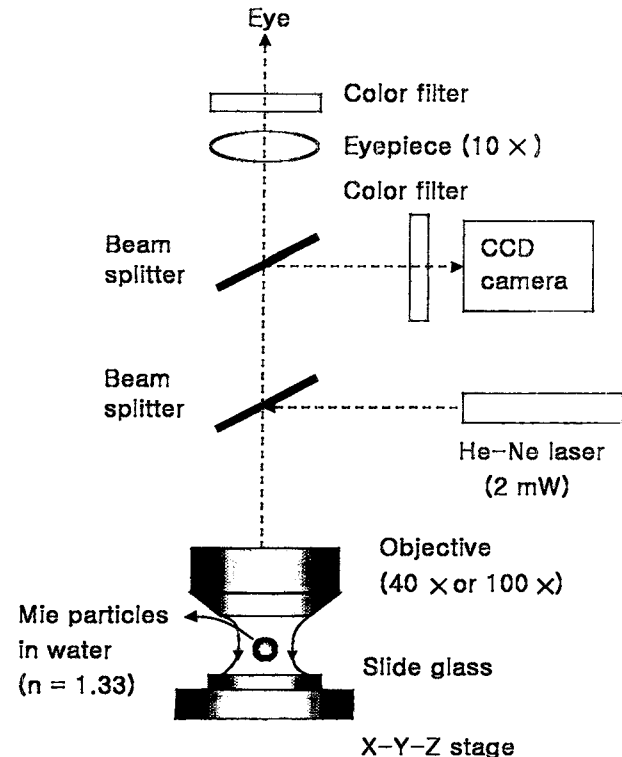


그림 3. 집속된 레이저 광속의 광압을 이용한 Mie 입자의 포획 및 이동을 위한 실험장치도.

대안렌즈로 볼 수 있는 동시에 CCD 카메라를 통하여 모니터로 관찰하면서 VTR로 녹화할 수 있도록 하였다. 프리즘 면 위에 있는 입자들 중 관찰할 입자를 선택한 다음, 슬라이드 유리면을 수평으로 유지한 채 재물대를 이동시켜 그 입자들이 대물렌즈에 의하여 집속된 레이저 광속 안에 위치하도록 하였다. 물체 면상의 조명광 세기가 입자들에 의해서 산란된 레이저 광속의 세기에 비하여 약하기 때문에 산란광을 차단하기 위해 330 nm부터 530 nm까지만 투과하는 칼라필터(Ealing, 26-3376)를 대안 렌즈 뒤와 CCD 카메라 앞에 각각 삽입하였고, 산란광의 세기에 따라 조명광의 세기를 조절하면서 관찰하였다.

IV. 실험 결과 및 논의

그림 4는 40배 대물렌즈를 통과한 출력 2 mW의 헬륨네온 레이저 광속의 초평면상에서 폴리스티렌 라텍스 입자를 포획하여 아래 방향으로 이동시킨 결과이다. 큰 원안에 있는 입자는 지름 5 μm 의 폴리스티렌 라텍스 입자이며, 이 입자가 포획

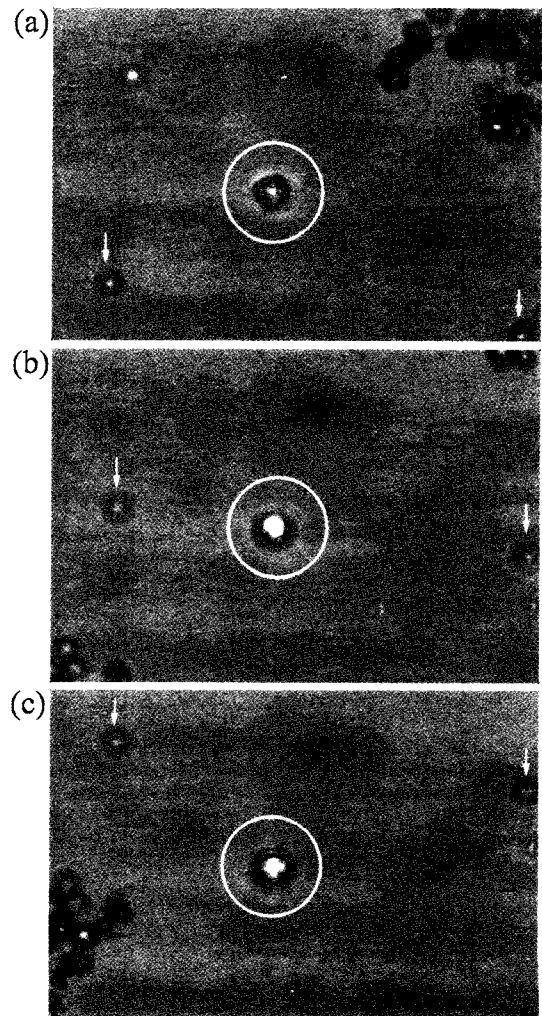


그림 4. 2 mW 헬륨-네온 레이저 광압에 의한 직경 5 μm 의 폴리스티렌 라텍스 입자의 포획 및 이동.

되어 이동되었다는 것을 보여주기 위하여 고정된 다른 입자들의 위치를 (a), (b), (c)의 사진에 화살표로 표기하였다. 앞서 2장의 이론에서 살펴 보았듯이 입사하는 레이저 광속의 축상 방향으로 미는 산란력(scattering force)이 입자들을 초점으로 잡아끄는 포획력인 경사력(gradient force) 보다 세기 때문에 레이저광속이 진행하는 방향으로 밀리나, 본 실험의 경우는 물 속이므로 입자와 외부의 굴절률 차가 별로 나지 않기 때문에 공기중에 놓인 Mie 입자들은 입사한 대부분의 광은 산란하는 대신에 투과하게 된다. 이로 인하여 산란력에 의한 밀리는 작용보다는 경사력에 의한 포획이 더 강하게 된다. 그러므로 물 속에서의 입자들은 레이저 광압의 경사력 때문에 밀리지 않고 포획되며, 레이저 축상의 단면에서도 광축상으로 입자들이 경사력 때문에 밀려 들어가서 포획된다. 그러므로 입자는 레이저 광속에 완전히 포획되어 이동할 수 있게 된다. 이외에도 증류수 속의 입자에 레이저 광속을 비출 때 입자는 광압에 의한 입자의 이동을 제외하고도 열확산력(radiometric force), 점성저항력, 중력 등의 영향을 받으며, 또 물분자들의 열운동에 의한 힘을 받아 Brown 운동도 한다. 이러한 힘들은 입자에 동시에 작용하므로 이들이 입자의 운동에 미치는 효과의 상대적 중요성을 검토할 필요가 있다.^[20] 이 중에서 열확산력은 입자나 주위의 매질이 빛에너지를 잘 흡수할 경우에 입자표면 부근에 불균일한 온도분포가 생겨 입자 주위에 있는 매질의 분자 열운동이 변화함으로써 입자가 받는 힘이다. 실험에 사용된 투명한 폴리스티렌 라텍스 입자는 레이저 광속의 파장 영역에서 흡수가 매우 적고 또 증류수의 열전도도가 비교적 좋아 열확산력이 문제가 될 만큼 큰 온도구배가 생기지 못한다. 그리고 점성저항력 F_{drag} 는 주위의 유체에 대한 구형입자의 상대속도가 v 일 때 Stokes 법칙에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$F_{drag} = 6\pi\eta av \quad (3)$$

여기서 η 는 유체의 점성계수이고 a 는 구의 반경을 나타낸다. 이와 같은 점성저항력은 입자가 외력에 의해 가속운동을 하는 경우 외력에 대해 저항하는 방향으로 작용하며, 유체가 대류운동을 하는 경우에는 입자가 유체를 따라 표류하도록 한다. 물 속에서 중력에 의한 입자의 최대 침강속도 v_g 는 중력과 점성저항력이 서로 상쇄되는 속도이다. 그러므로 점성계수가 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (20°C에서)인 물 속에서 비중이 1.05인 라텍스 입자의 최대 침강속도는 (3)식으로부터 $mg = 6\pi\eta av_g$ 이므로 $v_g = 0.88 \mu\text{m/s}$ 가 된다. 한편 Brown 운동에 의한 입자의 평균제곱변위는 $\sqrt{\langle \Delta r^2 \rangle} = \sqrt{t \cdot \frac{k_B T}{\pi\eta a}}$ 이다. 여기서 t 는 시간, T 는 절대 온도, k_B 는 Boltzmann 상수를 나타낸다. 따라서 20°C의 물 속에서 입자는 Brown 운동에 의해 매초 0.70 μm 씩 이동한다. 그러므로 입자의 운동에서는 중력과 Brown 운동의 효과는 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과를 이용하여 지름 3~5 μm 크기의 폴리스티렌 라텍스 입자들을 물에다 뿌려 놓은 뒤, 레이저 광속을 각각의 입자에 집속시킨 후, 이동시켜서 'A'자 형태의 모양을 만드는 과정이 그림 5이다. 그림 5에서 특별히 밝은 입자가 현재 포

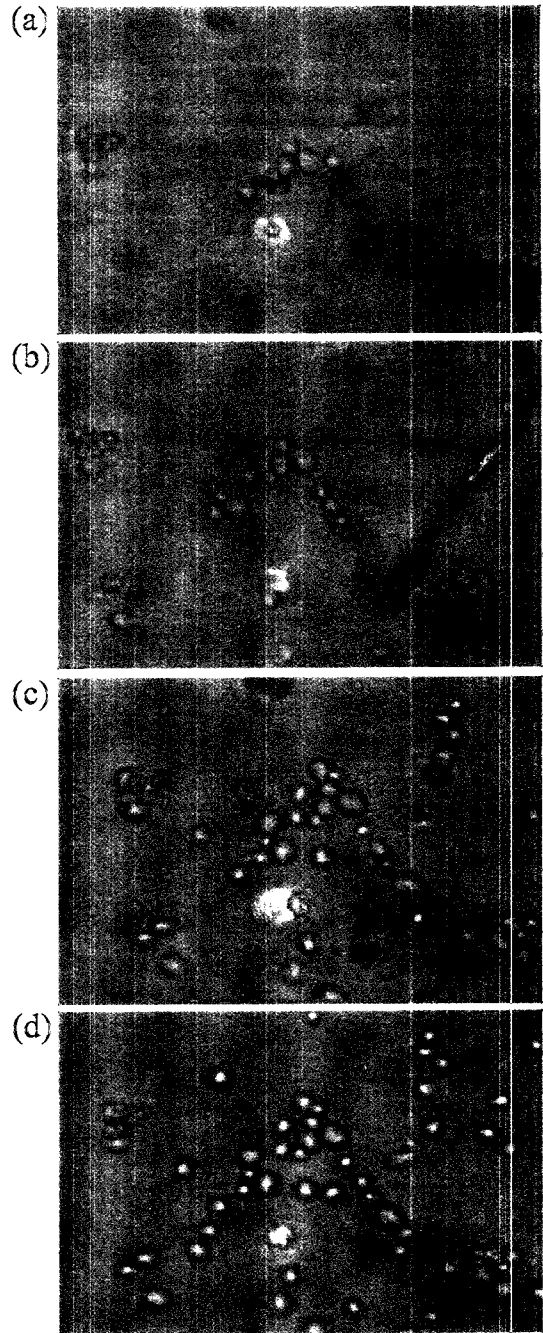


그림 5. 헬륨-네온 레이저 광압을 이용한 3~5 μm 크기의 폴리스티렌 라텍스 입자들의 'A'자 형태 배열.

획된 입자이며 이러한 입자들을 모아서 (a), (b), (c), (d)와 같이 서서히 'A'자 형태가 이루어지도록 하였다. 고정된 입자들은 외부의 진동이 없는한 그대로 유지된다.

또한 실제의 세포가 포획될 수 있는지를 확인하기 위하여 그림 6에서 보듯이 수 μm 길이의 살아있는 미생물을 역시 포획 이동시켰다. 그림 6의 (a), (b), (c)에서 보듯이 작은 원 안에 있는 미생물을 포획, 이동시켜 큰 미생물의 주변을 한 바퀴 돌아서 다시 재배치한 것이다. 이와 같이 기존의 2mW 정도인 작은 출력의 레이저에서 만드는 광압으로도 마이크로 크기의 입자를 자유로이 포획하고 이동시킬 수 있음을 보았고

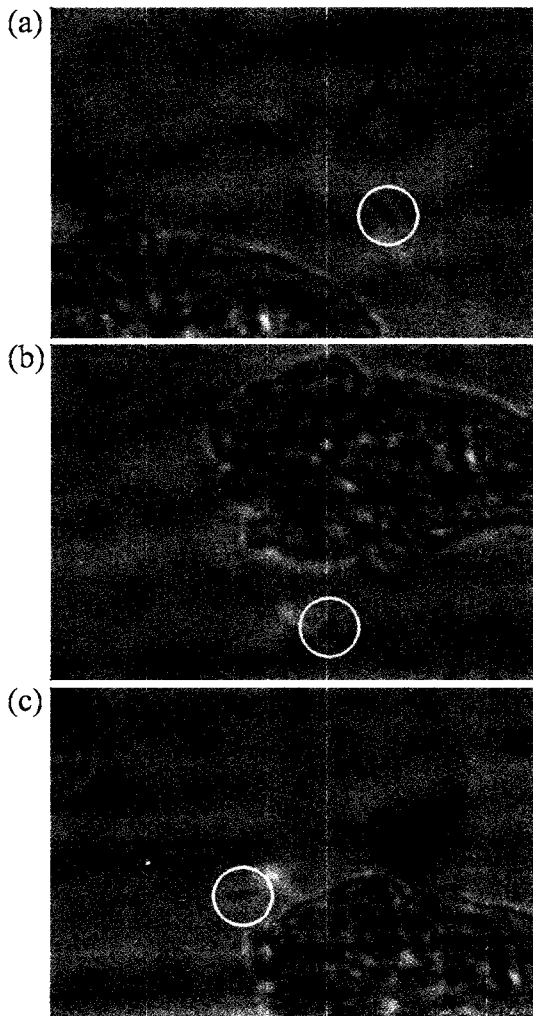


그림 6. 헬륨-네온 레이저 광압에 의한 길이 4~5 μm의 미생물의 포획 및 이동.

이를 통하여 Mie 입자나 미생물들의 광집계로 응용이 가능함을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

직경 3~5 μm 크기의 폴리스티렌 라텍스 입자들에 조명된 2 mW의 저출력 레이저의 광압을 이용하여 이들 입자들을 포획하고 이를 자유로이 이동시켰다. 저출력 레이저 광속을 40배 내지는 100배의 배율을 갖는 대물렌즈로 집속하여 입자들을 조작하기에 충분한 광압을 얻을 수 있었다. 이러한 집속된 레이저 광속의 광압에 의하여 광속방향으로 입자가 가속되며, 유체속에서는 집속된 레이저 광속의 광속허리 방향으로 작용하는 경사력에 의하여 입자가 유리면에 붙지 않고 약간 뜨기 때문에 이 입자들을 자유로이 조작할 수 있었다. 그리고 이 결

과로부터 폴리스티렌 라텍스 입자들을 조작하여 영문자 'A'를 만들기도 하였고, 수 μm 크기의 미생물을 포획하여 자유로이 이동시킬 수가 있었다. 이러한 실험 결과들로부터 집속된 레이저 광속이 Mie 입자나 미생물을 포획, 이동 및 조작이 가능한 광집계로 사용할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 156 (1970).
- [2] 유석진, 이진서, 안지수, 권남익, *한국광학회지* **7**, 24 (1996).
- [3] S. Sato, Y. Harada, and Y. Waseda, *Opt. Lett.* **19**, 1807 (1994).
- [4] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Opt.* **19**, 660 (1980).
- [5] R. Omori, T. Kobayashi, and A. Suzuki, *Opt. Lett.* **22**, 816 (1997).
- [6] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2209 (1994).
- [7] V. I. Balykin, V. S. Letokhov, V. G. Minogin, Yu. V. Rozhdestvensky, and A. I. Sidorov, *J. Opt. Soc. Am.* **B2**, 1776 (1985).
- [8] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura, and H. Masuhara, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 807 (1992).
- [9] Karel Svoboda and Steven M. Block, *Opt. Lett.* **19**, 930 (1994).
- [10] 장수, 이상수, *새물리* **24**, 387 (1984).
- [11] J. A. Kim, K. I. Lee, H. R. Noh, W. Jhe, and M. Ohtsu, *Opt. Lett.* **22**, 117 (1997).
- [12] A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 826 (1988).
- [13] S. Chang, J. H. Jo, and S. S. Lee, *Opt. Comm.* **108**, 133 (1994).
- [14] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo, and S. S. Lee, *Opt. Comm.* **129**, 394 (1996).
- [15] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo, and S. S. Lee, *Opt. Comm.* **139**, 252 (1997).
- [16] S. Kawata and T. Sugiura, *Opt. Lett.* **17**, 772 (1992).
- [17] S. Kawata and T. Tani, *Opt. Lett.* **21**, 1768 (1996).
- [18] Y. G. Song, S. Chang, and J. H. Jo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, L380 (1999).
- [19] J. S. Kim and S. S. Lee, *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 303 (1983).
- [20] 김진승, 레이저 광속의 광압에 의한 미립자의 부양에 관한 연구 (박사학위 청구논문, 한국과학기술원, 1983).
- [21] 장수, 유전체 미립자에 미치는 집속된 레이저 광파의 역학적 효과와 광부양에 관한 연구 (박사학위 청구논문, 한국과학기술원, 1986).
- [22] 박승욱, 집속된 레이저 광파에 의한 유전체 미립자의 포획과 이 과정에 따른 광파의 산란에 관한 연구 (박사학위 청구논문, 한국과학기술원, 1987).

Trap and movement of Mie particles by using the focussed He-Ne laser beam

Young Gon Song, Jae Heung Jo, and Soo Chang

Department of Physics, Hannam University, Taejon, 306-791, Korea

(Received March 21, 2000, Revised manuscript received May 30, 2000)

Mie particles such as polystyrene latex spheres with 3~5 μm diameters are easily trapped and freely moved toward an arbitrary position by using the low power He-Ne laser beam focussed by the objective lens with the magnification of 40 X or 100 X. By using this technology, we can successfully arrange Mie particles in the form of the capital letter A. As a result, we can confirm the possibility of the optical tweezer that can readily trap and freely move the Mie particles.

OCIS codes : 120.0120, 140.7010.