

가우스형 에바네스토프의 광압에 의한 Mie 입자 결합체들의 회전

송영관 · 장 수 · 조재흥
 한남대학교 물리학과

(1998년 10월 12일 받음, 1998년 12월 7일 수정본 받음)

파장이 532 nm인 선형 편극된 Nd:YAG 레이저 광속을 Gadolinium Gallium Garnet 프리즘 면에서 전반사시킬 때 형성된 에바네스토프 속에 위치한 Mie 입자 결합체들이 광압에 의해 회전하는 것을 관찰하였다. 가우스 광속에 의한 에바네스토프의 최대 강도 지점에서 벗어난 곳에 위치한 3~5 μm 크기의 라텍스 또는 효모 결합체들이 0.1~1 rpm의 속도로 회전하였는데, 두 입자의 결합체는 광속의 진행 방향과 나란해질 때 회전이 멈추었으나 세 입자 이상의 결합체들은 계속 회전하는 것을 볼 수 있었다. 본 실험 결과는 근접장 영역에서 에바네스토프의 광압에 의한 마이크로 모터의 제작 가능성을 보여준다.

I. 서 론

1970년 Ashkin이 레이저 광압을 이용하여 Mie 입자의 가속 및 포획 실험에 성공한 후 마이크로미터 크기의 입자에 미치는 광압에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^[1-6] 강하게 집속된 단일 레이저 광속의 경사력을 이용한 입자의 포획 방법은 광 집게(optical tweezer)로서 생물학 분야를 포함한 여러 분야에서 높은 응용 가능성 때문에 연구가 활발히 이루어져 왔다. 또한 이 경사력은 평평하면서 좌우 비대칭이고 회전 대칭성을 갖는 마이크로미터 크기 물체를 회전시키는데 이용됨으로써 마이크로 모터의 제작 가능성도 보여 주었다.^[7]

한편 광압에 의한 마이크로 모터 제작을 위해서는 광압이 모터 부분에 선택적으로 작용하는 것이 필요한데, 이를 위해서 근접장 영역에만 존재하는 에바네스토프의 광압^[8-14]을 이용하는 것이 편리할 수 있다. 광압에 의한 입자의 가속 운동은 진행파에 의해서뿐만 아니라 매질의 경계면에서 레이저 광속을 전반사시킬 때 형성되는 에바네스토프에서도 가능하다. Kawata 등은 반원통형 sapphire 프리즘 위에 형성된 에바네스토프의 광압으로 입자를 이동시킬 수 있음을 보여주었고,^[8] 또한 가느다란 도파관 위에 형성된 에바네스토프의 경사력 및 산란력을 이용해서도 입자를 선형 가속시켰다.^[9] 그러나 에바네스토프의 광압에 의한 입자들의 회전은 아직 보고된 바 없다.

본 실험에서는 출력 100 mW이고 파장이 532 nm인 선형 편극된 Nd:YAG 레이저 광속을 Gadolinium Gallium Garnet (GGG) 프리즘 면에서 전반사시킬 때 형성된 에바네스토프의 광압에 의해 Mie 입자 결합체들이 회전할 수 있음을 보이고자 한다.

II. 실험 장치 및 방법

그림 1은 가우스 광속에 의한 에바네스토프(이하 가우스형 에바네스토프라 칭함)의 광압에 의한 Mie 입자 결합체의 회

전을 관찰하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 광원은 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저(Lightwave, 140-0532-200)이고, 굴절률이 1.59인 투명한 폴리스티렌 라텍스 입자와 효모 입자들이 본 실험에 사용되었다. 먼저 수직으로 조명할 수 있는 금속 현미경(Nikon, Optiphot2-Pol)의 재물대 위에 GGG 직각프리즘을 놓은 다음 소량의 입자들을 증류수와 혼합한 후 주사기를 이용하여 프리즘의 면위에 떨어뜨렸다. 532 nm에서 GGG 프리즘의 굴절률은 1.96이며, 이 프리즘과 굴절률이 1.33인 물과의 접촉면에서의 임계각은 42.7°이다. 연속 발진형 Nd:YAG 레이저에서 나온 선형 편극된 가우스 광속을 입

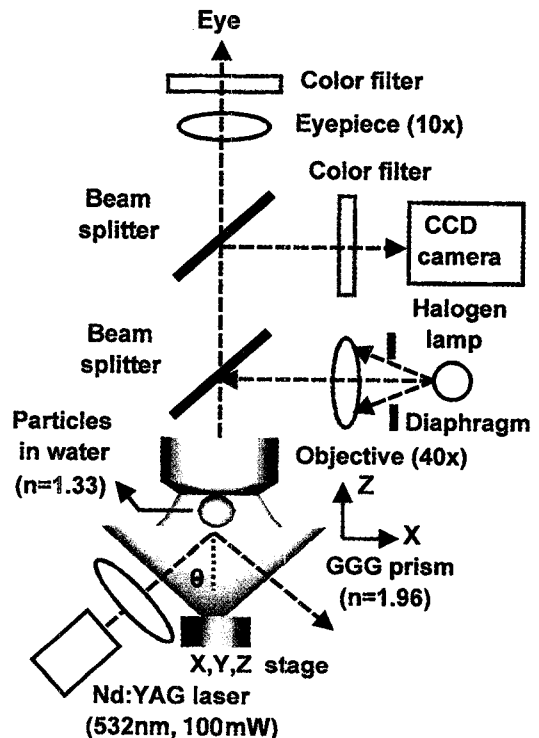


그림 1. 실험 장치의 개략도.

사각 $\theta=45^\circ$ 로 GGG 프리즘 면에 입사시킴으로써 프리즘 면 위에 가우스형 에바네스토프가 형성되도록 하였다. 이 때 프리즘에 입사하는 광속의 출력은 100 mW였다. 물에 잠겨있는 배율이 40배인 현미경 대물렌즈의 초점 부근에 프리즘 면이 놓이도록 조절하고, 세기를 가변할 수 있는 할로젠 램프의 조명광을 위에서 수직으로 내려 쬐이면서 관찰될 입자들이 선명하게 보일 수 있도록 수동으로 현미경 재물대를 조정하였다. 입자들의 운동을 배율이 10배인 대안렌즈로 볼 수 있는 동시에 CCD 카메라를 통하여 모니터로 관찰하면서 VTR로 녹화할 수 있도록 하였다. 프리즘 면 위에 있는 입자들 중 관찰할 입자 결합체들을 선택한 다음 프리즘 면을 수평으로 유지한 채 재물대를 이동시켜 그 입자들이 에바네스토프 안에 위치하도록 하였다. 물체 면상의 조명광 세기가 입자들에 의해서 산란된 에바네스토프의 세기에 비하여 약하기 때문에 산란광을 차단하기 위해 600 nm보다 더 길은 파장의 빛만을 투과시키는 적색 필터(Ealing, 26-3327)를 대안 렌즈 뒤와 CCD 카메라 앞에 각각 삽입하였고, 산란광의 세기에 따라 조명광의 세기를 조절하면서 관찰하였다.

III. 실험 결과 및 토의

그림 2는 가우스형 에바네스토프에서 구형 입자 두 개로 구성된 물체의 회전에 대한 역학적 원리를 나타내고 있다. 강체의 운동은 항상 질량중심의 병진 운동과 질량 중심에 관한 회전 운동의 합성으로 나타낼 수 있고, 회전 운동을 변화시키는 작용은 토크로 표현된다. 만일 입자들의 결합체가 x축을 따라 전파하는 가우스형 에바네스토프의 최대 강도 지점에서 벗어난다면, 각각의 구는 x축 방향으로 산란력을 -y축 방향으로는 경사력을 받게 된다. 그림과 같이 원점 O에 대하여 위치 벡터 r (또는 $-r$)로 나타낼 수 있는 점에 작용하는 힘을 F_1 (또는 F_2), r 과 F_1 사이의 각을 ϕ , 힘과 빛의 입사 방향 사이의 각을 α (α 는 구에 작용하는 산란력에 대한 경사력의 비율에 의존)라 하면 질량중심 O에 대하여 반시계 방향으로 회전을 시키는 힘 F_1 과 시계 방향으로 회전을 시키는 힘 F_2 에 의한 알짜 토크 T_{opt} 는

$$T_{opt} \approx r \times (F_1 - F_2) \approx \hat{z}(F_1 - F_2)r \sin\phi \quad (1)$$

가 된다. 그러므로 $F_1 \neq F_2$ 이면, 이 입자 결합체는 ϕ 가 영이 될

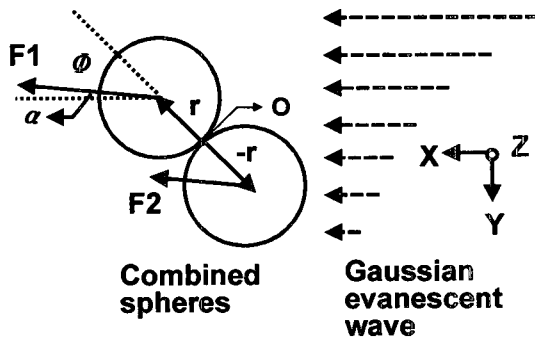


그림 2. 가우스형 에바네스토프 속에서 입자 결합체의 회전에 대한 역학적 설명.

때까지 질량 중심에 대해서 회전한다. 한편 점성이 있는 액체 속에서 이 물체의 운동은 점성에 의한 저항력에 크게 영향을 받게 되는데, 광압과 점성에 의한 저항력이 평형을 이룰 때는 일정한 회전 운동을 하게 될 것이다. 점성계수가 η 인 유체 속에서 v 의 속도로 이동하는 반지름 r 인 구는 Stokes의 법칙에 의해 저항력

$$F_{drag} = 6\pi\eta r v \quad (2)$$

를 받게 되는데 그림 2에서 각속도 $\omega \approx v/r$ 로 일정한 회전 운동 상태에 놓여 있을 때 O점에 대한 점성 저항력의 짝힘에 의한 토크는

$$T_{drag} \approx 2rF_{drag} \approx 12\pi\eta r^3\omega \quad (3)$$

가 된다.

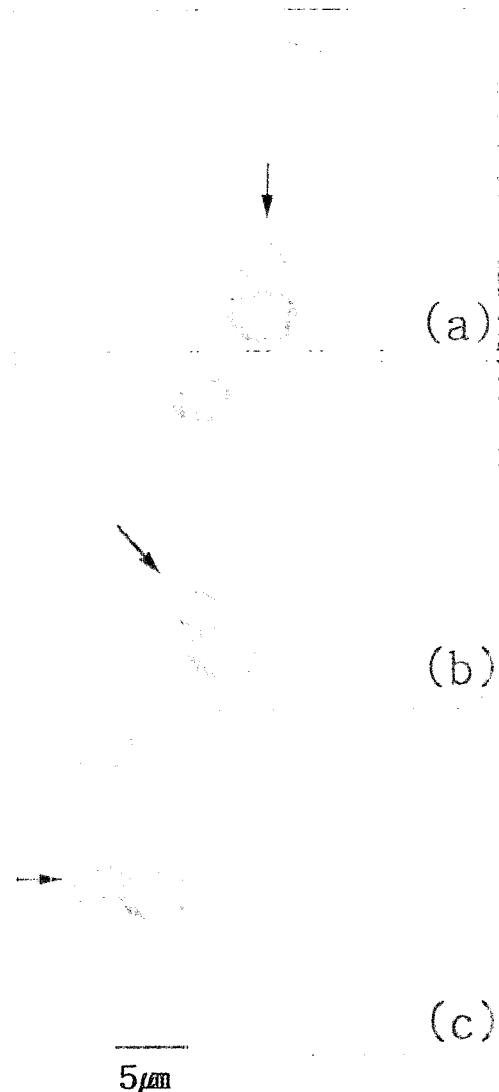


그림 3. 가우스형 에바네스토프의 광압에 의한 폴리스티렌 라텍스 입자 두 개로 된 결합체의 반시계 방향 회전을 (a) $t=0$, (b) $t=50$ 초, (c) $t=120$ 초에 찍은 사진. 적색 필터를 사용하였고 사진 속의 하얀 화살표의 방향과 길이는 각각 에바네스토프의 진행 방향과 세기를 나타낸다.

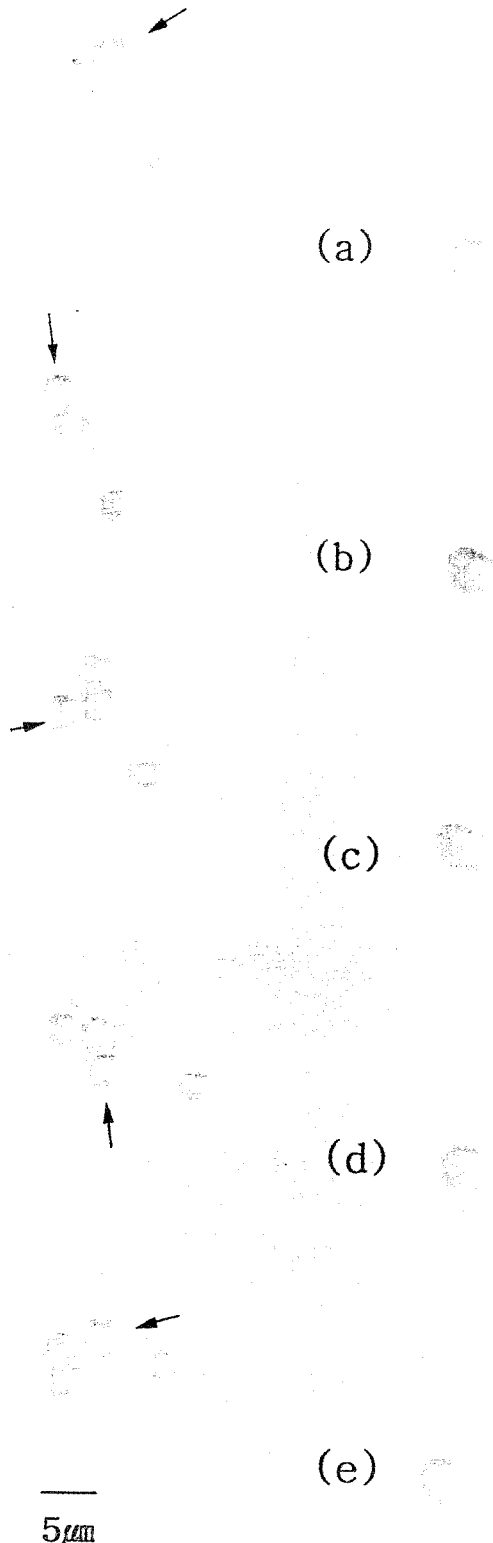


그림 4. 가우스형 에바네스cent파의 광압에 의한 효모 입자 세 개로 된 결합체의 반시계 방향 회전을 (a) $t=0$, (b) $t=11$ 초, (c) $t=40$ 초, (d) $t=58$ 초, (e) $t=65$ 초에 찍은 사진. 필터를 사용하지 않았으며 사진 속의 하얀 화살표의 방향과 길이는 각각 에바네스cent파의 진행 방향과 세기를 나타낸다. (b)는 조명광의 세기를 약하게 한 상태에서 찍은 것으로 에바네스cent파의 영역이 나타나 있어 입자 결합체가 최대 강도 지점 아래에 있음을 알 수 있다.

그림 3은 레이저 광속을 전반사가 되도록 GGG 프리즘 면에 입사시킨 후 (a)는 0, (b)는 50초, (c)는 120초가 경과되었을 때 물 속에서 두 입자 결합체가 가우스형 에바네스cent파에 의해 회전하는 것을 CCD 카메라로 촬영한 사진들이다. 직경 3~5 μm 인 폴리스티렌 라텍스 입자들로 이루어진 물 속의 두 입자 결합체를 가우스 광속에 의하여 형성된 에바네스cent파안으로 이동시켜 최대 강도 지점에서 벗어난 위치에 놓이도록 하였다. 그림에 나타난 것처럼 가우스형 에바네스cent파를 오른쪽에서 왼쪽으로 입사시키고, 두 입자 결합체의 위 부분이 아래 부분보다 더 큰 힘을 받도록 에바네스cent파의 최대 강도 지점을 입자들의 위쪽에 위치시켰는데 입자 결합체가 광속의 진행 방향으로 거의 평행하게 정렬할 때까지 반시계 방향으로 회전하는 것을 볼 수 있었다. 두 입자 결합체의 회전이 멈추는 순간($t=120$ 초) 두 구의 중심을 잇는 선이 빛의 입사 방향에 대해 0.16 rad (9°)의 각을 이루었는데, 이것은 구형 입자들에 작용하고 있는 산란력에 대한 경사력의 비율이 거의 0.16이 됨을 의미한다. 이 결합체의 평균 각속도는 1.3×10^{-2} rad/s로 측정되었으며, 점성 계수가 1×10^{-3} Pa·s인 물속에서 이와 같은 각속도로 회전하도록 하는 토크의 크기는 Stokes의 공식에 의해 $T_{drag} \approx 12\pi\eta r^3\omega \approx 3.9 \times 10^{-21}$ Nm 정도가 됨을 알 수 있다.

그림 4는 세 입자 결합체에 가우스형 에바네스cent파를 오른쪽에서 왼쪽으로 입사시킨 후 입자의 운동을 (a)는 0, (b)는 11초, (c)는 40초, (d)는 58초 (e)는 65초가 경과된 후에 CCD 카메라로 촬영한 사진들이다. 물 속에 있는 직경 3 μm 인 효모 입자 세 개로 이루어진 결합체를 선택하여 이것을 가우스형 에바네스cent파의 최대 강도 지점의 아래에 위치시킨 후 회전을 관찰하였다. 선택된 세 입자 결합체의 꼭지각은 102° 였다. 결합체의 위 부분에 미치는 광압이 더 크기 때문에 세 입자 결합체는 반시계 방향으로 회전하였는데, 두 입자 결합체와는 달리 연속적으로 회전하는 것을 볼 수 있었다. 이 때의 평균 각속도는 0.9×10^{-1} rad/s였고 광압과 점성 저항력이 평형을 이루는 조건에서 계산된 토크의 크기는 $T_{drag} \approx 36\pi\eta r^3\omega \approx 3.4 \times 10^{-20}$ Nm 정도가 되었다.

그림 5는 네 입자 결합체에 가우스형 에바네스cent파를 오른쪽에서 왼쪽으로 입사시킨 후 입자의 운동을 (a)는 0, (b)는 2분, (c)는 5분, (d)는 8분, (e)는 11분이 지났을 때 CCD 카메라로 촬영한 사진들이다. 물 속에 있는 직경 3~4 μm 인 효모 입자 네 개로 된 결합체를 찾아 에바네스cent파의 최대 강도 지점의 위에 위치시킨 다음 회전을 관찰하였다. 결합체의 아래 부분에 미치는 광압이 더 크기 때문에 이 Mie 입자 결합체는 시계 방향으로 회전하였다. 측정된 평균 각속도는 0.1×10^{-1} rad/s였는데 광압과 물의 점성 저항력이 평형을 이루는 상태에서 이와 같은 각속도로 회전할 수 있는 토크의 크기를 구해보면 $T_{drag} \approx 78\pi\eta r^3\omega \approx 8.3 \times 10^{-21}$ Nm 정도가 되었다. 그리고 이 입자 결합체를 에바네스cent파의 최대 강도 지점의 아래에 위치시켰을 때는 반시계 방향으로 회전하는 것도 확인할 수 있었다.

z 축을 따라 에바네스cent의 세기가 불균일 하여 y 축에 관한

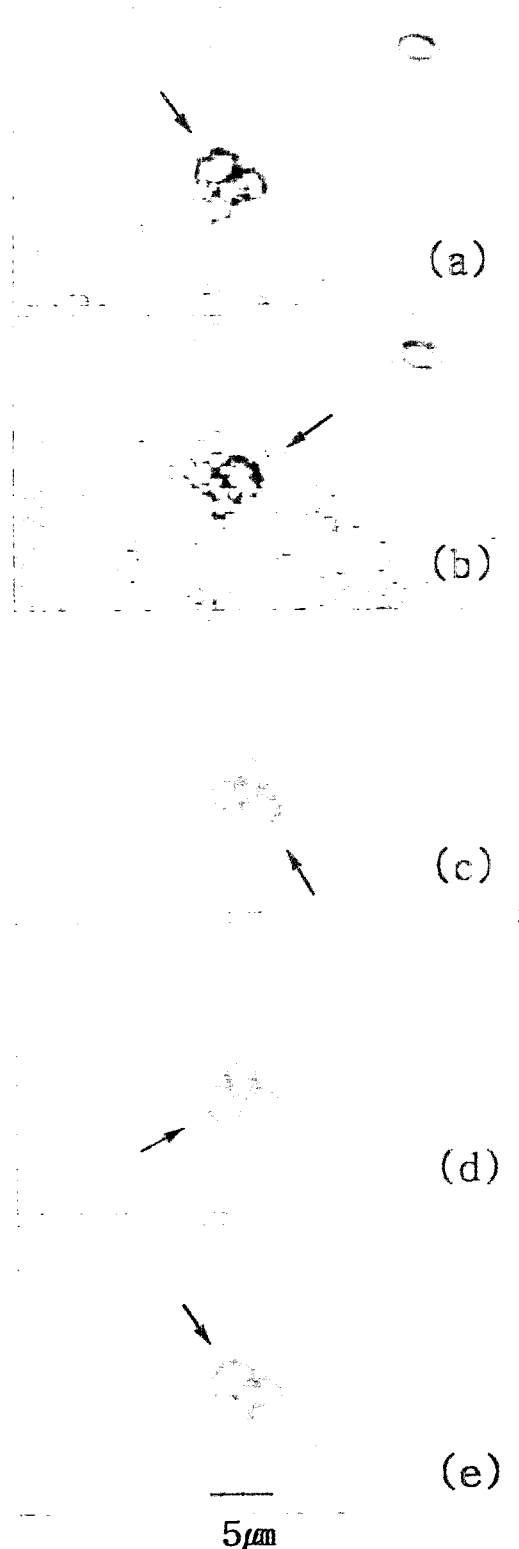


그림 5. 가우스형 에바네스цент파의 광압에 의한 효모 입자 네 개로 된 결합체의 시계 방향 회전을 (a) $t=0$, (b) $t=2$ 분, (c) $t=5$ 분, (d) $t=8$ 분, (e) $t=11$ 분에 찍은 사진. 필터를 사용하지 않았으며 사진 속의 하얀 화살표의 방향과 길이는 각각 에바네스цент파의 진행 방향과 세기를 나타낸다. (a), (b)는 조명광의 세기를 약하게 한 상태에서 찍은 것으로 에바네스цент파의 영역이 나타나 있어 입자 결합체가 최대 강도 지점 위에 있음을 알 수 있다.

회전도 예상이 되었으나 결합된 Mie 입자들이 x-y 평면과 평행한 평면 물체이므로 y축 중심의 회전 운동은 바닥(x-y 평면)과의 충돌 때문에 일어나지 않았다.

IV. 결 론

파장이 532 nm이고 출력이 100 mW인 선형 편극된 Nd:YAG 레이저 광속을 Gadolinium Gallium Garnet 프리즘 면에서 전반사 시킬 때 형성된 가우스형 에바네스цент파의 최대 강도 위치에서 벗어난 곳에 있는 여러 개의 Mie 입자 결합체들이 광압에 의해 회전하는 것을 관찰하였다. 직경이 3~5 μm 인 폴리스티렌 입자 두 개로 된 결합체는 광속의 진행 방향으로 거의 평행하게 정렬할 때까지 회전하였고, 직경이 3~4 μm 인 효모 입자 3~4개로 된 결합체들은 물 속에서 0.1~1 rpm의 각속도로 연속적으로 돌 수 있음을 확인하였다. 단일 가우스형 에바네스цент파가 집속된 영역 내에서 회전하는 Mie 입자 결합체들은 광속의 진행 방향으로도 역시 느리게 이동하였는데 이와 같은 문제점을 해결하여 보다 안정적인 회전을 얻고자 한다면 중심이 약간 어긋난 채로 반대 방향으로 진행하는 두 개의 에바네스цент파를 이용하면 될 것이다. 가우스형 에바네스цент파를 이용한 이와 같은 Mie 입자들의 회전은 마이크로 모터나 마이크로 가속도계에 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한남대학교 학술 연구 조성비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970).
- [2] A. Ashkin, Science, **187**, 1073 (1975).
- [3] A. Ashkin, Science, **210**, 1081 (1980).
- [4] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and Steven Chu, Opt. Lett. **11**, 288 (1986).
- [5] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and T. Yamane, Nature, **330**, 769 (1987).
- [6] E. Higurashi, O. Ohguchi, and H. Ukita, Opt. Lett. **20**, 1931 (1995).
- [7] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi, Appl. Phys. Lett. **64**, 2209 (1994).
- [8] S. Kawata and T. Sugiura, Opt. Lett. **17**, 772 (1992).
- [9] S. Kawata and T. Tani, Opt. Lett. **21**, 1768 (1996).
- [10] T. Sugiura and S. Kawata, Bioimaging, **1**, 1 (1993).
- [11] S. Chang, J. H. Jo, and S. S. Lee, Opt. Comm. **108**, 133 (1994).
- [12] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo, and S. S. Lee, Opt. Comm. **129**, 394 (1996).
- [13] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo, and S. S. Lee, Opt. Comm. **139**, 252 (1997).
- [14] S. Chang and S. S. Lee, Opt. Comm. **151**, 286(1998).

Optically induced rotation of combined Mie particles within an evanescent field of a gaussian beam

Y.G. Song, S. Chang and J.H. Jo

Department of Physics, Hannam University, Taejon 300-791, Korea

(Received October 12, 1998, Revised manuscript received December 7, 1998)

We demonstrate a windmill type rotation of combined Mie particles caused by the evanescent field generated at the surface of a Gadolinium Gallium Garnet prism where a linearly polarized Nd:YAG laser beam (of wavelength 532 nm and power 100 mW) is totally reflected. The combined particles (e.g., doublets, triplets or quadruplets) consisting of polystyrene latex (or yeast) spheres with diameters of 3~5 μ m are reported to rotate at 0.1~1 rpm in water when the particles are slightly displaced from the center of the evanescent field.