

광섬유의 Near field를 이용한 미세입자의 가속에 관한 연구

강 용 훈^o, 이 혁
서울대학교 공과대학 전기공학과

The acceleration of microscopic particles
in the near field diffracted from the fiber end.

Yonghoon Kang, Hyuk Lee
Dept. of Electrical Eng., Seoul National University

Abstract

The force exerted on particles when the momentum of light is changed at the boundary is used in accelerating particles in the fluid. So far, particles are accelerated by the gaussian beam focused by lenses or microscopic objectives. In this paper, particles are moved by the light diffracted from the fiber end. And we proposed the possibility of particle acceleration using the fiber end.

1. 서론

Maxwell 이 예측했던 광압(light pressure)이 레이저의 출현과 더불어 관측 가능하게 됨에 따라서 그것을 응용하기 위한 연구가 진행 되어 왔다. [1] A. Ashikin 등이 제안한 레이저를 이용한 광압 실험은 수 μm 크기 내지는 μm 보다 작은 크기의 입자를 유체 속에서 가속시키거나 공중에서 부양(levitation)시키기도 하고, 공간상의 한 곳에 포획(trapping)하여 고정시키는 조작이 가능함을 보였다. [2][3]

레이저를 이용한 미세 입자의 가속, 포획은 입자를 물리적인 접촉이나 손상 없이 움직일 수 있고, 하전되지 않은 중성입자인 경우에도 힘을 가할 수 있다는 장점을 가지고 있어 생물학이나 물리학 분야에 응용되고 있다. [1][4]

레이저를 이용한 광압을 좀더 폭 넓게 응용하기 위해서는 작은 공간내에 빛을 왜곡없이 유도 할 수 있어야 하고, 빛의 경로를 여러 개 동시에 만들어 한 입자를 여러 방향으로 움직이거나, 여러 개의 입자를 동시에 움직이거나 포획(trap)할 수 있어야 하는데 렌즈나 현미경의 대물렌즈를 쓰는 기존의 방법에는 많은 어려움이 따른다.

본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하기 위하여 광통신에서 흔히 쓰이는 광섬유(optical fiber)를 이용하는 방법을 제안하였다. 일반적으로 광섬유는 빛을 원하는 곳까지 유도하는 도파관으로 쓰이기 때문에, 이를 이용하여 빛을 입자가 있는 작은 공간까지 왜곡 없이 유도할 수 있고, 작은 공간 내에 여러 개의 광섬유를 두어 입자가 받는 힘의 경로를 여러 가지로 만들 수 있다. 그림(1)은 그 과정을 개략적으로 나타내 준다. 유체 속에 떠 있는 입자가 광섬유의 끝에서 회절되어 나오는 빛 속에서 힘을 받아 움직인다. 이 광섬유의 위치를 조절하여 입자의 운동을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 이를 위한 기초 실험으로서, 광섬유 끝부분에서 회절되는 레이저 광 안에서 입자가 힘을 받아 운동하는 것을 관찰하여, 광압을 이용한 미세 입자의 가속에 광섬유를 이용할 수 있음을 보였다.

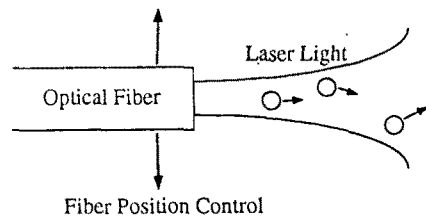


그림 1. 광섬유에서 회절되는 빛 속에서의 입자의 운동

2. 본론

2.1 광압의 일반

전자기파로 표현되는 빛은 운동량(momentum)을 가지고 있다. 이 운동량이 변화하면서 작용하는 힘에 대한 식은 다음과 같다.

$$F = \frac{\Delta P}{c} \quad (1)$$

빛이 그 파장보다 더 큰 입자에 미치는 힘은 기하광학의 이론을 이용하여 구할 수 있다. 위의 식 (1)을 바탕으로 빛이 굴절되거나 반사되면서 운동량의 변화가 생길때 입자에 미치는 힘을 다음과 같이 구할 수 있다. [5]

$$F_r = \left(\frac{2n_e PR}{c} \right) \cos(\theta_1)$$

$$F_d = \left(\frac{PT}{c} \right) (n_e^2 + n_i^2 - 2n_e n_i \cos(\theta_1 - \theta_1'))^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 P는 레이저의 power를, R과 T는 각각 반사율(Reflectance)과 굴절율(Transmittance)을 나타내고, θ_1, θ_1' 는 입사하는 빛의 입사각과 굴절각이다. n_e, n_i 는 주변 유체와 입자의 굴절율이다.

그림(2)는 렌즈에 의해 집속된 레이저 광 안에서 입자가 받는 힘을 보여준다. 입자의 굴절율이 주변 유체의 굴절율보다 큰 경우에는 빛의 세기가 큰 쪽으로 힘을 받는 것을 볼 수 있다.

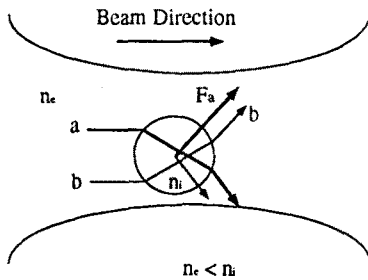


그림 2 레이저 광 안에서 입자가 받는 힘

2.2 빛의 분포

일반적으로, step index profile을 가진 single mode fiber의 field의 모드를 weakly guiding approximation으로 구해보면, 기본 모드로서 LP_{01} 모드가 존재한다. [6] LP_{01} 모드는 gaussian mode와 모양이 거의 유사하여 power와 spot size가 같은 gaussian mode로 근사할 수 있다. 이때 광섬유의 단면에서 회절되는 빛은 가우시안 빔으로 생각할 수 있다. [7]

2.3 ray tracing을 통한 힘의 유도

광섬유에서 나온 레이저 광은 입자의 표면에서 일부는 반사되고 일부는 굴절되면서 입자에 힘을 미친다. 또 내부로 굴절되어 들어간 광은 다시 한번 입자와 주변 유체의 경계에서 굴절되거나 반사되면서 힘을 미친다. 여기서 반사된 빛은 입자의 내부로 진행하다가 다시 경계를 만나면서 힘을 준다. 같은 방

식으로 무한대로 반사된 빛까지 입자에 힘을 주게 된다. 전체적으로 레이저 광이 입자에 가하는 힘은 이 힘들의 vector sum이 된다. skew ray tracing을 통해 각 ray의 방향을 알 수 있고 이 빛들이 진행하면서 각각 입자에 미치는 힘을 구할 수 있다. [8] 실제로 이렇게 구한 힘은 그림(2)에서처럼 레이저의 진행 방향 성분과 반경방향의 성분을 가진다. [5]

2.4 실험 및 결과

실험적인 확인을 위해 그림(3)과 같이 구성하여 실험하였다. 레이저에서 나온 빛은 fiber coupler에 의해 광섬유 안으로 집속된후, 광섬유를 통해서 유리 cell 안으로 유도되어 광섬유의 끝에서 굴절되어 나오게 된다. 물 속에 떠다니던 입자는 이 빛 속에서 힘을 받아 움직이게 된다. 이 광섬유의 위치는 fiber positioner로 조절한다.

광원으로 Ar laser를 사용하였고, 광섬유의 끝에서 나오는 레이저 power는 100mW였다. 이 빛을 초점거리가 8.3 mm 이고 배율이 20인 현미경 대물렌즈(microscopic objective)로 광섬유에 집속하였다. 레이저 광을 유도하기 위한 광섬유로는 core의 직경이 $5 \mu m$, cladding의 직경이 $125 \mu m$ 인 step index profile을 가진 single mode fiber (N. A. = 0.1, New Port 제품)를 이용하였으며, 실험 대상이 되는 입자는 polystyrene ($n = 1.46$, 한남화학 제품)으로 직경이 평균 $10 - 30 \mu m$ 정도였다. 입자를 가두는 cell은 가로, 세로,

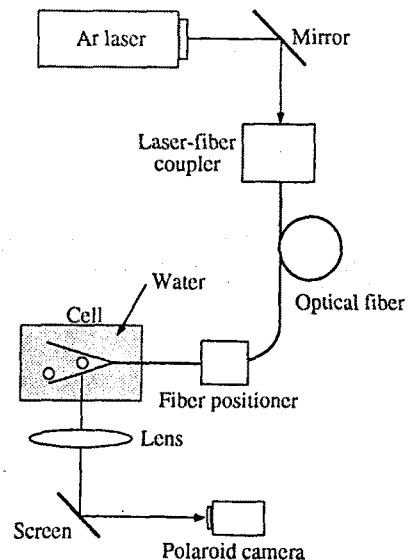
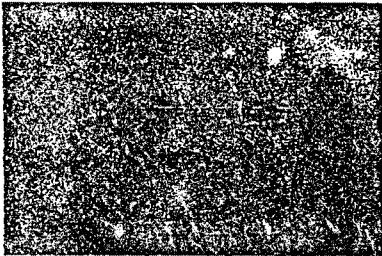


그림 3 실험 구성도

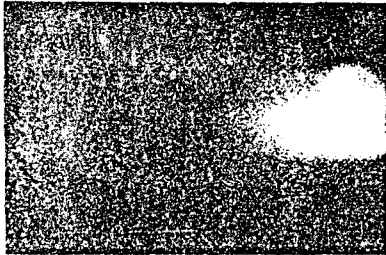
높이가 각각 1cm인 유리와 폴라스틱으로 구성하였고 측면의 폴라스틱 면에 난 pin hole로 광섬유가 cell 안으로 유도된다.

그림(4)의 사진은 힘을 받아 움직이는 입자로 부터 산란되는 빛을 렌즈로 집속하여 스크린에 맺힌 상을 약 2초 간격으로 촬영한 사진이다. 그림(4-a)에서는 입자가 운동하면서 광섬유의 끝 부분에서 멀어지기 때문에 빛의 세기가 약해져 그 산란되는 빛이 흐려지는 것을 볼 수 있다. 그림(4-b)에서는 입자의 상이 좀더 강하게 남아 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 물속에 떠다니던 입자가 빛 속에 들어가면서 실제적으로 힘을 받게 되는 위치가 다르기 때문에 위와 같은 결과가 나왔다고 생각할 수 있다. 관측된 입자의 속도는 약 $100\mu\text{m/s}$ 정도이며 입자의 크기에 따라 조급의 차이가 있었다.

이렇게 레이저 광을 광섬유로 유도하여 광섬유의 단면에서 회절되는 빛을 이용하여 입자를 움직일 수 있고 나아가 원하는 방향으로 입자의 운동을 제어할 수 있는 가능성을 보였다.



(a)



(b)

그림 4 실험 결과 사진

3. 결론

레이저 빔의 광압을 입자의 가속 운동에 응용하기 위한 방법으로서 광섬유를 이용하여 입자를 가속시키는 시스템을 제안하였고, 실험을 통해 가능성을 보였다.

실제로 이것을 응용하기 위해서는 두 개 이상의 fiber를 cell 속으로 유도하여 입자의 운동을 제어하기 위한 연구를 하여야 하며, 둘 이상의 레이저 광이 중첩된 빛 속에서 입자가 받는 힘에 대한 이론적인 설명과 수치계산에 관한 연구도 필요하다.

참고문헌

- (1) A. Ashkin, *Science*, vol 210, 1081 (1980).
- (2) A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, Vol 24, 4, 156 (1970)
- (3) A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, Steven Chu, *Opt. Lett.*, Vol 11, 5, 288, (1986)
- (4) Steven Chu, *Science*, Vol 253, 861, (1991)
- (5) William H. Wright, G. J. Sonek, Y. Tadir, Michael W. Berns, *IEEE J. Quan. Elec.*, Vol. 26, 12, 2148, (1990).
- (6) Takanori Okoshi, *Optical Fibers*, Academic Press, 1982
- (7) Ghatak and Thyagarajan, *Optical Electronics*, Cambridge University Press, 1989.
- (8) M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1980.