110 대한기계학회논문집 B권, 제 29 권 제 1 호, pp. 110~115, 2005

〈 논문 〉

광압을 이용한 입자빔 집속

김상복* · 박형호** · 김상수†

(2004 년 8 월 18 일 접수, 2004 년 10 월 20 일 심사완료)

Particle Beam Focusing Using Radiation Pressure

Sang-Bok Kim, Hyungho Park and Sangsoo Kim

Key Words : Particle Beam(입자빔), Aerodynamic Lens(공기역학 렌즈), Radiation Pressure(광압)

Abstract

A novel technique for fine particle beam focusing under the atmospheric pressure is introduced using a radiation pressure assisted aerodynamic lens. To introduce the radiation pressure in the aerodynamic focusing system, a 25mm plano-convex lens having 2.5mm hole at its center is used as an orifice. The particle beam width is measured for various laser power, particle size, and flow velocity. In addition, the effect of the laser characteristics on the beam focusing is evaluated comparing an optical tweezers type and pure gradient force type. For the pure aerodynamic focusing system, the particle beam width was decreased as increasing particle size and Reynolds number. Using the optical tweezers type, the particle beam width becomes smaller than that of the pure aerodynamic focusing system about 16%, 11.4% and 9.6% for PSL particle size of 2.5μm, 1.0μm, and 0.5μm, respectively. Particle beam width was minimized around the laser power of 0.2W. However, as increasing the laser power higher than 0.4W, the particle beam width was increased a little and it approached almost a constant value which is still smaller than that of the pure aerodynamic focusing system. For pure gradient force type, the reduction of the particle beam width was smaller than optical tweezers type but proportional to laser power. The radiation pressure effect on the particle beam width is intensified as Reynolds number decreases or particle size increases relatively.

기호설명

P	: 레이저 출력
n_1	: 주위 매질의 굴절률
n_2	: 입자의 굴절률
Q	: 무차원 반사 효율
F	: 광압에 의한 힘
D	: 원통관 직경
d	: 오리피스 직경
d_p	: 입자 직경
d_b	: 입자빔 폭
f	: 렌즈 초점거리
Re	: 오리피스 레이놀즈 수
η	: 수축인자

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : sskim@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3095
* 한국과학기술원 기계공학과
** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

입자 크기 분포 측정과 입자 모니터링의 정밀도를 높이기 위해서 고농도의 입자 분포가 필요하다. 따라서 반도체 공정과 같이 입자가 희박하게 존재하는 환경에서는 입자의 모니터링과 입자 크기 분포 측정이 어렵다. 입자의 수 농도를 증가시켜 보다 정밀한 입자 측정을 위한 장치로 공기역학 렌즈[Aerodynamic lens[1,2]]가 일반적으로 주로 사용된다. 공기역학 렌즈는 입자의 흐름을 고농도 빔의 형태로 만들어 입자가 제한된 좁은 영역에서 흐를 수 있게 하여 입자의 수 농도를 높여 정밀한 입자

측정을 가능하게 한다. 일반적인 공기역학 렌즈의 구조는 원통관에 한 개 혹은 여러 개의 동심축을 가지는 오리피스로 이루어져있다. 공기역학 렌즈를 이용한 입자빔 집속 장치는 공기-입자 유동을 오리피스를 지나게 하여 입자의 관성을 이용하여 입자를 중심축에 집속시키는 것을 기본으로 한다. 따라서 주어진 유동 조건에서 입자빔의 집속효과는 입자의 관성력에 의해 결정된다. 또한 유동 조건은 원통관의 직경과 오리피스의 직경의 비에 의해 결정되므로 집속 효과를 보이는 유동 조건은 공기역학 렌즈의 형상에 의해 제한된다.

본 연구에서는 입자에 광압(Radiation pressure)을 추가적으로 인가함으로써 입자빔 집속 장치의 집속 효과를 능동적으로 조절하고, 공기역학 렌즈를 이용한 입자빔 집속 장치의 입자빔 집속 한계를 극복할 수 있는 방법을 제시하였다. 공기역학 렌즈에 광압을 가하기 위하여 구멍이 있는 평면-볼록 광학 렌즈를 오리피스로 사용하였고, Ar-Ion 레이저를 이용하여 입자에 광압을 인가하였다. 한편, 레이저 빛의 강도(intensity) 분포에 따른 광압의 효과를 알아보기 위해 평면-볼록 렌즈를 사용한 광 집게 원리를 이용한 경우(optical tweezers type)와 가우시안 강도 분포를 가지는 순수 광 구배력을 이용한 경우(pure gradient force type) 두 가지에 대해 실험을 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 공기역학 렌즈

공기역학 렌즈는 Fig. 1과 같이 원통관과 오리피스로 구성되어 있다. 공기-입자 유동이 오리피스를 지나면, 입자는 그 관성에 의해서 공기의 유동에서 벗어나 중심축에 모여 입자빔을 형성한다. 이론적으로 오리피스 후류에서 공기 유선의 최외각 반경에 대한 입자 흐름의 최외각 반경의 비를 나타내는 수축인자(contraction factor)로 입자빔 집속 성능을 나타낸다. 수축인자가 0인 경우는 입자가 오리피스를 통과하여 완전히 중심축에 모이는 경우를 나타내고, 수축인자가 1인 경우는 입자가 공기 유동을 정확하게 따라가는 것을 나타낸다. 그리고 수축 인자가 음의 값을 갖는 경우는 입자의 관성효과가 커서 입자가 중심축을 가로지르는 경우를 나타낸다. 이론상 입자빔은 수축인자가 1에서 -1사이의 값을 가질 때 입자빔이 형성된 것으로 판단한다.

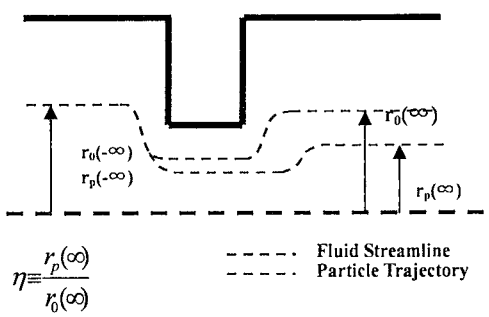

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the particle stream contraction factor

2.2 광압

빛을 광자의 흐름으로 생각할 때 빛이 입자를 통과 하면서 굴절하는 것을 광자의 운동량 변화의 관점에서 고찰할 수 있다.[3,4] 광자가 주위보다 굴절률이 큰 입자를 통과 할 때 광자의 운동량의 변화는 Fig. 2와 같이 입자에 힘을 가하게 된다. 광자의 운동량은 다음과 같다.

$$\frac{n_1 P}{c} \tag{1}$$

여기서, P 는 레이저 출력, n_1 은 주위 매질의 굴절률, 그리고 c 는 빛의 속력을 나타낸다.

입자가 빛에 의해 받는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = Q\frac{n_1 P}{c} \tag{2}$$

여기서 Q 는 광자를 반사하는 효율을 나타내는 무차원 수로, 광자의 입사각과 입자와 주위의 굴절률에 의해 결정된다. 입자가 광자를 완벽하게 반사하는 경우가 Q 의 최대값으로 2 가 된다. 입자가 가우시안 강도(Gaussian intensity) 분포를 가지는 빛 내부에 있을 때, Fig. 3과 같이 강도 구배 방향으로 향하는 구배력(gradient force)과 빛의 진행 방향으로 작용하는 산란력(scattering force)를 받게 된다. 따라서 입자는 빛의 중심축에 모이면서 빛의 진행 방향으로 이동하게 된다. 이런 현상을 이용한 것이 광 집게(optical tweezers)[4]로서 마이크론 혹은 서브 마이크론 입자와 세포 등을 조작(manipulation)할 때 사용된다.[5-8] 광 집게의 원리는 수치구경(numeric aperture)이 큰 렌즈에 렌즈의 외경만큼 확대된 빛이 들어갈 경우, 빛이 렌즈에 의해 크게 굴절되면서 렌즈의 초점 부근에 큰 강도 구배를 일으켜 입자를 잡아두게 하는 것이다.

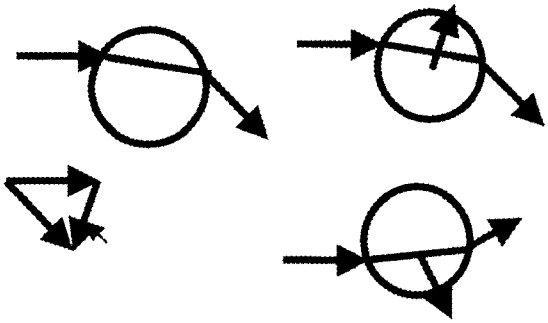

Fig. 2 Principle of radiation pressure. The change of the momentum of photons exerts force to particle

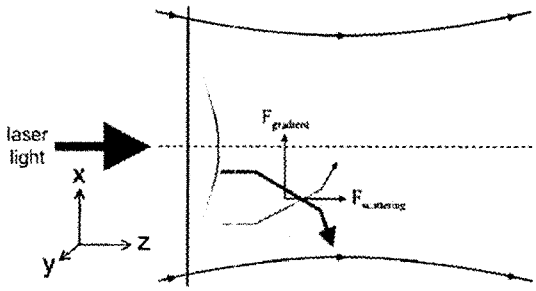

Fig. 3 Particle in the laser beam which has the Gaussian intensity distribution

광 집게는 주로 물 속에 있는 입자를 조작할 때 사용되지만 공기 중에서 사용될 경우 공기의 점도가 물보다 작기 때문에 작은 입자에 대해 스톡스 저항력(Stokes drag force)을 고려하면 같은 크기의 힘으로 공기 중에서 입자는 더 큰 속도를 얻을 수 있으므로 광압의 효과가 공기 중에서 더 클 것으로 생각할 수 있다. 식 (2)에서 1W 의 레이저 출력으로 PSL 1 ㎛입자에 가할 수 있는 힘은 수십에서 수백 피코 뉴턴(pico Newton)이고 이는 입자 중력의 10^6배에 해당하기 때문에, 레이저 빛을 이용하여 입자의 경로를 제어하는 것이 이론상 가능하다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

전체적인 실험장치는 Fig. 4와 같다. 일반적인 오리피스 대신 중심에 구멍이 있는 평면-볼록 광학 렌즈를 사용하여 유동 조건을 기존의 공기역학 렌즈와 같게 유지하면서 광압을 가할 수 있도록 설계되었다. 원통관의 직경은 25 mm이고 평면-볼록 광학 렌즈의 구멍의 직경은 2.5 mm이다. 그리고 평면-볼록 렌즈의 초점거리는 35 mm이다. 광압을 가하기 위하여 Ar-Ion 레이저(Coherent, Innova 7100)를 사용하였다. 입자빔의 집속 성능을 알아보기 위해서는 이론상 수축인자를 직접 측정하는 것이 필요하지만 입자 개개의 궤적을 실험으로 측정하는 것이 어려우므로 입자빔의 집속 성능을 알아보기 위해 입자빔의 폭을 측정하였다. 입자빔의 폭은 평면-볼록 광학 렌즈로부터 45 mm 후류에서 He-Ne 레이저(JDS Uniphase co., 1135p)를 시트(sheet) 형태로 조사하여 가시화한 다음 디지털 카메라(Olympus C-2100)를 이용하여 입자빔의 이미지를 얻어 영상 처리 기법으로 입자빔의 폭을 측정하였다.

3.1 입자빔 발생 장치

입자빔을 생성시키기 위해 직경 2.5 ㎛, 1.0 ㎛, 그리고 0.5 ㎛인 PSL(Polystyrene latex, Duke Scientific Co.) 표준 입자를 사용하였다. 입자는 입자 분무기(atomizer)를 이용하여 발생시켰고, 확산 건조기(diffusion dryer)를 거쳐 수분이 제거된 상태로 믹싱 챔버에서 공기와 균일하게 섞여서 원통관으로 공급된다. 원통관은 내경 25mm인 아크릴 튜브를 사용하였고, 원통관의 길이는 오리피스 상류에서 완전발달 유동이 유지되도록 설계되었다. 유동 조건에 대해서는 상압 조건에서 마이크론 크기의 입자가 오리피스 레이놀즈 수가 300이상 700 이하 일 때 입자빔을 형성시킬 수 있다는 것이 알려져 있다.[9] 따라서 이 조건을 만족시키는 범위에서 공기-입자 유량을 조절하여 유동 조건을 바꾸어 가면서 실험을 하였다. 광 집게의 원리를 이용한 경우는 오리피스로 사용된 렌즈의 초점 부근에서 많은 광자가 입자를 통과하므로 광압의 효과가 이부분에서 가장 클 것으로 예상할 수 있기 때문에 렌즈 초점에서 10 mm 후류에서 입자빔을 가시화하여 입자빔 폭을 측정하였다. 입자빔을 가시화 하기 위하여 검출 블록(detection block)을 설치하였다. 검출 블록은 애노다이징(anodizing) 처리된 알루미늄으로 제작 되었고, 입자의 흐름과 수직한 방향으로 슬릿을 만들어 입자빔 가시화 용 He-Ne 레이저가 시트 형태로 조사될 수 있도록 하였다. 검출 블록의 윗부분은 보임창(view port)을 만들어 디지털 카메라로 입자빔의 이미지를 얻을 수 있도록 하였다.

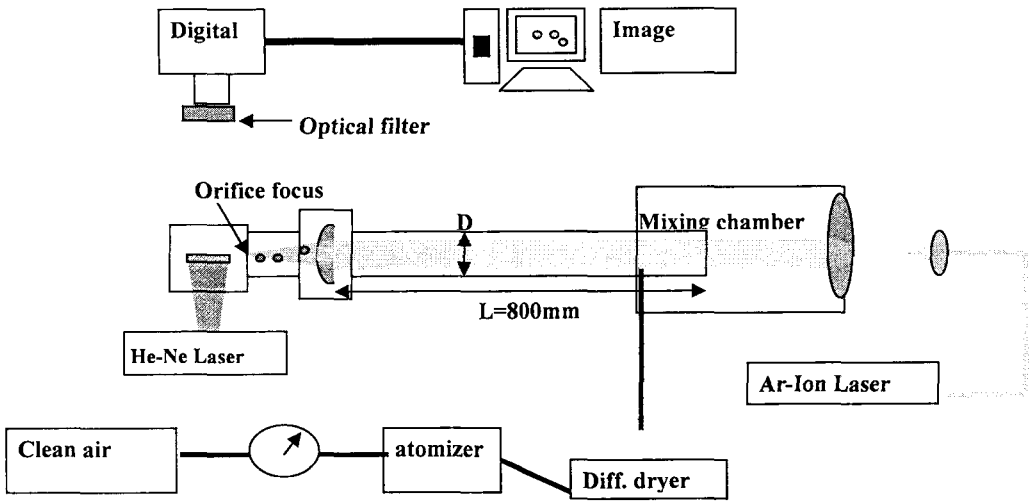

Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

3.2 광압 발생부

광압의 효과를 알아보기 위해 광 집게를 이용한 방법과 순수 광 구배력을 이용한 방법, 두 가지에 대해 실험을 하였다. 광 집게의 원리를 이용한 경우는 레이저로부터 나온 빛은 초점거리가 각각 12 mm와 212 mm인 광학 렌즈를 통과하여 원통관 내경 및 오리피스로 사용된 렌즈의 외경과 같은 25 mm로 확대되어 오리피스 상류에서 조사되도록 하였다. 확대된 레이저 빛은 오리피스로 사용된 평면-볼록 광학 렌즈를 통과하면서 광 집게의 원리에 의해 입자에 중심축을 향하는 힘을 전달하게 된다. 순수 광 구배력을 이용하는 경우는 Ar-Ion 레이저 빛 자체가 가진 가우시안 강도 분포를 이용하여 레이저 빛을 구멍이 있는 평면 윈도우(window)에 조사하여 광 구배력만으로 입자에 중심축 방향으로 힘을 가할 수 있게 하였다. 레이저 출력에 따른 광압의 효과를 알아 보기 위해 레이저의 출력을 0에서 1.8 W까지 0.2W씩 증가시키면서 레이저를 조사하였다.

3.3 입자빔 폭 측정

입자빔의 영상을 디지털 카메라로 얻기 위해 디지털 카메라 앞에 광학 필터(F-632.8-10, CVI Co.)를 설치하여 He-Ne 레이저 빛에 의해 산란된 영상만 획득할 수 있도록 하였다. 디지털 카메라로 얻어진 입자빔 영상을 영상처리 기법을 통해 입자빔의 폭을 구하였다. 입자빔 경계의 정의는 입자에 의해 산란된 빛의 강도 변화의 기울기가 최대인 점으로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 광 집게 원리를 이용한 경우

광 집게의 원리를 이용하여 입자빔에 광압을 가한 경우 레이저 출력에 대한 PSL 입자 (1.0 ㎛)의 입자빔 폭의 변화는 Fig. 5와 같다. 결과 그래프를 보면, 입자빔의 폭이 감소하다 점점 증가하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 볼 수 있었다. PSL 입자 2.5 ㎛와 0.5 ㎛의 경우에도 같은 경향을 보였다. 결과를 통해 레이저 출력이 0 W인 공기역학 렌즈를 이용한 경우보다 광압을 추가적으로 이용한 경우 입자 빔 폭이 더 작음을 알 수 있었다. Fig. 6은 레이저출력이 0 W인 경우와 입자빔 폭이 최소가 되는 0.2 W의 경우에 대해 입자빔 폭의 변화를 나타낸 것이다. 광압을 가했을 경우 최대 입자빔 폭의 감소량은 입자 크기 2.5 ㎛, 1.0 ㎛, 그리고 0.5 ㎛에 대해 각각 16 %, 11.4 %, 그리고 9.6 % 이었다. 한편, 광압의 효과는 입자가 클수록 더 컸다. 이는 입자가 클수록 많은 광자가 입자에 의해 운동량 변화를 겪게 되어 큰 힘을 입자에 작용할 수 있기 때문이다. 그리고 오리피스 레이놀즈 수가 작을수록 광압의 효과가 컸다. 오리피스 레이놀즈 수는 입자의 관성력으로 생각할 수 있으므로 같은 광압이 작용할 때, 입자 빔 폭에 대한 광압의 효과는 관성력이 작을수록 더 극명하

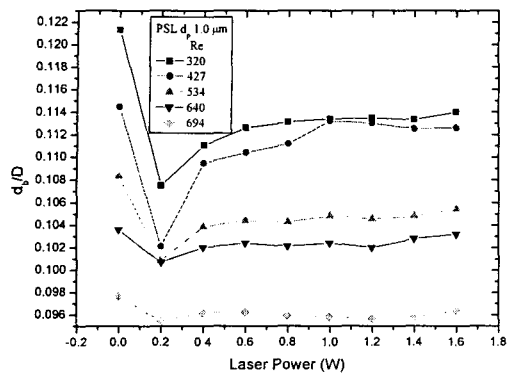

Fig. 5 Particle beam width variation when particle size d_p=1.0 ㎛ : Optical tweezers case

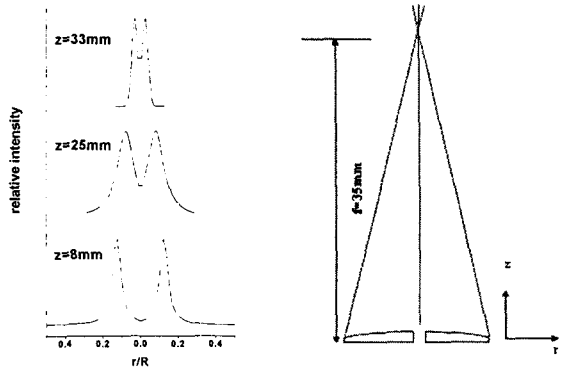

Fig. 7 Distortion of the laser beam intensity profile. The original Gaussian intensity profile turn to the distorted intensity profile which has two peak

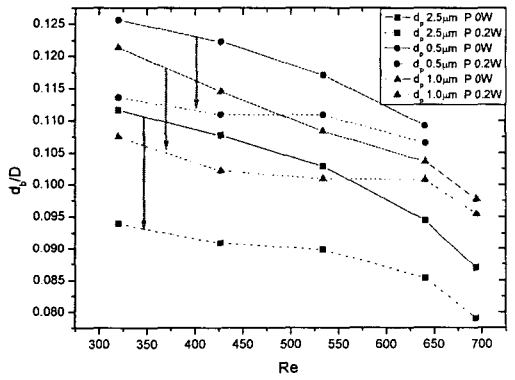

Fig. 6 Comparison of the particle beam width between laser power 0 W and 0.2 W

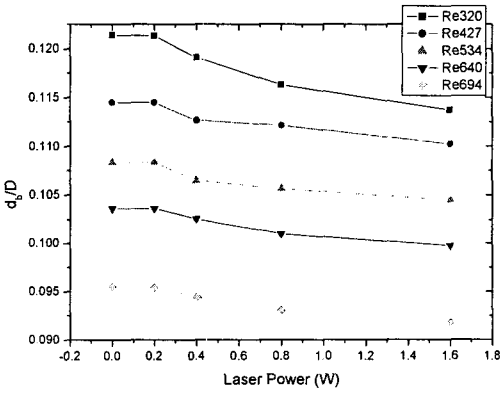

Fig. 8 Particle beam width variation when particle size d_p=1.0 ㎛ : Gaussian intensity distribution case

게 나타나기 때문이다. 또한 광 집게의 원리를 이용하는 경우 광압의 효과는 레이저 빛이 강하게 모이는 초점 부근에서 가장 크게 된다. 따라서 오리피스 레이놀즈 수가 큰 경우는 입자가 이 부근에서의 거주시간이 짧아 광압을 받는 시간이 적기 때문에 광압의 효과가 적은 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 6에서 같은 오리피스 레이놀즈 수에 대해 광압이 가해진 작은 크기의 입자가 광압이 없는 큰 입자보다 작은 입자빔 폭을 형성하는 것을 관찰할 수 있었다. 이론적으로 공기역학 렌즈를 이용할 경우, 입자 관성력의 차이 때문에 동일한 오리피스 레이놀즈 수에 대해 작은 입자가 큰 입자보다 작은 입자빔 폭을 형성하는 것이 불가능 한다. 따라서 광압을 이용할 경우 관성력의 차이를 극복할 만큼 추가적인 힘을 인가할 수 있기 때문에 공기역학 렌즈의 작동조건을 확장시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

광압은 이론상 레이저 출력에 비례한다. 따라서 레이저 출력이 증가할수록 입자빔의 폭이 감소해야 한다. 그러나 실험 결과는 레이저출력이 증가할 때 최소값을 지난 뒤 일정한 값으로 수렴해가는 경향을 보였다. 이 결과는 Fig. 7과 같이 평면-볼록 렌즈 중심에 있는 구멍에 의해 생기는 레이저 빛 강도 분포의 왜곡 때문인 것으로 생각된다. 이 그림에서 반경 방향으로 입자에 작용하는 힘은 초점으로 향하는 산란력과 빛 강도 구배 방향으로 작용하는 구배력이 존재한다. 그림에서 보여지듯이, 구배력은 레이저 빔의 강도가 최대인 점으로

작용하게 된다. 따라서 구배력은 산란력과 달리 중심축에서 멀어지는 방향으로 작용하여 입자에 중심 방향과 그 반대 방향으로 작용하는 광압의 효과가 동시에 나타나 입자빔이 레이저 출력 증가에 따라 계속 감소하지 못 하는 것으로 생각된다.

4.2 순수 광 구배력을 이용한 경우

Fig. 7 과 같은 레이저 빔의 왜곡을 제거하기 위하여, 중심에 구멍을 갖는 평면 원도우 오리피스를 이용하여 광압 실험을 수행하였다. Ar-Ion 레이저의 경우 가우시안 강도 분포를 가지므로 오리피스를 통과한 입자에 작용하는 힘은 레이저 빛의 중심축으로 향하는 구배력만 존재하게 된다. 그 실험 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 평면-볼록 렌즈의 경우와 달리, 평면 원도우 오리피스를 사용할 때 각 유량조건에 따라 입자빔의 폭은 레이저 출력에 비례하여 감소함을 확인할 수 있었다. 그리고 전체적으로 입자빔 폭의 감소량은 광 집게 원리를 이용한 경우보다 작았다. 이 결과는 광 집게 원리를 이용할 경우, 레이저 빛이 오리피스에 의해 초점에서 강하게 모이게 됨으로 입자를 통과하는 광자수가 평면 원도우 오리피스를 사용하는 경우보다 많기 때문에 입자에 전달할 수 있는 힘이 더 크기 때문이다.

5. 결 론

광압이 미세입자 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 기존의 공기역학 렌즈의 오리피스를 평면-볼록 렌즈와 평면 원도우 오리피스로 대체하여 마이크론 크기 입자의 입자빔 생성 특성을 연구하였다. 입자 크기, 유동 조건 그리고 레이저 출력을 변수로 하여 입자빔 폭의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 광 집게 원리를 이용한 경우와 순수 광 구배력을 이용한 경우 모두 광압이 존재할 때 같은 유량 조건에 대해 기존의 공기역학 렌즈를 이용한 경우보다 작은 입자빔 폭을 가졌다. 광 집게 원리를 이용할 경우 입자 직경 2.5 ㎛, 1.0 ㎛, 그리고 0.5 ㎛인 PSL 표준 입자 각각에 대해 입자빔 폭의 감소가 최대 16 %, 11.4 %, 그리고 9.6 % 였다. 광 집게 원리를 이용할 경우 오리피스로 사용된 렌즈 중심의 구멍에 의해 강도 분포가 왜곡되어 산란력과 구배력이 서로 반대 방향으로 작용하여 레이저 출력에 비례하여 입자빔 폭이 감소하지 않고 입자빔 폭이 레이저 출력 증가에 따라 감소하다 증가하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 순수 광 구배력을 이용한 경우는 구배력만 작용하여 입자빔 폭의 감소가 레이저 출력에 비례하였다. 입자빔 폭의 감소는 광 집게 원리를 이용한 경우가 순수 광 구배력을 이용한 경우보다 컸다.

후 기

본 연구는 부분적으로 과학기술부 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 22, pp. 293~313.

(2) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 22, pp. 314~324.

(3) Ashkin, A., 1970, "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 26, pp. 156~159.

(4) Ashkin, A., Dziedizic, J. M. and Chu, S., 1986, "Observation of a Aingle-beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles," *Opt. Lett.*, Vol. 11, pp. 288~290.

(5) Ashkin, A. and Dziedzic, J. M., 1987, "Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria," *Science*, Vol. 235, pp. 1517~1520.

(6) Steubing, R., Cheng, S., Wright, W. H., Numajiri, Y. and Berns, M. W., 1991, "Laser Induced Cell Fusion in Combination with Optical Tweezers: the Laser-Cell Fusion Trap," *Cytometry*, Vol. 12, pp. 505~510.

(7) Misawa, H., Koshioka, M., Sasaki, K., Kitamura, N. and Masuhara, H., 1991, "Three Dimensional Optical Trapping and Llaser Ablation of a Single Polymer Latex Particle in Water," *J. Appl. Phys*, Vol. 70, pp. 3829~3836.

(8) Takashi, K,, Yasunori, I., Naokiee, M. and Totaro, I., 1997, "Theory of Optical Chromatography," *Anal. Chem.*, Vol. 69, pp. 2701~2710.

(9) Lee, M., Yi, M. and Lee, S., 2003, "Inertia Focusing of Particles with an Aerodynamic Lens in the Atmospheric Pressure Range," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 211~224.