

# 광압을 이용한 입자빔 집속

김상복<sup>†</sup> · 박형호\* · 김상수\*\*

## Particle Beam Focusing Using Radiation Pressure

Sangbok Kim, Hyungho Park and Sangsoo Kim

**Key Words :** Aerodynamic lens(공기역학적 렌즈), Particle beam(입자빔), 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 25 mm plano-convex lens having 2.5 mm 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 Ar-Ion continuous wave laser and a pulsed Nd-YAG laser. For the pure aerodynamic focusing system, the particle beam width was decreased as increasing particle size and Reynolds number. For the particle diameter of 0.5  $\mu\text{m}$ , the particle beam was broken due to the secondary flow at Reynolds number of 694. Using the Ar-Ion CW laser, 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 2.5  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ , and 0.5  $\mu\text{m}$  respectively at the Reynolds number of 320. Particle beam width was minimized around the laser power of 0.2 W. However, as increasing the laser power higher than 0.4 W, 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. The radiation pressure effect on the particle beam width is intensified as Reynolds number decreases or particle size increases relatively. On the other hand, using 30 Hz pulsed Nd-YAG laser, the effect of the radiation pressure on the particle beam width was not distinct unlike Ar-Ion CW laser.

### 기호설명

P : 레이저 출력  
 $n_1$  : 주위 매질의 굴절률  
 $n_2$  : 입자의 굴절률  
 Q : 무차원 효율  
 F : 광압에 의한 힘  
 T : 프레넬 투과도  
 R : 프레넬 반사도  
 D : 원통관 직경

d : 오리피스 직경  
 $d_p$  : 입자 직경  
 f : 렌즈 초점 거리  
 r : 굴절각  
 $\theta$  : 입사각  
 $\eta$  : 수축인자  
 Re : 오리피스 레이놀즈 수

### 1. 서론

질량분석기와 실시간 화학조성 분석기등과 같은 장치에서 입자 측정 성능 향상을 위해서 높은 입자의 수농도가 요구된다. 입자의 수농도를 증가시키는 방법으로 입자의 흐름을 좁은 영역에 제한하여 얻어지는 입자빔을 이용하는 것이 일반적이다. 입자빔을 만드는 방법으로 원통관에 오리피스를

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
 E-mail : zoomkaist@kaist.ac.kr  
 TEL : (042)869-3061 FAX : (042)869-3095

\* 한국과학기술원 기계기술연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

설치하여 입자빔을 형성시키는 공기역학적 렌즈<sup>(1-3)</sup>가 일반적으로 사용된다. 공기역학적 렌즈가 입자빔 제조 기술에 성공적으로 적용되어 왔지만 공기역학적 렌즈는 정해진 원통관과 오리피스 크기에 대해 형성시킬 수 있는 입자빔의 직경의 한계값이 정해진다. 따라서 입자의 수농도에 제한이 가해지게 된다. 뿐만 아니라 주어진 유동 조건에서 사용 가능한 입자의 크기가 제한되고 주어진 입자의 크기에 대해 사용 가능한 유량이 제한된다. 따라서 기존의 공기역학적 렌즈를 이용한 입자빔 형성 방법은 한계성을 지니고 있다. 공기역학적 렌즈의 장점을 유지하며 한계를 극복하기 위해서 유동 조건을 변화시키지 않고 입자에 힘을 가하는 것이 가능해야 한다.

빛을 강하게 집속할 경우 빛에 의한 광압이 입자에 큰 힘을 미칠 수 있다.<sup>(4,5)</sup> 광압이 입자에 미칠 수 있는 힘은 빛의 진행 방향으로 작용하는 scattering force와 빛의 강도가 큰 쪽으로 작용하는 gradient force가 있다. 두 힘의 영향력은 빛을 렌즈를 통해 집속 시킬 때 렌즈의 수치 구경에 따라 달라지게 된다. 따라서 입자에 원하는 방향으로 힘을 가할 수 있다. 광압을 이용하여 동위원소 분리, 입자 가속 그리고 입자 부유가 가능하다.

본 연구에서는 공기역학적 렌즈를 이용한 입자빔 생성 장치에 일반적인 오리피스 대신 평면-볼록 렌즈를 오리피스로 사용하여 유동 조건의 변화 없이 입자에 광압을 가함으로써 기존 공기역학적 렌즈의 한계를 극복할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 공기역학적 렌즈

공기역학적 렌즈는 Fig. 1 에서와 같이 공기-입자 유동이 오리피스를 지나면서 입자는 그 관성에 의해서 공기의 유동에서 벗어나면서 중심축에 모이

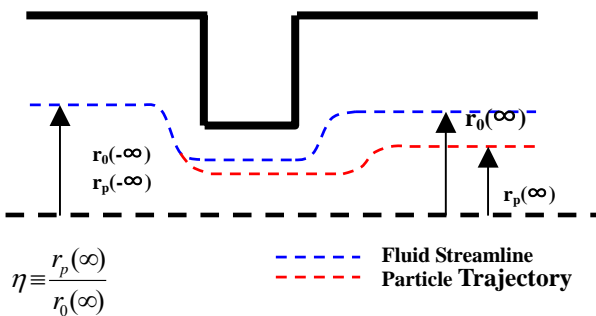


Fig. 1 Schematic diagram illustrating the particle stream contraction factor.

는 것을 이용한 것이다. 입자빔 형성 성능을 나타내는 인자로 수축인자  $\eta$ 가 있다. 수축인자는 오리피스 이후의 공기 최외각 유선의 반지름 방향 위치에 대한 최외각 입자 궤적의 반지름 방향 위치의 비로 나타난다. 수축인자가 0 인 경우 입자가 중심축에 모인 것을 나타내고, 1 인 경우는 입자가 완벽하게 공기 유동을 따라가는 것을 나타낸다. 그리고 수축인자가 음수인 경우는 입자가 중심축을 가로지르는 경우를 나타낸다. 입자빔이 형성되는 경우의 수축인자는 -1 과 1 사이의 값을 가지게 된다.

### 2.2 광압

빛을 광자의 흐름으로 생각할 때 빛이 입자를 통과 하면서 굴절하여 광자의 운동량이 변하게 된다. 광자의 운동량의 변화는 Fig. 2 와 같이 입자에 힘을 가하게 된다.

광자가 가지는 운동량은 다음과 같다.

$$\text{광자의 운동량} = \frac{n_1 P}{c} \quad (1)$$

입자가 빛에 의해 받는 힘은

$$F = Q \frac{n_1 P}{c} \quad (2)$$

이다.

Q 값은 빛의 입사각에 따라 다른 값을 가진다. 물리적으로 Q 는 입자가 빛을 반사하는 정도를 나타낸다. 완전 반사체의 경우 Q 값은 2 가 된다.

빛은 Fig. 3 과 같이 입자의 표면과 내부에서 반사와 굴절을 반복하게 된다. 기하광학 근사로 입자가 빛의 파장보다 충분히 클 경우 Q 값을 계산하면 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

$$Q_z = \left\{ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (3)$$

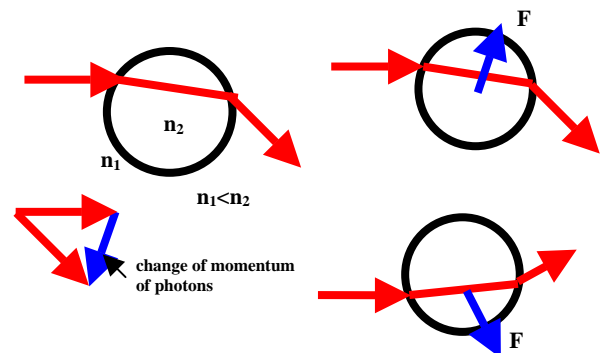


Fig. 2 Principle of radiation pressure. The momentum change of photons exerts force to sphere.

$$Q_y = \left\{ R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (4)$$

Fig. 4는 PSL 입자가 각각 물과 공기 중에서의  $Q_z$  을 계산한 결과를 나타낸다.

위 식에서 광압에 의한 힘이 빛의 강도에 직접 비례함을 알 수 있다. 따라서 빛의 강도를 조절함으로써 입자에 원하는 크기의 힘을 가할 수 있다.

### 3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 5는 전체적인 실험장치를 나타낸다. 기존의 평판 오리피스를 대신하여 중심에 구멍이 있는 평면-볼록 렌즈를 사용하여 유동 조건을 기존의 공기역학적 렌즈와 같게 유지하며 광압을 가할 수 있도록 오리피스를 대체하였다. 원통관의 직경은 25mm 이고 오리피스의 직경은 2.5mm 이다. 렌즈의 초점 거리는 35mm 이다. 광압원으로 연속 발진 Ar-Ion 레이저와 pulsed NdYAG 레이저가 사용되었고, 입자빔의 가시화를 위해 He-Ne 레이저가 사용되었다.

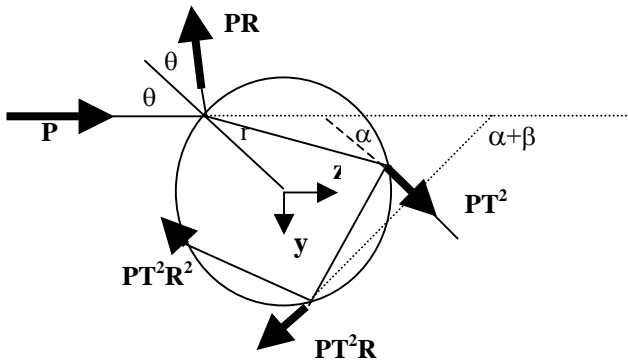


Fig. 3 Geometric optics approximation

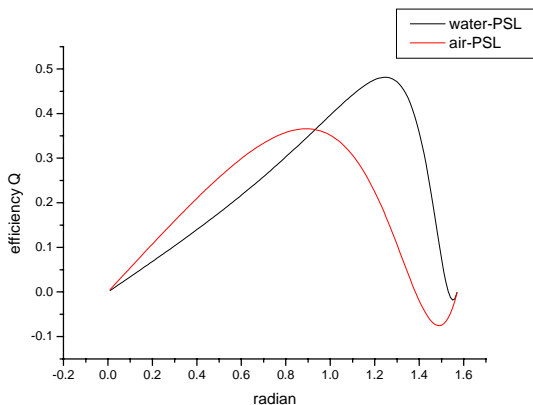


Fig. 4 Values of the dimensionless factor Q for z component, in the cases of the PSL particle suspended in the water and in the air. Q has different values for different incident angle.

광압은 오리피스로 사용된 평면-볼록 렌즈를 통해 빛이 모이면서 입자에 작용하도록 설계되었다. 입자빔의 측정은 오리피스로부터 45mm 후류에서 측정하였다. 디지털 카메라(Olympus C-2100)로 입자빔의 영상을 얻고, 이미지 처리를 통해 입자빔의 폭을 측정하였다. 유량은 상압에서 입자빔이 생성하는 조건으로 오리피스 레이놀즈 수가 300 이상 700 이하가 되도록 하였다.<sup>(3)</sup>

입자는 PSL  $d_p$  2.5 $\mu$ m, 1.0 $\mu$ m 그리고 0.5 $\mu$ m가 사용되었다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 순수한 공기역학적 렌즈의 경우

Fig. 6은 광압의 효과가 없을 경우 오리피스 레이놀즈 수에 따른 측정된 입자빔의 폭을 나타낸다. 입자빔의 폭은 오리피스 레이놀즈 수가 커질수록 그리고 입자의 크기가 클수록 작아짐을 볼 수 있다. 일반적인 공기역학적 렌즈와 같은 결과<sup>(3)</sup>로 평면-볼록 렌즈를 오리피스로 사용할 경우 입자빔 형성 시 유동조건에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2 연속발진 Ar-Ion 레이저로 광압을 가할 경우

Fig. 7은 Ar-Ion 레이저를 사용하여 광압을 가하였을 때 레이저 출력과 오리피스 레이놀즈 수에 대한 입자빔 폭의 변화를 나타낸다. 광압이 존재할 경우 입자빔의 폭이 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 레이저 출력의 변화에 대해 입자빔의 폭이 최소값을 가진 후 다시 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 8에 보이는 것과 같이 렌즈 중심의 구멍에 의한 빛의 강도 분포가 왜곡되어 입자에 gradient force가 증가하여 입자가 강도가 최대가 되는 점으로 향하는 힘을 받아 생긴 현상으로

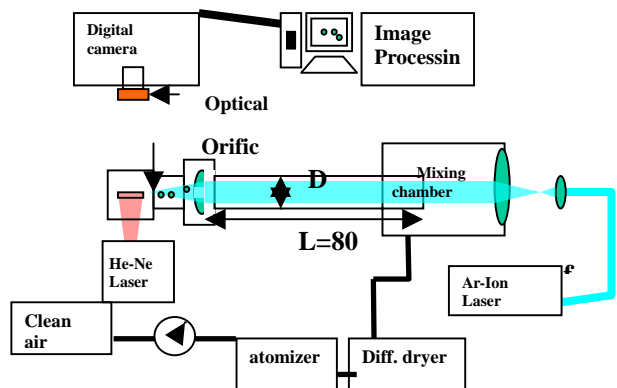
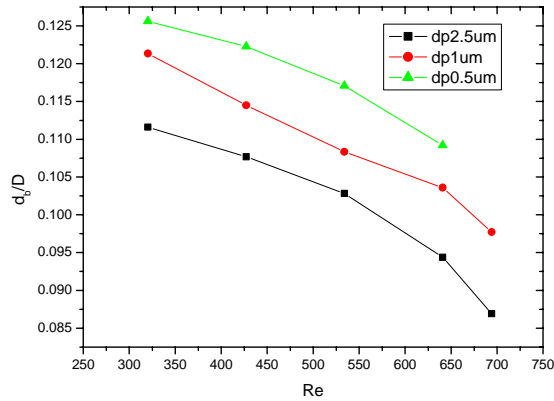
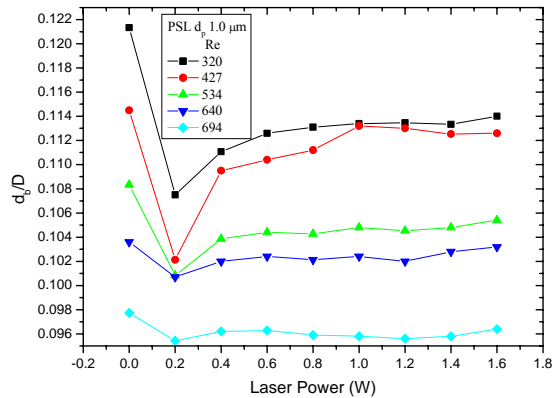


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup.

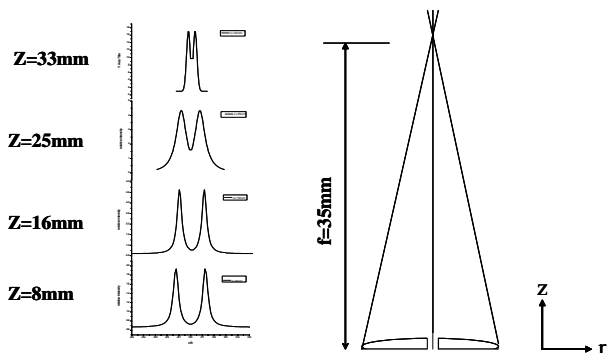
생각되어 진다. Fig. 7 에서 입자빔의 폭이 최소값에서 다시 증가해서 순수한 공기역학적 렌즈에서 보다 작은 값으로 수렴하는 것도 같은 원인에 의한 것이라 생각되어 진다.



**Fig. 6** Variation of the particle beam width as a function of Reynolds number without radiation pressure. Particle beam width gets smaller with increase particle size and Reynolds number.



**Fig. 7** Particle beam width as a function of the power of the Ar-Ion CW laser for particle size  $d_p = 1.0 \mu\text{m}$ .



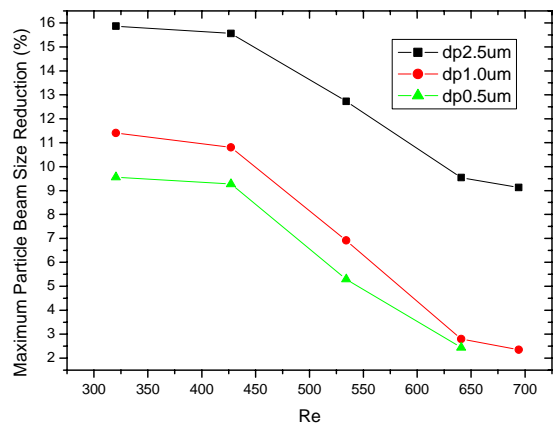
**Fig. 8** Distortion of the laser beam intensity profile. The original Gaussian intensity profile turns to the distorted intensity profile.

Fig. 9 은 입자빔의 폭이 최소가 되는 레이저 출력 0.2W인 경우와 광압이 없을 경우 입자빔 폭의 변화를 나타낸다. 입자빔의 폭의 감소가 입자크기  $d_p$  2.5 $\mu\text{m}$ , 1.0 $\mu\text{m}$  그리고 0.5 $\mu\text{m}$ 에 대해 최대 16%, 11.4% 그리고 9.6% 였다. 입자가 작을수록 변화가 적은 것은 광압 효과가 입자의 단면적에 비례하기 때문이다. 그리고 Fig. 7 에서도 볼 수 있듯이 일정한 입자 크기에 대해 오리피스 레이놀즈 수가 클수록 입자의 관성이 크기 때문에 광압의 효과가 적다. 입자의 관성은 입자가 클수록 커지기 때문에 Fig. 8 에서 입자빔의 폭 감소가 입자 직경의 제곱에 정확하게 비례하지 않음을 볼 수 있다.

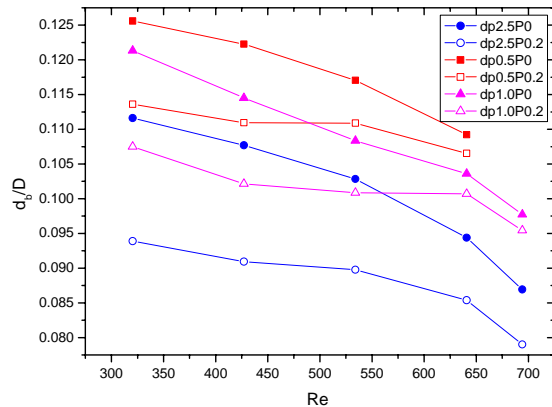
Fig. 10 은 Fig. 9 에서 나타낸 것과 같은 결과를 광압이 없을 경우와 레이저 출력이 0.2W 일 때 입자빔 폭의 변화를 같이 그린 것이다. 결과에서 입자크기가 작음에도 불구하고 더 작은 입자빔 폭을 얻을 수 있는 부분이 있음을 알 수 있다. 이는 순수한 공기역학적 렌즈에 의해서는 얻을 수 없는 결과이다. 즉 정해진 입자 크기에 대해 얻을 수 있는 입자빔 폭의 범위를 광압을 이용하여 확장할 수 있음을 나타낸다.

### 4.3 펄스 레이저로 광압을 가할 경우

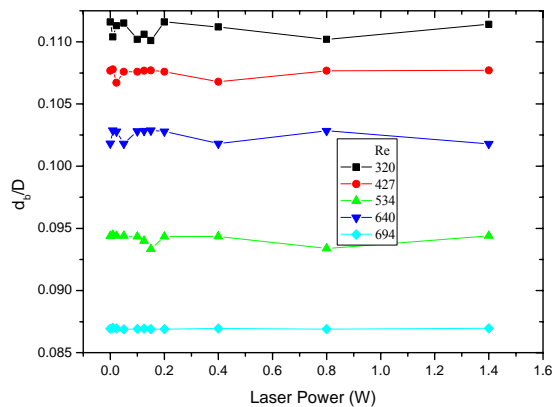
Fig. 11 은 Nd-YAG 펄스 레이저를 사용하여 광압을 가하였을 경우 레이저 출력에 대한 입자빔 폭의 변화를 나타낸 것이다. 실험 수 있다. 이는 사용된 레이저의 pulse rate 가 30Hz 로 1/30 초마다 빛을 발진한다. 그러나 유량 조건에서 최저 유량 일 때 입자가 오리피스에서부터 측정 구간까지 이동하는 시간은 1/40 초 정도 였다. 따라서 거의 모든 입자가 광압의 효과를 받지않고 측정 구간을 지나게 되어 입자빔 폭의 변화가 없는 것으로 결론지을 수 있다.



**Fig. 9** Maximum reduction of the particle beam width for particle size  $d_p = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $1.0 \mu\text{m}$  and  $0.5 \mu\text{m}$  (Ar-Ion CW laser).



**Fig. 10** Variation of the particle beam width with Reynolds number for laser power 0 W and 0.2 W (Ar-Ion CW laser).



**Fig. 11** Particle beam width variation with power of the pulsed Nd-YAG laser. Particle size  $d_p = 2.5 \mu\text{m}$

## 5. 결론

본 연구는 광압을 이용하여 기존의 공기역학적 렌즈의 한계를 극복하여 입자빔의 성능 향상 방법을 제시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평면-볼록 렌즈를 오리피스로 사용하여 공기역학적 렌즈에 광압을 가할 경우 보다 작은 입자빔 폭을 얻을 수 있었다.

(2) 평면-볼록 렌즈 오리피스에 의한 빛 강도 분포의 왜곡으로 최소 입자빔 폭을 얻을 수 있는 레이저의 출력이 제한 된다. 즉 입자빔의 폭은 이론과 달리 레이저의 출력에 비례하여 줄어들지 않았다.

(3) 펄스 레이저를 사용할 경우 pulse rate 와 입자속도의 상관관계가 광압 효과에 큰 영향을 미친다.

## 후 기

본 연구는 과학재단 국가 지정 연구실 사업과 교육부 BK21 사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Liu, P., Ziemann, P.J., Kittelson, D.B., and McMurry, P.H., 1995a, "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., 1995b, "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) Lee, J. W., Yi, M. Y., and Lee, S. M., 2003 "Inertia focusing of particles with an aerodynamic lens in the atmospheric pressure range", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 211-224.
- (4) Ashkin, A., 1970, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 26, pp. 156-159.
- (5) Ashkin, A. and Dziedzic, J.M., 1987, "Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria" *Science* Vol. 235, pp. 1517-1520.
- (6) Ashkin, A., 1992 "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime" *Biophys. J.*, Vol. 61, pp. 569-582.