

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.8.589

수축-발산형 공기역학렌즈를 이용한 초미세 나노 입자의 집속

이광승* · 김송길* · 이동근†

(2008년 3월 10일 접수, 2008년 7월 20일 수정, 2008년 7월 22일 심사완료)

Nanoparticle Focusing with A Novel Converging-Diverging-Type Aerodynamic Lens

Kwang-Seung Lee, Song Kil Kim and Dong Geun Lee

Key Words : Aerodynamic Lens (공기역학렌즈), Converging-Diverging (수축-발산), Nanoparticle Focusing (나노입자 집속), Single Particle Mass Spectrometer (단일입자 질량분석기)

Abstract

An orifice type of aerodynamic lens is generally used to focus nanoparticles. However, it is impossible to focus particles smaller than 10nm in air due to flow instability of fluid in a lens. In this study, we propose a new converging-diverging type of the aerodynamic lens capable of focusing particles of 5-50nm in air. Designing factors of the lens configurations is also extracted and explained in detail through a numerical simulation. It was demonstrated that the aerosols are delivered from the entrance to the downstream of the lens system with 90% transmission efficiency. The final beam diameters are shown to be more or less 1mm in the range of particle size.

1. 서론

대기중에 부유하는 나노입자를 집속(focusing)하는 기술은 에어로졸 질량 분석기(Aerosol Mass Spectrometry) 및 입자 모니터(In-situ Particle Monitor) 등의 분석장비에서의 효과적인 입자 유입부 (Aerosol inlet)외에도 마이크로 타워의 제조 등의 다양한 응용 분야 등에 이용되어 왔다. Murphy and Sears⁽¹⁾는 진공속으로 모세관을 통하여 입자를 분사할 경우 입자 빔이 생성됨을 최초로 제시하였으나, 급격히 입자빔이 퍼지는 단점을 가졌다. 그 후 Liu 등^(2,3)은 서로 다른 직경의 5개의 오리피스 (orifice)를 적절한 간격으로 직렬 배열하는 경우, 다양한 크기의 나노입자를

1mm정도의 직경으로 집속하며 빔의 발산(Divergence)을 효과적으로 막을 수 있음을 이론, 수치해석과 실험을 통하여 검증하였다. 각 단의 오리피스 내경은 서로 다른 크기의 입자를 집속하도록 디자인 되어 40-250nm의 넓은 크기 분포를 가지는 입자를 모두 낮은 손실로서 집속하였다. 특히 Knife edge법을 이동하여, 전하를 띤 입자의 유입과 유출시 대전된 입자의 전류를 측정후 비교함으로써, 입자 빔의 직경과 투과효율을 정량적으로 평가하였다.⁽³⁾ 이에 Liu 등의 "공기역학렌즈"라 불리는 입자집속 디자인은 현재 가장 널리 사용되고 있다.

공기역학렌즈는 에어로졸 질량분석기의 입자 유입부로서 가장 널리 사용되고 있기 때문에, 간단히 에어로졸 질량분석기의 개요를 살펴보면 다음과 같다. 에어로졸 질량분석기는 공기중에 부유하는 단일 나노입자의 화학적 조성과 크기를 실시간으로 동시에 분석하는 큰 장점을 가진다.⁽⁴⁻⁸⁾ 또한 나노 입자의 생성 및 반응 등의

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : donglee@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2365 FAX : (051)512-5236
* 부산대학교 대학원 기계공학부

나노스케일 현상의 계측^(9,10) 및 에어로졸 나노입자의 흡입시 환경유해성 연구⁽¹¹⁾의 기초틀로서 사용되고 있다. 그러나, 이와 같이 환경 및 보건분야에서 중요한 5-50nm의 초미세입자의 특성평가에 사용하기 위해서는, 먼저 공기 역학 렌즈가 초미세입자의 집속에 최적화 되어야 한다. 이에 현재까지 공기역학렌즈의 개발현황을 다음과 같이 설명한다.

Schreiner 등⁽¹²⁾은 새로운 디자인의 공기역학렌즈를 개발하여 190-1150nm의 NaCl 입자를 2mm내외의 에어로졸 빔으로 집속하였다. Huffman 등⁽¹³⁾은 Liu 등^(2,3)의 디자인과 유사한 공기역학렌즈를 사용하여 100-550nm의 휘발성 입자를 집속하였으며, beam probe법을 이용하여 빔 직경이 1mm내외임을 측정하였다. 또한 그들은 기존의 공기역학렌즈의 실험적인 성능평가를 디자인 및 측정방법 별로 요약하여 보고하였는데, 많은 연구자들이 등의 디자인에서 벗어나지 못하고, 실제 100nm이하의 입자를 집속할 수 있음을 확인하지 않은 채로 사용하고 있음을 알 수 있다.

최초로 수치해석을 이용하여 공기역학렌즈의 디자인을 검증한 선행연구자로서, Zhang et al.⁽¹⁴⁾은 공기역학렌즈에서 입자의 거동에 영향을 미치는 인자로서 오리피스 외경 (OD), 내경 (d_f) 및 두께 (L), 상단의 압력 (P_{up})과 전송가스의 유량 (Q) 등을 제시하였고 그 영향을 수치해석을 통해 규명하였다. 그들의 후속 연구에서 최적의 집속성능을 나타내는 입자의 최적 스톱스 수 (St_0)는 유동의 레이놀즈 수 (Re)와 d_f/OD 등의 무차원 수에 의해 변화하며, 그 함수관계를 밝힐 수 없었다.⁽¹⁵⁾ 그 결과, 그들의 디자인으로는 80nm 크기 이하의 미세입자를 효과적으로 집속할 수 없는 한계를 가진다. Wang 등⁽¹⁶⁾은 가벼운 전송가스를 사용할 경우 더 작은 입자를 집속할 수 있음을 보이고, 또한 효과적인 집속을 위한 디자인 가이드라인을 제시하였다. 더 나아가 수치해석을 통하지 않고서도 손쉽게 렌즈 디자인을 할 수 있도록, Microsoft Excel로 만들어진 디자인 툴을 발표하였다.⁽¹⁷⁾ 그러나, 그들 역시, 최적 스톱스 수 (St_0)와 유동의 마하(Ma) 수, 형상 정보(d_f/OD)와의 함수관계를 도출하지 못하였다. 대신 단단(Single-stage) 오리피스에 대하여, 세가지 고정된 Ma수에서 St_0 와 Re의 관계를 수치해석을 통하여 구한 다음, 다단 (Multi-stage) 오리피스의 디자인에 외간 또는 보간 (Interpolation /

Extrapolation)을 통하여 St_0 를 예측하여 사용하는 한계를 가진다. 이에 우리는 다양한 공기역학렌즈 디자인 전반에 걸쳐 수치해석을 수행하였고, 전형적인 운전조건에 사용가능한 Re, d_f/OD , Ma와 St_0 사이의 일반적인 함수관계가 존재할 수 있음을 처음으로 밝혔다.⁽¹⁸⁾

이상의 모든 연구는 30nm이상의 입자의 집속과 관련된 것임을 강조하고 싶다. 전술한 5-50nm의 초미세 입자의 집속과 관련된 최초의 연구는 Wang 등⁽¹⁹⁾에 의해 이루어졌다. 공기역학 렌즈에서 헬륨(He)을 전송가스로 사용하여, 3-30nm의 입자를 집속할 수 있음을 보고하였고, 실제 knife edge법을 이용하여 2-5mm 내외의 빔이 형성됨을 보고하였다.⁽²⁰⁾ 그러나 대기중에 부유하는 환경 에어로졸 입자에 응용하기 위해서는 전송가스와 입자를 분리 후 He으로 대체하여야 하는데, 이는 불가능하다. 또한, 측정된 빔 직경의 크기는 2mm이상으로 에어로졸 질량분석기에 사용하기에는 더 효과적인 디자인이 필요하다.

본 연구에서는, 등^(2,3) 이후 사용되어 온 평판 오리피스 타입을 벗어난, 새로운 수축-발산형 (converging-diverging) 렌즈를 도입하여 Wang 등^(19,20)의 한계를 극복할 수 있음을 밝히는데 그 목적이 있다. 수축-발산형 공기 역학렌즈를 이용할 때, 공기를 전송가스로 사용할 경우에도, 5-50nm의 초미세 입자를 직경 1mm 내외의 에어로졸 빔으로 90%이상의 투과 효율로 집속할 수 있음을 수치해석을 이용하여 검증하였다.

2. 수치해석 방법과 가정조건

2.1 경계조건 및 가정

FLUENT(version 6.2.16)를 이용하여 수축-발산형 공기역학렌즈에서 입자의 거동 및 유동을 해석하였다. 선행 연구자들⁽¹⁴⁻¹⁹⁾과 같이, 본 연구에서도 입자의 수 농도가 낮고, 입자의 크기가 수십 나노미터 이하로 아주 작기 때문에, 유동은 입자에 영향을 끼치고, 입자는 유동에 영향을 끼치지 않는다. 렌즈의 입구는 에어로졸 질량분석기의 일반적인 공기유입 유량(100 sccm, $2.042 \times 10^{-6} \text{kg/s}$)으로 제한하였다. 공기역학렌즈의 출구는 질량분석기의 압력조건인 10^{-3}torr ($\sim 0.13 \text{pa}$)로 일정하게 가정하였으며, 축대칭적인 성질을 이용하여 계산 영역을 감소시켰다. 전송 가스는 정상상태의 압축성 층류 점성유동으로

가정하였다. 또한 입자는 ~2g/cc의 밀도를 가지는 구형 NaCl입자에 선행연구에서와 같이 하였다.⁽¹⁸⁾

10nm내외의 초미세 입자의 경우 Wang 등⁽¹⁹⁾과 같이 브라운 운동을 고려하였으며, 30nm이상의 입자의 거동 모사시 브라운 확산 효과를 무시하였다.⁽¹⁹⁾ 수축-발산형 공기역학렌즈에서 최대 누센 (Kn)수가 약 0.042으로 1보다 아주 작은 값을 가짐으로, 유동의 연속체 가정이 유효하다.

2.2 입자의 운동

입자의 운동은 관성력의 작용에 따라 이동하며 항력(drag force), 브라운힘(Brownian force)으로 단위 질량일 경우, 아래 식과 같이 표시 된다.⁽¹⁹⁾ 입자는 계산의 편의상 구형으로 간주하고 양력(Lift force)는 무시하였다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_{drag} + F_{bi} \quad (1)$$

여기서, 벡터 u_p 는 입자속도, F_{drag} 과 F_{bi} 는 항력과 브라운 힘을 나타낸다. 항력은 스톡스 법칙에 따라 아래와 같다.

$$F_{drag} = \frac{3\pi\mu d_p (u_f - u_p)}{m_p C_c} \quad (2)$$

식에서, μ 는 공기의 동점성, d_p 는 입자직경, u_f 는 유동속도, u_p 는 입자속도, m_p 는 입자질량, C_c 는 미끄럼 보정상수를 나타낸다. 브라운힘은 아래와 같이 나타낸다.⁽¹⁹⁾

$$F_{bi} = G_i \sqrt{\frac{\pi S_o}{\Delta t}} \quad (3)$$

$$S_o = \frac{216 v k T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (4)$$

여기서, G_i 는 Gaussian random 수, v 는 가스의 동점도 (kinematic viscosity), ρ 는 가스 밀도, ρ_p 는 입자 밀도, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도를 나타낸다.

그리고, 수식 (3)에서 시간간격(Δt)은 10^{-6} 초의 차수로 계산 되어져서, 충분히 작기 때문에 이 시간 간격 동안 계산된 항력은 거의 일정하게 유지된다.⁽¹⁹⁾

3. 단단 수축-발산형 렌즈(Single lens)

3.1 수축-발산형 렌즈의 선정

전술한 평판 오리피스 형 렌즈의 성능 한계를 극복하기 위하여 먼저 기존에 사용된 기타 렌즈

형상에 대해 조사를 하였다. 2000년 이전까지, 간단한 원통형의 모세관(Capillary)⁽²¹⁾ 또는 수축-원뿔형 노즐(Converging conical nozzle)^(22,23)을 이용하여 수백 나노미터 이상의 관성이 큰 입자를 가속 및 집속시켰다. 또한 단단 수축-발산형 초음속 노즐을 이용하여, 1-50 μ m 크기의 파우더를 고속 충돌을 이용하여 기판에 부착⁽²⁴⁾하거나, 20-500nm 나노입자를 전기장하에서 가속 부착⁽²⁵⁾하는 연구가 보고되었다. 그러나, 초음속 유동의 높은 Re수에 의하여, 발산부(Diverging part)에서 후류(Back flow) 및 회류(Circulation)가 발생하여 유동이 불안정해진다. 이를 줄이기 위하여 발산각도(Diverging angle)를 작게 하여 사용하였다. 그러나 발산각도를 줄이면, 축 방향의 길이가 길어지는⁽²⁶⁾ 한계가 있다.

여기서, 상기 수축-발산형 노즐은 초음속 유동에서 후류의 충격파를 저감하여 유동을 안정화 시키는 장점을 가지는 것에 주목할 필요가 있다.^(24,25) 이에 Wang 등⁽¹⁹⁾의 공기역학렌즈를 유동의 불안정성의 관점에서 재검토하였다.

Fig. 1(a)와 1(b)에서 He과 공기를 작동가스로 사용할 때, 오리피스 전후에서 유선(Streamline)을 비교하였다. 확산성이 좋은 He에 비해 밀도가 6.9배 큰 공기를 사용하면, 같은 유입 질량유량에서 Re수가 훨씬 커지게 된다. 이에 따라, 와류(Vortex)가 커져 유동이 불안정해지고,

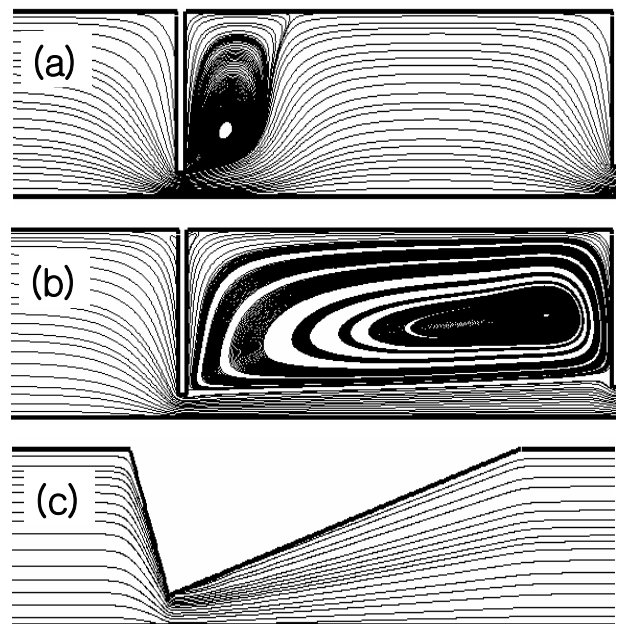


Fig. 1 Gas streamlines in a lens with 1.3mm opening at 100sccm volume flowrate of (a)He, (b)Air, (c)Air

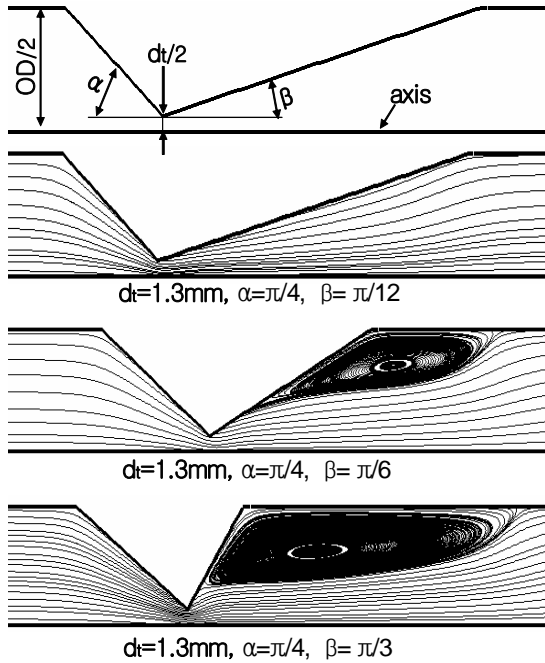


Fig. 2 Gas streamlines and vortex development in a converging-diverging lens with different diverging angles (β) at 100sccm of air

입자의 집속 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 같은 조건에서 와류 (Vortex)를 최소화할 수 있는 수축-발산형 노즐을 오리피스 대신 사용하면, 훨씬 안정적인 유동과 이에 의한 입자의 집속 성능의 향상을 기대되며 Fig. 1(c)에서 확인하였다.

Fig. 2에서는 단단 수축-발산형 공기역학렌즈에서 수축각 (α)이 $\pi/4$ (45°)로 고정된 상태에서 발산각 (β)의 변화에 따른 유선을 나타내었다. β 가 $\pi/12$ (15°) 이상 커지면, 와류가 커져 오리피스에서의 유동과 유사해진다. 또한 Fig. 2에서 $\beta=\pi/12$ 일 때 발산부를 따라 유선이 약간 휘는 것을 관찰할 수 있는데, 이를 막기 위한 최대 발산각은 $\pi/29$ 으로 계산되어, 향후 언급되지 않으면 $\beta=\pi/29$ 임을 의미함을 강조한다.

3.2 입자 집속 성능

기본적으로 수축-발산형 렌즈의 입자 집속 원리는 오리피스형과 유사하다. 렌즈의 집속성능은 렌즈 전후의 입자빔의 반경비 (r_{p0}/r_{pi}), 즉 수축률 (η_c)로 잘 대변된다.^(2,3,14-20)

최적으로 집속되는 입자의 크기(d_{p0})는 렌즈 목 (Throat)의 직경 (d_t)에 강하게 의존하므로, 먼저 노즐목 직경의 영향을 파악하였다. 수축각과 발산각을 각각 $7\pi/30$ 과 $\pi/29$ 로 고정할 때, 1.3, 1.5와 1.7mm의 세가지 다른 목 직경에 대하여,

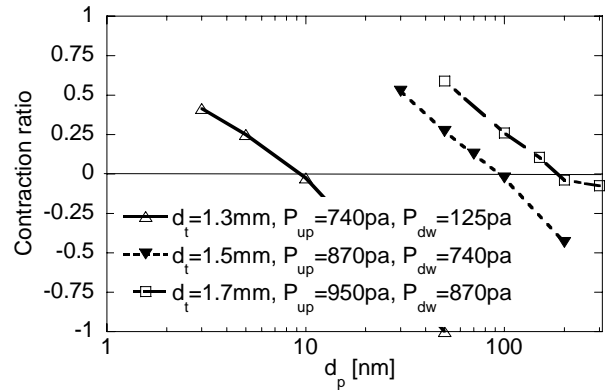


Fig. 3 Nanoparticle focusing with a single converging-diverging aerodynamic lens with three different openings at 100sccm of air for contraction ratio versus d_p

수축률을 입자 크기의 함수로 Fig. 3에 나타내었다. 수축률이 0에 가까울수록 집속이 잘 되고, 음의 값은 과도집속 (overfocusing)을 의미한다. 그림에서 $d_t=1.3$ 에서 10nm 입자가 최적으로 집속된다. 특히, 최적 스톡스수 이하에서 다단으로 렌즈를 동작(Sub-optimal operation)시키면 d_{p0} 이하의 입자도 집속될 수 있을 것으로 기대된다.⁽¹⁶⁾

그림에서 렌즈 목의 이전 또는 이후의 압력 (P_{up} 또는 P_{dw})은 통상적으로 일정한 값으로 가정하여 단단 렌즈의 집속성능을 평가하였다. 그러나, 실제 다단으로 결합하면 단단 모사 때 사용된 압력과는 크게 달라져서, 단단 모사에서 예측된 입자 집속 성능과는 다른 실제 성능을 나타내게 된다. 이에 Fig. 3에서는 실제 다단 결합시 예측된 압력을 명시하였다.

3.3 브라운 운동을 고려한 입자 투과효율

입자의 집속능력과 관련된 수축률과 더불어 투과효율은 공기역학렌즈의 성능평가에서 가장 중요한 요소이다. Fig. 4(a)는 발산각 ($\beta=\pi/29$)이 일정하고, 수축각 α 가 변화할 때 입자 크기 별 투과효율을 나타낸다. 수축각의 변화에 대해 전송률은 큰 변화를 보이지 않으며, 대략 95%의 우수한 투과효율을 보이고, 수축각의 변화에 따른 전송률 차이의 최대값은 5%이내를 나타낸다.

Fig. 4(b)는 α 를 고정하고, β 을 변화시킬 때 투과효율을 예측한 값이다. β 값이 $\pi/6$ 이하로 낮을 경우, 투과효율이 95% 이상으로 우수하지만, $\beta=\pi/3$ 일 경우 83% 이하로 감소한다. 이것은 Fig. 2에서와 같이 β 가 증가하면, 렌즈 목 이후의 팽창부에서 심한 와류의 생성과 유동의 불안정성에 기인하는 것으로 판단된다. 결국

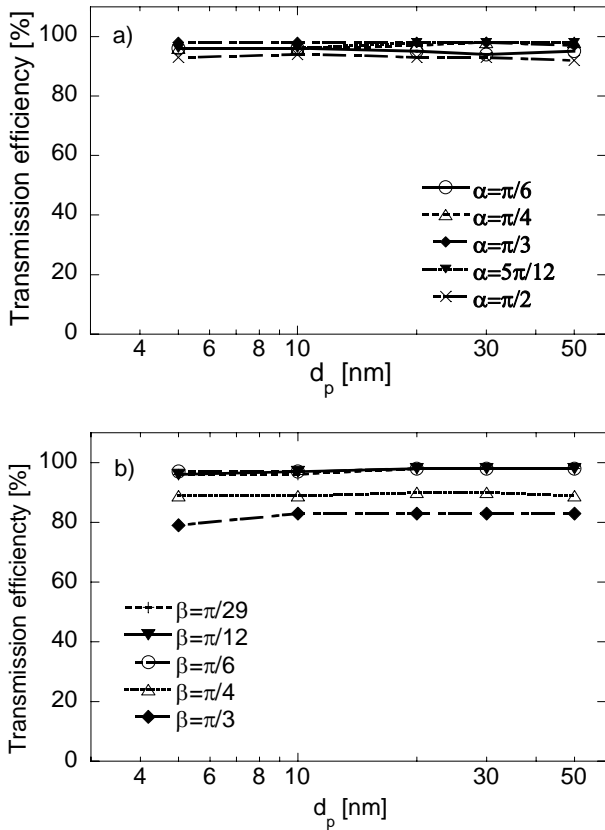


Fig. 4 Transmission efficiency in a converging-diverging lens at $d_t=1.3\text{mm}$ and 100sccm of air when (a) $\beta=\pi/29$ or (b) $\alpha=7\pi/30$ is kept constant; Brownian motion is considered for the prediction of particle behaviors ($<30\text{nm}$)

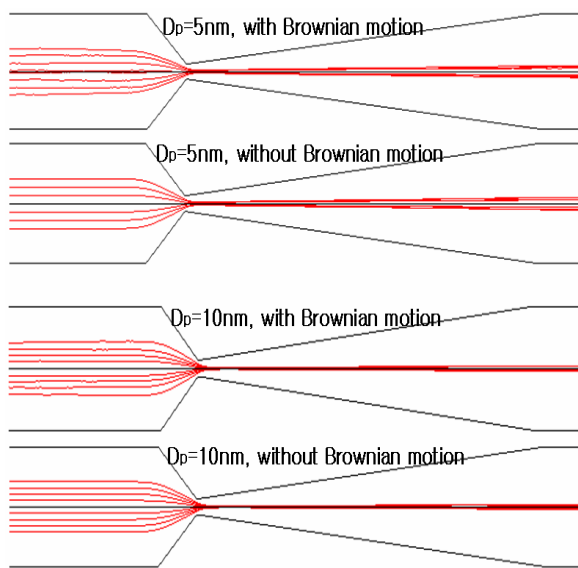


Fig. 5 Brownian motion effects on trajectories of particles of 5 and 10nm in diameter in a converging-diverging lens at $\alpha=7\pi/30$ and $\beta=\pi/29$

입자는 와류에 의해 체류하다가 렌즈 및 분리공간(Spacer)의 벽면에서 손실된다. Chen et al.⁽²⁷⁾에 의하면, 임계 오리피스에서 입자 크기가 클수록 오리피스 전면부에서 입자의 관성충돌에 의한 손실이 커지나, Fig. 2(a)의 결과에서는 입자 크기에 따라서, 전송 효율의 큰 변화는 없다. 이는 입자크기가 50nm 이하로 충분히 작아서, 관성충돌이 일어나기에는 입자의 관성력이 충분하지 않기 때문이다.

작은 입자의 브라운 확산 손실은 입자의 속도가 느린 지역에서 주로 발생^(16,19)한다. 와류가 발생하는 $\pi/6$ 이상의 발산각 (Fig. 2 참조)에서는 입자의 체류시간이 증가하여, 10nm이하의 입자들의 확산손실이 커질 것으로 예측⁽¹⁶⁾되고, Fig. 4(b)에서 확인된다. 또한 확산에 의한 5nm 및 10nm 입자의 궤적 변화를 Fig. 5에 도시화하였다. Fig. 4를 참조하면, Fig. 5에서 사용된 디자인 ($\alpha=7\pi/30$, $\beta=\pi/29$ and $d_t=1.3\text{mm}$)의 렌즈에서는 브라운 확산에 의한 5nm의 입자 손실도 크지 않음을 알 수 있고, Fig. 5에서 확인되었다. 이는 기존의 다른 연구결과와도 일치한다. 즉, 오리피스형 렌즈에서 3nm이하의 입자에서만 입자의 확산이 크게 관찰되었고,⁽¹⁶⁾ Zare et al.⁽²⁸⁾의 임팩터 주위에서 나노입자에 대한 브라운 운동의 결과와 유사한 경향을 보인다.

4. 수축-발산형 다단렌즈(Multi-lens) 분석

직경이 다른 여러개의 단단 렌즈들을 직렬로 구성함으로써, 각 단의 렌즈가 정해진 크기범위의 입자를 집속하여 넓은 크기 범위의 입자를 집속할 수 있다.⁽³⁾ 오리피스형 다단 렌즈 시스템의 경우, 렌즈와 렌즈 사이에서 와류를 거친 유동이 다시 완전발달 되기 위한 충분한 분리공간 (Spacer)이

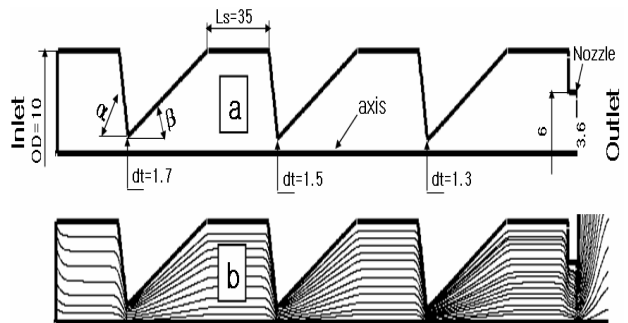


Fig. 6 Converging-diverging aerodynamic lens system (a) Configuration, dimensions are in mm (b) Air streamline in the system at 100sccm of air

필요하다. 그러나, 수축-팽창형 공기역학렌즈는 Fig. 6(b)와 같이 와류가 없이 유동이 매우 안정적이어서, 상대적으로 분리공간의 길이가 짧은 장점을 가진다.

Fig. 6(a)에서 본 연구에서 개발된 수축-팽창형 공기역학렌즈 형상과 계략적인 수치를 나타내며, 분리공간의 길이 (L_s)는 35mm이다. 총 3개의 렌즈를 배열하였으며 렌즈 목의 직경은 유동방향으로 1.7mm, 1.5mm와 1.3mm이고 렌즈의 외경은 10mm로 일정하다. 마지막 출구에는 입자를 진공 챔버 내로 가속화 시켜 입자의 확산을 줄이는 직경 3mm의 노즐을 연결한다. 3개의 렌즈의 수축각과 팽창각은 모두 $\alpha=7\pi/30$, $\beta=\pi/29$ 로 동일하다. 첫 번째 렌즈 ($d_i=1.7\text{mm}$)는 주어진 압력과 유량에서 150nm내외의 입자가 최적 집속되게 설계되었다.

Fig. 7은 수축-발산형 공기역학렌즈 내부의 운반가스(공기)의 속도장과 압력장의 변화를 나타낸다. 첫 번째와 두 번째 렌즈의 목에서 Ma 수는 0.35내외이고 약 100Pa의 압력강하를 야기한다. 반면, 세 번째 렌즈와 가속노즐에서 Ma 수는 1과 1.8정도로 초음속 유동이 생성되며, 주로 세 번째 렌즈의 목을 지나면서 압력이 큰 폭으로 떨어진다. 하지만 수축-팽창형 렌즈의 특성상 충격파의 효과는 무시할 수 있다. Fig. 8에서는, 입자크기 별로 전체 시스템의 집속성능을 입자궤적으로 나타내었다. 계산시 30nm미만의 입자에 대하여 브라운 확산 효과를 포함하였으며, 30nm이상의 입자에 대해서는 그 효과를 무시하였다. 공기를 작동가스로 사용해도 5-50nm 크기범위 전반에 걸쳐 노즐 출구에서 40mm 후류에서 측정된 최종 입자 빔 직경은 1mm 내외였다. 5nm 입자의 경우, 노즐 후류에서 입자확산에 의해 빔직경이

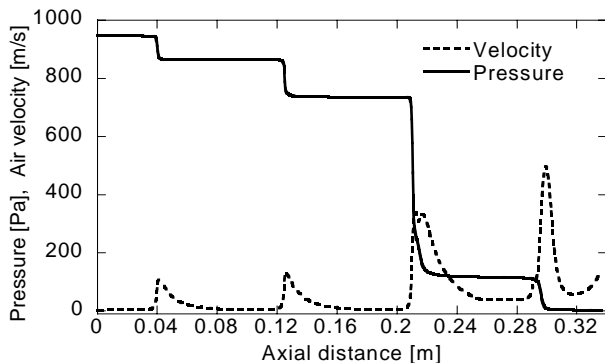


Fig. 7 Velocity and pressure drop of an air in the converging-diverging lens system at 100sccm of air

약 1.8mm 까지 증가한다. 이것은 노즐 전후에서 큰 압력차 (이전, 0.133Pa; 이후 125Pa)로 인해, 노즐 하류에서 공기가 급격히 팽창하고, 이 때 관성이 작은 5nm 입자는 운반가스의 팽창과 함께 발산하기 때문이다. 더불어 브라운 확산도 입자 발산에 영향을 미치게 된다. 만약 같은 조건에서 He를 전송가스로 사용하게 되면, 운반가스의 팽창이 더 커서 입자 집속에 좋지 않은 결과를 가져올 것으로 판단된다.

Fig. 9에서 공기를 전송가스로 사용한 수축-발산형 공기역학렌즈의 성능을 He를 전송가스로 사용한 Wang et al.⁽¹⁹⁾의 공기역학렌즈 성능과 비교하였다. Wang et al.⁽¹⁹⁾의 시뮬레이션 결과는 Wang & McMurry⁽¹⁷⁾의 디자인 틀 방법을 이용하였으며, 노즐 끝단으로부터 40mm떨어진 곳에서 동일하게 측정하였으며, 입자 밀도는 1g/cc와 2g/cc모두 상호 비교하였다.

본 연구의 시뮬레이션 결과는 다양한 입자 크기에 대해서 입자 빔 직경이 대체로 일정하지만, Wang et al.⁽¹⁹⁾의 시뮬레이션 결과에서는 입자 크기가 커지면서 30nm가 될 경우, 과다집속에 의해 입자 빔 직경이 최대가 되며, 50nm일 경우는 과다집속과 관성력이 더욱 증가되면서, 렌즈의 벽면에서 입자가 관성충돌을 하게 된다. 입자 빔의 가장자리 입자들은 관성충돌로 소실되고, 결국 중심축에 위치한 입자들만 렌즈를 통과하여 입자 빔 직경은 오히려 감소한 결과를 보인다. 이 결과는 Fig. 9(b)의 입자직경과 전송률 그래프를 통해서도 확인 할 수 있으며, 50nm입자의 경우 전송률이 급격히 낮아져서, 대부분의 입자가 소실됨을 확인 할 수 있다.

또한 Fig. 9(b)에서 투과효율에 대한 상호 비교

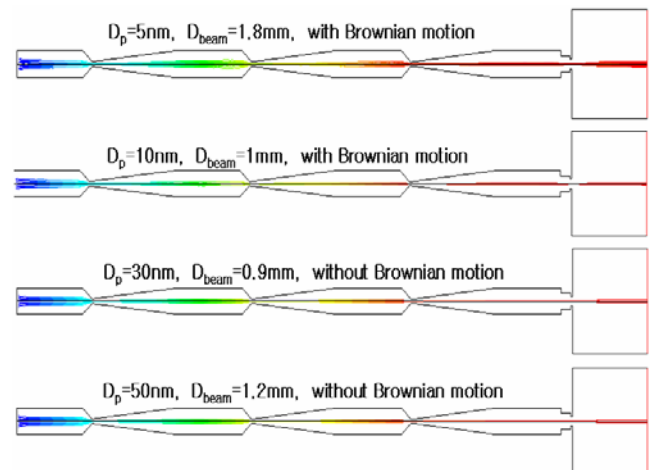


Fig. 8 Trajectories of particles with different sizes at 100sccm of air in the aerodynamic lens system

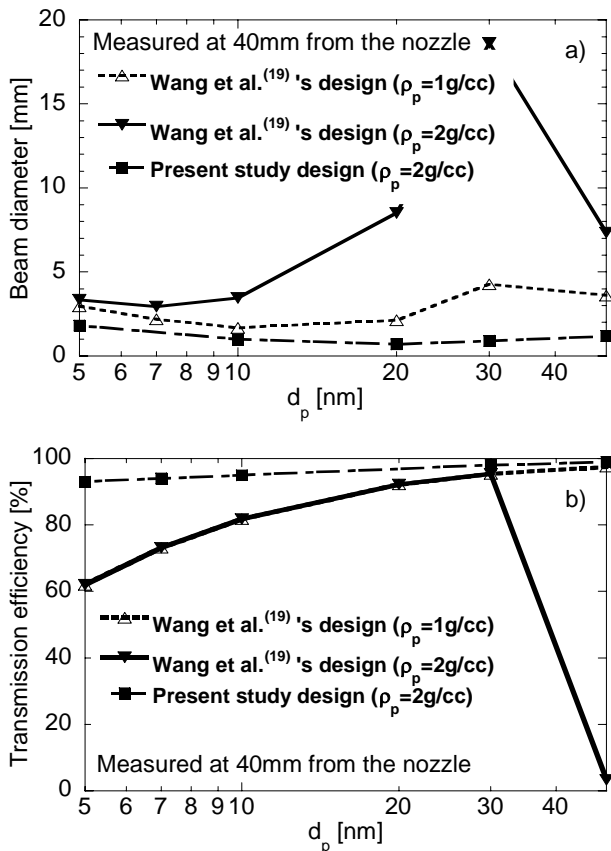


Fig. 9 Beam diameters and transmission efficiencies of particles as a function of particle size

는 본 연구에서 제안한 디자인이 특히 작은 입자에 대해 더 우수한 투과효율로 집속할 수 있고, 전 범위에서 90% 이상임을 나타낸다. 전술한 바와 같이 수축-팽창형의 렌즈에서는 안정화된 공기 유동과 입자확산의 저감 등에 의한 결과로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 오리피스형 공기역학 렌즈를 벗어난 새로운 수축-팽창형 렌즈를 개발하여, 공기중에 부유하는 5-50nm 크기범위의 초미세입자를 1mm 내외의 빔으로 집속하는 기술을 최초로 개발하였다. 또한 He를 작동가스 사용하는 기존의 한계점을 극복하기 위하여 공기를 사용하였으며, 그럼에도 불구하고 기존의 공기역학렌즈 디자인과 비교하여도 상대적으로 더 우수한 집속성능 및 더 낮은 입자손실을 나타냄을 수치해석을 통하여 증명 하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Murphy, W. K. and Sears, G. W., 1964, "Production of Particulate Beams," *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1986~1987.
- (2) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995a, "Generation Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 293~313.
- (3) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995b, "Generation Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 314~324.
- (4) Carson, P. G., Johnston, M. V. and Wexler, A. S., 1997, "Laser Desorption/Ionization of Ultrafine Aerosol Particles," *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, Vol. 11, pp. 993~996.
- (5) Noble, C. A. and Prather, K. A., 2000, "Real-time Single Particle Mass Spectrometry: a Historical Review of a Quarter Century of Chemical Analysis of Aerosols," *Mass Spectrom. Rev.*, Vol. 19, pp. 248~274.
- (6) Lee, D., Park, K. and Zachariah, M. R., 2005, "Determination of Size Distribution of Polydisperse Nanoparticles with Single Particle Mass Spectrometry: The Role of Ion Kinetic Energy," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 162~169.
- (7) Lee, D., Miller, A., Kittelson, D. and Zachariah, M. R., 2006, "Characterization of Metal-bearing Diesel Nanoparticles Using Single Particle Mass Spectrometry," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 37(1), pp. 88~110.
- (8) Reents, W. D. and Ge, Z., 2000, "Simultaneous Elemental Composition and Size Distribution of Submicron Particles in Real Time Using Laser Atomizer/Ionization Mass Spectrometry," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 33, pp. 122~134.
- (9) Mahadevan, R., Lee, D., Sakurai, H. and Zachariah, M. R., 2002, "Measurement of Condensed-Phase Reaction Kinetics in the Aerosol Phase Using Single Particle Mass Spectrometry," *J. Phys. Chem. A*, Vol. 106, pp. 11083~11092.
- (10) Park, K., Lee, D., Rai, A., Mckherjee, D. and Zachariah, M. R., 2005, "Size-Resolved Kinetic Measurements of Aluminum Nanoparticle Oxidation with Single Particle Mass Spectrometry," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 109, pp. 7290~7299.
- (11) Venkataraman, C. and Raymond, J., 1998, "Estimating the Lung Deposition of Particulate

- Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Associated with Multimodal Urban Aerosols,” *Inhal. Toxicol.*, Vol. 10(3), pp. 183~204.
- (12) Schreiner, J., Schild, U., Voigt, C. and Mauersberger, K., 1999, “Focusing of Aerosols into a Particle Beam at Pressures from 10 to 150 Torr,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 31(5), pp. 373~382.
- (13) Huffman, J., Jayne, J., Drewnick, F., Aiken, A., Onasch, T., Worsnop, D. and Jimenez, J., 2005, “Design, Modeling, Optimization, and Experimental Tests of a Particle Beam Width Probe for the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 1143~1163
- (14) Zhang, X., Smith, K. A., Worsnop, D. R., Jimenez, J., Jayne, J. T. and Kolb, C. E., 2002, “A Numerical Characterization of Particle Beam Collimation by an Aerodynamic Lens-Nozzle System: Part I. An Individual Lens or Nozzle,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 36, pp. 617~631.
- (15) Zhang, X., Smith, K. A., Worsnop, D. R., Jimenez, J. L., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Morris, J. and Davidovits, P., 2004, “Numerical Characterization of Particle Beam Collimation: Part II Integrated Aerodynamic-Lens-Nozzle System,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 38, pp. 619~638.
- (16) Wang, X., Kruis, F. E. and McMurry, P. H., 2005a, “Aerodynamic Focusing of Nanoparticles: I. Guidelines for designing Aerodynamic Lenses for Nanoparticles,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 611~623.
- (17) Wang, X. and McMurry, P. H., 2006b, “A Design Tool for Aerodynamic Lens Systems,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 40, pp. 320~334.
- (18) Lee, K.-S., Cho, S.-W. and Lee, D., 2008, “Development and Experimental Evaluation of Aerodynamic Lens as an Aerosol Inlet of Single Mass Spectrometry,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 39, pp. 287~304.
- (19) Wang, X., Gidwani, A., Girshick, S. L. and McMurry, P. H., 2005b, “Aerodynamic Focusing of Nanoparticles: II Numerical Simulation of Particle Motion through Aerodynamic Lenses,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 624~636.
- (20) Wang, X. and McMurry, P. H., 2006a, “An Experimental Study of Nanoparticle Focusing with Aerodynamic Lenses,” *Int. J. Mass Spectrom.*, Vol. 258, pp. 30~36.
- (21) Cheng, Y. S. and Dahneke, B. E., 1979, “Properties of Continuum Source Particle Beam. II. Beams Generated in Capillary Expansions,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 10, pp. 363~368.
- (22) Mallina, R. V., Wexler, A. S. and Johnston, M. V., 1997, “Particle Growth in High-speed Particle Beam Inlet,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. 223~238.
- (23) Mallina, R. V., Wexler, A. S. and Johnston, M. V., 1999, “High-speed Particle Beam Generation: Simple Focusing Mechanisms,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, pp. 719~738.
- (24) Grujicic, M., Zhao, C. L., Tong, C., DeRosset, W. S. and Helfritch, D., 2004, “Analysis of the Impact Velocity of Powder Particles in the Cold-gas Dynamic-Spray Process,” *Materials Sci. eng. A*, Vol. 368, pp. 222~230.
- (25) Jen, T.-C., Pan, L., Li, L., Chen, Q. and Cui, W., 2006, “The Acceleration of Charged Nano-particles in Gas Stream of Supersonic de-Laval-type Nozzle Coupled with Static Electric Field,” *Appl. Thermal eng.*, Vol. 26, pp. 613~621.
- (26) Tafreshi, H. V., Benedek, G., Piseri, P., Vinati, S., Barborini, E. and Milani, P., 2002, “A Simple Nozzle Configuration for the Production of Low Divergence Supersonic Cluster Beam by Aerodynamic Focusing,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 36, pp. 593~606.
- (27) Chen, S.-C., Tsai, C.-J., Wu, C.-H., Pui, D. Y. H., Onischuk, A. A. and Karasev V. V., 2007, “Particle Loss in a Critical Orifice,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 38, pp. 939~949.
- (28) Zare, A., Abousli, O. and Ahmadi. G., 2007, “Computational Investigation of Airflow, Shock Wave and Nano-particle Separation in Supersonic and Hypersonic Impactors,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 38, pp. 1015~1030.