

상압 공기역학적 렌즈의 입자 관성집속 모델

이진원* · 이민영*

(2000년 6월 12일 접수, 2001년 1월 8일 심사완료)

Model for the Inertial Focusing of Particles Using an Atmospheric Aerodynamic Lens

Jin-Won Lee and Min-Young Yi

Key Words : Aerodynamic Lens(공기역학적 렌즈), Orifice(오리피스), Particle Beam(입자빔), Particle Focusing(입자 집속), Inertial Focusing(관성 집속)

Abstract

Aerodynamic lenses are widely used in generating particle beams of high density and small diameter, but analytical or modeling studies are limited only in the free molecular regime. In this study, it is shown that generating particle beam is also possible in atmospheric pressure range, and the mechanism of generating particle beam using an orifice is analysed into three different parts : fluid dynamic contraction, diffusional defocusing, and inertial focusing. In laminar flow conditions, the diffusional defocusing effect can be neglected, and the effects of inertial focusing can be expressed in terms of the orifice size and Stokes number. Numerical experiments are done for two different orifices, $d/D=1/5$ and $1/10$ and particle diameter $d_p=1-10 \mu\text{m}$. The results for two different orifices can be made into a single curve when a modified Stokes number is used. The inertial focusing effect diminishes when the modified Stokes number becomes smaller than 10^{-2} .

기호설명

C	:	입자의 농도	d_b	:	입자빔의 직경
C_c	:	미끄럼 보정 계수	d_p	:	입자의 직경
C_D	:	항력계수	L	:	관의 길이
D	:	관의 지름	P	:	압력
D_{cr}	:	관 입구에서의 임계 입자궤적의 반경방향 위치	P_{atm}	:	대기압(= 10^5 Pa)
D_{mol}	:	입자 확산계수	Pe	:	Peclet 수 (= ud/D_{mol})
d	:	오리피스의 직경	Re	:	레이놀즈 수 (= ud/ν)
			Re_p	:	입자 레이놀즈 수 (= $\frac{\rho_p \vec{u}_p - \vec{V} d_p}{\mu}$)
† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과			St	:	스톡스 수 (= $\frac{\rho_p d_p^2 u C_c}{18\mu d}$)
E-mail : jwlee@postech.ac.kr			St_m	:	보정 스톡스 수(= $St(d/D)^{5/3}$)
TEL : (054)279-2170 FAX : (054)279-3199			u	:	오리피스에서의 평균 유속
* 포항공과대학교 대학원 기계공학과					

u_p	:	입자의 속도
V	:	유속
μ	:	공기의 점성 계수
η	:	입자의 손실률
ν	:	공기의 동점성 계수
ρ_f	:	공기의 밀도
ρ_p	:	입자의 밀도
Δd_i	:	관성효과에 의한 빔직경 변화량

1. 서론

공기중에 부유된 입자를 아주 작은 공간에 집중(focusing)시키는 기법은 다양한 분야에 응용가능성을 가지고 있는 기술로서, 이렇게 생성된 고집속 입자유동을 입자빔(particle beam)이라고 부른다.

최초의 입자빔은 Murphy and Sears⁽¹⁾에 의해 개발되었으며, 모세관을 통하여 진공속으로 입자유동을 공급하여 입자빔을 생성시키는 방법이었으며, 그 후 효과를 높이기 위해 보호공기(sheath air)라는 2차유동을 도입한 방법이 고안되었다. 최근에는 공기역학적 렌즈(aerodynamic lens)라는 일종의 오리피스를 관내에 설치하여 유동을 인위적으로 국한시키는 방법이 Liu 등^(2,3)에 의해서 제시되었고, 그 후 입자빔을 생성시키는 대표적인 방법이 되어 이를 이용한 많은 연구결과들이 발표되었다. 즉, Kinney 등⁽⁴⁾은 반도체 공정조건(100scm, 1torr)에서 공기역학적 렌즈를 입자 측정기(ISPM) 바로 위에 설치하여 입자들을 집중시켜 진공속에서의 입자 거동을 보다 정확히 측정하였으며, Bae 등⁽⁵⁾은 감압 하에서 임계 오리피스 하류에서 에어로졸 입자의 공간분포와 ISPM(In-Situ Particle Monitor)의 성능을 평가하였고, Schreiner 등⁽⁶⁾은 성층권 압력 하에서 구름 입자의 성분을 분석하기 위하여 다단의 공기역학적 렌즈를 사용하여 입자빔을 생성시키고 이들의 투과 효율을 구하였다. 배귀남⁽⁷⁾은 공기역학적 렌즈를 사용하여 렌즈의 크기, 수, 간격, 마지막 렌즈로부터의 거리 등에 따른 입자 빔의 모양 및 크기를 실험적으로 구하였으며, 안진홍 등⁽⁸⁾은 진공 챔버속에 임계 오리피스를 설치한 뒤 이 임계 오리피스를 통과한 입자의 운동 특성에 대하여 살펴보았다.

이처럼 기존의 공기역학적 렌즈를 사용한 연구

는 저압(진공조건)하에서 입자빔을 생성하거나 입자빔을 응용하는 연구에 초점이 맞추어져 있었다. 최근에 관입구에서의 유량과 압력 그리고 입자의 크기를 알면 그에 맞게 공기역학적 렌즈를 설계할 수 있는 식이 소개되었는데,⁽⁹⁾ 이 또한 분자유동 영역(free-molecular regime)에서만 통용되는 식이다. 따라서 본 연구에서는 하류가 저압이 아닌 대기압조건일 경우에 대하여, 입자빔의 생성특성 및 입자 집속(particle focusing)의 일반화된 모델을 개발하고자 한다.

먼저 입자집속현상의 기본 메카니즘을 살펴보면, 공기역학적 렌즈를 사용하여 입자빔을 만드는 경우에 최종적인 입자빔의 크기는 노즐의 크기를 기준으로 하여, 유선(streamlines)의 집중에 의한 수축효과, 확산에 의한 반집속(defocusing)효과, 그리고 입자의 관성력에 의한 집속효과의 세 가지 효과의 조합으로 나눌 수 있다. 확산효과가 큰 난류의 경우나 유선의 확산이 큰 외부유동(external flow)의 경우에는 집속효과가 크지 않으며, 따라서 실제로 입자빔을 만드는 경우는 층류 내부유동에 국한된다. 따라서 본 연구에서도 층류 내부 유동에 대하여 세 가지 효과를 구분하여 구하고 특히 입자의 관성에 의한 집속효과에 대한 정량적 모델을 제시하고자 한다.

2. 해석방법

입자의 관성효과가 포함되는 경우의 입자빔의 크기 또는 입자의 위치분포는 Eulerian 방법으로 해석이 어려우므로 Lagrangian 방법으로 구하는 것이 일반적이다. 따라서 주어진 해석계에 대하여 유동장을 계산하고 이 유동장내에서의 입자 운동방정식을 풀어 입자의 위치를 구하면 입자빔의 크기를 구할 수 있다. 최종 입자빔의 직경은 총집속 효과에 의해 결정된다고 할 때, 입자의 관성에 의한 집속효과는 총집속효과에서 유선의 수축효과와 확산에 의한 확대효과를 제외한 나머지로 구할 수 있다. 유선의 수축효과는 노즐 끝을 지나가는 임계유선의 궤적으로부터 구해지고, 유선효과와 확산효과를 합한 비관성 효과는 입자의 대류확산방정식의 해로부터 바로 구해진다.

2.1 해석모델 형상

공기역학적 렌즈의 가장 간단한 형상은 일정 직

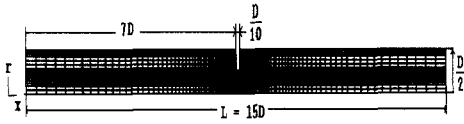


Fig. 1 Main grid of the aerodynamic lens system

경의 원형관내에 작은 축대칭 노즐 오리피스를 설치한 것이다.(Fig. 1) 오리피스는 얇은 판 모양으로 두께는 관 지름의 1/10, 관의 입구에서 7D 만큼 떨어진 곳에 있으며, 관의 지름 $D=1\text{cm}$, 길이 $L=150D$, 오리피스의 구멍크기 d 는 $(1/5)D$, $(1/10)D$ 의 두 가지를 고려하였다. 입자의 크기 d_p 는 1., 2., 4., 6., 8., 10. μm 에 대해서 살펴보았으며, 입자빔의 크기에 대한 계산결과는 관의 출구에서의 값을 기준으로 하였다.

2.2 유동장 방정식

유동장은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식의 연립해로부터 구한다. 경계조건으로는 i) 입구에서 완전발달 층류속도분포 조건, ii) 출구에서 일정 압력(pressure) 조건($P=P_{\text{atm}}$), iii) 외벽면에서 접촉조건(no-slip), 그리고 iv) 중심축에서 대칭조건을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1a}$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \tag{1b}$$

계산에 사용된 격자는 불균일 격자를 사용하였다. 관의 벽면과 오리피스에 가까울수록 속도 기울기(velocity gradient)가 더 크기 때문에, 이 부분에 더 세밀하게 격자를 구성하였다. 격자수는 계산결과가 더 이상 격자수에 따라 변하지 않는 조건에서 결정하였으며, 최종적으로 106 x 20의 비균일 격자를 선택하였다.

이 식들의 수치해석에는 유한체적법을 사용하는 상용패키지인 CFX-Flow3D를 사용하였으며, 질량생성항이 10^7 이하로 되면 수렴하였다고 판단하였다. 또한 유동속도는 오리피스에서의 레이놀즈수를 기준으로 400-2000까지를 고려하였다.

2.3 대류확산 방정식

정상상태의 대류확산 방정식은 입자의 농도 C

와 입자의 확산계수 D_{mol} 을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\vec{V} \cdot \nabla)C = D_{mol} \nabla^2 C \tag{2}$$

층류에서의 입자 확산계수는 Stokes-Einstein의 식 (3)으로 표현되며,⁽¹⁰⁾ Cunningham 미끄럼 보정 계수 C_c 는 일반적으로 다음의 식 (4)가 쓰인다.

$$D_{mol} = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p} \tag{3}$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} [2.541 + 0.8\exp(-0.55 \frac{d_p}{\lambda})] \tag{4}$$

여기에서 k 는 볼츠만 상수, λ 는 공기의 평균 자유행로(mean free path)이다.

입자의 거동에서 대류와 확산의 상대적 크기는 Peclet수(= ud/D_{mol})에 의해 결정되는데, 본 연구에서 대상으로 하는 일반적인 입자의 크기(1 ~ 10 μm)에서는 이 값이 $10^8 \sim 10^{10}$ 정도로 확산의 효과는 거의 무시할 만하다.

2.4 입자운동 방정식

입자의 궤적을 계산하기 위하여 입자는 구형이며, 회전하지 않고, 입자끼리 서로 영향을 미치지 않으며, 입자는 유동에도 영향을 주지 않는다고 가정하였고, 이 경우 입자의 운동방정식은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.^(11,12)

$$\rho_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{3\rho_f}{4d_p} C_D |\vec{V} - \vec{u}_p| (\vec{V} - \vec{u}_p) \tag{5}$$

u_p 는 입자의 속도, \vec{V} 는 공기의 속도이며, C_D 는 항력계수로서 $Re_p < 1000$ 의 범위에서 잘 맞는 다음의 식으로부터 계산하였다.

$$C_D = 24(1 + 0.15 Re_p^{0.687}) / Re_p \tag{6}$$

$$Re_p = \frac{\rho_p |\vec{u}_p - \vec{V}| d_p}{\mu}$$

입자 레이놀즈 수.

입자궤적을 계산할 때에, 4차 Runge-Kutta방법을 사용하였으며, 시간적분에 있어서 시간의 증

분은 self adaptive를 사용하였다. 관의 입구에서 반경방향으로 균일한 간격으로 100개의 위치에서 입구에서의 유동속도와 같은 속도로 입자를 공급하여 그 궤적을 추적하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동장과 입자궤적의 일반 특성

Fig. 2는 $d/D=1/5$ 일 때 임계 유선과 여러 입자 크기에 대한 임계궤적을 나타내고 있다. 먼저 유동의 특성을 살펴보면, 입구에서 포물선형 속도 분포를 가지고 평행하게 흐르던 유선은 오리피스 근처에서 급격히 수축되고 오리피스를 지나면서 더욱 수축되었다가 다시 약간 확장된 후 거의 일정한 단면적을 유지하면서 출구까지 진행한다. 오리피스의 상류면에는 작은 재순환 영역이 형성되며, 하류측에는 벽면을 따라 평행하게 긴 축대칭 재순환 영역이 형성된다. 관의 길이가 매우 길면 재순환 영역이 닫히면서 오리피스를 나온 유동이 관벽면까지 확장되지만 길이가 짧은 관에서는 재순환영역이 외부로 열린 상태를 유지한다. 이러한 일반적 유동특성은 오리피스의 두께를 변화시켜도 거의 달라지지 않았다. 오리피스를 지나서 상류로부터 공급된 유동의 경계면을 임계유선(critical streamline)이라고 하면, 오리피스의 끝을 접촉한 후 조금 더 수축되었다가 약간 확장한 후 거의 일정한 직경을 유지하고 출구까지 이어진다.

한편 입자의 궤적은 유선과는 약간 다른 특성을 갖는다. 입구의 여러 지점에서 입자를 출발시키면 중심축 부근에서 출발한 입자는 오리피스를 통과하여 하류로 내려가지만 벽면부근에서 시작한 입자들은 오리피스면에 충돌하여 제거된다. 따라서 통과입자와 충돌입자궤적의 구분궤적을 임계궤적(critical trajectory)이라고 하면, 오리피스 이후의 입자빔의 크기는 임계입자궤적에 의해서 결정된다(Fig. 3). 또한, Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 오리피스를 통과한 다음 크기가 작은 입자는 유선을 따라 가지만 크기가 커질수록 유선에서 많이 벗어나는 것을 볼 수 있다.

충류조건에서 교차하는 일어나지 않으며, 임계입자궤적도 오리피스 하류에서 출구까지 유동이 어느 정도 이상 빠르면($Re \geq 400$), 크게 변화하지

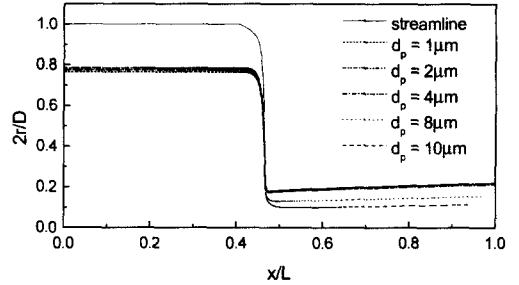


Fig. 2 Critical streamline and critical particle trajectories for $d/D=1/5$ and $Re=1000$

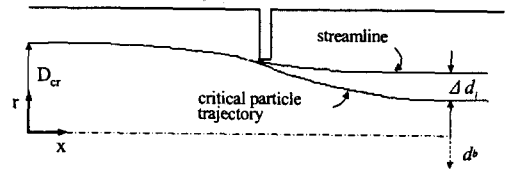


Fig. 3 Schematic diagram of critical streamline and critical particle trajectory. Δd_i denotes the difference between critical streamline and critical particle trajectory, which is an indicator of the inertia effect

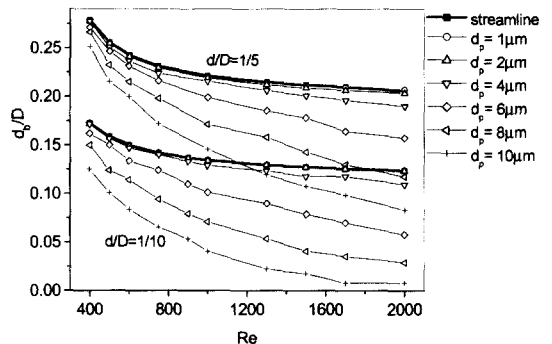


Fig. 4 Size of the particle beam at the exit vs. Re for two different orifices and various particle sizes

않고 반경 방향으로 거의 일정한 값을 유지한다.

3.2 입자빔의 전체 크기의 변화

유속과 입자의 크기를 변화시키면서 출구에서의 입자빔의 크기(임계계적의 직경, d_b)를 관의 지름(D)으로 무차원화하여 나타내면 Fig. 4와 같다. Re 가 증가할수록, 그리고 입자가 커질수록 입자빔의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다.

두 종류의 오리피스에 대한 곡선군에서 각각 제일 위에 있는 곡선이 임계유선에 대한 것이며, Re 에 따른 임계유선의 변화가 유선수축효과를 나타내는 것이고, 각 입자크기에 대한 곡선과 임계유선과의 차이가 입자의 관성에 의한 집속효과를 나타낸다. $1.0 \mu m$ 이하의 크기의 입자에서는 관성에 의한 집속효과가 거의 없음을 알 수 있고, 또한 $10 \mu m$ 정도의 큰 입자의 경우에는 $Re > 1600$ 이면 오리피스 직경의 1/10 이하로 입자빔의 크기를 축소할 수 있음도 알 수 있다. 그러나 $d/D=1/5$ 인 큰 오리피스를 이용하면 집속효과의 절대치는 비슷하더라도 최종빔의 절대크기를 오리피스 직경의 1/4 이하로는 감소시킬 수 없으므로, 입자빔의 절대크기를 일정수준이하로 줄이려면 오리피스의 크기를 일정크기 이하로 하여야 함을 알 수 있다.

3.3 관성력에 의한 집속 효과 모델

층류 조건에서 대상입자크기의 경우에 집속을 방해하는 방향으로 작용하는 확산의 효과는 실제로 무시할 만하다. 따라서 입자의 관성에 의한 집속효과는 Fig. 3에서 각 입자크기에 해당하는 입자빔의 크기를 임계유선직경에서 뺀 것으로부터 구할 수 있다. 이렇게 구한 관성에 의한 집속 효과 Δd_i 를 관성의 지표인 스톡스 수(Stokes number : $St = \frac{\rho_p d_p^2 u C_c}{18\mu d}$)의 함수로 나타낸 것이 Fig. 5 이다.

오리피스가 정해졌을 때에는 유동속도와 입자 크기의 효과가 단 하나의 변수인 스톡스 수의 함수로 잘 묶이는 것을 알 수 있으며, 당연히 스톡스 수의 증가에 따라 관성에 의한 집속효과는 급격히 증가한다. Fig. 4의 곡선들의 형태를 보면 두 오리피스에 대한 곡선들이 닮았음을 알 수 있고, Re 와 입자크기가 같은 경우 절대치로 따지면 $d/D=1/10$ 인 작은 오리피스의 집속효과가 큰 것으로 나타나는데, 이 결과를 스톡스 수로 무차원화

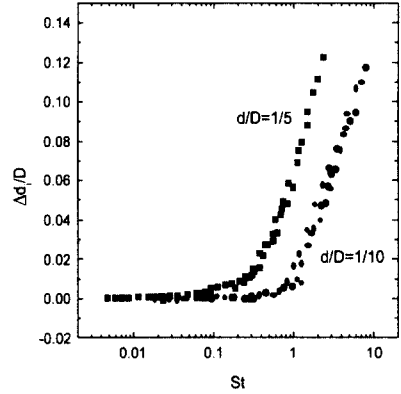


Fig. 5 Effect of inertia focusing vs. Stokes number for two different orifices

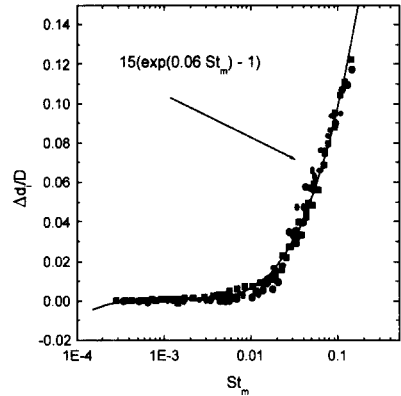


Fig. 6 Unified inertia focusing curve for the aerodynamic lens as a function of the modified Stokes number($St_m = St(d/D)^{5/3}$)

하면 절대적으로 같은 관성집속효과를 위해서는 $d/D=1/10$ 인 작은 오리피스에서 보다 큰 스톡스 수를 요구한다. 일견 모순인 것처럼 보이는 이 결과는 모든 무차원변수가 오리피스에서의 속도와 직경을 기준으로 한 것과 스톡스 수가 입자의 직경의 제곱에 비례하는 관계 때문에 생기는 것이다.

Fig. 5에서 나타난 $d/D=1/5, 1/10$ 의 두 그래프는 스톡스 수를 적절히 수정하면 하나의 그래프로 합쳐질 수 있다. 즉 가로축을 스톡스 수 대신에 $St(d/D)^{5/3}$ 에 대하여 표시하면 Fig. 5의 두 개의 그

래프는 Fig. 6에서 보이듯이 하나로 합쳐진다. 또한 이 그래프는 아래 식 (7)과 같이 근사 시킬 수 있다.

$$\Delta d_i/D = 15(\exp(0.06 St_m) - 1) \quad (7)$$

여기서, $St_m = St(d/D)^{5/3}$

식 (7)은 공기역학적 렌즈의 가장 일반적인 구조에 대하여 가장 주된 변수인 오리피스 크기 변화를 고려한 결과로서, 공기역학적 렌즈내의 유동과 입자궤적이 오리피스 크기에 따라 scaling 이 잘 되는 것임을 상기하면, 이 식은 기본구조가 유사하며 $d/D = 1/5 \sim 1/10$ 인 영역 안의 모든 상압 공기역학적 렌즈에 적용된다고 볼 수 있다. 이 식을 확인하기 위해 $d/D = 1.5/10$ 인 경우에 대하여 똑같은 계산을 수행 한 결과, 예상했던 대로 식 (7)과 잘 맞는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 6에서 보이듯이 보정된 스톡스 수가 10^2 이하에서는 관성력에 의한 영향이 거의 없으며, 따라서 이 범위에서는 입자집속이 오직 유체역학적 유선구조에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 영역에서 입자빔의 크기를 제어하려면 유동장 또는 유선분포를 제어하는 방법 밖에 없고, 보정스톡스 수가 10^2 보다 큰 범위에서는 관성력에 의한 효과가 나타나므로 오리피스를 통한 유동제어 이외에 부수적으로 입자 관성력에 의한 추가집속효과를 얻을 수 있다는 것을 보여 준다.

3.4 입자의 손실률

상압공기역학적 렌즈에서 오리피스에 의한 입자의 손실을 알아보기 위하여 다음과 같이 입자 손실계수 (η)를 정의하였다.

$$\eta = \frac{\text{오리피스면에 충돌한 입자의 양}}{\text{전체 관내로 유입된 입자의 양}} \quad (8)$$

입구에서 유입된 입자중 반경이 $D_{cr}/2$ 보다 밖에서 출발한 입자들은 오리피스면에 충돌하게 된다. 여기에서 $\eta = 0$ 은 관내의 입자가 하나도 오리피스에 충돌하지 않는 것을 의미하며, η 값이 클수록 많은 입자가 오리피스면에 충돌하여 없어

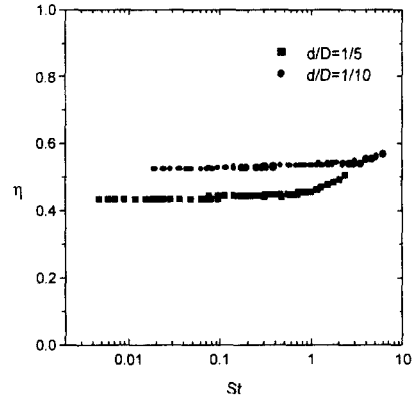


Fig. 7 Particle loss factor η vs. St

진다는 것을 의미한다. Fig. 7을 살펴보면 스톡스 수가 클수록, 오리피스 구멍의 크기가 작을수록 입자 손실이 크며, 대체로 50% 정도의 손실률을 보인다.

3.5 결과의 종합 검토

본 연구는 기존의 입자빔에 관한 연구와 여러 면에서 다르다. 우선 기존의 연구는 모두 다 저압하에서 입자빔의 생성과 그 거동에 대해서 다루었으며, 이는 진공 중에서 작동되는 반도체공정 등에서의 적용을 염두에 두고 있었기 때문이다. 즉, 일반적으로 관성이 약한 $1 \mu\text{m}$ 이하인 입자를 대상으로 관성효과를 발견하여 활용하는 것이고, 본 연구는 관성이 크다고 알려진 입자크기의 범위에 대해서 적용한 것이다.

진공상태에 대한 기존의 연구에서 해석은 주로 입자빔의 크기가 '0'이 되는 경우에 대해서 다루고 있으며,^(2,8) 스톡스 수 '1' 근처에서 거의 point focusing이 된다고 보고하고 있다. 본 연구의 결과에 의하면, 상압하에서도 적절한 크기의 오리피스를 사용하는 경우 입자빔의 직경이 관직경의 1/100 이하가 되도록 고도의 집속이 가능함을 보여주고 있으며, 특히 이러한 고도집속이 10 정도의 아주 큰 스톡스 수에서 얻어질 수 있다는 것이 입증되었다. 이러한 결과는 스톡스 수 '1' 근처에서만 point focusing이 된다는 기존의 연구 결과와는 큰 차이가 있으며, 이는 상압에서 유선의 평행도가 크게 증가하면서, 미끄럼 보정계수(C_c)의 감소에 의한 유동의 입자에 대한 항력이 증가

하기 때문이다. 본 연구에서의 미끄럼 보정계수 (C_s)값은 1~1.2 이다.

또한, 기존 연구는 입자의 손실률이 거의 0이 되는 것을 목표로 하고 있는 반면, 본 연구에서는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 50% 내외의 손실률을 보인다.

4. 결론

(1) 대기압 영역에서 작동하는 공기역학적 렌즈의 경우에도 관직경의 1/100정도 이하의 크기로 집속된 입자빔을 얻을 수 있다.

(2) 입자빔의 집속효과는 유선의 수축효과, 확산효과 그리고 입자관성에 의한 효과의 합으로 잘 구분될 수 있다.

(3) 입자관성에 의한 집속효과는 오리피스 크기와 스토크스 수의 함수로 나타낼 수 있으며, 각기 다른 크기의 오리피스에 대한 결과도 수정된 스토크스 수를 사용하여 하나의 통일된 관성집속곡선을 얻을 수 있다.

(4) 보정 스토크스 수가 10-2 보다 작을 경우에는 입자에 의한 관성력의 영향이 거의 없다.

(5) 상압 공기역학적 렌즈에서는 입자의 손실률이 50% 내외로 매우 높으며, 따라서 실제 응용면에서는 제약이 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학재단 특정기초연구사업(과제번호 98-0200-03-01-3)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

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., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence : I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 22, pp. 293~313.

(3) 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 Science and Technology*, Vol. 22, pp. 314~324.
 (4) Kinney, P. D., Bae, G. N., Pui, D. Y. H., and Liu, B. Y. H., 1996, "Particle Behavior in Vacuum Systems : Implications for In-Situ Particle Monitoring in Semiconductor Processing Equipment," *Journal of the Institute of Environmental Sciences*, Nov/Dec., pp. 40~45.
 (5) Bae, G. N., Kinney, P. D., Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1998, "Investigation of Aerosol Spatial Distributions Downstream of a Critical Orifice at Low Pressure," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 28., No. 6, pp. 479~488.
 (6) Schreiner, J., Voigt, C., Mauersberger, K., McMurry, P., and Ziemann, P., 1998, "Aerodynamic Lens System for Producing Particle Beams at Stratospheric Pressures," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 29, pp. 50~56.
 (7) 배귀남, 1999, "저압상태에서 공기역학적 렌즈를 이용한 입자 빔의 생성 및 크기 제어," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제10호, pp. 1320~1326.
 (8) 안진홍, 안강호, 1999, "임계 오리피스를 통과한 입자의 운동특성과 입자 빔에 관한 수치적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제10호, pp. 1240~1247.
 (9) Liu, P., Rao, N.P., Kittelson, D.B. and McMurry, P.H., 1996, "Optimizing the Detection Efficiency of a Low Pressure, In-Situ Particle Monitor Using Aerodynamic Focusing Lenses," *Annual technical meeting- Institute of Environmental Sciences*, Vol. 42, p. 217.
 (10) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons.
 (11) Riley, J. J., 1971, Ph.D. Thesis, The Johns Hopkins Univ. Baltimore, MD.
 (12) Clift R., Grace J. R. and Weber M. E. 1978, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, New York.