

임계 오리피스를 통과한 입자의 운동특성과 입자 빔에 관한 수치적 연구

안진홍*, 안강호**
(1998년 12월 7일 접수)

Numerical Study of Particle Motion and Particle Beam Formation Through a Critical Orifice

Jin-Hong Ahn and Kang-Ho Ahn

Key Words : Particle Motion(입자운동), Vacuum(진공), Critical Orifice(임계 오리피스), Particle Beam(입자 빔), Compressible Flow(압축성 유동), Stokes Number(스톡스 수)

Abstract

Particle motion through a disk type critical orifice placed in a 3.0cm diameter chamber has been studied numerically. In the simulation, the velocity field is solved using Pantankar's SIMPLER algorithm for the compressible flow and convergence of the computation is confirmed if the mass source at each control volume is smaller than 10^{-7} . The particle motion in the flow field is solved in Lagrangian method. The particle trajectories showed that the particles injected away from the center line are expanded rapidly. At lower pressures, this expansion phenomena are more dominant. At lower pressures, the clear difference in particle and air speed is showed all the way down to the exit plan. It was found that particles with Stokes number of ca.2.5 tend to focus close to the center line very well except the particles travelling near the wall. However, particles with Stokes number greater than ca.2.5 show a tendency to cross the center line.

기호설명

- C_c : Cunningham 미끄럼 보정 계수
- C_d : 구형 입자의 항력 계수
- D_p : 입자의 직경
- d_o : 오리피스 직경
- M : 마하 수
- m_p : 입자의 질량
- p : 압력
- p^* : 유효압력
- Q : 유량
- R_c : 챔버의 반경
- R : 기체 상수
- Re : 레이놀즈 수
- r : 반경방향 좌표

- z : 축방향 좌표
- Stk : 스톡스 수
- S : 분자 속도 비
- T : 온도
- v_f : 가스의 속도
- v_p : 입자의 속도
- v_r : 반경방향 속도
- v_z : 축방향 속도
- λ : 공기 분자의 평균자유행로
- μ : 공기의 점성 계수
- ν : 공기의 동점성 계수
- ρ : 밀도

하첨자

- f : 가스
- p : 입자
- stg : 정체(stagnation)
- c : 출구

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

- i : 입자의 주입위치
- o : 오리피스
- ∞ : 자유류

1. 서론

반도체 공정 및 클린 룸(clean room)내의 입자의 오염은 수율과 직접적인 관계가 있어 오염입자의 측정 및 제어는 매우 중요하며 고집적화에 따른 미세 입자의 측정 및 제어의 필요성은 더욱 증가 추세에 있다. 이러한 반도체 제조공정은 대부분 진공 상태에서 이루어지고 있어 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. Kinney⁽¹⁾ 등에 의해 대표적인 반도체 공정 조건(100sccm, 1torr)에서 진공 시스템을 구성하는 장비내 입자 거동을 파악하기 위한 실험이 수행되었고 Bae⁽²⁾ 등과 배귀남⁽³⁾은 임계 오리피스(critical orifice)하류의 저압 상태에서 입자의 공간적 분포 및 ISPM(In-Situ Particle Monitor)의 성능을 평가하였다. 또한 Liu 등^(4,5)은 공기역학적 렌즈를 이용하여 입자의 운동을 수치적 및 실험적으로 연구하여 스토크스 수에 따른 입자의 focusing 효과를 계산하였다. 그리고 Schreiner⁽⁶⁾는 다단의 공기역학적 Lens를 이용하여 입자의 빔(beam)을 형성하였고 이에 따른 투과 효율(transmission efficiency)을 구하였다.

본 연구의 모델은 진공 챔버(vacuum chamber) 입구에 임계 오리피스물 부착한 형태로서 진공 상태에서 입자의 운동특성 및 입자의 focusing 현상을 예측할 수 있는 매우 흥미로운 형상이다.

진공 상태에서 입자 운동의 주요 메카니즘으로 관성 충돌(inertial impaction), 대류 확산(convective diffusion), 중력 침강(sedimentation), 열영동(thermophoresis) 등이 있다. 주로 오리피스에서는 입자의 관성 효과가 지배적이고 오리피스 하류의 챔버 내에서는 대류 확산이 지배적인 요소이다.

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 유동장에 대한 보다 정확한 정보를 얻고자 하였다. 또한 입자의 존재와 운동이 유동장에 영향을 주지 않는다는 가정하에 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법(finite volume method)을 적용한 수치해석을 통하여 임계 오리피스를 통과한 진공 챔버 안에서 공간 좌표의 함수로 속도 · 압력 · 온도 · 밀도분포를 얻었으며 이 계산결과로 얻어진 유동

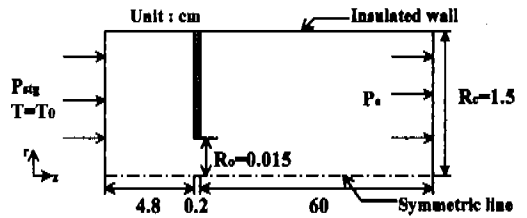


Fig. 1 Calculation domain.

장내에서 Lagrangian 방법으로 입자의 거동을 해석함으로써 입자의 운동특성에 관하여 연구하였다.

2. 수치 해석

2.1 프로그램 검증 및 유동 해석

유동장의 해석을 위하여 2차원 축 대칭 계산 영역을 선정하였으며 이를 Fig. 1에 도시하였다. 임계 오리피스물 통과한 후의 진공 챔버 내에서의 유동을 살펴보기 위해 챔버의 길이를 60cm, 챔버의 직경을 3.0cm로, 오리피스의 직경을 300μm로 선정하였다. 유동은 2차원 정상 축 대칭 압축성 유동으로 가정하였으며 유동장 전 영역에서 등엔트로피 유동(isentropic flow)으로 가정하였다. 유동에 대한 지배 방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식으로 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식 :

$$v_z \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + v_r \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial r} = - \frac{\partial p^*}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] \tag{2a}$$

$$v_z \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial z} + v_r \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} = - \frac{\partial p^*}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} \right] \tag{2b}$$

$$p^* = p - \frac{\mu}{3} \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} \right] \quad (2c)$$

여기서, p^* 는 유효 압력(effective pressure)이다. 또한 압축성 효과는 유체의 압력과 밀도사이의 등엔트로피 관계식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{\gamma RT} \quad (3a)$$

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3b)$$

$$\bar{h} = c_p T + \frac{1}{2}(v_x^2 + v_r^2) \quad (3c)$$

$$p_{sig} = p_1 [1 + (\gamma - 1) M_1^2 / 2]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3d)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial p} = -\gamma RT / \gamma p_{sig} v_{x1} [1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2]^{\frac{1 - 2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3e)$$

경계 조건으로 입구에서는 온도와 정체 압력(stagnation pressure)을 주었으며, 속도는 내부 유동으로부터 보정된다. 챔버의 상부면은 단열벽 조건을, 하부면은 경계면에 수직인 방향의 속도는 0, 주 유동 방향속도에 대하여 대칭 조건을 적용하였다. 또한 오리피스 표면은 점착 조건(no-slip)을, 출구에서는 압력 조건을 적용하였다. 압축성 유동의 이론에 의하면 오리피스의 하류부근의 압력이 상류의 압력의 0.528배 이하라면 유동은 choking이 일어난다. 이러한 유동 조건에서 계산된 체적 유량은 식 (4)로부터 계산하여 1.33 l/min 으로 확인하였다.

$$Q = \frac{\pi}{4} d_o^2 \left(\frac{2\gamma RT}{\gamma + 1} \right)^{0.5} \quad (4)$$

본 연구에서는 계산영역의 경계면이 좌표면과 일치하도록 일반 곡선 좌표계(generalized curvilinear coordinates)에 기초한 경계 밀착 좌표계(body fitted coordinates)를 사용하였다. 축 대칭 좌표계 z, r로 표현된 식 (2a)와 (2b)의 보존 방정식을 경계 밀착 좌표계 ξ, η 로 변환하였으며, 유한체적법에 기초하여 지배 방정식을 이산화 하였다. 이 때, 운동량 방정식의 종속 변수로는 공변 속도(covariant velocity)를 사용하였다. 속도장과 압력장의 결합은 Patankar가 제시한 SIMPLER 알

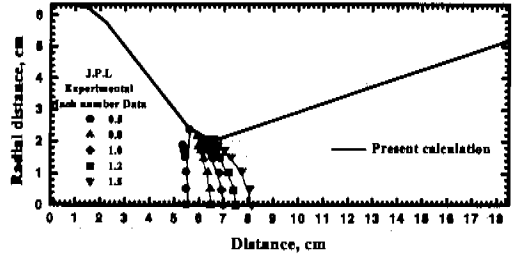


Fig. 2 Constant Mach number in a 45° to 15° conical nozzle.

고리듬(7)을 사용하였다. 대류항에 대한 도식은 1차원 대류-확산 문제의 엄밀해와 근사하도록 기술된 멱승 도식(power-law scheme)을 사용하였다. 수치 계산의 수렴 판정은 압력 수정 시 발생하는 질량 생성(mass source)항을 이용하였으며, 모든 제어체적에서 질량 생성 항이 10^{-7} 이하임을 확인하였다.

유동장 해석의 타당성 검토를 위하여 Serra(8) 등이 제시한 45° - 15° 원추형 노즐을 사용하여 마하 수 분포를 계산하였다. 본 모델 역시 2차원 축대칭 계산영역이며 격자 선정은 종속 변수들의 변화가 큰 것으로 예견되는 노즐 목 부근에 격자를 집중시켜 160x40의 제어 체적을 갖는 비균일 격자를 선정하였다.

Fig. 2는 마하 contour를 비교한 것이다. 예측된 마하 수 분포는 J.P.L. (Jet Propulsion Laboratory)에서 실험한 결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 유동장 해석을 위한 프로그램은 타당한 것으로 판단된다.

2.2 입자 궤적 해석

본 연구에서 입자 궤적의 해석을 위한 가정은 다음과 같다. 입자는 구형이며, 브라운 운동은 무시하였다. 입자간의 충돌이나 입자에 의한 유동장의 영향은 없다고 가정하였으며, 중력은 고려하지 않았다. 따라서 입자에 작용하는 외력은 유체와의 상대 속도에 의한 점성 항력(viscous drag force)이다. 이에 대한 지배방정식은 다음 식 (5)와 같이 주어진다.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho_f (\vec{v}_f - \vec{v}_p) |\vec{v}_f - \vec{v}_p| \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (5)$$

여기서, m_p 는 입자의 질량이고 D_p 는 입자의 직경이다. C_d 는 주위 유체와 입자의 상대속도에 의한 구형 입자의 항력계수이며, 입자의 마하 수와 입자의 레이놀즈 수를 고려한 유동조건에 대한 다음 식과 같이 주어지는 Henderson⁽⁹⁾에 의해 제안된 식을 사용하였다.

초음속 조건 ($M_p > 1.75$)

$$C_d = \left(0.9 + \frac{0.34}{M_\infty^2} + 1.86(M_\infty/Re_\infty)^{1/2} \left[2 + \frac{2}{S_\infty^2} + \frac{1.058}{S_\infty} (T_p/T)^{1/2} - \frac{1}{S_\infty^4} \right] \right) / \{ 1 + 1.86(M_\infty/Re_\infty)^{1/2} \} \quad (6a)$$

초음속 조건 ($1.0 \leq M_p \leq 1.75$)

$$C_d(M_\infty, Re_\infty) = C_d(1.0, Re_p) + \frac{4}{3}(M_\infty - 1.0) \times [C_d(1.75, Re_\infty) - C_d(1.0, Re_p)] \quad (6b)$$

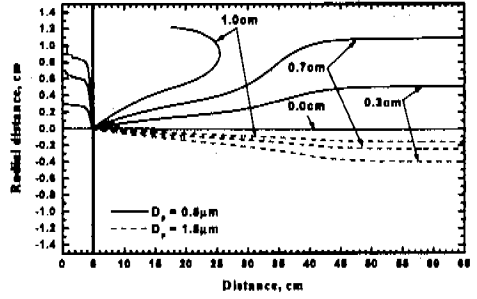
아음속 조건 ($M_p < 1.0$)

$$C_d = 24 \left[Re_p + S \left\{ 4.33 + \left(\frac{3.65 - 1.53 T_p/T}{1 + 0.353 T_p/T} \right) \times \exp \left(-0.247 \frac{Re_p}{S} \right) \right\} \right]^{-1} + \exp \left(-\frac{0.5 M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) \left[\frac{4.5 + 0.38(0.03 Re_p + 0.48 \sqrt{Re_p})}{1 + 0.03 Re_p + 0.48 \sqrt{Re_p}} + 0.1 M_p^2 + 0.2 M_p^3 \right] + \left[1 - \exp \left(-\frac{M_p}{Re_p} \right) \right] 0.6 S \quad (6c)$$

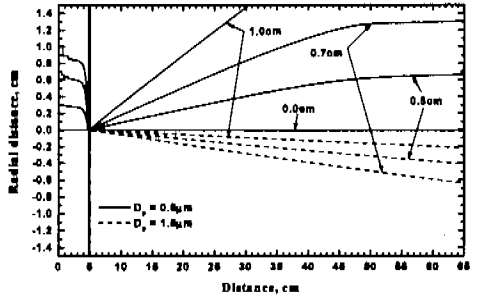
여기서, Re_p 는 국소 입자 레이놀즈수(local particle Reynolds number)로서 다음과 같다.

$$Re_p = \frac{\rho D_p |\vec{v}_f - \vec{v}_p|}{\mu} \quad (7)$$

여기서 점성계수(μ)와 같은 대기압 근처의 온도의 함수로서 기체의 절대 점성계수를 구하여



(a) $P_{stg} = 1 \times 10^5$ Pa, $P_o = 200$ Pa



(b) $P_{stg} = 1 \times 10^5$ Pa, $P_o = 20$ Pa

Fig. 3 Particle trajectories injected at different locations.

선형 보간식을 만들었으며, 결과는 식 (8)과 같다.

$$\mu(T) = 3.493 \times 10^{-5} + 4.9 \times 10^{-7} T \quad (8)$$

M_p 는 국소 입자 마하수(local particle Mach number)로서 다음과 같으며,

$$M_p = \frac{|\vec{v}_f - \vec{v}_p|}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (9)$$

S 는 분자 속도비로서 다음과 같이 정의된다.

$$S = M_p \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \quad (10)$$

그리고 T_p 는 입자가 동온이라고 가정 될 때 입자의 온도이며, T 는 가스의 온도이다.

식 (6b)에서 $C_d(1.0, Re_p)$ 는 식 (6c)를 사용하여 계산된 값이며, $C_d(1.75, Re_\infty)$ 는 M_∞ 가 1.75일 경우 식 (6a)를 이용하여 계산한 값이다. 또한 식

(6a)와 식 (6b)에서의 하첨자 ∞ 는 자유류 조건에서의 값을 나타낸다.

지배방정식 (5)는 시간에 대한 상미분 방정식으로 입자의 초기 위치와 초기 속도가 주어지면 시간에 따른 입자의 궤적을 Lagrangian 방법으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 입자의 주입 위치로 오리피스 입구로부터 상류방향으로 4.8cm인 지점을 선정하였으며, 입자의 주입 속도는 주입 위치에서의 유동 속도와 같다고 하였다. 지배방정식의 해석을 위해 초기치 문제 해석에 가장 일반적으로 사용되는 4계 Runge-Kutta 법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자의 궤적 해석

Fig. 3(a), (b)는 챔버 상류의 압력이 1기압일 때 챔버 하류의 압력이 각각 200Pa과 20Pa일 경우 입자의 주입 위치에 따른 궤적을 보여주고 있다. Fig. 3(a), (b)를 보면 입자의 직경이 0.5 μ m일 경우 입자의 주입 위치에 상관없이 축을 통과하지 않음을 볼 수 있으며, 입자의 초기 위치가 축으로부터 멀어질수록 입자는 오리피스를 통과한 직후 빨리 팽창되어짐을 알 수 있다. 또한出口的 압력이 낮아질수록 이러한 입자의 팽창현상은 더욱 더 두드러지게 나타난다. 그리고 입자의 직경이 1.5 μ m인 경우 입자의 관성력에 의해 중심축을 지나 챔버 하류로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 입자가 임계 오리피스를 통과할 경우 급격한 압력 감소로 인한 속도의 증가로 유선에서 이탈하게 되는데, 하류의 압력이 낮을수록 입자에 작용하는 유체저항이 작아져 자유비행(free flight)거리가 증가하는 것을 볼 수 있다.

3.2 입자의 운동 시간

Fig. 4는 챔버 상류의 압력이 1×10^5 Pa이고 챔버 하류의 압력이 20 Pa일 때 직경 1.0 μ m의 입자를 inlet plane에서 챔버의 반경 방향으로 위치를 바꿔 주입하였을 경우 오리피스를 통과한 후의 입자가 챔버의 하류까지 도달하는데 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 입자의 초기 위치에 상관없이 오리피스 출구로부터 약 20cm까지는 유사한 운동 시간을 나타내고 있으나 그 이후에는 입자의 초기 위치와 관련 하여 뚜렷한 뚜렷한 차이 불 보이

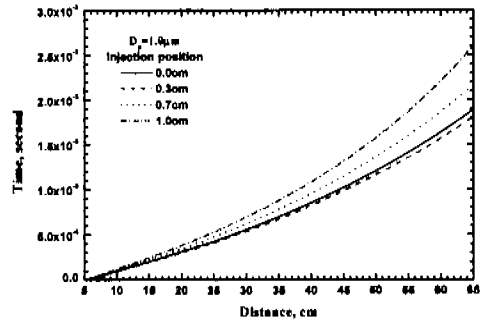


Fig. 4 Elapsed time from the exit plane of the orifice for different r-direction release points.

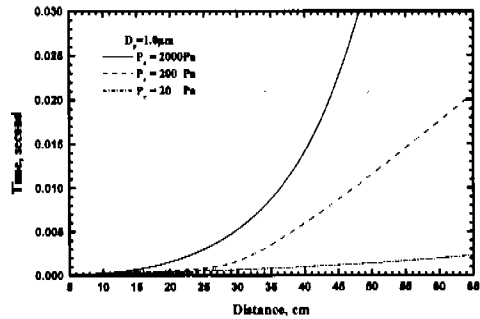


Fig. 5 Time of flight from the exit plane of the orifice for different down stream pressures.

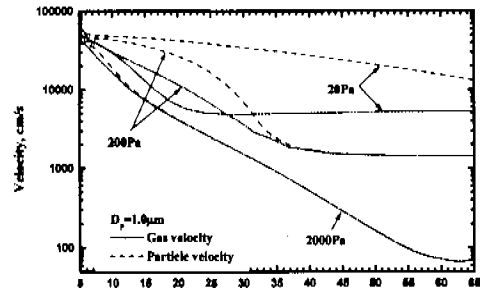


Fig. 6 Gas and particle velocity exiting from the orifice when a particle is injected at the center line for different downstream pressures.

고 있다. 즉, 입자의 주입 위치가 축으로부터 멀어질수록 입자의 운동시간이 오래 걸리는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 챔버의 중심 축에서 유체의 속도가 가장 빠르고 축으로부터 멀어질수록 유체의 속도가 감소되기 때문인 것으로 판단

된다. Fig. 5는 직경 1.0 μm 입자의 주입 위치가 중심 축에 있고, 챔버 상류의 압력이 1×10^5 Pa 이고 챔버 하류의 압력이 다를 경우 입자의 운동시간을 나타낸 것이다. 챔버 하류의 압력이 2000 Pa인 경우를 제외하면 오리피스 출구로부터 약 20cm까지 유사한 속도로 움직이나, 그 이후에는 압력이 높을수록 입자의 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 이는 입자의 속도를 보여주는 Fig. 6에서 명확히 볼 수 있다.

3.3 입자와 주위 유체와의 속도 비교

Fig. 6은 직경이 1.0 μm 의 입자가 챔버의 중심을 따라 유입되었을 때 오리피스 출구에서 유체와 입자의 속도변화를 나타낸 것이다. 챔버의 압력이 2000Pa일 때 입자와 유체사이의 속도는 오리피스 출구로부터 약 10cm까지 약간의 차이를 보이고 있으며, 200Pa인 경우는 약 40cm까지 속도의 차이가 크게 나타나고 있다. 챔버의 압력이 더 내려가 20Pa일 때에는 입자의 속도가 주위 유체에 비해 매우 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 오리피스 출구로부터 약 1cm 부분에서 충격파의 발생으로 유체 속도의 변화가 급격히 일어나고 있는 것을 볼 수 있다.

3.4 Stokes 수에 따른 입자의 운동 특성

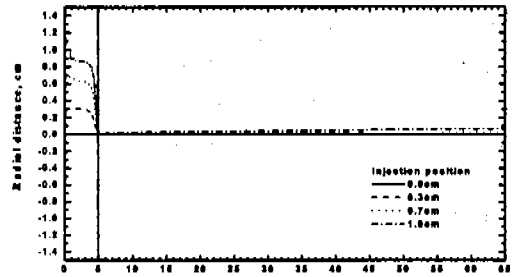
Stokes 수는 오리피스의 직경에 대한 입자의 정지거리(stopping distance)의 비로 다음의 식 (11)과 같이 정의되며 입자의 관성에 관한 특성을 나타낸다.

$$Stk = \frac{\rho_p D_p^2 C_c}{18 \mu} \cdot \frac{\bar{U}_0}{d_0} \quad (11)$$

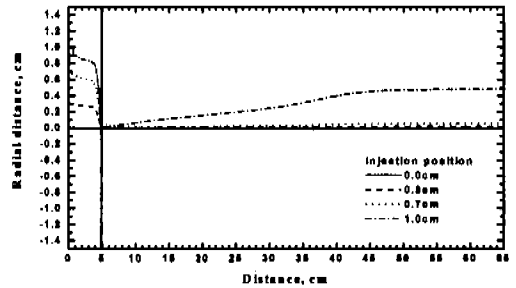
여기서, \bar{U}_0 는 오리피스 입구에서의 평균속도를 나타내며 ρ_p 는 입자의 밀도, d_0 는 오리피스의 직경을 나타낸다. 또한 C_c 는 미끄럼 보정계수(Cunningham slip correction factor)로서, 본 연구에서는 Davis⁽¹⁰⁾가 제시한 다음 식을 사용하였다.

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-1.1 \frac{D_p}{2\lambda}\right) \right] \quad (12)$$

여기서, λ 는 공기 분자의 평균 자유 행로(mean free path)로서 다음의 식을 사용하였다.



(a) $P_{\text{sig}} = 1 \times 10^5$ Pa, $P_c = 2000$ Pa



(b) $P_{\text{sig}} = 1 \times 10^5$ Pa, $P_c = 200$ Pa

Fig. 7 Particle trajectories with Stokes number 2.5.

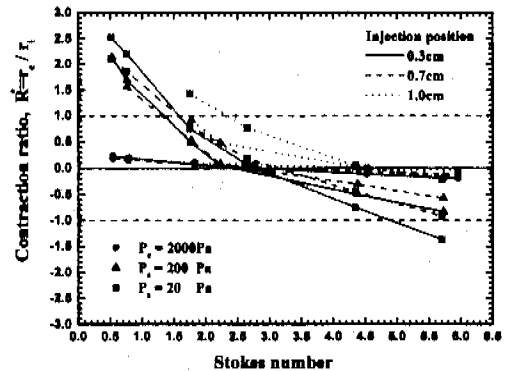


Fig. 8 Particle contraction ratio as a function of Stokes number.

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \quad (13)$$

여기서, 하첨자 0는 기준 값(reference value)이다.

Fig. 7은 챔버 상류의 압력이 대기압이고 챔버 하류의 압력이 각각 2000Pa, 200Pa일 때 스토크스 수가 약 2.5인 경우에 대한 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 입자의 초기 위치가 1.0cm인 경우를 제외하면 입자의 초

기 주입위치에 상관없이 입자가 모두 축 근처로 집중되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 오리피스 상류의 압력이 1기압이고 오리피스 하류측 압력이 변할 경우 입자의 contraction 비율 나타낸 것이다. Contraction 비의 정의는 입자의 주입 위치에 대한 챔버 하류에서의 입자의 출구위치의 비로써 다음 식 (14)와 같다.

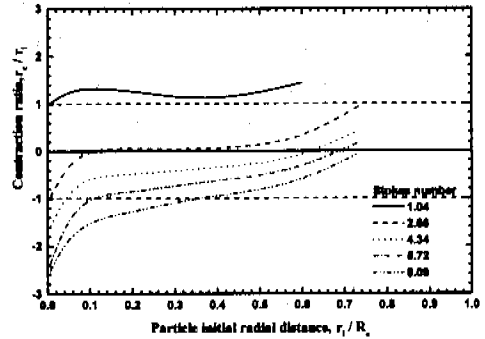
$$R^* = r_e / r_i \quad (14)$$

그림에서 입자의 Stokes 수가 약 2.5인 경우 축에 집중되어지는 경향을 볼 수 있으며, Stokes 수가 약 3이상에서는 축을 가로지르는 경향을 나타냈는데, 이는 입자의 강한 관성효과에 의한 것이다. 그러나 챔버내의 압력이 2000Pa인 경우 입자의 초기위치 및 Stokes 수에 상관없이 축의 근처에 집중되어지는 경향을 볼 수 있었다.

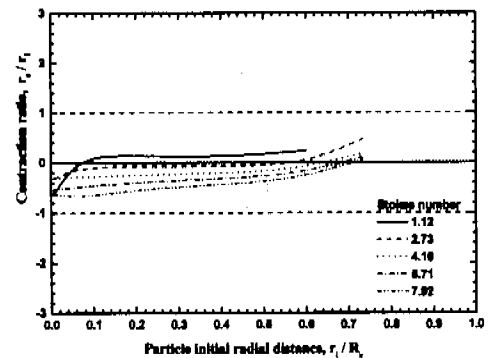
Fig. 9는 챔버 상류의 압력 변화와 입자의 주입 위치에 대한 contraction비의 영향을 보기 위한 것으로 r_i/R 는 챔버반경에 대한 입자의 주입 위치를 무차원화한 것이다. Fig. 9(a)는 오리피스 상류의 압력이 10^5 Pa, 하류의 압력이 200Pa인 경우이며, Fig. 9(b)는 오리피스 상류의 압력이 10^4 Pa, 하류의 압력이 200Pa인 경우로 입자의 주입 위치가 벽에 가까워질수록 contraction 비가 증가되는 경향을 나타내고 있다. 이것은 입자의 주입 위치가 벽에 가까워질수록 유동의 속도는 경계층 효과에 의하여 감소되고 이로 인하여 입자가 충분히 가속되지 못하게된다. 이들 입자는 오리피스를 통과할 때 중심 축 부근까지 투과하지 못하게 되어 contraction 비가 증가하는 것으로 보이나 그 효과는 그리 크지 않았다. 또한 Stokes 수는 압력과 입자 크기 등의 함수이므로, 챔버 압력을 고정시키고 오리피스의 상류의 압력을 대기압 이하의 조건으로 낮추게 되면 일정한 크기의 입자에 대해서 Stokes 수는 증가하게 된다. 따라서 입자의 contraction 비도 변하게 된다.

4. 결론

수치 해석 방법을 이용, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 해석하여 얻은 유동장을 바탕으로 입자의 운동을 Lagrangian 방법으로 해석함으로써 입



(a) $P_{sg} = 1 \times 10^5$ Pa, $P_e = 200$ Pa



(b) $P_{sg} = 1 \times 10^4$ Pa, $P_e = 200$ Pa

Fig. 9 Particle contraction ratio as a function of particle initial radial distance.

게 오리피스를 통과한 후의 입자의 운동특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 오리피스를 통과한 후의 입자의 자유운동 영역은 챔버 하류의 압력이 낮을수록 더 길어졌다.
- (2) Stokes 수가 약 2.5일 때, 입자가 벽 근처에서 유입된 경우를 제외하면 오리피스 통과 후 챔버의 중심 축에 집중되어지는 경향을 나타내었다.
- (3) Stokes 수가 약 2.5이상일 경우 입자는 챔버의 중심 축을 가로지르는 경향을 나타내었다.
- (4) 오리피스의 상류 측 압력이 낮은 경우 입자 빔 형성이 더 잘 되는 것을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 창의적연구진흥사업(나노입자제어기술연구단)에 의해 지원받아 수행된 결과임.

참고문헌

- (1) Kinney, P.D., Bae, G.N., Pui, D.Y.H., and Liu, B.Y.H., 1996, "Particle Behavior in Vacuum Systems," *Journal of the Institute of Environmental Science*, Nov./Dec., pp. 40~45.
- (2) 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.
- (3) 배귀남, 1998, "저압상태에서 공기역학적 펜즈를 이용한 In-Situ Particle Monitor의 성능특성 실험," 대한기계학회 추계학술대회논문집 B, pp. 894~899
- (4) Liu, P., Ziemann, Paul J., Kittelson, David B. and McMurry, Peter 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.
- (5) Liu, Peng, Ziemann, J., Kittelson, David B., and McMurry, Peter 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.
- (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) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill
- (8) Serra, Raymond A., 1972, "Determination of Internal Gas Flows by a Transient Numerical Technique," *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 5. pp. 603~611.
- (9) Henderson, Charles B., 1976, "Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows," *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 6. pp. 707~708.
- (10) Reist, Parker C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, 2nd Ed., McGraw-Hill