

## 관에서의 입자농도분포 제어에 관한 수치적 연구

이 민 영,<sup>1</sup> 유 주 식<sup>\*2</sup>

## A NUMERICAL STUDY ON THE CONTROL OF PARTICLE CONCENTRATION DISTRIBUTION IN A PIPE

Min-Young Yi<sup>1</sup> and Joo-Sik Yoo<sup>\*2</sup>

The control of particle concentration distribution in a pipe with an orifice and a sheath air is numerically investigated. When using Eulerian approach, there is no great change in the concentration distribution by the shape of orifice and molecular diffusivity. As the Reynolds number becomes small, the effect of orifice on the concentration distribution is decreased. For small Reynolds number, the concentration distribution can be effectively controlled by using a sheath air. The effect of the sheath air on the concentration distribution is increased, as the Reynolds number becomes small.

**Key Words :** 입자(Particle), 농도분포(Concentration Distribution), 오일러방법(Eulerian Method), 공기역학적 렌즈(Aerodynamic Lens), 입자 빔(Particle Beam)

## 기 호 설 명

$C$  : 입자의 concentration number  
 $C_c$  : Cunningham 미끄럼 계수  
 $D_{mol}$  : molecular diffusivity  
 $d_p$  : 입자의 지름  
 $D$  : 관의 직경  
 $d$  : 오리피스의 직경  
 $k$  : 볼츠만 상수  
 $P$  : 압력  
 $P_{atm}$  : 대기압  
 $Re$  : 레이놀즈 수( $= \frac{\rho U_c D}{\mu}$ )  
 $T$  : 온도  
 $t$  : 시간

$U_c$  : 특성 속도(관 입구에서 평균유속)  
 $\vec{V}$  : 유체의 속도  
 $V_s$  : sheath air 의 주입속도  
 $v_x$  : 축 방향의 유체 속도 성분  
 $v_r$  : 반경 방향의 유체 속도 성분  
 $\Delta r$  : 수축(contraction) 범위

## Greek

$\lambda$  : 공기의 평균자유행로(mean free path)  
 $\mu$  : 점성계수  
 $\rho$  : 밀도

## 1. 서 론

유동 중에 포함된 입자의 분포를 제어하는 연구는 대개 일정 크기 이상의 입자를 제거하거나 일정 농도의 입자 빔을 만들기 위한 연구가 주로 되어 왔다. 그 중에서 입자 빔의 생성에 관해서는 주로 반도체 공정과 관련하여 많은 연구가 되어 왔다. Murphy and Sears[1]는 모세관을 통해서 주입된 에어로졸이 노즐을 통과하여 진공 속으로 들어가면서

접수일: 2009년 9월 8일, 수정일: 2009년 11월 17일,  
 게재확정일: 2009년 11월 20일.

1 정회원, 포항산업과학연구원 CO2연구단

2 종신회원, 안동대학교 기계교육과

\* Corresponding author, E-mail: jsyoo@andong.ac.kr

입자 빔을 생성시키는 방법을 제시하였다. 이것은 입자 빔을 생성시키는 표준기법으로 사용되고 있는데, 이 방법을 개선하기 위하여 sheath air라고 하는 일종의 2차 유동을 이용하는 방법이 있다. 이것은 에어로졸 주위에 별도의 공기를 주입시켜서 에어로졸을 중심축 부근으로 모으거나, 중앙과 벽면에 순수한 공기를 주입시켜서 에어로졸을 가운데로 모이게 하는 방법이다(Dahneke 등[2]). 한편 Liu 등[3,4]은 aerodynamic lens라는 일종의 오리피스를 관 내에 설치하여 인위적으로 유동을 국한시키는 방법을 제시하였다.

입자농도분포 제어에 관한 초기의 연구들은 대부분 낮은 압력 하에서 입자 빔을 생성시키는 것에 관심을 두었다. 이 등[5]은 입자의 집속현상을 유체의 수축에 의한 효과와 입자의 관성에 의한 효과 그리고 입자의 확산에 의한 효과로 나누어서 상압 하에서 공기역학적 렌즈가 작동할 수 있음을 수치해석을 통하여 보였고, Lee 등[6]은 실험을 통해서 실제로 상압 공기역학적 렌즈가 작동함을 수치해석과 실험으로 증명하였다. 최근에는 초미세 나노 입자의 집속에 관한 연구가 관심을 받고 있다[7-9]. 본 연구에서는 상압 하에서 2차원적인 관 유동을 대상으로 하여, 오리피스를 설치하거나 별도의 2차 유동을 도입할 때 농도 분포가 어떻게 변화하는가를 조사한다.

## 2. 해 석

입자가 포함된 시스템의 해석에는, 입자의 관성력이 중요한 경우에는 Lagrangian 방법을 사용하고[5], 입자의 관성력이 중요하지 않은 경우에는 Eulerian 방법을 사용하는 것이 일반적이다. 입자의 직경이  $O(0.1)\sim O(1)\mu\text{m}$ 에서는 관성력과 확산이 둘 다 중요하게 되는데, Lagrangian 방법은 Eulerian 방법에 비해서 수치해석에 드는 비용이 큰 단점이 있다.

### 2.1. 해석모델의 형상

Fig. 1에서 본 연구에서 사용한 시스템을 나타내었다. 2차원 축대칭 형상이며, 관의 직경(D)을 기준으로, 전체 시스템의 길이는 15D, 오리피스까지는 7D이다. 계산에서 사용된 관의 반지름,  $D/2 = 0.5\text{cm}$ 이고 오리피스의 두께는 0.1cm이며,  $d/D = 0.1, 0.2, 0.5$ 의 세 가지 경우에 대해 살펴본다.

### 2.2. 오리피스와 sheath air

본 연구에서 고려하고 있는 오리피스의 형태는 Fig. 2와 같고, sheath air는 Fig. 3과 같이 유동장에 분사된다. sheath air는 Fig. 2와 같이 오리피스의 바로 뒤에서  $V_s$ 의 속도로 주입된다. sheath air가 나오는 틈새의 폭은 관 반경의 1/5이다.

### 2.3 지배방정식 및 수치적 방법

입자유동을 해석하는 데에는 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법이 있는데 여기에서는 Eulerian 방법을 사용한다. Eulerian 방법에서의 입자 농도에 대한 지배 방정식은 다음과 같은 연속 방정식, 운동 방정식, 확산 방정식으로 기술된다.

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) C = D_{mol} \nabla^2 C \tag{3}$$

본 연구에서 고려하는 유동은 수평으로 놓여진 끝은 파이프 내의 흐름이며 유동에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{.inlet} : \begin{matrix} v_x = \\ v_r = 0 \end{matrix} \text{Poiseuille flow} \tag{4}$$

$$\text{.outlet} : P = P_{atm}, \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = 0 \tag{5}$$

$$\text{.wall} : \text{no slip condition} \tag{6}$$

경계조건 (4-6)하에서 유한체적법을 사용하는 패키지 CFX-Flow3D를 사용하여 식 (1,2)의 해를 구한다. 계산에 사용된 격자는 불균일 격자를 사용하였으며, 격자수는 계산결과가 더 이상 격자수에 따라 변하지 않는 조건에서 결정하였으며, 최종적으로  $106 \times 20$ 의 격자를 선택하였다. 수렴조건은 질량 생성항이  $10^{-7}$ 이하로 되면 수렴하였다고 판단하였다. Re수는 1~500사이, 관 입구에서의 유동속도를 기준으로 하면  $U_c < 0.8\text{m/s}$  로 층류영역에 속한다.

유동장이 구해졌으면 속도장을 식 (3)에 대입하여 농도 분포를 구한다. 농도에 대한 경계조건은 다음과 같다. 이 때, 벽면에서 입자의 경계조건은 no penetration조건을 사용하였는데,  $C=0$ 인 조건을 사용하여도 같은 결과를 얻었다.

$$\text{.inlet} : C = \text{constant} = 1 \tag{7}$$

$$\text{.wall} : \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \tag{8}$$

이상에서  $C$ 는 입자의 concentration number이며,  $D_{mol}$ 은 입자의 크기에 의해서 결정되는 molecular diffusivity이다. 층류에서의  $D_{mol}$ 은 다음과 같은 Stokes-Einstein 식으로 표현된다.

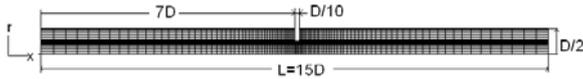


Fig. 1 Main grid of the system

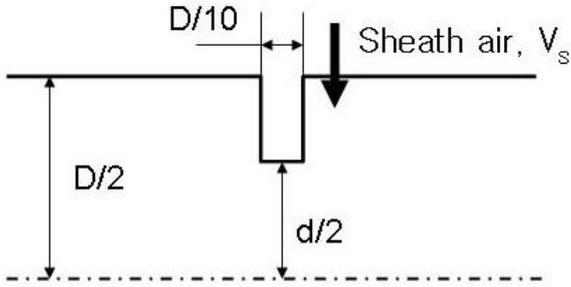


Fig. 2 Definition of tube radius(D/2), orifice opening size(d/2) and injection position of the sheath air

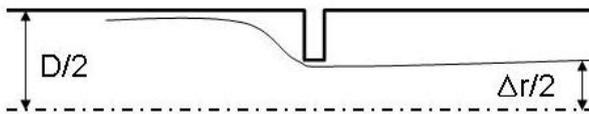


Fig. 3 Contraction ratio,  $\Delta r/D$

$$D_{mol} = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (9)$$

여기에서  $C_c$ 는 Cunningham 미끄럼 계수로 다음과 같이 표현된다(Hinds[5]).

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} [2.541 + 0.8\exp(-0.55 \frac{d_p}{\lambda})] \quad (10)$$

농도분포에 미치는 오리피스의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3와 같이 수축비(contraction ratio= $\Delta r/D$ )를 정의한다. 여기에서  $\Delta y$ 는 농도가 큰 부분과 작은 부분으로 나누는 기준이 된다. 입구에서 농도조건을  $C=1$ 로 주었기 때문에, 오리피스 통과 후, 중심에서  $\Delta r$ 까지는 1에 가까운 값을 지니며,  $\Delta r$ 을 지나면 급격하게 '0'이 된다. 계산결과  $\Delta r$ 의 값을 정확하게 구분할 수 있다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 오리피스의 영향

본 연구에서 나타나는 두 개의 주요 변수는 입자의 직경

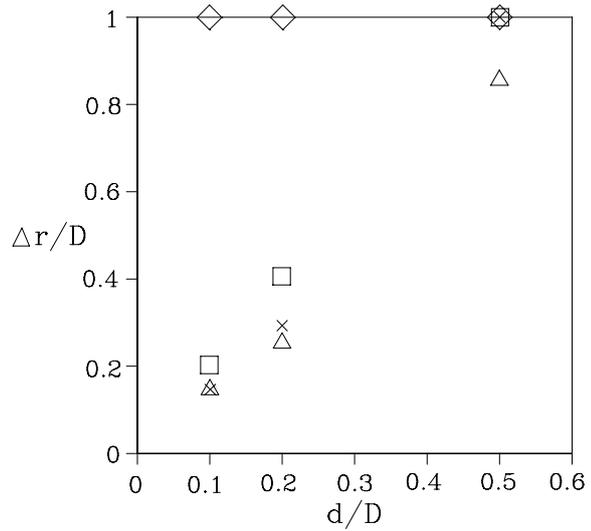


Fig. 4 Contraction ratio vs.  $d/D$  without sheath air for several Reynolds numbers:  $Re=1.0(\diamond)$ ,  $10(\square)$ ,  $100(\times)$ ,  $500(\triangle)$

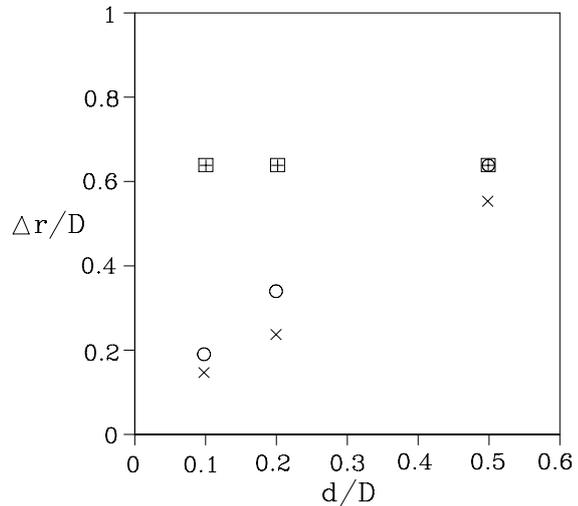


Fig. 5 Contraction ratio vs.  $d/D$  with sheath air for several Reynolds numbers:  $Re=1.0(\square)$ ,  $10(+)$ ,  $100(\circ)$ ,  $500(\times)$ .

과 레이놀즈수이다. 여기에서는, 직경  $0.01\mu m$ ,  $0.1\mu m$ ,  $1.0\mu m$ 의 입자와 레이놀즈 수  $Re=1, 10, 100, 500$ 의 유동에 대해 조사하였다. 계산에 사용된 관의 길이는  $L=15cm$ 이다. 레이놀즈 수가 100보다 큰 경우에 있어서는 오리피스의 설치와 농도 분포에 영향을 미치며, 작은 레이놀즈 수( $Re=1, 10$ )에서는 그 영향이 매우 적게 나타났다. 또 입자의 크기는 레이놀즈 수가 작고 오리피스를 통과한

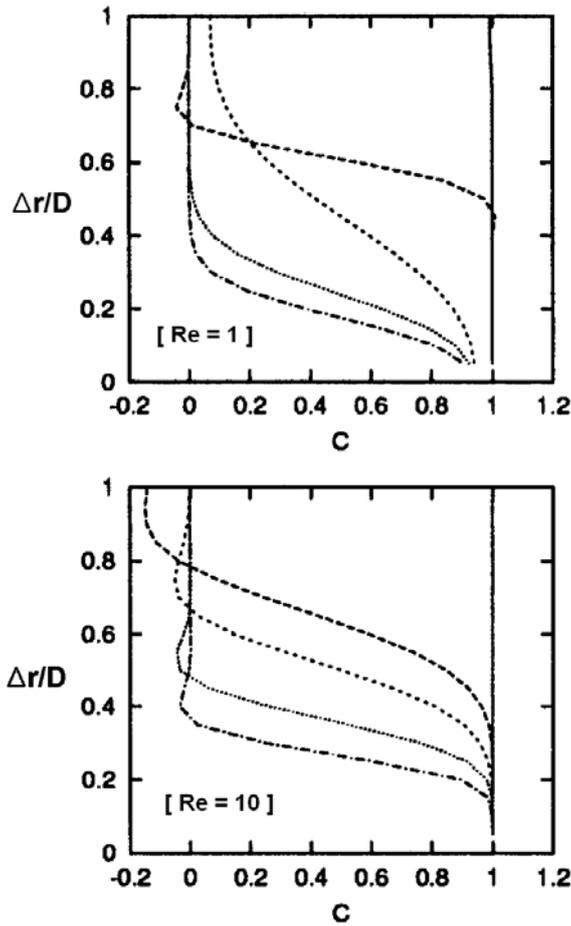


Fig. 6 Effects of the sheath air when the injection velocity is higher than the mean inlet velocity with  $d/D=0.2$  and  $Re=1, 10$ : (1) no sheath air; (2)  $V_s = U_c$ ; (3)  $V_s = 2U_c$ ; (4)  $V_s = 5U_c$ .

바로 직후에 농도 분포에 영향을 미친다. 그러나 출구에서는 입자의 크기에 따른 농도 분포의 차이가 거의 없었다.

오리피스에 영향을 보기 위하여  $Re = 1, 10, 100, 500$ 에서의 수축비를 구하여 Fig. 4에 도시하였다. 여기에서는 입구에서 균일하게 주입된 입자의 농도 분포가 오리피스가 존재하는 경우 어떻게 변화하는가가 관심사이므로 출구에서의 값만 비교하였다.  $d/D=0.5$ 인 경우에는 레이놀즈 수가 500 이상일 때,  $d/D=0.2, 0.1$ 인 경우에는 레이놀즈 수가 10 이상이면 오리피스에 의해 농도 분포가 영향을 받는다. 그러나 레이놀즈 수가 작은 경우에는 수축비가 1에 가깝게 된다. 즉, 유동이 오리피스를 통과한 후 원상태로 회복을 하여서 오리피스에 의한 영향이 거의 없다. 그리고, 같은  $d/D$ 에서는 레이놀즈 수가 클수록 더 많이 수축된다. 결과에서 제시

된 것은 직경  $0.1\mu m$  입자에 대한 것인데  $0.01\mu m, 1.0\mu m$  입자들도 거의 같은 결과를 나타내었다.

### 3.2 Sheath air의 영향

sheath air의 영향을 종합적으로 보기 위하여 직경  $0.1\mu m$  입자에 대해  $Re = 1, 10, 100, 500$ 에서의 수축비를 구하여 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서  $Re = 1$ 과 10,  $d/D = 0.5$ 인 경우에는  $Re = 1, 10, 100$ 이 거의 일치한다. sheath air의 분사 속도( $V_s$ )는  $U_c$ 와 같다. 레이놀즈 수를 고정하는 경우, 오리피스의 구멍이 가장 클 때 sheath air의 영향이 가장 크게 나타난다. 한편 동일한 오리피스에서는, 레이놀즈 수가 작을수록 sheath air의 영향이 커진다. 이에 따라 오리피스의 구멍이 제일 작은 경우( $d/D=0.1$ )에서는 레이놀즈 수가 100을 넘으면 sheath air에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

끝으로 sheath air의 분사 속도가  $U_c$ 와 다른 경우에 대한 농도 분포를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 sheath air의 속도가  $U_c$ 의 2, 5, 10 배인 경우에 대한 것인데 sheath

air에 의한 영향이 커지는 경우의 농도 분포의 변화 양상을 보여준다. 여기에서는,  $Re = 1, 10$ 의 레이놀즈 수가 작은 영역에서도 sheath air의 속도를 높혀 주면 농도 분포를 많이 변화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. sheath air의 양을 증가시키면 농도 분포가 서서히 변화하는데,  $Re = 10$ 에서  $V_s = 10U_c$ 이면  $Re = 100$ 인 경우와 거의 비슷한 농도 분포를 얻게 된다.

## 4. 결 론

2차원적인 관 유동에서 오리피스와 sheath air가 입자의 농도 분포에 미치는 영향을 조사하였다. 주요 결과는 다음과 같다. 오리피스의 형상과 입자의 확산 계수는 농도 분포에 거의 영향을 미치지 않는다. 레이놀즈 수가 큰 경우에는 오리피스에 의해 농도 분포가 영향을 받는다. 그러나 레이놀즈 수가 작을 때에는 유동이 신속하게 원래의 형태로 돌아오므로 오리피스에 의해서 농도 분포를 변화시킬 수가 없다. 이 경우에 있어서는 sheath air를 사용하여 효과적으로 농도 분포를 변화시킬 수 있다. 그리고 sheath air의 영향은 레이놀즈 수가 작을수록 증대된다.

## 참고문헌

- [1] 1964, Murphy, W.K. and Sears, G.W., "Production of particulate beams," *J. Appl. Phys.*, Vol.35, pp.1986-1987.
- [2] 1982, Dahneke, B., Hoover, J. and Cheng, Y.S., "Similarity theory of aerosol beams," *J. Colloid and Interface*

- Science*," Vol.87, No.1, pp.167-179.
- [3] 1995, Liu, P., Ziemann, P.J., Kittelson, D.B. and McMurry, P.H., "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.
- [4] 1995, Liu, P., Ziemann, P.J., Kittelson, D.B. and McMurry, P.H., "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.
- [5] 2001, 이진원, 이민영, "상압 공기역학적 렌즈의 입자 관성집속 모델," *대한기계학회논문집 B권*, Vol.25(3), pp.315-321
- [6] 2003, Lee, J.W., Yi, M.Y. and Lee, S.M., "Inertial focusing of particles with an aerodynamic lens in the atmospheric pressure range," *J. Aerosol Science.*, Vol.34(2), pp.211-224.
- [7] 2005, Wang, X., Kruis, F.E. and McMurry, P.H., "Aerodynamic focusing of nanoparticles : I. Guidelines for designing aerodynamic lenses for nanoparticles," *Aerosol Science and technology*, Vol.39, pp.611-623.
- [8] 2006, Wang, X. and McMurry, P.H., "An experimental study of nanoparticle focusing with aerodynamic lenses," *Int. J. Mass Spectrometry* Vol.258, pp.30-36.
- [9] 2008, 이광승, 김송길, 이동근, "수축-발산형 공기역학렌즈를 이용한 초미세 나노 입자의 집속," *대한기계학회논문집 B권*, Vol.32(8), pp.589-596.
- [10] 1999, Hinds, W.C., *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons.