

노즐 형상 및 입경에 따른 난류 분류중의 미립자 유동 특성에 관한 연구

A study of particle motion for nozzle geometry and particle diameter in turbulent jet flow

김종철*, 황승식*, 전운학**
J. C. Kim, S. S. Hwang, U. H. Chun

ABSTRACT

This paper is a review of the results of examining the flow characteristics of gas and particles with regards to pipe-type nozzle and converging nozzles depending on nozzle geometry. The nozzles used in this experiment are the pipe-type nozzle which can sufficiently mix the gas and particles, and the converging nozzle which can rapidly accelerate fluid. The particles used at the time of this experiment each measured 0.8, 30, 60 and 80 μm in diameter. The Phase Doppler Particle Analyzer was used to measure the velocity of each particle, and the Hot-wire probe was used to measure the spectrum in order to analyze the flow near the nozzle exit of the 0.8 μm particle

주요기술용어 : flow characteristics(유동특성), nozzle geometry(노즐형상), particles(입자), Hot-Wire probe(열선프로브), Phase Doppler Particle Analyzer(위상도플러 입자 분석계)

Nomenclature

A, B, C : Type of nozzles
D : Nozzle diameter (mm)
 F_e : External force (N)
 S_t : Stokes number (τ_p / τ_f)

U_j : Air velocity at nozzle exit (m/s)
 U_m : Average velocity of axial direction (m/s)
 V_m : Average velocity of radial direction (m/s)
 ν_f : Kinematic viscosity of fluid (kg/m \cdot s)
 ρ_p : Density of particle (kg/m 3)
 ρ_f : Density of fluid (kg/m 3)
 τ_p : Aerodynamic response time ($\rho_p dp^2 /$

* 정회원, 국민대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 국민대학교 기계공학과

18 μ)

τ_f : Characteristic time (D / U_j)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 동향

기체와 고체의 혼상분류는 고체-기체 반응장치, 플라즈마 코팅, 정전도포 및 atomizer 등과 같은 공업장치와 오염물질을 포함한 제트류와 하천에 있어서 분류형 토사류등의 자연계에서 볼 수 있다.

이와 같은 공업장치에서의 성능 결정과 자연현상의 제어 및 이용에 있어서 혼상분류가 매우 중요하게 여겨지는 이유는 입자의 거동 및 입자와 기류의 상호간섭이 고체-기체 혼상분류에 존재하기 때문에 미립자의 유동 특성은 기기 전체의 성능을 좌우하는 중요한 인자로 알려져 왔다. 지금까지, 난류분류중의 미립자유동은 유체의 불규칙적인 변동에 의해 확산을 일으킨다는 관점으로 부터 연구가 이루어 졌다.

Ishima⁽¹⁾는 고체-액체 입자혼상류의 평균 속도 및 난류강도, 분산입자의 수밀도분포를 구하여 유체와 분산입자와의 상호간섭구조에 대한 검토를 하였다.

McLaughlin⁽²⁾은 입자운동해석을 위한 방법중 하나인 one-way coupling에 대한 문제점을 거론하였다. 또한, 이산와(離散渦)법을 이용하여 입자의 유동과 큰 난류척도를 갖는 vortex의 관계를 명확히 한 것도 있다⁽³⁾⁻⁽⁴⁾. D. Modarres⁽⁵⁾는 LDV를 사용하여 기체의 평균 속도, 난류강도 측정 및 측정 신호의 새로운 판별방법을 개발하였다.

그러나, 이들 연구중 대부분은 노즐의 형상에 따른 입자유동현상에 대해서는 고려하지 않았다. 즉, 단일노즐을 이용하여 입자와 vortex의 관계에 대하여 중점을 두고 있는 연구라고 할 수 있다. 수치해석의 경우에는 관내유체속도 및 입자의 농도분포가 일정하며, 입자의 분류속도는 유체속도와 같다는 가정을 적용한 것이 많다. 또

한, 분류노즐로서 충분히 긴 파이프를 이용한 원관난류를 분출시키고 있으나, 형상이 다른 분류노즐에 대한 입자와 기체유동에 대한 연구가 거의 없는 바 노즐형상 및 크기에 따른 연구가 필요한 실정으로 본 논문은 입자크기와 노즐형상이 입자 유동 특성에 미치는 영향에 이어 실험한 논문으로 노즐의 출구형상에 따른 기체의 가속정도 및 기체유동에 대한 미립자의 동기성을 검토하기 위하여, 내경이 일정한 파이프형 노즐 및 출구에서 일정비로 좁아지는 2개의 서로 다른 축소형 노즐을 사용하여 입자크기에 따른 노즐출구 및 그 이후에서의 입자유동을 검토하기 위하여 분류중에 직경이 다른 미립자를 혼합시킨 혼상류를 이용하여 포텐셜 코어영역에서 노즐형상과 입자 유동과의 상호관계를 명확히 규명하기 위하여 노즐형상에 따라 발생하는 vortex의 규칙성 및 강도를 측정하였다. 또, 입자운동방정식을 사용하여 입자 크기 및 노즐 형상에 따른 속도분포를 이론적으로 구하여 실험치와 비교함으로써 실험의 타당성을 입증코자 하였다.

2. 이 론

2.1 공기역학적 응답시간

Hjelmfelt와 Mockros⁽⁷⁾의 해석에 의하면 정현파로 진동하는 유체중의 입자가 갖는 주파수를 다음 식으로 표현하고 있다.

$$f = \frac{0.14 \times 18 \times \nu_f \times \rho_f}{2 \times \pi \times \rho_p \times d_p^2} \quad (1)$$

여기서, ρ_p 는 입자의 밀도, ρ_f 는 유체의 밀도, ν_f 는 유체의 동점성계수, d_p 는 입자의 직경. 식(1)로부터 본 실험에 사용한 DOP (Diocetyl Phthalate; $C_6H_4(COOCH_2CH(C_2H_5)(CH_2)_3CH_3)_2$) 입자에 대하여 99%의 동기성을 계산하면, f 는 11k Hz가 되며 이것은 유체요소를 충분히 추적할 수 있는 값이다. 유체속도가 스텝형으로 변화할 때의 입자속도변화는 입자운동방정식으로부터 관성항과 항력항만을 고려하여 구해진다.

Table 1 Physical properties of particles

Material	$d_p[\mu\text{m}]$	$\rho_p[\text{kg}/\text{m}^3]$	$\tau_f[\text{sec}]$	$\tau_p[\text{sec}]$	St
DOP	0.8	983~993	5×10^{-4}	1.9×10^{-6}	0.004
Glass beads	30	2500	5×10^{-4}	6.8×10^{-6}	13.7
Glass beads	60	2500	5×10^{-4}	0.0256	51.2
Glass beads	100	2500	5×10^{-4}	0.0762	152.5

또한, 공기역학적 응답시간 즉, 공력응답시간을 τ_p 라 하면, τ_p 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\pi}{6} \times d_p^3 \times \rho_p \frac{d(u_p)}{dt} = 3\pi \times \rho_f \times \nu_f \times d_p (u_f - u_p) \quad (2)$$

$$\frac{d u_p}{d t} = 18 \times \rho_f \times \nu_f \times \frac{u_f - u_p}{\rho_p \times d_p^2} \quad (3)$$

식(3)을 $u_f = \text{const.}$ 의 조건에서 적분하면,

$$u_p(t) = (u_p(0) - u_f) \times e^{-at} + u_f \quad (4)$$

$$\tau_p = \frac{1}{a} = \rho_p \times \frac{d_p^2}{18 \times \rho_f \times \nu_f} \quad (5)$$

여기서 u_p 는 입자의 평균속도, u_f 는 유체의 평균속도,

식(5)로부터 본 연구에서 사용된 각 입자의 공력응답시간 및 물리적 특성은 Table 1과 같다. 여기서 τ_p 는 공력응답시간, τ_f 는 특성시간 (D/U_j), St 는 스토크스 수 (τ_p/τ_f)이다. 또한 τ_f 에서 D 는 노즐의 직경 ($D=100$ mm)이고, U_j 는 기체의 출구속도 ($U_j=20$ m/s)이다.

2.2 입자운동방정식

유체 중에 포함된 입자가 운동할 경우, 이 입

자에 작용하는 힘은 주로 항력과 외력이다. 이 힘들의 대소관계로부터 입자는 다양한 운동을 하게 된다. 항력은 입자와 유체 사이에서 발생하는 속도차에 의하여 입자가 유체로부터 받는 힘이며, 외력은 외부에서 입자에 가해진 힘으로 중력, 정전기력 및 원심력 등이 있다. Tchen⁽¹⁶⁾에 의하면 임의의 속도분포를 가진 유체 내에서 이동하는 입자의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d u_p}{d t} = 3\pi \mu d_p (u_f - u_p)$$

$$+ \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d u_f}{d t}$$

$$+ \frac{\pi}{12} \rho_f \left(\frac{d u_f}{d t} - \frac{d u_p}{d t} \right) +$$

$$\frac{3}{2} d_p^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu} \int_{t_0}^t \frac{(d u_f/dt - d u_p/dt)}{\sqrt{t-t'}} d t'$$

$$+ Fe \quad (6)$$

여기서, d_p 는 입자의 직경, ρ_p 는 입자의 밀도, u_p 는 입자의 속도, u_f 는 유체의 속도, ρ_f 는 유체의 밀도, t 는 노즐에서 분출된 입자의 처음 속도, t' 는 입자의 나중 속도, Fe 는 외력이다.

그리고, 이 식의 적용조건은 다음과 같다.

- (1) 미립자는 구형이며, 입자밀도는 기체밀도와 비교해서 충분히 작다.
- (2) 미립자의 농도는 희박하기 때문에 미립자의

존재로 인한 기체에 대한 영향은 무시할 정도로 작다.

(3) 난류는 일정한 정상류이며, 그 영역은 무한히 계속된다.

(4) 미립자에 작용하는 외력은 중력등이다.

본 계산에서는 식(6)의 각 항을 위의 적조건에 의해 평가한 후 미소항은 생략하고 관성항, 항력항 및 중력항 만을 고려하여 입자 운동식을 다음 식 (7)과 같이 정리하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d u_p}{dt} \\ &= C_D \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho_f |u_f - u_p| (u_f - u_p) \\ &+ \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g \end{aligned} \quad (7)$$

S_t 에 기인하는 입자운동방정식에서 사용한 S_t 의 항력항은 레이놀즈수에 미치는 영향이 매우 적으므로, 항력방정식은 식(8)로 주어진다.

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{Re_p^3} \quad (0.5 \leq Re_p \leq 1000) \\ Re_p &= \frac{|u_f - u_p| d_p}{\nu} \end{aligned} \quad (8)$$

입자유동을 나타내는 식(7)에 식(8)을 대입하여 정리하면 식(9)와 같이 된다.

$$\frac{d u_p}{dt} = a (u_f - u_p) + g \quad (9)$$

여기서 a 는 $a = u_f \rho_p d_p^2 / 18 \mu d$ 이다.

식(9)를 적분하고, $t = i \Delta t$, $u_p(t) = u_{pi}$, $x_p(t) = x_i$ 로 하여 이산화식(discretization equation)에 의해 전개하면 아래 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} u_{pi+1} &= \left(u_{pi} - u_{fi} - \frac{g}{a} + \frac{u_{fi}}{a} \right) e^{-a \Delta t} \\ &+ u_{fi} + \frac{g}{a} - \frac{u_{fi}}{a} + u_{fi} \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

$$x_{i+1} = x_i$$

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{a} \left(u_{pi} - u_{fi} - \frac{g}{a} + \frac{u_{fi}}{a} \right) (e^{-a \Delta t} - 1) \\ & + \left(u_{fi} + \frac{g}{a} - \frac{u_{fi}}{a} \Delta t \right) + \frac{1}{2} u_{fi} \Delta t^2 \end{aligned} \quad (11)$$

식(10), (11)에서, $u_{fi} = f(x_i)$ 는 x_i 에서 유체의 근사 속도이며, 기체에 대한 실험보간값은 다음과 같은 식에 의해 구하였다.

$$\begin{aligned} u_p &= u_{pi} + \frac{x - x_{pi}}{x_{p2} - x_{p1}} (u_{p2} - u_{p1}) \\ &= u_{p1} \frac{x_{p2} - x}{x_{p2} - x_{p1}} + u_{p2} \frac{x - x_{p1}}{x_{p2} - x_{p1}} \end{aligned} \quad (12)$$

본 연구에서는 노즐입구에서의 공기의 속도 (U_j)는 노즐 형상에 상관없이 20m/s로 일정하게 유지하였고, 시간미소증분 $\Delta t = 10 \mu s$ 로 하였을 때 위의 식으로부터 계산한 수치해석 결과와 실험값을 비교하여 4장의 Fig. 15에 나타내었다.

3. 실험장치 및 실험방법

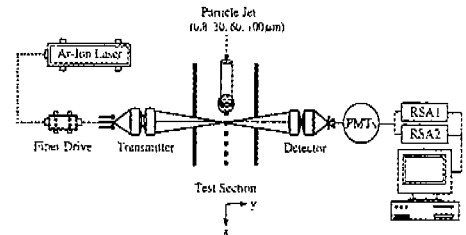


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험장치는 기체와 고체의 혼상분류를 분출하여 실험이 이루어지는 테스트 섹션, 혼상류에 미립자를 공급하기 위한 미립자공급장치, 기체의 유동 상태를 측정하기 위한 스펙트럼 장치 및 유속과 난류강도를 측정하기 위한 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer, Aerometrics사) 장치로 구성되어 있다. 측정에는 2파장 4빔모드 전방산란형 PDPA를 사

용하였다. 레이저의 광원은, 파장 514.5nm, 488nm, 빔 직경 1.4nm, 출력 4W의 알콘-이온 레이저로 주어졌다.

평균속도 및 난류강도의 평균에는 미립자가 측정체적(초점)을 통과할 때만 데이터가 얻어지는 단순한 산술평균은 고속의 미립자만이 데이터로서 얻어질 우려가 있으므로 이를 보정하기 위하여 미립자의 절대속도와 체류시간을 고려한 식 (13)⁽⁹⁾을 사용하였다. 이때 측정수 및 측정시간은 각각 5,000개, 3분이다.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} u_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{N_i} \Delta t_i} \quad (13)$$

본 실험에서 사용한 분류 노즐은 파이프형 노즐 1종류와 축소형 노즐 2종류이며, Fig. 2는 분류 노즐의 개략도이다.

본 연구에서 사용한 미립자는 평균 입자 지름이 0.8 μ m인 DOP와 평균 입자 지름이 30, 60 및 100 μ m인 3종류의 유리입자를 사용하였다. Fig. 3은 스펙트럼의 측정을 위한 장치의 구성도를 나타낸 것으로 정온도형 열선유속계는 유속에 대한 열선과 유체와의 열전달 변화를 계속하여 유속을 측정한다.

본 실험에 앞선 예비실험으로 노즐에서 분출

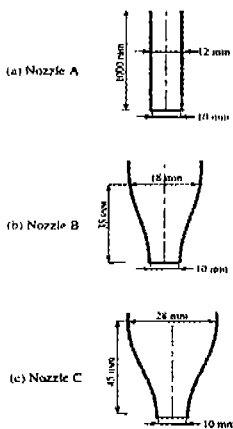


Fig. 2 Geometry of nozzles (A, B, C)

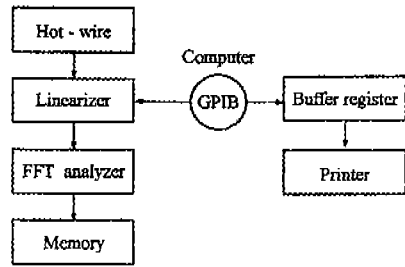


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

된 기체만의 속도분포 상태를 측정하기 위하여 노즐에 공급되는 공기 유량과 노즐에서 분출된 후의 공기 속도를 측정하였다. 오리피스를 이용하여 공기유량을 측정하였으며 피토히관을 이용하여 노즐에서 분출된 공기 속도를 측정하였고 본 실험에서는 PDDPA장치를 이용하여 $U_j=20$ m/s, $Re=13,200$ 인 조건에서 분류방향에 대하여 평행한 수직하향의 속도성분을 u , u 에 대한 반경방향의 속도성분을 v 라 정의하고 유속을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 순간속도파형

노즐형상에 따른 기체의 유동현상을 알아보기 위해서 동기성이 우수한 0.8 μ m DOP 미립자를 각 노즐에 대해 전영역에 걸쳐 측정하여 얻은 순간속도 파형 Data는 거의 유사한 경향을 보이고 있으나, 그중 $x/D=3$ 에서 각 노즐에 대한 값이 가장 분석하기 좋게 뚜렷하게 나타났으므로 모든 결과는 $x/D=3$ 에서의 결과를 나타내었다. 0.8 μ m DOP의 각 노즐에 대한 출구측 부근에서 순간속도파형의 반경방향 변화를 나타낸 것으로 Fig. 4는 노즐A, 노즐B, 노즐C에 대한 결과이다. 노즐A는 $y/D=0$ 에서 $y/D=1$ 로 커질수록 안정한 파형을 보이며, 노즐B와 C는 $y/D=0.5$ 에서 정현파적인 파형의 변동을 보이는데, 이는 조직적인 난류구조의 존재를 나타내는 것으로 노즐B보다는 노즐C가 더 큰 반경방향 속도 변화가 존재하는 것을 예측할 수 있다

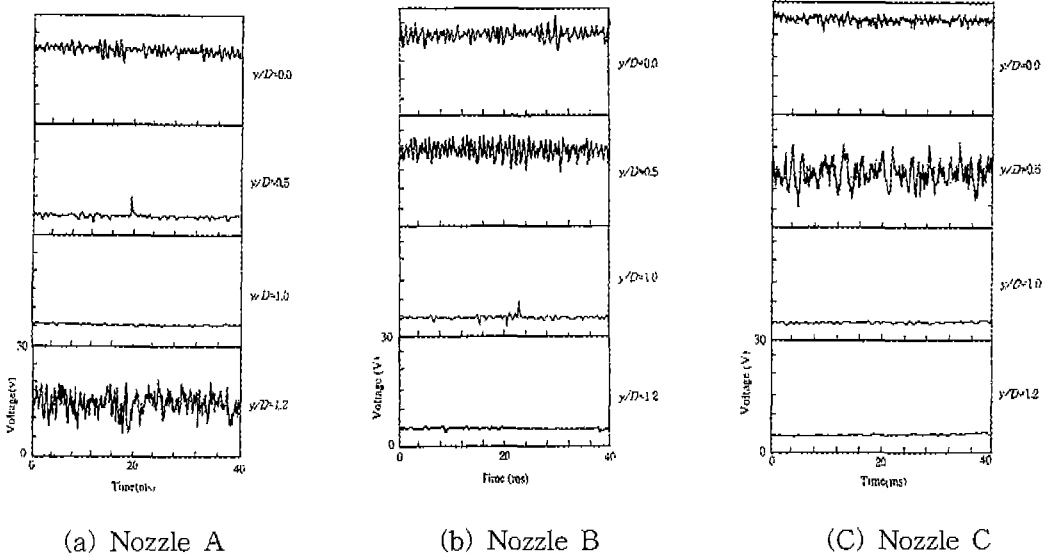


Fig. 4 Instantaneous velocity wave in the radial direction at $x/D=3$

4.2 노즐의 스펙트럼 변화

Fig. 5는 각 노즐A, B 및 C에 대한 속도스펙트럼의 반경방향변화를 나타낸 것이다. $x/D=3$ 에서 노즐의 스펙트럼 변화에 대한 결과로 노즐A의 경우 $y/D=0$ 에서부터 $y/D=0.75$ 까지는 변화의 폭이 작고 $y/D=1.0$ 보다 클수록 변화의 폭은 조금 더 크게 나타났다. 축소형 노즐B와 C에서는 분류축부근($y/D=0\sim 0.25$)에서 스펙트럼의 최

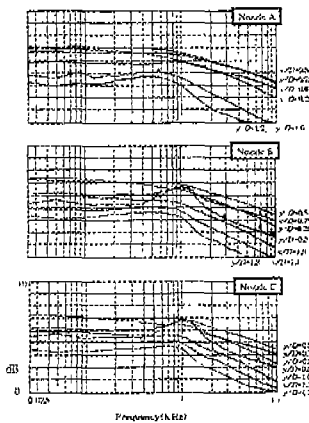


Fig. 5 Velocity power spectrum in the radial direction (A, B, C)

대치가 나타나는데 축소비가 큰 노즐C에서 스펙트럼 최대치가 더 큰 것은 대규모 vortex로부터의 영향이 나타나고 있음을 나타내며, 노즐A보다 노즐C가 큰 것은 vortex의 규칙성이 강하다는 것을 의미한다.

4.3 노즐출구에서의 속도빈도 분포

Fig. 6은 노즐형상A, B 및 C와 측정위치 $x/D=0.1$ 에서 입자크기를 0.8, 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 로 변화시킬 경우 입자의 축방향속도에 대한 확률빈도 분포를 나타내고 있다. 각 입자에 대한 속도분포폭을 비교하면 노즐B와 C에서 매우 좁게 나타났지만, 노즐A의 경우는 노즐B, C에 비하여 넓게 나타난다. 파이프형 노즐의 경우 미립자직경이 클수록 속도분포폭이 넓어지면서 속도는 약간 감소하였다. 축소형 노즐의 경우 축소비가 큰 경우인 노즐C가 입자의 크기에 따라 속도의 변화가 크게 나타났다. 노즐형상에 관계없이 미립자직경이 커질수록 분출속도가 작아진다. 이것은 입자와 관 벽 사이의 마찰과 입자의 공력응답 시간 차이에 의한 영향이라고 볼 수 있다. Fig. 7은 노즐형상 A, B 및 C와 측정위치 $x/D=0.1$ 에서 입자크기를 0.8, 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 로 변화시킬 경우

입자의 반경방향속도에 대한 확률 빈도 분포를 나타내고 있다. 축방향의 경우와는 다르게 반경 방향에서는 노즐A, B 및 C에서 약간의 차이는 있으나 전반적으로 미립자직경이 커질수록 속도 분포 폭이 일정하게 증가한다.

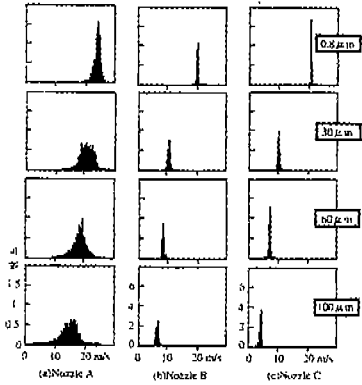


Fig. 6 Particle velocity histogram in the axial direction of nozzle($x/D=0.1$)

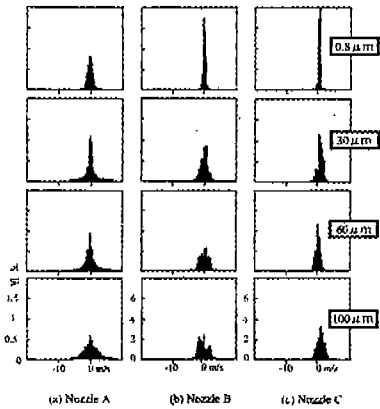


Fig. 7 Particle velocity histogram in the radial direction of nozzle($x/D=0.1$)

Fig. 8은 측정위치 $x/D=5$ 에서의 입자의 축방향속도에 대한 확률빈도 분포를 나타

내고 있다. 노즐A는 미립자직경이 커짐에 따라 약간의 속도 감소가 있으나 그 속도분포 폭은 전체적으로 넓으며, 노즐B, C는 미립자직경

이 커질수록 노즐형상과 관계없이 속도분포폭이 좁아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 측정위치 $x/D=5$ 에서의 입자의 반경방향속도에 대한 확률빈도 분포를 나타내고 있다. $0.8\mu\text{m}$ 의 경우는 노즐형상에 상관없이 속도분포폭이 넓게 나타났고, 그 밖의 입자에서는 노즐형상에 상관없이 속도분포폭이 좁게 나타나고 있다.

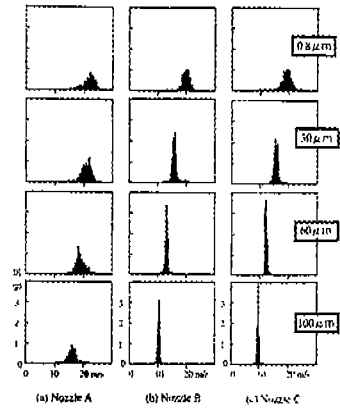


Fig. 8 Particle velocity histogram in the axial direction of nozzle($x/D=5$)

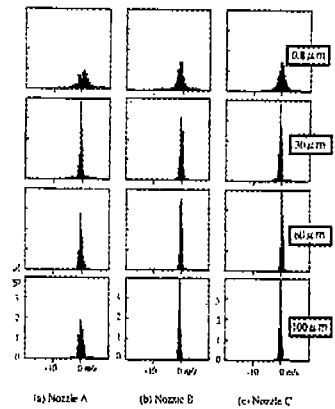


Fig. 9 Particle velocity histogram in the radial direction of nozzle($x/D=5$)

Fig. 6과 Fig. 8을 비교하면 노즐A는 입자의 직경 변화에 따른 속도분포의 변화가 없고, 노즐 B, C에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자는 속도분포폭이 증가하였으며, $30, 60$ 및 $100\mu\text{m}$ 입자 순으로 속도 감소가 크게 일어나고 있다. 이것은 노즐A로는 입자의 동기성을 파악하기 힘들며 노즐B, C에서 $0.8\mu\text{m}$ 는 동기성이 양호하여 vortex에 혼입되었으며, 입자가 클수록 동기성이 떨어진다는 것을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 9를 비교하면 노즐의 종류와 상관없이 반경방향으로 노즐 중심에서 멀어질수록 입자의 직경이 $0.8\mu\text{m}$ 인 경우는 동기성이 양호하나, $30, 60$ 및 $100\mu\text{m}$ 입자의 경우는 동기성이 떨어진다는 것을 나타낸다.

4.4 노즐형상에 따른 입자의 유동

4.4.1 축방향 평균속도

Fig. 10의 (a)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $30\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. $0.8\mu\text{m}$ 입자의 경우 $x/D=0.1$ 에서 노즐형상에 따른 차이는 $30\mu\text{m}$ 입자의 경우에 비하

여 작음을 알 수 있다. 각 노즐에 의한 $0.8\mu\text{m}$ 입자 속도의 차이는 하류로 갈수록 점차 작아진다. 파이프형 노즐의 경우 $x/D \leq 5$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ 와 $30\mu\text{m}$ 의 중심부($y/D < 0.5$) 속도차는 축소형 노즐에 비하여 작게 나타난다. 중심부 이외($y/D > 0.5, x/D > 5$)에서는 각 노즐 형상과 함께 같은 속도 분포를 나타내기 때문에, 분류의 난류구조에는 노즐형상에 따른 큰 변화가 나타나지 않을 것을 알 수 있다. 또한, 이 영역은 노즐형상에 관계없이 규칙성을 갖는 vortex가 존재한다고 생각되어지는 부분이다.

분출시에는 일정한 속도분포를 가지고 있지만, 출구로부터 멀어짐에 따라 중심부($y/D < 0.5$)에서 속도가 거의 일정한 반면 주위부($y/D > 0.5$)에서는 저속부분이 넓어지고 있다. 입자속도는 5에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 같은 속도까지 가속되고 있으나, $x/D \geq 5$ 에서는 노즐형상에 관계없이 입자의 관성력 때문에 기체속도보다 입자속도가 커지고 있다.

결론적으로 $x/D \leq 3, 0 < y/D < 0.5$ 인 영역에서

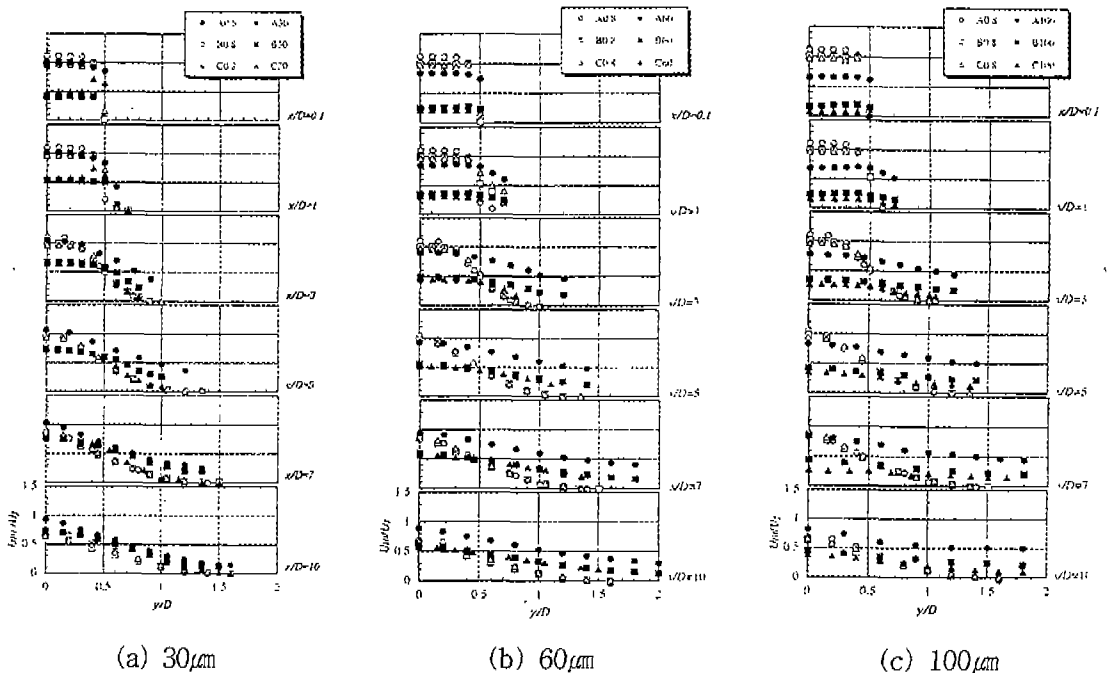


Fig. 10 Average velocity profiles in the axial direction

는 노즐A가 노즐B, C보다 속도분포면에서 좋고, $x/D \geq 5$ 일 때, 노즐에 따른 차이는 없고 y/D 가 증가할수록 속도감소가 거의 선형적으로 나타난다.

Fig. 10의 (b)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. $x/D=0.1$ 에서 입자속도는 일정한 분포를 나타내고 있고, $0.8\mu\text{m}$ 입자의 속도분포는 노즐형상에 거의 무관하나 $60\mu\text{m}$ 입자의 속도분포는 노즐A의 경우가 노즐B, C의 경우보다 크다. 전반적인 속도분포경향은 $30\mu\text{m}$ 의 경우와 동일하나 y/D 가 증가함에 따른 속도감소율이 적으며 노즐A와 노즐B, C간 속도차이가 있다. 따라서 노즐A는 넓은 범위에 걸쳐 양호한 속도분포를 갖는다.

Fig. 10의 (c)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $100\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. $x/D=0.1$ 에서 보면 $30\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 비하여, $0.8\mu\text{m}$ 입자 속도와 $100\mu\text{m}$ 입자속도의 차이가 크며, 이는 노즐형상에 따른 축방향

속도분포 차이가 미립자직경이 커질수록 증가함을 보여 준다. $x/D < 1$, $y/D < 0.5$ 에서는 노즐형상과 입자크기에 따라 고른 속도분포를 갖으며, $x/D > 1$, $y/D > 0.5$ 의 범위에서는 $100\mu\text{m}$ 입자의 속도분포는 노즐A의 경우가 노즐B, C의 경우보다 크게 나타났으며 노즐B와 C의 속도차이는 별로 없었다.

4.4.2 반경방향 평균속도

Fig. 11의 (a)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $30\mu\text{m}$ 입자에 대한 반경방향 평균속도분포를 나타낸 것이다.

노즐출구에서의 $0.8\mu\text{m}$ 속도분포는 노즐형상에 상관없이 동일한 속도분포를 나타내고 있다. 모든 영역에서 $30\mu\text{m}$ 입자의 속도가 $0.8\mu\text{m}$ 입자의 속도보다 크며, $x/D > 1$ 의 범위에서 $y/D=0$ 부터 $y/D=0.75$ 로 증가함에 따라 입자속도의 크기는 노즐형상에 관계없이 점차적으로 증가되며 $x/D > 7$, $y/D > 0.75$ 인 영역에서는 입자의 속도가 점차 감소된다.

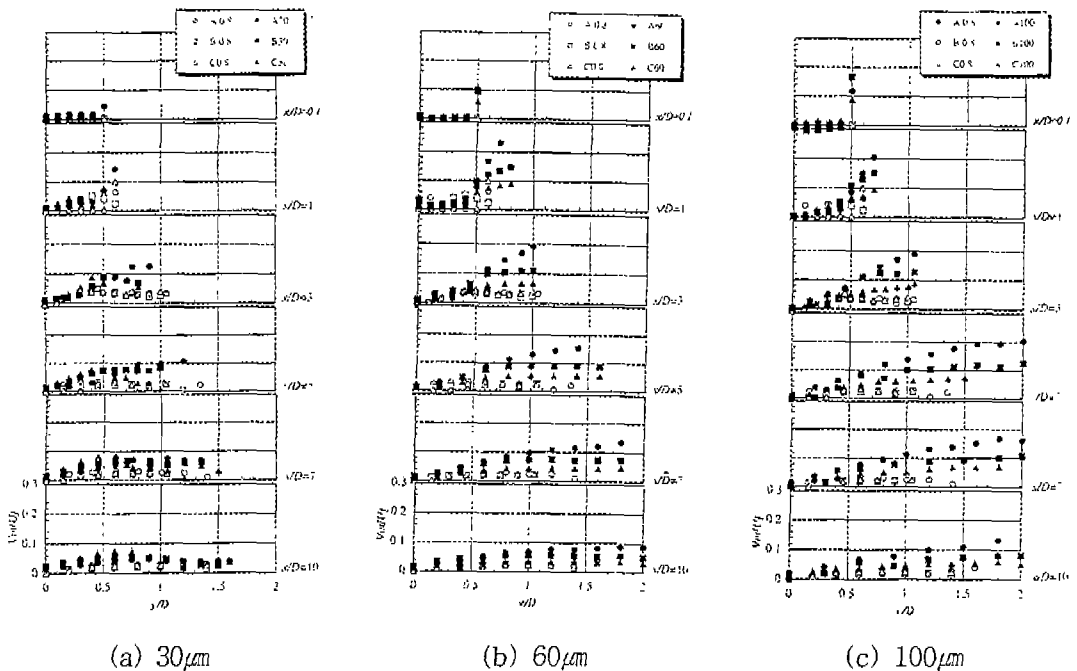


Fig. 11 Average velocity profiles in the radial direction

결과적으로 $3 < x/D < 7$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 노즐의 형상에 관계없이 일정한 속도분포를 갖고 있다.

Fig. 11의 (b)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 대한 반경방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. $30\mu\text{m}$ 입자의 경우와 비교하면, $x/D=3\sim 7$, $y/D > 0.5$ 에서는 노즐의 형상차이에 의한 속도 분포차이가 뚜렷이 나타나고, 입자의 속도 증가폭이 더 크다. 이것은 $60\mu\text{m}$ 입자가 갖는 운동량에 의하여 vortex에 대한 완전 혼입이 되지 않은 상태에서 바깥방향으로 이동하기 때문으로 생각된다. 따라서 $60\mu\text{m}$ 입자의 경우, 모든 측정 영역에서 노즐A의 속도분포가 크며, 노즐B, C에 대한 차이는 x/D 가 증가할수록 적어진다.

Fig. 11의 (c)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $100\mu\text{m}$ 입자에 대한 반경방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. $x/D > 1$ 및 $y/D > 0.5$ 에서의 속도 변화는 $60\mu\text{m}$ 입자와 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 x/D 가 증가함에 따라 각 노즐에 대한 입자의 속도 변동폭은 일정한 간격으로 감소함을 알 수 있다.

$x/D = 3\sim 10$, $y/D < 0.5$ 인 중심부에서의 기체와 입자속도는 거의 동일하다.

$x/D > 5$ 인 경우 노즐축소비 가작을수록 속도가 크며, 축방향 속도분포같은 경향을 보이고 있다.

4.4.3 축방향 난류강도

Fig. 12의 (a)는 각 노즐에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $30\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 난류강도분포를 나타낸다. 기체의 축방향 난류강도, 즉 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 축방향 난류강도를 살펴보면, x/D 에 상관없이 실험에 사용한 모든 노즐에서 난류강도는 $0 < y/D < 0.5$ 에서 증가하고 있으나, 난류강도는 $0 < y/D < 0.5$ 에서 증가하고 있으나, $y/D > 0.5$ 에서 감소하고 있다. 또한 $y/D=0$ 일 때 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 증가함을 알 수 있다. $30\mu\text{m}$ 입자의 경우 $y/D=0$ 일 때 축소형 노즐B, C는 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 조금씩 증가하지만 파이프형 노즐은 감소하며, 파이프형 노즐과 축소형 노즐의 난류강도의 차이가 분명하다. $0.1 < x/D < 1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 축소형 노즐B와 C는 기체에 동기하고 있으나 파이프형 노즐은 축소형 노즐에

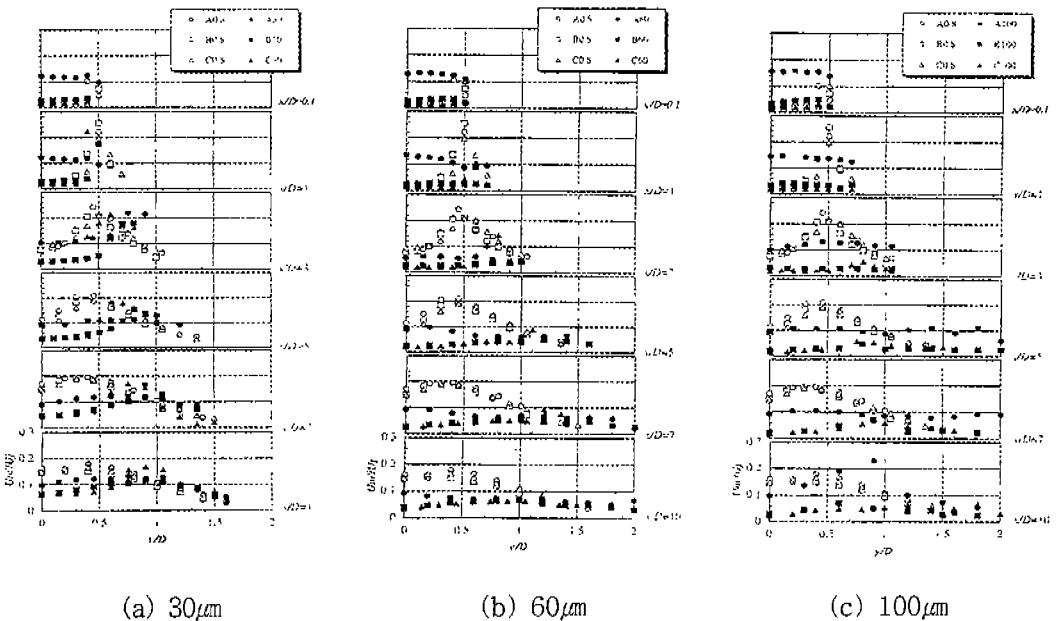


Fig. 12 Average turbulent intensity in the axial direction

비해 동기성이 떨어진다. 이것은 미립자와 원관 내벽 사이에서 마찰이나 미립자의 충돌에 의해서 생긴 미립자간의 속도차에 의해 나타난 것이라고 생각된다. 분출후에 분류층의 미립자의 속도가 균일화되면서 노즐의 형상과 상관없이 공통적으로 나타나는 현상은 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서부터 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 역전하는 현상이 나타나기 시작하여 $x/D \geq 3$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 난류강도가 역전되는 것과 $x/D \geq 7$, $y/D > 1$ 에서 입자는 기체에 동기한다는 것이다. 역전현상에서 파이프형 노즐과 축소형 노즐B는 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 일치하는 지점중에 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 가장 큰 난류 강도값을 가지며, 이 지점전후에서 기체에 대한 입자의 동기성이 좋지 않다. 이것은 vortex에 의해 입자와 기체의 혼재가 일어나는 지점으로 생각된다. $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 역전현상은 축소형 노즐A와 B에서 차이가 나타난다. 축소형 노즐B는 파이프형 노즐의 현상과 축소형 노즐C의 현상을 동시에 가지고 있다.

Fig. 12의 (b)는 각 노즐에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 난류강도분포를 나타낸다. $60\mu\text{m}$ 입자의 난류강도는 $y/D=0$ 일 때 축소형 노즐B와 C는 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 조금씩 증가하고 있으며 파이프형 노즐은 증가하다가 $x/D=3$ 부근에서 작아졌다 다시 증가하고 있으며 파이프형 노즐과 축소형 노즐의 난류강도 차이가 크다. $30\mu\text{m}$ 의 경우와 마찬가지로 $0.1 < x/D < 1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 축소형 노즐B와 C는 기체에 동기하고 있으나 파이프형 노즐은 축소형 노즐에 비해 동기성이 떨어진다. 또한 분출후에 분류층의 미립자의 속도가 균일화됨에 따라 노즐의 형상과 상관없이 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서부터 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 역전하기 시작하지만, $30\mu\text{m}$ 의 경우와는 다르게 파이프형 노즐은 $x/D \leq 5$, $1 < y/D < 1.5$ 일 때 역전현상이 나타나며 축소형 노즐C는 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 과 $x/D \leq 5$, $1 < y/D < 1.5$ 일 때 역전현상이 나타난다. 하지만 축소형 노즐B은 x/D 와 y/D 가

증가함에 따라 기체에 동기하고 있으나 역전현상이 일어나는 지점은 명확하지 않다. $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 일치하는 지점중에 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 축소형 노즐C의 경우 가장 큰 난류 강도값을 가지며, 이 지점전후에서 기체에 대한 입자의 동기성이 좋지 않는 지점으로 vortex에 의해 입자와 기체의 혼재가 일어난다. Fig. 12의 (c)는 각 노즐에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $100\mu\text{m}$ 입자에 대한 축방향 난류강도분포를 나타낸다. $100\mu\text{m}$ 입자역시 난류강도는 $y/D=0$ 일 때 축소형 노즐B와 C는 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 증가하고 있고 파이프형 노즐은 조금씩 감소하고 있으며 파이프형 노즐과 축소형 노즐의 난류강도 차이가 분명하다. 위의 실험 결과들과 마찬가지로 $0.1 < x/D < 1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 축소형 노즐B와 C는 기체에 동기하고 있으나 파이프형 노즐은 축소형 노즐에 비해 동기성이 떨어진다. 분출후에 분류층의 미립자의 속도가 균일화됨에 따른 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도의 역전현상은 노즐의 형상과 상관없이 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서부터 나타나기 시작하지만, 파이프형 노즐의 경우 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 과 $5 \leq x/D \leq 7$, $1 < y/D < 1.5$ 및 $x/D=10$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 역전현상이 나타나고 축소형 노즐의 경우 x/D 와 y/D 가 증가함에 따라 기체에 동기하고 있으나 역전현상이 일어나는 지점은 명확하지 않다. $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 일치하는 지점중에 $x/D=10$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 파이프형 노즐의 경우 가장 큰 난류 강도값을 가지며, 이 지점 전후에서 기체에 대한 입자의 동기성이 좋지 않는 지점으로 vortex에 의해 입자와 기체의 혼재가 일어난다.

4.4.4 반경방향 난류강도

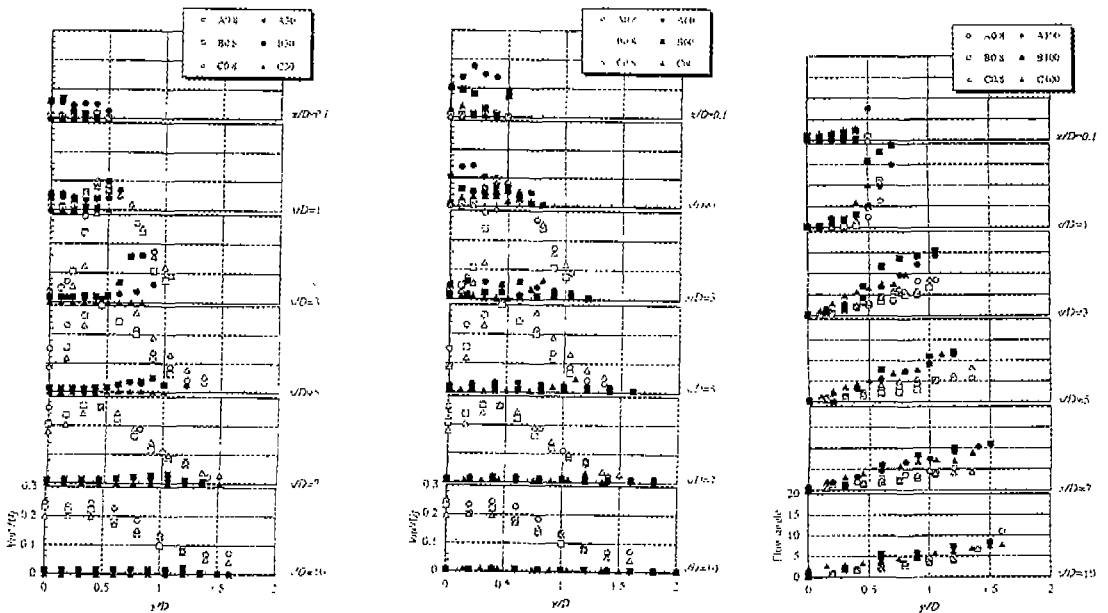
Fig. 13의 (a)는 각 노즐에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $30\mu\text{m}$ 입자에 대한 반경방향난류강도분포를 나타낸다. 기체의 반경방향 난류강도, 즉 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 반경방향 난류강도를 살펴보면, x/D 에 상관없이 실험에 사용한 모든 노즐에서 난류강도는

$0 < y/D < 0.5$ 에서 증가하고 있으나, $y/D > 0.5$ 에서 감소하고 있다. 또한 $y/D=0$ 일 때 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 증가함을 알 수 있다. $30\mu\text{m}$ 입자는 $y/D=0$ 일 때 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 감소하며 파이프형 노즐과 축소형 노즐의 난류강도 차이 역시 감소하고 있으며, $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도와와의 차가 $x/D=3$ 까지 감소하다가 급격히 증가한다. 노즐의 형상에 상관없이 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 $30\mu\text{m}$ 입자의 난류강도 역전현상이 일어난 다음 분출 후에 분류중의 미립자의 속도가 균일화되면서 입자는 거의 일정한 난류 강도값을 갖는다. Fig. 13의 (b)는 각 노즐에서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 대한 반경방향 난류강도분포를 나타낸다. $30\mu\text{m}$ 입자의 경우와 마찬가지로 $60\mu\text{m}$ 입자는 $y/D=0$ 일 때 x/D 가 증가함에 따라 난류강도가 감소하며 파이프형 노즐과 축소형 노즐의 난류강도 차이 역시 감소하고 있으며, $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도와와의 차가 $x/D=3$ 까지 감소하다가 급격히 증가하

는데 $30\mu\text{m}$ 의 경우보다 그 차이가 크다. 노즐의 형상에 상관없이 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 $60\mu\text{m}$ 입자의 난류강도 역전현상이 일어난 다음 분출 후에 분류중의 미립자의 속도가 균일화되면서 입자는 거의 일정한 난류 강도값을 갖는다.

4.4.5 입자의 유동각

Fig. 14의 (a)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $30\mu\text{m}$ 입자에 대한 유동각 분포를 나타낸 것이다. 유동각은 $\theta = \tan^{-1} V_m / U_m$ (V_m : 반경방향 평균속도, U_m : 축방향 평균속도)로 정의한다. x/D 가 증가해도 $y/D=0$ 인 중심축에서 입자직경 및 노즐형상에 따른 영향은 없다. $x/D=0.1$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ 의 유동각 분포를 보면 노즐형상에 의한 차이가 거의 없지만, $x/D=3$ 에서는 그 차이를 보이다가 $x/D \geq 7$ 에서는 다시 차이가 적어진다. $x/D=0.1$ 을 제외한 모든 축방향에서 y/D 가 증가함에 따른 유동각의 크기가 증가되었으며 노즐형상에 의한 차이는 x/D 가 3~5에서 나타났으나 다른



(a) $30\mu\text{m}$

(b) $60\mu\text{m}$

(c) $100\mu\text{m}$

Fig. 13 Average turbulent intensity in the radial direction

영역에서의 차이는 없다.

Fig. 14의 (b)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $60\mu\text{m}$ 입자에 대한 유동 각 분포를 나타낸 것이다. 중심부에서는 $30\mu\text{m}$ 입자의 경우와 거의 동일하며, 주변부($y/D > 0.5$)에서는 x/D 가 증가할수록 유동각이 감소함을 알 수 있다. $x/D > 3$ 에서는 $60\mu\text{m}$ 입자의 유동각이 입자가 $0.8\mu\text{m}$ 보다 크지만, $x/D=10$ 에서는 거의 동일한 분포를 보이고 있다. $30\mu\text{m}$ 입자의 유동각과 달리 노즐형상에 따른 유동각의 차이는 없다.

Fig. 14의 (c)는 각 노즐에 있어서 $0.8\mu\text{m}$ 입자와 $100\mu\text{m}$ 입자에 대한 유동 각 분포를 나타낸 것이다. $100\mu\text{m}$ 입자의 경우 노즐 중심부 유동각 변화는 $30, 60\mu\text{m}$ 입자와 거의 동일하다. $x/D \geq 3$ 에서는 $0.8\mu\text{m}$ 와 입자의 유동각 차이가 명확히 나타나지만, 노즐형상에 따른 차이는 거의 보이지 않으나 $x/D=3$ 인 구역에서 노즐B의 유동각이 다른 노즐에 비해 크다. 이러한 결과로부터 노즐 출구부근($y/D=0, x/D=0.1$)에서 유동

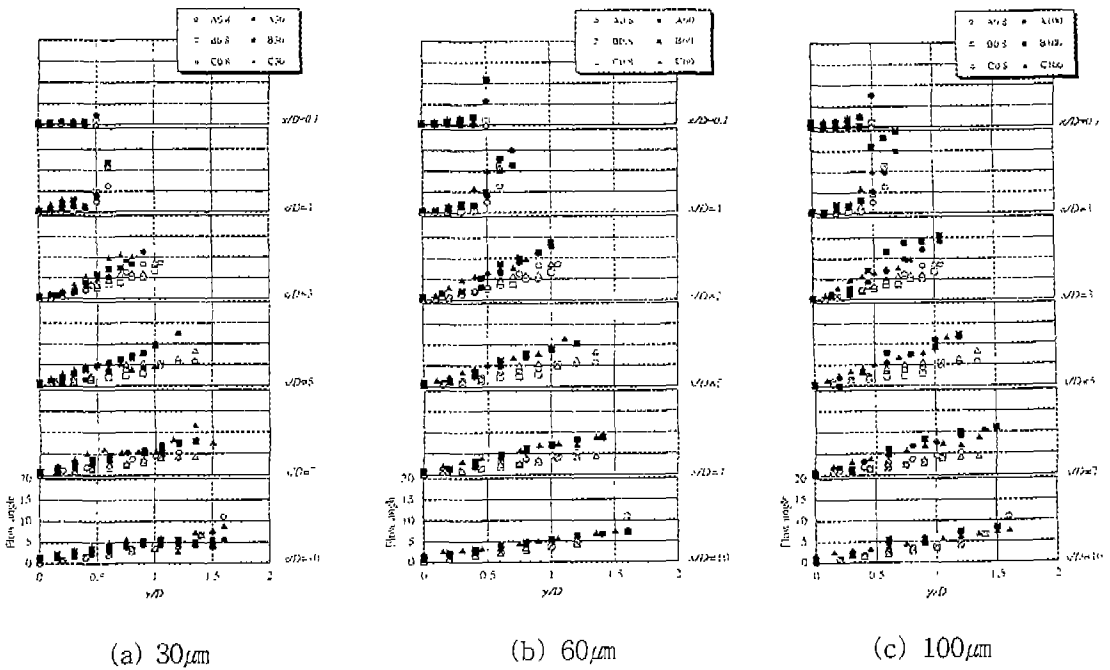


Fig. 14 Flow angle

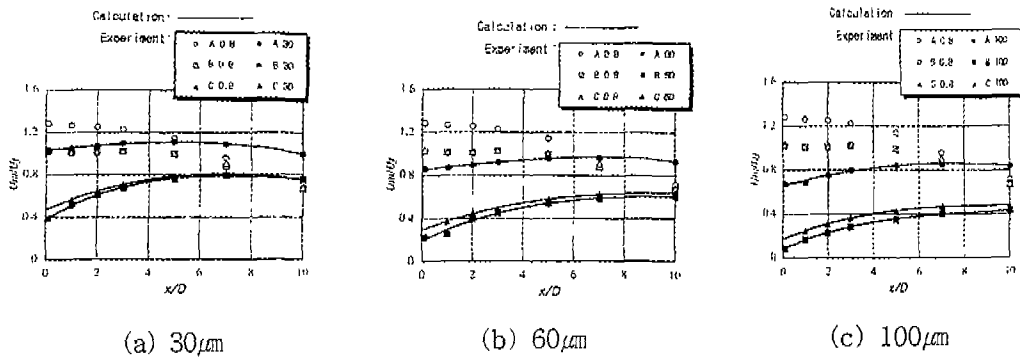


Fig. 15 Particle velocity profiles for different nozzle at the center axis

각은 $100\mu\text{m}$ 입자가 가장 크며, $60\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 순으로 작아지는 것을 알 수 있다.

4.6 노즐축 중심에서의 입자속도

Fig. 15는 노즐축 중심상에서의 0.8, 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 입자 및 입자속도변화를 실험에 의한 값과 운동방정식에서 구한 값을 비교할 수 있도록 나타내었다. 노즐 B, C의 $0.8\mu\text{m}$ 입자 속도는 포텐셜 코아내에서 일정속도를 보인 후 감소하고 있으며, 이것은 분류의 유체속도 감소특성을 잘 나타내고 있다. 노즐 A의 경우 $0.8\mu\text{m}$ 입자 속도는 분출 직후로부터 감소를 시작한다.

입자의 크기가 작을수록 x 축 방향으로의 속도는 증가하고 노즐 B, C에 따른 변화는 없고 노즐 A에서의 속도분포가 크다. 모든 입자와 노즐 형상에서 실험값과 이론값은 매우 잘 일치한다.

5. 결 론

본 논문은 노즐의 출구형상에 따른 기체의 가속도 및 기체유동에 대한 동기성을 파악하고, 그에 따른 미립자의 유동현상을 검토하기 위하여 내경이 일정한 파이프형 노즐 및 출구에서 일정 비로 좁아지는 축소형 노즐을 사용하였다. 또한, 분류 중에 $0.8\mu\text{m}$ 의 DOP와 직경이 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 인 유리입자를 혼합시킨 혼합류를 형성시킴으로서, 입자크기에 따른 노즐출구 및 그 이후에서의 유동현상을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노즐 출구에서의 미립자 유동으로부터 파이프형 노즐로는 동기성을 파악하기 어렵고, 축소형 노즐에서는 $0.8\mu\text{m}$ 일 때 높은 동기성을 가지고 있으며, 그에 비해 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 입자의 순으로 동기성이 낮음을 알 수 있었다.
2. 노즐형상과 입자의 직경변화에 따른 축방향 속도분포는 $0.8\mu\text{m}$ DOP인 경우 $x/D \leq 1$, $y/D < 0.5$ 에서 파이프형 노즐 속도구배는 1.2,

축소형 노즐 1.0으로 파이프형 노즐이 더 큰 속도분포를 보이다가 $x/D \geq 3$, $y/D \geq 0.5$ 에서 속도 구배는 노즐형상과 상관없이 거의 일정하게 감소하였고, $30\mu\text{m}$ 입자인 경우 노즐 출구 부근 ($x/D \leq 1$, $y/D < 0.5$)에서 파이프형 노즐은 1.0, 축소형 노즐은 0.5, $60\mu\text{m}$ 입자인 경우 파이프형 노즐 0.8, 축소형 노즐 0.3, $100\mu\text{m}$ 입자인 경우 파이프형 노즐 0.6, 축소형 노즐 0.1~0.2이었고, $x/D \geq 3$, $y/D \geq 0.5$ 에서는 $30\mu\text{m}$ 입자의 속도 감소 폭이 가장 컸으며, $60\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ 순으로 감소 폭이 작았다. 이는 $60\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ 는 저속으로 분출한 후 기체의 운동량 전달과 입자의 관성력에 따라 점차 속도가 계속 유지됨을 의미한다. 이로부터 출구 부근에서는 노즐형상과 입자의 직경에 따른 영향이 현저하게 나타나지만 출구에서 멀어질수록 노즐형상 보다는 입자의 직경에 따른 영향이 현저하게 나타남을 알 수 있다.

3. 노즐형상과 입자의 직경변화에 따른 반경방향 속도 분포는 $0.8\mu\text{m}$ DOP인 경우 노즐형상에 상관없이 $x/D \leq 1$, $y/D < 0.5$ 에서 속도 구배는 0.0~0.1이었고 $x/D \geq 3$, $y/D \geq 0.5$ 에서는 속도 구배는 0.1~0.2부근에 일정하게 분포하였다. $x/D = 0.1$ 에서는 노즐형상 및 입자의 크기에 상관없이 0.0~0.1에 분포하였다. $1 \leq x/D \leq 3$ 에서는 노즐형상에 상관없이 입자의 직경에 따라 속도가 증가하다가 $x/D \geq 5$ 에서 점점 감소하였다. 그러나 그 감소 폭은 노즐형상 보다는 입자의 직경이 작을수록 크게 나타났다.
4. 축방향 난류강도분포는 분출후 미립자의 속도가 균일화됨에 따라 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 의 난류강도가 역전하는 현상이 나타난다. 실험에 사용한 모든 입자에서 노즐의 종류와 상관없이 $x/D = 1$, $0 < y/D < 0.5$ 인 영역부터 이러한 역전현상이 나타나기 시작하며, $30\mu\text{m}$ 의 경우, $x/D \geq 3$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 난류강도가 역전되고, $60\mu\text{m}$ 의 경우, 파이프형 노

줄은 $x/D \leq 5$, $1 < y/D < 1.5$ 일 때 역전현상이 나타나며 축소형 노즐C는 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 과 $x/D \leq 5$, $1 < y/D < 1.5$ 일 때 역전되지만 축소형 노즐B는 x/D 와 y/D 가 증가함에 따라 기체에 동기하고 있으나 역전현상이 일어나는 지점은 명확하지 않다. $100\mu\text{m}$ 의 경우, 파이프형 노즐의 경우 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 과 $5 \leq x/D \leq 7$, $1 < y/D < 1.5$ 및 $x/D=10$, $0.5 < y/D < 1$ 에서 역전현상이 나타나고 축소형 노즐의 경우 x/D 와 y/D 가 증가함에 따라 기체에 동기하고 있으나 역전현상이 일어나는 지점은 명확하지 않다. 또 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 입자의 난류강도가 가장 큰 난류 강도 값을 가지며 일치하는 지점이 생긴다. 이러한 지점은 파이프형 노즐의 경우 $30\mu\text{m}$ 일 때 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 에서, $100\mu\text{m}$ 일 때 $x/D=10$, $0.5 < y/D < 1$ 에서, 축소형 노즐의 경우 $60\mu\text{m}$ 일 때 $x/D=3$, $0.5 < y/D < 1$ 이며, vortex에 의해 입자와 기체의 혼재가 일어난다고 생각된다. 반경방향 난류강도분포는 노즐의 형상과 입자의 크기에 상관없이 $x/D=1$, $0 < y/D < 0.5$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ DOP의 난류강도와 30, 60 및 $100\mu\text{m}$ 의 난류강도가 역전현상을 일으킨 후 분류층의 미립자의 난류강도가 균일화되면서 입자는 거의 일정한 난류 강도 값을 갖는다.

5. 노즐 형상과 입자의 직경 변화에 따른 유동각을 측정된 결과 $8\mu\text{m}$ 의 DOP인 경우 $y/D < 0.5$, $x/D=0.1$ 에서는 유동각이 거의 일정하였으며, 파이프형 노즐은 입자의 크기가 커질수록 유동각은 작아졌지만, 축소형 노즐보다는 전체적으로

유동각이 작았다. 축소형 노즐은 입자의 직경이 커질수록 유동각이 커졌다. $x/D \geq 3$ 에서부터는 노즐형상에 의존하지 않는 동일한 유동각을 나타내고 있다.

6. 입자의 크기, 노즐형상에 따른 축방향의 속도 분포 측정치는 이론치와 잘 일치한다.

참 고 문 헌

1. Ishima 外 2名, 日本機械學會論文集, 格子亂流場における粒子擴散現象, 60-575 B, p. 155, 1994.
2. J. B. McLaughlin, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 20, p. 211, 1994.
3. R. J. Perkins, The 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow, pp.3-17, 1995.
4. N. Hata, ASME, Vol. 114, p. 420, 1992.
5. D. Modarres, et al, J. AIAA, Vol. 22, p. 624, 1983.
6. 전운학, 김종철, 황승식 “입자크기와 노즐형상이 입자유동특성에 미치는 영향” 한국자동차공학회논문집, 제6권 5호 pp97~103, 1998.
7. Hjelmtelt. A.Jr & Mockros.L.F., Appl.Sci.Res. Vol. 16, p. 146, 1996
8. J. O. Tchen, p. 460, 1959.
9. Aerometrics, Inc " Real-Time Signal Analyzer" KEPCO, Job Number 2954 System Manual.