

# 입자크기와 노즐형상이 입자유동특성에 미치는 영향

## Effects of Particle Size and Injector Geometry on Particle Dynamics

전 운 학\*, 김 종 철\*\*, 황 승 식\*\*  
U. H. Chun, J. C. Kim, S. S. Hwang

### ABSTRACT

The flow structure of particles for two different injectors has been investigated experimentally by means of a Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA). Two injectors used in the present study are the pipe and contraction nozzle. Particles of 0.8 $\mu$ m, 30 $\mu$ m, 60 $\mu$ m, and 100 $\mu$ m diameter were injected with a constant mass loading ratio of 0.01 and a Reynolds number of 13200. The initial mean velocity and turbulent intensity of particle are strongly influenced by the particle size and the injector geometry. The flow angles of particle at nozzle exit are sensitive to the particle size rather than the injector geometry.

주요기술용어 : Particle(입자), Injector Geometry(인젝터형상), Turbulent Intensity(난류강도), Phase Doppler Particle Analyzer(위상도플러입자분석계), Flow Angle(유동각)

### 기 호 설 명

D : Nozzle diameter(mm)  
 $d_p$  : Particle diameter ( $\mu$ m)  
 $f_d$  : Doppler frequency  
 $N_d$  : Number of particle  
 $N_f$  : Number of fringe  
 $S_t$  : Stokes number ( $\tau_p/\tau_f$ )  
 $U_j$  : Air velocity at nozzle exit

$\Delta t$  : Interrarrival time for particle( $N_f/f_d$ )  
 $U_m$  : Measured velocity  
 $\tau_p$  : Aerodynamic response time( $\rho_p d_p^2/18\mu$ )  
 $\tau_f$  : Characteristic time( $d/U_j$ )

### 1. 서 론

미립자를 포함하는 혼상분류(混相噴流)의 유동은, 내연기관에서의 액체입자 및 미분탄의 분사에 의한 미립자유동 및 기체와의 혼합현상, 표면냉각 및 재료의 표면처리에 따른 미립자의 형상, 입경의 결정, 프라즈마용 분사에 의한 코팅에서 공

\* 정회원, 국민대학교 기계공학과  
\*\* 국민대학교 기계공학과 대학원

급되는 미립자의 공급량 및 속도조절등, 여러 산업분야에 광범위하게 응용되어지고 있다. 즉, 미립자의 유동은 기기 전체의 성능을 좌우하는 중요한 인자로 알려져 왔다.

지금까지, 난류분류중의 미립자유동은 유체의 불규칙적인 변동에 의해 확산을 일으킨다는 관점으로부터 연구가 이루어졌다. D. Modarres<sup>1)</sup>는 LDV를 사용하여 입자와 기체의 평균속도, 난류강도 측정 및 측정신호의 새로운 판별방법을 개발했다. 또한, Hishida<sup>2)</sup>는 입자의 밀도, 평균속도분포 및 난류강도측정을 통하여 기체난류구조와 미립자군운동과의 상호관계를 명확히 하는 등, 미립자운동에 대한 실험연구가 활발히 진행되어 왔다. 또한, 이론계산<sup>3,4)</sup>을 통해 미립자유동에 미치는 큰 난류 길이척도를 갖는 와(渦)의 영향을 명확히 하였다. 그러나, 이론계산에서는 관내의 유체 속도분포가 일정하고, 미립자의 분류속도를 유체속도와 동일시 하는 것 등, 실제현상을 파악하는데 있어서 초기분류조건 등의 많은 문제를 갖고 있는 것이 사실이다.

본 연구에서는 이와 같은 관점으로부터 파이프형 노즐, 미립자가 노즐내부에서 유체의 급가속에 추수하지 못하고, 미립자분출속도는 유체속도보다 낮아져 분류중의 미립자유동도 변화한다고 생각되는 축소형 인젝터를 사용하여, 인젝터형상에 따른 미립자의 유동 및 미립자 입경에 따른 유동변화를 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 Fig.1에 나타내고 있는 바와 같이, 노즐, 측정부, PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer, Aerometrics사)등으로 구성되어 있다. 분류는 송풍기에 의해 소량의 미립자를 포함한 공기를 노즐을 통해 분출 시켰다. 분류속도의 조절은, 가변주파수전원장치에 의한 모터의 회전수 제어로 하였다. 노즐은 외경 12mm, 내경 10mm의 니켈파이프(a) 및 내경 10mm, 축류면적 1/7.8인 축소형 노즐(b)을 사용하였다. 여기서, 관내에서 난류의 충분한 발달 및 미립자의 가속을 고려하여, 노즐의 길이를 1m로 하였다. 측정에는 2파장 4빔모드 전방산란형 PDPA를 사용하였다. 레이저의 광원은, 파장 514.5nm, 488nm, 빔 직경 1.4mm, 출력 4W의 알콘 이온레이저로 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(1)을 사용하였다. 이때 측정수 및 측정시간은 각각 5,000개, 3분이다.

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

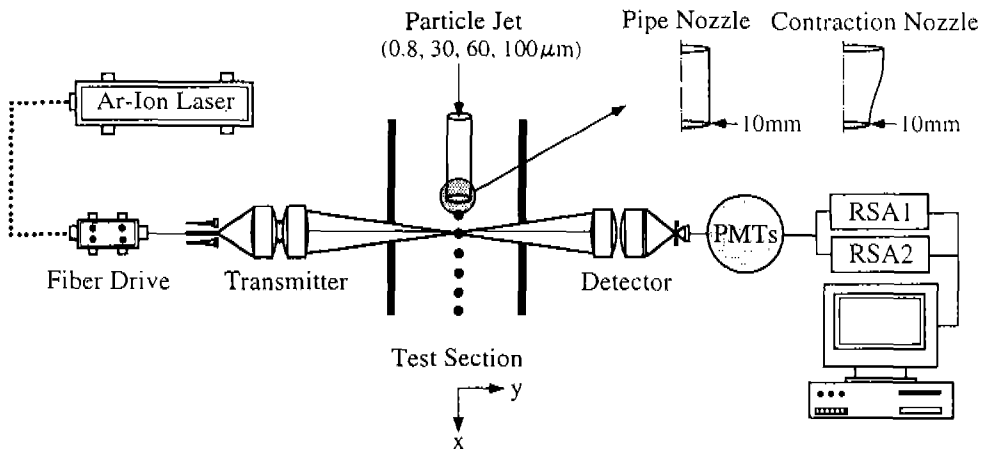


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2.2 실험방법

$U_j=20\text{m/s}$ ,  $Re=13,200$  조건에서, 분류방향에 대하여 평행한 수직하향속  $U$ ,  $U$ 에 대한 반경방향속  $V$ 라 정의하여 유속을 측정하였다. 분류의 상태를 간단히 하고, 변수를 최소화 하기 위하여 미립자와 미립자의 간섭, 미립자의 혼입에 따른 기체유동에의 영향을 무시할 수 있도록<sup>5,6)</sup> 미립자 질량/공기질량을 0.1로 하였다. 미립자는 난류분류에 대한 추수(追隨)성이 양호한 미립자로서 직경  $0.8\mu\text{m}$ 의 Diocetyl phthalate(화학식:  $\text{C}_6\text{H}_4[\text{COOH}_2\text{CH}(\text{C}_2\text{H}_5)(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3]_2$ ) 및 추수성이 나쁜 직경  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 의 유리미립자를 사용하였다. Table 1은 미립자의 물리적특성을 나타낸 것이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig.2는 파이프 및 축소형노즐에 의한 노즐출

Table 1 Physical properties of particles

	Model No.	Ave. Diam.	Standard Deviation	Density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$0.8\mu\text{m}$	DOP	$0.8\mu\text{m}$	1.3	983~993
$30\mu\text{m}$	GBL-30	$32.4\mu\text{m}$	1.62	2,500
$60\mu\text{m}$	GBL-60	$58.4\mu\text{m}$	2.37	2,500
$100\mu\text{m}$	GBL-100	$101.5\mu\text{m}$	3.12	2,500

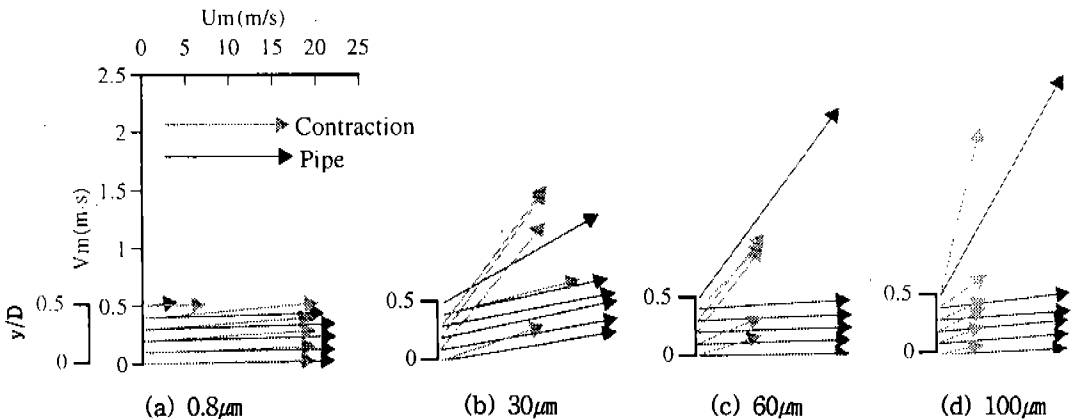


Fig.2 Velocity vectors of particle at injector exit

구의 미립자에 대한  $U$ ,  $V$ 의 벡터성분을 나타내고 있다.  $0.8\mu\text{m}$ 의 경우, 노즐형상에 의존하지 않고 노즐의 축중심방향으로 향하고 있다.  $30\mu\text{m}$  미립자부터 반경방향의 성분이 나타나며 파이프와 축소형노즐의 차이가 나타나고 있다. 파이프형에서  $60\mu\text{m}$ 와  $100\mu\text{m}$ 에 대한 벡터성분은 노즐출구 및 미립자의  $St$ 의 영향에 의해 노즐축 중심방향으로 향하고 있다. 또한,  $y/D=0.5$ 에 있어서  $60\mu\text{m}$ 와  $100\mu\text{m}$ 에 대한 벡터성분이 반경방향으로 향하고 있는 것은, 파이프형에서는 미립자와 관내벽면과의 충돌반사, 축소형노즐에서는 관내의 안쪽을 향한 흐름에 의한 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig.3은 분류축중심의 흐름방향 입자속도변화를 나타낸다.  $0.8\mu\text{m}$ 의 경우 파이프형 인젝터에서는 분출직후부터 감쇄를 시작하며, 축소형 인젝터에서는 포텐셜코아까지 일정속도를 유지한후  $x/D=5$ 부터 감쇄를 시작하며, Crow<sup>7)</sup>의 실험치와 경향이 일치한다. 그리고,  $x/D=5$ 부터는 인젝터형상에 따른 속도차이가 없어지며 동일한 속도분포를 나타내고 있다.  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  미립자는 저속으로 분출한 후 유체속도로부터 가속되어 속도가  $x/D \approx 7$ 까지 증가된후 감소한다. 또한, 파이프형 인젝터의 경우는 입경에 따른 속도차가 출구로부터 멀어짐에 따라 작아지지만, 축소형 인젝터는 그 차이가 어느정도 유지되는 것을 알 수 있으며, 가속되는 정도는 축소형노즐보다 파이프형에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

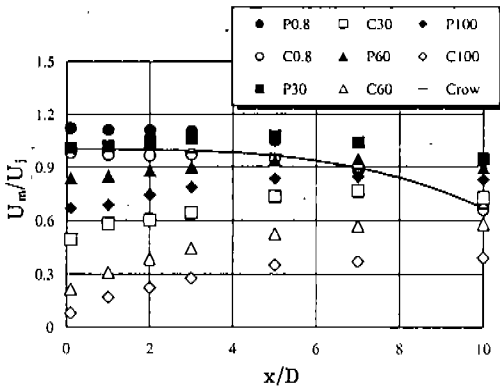


Fig.3 Particle velocity profiles for two different injector at the center axis(x)

Fig.4는 축방향의 평균속도분포를 나타내고 있다.  $0.8\mu\text{m}$ ,  $x/D=5$ 까지의 분류 중심부 속도분포는 파이프 및 축소형노즐에 따라 약간의 차가 나타나고 있으며, 중심부이외에서는 동일한 속도 분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 분류의 구조가 노즐에 따라 크게 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다.

$30\mu\text{m}$ 의 미립자에 대해서는, 분출시에 일정한 속도분포를 갖고 있었던 것이, 중심부에선 가속되며 반경방향으로 갈수록 저속범위가 확대되고 있다. 파이프형의 경우, 분출구에서의  $0.8\mu\text{m}$ 미립자에 대한 유체속도분포와 비교해 보면 관내에서

의 가속이 충분하지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나, 미립자의 관성에 의해 반대로  $0.8\mu\text{m}$ 미립자보다 속도가 커짐을 알 수 있다.

$60\mu\text{m}$ 의 경우, 축소형노즐에서 미립자의 출구 속도는 일정하게 분포되어 있다.  $x/D=1$ 이후에서는  $y/D \geq 0.5$ 의 주변부위에서 급격하게 감속한다. 감속되는 경향은 일정한 힘을 받고 있는 것과 같이 선형적이다. 축소형노즐 중심부에서는 미립자가 서서히 가속되고 있지만, 파이프형 노즐로부터 분출한 미립자는 파이프내에서 충분히 가속되어져 있기 때문에 가속량이 적다.  $x/D=10$ 에서는 파이프형노즐로부터 분출한 미립자가 관성에 의해 유체속도를 추월하고 있으며, 그와 동시에 감속도 시작되고 있다.

$100\mu\text{m}$ 의 경우  $x/D=0.1$ 지점을 보면, 파이프로부터 분출한  $100\mu\text{m}$ 의 미립자 속도분포가  $0.8\mu\text{m}$ 의 미립자에 대한 속도분포와는 전혀 다르며 일정한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.  $x/D=1 \sim 5$ 의 중심부는 포텐셜코어가 존재한다고 생각되어지는 영역이다. 이 영역 안에서 파이프로부터 분출한 미립자속도는 크게 변화하고 있지는 않지만, 축소형노즐로부터 분출한 미립자속도는 같은 간격을 유지한 채로 가속하고있다. 주변부위에 있어서의 속도는 감속하고 있지만, 미립자의 추수성이 나쁘기 때문에 급격하지는 않다. 또한,  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 의 미립자는 축소형노즐에 있어

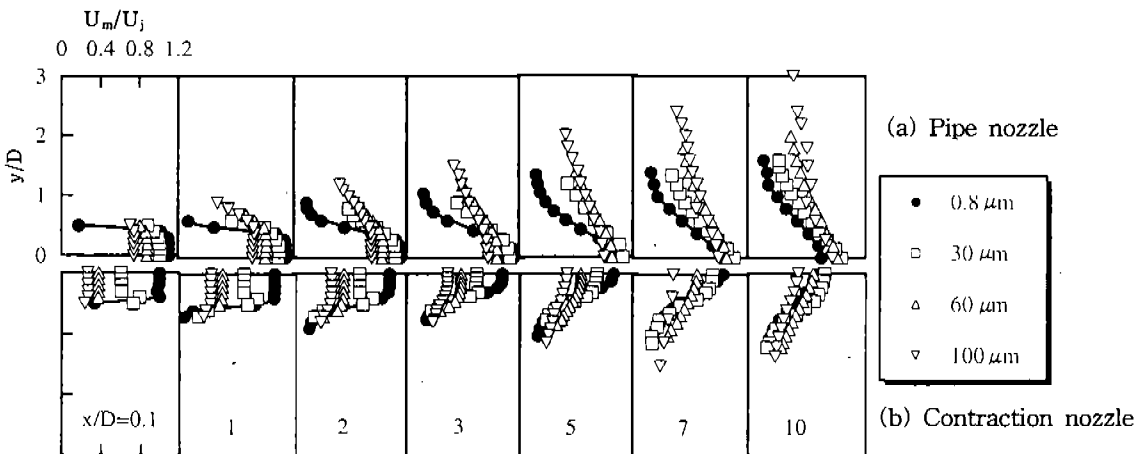


Fig.4 Profile of axial mean velocity (Pipe, Contraction nozzle)

서 관내에서 충분히 가속되었기 때문에, 파이프형의 미립자 속도분포에 비해 상당히 작은 속도값을 갖고 있다.

Fig.5는 반경방향 평균속도분포를 나타내고 있다.  $0.8\mu\text{m}$ 의 출구속도분포는 파이프형과 축소형 노즐에 의존하지 않고, 모두 일정한 분포를 갖고 있다.  $x/D=1$ ,  $y/D \geq 5$  영역에서 큰 난류길이 척도를 갖는 와에 의해서 속도가 급격히 증가하고 있다.  $x/D > 5$  이 되면 포텐셜코어가 없어지며, 유체속도분포는 노즐형상에 의존하지 않고 동일한 속도분포를 나타낸다.

$30\mu\text{m}$ 에서는, 축소형노즐은  $x/D < 3$ 의 중심부에서 축중심방향으로 흘러가고 있으며,  $x/D > 3$ 의 주변부는 급격하게 속도가 증가하고 있다.  $x/D = 3$ 의 중심부에서 축중심을 향한 속도는 확인할 수 없지만, 분출구로부터 바깥방향으로의 관성을 갖고 있기 때문에,  $x/D = 5 \sim 10$ 에서 그 영향이 나타나 있다. 또한 이때 노즐에 따른 차이는 거의 없다.

$60\mu\text{m}$ 는 노즐출구부근에서의 속도분포는 노즐의 축중심방향을 향하고 있으며,  $x/D = 2 \sim 10$ 에서는 미립자의 속도분포경향은 동일하다.

$100\mu\text{m}$ 는  $x/D = 0.1$ 에서의 미립자속도분포를 보면, 노즐에 의한 차이가 보이지 않고  $x/D = 2 \sim 10$ 에서는  $y/D \leq 0.5$ 의 중심부에서  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 의 미립자의 속도는 같으며, 파이프형노즐의 경우  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 의 미립자간의 반

경방향 속도분포 차이는 명확하지 않다.

Fig.6은 축방향의 난류강도분포를 나타내고 있다.  $0.8\mu\text{m}$ 의 경우, 파이프형에 비해 축소형노즐의 영향이 명확하게 나타나고 있다. 전반적으로 난류강도가 노즐의 주변 하류에 형성되는 유체의 큰 난류길이 척도를 갖는 와구조에 의해서 증가한 것에 반해,  $30\mu\text{m}$  미립자는 주변부위에서 유체를 추수하고는 있지만, 중심부에서 반대 난류강도 변화가 명확하지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 미립자와 파이프내벽과의 사이에 있어서 마찰이나 미립자의 충돌에 의해 생긴 미립자간 속도차에 의해 나타난 것으로, 분출 후는 분류중에 미립자속도가 균일화되기 때문으로 생각된다.

$60\mu\text{m}$ 는, 노즐출구에서의 미립자 난류강도는, 파이프형 노즐이 축소형노즐보다 크다. 중심부를 보면 하류로 갈수록 파이프형에서의 미립자난류강도가 감소하고 있다. 이것은 미립자간의 속도차가 적어지기 때문이며, 반대로 축소형노즐로부터 분출하는 미립자는, 출구에서 미립자간의 속도차가 거의 없으므로, 하류로 갈수록 서서히 증가한다. 이것은 유체의 난류강도가 증가하기 때문이다.

$100\mu\text{m}$ 의 경우 노즐출구에서의 미립자가  $0.8\mu\text{m}$  난류강도보다 큰 것은, 미립자간 속도차에 의한 것이라고 생각된다. 하류로 갈수록 중심부에서 미립자간 속도차가 작아짐에 따라 난류강도도 감소하고 있으나, 다른 미립자에 비해서 변화는 현저

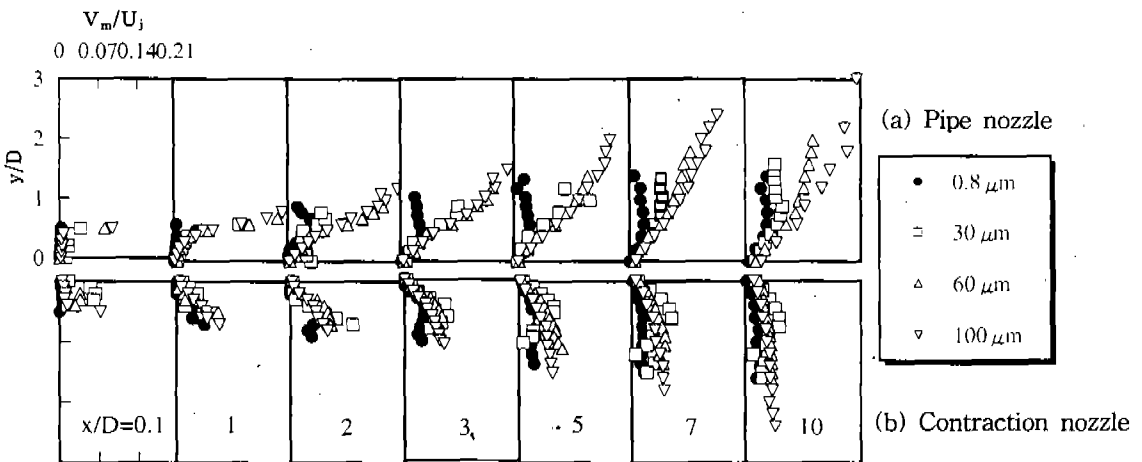


Fig.5 Profile of radial mean velocity (Pipe, Contraction nozzle)

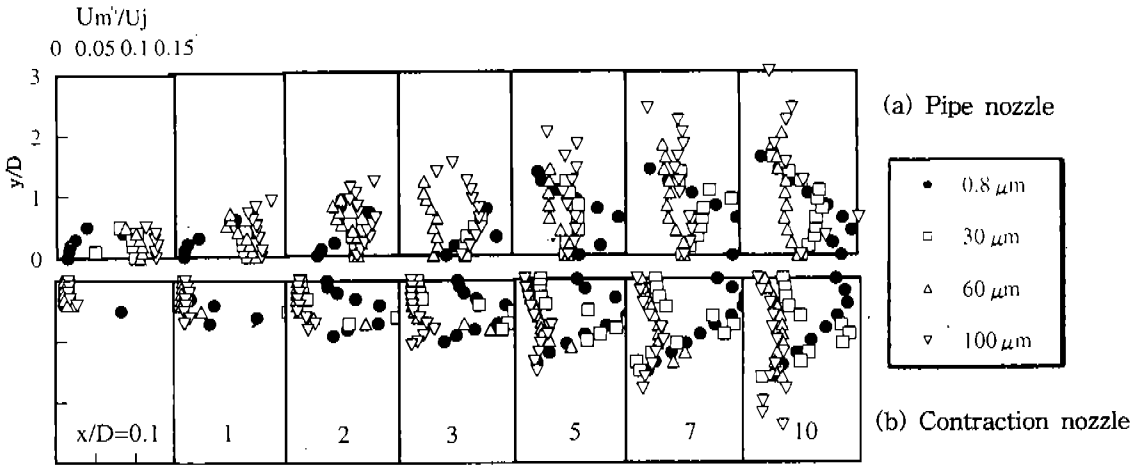


Fig.6 Profiles of axial turbulent intensity (Pipe, Contraction nozzle)

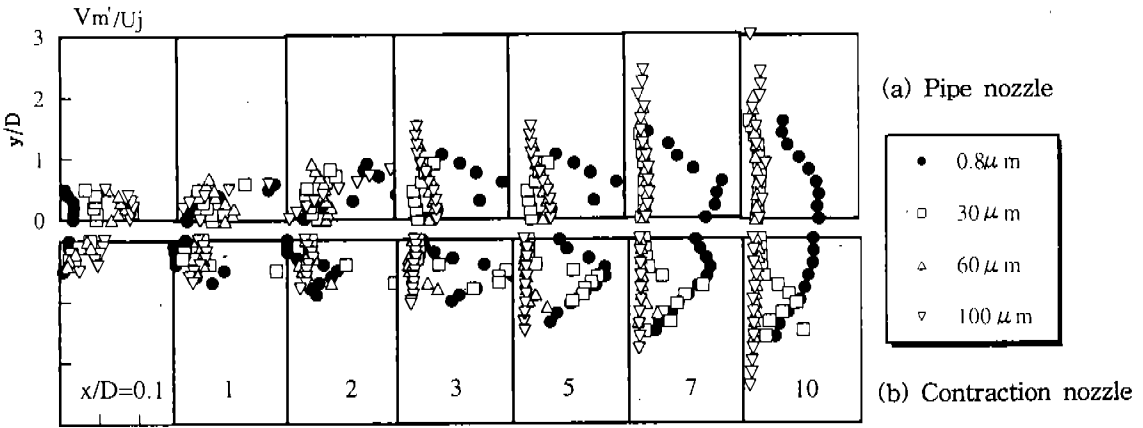


Fig.7 Profiles of radial turbulent intensity (Pipe, Contraction nozzle)

하지 않다. 이것은  $x/D=5\sim7$ ,  $y/D>0.5$ 에 해당하는  $0.8\mu\text{m}$  난류강도분포와 유리미립자의 난류강도분포가 교차하는 곳에 있어서, 큰 난류길이 척도를 갖는 와에 의한 영향이라고 생각된다.

또한, 전반적으로 보면,  $x/D=7, 10$ 의 중심부에서 파이프형의  $0.8\mu\text{m}$  미립자난류강도가 급격히 증가하는 원인으로서, 와(渦)의 이동속도와 미립자의 이동속도가 같기 때문이라고 생각된다.  $x/D=1\sim10$ 에서는 파이프형에 있어서 미립자간의 속도차가 감소하기 때문에, 난류강도가 작아지고 있지만, 축소형노즐의  $x/D=2\sim3$ 에서  $30\mu\text{m}$ 미립자

의 난류강도가 주변부위에서 급격히 증가하여, 유체의 난류강도와 같은 정도의 크기까지 성장하고 있다.

Fig.7은 반경방향의 난류강도를 나타내고 있다. 파이프의 출구 미립자가  $y$ 방향으로 향한 관성을 갖고 있기 때문에  $y/D=0.5$ 부근에서 난류강도가 커지고 있지만, 다른 부위에서는 노즐에 의한 난류강도차는 없다. 파이프형의  $100\mu\text{m}$ 미립자의 경우, 노즐출구에서 미립자간 속도차가 크므로 난류강도가 크게 나타나 있지만, 하류로 갈수록 속도차가 감소하여 작아진다. 전반적으로 축소형노즐의

미립자의 난류강도가 파이프형보다는 작으며,  $x/D=2$ 에 있어서는 축방향 난류강도와 같이,  $30\mu\text{m}$ 의 난류강도가 급격히 증가하고 있다.

하는 경향을 보이고 있다.

### 참 고 문 헌

### 3. 결 론

파이프 및 축소형노즐을 사용한  $0.8\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  입자에 대한 평균속도 및 난류강도를 PDDPA(위상도플러입자분석계)를 이용하여 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 파이프 및 축소형노즐에 의한 미립자의 출구평균속도에 대한 큰 차이가 보였다. 입경이 큰 미립자일수록 추수성이 떨어지므로 노즐출구의 분출속도는 작아지고, 반경방향으로의 흐름은 확대됨을 알 수 있다. 파이프형 인젝터의 경우는 입경에 따른 속도차가 출구로부터 멀어짐에 따라 작아지지만, 축소형 인젝터는 그 차이가 어느정도 유지된후 감소하는 것을 알 수 있다.
- 2)  $0.8\mu\text{m}$ 의 경우, 축방향 난류강도가 노즐형상에 따른 차이가 크게 나타나고 있지만 반경방향의 경우는 거의 동일하다. 또한, 노즐 주위의 하류( $y/D \approx 5$ )에서 생성되는 큰 난류 길이척도를 갖는 와로 인하여 난류강도가 크게 나타나고 있는 반면, 그 이외의 입자에 대해서는 형성된 와에 추수하지 않으므로 중심부( $y/D < 1$ ) 난류강도가 적으나 감소

1. D. Modarres, H. Tan and S. Elghobashi, "Two-Component LDA measurement in a two-phase turbulent", J.AIAA, Vol. 22, 624, 1983.
2. K. Hishida, K. Umemura and M. Maeda, "Heat transfer to plane wall jet in gas-solids two-phase turbulent jet", J. Heat transfer, Vol. 5, 2385, 1986.
3. J.N. Chung and T.R. Troutt, "Simulation of particles in turbulent fluid", J. Fluid Mech., Vol. 186, 199, 1988.
4. J. Uthuppan, S. K. Aggarwal and F.F. Grinstein, "Particle dispersion in a transitional axisymmetric jet: a numerical simulation", J.AIAA, Vol. 32, 2004, 1984.
5. 日本流體學會 편집, "混相流體力學", 180, 1991.
6. T.H. Shih and J.L. Lumley, "Second-order modelling of particle dispersion in a turbulent flow", J.Fluid Mech., Vol. 163, 349, 1986.
7. S.C Crow and F.H. Champagne, "Orderly structure in jet turbulent", J.Fluid Mech., Vol. 48, 547, 1971.