

## 공기유입을 고려한 2유체 분무의 구조에 관한 실험적 연구

채효철\* · 김동일\*\* · 오상현\*\*\*

### An Experimental Study on Structure of Air-assist Spray with Air Entrainment

H. C. Chae, D. I. Kim, S. H. Oh

#### Abstract

The effect of air entrainment in twin-fluid spray structure is investigated experimentally by varying the amount of atomizing air. The air entrainment is expected to affect on droplet size and velocity, droplet number density, turbulent kinetic energy and vorticity. PDA(Phase Doppler Anemometer) and PIV(Particle Image Velocimetry) system are used to measure those important factors in analyzing spray structure.

The results show that spray structure consists of three distinctive regions ; the atomizing region near nozzle, characterizing strong convective effect, the central core region where droplets are accelerated, and the spray sheath region where droplets are decelerated due to air entrainment. The local air entrainment rate is largest near nozzle, characterizing strong turbulent kinetic energy and vorticity but deceases along the downstream. However, the air entrainment rate linearly increases along axial distance.

**주요기술용어(Key Words):** Twin Fluid Nozzle(2유체 분사 노즐), Air entrainment(공기 유입), Particle Image Velocity(입자 영상 유속계), Phase Doppler Anemometer(위상 도플러 입자 분석계)

#### NOMENCLATURE

D : inner diameter of nozzle holder  
 M<sub>a</sub> : mass flow rate of entrained ambient air  
 M<sub>n</sub> : initial mass flow rate through the nozzle  
 M<sub>t</sub> : total mass flow rate  
 r : radial distance from the nozzle axis  
 R<sub>ei</sub> : radial distance of entrained droplet at measurement point i  
 u : axial velocity of droplet  
 u' : fluctuating velocity of u

U : mean axial velocity of droplet  
 v : radial velocity of droplet  
 v' : fluctuating velocity of v  
 V<sub>ei</sub> : mean radial velocity of entrained droplet at measurement point i  
 ω<sub>z</sub> : mean vorticity  
 z : axial distance from the nozzle exit

#### Greek symbols

ρ : air density  
 Ψ : nondimensional entrainment ratio

\* 부산대학교 대학원  
 \*\* 부산대학교 기계기술연구소  
 \*\*\* 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

#### 1. 서 론

공기유입(entrainment)량은 제트가 노즐로부터

분사될 때 제트의 경계를 통해 유인되는 주위 공기의 양으로 정의한다. 이는 분무를 둘러싸고 있는 주위 공기에 대해 미립화 공기와 액적에 의한 운동량 전달의 결과이다. 공기유입 효과는 실제 분무 시스템에 있어서 분무 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다. 가스터빈과 디젤 엔진과 같은 연소 시스템에서의 공기 유입은 극소적인 당량비에 영향을 미치고, NO<sub>x</sub>형성에 직접적인 관계가 있다. 또한, 산업용 노에서의 높은 공기 유입율이 분무의 속도를 감소시켜 노에서 액적의 잔존시간(residence time)에 영향을 미치게 된다. 또한, 공기유입은 소비재 제품의 스프레이에서 유입된 질량 유동율은 액체 증발에 영향을 미치고, 액적 증발과정(drying process)동안 액적으로부터 가능한 많은 수분을 제거하기 위한 분무 증발(spray drying)에 중요한 의미를 가진다.

Ricou와 Spalding<sup>(1)</sup>은 일정한 압력하에서 정지한 공기에 다양한 기체(공기, 이산화탄소, 프로판, 수소)를 분사하여 형성되는 난류제트에서 축방향으로의 질량 유동율(mass flow rate)을 측정함으로써 공기 유입율에 대한 모델을 제시하였다.

Briffa와 Dombrowski<sup>(2)</sup>는 제트의 외부에 유입 입자를 포함한 공기를 인공적으로 보내어 유입된 입자의 속도를 가시화 촬영으로 측정하였다. 그들은 유입된 질량 유동율과 축 방향 거리간의 선형적인 관계를 도출하여 공기 유입 모델을 제시하였다.

MacGregor<sup>(3)</sup>는 구형 액적의 항력과 분류(jet flow)의 운동량에 근거한 간단한 모델을 개발하여 Ricou와 Spalding<sup>(1)</sup>의 실험 결과와 비교하였다. 이외에도 여러 연구<sup>(4-6)</sup>가 이루어 졌으나 공기 유입의 양을 결정하는 간단한 식을 제시하는데 그치지 때문에 공기유입에 관한 명확한 해석은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 PIV 시스템과 PDA 시스템을 이용하여 분무 유동장의 속도 분포, 액적의 크기 및 속도, 분무 구조를 중심으로 공기 유입 현상을 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

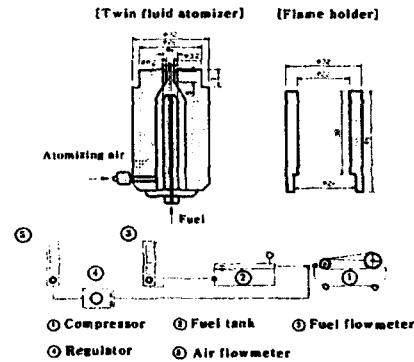


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

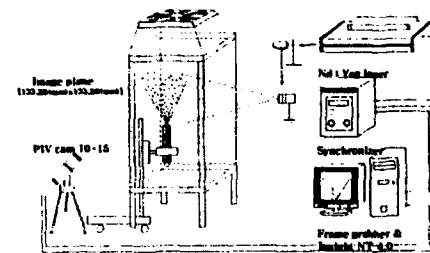


Fig.2 Schematic diagram of PIV experimental apparatus

Table 1. Specifications of PIV system

Laser Source	Nd : YAG
Wave Length(nm)	532
Laser Power(mJ/pulse)	200
Beam thickness(mm)	2.5
PIV Camera(pixel)	1,024 × 1,024
Frame interval(μs)	54.9, 60.1
Interrogation section(pixel)	32 × 32 (with 50% overlap)

본 실험에서 사용된 2유체 노즐과 분사 시스템을 Fig.1에 나타내었다. 분사계는 압축기, 연료탱크, 유량계(연료, 공기), 분사 노즐로 구성된다. 미립화 공기량은 충류 유량계(SOKKEN: Model 200LM)로 검증하여 면적 유량계로 조절하였고, 비연소시 수직 상방향으로 분사하여 측정하였다. Fig.2는 분무 유동장을 보기 위한 PIV 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용된 2 유체 노즐(Twin Fluid Atomizer)은 3개의 유리

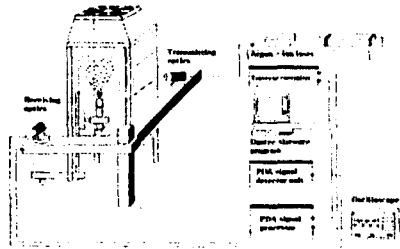


Fig.3 Schematic Diagram of PDA Experimental Set-up

Table 2. Specifications of PDA system

Laser wavelength(nm)	514.5(green)/488(blue)
Laser beam dia.(mm)	1.4
Fringe spacing(μm)	5.4219
Fringe number	35
Maximum dia.(μm)	167.068
Focal length(mm)	transmitter : 400 receiver : 400
Collection angle(degree)	27

와 1개의 블랙판으로 구성된 4각형 정체실에서 분사되며 입자의 정체로 인한 오차를 막기 위해 원심팬이 설치된다. 분무의 속도분포와 가시화를 위한 PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd : YAG 레이저, CCD 카메라등 이들을 제어하기 위한 동기화 장치(TSI 610032)와 컴퓨터로 이루어진다. 구성품의 주요 제원은 Table.1에 나타내었다.

본 실험에서의 PIV 측정영역의 크기는 133.86 × 133.86 mm이며, 속도 벡터의 추출은 2화상 상호상관 기법(Two Flame Cross-Correlation)을 이용하였다. 이때, 두 프레임 사이의 시간 간격은 조건 A와 B는 54.9μs, 조건 C는 60.1μs이고, 탐색 영역(Interrogation window)의 크기는 32 × 32 pixels, 중첩 면적의 크기는 50%로 설정하였다. 레이저 조사 시간은 4ns정도로 CCD 카메라의 노출시간에 맞추었다. 구해진 속도 벡터는 후처리 프로그램으로 불량 벡터의 제거, 1000장의 앙상블 평균등의 통계적인 방법으로 처리되었다.

Fig.3은 분무 액적과 유입입자의 크기를 측정하기 위해 2-D PDA 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 광원은 수냉식 5W Ar-ion레이저이고, 실험

사용시 출력은 2W로 하였다. 레이저 빔은 브래그 셀(Bragg cell)과 빔 분리기를 통과하여 40MHz의 주파수 편이를 가지는 각각 1쌍(녹색, 청색)의 빔으로 측정점에 프린지를 형성한다. 이때, 측정되는 신호의 위상차와 도플러 신호의 주파수는 신호 처리계를 통하여 연료 액적의 크기와 속도등과 같은 데이터를 획득하였다. PDA 시스템의 측정 조건은 Table.2에 나타내었다.

2.2 실험 조건

Table.3은 본 실험에서 사용한 실험 조건을 나타낸 것으로서 연료는 백등유(Kerosene)를 사용하였으며 연소시 대표적인 안정화 화염으로 나타나는 조건으로써 일정한 연료량에 미립화 공기량을 3가지로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다.

Table 3. Experimental conditions

Condition	A	B	C
Fue(cc/min)	21	21	21
Air(l/min)	32	29	25

2.3 공기 유입 측정방법

Fig.4는 공기유입을 측정을 위해 나타낸 모델의 개략도이다. 유입되는 입자의 속도를 얻기 위해 PIV 데이터를 이용하여 측 방향 속도 성분이 거의 0에 가까운 속도를 주위 공기의 유입 속도로 선택하였고, 그 지점을 중심으로 분무 경계선을 결정하였다. 그리고, 유입되는 지점의 측 방향 높이(dz)를 2.1mm 간격으로 일정하게 하여 계산하였다. 또한, PDA 시스템을 통해 유입되는 입자들의 크기를 관찰하였다.

측 방향 위치 z에서의 국부적인 공기 유입율(local entrainment rate)은 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{dM_c}{dz} = 2\pi R_{ci} V_{ci} \quad (1)$$

측 방향 거리(z<sub>i</sub>)에 따라 유입입자의 측 방향 속도 성분이 거의 0인 지점에서의 반경 거리(R<sub>ci</sub>)

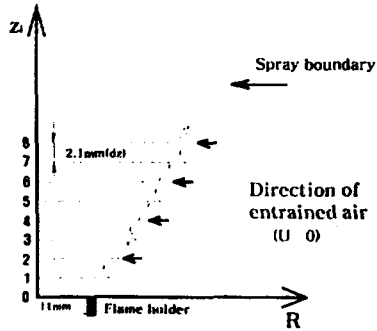


Fig.4 Measuring method for air entrainment rate measurements

와 유입속도( $V_{ei}$ )를 결정한다. (1)식에서, 축 방향  $z_i$  지점까지 누적된 공기 유입율은 다음과 같다.

$$M_e = 2\pi \rho \Delta Z \sum_{i=1}^n R_{ei} V_{ei} \quad (2)$$

결국, 총 질량 유동율은 식(3)에 의해 공기 유입율( $M_e$ )과 노즐 출구에서의 초기 질량 유동율의 합으로 구성된다. 그리고, 무차원화 시킨 공기 유입율은 (4)식에 의해 나타난다.

$$M_t = M_e + M_n \quad (3)$$

$$\Psi = \frac{M_e}{M_n} = \frac{M_t}{M_n} - 1 \quad (4)$$

위의 식을 이용하여 구한 값은 실제 분무 과정에서 나타나는 분무각에 의한 오차가 생기므로

이러한 오차를 줄이기 위해 축 방향 높이( $dz$ )를 가능한 작게하여 분무각에 의한 영향을 고려하였다.

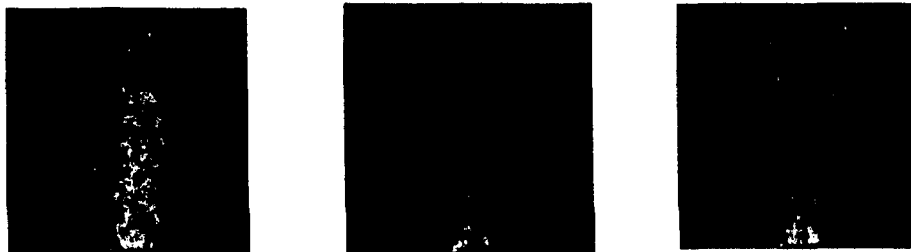
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분무 가시화

Fig.5은 미립화 공기량에 따라 분무 형태와 공기 유입 현상을 밝히기 위해서 CCD 카메라를 이용하여 가시화한 것이다. 조건 A, B, C의 분무 경계 부근에서 주름(winkle)상을 관찰할 수 있으며 미립화 공기량이 많은 조건 A는 조건 B, C에 비해 액적의 크기가 작아 분무 내에 고루 분포하고 있으며 분무 폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이것은 미립화 공기량이 증가할수록 주위 공기와의 상호작용이 의해 액적의 크기가 작아지고, 확산에 의해 분무 폭이 증가하기 때문이다.

#### 3.2 평균 유동장 및 속도분포

Fig.6은 미립화 공기량에 따라 조건 A, B, C의 1000개의 순간 속도장을 평균한 그림이다. 유입되는 주위 공기의 유동장을 보면 노즐 선단 부근(20mm이내)에서 빠른 기류의 속도와 액적에 의해 유입이 크게 일어나며, 50mm 단면 부근에서는 공간상에 액적이 누적되어 조밀한 분포를 나타낸다. 이것은 액적 속도의 감소와 주위로부터 유입된 입자에 의한 것으로 보여진다. 100mm 단면 이상에서는 주위 유동에 의한 영향이 적으며 확산에 의한 분무의 폭이 증가한다.



(a) Condition A

(b) Condition B

(c) Condition C

Fig.5 Visualizations of spray with an increase in the amount of atomizing air

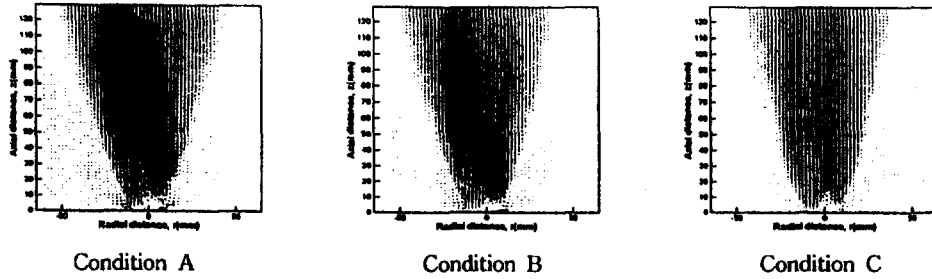


Fig.6 The ensemble averaged velocity field with Condition A, B, C

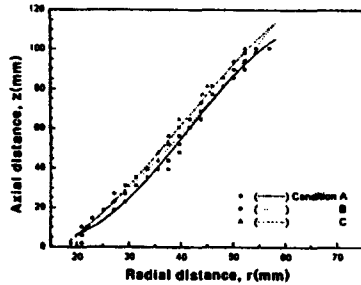


Fig.7 Width of spray with the axial distance

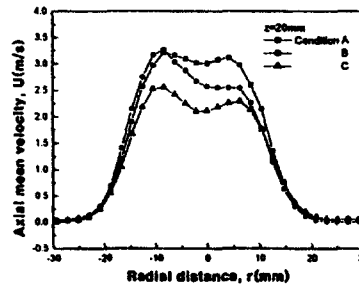


Fig.9 Distribution of mean axial velocity with axial distance

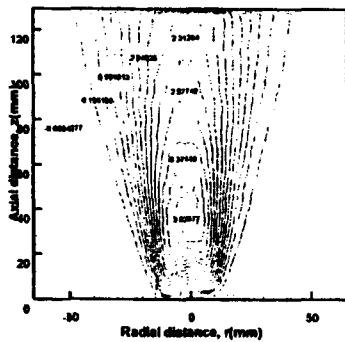


Fig.8 Contours for the ensemble averaged axial velocity field(Condition A)

Fig.7은 미립화 공기량에 따라 조건 A, B, C의 분무 폭을 도식한 그래프이다. 조건 A는 다른 조건들에 비해 분무 폭이 축방향 높이 60mm이하에서 다소 크게 나타나지만 하류로 갈수록 비슷해지는 경향을 볼 수 있다. 이것은 가장 많은 미립화 공기량에 따라 작은 액적들이 형성되어 중

심 영역에서는 입자의 확산이 크게 나타나며 하류 쪽에서는 입자 속도의 현저한 감소와 주위 공기의 영향으로 사료되어진다. 그리고, 주위 공기의 유입에 의해서 액적의 궤적이 안쪽으로 휘어 들어오는 효과로 인해 실제 분무폭은 줄어들게 된다.

Fig.8은 조건 A의 순간 축 방향 속도장을 평균한 그림이다. 노즐 선단에서 축 방향으로 갈수록 가장 큰 속도 분포를 가져야 하지만  $z=20\text{mm}$  단면이하에서는 분무 액적의 조밀한 분포로 인해 전형적인 제트형 속도 분포를 띄지 않는 것으로 사료되어진다. 그러나, 비교적 밀도가 낮아지는  $z=20\text{mm}$  단면이상에서는 전형적인 제트형 속도 분포를 나타내고 있다.

Fig.9은 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리  $z=20\text{mm}$  단면에서 반경방향에 따른 액적의 축 방향 평균 속도를 나타낸다. 미립화 공기량이 많은 조건 A는 조건 B, C에 비해 공기의 속도

분포가 입자의 속도에 가장 큰 영향을 미치므로 축 방향 평균 속도 분포가 크게 나타난다. Fig.8의 노즐 선단 주위영역과 마찬가지로 너무나 조밀한 입자 분포로 인해 축 중심 속도가 낮은 속도 분포를 나타내고 있다.

3.3 평균 난류 유동장 및 분포

Fig.10은 조건 A의 분무 유동장의 평균 난류 운동 에너지 분포를 나타낸 그림이다. 전 단면에 걸친 난류 운동 에너지의 분포를 보면 분무의 가장자리부근에서 난류 운동이 왕성하며, 노즐 선단 부근에서 가장 활발함을 볼 수 있다. 이러한 난류 운동은 하류로 갈수록 작아지며 100mm 단면 이상에서는 거의 영향을 없음을 볼 수 있다. Fig.11은 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리

$z=20\text{mm}$  단면에서 분무의 평균 난류 운동 에너지를 나타낸 그래프이다. 난류 운동 에너지의 최고치는 쌍봉 형태를 가지고, 중심축에서 보다 작은 값을 가지고 있다. 그래프에서 미립화 공기량이 많은 조건 A에서 가장 크게 나타나며  $z=50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$  단면으로 갈수록 쌍봉 형태는 거의 사라지며 전체적으로 감소하는 경향을 Fig.10에서 관찰할 수 있다.

Fig.12은 조건 A에서 순간 와도장을 평균한 그림이다. 노즐 선단 부근에서 큰 와도장과 축 중심 대칭으로 작은 와도장이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이것은 보염기에 의해 발생되어 연료와 공기의 혼합을 향상시켜 화염의 안정화에 직접적인 영향을 미친다. 그리고, 노즐 선단의 큰 와도장은 Fig. 10의 난류 운동 에너지의 분포와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

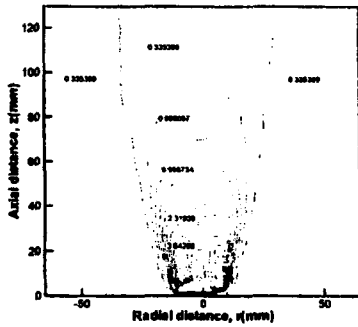


Fig.10 Contours for the mean turbulent kinetic energy :  $\frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$  (Condition A)

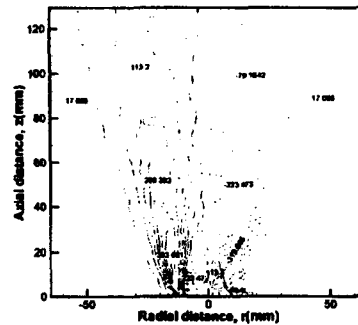


Fig.12 Contours for mean vorticity :  $w_z = (-\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial z})$  (Condition A)

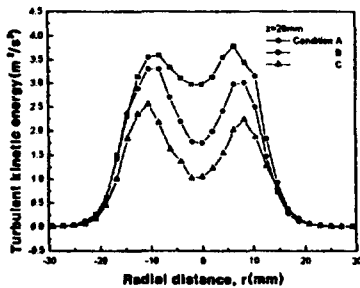


Fig.11 Distribution of mean turbulent kinetic energy with axial distance

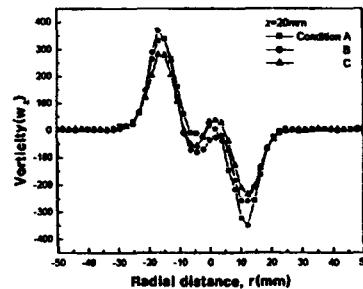


Fig.13 Distribution of mean vorticity with axial distance

Fig.13은 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리  $z=20\text{mm}$  단면에서 분무의 평균 와도장을 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 양(+)  
의 값은 시계 방향, 음(-)의 값은 반시계 방향으로 와도장의 방향성을 나타낸다.

전체적으로 조건 A의 와도장이 크게 나타나며  $z=50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$  단면으로 갈수록 작은 와도장은 거의 사라지고, 노즐 선단부근의 큰 와도장은  $100\text{mm}$  단면 이상에서는 조건에 관계없이 감소하는 경향을 Fig.12에서 관찰할 수 있다.

### 3.4 액적의 수밀도 및 액적 분포

Fig.14은 분무 조건 A에서 분무 입자의 공간적 수밀도를 나타낸 그래프이다.  $z=20\text{mm}$  단면 축 중심에서 액적의 공간적 수밀도는  $14800\text{개/cc}$ ,  $z=50\text{mm}$  단면에서는  $16200\text{개/cc}$ ,  $z=100$  단면에서는  $12000\text{개/cc}$ 로 나타난다. 이러한 것은 중력에

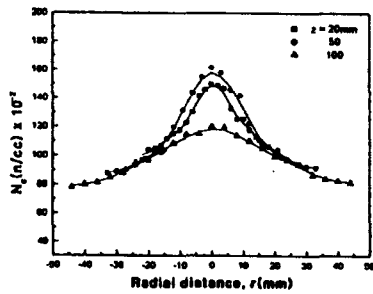


Fig.14 Distribution of number density with axial distance (Condition A)

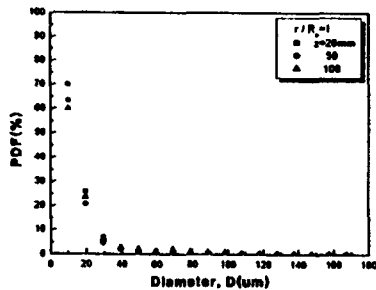


Fig.15 Probability density function distribution of droplet size (Condition A)

의한 액적의 축방향 속도 감소와 액적의 확산(diffusion)에 의한 영향이다. 그리고,  $z=50\text{mm}$  단면에서 크게 나타나는 것은 액적의 속도 감소로 인한 액적들의 조밀성과 주위 공기의 유입으로 인한 영향으로 사료된다.

Fig.15은 조건 A에서 노즐 선단으로부터 축 단면에 따라 공기 유입 지점에서의 유입되는 액적들의 크기 분포를 확률 밀도 함수(Probability

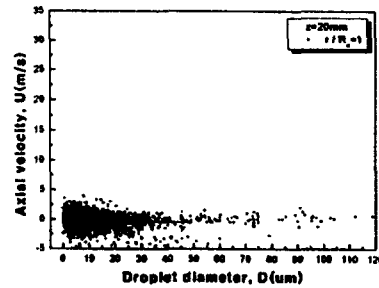


Fig.16 Distribution of size-velocity correlation of droplet (Condition A)

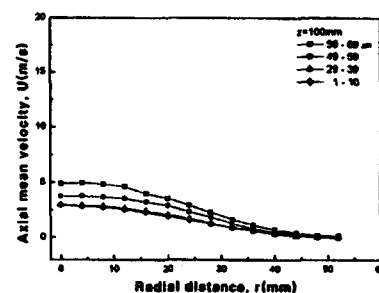
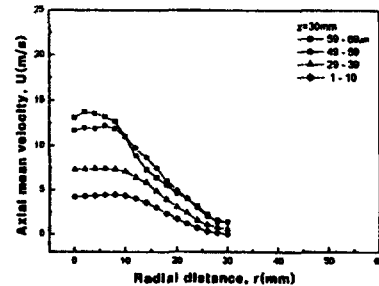


Fig.17 Distribution of measured axial velocity component of different droplets (Condition A)

Density Function)로 나타내었다. 축 단면 20mm, 50mm, 100mm에서 액적 크기 분포를 보면 11-20 $\mu$ m범위의 액적들은 20~28%정도이며, 10 $\mu$ m 이하의 작은 액적들은 60~70%로 가장 큰 비율로 유입이 되고 있음을 알 수 있다.

Fig.16은 조건 A의 z=20mm 단면의 유입지점에서 측정된 액적의 속도와 크기의 관계를 나타낸 그래프이다. 유입된 액적들을 보면 10 $\mu$ m이하의 작은 액적들의 축 방향 속도는 큰 액적들에 비해 음(-)의 속도를 가지는 액적의 수가 증가한다. 이것은 노즐선단의 빠른 기류와 입자 유속에 의해 큰 액적보다는 기류의 속도와 동적 평형을 잘 이루는 작은 입자의 수가 증가하기 때문이다. 따라서 Fig.15와 Fig.16의 그래프에서 유입되는 입자의 크기는 공기에 잘 편승되는 10 $\mu$ m이하의 작은 액적들임을 관찰할 수 있었다.

Fig.17은 액적의 크기에 따른 속도 분포를 통해 액적과 기류의 상대 속도를 나타낸 그래프이다. z=30mm 단면에서는 10 $\mu$ m이하의 액적들보다 큰 액적들의 속도가 크게 나타나고, z=100mm 단면에서는 액적의 크기에 관계없이 액적의 평균 축 방향 속도는 큰 차이가 없다. 이것은 관성력이 큰 액적들은 하류로 갈수록 운동량의 감소로 인해 기류의 속도에 잘 편승되는 10 $\mu$ m이하의 액적 속도와 비슷해지기 때문이다. 이처럼 10 $\mu$ m이하의 액적은 기류의 속도와 비슷하므로 분무 유동장의 중심부 영역에서는 액적의 속도가 기류의 속도보다 빠르며 하류로 갈수록 액적과 기류의 상대 속도는 감소함을 알 수 있다.

### 3.5 분무 구조의 모델

Fig.18은 2유체 분사 노즐 조건 A에 의해 형성된 분무 구조 및 내부 유동을 나타낸 그림이다. 분무 구조는 축 방향에 따라 크게 미립화 영역, 중심부 영역, 외주 영역으로 나누어진다.

미립화 영역은 액주가 미소한 액적으로 분열되어 미립화 공기에 의해 가속되는 영역이다. 실험 결과에서 약 20mm이내 부근이며, Fig.8에서 분무 액적의 조밀한 분포로 인해 축 방향 속도가 축 중심에서 잘 나타나지 않으며, 난류 운동 에너지와 와도장의 영향으로 주위 공기의 유입이

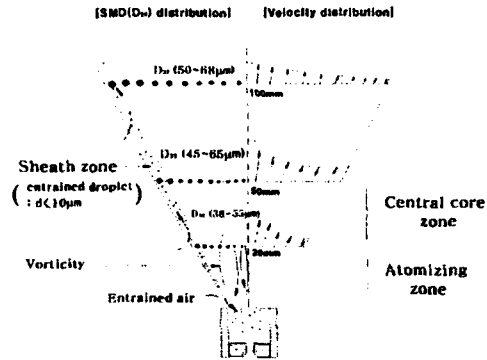


Fig.18 Model for internal structure of the twin-fluid air blast nozzle(Condition A)

가장 크게 일어나는 영역이다. 그리고, 축 방향 20mm단면에서 SMD(D<sub>32</sub>) 분포는 38~55 $\mu$ m범위의 운동량이 작은 액적들이 존재하였다.

중심부 영역은 노즐 출구에서 분사되어 운동량이 큰 입자로 구성된 영역이다. 이 영역은 Fig.8과 Fig.17의 z=20~50mm 단면에서 축 방향 속도 분포가 액적의 관성력에 크게 작용되는 영역으로 축 방향 50mm단면에서 SMD(D<sub>32</sub>)는 운동량이 큰 45~65 $\mu$ m범위의 액적들이 존재하였으며 z=100mm단면에서는 50~68 $\mu$ m범위의 액적들이 존재하였다.

외주 영역은 유입되는 주위 공기의 영향이 크게 작용하는 영역으로 Fig.14의 z=50mm 단면의 수밀도 분포 증가와 Fig.16의 그래프에서 10 $\mu$ m이하 액적들의 속도가 음의 값을 나타내고 있으므로 이 영역을 관찰할 수 있다. 이 영역은 운동량을 잃은 입자들이 분무의 빠른 기류에 편승되어 중심부로 이동하게 된다.

### 3.6 공기 유입

Fig.19은 각 조건에 대해서 식(1)에서 구한 국부적인 공기 유입율을 축 방향에 따라 도시하였다. 노즐 선단 부근에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 나타내는데 이것은 유입되는 지점에서 반경 거리에 비해 유입 입자의 반경 방향 속도가 크게



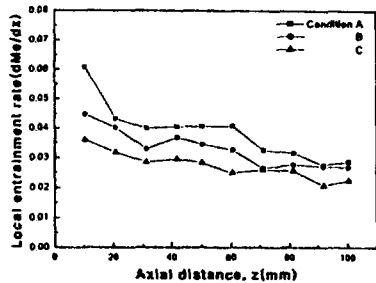


Fig.19 Variations of local entrainment rates with the axial distance

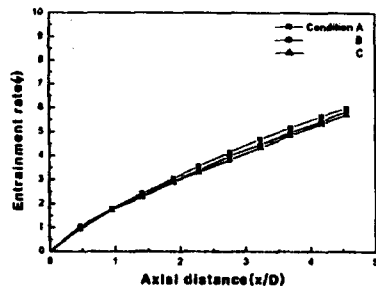


Fig.20 Variations of nondimensional entrainment rates with the axial distance(x/D)

나타나기 때문이다. 그러나, 80mm 이상 부근에서는 유입되는 속도가 너무 작기 때문에 각 조건에 상관없이 비슷해지는 경향을 나타낸다.

Fig.20은 각 조건에 대해서 축 방향(x/D)에 따라 무차원화시킨 공기 유입율을 나타낸 그래프이다. 축 방향에 따라 누적된 공기 유입율은 각 조건에 따라 선형적인 증가를 보이며, 축 거리 4.6(z=100mm) 지점에서 각 조건에 따라 누적된 유입 공기량(Me/Mn)은 미립화 공기량에 비해 5.7~6배까지 증가하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 PIV와 PDA 시스템을 이용하여 2유체 분무의 구조와 공기 유입 현상을 실험적으로 고찰하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분무 유동장을 통해 2유체 분무의 구조는 노즐선단 부근의 미립화 공기에 의해 미소한 액적이 가속되는 미립화 영역과 입자의 관성력이 크게 작용하는 중심부 영역 그리고, 유인되는 주위 공기의 영향이 큰 외주 영역으로 구성되어 있었다.
- (2) 국부적인 공기 유입율은 난류 운동 에너지와 와도장의 영향이 큰 노즐 선단 부근에서 가장 크게 나타나고, 축 방향 하류로 갈수록 감소하였다. 그러나, 축 방향 80mm 이상 부근에서는 공기 유입의 영향이 작으므로 거의 일정해지는 경향을 나타내었다.
- (3) 분무 경계 부근에서 일어나는 공기 유입은 미립화 공기량에 따라 축 방향으로 갈수록 선형적인 증가를 보였다. 그리고, 축 방향 100mm 지점까지 누적된 유입 공기량은 미립화 공기량에 비해 6배까지 증가하였다.

#### 참고문헌

- (1) Ricou, F.,P.,R. and Spalding, D. B., "Measurement of Entrainment by Axisymmetric Turbulent Jets," *Journal of Fluid Mech.*, Vol.51, pp.773~779, 1961
- (2) Briffa, F.E.J., and Dombrowski, N., "Entrainment of Air into a Liquid Spray," *AIChE Journal*, pp.708~717, 1966
- (3) MacGregor, S. A., "Air Entrainment in Spray Jets," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.12, pp.279~283, 1991
- (4) S. H. Park and H. D. Shin, "Measurements for Entrainments Characteristics of Swirling Jet," *Int. J. Heat Mass transfer*. Vol.36, No.16, pp.4009~4018, 1993
- (5) Sutherland, I. J., Sojka, P.E. and Plesniak, M. W., "Entrainment by ligament-Controlled Effervescent Atomizer-Produced Sprays," *Int. J. Multiphase Flow* Vol.23, No.5, pp.865~884, 1997
- (6) 김동일, 오상현, "2유체 분무 액적의 거동에 관한 실험 및 수치해석 연구", *한국액체미립화학회지*, 제3권, 제4호, pp.63~71, 1998