

PDPA를 이용한 노즐의 형상에 따른 분무 특성의 연구

A Study of Spray Characteristics for the Shape of Nozzle by Phase Doppler Particle Analyzer

황 승 식*, 이 회 상*, 김 중**, 이 봉 규**, 김 중 철*, 전 운 학***
S. S.Hwang, H. S. Lee, J. Kim, B. G. Lee, J. C. Kim, U. H. Chun

ABSTRACT

The skill that utilizes atomization of the liquid has been widely used in the field of industry and engineering. Though there are dozens of methods to make atomization, the pressure type injection nozzle is frequently used in washing of parts, pastourization and painting because it has relatively simple system.

This study is to reveal the characteristics of atomizing formed by three different types of the pressure type injection nozzle. We measured velocity and diameter of droplet to compare and analyze characteristic of each nozzle.

In case of velocity, atomization of hollow-cone nozzle is irregular than others and change of radial direction is especially large. Atomization of flat nozzle is nearly uniform. In case of diameter, atomization of hollow-cone nozzle is increased rapidly, as measurement point become more distant from the center of nozzle. Atomization of flat nozzle has the most fixed magnitude.

Accordingly, full-cone nozzle can be used irrespective of the form of subject and hollow-cone nozzle is proper to the occasion to spray large and smooth subject. Also, flat nozzle is proper to the occasion to spray a part of subject and long groove.

주요기술용어 : Pressure Type Injection Nozzle(압력식 분사노즐), Full-Cone Nozzle(원형 노즐), Hollow-Cone Nozzle(중공원형 노즐), Flat Nozzle(부채꼴형 노즐), Subject(피사체)

* 정회원, 국민대학교 기계공학과 대학원

** 국민대학교 기계공학과 대학원

*** 정회원, 국민대학교 기계공학과

1. 서 론

액체를 미립화하여 이용하는 기술은 제철, 화학공업, 연소의 분무 등 공업·공학분야에 다양하게 이용되고 있다. 미립화의 방법도 수 μm 이하의 미소입자인 에어로졸(Aerosol)에서 수백 μm 이상의 거대입자를 만드는 스프링클러(Sprinkler)까지 여러 가지 방법이 있다. 일반적으로 공업용으로는 입자직경이 수 μm 에서 수백 μm 의 분무를 발생시키는 분사노즐(Injection Nozzle, Atomizer)이 사용된다. 미립화를 만드는 분사노즐은 액체에 가하는 에너지 공급 방식에 따라 압력식, 회전식, 진동식, 2유체식 분사노즐 등으로 분류할 수 있다. 또한 분사노즐은 노즐의 형태에 따라 여러 가지의 종류가 있다. 이것들 가운데 압력식 분사노즐은 비교적 간단한 시스템으로 양호한 분무를 얻기 때문에 많이 이용되며 종류도 다양하다. 압력식 분사노즐은 일반적으로 부품의 세척, 각종 프레임 냉각, 예칭, 소독·살균, 도장 등에 많이 사용된다. 그러나 아직 우리나라는 이에 대한 구체적인 연구나 제작이 다른 나라에 비해 미약한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 압력식 분사노즐 가운데에서 대표적인 연속 분무에 사용되는 몇 가지 분사노즐을 택하여 각 분사노즐에 의한 분무의 입자직경분포와 속도분포 등을 측정하고, 분사노즐 구조와 형성된 분무와의 관계에 대하여 연구하였다. 본 연구가 산업용 압력식 분사노즐의 응용에 도움이 되기를 바란다.

2. 이 론

2.1 PDPA의 원리

분무 측정을 하는 경우 여러 가지의 방법을 사용하고 있지만, 크기가 수 μm 인 입자의 직경과 유속을 동시에 측정할 수 있는 위상도플러법을 일반적으로 사용한다. 그 중 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)장치는 LDV(Laser Doppler Velocity)장치¹⁻⁴⁾의 확장 형태로서 유체 분무 중 미립자의 속도뿐만 아니라 입자의 크기도 측정할 수 있는 장치이다.

레이저를 이용하여 분무입자의 크기를 측정하는 방법인 비지빌리티법⁵⁾, 산란강도법⁶⁾ 등은 피측정 유체의 주변환경과 광학계에 관련된 문제, 오차 등 때문에 극소적인 입자의 직경을 측정하는 것이 곤란했다.

F. Durst 교수가 1975년에 발표한 위상법은 원리적으로 우수했지만, 당시에는 전자부품의 기술력이 낮아서 이것을 실용화하기가 어려웠다. 그러나, 최근 전자기술의 발달로 실용화하는 것이 가능해졌다. F. Durst 교수는 LDV의 산란광에 대한 기초연구에서, 산란광의 간섭호 간격이 피측정체의 직경에 비례한다는 것과 측정점을 이동하면 산란광의 주기는 같지만 위상이 다르다는 것을 알았다. 이것이 위상도플러법의 시작이다.

일반적으로 광원과 관측기가 상대 운동을 하는 경우에는 도플러 효과에 의해 파장 및 주파수의 변화가 발생한다. PDPA는 이러한 원리를 이용한 것으로, 유체에 레이저 빔을 교차시키면 주축에 평행한 격자(fringe)를 갖는 타원형태의 측정체적이 형성되고, 이 부분을 지나는 입자에 의해 산란된 두 산란광의 주파수와 위상차에 의해 액적의 유속과 직경이 측정된다.

2.1.1 입자의 속도 측정

파장과 위상이 같은 2개의 레이저 빔을 교차시키면, Fig.1에 나타난 것과 같이 빔의 교차부에 간섭 줄무늬(Interference fringe)가 발생한다. 입자가 간섭 줄무늬의 밝은 부분에 있을 때에는 산란광이 강하고, 어두운 부분에 있을 때는 산란광이 약하게 되어, 이 산란광의 변화 주기에서 입자의 이동속도를 알 수 있다. Fig.1에서 간섭 줄무늬

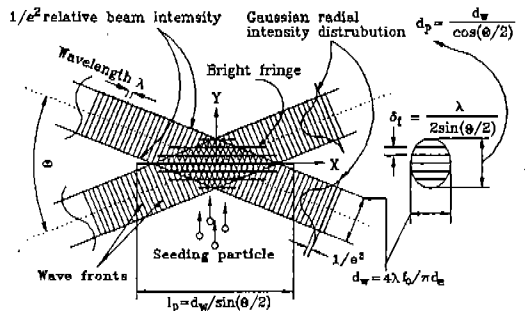


Fig.1 Fringe model of PDPA

간격을 δ_j 라 하고 산란광의 주파수 변화를 f 로 하면, 간섭 줄무늬의 수직 방향(Y방향) 입자의 속도 성분 U 를 다음 식으로 구할 수 있다.⁷⁾

$$U = f \cdot \delta_j \quad (1)$$

여기서, 빔의 교차각을 θ , 레이저 파장을 λ 라 하면, 간섭 줄무늬 간격 δ_j 는

$$\delta_j = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

Y방향 입자의 속도 성분 U 는

$$U = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} j \quad (3)$$

이다. 이 때 θ , λ 를 일정하게 두고 도플러 주파수 f 를 측정하면 입자 속도를 구할 수 있다. 또, 빔이 교차하는 부분에서는 측정 체적이 생기는데, 이 측정 체적의 길이를 l_b 라 하고, 높이를 d_b , 폭을 d_w 로 표시하면 다음과 같다.

$$l_b = \frac{d_w}{\sin(\theta/2)}, \quad d_b = \frac{d_w}{\cos(\theta/2)}, \quad d_w = \frac{4\lambda f_0}{\pi d_e} \quad (4)$$

그리고, 측정 체적 V_p 를 이들의 곱으로써 나타낼 수 있다.⁷⁾

$$V_p = \frac{\pi}{6} (l_b \cdot d_b \cdot d_w) \quad (5)$$

여기서, θ 는 빔사이의 교차각이며, f_0 는 렌즈의 초점 거리, λ 는 레이저의 파장, d_e 는 렌즈에서의 빛의 직경이다. 측정 체적은 초점 거리에 의해서 변화하게 된다. 그러므로 초점 거리가 길어지면 렌즈에서부터 나온 빛의 직경은 큰 측정 체적을 만들 수 있다.

두 개의 빔의 교차점에서 만들어진 간섭 줄무

늬의 형상은 움직임이 없다. 그러므로, 변조된 빛의 주파수는 입자 속도에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이러한 불분명한 문제들을 해결하기 위해서는 투사되는 빛에서 약간의 주파수 변이가 교차하는 두 개의 빔중 어느 한쪽에 있어야 한다. 측정 체적 속을 이동하는 입자는 빛을 분산시키는데, 여기서 변조 주파수(Modulation frequency)와 변이 주파수(Shift frequency)의 차이가 속도에 비례하게 된다. 따라서 간섭 줄무늬 이동에서 반대 방향의 이동은 변조 주파수를 증가시키는 반면에 같은 방향의 이동은 변조 주파수를 감소시킨다. 정확한 속도 측정의 역학적 범위는 변이 주파수에 의해 결정되고, PDPA장치에서의 변이 주파수는 변조 주파수를 Bragg cell을 이용한 40MHz의 주파수 변이에 의해 생성된다.

측정된 속도는 신호 처리기에서 계산이 된 후, 모두 합산하여 평균값과 표준 편차로 나타내어지고, 이것은 히스토그램 형태로 보여지게 된다. 이때의 평균값과 표준 편차의 식은 다음과 같다.⁷⁾

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}} \quad (6)$$

여기서, \bar{U} 는 평균 속도를 나타내며, U_i 는 임의의 입자 속도, n 은 측정된 입자 개수를 나타낸다.

2.1.2 입자의 크기 측정

PDPA장치를 이용한 입자의 크기 측정은 3개의 수광기 검출기에서 받아들인 신호의 위상차를 비교하여 액적 크기를 측정한다는 것이 특징으로, 측정 원리는 간섭 줄무늬 모델(Fringe model)을 이용해 설명할 수 있다(Fig.2). 측정 체적에서 간섭 줄무늬가 광선이라 생각하면, 그것들은 측정 체적을 통과하는 투명한 구형 액적이 렌즈의 포커싱(Focusing)작용을 하여 공간으로 투영된다. 고정된 광검출기에서는 도플러 주파수로 인해 발생하는 밝고 어두운 간섭 줄무늬가 검출된다. 이때 두 개의 검출기 U_1-U_2 는 같은 주파수를 가지지만, 검출기 사이의 거리 S' 와 투영된 Fringe 사이의 거리 S 의 비에 비례하는 상대적인 위상차를 가지게 된다. 측정 체적에서 먼 거리에 투영된 Fringe

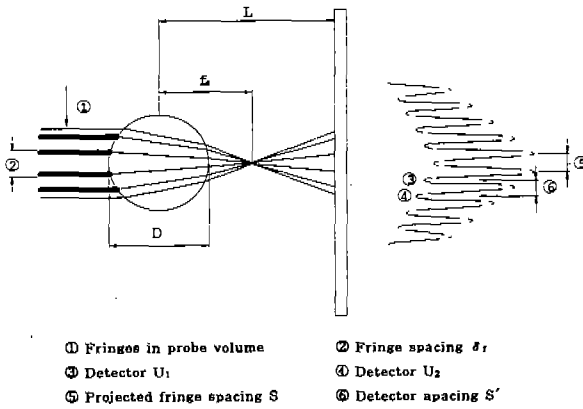


Fig.2 Refracted fringe image and signal phase difference

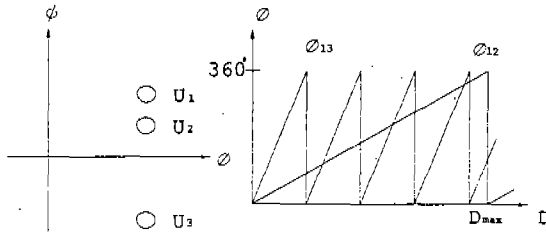


Fig.3 Detector position and phase responses

사이의 거리 S 는 액적의 초점 거리 f_2 에 반비례하고, 투명하고 구형인 액적에 대한 이 초점 거리가 액적 직경 D 에 비례한다. 따라서, 측정된 위상차 ϕ 가 액적 직경에 비례하게 된다.

Fig.3은 검출기 위치(Detector position)와 위상 응답(Phase responses)과의 관계를 나타내고 있다. 검출기의 거리가 넓은 U_1-U_3 는 위상차 ϕ_{13} 를 주고, 그것은 액적 직경에 따라 빠르게 반응하며 고해상도의 측정을 가능하게 한다. 그러나, 360° 보다 작은 위상차를 보이는 액적에 대해서는 보다 정확한 측정값을 얻을 수 있지만, 측정 중의 작은 입자는 큰 입자와 구별할 수 없어서 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 고해상도를 유지하면서 부정확한 문제(큰 입자에 의해 작은 입자가 검출되지 않는 상태-느리게 변하는 위상)를 해결하기 위해서는, 3개의 검출기가 필요하다. 가깝게 있는 검출기 U_1-U_2 는 느린 위상차 ϕ_{12} 를 얻으며, 검출기 U_1-U_3 으로부터의 측정에서 생기는 문제를

해결한다. 검출기 U_2-U_3 은 자기 안정화와 검출 데이터의 검정 확인에 사용된다.

위상 변이와 입자 직경 사이의 정확한 관계를 계산하기 위해서는 빛이 분산하는 유형을 고려하여야 한다. 빛의 분산 과정을 광선 광학(Ray optics)에 의해 반사, 굴절, 2차 굴절, 진행 방향으로의 회절 등으로 나눌 수 있다. 다양하게 분산된 광선의 광학적 검출의 길이를 고려하므로써 주어진 광학적 조건에 대한 위상 대 지름 곡선을 산출할 수 있다.

측정된 직경은 데이터 처리 시스템에서 산술적인 평균 직경(D10)과 면적에 대한 체적비(Sauter 평균 직경-D32)로 계산이 된다.

$$D10 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad D32 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (7)$$

여기에서 d_i 는 입자의 입자 직경이며, n 는 측정된 입자 개수이다. D10으로 측정된 모든 액적의 직경은 가중치 없이 계산이 되므로 반드시 분포의 중심에 위치하지는 않는다. 그러나 D32에서는 분포가 높은 부분 즉, 많이 측정된 부분에 가중치를 더함으로써 액적의 직경이 결정되기 때문에 일반적으로 사용되는 입자의 크기는 D32가 많이 사용되고 있다.

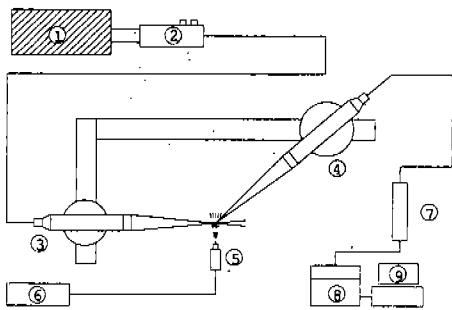
3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

실험 장치는 유체입자의 속도와 크기를 측정할 수 있는 측정 장치(PDPA 장치)와 노즐을 연결한 분사 장치로 나누어진다. 실험 장치의 개략도는 Fig.4에 나타내었다.

3.1.1 PDPA 장치

PDPA 장치는 레이저 부분, 광학 부분, 신호 처리 부분, 데이터 처리 부분으로 구성되어 있다. 레이저는 Ar-ion Laser가 사용된다. PDPA 측정 시에는 공간 분해 능력 및 Data Rate를 증가시키기 위하여 Gaussian 모드가 필요하고, 광학 부분은 광 분리기(Beam splitter), 송광기(Trans-



- ① Laser source
- ② Fiber drive
- ③ Transmitter
- ④ Receiver
- ⑤ Nozzle
- ⑥ Water source
- ⑦ Receiver modu
- ⑧ Signal proces
- ⑨ Computer

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

mitter), 수광기(Receiver)로 구성되어 있으며, 초점거리 300mm의 focusing lens를 사용하였다. 광학 부분의 조합에 의하여 레이저가 측정하려는 구역으로 들어가게 되며, 측정하려는 신호를 정확히 받을 수 있게 된다. 송광기에서 보내어진 4개의 레이저 빔은 한 초점에서 모이게 되며, 이곳에 측정 체적이 생기게 된다. 측정 체적에서 측정 각도를 30°방향(일반적으로 30°~45° 사이의 각도를 둔다)으로 수광기(Receiver)를 설치하여 도플러 격발(Doppler burst) 신호를 받게 된다. 광원은 파장이 514.5nm(Green beam), 488.0nm(Blue beam), 476.5nm(Violet beam)인 Ar-ion Laser(최대 출력 5W)를 사용하였으며, 실험시 사용 출력은 2W로 하였다. 측정에 사용한 PDPA장치는 2차원 측정장비로서 녹색빔과 청색빔만을 사용하였다. 레이저 부분에서 생성된 레이저는 광학 부분으로 들어가게 되며, 2개의 빔은 각각 2개(녹색빔, 청색빔 각각 1쌍)로 분리된다. 여기서 각각 한 개의 빔에 40MHz의 변조를 하여 액적의 이동 방향을 측정하였다. RSA(Real-time signal analyzer)에서 처리된 신호는 컴퓨터로 보내지고 여기서 계산이 이루어지게 된다. 계산된 수치는 관측자가 히스토그램 형태 또는 수치적 형태로 모니터를 통해 볼 수 있게 된다. 그리고 오실로스코프(Oscilloscope)를 신호 처리기에 설치하여, 여기서 측정된 파형을 관측할 수 있다. 오실로스코프에서 측정되는 신호는 PDPA 장치의 RSA상의

Table 1 Test nozzles & specifications

Nozzle	Model	Pressure (MPa)	Orifice Dia. (mm)	Spray angle
Full-cone	1/4HH6.5	0.2	2.3	60°
Hollow-cone	1/4B3		2.4	60°
Flat	H1/4U6515		2.4	60°

* 한미노즐(주) 제원

격발 조건을 조정하는데 사용한다.

3.1.2 분사 장치

본 실험에 사용된 분사 장치는 사용유체가 파이프를 통해 노즐로 분무되도록 하였고, 그 사이에 압력계지와 밸브를 설치하여 압력을 일정하게 유지하도록 하였다.

노즐은 사용하는 유체의 특성, 압력, 분사각도, 환경조건, 재질 등에 따라 여러 가지가 있으나, 여기서는 대표적인 압력식 분사 노즐인 Full-cone 노즐(원형 노즐), Hollow-cone 노즐(중공원형 노즐), Flat 노즐(부채꼴형 노즐)을 사용하였다.(Table 1 참조)

3.2 실험 방법

본 실험은 PDPA 장치를 이용하여 산업용으로 많이 사용되는 압력식 분사 노즐이 형상에 따라 어떠한 분무 특성을 갖는지를 알아보고자 하는 것이다.

노즐은 대표적인 형상인 Full-cone 노즐, Hollow-cone 노즐, Flat 노즐의 3가지를 선정하여 실험하였다. 분사압력은 최적의 압력 크기인 0.2MPa⁸⁾로 일정하게 유지하였고, 유체는 물(수돗물)을 사용하였다. 노즐의 위치는 위에서 아래로 분사되도록 하였다. 분사각도는 60°로 하였고, 노즐 중심을 기준으로 해서 서로 대칭적으로 분무되므로 분무된 노즐은 중심에서 한쪽 방향(30°)만 측정하였다. Fig.5와 같이 아래로 분사되는 방향을 Z축, 분사되는 반경의 한쪽 방향을 X축으로 정하였고, 노즐 중심에서 Z축으로 멀어질수록 노즐의 분사 범위는 반경 방향으로 점점 커지므로 측정지점도 증가시켜 측정하였다.(반경 방향 측정지점은 Z=100은 0~800mm, Z=200은 0~100mm, Z=300

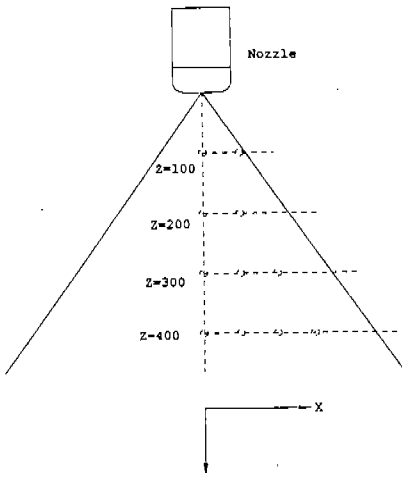


Fig.5 Measurement points of experiment

은 0~160mm, Z=400은 0~200mm의 범위까지 측정하였다)

신호처리에 있어서 격발(burst)과 고전압(high voltage)를 조절하여 적정값을 가진 상태에서 실험을 하고, 각 지점에서의 측정이 끝날 때마다 데이터를 컴퓨터에 저장하도록 했다.

4. 실험 결과 및 고찰

3가지 노즐(Full-cone, Hollow-cone, Flat)에서 분사되는 유체 입자의 분무 특성을 알아보고, 서로 비교하기 위하여 크게 3가지(입자의 속도와 크기, 분포)를 분석하여 결과를 도출하였다.

4.1 입자의 속도

4.1.1 Z축 방향 속도

각 노즐(Full-cone, Hollow-cone, Flat)에 따른 Z축 방향 속도분포를 Fig.6~Fig.8에 나타냈다. 그림의 가로축은 노즐이 분사되는 반경 방향의 측정거리이고, 그림의 세로축은 노즐의 수직방향 평균속도 즉, Z축 방향 평균속도이다. 이 때 PDPA장치의 레이저에 의해 생기는 측정체적의 위치인 Z=100, Z=200, Z=300, Z=400의 4가지 경우를 동시에 나타냈다.

Fig.6은 노즐이 Full-cone인 경우의 그림이다. 이 노즐의 경우 분무가 원추형으로 속이 짝 차게

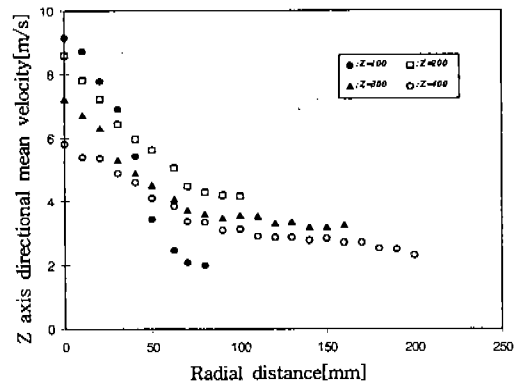


Fig.6 Distribution of Z axis directional mean velocity at Full-cone nozzle

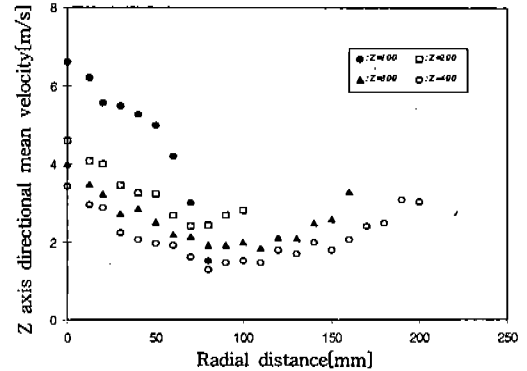


Fig.7 Distribution of Z axis directional mean velocity at Hollow-cone nozzle

분무되는 형태이다. 대체로 이 노즐은 속도가 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 측정체적의 위치가 노즐 중심에서 아래로 멀어질수록(Z=100에서 Z=400으로 갈수록) 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. Z=100의 경우는 반경 방향의 분사 범위가 40~50mm 정도이므로 이 거리를 벗어난 경우는 속도가 급격히 감소하고 있다. 그 밖의 경우에는 초기 속도가 대체로 6~9m/s에서 시작하여 3~4m/s로 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig.7은 노즐이 Hollow-cone인 경우의 그림이다. 이 노즐의 경우는 Full-cone 노즐의 경우와 같이 원추형이지만 속이 빈 상태로 분무되는 형태의 노즐이다. 이 노즐은 Full-cone 노즐과는 달리 처음에는 속도가 감소하다가 다시 약간 증가

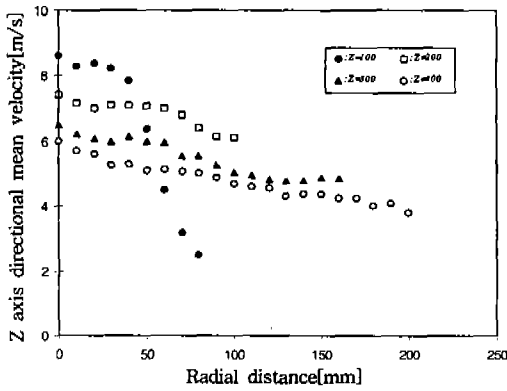


Fig.8 Distribution of Z axis directional mean velocity at flat nozzle

하는 경향을 보이고 있다. 이것은 노즐 형상이 노즐 안에서부터 와류를 형성하고, 이로 인해 가운데가 비어서 분무되기 때문이다. 분무가 되지만, 중간부분은 와류로 인하여 입자들이 속도도 약하고 불규칙하게 움직이므로 이러한 현상이 발생하는 것으로 보인다. Z=100인 경우는 다른 경우와 달리 속도가 다시 증가하지 않는다. 이것은, 측정 지점의 위치가 노즐 중심과 가까우므로 아직 분무가 제대로 이루어지지 않기 때문이다.

Fig.8은 노즐이 Flat인 경우의 그림이다. 이 노즐의 경우는 분무가 부채꼴 모양으로 분사된다. 따라서 3차원적이러기 보다는 2차원적인 분무형태이다. 이 노즐은 Z=100인 경우를 제외하고는 속도 분포의 감소폭이 매우 적다. Z=100인 경우는 반경 방향의 분사범위가 40~50mm까지는 속도가 거의 비슷하고, 그 이후에는 속도가 급격히 감소하고 있다. 그 외의 경우는 초기 속도가 6~8m/s에서 시작하여 4~6m/s로 매우 완만하게 감소하고 있다. 이것은 분무 형태가 2차원적이므로 분사되는 힘이 중심뿐만 아니라 60°로 퍼지는 부분까지 다른 노즐에 비해 비교적 고르기 때문에 속도가 다른 노즐에 비해 비교적 적게 감소하는 것으로 보인다.

이번에는 측정체적의 위치가 Z=100, Z=200, Z=300, Z=400인 4가지 경우에 대한 속도분포를 Fig.9~Fig.12에 나타냈다. 그림의 가로축은 노즐이 분사되는 반경 방향의 측정거리이고, 그림의 세로축은 노즐의 수직방향 평균속도 즉, Z축 방향

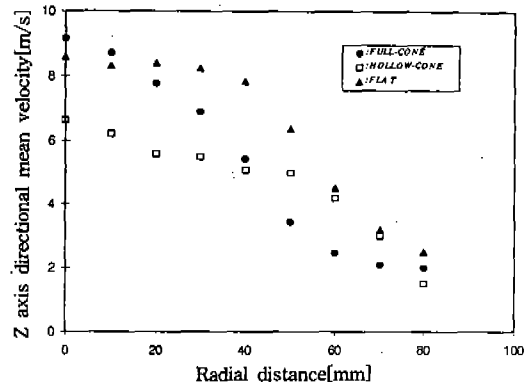


Fig.9 Distribution of Z axis directional mean velocity at distance Z=100

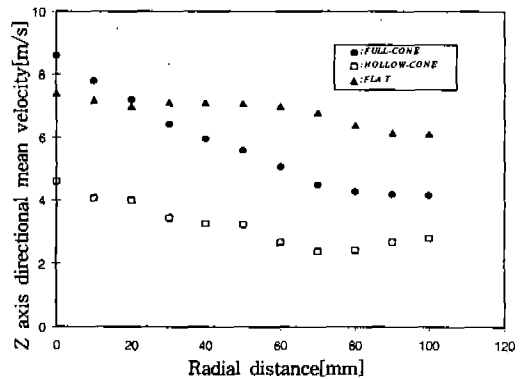


Fig.10 Distribution of Z axis directional mean velocity at distance z=200

평균속도이다. 이 때 3가지 노즐의 분포를 동시에 나타냈다.

Fig.9는 측정체적의 위치가 Z=100인 경우이다. 3개 노즐 모두 측정체적이 노즐 앞부분에 위치하기 때문에 분무를 형성하는 범위를 벗어난 반경 방향의 측정거리 40~50mm 이후에서는 급격히 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 다만 Hollow-cone 노즐은 반경 방향의 측정거리 40~50mm 이전에서 5~6m/s로 다른 노즐에 비해 약간 작은 속도분포를 보이고 있다.

Fig.10은 측정체적의 위치가 Z=200인 경우이다. Full-cone 노즐은 속도가 감소하고 있고, Hollow-cone 노즐은 감소하다가 반경 방향 측정거리가 80~100mm 지점에서 다시 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이에 비해 Flat 노즐은 속도가

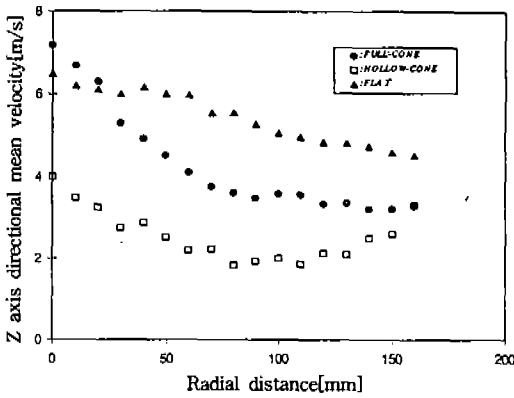


Fig.11 Distribution of Z axis directional mean velocity at distance Z=300

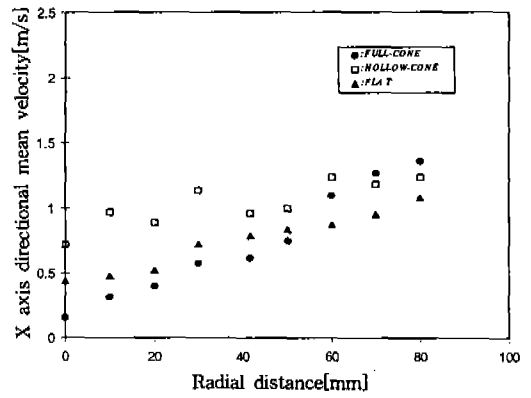


Fig.13 Distribution of X axis directional mean velocity at distance Z=100

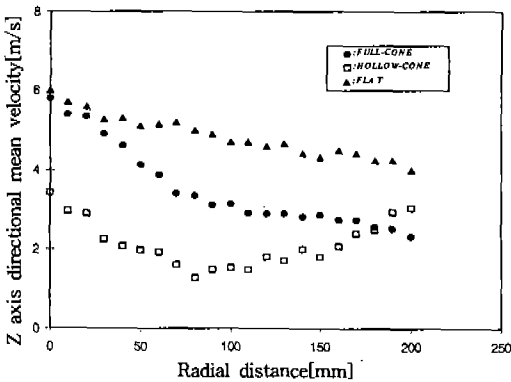


Fig.12 Distribution of Z axis directional mean velocity at distance Z=400

거의 일정하다. 그리고 Full-cone 노즐과 Flat 노즐이 Hollow-cone 노즐보다 속도분포가 전반적으로 2~4m/s 정도 더 크다. 이것은 Hollow-cone 노즐이 와류를 형성시키므로 이 와류의 영향으로 중간부분의 입자 속도가 다른 노즐에 비하여 작은 것으로 보인다.

Fig.11은 측정체적의 위치가 Z=300인 경우이다. 측정체적이 Z=200인 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. Full-cone 노즐은 7m/s에서 시작하여 3~4m/s로 감소하고 있고, Flat 노즐은 7m/s에서 5m/s로 감소폭이 매우 적다. 또한 Hollow-cone 노즐은 낮은 속도대(2~4m/s)에서 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig.12는 측정체적의 위치가 Z=400인 경우이

다. 이 경우도 Z=200, Z=300의 경우와 비슷한 속도분포 경향을 나타내고 있다. Full-cone 노즐은 6m/s에서 시작하여 2m/s로 감소하고 있고, Flat 노즐은 6m/s에서 5m/s로 거의 일정한 속도분포를 보이고 있다. Flat 노즐은 이러한 현상은 앞부분에서도 언급했듯이 부채꼴모양의 2차원적인 분무 형태이므로 분사되는 힘이 중심에서 60°로 퍼지는 부분까지 비슷한 힘으로 분사된다는 것을 의미한다. 따라서 다른 노즐에 비해 노즐 중심에서 반경 방향으로 멀리 떨어져도 비교적 일정한 속도분포를 나타내는 것이다. Hollow-cone 노즐은 다른 노즐에 비해 약간 불규칙적으로 감소하다가 다시 증가하고 있다.

4.1.2 X축 방향 속도

측정체적의 위치가 Z=100, Z=400인 2가지 경우에 대한 X축 방향 속도분포를 Fig.13, Fig.14에 나타냈다. Z=200과 Z=300인 경우는 Z=400인 경우와 유사하므로 Z=400인 경우만 대표적으로 나타냈다. 그림의 가로축은 노즐이 분사되는 반경 방향의 측정거리이고, 그림의 세로축은 노즐의 X축 방향 평균속도이다. 이 때 3가지 노즐의 분포를 동시에 나타냈다.

Fig.13은 측정체적의 위치가 Z=100인 경우이다. 3개의 노즐 모두 속도가 대체로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 측정체적이 노즐 중심에서 반경 방향으로 갈수록 분사각도가 커지므로 X축 방향 속도가 약간씩 증가하는 것이다. Full-cone 노즐과 Flat 노즐은 0~0.5m/s의 속도에서 시작

하여 1~1.5m/s의 속도까지 반경 방향으로 측정 체적이 이동함에 따라 거의 일정하게 증가하고 있다. 그러나 Hollow-cone 노즐의 경우 약간의 증가추세를 보이고 있으나, 그 속도분포가 매우 불규칙하게 나타나고 있다.

Fig.14는 측정체적의 위치가 Z=400인 경우이다. 이것도 Z=100인 경우와 마찬가지로 속도가 점점 증가하나, Z축 방향 속도처럼 크지는 않고 0~2.5m/s 범위에서 증가하고 있다. Full-cone 노즐과 Flat 노즐은 0~0.3m/s의 속도에서 시작하여 1.5~2.5m/s의 속도까지 반경 방향으로 측정 체적이 이동함에 따라 거의 일정하게 증가하고 있다. Hollow-cone 노즐의 경우는 반경 방향의 측정 위치가 150mm까지는 속도가 불규칙하게 변하고 있지만, 그 이후부터는 점점 증가하고 있다. 이것은 앞부분에서 언급했듯이 노즐 안에서 와류를 형성시키기 때문에 속이 빈 원추형으로 분무되므로, 입자들이 원추의 원주부분에 집중되고 나머지 부분에서는 입자들이 불규칙하게 움직이기 때문으로 여겨진다.

4.1.3 속도의 벡터성분

측정체적의 위치가 Z=100, Z=400인 2가지 경우에 대한 속도벡터를 Fig.15에 나타냈다. 이 그림은 노즐의 Z축 방향 속도 성분과 X축 방향 속도 성분을 합하여 그 값을 벡터 형태(크기와 방향)로 표시한 것이다. 각 벡터 성분은 각 측정 지점에서 측정 거리만큼 등분하여 같은 비율로 표시

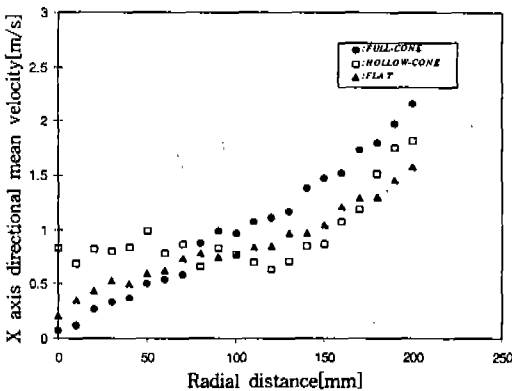


Fig.14 Distribution of X axis directional mean velocity at distance Z=400

하여 나타냈다. Z=200과 Z=300인 경우는 Z=400인 경우와 유사하므로 Z=400인 경우만 대표적으로 나타냈다.

세 가지 노즐 모두 Z=400인 경우가 Z=100인 경우보다 속도 벡터의 크기는 작고, 측정범위 즉, 분무범위는 넓다. Z=100인 경우는 노즐 중심과 가깝기 때문에 아직 분무 패턴이 제대로 이루어지지 않은 상태에서 분무되므로 세 가지 노즐의 차이를 알 수 없지만, Z=400인 경우에서 세 가지 노즐의 차이가 확연하게 드러나고 있다. Z=400인 경우, Full-cone 노즐은 속도 벡터의 크기가 측정 지점이 반경 방향으로 이동할수록 일정하게 감소하고 있고, Hollow-cone 노즐은 속도가 감소하다가 중간 지점에서 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 와류의 영향 때문이다. Flat 노즐은 속도벡터의 크기가 감소하고 있지만, Full-cone 노즐에 비하여 감소 폭이 적다는 것을 알 수 있다.

4.2 입자의 크기

측정체적의 위치가 Z=100, Z=400인 2가지

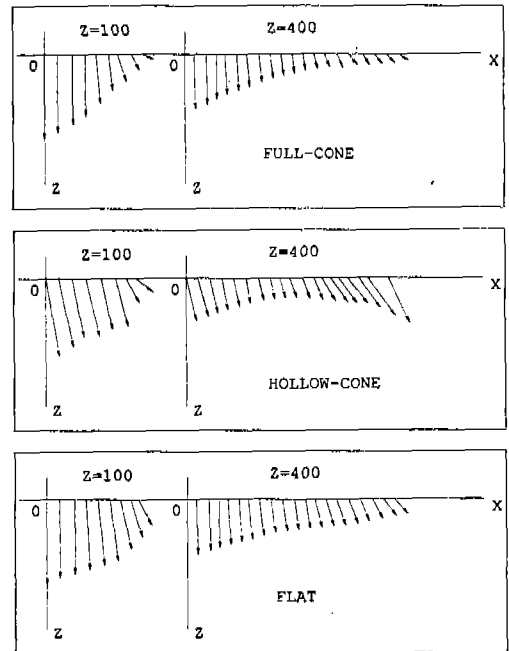


Fig.15 Velocity vector along radial distance

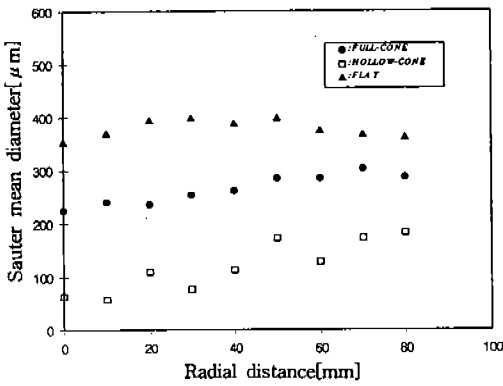


Fig.16 Distribution of sauter mean diameter at distance Z=100

경우에 대한 Sauter 평균직경의 분포를 Fig.16, Fig.17에 나타냈다. 그림의 가로축은 노즐이 분사되는 반경 방향의 측정거리이고, 그림의 세로축은 노즐의 Sauter 평균직경이다. 이 때 3가지 노즐의 분포를 동시에 나타냈다.

Fig.16은 측정체적의 위치가 Z=100인 경우이다. 전반적으로 3개의 노즐 모두 측정체적의 위치가 노즐 중심에서 반경 방향으로 멀어질수록 입자의 크기가 증가하고 있다. 이것은 측정체적의 위치가 반경 방향으로 갈수록 분사압력이 약해지므로, 입자들끼리 서로 합쳐져서 입자 크기가 커지기 때문이다. Flat 노즐은 3개의 노즐 가운데 가장 입자 크기가 크다. 노즐 중심 쪽의 입자 크기는 360~400 μm이다. Full-cone 노즐은 노즐 중심 쪽의 입자 크기는 200~220 μm이고, 측정거리가 반경 방향으로 멀어질수록 증가하여 250~260 μm까지 측정된다. Hollow-cone 노즐은 가장 낮은 입자 크기 분포를 보이고 있다. 또한 입자 크기가 증가하고 있기는 하지만, 다소 불규칙한 경향이 있다. 입자 크기는 80~90 μm에서 160~170 μm까지 증가하고 있다.

Fig.17은 측정체적의 위치가 Z=400인 경우이다. Z=100인 경우와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 3개의 노즐이 좀 더 확실한 차이를 보이고 있다. Flat 노즐은 거의 비슷한 입자 크기 분포를 나타내고 있고, 다른 노즐보다 입자 크기도 크다. 대체로 입자 크기가 390~420 μm이다. Full-cone 노즐은 초기 입자 크기가 180~200 μm이고, 측

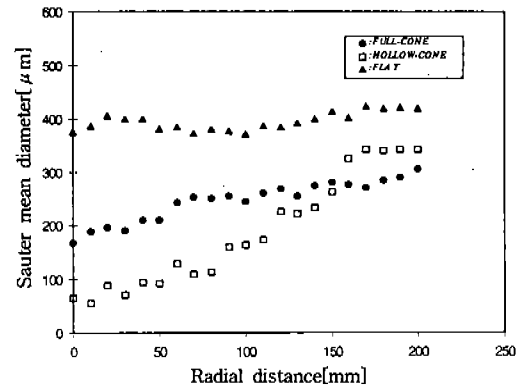


Fig.17 Distribution of sauter mean diameter at distance Z=400

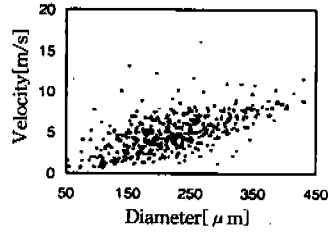
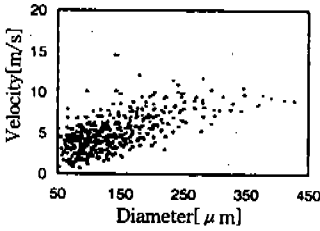
정위치가 반경 방향으로 이동할수록 점점 증가하여 290~300 μm까지 측정되고 있다. Hollow-cone 노즐은 입자 크기가 가장 급격하게 증가하고 있고, 측정위치가 0~160mm까지는 불규칙하게 증가하는 분포를 보이고 있다. 이것은 Hollow-cone 노즐의 경우 가운데가 비어서 분무되므로 분무의 외각지역 즉, 원추형 분무의 원주부분은 분사노즐에서 직접 비산되는 비교적 큰 입자가 모여 있고, 중심부는 분사흐름에 실린 비교적 작은 입자 덩어리들이 모여 있으므로 입자의 크기가 급격히 증가하는 것으로 볼 수 있고, 그 중간 부분은 직경 분사된 입자보다는 입자끼리 서로 합쳐지거나 분리된, 불규칙하게 분사되는 입자들로 인하여 다소 불규칙한 입자 크기 분포를 나타내는 것으로 보인다.

4.3 입자의 분포

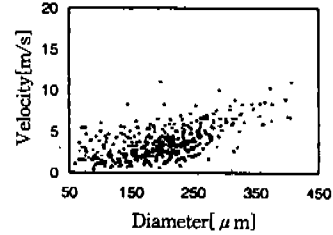
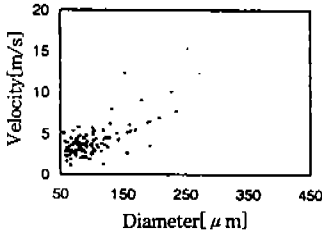
측정체적의 위치가 Z=400인 경우가 다른 경우에 비해 분무 형태가 명확하게 나타났으므로, 이때의 분포를 대표적으로 분석했다. Fig.18은 노즐에서 분무되는 입자의 Z축 방향 속도와 직경을 동시에 나타낸 그림이다. 그림의 가로축은 분무 입자의 직경이고, 세로축은 분무 입자의 Z축 방향 속도이다. 각 노즐의 분포를 반경 방향 측정지점 중에서 2가지 경우 즉, 분무의 중심부인 0mm 지점과 분무의 바깥쪽 지점인 150mm 지점을 선택하여 비교했다.

Full-cone 노즐의 경우는 0mm 지점에서는 입

<Full-cone>



<Hollow-cone>



<Flat>

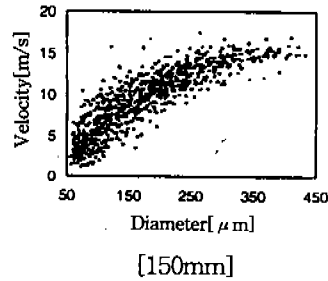
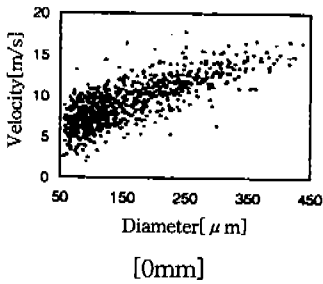


Fig.18 Distribution of Z axis directional velocity & diameter at distance Z=400

자가 작은 부분에 많이 집중되어 있고, 150mm 지점에서는 입자가 중간 부분(150~250 μm)에 고르게 분포하고 있다.

Hollow-cone 노즐의 경우에는 0mm 지점에서는 측정되는 입자들도 적고 입자 크기도 작은 부분에 집중되어 있으나, 150mm 지점에서는 입자의 크기가 중간 부분(150~250 μm)에 고르게 분포하고 있다.

Flat 노즐의 경우는 0mm 지점과 150mm 지점이 모두 다른 노즐에 비해 고르게 분포하고 있고, 측정된 입자의 수도 많은 편이다. 특히 0mm 지점에서 다른 노즐은 입자가 작은 곳에 분포하는

데 비해 Flat 노즐은 고르게 분포하고 있다. 이러한 현상은 Flat 노즐이 다른 노즐에 비해 균일한 속도로 고르게 분무된다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 형상이 다른 세 가지의 압력식 분사 노즐에 의해 형성되는 분무의 특성을 밝히기 위한 것이 목적으로, 입자의 공간위치에서 분무 입자의 속도와 직경을 동시에 측정하였다. 이 측정값들을 통해 각 분사노즐의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무 입자의 속도에 있어서 세 가지 노즐 모두 Z축 방향의 속도는 $9\text{m/s} \sim 2\text{m/s}$ 범위에 있고, X축 방향의 속도는 $0\text{m/s} \sim 2.5\text{m/s}$ 범위에 있다. Full-cone 노즐에서는 Z축 방향의 속도는 일정하게 감소하고 있고, X축 방향의 속도는 약간씩 증가하고 있다. Hollow-cone 노즐에서는 분무 외각부를 제외한 분무 중심부에서는 불규칙한 속도를 보이고 있으며, 특히 X축 방향(반경 방향)의 변화가 크다. 또한 Flat 노즐에서는 중심부에서 주변으로 거의 일정하게 분무되고 있다.
- 2) Sauter 평균직경은 세 가지 노즐 모두 분무 중심부에서 주변으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. Full-cone 노즐은 $180 \sim 260 \mu\text{m}$ 로 증가하고 있고, Hollow-cone 노즐의 경우 와류의 영향으로 분무 중심부에서 주변으로 갈수록 불규칙적으로 급격히 증가하고 있다. ($80 \sim 320 \mu\text{m}$) Flat 노즐의 경우 입자의 크기가 $360 \sim 420 \mu\text{m}$ 로 가장 일정하다.
- 3) 입자의 분포는 분무 중심부에서는 입자가 작은 부분에 많이 집중되어 있다. Hollow-cone 노즐의 경우 분무 중심부와 외각부의 차이가 크고, Flat 노즐의 경우는 각 측정위치에서 입자의 속도와 크기가 가장 고르게 분무되고 있다.
- 4) Full-cone 노즐은 세 가지 노즐 중에서 가장 분무범위가 넓고 양호하기 때문에, 피사체의 모양이나 크기 등 형태에 큰 영향을 받지 않고 분무시킬 수 있다. 이에 비해, Hollow-cone 노즐은 속이 빈 상태로 분무되므로,

피사체의 크기가 크고 큰 굴곡이 없는 형태에 적용하는 것이 좋다. 그리고 Flat 노즐은 2차원적으로 길게 분무되므로, 피사체를 부분적으로 분무시킬 필요가 있는 곳이나 길게 흡이 파인 곳에 사용하는 것이 좋다.

참 고 문 헌

1. Adrian, R. et al. (eds.): "Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics", Springer-Verlag, 1989.
2. Adrian, R. et al. (eds.): "Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics", Springer-Verlag, 1991.
3. 竹内秀明: "LSIプロセスとエアロゾル研究", 8(1), 4-9, 1993.
4. Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J. H.: "Principle and Practice of Laser-Doppler Anemometry", Academic Press, 1976.
5. Farmer, W. M.: Applied Optics, 11(11), 2603, 1972.
6. 前田昌信, 菱田公一, 中村公泰, 猪飼 茂: "混相流中の微粒子の粒径, 速度および濃度の非接触測定", 日本機械學會論文集B編, 48(425), 69, 1982.
7. Michael houser: "PDPA manual & report", Aerometrics-우주하이테크, pp. 2-1~6-5, 1995.
8. 황승식: "PDPA를 이용한 도장의 최적 조건에 관한 실험적 연구", 국민대학교 대학원, pp. 25~71, 1997.