

## PDPA와 화상처리법(PMAS)의 비교를 위한 분무 측정 실험

An experiment for comparison of an imaging measurement technique  
for a water spray with a phase-Doppler measurement technique

정종수, 이교우\*

J. Jurng and G.-W. Lee

### ABSTRACT

Two measurement techniques of droplet sizing, an imaging technique(PMAS) and a phase-Doppler measurement technique (PDPA), have been compared using a water spray from a pressurized-type swirl nozzle. The result showed that SMD measured by PDPA was larger than that measured by PMAS by about 40 %. Such discrepancy of SMD could be explained by the fact that the light signal intensity used by PDPA can be biased towards larger particles. On the other hand, there could be lower opportunity to capture the images of the large particles with PMAS, since the large particles could be out of sight due to their high speed.

주요기술용어: Phase-Doppler Measurement Technique (위상도플러법), Imaging Measurement Technique (화상처리법), Water Spray (수분무), SMD (Sauter평균입경), Number Density (수밀도), Spray Nozzle (분무노즐)

### 1. 서 론

액체 분무의 특성을 평가하기 위해 사용하는 파라미터 중 가장 중요한 것은 위치에 따른 분무의 평균 입자경과 입경의 분포이다. 지금까지 여러 종류의 입경 측정법이 제안되었지만 측정방법이 간단하고, 단시간에 측정이 가능하며, 측정의 정확도에 신뢰성이 있고, 가격이 저렴한 장치라는 여러 가지 요구 사항을 동시에 만족하는 측정 방법은 없었다.

최근 발표된 몇몇 논문에서 분무 입경 측정법 간의 비교를 위한 실험 결과를 발표하였는데, 이미지법과 레이저회절법에 의한 입자경 측정치를 비교한 논문[2], 레이저 회절법과 위상 도플러 측정법 간의 비교[3] 등의 연구 결과가 있다. 일반적으로 '레이저 회절법(Laser diffraction method)'이 가장 광범위하게 사용되고, 그 다음으로 '위상 도플러법 입자경 측정기(Phase Doppler measurement method)'가 많이 보급되어 있다. 전자는 Malvern 사의 제품이

\* 정회원, 한국과학기술연구원

잘 알려져 있는데 분무 전체의 평균적인 입경 측정에 주로 사용되며, 후자는 Dantec 사와 Aerometrics 사의 제품이 널리 사용되며 입자 경과 입자의 속도를 국소적으로 동시에 측정하고, 또한 2 - 3차원 정보의 측정이 가능하다고 한다. 이 두 방법의 결점으로는, 전자는 측정값에 대한 다중 산란 현상의 영향이 커서 분무의 입자농도가 큰 경우에는 적합하지 않고, 후자는 검출기인 광전자 증배관으로의 가전압 값에 의해 측정값이 달라진다는 점과 작은 입경의 입자들에 대해서는 측정값의 정밀도가 떨어지는 점 등의 문제가 있다.[1]

이러한 특성은 Greenfield 사의 화상처리 시스템과 Malvern 사의 Laser Diffraction 법(LDSA)의 측정결과를 비교한 참고문헌 [2]과 [3]에서 언급되고 있다. [2]에서는 크기를 알고 있는(Latex, 45  $\mu\text{m}$ ) 입자를 사용하여 화상처리법의 확대비를 변화시키면서 측정한 결과를 비교하였는데, 화상처리법은 광학계의 확대비의 최적치가 존재하며 또한 입자속도의 영향을 받기 쉽다고 보고하고 있다. 그리고 최적조건에서도 회절법과는 약간의 차이를 보이고 있으며 이는 각각의 측정법의 특성에서 기인한다고 언급하고 있다. 한편 참고문헌 [3]은 실제 분무에서의 입경 측정법의 결과를 비교한 논문인데, 우선 현미경 확대상(I.A.), 레이저 회절법(Laser diffraction method, LDSA), PDPA 의 3 가지 방법을 적용한 결과에서 SMD 는 거의 26.0  $\mu\text{m}$  로 일치하였다. 그러나, 입경분포 측면에서는 현미경 확대상(I.A.)의 결과는 입경 분포가 18 - 27  $\mu\text{m}$  로 좁은 영역에 집중되어 있고 특히 24  $\mu\text{m}$  에서 최고치(Peak)가 관찰되는데 반해 레이저 회절법(Laser diffraction method, LDSA)에 의한 결과는 18 - 35  $\mu\text{m}$  로 작은 입경 측은 일치하는 반면에 PDPA 에 의한 입경 분포 함수는 5 - 35  $\mu\text{m}$  의 범위로 큰 입경 범

위는 LDSA 에 의한 결과와 일치하고 작은 입경 한계는 거의 0 에 달하는 것으로 나타났다.

또한 입경이 이와 같이 단일 입경으로 이루어져 있는 분포에서는 SMD 는 거의 일치하지만 실제 분무에서는 큰 차이를 보일 수도 있다. 레이저 회절법에서는 산란광으로부터 액적지름 분포를 가정하는데 대표적인 것으로는 대수정규분포, 로진람러(Rosin-Rammler)함수 및 누키야마-타나사와함수가 있다. 그 밖에 분포함수를 가정하지 않는 방법도 있다고 한다. 참고문헌[3]에서는 누키야마-타나사와 함수를 사용할 경우에 평균지름에 대한 빈도를 나타내는 파라미터인  $\alpha$  가 커질수록, 즉 평균지름 액적의 빈도수가 높아질수록 회절법과 위상도플러법에서 구한 액적의 크기의 비가 1에 근사한다고 보고하고 있다.

본 연구실에서는 진공 하에서 분무를 이용한 아이스슬러리 생성 과정에 관한 연구를 수행하기 위해, 최근 실용화된 새로운 방식의 '화상처리방식 입경측정기'를 사용하여 분무 특성을 측정하고 있다.[4] 종전의 화상처리방식의 분무 입경 측정방법은 포집된 분무 입자를 현미경 등을 사용하여 사진 촬영한 필름이나 인화된 사진을 다시 화상 처리하여 분무 입경을 측정하는 프로그램이 주로 시판되었다. 하지만, 이 방식은 화상처리에 시간이 많이 소요되는 단점 때문에 널리 보급되지는 않았다. 하지만, 최근 컴퓨터 관련 기술의 발전에 힘입어 고속 CPU가 등장함으로써 비산하는 입자군의 입자경을 실시간으로 촬영하고 이를 화상 처리하여 분무 특성을 측정할 수 있게 됨으로써 새로운 방식의 화상처리방식의 분무입경 측정기가 2 - 3 종류 시판되기 시작하였다. 이러한 이미지 측정에 의한 화상처리법은 입경 측정, 입자의 속도 측정뿐만 아니라 분무 액적

의 국소 수밀도(Number density, 단위체적당 입자수)까지 측정할 수 있고, 상대적으로 저가로 측정 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있으므로 몇 가지 소프트웨어(software) 상의 기술적인 문제를 해결한다면 앞으로 유용하게 사용할 수 있는 분무 입경 측정 방법이 될 것이다.

서로 다른 장비에 의한 분무 입경의 측정에는 각각의 입경 측정법의 작동 특성에 차이가 있어서 이러한 차이에 따라 분무 입경의 측정 결과가 달라지므로 이러한 점에 대해 신중하게 고려하여야 한다. 최근 발표된 몇몇 논문에서 분무 입경 측정법 간의 비교를 위한 실험 결과를 발표하였는데, 이미지법과 레이저 회절법에 의한 입자경 측정치를 비교한 논문[3], 레이저 회절법과 위상 도플러 측정법 간의 비교[4] 등의 연구 결과가 있다.

본 연구에서는 중공형 수 분무(Hollow, cone-type water spray)를 실험 대상으로 하여 이미지 측정법과 위상 도플러 측정법에 의한 분무 입경 및 수밀도의 측정 결과를 서로 비교

하여 측정 결과간의 차이를 분석함으로써 이 두 가지의 방법이 가지고 있는 입자의 측정특성과 장단점을 검토하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 특히 분무 내의 특정 위치에서 이 두 가지 방법으로 측정한 입경의 분포를 분석하여 평균 입경치의 차이가 발생하는 원인에 대한 분석을 시도하였다.

## 2. 본 론

### 2-1. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1 (a)와 (b)에 나타냈다. 이 실험장치는 광학적 측정장치(화상처리방식 측정장치 및 위상 도플러 측정장치)와 분무 발생 장치의 두 부분으로 구성되어 있다. 분무 발생 장치는 분무 노즐, 솔레노이드 밸브(Solenoid valve), 솔레노이드 밸브 컨트롤러, 가압 탱크 등으로 구성되어 있다. 분무 노즐로는 중공형(Hollow cone-type) 와류 분무 노즐(Swirl type spray nozzle, Ikeuchi Model 6032)을 사용하였으며,

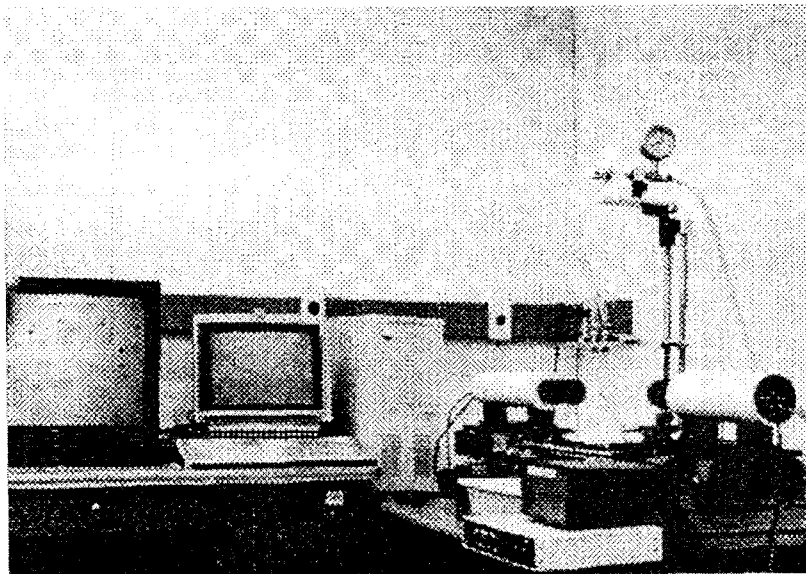


Fig. 1 (a) Experimental Apparatus

이 노즐에 대한 자세한 제원은 Table 1 에 있다. 압축공기 실린더로부터 고압 공기를 공급

노즐	분무각	분무유량 (l/hr)	평균 입경 ( $\mu\text{m}$ )	노즐 출구 직경 (mm)
6032	60°	12.7	60	0.25

Table 1 Specifications of the nozzle (presented by Ikeuchia Co.)

하여 가압 탱크의 압력을 8 - 10 기압으로 고정하여 분사압력을 설정하였다.

본 연구에서 분무 입자의 계측에 사용한 입자운동분석 시스템(Particle Motion Analysis System, 이하 PMAS, V-tek 사)은 영상 처리에 의한 입자 계측 방법의 일종이다. 이 장치는 입자의 추적성(속도계산) 측정 및 입자의 입경 분포도(SMD) 측정의 두 가지 기능과 거시적 현상 촬영 기능을 가지고 있다. PMAS 측정 장치는 발광 시간이 매우 짧은 스파크 광

원(Spark light source)을 이용하여 분사 중의 분무 액적을 정지 화면으로 촬영하여 화상으로 저장한 후 입자분포 분석용 소프트웨어를 사용하여 분무 액적의 크기를 분석하여 평균 입경 뿐만 아니라 입자 직경의 분포를 구할 수 있다. 또한, 발광 시간이 매우 짧은 이중 스파크 광원(Double spark light source)을 사용하여 액적 입자의 이동을 화상으로 저장하여 이동 속도를 구할 수 있다. 일대일 대화형식의 사용자 위주 처리 프로그램을 이용하여 저장된 화상으로부터 각각의 분무 입자의 거동 해석이 가능하다.

한편 본 실험에서 분무 액적 측정 결과의 비교를 위하여 사용한 위상 도플러식 입경 측정 시스템은 Dantec 사의 제품이다. 위상 도플러 신호를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 방법의 원리는 두 레이저 광을 교차시켜 만든 프린지(Fringe) 속을 입자가 통과할 때 발생하는 도플러 신호의 위상차가 신호 검출기의 위치에 따라 다른 점을 이용하여 액적의 크기

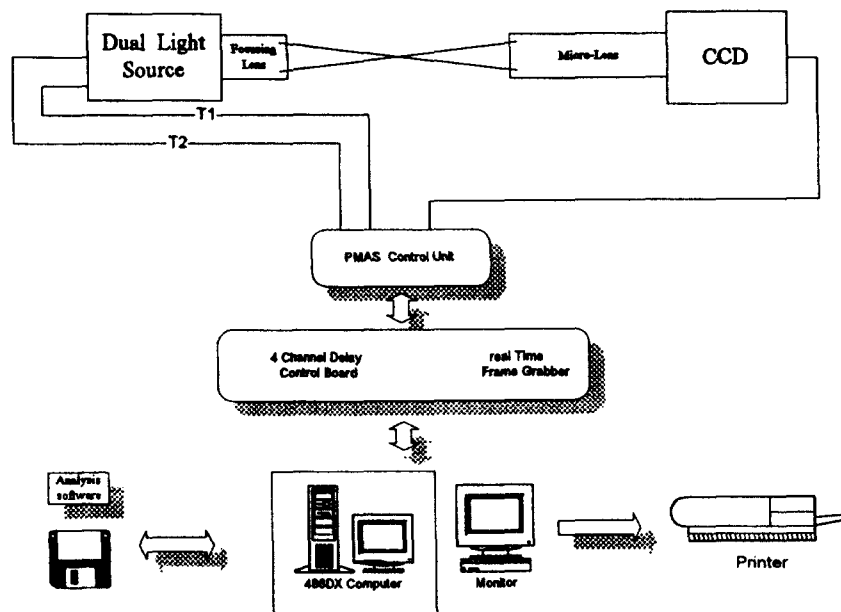


Fig. 1 (b) Schematics of the PMAS (MX-II)

를 계산한다. 장치의 초기 설정조건들을 살펴 보면 다음과 같다. 액적의 직경분포는 0 - 201.8  $\mu\text{m}$ 를 사용하며, 속도는 -16.86 - 84.3 m/sec의 범위를 가진다. 프린지 간격은 2.81  $\mu\text{m}$ 이며, 514.5 nm의 파장을 가지는 Ar-ion 레이저를 사용하였다. Gaussian 빔직경은 0.7 mm이며 Transmitting Optics에서의 렌즈의 초점 거리는 310 mm이다. 한편 수광부(Receiving optics)의 렌즈 초점거리는 600 mm, 산란각은 135도이다. 최대 입자 밀도는  $0.21 \times 10^6$  1/cm<sup>3</sup>이며, -2.575와 -1.287 deg./ $\mu\text{m}$ 의 위상변수(Phase factor)를 가진다.

2-2. 실험결과 및 검토

우선 Fig. 2 에 본 연구에서 실험 대상으로 사용한 분무의 특성을 나타냈다. 본 연구에

다. 분사 압력 10 기압에서 실제로 측정된 분무 유량은 0.060 L/min (6 kg/cm<sup>2</sup>), 0.14 L/min (10 kg/cm<sup>2</sup>) 으로 제조사(일본 Ikeuchi 사)의 카탈로그(catalog)에서 제시된 값의 약 70 % 정도의 유량을 나타냈다. Fig. 2 는 노즐로부터 95 mm 떨어진 위치의 단면에서 측정된 SMD 및 입자 수밀도의 반경 방향 분포를 나타내는 그림이다. 이 그림에서 SMD 는 중심축 부근에서 약 40  $\mu\text{m}$  정도로 가장 작고, 외곽으로 가면 SMD 값이 증가하여 반경 50 mm 부근에서는 약 90  $\mu\text{m}$  정도의 값을 나타낸다. 한편, 입자 수밀도는 중심축 부근에서는 약 10,000 개/m<sup>3</sup> 최대인 반면 외곽으로 가면서 크게 감소하여 50 mm 부근에서는 약 3,000 개/m<sup>3</sup> 으로 대략 1/3 정도의 값을 나타낸다. 이러한 현상은 외곽 부분에서는 중심축 부근에

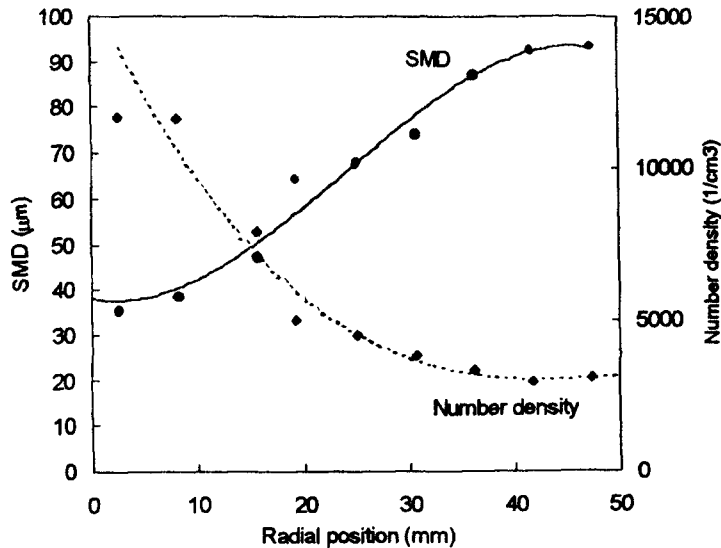


Fig. 2 Radial distributions of SMD and number density of a hollow cone spray at h = 95 mm

서 사용한 분무 노즐은 분무각 60 도, 분무 유량이 분사 압력 10 기압에서 0.212 L/min 라고 알려져 있는 nozzle 6032(일본 Ikeuchi Co.) 이

비해서 면적이 확대되면서 공간이 넓어지는 것이 가장 큰 원인이다. 한편 작은 입자에 비해 큰 입자가 상대적으로 속도가 크기 때문에 외

곽에서 많이 관찰되므로 상대적으로 큰 입자의 영향을 많이 받는 SMD 값이 외곽에서 큰 값을 나타내는 것이라고 생각된다.

Fig. 3 은 위상 도플러법(PDPA)에 의한 측정 결과와 화상처리 방법(PMAS)에 의한 평

분포가 서로 매우 잘 일치하고 있다. 이러한 실험 결과로 미루어볼 때 두 가지 측정 방법에 의해 얻어진 측정 결과는 이 실험 대상 분무의 입경분포 특성을 정성적으로 잘 나타내고 있는 것으로 생각되며 일정한 상수가 곱해진 형태라

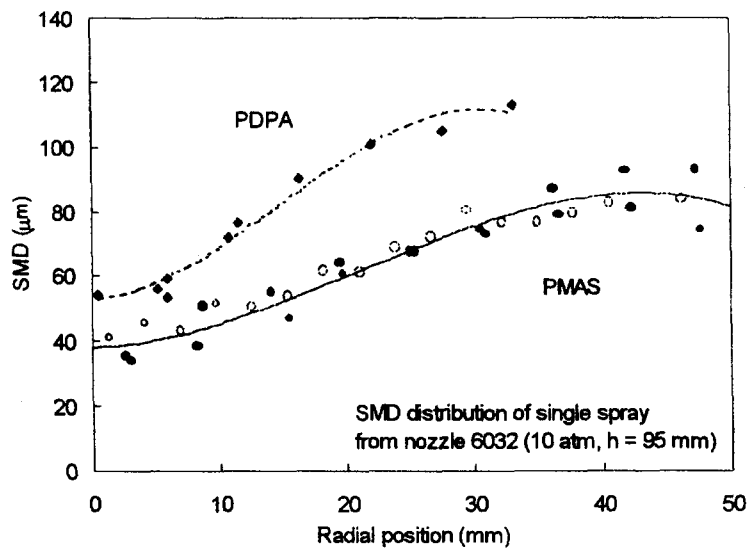


Fig. 3 Comparison of radial distributions of SMD at  $h = 95$  mm by the PDPA and PMAS

균 입경 (SMD)값을 비교한 그림이다. 이 그림에서 화상처리법(PMAS)으로 측정된 결과는 중심축에서는  $40 \mu\text{m}$ , 반경  $30 \text{ mm}$  부근에서는 약  $75 \mu\text{m}$ 의 측정치를 보이는 반면, 위상 도플러법(PDPA)에 의해 측정된 SMD 결과는 같은 위치에서  $55 \mu\text{m}$ 와  $110 \mu\text{m}$  라는 값을 나타낸다. 즉 화상처리법에 비해서 위상도플러법이 약 40% 정도 SMD 를 크게 측정하고 있다. 하지만 이러한 두 측정법의 측정 결과 반경 방향을 따른 변화는 매우 유사하다. 두 방법에 의해 측정된 반경 방향의 입경 분포의 형상을 비교하기 위하여 중심축에서 측정된 평균 SMD 를 기준으로 정규화(Normalize)한 결과를 Fig. 4에 나타냈는데 이 그림에서 관찰할 수 있듯이 두 가지 측정 방법에 의해 얻어진 평균 입경의

고 할 수 있다. 하지만 이 측정결과 만으로는 이 두 가지 측정 방법 중에 절대적으로 SMD 값을 나타내는 데 어느 방법이 더 신뢰할 만한가에 대해서는 결정하기가 어렵다.

이러한 점을 분석하는데 도움이 되도록 분무 내의 특정한 측정 위치에서의 분무 입경의 분포, 즉 체적 확률 밀도함수(Volumetric probability density function, volume PDF)를 Fig. 5, 6에 비교하여 나타내었다. 이 그림에서 보면 위상 도플러법과 화상 처리법에 의한 결과간의 차이점 및 특징이 비교적 잘 나타난다. 즉, Fig. 5에서  $R = 0 \text{ mm}$  (중심부)에서의 입경분포 측정결과를 비교하여 보면 PMAS에 의한 측정 결과는  $40 \mu\text{m}$  이하의 입자가 많이 관찰되는 반면, PDPA 로는 PMAS 결과에서

는 나타나지 않는 80  $\mu\text{m}$  이상의 입자들이 많이 관찰되고, 이러한 차이 때문에 PDPA 로 측정 한 SMD 값이 약 40 % 정도 크게 나타나는 것이라고 설명할 수 있다.

획득할 가능성이 그 만큼 줄어든다.

레이저 회절법에서는 산란광으로부터 역 적지름 분포를 가정하는데 대표적인 것으로는 대수정규분포, 로진 램러(Rosin-Rammler)함수

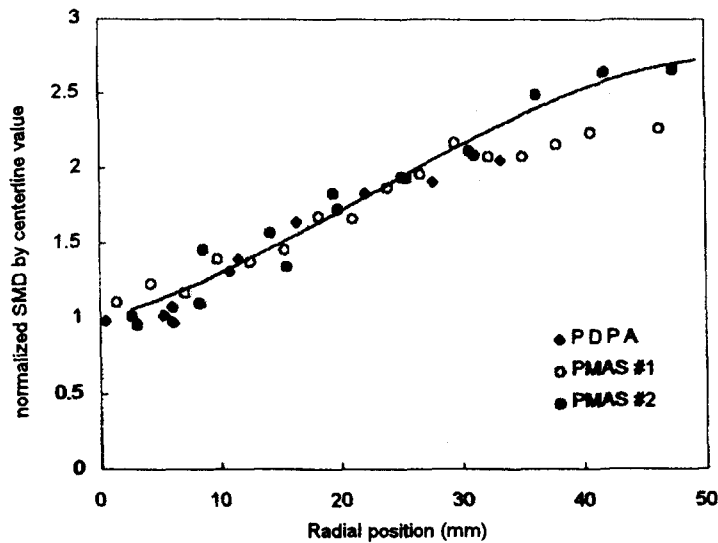


Fig. 4 Radial distributions of SMD normalized by the centerline value at  $h = 95$  mm by the PDPA and PMAS

이러한 특성은 서론에서 언급하였듯이 참고문헌 [2]에서 설명하고 있는 것과 일치한다. 즉, 화상처리법은 광학계의 확대비의 최적치가 존재하며 또한 입자속도의 영향을 받기 쉬우며, 회절법과는 약간의 차이를 보이고 있는데 이는 각각의 측정법의 특성에서 기인한다. 분무의 외곽( $R = 25$  mm) 쪽에서 측정 한 결과를 보면 보다 확실하다. PMAS 측정 결과는 입자가 주로 60 - 80  $\mu\text{m}$  사이의 범위에 집중되는 반면, PDPA 는 80 - 150  $\mu\text{m}$  의 넓은 범위에 걸쳐 고르게 분포하고 있다. 즉 PMAS에서는 상대적으로 속도가 느린 작은 입자와 비교해서 속도가 빠른 큰 입자들은 한정된 공간해상도(Spatial resolution) 내부에서의 체류시간이 작으므로, 촬영하였을 때 이미지를

및 누키야마-타나사와함수가 있다. 그 밖에 분포함수를 가정하지 않는 방법도 있다고 한다. 참고문헌[3]은 평균지름 역적의 빈도수가 높아질수록 회절법과 위상도플러법에서 구한 역적의 크기의 비가 1에 근사한다고 보고하고 있다. 그러나 본 연구와 같은 일반적인 분무에서 SMD는 상대적으로 큰 입자의 영향을 받고 있으며 반면 빈도수는 작은 입자가 많은 부분을 차지함을 Fig. 5, 6에서 볼 수 있다. 즉, 이러한 경우에 위상도플러법이 레이저회절법보다 입경을 어느 정도 크게 예측함을 알 수 있다.

이상에서 살펴 본 연구 결과들에서, 두 측정방법(PDPA와 PMAS)의 결과를 비교한 본 실험 결과를 다음과 같이 해석해 볼 수 있다. 우선 PDPA에 의하여 측정 한 입경의 측정 결

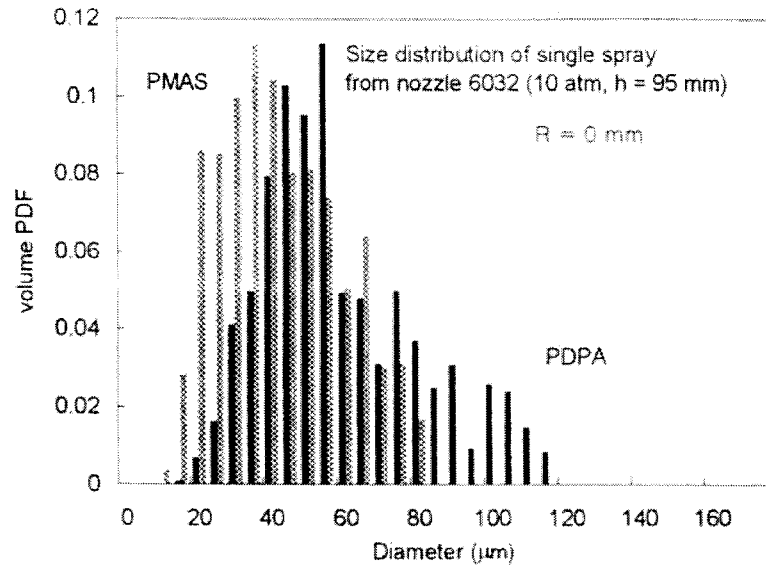


Fig. 5 Volume PDF at R = 0 mm and h = 95 mm by the PMAS

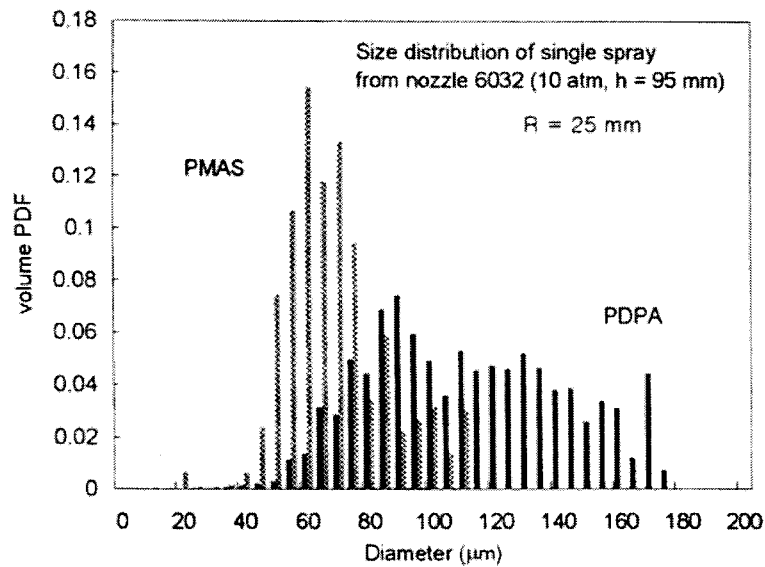


Fig. 6 Volume PDF at R = 25 mm and h = 95 mm by the PMAS

과가 약 40 - 50 % 정도 크게 나타나는데 이는 PDPA의 측정 결과가 광산란 강도가 강한 큰 입자 쪽으로 편향(biased)되는 것에서 그 첫

번째 원인을 찾을 수 있겠고, 그 반면에 PMAS 측정결과는 작은 입자 쪽으로 편향된 것으로 보인다. PMAS에서는 큰 입자의 경우



작은 입자에 비해서 편성이 크기 때문에 한정된 공간(Spatial resolution)인 화상에 포함될 확률이 그 만큼 감소하게 되며, 이로 인해 전체적으로 크기가 작은 쪽으로 편향되어 나타나며 이는 Fig. 2 에 나타난 입자 수에서도 잘 알 수 있다. 즉, 중공형(Hollow cone type) 노즐이므로 유량 분포의 측정 결과는 중심측보다는 외곽에서 유량이 크게 나타나는 분포를 보이고 있는 반면에, 분무 입자의 수밀도에 대해서는 외곽으로 가면 1/3 정도로 감소하는 결과를 나타내는 것이라고 생각된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 위상 도플러 측정법(PDPA)과 화상 처리법(PMAS)으로 중공형(Hollow-cone type) 노즐에서 발생된 물 액적군(Water spray)의 입경 및 분포를 측정하여 두 측정법의 특징을 비교 분석하였다.

PMAS에 의한 측정결과에 비해 PDPA에 의한 측정결과는 평균입경(SMD)이 약 40% 정도 크게 측정되며, 이는 PDPA의 원리가 광산란에 기초하기 때문에 산란 강도가 강한 큰 입자 쪽으로 편향되기 때문이라고 생각된다. 한편, PMAS는 공간상의 일정 지역을 화상으로 저장하여 이를 처리하여 분석하므로 작은 입자에 비해 상대적으로 속도가 빠른 큰 입자가 측정 화상 속에 들어올 확률이 그만큼 작아지게 되며 이 때문에 PDPA의 경우와는 반대로 평균 입경의 측정치가 작은 쪽으로 편향될 가능성이 있다. 따라서 PDPA와 비교할 때 PMAS에 의한 화상처리법이 입경측정 시 여러 가지 장점이 있기는 하지만 이 2 가지의 방법 중에 어느 방법이 보다 정밀하게 입경을 측정할 수 있다는 결론을 내리기에는 본 실험의 결과만으로는 부족하다. 따라서 이상의 실험 결

과들을 입자의 추적성이 양호한 회절법을 이용한 측정법(Malvern System)의 측정 결과와도 비교 분석해보고 각각의 특징과 장단점들을 종합적으로 비교 분석할 필요가 있으며, 이를 본 연구에 이은 향후의 연구 과제로 생각하고 있다.

### 참고 문헌

- [1] 中山滿茂, "이미지법에 의한 측정," 분무특성의 측정원리와 실습, 제4회 미립화 포럼, pp. 35 - 43, 1996
- [2] 中山滿茂, "이미지법-레이저회절법에 의한 입자경 측정치의 상관," 제3회 (일본)미립자 심포지엄 강연논문집, pp. 32-35, 1994
- [3] 김상진 등, "噴霧粒子徑의 光學的測定法の比較," 제3회 (일본)미립자 심포지엄 강연논문집, pp. 10 - 15, 1994
- [4] 이윤표 외, "에너지 변환 및 고효율 이용 기술", 과학기술처, UCE1444-5843-4, 1996