

위상/도플러 입자 분석기의 입력 고전압 크기에 따른 영향

Input High-Voltage Effects of the Phase/Doppler Particle Analyzer

강 신 재*

S. J. Kang

1. 서론

위상/도플러 입자 분석기(PDPA)는 과학적 인 연구용 장비로서 미립화기로부터 얻어지는 분무의 진단분야에서 최근에 괄목할만한 발전이 진행되어 왔다. 이것은 분무유동장의 입자의 위치에 대하여 액적의 크기, 속도, 수 밀도 등을 공기유동의 상세한 난류특성과 함께 측정할 수 있는 능력을 가지고 있어 분무에 대한 많은 정보를 제공할 수 있다. 이 장비는 가스터빈 엔진 연소기에 대한 무 화기의 제어 뿐만 아니라 액체연료의 분무 화염, 액체금속의 급속 응결 분무, 가스터빈 엔진 연소기, 로, 슬러리 분무, 도장 분무, 화학반응 분무, 증발 등에서 액적의 거동을 파악하는데 이용된다. 이들 측정장비로부터는 분무의 대칭성, 축방향과 반경방향에 대한 분무액적의 크기, 속도, 수밀도분포, 액적크기분포의 변화, 크기-속도 상관관계, 분무각, 분무관통도, 분무와 주위공기사이의 상호작용, 분무가 충돌되는 부분에서의 분무의 유동형태 등에 관한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 이와 같은 상세한 정보를 바탕으로 무 화기의 설계에서 기하학적 구조와 입력조건을 변화시킴으로써 보다 최적의 요구되는 분무상대로 설계조건을 만족시킬 수 있게 된다. 또한 공정설계, 감시시스템, 제어 등에

매우 유용한 장비가 될 뿐만 아니라 분무모 델을 개발하는 이론 및 전산유체역학자들과 시험예측에 대한 방대한 자료를 제공할수 있다.

이와 같이 다양한 응용분야에서 유용한 정보를 제공하는 PDPA가 비교적 다른 형태의 측정장비에 비하여 사용방법과 보정의 편리함에도 불구하고 광학적 한계에 의해서 발생되는 측정 평균치에 대한 몇 가지의 측정오차를 유발하는 요인이 있다.

PDPA를 이용한 측정결과와 정확도는 3가지의 작용요인에 의해서 영향을 받는다. 첫째는 레이저원(laser source)의 출력이다. 둘째는 광배율기의 입력전압(PMT input voltage)이고, 셋째는 입자가 구형인지 아닌 지를 결정해 주는 기준값(threshold)이다¹⁾. 레이저원의 동력을 높이거나, 광배율기의 전압을 높이거나, 기준값을 크게 해주면 액적의 평균직경이 더 작게 되는 결과를 초래한다. 왜냐하면 낮은 입력전압에서 작은 액적들은 감지하기가 어려운 반면 큰 액적들은 감지되고, 높은 입력전압에서는 작은 액적들이 상대적으로 많이 감지되기 때문이다.

PDPA를 이용할 때 액적은 원형에 가까워야 하며, 단위 측정시간에 측정채적 내에서 는 단일 액적이어야 한다. 그러나 실제의 분열된 액적들은 비규칙적이고 원형이 아닌 여러가지의 모양과 크기를 가지고 있을 수 있기 때문에 PDPA를 이용하여 액적을 측정할 때는 광배율기(PMT)의 고전압(high

* 정회원, 전북대학교 기계공학부

voltage)을 적절하게 선택해야 한다²⁾. 고전압이 너무 낮으면 작은 액적을 탐지기(detector)가 감지할 수 없고, 고전압이 너무 높으면 잡음(noise)을 데이터로 오판하여 액적으로 나타낼 수도 있다²⁾. 따라서 고전압이 측정결과 즉, 액적의 크기와 속도, 그리고 단위시간동안 계속되는 량에 미치는 영향을, 몇 가지의 분무조건과 측정위치에 따라 소개하고자 한다.

2. PDPA의 구성 및 분무조건

PDPA의 광학계는 LDA(laser Doppler anemometer)와 유사하고, 송광부(transmitting optics)와 수광부(receiving optics)로 구성되어 있다. 광원으로는 Ar-ion레이저를 주로 사용한다. 송광부는 광섬유로 구성되어 있고, 수광부는 초점렌즈와 광배율기(photo-multiplier tube, PMT)로 구성되어 있다. Table 1에 입력 고전압이 미치는 영향을 고찰하기 위한 실험에서 구성된 PDPA의 설정치를 요약한 것이다.

Table 1. PDPA Configuration Setup

Fringe spacing	4205.1 nm
Number of fringes	36
Wavelength	514.5 nm
Gaussian beam diameter	1.35 mm
Beam separation	38 mm
Transmitting Lens focal length	310 mm
Receiving Lens focal length	310 mm
Scattering angle	46°
Angle adjustment	2.0 mm
Particle density	1 g/cm ³
Particle/Medium refractive indexes	1.334/1.0
Transmitting polarization angle	0°
Receiving polarization angle	0°
Fringe rotation angle	0°
Optical frequency shift	40 MHz
Doppler frequency bandwidth	36 MHz

본 연구실에서 사용하는 신호처리기는 DANTEC사의 58N10과 58N50 모델이며 이 모델은 버스트 검출방식을 사용한다. 또한, DANTEC사의 수광부는 액적크기에 대한 2π의 모호성을 제거하고 적당한 해상도를 유지하는 상태에서 액적의 크기 측정범위를 확장하기 위하여 PMT가 3개로 구성되어 있다. 이때 각각의 PMT에 공급되는 고전압은 0 V 에서 2000 V 까지 8 V 의 증분으로 가감된다. 그리고 3개의 PMT에는 동일한 크기의 전압이 공급된다.

Fig. 1의 이유택노즐에 공급되는 액체유량과 기체유량을 조절하여 비교적 분무 액적의 크기가 큰 조건과 액적의 크기가 작은 분무 조건을 선정하고, 서로 다른 두 가지의 액적크기조건에 따라 분무 유동장에서 PMT에 공급되는 고전압의 크기가 측정치에 미치는 영향을 소개하고자 하며, Table 2는 2가지의 서로 다른 분무조건을 요약한 것이다.

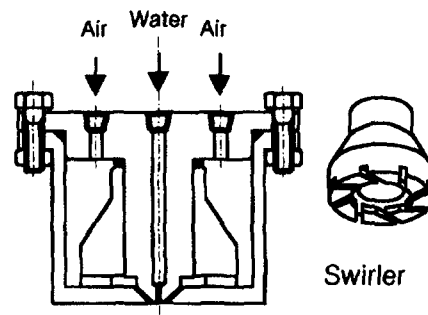


Fig. 1 Structure of the twin-fluid airblast atomizer

Table 2. Spray conditions

Spray parameter	Case (I)	Case (II)	
Liquid flow rate (kg/min)	0.03	0.05	
Air/Liquid Mass ratio (Mr)	6.0	1.0	
Measuring points	X/D _{no}	33.3	33.3
	r/D _{no}	0	3.3

3. 입력 고전압의 영향

Fig. 2는 2가지의 분무조건에 대해서 고전압에 따른 SMD와 단위시간에 대한 액적의 측정율을 나타내는 데이터율(data rate)의 변화를 보여주고 있다. 입자의 개수를 10,000 개씩 3회 획득하여 총 30,000개를 샘플링 한 것이며, 도표상에서 각각의 위치는 측정값을 평균한 값이고, 또한 표준편차를 구하여 오차막대(error bar)로 표시한 것이다.

일반적으로 고전압이 커질수록 작은 입자들이 잘 감지되어 액적의 평균직경이 감소한다고 알려져 있다. Fig. 2를 살펴보다도 고전압이 커짐에 따라 SMD가 점점 감소하

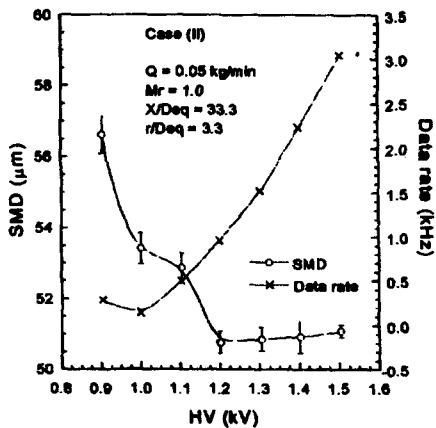
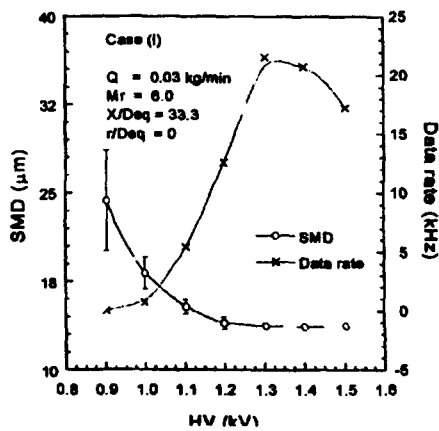
다가 1200 volt 이상에서는 일정해지는 것을 볼 수 있다. 이것으로 고전압의 증가하면 작은 액적들이 많이 받아들여져 평균직경에 영향을 미치게 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 데이터율이 클수록 좀더 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있는데 고전압이 증가함에 따라 점점 증가한다.

레이저광의 측정체적을 통과하는 총 입자들 중에서 구형인 입자만을 받아들여 처리하게 되는데, 이 구형 입자의 비율을 나타내주는 유효데이터(validation)는 전 영역의 고전압에 대하여 항상 높은 값을 유지하는 것이 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다.

PDPA에 의한 입자의 계측시 고전압이 너무 높으면 신호에 잡음이 실려 측정결과에 영향을 미치게 되므로 적절한 고전압의 선정이 중요하다. 그림 (a)에서 고전압이 1400 volt 이상에서 데이터율이 떨어지고 있는 것으로 보아 이 영역 이상에서는 신호에 잡음이 실린다고 할 수 있다. 이것으로부터 데이터율이 높고 고전압에 따른 SMD의 변화가 없는 1300 ~ 1400 volt 사이가 최적이라고 결론을 내릴 수 있다. 그러나, 분사기의 형태나, 분무조건에 따라 최적의 입력 고전압 값이 다르기 때문에, 보다 신뢰할 수 있는 PDPA 계측을 수행하기 위해서는 연구자가 최적의 고전압을 찾고 그 범위 안에서 조절해야 할 것으로 생각한다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 분무조건에 대해서 고전압의 변화에 따른 측방향 속도의 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 속도가 감소되는 경향을 보이고 있는데, 고전압이 낮은 곳에서 감소 정도가 상당히 크다가 1100 volt 이상에서 부터는 완만해지고 있으며 1300 volt 이상에서는 거의 일정한 값을 보이고 있다.

앞의 Fig. 2와 함께 생각해 보면, 저 고전압에서 액적의 평균직경과 속도가 크고 고전압이 증가되면 평균직경이 작아지면서 속



(b)

Fig. 2 High voltage effect on SMD and data rate

도도 감소되는 것을 볼 수 있으며, 이것으로부터 큰 액적의 속도가 작은 액적의 속도보다 크게 나타난다고 할 수 있다.

Fig. 4는 고전압이 증가할 때 액적의 크기 분포에 대한 비대칭도(skewness)의 변화를 보여주는 것이다. 비대칭도를 비교 분석하기 위해서는 대칭의 분포형태를 이루는 Gauss의 정규분포를 이용하는데 확률밀도분포가 Gauss의 정규분포를 나타낼때 얻어지는 비대칭도는 0의 값을 갖게 된다. 그러나 액적의 크기성분이 어느 한쪽으로 치우쳐서 발생되면 확률밀도 역시 그 중심축에 대해 비대칭현상을 나타내어 결과적으로 비대칭도

는 그 비대칭 정도에 따라 값의 크기가 결정되며 치우친 방향에 의하여 부호가 결정된다. 이때 액적경 d 에 대한 비대칭도는 다음 식으로 정의된다.

$$S(d) = \overline{d^3} / (\overline{d^2})^{3/2} \quad (1)$$

그림에서 보면 고전압이 증가할수록 비대칭도가 감소하고 있다. 즉 입자의 분포형태가 정규분포에 가깝게 나타나고 있음을 의미한다. 고전압의 증가에 따라 작은 액적들이 많이 받아들여져 액적의 분포에 영향을 주게 되고, 결국 이것은 액적의 평균직경에도 영향을 미치게 되는 것이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 고전압에 따른 비대칭도의 변화양상을 직접 수확률밀도 분포곡선으로 표현하여 본 것으로, 고전압의 증가에 따른 크기분포의 변화를 쉽게 확인 할 수 있다. Fig. 4에서, 고전압이 1200 volt 이상에서는 비대칭도의 감소폭이 줄어들고 있는

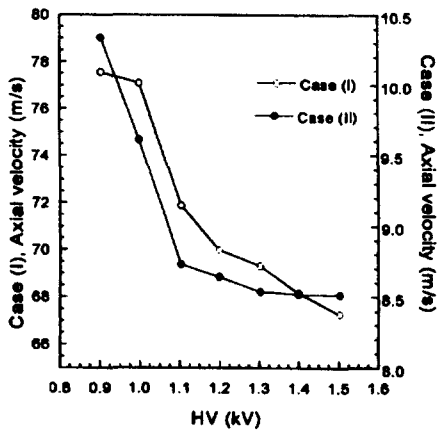


Fig. 3 High voltage effect on axial velocity

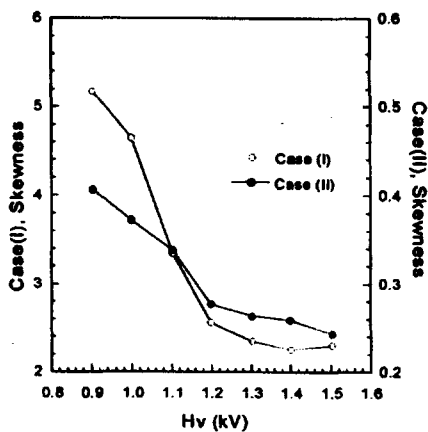


Fig. 4 High voltage effect on droplet size skewness

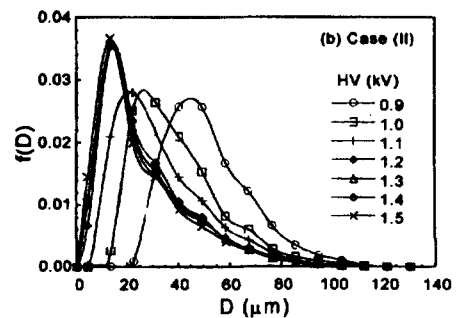
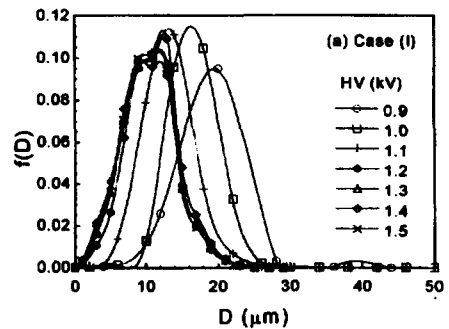


Fig. 5 High voltage effect on droplet size distributions

것을 볼 수 있는데, 본 그림에서도 역시 1200 volt 이상에서 크기분포의 변화양상이 둔화되고 있는 것을 확인할 수 있다.

비대칭도(skewness)와 함께 다음과 같이 정의되는 입자의 분포함수에서 입자 크기분포의 폭을 나타내는 변수들, 즉 Nukiyama-Tanasawa 분포⁴⁾에서의 q , Rosin-Rammler 분포⁵⁾의 n , 그리고 상한분포함수(ULDF)⁶⁾에서의 δ 값 등이 액적의 균일도와 관련이 있는 것으로 여겨지고 있다. 몇몇 학자들은 이 분포변수들의 변화를 균일도와 결부시켜 해석하려는 시도가 있어 왔다.

Fig. 6은 각각의 분포변수들이 고전압에 따라 어떤 변화를 보이고 있는지를 알기 위해 도시한 것이다. 모든 분포변수들이 고전압의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있고 고전압이 1100 volt 이상에서는 완만한 감소폭을 나타내고 있다. 또한 특이할만한 것으로는 비대칭도와 n , q 와 δ 값의 분포

경향이 아주 유사하다는 점이다.

4. 결론

위상/도플러 입자분석기의 입력 고전압의 크기가 액적의 속도와 크기 측정에 미치는 영향을 이유체노즐의 몇 가지 분무조건에서 살펴보았다.

입력 고전압이 낮을 경우에는 액적의 속도와 크기의 측정치에 대한 정확도에 큰 문제점을 가지고 있어 주어진 실험조건에 따라 적절한 어느 고전압의 크기 이상의 고전압에서 실험을 수행하여야 한다. 또한, 입력 고전압이 증가하면 측정되는 액적의 개수가 증가하나 어느 이상에서는 신호대 잡음비의 감소로 측정 액적의 개수가 오히려 감소한다.

따라서 주어진 장치의 구성과 분무조건에서 액적의 속도와 크기의 측정치가 안정화될 수 있는 고전압의 최저치를 결정하고 이에 대하여 측정 액적의 개수를 최대치로 하는 고전압을 결정하여 실험을 수행하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Inamura, T., Nagai, N., and Hirai, T., "Study on Spray from Plain Jet Atomizer Using Phase/Doppler Particle Analyzer", ICLASS-91, pp. 579-586, 1991.
2. Ward, M.J., Bossard, J.A., Peck, R.E., and Hirtleman, E.D., "Spray Characterization in Axisymmetric Swirling Combustor Flows", ICLASS-91, pp. 529-537, 1991.
3. Bachalo, W.D., and Houser, M.J., "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop

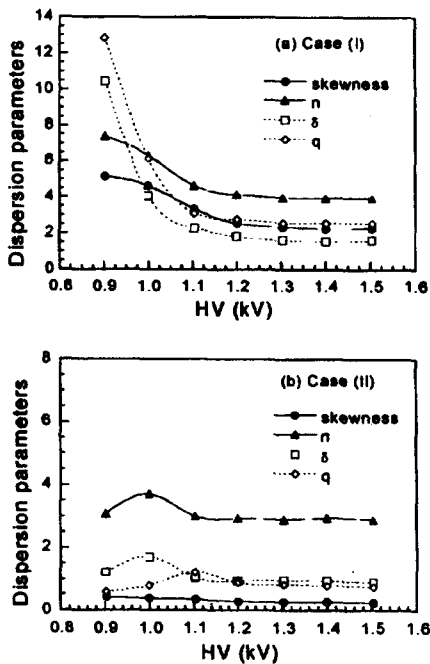


Fig. 6 High voltage effect on droplet dispersion parameters

- Size and Velocity Distributions", *Optical Engineering*, Vol. 23, No. 5, 1984.
4. Saffman, M., "Automatic Calibration of LDA Measurement Volume Size", *Applied Optics*, Vol. 26, No. 13, pp. 2592-2597, 1987.
 5. Nukiyama, S. and Tanasawa, Y., "Experiments on the Atomization of Liquids in an Air Stream, Report 3, On the Droplet-Size Distribution in an Atomized Jet," Defense Research Board, Department National Defence, Ottawa, Canada; translated from *Trans. Soc. Mech. Eng. Jpn.*, Vol. 5., No. 18, pp. 29-36, 1939.
 6. Rosin, P. and Rammler, E., "The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal," *J. Inst. Fuel*, Vol. 7, No. 31, pp. 29-36, 1939.
 7. Mugele, R. and Evans, H. D., "Droplet Size Distribution in Sprays," *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 43, No. 5, pp. 1317-1324, 1951.