

위상도플러 유속계를 이용한 계측에 있어서의 화염에 기인한 오차의 평가

양 영 준[†]

The evaluation of error due to flame in the measurement using phase doppler anemometry

Young-Joon Yang[†]

Abstract

Spray combustion has been used in many industrial fields, for instance, such as diesel engines, gas turbines and industrial furnaces, and furthermore various measurement techniques have been applied to elucidate the phenomenon of spray combustion. In order to measure simultaneously the droplet velocity and the droplet size of spray, phase doppler anemometry (PDA) was frequently used in spray combustion. However, the measurement error is occurred due to existence of flame, which is considered as influencing the precision of measurement. Therefore, the purpose of this study is experimentally to conduct the systematic evaluation on the measurement error when PDA measurement is applied to combustion field.

Key Words : PDA, measurement error, laser measurement, flame, combustion field

1. 서 론

분무화염은 공업적으로 각종 자동차엔진, 산업용료, 액체연료 로켓엔진, 가스터빈 연소기 등에서 폭 넓게 사용되어지고 있다. 이러한 분무연소는 매우 복잡한 현상이지만 근래의 계측기술 및 신호처리 기술의 급속한 발달에 의해 그 현상에 대한 규명이 나날이 발전하고 있다^[1-6]. 그 중에서도 레이저를 이용한 계측기술의 진보가 더욱 두드러지고 있으며, 예를 들면 레이저 유기형광법(LIF)^[7], 레이저 도플러 유속계(LDV)^[8], 위상도플러 유속계(PDA)^[9] 등과 같은 계측수법이 확립되어지고 있다. 레이저 계측은 비접촉식이며 고시간·고공간 분해능이 가능한 이점이 있는 반면 광학계의 설치가 어렵고 광학에 관한 전문지식이 필요하다. 또한 계측결과와 정량성과 오차평가에 관한 과제가 남아 있다.

레이저를 이용한 분무입경 계측법이 개발·적용되어

지고 있지만^[10], PDA는 LDV의 기본원리에 근거하고 있으며 산란입자로부터의 도플러 신호의 위상차를 이용하여 측정체적을 통과한 입자의 속도와 입경을 동시에 계측할 수 있다. 액적의 입경 계측에 있어서 종래의 이상류(two phase flow)의 연구에 이용되어진 침전법, 혼적법 등은 관찰에 의해 입경을 계측하기 때문에 간편한 방법은 아니다. 또한 계측 가능한 최소입경에도 한계가 있고 시계열 데이터를 얻는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그러나 위상도플러 유속계(phase doppler anemometry; PDA)에 의해 액적의 속도와 입경을 동시에 계측하는 것이 가능하게 되어 분무류 및 분무연소장에 있어서의 적용 사례가 보고 되어지고 있고^[11-13], 분무현상을 규명하기 위한 유효한 수단으로 받아들여지고 있다. 그러나 PDA도 LDV의 발달과정에서 알 수 있는 바와 같이 해결·검증 해야만 할 과제가 많이 남아 있다. 예를 들면, 계측원리에 의한 계측치의 신뢰성, 즉 측정체적내의 액적의 통과위치의 차이에 의해 생기는 오차^[14,15], 측정체적을 분할하는 슬리트의 영향^[16], 광학계의 위치 및 계측시의 파라메타의 설정에 의해 생기는 오차^[17], 신호처리 및 보정방법^[18], 액상 질량유속

진주산업대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Jinju National University)

[†]Corresponding author: yangyj@jinju.ac.kr

(Received : June 21, 2005, Accepted : July 14, 2005)

계측치의 정도^[19], 연소장에 적용할 때의 문제점^[20,21] 등이 있다. 위에 나열한 사항은 모두 중요한 과제이지만, 특히 PDA 계측을 연소장에 적용하려고 하는 경우에는, 광로상에 화염의 존재에 의한 공간의 굴절률의 변화, 액적 자체의 온도 변화에 의해 생기는 액적 내부의 굴절률의 변화, 측정 체적 내에 있어서의 액적의 증발에 의한 입경의 변화와 이에 따른 증발가스의 영향 등이 고려되어야 한다. 이 때문에 연소장에 PDA 계측을 적용할 때 그 정도(precision)에 관한 고찰은 필요불가결 하지만, 그러나 연소장에 있어서 PDA 계측의 정도에 관한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 연소장에 PDA 계측을 적용할 때 발생하는 오차에 관한 계통적인 평가를 목적으로 한다. 특히 입경의 크기를 아는 폴리스티렌 입자(polystyrene particle)를 이용하여 비연소장과 연소장 계측시에 큰 차이를 나타내는 광로상의 화염의 존재가 계측에 미치는 영향과 화염형태와 화염위치에 따른 오차를 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에서 측정대상으로 한 폴리스티렌 입자는 미리 광학현미경에 의해 입경을 검증하였다. 폴리스티렌 입자는 모터를 일정 속도로 회전시킴으로써 PDA 측정체적내를 일정속도로 통과하여 계측이 이루어진다. 모터는 시판품(Mabuchi, RF-500TB)을 이용하였다. PDA 광학계의 수광계 및 신호처리계에는 시판의 장치(Dantec, 57X10 및 58N10)를 이용하였고, 광원에는 아르곤 이온레이저(Spectra Physics, Stable2017, 발진파장 514.5 nm)를 사

용하였다. 광전자 증배관으로 부터의 출력신호는 신호 처리기에서 처리되어진 후, 퍼스널 컴퓨터(IBM, PS/486DX-33 MHz)에서 해석되어진다. 수광방향은 광축에 대해서 전방으로부터 63°이며 굴절률 1.59의 폴리스티렌 입자를 계측할 때에는 이 방향에서 레이저광의 1차 굴절률이 지배적이 되고, 반사광의 비율이 최소가 된다^[22]. 그러나 PDA 계측법은 많은 파라메타를 포함한 계측법이며, 시스템 설계시의 검토항목으로서 측정체적의 크기와 프렌지 간극, 계측속도 범위, 계측입경 범위 등이 있다. 또한 계측시에는 레이저 파워, 수광개구창(aperture window)의 폭, 액셉트 율(accept rate), 데이터 율(data rate), 광전자 증배관의 인가전압 등을 들 수 있다.

일반적으로 계측시에 이들 설정치를 최적화하는 것은 어려우며^[17], 계측 중에 실험자의 판단에 의해 계측치에 포함되어지는 오차도 변화한다. 그러나 본 실험에 있어서는 계측대상 입자의 입경을 미리 알고 있으며 또한 그 속도도 예측 가능하기 때문에 이것에 맞는 광학계 설치의 최적화를 실시하여 그 오차가 최소가 되도록 하였다. 실제로 계측시에 PDA 신호처리기로부터의 도플러 신호를 오실로스코프(oscilloscope)에 의해 모니터하면서 측정 조건이 최적이 되도록 수광계의 3개의 광전자 증배관의 인가전압과 증폭률 및 폴리스티렌 입자궤도를 마이크로 트레버서(SIGMA Kokisei, Σ 707C-(1), 최소눈금 10 μ m)로 조정하였다.

표 1에 계측에 이용한 PDA 광학계의 사양을 나타내

표 1. PDA 광학계의 사양
Table 1. Specification of PDA optical system

Transmitting optics :	
Wavelength of laser beam	514.5 nm
Initial diameter of laser beam	1.34 mm
Focal length of front lens	500 mm
Beam separation	51.5 mm
Spot diameter	244.8 μ m
Fringe spacing	5.0 μ m
Fringe number	49
Receiving optics :	
Off axis angle	63 degree
Focal length of receiving optics	310 mm
Width of spatial filter	100 μ m
Range : Maximum diameter	254.0 μ m
Maximum velocity	1.5 m/s
Minimum velocity	-0.5 m/s
Bandwidth of signal processor	0.4 MHz
Frequency shift	40 MHz
Sampling time	100 sec

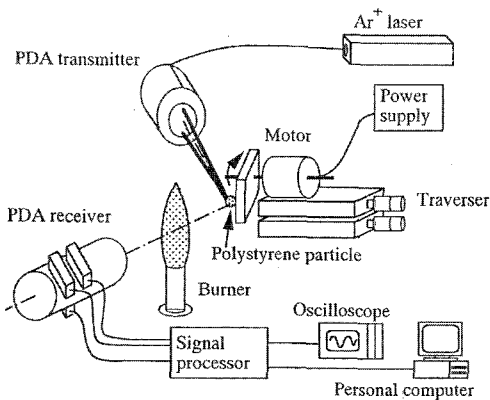


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

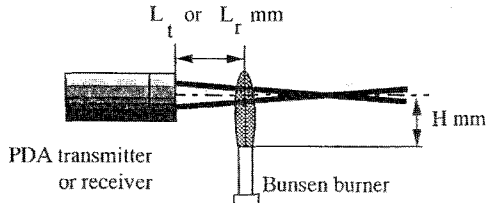


그림 2. 버너의 이동방향
Fig. 2. Movement direction of burner.

었다. 본 실험에서는 광로상의 화염의 존재가 PDA 계측에 미치는 영향을 조사하기 위해서 그림 2에 나타난 것과 같이, PDA의 송광계 또는 수광계와 측정체적 사이에 분젠버너를 설치하여 송광계와 분젠버너의 거리 L_s , 수광계와 분젠버너의 거리 L_r , 광축으로부터 버너포트 출구까지의 거리 H 를 변화시켰다.

분젠버너는 노즐외경 16 mm, 내경 13 mm의 원관이며 버너내부에는 혼합기의 흐름이 안정되도록 강모(steel wool)와 금속망(40 mesh)을 삽입하였다. 공급연료는 프로판을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 화염은 당량비 1.46, 노즐출구에 있어서 단면평균유속 0.5 m/s의 부분 예혼합화염($Re=436$)과 단면평균유속 0.03 m/s의 확산화염($Re=95$)이며 각각 청염과 휘염에 대응한다. 본 실험에서 이용한 PDA광원의 파장은 514.5 nm이며 휘염의 경우에는 슈트(soot)로부터의 연속스펙트럼이 레이저광에 중첩하여 도플러신호의 노이즈성분을 증가시키는 요인으로 예상되어진다. 본 연구에서는 그 영향을 고찰할 목적으로 위의 2개의 화염형태를 이용하였다. 분젠버너의 평균온도 및 온도변동의 계측에는 아날로그식 열관성 보상회로가 있는 열전대(thermocouple)에 표면반응 방지용 SiO_2 코팅을 실시한 것을 사용하였다.

온도 프로브의 구조를 그림 3에 나타내었다. 감온부에 전기용접에 의한 비드가 생기지 않도록 만들어진 소선직경 25 μm 의 Pt/Pt-13%Rh 열전대를 같은 재질의 직경 500 μm 의 소선에 수소용접한 것을 사용하였다. 온도변동을 열전대로 계측하는 경우 열관성에 의한

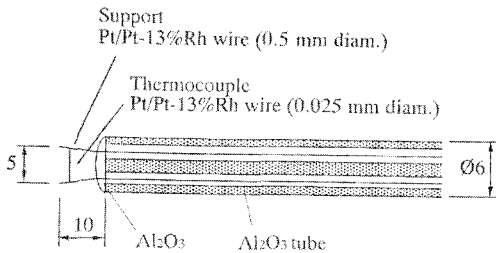


그림 3. 온도 프로브의 구조
Fig. 3. Structure of thermocouple.

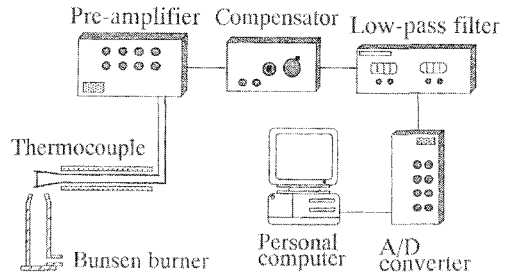


그림 4. 온도측정 시스템
Fig. 4. System of temperature measurement.

응답지연을 보상할 필요가 있다^[23]. 본 실험에서는 본래 유속이나 온도에 의해 영향을 받는 열전대의 응답특성을 1차지연으로 가정하여, 1차 진행특성을 가지는 전기회로로 보상을 하고 이때 보상시정수는 10 ms으로 일정하게 하였다^[23].

그림 4에 온도측정 시스템을 나타내었다. 열전대의 출력은 전증폭기(pre-amplifier)에 의해 50배로 증폭되며, 보상기에 의해 2배로 증폭됨과 동시에 열전대의 1차지연이 전기적으로 보상되어진다. 그 출력은 로우패스 필터(NF Electronic, FV-665)에서 5 kHz 이상의 고주파성분이 제거되어진 후 A/D컨버터(Elmec, Model EC-2392B)에 의해 디지털화 되어 퍼스널 컴퓨터(Nec, PC9801-VX)에 기록되어진다. A/D컨버터의 이산시간은 50 μs (sampling rate 20 kHz)이며 90,000개의 데이터를 기록할 수 있으므로 한번에 4.5초간의 계측이 가능하다. 또한 샘플링 정리^[24]로부터 10 kHz까지 변동의 계측이 가능하지만 본 실험에서는 5 kHz 이상의 고주파 노이즈를 제거하였으며 또한 열전대의 응답특성을 고려하면 1 kHz까지의 온도변동 계측이 가능하다.

그림 5에 본 실험에 이용한 청염과 휘염에 대한 화

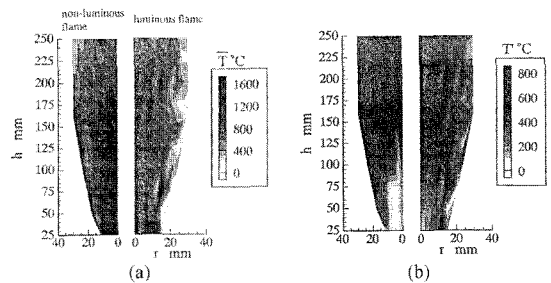


그림 5. 분젠화염 온도분포; (a) 평균온도분포, (b) 온도변동분포
Fig. 5. Temperature distribution of bunsen flame; (a) Distribution of mean temperature and (b) Distribution of rms temperature.

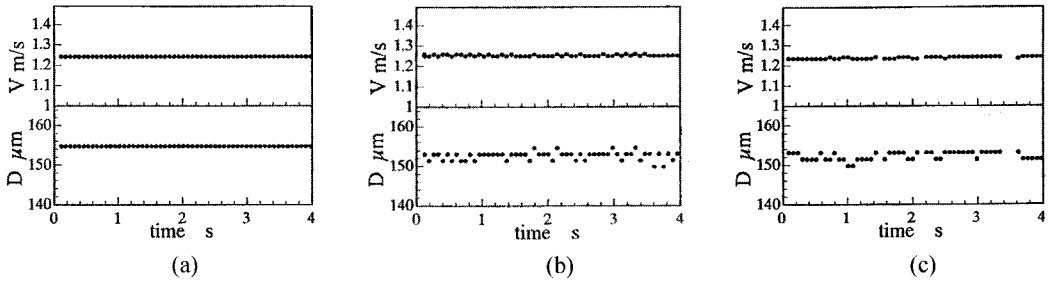


그림 6. 입자속도 및 입경의 시계열 데이터 ($L_f=150$ mm, $H=50$ mm); (a) 화염이 없는 경우, (b) 청염을 놓은 경우, (c) 휘염을 놓은 경우
 Fig. 6. Time-series data of particle velocity and diameter ($L_f=150$ mm, $H=50$ mm); (a) Without flame, (b) With non-luminous flame, and (c) With luminous flame.

염의 평균온도 및 온도변동(rms)의 분포를 나타내었다. 두 화염 모두 버너의 하류 영역에서 평균온도는 저하지만 온도변동의 값은 증가한다.

3. 결과 및 검토

3.1. 광로상의 화염의 영향

3.1.1. 화염위치 및 화염형태의 영향

그림 6(a), (b), (c)는 각각 광로상에 화염이 없는 경우, 송광계에 앞에 청염(non-luminous flame, 부분 예 혼합 화염)을 놓은 경우($L_f=150$ mm, $H=50$ mm), 같은 위치에 휘염(luminous flame, 확산화염)을 놓은 경우의 속도 및 입경에 대한 시계열 데이터의 예이다. 측정대상으로 한 폴리스티렌 입자의 직경은 $153 \mu\text{m}$ 이다. 또한 그림 7(a), (b), (c)은 그림 6(a), (b), (c) 각각의 조건에서의 속도와 입경 계측치의 PDF이며 평균값과 rms 값을 그림 내에 나타내었다. 그림 6(a), (b), (c)를 각각 비교하면 속도 계측치는 화염의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 화염의 존재에 의해 폐기되어지는 데이터(그림 6(b), (c))가 있으며 계측치를 시계열 데이터로서 취급할 때 주의가 필요하다. 한편 입경 계측의 경우, 화염이 광로상에 없을 때는 계측치에 변동이 거의 보이지 않고(그림 6(a)) 양호한 계측이 이루어지고 있다. 그림 7(a)에 나타난 것과 같이, 다음 식에서 정의하는 입경계측치의 표준편차 D' 은 $0.21 \mu\text{m}$ 이다.

$$D' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - D_{10})^2}{N}} \quad (1)$$

여기서 N 은 총 샘플수, D_i 는 i 번째의 입경 계측치, D_{10} 은 계측된 평균입경이다. 그림 6(b), (c)의 화염이 있는 경우에는 계측치에 변동이 보이며 광로상의 화염의 존재가 입경계측에 영향을 미치고 있음을 알 수

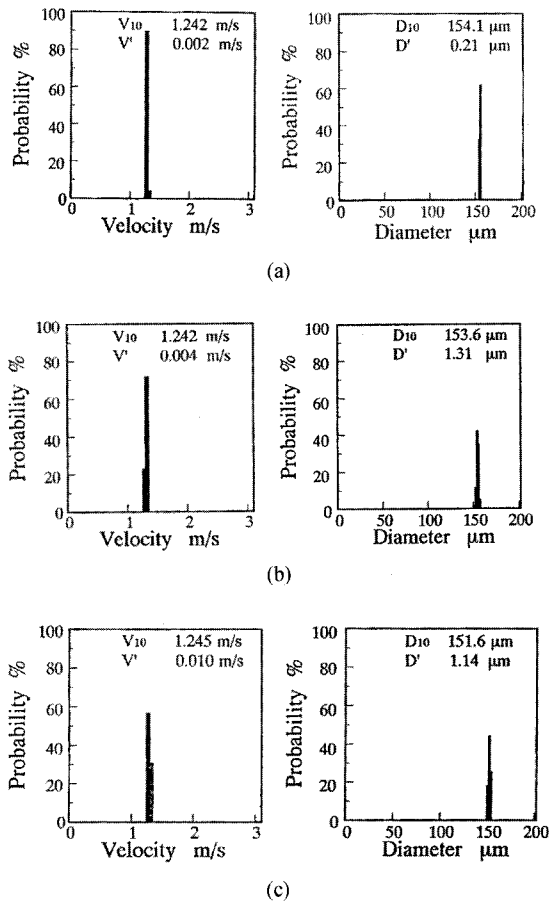


그림 7. 입자속도 및 입경 계측 결과 ($L_f=150$ mm, $H=50$ mm); (a) 화염이 없는 경우, (b) 청염을 놓은 경우, (c) 휘염을 놓은 경우
 Fig. 7. Measurement results of particle velocity and diameter ($L_f=150$ mm, $H=50$ mm); (a) Without flame, (b) With non-luminous flame, and (c) With luminous flame.

있다. 그림 7(b), (c)에 나타난 바와 같이 청염에 대해서 생기는 변동 D' 의 값은, $D'=1.31 \mu\text{m}$, 또한 휘염에 대해서는 $D'=1.14 \mu\text{m}$ 가 되어 크기에 큰 차이는 보이지 않는다. 즉 화염발광이 입사 레이저광의 파장에 대한 중첩성 여부의 영향은 거의 나타나지 않는다. 화염의 존재에 의한 공간의 온도분포의 변동, 즉 굴절률의 변동이 그림 6(b), (c)에 나타내어진 계측치의 변동의 원인이라고 예상되어진다.

광로상에 놓여진 화염의 위치가 계측치에 미치는 영향을 조사하기 위하여 광로상의 분젠버너의 위치를 변화시켰다. 그림 8은 화염의 위치와 계측되어진 평균입경 D_{10} 의 관계를 나타낸 것으로 분젠버너를 각각 송광계의 앞 또는 수광계의 앞에 설치한 경우이다. 또한 그림 9는 화염의 위치와 D' 의 관계를 나타낸 것으로, 모두 PDA 광학계의 광축에 걸리는 화염부분의 평균온도와 변동의 크기가 같도록 $H=50 \text{ mm}$ 으로 고정하였다. 그림 8을 관찰하면 광로상의 화염의 존재는 화염형태(청염 또는 휘염)나 설치위치에 관계하지 않고 계측되

어지는 평균 입경치에는 거의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 또한 어느 조건에 있어서도 평균입경은 $153 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ 의 사이에 있으므로 평균입경에 관해서는 화염이 광로상의 어느 위치에 존재해도 계측의 정도(precision)는 충분하다 라고 할 수 있다.

한편, 그림 9에서와 같이 입경계측치의 변동값은 화염의 위치에 따라 크게 변한다. 즉 송광계, 수광계의 어느 쪽에 화염을 놓아도 광학계와 화염의 거리가 가까울수록 D' 의 값은 증가하는 경향이 관측되어진다. 송광계, 수광계 각각의 앞에 놓인 화염의 영향은 전혀 성질이 다른 것으로 생각되어지기 때문에 각각의 경우에 대해 구별하여 그 원인을 고찰해 보기로 한다. 먼저 송광계의 광로상에 화염이 존재하는 경우, 화염에 의한 공간의 굴절률의 미소한 변화가 측정체적을 형성하는 2개의 레이저 광을 미묘하게 굴절시켜 측정체적의 위치와 크기, 측정체적 내에서의 레이저강도 분포가 변화하여 계측치에 영향을 주는 것으로 예상되어진다. 이 때문에 송광계에 화염이 가까울 수록 2개의 레이저광의 굴절에 의한 측정체적의 벗어남의 정도가 증가하고 D' 도 증가한다.

수광계의 광로상에 화염이 존재하는 경우, 폴리스티렌 입자로부터의 산란광 신호가 화염이 존재하는 영역에서 미묘하게 굴절하여 신호의 질을 저하시킴(오실로스코프를 모니터함으로써 확인되어진다)과 동시에 위상을 변화시킨다. 또한 본 실험에서 이용한 수광 광학계는, 그림 10에 나타난 것과 같이 수광 개구창(aperture window)이 U_1, U_2, U_3 의 3영역으로 분할되어 각각에 대해서 광전자증배관이 할당되어져 있다^[25]. 이 때문에 수광계에 화염이 가까울수록 개구창 내에 굴절률이 불균일한 공간이 많게 된다. 이때 영역 U_1, U_2, U_3 을 통해서 각각의 광전자증배관에 도달하는 도플러 광은 여러 형태로 굴절함으로써 위상에 변화를 초래하는 것으로 예상되어진다.

3.1.2. 화염평균온도와 온도변동의 영향

지금까지의 실험에서는 광축으로부터 버너포트 출구까지의 거리가 $H=50 \text{ mm}$ 로 일정하였지만, 이 H 를 변화시켜 계측을 행하였다. 여기서는 H 에 변화를 가해 광축에 걸리는 화염부분의 평균온도 및 온도변동의 rms값을 변화시킴으로써 H 변화에 따른 영향을 비교하고자 한다.

그림 11은 화염의 위치와 평균입경 D_{10} 과의 관계를 나타낸 것으로 분젠화염을 송광계와 측정체적의 사이 또는 수광계와 측정체적의 사이에 놓았을 때의 계측 결과이다. 그림 12는 화염의 위치와 rms 값 D' 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 측정대상은 직경 $153 \mu\text{m}$ 의

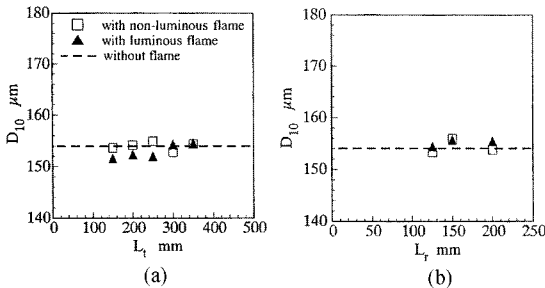


그림 8. 화염위치의 영향 ($H=50 \text{ mm}$); (a) 송광계 측, (b) 수광계 측
Fig. 8. Influence of flame position ($H=50 \text{ mm}$); (a) Transmitter-side and (b) Receiver-side.

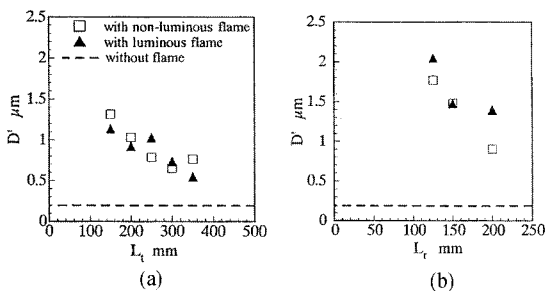


그림 9. 화염위치와 입경계측치의 변동값과의 관계 ($H=50 \text{ mm}$); (a) 송광계 측, (b) 수광계 측
Fig. 9. Relation between rms of particle diameter and flame position ($H=50 \text{ mm}$); (a) Transmitter-side and (b) Receiver-side.

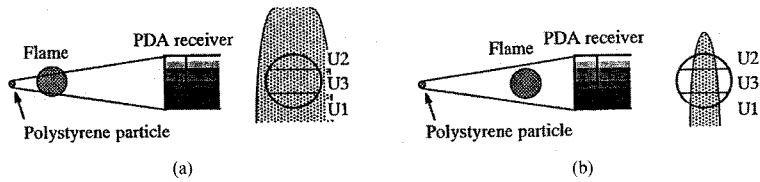


그림 10. PDA 수광계의 개구창과 화염위치의 관계; (a) 화염과 수광계가 먼 경우, (b) 화염과 수광계가 가까운 경우
 Fig. 10. Relation between aperture window of PDA receiver and flame position; (a) Case of long distance between flame and PDA receiver and (b) Case of near distance between flame and PDA receiver.

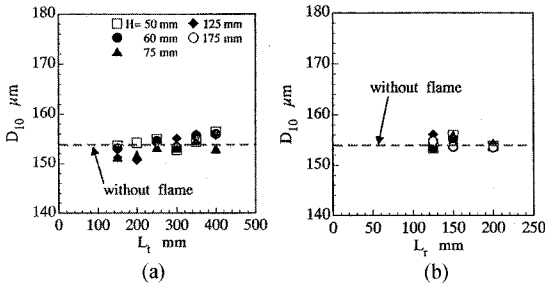


그림 11. 화염위치와 평균입경의 관계; (a) 송광계 측, (b) 수광계 측
 Fig. 11. Relation between flame position and mean diameter; (a) Transmitter-side and (b) Receiver-side

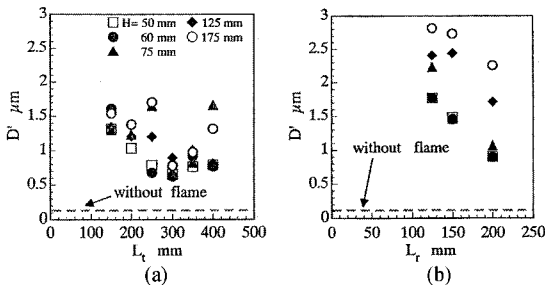


그림 12. 화염위치와 입경의 변동값의 관계; (a) 송광계 측, (b) 수광계 측
 Fig. 12. Relation between flame position and rms of diameter; (a) Transmitter-side and (b) Receiver-side.

폴리스티렌 입자이며 이용한 화염은 전술한 정염이다. 그림 11를 관찰하면 여기서도 평균입경의 계측치는 $153 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ 의 사이에 있으며 H 의 값에 의존하지 않는 것을 알 수 있다. 한편, D' 에 있어서는 H 가 커짐에 따라 증가하며 특히 수광계 앞에 화염이 존재하는 경우에 그 경향이 현저하다(그림 12). 그림 5에 의하면 H 가 증가함에 따라 광축에 걸리는 화염부분의 온도는 저하하고 온도변동은 크게 되기 때문에 화염의 온도변동, 즉 밀도변동을 통한 굴절률의 변동이 계측오차 발

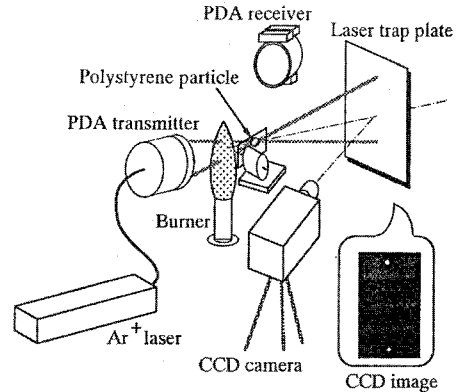


그림 13. 레이저 흔들림량 계측을 위한 실험장치
 Fig. 13. Experimental apparatus for measuring the wavering amount of Laser.

생의 중요한 영향 인자인 것을 추측할 수 있다. 광로상의 화염에 의해 생기는 계측오차는 측정체적의 위치·크기의 변화 및 송광레이저광의 교차각의 변화, 도플러광의 굴절에 의한 위상 변화, 수광계 시야의 흔들림 등에 의한 것이다. 이것은 모든 송광계로부터의 사출 레이저광 및 입자로부터의 도플러광이 굴절의 영향을 받는 것에 귀착되어진다.

그림 13은 굴절에 의한 레이저광의 이동량의 계측과 폴리스티렌 입자의 PDA 계측과의 동시측정을 위한 실험장치 개략도이다. PDA광학계 및 폴리스티렌 입자 회전부는 전술한 것과 동일하다. 여기서는 광로상의 화염에 의한 레이저광의 흔들림을 평가하기 위하여 PDA 송광계로부터 사출되어지는 2개의 레이저광을 레이저 트랩판(laser trap plate)에 발진시켜, 레이저 트랩판 상의 2개의 레이저광의 궤적을 CCD카메라에 의해 촬영하였다. 레이저광의 광로에 걸리는 화염부분의 굴절을 변동이 클수록 레이저광의 궤적은 크게 이동하게 된다. 실험은 분젠버너를 설치하지 않은 경우와 분젠버너를 $L_f=150 \text{ mm}$ 으로 일정하게 하고 $H=50, 75, 125 \text{ mm}$ 의 경우에 대해 행하였다. 이용한 화염은

전술한 청염이다. CCD카메라에 의한 촬영은 10초간 행하고 테이터처리 화면수는 30장으로 하였다(frame rate : 30 sheets/sec).

그림 14는 계측된 레이저 트랩판 상의 레이저광의 궤적이다. 광로상에 화염이 존재하는 경우가 레이저 광의 흔들림이 크고, H의 증가와 함께 그 흔들림도 증가

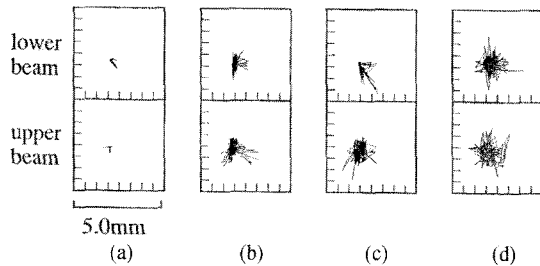


그림 14. 레이저 트랩상에 있어서 입사레이저광의 궤적 ($L_i = 150$ mm); (a) 화염이 없는 경우, (b) $H=50$ mm, (c) $H=75$ mm, (d) $H=125$ mm

Fig. 14. Trace of incident Laser beam on Laser trap plate ($L_i = 150$ mm); (a) Without flame, (b) $H=50$ mm, (c) $H=75$ mm, and (d) $H=125$ mm.

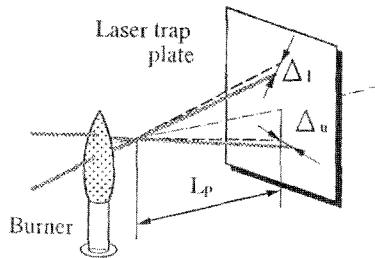


그림 15. 레이저 흔들림량의 정의
Fig. 15. Definition of wavering amount of Laser.

하는 것을 알 수 있다. 여기서 흔들림량을 정량적으로 평가하기 위해서 그림 15에 나타낸 것과 같이 화염을 설치하지 않은 경우의 레이저광 위치로부터의 이동량 Δ_u 와 Δ_l 의 rms값 Δ'_u 와 Δ'_l 를 구해 다음 식에 의해 흔들림량 Δ' 을 정의한다.

$$\Delta' = \Delta'_u/L_p + \Delta'_l/L_p \quad (2)$$

여기서, L_p 는 PDA 측정체적으로부터 레이저 트랩판까지의 거리이고 밑첨자 u 와 l 은 각각 송광계의 상측 레이저광과 하측 레이저광을 의미한다.

그림 16에 나타낸 것과 같이 측정점의 흔들림량 Δ' 과 계측된 입경의 변동값 D' 값의 경향은 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. D' 값의 절대치는 개개의 PDA 광학계의 설계 파라메타의 차이와 계측 설정치 등의 조건에 의존해 변화하기 때문에 계측오차의 일반적인 보정함수를 흔들림량 Δ' 을 이용하여 정의하는 것은 어렵지만, 계측시에 송광계 레이저광의 흔들림량을 측정

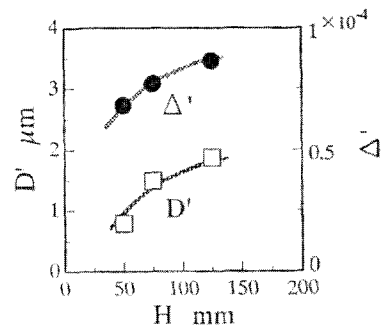


그림 16. 입경의 변동값과 입사레이저광의 흔들림량의 관계 ($L_i=150$ mm)
Fig. 16. Relation between rms of diameter and wavering amount of incident Laser beam ($L_i=150$ mm).

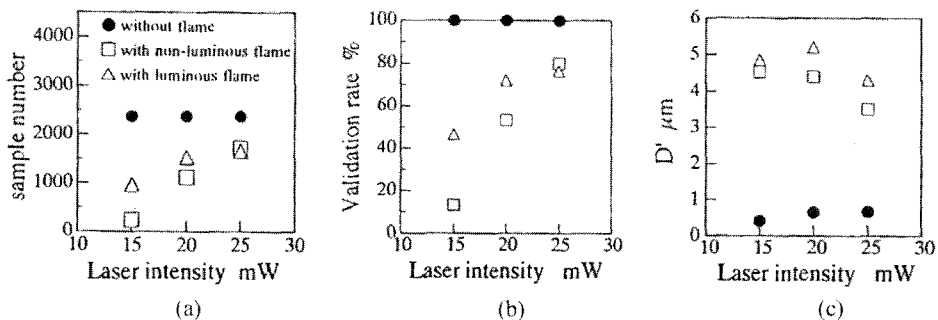


그림 17. 레이저 출력과 계측오차의 관계 ($L_i=125$ mm, $H=175$ mm); (a) 샘플수, (b) Validation rate, (c) 입경계측치의 변동값
Fig. 17. Relation between Laser output and measurement error ($L_i=125$ mm, $H=175$ mm); (a) Sample number, (b) Validation rate, and (c) Rms of particle diameter.

함에 의해 화염의 영향에 의한 계측오차의 크기를 정성적으로 평가할 수 있다고 예상되어진다.

3.2. 레이저 출력의 영향

화염의 존재가 도플러신호의 S/N비를 저하시키는 예로서 그림 17에 레이저출력을 변화시킨 경우의 계측 sample number, 데이터의 validation rate, rms 값의 변화를 나타내었다. 화염은 수광계로부터 거리 $L_r=125$ mm, $H=175$ mm의 위치에 설치되었고 레이저출력은 레이저 교차부에 있어서 15, 20, 25 mW가 되도록 변화시켰다. 여기서 측정대상으로 한 것은 직경 153 μ m의 폴리스티렌 입자이다.

이들 결과로부터 레이저파워가 낮은 경우는 화염이 광로상에 존재함에 의해 신호의 S/N비가 저하하고 유효한 데이터수가 감소하는 것을 알 수 있다(그림 17(a), (b)). 또한 레이저 출력을 높이면 폐기되어지는 데이터 수는 감소하지만 측정된 데이터로부터 얻어지는 D' 값은 레이저 출력의 대소에는 거의 의존하지 않고 오히려 화염의 존재 유무의 영향이 두드러진다(그림 17(c)).

4. 결 론

PDA 계측에 있어서 광로상의 화염의 존재가 계측에 미치는 영향에 대해 기지의 입경을 가지는 폴리스티렌 입자를 이용하여 계측치의 정량적인 평가를 시도하여 오차 요인을 검토하였다. 그 결과 이하의 결론을 얻었다.

(1) 속도계측에 있어서 광로상의 화염의 존재가 계측치에 영향을 주지 않지만, 데이터율이 저하하는 경향이 있다.

(2) 입경계측에 있어서 광로상의 화염의 존재는 입경 평균치에는 거의 영향을 주지 않는다. 그러나 화염이 송광계 및 수광계에 가까울수록 변동값은 크게 되고 특히 수광계의 앞에 화염이 존재할 때에 계측정도가 더 저하한다.

(3) 입경계측에 있어서는 화염의 흔들림, 즉 굴절률의 변화가 중요한 영향인자이며 계측치에 큰 영향을 미친다.

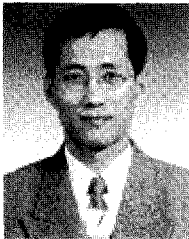
(4) 광로상의 화염의 존재에 의해 도플러신호의 S/N비가 저하하기 때문에 높은 레이저 출력이 필요하게 된다.

(5) PDA 계측에 있어 광로상의 화염의 영향에 의한 계측오차를 평가하는 지표로서 레이저광의 흔들림양을 저분하여 그 가능성을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] 양영준, "연소장에서의 광학식 수광프로브의 적용", 센서학회지, 제13권, 제5호, pp. 335-341, 2004.
- [2] 마대영, 김정규, "초음파분무법으로 제조한 α - Fe_2O_3 막의 구조적 및 전기적 특성에 미치는 기판온도 효과", 센서학회지, 제13권, 제4호, pp. 127-131, 2004.
- [3] 中部主敬, 水谷幸夫, 平尾知之, "火炎發光と油敵ミ-散亂による噴霧火炎と氣液混燒火炎の構造觀察", 日本機械學會論文集, 55-516B, pp. 2517-2525, 1989.
- [4] 赤松史光, 中部主敬, 水谷幸夫, 香月正司, "予混噴霧流中で燃焼する油滴群の光學的計測", 日本機械學會論文集, 60-577B, pp. 3172-3178, 1994.
- [5] 김용규, 강기훈, 감기술, 이영희, "Pt/Pd 열전대의 실온보상을 위한 Cu-Ni 합금 개발", 센서학회지, 제13권, 제6호, pp. 405-410, 2004.
- [6] 서정환, 노상수, 이용안, 정귀상, 김광호, "고온용 압저항센서용 크롬산화박막의 특성", 센서학회지, 제14권, 제1호, pp. 56-61, 2005.
- [7] N. M. Laurendeau, "Temperature measurement by light-scattering methods", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 14, pp. 147-170, 1988.
- [8] F. Drust, A. Melling, and J. H. Whitelaw, "Principle and practice of laser doppler-anemometry", *Academic Press*. 1976.
- [9] W. D. Bachalo and M. J. Houser, "Phase/doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions", *Opt. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 583-590, 1984.
- [10] D. L. Black, M. Q. McQuay, and M. P. Bonin, "Laser-based techniques for particle-size measurement: a review of sizing methods and their industrial applications", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 22, pp. 267-306, 1996.
- [11] V. G. McDonnell and G. S. Samuelsen, "Application of laser interferometry to the study of droplet/gas phase interaction and behavior in liquid spray combustion system", *Combust. Sci. and Tech.*, vol. 74, pp. 343-359, 1990.
- [12] 栗原昇, 池田裕二, 中島健, "エアアシストインセクタにより形成された噴霧の分散過程", 日本機械學會論文集, 61-582B, pp. 759-765, 1995.
- [13] J. Domnick, A. Lindenthal, C. Tropea, and T. H. Xu, "Application of phase doppler anemometry in paint sprays", *Atomization and Spray*, vol. 4, pp. 437-450, 1994.
- [14] G. Gouesbet and G. Grehan, "Gaussian beam errors in phase doppler anemometry and their elimina-

- tion”, *Fifth Symp. (Int.) on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, 11.6, pp. 243-259, 1990.
- [15] Y. Hardalupas and A. M. K. P. Taylor, “Phase validation criteria of size measurement for the phase doppler technique”, *Exp. in Fluids*, vol. 17, pp. 253-258, 1994.
- [16] F. Durst, C. Tropea, and T. H. Xu, “The slit effect in phase doppler anemometry”, *2nd Conf. (Int.) on Fluid Dynamic Measurement and its Applications*, pp. 38-43, 1994.
- [17] Y. Ikeda, F. Sekihara, and T. Nakajima, “Set-up parameter optimization of phase doppler technique for spray measurement”, *7th Conf. (Int.) on Liquid Atomization and Spray Systems*, pp. 983-990, 1997.
- [18] M. Saffman, “Automatic calibration of LDA measurement volume size”, *Applied Optics*, vol. 26, no. 13, pp. 2592-2597, 1987.
- [19] H. H. Qiu and M. Sommerfeld, “A reliable method for determining the measurement volume size and particle mass fluxes using phase-doppler anemometry”, *Exp. in Fluids*, vol. 13, pp. 393-404, 1992.
- [20] Y. Ikeda, T. Hirohata, and T. Nakajima, “Measurement uncertainties of phase doppler technique due to effect of slit location, control volume size effects”, *Development in Laser Techniques and Fluid Mechanics*, pp. 165-179, 1997.
- [21] J. K. Martin, “Transient diesel sprays: application of the phase/doppler particle analyzer for the measurement of liquid droplet characteristics”, *Combust. Res.*, vol. 91, pp. 1-12, 1992.
- [22] G. Pitcher, G. Wigley, and M. Saffman, “Sensitivity of droplet size measurement by phase doppler anemometry to refractive index changes in combustion fuel sprays”, *Fifth Sym. (Int.) on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 14.4, 1990.
- [23] 水谷幸夫, 松本弘寸柵, 香月正司, “熱電對による火炎溫度とその變動の測定”, *日本機械學會論文集*, 51-468B, pp. 2656-2663, 1985.
- [24] 南茂夫, 河田聰編著, *科學計測のための波形データ處理*, CQ出版社, 1986.
- [25] DANTEC, PDA User’s manual, pp. 20.



양 영 준 (Young-Joon Yang)

- 1991년 2월 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 1996년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 7월 오사카대학교 대학원 기계물리 연소공학 전공(공학박사)
- 1996년 1월 ~ 1998년 2월 (주)두산중공업
- 2002년 4월 ~ 2003년 2월 (주)이온공학 연구소(일본 국가연구기관)
- 현 진주산업대학교 자동차공학과 전임강사
- 주관심분야 : 연소공학 광계측