

층류화염 유동속도 측정을 위한 modulated LII 기법

이원남^{*}, 이정수^{**} · 남연우^{**}

Modulated LII technique for the Measurement of Flow Velocity in Laminar Flames

Wonnam Lee^{*}, Jung Soo Lee^{**} and Youn Woo Nam^{**}

ABSTRACT

The modulated LII technique has been suggested for the measurement of axial velocity profiles of laminar diffusion flames. The theoretical background is explained based on the blackbody radiation and LII signal. Experimentally, soot particles in ethylene diffusion flames are heated by a modulated Ar-ion laser beam. LII signals and their phase angles are measured using a lock-in amplifier at the different flame heights and the axial flow velocities are obtained from the measured phase angle delay informations. The measured velocities are similar to those from LDV measurements under the same operating conditions. The effects of laser power, LII signal wavelength, and modulation frequencies are not sensitive to the velocity measurement. However, the choice of an optical chopper blade type could affect the measurement result. The use of a 6/5 chopper blade showed the better result that is possibly due to the square shape of modulated laser beam. This study successfully demonstrated that axial flow velocities of laminar diffusion flames can be measured by a new technique utilizing LII signal, which does not need particle seeding unlikely to LDV or PIV techniques.

Key Words : Modulated LII technique, Flow Velocity, Laser Induced Incandescence, Laminar Diffusion Flame, Soot Particle

1. 서 론

연소현상 또는 화염에 대한 연구에서 유동장 특성 즉 유동 속도에 대한 정보는 매우 중요하다. 그러나 고온의 조건에서 화학반응이 진행되는 화염에서 유속을 측정하는 것은 쉽지 않다. 현재 화염에서 유동 속도를 측정하는 방법으로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry) 또는 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 등이 널리 사용되고 있다. 이와 같은 레이저 응용 광학계측 기법들을

이용하면 다양한 조건에서 화염이 존재하는 유동장의 속도를 비교적 정확하게 측정할 수 있으며, 특히 난류유동의 속도를 측정할 수 있다[1,2]. 그러나 이 방법들은 모두 particle seeding이 필요하며 이에 따른 많은 제약을 갖게 된다. 경우에 따라서 고온의 화염 내부 유속을 측정하기에 적절한 particle seeding이 불가능하기도 하며, 또한 이 기법들은 모두 비교적 복잡한 측정 시스템이 요구되고 있어 화염의 유속을 측정하려면 많은 시간과 비용 및 노력이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 확산화염에 레이저를 조사하면 화염 내부에 존재하는 매연입자에서 생성되는 LII(Laser Induced Incandescence) 신호를 이용하여 매연이 존재하는 지역의 유동속도를 측정하는 매우 간단한 기법을 제안하고 이를 이론적 및 실험적으로

* 단국대학교 기계공학과

** 단국대학교 대학원 기계공학과

† 연락처, wlee@dku.edu

검토하여 그 가능성을 입증하였다.

화염에서의 LII 신호는 레이저를 화염에 조사하면 화염내부에 존재하는 입자가 레이저광을 흡수하여 온도가 상승하고 이에 따라 방출되는 열복사광이다. 확산화염의 내부에는 대부분 매연입자가 존재하고 매연입자는 광대역에 걸쳐서 빛을 잘 흡수한다. 따라서 최근에 고온으로 가열된 입자가 방출하는 LII 신호를 이용하여 화염, 엔진과 배기가스 등에서 발생하는 매연의 특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. LII에 대한 연구는 매연이 있는 화염에서 라만 산란 신호를 압도하는 매연입자의 배경광도(background luminosity)의 관찰로부터 이런 배경광도가 화염에서 매연질량 농도를 측정하는데 유용하다고 제안한 이후 활발하게 이루어졌다[3]. 매연(soot)은 대부분이 탄소로 이루어진 입자로 이루어져 있으므로 레이저로 가열하면 에너지를 흡수하고 온도가 증가하여 외부로 LII 신호를 방출하게 된다. 일반적으로 LII 기법은 Nd:YAG 레이저와 같이 매우 높은 에너지 밀도를 갖는 열원을 이용하여 매연입자의 온도를 3950 K 정도(매연입자의 증발온도)까지 증가시킨 후 방출되는 신호를 측정하여 매연의 체적분율 또는 입자의 크기를 측정하는데 사용되어 왔다[4-7]. 그러나 이와 같이 매연입자의 온도를 크게 증가시키면 레이저의 조사에 따라 화염의 유동장이 교란을 받게 되어 연속적인 측정에 많은 제약이 있고 대부분은 레이저 플래쉬 개념으로 영상을 얻어서 자료를 분석하는 방법이 사용된다.

본 연구에서는 온도가 증가한 매연입자가 유동장을 따라 움직이며 방출하는 LII 신호를 측정하여 유동 속도를 측정하는 새로운 기법을 검토하였다. 이 때 화염에서 유동 속도를 측정하기 위해서는 화염의 유동장을 교란시키지 않으면서 자료를 얻을 수 있어야만 한다. 높은 에너지 밀도로 매연입자를 가열하는 경우, 가열 후 연소장의 변화가 예상된다. 따라서 최소한의 온도상승(100 K 이하)이 발생하도록 매우 낮은 에너지 밀도를 갖는 Ar-ion 레이저를 이용하여 매연입자를 가열한 후 위치에 따라 방출되는 LII 신호를 측정하여 충류확산화염의 유동속도를 측정하였다.

2. 이론적 배경

파장(λ)과 온도(T)에 따른 흑체의 복사강도(intensity), $I_B(\lambda, T)$ 는 식(1)과 같이 Planck 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$I_B(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]^{-1} \quad (1)$$

여기에서, 일차복사상수(first radiation constant)와 이차복사상수(second radiation constant)는 각각 $C_1 = 2\pi c^2 h = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 와 $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 인 물리적 상수의 값으로 이루어져 있으며, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수를 의미한다. Fig. 1은 Planck 법칙을 나타낸 곡선으로 온도에 따라 흑체의 복사강도가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 이때 온도가 2500 K 이하일 경우 가시광선 부근의 영역에서는 온도 증가에 따른 복사강도 증가가 자연대수(exponential)에 비례하며 식 (2)와 같이 Wien의 법칙으로 근사될 수 있다.

$$I_B(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-\frac{C_2}{\lambda T}) \quad (2)$$

이로부터 일반적인 화염온도에서는 가시영역의 550 nm보다 750 nm에서 매연입자의 열복사 신호가 더 강하다는 것을 알 수 있다. Fig. 1로부터 750 nm의 파장에서 흑체온도가 1600 K에서 1650 K로 50 K 증가하면 방출되는 복사강도는 $9.76974 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ 에서 $1.40507 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ 로 약 43.8 % 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 흑체의 온도를 시간에 따라 일정한 주기로 변화시키면 흑체의 복사강도는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 시간에 따라 최댓값에서 최솟값으로 주기적으로 변화하게 된다. 이처럼 온도의 변화에 따라 변하는 흑체의 복사강도는 LII 신호로 측정할 수 있게 된다. CW 레이저광을 초퍼(chopper)를 이용하여 펄스로 공급하면 화염의 매연입자에 에너지를 주기적으로 공급할 수 있으며, 이때 매연입자에서 방출되는 LII 신호의 변화를 화염 높이에 따라 측정하면 축 방향 유속을 알 수 있다.

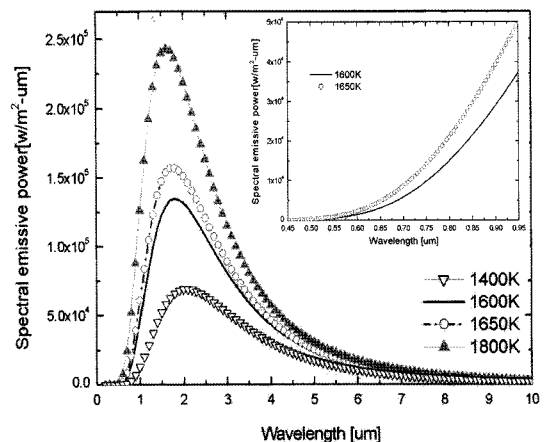


Fig. 1 Spectral emissive power

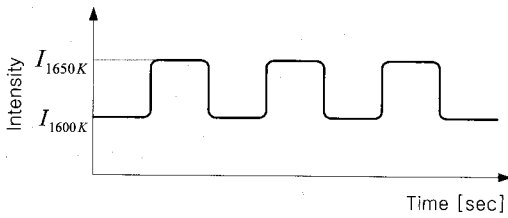


Fig. 2 Modulated LII signal

Figure 3에 나타난 것처럼 화염의 일정한 높이에서 매연입자를 레이저로 가열하고 높이를 변화시키면서 방출하는 LII 신호를 측정하게 된다. 이때 LII 신호는 화염의 높이 변화 ΔZ 에 따라 Fig. 4와 같이 입력 신호로부터 Δt 만큼의 시간차가 발생하며 측 방향의 유속을 다음으로 측정할 수 있다.

$$u_z = \frac{\Delta Z}{\Delta t} \quad (3)$$

또한 신호의 지연은 위상차로도 나타낼 수 있으며 이 때 위상차와 시간지연은 다음의 관계를 갖는다.

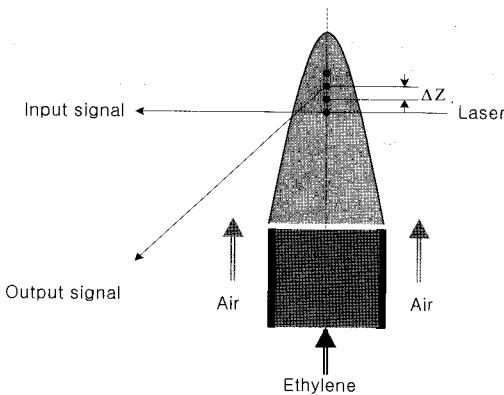


Fig. 3 LII signal detection

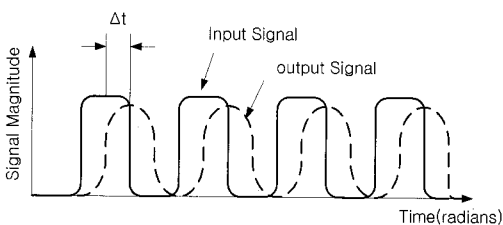


Fig. 4 Delayed LII signal

$$\Delta t = \frac{T \cdot \Delta \phi}{360^\circ} \quad (4)$$

이때 T 는 주기를 나타낸다. 따라서 서로 다른 높이에서 LII 신호의 시간지연 또는 위상차를 측정하면 이로부터 유속을 알 수 있다. 일반적으로 시간지연 측정에는 많은 오차와 불확실성이 따르지만 lock-in 앰프를 이용하면 정확한 위상각을 측정할 수 있다. 이를 이용하면 비교적 간단하게 화염의 유속을 측정할 수 있게 된다.

3. 실험장치 및 방법

LII를 이용한 층류 확산화염의 유속을 측정하기 위하여 동축류 버너(co-flow burner)를 사용하였다. 기존의 LDV로 속도를 구한 값들과 비교하기 위한 실험은 Santoro *et al.*[1]이 사용한 것과 동일한 버너를 사용하였으며, 이후 다양한 실험을 위하여 매연 연구가 많이 수행되고 있는 다른 크기의 동축류 버너를 사용한 실험을 수행하였다.

LDV 결과와 비교를 위한 실험에서는 버너 중심에 위치한 외경 12.7 mm, 내경 11.1 mm의 황동 노즐을 사용하여 연료를 공급하고, 노즐 외부에 내경 104 mm의 동축관으로 공기(shield air)를 공급하였다. 연료는 CP급 에틸렌(C_2H_4 , 순도 99.9%)을 사용하였으며, 질량흐름 제어장치(MFC, MKS & Brooks Instrument)와 readout장치(LOKAS, GMATE2000)를 사용하여 연료와 shield air의 유량을 제어하였다. 에틸렌의 유량은 기존의 LDV로 측정한 실험과 동일하도록 $3.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 설정하였다. 다양한 실험에는 연료 노즐이 외경 9.53 mm, 내경 8.0 mm 인 동축류 버너를 이용하였으며 이때 에틸렌을 3.0 scc/s 로 공급하였다. 이 버너의 구조는 이원남[8]에서 자세히 설명되었다.

Figure 5는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 화염 내의 매연입자를 가열하기 위한 레이저 광원으로는 Ar-ion 레이저(Spectra Physics; Stabilite 2017-05)를 사용하였다. 레이저광은 광학 chopper(Stanford Research System; SR540)와 렌즈를($f=1000 \text{ mm}$) 통과하여 화염에 도달하고 화염을 통과한 신호는 광다이오드로 측정된다. 레이저광과 수직인 방향에서 광증배관(PMT)를 이용하여 LII 신호를 측정하였다. 이때 필요에 따라 550 nm 또는 750 nm의 협대역 통과(narrow-band-pass)필터를 사용하였으며 이 필터들의 통과 대역(FWHM)은 각각 10 nm이다. Fig. 6은 실제 측정장치의 구성을 보여주고 있으며 이때 외부의 잡음을 최소화하기 위하여 수광렌즈 및 조리개를 통과한 신호는 외부와 광학적

으로 철저히 차단시켰다. 화염의 측정위치를 수평, 수직으로 이동하기 위하여 0.025 mm/pulse의 해상도를 가지는 3축 이송장치 위에 동축류 버너를 장착하였고 역시 0.025 mm/pulse의 해상도를 가지는 motorized vertical translation stage를 제작하여 PMT도 Z축(화염의 수직방향)으로 이송하도록 장착하였다. Lock-in 앰프(Stanford Research Systems; SR830)와 이송장치는 자체 개발한 Labview (National Instrument) 프로그램과 DAQ 장치를 이용하여 제어하였다.

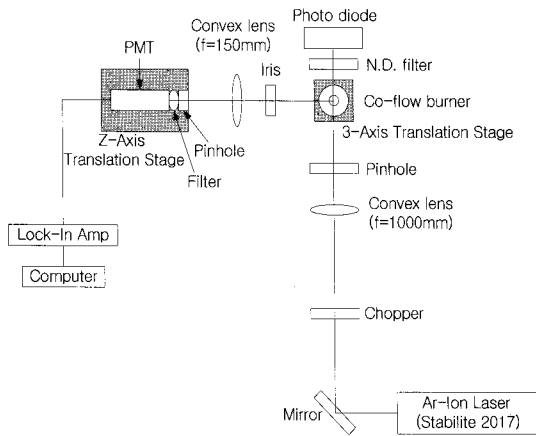


Fig. 5 Schematic of experimental set-up

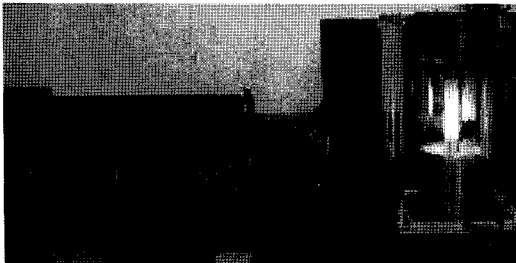


Fig. 6 PMT set-up

4. 실험결과 및 고찰

Figure 7은 실제로 측정된 레이저 광의 산란신호를 보여주고 있다. 이때 화염 높이 49 mm에 조사된 레이저의 514.5 nm 산란광은 레이저 광과 수직인 방향에서 직경 0.2 mm인 핀홀을 장착한 PMT를 사용하여 측정되었다. 레이저 광의 폭은 최대 1.0 mm (1/e 기준으로는 약 0.5 mm) 이내로 측정되었다. 따라서 레이저 광이 조사된 위치에서 0.5 mm 벗어난 지역에서는 레이저 광이 존재하지 않고 단지 LII 신호만이 얻어진다는 것을 확인할 수 있었다.

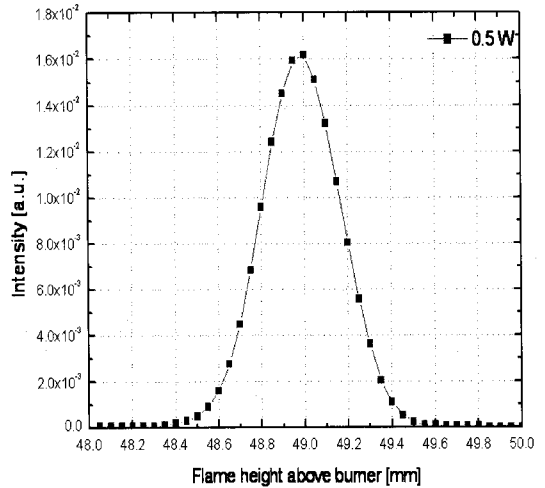


Fig. 7 Laser intensity profile

Figure 8은 오실로스코프(Agilent ; 54621A)로 측정된 시간에 따른 입력 및 출력신호의 전형적인 예를 보여주고 있다. 이 경우 내경 11.1 mm 버너에서 에틸렌을 유량 3.85 cm³/s로 공급하였으며 레이저를 화염의 40.0 mm 높이에 0.5 W의 출력으로 조사하였다. 화염 높이 40.5 mm와 44.5 mm에서 측정된 LII 신호로부터 신호의 크기가 줄어들고 시간지연이 발생하는 것을 알 수 있다. 이때 발생한 시간지연 Δt 와 거리변화 ΔZ 를 이용하여 식 (3)으로부터 측 방향 유속을 구할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 앞서 설명한 것처럼 Δt 의 측정에는 임의적인 요소가 크게 존재할 수 있어 본 연구에서는 lock-in 앰프를 이용하여 위상차 $\Delta\phi$ 를 측정하고, 식 (3)과 (4)를 이용하여 유속을 측정하였다.

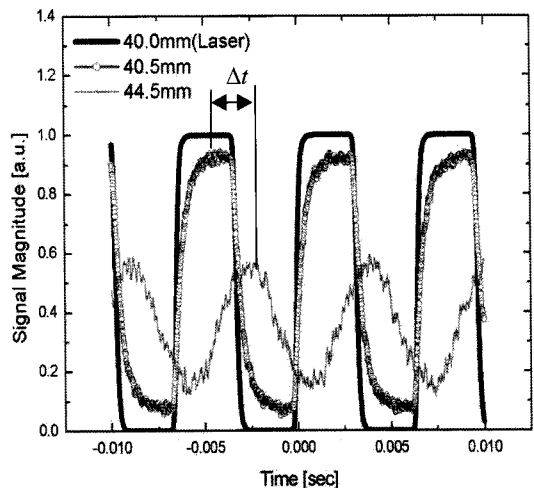


Fig. 8 Actual input and output signal

LII 신호를 이용한 유속 측정에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 레이저 출력, LII 신호 파장, modulation 주파수를 검토하였다. 이 실험은 연료노즐 내경이 8.0 mm인 버너에 에틸렌을 3.0 scc/s로 공급하며 수행하였다.

Figures 9와 10은 레이저 출력과 LII 신호 측정 파장의 영향을 나타내고 있다. 이때 레이저 광은 화염높이 49.0 mm에, modulation 주파수는 308 Hz로 고정하였다. Fig. 9는 측정된 LII 신호의 위상차를 Fig. 10은 신호의 크기를 각각 보여주고 있다. 레이저 가열 위치에서 벗어나는 49.5 mm 이후의 LII 신호는 레이저 출력에 따라 증가하지만 위상차는 동일한 것을 알 수 있다.

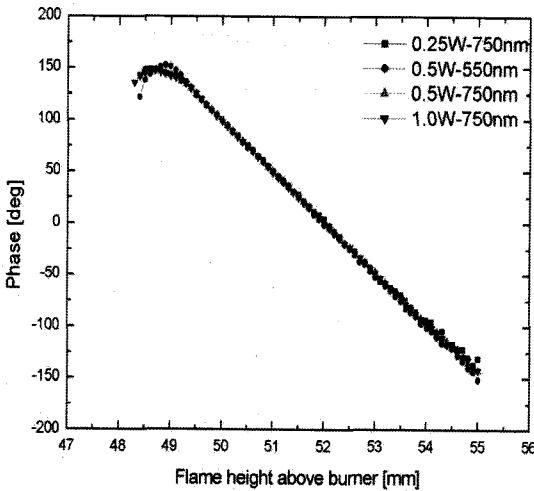


Fig. 9 Phase change with increase of ΔZ

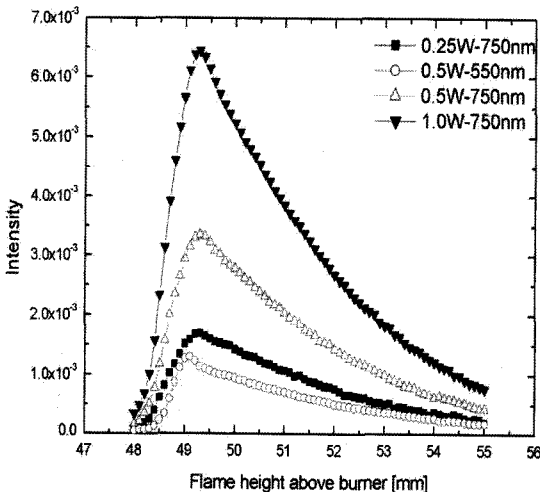


Fig. 10 LII intensity with increase of ΔZ

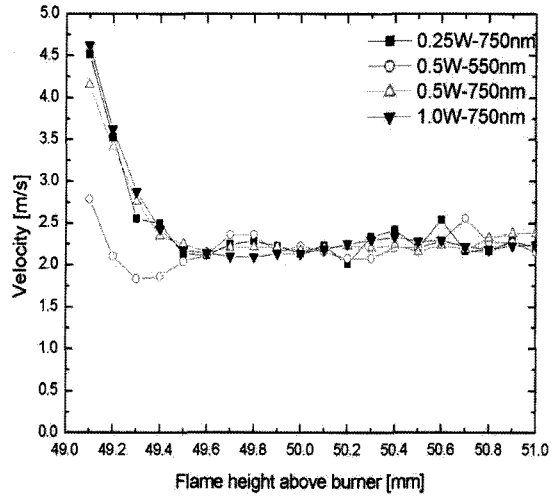


Fig. 11 Axial velocities obtained from measured LII signals

Figure 11은 이 위상차를 이용하여 얻어진 속도를 보여주고 있다. 레이저로 가열되는 지역을 벗어난 49.5 mm 이후에서는 유동 속도를 측정할 수 있으며 이는 레이저 출력이나 LII 신호 측정 파장의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 에너지 보존식을 적용하여 계산한 결과 레이저의 가열로 증가하는 측정부위의 온도 증가는 최대 100 K를 넘지 않았으며, 따라서 레이저 가열에 따른 부력효과가 거의 나타나지 않기 때문이라는 것을 알 수 있었다. Fig. 10으로부터 일반적인 화염의 온도 영역에서는 550 nm 보다는 750 nm에서 LII 신호가 더 강하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 LII 신호를 이용한 층류화염의 유동속도 측정에는 750 nm에서 측정하는 것이 유리하다. 이 결과를 바탕으로 이후 실험은 대부분 레이저 출력을 0.5 W로 하고, 레이저 조사 위치로부터 +0.5 mm, +1.5 mm 지점에서 750 nm의 LII 신호를 이용하여 유속을 측정하였다.

Figure 12와 13은 modulation 주파수의 영향을 보여주고 있다. 사용된 광학 chopper는 30/25 blade와 6/5 blade이며 이는 각각 30개의 뚫린 구간과 30개의 막힌 구간과 6개의 뚫린 구간과 6개의 막힌 구간이 존재하는 것이다. 따라서 30/25 blade는 높은 주파수(400 Hz~3.7 kHz)에서 사용하고 6/5 blade는 낮은 주파수(4 Hz~400 Hz)에서 사용한다.

Figure 12는 측정된 LII 신호의 위상차를 Fig. 13은 신호의 크기를 각각 보여주고 있다. 레이저 가열 위치에서 벗어나는 49.5 mm 이후의 LII 신호는 modulation 주파수에 따라 위상차가 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. Fig 13은 modulation 주파수가 높아지면 펄스 시간이 짧아

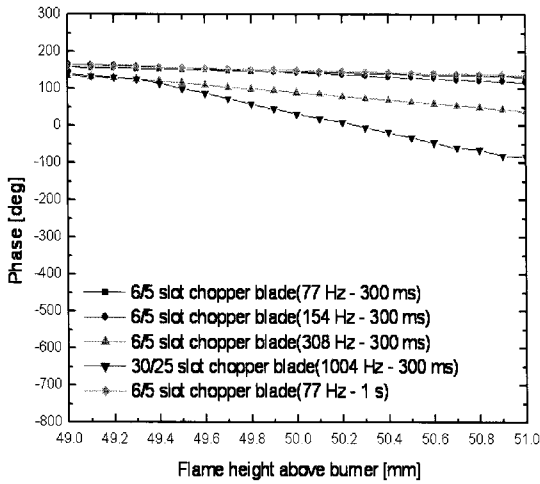


Fig. 12 Phase change with various modulation frequencies

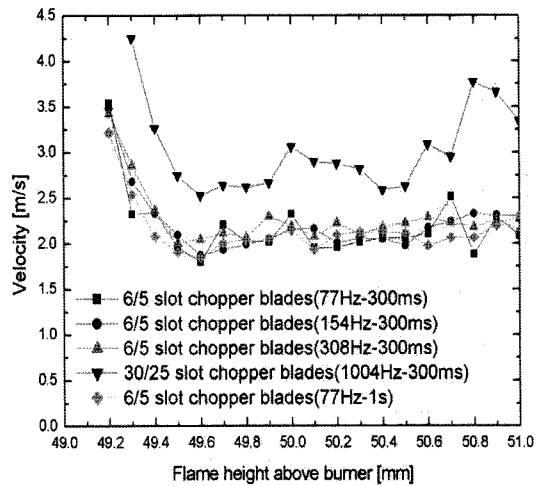


Fig. 14 Axial velocities obtained with different modulation frequencies

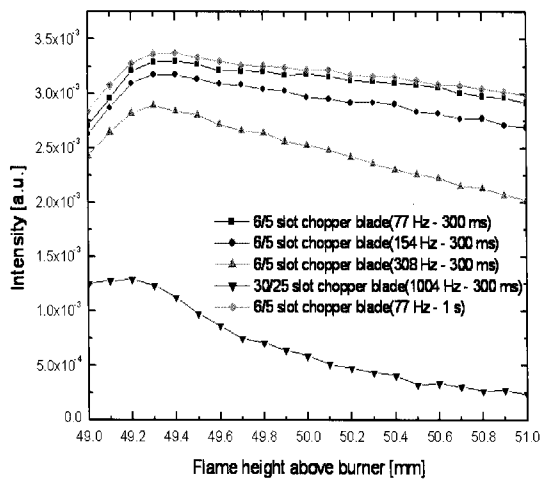


Fig. 13 LII intensities with various modulation frequencies

지면서 LII 신호가 약해지는 것을 보여준다. 의 변화에 따라 레이저 출력에 따라 증가하지만 위 상차는 동일한 것을 알 수 있다.

Figure 14는 이 자료를 이용하여 구한 속도를 보여준다. 낮은 주파수 영역에서는 modulation 주파수의 영향이 없으나 30/25 blade 광학 chopper를 사용한 1004 Hz 결과는 다르게 나타났다. 이는 30/25 blade 광학 chopper의 경우 레이저 빔에 비해 슬롯의 크기가 작으므로 레이저 가열 파형이 사각파에서 크게 벗어나기 때문이라고 생각된다. 따라서 추후 실험은 6/5 blade를 이용하여 수행되었으며 modulation 주파수는 154 또는 77 Hz를 사용하였다.

연료 노즐의 외경이 12.7 mm, 내경이 11.1 mm인 버너에서 에틸렌 유량 3.85 cm³/s로 측정하여 그 결과를 동일한 조건에서 측정된 LDV 결과[1]와 비교하였다. Fig. 15는 화염의 20, 40, 70 mm 지점에서 각각 화염의 반경 방향에서 속도를 LDV로 측정된 값과 비교하고 있으며 매연이 어느 정도 이상 존재하는 구간에서만 속도가 측정 되는 것을 알 수 있다. LII 신호를 이용하여 측정된 속도는 LDV로 측정된 것보다 0.1 ~ 0.2 m/s 정도 빠르게 나왔으나 이는 오차범위 내에서 거의 일치 한다고 볼 수 있다. Fig. 16은 화염의 중심에서 축 방향을 따라 측정 한 결과를 보여준다. 매연이 어느 정도 이상 존재하는 40 ~ 75 mm 구간에서 화염의 위쪽으로 갈수록 속도가 조금씩 증가하며 LDV로 측정된 결과와 거의 일치 하는 것을 알 수 있다.

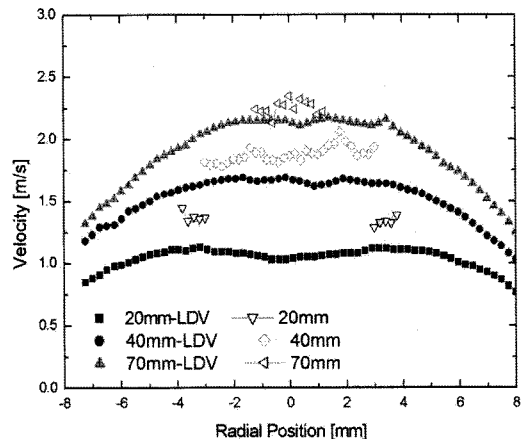


Fig. 15 The velocity profile at the flame height of 20, 40, and 70 mm

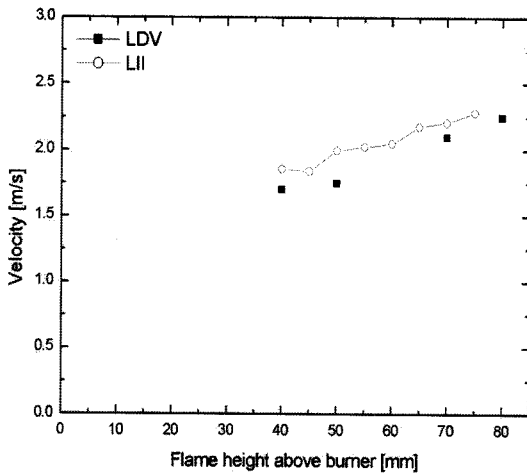


Fig. 16 The axial velocities along the center line

매연입자의 LII 신호를 이용한 유속 측정 기법을 이용하여 연료 노즐의 외경이 9.53 mm, 내경이 8.0 mm인 버너를 이용하여 화염의 축 방향 유속을 측정하였다. Fig. 17은 화염의 20, 30, 40, 50, 60 mm 지점에서 각각 화염의 반경방향으로 측정된 속도분포를 보여준다. 화염높이 20, 30 mm 지점에서는 화염의 중심 근처에 매연이 거의 존재하지 않아 속도를 측정할 수가 없었다. 화염의 위로 올라 갈수록 속도가 조금씩 증가 하는 것을 알 수 있으며 매연의 분포가 비교적 균일 해지는 화염의 위쪽에서는 반경 방향의 속도 분포가 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

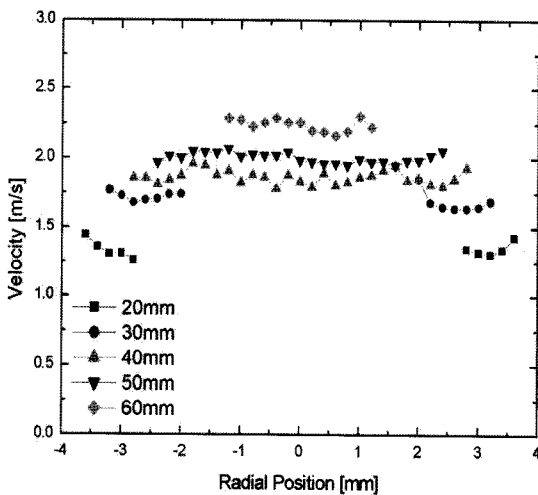


Fig. 17 The velocity profile at the flame height of 20, 30, 40, 50, and 60 mm

Figure 18은 화염의 중심에서 축 방향을 따라 측정된 35~65 mm 구간에서의 속도와 매연의 체적분율이 가장 높은 지점의 속도를 나타낸 것이다. 이 두 속도를 비교 해본 결과 거의 일치하는 것을 알 수가 있다. 화염의 아래쪽은 화염의 중심 근처에서는 매연이 거의 존재하지 않기 때문에 LII 신호가 거의 나오지 않았고 화염의 35 mm 지점서부터 속도를 구할 수 있었다. 화염의 35 mm 이상의 지점에서는 화염의 중심과 화염의 양끝단의 속도가 거의 같았다. 이와 같은 화염속도의 측정은 간단하게 유동장 특성을 파악하는데 매우 도움이 된다는 것을 알 수 있다. 특히 압력조건 등과 같이 LDV 적용이 어려운 경우에 유용하리라 생각된다.

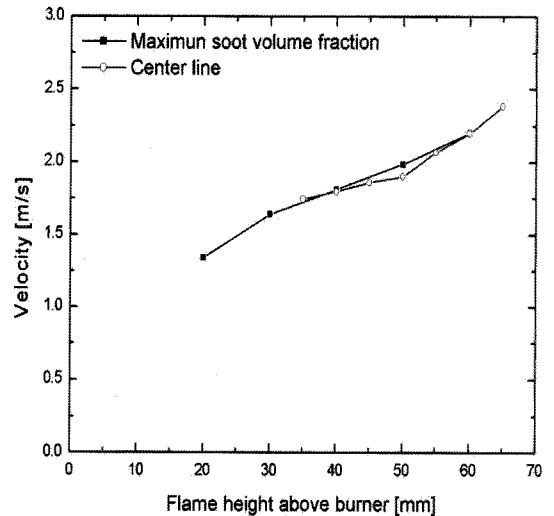


Fig. 18 The axial velocities along the center and the maximum soot volume fraction lines.

5. 결론

확산화염의 내부에 존재하는 매연입자의 LII 신호를 이용하여 매연이 존재하는 지역의 유동속도를 측정하는 새로운 방법의 가능성을 알아보았다. 화염을 Ar-ion 레이저광을 modulate하여 가열하면서 화염의 각각 다른 높이에서 lock-in 앰프로 위상각을 측정하였다.

화염의 위치에 따른 위상차를 이용하면 축 방향 화염유속을 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 측정된 유속은 동일한 조건에서 LDV로 측정된 축 방향 속도와 비교적 잘 일치하였다. 레이저의 출력, LII 신호의 파장 및 modulation 주파수의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있었으며, 다양한 종류 확산화염의 속도 측정이 가능함을 보여주었

다. 이 방법을 이용하면 매연입자가 존재하는 지역으로 한정되지만 비교적 간단하게 화염의 유속을 측정할 수 있으며, 따라서 particle seeding이 쉽지 않은 경우에도 유동속도를 측정할 수 있게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 연소 진단 기술센터 (Combustion Engineering Research Center)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] R. J. Santoro, T. T. Yeh, J. J. Horvath, and Semerjian H. G., "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 53, 1987, pp. 89-115.
- [2] Z. Zhao, A. Kazakov, and F. L. Dryer, "Measurements of dimethyl ether/air mixture burning velocities by using particle image velocimetry," *Combustion and Flame*, Vol. 139, 2004, pp. 52-60.
- [3] A. C. Eckbreth, "Effect of Laser-Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. of applied physics*, Vol. 48, 1977, pp. 4473-4479.
- [4] B. Quey, T. W. Lee, T. Ni, and R. J. Santoro, "Spatially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using LII," *Combustion and Flame*, Vol. 97, 1994, pp. 384-392.
- [5] T. Ni, J. A. Pinson, S. Gupta, and R. J. Santoro, "2-Dim Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of LII," *Applied Optics*, Vol. 35, 1995, pp. 7073-7091.
- [6] R. J. Santoro, H. G. Semerjian, and R. A. Dobbins, "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 51, 1983, pp. 203-218.
- [7] 이승, 이상협, 이병준, 한재원, "레이저 유도 백열법을 이용한 화염 내부 매연 농도 측정," *대한기계학회 논문집 B권*, 제24권 제5호, 2000, pp. 725-732.
- [8] 이원남, "충류확산화염에서의 PAH 및 매연 생성에 대한 압력의 영향," *대한기계학회논문집 B권*, 제22권 제10호, 1998, pp.1445-1453.