

## Modulated LII 신호와 이색법을 이용한 매연입자 온도 측정

남연우\* · 이원남\*\*†

### The Measurement of Soot Particle Temperatures Using a Two-Color Pyrometry and Modulated LII Signals

Youn Woo Nam and Wonnam Lee

#### ABSTRACT

A new measurement technique based on a two-color pyrometry and modulated LII signals to measure local soot particle temperatures has been proposed and examined experimentally. The theoretical review suggests that modulated LII signals of soot particles is suitable for a two-color pyrometry as long as the temperature increase due to laser heating remains relatively small. The modulated LII signals from ethylene and propylene diffusion flames were simultaneously measured at 550 and 750 nm by a dual measurement system that consists of optical fibers, PMT and lock-in amps. The local soot particle temperatures of diffusion flames could be obtained using a two-color pyrometry and modulated LII signal based new technique.

**Key Words** : Two-color pyrometry, Soot particle temperature, Modulated LII

#### 1. 서 론

확산화염의 연소 특성을 해석하기 위해서는 화염의 온도를 측정하는 것이 매우 중요하다. 화염의 온도를 측정하는 방법에는 열전대, CARS 및 복사온도계 등의 다양한 기법들이 있다. 열전대와 같은 접촉식 방법은 열전달 등의 오차 요인과 측정 환경의 영향을 많이 받는다. 반면 CARS와 같은 비접촉식 방법은 측정환경의 영향을 덜 받는 반면에 광학 시스템의 구성과 측정 신호의 해석에 따른 제약을 받는다. 비접촉식 방법인 복사온도계(pyrometry)는 고온의 물체에서 나오는 복사에너지를 이용하여 손쉽게 온도를 측정할 수 있는 장점이 있고, 최근에는 특정 파장의 선택과 여러 파장을 이용하여 측정 온도의 오차를 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2]. 또한 이 기법은 디젤 엔진, 연소로 등과 같은 응용 분야에도 활발하게 적용되고 있다[3-4].

지금까지 복사온도계로 국소지역의 온도를 측정하기 위해서는 계속된 line-of-sight 신호를 Abel's inversion 등의 수치해석 기법을 통해 해석하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 국소지역의 온도 측정을 위한 해석이 번거롭고, 수치해석 방법이 가지고 있는 오차요인 등으로 인하여 측정의 정확성이 많이 떨어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 modulated LII 신호와 이색법을 이용하는 매연입자의 국소지역 온도 측정하는 새로운 기법의 타당성을 검토하였다.

가열된 매연입자가 방출하는 LII 신호를 이용한 화염의 매연 특성 연구는 주로 매연입자의 체적분율과 크기 및 분포 등의 측정을 위하여 수행되었다. 이 경우 가열된 매연 입자의 LII 신호를 얻기 위해서는 일반적으로 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 레이저를 사용하게 되며, 매연입자의 온도는 대부분 매연입자의 증발온도인 3950 K까지 상승하게 된다. 그러나 본 연구에서는 사용된 LII 기법은 매연입자의 온도를 측정하고자 최소한의 온도 상승이 발생하도록 Ar-ion 레이저를 이용하여 매연입자를 가열하였다. 최소한으로 가열된 매연입자의 LII 신호를 레이저 진행 방향의 수직방향에서 측정하여 국소지역의 LII

\* 단국대학교 대학원 기계공학과

\*\* 단국대학교 기계공학과

† 연락처, E-mail : wlee@dku.edu

신호를 측정할 수 있었다. 이때 LII 신호의 크기가 매우 작아지며 따라서 modulated LII 기법을 사용하여 잡음을 제거할 수 있었다. 화염의 modulated LII 신호는 광섬유를 이용하여 두개의 파장에 따른 신호로 분리하고 이를 이색법(two-color pyrometry)을 적용하여 실시간으로 확산화염의 국소지역 온도를 측정하였다.

### 2. 이론적 배경

복사온도계(pyrometry)는 온도를 가지고 있는 표면에서 나오는 파장에 따른 복사강도를 이용하여 온도를 측정하는 기법이다. 이색법, ratio pyrometry는 서로 다른 두개의 파장에서 측정된 복사 강도를 이용하여 온도를 구할 수 있다. 남연우[5]는 ratio pyrometry로 측정되는 온도에서는 파장에 따른 방사율 비의 변화에 따른 영향이 매우 적음을 보여주었으며 그 기법에 대하여 자세히 기술하였다.

Planck 법칙에 따르면 일반적인 화염의 온도에서는 가시영역의  $\lambda_1(550 \text{ nm})$ 보다  $\lambda_2(750 \text{ nm})$ 에서 매연입자의 열복사 신호가 더 강하다는 것을 알 수 있다. Fig. 1로부터 750 nm의 파장에서 흑체온도가 1600 K에서 1650 K로 50 K 증가하면 방출되는 복사강도는  $9.76974 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{-}\mu\text{m}$ 에서  $1.40507 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{-}\mu\text{m}$ 으로 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 modulated 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 파장에 따른 증가된 복사 강도의 신호의 비를 이용하여 온도를 측정할 수 있다. 따라서 화염에 조사되는 레이저의 입사방향과 수직인 위치에서 modulated LII를 이용한 온도 측정용 pyrometry를 이용한 line-of-sight 온도가 아니라 국소지역의 온도를 측정할 수 있도록 한다.

Modulated LII 신호를 이용한 온도 측정 방법은 다음과 같다. 이색법을 이용한 파장에 따른 흑체의 방사신호 강도와 온도의 관계는 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\ln(I_\lambda) = A \frac{1}{T} + B \quad (1)$$

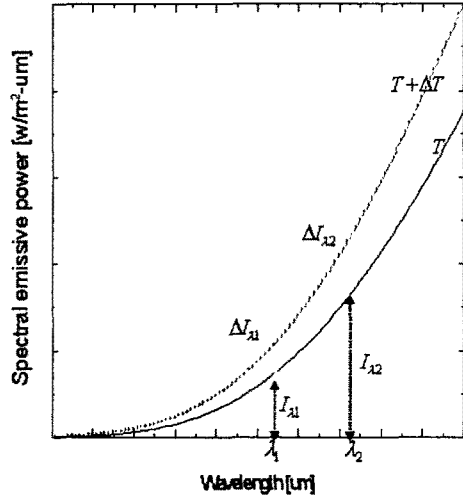


Fig. 1 Spectral emissive power.

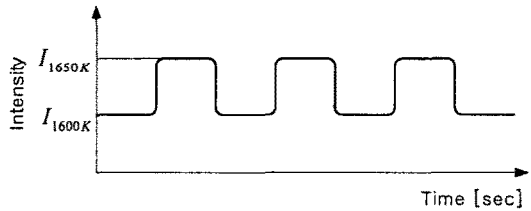


Fig. 2 Modulated LII signal.

$$\ln(I_\lambda + \Delta I_\lambda) = A \frac{1}{(T + \Delta T)} + B \quad (2)$$

이때 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 파장에 따른 신호의 세기가  $\Delta I_\lambda \ll I_\lambda$  라고 가정을 하였을 경우, 식(1)과 (2)의 비는 식 (3)과 (4)와같이 표현될 수 있다.

$$\ln\left(\frac{I_\lambda + \Delta I_\lambda}{I_\lambda}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta I_\lambda}{I_\lambda}\right) \approx \frac{\Delta I_\lambda}{I_\lambda} \quad (3)$$

$$\ln\left(\frac{I_\lambda + \Delta I_\lambda}{I_\lambda}\right) = A\left(\frac{1}{T + \Delta T} - \frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

이를  $\Delta I_\lambda$ 에 대하여 정리하면 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$\Delta I_{\lambda} \approx A \left( \frac{1}{T + \Delta T} - \frac{1}{T} \right) I_{\lambda} \quad (5)$$

식 (5)에서 각각의 파장에 따른 비(ratio)로서 식을 정리하면 식 (6)으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln \left( \frac{\Delta I_{\lambda_1}}{\Delta I_{\lambda_2}} \right) &\approx \ln \left( \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \right) + \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \\ &= (A_1 - A_2) \frac{1}{T} + (B_1 - B_2) + \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \\ &= \alpha \frac{1}{T} + \beta \\ \alpha &= (A_1 - A_2) \\ \beta &= (B_1 - B_2) + \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이를 측정하고자 하는 온도에 따라 정리하면 식 (7)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{\alpha}{\ln \left( \frac{\Delta I_{\lambda_1}}{\Delta I_{\lambda_2}} \right) - \beta} \quad (7)$$

시스템이 가지고 있는 효율에 따른 각각의 보정 계수 값만 보정하며 대입시켜준다면 LII 신호를 이용하여 화염 및 엔진 내부의 국소지역 온도를 측정할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 국소지역의 Modulated LII 신호를 광섬유(optical fiber)를 이용하여 두개로 나누어받아 파장에 따른 신호를 동시에 측정하였다. 사용된 광화이버(Ocean optics : SPLIT400-2-UV/VIS)는 한개의 입력부와 약 1:1로 나누어지는 두개의 출력부로 구성되어 있으며, 광섬유 각각의 코어 사이즈는 400 μm로 동일하다. 광화이버에서 나오는 신호의 분산을 막고 초점을 맞추기 위하여 컬리메이팅 렌즈(collimating lens)를 사용하였다. 매연의 방사율을 고려하기 위하여 온도에 따른 단색복사강도의 기울기가 큰 영역인 550 nm와 750 nm 선 선택하였고, 10 nm(FWHM)의 협대역 필터(bandpass filter)를 사용하였다. Modulated LII 신호를 측정하기 위하여 두 개의 PMT (Hamamatsu : H7712-12, H7712-02)를 이용하였다. 전용 파워 서플라이(Hamamatsu : C7169)를 이용하여 PMT의 전압

조절과 안정적인 파워를 공급하였다. 측정된 두개의 신호는 두 대의 lock-in amp (Stanford Research System : SR830)를 이용하여 신호처리를 수행하였으며, 이는 Labview (National Instrument)로 작성된 프로그램을 이용하여 제어하였다. 또한 측정 장치의 표준 온도 교정을 위해 optical chopper(Stanford Research System : SR540)와 아이리스(iris) 등의 광학장치를 이용하여 구성하였다. 표준 온도에 따른 복사강도의 신호를 교정하기 위하여 표준 온도계의 오차가 적은 텅스텐 리본 램프를 사용하였다. 사용된 텅스텐 리본 램프(General Electronic : 60V/30A)는 한국표준과학연구원의 고온 흑체로에서 650nm의 파장을 기준으로 800~2000℃의 휘도 온도 범위에서 교정되었고, 이를 이용하여 파장에 따른 PMT의 복사광 신호와 온도의 관계를 교정하였다. 텅스텐 리본 램프를 보호하며 일정한 전류와 전압을 공급과 조절하기 위하여 과전압·전류 차단이 가능하고, 노이즈가 5 mV<sub>rms</sub> 이하인 파워 서플라이(디지털전자 : DRP-2050D)를 사용하여 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 제어하였다. Fig. 3은 표준 온도 보정 실험에 사용된 장치의 구성을 보여주고 있다. 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 900~1300℃까지 일정하게 증가시켰다. 10 0℃씩 증가시킬 때마다 광섬유를 통하여 들어온 신호는 550 nm, 750 nm 필터와 각각의 PMT 이용하여 복사강도를 측정하였다. 텅스텐 리본 램프의 방사율(ε)을 보정을 하고, 실제 온도를 기준으로 550 nm, 750 nm에 따른 휘도 온도를 계산하였고, 남연우[5]에 자세하게 설명되었다.

Modulated LII 신호와 고온 온도 측정 영역

Tungsten ribbon lamp

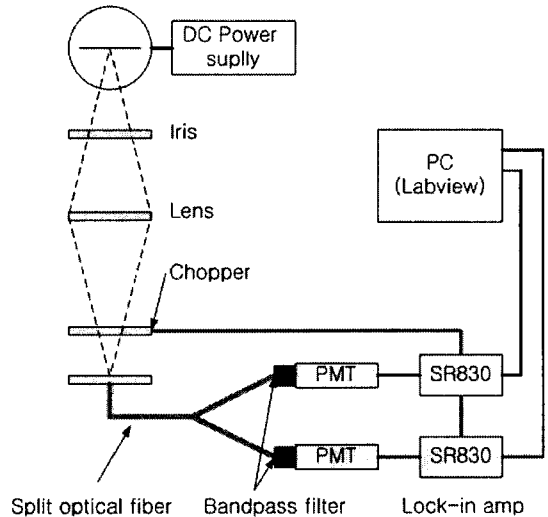


Fig.3 Schematic of PMT system calibration

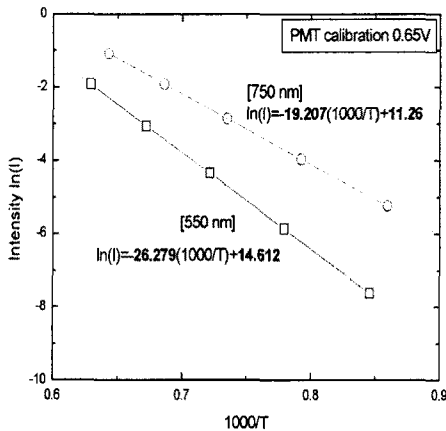


Fig. 4 Calibration of the PMT system

에서 PMT가 포화되는 것을 막기 위하여 PMT의 전압공급 세기를 0.65 V로 설정하였다. 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 650 nm 기준으로 900°C부터 100°C씩 증가시키고, 조절 후 온도가 일정해지도록 충분한 시간을 가진 후 PMT를 이용하여 복사강도를 측정하였다.

Figure 4는 텅스텐 리본 램프를 이용하여 650 nm 기준으로 900~1300°C에서 550 nm와 750 nm에서 PMT 측정 시스템을 교정한 결과이다. 이와 같이 온도의 역수와 복사강도의 로그 값을 선형적인 식으로 근사화시켜 PMT 시스템을 교정하였다.

PMT에 측정된 복사강도의 로그 값은 화염의 온도와 반비례하는데 이를 시스템 전체의 효율( $\eta$ )까지 포함하여 이론적으로 추정하면 식(8)과 같다.

$$I(\lambda, T) = \eta \epsilon_{\lambda} I_b(\lambda, T) = \eta \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right)$$

$$\ln(I) = -\frac{C_2}{\lambda T} + \ln(\eta \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5})$$

$$= -\frac{C_2}{\lambda} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{1000}{T} + \ln(\eta \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5}) \quad (8)$$

위 식에 따르면 550 nm, 750 nm의 파장에 대하여 시스템 전체의 효율( $\eta$ )은 온도가 들어가 있는 항의 계수에 영향을 미치지 않는다. 온도가 들어 있는 항의 계수는 단지 파장과 이차방사계수(second radiation coefficient,  $C_2$ )에 의해서만 결정되어지고 550 nm, 750 nm의 파장에 대하여 -26.16, -19.19 값을 갖는다.

실험을 통해 각각의 파장에서 측정된 온도항의 계수 -26.297, -19.207와 이론적으로 계산한 값을 비교하면 0.5% 이하의 실험 오차를 가짐으로서

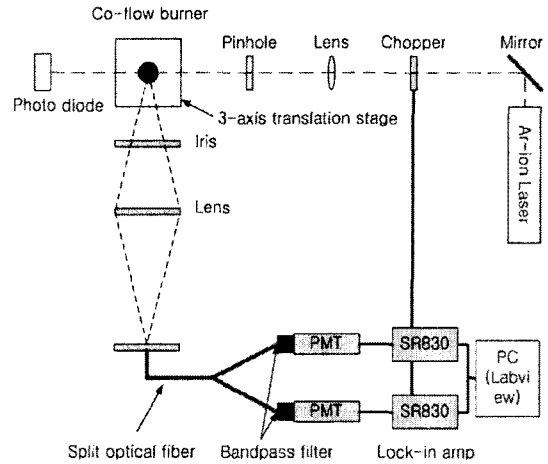


Fig.5 The temperature measurement set-up

교정이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

본 연구에 사용되어진 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 가열된 매연 입자의 신호를 얻기 위하여 Ar-ion 레이저(Spectra Physics; Stabilite 2017-05)를 사용하였다. 레이저광은 광학 chopper와 렌즈를 통과하여 화염에 도달하고 화염을 통과한 신호는 광다이오드로 측정된다. 레이저광과 수직인 방향에서 광섬유를 이용하여 두개의 신호로 분리하고 550 nm, 750 nm 필터와 PMT를 이용하여 LII 신호를 측정하였다. 표준 온도 교정 실험과 동일하게 광학장치를 구성하였으며, 고해상도를 가지는 이송장치를 이용하여 화염의 위치를 변화시켰고 전체 시스템을 Labview를 이용한 프로그램으로 제어하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

주어진 화염의 국소지역 온도를 측정하기 위하여 광섬유를 통해 550 nm와 750 nm의 신호를 동시에 측정하여 온도를 계산하였고, 동일한 조건에서 ratio pyrometry로 측정된 결과[5]와 비교하였다.

식 (6)에서 파장에 따른 온도항의 비는  $\alpha$ 로 표현하였고, 시스템에 효율 및 매연 입자의 방사율에 따른 비는  $\beta$ 로 나타내었다. 표준 온도에 대한 시스템의 교정값을 이용하여 식 (7)을 표현하면 다음과 같은 관계식(9)을 얻을 수 있었다.

$$T = \frac{-7.072}{\ln\left(\frac{\Delta I_{\lambda_1}}{\Delta I_{\lambda_2}}\right) - 3.464} \quad (9)$$

Modulated LII 신호를 이용한 온도 측정에 영

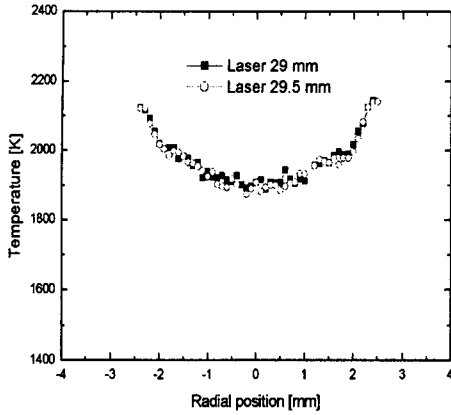


Fig. 6 The effect of laser position.

항을 미칠 수 있는 요인으로는 레이저 출력, modulation 주파수와 레이저 조사 위치가 있다. 이정수[6]에서 검토한 결과를 바탕으로 레이저 출력 0.5 W, modulation 주파수 308 Hz로 고정하였다. 레이저를 조사한 위치에 따른 영향을 알아 보기 위하여 연료 노즐 직경이 8.0 mm인 동축류 버너[7]에 에틸렌 3.0 scc/s를 공급하였다. Fig. 6은 버너 팁으로부터 30 mm 높이에서의 온도를 측정하기 위하여 레이저를 0.5 mm와 1.0 mm 떨어진 곳의 modulated LII 신호를 측정하여 계산한 온도 결과이다. 레이저 조사 위치에 따른 온도의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 7은 에틸렌 연료 유량이 3.0 scc/s인 확산화염의 35 mm 높이에서 modulated LII 복사강도를 측정하여 계산된 결과를 ratio pyrometry로 측정했던 온도와 비교하였다. modulated LII로 측정한 온도가 ratio pyrometry로 측정된 온도보다 전체적으로 최대 200 K정도 높게 나타났다. 화염면 쪽의 온도는 기존의 측정된 결과와는 다른 경향을 나타내었다. Ratio pyrometry로 측정된 결과는 화염면으로 갈수록 화염의 온도가 떨어지는 경향을 가지고 있다. 하지만 modulated LII로 측정된 결과는 화염면으로 갈수록 화염의 온도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 층류 확산화염에서 연료와 산화제가 만나는 화염면의 온도가 가장 높다는 것을 실험적으로 보여주는 결과이다.

Figure 8에서는 에틸렌 확산화염의 노즐 중심의 수직방향과 노즐 중심으로부터 1 mm, 2 mm 떨어진 곳의 화염 높이에 따른 화염의 온도를 측정된 결과이다. 동일 높이에서 화염면 방향으로 온도가 증가하였다. 또한 35 mm 높이에서 반경 방향으로 측정된 Fig. 7에서의 노즐 중심에서 1 mm, 2 mm 떨어진 곳의 온도와 같은 값을 확인

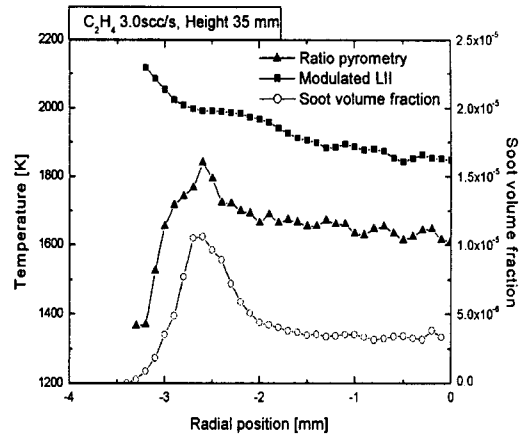


Fig. 7 The radial temperature profiles and soot volume fractions of an ethylene flame

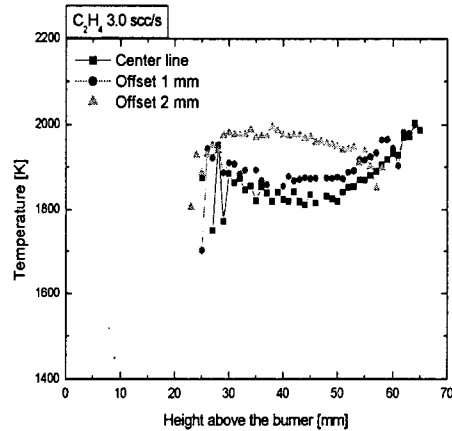


Fig. 8 The axial temperature profiles of an ethylene flame

함으로서 측정 온도의 재현성을 확인할 수 있었다.

Figure 9는 프로필렌(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) 연료 유량이 0.68 scc/s인 확산 화염의 15 mm 높이에서 반경방향으로 국소지역의 온도를 측정하였다. 에틸렌 확산화염에서와 유사하게 전체적으로 약 200 K의 온도 차이를 나타내면서 화염면으로 나아갈수록 매연 입자의 온도가 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Figure 10은 프로필렌 연료를 이용하여 sooting 화염(0.71 scc/s)과 non-sooting 화염(0.68 scc/s)의 중심방향을 따라서 국소지역의 매연 온도를 측정하였다. Non-sooting하는 화염의 경우에는 화염의 하류로 갈수록 매연의 산화에 따른 화염온도의 증가를 볼 수 있다. 반면에 sooting 화염의 경우에는 매연을 방출하는 쪽으로 갈수록 화염의 온도가 급격히 떨어지는 것을

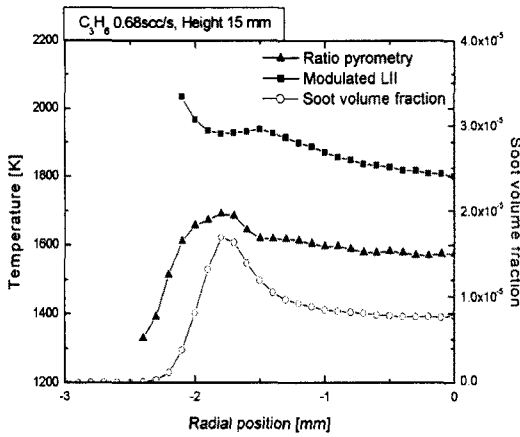


Fig. 9 The axial temperature profiles of a propylene flame

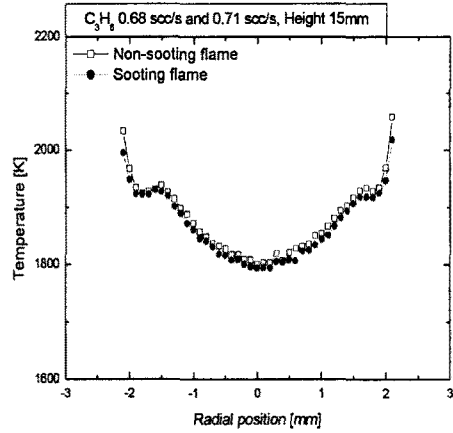


Fig. 11 The comparison of temperature distribution in sooting and non-sooting flame.

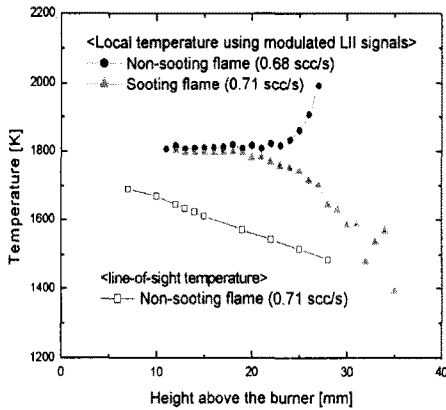


Fig. 10 The axial temperature profiles of sooting and non-sooting propylene flames

관찰할 수 있다. 이는 매연의 생성이 늘어나고 외부로 방출되면서 매연 입자의 온도가 급격히 떨어진다는 것을 잘 보여주고 있다. 또한 기존의 ratio pyrometry로 측정된 line-of-sight의 신호와 비교하여 보면 온도의 차이는 가지고 있으나 화염의 후류로 갈수록 일정한 온도의 차이를 가지고 떨어지는 경향은 매우 유사하다.

Figure 11은 노즐로부터 15 mm 지점에서 sooting과 non-sooting 프로필렌 확산화염의 반경방향 온도를 측정하였다. 동일 지점에서 sooting 화염의 온도가 non-sooting 화염의 온도보다 낮게 나타났고, 그 차이와 화염 중심의 온도는 축 방향으로 측정된 차이와 값이 모두 동일하였다.

Figures 6-11의 에틸렌과 프로필렌 확산화염을

이용한 실험 결과들로부터 modulated LII 신호를 이용하여 국소지역의 매연 입자 온도를 측정할 수 있었다. 지금까지 pyrometry를 이용하여 국소지역의 온도 측정하기 위해서는 측정된 line-of-sight의 신호를 Abel's inversion 등의 방법을 이용하였지만 수치해석이 가지고 있는 여러 요인과 방법의 번거로움으로 인한 어려움이 많았다. 그러나 이와 같은 modulated LII 신호를 이용한 온도 측정은 실시간으로 국소지역의 온도 측정을 쉽게 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 특히 압력 조건 등과 같이 pyrometry 이외의 방법이 없는 경우에 국소지역의 온도 측정에 매우 유용하리라 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 확산화염의 내부에 존재하는 modulated LII 신호를 이용하여 국소지역의 매연 입자의 온도를 측정하는 새로운 방법의 가능성을 알아보았다. 확산화염에 Ar-ion 레이저광을 modulate하여 나오는 매연 입자의 LII 신호를 광화이버를 이용하여 두개의 신호로 분리하였다. PMT를 이용하여 550 nm와 750 nm의 신호를 두 대의 lock-in amp를 이용하여 동시에 측정함으로써 국소지역의 온도를 실시간으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

Modulated LII 신호를 이용하면 국소지역의 매연 입자의 온도를 실시간으로 쉽게 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 측정된 온도는 기존의 측정된 결과와 유사한 경향을 가지고 있었고, 레이저의 조사 위치에 따른 영향은 거의 없는 것으로

알 수 있었다. 이 방법을 이용하면 매연입자가 존재하는 지역으로 한정되지만 비교적 간단하게 다양한 연료와 압력 조건 등에서 국소지역의 매연입자 온도를 실시간으로 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

Abel inversion과 ratio pyrometry와 같은 기존의 방법으로 측정된 결과와 비교하였다. 온도 프로파일의 경향이 동일함을 알 수 있었다. 그러나 두 측정 방법에 따른 온도의 차이가 100-200 K 정도 나타났으며 이는 측정 방법에 따른 오차에서 기인하는 것으로 생각되며 현재 이와 같은 측정 오차를 줄이기 위한 추가적인 연구를 수행하고 있다.

권, 제22권 제10호, pp. 1445-1453, 1998

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] Y. Tago, F. Akimoto, K. Kitagawa and N. Arai, "Measurements of surface temperature and emissivity by two-dimensional four-color thermometry with narrow bandwidth," *Energy*, Vol. 30, pp. 485-795, 2005.
- [2] J.J. Murphy and C.R. Shaddix, "Influence of scattering and probe-volume heterogeneity on soot measurements using optical pyrometry," *Combustion and flame*, Vol. 143, pp. 1-10, 2005.
- [3] Y. Huang, Y. Yan and G. Riley, "Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using two-colour method," *Measurement*, Vol. 28, pp. 175-183, 2000.
- [4] B.F. Kock, B. Tribalet, C. Schulz and P. Roth, "Two-color time-resolved LII applied to soot particle sizing in the cylinder of a diesel engine," *Combustion and flame*, article in press, 2006.
- [5] 남연우, 이원남, "Ratio pyrometry를 이용한 매연입자 온도 계측에 대한 고찰," 29th KOSCO Symposium 논문집, pp. 124-129, 2004.
- [6] 이정수, 남연우, 이원남, "매연입자의 LII 신호를 이용한 총류확산호염 유동속도 측정," 32th KOSCO Symposium 논문집, pp.157-163, 2006.
- [7] 이원남, "총류 확산화염에서 PAH 및 매연생성에 대한 압력의 영향", 대한기계학회 논문집 B