

Ratio Pyrometry를 이용한 매연입자 온도 계측에 대한 고찰

남연우* · 이원남** · 이춘범***

The Measurement of Soot Particle Temperatures Using a Ratio Pyrometry

Youn Woo Nam, Wonnam Lee and Chun Beom Lee

ABSTRACT

The ratio pyrometry has been investigated experimentally for the measurement of soot particle temperatures in a diffusion flame. A tungsten lamp calibration system was constructed and used in order to calibrate the ratio pyrometry and two-color pyrometry using a KL-factor method. Once the ratio pyrometry is properly calibrated, temperatures measured using a ratio pyrometry were virtually identical to those obtained from a KL-factor method. The effect of soot volume fraction on temperature measurement was almost negligible, and therefore, the ratio pyrometry could provide the useful temperature information of sooting flames. The potential application of a ratio pyrometry to a 2-D temperature measurement without sacrificing the accuracy was demonstrated.

Key Words : Ratio Pyrometry, Two-color Pyrometry, Soot Temperature

1. 서 론

연소기기의 연소특성을 해석하기 위해서는 화염의 온도를 측정하는 것이 매우 중요하다. 화염의 온도를 측정에는 열전대, CARS 및 복사온도계 등 다양한 기법들이 사용된다. 그러나 압력 조건에서의 연소일 경우에는 열전대와 같은 접촉식 온도 측정은 많은 어려움을 가져올 수 있다 따라서 가시화 엔진 등과 같은 압력 용기 내에서의 화염온도 측정에는 CARS 또는 복사온도계 등과 같은 비접촉식 방법이 사용되고 있다. CARS는 비접촉식 온도 측정방법으로 고온에서 측정값의 신뢰도와 정확도가 매우 우수하다고 알려져 있으며, 용기 내부에 있는 화염의 온도도 쉽게 측정할 수 있다. 그러나 확산화염의 온도 측정에 있어서 C_2 라디칼 또는 매연 입자의 존재에 따른 신호의 왜곡이 해결되지 않았으며 질소가 없는 연료지역에서는 온도 측정에 어려움이

있다. 또한 고가의 장비와 신호의 해석이 용이하지 않으므로 보편적으로 사용되기에는 많은 제약이 있다.

복사온도계를 이용하면 고온의 물체로부터 방출되는 복사에너지를 이용하여 비접촉식 방법으로 손쉽게 온도를 측정할 수 있다. 이때 온도를 측정하기 위해서는 물체의 표면 또는 측정 체적의 겉보기 방사율을 알아야 한다. 화염의 방사율은 매연의 양에 따라 크게 변하므로 일반적인 복사온도계를 이용한 화염의 온도측정은 적합하지 않다. 따라서 화염의 온도 측정에는 이색법(two-color method), 삼색법(three-wavelength pyrometer), 다색법(multi-wavelength pyrometer) 등과 같이 화염의 방사율 변화를 고려하거나, 무시할 수 있는 방법의 복사온도계가 사용된다. 이 중에서 이색법은 층류와 난류 화염 연구와 같은 기초과학분야 뿐만 아니라 디젤 엔진과 같은 응용분야에까지도 널리 쓰이고 있는 방법으로[1-4] 대부분의 이색법 온도 측정은 KL-factor 법을 이용하여 수행되고 있다. KL-factor 법을 이용한 이색법은 온도 측정이 비교적 정확하지만 온도 계산에 시간이 걸리므로 이차원 영상을 이용한 온도 측정에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본

* 단국대학교 대학원 기계공학과

† 연락처, E-mail : smurf@dankook.ac.kr

** 단국대학교 기계공학과

*** 자동차부품연구원 환경부품연구센터

연구에서는 파장에 따른 복사강도 값의 비를 이용한 ratio pyrometry 방법을 적용하여 화염의 온도 측정 가능성을 알아보았다. 특히 ratio pyrometry에 대한 이론적 검토와 그 측정 결과를 KL-factor 법과 비교하였다. 또한 이를 이용하여 이차원 영상을 통해 실시간으로 온도의 분포를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 복사온도계(Pyrometry)

복사온도계(pyrometry)는 온도를 가지고 있는 표면에서 나오는 파장에 따른 복사강도를 이용하여 온도를 측정하는 기법이다. Planck 법칙에 따르면 임의의 파장(λ)과 온도(T)에 있어 흑체 복사 강도(intensity)는 $I_B(\lambda, T)$ 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, 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 $C_2 = hc/k = 14.37 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 인 물리적 상수의 값으로 이루어져 있으며, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수를 의미한다. Planck의 식을 근사화 시킨 Wien의 식은 특정영역($\lambda < 800 \text{ nm}$, $T < 2500 \text{ K}$)에서 Planck의 복사법칙과 10^{-3} 이하의 오차 내에서 일치하고, 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

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

Wien의 식은 흑체(복사율: $\epsilon = 1.0$)일 때이므로 파장을 고려한 비흑체($\epsilon_\lambda < 1$)일 경우 분광 복사 휘도는 식(3)과 같으며

$$I(\lambda, T) = \epsilon_\lambda I_B(\lambda, T) = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

파장과 온도에 따라 다르게 된다. 따라서 파장에 따른 방사율(ϵ_λ)을 알고 있다면 서로 다른 파장에서 측정된 복사 강도를 이용하여 온도를 구할 수 있다.

2.1 KL-factor 법

확산화염의 매연(soot)에서 방출되는 열복사 신호의 방사율(ϵ_λ)은

$$\epsilon_\lambda(\lambda, f_v) = 1 - \tau_\lambda = 1 - \exp(-K_\lambda L) \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 이때 f_v 는 매연의 체적분율(soot volume fraction), τ_λ 는 화염을 통과하는 단색광의 투과율(transmittance), L 은 흡수층의 두께를 나타내는 광학축 방향으로의 광학 거리(optical path length)를 의미한다. K_λ 는 매연 입

자의 밀도와 관계된 값을 나타내는 흡수계수(absorption coefficient)로 Mie 이론의 Rayleigh 한계를 가정하면 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_\lambda = f_v \frac{36\pi F(\lambda)}{\lambda} \quad (5)$$

여기서, $F(\lambda) = \frac{1}{6} \text{Im} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]$ 이고, 굴절율은

$m = n - ki$ 로 나타내어진다. 이때 적절한 매연 입자의 굴절율이 선택되어야 하는데, 본 연구에서는 Chang and Charalampopoulos[5]에 의해 제시된 아래 관계식(6)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} n &= 1.811 + 0.1263 \ln \lambda \\ &+ 0.027(\ln \lambda)^2 + 0.0417(\ln \lambda)^3 \\ k &= 0.5821 + 0.1213 \ln \lambda \\ &+ 0.2309(\ln \lambda)^2 - 0.01(\ln \lambda)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로 파장 λ 에 대하여 분광복사 휘도는

$$\begin{aligned} I_\lambda(f_v, T) &= \epsilon_\lambda I_{B,\lambda}(T) \\ &= \left[1 - \exp\left(-\frac{36\pi F(\lambda) f_v L}{\lambda}\right) \right] C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

과 같다. 매연체적분율(f_v)과 광학거리(L)는 사용한 각각의 파장 λ_1 , λ_2 와 무관하므로 식(7)로부터 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} 36\pi f_v L &= \frac{\lambda_1}{F(\lambda_1)} \ln \left[1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \right] \\ &= \frac{\lambda_2}{F(\lambda_2)} \ln \left[1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, T_{a1} 과 T_{a2} 는 각각의 파장에서 측정 장치를 교정(calibration)하여 얻어지는 겉보기 온도이다. 파장에 따른 겉보기 온도와 식(8)을 이용하여 반복 계산과정을 통해 수렴하는 화염의 실제 온도(T)를 구할 수 있다. 이렇게 측정된 화염의 온도를 이용하여 KL-factor를 계산함으로써 매연 체적분율도 구할 수 있다. 위의 방법을 이색법의 KL-factor 법이라 한다.

2.2 Ratio pyrometry

각각의 파장에서 측정된 값을 반복 과정을 통해 수렴값을 이용하는 KL-factor 법은 계산 시간이 많이 소요되는 단점이 있어 이차원적인 측정에 적절하지 않다. 따라서 선택한 파장에서 측정된 복사 강도값의 비를 이용하여 온도를 측정하기 위한 ratio pyrometry를 검토하였다.

비흑체를 고려한 Wien의 식(3)에 수광부 광학장치, 측정 거리 및 PMT 등 시스템 전체의 효율(efficiency, η_λ)을 고려하면 측정되는 복사광의

세기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(\lambda, T) = \eta_{\lambda} I_B(\lambda, T) = \eta_{\lambda} \epsilon_{\lambda} I_B(\lambda, T) \quad (9)$$

각 파장에서 측정된 복사 강도 값의 비 R_I 는 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_I(\lambda_{1,2}, T) = \frac{\eta_{\lambda_1} \cdot \epsilon_{\lambda_1} \cdot I_B(\lambda_1, T)}{\eta_{\lambda_2} \cdot \epsilon_{\lambda_2} \cdot I_B(\lambda_2, T)} = \frac{\eta_{\lambda_1} \cdot \epsilon_{\lambda_1}}{\eta_{\lambda_2} \cdot \epsilon_{\lambda_2}} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5} \cdot \exp\left\{ \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \right\} \quad (10)$$

그러므로 측정하려는 온도(T)는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln R_I - \left(\ln \frac{\eta_{\lambda_1}}{\eta_{\lambda_2}} + \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} + \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5}\right)} \quad (11)$$

각각의 파장에서 calibration 된 측정 시스템을 사용할 경우, 파장에 따른 매연이 존재하는 화염의 방사율만 고려된다면 측정하려는 온도(T)는 파장에 따른 복사강도의 비(R_I)를 측정함으로써 계산이 가능하다. Flower[7]은 λ_1, λ_2 사이의 파장 간격을 줄이면 매연 입자의 방사율 비가 $\epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2} \approx 1$ 과 같아지므로 무시할 수 있다고 하였으며, Y. Huang et al.[8]에서는 $\epsilon_{\lambda} \propto 1/\lambda$ 이므로 $\epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2} = \lambda_1 / \lambda_2$ 로서 계산하는 방법을 제시하였다. 그러나 매연이 존재하는 화염의 방사율을 알 수 있으면 식(11)의 $\epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2}$ 값을 구할 수 있으므로, 본 연구에서는 식(4)-(6)으로 계산되는 방사율을 고려하여 온도를 구하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 온도를 측정하기 위하여 선형성(linearity)과 감도(sensitivity)가 우수한 PMT(photomultiplier tube, Hamamatsu : H7712-12)을 사용하였다. PMT의 전압 조절과 안정적인 파워를 공급하기 위하여 전용 파워 서플라이(Hamamatsu : C7169)를 이용하였다. 매연의 방사율을 고려하기 위하여 온도에 따른 단색복사강도의 기울기가 큰 영역인 550nm와 750nm선택하였고, 10nm(FWHM)의 협대역 필터(bandpass filter)를 사용하였다. Optical chopper(Stanford Research System : SR540)와 아이리스(iris) 등의 광학장치를 이용하여 구성하였다. Lock-in amp(Stanford Research System : SR830)는 Labview(National Instrument)를 통해 제어되었다. 표준 온도에 따른 복사강도의 신호를 교정(calibration)하기 위하여 표준 온도계의 오차가

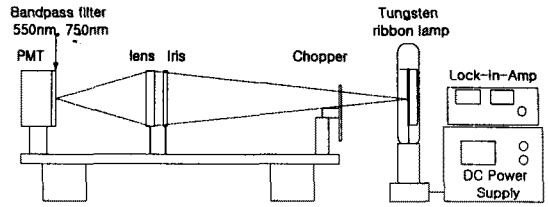


Fig. 1 Schematic of PMT calibration

작은 텅스텐 리본 램프(tungsten ribbon lamp)를 사용하였다. 사용된 텅스텐 리본 램프(General Electronic : 60V/30A)는 한국표준과학연구원 의 고온 흑체로서 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 5mV_{rms}이하인 파워 서플라이(디지털전자 : DRP-2050D)를 사용하여 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 제어하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 장치의 구성을 보여주고 있다. 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 900~1900℃까지 일정하게 증가시켰다. 100℃씩 증가시킬 때마다 550nm, 650nm, 750nm의 필터를 PMT앞에 놓고 복사강도를 측정하였다.

텅스텐 리본 램프의 텅스텐 방사율(ϵ)을 보정하기 위하여 550nm, 650nm, 750nm의 파장에서 온도에 따른 텅스텐의 방사율을 계산하였다. 참고문헌(CRC Handbook)[6]을 이용하여 각각의 파장에서 온도에 따른 방사율의 변화를 식(12) 및 Table 1과 같이 표현할 수 있었다. 이를 이용하여 텅스텐 리본 램프의 방사율을 보정하였다.

$$\epsilon_{\lambda}(T) = A \left(\frac{T}{1000}\right) + B \quad \text{for } 500\text{nm} < \lambda < 800\text{nm} \quad (12)$$

Table 1 Coefficient of tungsten emissivity for wavelength

λ (nm)	A	B
550nm	-0.01768	0.49032
650nm	-0.020	0.48186
750nm	-0.02411	0.47589

한국표준과학연구원에서 650nm 파장에서 교정한 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도(T^*)의 복사강도는 고온 흑체의 복사강도와 방사율(ϵ)의 곱으로 식(13)과 같이 표현이 가능하다. 고온 흑체의 복사강도인 식(2)와 텅스텐의 방사율을 계

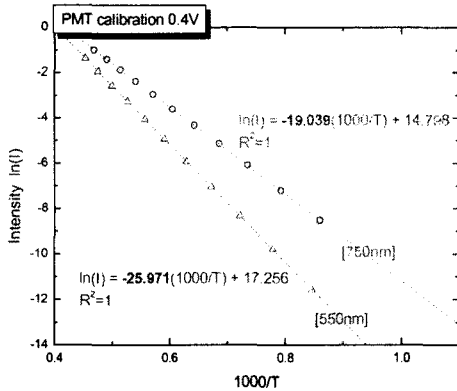


Fig. 2 Calibration for PMT 0.4V

산한 식(12)을 이용하여 텅스텐 리본 램프의 실제 온도를 식(14)을 이용하여 계산하였다. 이와 같이 계산된 실제 온도를 이용하여 550nm와 750nm에서의 휘도 온도도 계산하였다.

$$I(\lambda, T) = I_B(\lambda, T^*) \\ = \varepsilon_\lambda(T) I_B(\lambda, T) \quad (13)$$

$$T = \frac{C_2}{\lambda} \frac{1}{\ln\{1 - \varepsilon_\lambda(T)\} + \varepsilon_\lambda(T) \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T^*}\right)} \quad (14)$$

고온 온도 측정 영역에서 PMT가 포화(saturation)되는 것을 막기 위하여 550nm보다 신호가 강한 750nm파장의 복사강도를 기준으로 PMT의 전압공급 세기를 0.4V로 설정하였다. 텅스텐 리본 램프의 휘도 온도를 650nm 기준으로 900°C부터 100°C씩 증가시키고, 조절 후 온도가 일정해지도록 충분한 시간을 가진 후 PMT를 이용하여 복사강도를 측정하였다.

Figure 2은 텅스텐 리본 램프를 이용하여 650nm 기준으로 900~1900°C에서 550nm와 750nm에서 PMT를 교정한 결과이다. 이와 같이 온도와 복사강도를 선형적인 식으로 근사화시켜 PMT를 교정하였다.

PMT에 측정된 복사강도는 화염의 온도와 반비례하는데 이를 시스템 전체의 효율(η)까지 포함하여 이론적으로 추정하면 식(15)과 같다.

$$I(\lambda, T) = \eta \varepsilon_\lambda I_B(\lambda, T) = \eta \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \\ \ln(I) = -\frac{C_2}{\lambda T} + \ln(\eta \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5}) \\ = -\frac{C_2}{\lambda} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{1000}{T} + \ln(\eta \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5}) \quad (15)$$

위 식에 따르면 550nm, 750nm의 파장에 대하여 시스템 전체의 효율(η)은 온도가 들어가는 항의 계수에 영향을 미치지 않는다. 온도가 들어있는 항의 계수는 단지 파장과 이차방사계수(second radiation coefficient, C_2)에 의해서만 결정되어지고 550nm, 750nm의 파장에 대하여 -26.16, -19.19값을 갖는다. 실험을 통해 각각의 파장에서 측정된 온도항의 계수 -25.971, -19.039와 이론적으로 계산한 값을 비교하면 0.8%이하의 실험 오차를 가짐으로서 교정이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

PMT를 이용하여 측정된 550nm와 750nm의 복사 강도는 line-of-sight 신호이므로 Abel's inversion을 이용하여 주어진 위치에서의 화염의 온도를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

주어진 화염의 온도를 측정하기 위하여 550nm와 750nm 파장에서 측정된 값을 반복 과정을 통해 수렴되어지는 값을 이용하는 KL-factor 법과 각각의 파장에서 측정된 복사 강도값의 비를 이용한 ratio pyrometry를 비교하였다.

식(10)을 다음 식(16)과 같이 간략하게 표현하였다

$$R_I(\lambda_{1,2}, T) = \eta_R \cdot \varepsilon_R \cdot \frac{I_B(\lambda_1, T)}{I_B(\lambda_2, T)} = \eta_R \cdot \varepsilon_R \cdot R_{I_B} \quad (16)$$

따라서 로그 좌표에서 식(17)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\ln(R_I) = \ln \eta_R + \ln(\varepsilon_R) + R_{I_B} \\ = \ln \eta_R + \ln(\varepsilon_R) + \ln C + D \cdot \frac{1000}{T} \\ = \ln \eta_R + \ln(\varepsilon_R) + 1.5508 - 6.976 \cdot \frac{1000}{T} \quad (17)$$

이때 파장에 따른 시스템 전체의 효율비(η_R)는 두 파장에서의 PMT 감도비와 협대역 필터의 투과율(transmittance)의 비를 곱하여 결정할 수 있다. 본 실험에 사용된 측정 시스템에서는, 550nm와 750nm에서, PMT quantum efficiency 자료[9] ($\eta_{PMT}=2.577$)와 협대역 필터의 투과율 비($\eta_{filter}=0.9146$)비가 사용되었으며, 따라서 시스템 전체의 효율비(η_R)는 약 2.357로 추정되었다. 실험을 통하여 얻은 Fig. 2의 PMT의 교정 결과와 식(15)을 이용하여 복사강도의 절편 값의 차이가 시스템 전체의 효율비(η_R)로 나타낼 수 있었고, 그 값은 약 2.458로서 추정된 값과 근사하였다. 또한 식(17)에서 온도항의 계수($D=6.976$)는 Fig. 2의 PMT 교정(550nm와 750nm의 온도항 계수

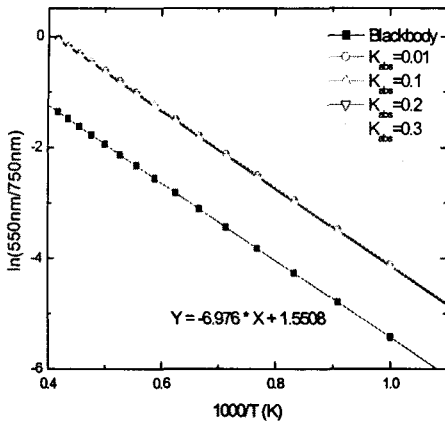


Fig. 3 Error analysis due to ϵ_R

의 비 6.932로 측정됨)을 통하여 실험적으로 확인할 수 있었다.

매연이 존재하는 확산화염에서 국부적인 흡수 계수 K_{abs} 값의 변화를 0.01~0.3사이에서 변화한다고 가정했을 때, $\ln(\epsilon_R)$ 값은 0.33~0.39의 범위에서 변화하게 된다. Fig. 3는 이 값과 시스템의 효율비를 모두 고려하여 식(17)로 계산된 결과를 보여주고 있으며, K_{abs} 값이 변함에 따른 영향은 1.0 % 이하로 나타났다. 따라서 화염내부에 존재하는 매연의 양은 ratio pyrometry로 측정되는 온도에 미치는 영향이 매우 적다는 것을 확인할 수 있었다.

Ratio pyrometry로 온도를 측정하기 위한 실험적 관계식은 프로필렌 확산화염을 이용한 실험으로 얻을 수 있었다. 연료튜브의 내경이 8 mm인 동축류 버너[10]를 사용하여 연료 유량이 0.68scc/s인 프로필렌 확산화염을 형성하였으며, 화염 높이 15 mm에서 line-of-sight로 550 nm와 750 nm의 복사 신호를 측정하였다. 측정된 복사 강도는 line-of-sight신호이므로 Abel's inversion을 이용하여 주어진 위치에서의 파장에 따른 복사신호로 변환하였다. 이를 바탕으로 KL-factor 법을 이용하여 온도를 계산하였으며, 이 자료를 바탕으로 ratio pyrometry 관계식(18)을 얻을 수 있었다.

$$\ln(R_r) = 2.8389 - 6.932 \cdot \frac{1000}{T} \quad (18)$$

이 관계식은 이론적으로 얻어진 관계식인 식(19)와 비교하면

$$\ln(R_r) = 2.7918 - 6.976 \cdot \frac{1000}{T} \quad (19)$$

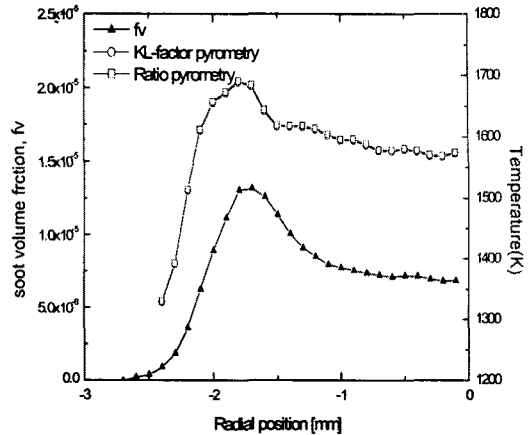


Fig. 4 The comparison of each method & fv

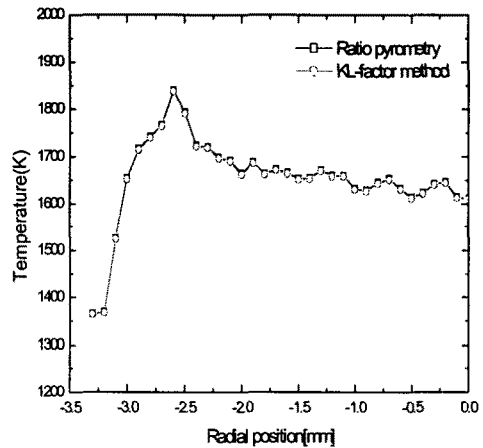


Fig. 5 The comparison of each method for C_2H_4

두 관계식의 계수가 비교적 유사한 값을 보여주는 것을 알 수 있다. 그러나 측정장치의 구성요소에 어느 정도의 불확도(uncertainty)가 존재하므로, 본 연구에서는 프로필렌 화염을 이용한 실험으로 ratio pyrometry 관계식인 식(18)을 사용하였다. Fig. 4는 KL-factor 법으로 측정된 온도를 이용하여 ratio pyrometry를 calibration한 결과를 보여주고 있다. 식(19)를 이용하여 보정된 ratio pyrometry로 측정된 온도와 KL-factor 법으로 계산된 온도의 차이는 화염의 전체 영역에서 1 K 이내임을 보여주고 있다.

Figure 5는 에틸렌 연료 유량이 3.0scc/s인 확산화염의 35mm높이에서 화염의 복사강도를 측정하여 KL-factor 법과 ratio pyrometry를 이용

하여 온도를 계산한 결과이다. 에틸렌 확산화염에서도 전반적으로 온도 차이가 거의 나타나지 않았다. 즉 매연이 많이 존재하는 지역과 매연이 거의 존재하지 않는 영역 모두에서 ratio pyrometry로 측정된 온도는 KL-factor 법으로 측정된 온도와 일치하는 것을 알 수 있으며, 화염의 내부에서 매연체적분율이 크게 변하더라도 ratio pyrometry로 측정되는 온도는 KL-factor 법으로 측정되는 온도와 궁극적으로 동일하다는 것을 의미한다. 따라서 이와 같은 ratio pyrometry를 사용하면 이차원 영상처리를 통하여 실시간으로 온도의 분포를 측정할 수 있게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 파장에 따른 복사강도 값의 비를 이용한 ratio pyrometry 방법을 적용하여 화염의 온도 측정 가능성을 알아보았다. 특히 ratio pyrometry에 대한 검토와 그 측정 결과를 KL-factor 법과 비교하였으며, 이를 이용하여 이차원 영상을 이용하여 실시간으로 온도의 분포를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

텅스텐 리본 램프를 이용하여 PMT를 550nm, 750nm 파장에 따라 교정하였으며, PMT 및 광학 장치에서의 효율을 이론적으로 검토하여 ratio pyrometry에 미치는 매연체적분율의 영향이 매우 적음을 알 수 있었다.

KL-factor 법으로 측정된 온도를 이용하여 ratio pyrometry를 calibration한 결과 화염의 전체 영역에서 1 K 이내로 일치 시킬 수 있었으며, 이는 이론적인 해석과 거의 일치하였다. 또한 화염의 내부에서 매연체적분율이 크게 변하더라도 ratio pyrometry로 측정되는 온도는 KL-factor 법으로 측정되는 온도와 궁극적으로 동일하였다. 따라서 이와 같은 ratio pyrometry를 사용하면 이차원 영상처리를 통하여 실시간으로 온도의 분포를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 연소 진단 기술센터(Combustion Engineering Research Center)의 지원으로 수행되었으며, 이색법 온도 측정과 관련하여 도움을 주신 한국표준과학연구원의 박승남 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

[1] B. Lawton and G. Klingenberg, "Transient

Temperature in Engineering and Science", Oxford University Press, pp.258-278, 1996

[2] F. Xu, L. C. Lin and G. M. Faeth, "Soot Formation in laminar Premixed Methane/Oxygen Flames at Atmospheric Pressure", Combustion and Flame, Vol. 115, pp.195-209, 1998

[3] T. P. Jenkins and R. K. Hanson, "Soot Pyrometry using Modulated Absorption/Emission", Combustion and Flame, Vol. 126, pp.1669-1679, 2001

[4] 이태원, 이선봉, 하종률, "디젤엔진에서 이색법을 이용한 화염온도와 Soot의 계측기술에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제20권 제9호, pp.3007-3014, 1996

[5] Chang, H and Charalampopoulos, T. T., "Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot", Proc. R.Soc.Lond. A, Vol. 430, pp.577-591, 1990

[6] David R. Lide, H. P. R. Frederikse, "CRC Handbook of Chemical and Physics 75th Edition", CRC Press

[7] W. L. Flower, "Soot Particle Temperature in Axisymmetric Laminar Ethylene-Air Diffusion Flames at Pressures up to 0.7 MPa", Combustion and Flame, Vol. 77, pp.279-293, 1989

[8] Y. Huang, Y. Yan, G. Riley, "Vision-based Measurement of Temperature distribution in a 500-kW Model Furnace Using The Two-color Method", Measurement, Vol. 28, pp.175-183, 2000

[9] "Hamamatsu Photosensor Module Final Test Sheet Type H7712-12", Hamamatsu, pp.2, 2003

[10] 이원남, "층류 확산화염에서 PAH 및 매연 생성에 대한 압력의 영향", 대한기계학회 논문집 B권, 제22권 제10호, pp.1445-1453, 1998