

측정방법에 따른 에틸렌 확산화염의 온도분포

- 열전대 및 이색법 측정 결과 비교

이원남* · 나용대* · 이범기* · 박승남**

Temperature Distribution in Ethylene Diffusion Flames Based on Measurement Techniques

- Comparison of Thermocouple and Two-Color Pyrometry

Wonnam Lee, Yong Dae Na, Bumky Lee and Seong Nam Park

Key Words: Temperature(온도), Diffusion Flame(확산화염), Two-Color Pyrometry(이색법), Thermocouple(열전대)

Abstract

Flame temperatures were measured and compared using a rapid insertion technique and a two-color pyrometry with Abel inversion process in co-flow ethylene diffusion flames. The measured line-of-sight temperature showed very limited usefulness in understanding the detailed soot formation/oxidation process in a co-flow diffusion flame. The flame temperatures could be measured with reasonable accuracy for the soot laden regions in ethylene diffusion flames using two-color pyrometry with an Abel inversion technique. Two-color-pyrometry with Abel inversion was demonstrated as a useful temperature measurement technique for co-flow diffusion flames, especially under pressure conditions, where a thermocouple is not applicable. The soot volume fraction could be also obtained using two-color pyrometry with Abel inversion, which provides important information for understanding the soot formation/oxidation mechanism in diffusion flames.

1. 서론

동축류 확산화염은 매연의 생성 및 산화 메커니즘의 연구에 널리 사용되고 있

다. 일반적으로 동축류 확산화염에서의 매연 생성/산화 특성은 매연입자의 체적 분율, 수밀도, 평균 직경 및 PAH 농도 측정을 통하여 분석된다. 이러한 측정에는 레이저 광 소멸법, 광 산란법, LII(laser induced incandescence) 및 광대역 LIF 기법 등이 사용되며, 이를 이용하여 화염 내부의 매연입자/PAH 분

* 단국대학교 기계공학과

** 한국표준과학연구원

포를 측정하고 있다. 화염에서의 매연 생성/산화 특성은 온도에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다.^(1,2) 따라서 매연 생성/산화 특성에 관한 연구에는 화염의 온도가 고려되어야 하며, 이때 화염 내부의 온도 분포를 측정하거나, 측정이 불가능 할 경우에는 단일화염 등 화염의 특성 온도 값을 이용하여 매연 생성/산화 특성을 분석하게 된다.

확산화염의 온도 측정에는 열전대, CARS(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy), 복사온도계 등이 사용되고 있다. 열전대의 경우 측정이 비교적 쉽고, 적은 비용으로 가능한 간편한 온도 측정법으로 알려져 있다. 그러나 열전대를 이용하여 화염의 온도를 측정할 경우, (1) 고온의 화염온도 측정에 대한 제한(Pt/Pt-Ph13%의 경우 최대 2050 K), (2) 매연이 생성되는 지역에서의 매연 부착에 따른 온도 측정의 부정확성, (3) 열전대에 의한 유동장의 교란, (4) 표면에서의 촉매반응, (5) 열전대 선을 통한 열전도, (6) 고온지역에서의 복사열 손실 등의 문제가 있다. 이와 같은 오차 요인의 일부는 급속 삽입법을 사용하여 최소화 할 수 있다. 그러나 화염이 용기의 내부에서 형성되는 압력 조건에서는 열전대를 이용한 화염온도의 측정이 불가능한 경우가 많게 된다.

CARS는 비접촉식 온도 측정 방법으로 고온에서 측정값의 신뢰도와 정확도가 매우 우수하다고 알려져 있으며, 용기 내부에 있는 화염도 쉽게 측정할 수 있다. 그러나 CARS를 이용한 확산화염의 온도측정에는 C₂ 라디칼 또는 매연입자의 존재에 따른 신호의 왜곡이 완전히 해결되지 않았으며, 특히 질소가 거의 없는 연료지역에서는 온도 측정에 어려움이 있게 된다. CARS는 또한 측정장치

가 비교적 고가이며, 신호의 해석이 용이하지 않으므로, 확산화염의 온도에 보편적으로 사용되기에는 아직 제약이 많다고 할 수 있다.

매연이 발생하는 확산화염의 온도 측정에는 복사온도계가 널리 사용되어 왔다. 이색법은 pyrometry의 한 방법으로 온도 측정이 비교적 쉽고, 압력조건에서도 적용이 가능하므로 디젤엔진, 확산화염 등의 온도 측정에 활용되고 있다.^(3,4) 그러나 대부분의 이색법은 시각선(line-of-sight) 측정으로, 화염내의 온도 분포를 알 수 없어 측정 결과의 유용성이 매우 제한되어 왔다. 동축류 화염의 경우 Abel 변환을 이용하면 이색법으로 얻어진 측정 결과를 분석하여 화염내의 온도 분포를 얻을 수 있다.⁽⁵⁾ 특히 Abel 변환을 이용한 이색법은, 측정 결과의 타당성이 검증될 경우, 압력조건과 같이 용기 내부에 위치하는 화염에서, 매연이 많이 생성되는 지역의 온도 측정에 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 (1) 대기압에서 이색법을 이용하여 에틸렌 확산화염 온도를 측정하고, 이를 열전대를 사용하여 측정된 온도와 비교 분석하여, 각각의 측정 방법의 장단점을 비교하고, (2) 이색법을 이용하여 2 기압과 4 기압에서 화염 온도와 매연 체적분율을 측정하여 압력 조건에서의 화염 온도 측정 가능성을 알아보았다.

2. 이색법과 Abel 변환

완전 흑체의 열복사 특성은 기본적으로 플랑크 법칙으로 설명되며, 본 연구에서 사용된 이색법의 근거가 된다. 본 연구에서 사용된 이색법의 파장영역(800 nm 이하) 및 측정온도 범위(2500 K 이하)에서는 열복사는 다음과 같이 Wien의

법칙으로 표현될 수 있다.

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

여기에서 C_1 은 $8\pi hc$, 수광부의 solid 각 등의 형상계수 및 교정(calibration) 값 등에 의해서 결정되고, C_2 는 hc/k_B 를 나타내며, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k_B 는 볼츠만 상수를 의미한다. 매연이 생성되는 확산화염의 열복사 신호는 매연의 복사율(emissivity) ϵ_λ 로

$$\begin{aligned} \epsilon_\lambda(\lambda, f_v) &= 1 - \tau_\lambda \\ &= 1 - \exp(-K_\lambda L) \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 표현되며, 여기에서 f_v 는 매연 체적분율 (soot volume fraction), τ_λ 는 투과율(transmittance), K_λ 는 흡수 계수(absorption coefficient), L 은 광학경로 길이를 나타낸다. Mie 이론의 Rayleigh 한계를 가정하면 흡수계수는

$$K_\lambda = f_v \frac{36\pi F(\lambda)}{\lambda} \quad (3)$$

$$F(\lambda) = \frac{1}{6} \operatorname{Im} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \quad (4)$$

으로 표현되며, 이때 $m = n + ik$ 는 굴절률을 나타낸다.

$$\begin{aligned} &36\pi f_v L \\ &= \frac{\lambda_1}{F(\lambda_1)} \ln \left[1 - \exp \left\{ -\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \\ &= \frac{\lambda_2}{F(\lambda_2)} \ln \left[1 - \exp \left\{ -\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

의 관계를 이용하면⁽⁶⁾ 화염의 온도 T 를 구할 수 있게된다. 여기에서 T_{a1} 과 T_{a2} 는 각각 파장 λ_1 과 λ_2 에서 겉보기 온도를 의미한다.

각각의 파장에서 측정된 신호를 Abel 변환하고, 그 결과를 이용하면 화염내의 온도를 구할 수 있다. 여기에서는 3점

Abel inversion 기법이 사용되었다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 동축류 버너는 내경 8 mm의 연료관과 내경 80 mm의 동축류 실린더로 이루어져 있다.⁽⁷⁾ 에틸렌 확산 화염을 형성하기 위하여 연료관을 통하여 에틸렌을 3 scc/sec로 공급하였으며, 공기 또는 질소로 희석하는 경우에는 연료관에 추가로 공기 또는 질소를 3 scc/sec의 유량으로 첨가하였다. 1, 2 및 4 기압의 조건에서 이색법을 이용한 화염의 온도와 매연체적분율을 측정하였으며, 열전대를 이용한 화염 온도의 측정 은 단지 1 기압 조건에만 수행되었다.

열전대를 이용한 온도 측정에는 직경 76 μm 의 R type(Pt-Pt/13%Rd, OMEGA), 열전대가 사용되었으며, Fig.1과 같은 probe를 제작하여 급속삽입법을 이용하였다. 열전대의 삽입속도와 화염 내에 체류하는 시간은 예비실험을 통하여, 유동장의 교란을 최대로 억제하고 열전대의 온도가 정상상태에 도달하도록 각각 25 cm/sec와 0.6 초로 설정하였다. 버너는 3차원 이송장치에 장착되어 Lab view (National Instrument)로 작성된 프로그램으로 위치가 제어되었다. 화염의 온도는 열전대로 얻어진 신호를 온도측정장치

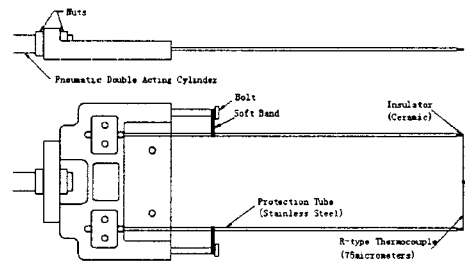


Fig.1 Thermocouple probe.

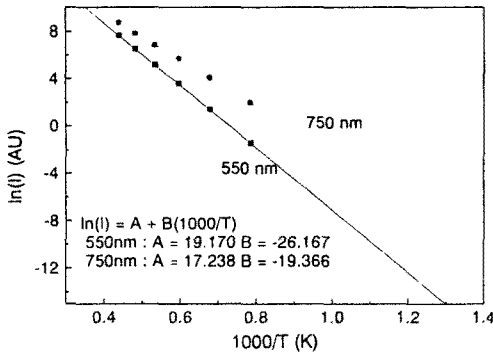


Fig.2 Calibration curve.

(HP3497a)를 통하여 온도로 변환되었다..

확산화염의 열복사 신호는 CCD 카메라(Pulnix TM-6701AN)와 frame grabber(Matrox Pulsar)를 이용하여, 550/750 nm의 파장에서 10 nm(FWHM)의 band-pass 필터를 사용하여 측정하였다. 한국표준과학연구원의 고온흑연관 흑체로를 이용하여 CCD 카메라 및 영상처리장치의 복사광 신호-온도 관계를 교정(calibration) 하였으며, Fig.2는 calibration 결과가 Wien의 법칙을 잘 따르고 있음을 보여주고 있다. CCD 카메라를 통하여 얻어진 시각선으로 적분된 550 및 750 nm의 신호와 Fig. 2의 calibration 선도 및 식 (5)으로부터 line-of-sight 화염온도를 구하게 된다. 각 파장에서 얻어진 신호는 Abel 변환을 통하여 화염 내의 주어진 위치에서의 emission 값을 알 수 있도록 하며, 이를 이용하면 주어진 화염의 높이, 반경 위치에서 온도와 매연체적분율을 구할 수 있게 된다. 이때 적절한 매연입자의 굴절률을 선택되어야 하며, 본 연구에서는 Chang and Charalampopoulos⁽⁸⁾가 제시한 다음의 관계식을 사용하였다.

$$n = 1.811 + \frac{0.1263 \ln \lambda}{0.027(\ln \lambda)^2 + 0.0417(\ln \lambda)^3} \quad (6)$$

$$k = \frac{0.5821 + 0.1213 \ln \lambda}{0.2309(\ln \lambda)^2 - 0.01(\ln \lambda)^3} \quad (7)$$

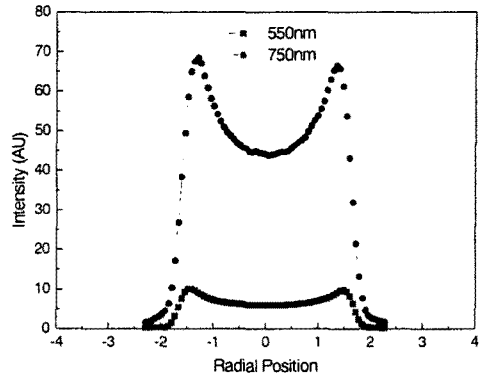


Fig.3 Line-of-sight soot emission profile (C_2H_4 , 30mm flame height, 4 atm)

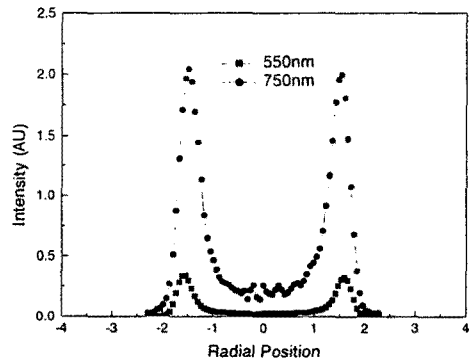


Fig.4 Soot emission profile with Abel inversion (C_2H_4 , 30mm flame height, 4 atm)

Fig.3은 각각 550 및 750 nm의 파장에서 시각선으로 적분된 화염의 열복사 신호를, Fig.4는 Abel 변환으로 계산된 화염 내부의 열복사 특성을 보여주며, 이 결과로부터 화염의 온도 분포를 구하게 된다. 이때 Fig. 4에 나타난 것과 같이 Abel 변환의 특성상 화염의 중심부에서는 신호의 변화가 심하여 화염 온도를 구할 수 없는 경우가 많으며, 매연체적분율이 매우 작은 화염의 바깥지역에서도 또한 신뢰할 수 있는 화염 온도를 구하기가 어렵게 된다. 그러나 매연의 생

성/산화 지역에는 매연이 충분히 존재하므로 비교적 신뢰할 수 있는 화염 온도를 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Fig.5는 에틸렌 확산화염의 중심축을 따라 이색법으로 측정된 line-of-sight 온도를 열전대로 측정된 온도와 비교하고 있다. 이색법의 line-of-sight 온도는 매연의 체적분율에 가중치가 주어진 평균온도의 개념으로 열전대로 측정된 화염 중심의 온도($T/C T_{center}$)보다 더 높게 된다. 그러나 대부분의 화염 높이에서 매연은 화염면의 안쪽(연료지역)에 위치하고 있으므로 동일한 화염 높이에서 열전대로 측정된 최대온도($T/C T_{max}$)보다 낮게 된다. 따라서 line-of-sight 온도의 해석에는 화염의 구조와 매연입자의 분포에 대한 이해가 필요하게 된다.

Fig.6은 에틸렌 확산화염의 10, 30 50 mm 높이에서 이색법으로 측정된 신호를 Abel 변환을 하여 얻어진 화염온도를 열전대로 측정된 결과와 비교하고 있다. 대체적인 온도 분포는 유사한 경향을 보

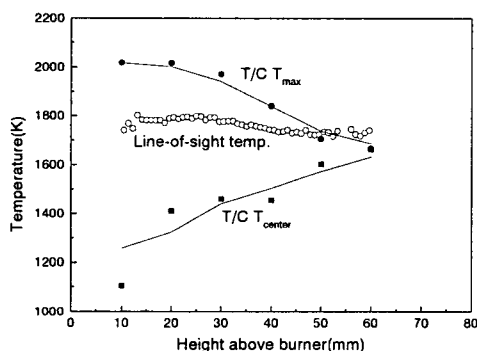


Fig.5 Temperatures measured using a line-of-sight two-color pyrometry and thermocouples in an C_2H_4 diffusion flame at 1 atm.

이고 있지만, 동일한 반경방향에서 최대 200 K의 차이를 보이고 있다. 또한 이색법에 의한 온도 측정은 매연이 존재하는 지역에 한정됨을 보여주고 있다. 그러나 열전대로 측정된 온도에는 열전도에 의한 오차, 매연 부착에 따른 온도 저하

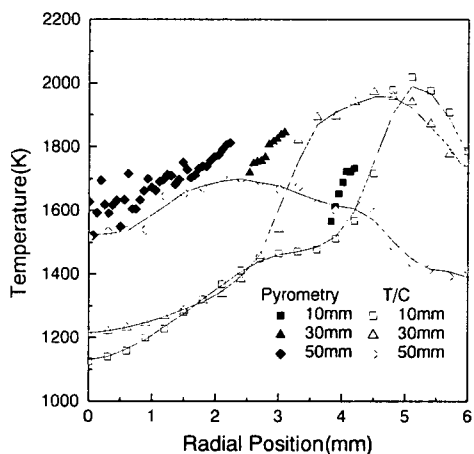


Fig.6 Radial temperature profiles of the C_2H_4 diffusion flame measured by two-color pyrometry and thermocouple at 1 atm.

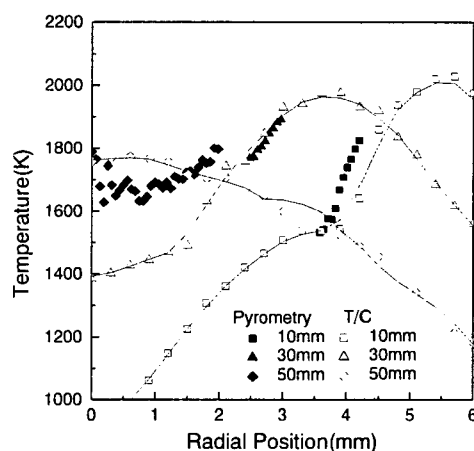


Fig.7 Radial temperature profiles of the C_2H_4+Air diffusion flame measured by two-color pyrometry and thermocouple at 1 atm.

등의 불확실성이 있으며, 이에 대한 보정이 쉽지 않다. 특히 확산화염의 매연 지역에서는 열전대로 측정된 온도의 오차가 매우 클 수 있다.

Fig.7은 에틸렌에 공기가 첨가된 경우의 온도측정 결과를 비교하고 있다. 화염 높이 10, 30 mm에서는 이색법으로 얻어진 온도가 열전대로 측정된 값과 매우 유사하였다. 그러나 화염 높이 50 mm에서는 차이를 보이고 있으며, 이는 열전대의 촉매 반응 또는 이색법의 Abel 변환의 문제로 생각된다.

Fig.8은 에틸렌에 질소가 첨가된 경우의 온도측정 결과를 비교하고 있다. 화염 높이 30 mm에서는 이색법으로 얻어진 온도가 열전대로 측정된 값과 큰 차이를 보여주지만, 50 mm에서는 대체적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. 질소의 희석에 따른 화염내부의 매연생성량 감소와 관련이 있는 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

Fig. 9는 1기압의 에틸렌 확산화염의 30 mm 높이에서 이색법으로 측정된

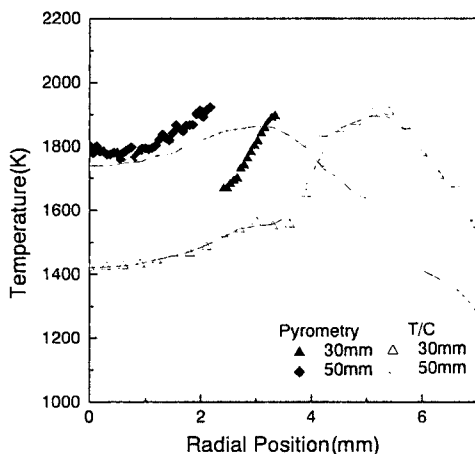


Fig.8 Radial temperature profiles of the $C_2H_4+N_2$ diffusion flame measured by two-color pyrometry and thermocouple at 1 atm.

line-of-sight와 Abel 변환으로 얻어진 반경방향 온도 분포 및 매연체적분율을 보여주고 있다. Line-of-sight 온도는 대부분의 지역에서 화염의 온도와 차이가 있음을 알 수 있으며, line-of-sight 온도가 실제 화염의 온도와 유사하게 되는 지역 또한 매연이 가장 많이 존재하는 지역이 아니라는 것을 알 수 있다. 이 결과는 line-of-sight로 측정된 온도의 해석에는 주의가 필요하다는 것을 보여주고 있다

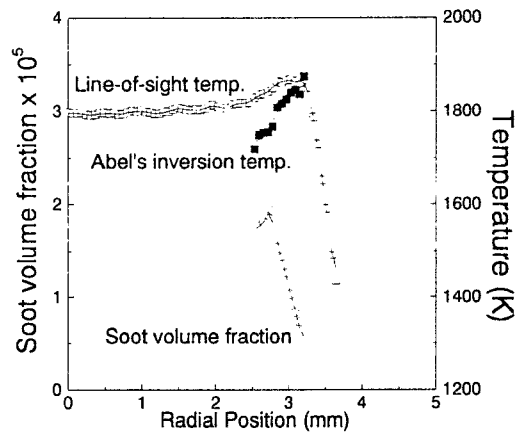


Fig.9 Radial profiles of soot temperature and volume fraction of the C_2H_4 diffusion flame at 30 mm flame height.

매연이 많이 생성되는 지역에서는 이색법과 Abel 변환을 사용한 방법의 적용이 더 쉽게 된다. Fig.10과 11은 각각 2기압, 4기압에서 10, 20, 30, 40, 50 mm의 화염 높이에서 측정된 에틸렌 확산화염의 온도 분포를 보여주고 있다. Fig.6의 1기압 결과와 비교하면, 온도측정 지역이 상대적으로 넓어지고 측정 오차에 따른 온도의 국부적인 불안정성이 줄어 든 것을 알 수 있다. 압력의 증가는 화염의 매연생성을 증가시키고, 이에 따라 매연에 의한 복사율이 커지고 결과적

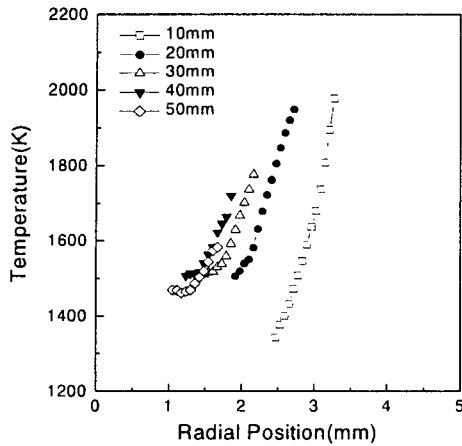


Fig.10 Radial temperature profiles of the C_2H_4 diffusion flame at 2 atm.

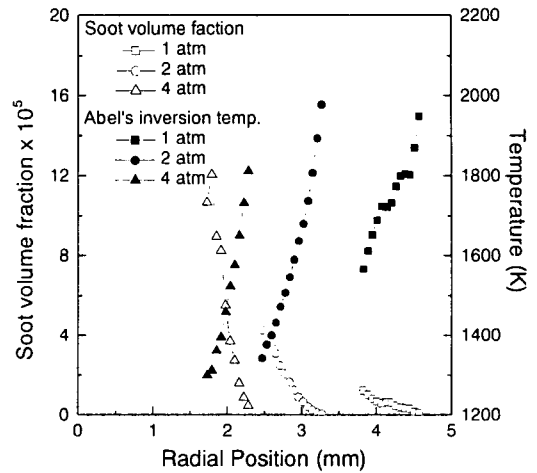


Fig.12 Radial profiles of soot temperature and volume fraction of the C_2H_4 diffusion flame at 10 mm flame height.

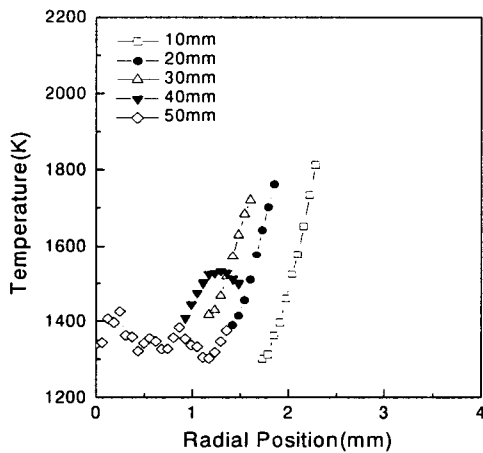


Fig.11 Radial temperature profiles of the C_2H_4 diffusion flame at 4 atm.

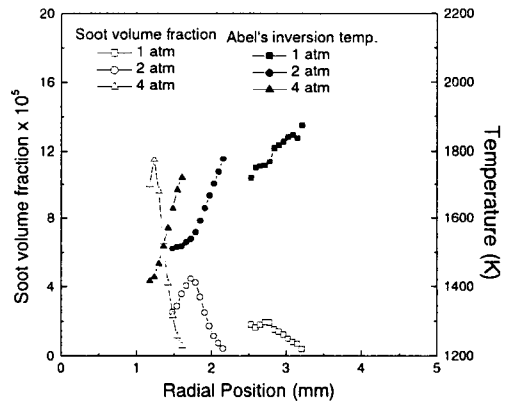


Fig.13 Radial profiles of soot temperature and volume fraction of the C_2H_4 diffusion flame at 30 mm flame height.

으로 이색법의 신뢰도가 증가하기 때문이라고 생각된다. 한재원⁽⁹⁾은 복사율 변화에 따른 이색복사온도계의 측정오차를 검토하였으며, 복사율이 작아지면 오차가 커질 수 있음을 보여주었다. 그러므로 이색법을 이용한 화염의 온도 측정엔 매연의 생성이 증가하는 압력조건에서 더 적합하다고 할 수 있다. 특히 압력조건에서는 열전대를 사용한 온도측정에 어려움이 있으므로, 이색법을 이용한 온도측정이 유용하게 된다.

이색법을 이용하면 화염온도와 동시에 매연체적분율을 측정할 수 있다. Fig. 12와 13은 각각 에틸렌 확산화염의 10, 30 mm 높이에서 측정된 화염의 온도와 매연체적분율을 1, 2, 4 기압 조건에서 비교하고 있다. 압력의 증가에 따라 매연체적분율의 증가가 발생하며, 화염의 온도는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

확산화염에서는 고온의 매연입자로부터 복사열손실이 발생하게 되며, 압력의 증가는 매연의 생성을 증가시키고, 증가된 매연은 화염의 온도를 낮추는 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

동축류 에틸렌 확산화염의 온도를 열전대와 이색법을 이용하여 측정하여 비교하였다. 이색법을 이용한 line-of-sight 온도는 화염의 특성온도를 보여주지만 매연의 생성/산화 메커니즘의 이해에 적용하기에는 부족함을 알 수 있었다. 매연이 존재하는 지역의 화염온도는 Abel 변환으로 얻어진 이색법 온도로 측정 가능하였으며, 특히 압력 조건에서는 이색법을 이용한 화염의 온도 측정이 매우 유용할 수 있음을 알 수 있었다. 이색법을 이용하여 화염온도와 동시에 매연체적분율을 측정할 수 있었으며, 이색법과 Abel 변환으로는 압력조건에서 동축류 화염의 매연 생성/산화 특성 연구에 유용하게 사용될 수 있다.

후기

본 연구는 한국표준과학연구원의 연합협동 연구의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Gülder, O. L., and Snelling, D. R., 1993, "Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 92, 115-124.
 (2) Axelbaum, R.L., and Law, C.K., 1990,

"Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1517-1523.

- (3) Nakahira, T., Komori, M. and Tsujimure, K., 1992, "Measurement of Flame Temperature Distribution in D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE paper 920692.
 (4) 이태원, 황성목, 정성식, 하종률, 1995, "이색법을 이용한 화염온도와 soot 생성과의 관계 연구," 1995년도 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp. 728-732.
 (5) De fuliis, S., Barbini, M., Benecchi, S., Cignoli, F. and Zizac, G., 1998, "Determination of the Soot Volume Fraction in an Ethylene Diffusion Flame by Multiwavelength Analysis of Soot Radiation," *Combustion and Flame*, 115, 253-261.
 (6) Lee, W. and Na Y. D., 2000, "Soot Study in Laminar Diffusion Flames at Elevated Pressure Using Two-Color Pyrometry and Abel Inversion," *JSME International Journal*, B, 43, 4, 550-555.
 (7) 이원남, 1998, "층류 확산화염에서의 PAH 및 매연생성에 대한 압력의 영향," *대한기계학회논문집 B*, 22, 10, 1445-1453.
 (8) Chang, H. and Charalampopoulos, T. T., 1990, *Proc. Roy. Soc. London A*, 430, 577-591.
 (9) 한재원, 1999, "적외선 복사온도 이론 및 측정," 1999년도 대한기계학회 추계열공학부 학술회.