

# 레이저 및 열전대를 이용한 동축류 확산화염에서의 매연입자 측정에 관한 연구

한용택\* · 이기형\*\* · 이원남\*\*

(2004년 3월 4일 접수, 2004년 5월 15일 심사완료)

## A Study on the Soot Particle Measurement in Co-Flow Diffusion Flame Using a Laser Diagnostics and a Thermocouple

Yong-Taek Han, Ki-Hyung Lee and Won-nam Lee

**Key Words:** Diffusion Flame(확산화염), Soot(매연), Rapid Insertion Technique(급속삽입법), Co-Flow Burner(동축류버너), PAH(다중고리 방향족 탄화수소), Soot Volume Fraction(매연체적분율), LEM(레이저 소멸법), LIS(레이저 산란법)

### Abstract

The temperature and soot particle measurement technique in a laminar diffusion flame has been studied to investigate the characteristics of soot particle with temperature using a co-flow burner. The temperature distribution in the flame were measured by rapid insertion of a R-type thermocouple and the soot particles by LEM/LIS techniques. In these measurement, soot volume fraction, number density and soot diameters were analyzed experimentally. As a results, the spacial distributions of particle volume fraction, soot diameter, and number density are mapped throughout the flame using the Rayleigh theory for the scattering of light by particles. A laser extinction method was used to measure the soot volume fraction and laser induced scattering method was used to measure the soot particle diameter and number density. Also, we measured temperature without the effect of soot particles attached to the thermocouple junction, which is close to the nozzle. In this result, we found that upstream zone has a unstable flowing in co-flow diffusion flame and the y-axis temperature of flame has a uniform temperature distribution in the most soot volume fraction zone.

### 기호설명

$T_g$  : (Gas 온도)

$T_j$  : (열전대 열선 온도)

$\epsilon_j$  : (백금 방사율)

$k_{ext}$  : (소멸 계수)

$\sigma$  : (Stefan-Boltzmann 상수)

$Nu_j$  : (열전대의 Nusselt 수)

$X_g$  : (열전도 계수)

### 1. 서론

확산화염은 연료와 산화제가 초기에 분리되어 있으며, 화염지역에서는 연료와 산화제가 확산과 대류에 의해 전달되어 분자적으로 혼합이 이루어져 화염을 형성한다. 확산화염은 디젤엔진, 가스 터빈 그리고 산업용 버너등과 같은 대부분의 산업용 연소기기에서 널리 이용되고 있다. 하지만

† 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : rthan102@hanmail.net

TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

\* 회원, 한양대학교 기계공학과

\*\* 회원, 단국대학교 기계공학과

확산화염을 이용하는 연소기기의 특성상 매연의 생성은 불가피하며 매연발생의 능동적인 제어를 위하여 그 생성 및 산화과정의 규명은 반드시 필요하다. 일반적으로 동축류 확산화염에서의 매연 생성 및 산화의 특성은 매연입자의 체적분률, 수밀도, 평균직경 및 PAH 농도 측정을 통하여 분석되어진다. 이때 매연의 생성과 산화의 특성은 온도의 영향을 많이 받는다고 알려져 있다.

Gülder<sup>(1)</sup>는 동축류 확산화염에서 화염온도에 따른 매연 생성 특성을 연구하였으며, 이 경우 화염 온도가 증가할수록 최대 매연 생성량과 매연 생성률이 증가함을 보였다. 또한, 에틸렌 확산화염을 사용한 실험적 연구 결과들은 연료에 첨가된 소량의 산화제, 특히 산소의 첨가는 매연의 발생을 증가시키고 따라서 열해리 반응물과 매연 생성률의 증가가 이루어진다고 설명하였다.<sup>(2-3)</sup>

그러나 연료에 첨가된 산소는 화염온도를 상승시키게 되고 연료 회석 효과에 의한 매연 생성 메카니즘의 변화등이 복합적으로 발생하여 매연 생성에 대한 산화제의 영향을 정량적으로 평가하기 어렵게 한다. 따라서 매연생성/산화특성에 관한 연구에는 화염의 온도가 고려되어야 하며, 확산화염의 온도 측정 장치로는 열전대(thermocouple), CARS(Coherent Anti-stokes Raman Spectroscopy), 복사온도계 등이 사용된다.

본 연구에서는 R-type 열전대를 이용하여 동축류 에틸렌( $C_2H_4$ ) 확산화염에서의 온도를 측정하였다. 일반적으로 열전대의 방법은 비교적 온도 측정이 쉽고, 적은 비용으로 측정을 할 수 있지만, 열전대 비드로부터 복사열손실, 열전대선을 통한 전도열손실, 매연입자의 부착 등으로 인한 측정오차가 발생하게 된다. 현재 이의 해결방법으로 급속삽입법(Rapid Insertion Technique)을 이용하고 있으나 화염이 용기의 내부에서 형성되는 대부분의 압력조건에서는 열전대를 이용한 화염 온도측정이 불가능하다는 단점도 있는 측정법이<sup>(4-7)</sup>

한편, 확산화염내의 매연 체적분률은 일반적으로 레이저를 이용한 광소멸법<sup>(8)</sup>으로 측정한다.

매연 입자의 산란특성이 Mie 산란 특성과 같으면 광학적인 측정방법으로 매연의 체적분률, 매연 분포 함수의 크기 또는 직경, 매연의 수밀도 또는 굴절률을 결정할 수 있다.<sup>(9)</sup>

그리고, 매연입자의 생성은 첫째, 광범위한 열

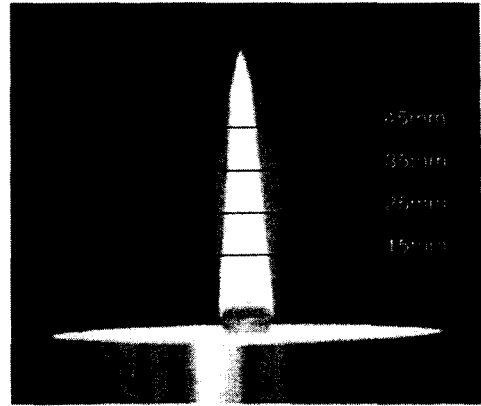


Fig. 1 Co-flow diffusion flame

분해(pyrolysis)와 원자 재배열(rearrangement)을 통해서 핵(nuclei)이 형성되며(soot inception), 둘째로 이 핵에 아세틸렌등의 화학종이 부착되는 표면성장(surface growth)을 통하여 체적분률(volume fraction)의 증가를 가져오고, 셋째로 미연 탄화수소가 고갈되어 더 이상의 입자성장은 없이 타 입자와의 응집(coagulation)을 통하여 크기는 증가하고 수밀도(number density)의 감소를 가져오며, 마지막 단계로  $O_2$ ,  $OH$ ,  $O$  등에 의해서 매연입자의 산화가 발생하게 된다고 알려져 있다.<sup>(9-11)</sup>

본 연구에서는 화염길이가 65mm이고, 연료에 에틸렌( $C_2H_4$ )인 Fig. 1과 같은 동축류 확산화염의 측정지역을 15mm, 25mm, 35mm, 45mm로 나누고, 횡축방향으로 열전대를 0.2mm 간격으로 이동시켜 측정하였으며, 측정지역에서의 R-type 열전대와 아르곤-이온 레이저를 이용하여 온도와 매연체적분률 및 매연입자직경을 분석하였다. 또한 수밀도의 측정을 통하여 매연생성/산화의 메카니즘에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 동축류 버너 및 급속삽입법 실험장치

동축류 확산화염을 이용하여 연료는  $C_2H_4$ (에틸렌)을 사용하였고, 연료의 양은 mfc(Mass flow controller)로 연료의 양을 조절하여 180scc/m로 공급하였다. 연료는 버너의 중심에 위치한 내경 8.0mm, 외경 9.3mm의 황동 노즐을 통하여 공급하였으며, 외부로부터의 간섭에 의하여 화염의

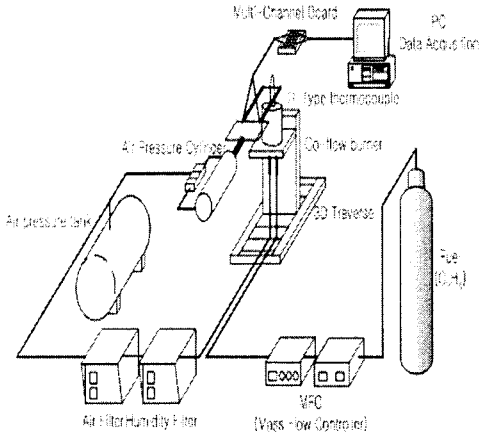


Fig. 2 Experimental setup

떨림이나 변형이 일어나지 않게 하기 위한 과도 증류공기(over-ventilated shield air)를 공급하였다. 이러한 과도 증류공기는 직경 2.5mm의 유리구슬, 황동 스크린 및 플라스틱, 세라믹 하니콤을 사용한 장치를 버너주위에 장치하여 출구속도장이 균일한 주위공기를 공급하였고, 이를 통하여 실험 과정에 있어서 동일하며 안정적인 과도 공기 증류 확산화염을 얻어낼 수 있었다. 또한 측정지역에서의 온도를 측정하기 위해서 급속삽입기구를 고안하고, 고온에서의 온도 측정이 가능한 R-type (Pt-Pt/13%Rd) 열전대를 사용하였으며, 급격한 온도 변화에 민감하게 따라갈 수 있도록  $60\ \mu\text{m}$ 의 세션을 선택하였다. 열전대는 연장동선과 연결되어 있고, 연장동선의 다른 끝을 다채널 터미널 보드에 연결하여 A/D 보드(NI-6035E)로 온도 기전력 신호가 전달되며, 기전력 신호를 PC로 처리하여 온도 데이터를 획득하였다. 버너는 X-Y-Z 축으로 움직일 수 있는 이송 장치 위에 설치되어 있으므로 화염의 반경방향 및 높이 방향의 정확한 지점에서의 온도 측정이 가능하였다. 전체적인 온도 측정 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

## 2.2 온도 데이터 분석 및 처리

각각의 측정점의 raw 데이터(voltage history)를 비교 분석하여 설정한 열전대의 전형적인 응답특성을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a), (b), (c), (d) 네 개의 그래프는 열전대의 전압신호의 특성을 파악한 대표적인 데이터의 형식이다. 열전대의 삽입은 약 0.7초 동안 이루어지며 공압실린더를 이용하여 화염내에 전진속도는  $15\text{cm/s}$ 로 측정위

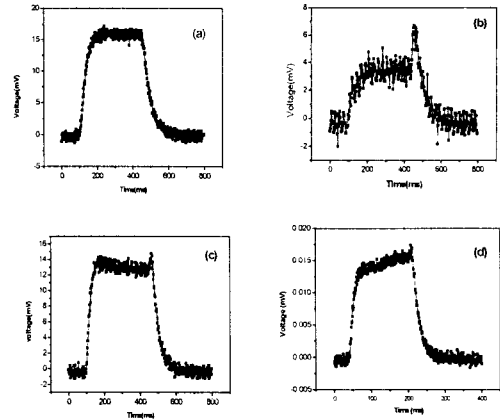


Fig. 3 Characteristics of temperature measurement system

치로 이동하였으며, 또한 솔레노이드 밸브를 이용하여 후퇴속도는  $19.23\text{cm/s}$ 가 되도록 설정하였다. 정상확산화염을 기준으로 볼 때, Fig. 3(a)의 경우에는 매우 안정된 상태의 데이터로서 표준상태의 데이터신호로 판단될 수 있다.

(b)의 경우에는 버너노즐에서 매우 가까운 영역에서 얻은 데이터로서 유동의 영향과 열분해가 아직 이루어지기전에 불안정한 화염초기 상태로서의 데이터로서 신호의 진행이 매우 불안정한 상태임을 알 수 있다.

한편 (c)의 경우에는 열전대가 화염 안으로 삽입된 이후 온도가 최고를 보이고 이후 감소하는데, 이것은 열전대의 접점에 달라붙은 매연입자에 의한 복사열손실로 보인다.

(d)의 경우에는 200~400ms에 걸쳐 온도가 미세하게 증가하는 경향을 보이다가 감소한다. 이러한 경우는 열전대의 접점이 화염대 내부에 있을 때 양쪽의 열전대 선이 화염대에 닿아서 화염대로부터 열전도에 의해 접점의 온도가 조금씩 상승하는 것으로 생각된다.

위의 온도 그래프 형태로부터 접점이 목표점에 도달한 직후부터 매연이 부착하기 전에 최고치를 얻어야 준 정상상태(quasi-steady state)에서 온도를 읽었다고 할 수 있다.<sup>(12)</sup>

그래프의 네 가지 패턴에 대해, 얻은 온도가 목표점에 도달한 직후, 얼마 후에 나타나는지 조사한 결과, 네 가지 모두 최고치는 목표점에 도달한 후 150ms 이내에 나타났다. 따라서 네 가지

경우에 대해 일관성을 두기 위해 온도를 측정하는 방법은 대략 열전대의 접점이 목표점에 도달 후 100~200ms 범위에 위치한 온도 데이터의 평균값으로 하였다. 유효 값이라고 인정할 수 있는 범위, 즉 매연 부착이 본격적으로 시작하기 전에 값을 얻었으므로 비교적 실제 화염 온도에 보다 가까운 값이라고 생각된다.

2.3 LEM/LIS를 이용한 광학적 측정장치

레이저 광소멸법(Laser Extinction Method : LEM)/산란법(Laser Induced Scattering : LIS)을 이용한 매연체적분률, 매연입자입경 및 수밀도의 측정을 위한 측정 장치에는 아르곤 이온 레이저(Spectra-Physics Stablite 2017-05)를 파장 514.5nm에서 1W의 출력으로 사용하였다. 광소멸 신호와 광산란 신호는 각각 광다이오드(Hamamatsu 1337-101BQ)와 PMT 모듈(Hamamatsu H7712-02)을 이용하여 측정하였다. 또한 외부 노이즈의 최소화를 위하여 lock-in 앰프(Stanford Research System SR830)와 광학용 초퍼시스템(Stanford Research System SR540)를 사용하여 line-of-sight 광소멸법 및 광산란법을 이용하였으며, 이러한 자료획득과 장치제어는 GPIB통신과 Labview를 통하여 이루어졌다. Fig. 4는 레이저 광소멸법 및 산란법의 실험장치의 개략도를 나타내는 그림이다.

2.4 온도 측정시 복사 열손실 보상

측정된 온도는 열전대의 접점이므로 복사열손

실, 유도선을 통한 전도 열손실, 열전대의 접점 표면에서 일어나는 열생성(heat generation)등을 고려해 가스의 온도를 구해야 한다. 그러나 본 실험에서 택한 열전대 선의 직경이 매우 작아서 접점의 직경은  $120 \pm 25 \mu m$ 이므로 전도 열전달과 표면에서의 열 생성은 접점에서의 복사열손실에 비해 충분히 작은 값이므로 복사 열손실만을 고려하였다. 접점에서 준정상 에너지 평형(quasi-steady energy balance)을 적용하면 다음과 같이 측정된  $T_g$  값을 얻을 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\epsilon_j \sigma T_j^4 = (\chi_{g,o} Nu_j / 2d_j)(T_g^2 - T_j^2)$$

여기서  $\epsilon_j$ 는 접점의 방사율(emissivity),  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $Nu_j$ 는 접점의 Nusselt수,  $d_j$ 는 접점의 대표지름, 그리고  $X_{g,o} = X_g / T_g$ 이다. 여기서  $X_g$ 는 가스의 열전도 계수로,  $T_g$ 에 선형적으로 비례한다고 가정하여,  $X_{g,o}$  값을 상수로 하였으므로,  $X_g$ 가 상수라는 가정보다는 훨씬 합리적이다. 이 식의 좌변은 단위 면적당 복사 열소실량이며 우변은 대류 열 유입량이다.  $Nu_j = 2.1$ ,<sup>(6)</sup>  $X_{g,o} = 6.54 \times 10^{-5} W/m^2 K$ ,<sup>(6)</sup>  $d_j = 160 \mu m$ <sup>(6)</sup>를 적용하였다. 방사율  $\epsilon_j$ 는 백금(Pt)의 깨끗한 표면에 대한 값을 취했으며, 온도에 따라 각기 다른 값들을 주어 값을 구하였다.<sup>(13-14)</sup>

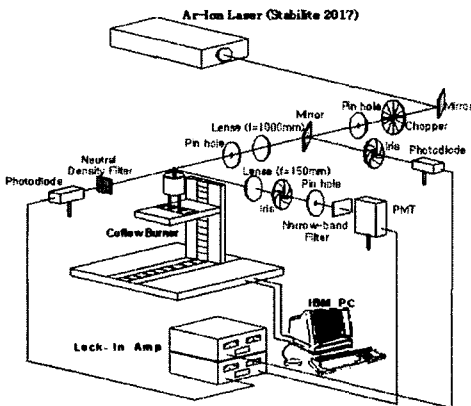


Fig. 4 Laser light extinction/scattering experimental set-up

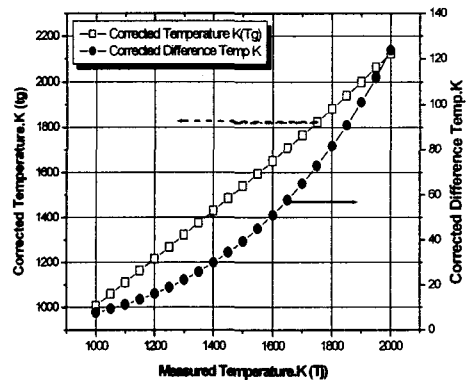


Fig. 5 Comparison between the measured and corrected temperature

온도가 높을수록 복사 보정에 의한 온도 차이가 커져서, 2000K에서는 보정 온도 차이는 약 123K 나타난다. Fig. 5는 위와 같은 방법을 통해서 온도에 따라 보정하기 전과 보정한 후의 온도 차이를 나타내는 식을 도시한 그래프이다.

### 2.5 매연체적분률, 평균입경, 및 수밀도의 측정 이론

매연입자의 크기  $D$ 가 레이저 파장  $\lambda$ 에 비해 충분히 작아서 입자 크기 무차원수  $\alpha(\pi D/\lambda)$ 가 0.1이하인 경우에 레이저 광의 소멸은 주로 흡수(absorption)에 의한 것이라 가정할 수 있으며, 입자에 의한 감쇠계수  $K_{ext}$ 는 식 (1)과 같이 감쇠비  $I/I_0$ 를 구함으로써 얻어진다.

$$\frac{I(y)}{I_0} = \exp\left[-\int_{-x_0}^{x_0} K_{ext}(x, y) dx\right] \quad (1)$$

이때 화염을 축대칭으로 가정하고 Abel 변환을 이용하여 식을 재구성 한다.

매연 입자가 레이저 파장에 비해 충분히 작은 구형입자로 가정한 Rayleigh 근사를 이용하고 매연입자의 복소 굴절률(refractive index)  $m = 1.57 - 0.56i$ 을 사용하면, Abel 변환 후 구한  $K_{ext}$ 로부터 매연입자의 체적분률  $f_v$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_v = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(m)} \quad (2)$$

이 식에서 복소함수  $E(m)$ 은 다음과 같다.

$$E(m) = -Im\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}\right) \quad (3)$$

또한 매연입자의 입경분포가 로그 정규이며 self-preserved 분포로 가정하면<sup>(15)</sup> 다음의 관계를 이용하여 매연입자의 입경( $D$ ), 수밀도( $N$ )등을 구할 수 있다.

또한 매연입자의 입경분포가 로그 정규이며 self-preserved 분포로 가정하면<sup>(15)</sup> 다음의 관계를 이용하여 매연입자의 입경( $D$ ), 수밀도( $N$ )등을 구할 수 있다.<sup>(17)</sup>

$$D_{30} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{4\pi E(m) Q_{rr}}{f_v F(m) K_{ext}}^{1/3} \quad (4)$$

$$N = \frac{6\phi}{\pi D_{30}^3} \quad (5)$$

$$f_N = \left(\frac{D_{63}}{D_{30}}\right)^3 = 2.0788 \quad (6)$$

$$E(m) = -Im\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}\right) = 0.25954 \quad (7)$$

$$F(m) = \left|\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right|^2 = 0.21734 \quad (8)$$

$$m = 1.57 - 0.56i \quad (9)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 LEM/LIS 기법을 이용한 매연체적분률, 평균입경, 및 수밀도의 분포 특성

Fig. 6은 위의 방법으로 구한 매연체적분률  $f_v$ 을 나타내는 그림으로서, 광소멸 신호로부터 얻어진 적분된 매연 체적분률을 나타내는 그림이다.<sup>(17)</sup>

Abel 변환후의 매연체적분률을 나타내는 그림이므로 좌우대칭이 되는 매연체적분률의 형태로 나타내어지고 있으며, 화염안쪽의 영역에서는 PAH발생지역으로 판단되어지므로 매연체적분률이 거의 발생되어지지 않는 것을 알 수 있다.

또한, 화염상류에서의 매연입자들이 streamline들을 따라 화염하류쪽으로 이동하며 표면성장을 하며 계속 성장하다 화염중앙부위에서 매연체적분률의 최대값을 이루고 응집현상을 거치며 매연체적분률의 감소현상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 동축류 화염전체높이에서 매연은 화염상류에서 발달하여 화염중앙부위에서 가장 큰

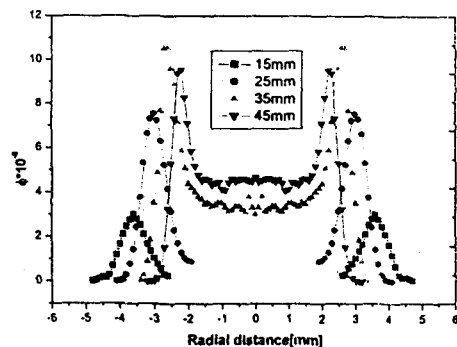


Fig. 6 Soot volume fractions measured by laser extinction method

발달과정을 거쳐 화염하류에서 산화에 의해 다시 감소하면서 점차 매연체적분률이 줄어드는 경향을 알 수 있다.

다음의 Fig. 7와 Fig. 8은 위의 방법으로 구한 매연입자의 입경직경( $D_{30}$ )과 수밀도( $N$ )을 나타내는 그림으로서, 매연으로 전이되기 시작하는 매연 생성 초기 지역에서 높은 수밀도를 나타내는 매연입자는 서로 충돌과 융합에 의한 응집작용을 통하여 급격한 수밀도의 감소를 보이며 성장하게 되며, 이때 입자수의 감소는 이론적으로 Smoluchowski<sup>(16)</sup>식을 따른다고 알려져 있다. 즉

$$\frac{dN}{dt} = -kN^2$$

으로서 이때 입자수의 감소율은 수밀도의 제곱에

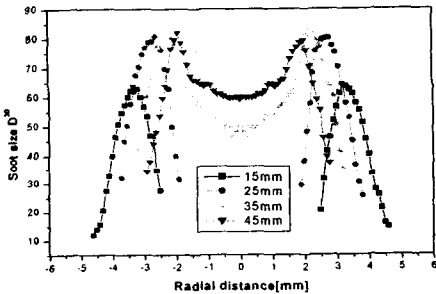


Fig. 7 Mean diameters of soot particles( $D_{30}$ ) measured by light extinction method

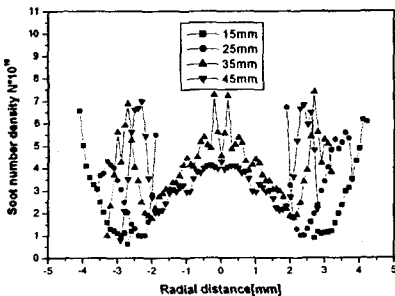


Fig. 8 Number density of soot particle measured by light extinction/ scattering method

비례하여 감소하고, 이때  $k$ 는 매연입자 크기의 함수로서 입자 직경의 1/2승과 온도에 비례한다. 또한 위와 같은 형태는, 본 실험에서도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.<sup>(17)</sup>

### 3.2 동축 확산화염의 온도분포 특성

Fig. 9은 복사열손실의 보정과정을 거친 후의 높이에 따른 온도의 결과를 나타내는 그래프이다. Fig. 9의 그림을 통해서 반경방향 위치별 온도의 분포를 알 수 있으며, 높이별로 화염의 폭도 변화하며, 그에 따라 화염대의 위치가 달라짐을 간접적으로 알 수 있으며, 화염면에서의 온도가 가장 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 data 획득과정에서 화염 상류 부위에서는 화염의 진행이 활발한 산화로 인해 약간은 불안정한 data의 획득이 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 10의 그래프는 화염이 비교적 안정화된 높이인 15mm와 25mm에서의 급속삼입법과 레이저소멸법으로 얻은 온도와 매연의 체적분률의 관계를 나타낸 그림이다.

그림에서 알 수 있듯이 연소의 상태가 발달 할수록 매연의 체적분률은 증가하는 것을 뚜렷이 알 수 있으며, 화염면에서는 매연의 체적분률은 산화에 의해서 최소가 되는 것을 알 수 있고, 그때의 온도는 최대가 되는 것을 알 수 있다. 또한 위에서는 거의 배출되지 않고, 화염면으로 이동

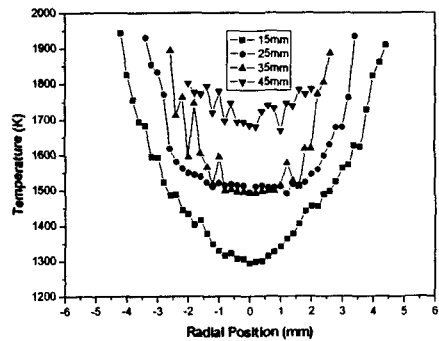


Fig. 9 Radial temperature profiles of the  $C_2H_4$  diffusion flame measured by thermocouple

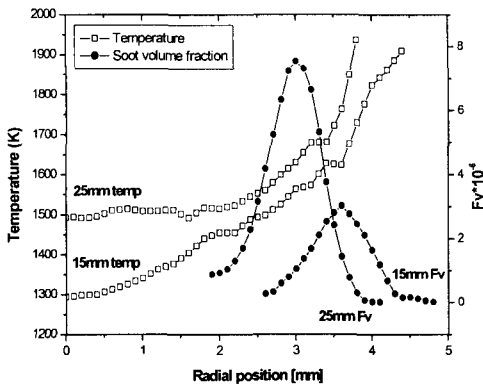


Fig. 10 Temperature and soot volume fraction at 15mm and 25mm positions

함에 따라 표면성장을 거쳐 성장함을 알 수 있으며, 입자 직경 또한 매연 체적분률과 비례하여 증가하며 비슷한 위치에서 화염면대에서 평균직경 역시 감소하는 것을 Fig. 10 그림을 통해 알 수 있다. 또한 식 (4)와 (5)에서와 같이 입자의 직경과 수밀도는 반비례하는 전체적인 분포를 그리고 있는데 이것은 매연이 성장 할 때에는 응집 현상에 의해서 수밀도는 감소하며 다시 산화하면서 산화 과정을 통해 수밀도는 다시 증가하는 현상에 기인한다.

동축류 화염 전체높이(≒65mm)에서 매연은 노즐에서 발달하여 화염 중앙부위에서 가장 큰 발달과정을 거쳐 화염 상류에서 산화에 의해서 다시 감소하면서 점차 매연 체적분률이 줄어드는 경향을 알 수 있다.

또한 Fig. 11은 180scc/m 확산화염의 중심을 기준으로 y축 방향으로 1mm 간격으로 동축류 버너 노즐 약 3~4mm에서부터 화염 끝까지 측정 한 온도의 결과이다.

Fig. 11에서는 화염중앙부위에서 노즐높이 약 3~4mm부터 최대 높이까지 화염의 중심축의 온도 분포를 구한 결과이며, 위 그림에서 화염 온도의 상승이 화염상류까지 진행하는 것을 알 수 있으며, 화염의 중앙축에서는 온도가 계속하여 상승하다 매연이 활발하게 상승되는 지역에서의 높이에서는 온도의 발달이 거의 이루어지지 않고 다시 산화가 이루어지는 화염하류에서는 다시 온도

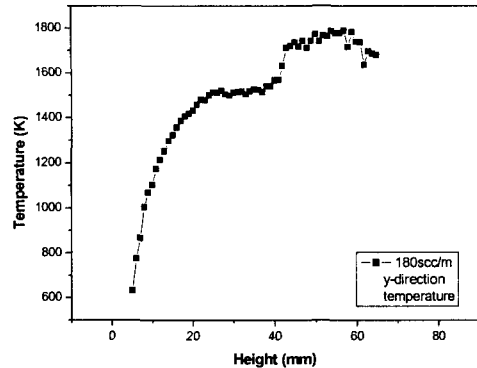


Fig. 11 y-direction's temperature from the end of flame to the top of flame

의 상승이 이루어지는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

급속 삽입 기법을 이용하여 층류 확산화염에서 횡축방향과 종축방향의 온도 측정에 관한 계측과 레이저 광계측을 통하여 매연의 체적분률, 입자 직경, 수밀도등을 분석한 결과 다음을 알 수 있었다.

(1) 층류 확산화염에서의 열전대를 이용한 온도 측정에서는 측정 한 데이터에서 열전대 비드에서 일어나는 복사열손실을 보정하여야 실제 화염의 온도와 가까운 온도를 구할 수 있었으며, 노즐부위와 화염상단에서는 불안정한 상태의 화염의 진행이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

(2) 횡축방향에서의 매연 체적분률과 온도와의 관계에서 연소가 진행됨에 따라 성장하고, 온도는 화염면에서 가장 높음을 알 수 있었고, 화염면에서 산화의 영향으로 매연 체적 분률이 화염대 안쪽에서 다시 감소함을 볼 수 있었다.

(3) 매연입자의 직경과 수밀도는 반비례하는 전체적인 분포를 가지고 있으며, 이것은 매연이 성장 할 때에는 응집현상에 의해 수밀도는 감소하며 다시 산화하면서 산화 과정을 통해 매연의 수밀도는 증가하는 현상을 볼 수 있다.

(4) 화염의 중심을 기준으로 y-축방향으로 온도 측정시 PAH가 생성되리라 예상되는 지역과 매연의 산화가 이루어지는 영역에서는 온도의 상승이

일어남을 알 수 있었으며, 매연이 가장 많이 발달 되는 지역에서는 온도가 일정함을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 에너지관리공단에서 시행한 에너지 기술학술진흥사업[2003-E-TR03-P-01-0-000-2003]의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고문헌

- (1) Gülder, O. L., 1992, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures," *Combust, Flame*, Vol. 88, No. 1, pp. 74~82.
- (2) Hura, H. S. and Glassman, I., 1987, "Fuel Oxygen Effects on Soot Formation in Counterflow Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 53, pp. 1~21.
- (3) Hura, H. S. and Glassman, I., 1988, "Soot Formation in Diffusion Flames of Fuel/Oxygen Mixtures," *Twenty-Second Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, Pittsburgh, pp. 371~378.
- (4) Santoro, R. J. T. T., Horivath, J. JJ. and Semrjian, H. G., 1984, *Combustion Science and Technology*, Vol. 53, pp. 89~115.
- (5) Kent, J. H. and Wagner, H. Gg., 1984, *Combustion Science and Technology*, Vol. 41. p. 245.
- (6) Mcnealy, Charles S., Ümit Ö. Köylü, Pfefferle, Lisa D. and Rosner, Daniel E., 1997, *Combustion and Flame*, Vol. 109, No. 4, pp. 701~720.
- (7) Lee, G. W., Jung, Y. R and Jurng, J. S., 1999, "Temperature Measurement in Concentric Diffusion Flames by Rapid Insertion Technique," *Kosco symposium*, Vol. 4, No. 2, pp. 75~83.
- (8) Dobbins, R. A., Santoro, R. J. and Semerjian, H. G., 1984 "Soot Particle Measurement in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 208~237.
- (9) Haynes, B. S. and Wagner, H. Gg., 1981 "Soot Formation," *Prog. Energy Combustion. Sci.*, Vol. 7, pp. 229~273.
- (10) Smith, O. I., 1981 "Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particle Emission," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 7, pp. 275~291.
- (11) Lee, W. N., Song, Y. H. and Cha, M. S., 1997, "OH Radical Distribution and Sooting Characteristics in Co-Flow Diffusion Flames," *15th Kosco Symposium*, pp. 1~11.
- (12) Rosner, D. E., 1986, "Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems," *Butterworths*.
- (13) Holman, J. P., 1990, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (14) Park, J. C., Kang, K. H. and Park, C. P., 1985, *Temperature*, Korea Research Institute of Standards and Science, pp. 105~208.
- (15) Dobbins, R. A., Santoro, R. J. and Semerjian, H. G., 1984, "Soot Particle Measurement in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 208~237.
- (16) Haynes, H. S. and Wagner, H. G., 1981, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 7, pp. 209~273.
- (17) Santoro, R. J., Semerjian, H. G. and Dobbins, R. A., 1983, "Soot Particle Measurement in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.