

〈論 文〉

방사와 투과를 이용한 층류확산화염내 매연입자의 온도 및 농도 측정

송상종* · 박성호** · 김상수***

(1993년 2월 12일 접수)

Soot Temperature and Concentration Measurement Using Emission/Transmission Tomography in Laminar Diffusion Flame

Sang-Jong Song, Sung-Ho Park and Sang-Soo Kim

Key Words : Soot(매연입자), Laminar Diffusion Flame(층류확산화염), Flame Temperature(화염온도), Emission(방사), Transmission(투과), Tomography(토포그래피)

Abstract

The measurements of monochromatic line-of-sight flame emission and light transmission in the same path having small spatial resolution were performed in an axisymmetric laminar propane (C₃H₈) diffusion flame. The light wavelenghtes of 632 nm, 800nm and 900 nm were used. From these measurements, local point soot radiances (by Kirchhoff's law) and absorbtion coefficients were reconstructed by tomography. Thus local point soot temperatures and concentrations were obtained. The reconstructed soot temperatures and concentrations of local points have no differences between the case of visible range(632 nm) and the case of infrared range(800 nm and 900 nm). In these ranges, the scattering coefficient is much lower than the absorbtion coefficient. Soot mean temperature over the path also matches well with local soot temperature in outer region of the flame. Temperature measurement by thermocouple with different bead diameters (222 μm and 308 μm) was carried in the same flame. Rapid insertion technique was used and radiaton effect was considered. Radiation correction in the sooting region was carried out and the corrected result was in good agreement with the local soot temperature.

기 호 설 명

a	: 가속도 (m/s ²)	$f(r)$: 내부 분포함수
$B_{\lambda}(T)$: 플랑크함수	$g(y)$: 경로 적분함수
c	: 진공에서의 빛 속도 (=2.9979×10 ⁸ m/s)	h	: 플랑크상수 (=6.6260×10 ⁻³⁴ Js)
D	: 구의 직경	IL_{λ}	: 파장λ에서의 방사강도
d_w	: 비드(bead)의 직경	ILS_{λ}	: 파장λ에서의 방사 및 투과강도
$E(\bar{m})$: 복소굴절계수로 구성된 함수	IS_{λ}	: 파장λ에서의 입사광원의 강도
f_v	: 체적농도	k	: 볼츠만상수 (=1.3806×10 ⁻²³ J/K), 식(2)
		k	: 열전도도, 식(22)
		k_g	: 가스의 열전도도
		\bar{m}	: 복소굴절계수
		ML_{λ}	: 파장 λ에서 측정된 화염의 방사강도값

*현대자동차(주)

**삼성중공업(주)

***정회원, 한국과학기술원 기계공학과

$ML_{\lambda,emit}$: 파장 λ 에서 측정된 IR emitter의 방사강도값

\overline{Nu} : 면적평균된 Nusselt수

$P(D)$: 크기 분포함수

Pr : 가스의 Prandtl수

Re : Reynolds수, $Re = U_z d_w / \nu_g$

T : 온도(K)

T_g : 가스의 온도(K)

T_{sr} : 주위 온도(K)

T_w : 열전대 표면온도(K)

U_z : 축방향의 속도

Z : 버너위 축방향의 위치

$\alpha_{\lambda}^{(a)}$: 파장 λ 에서의 국소흡수계수

$\alpha_{\lambda}^{(e)}$: 파장 λ 에서의 국소소멸계수

ϵ_w : 열전대의 표면 방사계수

κ : $k = k_g \left(\frac{T}{T_g} \right)^{\kappa}$ 관계에서의 지수변수

λ : 빛의 파장

σ_B : 스테판-볼츠만상수 $\{5.67 \times 10^{-8} \text{ W (m}^2\text{K}^4)\}$

τ_{λ} : 파장 λ 에서의 투과율

ν_g : 가스의 동점성계수

CARS, LIF 그리고 방사 및 투과 등의 방법이 이용된다. CARS 방법을 이용하면 화염의 내부점에서의 온도값을 직접 구할 수 있으나 측정신호가 매우 약한 비탄성산란(inelastic scattering)인 Raman 신호를 이용한 측정법이기에 때문에 고출력의 레이저와 스펙트럼 분석장비 등을 필요로 한다. LIF에 의한 방법은 레이저를 이용하여 특정분자를 발광시켜 그 분자에서 나오는 빛을 스펙트럼 분석하여 온도를 구하게 된다. 방사 및 투과에 의한 방법은 측정신호가 경로적분된 값이기 때문에 토모그래피(tomography), Abel의 법칙 등을 이용하여 내부점에서의 재구성 작업이 필요하게 되고, 여기서 얻어진 내부점의 화염방사로부터 온도를 구하게 된다.

본 실험에서는 축대칭의 프로판(propane) 층류화산화염에서 가시광선(632 nm)과 근적외선(800 nm, 900 nm) 파장대에 대한 매연입자의 방사 및 투과 측정으로부터 토모그래피를 이용하여 매연입자의 온도와 농도분포를 구하고자 한다. 또한 열전대 측정결과와 비교하여 측정값의 차이를 알아보고, 복사효과를 고려함으로써 열전대 측정값을 정량화하고자 한다.

1. 서 론

연소기관의 성능을 나타낼 때와 보일러의 복사열 전달을 계산, 화염의 구조해석 등에서 온도는 매우 중요한 인자이다. 온도를 정확히 측정하게 되면 이들의 해석은 그만큼 정확해진다. 이와같이 온도를 정확히 측정하는 것이 중요하지만, 그러나 실제 실험에 있어서 온도측정은 시간적 공간적 제한이 따르며, 특히 매연입자(soot)가 존재하는 확산화염(diffusion flame)에서의 화염온도 측정은 많은 어려움이 수반된다. 이를 극복하기 위해서는 정확한 온도측정법과 더불어 다양한 온도측정법의 개발이 요구된다.

온도측정에는 열전대(thermocouple, TC)를 이용한 방법이 일반적이다. 그러나 근래에는 CARS(coherent anti-stokes raman spectroscopy), LIF(laser induced fluorescence), 방사 및 투과(emission/transmission, 혹은 absorption/emission), Raman scattering, Rayleigh scattering 등 광학적 방법을 이용한 측정법이 활발히 연구되고 있다. 층류화산화염에서 광학적방법을 이용한 온도측정에는

2. 수식 전개

2.1 방사 및 투과

열역학적 평형상태에서 화염내 매연입자의 방사는 Planck의 흑체복사와 매연입자의 흡수계수의 곱으로 표시된다. (Kirchhoff's law) 그리고 측정되는 화염의 방사는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 측정방향에서는 경로적분된 값으로 측정된다. 이 경로적분된 값으로부터 Abel의 법칙을 이용하여 역변환과정을 거치게 되면, 내부점에서의 방사를 계산할 수 있다.

먼저, 파장 λ 에 대한 자체흡수효과를 고려한 화염의 방사는 다음과 같다.

$$IL_{\lambda}(y) = \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha_{\lambda}^{(a)}(x,y) B_{\lambda}[T(x,y)] \exp\left[-\int_{x,y}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha_{\lambda}^{(e)}(x',y') dx'\right] dx \quad (1)$$

여기서 IL_{λ} 는 관측경로를 따라 측정되는 화염만의 방사이고, $\alpha_{\lambda}^{(a)}$ 와 $\alpha_{\lambda}^{(e)}$ 는 각각 국소흡수계수와 국소소멸계수이다. Rayleigh 산란영역에서는 국소

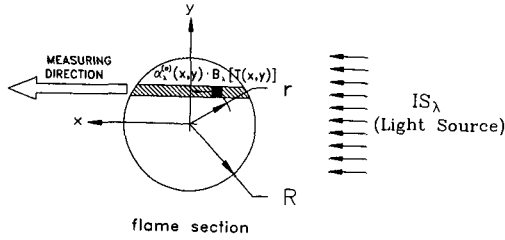


Fig. 1 Representation of flame measuring section with light source

산란계수는 무시할 수 있으므로 $\alpha^{(a)}$ $\alpha^{(e)}$ 의 관계가 성립된다. $B_\lambda(T)$ 는 Planck함수로서

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1]} \quad (2)$$

이다.

입사광의 강도가 IS_λ 일때, IS_λ 는 화염단면을 지나면서 화염내에 분포하는 매연입자에 의해 지수(exponential)함수로 감소된다. (Bouguer's law) 이 때 화염의 방사 IL_λ 도 함께 측정되므로 입사광 IS_λ 에 대한 측정강도 ILS_λ 는 다음과 같다.

$$ILS_\lambda(y) = IL_\lambda(y) + IS_\lambda \exp[-\int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha^{(e)}(x,y) dx] \quad (3)$$

본 실험의 광투과율(transmittance) τ_λ 는 위의 식으로부터 다음과 같다.

$$\tau_\lambda(y) = \frac{ILS_\lambda(y) - IL_\lambda(y)}{IS_\lambda} \quad (4)$$

본 연구에서 측정하고자 하는 매연입자의 온도와 농도분포를 구하기 위하여, 식(3)에서 볼 수 있듯이 입사광의 주사 가부에 따라 화염단면을 통과한 광의 세기를 측정하는 것이 필요하다. 그러므로 52 mm 높이의 화염단면을 통과하여 경로적분된, 파장 900 nm 단색(monochromatic)광의 측정된, 방사 및 투과강도는 Abel의 역변환을 이용하여 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 이 역변환과정의 개략적인 내용은 다음과 같다.

2.2 Abel의 변환법칙

일반적으로 경로적분된 데이터를 가지고 내부점으로 3차점 재구성(reconstruction)하는 방법으로는 Fourier transform method, Fourier convolution

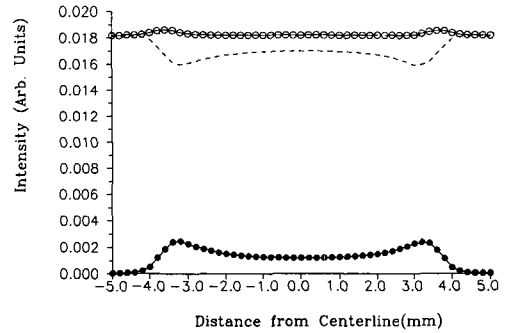


Fig. 2 Measured flame emission(●) and light transmission+flame emission(○) for the wavelength of 900nm at 52mm height, thus light transmission(---)

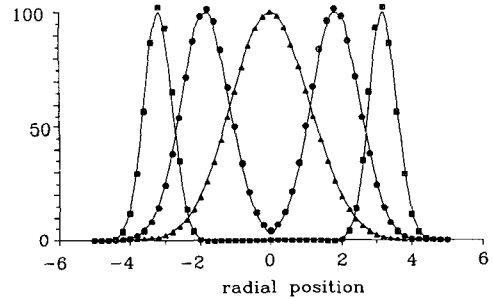


Fig. 3 Abel's tomography test results(— : true value, ●, ■, ▲ : reconstruction value)

method, Onion peeling 등이 있다. 그러나 본 실험의 화염과 같이 축대칭분포의 경우에는 Abel 공식을 쓰면 수학적으로 직접 변환되게 된다.

내부 분포함수, $f(r)$ 를 경로적분하면 다음과 같이 $g(y)$ 을 얻을 수 있다.

$$g(y) = \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} f(r) dx \quad (5)$$

여기서 다음의 Abel 변환공식을 쓰면, 경로적분된 값 $g(y)$ 로부터 내부분포값 $f(r)$ 이 구해진다.

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dg}{(y^2-r^2)^{1/2}} dy \quad (6)$$

여기서 $g(y)$ 가 y 에 대하여 2차식으로 변한다고 가정하고, 식(6)을 이용하여 차분화하면 다음과 같다.⁽¹⁾

$$f(r_j) = -\frac{1}{\pi} \sum_{k=j}^{M-1} 2 \frac{g(y_{k+1}) - g(y_k)}{(y_{k+1})^2 - (y_k)^2}$$

$$[(y_{k+1}^2 - r_j^2)^{1/2} - (y_k^2 - r_j^2)^{1/2}] \quad (7)$$

위의 식을 써서 Gauss분포함수에 대하여 재구성 한 결과는 재구성점을 측정점의 개수와 동일하게 놓았을때, 실제값에 10%내의 정확성을 보인다.

2.1 매연입자 농도 계산

크기 분포를 갖는 구형입자에 대한 체적농도 f_v 의 정의는 다음과 같다.

$$f_v = \frac{\pi}{6} N \int_0^\infty P(D) D^3 dD \quad (8)$$

$P(D)$: 크기 분포함수
 N : 단위체적당 입자수

충류확산화염내의 매연입자는 크기 분포를 갖는 구형의 흡수체로 흡수계수가 산란계수에 비해 훨씬 크다. 한편 전자기이론에 의하면 구형입자에 대한 흡수계수는 Rayleigh 영역($\pi D/\lambda \leq 0.3$)에서 다음과 같다.⁽²⁾

$$\alpha_\lambda^{(a)} = \frac{\pi^2}{\lambda} (-) \text{Im} \left(\frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \right) \int_0^\infty P(D) D^3 dD \quad (9)$$

여기서 \tilde{m} 은 복소 굴절계수로써 실수부와 허수부로 나뉘며 허수부는 입자가 흡수체인 경우에 입자에 흡수되는 에너지를 나타내는 감쇠계수이다.

식(8)과 식(9)로부터

$$f_v = \frac{\alpha_\lambda^{(a)}}{6\pi E(\tilde{m})} \quad (10)$$

으로 표현되며, $E(\tilde{m})$ 은 다음과 같다.

$$E(\tilde{m}) = (-) \text{Im} \left(\frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \right) \quad (11)$$

산란의 영향을 무시할 수 있는 Rayleigh 산란 영역에서의 흡수계수는 소멸계수로 표현된다. 소멸계수는 식(3)으로부터 Abel의 법칙을 쓰면 구해지고, \tilde{m} 의 값은 Dalzell, Sarofim⁽³⁾에서 632 nm에서는 $\tilde{m} = 1.52 \sim 0.52i$ 를, 그리고 800 nm와 900 nm에서는 $\tilde{m} = 1.57 \sim 0.49i$ 를 각각 사용하였다.

2.4 매연입자 온도계산

자체흡수효과를 고려한 화염의 방사에 대한 식(1)은 피적분항이 경로함수이기 때문에 그대로는 Abel법칙 등을 이용한 토모그래피를 사용할 수 없다. 본 실험에서는 Freeman, Katz⁽⁴⁾에 의한 근사화를 사용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{IL_\lambda(y)}{1 + \frac{1}{2} \ln \tau_\lambda(y)} = \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} \alpha_\lambda^{(a)}(x, y) B_\lambda [B_\lambda T(x, y)]^{dx} \quad (12)$$

여기서

$$\tau_\lambda = \exp \left[- \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} \alpha_\lambda^{(e)}(x, y) dx \right] \quad (13)$$

이 결과는 자체흡수효과를 고려하지 않을 때에 비해 방사에서 $1/[1 + \frac{1}{2} \ln \tau_\lambda(y)]$ 의 비의 차이를 보인다. 위의 결과로부터 Abel의 법칙을 이용하면, 내부점에서의 매연입자 방사가 구해지고, 흡수계수를 대입하면, Planck식에서 매연입자 온도가 구해진다.

2.5 매연입자 평균온도

식(12)에서 측정경로를 따라 Planck의 흑체복사 $B_\lambda(T)$ 가 일정하다면, 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{IL_\lambda(y)}{1 + \frac{1}{2} \ln \tau_\lambda(y)} = B_\lambda [T(x, y)] \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} \alpha_\lambda^{(a)}(x, y) dx \quad (14)$$

위의 결과를 쓰면, 토모그래피를 사용하지 않고, 바로 방사 및 투과측정 경로상의 매연입자 평균온도를 구할 수 있게 된다.

3. 실험-방사 및 투과를 이용한 방법

본 실험의 화염은 축대칭 충류확산화염으로서 프 로판(C_3H_8)을 연료로 사용하였다. 버너는 내경 15 mm(외경 17 mm)의 황동관으로 만든 내관과 동심축을 갖는 내경 110 mm의 아크릴관의 외관으로 구성되며, 내관으로는 585 cc/min의 체적속도로 프로판이 공급되고, 내관 바깥(외관내)으로는 공기가, 852 l/min의 체적속도로 공급되어, 균일한 속도로 흐른다. 충류확산화염의 버너구조는 Santoro⁽²⁾ 등에서 잘 설명되고 있다.

본 실험의 버너에서 형성된 충류확산화염은 Fig. 4에서 보는바와 같이 화염길이가 125 mm이며, 화염 아래부분에서는 암영역(dark zone)이 형성되었고, 화염 끝에서는 양날개가 형성되었다.

3.1 방사 및 투과 측정장치

광학장치는 먼저 단파장에 대하여 라인선상의 화

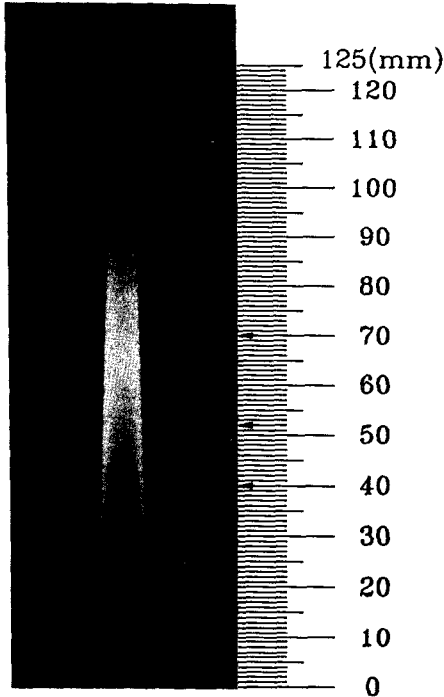


Fig. 4 Laminar diffusion flame and measuring section representation

염의 방사를 작은 공간해상도를 갖는 정렬된 핀홀세트(P1, P2, TP)를 통하여 측정도록 하였다. 핀홀의 정렬은 두개의 고정하도록 핀홀(P1, P2)을 먼저 PMT에 수직되게 정렬시킨 후, 위치조정 가능한 핀홀(TP)을 사용하여 예비실험에서 측정광량이 최대가 되는 것을 확인하면서 정렬하였다. 다음에 입사광원은 동일 측정경로를 따라, 화염단면을 지나 핀홀세트를 통과하여 측정된다. 이 때 입사광이 화염단면을 지나면서 굴절되는데, 본 실험의 광학장치에서는 광원이 정렬된 핀홀에 수직되게 입사되도록 반사경(SM)을 사용하여 조정하였고, 화염단면을 지나기 전과 지난 후의 측정강도가 같게 되도록 광원의 위치를 조정하였다. 또한 입사광의 강도는 화염의 방사강도의 수준으로 낮추었다.

본 실험에서는 두가지 측정을 병행하게 된다.

첫째, 입사광원이 없는 상태에서 경로적분된 화염의 방사를 측정한다.

둘째, 입사광원이 있는 상태에서는 동일 경로를 따라서 화염의 방사와 입사광원의 투과를 함께 측정한다.

이 과정을 설명하면 다음과 같다. 화염의 방사 혹

은 입사광원은 광로선상으로 정렬된 핀홀세트(500 μm)를 통과하게 된다. 즉, 하나의 위치조정 가능한 핀홀(TP)을 통과하고, chopper(setting frequency : 210 Hz)를 지나 나머지 두개의 고정핀홀(P1, P2)을 통과하게 된다. 그리고 파장 λ의 bandpass filter(λ=632.8 nm, 800 nm, 900 nm)를 거쳐 PMT(RCA, 8852)에 수광되고, Lock-in Amp.에서 계측되며, GPIB를 거쳐 PC에 저장된다.

Fig. 5에서 사각 배기구(square chimney)는 외부공기의 유동으로부터 화염의 흔들림을 방지하기 위하여 설치하였고, 차단판(blocking plate)은 광원을 열고 닫는(ON/OFF) 역할을 한다.

본 실험의 광학장치들은 모두 광학테이블에 고정되어 있으며, 버너를 이동시켜서 측정하게 된다. 버너는 0.2 mm간격으로 이동되며 화염높이 40, 52, 70 mm의 세 단면에 대하여 측정하였다. 각 단면에서 측정의 시작점은 화염의 방사가 없는 임의의 지점이 되며, 화염의 휘염영역(luminous zone)을 통과하여 다시 화염의 방사가 없는 지점까지 측정하였다.

본 실험에서는 다음과 같이 IR Emitter(Oriel, 6363)를 사용하여 화염의 방사를 보정하였다. IR emitter를 화염위치에 두고 방사 및 투과측정시와 동일한 세팅(setting)하에서 IR emitter의 방사를 측정하였다. 이 측정을 통하여 본실험의 광학장치의 게인(gain)을 알게 되며, 다음과 같이 화염의 절대 방사 IL_λ 가 구해진다.

$$(gain) [\epsilon_{emit} \times B_\lambda(T_{emit})] = ML_{\lambda, emit} \quad (15)$$

$$IL_\lambda(y) \frac{ML_\lambda(y)}{(gain)} \quad (16)$$

따라서

$$IL_\lambda(y) = ML_\lambda(y) \frac{\epsilon_{emit} \times B_\lambda(T_{emit})}{ML_{\lambda, emit}} \quad (17)$$

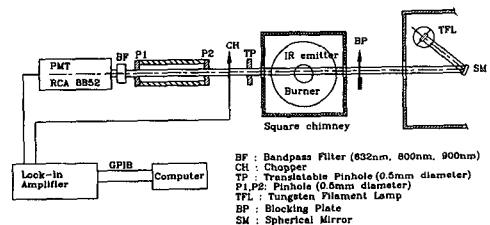


Fig. 5 Schematics of emission/transmission measuring system

여기서 $ML_{\lambda}(y)$, $ML_{\lambda, emit}$ 는 Lock-in Amp.를 통해서 측정된 값이다. IR emitter의 방사계수 및 온도는 검출과장대가 650 nm인 고온계(pyrometer)와 850 nm인 고온계의 두 종류를 사용하여 측정하였다. IR emitter는 회체(gray body)로 생각할 수 있으며, 이 두 종류의 고온계를 사용하여 측정된 결과는 방사계수를 1로 두었을 때, 4°C의 온도차를 보였으며, 본 실험에서는 보다 정확한 650 nm 고온계 측정결과인 1205 K, 방사계수를 1로 두고 보정하였다.

4. 실험결과 및 고찰 -방사 및 투과를 이용한 방법-

4.1 매연입자의 온도 및 농도 계산

-방사/투과 토모그래피

충류화산화염은 화염길이가 125 mm이며, 버너위 40, 52, 70 mm 높이의 세 단면에 대하여, bandpass filter를 632 nm, 800 nm, 900 nm로 바꾸어 가면서 화염의 방사 및 광투과측정을 하였다. 측정값은 축대칭 분포를 가지며, 축대칭점에 가까운 측정 지점을 원점으로 설정하여 각각 (-)반경분포와 (+)반경분포로 구분하고, 각각에 대하여 매연입자의 온도와 농도를 계산하였다. 여기서 매연입자 온도는 매연입자농도가 그 단면의 최대 매연입자 농도값의 1/10 이상일 때에 대하여 계산하였다.

매연입자의 온도 재구성에는 먼저 세 가지의 파장(600 nm, 800 nm, 900 nm)에 대한 각각의 온도 재구성 결과가 서로 잘 일치하고 있음을 보게 된다. 높이 40 mm의 화염단면에서 매연입자 온도는 바깥화염(반경~4.4 mm)에서 1700 K로 높게 나타났고, 화염안쪽으로 갈수록 점점 낮아져 매연입자 농도가 최대인 지점(반경~3.8 mm)에서 1650 K, 반경~3.0 mm 지점에서는 1600 K로 떨어졌다. 한편, 반경 3.0 mm 이내에서는 매연입자가 거의 존재하지 않으므로 이 영역에서는 온도 재구성을 할 수 없게 된다.^(5,6) 높이 52 mm의 화염단면에서는 바깥화염(반경~4 mm)에서 1700~1750 K, 매연입자 농도가 최대인 지점(반경~3.4 mm)에서 1650 K, 반경이 2.0 mm되는 지점에서는 1600 K의 분포를 보였다. 그리고 높이 70 mm의 화염단면에서는 바깥화염(반경~3.2 mm)에서 1700 K로 높고, 화염내부로 가면서 점점 떨어져 화염중심에서 1550 K의 온도분포를 보였다. 이처럼 세파장에 대한 온

도 재구성결과가 서로 잘 일치하는 것은 Rayleigh 산란영역에서 매연입자의 산란계수는 흡수계수에 비해 훨씬 작고 따라서 화염의 방사에 대한 식에서 흡수계수는 소멸계수로 표현될 수 있기 때문으로 사료된다. 또한 Planck함수를 이용하여 온도를 구하는 방법은 $B_{\lambda}(T)$ 가 개략적으로 T^4 에 비례하므로 10%의 Planck함수의 오차는 ~2%의 온도오차를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾ 따라서 가시광(632 nm)과 적외선(800 nm, 900 nm)에서의 온도 재구성차이는 더욱 줄어들음을 알 수 있다.

매연입자 농도 재구성에서는 Dalzell, Sarofim⁽³⁾이 제안한 복소 굴절계수를 이용하여 632 nm에서는 $\tilde{m}=1.52-0.52i$ 를, 800 nm에서는 $\tilde{m}=1.57-0.49i$ 를 각각 사용하였다. 그리고 900 nm에서는 800 nm의 복소 굴절계수를 그대로 사용하였다. 이렇게 함으로써, 특히 632 nm와 800 nm의 두 파장의 매연입자 농도 결과는 서로 접근하게 되었다. 화염의 높이에 따른 매연입자 농도분포는 Fig. 6에 표시하

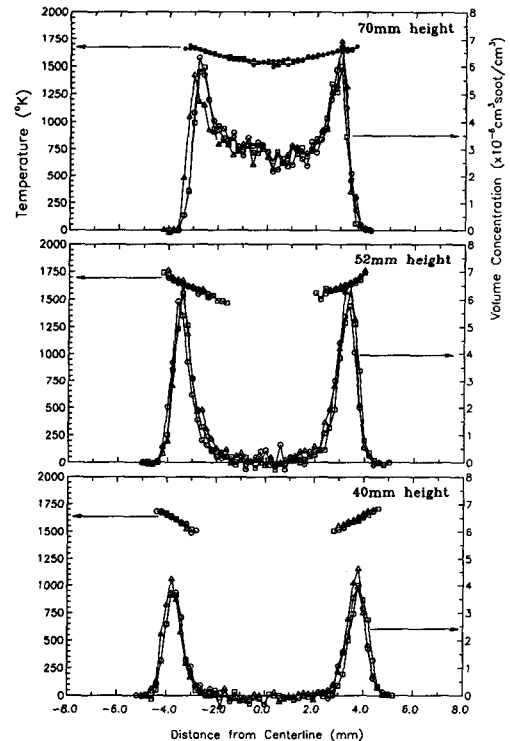


Fig. 6 Reconstructed soot temperature and concentration by emission/transmission method for the wavelength of 632 nm(Δ), 800 nm(\square), and 900 nm(\circ)

였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 높이 40 mm의 화염단면에서는 반경이 3.8 mm인 지점에서 최대 농도($4\sim 4.5\times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{soot}/\text{cm}^3$)를 보이고, 내부로 가면서 급격히 떨어져 반경 3 mm 이내에서는 매연입자가 거의 존재하지 않게 된다.^(5,6) 높이 52 mm의 화염단면에서는 반경이 3.4 mm인 지점에서 최대 농도분포 $6.5\times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{soot}/\text{cm}^3$ 를 보이고, 역시 화염내부로 가면서 급격히 떨어져 반경 1.5 mm 이내에서는 매연입자가 거의 존재하지 않게 된다. 그리고 높이 70 mm의 화염단면에서는 반경이 3.0 mm인 지점에서 최대 농도($6.0\times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{soot}/\text{cm}^3$, 800nm 기준)에 도달하였고, 화염중심에서 $3.0\times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{soot}/\text{cm}^3$ 의 농도분포를 보였다.

4.2 매연입자 평균온도

여기서 구해진 온도값은 방사 및 투과측정 경로상의 매연입자 평균온도이며, 그 결과는 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12과 같고, 각 단면에 대하여 한 파장의 결과에 대하여만 구하였다.

단면 40 mm에 대하여, 화염의 바깥에서의 매연입자 평균온도는 방사/투과 토모그래피와 동일한 1700 K의 값을 가지며, 매연입자 농도가 최대인 지점(반경~3.8 mm)에서는 1660 K로 방사/투과 토모그래피에 비하여 10~20 K 가량 높게 나타났다. 또한 반경 3 mm 이내에서는 1600 K로 일정한 분포를 보였다.

단면 52 mm에서는 바깥화염대(반경~4 mm)에서의 매연입자 평균온도는 방사/투과 토모그래피와 동일한 1700 K~1750 K의 값을 갖고, 매연입자 농도가 최대인 지점(반경~3.4 mm)에서는 1670 K로 방사/투과 토모그래피에 비하여 10~20 K 가량 높게 나타났고, 반경 2.0 mm 이내에서는 1640 K로 일정한 분포를 보였다.

단면 70 mm에서는 바깥화염대(반경~3.2 mm)에서는 매연입자 평균온도는 방사/투과 토모그래피와 동일한 1700 K의 값을 갖고, 내부로 가면서 점점 낮아져, 중심에서 1620 K의 값을 가졌다. 이는 방사/투과 토모그래피에 비해 70 K 가량 높은 값이다.

위의 결과로부터 매연입자 평균온도는 내부점의 온도값은 아니지만, 외부화염대에서는 방사/투과 토모그래피에서 구한 내부점의 온도와 잘 일치함을 볼 수 있고, 또한 내부영역에서는 비교적 큰 차이를 나타내지 않음(50~70 K 이내)을 볼 수 있다.

5. 열전대를 이용한 화염온도측정

일반적으로 열전대를 이용한 온도측정은 측정이 용이하고, 내부점의 온도값을 직접 읽을 수 있기 때문에 많이 이용되지만 화염에서는 삼입식측정법이기에 때문에 화염유동장의 변형에 따른 측정오차를 내재하고 있을 뿐만 아니라, 예혼합화염에서는 OH기에 대한 열전대선(Pt)의 촉매산화작용으로 측정부위에서 온도상승을 유발하게 되며, 또한 고운에서는 열전대선의 방사계수가 높아져서, 복사에 의한 열손실이 커진다. 특히 층류확산화염에서는 화염내에 분포하는 매연입자가 열전대 비드(bead) 표면에 부착되어 비드표면에서 방사계수가 상승하고, 따라서 복사열손실이 증가하여 실제온도와 측정온도의 차는 더욱 커진다. 층류확산화염에서 열전대 비드에 매연입자가 부착되는 매카니즘은 열영도(thermophoresis)으로 인한 영향이 지배적이며⁽⁸⁾, 그 지점에서의 매연입자농도, 열전대 비드의 삼입시간, 열전대 비드와 주위 가스의 온도차에 의존한다. 따라서 매연입자 발생영역에서 매연입자 부착은 피할 수 없으며,⁽⁹⁾ 매연입자 부착을 줄이기 위해 Kent, Wagner⁽¹⁰⁾는 층류확산화염의 온도측정에서 고속삼입법(rapid insertion technique)을 이용하였다. 또한 직경이 매우 작은 열전대 선을 사용하여 비드크기를 작게 함으로써 복사의 영향을 줄일 수 있다. (Fig.7) 복사영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 다음의 에너지평형식을 사용하였다.

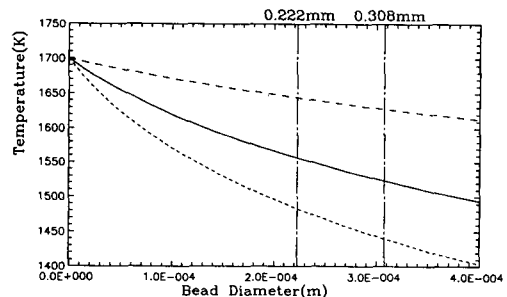


Fig. 7 Thermocouple response at the flame temperature of 1700 K as a function of bead diameter at 52 mm height ($U_z=1.61 \text{ m/sec}$) with bead emissivity of 0.16(---), 0.5(—), and 0.9(— · —)calculated from Eq.(18)

5.1 복사효과를 고려한 에너지평형식

비드와 연결된 선을 통한 열전도에 의한 열전달, 열전대 비드에 부착된 매연입자의 산화에 의한 열 발생들을 무시하게 되면, 주위가스의 전도 및 대류에 의한 비드로의 열전달은 비드의 복사에 의한 열 손실과 같다는 열전대 비드에 대한 에너지 평형식을 얻게 된다. 여기서 열전대 비드를 구로 가정하고, $T_w^4 \gg T_{Sr}^4$ 의 관계에서 T_{Sr}^4 를 무시하면, 다음과 같은 식을 얻게 된다.^(8,11)

$$\frac{k_g T_g}{d_w} (\overline{Nu}) \frac{1}{1+\kappa} \left[1 - \left(\frac{T_w}{T_g} \right)^{1+\kappa} \right] = \epsilon_w \sigma_B T_w^4 \tag{18}$$

위식에서 좌변은 기체의 열전도도가 비반응기체에서 다음과 같이 온도의 함수이기 때문에 유도된 식이다.⁽¹¹⁾

$$k = k_g \left(\frac{T}{T_g} \right)^\kappa \tag{19}$$

여기서 κ 는 지수변수에 해당하며 0.84의 값을 갖는다.

한편 구 (sphere)에서 강제대류에 대한 비반응기체의 Nusselt 수는

$$\overline{Nu} = 2 + 0.552 Re^{1/2} Pr^{1/3} \tag{20}$$

으로 표현되며, Pr 은 0.7을 사용하였고, Re 는 Reynolds수로 $U_z d_w / \nu_g$ 이다.

층류확산화염에서 축방향의 화염속도 U_z 는 Roper⁽¹²⁾의 이론과 Santoro,⁽¹³⁾ Mitchell,⁽¹⁴⁾ Roper⁽¹⁵⁾ 등의 실험결과로부터 가스종류 및 연료유량에 무관하게 $U_z = (2aZ)^{1/2}$ 의 속도를 가지며, 여기서 a 는 부력의 지배를 받는 가속도로 25 m/s²이다. d_w 는 비드 직경으로, 매연입자가 비드에 부착될 경우, 부착된 매연입자를 포함한 비드직경을 말한다. 그러나 본 실험에서는 매연입자 부착에 따른 비드직경 증분은 무시할 수 있을 정도로 작으므로 열전대 비드직경을 그대로 사용하였다. 가스의 물성치 k_g, ν_g 는 각각 공기에 대한 값⁽¹⁶⁾을 사용하였고, 테이블에서 사이값은 선형보간법을 사용하여 구하였다. 또한 본 실험에서의 방사계수 ϵ_w 는 열전대 비드가 매연입자로 뒤덮힌 때는 0.9를 사용하였고, 매연입자가 부착되지 않은 Pt상태에서는 0.16을 사용하였다.

5.2 실험 — 열전대를 이용한 방법

열전대를 이용한 화염온도 측정에서는 R-type

(Pt, Pt-Rh 13%)의 열전대를 사용하였다. 열전대 선은 75 μ m와 125 μ m의 두 종류의 굵기를 사용하였으며, 비드직경은 각각 222 μ m와 308 μ m이었다.

열전대 선은 (-)자형으로 세라믹 튜브와 석영관으로 고정하였다. 열전대가 고정된 세라믹 튜브는 레일 포스트에 의해 지지되고, 열전대는 레일위를 이동하면서 화염내 측정지점에 급속 이동되며, 온도측정후에는 복귀하여 비드에 부착된 매연입자를 산화불꽃으로 완전히 제거한 후, 그 다음 측정을 하였다.

온도측정은 디지털온도계(YEW, 2575)를 사용하였으며, 디지털온도계에 내장된 D/A 변환기에서 mV/°C로 내부증폭된 후, 디지털 오실로스코프에 연결되어 시간에 따른 온도변화가 기록되고, GPIB를 거쳐 PC에 저장된다. (Fig.8)

열전대를 이용한 온도측정에서 시간에 따른 온도

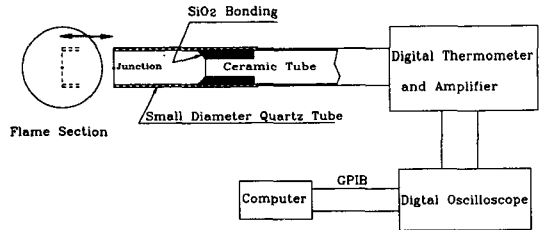


Fig. 8 Schematics of thermocouple measuring system

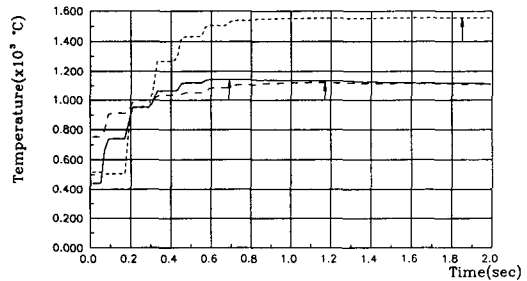


Fig. 9 Thermocouple response vs. time after insertion using TC of bead diameter 0.222 mm at 52 mm height and the radial position of R = -5.3 mm (---) : non-sooting region, reading temperature is 1829.7 K
R = -3.3 mm (—) : sooting region reading temperature is 1417.1 K
R = 0.7 mm (----) : non-sooting region, reading temperature is 1395.7 K
(↑) : reading point at maximum temperature

분포곡선을 보면, 매연입자가 없는 영역에서는 일정한 온도분포를 나타내는 반면, 매연입자 발생 영역에서의 온도는 처음에 상승하다가 최고온도에 도달한 후 감소하고 있음을 볼 수 있다. (Fig.9)

본 측정에서는 최고온도를 측정값으로 읽고, 이 온도를 기준으로 복사효과를 고려하였다. 여기서 매연입자 발생영역에서의 방사계수는 0.9, 매연입자가 발생되지 않는 영역에서는 0.16으로 놓고 계산하였다. 그리고 경계에서는 0.5로 하였다.

5.3 실험결과 및 고찰 — 열전대를 이용한 방법

40 mm 단면에서 측정된 온도분포(비드크기 222 μm 측정값 기준)는 화염대의 약 1.5 mm 바깥(반경 ~6.0 mm)에서 1850 K로 최고온도를 보이며, 화염대로 진입하면서 급격히 떨어져 최대 매연입자 농도(반경 ~4 mm) 위치에서 1400 K로 떨어졌다. 화염내부에서의 온도는 균일한 분포를 보이며, 화염중심에서의 온도는 1350 K로 측정되었다. 매연입자 발생영역에서 방사/투과 토모그래피에서 구한 온도와는 200 K(222 μm 비드크기) - 250 K(308 μm 비드크기)의 온도차를 보인다. 복사효과를 고려할 때, 방사계수는 매연입자 농도분포에 따라 매연입자 발생영역에서는 0.9, 매연입자가 발생치 않는 영역에서는 0.16, 그리고 경계에서는 0.5를 주고 계산하였다. 이와같이 복사효과를 고려한 온도분포는 매연입자 농도가 높은 곳에서는 비드크기에 관계없이 방사/투과 토모그래피의 온도분포에 20K내에 근접함을 볼 수 있다. 그러나 매연입자 발생 경계에서는 복사효과를 고려했을 때에도 잘맞지 않은 것을 볼 수 있는데, 이는 방사계수의 값을 대략 중간값 0.5를 주고 계산했기 때문이다. (Fig.10)

52 mm 단면에서 측정된 온도분포(비드크기 222 μm 측정값 기준)는 화염대의 약 1.0 mm 바깥(반경 ~5.2 mm)에서 1850 K로 최고온도를 보이며, 역시 화염대로 진입하면서 급격히 떨어져 최대 매연입자 농도(반경 ~3.4 mm) 위치에서 1450 K로 떨어졌다. 화염내부에서는 온도는 균일한 분포를 보이며, 화염중심에서의 온도는 1400 K로 측정되었다. 매연입자 발생영역에서 방사/투과 토모그래피에서 구한 온도와는 200 K - 250 K의 온도차를 보인다. 복사효과를 고려한 온도분포는 매연입자 농도가 높은 곳($1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ soot/cm}^3$ 이상)에서는 비드크기에 관계없이 방사/투과 토모그래피의 온도분포에 20 K내에 근접함을 볼 수 있다. 그러나 매

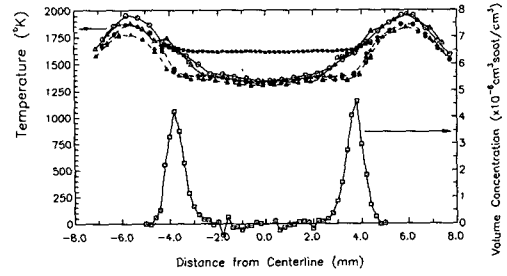


Fig. 10 Temperature profile at 40 mm height by TC of bead diameter 0.222 mm (● : measured value, ○ : radiation corrected value), 0.308 mm (▲ : measured value, △ : radiation corrected value) and soot mean temperature (■), emission/transmission tomography results (□) for the wavelength of 632 nm

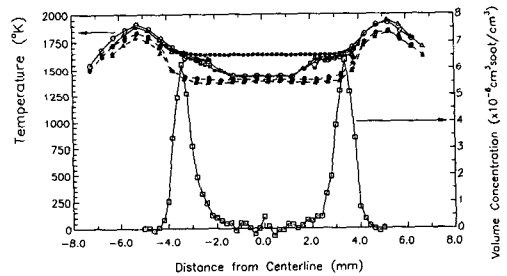


Fig. 11 Temperature profile at 52 mm height by TC of bead diameter 0.222 mm (● : measured value, ○ : radiation corrected value), 0.308 mm (▲ : measured value, △ : radiation corrected value) and soot mean temperature (■), emission/transmission tomography results (□) for the wavelength of 800 nm

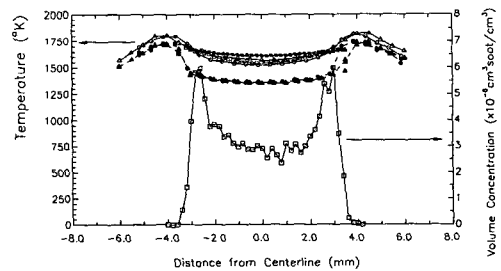


Fig. 12 Temperature profile at 70 mm height by TC of bead diameter 0.222 mm (● : measured value, ○ : radiation corrected value), 0.308 mm (▲ : measured value, △ : radiation corrected value) and soot mean temperature (■), emission/transmission tomography results (□) for the wavelength of 800 nm

연입자 발생 경계에서는 50 K 내외의 온도차를 보이고 있다. (Fig.11)

70 mm 단면에서 측정된 온도분포는 화염대의 약 0.5 mm 바깥(반경~5.2 mm)에서 1800 K~1850 K로 최고온도를 보이며, 역시 화염대로 진입하면서 급격히 떨어져 최대 매연입자 농도(반경~3.0 mm) 위치에서 1400 K로 떨어졌다. 화염중심부로 갈수록 온도는 약간씩 낮아지고 있음을 볼 수 있으며, 화염중심에서 1350 K로 측정되었다. 화염대 전체가 매연입자 발생영역으로 방사/투과 토모그래피에서 구한 온도와는 200 K의 온도차를 보인다. 복사효과를 고려한 온도분포는 30 K 내에 근접함을 볼 수 있다. (Fig. 12)

6. 결 론

층류화산화염의 온도분포는 화염대 약 1 mm 바깥에서 최고온도값을 가지며, 화염대로 열전달된다. 따라서 화염대내의 매연입자 온도는 바깥화염대에서 높고, 내부로 가면서 점점 낮아지는 분포를 보인다. 매연입자의 방사 및 투과측정을 통하여 볼 때 층류화산화염내 매연입자의 온도는 바깥화염에서 1700 K~1750 K의 분포를 가지며, 화염내부로 가면서 점점 낮아져서 1550 K~1600 K의 분포를 갖는다.

방사 및 투과측정으로부터 가시광(632 nm)과 적외선(800 nm, 900 nm)에서의 온도재구성결과는 차이를 보이지 않는다. 이것은 매연입자의 흡수계수에 비해 산란계수가 훨씬 작기 때문에 화염의 방사에 대한 식에서 흡수계수는 소멸계수로 표현될 수 있기 때문이다. 이 결과로부터 단파장에 대한 방사 및 투과에 의한 온도측정법은 가시영역에서도 적용될 수 있음을 알 수 있다. 또한 Dalzell, Sarofim⁽⁹⁾이 제안한 복소 굴절계수를 적용함으로써, 632 nm와 800 nm에 대한 농도재구성 결과가 서로 접근함을 볼 수 있다.

측정경로상의 매연입자 평균온도를 구하는 방법은 해당경로에 대한 방사와 투과측정만으로 온도가 구해지므로 토모그래피에 의한 오차를 내재하고 있지 않으며, 이방법으로 구해진 매연입자 평균온도는 외부화염대에서는 방사/투과 토모그래피에서 구한 내부점의 온도와 잘 일치함을 볼 수 있었고, 또한 내부 수트 발생영역에서도 큰 차이를 보이지 않음(50~70 K 이내)을 볼 수 있었다.

층류화산화염내 매연입자 발생영역에서 열전대를 이용한 온도측정에서는 급속삽입법과 매연입자 부착 초기의 최고온도값에 대하여 복사효과를 고려해 줌으로서, 방사/투과 토모그래피에서 구한 온도결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제 번호: 89-02-03-08)과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Hughey, B.J. and Santavicca, D.A., 1982, "A Comparison of Techniques for Reconstruction Axisymmetric Reacting Flow Fields from Absorption Measurements," *Comb. Sci. Tech.* Vol. 29, pp. 167~190.
- (2) Santoro, R.J., Semerjian, H.G. and Dobbins, R. A., 1983, "Soot Particle measurement in Diffusion Flames," *Comb. Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.
- (3) Dalzell, W.H. and Sarofim, A.F., 1969, "Optical Constants of Soot and Their Application to Heat-Flux Calculations," *Trans. ASME J. Heat Transfer* 91, pp. 100~104.
- (4) Freeman, M.P. and Katz, S., 1960, "Determination of the Radial Distribution of Brightness in a Cylindrical Luminous Medium with Self-Absorption," *J. Opt. Soc. AM.* vol. 50, pp. 826-830.
- (5) Lee, J.K. and Kim, S.S., 1992, "Predictions on the Flame Structure and Soot Distribution in the Coflowing Laminar Diffusion Flames," *Trans. KSME*, Vol. 16, pp. 1583~1594.
- (6) Ha, Y.C. and Kim, S.S., 1992, "Soot Size and Concentration Measurements in a Laminar Diffusion Flame Using a Light Scattering/Extinction Technique," *Trans. KSME*, Vol. 16, pp. 1796~1804.
- (7) Hall, R.J. and Bonczyk, P.A., 1990, "Sooting Flame Thermometry Using Emission/Absorption Tomography," *Appl. Opt.* Vol. 29, pp. 4590

- ~4598.
- (8) Eisner, A.D. and Rosner, D.E., 1985, "Experimental Studies of Soot Particle Thermophoresis in Nonisothermal Combustion Gases Using Thermocouple Respones techniques," *Combustion and Flame*, Vol. 61, pp. 153~166.
- (9) Jeon, J.H., and Kim, S.S., 1991, "Soot Size measurement in a Laminar Diffusion Flame Using Themophoretic Sampling Technique," *Trans. KSME*, vol. 15, pp. 1697~1705.
- (10) Kent, J.H. and Wagner, H.Gg., 1984, "Why Do Diffusion Flames Emit Smoke?," *Comb. Sci. and Tech.*, Vol. 41, pp. 245~269.
- (11) Rosner, D.E., 1986, "Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems," Butterworth Publishers, Ch. 5.
- (12) Roper, F.G., 1977, "The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes : Part II. Experimental Verification," *Combustion and Flame*, Vol. 29, pp. 227~234.
- (13) Santoro, R.J., Yeh, T.T., Horvath, J.J., and Semerjian, H.G., 1987, "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Comb. Sci. Tech.* Vol. 53, pp. 89~115.
- (14) Mitchell, R.E. Sarofim, A.F. and Clomburg, 1980, L.A., "Experimental and Numerical Investigation of Confined Laminar Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 37, pp. 227~244.
- (15) Roper, F.G., 1984, "Soot Escape from Diffusion Flames : A Comparison of Recent Work in this Field," *Combustion Science and Technique*, Vol. 40, pp. 323~329.
- (16) Eckert. E.R.G. and Drake, R.M. Jr., 1972, "Analysis of Heat and Mass Transfer," McGraw-Hill, New York, Appendix. B..