

〈論 文〉

광산란 소멸법을 이용한 층류확산화염내에 매연입자의 크기 및 농도 측정

하영철* · 김상수**

(1992년 4월 14일 접수)

Soot Size and Concentration Measurements in a Laminar Diffusion Flame Using a Light Scattering/Extinction Technique

Young-Cheol Ha and Sang Soo Kim

Key Words : Optical Tomography (광학적 재구성법), Volume Fraction (체적분율), Scattering Coefficient (산란계수), Extinction Coefficient (소멸계수)

Abstract

Profiles of soot volume fraction, average diameter and particle number density have been measured using a light scattering and extinction technique in a coannular propane diffusion flame at atmospheric pressure. Temperature profiles were also obtained using a thermocouple technique. Measurements show that soot is first observed to form low in the flame in an annular region inside the main reaction zone. At higher locations this annular region widens until entire flame is observed to contain particles. Soot volume fraction and particle diameter profiles peak some 1mm on the fuel side of peak temperature and increase with height to oxidation region. Number density of flame core drops steeply from formation region to growth region and is relatively invariant to some height and decays out at flame tip.

기 호 설 명

<p>a : 측정간격</p> <p>D : 입자의 직경</p> <p>$E(m), F(m)$: 입자의 굴절계수로 이루어진 대수함수</p> <p>$F(x, y)$: 특징값</p> <p>$I_{\nu o}$: 주파수가 ν인 입사광의 강도</p> <p>I_{ν} : 주파수가 ν인 투과된 빛의 강도</p> <p>K_{ext} : 광소멸 계수</p> <p>λ : 입사광의 파장</p>	<p>m : 복소 굴절계수</p> <p>M : 최소 등간격 수</p> <p>N : 최소 등각도 수</p> <p>N_c : 단위 체적당 입자 수</p> <p>$P(D)$: 입자 크기 분포함수</p> <p>$p(r, \theta)$: 각도 θ에 대한 정사영</p> <p>ϕ : 체적분율</p> <p>Ψ : Shepp-Logan 필터</p> <p>ϕ : 수정된 Shepp-Logan 필터</p> <p>$Q_{\nu\nu}$: 수직 편광된 산란광에 대한 광산란 계수</p> <p>s : 입사광의 경로길이</p> <p>ρ_{max} : 최대 공간 주파수</p>
---	---

*한국가스공사 연구개발원

**정회원, 한국과학기술원 기계공학파

1. 서 론

매연입자란 미연의 연료가 열을 받아 열분해시 생성되는 고체입자로서 연소기관에서 주로 배출되며 연소실의 수명, 에너지의 효율적 측면, 그리고 공공건강에 중요한 인자로서 작용한다. 산업화 및 도시집중화로 대기오염이 점점 더 심각해짐에 따라 매연입자 제어의 필요성이 재인식 되어지고 있으며, 따라서 매연입자에 대한 연구는 한층 더 관심을 모으고 있다.

매연입자의 생성에 관한 연구는 연소현상에 대하여 연구를 한 이래로 병행되어 오고 있고 지난 수십년 동안 매연입자의 생성과 관련있는 화학적, 물리적 문제를 해결하는데 성과가 있었지만, 매연입자의 생성에는 매우 많은 인자가 결부된 광범위한 문제여서 아직까지 이 입자생성의 가장 기본이 되는 핵(nuclei)을 규명하지 못하고 있다. 또 실제 연소기관은 고온(1500~3000K), 고압(50~100atm), 연료속의 불순성분, 난류 혼합, 비정상 과정 등으로 실험하기 어렵고, 결과를 얻었어도 해석하기 매우 힘들므로 지금까지 거의 대부분의 실험이 간단한 예혼합 화염이나, 확산화염에 국한되어 오고 있다. 이중에 확산화염은 화염내에 매연입자의 생성, 성장, 산화과정이 뚜렷이 관찰되기 때문에 이것으로부터 얻은 정보는 확산과정과 혼합과정이 섞여 있는 실제화염내의 매연입자 생성을 해석하는데 중요한 역할을 하게 된다. 확산화염에 있어서 매연입자생성에 관한 다각적인 연구(첨가제주입, 연료의 종류변경, 전자기장에서의 화염전과 등)가 이미 수행되어 많은 결과가 발표되었다.^(1~7)

화염내에 매연입자를 측정하는 방법으로는 크게 두가지로 하나는 광학적 측정방법이고 다른 하나는 샘플링을 이용한 측정방법이다. 전자는 후자에 비해 기본입자의(primary particle) 크기까지는 정확히 알수없는 반면 유동장에 영향을 주지 않고 체적분율도 구할수 있으며 높은 공간 해상도로 정보를 얻을수있어 많이 사용되어지고 있다. 광학적 측정법으로는 광산란소멸법, 광산란법, 광소멸법등이 있는데 이중에 광산란소멸법은 미소입자($d < 100$ nm)의 크기 및 농도에 대한 분해능력이 뛰어나고 고가의 장비도 요구되지 않으며 비교적 손쉬운 정렬로 측정이 가능하여 널리 사용되어지고 있다. 따라서 본 실험에서는 동심확산화염내에 생기는 매연

입자의 크기와 농도를 광산란 소멸법으로 보다 정확히 측정하여 궁극적 목적인 매연입자 제어의 기반을 조성하고자 한다.

2. 이론

2.1 면내전단을 받는 경우

본 연구에서 사용한 가정은 다음과 같다.

- (1) 매연 입자는 구형이다.
- (2) 입자의 크기분포는 대수-정규분포이다.
- (3) 매연입자의 굴절계수는 화염전체에 걸쳐서 일정하다고 가정하고 Dallzell⁽⁸⁾이 제안한 $m = 1.57 - i0.56$ 을 사용한다.
- (4) 산란자의 수밀도는 충분히 묽어서 단산란(single scattering)만을 일으킨다.
- (5) 광학적 모델은 Rayleigh 산란이론을 적용한다.
- (6) 화염의 특성은 축방향으로 대칭이다.

2.2 광산란 소멸법

광산란 소멸법이란 광산란계수와 광소멸계수를 측정하여, 측정체적을 통과하는 입자의 평균지름, 수밀도, 체적분율을 얻어내는 방법이다. 일반적으로 미소입자를 측정하는 광학실험에서 측정체적을 한개의 입자 또는 그 이하의 크기로 만드는 것은 매우 어렵다. 따라서 이 경우에는 측정체적을 크게 하여 많은 입자들에 의하여 산란되어 나오는 빛을 측정하게 된다. 이때 산란입자의 농도가 충분히 묽고($N < 10^{10}/\text{cm}^3$) 그 크기가 작다면($\pi d/\lambda < 0.3$) Rayleigh 산란이론⁽⁹⁾을 적용할 수 있고 다음과 같다.

광산란 계수

$$Q_{vv} = \frac{N}{4} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D_0 \quad (1)$$

광소멸 계수

$$K_{ext} = -N \frac{\pi^2}{\lambda} \text{Im} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] D_0 \quad (2)$$

D 의 아래 첨자는 입자의 직경에 분포함수로서 모멘트를 취한것을 의미하며 다음과 같다.

$$D_i = \int P(D) D^i dD \quad (3)$$

입자크기 분포함수

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma_g D \cdot \exp\left(-\ln\left(\frac{D}{D_g}\right)^2 \div 2\sigma_g^2\right) \quad (4)$$

일반적 평균지름의 정의⁽⁹⁾로부터 평균지름 D_{63} 이 D_3, D_6 과 관련되어지고 식 (1)과 식(2)에 대입후 정리하면 다음과 같다.

입자의 체적분율

$$\phi = \lambda K_{ext} / 6\pi E(m) \quad (5)$$

평균지름 D_{63}

$$D_{63} = \lambda / \pi \{4\pi E(m) Q_{vv}(90^{deg}) / F(m) K_{ext}\}^{1/3} \quad (6)$$

수밀도

$$N = (12\phi / D_{63}^3) \quad (7)$$

2.3 광학적 재구성법(Optical Tomography)

본 실험에서 측정한 매연입자의 소멸계수는 경로 적분값임으로 국소소멸계수로 변환하기 위한 광학적 재구성과정의 필요하고 그 이론은 다음과 같다. 광학적 재구성법은 M개의 등간격 광선을 N개의 등각도로 주사하여 얻은 $M \times N$ 개의 정보로 적절한 변환을 하여 원래의 특성값 값을 재구성하는 방법을 말한다. [Fig. 2 참조] 각각의 주사광에 대한 광소멸계수는 Beer-Lambert 법칙에⁽¹⁰⁾ 의해 지배되며 측정영역에서의 특성값(property field value) $F(x, y)$ 와 관련하여 나타내면 다음과 같다.

$$-\ln \frac{I_v(r, \theta)}{I_{v0}} = P(r, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, y) ds \quad (8)$$

투과율 I_v / I_{v0} 은 실험적으로 측정할수 있음으로 식 (8)로부터 특성값 $F(x, y)$ 를 계산할 수 있고 이를 구하는 방법으로는 convolution technique⁽¹¹⁾을 사용한다. 식(8)를 central slice theorem⁽¹²⁾을 사용하여 2차원 푸리에 변환(Fourier transform)을 하고, 직교좌표계로 변환한 다음 역푸리에 변환과 이산화 과정을 거치면 다음과 같다.

$$F(x, y) = \frac{a}{2N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M P(r_k, \theta_j) \phi(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j - r_k) \quad (9)$$

$$\theta_j = \frac{(j-1)\pi}{N}, \quad r_j = ka, \quad a = \frac{2R}{M}$$

$$M = 4R\rho_{max}, \quad N = 2\pi R\rho_{max}$$

ϕ 는 특성 함수값이 계산되는 위치 (x, y) 에서의 가중함수(weighting function)로 해석할수 있으며,

적절한 ϕ 함수의 선택으로 보다 정확한 계산 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 ϕ 함수로 modified Shepp-Logan filter⁽¹³⁾를 사용하였으며 다음과 같다.

$$\phi(r_k) = 0.4 \Psi(r_k) + 0.3 \Psi(r_{k+1}) + \dots + 0.3 \Psi(r_{k-1}) \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (10)$$

$$\Psi(r_k) = -\frac{4}{\pi a^2 (4k^2 - 1)}, \quad \Psi : \text{Shepp-Logan filter}$$

3. 실험

3.1 실험장치 및 측정장치

본 연구에 사용한 버너는 내경이 각각 15 mm, 120 mm인 황동관과 동심 아크릴관으로 구성되어 있고 안쪽관으로는 연료가, 바깥쪽 관으로는 공기가 유입된다. 균일한 출구 유동을 만들기 위하여 연료 노즐속에 70 mesh 철망과 직경 3 mm의 유리 구슬을 채웠고, 공기통로 관에는 유리구슬과 40 mesh 철망을 여러층으로 겹쳤다. 화염을 실험실 내부의 공기유동으로부터 보호하기 위하여 내경

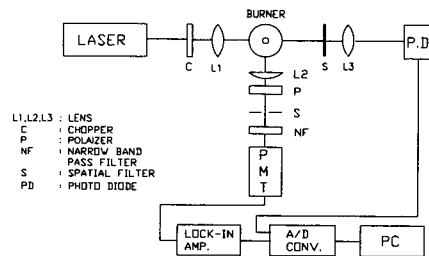


Fig. 1 Schematic of light scattering and extinction system

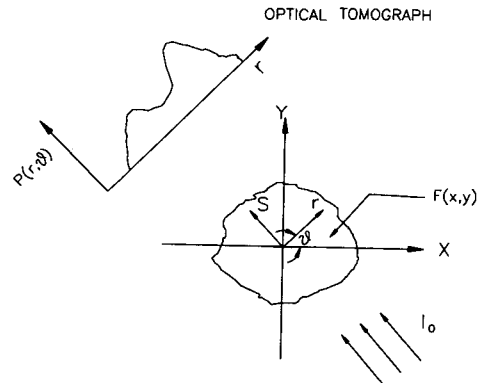


Fig. 2 Projection $P(r, \theta)$ in polar coordinate

120 mm, 높이 550 mm의 아크릴관을 버너 위에 설치하였다. 입사광이 화염을 통과하도록, 그리고 산란광과 투과율을 측정하기 위하여 폭 27 mm 높이 150 mm의 슬롯 4개를 아크릴관에 가공하였다. 배기관 벽면에서 공기의 재순환과 슬롯으로 유입되는 공기량을 감소시키기 위하여 배기관 위에 철망과 안쪽에 20 mm 구멍이 있고 직경이 130 mm인 동판을 놓았다. 연료는 연료탱크로부터 필터조정기 (filter regulator)와 유량계를 거쳐 유입되며, 공기는 2기압의 압축공기로서 실리카겔을 통과시켜 습기를 제거하고, 헤파필터(Hollongworth & vose, HB-5055)로 먼지를 제거한 후 공급하였다.

산란광과 소멸광을 측정하기 위한 광학계는 Fig. 1과 같다. 산란광과 투과율을 측정하기 위하여 5 mW의 He-Ne레이저(Spectra-Physics, 105-1)를 주사하고, 레이저 앞에 챔퍼(chopper)를 설치하여 주사광이 1289 Hz가 되도록 하였다. 이 주사광은 측정체적을 통과하여 소멸된광은 초점거리 200 mm의 렌즈를 지나 포토다이오드(광전자, HPI-2C)에 의하여 검출되어지고 산란광은 편광판, 초점거리 100 mm의 렌즈, 직경 0.3 mm의 바늘구멍, 그리고 Narrow Band Pass Filter를 거쳐 광전증배관(PMT, RCA-8852)에 입사된다. 이 입사된 광은 광전증배관에 의하여 증폭되고 전압으로 바뀌어 Lock-In Amp(EG&G, 5120)에 연결되어진다. Lock-In Amp에서 나온 신호는 아날로그-디지털 변환기로 사용된 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9400)에 들어가고 이산화된 신호는 퍼스널컴퓨터와 연결된다. 그리고 화염의 온도는 R type 열전대를 연결한 디지털온도계를 사용하여 측정하였다. 이때 매연입자의 부착에 의한 측정오차가 발생할 수 있으므로 정확한 온도분포를 구하기 위하여 삽입시간을 짧게 하거나, 비삽입법을 사용하여야 하지만, 본 연구에서는 온도의 대략적인 경향만을 관찰하였다.

3.2 보정 (Calibration)

단위체적당 미소산란계수 Q_{vv} 의 절대값을 계산하기 위하여 산란단면적이 알려져있는 프로판을 연료노즐에 주입하고 산란되어 나오는 광을 측정함으로써 보정을 수행하였고 산란자의 수밀도는 표준 대기압하에서의 아보가드로 수를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 재구성 프로그램의 검증

재구성 프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 정규함수를 사용하였고 검증결과는 Fig. 3에 도시하였다. 전반적으로 재구성값의 오차는 재구성값 최대치의 2% 이하이고, 프로그램 내부의 결함으로 발생하는 측면에서의 리플링을 측정반경을 크게하여 제거한다면 실제 체적분율의 국소값을 잘 추적할 것으로 생각된다. 투과율로부터 국소 소멸계수를 구할때 데이터 부족으로 인한 오차를 최소화하기 위하여 측정값을 선형 보간(linear interpolation)하였고 주사각 수는 200을 사용하였다.

4.2 매연 입자의 특성

본 실험에서는 동심층류확산화염에 대하여 투과율과 산란단면적을 측정하였다. 매연입자의 수밀도, 체적분율, 평균지름을 산란계수와 소멸계수로부터 구하였고 이를 기초로 동심확산화염의 구조를 고찰하였다. Fig. 4, 5, 6은 프로판과 공기유량이 각각 $3.17 \text{ cm}^3/\text{s}$, $1250 \text{ cm}^3/\text{s}$ 일때 확산화염내에 매연입자의 생성, 성장, 소멸 과정이 뚜렷이 관찰되는 무차원높이 $X=0.32, 0.416, 0.56, 0.8, 1.0$ 에서 반경방향으로 측정한 것으로 생성영역은 $X=0.32, 0.416$ 이고, 성장은 $X=0.56$ 이며, 산화는 $X=0.8,$

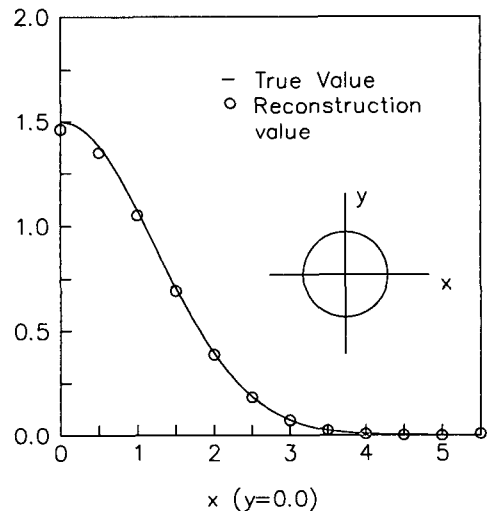


Fig. 3 Testing out the reconstruction program for normal function

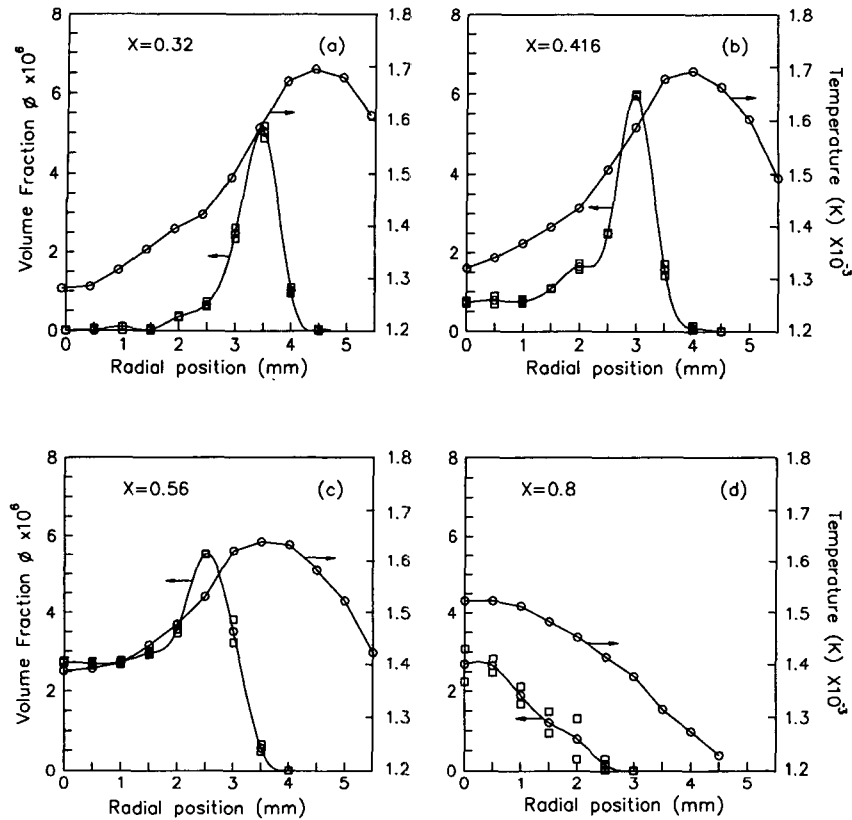


Fig. 4 Measured soot volume fraction and flame temperature profiles with height above nozzle (\circ : mean, \square : standard deviation)

1.0에 해당한다. 측정값은 Lecroy상에서 연속평균(continuous average) 127:1로 평균한값 10개를 취하여 평균값과 표준 편차를 계산하였다. 생성영역에 대하여 2개의 높이에서 측정된 것은 이 영역에서 다른 특성이 관찰되기 때문이다. 그리고 $X=1.0$ 에서는 매연입자가 모두 소멸하여 측정값을 나타내지 않았다.

(1) 체적분율

Fig. 4(a)는 매연입자의 생성영역 $X=0.32$ 에서 체적분율과 온도를 나타낸 것으로 화염중심에서 체적분율이 측정되지 않았으며, 반경방향으로 이동하면서 급격하게 증가하여 $r=3.5$ mm에서 최대가 되고, 다시 감소하여 화염대에서 매우 작아졌다. 온도를 보면 대략 1280K 정도로 화염중심에서 매연 입자의 생성온도⁽¹⁴⁾ 1350K(± 35 K) 보다 낮고 화염대에서는 매우 높다. 매연 입자의 생성원리를 화학적으로 고찰한 Glassman⁽¹⁴⁾ 등은 생성영역에서 화염대 부근에 중간생성물(PAH, $C_{2n}H_n$)이 많

이 분포한다고 발표하였다. 따라서 이에 대한 가능한 해석은, 화염중심에는 온도가 낮아서 열분해율이 낮아 매연입자의 생성이 매우 작으나, 화염대 바로 안쪽에서는 높은 온도로 인하여 매연입자의 생성이 활발하고, 생성된 매연입자는 화염중심과 화염대간의 온도구배로 인하여 화염중심 방향으로 이동한다. 이러한 과정을 거쳐 충분한 중간생성물과 점차로 낮아지는 온도로 인하여 표면성장과 응축과정이 지배하게되어 이러한 특성을 나타낸다고 설명할 수 있다. Dobbins⁽¹⁵⁾ 등이 ethene(C_2H_4)에 대하여 얻은 결과에서도 극부적으로 체적분율이 존재하는 생성영역이 있음을 관찰할 수 있었다. Fig. 4(b)는 $X=0.416$ 에서 측정된 결과인데 생성초기와 달리 화염중심에서 체적분율이 관측되었다. 최대치는 약 5.9×10^{-6} 으로 생성영역 $X=0.32$ 의 최대치 보다 약간 크다. 이는 화염중앙에서의 온도가 매연 입자를 생성할 만큼 높아 상당한 열분해 과정이 진행되고 있기 때문이다. 이 영역에서 화염의 중

심을 따라 18 mm 위에 위치한 성장영역 Fig. 4(c)에서는 중심에서 체적분율이 급격히 증가해 있고 최대치는 $X=0.416$ 에서와 거의 비슷한 5.6×10^{-6} 이며 약간 안쪽으로 이동해 있다. 화염중심의 온도가 매연입자의 생성, 성장을 활발히 할 만큼 충분히 높고 중간생성물도 많이 분포하여⁽¹⁶⁾ 중앙에서는 체적분율이 증가하지만 화염대 부근에서는 생성단계의 온도에 비해 다소 낮고 중간 생성물도 작아서 매연 입자의 생성, 성장이 매우 둔화 되었으며 화염내에 침투한 산소에 의하여 산화과정도 약간 진행되고 있어서 더 이상의 증가가 없다고 생각된다. 산화과정은 $X=0.8$ 부근에서 뚜렷히 관찰할 수 있었다. 여기서는 체적분율의 최대치가 이루는 고리영역이⁽¹⁷⁾ 사라지고 화염중심 부근에서 최대치가 측정되었는데 그 값은 성장영역의 중심에 비하여 약간 작은 2.6×10^{-6} 이었다. 연료내에 포함되어 있는 탄소가 고갈되어 더 이상 매연을 생성하거나 성장시키지 못하고 산화가 지배하여 고리영역이 사라지게 되었고, 중심부분은 화염경계면에 비해 산

소량이 작음으로 상대적으로 덜 산화되어 이러한 특성을 보이게 된다. 매연의 산화영역을 제외한 생성, 성장영역을 비교하여 보면 화염중심부분의 체적분율이 고리영역의 체적분율을 넘지못함을 공통적으로 관찰할 수 있었으며, 측정된 모든 높이에서 체적분율이 존재하는 영역이 화염대 약간 안쪽부터 임을 관찰할 수 있었다. 이와 관련 하여 Santoro⁽¹⁷⁾는 매연을 포함하는 영역이 반응지역(화염대)에서 연료가 많은쪽으로 수 밀리미터 안쪽에 있음을 관찰한 바 있다.

(2) 평균지름 D_{63}

Fig. 5(a)와 같이 매연입자의 생성영역 $X=0.32$ 에서는 화염의 중심부근에서 그 크기를 측정할 수 없었는데, 온도(Fig. 4(a))가 낮기때문에 열분해율이 작고, 생성된 매연입자가 성장을 하지못하여 그 크기는 작으며($d < 2$ nm), 또한 매우작은 체적분율을 가짐으로 검출되지 않은 것으로 생각된다. 화염의 중심을 따라 위로 10 mm 이동한 $X=0.416$ 부근에서부터 이 입자의 크기를 측정할 수 있었는데

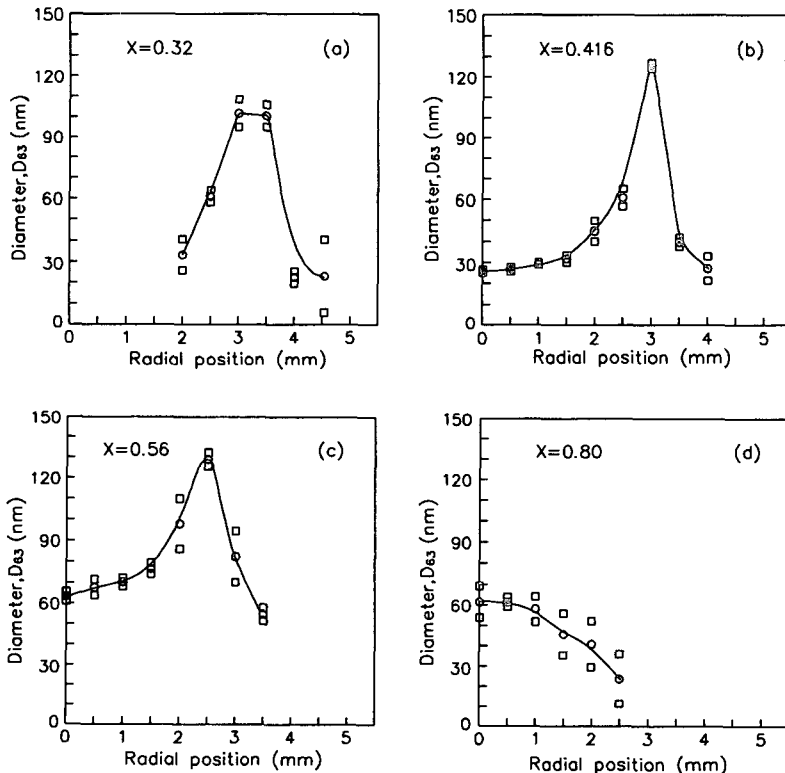


Fig. 5 Measured soot average diameter profiles with height above nozzle (○ : mean, □ : standard deviation)

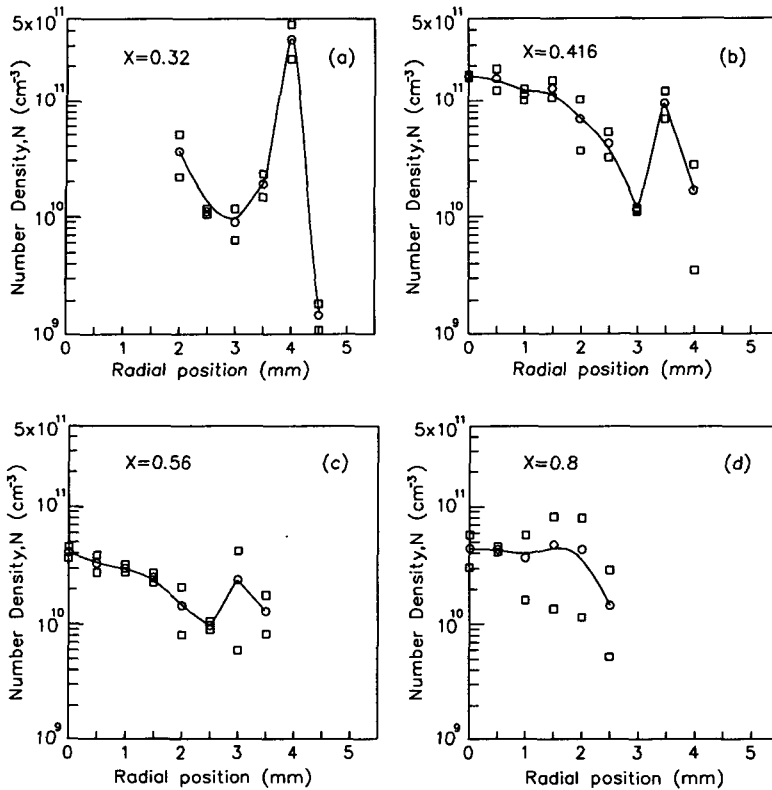


Fig. 6 Measured soot number density profiles with height above nozzle (○ : mean, □ : standard deviation)

크기의 경향은 체적분율의 그것과 비슷하였고, 최대치는 약 125 nm가 되었다. 화염의 아래부분에서 표면성장과 응집과정을 거쳐 성장영역에 도달한 입자는 중앙에서 약 65~70 nm, 최대치는 125~130 nm 정도로 Mie산란식⁽¹⁸⁾으로 계산한 값과 약 25% 정도의 오차가 나지만 실험상의 불확실성을 고려해 볼 때 무시할만 하였다. 산화영역인 $X=0.8$ 에서 이 입자의 크기는 대략 60 nm 이하로 측정되었고 $X=1$ 이상에서는 매연입자가 모두 산화되어 검출되지 않았다. 이 영역에서 표준편차가 비교적 큰 것은 화염의 선단으로 갈수록 화염이 불안정해지기 때문이다. 측정된 모든 높이에서 평균지름에 관하여 주목할 사항은 각각의 측정높이에서 체적분율과 경향이 거의 유사하며 지름이 최대인 곳과 체적분율이 최대인 곳이 일치하는 것으로 Jagoda⁽¹⁹⁻²⁰⁾ 등이 실험한 결과에서도 공통적으로 발견할 수 있었다.

(3) 수밀도

수밀도는 전반적으로 체적분율이나 평균지름의

경향과 다른 점이 고찰되었다. Fig. 6은 각각의 측정높이에서의 수밀도를 표시한 것으로 표준편차가 평균지름과 체적분율에 비해 크게 나타나고 있는데 이는 수밀도가 평균지름 3승의 역수꼴로 계산되기 때문이다. $X=0.32$ 에서 화염전체에 걸쳐 가장 큰 수밀도가 화염대 안쪽 약 0.5 mm에서 측정되었다. 이 지역에서는 활발한 열분해 과정을 통하여 많은 중간생성물이 생성되고 높은 온도로 인하여 성장보다는 생성이 지배하여 높은 수밀도가 측정된 것으로 생각된다. $X=0.416$ 에서는 화염의 중심부분에서 높은 수밀도가 관찰되었고 화염대 바로 안쪽(약 0.5 mm)에서 상당히 감소함을 볼수있다. 이는 화염중심의 온도가 점차 증가하여 (Fig. 4.(b)) 매연입자의 생성온도에 도달하였고, 화염대와 화염중심의 온도차로 생기는 열역동효과에 의하여 고리영역에서 생성된 입자의 일부가 화염중심으로 이동한 결과라 추측되며, 화염대 안쪽 0.5 mm 부근에는 $X=0.32$ 에서와 같이 온도는 충분히 높으나 매연입자가 된다고 생각되는 중간생성물이 많이 감소하

여 생성율이 낮아진 결과라고 추측된다. 성장과 산화일부영역에서는 수밀도가 거의 일정하게 측정되었고 $X=1$ 에서 모두 소멸하였다. 산화시 입자의 크기는 작아지지만 완전히 산화될때까지 하나의 개체로서 계속 유지되는 결과라 생각된다. 수밀도의 경향중에 주목할 점은 각각의 측정높이에서 체적분율이나 평균지름이 최대인 점에서 최소로 관찰된 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 층류화산화염내의 체적분율, 평균 지름, 수밀도를 광산란소멸법을 이용하여 측정하였으며 본 실험결과로부터 얻을 수 있었던 결론은 다음과 같다.

첫째, 매연입자는 Fig. 4, 5, 6에서 볼 수 있는 것처럼 생성, 성장 산화과정을 통하여 화염의 선단에 도달하며, 본 실험에서 사용된 화염조건에서는 무차원 높이 $X=0.56$ 까지 매연입자의 생성, 성장이 일어나고, 이 이상에서는 산화과정이 지배하여 $X=1$ 일때 매연입자는 모두 소멸하였다.

둘째, 체적분율 ϕ 나 평균지름 D_{33} 은 Fig. 4, 5에서와 같이 화염중심에서 반경방향으로 갈수록 증가하여 화염대 안쪽 약 1 mm 일때 최대가 되었고 화염 전체에 최대치는 각각 5.9×10^{-6} , 130 nm이었다. 산화영역에서는 화염중심부근에서 거의 일정하였고 화염경계면에서 급격히 감소하였다. 반대로 수밀도는 화염중심에서 반경방향으로 감소하여 체적분율이나 평균지름이 최대인 곳에서 최소가 된 후 화염대까지 다시 증가하였다. 생성시의 수밀도가 화염전체에서 가장 크며, 화염중심을 따라 감소하여 성장과 산화초기에는 거의 일정하다가 $X=1$ 에서 모두 소멸하였다.

셋째, 층류화산화염내에는 체적분율이 최대인 고리 영역이 존재하며, 본 실험과 같이 매연입자가 화염밖으로 배출되지 않는 유량조건하에서는 산화영역에서 사라졌고, 그 경향은 온도와 유사하였으며 화염대 안쪽 약 1 mm지점에 위치하였다.

참고문헌

(1) Wagner H., G. G., 1981, "Soot Formation," Prog. Energy Combust. Sci. vol. 7, pp.229~273.
 (2) Glassman, Irvin, 1988, "Soot Formation in

Diffusion Fuel/Oxygen Flame Mixtures," 22th Sympo. (Int.) Combust. pp. 371~378.
 (3) Howard, J.B., 1971, "Electric Charge of Soot Particle in Flames," 13th. Sympo. (Int.) Combust. pp. 353~362.
 (4) Dobbins R.A., 1989, "Comparision of Soot Growth & Oxidation in Smoking & Non Smoking Ethylene Diffusion Flames," Combust. Sci.& Tech. Vol.66, pp.1~16.
 (5) Roper F.G., 1979, "Soot Escape from Laminar Air-Starved Hydrogen Flame," Combust. & Flame Vol. 36, pp. 125~138.
 (6) Gülder, Omer L., 1989, "Influence of Hydrogen Fuel Structural Constitution & Flame Temperature on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames," combust. & Flame Vol. 78, pp. 179~194.
 (7) Kent, J.H., 1981, "Soot Formation in a Laminar Diffusion Flame," 18th sympo. (Int.) on Combustion/The Combustion Institute pp. 1117~1126.
 (8) Dalzell, W.H., 1970, "A Light-Scattering Method for Soot Concentration Measurements," combustion & Flame Vol. 14, pp. 161~170.
 (9) Santoro, R.J., 1983, "Interpretation of Optical Measurement of Soot in Flames," AIAA 18th Thermophysics conference, Montreal, Canada, Paper 83-1516.
 (10) Emmerman, P.J., 1980, "Multiangular Absorption Diagnostics of Turbulent Argon-Methan Jet," J.Energy. Vol 4, No.2 Article No. 79-0085R, pp. 70~77.
 (11) Ramachandran, G.N., 1971 "Three Dimensional Reconstruction From Radiographs & Electron," proc. nat. Acad. sci. USA Vol. 68, No. 9.
 (12) Santoro, R.J., 1981, "Optical Tomography For Flow Field Diagonstics," Int. J. Heat Transfer Vol. 24, pp. 1139~1150.
 (13) Kwoh, Y.S., 1977, "A Generalized $|\omega|$ Filter For 3-D Reconstruction", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. ns-24, No.5.
 (14) Glassman, Irvin, 1988, "Soot Formation In Combustion process," 20th Sympo. (Int.) on

- Combustion pp. 295~311.
- (15) Dobbins, R.A., 1983, "Soot Particle Measurements In Diffusion Flames," *Comb. & Flame* Vol. 51, pp. 203~218.
- (16) Osami, Nishida, 1983, "Optical Measurement of Soot Particles in a Laminar Diffusion Flame", *Comb. Sci. & Tech.*, Vol. 35, pp. 157~173.
- (17) Santoro, R.J., 1987, "The Transport & Growth of Soot Particles In Laminar Diffusion Flames", *Comb. Sci. & Tech.* Vol. 53, pp. 89~115.
- (18) Van De Hulst, H.C. 1957, "Light Scattering by Small Particles," John Wiley & Sons pp. 121~130.
- (19) Jagoda, I.J., 1980, "An Experimental Investigation into Soot Formation & Distribution in Polymer Diffusion Flames," *Comb. & Flame* Vol. 37, pp. 261~274.
- (20) Kent, J. H., 1990, "A Soot Formation Rate Map for Laminar Diffusion Flame," *Comb. & Flame* Vol. 79, pp. 278~298.