

동축 이중 에틸렌 확산화염의 매연 농도분포 및 온도 측정

이교우[†], 정종수*, 황정호**

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 12월 28일 심사완료)

Soot Concentration and Temperature Measurements in Laminar Ethylene Jet Double-concentric Diffusion Flames

Gyo-Woo Lee, Jongsoo Jurng and Jung-Ho Hwang

Key Words : Double-concentric Diffusion Flame(동축이중 확산화염), Soot Concentration(매연 농도), Rapid Insertion(급속 삽입법), Light Extinction Measurement(광 감쇠법)

Abstract

Experiments were performed with double-concentric diffusion flame(DDF) in order to investigate the characteristics of soot formation and temperature distributions. The flame size and shape of the DDF are similar to those of the well-known normal co-flow diffusion flame(NDF), except the formation of a tiny inverse flame near the central tube exit. A laser light extinction technique was used to measure the soot volume fractions. The temperature distributions in the flame were measured by rapid insertion of a R-type thermocouple. Soot concentrations along the flame axis of the DDF were higher than those of the NDF. However, the maximum soot volume fraction of the DDF along the periphery of the flame was lower than that of the NDF. It is mainly due to the effect of nitrogen-dilution from the inner air. Measured temperature distribution explains these trends of soot concentration. The temperature along the flame axis was also higher in DDF than that of the NDF. However, the flame temperatures at the flame front of the two flames were almost same regardless of the inner flame. This phenomenon means that the inverse flame inside the DDF did not affect on the flame structure including the temperature and soot concentration, except the region around the flame axis.

기호설명

$E(m)$: 복소함수(complex function)
 f_v : 매연 체적분율(soot volume fraction)
 I_o : 기준 광강도(reference intensity of beam)
 K_{ext} : 감쇠계수(extinction coefficient)
 m : 굴절지수(refractive index)
 r : 반경방향 좌표
 T_g : 가스 온도(gas temperature)
 T_j : 접점의 온도(junction temperature)
 x : 입사광의 진행방향 좌표
 y : 입사광의 진행방향에 수직한 좌표

α : 입자크기변수(particle size parameter)
 ϵ_j : 접점의 방사율(emissivity of junction)
 λ : 광원의 파장(wavelength of laser beam)

1. 서론

매연(soot particles)이란 미연의 연료가 열분해 될 때 생성되는 고체입자로서 연소기관에서 주로 배출되며, 환경오염의 주된 요인을 차지하고 있기 때문에 큰 문제점으로 지적되고 있다. 매연은 또한 연소에 있어서 효율, 기기의 내구성, 유지, 보수 문제와도 관련이 있어서 환경오염뿐만 아니라 연소공학의 측면에서도 매우 중요한 문제이다.

[†] 책임저자, 회원, KIST 지구환경연구센터
E-mail : gwlee@kist.re.kr
TEL : (02) 958-6702 FAX : (02) 958-5805

* 회원, KIST 지구환경연구센터

** 회원, 연세대학교 기계공학과

매연입자는 연료에 포함되어 있는 탄소로부터 생성된다. 1700K 이하의 낮은 온도에서는 방향족이나 불포화 지방족 탄화수소에서 발생하고, 그 이상의 온도에서는 일반적인 모든 탄화수소계 연료에서 발생된다. 그러나 매연입자의 생성은 많은 인자가 결부된 매우 광범위한 문제로서 아직도 전 세계적으로 많은 연구가 진행중인 상태이다. 실제 연소 기관들은 고온(1500K - 3000K), 고압(50 - 100 기압), 연료 속의 불순물, 난류, 비정상 현상 등으로 접근이 매우 어렵다. 이러한 이유로 대부분의 매연 연구는 간단한 예혼합화염이나 확산화염에 국한되어 왔으며, 특히 확산화염은 화염 내에서 매연입자의 생성, 성장 그리고 산화과정이 뚜렷이 관찰되므로 매연 생성의 많은 정보를 제공하였다.

일반적으로 매연입자의 생성은 다음의 네 단계로 나뉜다. 첫째, 광범위한 열분해(pyrolysis)와 원자 재배열(rearrangement)을 통해서 핵(nuclei)이 형성되며(soot inception), 둘째로 이 핵에 아세틸렌 등의 화학종이 부착되는 표면성장(surface growth)을 통하여 체적분율(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 단계로는 O₂, OH, O 등에 의해서 매연입자의 산화가 발생하게 된다. 매연의 배출은 생성과 산화 중 어느 과정이 지배적인가에 달려있다.^(1,2)

Kent 와 Wagner⁽³⁾는 Wolfhard-Parker 버너를 사용하여 높이에 따라 매연의 체적분율이 $2 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 정도임을 보였으며, McEnally 등⁽⁴⁾과 최인철 등⁽⁵⁾은 열전대를 이용한 매연농도 측정법으로 높이별 체적분율의 최고치가 $3 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ 정도임을 보고하고, 조건에 따른 매연입자의 특성을 확인하였다.

전형적인 확산화염과는 반대로 연료에 둘러싸인 산화제에 의해서 형성되는 역 확산화염(IDF, inverse diffusion flame)의 경우에는 화염대 밖에서 매연생성이 시작되므로 일반적인 확산화염과는 달리 산화과정을 거치지 않고 매연이 배출된다. Sidebotham 과 Glassman⁽⁶⁾은 이러한 IDF 에서 연료에 산소를 첨가하여 그 영향이 단순히 매연 생성 단계로의 빠른 전환을 의미하는 것이 아니라, 연료의 열분해 혹은 산화에 관여하는 여러 화학종들의 상관관계에 관계함을 보여주고 있다. Wu 와 Essenhigh⁽⁷⁾는 메탄 IDF 의 화염구조와 온도분포 등에 대한 연구를 하였으며, Maki 과 Kennedy⁽⁸⁾는 IDF 에서 중심축을 따라 매연의 체적분율이 $2 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 정도이며 고온부의 온도는 약 2350K -

2100K 임을 제시하였다.

본 연구실에서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 정상 확산화염(NDF, normal diffusion flame)의 내부에 역 확산화염이 형성된 혼합된 형태인 동축이중 확산화염(DDF, double-concentric diffusion flame) 내에서의 매연 생성 특성을 연구해 왔는데, 기존의 여러 확산화염을 대상으로 개발된 매연입자의 생성을 확인하는 효과적인 방법이 될 것으로 기대하고 있다. 정중수 등⁽⁹⁾은 중앙의 산화제로 공기를 사용하는 Air-DDF 에서는 NDF 보다 화염 내부의 온도가 상대적으로 높아서 매연 입자의 생성이 빨리 시작되고 농도가 높지만, 화염 외곽의 매연 생성 영역에서는 중앙의 공기로부터 확산된 질소의 영향으로 동일한 위치에서 연료의 농도가 상대적으로 낮으므로 매연 입자의 생성 및 성장이 빠르지 않고 평균 직경도 작은 것으로 보고하였다. 정중수 등⁽¹⁰⁾은 광 산란-감쇠법(light scattering-extinction method)을 이용하여 화염 내부의 매연 체적분율 분포를 측정하고 산란광의 강도를 측정하여 정상 확산화염과 이중 확산화염의 매연 생성기구를 비교하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 이러한 기존의 연구들을 바탕으로 중앙에 유입된 산소와 질소의 영향을 분리하여 평가하며, 그로 인한 매연입자의 농도분포 및 온도분포를 레이저광을 사용한 광 감쇠법(light extinction method)과 세선(fine-wire)의 열전대를 사용하는 급속삽입(rapid insertion)을 이용하여 측정하였다. 측정된 온도분포와 매연입자의 분포를 상호 비교하여 동축이중 확산화염의 매연특성에 미치는 내부의 역 확산화염의 영향을 인자별로 여러 측면에서 분석하였다.

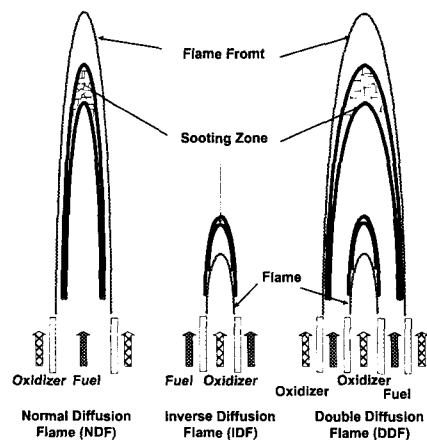


Fig. 1 Types of diffusion flames

2. 실험장치 및 방법

화염내의 매연 농도를 측정하기 위해 레이저를 광원으로 사용한 광 감쇠법을 사용하였으며, 측정된 경로 적분된 광 감쇠율의 분포를 이용하여 측대칭의 매연분포를 가정하고 Deconvolution 방법을 적용하여 각 단면에서의 매연 체적분율의 분포를 구하였다.⁽¹⁴⁾

Fig. 2 는 레이저광 감쇠법을 위한 장치도로서, 연료공급 및 제어부, 레이저 소스, 광학계, 수광부, 버너 및 이송장치부, 데이터 처리 및 이송대 제어용 컴퓨터 등으로 구성된다. 실험에 사용된 삼중관 버너는 중앙의 산화제(O₂ 또는 Air) 공급부의 내경이 8 mm(두께 1 mm), 중간의 연료 공급부의 내경이 18 mm(두께 1 mm) 이며 외곽의 공기 공급부는 내경이 86 mm 이다. 화염의 안정화를 위하여 주변 공기 통로에 유리구슬 층과 하니콤을 설치하였다. 산화제와 연료의 공급을 일정하게 유지하기 위해서 Mass Flow Controller (MKS 사, 4-Channels)를 사용하였다. 실험에 사용한 레이저 광원은 출력 2 Watt, 파장 514.5 nm 의 아르곤 이온 레이저로 출구에서의 빔 직경은 약 1.5 mm 이며 집광 렌즈를 사용하여 화염 통과시의 빔의 직경이 약 0.35 mm 정도이다. 레이저 광은 약 1 kHz 로 구동되는 chopper 를 지나 초점거리 500 mm 의 볼록 렌즈를 지나 beam splitter 에서 2 개의 광으로 나누어서 하나의 레이저 빔은 화염 측정 체적을 통과한 후 photodiode 로 강도를 측정하고, 다른 하나의 빔은 화염을 통과하지 않고 동일한 거리에 있는 광 다이오드로 기준 강도를 측정한다.

실험에 사용된 연료는 에틸렌(C₂H₄)이며 유량은

0.18 slpm(면적 평균 유속 1.75 cm/s)이며 외측 공기 유량은 27.48 slpm(7.27 cm/s)이고 중앙 공기 유량은 0 과 0.23 slpm(7.64 cm/s)의 두 경우(NDF, Air-DDF)로 나누어 실험하였으며, 중앙의 산화제를 산소로 사용한 경우(O₂-DDF)에는 질소만큼을 배제한 산소 0.046 slpm 을 공급하였다. 높이 방향으로의 측정 위치는 5 mm 간격으로 노즐 출구로부터 65 mm 까지 측정하였으며 고정된 높이에서 반경 방향으로는 0.25 mm 간격으로, 각 측정점에서는 100 개의 데이터를 0.3 초 간격으로 측정하여 평균치를 구하였다.

매연생성 지역에 열전대를 삽입하면, 열영동(thermophoresis) 현상⁽⁴⁾에 의해 매연 입자가 열전대에 달라붙어서 열전대의 접점으로부터의 복사 열손실이 증가되어 열전대의 접점의 온도(junction temperature)가 화염의 실제 온도보다 낮게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 접점의 크기를 최소화하고, 급속 삽입법을 적용하여 열전대가 화염대를 통과하는 시간을 가능한 한 작게 해서 온도를 측정하고자 하는 위치까지 도달하는 경로에서의 매연입자 부착을 최소화하고, 작은 직경의 열전대를 사용함으로써 접점의 온도 감응성이 좋기 때문에 매연입자의 본격적인 부착 이전에 화염의 실제온도에 가깝도록 온도측정이 가능하도록 하였다. 급속삽입 온도측정 기술을 사용하려면 화염 부근에서 열전대의 급격한 이송이 필요하기 때문에 화염 내 유동 교란이 있을 수 있다. 이러한 화염 내 유동에 교란을 최소화하도록 열전대의 고정을 위해 설치한 절연판을 화염으로부터 가능한 멀리 떨어지게 하고 열전대만을 화염 내로 삽입하였고 외기의 영향도 최소화하도록 장치를 고안하였다. Fig. 3 은 온도측정을 위한 급속삽입 장치인데, 화염 내로 삽입되는 열전대, 화염 외부에서 열전대를 지지하는 절연판, 절연판의 빠른 전, 후진을 위해 구동원으로 사용하는 솔레노이드, 열전대로부터의 데이터를 받는 보드와 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 열전대는 고온측정이 가능한 R-형 (Pt - Pt/13%Rd)을 사용하였으며, 급격한 온도 변화에 민감하게 반응하도록 직경 50 μm 의 세션을 선택하였다.

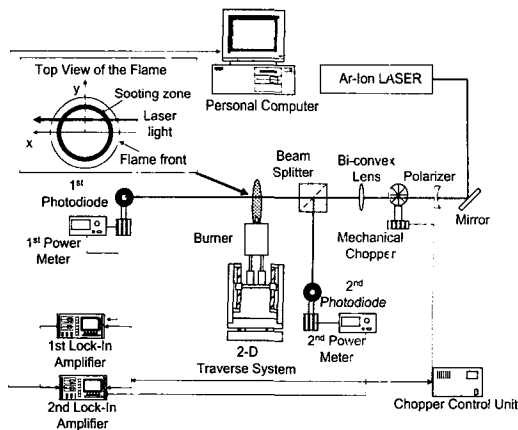


Fig. 2 Schematic of light extinction measurement system

3. 데이터 분석 및 처리

3.1 광 감쇠 데이터의 분석 및 처리

매연 입자의 크기 D 가 레이저 광의 파장 λ 에 비해 충분히 작아서 입자 크기 무차원수

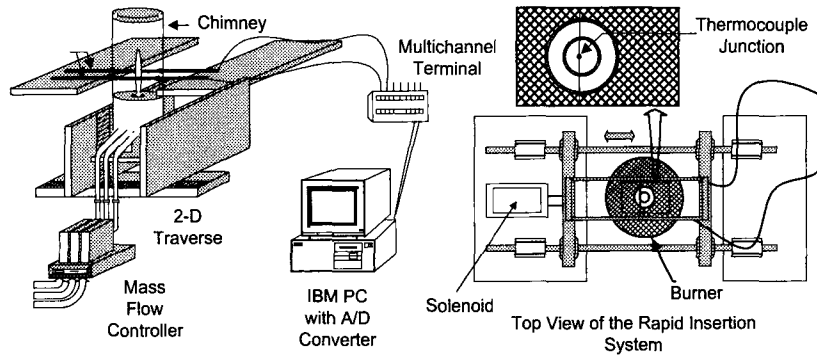


Fig. 3 Schematic of temperature measurement system

$\alpha(=\pi D/\lambda)$ 가 0.1 이하인 작은 경우에 레이저 광의 감쇠는 주로 흡수(absorption)에 의한 것이라 가정할 수 있으며 입자에 의한 감쇠계수(extinction coefficient)는 식 (1)과 같이 감쇠비 I/I_0 를 구함으로써 얻어진다.⁽¹¹⁾

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

이때 화염을 축대칭으로 가정하고 Abel 변환을 이용하여 식 (1)을 다음과 같은 식으로 재구성한다.

$$K_{ext}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{x_0}^{x_0} \frac{d(I/I_0)}{dy} (y^2 - r^2)^{-1/2} dy \quad (2)$$

매연 입자가 레이저 파장에 비해 충분히 작은 구형 입자로 가정한 Rayleigh 근사를 이용하고 매연 입자의 복소 굴절률(refractive index)은 $m = 1.57 - 0.56i$ ⁽¹¹⁾을 사용하면 Abel 변환으로 구한 K_{ext} 로부터 매연입자의 체적분율 f_v 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_v = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(m)} \quad (3)$$

이 식에서 복소함수 $E(m)$ 은 다음과 같다.

$$E(m) = -\text{Im}\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) \quad (4)$$

위의 방법을 이용하여 구한 화염의 반경방향별 매연 체적분율의 예가 Fig. 4에 나타나 있다. 이중 확산화염(Air-DDF)의 버너 팁에서 30 mm에서의 결과이다.

3.2 온도 데이터 분석 및 처리

3.2.1 열전대의 특성 반응

각각의 측정점의 raw 데이터(voltage history)를 비교 분석하여 설정한 열전대의 전형적인 응답특성을 Fig. 4에 나타냈다. 버너 팁에서부터 30 mm

높이(Height Above the Burner, H.A.B.=30 mm)에서의 온도를 반경방향에 따라 보여주고 있으며, (a), (b), (c) 세 개의 그래프는 특정 지점에서 열전대의 전압 신호를 시간에 따라 나타내었다. 열전대의 삽입은 약 1 초 동안 이루어지며, 이송시간을 제외한 실질적인 접촉의 체류시간은 0.5 초 이내이다. 후반부의 작은 최고치는 열전대를 빼내기 위해 솔레노이드를 후퇴시키는 과정에서 접점이 외곽의 화염대를 지날 때 생기는 것으로, 이는 삽입보다 후퇴시의 속도가 느리기 때문에 나타난다.

정상 확산화염을 기준으로 볼 때, 화염대와 열전대의 상대적인 위치에 따라서 그림과 같이 세 영역으로 나뉜다. Fig. 4에서 (a)의 경우에 해당하는 위치는 중심 축에서부터 화염대 안쪽인 반경 3mm 지점까지이다. 삽입된 이후 온도가 최고를 보이고 이후 감소하는데, 이것은 열전대의 접점에 달라붙은 매연입자에 의한 복사 열손실로 보인다. 한편, (b)의 경우는 열전대가 목적 위치에 삽입된 이후 300 ms ~ 400 ms에 걸쳐 온도가 오르는 경향을 보이다가 떨어진다. 온도는 대략 100~150 °C 정도 상승한다. 특히 최고 온도가 나타나는 위치에서 안쪽으로 2 mm 떨어진 지점부터 반경 방향으로 화염대까지 이러한 형태가 심하게 나타난다. 이 형태에서 열전대가 삽입된 이후 온도가 오르는 것은 Fig. 3의 장치 그림에서 보듯이 접점이 화염대 내부에 있을 때 양쪽의 열전대 선이 화염대에 닿아서 화염대로부터 열전도에 의해 접점의 온도가 조금씩 상승하는 것으로 생각된다. (c)는 화염대의 바깥쪽에서 나타나는데 삽입되자마자 최고치가 나타나고 이후 온도가 하강하는데, 이 형태가 나타나는 위치가 매연 입자의 산화영역이므로 접점 표면의 매연입자 부착에 의한 것이 아니라 접점이 열전대에서 가장 온도가 높은 부분이기 때문에 접점의 양 바깥쪽으로의 열전도에 의한 열

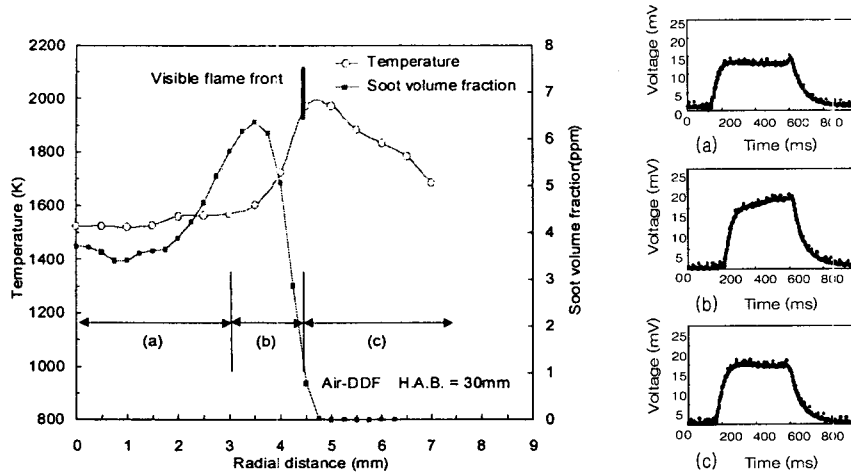


Fig. 4 Characteristics of temperature measurement system

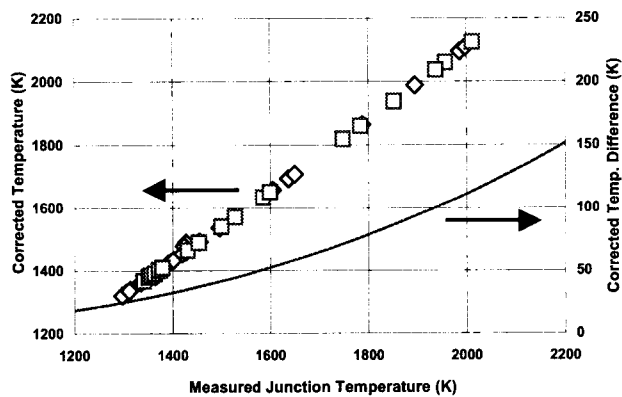


Fig. 5 Comparison between measured and corrected temperatures

손실로 보인다.

위의 온도 그래프 형태로부터 접점이 목표점에 도달한 직후부터 매연이 부착되기 전에 최고치를 얻어야 준정상 상태(quasi-steady state)에서 온도를 읽었다고 할 수 있다.⁽⁴⁾ 온도를 얻은 시간을 확인하기 위해서 실험 장치를 변경하여 측정 위치에 도달한 후부터 온도 데이터를 기록하도록 하였다. 그래프의 세 가지 패턴에 대해, 얻은 온도가 목표점에 도달한 직후, 얼마 후에 나타나는지 조사한 결과, 세 가지 경우 모두 최고치는 목표점에 도달 후 150 ms 이내에 나타났다. 그래서 세 가지 경우에 대해 일관성을 두기 위해 온도를 읽은 방법은 대략 열전대의 접점이 목표점에 도달 후 130 ~

150 ms 범위에 위치한 온도데이터의 상한과 하한값의 평균값으로 하였다. 유효값 이라고 인정할 수 있는 범위, 즉 매연 부착이 본격적으로 시작하기 전에 값을 얻었으므로 기존의 측정보다는 실제 화염 온도에 보다 가까운 값이라고 생각된다.

3.2.2 복사 열손실 보상

측정된 온도는 열전대의 접점의 온도이므로 복사 열손실, 유도선을 통한 전도 열손실, 열전대의 접점 표면에서 일어나는 열 생성(heat generation) 등을 고려해 가스의 온도를 구해야 한다. 그러나 본 실험에서 택한 열전대 선의 직경이 매우 작아서 접점의 직경은 $120 \pm 25 \mu\text{m}$ 이므로 전도 열전

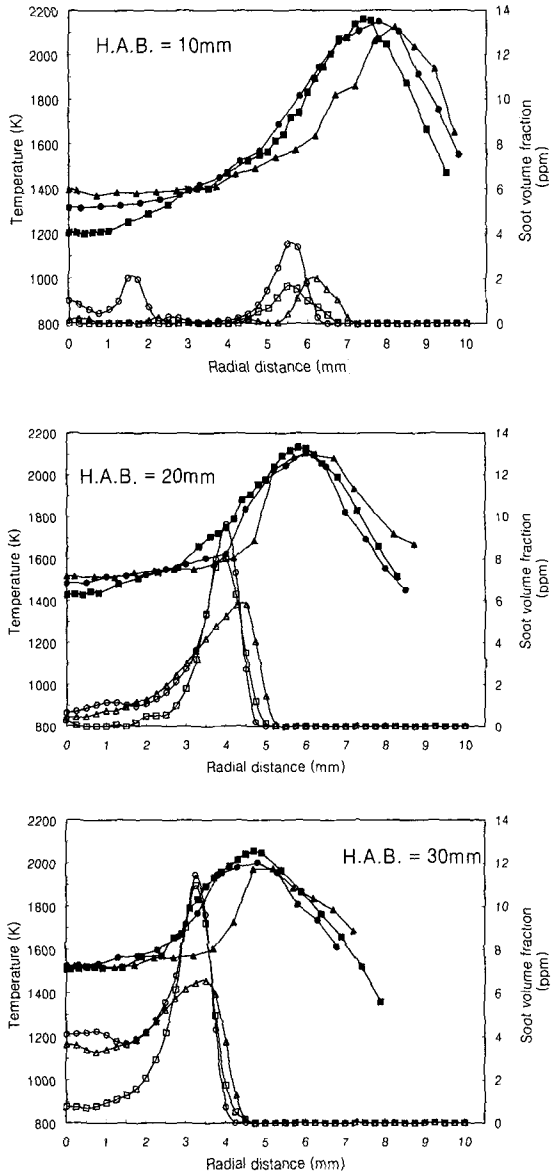


Fig. 6 Radial distributions of temperature and soot volume fraction

■ NDF Temp. ▲ Air-DDF Temp. ● O2-DDF Temp.
 □ NDF S.V.F. △ Air-DDF S.V.F. ○ O2-DDF S.V.F.

달과 표면에서의 열 생성은 접점에서의 복사열 손실에 비해 충분히 작으므로 복사 열손실만을 고려하였다. 접점에서 준정상 에너지 평형(quasi-steady energy balance)을 적용하면 다음과 같이 측정된 T_j 값으로부터 실제 화염 온도 T_g 값을 얻을 수 있다.⁽⁴⁾

$$\epsilon_j \sigma T_j^4 = (\chi_{s0} Nu_j / 2d_j)(T_g^2 - T_j^2) \quad (5)$$

여기서 ϵ_j 는 접점의 방사율(emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, Nu_j 는 접점의 Nusselt 수, d_j 는 접점의 대표지름, 그리고 $\chi_{s0} = \chi_s / T_s$ 이다. 여기서 χ_s 는 가스의 열전도계수로, T_s 에 선형적으로 비례한다고 가정하여, χ_{s0} 값을 상수로 하였으므로, χ_s 가 상수라는 가정보다는 훨씬 합리적이다. 이 식의 좌변은 단위 면적 당 복사 열 손실량이며 우변은 대류 열 유입량이다. $Nu_j = 2.1$,⁽⁴⁾ $\chi_{s0} = 6.54 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$,⁽⁴⁾ $d_j = 160 \mu\text{m}$ ⁽⁴⁾ 를 적용하였다. 방사율 ϵ_j 는 백금(Pt)의 깨끗한 표면에 대한 값을 취했으며, 온도에 따라 편차가 심해 Fig. 5 에 보듯이 온도마다 각기 다른 값들을 주어 값을 구하였다.^(12,13) 온도가 높을수록 복사 보정에 의한 온도 차이가 커져서, 2000 K 에서는 보정 온도 차이는 약 115K 로 나타난다.

4. 결과 및 고찰

2 장에서 언급하였듯이 실험에 사용한 연료유량은 0.18 slpm, 외부공기는 27.48 slpm 이다. 중앙의 산화제를 공기로 사용한 공기 확산화염(Air-DDF)의 경우는 공기 0.23 slpm 을 사용하였다. 화염 형태를 NDF 와 유사하게 유지하면서 내부에 역 확산화염(IDF)이 존재하도록 유량 범위를 선택하였다. 또한, 희석효과를 부분적으로 배제하기 위하여 공기 속의 질소를 제외하고 산소 0.046 slpm 만으로 산소 확산화염(O₂-DDF)을 구성하였다.

이상의 세 화염은 서로 조금씩 조건을 달리하므로 매연 생성 특성의 정량적인 비교는 어렵겠지만 중앙에 공급되는 산화제로 인한 효과가 매연생성 및 화염 온도에 미치는 영향의 정성적인 분석이 가능하였다. 세 화염 모두 길이는 80 mm 내외이고 Air-DDF 는 내부에 5 mm 정도의 역 확산화염이 존재하는 형태이며, O₂-DDF 는 내부의 역 확산화염의 길이가 약 3 mm 정도이다. 또한 Air-DDF 는 NDF 에 비해서 화염의 폭이 약간 확장된 상태이며 O₂-DDF 는 화염 하류에서 매연이 외부로 배출되는 형태를 보인다.

4.1 높이별 반경방향 온도 및 매연의 체적분율

Fig. 6 은 높이별 반경방향 거리에 따른 세 종류 화염의 온도분포와 매연 체적분율을 비교하였다. 먼저 Fig. 6(a)에서는 버너로부터 10 mm 높이에서의 결과를 보여주고 있다. 화염 중심축 근처에서 보면 두 DDFs

에서 각각 5, 3 mm 인 내부의 IDF 로 인해서 NDF 보다 높은 온도 분포를 보이고 있으며, O₂-DDF 의 매연 체적분율은 다른 두 화염의 경우보다 훨씬 크게 측정되었다. 또한 반경 1-2 mm 사이에서 보이는 O₂-DDF 화염의 매연 체적분율에서 내부의 IDF 의 매연 배출치를 가늠해 볼 수 있다. 이 높이에서는 중심 축으로부터 반경방향 약 8 mm 근처에서 2150 K 정도의 최고 온도를 보인다. Air-DDF 의 화염대가 NDF 에 비해 다소 확대된 형태가 명확히 보인다. Air-DDF 와 O₂-DDF 는 모두 내부의 역 확산화염(IDF, inverse diffusion flame)의 영향을 받지만, Air-DDF 는 내측 산화제로 사용된 공기의 유량이 O₂-DDF 의 산소 유량보다 훨씬 크기 때문에 화염대가 바깥쪽으로 이동되었다고 생각된다.

Fig. 6(b)는 20 mm 높이에서의 분포를 보여주고 있다. 먼저 중심축에서 보면 내부의 IDF 에 의한 온도상승의 효과가 미약해져서 NDF 와의 차이가 거의 없어짐을 알 수 있으며, 앞선 그림과 같이 외곽의 화염대 부근에서 NDF 와 O₂-DDF 는 온도와 매연분율에서 거의 비슷한 최고값의 위치를 나타내고 있다. 두 DDFs 의 경우, 중심축 근처에서 상류의 고온에서 기인한 매연 체적분율 상승의 조짐이 보이고 있다. 화염대 근처에서는 Air-DDF 의 매연 체적분율은 내부에서 분출된 공기의 희석효과에 의해서 다른 두 화염보다 낮게 측정되었다. 화염대에서의 최고온도는 마찬가지로 2150 K 이다.

Fig. 6(c)에서는 버너 팁으로부터 30 mm 높이에서의 결과를 보이고 있다. 중심축에서의 온도는 내부의 IDF 에 의한 온도상승의 효과가 더 이상 없음을 보여주고 있으며, 매연 체적분율의 경우, 앞서 지적한 상류에서의 온도효과에 의한 매연 생성 증대를 명확히 보여주고 있다. 이러한 내부의 매연 입자는 내부의 IDF 와 온도상승에서 기인한다. 화염대 근처의 경우, 앞의 경우와 마찬가지로 NDF 와 O₂-DDF 의 온도와 매연분율의 최고값은 비슷한 반경방향 위치를 가진다. 이 높이에서는 대략 2080 K 가량의 최고온도를 보인다.

4.2 축 방향의 온도 및 매연의 체적분율

중심축에서 내부의 IDF 의 영향을 좀더 자세히 보기 위하여 Fig. 7 에서는 버너 팁에서부터 축방향으로의 높이에 따른 온도와 매연의 분포를 나타냈다. 온도의 경우 Fig. 6 의 결과 외에 5 mm 높이에서의 결과를 추가하였다. 5 mm 정도 크기의 내부의 IDF 로 인해서 Air-DDF 는 이 부근에서 V 형태의 온도분포를 보인다. 내부화염의 화염대인 5 mm 높이를 벗어나면서 온도가 떨어지는 양상을

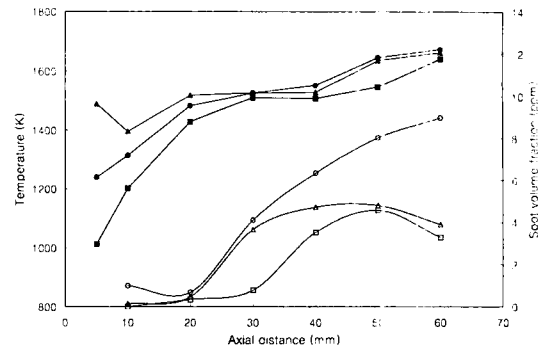


Fig. 7 Axial distribution of temperature and soot volume fraction along the centerline

■ NDF Temp. ▲ Air-DDF Temp. ● O₂-DDF Temp.
□ NDF S.V.F. △ Air-DDF S.V.F. ○ O₂-DDF S.V.F.

보인 것이다. 실험장치 구조상의 어려움으로 인해서 측정은 못했지만 Air-DDF 의 결과로 미루어 볼 때, O₂-DDF 역시 3 mm 근처에서 비슷한 V 형태의 온도분포를 예측할 수 있다.

한편, 매연 체적분율의 경우, 높이 20 mm 이후에서 두 DDFs 는 NDF 에 비해서 큰 증가를 보이며, O₂-DDFs 는 충분한 산화과정을 겪지 않고 외부로 배출됨을 보여주고 있으며 Air-DDF 는 내부 공기에 포함된 질소로 인한 희석효과로 인해서 하류에서의 매연량은 NDF 와 비슷한 수준으로 줄어들고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 증앙에 유입된 산소와 질소의 영향을 분리하여 평가하며, 그로 인한 매연입자의 농도분포 및 온도분포를 레이저광을 사용한 광 감쇠법(light extinction method)과 세선(fine-wire)의 열전대를 사용하는 급속삽입(rapid insertion)을 이용하여 측정하였다.

측정된 온도분포와 매연입자의 분포를 상호 비교하여 동축이중 확산화염의 매연특성에 미치는 내부의 역 확산화염의 영향을 인자별로 여러 측면에서 비교하고 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 최고온도는 버너 팁으로부터 10-20 mm 에서 2150 K 정도의 값을 보였다.

(2) 실험한 조건에서 O₂-DDF 와 Air-DDF 는 각각 3 mm 와 5 mm 의 내부 IDF 를 가진다.

(3) 화염의 중심축에서의 온도분포는 높이 20 mm 까지만 내부화염의 영향이 미치고, 이로 인한 매연생성의 촉진으로 이 높이부터 본격적인 매연

농도의 상승이 나타났다.

(4) 화염대 근처에서 온도장은 거의 유사한 형태로 나타나고 있으며, Air-DDF 의 매연농도는 내부공기 중의 질소로 인한 희석 때문에 비교적 낮은 분포를 보인다.

참고문헌

- (1) Haynes, B. S. and Wagner, H. Gg., 1981, "Soot Formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 7, pp. 229~273.
- (2) Smith, O. I., 1981, "Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particle Emissions," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 7, pp. 275~291.
- (3) Kent, J. H., Jander, H. and Wagner, H. Gg., 1981, "Soot Measurements in Laminar Ethylene Diffusion Flames," *18th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 1117~1126.
- (4) Mcenally, C. S., Koylu, Umit O., Pfefferle, L. D., and Rosner, D. E., 1997, "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 701~720.
- (5) 최인철, 이재복, 황정호, 2000, "Sooting 및 Non-Sooting 정상 확산화염에서 생성되는 매연 입자의 특성에 대한 연구," 대한기계학회논문 B 제 24 권, 제 7 호, pp. 894~993.
- (6) Sidebotham, G. W. and Glassman, I., 1992, "Effect of Oxygen Addition to a Near-Sooting Ethene Inverse Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 92, pp. 207~219.
- (7) Wu, K.-T. and Essenhigh, R. H., 1984, "Mapping and Structure of Inverse Diffusion Flames of Methane," *20th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 1925~1932.
- (8) Makel, D. B. and Kennedy, I. M., 1994, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 97, pp. 303~314.
- (9) 정중수, 이교우, 고범승, 강경태, 1998, "동축 이중 확산화염의 매연생성 특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 674~679.
- (10) 정중수, 이교우, 고범승, 강경태, 1999, "동축 이중 확산화염의 매연생성 특성," 대한기계학회 논문집 B 제 23 권, 제 11 호, pp. 1355~1362.
- (11) Dobbins, R. A., Santoro, R. J. and Semerjian, H. G., 1984, "Interpretation of Optical Measurements of Soot in Flames," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 92, pp. 208~237.
- (12) Holman, J. P., 1990, *Heat Transfer*, McGraw-Hill
- (13) 박종철, 강기훈, 박찬복, 1985, 온도, 한국표준연구소, pp. 105~208.
- (14) 황준영, 1995, "확산화염의 매연특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위 논문.