

동축 이중 확산화염의 매연 생성 특성

정종수*, 이교우*, 고범승**, 감경태***
(1998년 12월 15일 접수)

Soot Formation in a Double-Concentric Diffusion Flame

Jongsoo Jurng, Gyo-Woo Lee, Bum-Seung Ko and Kyung-tae Kang

Key Words: Double-Concentric Diffusion Flame(이중 확산화염), Soot(매연), Laser Extinction(광 감쇠), Deconvolution(역 콘볼루션), Nitrogen Dilution(질소 희석)

Abstract

An experimental study on a double-concentric diffusion flame(DDF) has been carried on in order to investigate the characteristics of soot formation compared to a normal coflow diffusion flame(NDF). Laser extinction technique has been used for an ethylene(C_2H_4) and air flame with various flow rates. Soot formation in the double-concentric diffusion flame was enhanced by the inner inverse diffusion flame due to the increase in flame temperature and also suppressed due to the nitrogen-dilution from the inner air. Soot concentration at the flame axis of DDF was higher than that of the NDF, mainly because of the increase of temperature by inner flame. However, the maximum soot volume fraction of DDF was lower than NDF at the outer side of the flame, mainly due to the effect of nitrogen-dilution from the inner air.

1. 서론

매연 입자는 각종 산업용 연소기 및 자동차용 디젤엔진 등에서 생성되어 대기 중으로 배출된다. 따라서 매연 입자의 생성 및 배출의 문제는 불완전 연소에 의한 것이므로 에너지의 효율적 이용이라는 문제에서도 중요한 연구 대상이지만, 이보다도 환경 오염의 문제, 특히 대기 중에 배출된 매연 입자가 사람들의 건강에 미치는 영향 등에 대한 사회적인 관심이 점점 더 커지고 있어서 이에 대한 대책 마련에 부심하고 있다. 또한 연소 시스템 내에서의 매연이 발생하여 화염 내의 매연 입자의 농도가 높으면 화염의 복사율이 커져서 연소실 벽면으로의 복사 열전달에 의한 열 전달율이 크게 증가하기 때문에, 특히 액체

연료를 사용하는 가스 터빈 연소기 혹은 디젤 엔진에서는 연소실 벽면의 온도가 상승하고 냉각 부하량이 증가하는 문제가 가장 중요하다. 따라서 많은 연구가 화염내의 매연 생성 메커니즘의 규명 및 영향을 주는 인자들을 밝히기 위해서 수행되고 있다.

매연 생성 과정에 대한 연구는 주로 화염 구조(structure) 및 매연 생성 기구(mechanism)가 비교적 단순한 예혼합 화염에 연구가 집중되어 왔다. 하지만 매연 생성이 문제가 되는 실제 연소 시스템에서의 화염은 대부분 비예혼합(non-premixed) 화염이다. 확산화염 내에서의 매연 생성에 대해서는 본질적으로 대표되는 층류 정상 확산 화염(laminar normal diffusion flame)을 대상으로 주로 수행되어 왔다. 화염에서의 매연 생성 과정에 대한 연구에는 주로 레이저 광 감쇠법을 이용하여 매연 입자 농도를 측정하는데, 이 분야의 대표적인 연구자로는 Santoro,^(1,2) Axelbaum and Law,⁽³⁾ Kent and Honnery⁽⁴⁾ 등이 있으며 이들이 수행한 연구는 주로 정상 확산 화염 내에서의 온도 및

* 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

** (주) LG 전자

*** 회원, 생산기술연구원

연료 농도의 분포가 매연 생성에 미치는 영향에 대해 초점을 맞추고 있는데, 이들의 연구로부터 매연 입자가 주로 생성되는 영역은 연료의 물 분율 0.1 - 0.18 의 범위, 화염 온도 1400 - 1700 K 의 범위에서 형성된다는 사실을 밝혀 냈다. 한편 최근 들어서는 역 확산 화염(inverse diffusion flame) 내에서의 매연 생성에 대한 연구가 관심을 끌고 있다. 역 확산 화염은 정상 확산 화염과는 반대로 산화제인 공기가 연료 제트의 안쪽에서 분출되어 형성되는 화염으로, 정상 확산 화염에서와는 다르게 매연이 화염면의 바깥쪽에서 생성되고 유동 방향이 바깥쪽으로 향하기 때문에 매연 입자가 화염면을 통과하지 않는다. 따라서 정상 확산 화염에서는 화염면에서 일어나는 매연 입자의 산화 과정이 일어나지 않게 되므로 특히 매연의 성장 과정을 연구하는 데 유리할 것으로 생각하여 연구를 수행하여 왔다. 역 확산 화염에서는 정상 확산 화염에서보다 매연의 생성량이 매우 작고 매연 체적 분율의 최대 값이 정상 확산 화염의 약 1/10 정도이다.⁽⁵⁾ 역 확산 화염에서의 매연 입자의 수밀도(number density) 및 크기(size) 등을 측정 한 황준영⁽⁶⁾의 논문에서는 정상 확산 화염과 마찬가지로 PAH 의 농도가 감소하기 시작하는 위치와 매연이 형성되기 시작하는

위치와 일치한다는 점을 확인하였다.

본 연구팀에서는 이러한 기존의 연구 결과를 바탕으로 정상 확산 화염의 내부에 역 확산 화염이 형성되어 두 화염이 이중으로 동시에 존재하는 동축 이중(double-concentric) 확산 화염으로 실험의 대상을 확장하여 화염 내에서의 매연 입자의 생성 과정에 대한 연구를 수행하여 왔으며,⁽⁷⁻¹⁰⁾ 유사한 형태의 동축 이중 화염에 대한 연구⁽⁷⁾를 통해 이러한 형태의 화염에서는 내부 제트를 포함한 유동 특성이 화염의 특성에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 밝혔다.

본 연구실에서는 참고문헌 (7)에 발표한 바와 같이 삼중 동심관(triple concentric tubes)형의 버너를 이용하여 정상 확산 화염과 역 확산 화염이 혼합된 형태인 동축 이중 확산 화염에 대해 연료 및 산화제의 유량 조건의 변화에 따른 화염 형태 및 배기가스의 배출 특성 등을 연구하고 있는데, 본 연구에서는 이러한 연구를 바탕으로 동축 이중 확산 화염을 대상으로 레이저를 이용한 광산란 및 감쇠법으로 화염 내의 매연 농도 분포 및 산란광의 강도 등을 측정하고 정상 확산 화염과의 비교를 통해 매연 입자의 생성, 성장 및 산화 과정을 연구하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 측정 방법

본 실험에 사용한 삼중 동심관 버너의 개략도를 Fig. 1 에 나타냈다. 실험에 사용된 삼중관 버너는 중앙의 공기 노즐의 내경이 8 mm, 두 공기 노즐 사이의 연료 노즐은 내경이 18 mm 이며 외곽부의 주변 공기 노즐은 내경이 86 mm 이다. 화염의 안정화를 위하여 주변 공기 노즐에 유리 구슬층과 하니콰를 설치하였다. 산화제와 연료의 공급을 일정하게 유지하기 위해서 Mass Flow Controller (MKS사, 4-Channels)를 사용하였다. 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2 에 나타냈다. 실험 장치는 크게 삼중관 버너, 연료 및 공기 공급계, 광학 측정을 위한 레이저 광학계, 버너 이송장치, 이송장치의 제어와 데이터 수집을 위한 컴퓨터 시스템 등으로 구성되어 있다.

화염내의 매연 농도를 측정하기 위해 레이저를 사용한 광 감쇠법(light extinction method)을 사용하였으며, 측정된 광 감쇠율의 분포를 이용하여

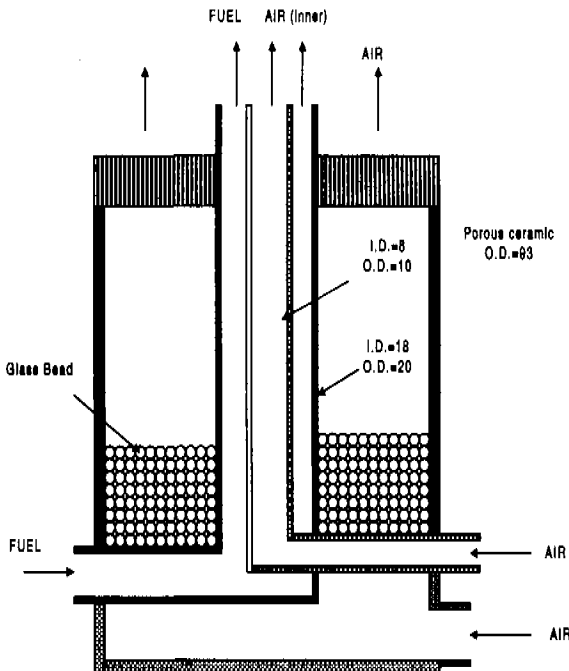


Fig. 1 Triple concentric burner.

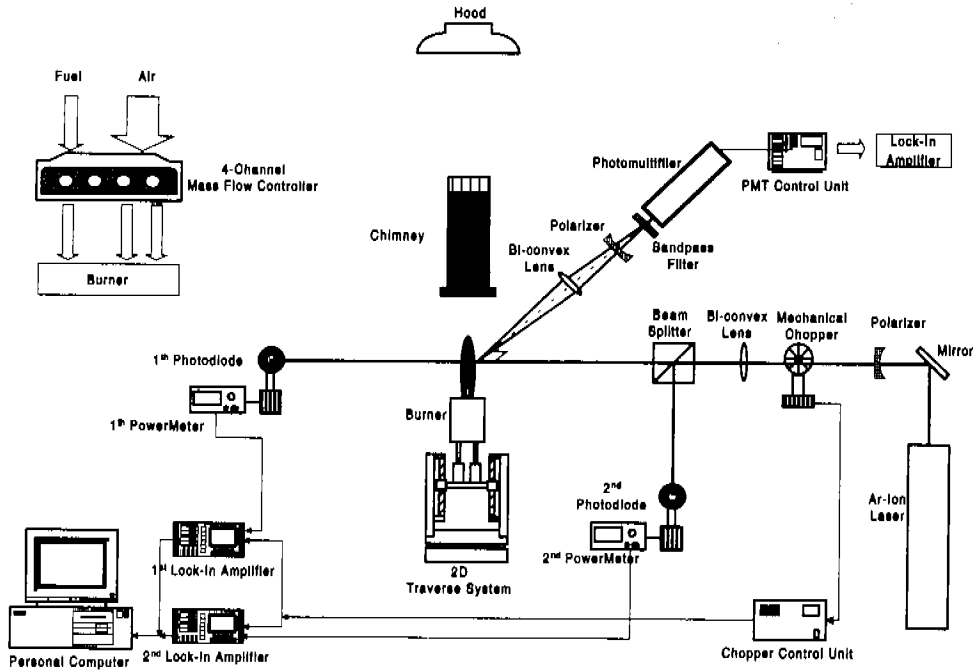


Fig. 2 Schematic diagram of laser extinction measurement system.

Deconvolution법을 적용하여 각 단면에서의 매연 체적 분율의 분포를 구하였다. 실험에 사용한 레이저 광원은 출력 0.1 W, 파장 514.5 nm 의 아르곤 이온 레이저(Ar-Ion Laser)로 출구에서의 빔 직경은 약 1.5 mm이며 집광 렌즈를 사용하여 화염 통과시의 빔의 직경이 약 0.35 mm 정도이다. 레이저 광은 약 1 kHz로 구동되는 초퍼(chopper)를 지나 초점거리 500 mm의 볼록 렌즈(convex lens)를 지나 빔 스플리터(beam splitter)에서 2개의 광으로 나누어서 하나의 레이저 빔은 화염 측정 체적을 통과한 후 광 다이오드(photodiode)로 강도를 측정하고, 다른 하나의 빔은 화염을 통과하지 않고 동일한 거리에 있는 광 다이오드(photodiode)로 기준 강도를 측정한다. 입사 레이저 광에 수직인 위치에 광 증배관(photomultiplier)을 설치하고 집광용 렌즈, 편광 필터, 반치폭이 1 nm인 514.4 nm 협대역 필터(narrow bandpass filter)를 사용하여 매연 입자에 의한 광 산란 신호를 측정하였다. 광 다이오드와 광 증배관에 의해 집광된 광의 강도 신호는 각각 Lock-In Amplifier를 사용하여 신호로부터 노이즈를 제거하고 증폭 과정을 거친 후 PC로 데이터를 처리하였다.

실험에 사용된 연료는 에틸렌(C_2H_4)이며 유량

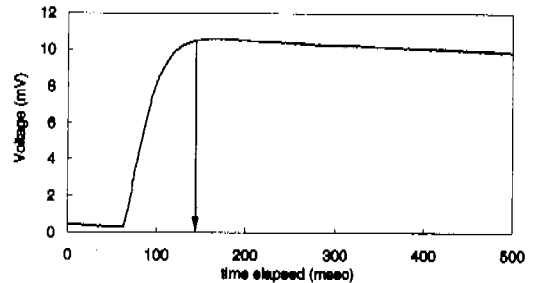


Fig. 3 Voltage signal from thermocouple by Rapid Insertion Technique.

은 0.2 lpm(면적 평균 유속 1.9 cm/s)이며 외측 공기 유량은 30 lpm(7.89 cm/s)이고 중앙 공기 유량은 0 과 0.25 lpm(8.28 cm/s)의 두 경우로 나누어 실험하였다. 높이 방향으로의 측정 위치는 5 mm 간격으로 노즐 출구로부터 65 mm 까지 측정하였으며 고정된 높이에서 반경 방향으로는 0.25 mm 간격으로, 각 측정점에서는 100개의 데이터를 0.3 초 간격으로 측정하여 평균치를 구하였다.

화염 내의 온도의 측정은 R-type(백금-백금/로듐 13%) 열전대를 사용하였다. 열전대는 0.05 mm 직경을 갖는 세선(fine wire)을 용접(butt welding)하여 세라믹 절연봉에 넣어 사용하였다.

Figure 3은 5초간 받은 열전대로부터의 기전력 값을 전압으로 표시한 대표적인 예를 나타내는 그림이다. 이 그림에서 보면 열전대가 삽입되기 전에는 기전력이 0.5 mV 정도이고 삽입을 시작하여 열전대가 화염 안으로 들어가는 60 msec 부터는 급속히 기전력 값이 증가하여, 140 ms 정도에서 최대값 피크를 지난 후 매연 입자의 부착으로 인하여 기전력 값이 점차 떨어지게 된다. 열전대의 급속 삽입을 위하여 사용 압력이 3 kgf/cm²인 전자식 솔레노이드를 이용하여 급속 삽입 장치⁽¹⁰⁾를 제작하여 사용하였다. 스위치를 이용하여 전자식 솔레노이드에 AC220V를 가하여 급속히 이동시키면 고정되어 있는 세라믹 봉과 그 끝에 위치한 열전대의 비드(bead)가 화염 내로 삽입된다. 화염 내에 삽입 후에는 초당 100개의 데이터를 5초간 기록한 후 화염 외측으로 다시 이동시켜 보조화염을 이용하여 열전대 비드(bead)에 부착(deposition)된 매연 입자를 제거하고 다시 삽입하였다. 데이터는 Amplifier가 내장된 A/D board(PCL-818HG, ADVANTECH)를 통하여 100배 증폭된 신호를 컴퓨터로 처리하였다. 열전대로부터 정확한 온도를 얻기 위해서는 열전대 비드로부터 복사 열 손실이나 열전대선을 통한 전도에 의한 영향을 고려하여 보정한다. 하지만 본 연구에서는 화염간의 상대적인 온도 비교에 중점이 있고, 사용한 열전대의 비드가 충분히 작아서 복사 열손실이 크지 않은 것으로 판단되므로 보정을 생략하였다. OMEGA PRESS의 REFERENCE TABLES⁽¹¹⁾를 참조하여 열전대 신호의 피크를 읽어 기전력을 온도로 변환하였다.

2.2 매연 농도 실험 데이터의 분석

화염을 통과하는 레이저 광의 감쇠(extinction)는 매연 입자에 의한 흡수(absorption)와 산란(scattering)으로 이루어지는데, 레이저 광의 전체 감쇠에서 흡수에 비해서 산란에 의한 비율은 상당히 작다. 따라서 본 연구에서는 매연에 의한 레이저 광의 감쇠는 주로 흡수에 의한 것으로 가정한다. 매연 입자의 복소 굴절률(refractive index) $m = 1.57 - 0.56i$ ⁽¹²⁾을 사용하면 Deconvolution 변환에 의해 구한 각 위치에서의 K_{ext} 로부터 다음 식으로 매연 체적 분율 f_v 를 구할 수 있다.

$$f_v = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(m)} \quad (1)$$

이 식에서 복소함수 $E(m)$ 는 다음과 같다.

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

3. 실험 결과 및 검토

확산 화염에서는 고온의 화염대를 중심으로 연료 축에서 매연이 생성된다. 매연 입자의 생성이 고온에서의 연료 성분과 열분해로부터 매연 입자의 생성이 시작되기 때문이다. 본 실험에서 사용한 동축 이중 확산 화염은 정상 확산 화염(normal diffusion flame)의 내부 중앙에서 공기가 분출되어 나와서 역 확산 화염(inverse diffusion flame)이 동시에 형성되는 형태이다.

동축 이중확산 화염에서의 실험 결과를 중앙에서의 공기를 공급하지 않은 정상 확산 화염에서의 매연 농도 측정 결과와 비교하였다. 이 실험에서 얻은 정상 확산 화염에서의 매연 농도의 분포는 기존의 실험 결과^(1,2)와 매우 유사하다.

정상 확산 화염의 길이는 약 8 cm 정도이고 이중 확산 화염의 경우에도 거의 같아서 약 8.1 cm이며, 화염 중앙에 형성된 역 확산 화염은 약 0.8 cm 정도의 길이로 푸른색을 띄고 있다.

Fig. 4는 이 두 화염에서의 매연 농도 분포를 나타낸 그림으로, 노즐 출구로부터 10 mm 간격으로 여러 단면에서의 반경 방향 분포를 비교하였다. 이 그림에서 보면 두 화염에서 거의 동일하게 버너 출구로부터 약 10 mm 높이에서 매연 입자가 처음으로 관찰되며, 반경 방향으로 5 - 7 mm 위치에서 모두 약 2 ppm 정도의 값이 나타난다. 최대치가 나타나는 위치는 정상 확산 화염의 경우의 반경 방향으로 약 5.7 mm 위치인데 반해, 이중 확산 화염에서는 약 6.5 mm 로 약간 바깥쪽이다. 이 현상은 이중확산 화염에서는 중앙부의 공기 제트의 유량 공급에 의해 화염이 형성되는 지점이 약간 바깥쪽으로 밀려나기 때문이라고 생각된다.

특히 높이 20 mm 단면에서의 실험 결과를 비교하면 매연 농도의 피크를 기준으로 하여 좌우측의 매연 농도 분포의 기울기가 상당히 다르다. 매연 농도 분포의 연료 축의 기울기는 매연 입자의 생성률, 산화제 축의 기울기는 매연 산화율을 나타낸다고 알려져 있다. 정상확산 화염의 경

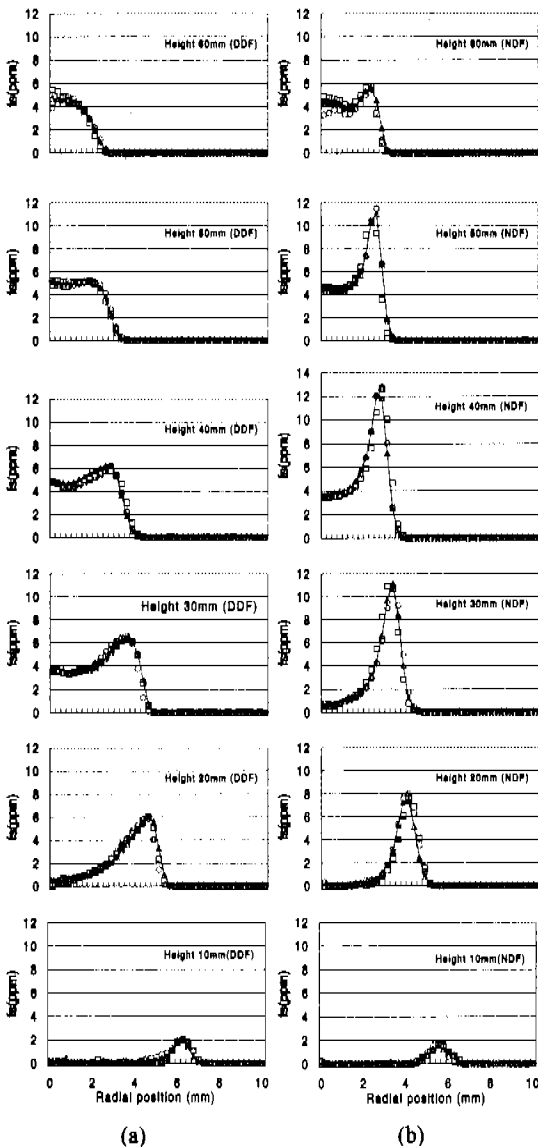
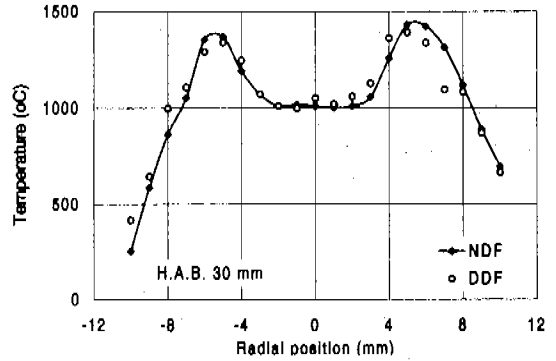
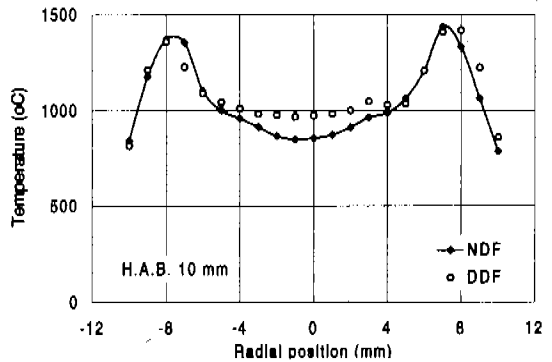


Fig. 4 Radial profiles of soot volume fraction in (a) double-concentric diffusion flame(DDF) and (b) normal diffusion flame(NDF).

우에는 좌우의 기울기가 매연 농도 피크를 중심으로 큰 차이가 없는 대칭 형태인데 반해, 이중 확산 화염의 경우에는 우측, 즉 바깥쪽에 비해 안쪽에서의 기울기가 완만하다. 이러한 현상은 정상확산 화염에서는 매연 생성지역을 기준으로 화염면이 우측에만 형성되는 것과는 달리 이중 확산 화염의 경우는 중심부에도 화염면이 형성되어 있기 때문에 내부 온도가 상대적으로 높기 때문이다. 노즐로부터 10 mm 및 30 mm 높이의 단



(a) H.A.B. 30 mm



(b) H.A.B. 10 mm

Fig. 5 Radial profiles of flame temperature.

면에서의 온도 분포를 측정한 결과를 비교하여 Fig. 5 에 나타냈다. 이 그림의 (b)에서 10 mm 단면에서는 DDF 측이 화염 중심부의 온도가 약 150°C 정도 높다. 그러나 화염대 부근인 외곽부의 온도는 10 mm 및 30 mm 높이의 두 화염 모두 큰 차이가 없다.

한편 Fig. 4의 매연 농도를 20 mm 이상의 높이에서 비교해 보면 이중 확산 화염 (a)에서의 매연 체적 분율의 최고값이 최고 6 ppm 정도로 정상 확산 화염 (b)의 12 ppm에 비해 약 1/2 정도이다. 이렇게 매연 농도가 낮은 원인은 매연이 생성되는 영역에서 온도가 낮거나 희석에 의해 연료 농도가 낮은 두 가지의 원인을 생각할 수 있다. 우선 앞서 설명한 대로 온도 측정 결과는 Fig. 5의 화염대에서의 온도에 거의 차이가 없으므로 중앙 공기에서 나온 질소의 희석 효과에 의해 매연 생성이 감소하는 것이라고 생각할 수 있다.

중앙 공기 제트물 산소 제트로 대체한 최근의 실험⁽¹⁰⁾에서는 이러한 매연 피크의 감소 현상이 나타나지 않았으며, 따라서 Fig. 4 외 DDF에서

나타나는 매연 피크의 감소 현상은 질소의 회석 효과 때문이라고 할 수 있다. 즉 DDF에서 중앙공기로 공급된 산소는 모두 소모되는 반면, 질소는 화염 내부로 확산되며 이 질소에 의해 회석되어 매연 생성 영역에서의 연료의 농도가 감소하기 때문에 매연 생성이 감소하는 것이라고 설명할 수 있다.

확산 화염 내에서는 매연 입자가 생성되어 성장하고 산화되기까지의 일련의 과정들을 화염의 중심축에서 비교적 관찰하기가 용이하다. 즉 화염 중심축을 따라서 매연 입자의 체적선(streakline)이 형성되므로 매연의 체적 분율 및 입자의 평균 직경, 수 밀도 등의 변화 과정을 중심축을 따라 살펴보면 매연 생성 과정을 이해하는데 도움이 된다. Fig. 6은 화염의 중심축에서 측정된 매연 체적 분율, 적분한(integrated) 매연체적 분율, 매연 입자의 팽산란 신호 및 온도의 변화를 나타내고 두 화염을 비교한 그림이다. 이 그림의 (a)에서 화염 중심축을 따라 높이에 따라 관찰하면 정상 확산 화염에서는 약 30 mm에서 처음으로 매연 농도가 나타나지만 DDF에서는 10 mm에서 매연이 나타나기 시작하고, 20 mm를 넘으면서 급격히 증가한다. 동축 이중 확산 화염에서의 매연 체적 분율은 30 mm 높이에서 약 4 ppm 정도에 도달한 후 증가율이 둔화되며, 50 mm에서 최대 값에 도달한 후에는 매연 농도가 60 mm까지는 서서히 감소하다가, 60 mm 이후에는 급격하게 감소한다. 정상 확산 화염에 비해 이중 확산 화염에서는 매연 입자가 상대적으로 일찍 나타나기 시작하며 매연 농도의 급격한 증가도 약 10 mm 정도 빨리 일어난다. 매연의 농도의 최고치는 두 화염 모두 높이 50 mm 지점에서 4 - 5 ppm 정도로 비슷하다. 화염 높이 40 mm 이후 약 60 mm까지의 경우에 이중 확산 화염은 매연 체적 분율이 4.8 ppm 정도에서 거의 변화하지 않는 반면에 정상 확산 화염의 경우에 높이 50 mm에서 중심축에서의 최대값이 약 4.6 ppm이고 높이 60 mm부터 화염의 끝인 약 80 mm에 이르기까지 급격히 감소한다.

이중 확산 화염에서 화염 중심축에서의 매연 생성이 먼저 시작되는 것은 화염 내부에 형성된 내측 화염에 의해서 화염 중심선에서의 온도가 정상 확산 화염에 비해서 더 높기 때문에 매연 생성이 촉진되는 것으로 생각된다. 한편 이 그림의 (b)는 매연 생성 분율의 적분치를 나타내는데

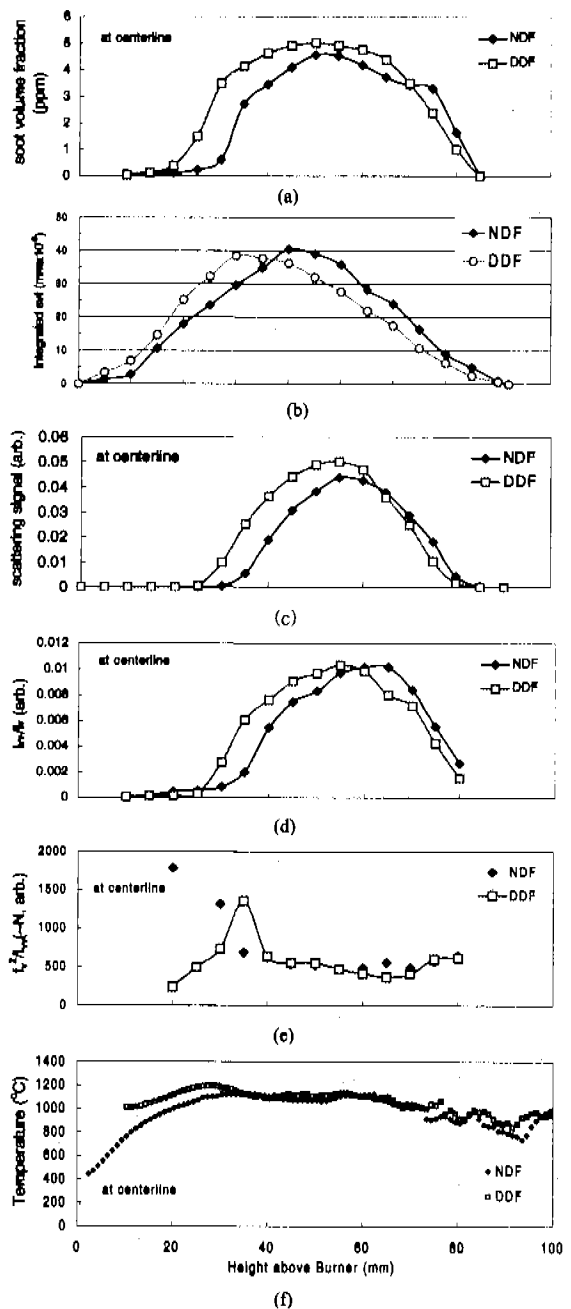


Fig. 6 Comparison between the centerline profiles of a double-concentric diffusion flame and a normal diffusion flame (a) Soot volume fraction (b) Scattering signal(I_w) (c) I_w/f_w (particle diameter) (d) f_w^2/I_w (number density) (e) temperature profiles.

이 값은 화염 전체에 걸쳐 매연 생성 경향을 비교하기 용이하다. 이 그림에서도 역시 DDF에서 매연 생성이 빨리 일어나고 있는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6의 (c)는 화염 중심선을 따라 측정한 매연 입자로부터의 산란광 신호를 나타낸 그림이다. 정상 확산 화염의 경우에 높이 10 mm에서 20 mm 까지는 산란 광 강도 I_w 는 지속적으로 증가한다. 이 지점에서의 체적 분율은 거의 검출되지 않고 있다. 동축 이중 확산 화염의 경우에도 유사하게 증가하며 그 강도는 정상 확산 화염보다 약간 크다. 높이 20 mm 이후에서 40 mm 까지는 정상 확산 화염의 경우에서 보다 동축 이중 확산 화염의 경우가 더 산란광 강도가 큰 값을 나타낸다. 그러나 40 mm에서 60 mm 지점까지는 두 화염 모두 비슷한 산란광 강도를 나타내고 있다. 높이 60 mm 지점 이후에는 양 화염에서 모두 비슷한 정도로 산란 광 강도가 급격하게 감소하고 있다.

산란 광 신호 I_w 는 그 신호 자체만으로는 매연 입자의 크기 또는 수 밀도 등을 나타내는 의미는 없다. 따라서 동일한 위치에서 측정한 매연 체적 분율 f_v 와의 관계를 통해서 매연 입자의 크기 D 및 수 밀도(particle number density) N 에 대해서 다음과 같이 추정한다.⁽⁶⁾

$$N \propto f_v^2 / I_w \quad (3)$$

$$D \propto (I_w / f_v)^{1/3} \quad (4)$$

위 관계식을 이용하여 Fig. 6의 (d)와 (e)에 측 방향으로 매연 입자의 크기의 분포와 관계 있는 I_w/f_v 그리고, 수 밀도와 관련이 있는 f_v^2/I_w 를 그려보았는데, 우선 (d)에서는 입자 크기의 성장과 관련이 있는 I_w/f_v 값의 변화를 관찰할 수 있다. 동축 이중 확산 화염의 경우는 정상 확산 화염 약 10 mm 정도 먼저인 약 20 mm 지점부터 증가하기 시작하며 따라서 입자의 크기가 증가하는 것으로 생각된다. 정상 확산 화염의 경우에 높이 30 mm에서 50 mm 지점까지 입자의 크기와 비례하는 I_w/f_v 의 신호가 약 5 배 정도로 급격히 증가하며 동축 이중 확산 화염의 경우에는 이 높이에서 정상 확산 화염에 비해 I_w/f_v 신호 값이 약 20 % 정도 더 크다. 그러나 정상 확산 화염의 경우에는 약 60 mm 지점에서 매연 입자의 크기가 최대를 나타내며 동축 이중 확산 화염의 경우에

는 약 55 mm 지점에서 매연 입자의 크기가 최대를 보이고 있다. 동축 이중 확산 화염의 경우에 예상대로 매연의 생성과 입자의 성장이 먼저 시작되는 것은 내부의 역 확산 화염에 의해 온도의 증가에 기인하는 것으로 생각된다.

양 화염에서의 매연 입자의 수 밀도와 관련이 있는 f_v^2/I_w 신호 값은 Fig. 6의 (e)에 나타냈다. 이 그림에서 보면 높이 30 mm 까지는 두 화염에 차이가 있으나, 정상 확산 화염과 동축 이중 확산 화염의 매연 입자 수 밀도가 30 mm 이후 화염 끝까지 거의 유사하다. 한편 정상 확산 화염에서 높이 10 mm에서 30 mm 지점 사이에서 수 밀도가 감소하는 것처럼 보이는 것은 하지만, 이 위치에서는 산란 신호와 매연 체적 분율이 매우 작은 값이어서 매연 입자의 수 밀도 값이 작은 측정 오차에 의해서도 영향을 크게 받기 때문에 본 실험 결과만으로는 수 밀도가 이와 같이 NDF에서 크게 감소하는 것이 사실인지 결론을 내릴 수는 없으며, 이 부분에 대한 연구가 더 필요하다고 생각하여 본 연구실에서 이에 대한 연구를 수행하고 있다.

Fig. 6의 (f)는 중심축 상에서의 온도 분포를 비교한 그림으로, DDF에서의 온도가 현저히 높은 것을 나타내고 있다. DDF의 경우 온도메이터를 10 mm 단면 이후부터 나타낸 것은 역확산화염 때문에 온도가 매우 높기 때문에 온도값이 매우 높아져 제의하였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 이중 확산 화염은 내측에 생성된 역 확산 화염의 영향으로 크게 외측 화염면의 안쪽과 내측 화염면의 바깥쪽 두 곳에서 매연 생성 지역이 형성되며, 이렇게 생성된 두 개의 매연 분포가 유동 흐름을 따라서 성장 및 산화 과정을 거친다.

(2) 이중 확산 화염에서는 화염의 중심부에서는 동일한 높이에서 정상 확산 화염보다 매연의 농도가 높은 반면, 화염의 외곽부에서는 매연의 최대 체적 분율이 낮다. 이러한 현상은 중앙 공기층의 질소가 연료에 확산되는 회석 효과에 의해

매연 입자의 성장이 억제되는 것이다. 즉, 화염 중심에서는 내측외 역 확산 화염에 의해서 온도 상승에 의한 매연 생성 촉진의 효과가 뚜렷하게 나타나는 반면에, 화염 외부 측에서는 내부의 역 확산화염의 영향이 크지 않아서 온도가 거의 동일하고 중앙 공기로부터 확산되는 질소에 의한 희석 효과때문에 매연의 생성이 억제되기 때문에 매연 농도가 오히려 낮다.

(3) 이중 확산 화염에서는 정상확산 화염에 비하여 화염의 중심측에서는 화염 내부의 온도가 높다. 그러나, 화염 외곽의 화염대 위치에서는 온도가 거의 동일하다.

참고문헌

- (1) Santoro, R. J., Semerjian H. G. and Dobbins, R. A., 1983, *Combustion and Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.
- (2) Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, J. J. and Semerjian, H. G., 1987, *Combustion Science and Technology*, Vol. 53, pp. 89~115.
- (3) Axelbaum, R. L. and Law, C. K., 1990, *Twenty-third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1517~1523.
- (4) Kent, J. H. and Honnery, D. R., 1990, *Combustion and Flame*, Vol. 79, pp. 287~298.
- (5) Makel, D. B. and Kennedy, I. M., 1994, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 97, pp. 303~314.
- (6) 황준영, 1995, "확산화염의 매연특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- (7) 정종수, 이교우, 1997, "동축 이중 확산화염에 대한 중앙 공기제트 유동의 영향," '97 대한기계학회 춘계학술대회논문집(II), pp. 37~42.
- (8) 고범승, 정종수, 이교우, 강경태, 1998, "동축 이중 확산 화염의 매연 생성 특성," 1998년도 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), pp. 674~679 (1998. 4. 24 - 25, 진주 경상대학교).
- (9) 정종수, 이교우, 1998, "동축 이중 확산 화염 외 매연 입자 농도 및 PAH 분포," 제16회 한국연소학회 심포지움 논문집, pp. 45~50, 1998. 4.10 (서울대학교, 서울).
- (10) 최강림, 남평우, 정종수, 이교우, 1998, "동축 이중확산화염의 매연 생성에 미치는 산화제의 영향," 1998 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), pp. 440~445.
- (11) Robert L. Powell, William J. Hall, Clyde H. Hyink, Jr., and Larry L. Sparks, *Thermocouple Reference Tables Based on the IPTS-68*, OMEGA PRESS, 1975.
- (12) Dobbins, R. A., Santoro, R. J. and Semerjian, H. G., 1984, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 92, pp. 208~237.