

# 동축류 확산화염의 OH 라디칼 분포 및 매연 특성

이원남\*, 송영훈\*\*, 차민석\*\*\*

## OH Radical Distribution and Sooting Characteristics in Co-Flow Diffusion Flames

Wonnam Lee\*, Young-Hoon Song\*\*, Min Suk Cha\*\*\*

Key Words : soot(매연), OH radical(OH 라디칼), PLIF(평면유도형광), diffusion flame(확산화염)

### ABSTRACT

The soot and OH radical distributions have been experimentally studied in ethylene and propane laminar diffusion flames. The integrated soot volume fraction was measured along the centerline of a flame using a laser light extinction method. Planar laser light scattering and PLIF techniques are employed for the soot and OH radical distribution measurements utilizing Nd:YAG laser and OPO, FDO system. The concentration of OH radical is rapidly decreased at the edge of sooting region, which implies the importance of OH radical species on the soot oxidation process. For ethylene flames, the addition of air in fuel moves the OH radical distribution towards the center line of a flame at the soot oxidation region, while the concentration of OH radical remains relatively high at the soot formation region. The interaction between soot particles and OH radicals becomes more active with fuel-air at the soot oxidation region. For propane flames, however, any indication of the increased interaction between soot particles and OH radicals with fuel-air was not noticed.

#### 1. 서론

확산화염은 다양한 실용 연소기기의 연소과정에 이용되고 있다. 이때 확산화염의 연소 특성상 매연입자가 발생하게 되며, 매연특성은 연소기기의 효율이나 수명에 영향을 미치고 또한 공해 문제를 유발하기도 한다. 확산화염에서 발생하는 매연입자는 생성과 산화과정을 거치므로 화염에서의 매연특성을 이해하기 위한 많은 연구가 매연 생성 및 산화 과정에 대하여 수행되어왔다. 층류 확산화염에서의 연구 결과는 매연 생성 또는 산화 특성에 있어서 화염의 구조가 중요하며,<sup>(1,2)</sup> 또한 확산 화염에서의 매연 특성은 매연 입자의 산화뿐만 아니라 precursor로 알려진 PAH의 생성, 산화에도 크게 영향을 받는다고 알려져 있다.<sup>(3,4)</sup> 확산화염에서의 매연생성율은 화염의 온도, 연료의 농도, 압력, 연료 구조, 첨가제 등 여러 가지 요인들에 의해서 영향을 받으며, 매연 입자의 산화는 주로 OH 라디칼 및 O<sub>2</sub>에 의해서 이루어진다고 알려져 있다.<sup>(5,7)</sup> 따라서 화염의 매연특성

---

\* 정회원, 단국대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 한국기계연구원

\*\*\* 서울대학교 대학원

의 변화는 매연입자와 OH 라디칼 분포의 관계로부터 이해할 수 있으며, 특히 매연이 산화되는 지역의 OH 라디칼 분포는 매연입자의 산화율의 변화와 밀접한 관계를 갖게 된다.

에틸렌 확산화염의 연료에 소량의 공기를 첨가할 경우 매연의 발생과정에 산소의 화학적 효과가 관찰되었으며, 이는 매연생성과 산화율의 변화로 설명되었다.<sup>(8)</sup> 그러나 연료라인에 공기가 첨가된 프로판 확산화염에서는 질소로 희석된 화염과 매연 발생이 크게 다르지 않았으며, 연료구조의 차이에서 비롯된 매연입자의 생성 또는 산화 과정의 변화 가능성이 제시되었다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 연료에 첨가된 공기의 매연 발생에 대한 선택적 영향을 이해하기 위해서, 매연입자의 체적분율, 분포 및 OH 라디칼 분포 변화에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

동축류 층류 확산화염을 사용하여 매연생성 특성과 OH 라디칼 분포를 측정하였으며, 그림 1 은 사용된 동축류 버너의 구조를 보여주고 있다. 연료는 버너의 중심에 위치한 내경 7.94 mm, 외경 9.53 mm의 황동관을 통하여 공급되며, 층류 확산화염을 형성하기 위하여 연료관의 주위로 동축의 내경 76 mm 관을 통하여 1000 scc/s 유량의 공기가 공급되었다.

확산화염의 연료에 첨가되는 질소와 공기가 매연 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 적분된 매연체적분율(integrated soot volume fraction)과 OH 라디칼 분포를 각각 레이저 광소멸법(laser extinction method)과 PLIF(planar laser induced fluorescence) 기법을 사용하여 측정하였다. 실험에 C.P. 등급(순도 99.5% 이상)의 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)과 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이 연료로 사용되었다. 연료 유량은 각각 3 scc/s(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 와 2 scc/s(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)로 설정하여 연료에 관계없이 연료라인을 통하여 공급되는 탄소 질량 유량(carbon mass flow rate)을 일정하게 유지하였으며, 연료에 첨가된 공기와 질소는 각각 0, 0.5, 1, 2, 3, 4.5, 7 scc/s 의 7 단계로 변화시켰다. 그림 2 는 순수한 에틸렌을 연료로 사용한 확산화염의 직접사진을 보여주고 있다. 본 실험에서 연료에 첨가된 질소와 공기의 유량은 비교적 적은 양으로 모든 실험 조건에서 확산화염의 특성이 유지됨을 알 수 있었다.

주어진 화염의 높이에서의 적분된 매연 체적 분율,  $F_v$ , 는 화염의 중심축을 통과하는 레이저광의 경로를 따라 매연 체적 분율  $\phi$  을 반경  $r$  에 대하여 적분한 값으로

$$F_v = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi dr = \frac{\lambda}{-Im\left\{\frac{(m^2-1)}{(m^2+2)}\right\}6\pi} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

의 식을 이용하여 측정하였다. 예기에서  $I_0$  와  $I$  는 각각 화염 전·후의 레이저광 세기를 나타내며, 매연입자의 굴절률은  $m = 1.89 - 0.48i$ <sup>(9)</sup>, 광원으로는 파장  $\lambda = 623.8$  nm의 헬륨-네온 레이저(10 mW)를 사용하였다.

OH 라디칼 분포는 PLIF 기법을 사용하였으며, 그림 3 은 PLIF 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 레이저 광원으로는 Nd:YAG 레이저(GCR 250-10, Spectra Physics)와 OPO(Optical Parametric Oscillator, MOPO 730D10, Spectra Physics)이 사용되었다. Nd:YAG 레이저의 3 차 조화 빔(355 nm, 550 mJ)으로 OPO를 펌핑하면 440 - 690 nm 의 가시광선(signal)과 730 - 2000 nm의 적외선(idler)이 발생하게 된다. 이때 펌핑 에너지의 약 30 %는 마스터 오실레이터로 유입되며 나머지는 파워 오실레이터로 보내지게 된다. 마스터 오실레이터에서는 BBO(Beta Barium Borate) 크리스탈에 의하여 큰 선폭(line width)으로 발진된 signal(가시광선)과 idler(적외선) 광이 그레이팅에 의하여 선택된 파장에 대하여 0.2 cm<sup>-1</sup> 선폭으로 증폭되어 파워 오실레이터로 유입되게 된다. 이렇게 유입된 적외선(idler)은 파워 오실레이터 발진의 시더(Seeder)로서 BBO 크리스탈에 적합하게(matching)되어 원하는 파장의 가시광선과 적외선 레이저광을 얻게 된다. 가시광선

(signal)은 주파수 배가 장치(FDO)를 통하면 자외선의 레이저광을 형성하게 된다. 이와 같은 Nd:YAG, OPO 및 FDO 장치를 이용하여  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  (1, 0) 밴드 Q1(6) 라인(282.948 nm, 최대출력 5 mJ)의 UV 레이저광으로 화염장의 OH 라디칼을 여기 시킨 후 발생하는 LIF 신호를 측정하였다.

LIF 신호의 측정에는 모노크로메이터(Jobin Yvon) 및 OMA(Princeton Instrument)를 이용한 점 측정법과 105 mm UV 렌즈(Nikko)를 장착한 ICCD 카메라(Princeton Instrument)를 사용한 2-D 측정법이 사용되었다. 모노크로메이터를 이용하여 OH 라디칼의 (0, 0) 밴드의 LIF 신호를 측정하여 OH 라디칼의 여기파장을 확인하였다. 그림 4의 결과로부터 비교적 온도에 덜 민감하며 신호가 강한 (1, 0) 밴드 Q1(6) 라인을 확인할 수 있으며, 이 여기 파장을 이용하여 OH 라디칼의 분포를 알아보기 위하여 PLIF 측정을 하였다. 레이저 빔은 실린더 렌즈( $f = 50$  mm)와 볼록렌즈( $f = 1000$  mm)를 통과하여 화염의 중심축을 통과하는 폭 120 mm의 평면광을 형성하였으며 90°에서 2-D LIF 신호를 검출하였다. ICCD 카메라는 제어기(ST-138, Princeton Instrument)와 펄스 발생기(PG-200, Princeton Instrument)를 통하여 -32 °C로 냉각시키고 레이저 펄스와 동기 되도록 하였으며, 카메라의 gating 시간은 100 ns로 설정하여 화염 발광 신호를 억제하였다. 화염의 매연입자에서 발생하는 레이저 산란신호(Mie 산란)는 WG-305와 UG-11 필터를 사용하여 제거하였으며, OH 라디칼의 (0, 0) 밴드의 LIF 신호를 측정하도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 에틸렌 확산화염

그림 5는 에틸렌 확산화염에서의 OH 라디칼 분포와 매연입자 분포를 보여주고 있다. 버너의 노즐로부터 연료가 공급되며 화염이 형성되고 화염주위로 OH 라디칼이 발달되는 것을 볼 수 있다. 이 초기화염 지역에서는 매연입자와 OH 라디칼 분포 지역이 분리되어 있으며, 매연입자가 연료지역에서 생성되는 것을 알 수 있다. 반면에 화염의 상부에서는 OH 라디칼과 매연입자 분포 지역이 만나며 따라서 OH 라디칼이 매연입자를 산화시키는 것을 볼 수 있다. 화염 상부의 매연입자가 산화되는 지역에서는 매연입자가 분포하는 경계와 OH 라디칼의 농도가 급격히 감소하는 지역이 일치하며, 매연입자의 산화 과정에 OH 라디칼이 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6은 동일한 화염에서 버너 노즐로부터 화염의 높이에 따른 OH 라디칼과 매연입자의 상대적 위치를 보여주고 있다. 화염 높이 8.8 mm에서는 단지 OH 라디칼만 존재하며, 화염의 내부에서는 매연입자의 precursor인 PAH가 형성되고 있다. 화염 높이 22.4 mm에서는 화염의 외각으로 OH 라디칼이 분포하고 매연입자는 화염 내부에 OH 라디칼과 분리되어 존재하며 이 높이에서는 매연의 생성과정만이 진행되고 있음을 알 수 있다. 화염의 상부로 이동함에 따라 35.2 mm의 높이에서는 매연입자가 OH 라디칼과 접촉하여 산화가 시작되며, 43.2 mm 높이에서는 매연입자와 OH 라디칼 분포지역이 중첩되어 매연입자의 산화가 매우 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 화염 높이 65.6 mm에서는 매연입자가 모두 산화되고 화염의 중심부위에 단지 OH 라디칼만이 존재하는 것을 알 수 있다.

확산화염의 연료를 질소로 희석하면 연료 농도의 감소에 따라 매연 생성반응 속도가 느려지게 된다.<sup>(10,11)</sup> 그림 7은 연료가 질소로 희석되는 에틸렌 화염에서 측정된 적분된 매연체적분율의 변화를 보여주며, 희석제인 질소의 증가에 따라 매연생성율이 감소됨을 알 수 있다. 그러나 에틸렌 화염의 연료에 공기를 첨가하면 같은 양의 질소 첨가와 비교하여 더 많은 양의 매연이 발생하며 이는 첨가된 공기중의 산소가 매연생성 메커니즘의 변화를 가져오기 때문으로 알려져 있다.<sup>(12,13)</sup> 그림 8은 에틸렌 화염의 연료에 공기를 첨가할 때 발생하는 매연특성의 변화를 보여주고 있다. 질소로 희석된 경우와는 다르게 연료의 농도가 감소함에도 매연의 생성율과 산화율이 크게 변하

지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 질소와 공기 첨가에 따른 매연 생성 특성의 차이는 그림 9 와 10에서 잘 알 수 있다. 그림 9 와 10은 각각 에틸렌/질소 및 에틸렌/공기 화염에서의 화염 높 이에 따른  $F_w$  의 변화인  $dF_w/dz$  값을 보여준다. 그림 9 는 에틸렌의 연료를 질소로 희석하면 질 소의 증가에 따라 매연생성율( $dF_w/dz > 0$  지역)과 매연산화율( $dF_w/dz < 0$  지역)이 크게 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 연료 농도의 감소에 따라 반응율이 낮아지기 때문이다.<sup>(10)</sup> 반면에 연료 에 공기가 첨가되는 경우에는 그림 10 에서 매연생성율( $dF_w/dz > 0$  지역)과 매연산화율( $dF_w/dz < 0$  지역)이 모두 첨가되는 공기에 의해 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

확산화염에서의 매연생성율은 매연입자의 생성 메카니즘, 화염 온도 등에 크게 영향을 받으며, 매연산화 특성은 OH 라디칼 분포, 화염 온도에 따라 정해진다고 알려져 있다. 그림 11 은 질소 로 희석된 에틸렌 화염의 OH 라디칼 분포를 보여주고 있다. 연료에 첨가된 질소의 증가에 따라 OH 라디칼의 분포가 화염의 상부로 이동하고, 생성되는 매연의 감소에 따라 화염 선단 부위의 OH 라디칼이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 화염 내에서 생성되는 매연의 감소에 따라 산화 에 요구되는 OH 라디칼이 상대적으로 적어지기 때문이라고 생각된다. 그림 12 는 공기가 첨가된 에틸렌 화염의 OH 라디칼 분포를 보여주며, 질소로 희석된 경우와 다르게, 첨가되는 공기의 증가 에도 연소반응의 초기지역인 화염 하단에서 OH 라디칼 농도가 계속하여 높게 나타나고 있다. 이 는 에틸렌에 공기가 첨가될 경우 화염 하단 부분에서는 연료 농도의 감소에도 불구하고 매연생성 율의 변화가 크지 않다는 그림 10 의 결과를 설명해 주고 있다. 또한 그림 12 로부터 화염의 상 부에서는 첨가되는 공기가 증가하면 OH 라디칼의 분포가 화염의 중심으로 이동하며, 따라서 공기 의 첨가에 따라 OH 라디칼에 의한 매연입자의 산화 반응이 일찍 시작되는 것을 알 수 있다. 이 와 같은 OH 라디칼의 분포 변화는 그림 9 와 10에서 나타난 매연생성 및 산화 특성을 잘 설명해 주고 있다.

#### 프로판 확산화염

에틸렌 확산화염에서는 연료에 첨가된 공기가 매연 생성특성을 크게 변화시키는 반면에 프로판 확산화염에서는 연료에 첨가된 공기의 화학적 효과가 거의 관찰되지 않았다.<sup>(8)</sup> 그림 13 과 14 는 각각 질소와 공기 첨가에 따른 프로판 화염의 적분된 매연체적분율의 변화를 보여주고 있다. 에 틸렌의 결과와 비교하여, 프로판의 경우 매연이 생성 및 산화되는 높이의 변화는 있지만 생성되는 매연의 양은 공기와 질소의 첨가에 따라 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 그림 15 와 16 은 프로 판 화염에 각각 질소와 공기가 첨가될 경우 화염 높이에 따른  $dF_w/dz$  값을 보여주고 있다. 연료 가 질소로 희석되면 공기가 첨가되는 경우에 비하여 매연의 생성과 산화 지역이 화염의 상부로 이동하지만 첨가된 질소와 공기의 유량이 같으면 매연생성율과 매연산화율의 크기가 유사함을 알 수 있다. 이와 같은 프로판 화염의 매연생성특성은 프로판 화염의 OH 라디칼 분포 특성에서도 알 수 있다. 그림 17 과 18 은 각각 질소와 공기를 첨가한 프로판 확산화염의 OH 라디칼 분포를 보여주며, 공기를 첨가한 경우 공기의 증가에 따라 화염 길이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러 나 매연이 산화되는 지역인 화염 상부의 OH 라디칼 분포는 높이의 변화는 있지만 에틸렌의 결과 에서와 같은 화염 반경 방향의 변화는 관찰되지 않았다. 이러한 OH 라디칼의 분포 특성은 질소 와 공기의 첨가에 따른 매연산화율의 크기가 비슷함을 보여준 그림 15 와 16 의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 19 와 20 는 앞에서 설명한 연료에 첨가된 공기가 에틸렌 화염과 프로판 화염의 매연생성 및 산화 특성에 미치는 영향에 대한 차이를 화염내의 매연입자와 OH 라디칼 분포의 관계로 보여 주고 있다. 각각의 그림은 에틸렌과 프로판 화염에서 순수 연료, 질소(3 scc/s) 첨가, 공기(3 scc/s) 첨가 경우의 OH 라디칼과 매연입자의 분포를 보여주고 있다. 이 때 연료에 질소 또는 공

기가 첨가되면 발생하는 매연이 매우 적으므로, 이 그림에서는 매연입자의 영상을 임의의 값으로 증폭하여 매연입자와 OH 라디칼 분포의 상대적 위치를 보여주고 있으며, 매연입자는 화염의 내측에 OH 라디칼은 화염의 외측에 분포하고 있다. 에틸렌 화염에서는 질소와 공기를 첨가할 경우 매연생성이 시작되는 위치의 큰 변화가 없지만, 프로판 화염에서는 질소를 첨가하면 매연생성 위치가 화염의 상부로 이동하였다. 또한 에틸렌 화염에 공기를 첨가하면 화염의 상부에서 OH 라디칼과 매연입자의 분포가 모두 화염의 중심으로 이동하며, 매연입자의 산화반응이 활발해지는 것을 알 수 있다. 반면에 프로판의 경우 공기를 첨가한 화염에서의 매연입자 산화반응은 질소를 첨가한 화염보다 낮은 높이에서 이루어지지만 OH 라디칼과 매연입자 분포의 반경방향 상대위치는 비슷하며, 매연입자 산화특성의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

에틸렌과 프로판 확산화염의 연료를 질소와 공기로 희석하며 매연 특성과 OH 라디칼 분포의 변화를 레이저 광산란 및 광소멸법과 평면 레이저 유도 형광법(PLIF)을 이용하여 알아보았다. 확산화염에서 매연입자가 산화되는 지역에서는 매연입자가 분포하는 경계와 OH 라디칼의 농도가 급격히 감소하는 지역이 일치하였으며, 매연입자의 산화과정에서 OH 라디칼이 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 에틸렌 화염에서 공기가 첨가될 경우 화염 하단의 OH 라디칼 농도는 계속하여 높게 나타났으며, 연료의 물분을 감소에도 매연생성율의 변화가 크지 않다는 것을 설명할 수 있었다. 화염 상부에서는 첨가되는 공기가 증가하면 OH 라디칼의 분포가 화염의 중심으로 이동하며 OH 라디칼에 의한 매연입자의 산화 반응이 일찍 시작되었다. 반면에 프로판 확산화염에서는 연료에 공기가 첨가되었을 경우, 매연이 산화되는 지역인 화염 상부의 OH 라디칼 분포는 높이의 변화는 있지만 에틸렌의 결과에서와 같은 화염 반경 방향의 변화는 관찰되지 않았다.

매연입자와 OH 라디칼 분포의 차이로부터, 에틸렌과 프로판의 연료에 첨가된 공기가 매연생성 특성에 미치는 영향이 서로 다를 수 있었다. 에틸렌 화염에 공기를 첨가하면 화염의 상부에서 OH 라디칼과 매연입자의 분포는 모두 화염의 중심으로 이동하며, 매연입자의 산화반응이 활발해지는 것을 알 수 있었다. 프로판의 경우 공기를 첨가하면 매연입자의 산화가 질소를 첨가한 화염보다 낮은 높이에서 이루어지지만, OH 라디칼과 매연입자의 반경방향 분포특성이 비슷하고, 매연입자 산화특성의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있었다. 또한 확산화염의 연료라인에 공기 또는 질소가 첨가되면 연료라인의 연료 물분율이 감소하며 화염에서 매연이 적게 생성되고 매연입자를 산화시키기 위한 OH 라디칼이 비교적 적게되어 화염의 후류에 많은 OH 라디칼이 존재하는 것이 관찰되었다.

#### 참고문헌

1. Kang, K. T., Hwang, J. Y., Chung, S. H. and Lee, W., "Soot Zone Structure and Sooting Limit in Diffusion Flames: Comparison of Counterflow and Co-Flow Flames," *Combust. Flame*, 109, 266-281 (1997)
2. Du, J. and Axelbaum, R. L., "The Effect of Flame Structure on Soot-Particle Inception in Diffusion Flames," *Combust. Flames*, 100, 367-375 (1995)
3. Neoh, K. G., Howard, J. B. and Sarofim, A. F., "Effect of Oxidation on Physical Structure of Soot," *Twentieth Symp. Int. on Combust.*, 951-958, The Combustion Institute (1984)
4. Lam, F. W., Howard, J. B. and Longwell, J. P., "The Behavior of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons During the Early Stages of Soot Formation," *Twenty-Second Symp. Int. on*

- Combust.*, 323-332, The Combustion Institute (1989)
5. Smyth, K. C., Tjossem, J. H., Hamins, A. and Miller, J. H., "Concentration Measurement of OH and Equilibrium Analysis in a Laminar Methane-Air Diffusion Flame," *Combust. Flame*, 79, 366-380 (1990)
  6. Puri, R., Santoro, R. J. and Smyth, K. C., "The Oxidation of Soot and Carbon Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames," *Combust. Flame*, 97, 125-144 (1994)
  7. Kennedy, I. M., Yam, C., Rapp, D. C. and Santoro, R. J., "Modeling and Measurements of Soot and Species in a Laminar Diffusion Flame," *Combust. Flame* 107, 368-382 (1996)
  8. 강희곤, 이원남, "확산화염 매연생성에 미치는 희석제 및 산화제의 영향," 대한기계학회 1996년 춘계학술대회논문집(B), 548-553 (1996)
  9. Lee, S. C. and Tien, C. L., "Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames," *Eighteenth Symp. Int. on Combust.*, The combustion Institute, 1159-1166 (1980)
  10. Axelbaum, R. L. and Law, C. K. "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," *Twenty-Third Symp. Intl. on Combust.*, The combustion Institute, 1571-1523, (1990)
  11. Gülder, Ö. L. and Snelling, D. R., "Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames," *Combust. Flame*, 92, 115-124 (1993)
  12. Hura, H. S. and Glassman, I. "Soot Formation in Diffusion Flames of Fuel/Oxygen Mixtures", *Twenty-Second Symp. Intl. on Combust.*, The combustion Institute, 1571-1523, (1988)
  13. Gülder, Ö. L., "Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane, and n-Butane Diffusion Flames," *Combust. Flame*, 101, 302-310 (1995)

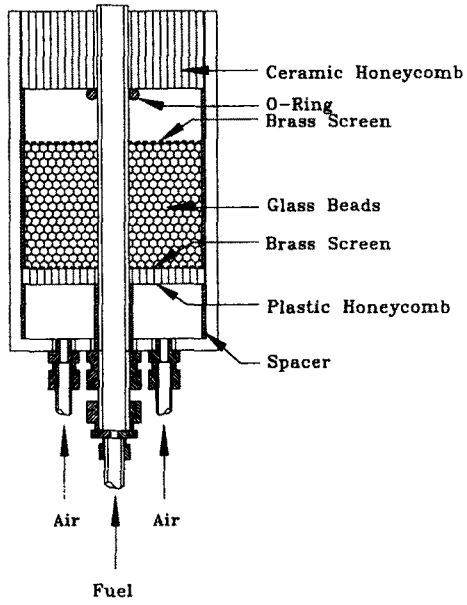


그림 1. 동축류 버너

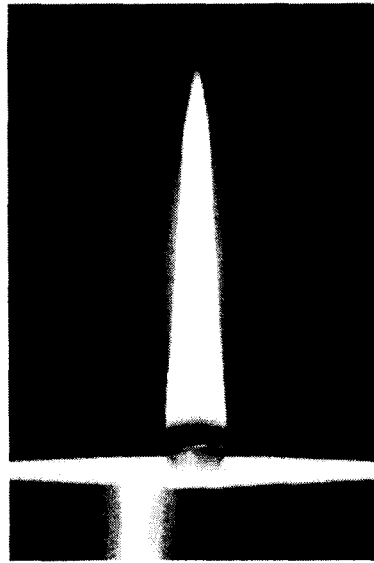


그림 2. 에틸렌 확산화염

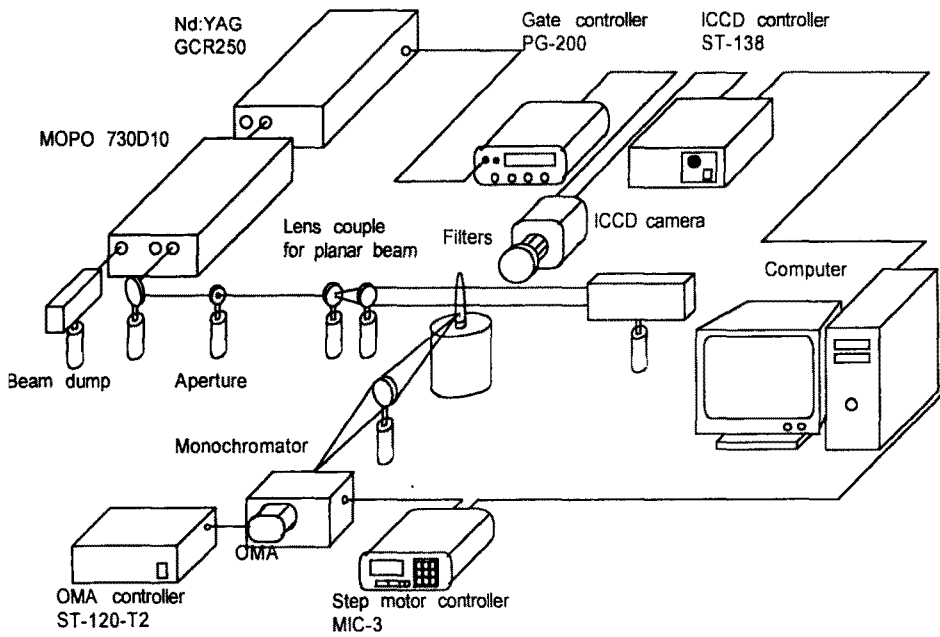


그림 3. PLIF 실험장치

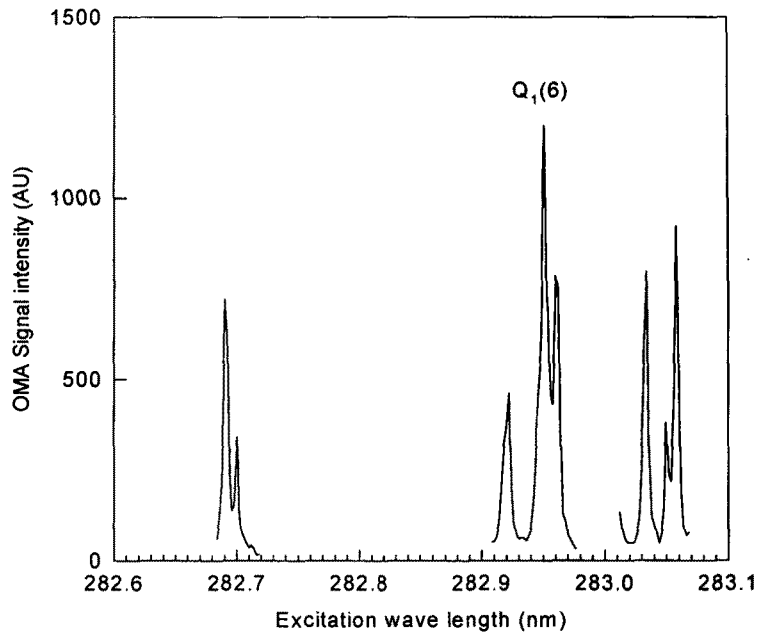


그림 4. OH LIF 신호

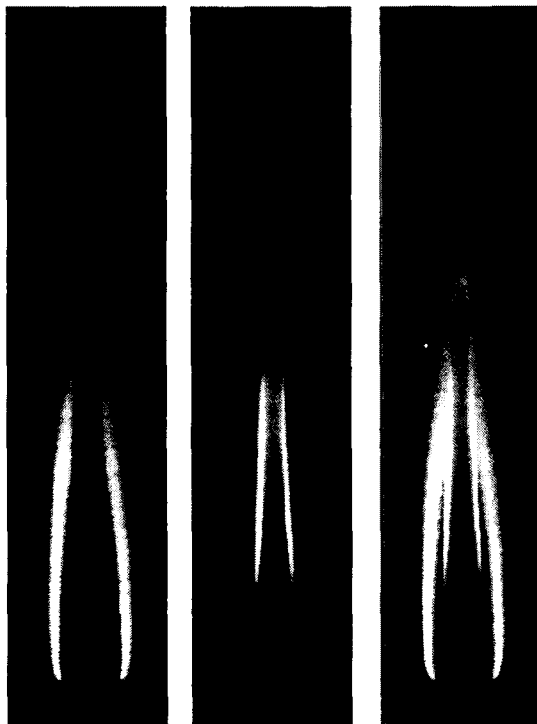


그림 5 에틸렌 확산화염의 (a) OH 라디칼 분포, (b) 매연입자 분포 및 (c) OH 라디칼과 매연입자

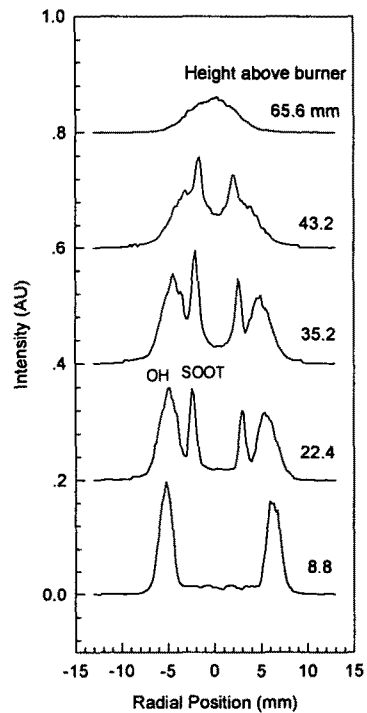


그림 6. 화염의 높이에 따른 OH 라디칼과 매연입자 분포 변화



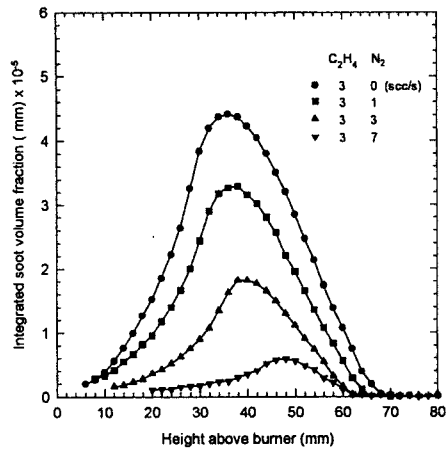


그림 7. 질소로 희석된 에틸렌 화염의 매연특성 변화

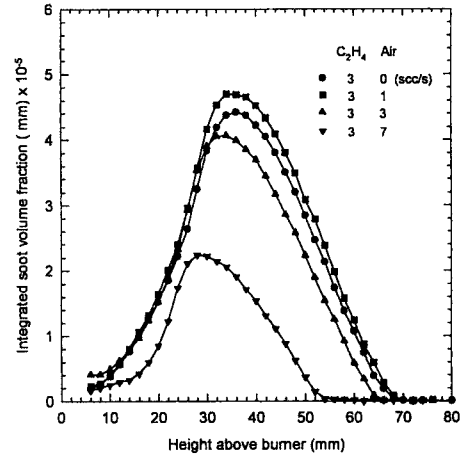


그림 8. 공기가 첨가된 에틸렌 화염의 매연특성 변화

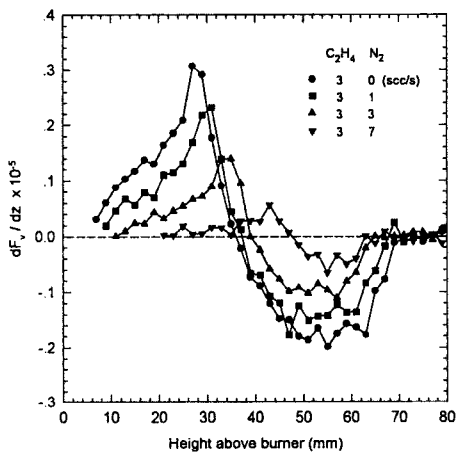


그림 9. 질소로 희석된 에틸렌 화염의 매연생성을 변화

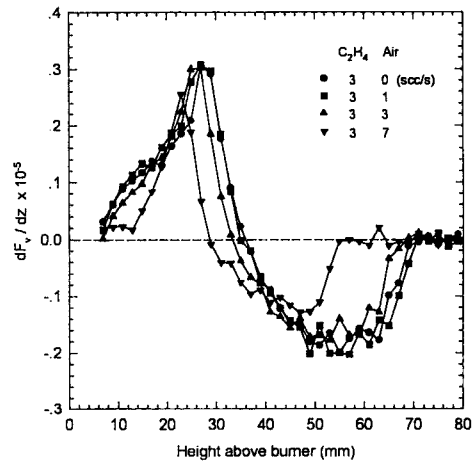


그림 10. 공기가 첨가된 에틸렌 화염의 매연생성을 변화

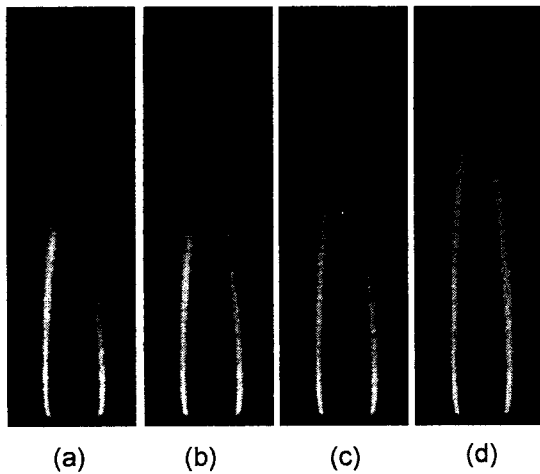


그림 11. 질소로 희석된 에틸렌 화염의 OH 라디칼 분포 변화.  $C_2H_4 = 3$  scc/s,  $N_2 =$  (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7 scc/s

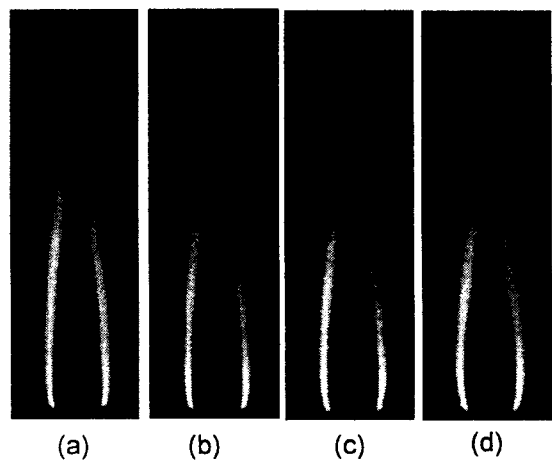


그림 12. 공기가 첨가된 에틸렌 화염의 OH 라디칼 분포 변화.  $C_2H_4 = 3$  scc/s, Air = (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7 scc/s

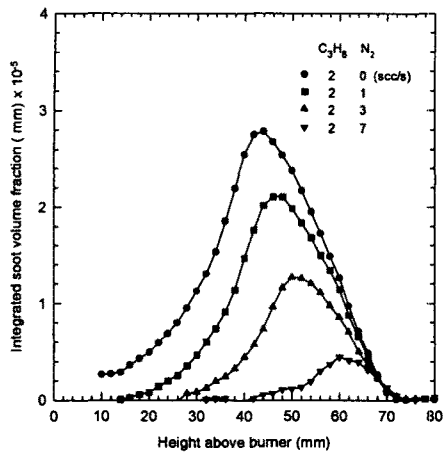


그림 13. 질소로 희석된 프로판 화염의 매연특성 변화

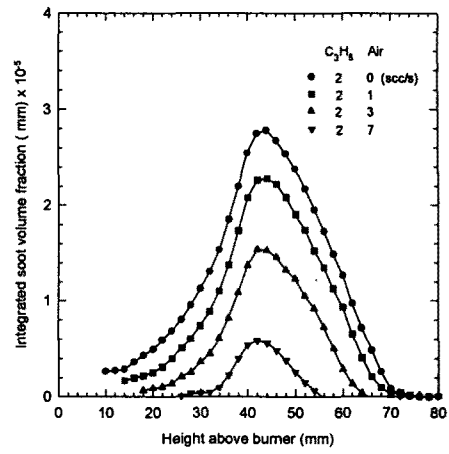


그림 14. 공기가 첨가된 프로판 화염의 매연특성 변화

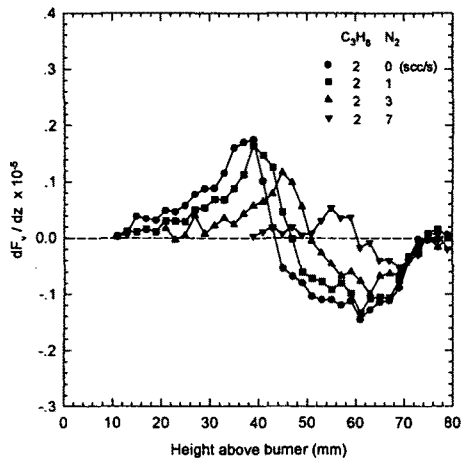


그림 15. 질소로 희석된 프로판 화염의 매연생성을 변화

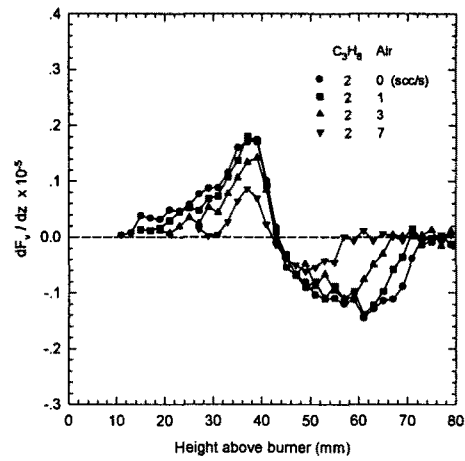


그림 16. 공기가 첨가된 프로판 화염의 매연생성을 변화

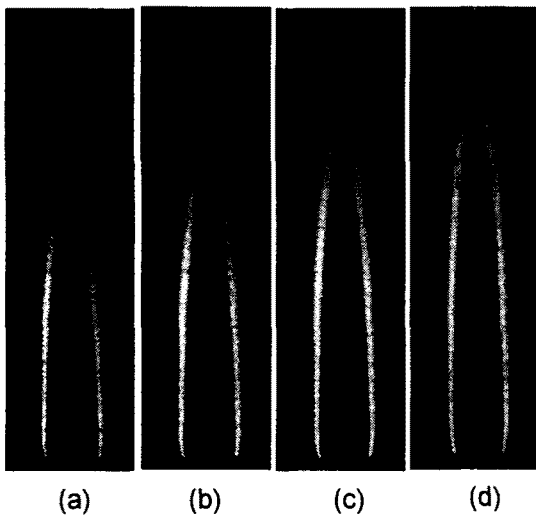


그림 17. 질소로 희석된 프로판 화염의 OH 라디칼 분포 변화.  $C_3H_8 = 2$  scc/s,  $N_2 =$  (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7 scc/s

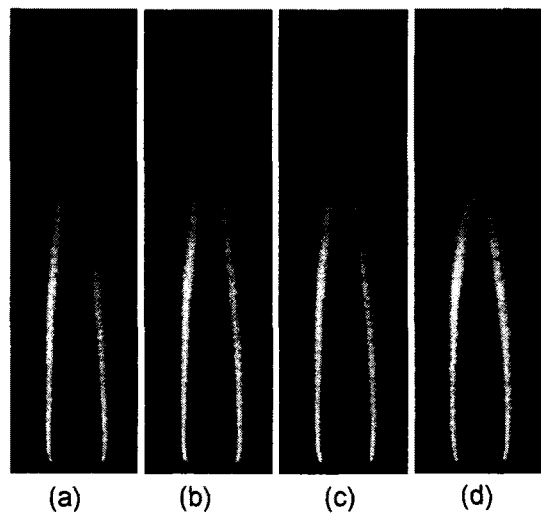
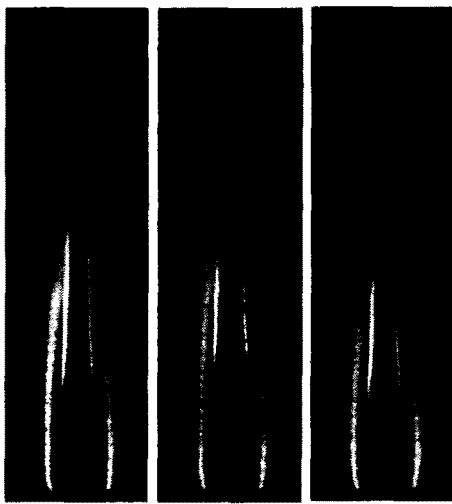
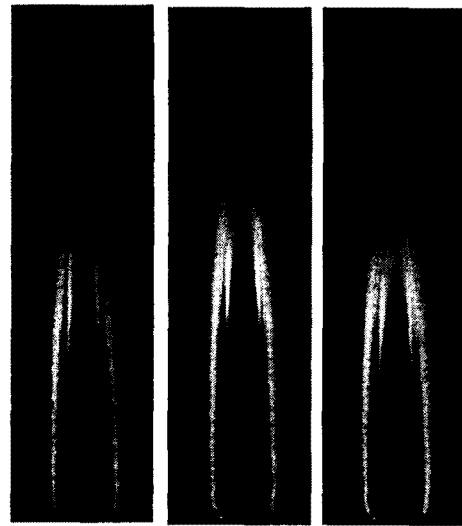


그림 18. 공기가 첨가된 프로판 화염의 OH 라디칼 분포 변화.  $C_3H_8 = 2$  scc/s, Air = (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7 scc/s



(a) (b) (c)

그림 19. 에틸렌 화염의 OH 라디칼 및 매연입자 분포 변화. (a)  $C_2H_4 = 3 \text{ scc/s}$   
 (b)  $C_2H_4 + N_2 = 3 + 3 \text{ scc/s}$   
 (c)  $C_2H_4 + \text{Air} = 3 + 3 \text{ scc/s}$



(a) (b) (c)

그림 20. 프로판 화염의 OH 라디칼 및 매연입자 분포 변화. (a)  $C_3H_8 = 2 \text{ scc/s}$   
 (b)  $C_3H_8 + N_2 = 2 + 3 \text{ scc/s}$   
 (c)  $C_3H_8 + \text{Air} = 2 + 3 \text{ scc/s}$