

산화제 결핍 분위기에서의 층류 확산화염내 OH, PAHs 및 그을음 분포

심성훈[†] · 신현동^{*}

(2001년 11월 14일 접수, 2002년 8월 23일 심사완료)

OH, PAHs and Soot Distribution in a Laminar Diffusion Flame Under Oxidizer Deficient Ambience

Sung Hoon Shim and Hyun Dong Shin

Key Words: Planar Laser Induced Fluorescence(PLIF, 평면 레이저 유도 형광법), OH Radical(수산활성기), Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs, 다고리 방향족 탄화수소), Soot(그을음), Confined Laminar Diffusion Flame(제한된 층류 확산화염), Oxidizer Deficient(산화제 결핍)

Abstract

We investigate the flame behavior and spatial distribution of OH, PAHs and soot in a confined buoyant diffusion flame with decrease of the coflowing air flow rate. Direct photographs and Schlieren images represent that flame is fully occupied by blue flame and becomes unstable, which is partially detached to the fuel nozzle tip in a near extinction flame under extremely reduced oxidizer condition. Laser induced fluorescence profiles clearly shows that OH is still generated in near-extinction flame, although intensity becomes weak with decreasing air flow rate. But soot scattering image cannot be seen any more in an oxidizer deficient ambience and simultaneously the PAHs are widely distributed downstream. These results are due to that a decrease of oxygen concentration in the combustion chamber leads to a temperature drop of flame, as a consequence, to a delay in soot growth and to a expanding of the PAHs, as soot precursors.

기호설명

- Q_{fuel} : 연료가스 유량 (cc/min)
- V_{inj} : 연료 노즐 출구 평균 유속 (cm/s)
- Q_{air} : 동축류 공기 공급 유량 (l/min)
- V_{air} : 동축류 공기 평균 유속 (cm/s)
- $Q_{air}/Q_{sto.}$: 이론공기량에 대한 공급 공기량의 비

1. 서론

확산화염은 연료가 연소하는 가장 기본적인 형태의 화염으로 연료와 산화제의 분포에 따라 확산과 유동이 관계하는 상호작용이 반응을 지배한다. 본 연구에서는 연소실내에 형성된 층류 확산화염에 대하여 동축류로 공급되는 산화제의 양을 감소시키면서 나타나는 화염의 변화에 대하여 연구를 수행하였다. 모든 고체, 기체, 액체 연료의 연소의 출발은 열분해(pyrolysis)로 시작되며 이 과정에서 연료의 화학적 구조가 와해되어 새로운 화학종을 형성하는 반응이 이루어진다.⁽¹⁾ 그러나, 아직까지도 화염의 형성 초기에 나타나는 화염의 구조나 화학종의 분포에 관한 실험적인 자료는 절대적으로 부족한 상태에 있다. 이는 착화과정 이 아주 짧은 시간 크기(time scale) 내에 이루어지기 때문에 실험적으로 그 과정의 화염구조를

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 열유체환경연구부

E-mail : shshim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7349 FAX : (042)868-7284

^{*} 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

분석한다는 것은 거의 불가능한 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 이의 대안으로 상대적으로 그 과정이 느린 속도로 진행되어 계측이 가능한 상태의 화염을 이용하고자 하였다. 즉, 제한된 연소실내의 층류 확산화염에 대하여 인위적으로 산화제를 감소시키면서 소염에 이르는 화염의 구조를 조사함으로써 역으로 연료가 착화되어 화염이 형성되어 가는 과정을 유추할 수 있는 가능성을 찾는 데에 그 목적을 두었다.

산화제의 결핍, 엄밀히 말해서 화염면으로 연소에 충분한 산소가 전달되지 못함으로써 발생하는 소염 현상은 하나의 비정상 거동으로서, 이 비정상 화염에서 그을음(soot) 및 각종의 활성기(radical)와 같은 화학종들(species)의 농도 분포에 관해서 정보를 얻을 수 있다면, 앞에서 언급한 바와 같이 역의 과정으로 착화시 연료가 어떤 과정을 거쳐 정상화염이 형성되는 가를 유추할 수 있는 좋은 자료가 될 수 있을 것이다.

연료 과농 연소에서 생성되는 그을음과 다중고리 방향족 탄화수소(PAHs)는 독성과 발암성을 가진 공해물질로 알려져 있다. 화염에서의 그을음 생성과정과 그 전구물질로서의 PAHs의 역할에 대한 논의는 상당히 많다.^(2,3) 근래에는 레이저 계측 기술의 발달로 이와 관련한 연구는 더욱 활기를 띄게 되었다. 1981년에 Lorenzo 등⁽⁴⁾은 CH_4/O_2 화염에 대하여 레이저 유도 형광법(LIF, Laser Induced Fluorescence)을 이용하여 PAHs 분포를 측정하였으며, 1997년에 Smyth⁽⁵⁾ 등은 역시 LIF를 이용하여 메탄, 프로판, 에틸렌 확산화염에 대하여 안정상태와 필러거림(flickering)상태에 대하여 그을음과 PAHs 및 OH 활성기(radical)의 분포 양상을 측정하였다.

1997년에 Vander Wal 등⁽⁶⁾은 LII (Laser Induced Incandescence)와 LIF를 동시에 사용하여 분류 확산화염에서의 그을음과 PAHs의 분포를 측정하여 PAHs가 그을음으로 성장하는 과정을 유추할 수 있는 주목할 만한 결과를 보고하였다. 2000년에 권성준⁽⁷⁾ 등은 이중동축류 예혼합 화염에서 OH 분포를 PLIF로 계측하였으며, Walsh⁽⁸⁾는 LII법으로 부력이 작용하는 메탄의 층류 및 대향류 확산화염에서 그을음의 부피분율을 계측한 바 있다. 그러나, 본 연구에서와 같이 제한된 연소실내에 형성된 확산화염에서 산화제 공급량의 감소에 의한 그을음과 PAHs 및 OH 활성기의 분포 거동에 관한 정보는 크게 부족하다.

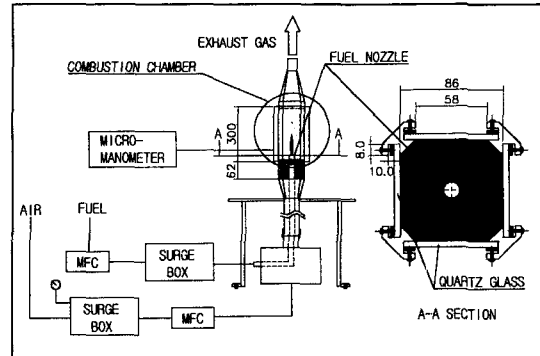


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

화염내에 분포하는 PAHs와 OH 활성기 분포를 얻기 위하여 본 연구에서 사용한 PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence)를 위해서 광학용 석영유리(quartz glass)의 창을 설치한 연소실을 구성하였으며, 그 구성도는 Fig. 1과 같다.

연소실은 동축류로 공급되는 산화제인 공기의 유동 균일화를 위해 설치된 하부의 스크린과 세라믹 볼 및 세라믹 하니컴(honeycomb)의 중앙에 황동제의 연료 노즐이 있다. 연소실의 상부는 개방되어 있으며, 연료와 공기는 하류의 압력이 변화하여도 설정유량을 유지할 수 있는 질량유량조절기(MFC, Mass Flow Controller)를 이용하여 공급하였다. 또한, 이들 모두 하류의 압력 맥동이 관내로 전달되어 불안정해지는 영향을 최소화할 수 있도록 완충 상자(surge box)를 통하여 공급되도록 하였다. 연소실 폭은 86mm, 하니컴 상부의 직선부의 높이는 300mm이다. 노즐은 내경 8mm, 외경 9mm의 것으로 노즐 출구부에서 발생하는 재순환 영역을 제거하기 위하여 두께를 최대한 얇게 가공하였다.

2.2 실험방법

연료는 99.5% 순도의 프로판을 사용하였으며, 공급 유량은 $Q_{\text{fuel}}=94.5 \text{ cc/min}$ (노즐출구 평균유속 $V_{\text{inj}}=3.13 \text{ cm/s}$, $Re_f=70$)으로 고정하였다. 이 연료 조건에서 동축류로 공급되는 공기 유량(Q_{air})을 이론공기량에 대하여 $Q_{\text{air}}/Q_{\text{sto.}} = 13.3, 3.56, 1.33, 1.11, 0.98, 0.80, 0.71$ 로 변화시키면서 화염의 구조를 PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)로

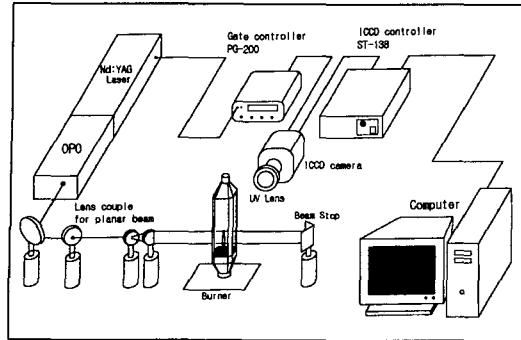


Fig. 2 Schematic of PLIF setup

분석하였다. Fig. 2에 PLIF 측정을 위한 구성을 나타내었다. 활성기의 여기(excitation)를 위해 OPO (Optical Parametric Oscillator, MOPO730, Spectra Physics)를 펌핑하는 600 mJ의 Nd : YAG 레이저 (GCR-200, Spectra Physics)를 사용하였다. 레이저 광은 원통형 렌즈를 거쳐 평면광으로 된다. 화염에서 발생하는 형광과 산란 신호는 적절한 필터를 거쳐 레이저 광에 직각으로 설치된 ICCD 카메라 (Intensified Charge Coupled Device, 576×384 pixels, Princeton Instrument)로 촬영된다. ICCD는 레이저 펄스와 동기시켜 150 ns로 게이팅된다. OH 활성기의 촬영을 위한 $A^2\Sigma^+-X^2\Pi(1,0)$ 밴드의 $Q_1(6)$ 천이를 위해 283.01 nm의 파장으로 여기시키고, 탄성산란광을 억제하기 위하여 레이저 영역을 차단하는 광학필터 (WG-305)와 화염자발광을 차단하고 OH 형광을 통과시키는 광학필터(UG-11)을 사용하였다. PAHs의 형광신호는 여기(excitation) 파장과 포착(detection) 파장에 따라 달라지는데 가시광과 자외선 영역의 단파장 영역의 레이저는 장파장에 비해 작은 분자의 PAHs까지 여기시켜 형광의 발생이 가능한 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 OH 영역을 피해서 282.98 nm에서 여기시켰다. PAHs의 형광을 포착하기 위하여 WG-305 광학필터와 화염자발광 차단용의 광학필터(SPF-450)를 사용하였다. 그을음의 분포는 탄성산란광을 필터를 사용하지 않고 직접 측정하였다. 포착된 형광신호가 약한 OH나 PAHs의 경우에는 10개의 화상을 겹쳐서 보다 선명한 영상을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상 화염과 펄럭이는 화염

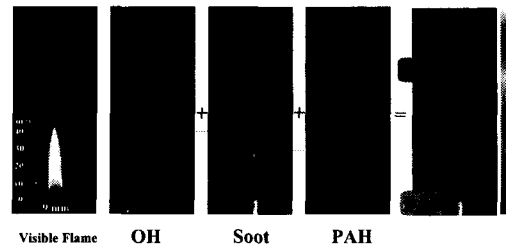


Fig. 3 OH, soot and PAHs distribution of propane diffusion flame in an oxidizer sufficient ambience ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto}=13.3$)

먼저, Fig. 3에 공기가 충분한 상태의 정상화염에 대하여 OH, 그을음 및 PAHs의 분포를 측정된 결과를 나타내었다. 차후 모든 그을음이나 활성기의 분포를 나타낸 그림에서 Fig. 3의 우측에 나타낸 강도를 그대로 적용한다. 즉, 붉은 색이 강하고 파란색이 약한 강도(intensity)를 나타낸다. 기존 연구에서 많이 알려진 바와 같이 화염 내부에는 노즐 근방의 상류부에 집중적으로 분포하고 있으며 그을음은 PAHs가 분포되어 있는 부분의 하류부와 화염대의 사이 좁은 영역에 나타나고 있다. OH 활성기는 화염대의 바깥쪽 하류부에 위치하고 있다. 즉, Vander Wal⁽⁶⁾이 언급한 바와 같이 PAHs는 그을음의 전구물질로 그을음의 상류에 위치하고 있으며, 그을음은 화염의 밝은 노란색 영역(soot luminous zone)에서 그 생성이 활발하고 OH는 이 바깥쪽의 고온 영역에서 생성되고 있음을 보여준다.

다음 산화제를 줄여 8.0 l/min로 이론공기량의 약 3.6배로 되면 화염은 연소가스 영역 (burnt gas zone)의 부력 효과에 의한 Kelvin-Helmholtz type의 불안정성(instability)이 나타나면서 펄럭이게 된다.⁽⁹⁾ 이 10 Hz 정도의 주기를 가지는 펄럭임(flickering)은 연소가스 영역의 와류(toroidal vorticity)로 인해 나타나며, 공기의 유입으로 이 부분에서 화염이 냉각되고 연료물질이 소진되어 부분적인 소멸을 유발하여 상류부 화염과 하류부 화염으로 분리시키기도 한다.

Fig. 4에 이 펄럭이는 화염에 대하여 PAHs와 그을음 및 OH 활성기의 형광을 150 ns로 순간 포착한 것이다. 각 사진은 정확히 동기되어 동일 위상에서 포착한 것은 아니며 각 주기상에서 반복되는 형태를 비교한 것이다. 이 화염은 펄럭임으로 인해 상류부 및 하류부의 화염이 분리되는 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 PAHs는 여

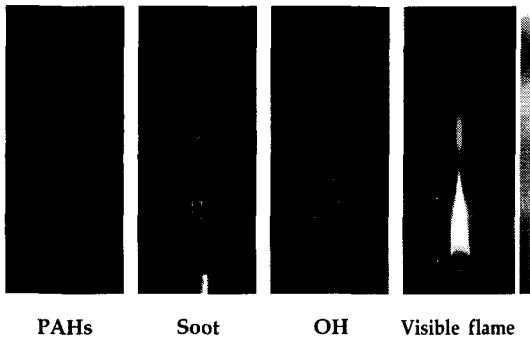


Fig. 4 PAH, Soot, OH radical distribution in a flickering flame ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=3.56$)



Fig. 5 Accumulated image of OH radical in flickering flame of Fig. 4

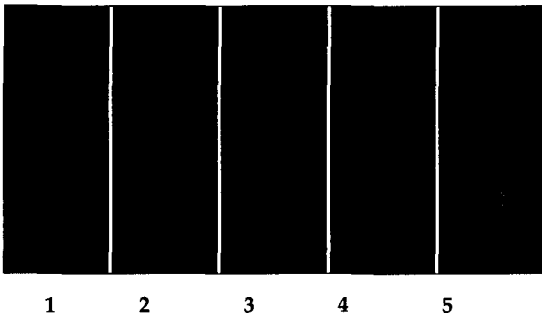


Fig. 6 Several images of OH radical in flickering flame ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=3.56$)

전히 주로 노즐 근방의 상류부에 분포하나 하류 쪽으로 약하게 퍼지는 것이 보이고 있다. 그을음의 경우에는 상류부 화염의 경우에는 앞의 Fig. 3과 거의 유사하나 하류부 화염의 경우에는 화염

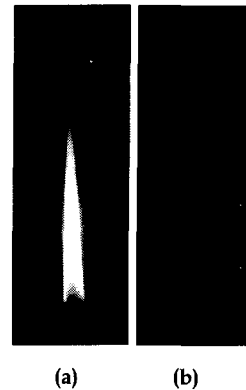


Fig. 7 Flame in an oxidizer deficient ambience ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=(a) 1.11, (b) 0.71$)

전부분에 걸쳐 그을음이 생성되고 있음을 보여준다. 이 현상은 확산화염에서 나타나는 특징과는 상당히 다른 특징이다. 다음, OH 활성기를 보면 상류부의 화염은 화염대의 하류부에 주로 분포하는 확산화염의 특징을 그대로 보이거나 하류부의 화염은 OH가 화염 내 외부로 넓게 분포하고 있다.

즉, 여기서 확인할 수 있는 것은 와류에 의해 유입된 공기는 연료와 완전히 혼합되어 하류부의 화염을 형성하는 것으로 이 하류부의 분리된 화염은 하나의 예혼합 화염으로 볼 수 있는 것이다. 참고로, 이 펄럭이는 화염에서 OH 활성기의 이미지를 10장을 겹쳐서 보면 Fig. 5에서 보는 바와 같이 상류부의 화염에서만 나타난다. 즉, 상류부의 화염은 지속적으로 유지되지만 하류부의 화염은 간헐적으로 나타나기 때문에 상대적으로 하류부의 형광 강도(intensity)가 아주 약하게 보이는 것이다. 따라서, 펄럭이는 화염에서 활성기나 분자의 형광이나 산란광을 측정할 때에는 화염과 동기시킨 순간적인 포착을 하여야만 그 분포를 보다 정확히 분석할 수 있는 것이다.

Fig. 6은 이 펄럭이는 화염에서 주기적으로 변하는 OH 활성기의 분포를 나타낸 것인데, 그림의 1은 상류부 화염만이 존재하는 경우이며 전형적인 확산화염의 형태이고 2는 화염이 외부 연소가스 영역의 와류에 의해 신장되면서 분리되기 직전으로 OH 분포도 하류부로 신장되면서 끝 부분에서 중앙이 열린 형태를 보인다. 이는 화염이 신장되면서 화염 바깥쪽에 형성된 OH 활성기의

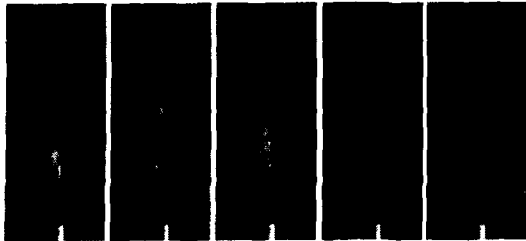


Fig. 8 Soot distribution with variation of coflowing air flow rate ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=13.3, 3.56, 1.33, 1.11,$ and less than 0.98 from left)

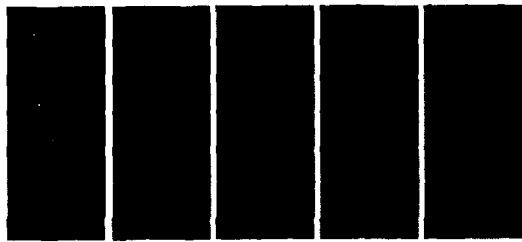


Fig. 9 Several OH fluorescence images with variation of coflowing air flow rate ($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=13.3, 3.56, 1.33, 1.11, 0.71$ from left)

영역을 뚫고 지나가는(break through) 것을 말한다. 다음의 3은 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 분리된 하류부의 화염이 예혼합 특성을 보여주고 있으며, 다시 4와 같이 하류부의 화염이 소멸되는 과정을 거쳐 본래의 형태로 돌아온다.

3.2 산소 결핍 상태의 화염

앞에서 설명한 펄럭이는 화염의 조건에서 더 산화제의 공급량을 줄여나가면 펄럭임은 사라지고 Fig. 7의 1과 같이 그을음 입자의 꼬리가 화염의 하류로 길게 이어지는 스모크(smoke)가 나타난다. 여기서 더욱 산화제의 양을 줄여 산소 결핍으로 인하여 소멸되기 직전의 화염은 Fig. 7의 2와 같이 스모크가 사라지고 그을음의 생성이나 연소로 인한 황염이 가끔 나타나기는 하지만 투명한 청염이 지배적으로 나타나는 화염으로 된다. 이 화염은 노즐의 한쪽에서 이탈하여 불안정하게 진동한다. 여기서 산화제를 더 줄이게 되면 화염은 더 이상 유지되지 못하고 소멸되게 된다.



Fig. 10 Accumulated PAHs fluorescence images with variation of coflowing air flow rate($Q_{fuel}=94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.}=13.3, 3.56, 1.33, 1.11, 0.98, 0.80, 0.71$ from left)



Fig. 11 PAHs image comparison with Schlieren image in an oxidizer deficient condition ($Q_{air}/Q_{sto.}=0.71$)

변화에 따른 그을음의 분포를 찍은 것이다. 그림에서 1과 2는 앞에서 설명한 바와 같다.

여기서 3과 4의 조건은 그을음 입자의 꼬리 즉, 스모크가 화염의 하류로 길게 나타나는 조건인데, 그을음의 분포를 보면 화염 내부에만 강하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 산화제 유량의 감소에 따라 급격히 감소한다. 그림의 5와 같이 산화제 유량이 이론 Fig. 8은 동축류로 공급되는 산화제 유량의 공기량의 약 98% 이하로 산화제가 감소된 상태에서는 그을음은 더 이상 나타나지 않는다. 즉, 산화제 결핍으로 인한 소멸 직전의 화염에서는 그을음이 생성되지 않는다는 것을 알 수 있다.

같은 조건의 변화에 대해 OH 활성기의 분포를 나타낸 그림이 Fig. 9이다. 그림에서 보는 바와 같이 산화제의 감소에 따라 OH 형광의 강도는 현저하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그을음의 분포에서와는 달리 산소 결핍으로 인하여 소멸직전의 상태에서도 OH 활성기는 아주 약하긴 하지만 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉, 소멸 직전에서 반응률(reaction rate)의 감소에 따라 열의 방출률(heat release rate)이 감소하여 화염의 온도가 낮아지게 되나 여전히 반응은 지속되

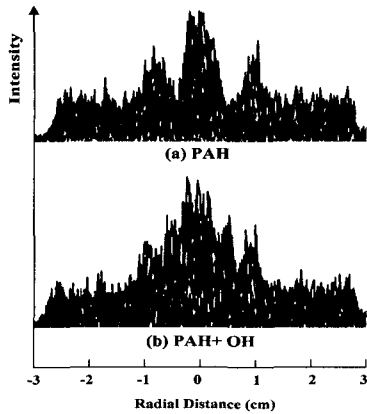


Fig. 12 Radial intensity profiles of (a) PAHs and (b) combined PAHs and OH fluorescences of propane diffusion flame near-extinction ($Q_{air}/Q_{sto}=0.71$)

고 있음을 보여준다. 또한, 그 분포 형태도 전형적인 확산화염과 같다.

다음은 역시 산화제 유량의 변화에 따른 PAHs 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림은 PAHs의 분포를 보다 뚜렷하게 보기 위하여 10장의 이미지를 겹쳐서 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PAHs의 형광의 강도는 공기량의 감소에 따라 약해지지만, 그 분포 면적이 점점 넓어지고 있음을 알 수 있다. 이를 Fig. 8의 그을음의 이미지와 비교하여 보면 산소 결핍 상태에서 그을음이 전혀 나타나지 않는 조건에서도 PAHs의 분포는 전체 화염의 영역에서 상대적으로 강하게 나타나고 있다.

이 결과에서 산소 결핍으로 인한 소염 직전의 화염에서는 그을음의 전구물질인 PAHs의 생성은 활발하게 진행되고 있으나 이들이 응집, 성장하여 그을음으로 생성될 수 있는 반응은 이루어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 조건에서는 연소 반응의 아주 초기단계인 열분해 반응이 주로 이루어진다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 10에서 흥미로운 것은 6,7과 같이 산소 결핍 조건에서 나타나는 PAHs의 이중 구조이다. 즉, 투명하게 형성되는 청염의 상류부에서 하류부까지 퍼져 있는 중앙부의 PAHs와 화염대 부분을 비운 채 바깥쪽에 형성되고 있는 PAHs로 인한 이중 구조가 나타나고 있다는 점이다. 이 산소 결핍 상태의 PAHs의 분포 이미지를 Fig.

11에서와 같이 Schlieren 이미지와 비교하여 보면 바깥쪽에 분포하는 PAHs는 연소가스 영역 (burnt gas zone)에 위치한다는 것을 알 수 있으며, 중앙과 바깥쪽의 PAHs 사이에 비어있는 부분은 화염대 바깥 부분과 거의 일치하고 있다.

따라서, Fig. 12에서와 같이 OH와 PAHs의 강도 신호를 겹쳐 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 OH 형광의 신호는 완전히 그 사이를 채우지는 못하지만 상당부분이 빈 공간에 들어간다는 것을 알 수 있다. 즉, PAHs의 이중 구조를 나타내는 빈 공간은 OH 활성기가 많이 분포한 부분이라는 것을 알 수 있다.

즉, 산소결핍 상태의 확산화염에서는 생성된 PAHs 분자들의 일부가 OH 활성기가 존재하는 영역에서 소모되고 나머지는 계속 연소 가스 영역으로 확산되어 가는 것으로 예측할 수 있다. 그러나, 이것도 이 PAHs의 이중구조의 출현에 대한 명확한 설명은 되지 못한다. 다만, 확실한 사실은 산소 결핍 상태의 화염에서는 PAHs가 더 이상 그을음 입자로 성장하지 못하고 분자 상태로 거동한다는 것이다. 이 때문에 유동의 영향 보다는 확산에 더 영향을 받을 것이라는 것을 예측할 수 있다. 이 부분은 차후 지속적으로 연구가 이루어질 것이다.

4. 결론

연소실내에 형성된 층류 확산화염에서 동축류로 공급되는 산화제의 유량을 감소시키면서 OH, PAHs 및 그을음의 분포를 PLIF로 계속하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 산화제가 충분한 경우의 전형적인 확산화염에서의 OH 활성기의 분포를, 화염의 분리가 나타나는 필러이는 화염과 비교하여 보면 분리된 하류부의 화염은 OH가 화염의 내 외부에 고루 분포하는 일종의 예혼합 화염과 유사한 분포를 갖는다. 즉, 연소가스 영역의 와류로 인해 유입된 공기가 연료와 혼합되어 연소됨을 알 수 있다.

(2) OH 활성기는 산화제 결핍으로 인한 소염 직전의 화염에서, 약하지만 여전히 존재하며 확산화염의 특징을 그대로 보이고 있으나, 그을음은 급격히 감소하여 산화제 결핍으로 인한 소염 직전의 화염에서는 더 이상 나타나지 않는다. PAHs는 산화제의 감소에 따라 하류까지 넓은

영역에 걸쳐 퍼지고 있다. 즉, 산화제 결핍상태에서는 PAHs가 그을음 입자로 성장하지 못하고 분자 상태로 거동한다. 이 결과들은 산화제의 유량을 조절함으로써 연소 반응의 초기단계에서 나타나는 반응을 실험적으로 재현할 수 있는 가능성을 제시한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 도움으로 진행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Glassman, I., 1987, "Combustion," Academic Press, Inc., 3rd Edition.
- (2) Makel, D. B., and Kennedy, I. M., 1994, "Soot Formation In Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 97, pp. 303~314
- (3) Sunderland, P. B., Kbyll, U. O. and Faeth, G. M., 1995, "Soot Formation in Weakly Buoyant Acetylene-Fueled Laminar Jet Diffusion Flames Burning in Air," *Combust. Flame*, Vol. 100, pp. 310~322.
- (4) Di Lorenzo, A., D'Alessio, A., Cincotti, V., Masi, S., Menna, P., and Venitozzi, C., 1981, "UV Absorption, Laser Excited Fluorescence and Direct Sampling in the Study of the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rich CH_4/O_2 Flames," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 485~491.
- (5) Smyth, K. C., Shaddix, C. R., and Everest, D. A., 1997, "Aspects of Soot Dynamics as Revealed by Measurements of Broadband Fluorescence and Flame Luminosity in Flickering Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 111, pp 185~207.
- (6) Vander Wal, R. L., Jensen, K. A., and Choi, M. Y., 1997, "Simultaneous Laser-Induced Emission of Soot and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Within a Gas-Jet Diffusion Flame," *Combust. Flame* Vol. 109, pp. 399~414.
- (7) Kwon S. J., Cha M. S., Choi M. C., and Chung S. H., 2000, "Characteristics of Premixed Flames in a Double Concentric Burner," *J. KSME*, Vol. 24, No. 12, pp. 1662~1669.
- (8) Walsh, K. T., Fielding, J., Smooke, M. D., and Long, M. B., 2000, "Experimental and Computational Study of Temperature, Species, and Soot in Buoyant and Nonbuoyant Coflow Laminar Diffusion Flames," *Twenty-Eighth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1973~1979.
- (9) Chen, L. D., Seaba, J. P., Roquemore, W. M., and Goss, L. P., 1988, "Bouyant Diffusion Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 677~684