

단층진단법을 이용한 축대칭 부분예혼합 화염의 자발광 스펙트럼 해석에 관한 연구

하 광 순* · 최 상 민*

(1999년 4월 13일 접수)

Tomographic Interpretations of Visible Emissions from the Axisymmetric Partially Premixed Flames

Kwangsoon Ha and Sangmin Choi

Key Words : Partially Premixed Flame (부분예혼합화염), Emission Computed Tomography (자발광 단층진단법), Radical Emission(라디컬복사), Background Emission(배경복사)

Abstract

Visible spectral characteristics of cross-sectional emissions from a partially premixed methane/air and propane/air flames have been investigated. An optical train with a two-axis scanning mirror system was used to record line-of-sight emission spectra from 354nm to 618nm, and inversion technique was adapted to obtain cross-sectional emission spectra. By analyzing the reconstructed emission spectra, cross-sectional intensities of CH and C₂ radicals were separated from the background emissions. The blue flame edge and yellow flame edge were also obtained by image processing technique for edge detection with color photograph of flame. These edges were compared with radial distributions of CH, C₂ radicals and background emissions. The CH radicals were observed at blue flame edge. The background emissions were generated by soot precursor at upstream of flame and by soot at downstream of flame. The C₂ radicals in propane/air flame were observed more than those in methane/air flame.

1. 서 론

부분 예혼합 화염(partially premixed flame) 현상은 린번 가스터빈 엔진 (lean-burning gas turbine engine), 직접 분사 가솔린 엔진 (direct-injection automotive engine), 가스 연소로 (gas-fired furnace), 스프레이 연소기 (spray-burning device) 등 실제 연소장치내에서 빈번히 발생한다. 비록 화염을 예혼합이나 확산화염의 형태로 형성한다 하더라도, 공기와 연료의 불완전하고 점진적인 혼합 때문에 부분적으로 연료/공기비나 당량비의 변화가 일어나게 되며, 이러한 현상도 넓은 의미의 부분예혼합 연소현상으로 볼 수 있다. 이러한 넓은 응용성 때문에 많은 연구자들에 의해서 부분 예혼합 화염에

대한 연구가 행해져 오고 있다. Yamaoka 와 Tsuji⁽¹⁻³⁾는 부분 예혼합 화염의 구조가 예혼합 과정의 당량비에 따라 달라진다는 사실을 밝혀내고, 두 개의 다른 반응대를 가진 이중화염의 개념을 이용하여 그 구조를 설명하였다. Hura 와 Glassman⁽⁴⁾은 부분 예혼합 화염내의 매연과 당량비와의 관계를 연구하여, 부분 예혼합의 정도가 낮을 때는 확산화염에서보다 매연의 생성이 오히려 증가함을 알아내었다. 또한 층류 및 난류화염 내에서의 NO emission 과 부분 예혼합 현상과의 관계도 많은 연구자들에 의해서 연구되어왔다.⁽⁵⁻⁶⁾ Gore 와 Zhan⁽⁷⁾은 층류 동축류 제트화염(co-flow jet flame)내에서 CO, H₂, O₂, N₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂ 등과 같은 각종 공해물질 및 화학종의 분포를 측정하고, 메탄화염의 경우 C₂H₄, C₂H₂ 등과 같은 중간생성물의 반응이 부분 혼합에 의해 크게 변화하게 됨을 밝혔다. 최근에는 Mitrovic 과 Lee⁽⁸⁾가 에틸렌 부분

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : smchoi@hanbit.kaist.ac.kr,

TEL : (042)869-3030 FAX : (042)862-1284

예혼합 화염내 매연부피분율(soot volume fraction)의 반경방향 분포를 LII(Laser-Induced Incandescence) 기법을 이용하여 측정하였다. 그 결과 에틸렌화염의 경우 당량비가 약 10 보다 클 때에는 확산화염에서보다 더 많은 매연이 발생함을 알아내었다. Mitrovic 과 Lee 은 이러한 현상을 산소의 첨가가 탄화수소계 화학종의 반응을 변화시킬 뿐 아니라 래디컬(radical) 생성을 증가시키기 때문으로 해석하고 있다. Blevins 등⁽⁹⁾은 당량비 1.6, 2.0, 3.5 의 메탄화염을 대상으로 온도와 CH 래디컬의 분포를 측정하였다. 온도측정을 위해서는 TFP (Thin-Filament Pyrometry) 기법을 이용하였으며, CH 래디컬 측정을 위해서는 자발광 측정기법과 LIF 기법을 이용하였다. 그들은 CH 래디컬 측정시 자발광을 이용한 측정이 단면정보가 아닌 선적분된 신호라는 단점을 보완하기 위해서 추가로 LIF 측정을 수행하였다. 측정은 화염 상류부분의 3 가지 높이에서 수행하였다. 그 결과 당량비가 증가할수록 이중화염구조는 없어지고 확산화염구조와 비슷해진다는 사실을 알아내었다. 그러나 온도측정에서는 확인되었던 이중화염구조가 CH 래디컬 측정에서는 확인되지 않아, 래디컬의 이중구조가 존재하는지에 대한 명확한 결론을 얻지 못하고 있다.

이와 같이, 부분 예혼합 화염내의 래디컬의 존재는 매연생성과정을 변화시키는 중요한 요인중의 하나이다. 이러한 래디컬의 존재를 명확하게 규명하기 위해서는 부분 예혼합 화염의 복사 특성을 알아야 한다. 그러나 부분 예혼합 화염에 존재하는 매연 및 매연전구물질(soot precursor)로 인한 복사가 가시광선영역에서부터 적외선영역까지 상당히 넓은 영역에 걸쳐 존재하기 때문에, 다른 종의 연소중간생성물질(radicals)의 복사신호에 배경잡음(back-ground noise)으로 작용한다. 따라서 연소과정에 주요하게 관여하는 래디컬의 복사량을 정확하게 측정하기 위해서는 배경복사특성을 이해하고 이의 양을 분리하기 위한 연구가 필요하게 된다. Mizutani 등⁽¹⁰⁾은 Wolfhard-Parker 버너 화염에 존재하는 CH, C₂ 래디컬 분포를 필터를 이용해 2 차원 영상화하기 위한 연구를 수행하였다. 그들은 배경복사와 래디컬의 복사를 구분해내기 위해 측정하고자하는 래디컬이 존재하는 파장대와 인접한 파장대에 추가의 필터를 설치하여 매연에 의한 배경잡음을 제거하였다. 그러나 이 연구의 대상화염은 평면화염이기 때문에, 화염단면을 따라 복사형태가 변화하지 않는 단순한 경우이며, 몇 개의 점에서 측정한 화염복사 스펙트럼을 전 영역에 걸쳐 적용했다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 부분 예혼합 화염내의 파장별 복사 특성을 알아보고자 한다. 연구의 목적은 부분 예혼합 화염내의 자발광 단면 복사 스펙트럼을 측정하고, 측정된 스펙트럼을 분석하여 래디컬 복사와 배경복사를 분리, 비교하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 측정대상이나 측정계를 이동하지 않고도 측정점을 변화시킬 수 있는 스캐닝미러(scanning mirror)와 ICCD 를 이용하여, 화염으로부터 발생하는 자발광 스펙트럼을 측정하였으며, 이를 단층진단기법에 의해 단면해석하였다. 측정대상은 비슷한 C/O 비(0.83)를 가진 촉대칭 부분 예혼합 메탄화염과 프로판화염의 두 화염이다. 배경복사를, 인접 파장대의 복사량으로 근사함으로써 제거, 분리하여, CH, C₂ 래디컬 및 배경복사의 반경방향 상대분포를 구하였다. 또한 화염사진을 영상처리하여 파란색 화염의 경계(blue flame edge)와 노란색 화염의 경계(yellow flame edge)를 각각 구하고, 앞서 구한 래디컬 및 배경복사의 반경방향 분포와 비교 분석하였다. 측정대상인 연료과잉 예혼합 화염은 높이에 따라, 매연이 비교적 적고 래디컬 복사가 우세한 영역과, 매연의 복사가 강하고 래디컬 복사가 적은 영역, 그리고 이와 같은 복사특성이 서로 교차하는 영역의 3 가지로 특징 지을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 부분을 대표하는 3 가지 영역을 대상으로 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

실험장치의 구성도는 Fig. 1 과 같다.

스캐닝미러 (scanning mirror, mirror :E00-XY3037Y, controller: DE2000, General Scanning Inc.)를 통과한 화염내 측정점의 빛을 렌즈(초점거리 260mm)를 통해 다색분광기(HR320, ISA Inc.)의 입구슬릿으로 모은 후 분광시킨다. 분광된 빛의 세기는 ICCD(Intensified Charge Coupled Device, ICCD-576-G/RB-E, Princeton Instruments, Inc.)를 통해 측정하여

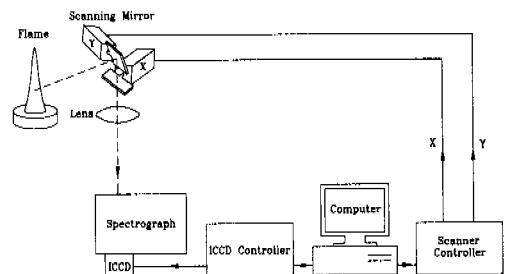


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

컴퓨터에 저장한다. 초점거리 250 mm 인 다색분광기는 수은램프를 이용하여 보정하였으며, 입구 슬릿의 간격은 100 μ m 로 하였다. 스캐너(Scanner)의 x, y 거울은 컴퓨터의 병렬포트(parallel port)를 통하여 제어되며, 본 실험조건에서의 화염대내 가능한 최소 측정간격은 0.005 mm/step 이었다.

실험에 사용된 스캐닝미러는 x, y 축의 두개의 거울을 구동시켜 측정대의 원하는 부위의 빛을 분광기의 입구쪽으로 보내는 역할을 한다. 따라서 측정대상이나 검출 시스템을 움직이지 않고도 화염대를 스캔할 수 있으며, 이러한 장점은 실규모 화염에 대한 적용가능성을 보여준다.

실험은 스캐닝미러를 조절하여 다색분광기의 입구쪽으로 들어오는 빛을 화염대의 원하는 측정 부위에 해당하도록 한 뒤, 다색분광기를 통해 분광하고, ICCD 로 분광한 빛의 파장별 세기를 측정, 컴퓨터에 저장하는 것을 반복하여 수행하였다. 각 측정점당 화염대의 측정면적은 0.1 \times 2mm 이었고, 354.31nm~617.57nm 의 가시 광선 영역을 0.46nm 간격으로 576 개로 나누어 측정하였다. 각 측정높이에서 x 축 방향으로 0.5mm/step 의 간격으로 55 개의 위치에서 측정값을 얻었다.

렌즈를 통하여 대상 화염은 분광기의 입구쪽에 상을 이루게 된다. 렌즈는 예민하면서도 융통성을 갖고 있어서 초점면에서 약간 어긋난 위치의 피사체도 정확한 상을 맺어준다. 이러한 허용범위를 피사체 심도(depth of field)라 부른다. 본 실험의 경우, 렌즈 시스템의 심도(50mm)는 버너의 직경(24mm)보다 크게 나타났으므로, 측정된 데이터를 화염의 반경방향에 따라 선적분된 결과로 가정할 수 있다. 이 선적분된 결과로부터 단면분포를 얻기 위해서는 단층진단기법을 이용해야 한다. 본 연구에서는 Ha 와 Choi⁽¹¹⁾에 의해 사용된 것과 같은 convolution back-projection method 를 이용하였다.

재구성된 각 위치별 스펙트럼에서 410.15nm-434.86nm 파장대의 복사강도를 평균하여 CH 래디컬($A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ transition)의 분포를, 500.34nm-520.00nm 대역을 평균하여 C₂ 래디컬($A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$ transition)의 분포를 구할 수 있다. 그러나 이렇게 구한 래디컬분포는 배경복사(background emission)의 영향이 포함된 것이므로 이를 제거하여야 한다. 이를 위해서 각 래디컬이 존재하는 파장대와 인접한 전후파장대역의 복사강도를 선형적으로 근사함으로써 배경복사의 영향을 제거하였다. 즉, CH 래디컬 구간에서의 배경복사의 영향은, 구간 직전인 410.61nm 와 직후인 435.32nm 에서의 복사강도가 CH 래디컬 구간내에서도 선형적으로 유지된다고

가정하여 결정하였다. C₂ 래디컬 구간에서는 500.80nm 와 520.46nm 에 해당하는 복사강도를 이용하였다. 이와같은 배경복사의 제거 방식은 Mizutani 등⁽⁴⁾의 방법과 개념적으로 일치하는 것이다. 래디컬 영역의 복사를 제외한 나머지 구간에서의 파장별 복사강도를 적분하여 배경복사의 양을 구하였다. 재구성된 CH 및 C₂ 래디컬 자발광 신호는 각각의 래디컬 농도, 화염 온도 등의 영향이 모두 포함된 것이다. 본 논문의 목적은 자발광 단층진단법의 유용성을 확인하고 각 단면에서 위치별 자발광 스펙트럼을 해석하여 래디컬, 매연 및 매연전구물질들의 존재와 위치를 파악하는 것이므로, 온도측정을 통한 정량적인 농도분포환산은 필요하지 않았다.

화염의 컬러영상을 처리하여 가시화염의 경계를 구하였다. 실험대상인 연료과잉 예혼합화염은 노란색 화염주위에 파란색 화염이 감싸고 있는 형태를 취하고 있기 때문에, 색깔에 따라 화염의 경계가 달라지게 된다. 따라서 화염영상을 일단 각각 8bit (256 gray level)에 해당하는 Red, Blue, Green 영상으로 나눈 후, Blue 영상을 이용하여 파란색 화염의 경계(blue flame edge)를, Red 영상을 이용하여 노란색 화염의 경계(yellow flame edge)를 각각 구하였다. 화염의 경계를 구하는데 있어서 사용된 국소명암판별 기준값은, 각 높이에서의 최대명도값(object maximum gray level)과 배경명도값(local background gray level)의 평균에 해당하는 값으로 정하였다. 이와 같이 50% local threshold 를 국소명암판별 기준으로 사용하는 것은 이 값을 이용해 계산된 값이 실제값을 잘 대변한다는 사실이 입자 직경 측정 실험 등으로 이미 입증되어 있기 때문이다.⁽¹²⁾

3. 실험결과

3.1 예혼합 메탄화염

Fig. 2 는 이 절에서의 측정대상인 부분 예혼합 축대칭 메탄화염 사진이다. 버너는 내부직경 23.5mm 인 스테인리스관으로 구성되어 있으며, 메탄(CH₄) 0.4 l/min, 공기 1.14 l/min 를 혼합하여 당량비 (equivalence ratio) 3.33, C/O ratio 0.82 로 화염을 형성하였다.

실험은 세 가지 높이에서 수행하였는데, 그 위치는 y/D = 0.00, 1.02, 1.87 과 같다. 여기서 y 는 버너출구로부터의 높이이며, D 는 버너내부직경이다. 육안과 사진에 따르면, y/D = 0.00 영역에서는 파란

색 화염이, $y/D = 1.87$ 에서는 주로 노란색 화염이 관찰된다. 그리고 $y/D = 1.02$ 에서는 파란색과 노란색 화염이 반반씩 섞여 있는 것으로 관찰된다. 앞서 실험방법에서 기술한 영상처리기법을 이용하여, Fig. 2의 화염사진을 판독, 가시화염의 경계를 구하였다. 메탄화염의 파란색 화염의 경계와 노란색 화염의 경계가 Table 1에 정리되어 있다. 파란색 화염이 노란색 화염의 바깥쪽에 위치해 있음을 알 수 있다.

각 높이에서 노란색 화염의 경계부분에서의 스

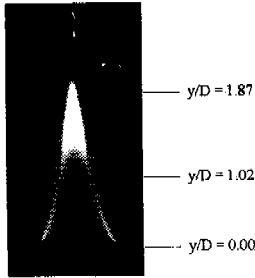


Fig. 2 Photograph of methane/air flame

Table 1 Results of visible edge detection in methane/air flame

Elevation (y/D)	Blue Flame Edge (r/D)	Yellow Flame Edge (r/D)
0.00	0.50	0.50
1.02	0.28	0.26
1.87	0.15	0.070

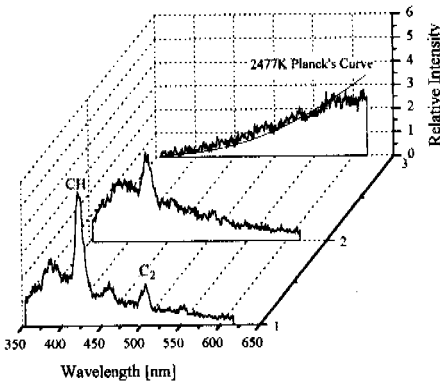


Fig.3 Tomographic reconstructed spectrum in methane /air flame (1: $y/D=0.00$, $r/D=0.55$, 2: $y/D=1.02$, $r/D=0.26$, 3: $y/D=1.87$, $r/D=0.085$)

펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림을 보면 화염의 복사 스펙트럼중 화염의 상류에서는($y/D = 0.00$) 래디컬복사가 우세하며, 하류로 갈수록 매연에 의한 복사가 증가함을 알 수 있다. 또한 매연에 의한 배경복사형태도 변화하여 래디컬이 존재하지 않는 화염의 하류부분($y/D=1.87$)에서는 플랑크(Planck) 곡선을 따르는 흑체복사 형태를 가짐을 알 수 있다. Fig. 3에 제시한 화염의 온도는 측정된 파장 영역 전체에 대해 최소자승법(least square fit method)을 적용하여 계산된 결과이다. 가시광선 영역에서 수백도 범위의 온도변화에 따른 플랑크 곡선의 변화 정도는 작기 때문에, 이와 같이 계산된 온도의 오차는 상대적으로 크게 된다. 따라서, Fig. 3에서 제시한 플랑크 곡선은 하류 배경복사와 흑체복사 거동을 비교하기 위한 개형으로서의 의미만 있을 뿐, 구체적인 온도값에는 큰 의미가 없다. 래디컬과 함께 존재하는 배경복사는 370nm 부근에서 최대값을 보이는 포물선 형태를 가지고 있다. 이는 매연전구물질의 laser induced emission spectra⁽¹³⁻¹⁵⁾와 유사한 형태를 보이는 것으로 보아 완전한 매연으로부터의 복사가 아닌 매연의 전구물질에 의한 복사로 보인다.

CH 래디컬과 C₂ 래디컬, 배경복사강도의 단면 분포가 Fig. 4~6에 나타나 있다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이, CH 래디컬은 수직방향으로는 화염의 상류에, 반경방향으로는 파란색화염의 경계 부분에 주로 분포함을 알 수 있다. Fig. 5의 배경복사 강도분포를 보면, 화염 상류부분($y/D = 0.00$)에서는

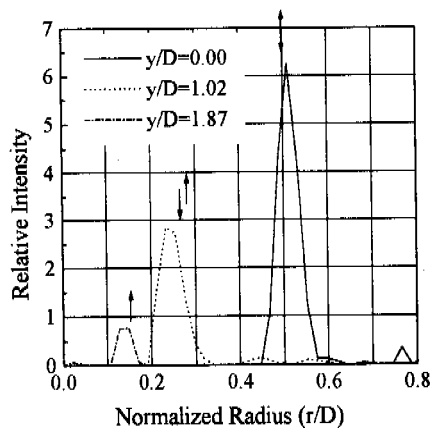


Fig. 4 Tomographic reconstructed intensities of CH radicals in methane/air flame (↑ : blue flame edge, ↓ : yellow flame edge)

화염의 끝에서만 검출되지만, 화염을 따라 올라가면($y/D = 1.02$, $y/D = 1.87$), 화염 중심부에서도 배경복사가 검출되는 것으로 나타난다. 앞서 스펙트럼 관찰을 통해 확인하였듯이, 화염의 상류($y/D = 0.00$)와 중류($y/D = 1.02$)에서의 배경복사는 매연의 전구물질로, 하류($y/D = 1.87$)에서의 배경복사는 매연으로 판단된다. 따라서 화염의 경계부분에 래디컬과 함께 존재하던 매연의 전구물질이 화염을 따라 하류로 내려가면서 매연으로 변하는 것을 알 수 있다. 래디컬의 복사량이 적고, 매연이 주로 존재하는 화염의 하류 부분에서는($y/D = 1.87$), 노란색 화염 경계부분보다 중심부에서 더 큰값을 나타낸다. 이와같은 분포는 Mitrovic 과 Lee⁽⁸⁾의 매연부

피분율 측정 결과와 일치하며, 또한 확산화염내에서의 매연분포와도 유사하다.⁽¹⁶⁾

Fig. 4와 5의 $y/D = 0.00$ 에서 CH 래디컬 및 배경복사가 최대값을 나타내는 반경방향 위치는 화염의 특성, 영상처리에 의한 화염 경계 결정 오차, 재구성 결과의 선평분제로 설명할 수 있다. 우선, 최근 발표된 Blevins 등⁽⁹⁾의 메탄/공기 화염내 (당량비 3.5) 화염상류영역의 CH 래디컬 반경방향 분포를 보면, 버너의 반지름($r/D=0.5$) 보다 바깥지점에서 CH 래디컬의 최대값이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 화염의 하류에서는 버너 직경보다 더 바깥쪽 영역에도 화염이 존재할 수 있다는 것을 보여준다. 둘째로, 영상처리에 의해 결정된 화염경계에 비해 바깥쪽에 화염이 존재하는 것으로 보이는 것은, 영상처리에 의해 결정된 화염의 경계가 광폭의 파장 대역에 걸쳐 합산된 복사강도를 기준으로 하며, 경계 결정을 위해 50%의 local threshold 를 적용한 결과에 따른 오차를 포함하고 있기 때문이다. 파란색 화염의 경계(blue flame edge)와 노란색 화염의 경계 (yellow flame edge)가 다르게 나타나는 것은, 파장에 따라 각 화염경계가 다르게 나타날 수 있다는 것을 보여주며, 따라서 영상처리에 의한 화염 경계 위치를 표시한 것은, 재구성된 복사분포에 대한 참고자료로서의 의미일 뿐이며, 기준으로서의 의미는 아니다. 셋째로 재구성된 각 복사분포의 선평은 Blevins 등⁽⁹⁾이 수행한 LIF 결과 보다 넓으므로 그에 따른 오차요인도 존재할 것이다. 재구성 결과의 선평에 따른 정확도는, 측정간격을 줄이므로써 개선할 수 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 메탄화염에서 C_2 래디컬은 화염의 상류부분에서 약간 검출되었으며, CH 래디컬이 존재하는 반경위치와 비슷한 위치에 존재하였다. D'Alessio 등은 C/O 비가 0.45 - 0.5 정도되는 예혼합 메탄화염에 자외선 레이저를 조사하여 C_2 에 의한 복사광을 얻은바 있다.⁽¹⁵⁾ 그들의 실험에서 얻어진 C_2 는 무거운 분자들이 강한 레이저에 의해 쪼개져 발생한 것이었다. 그러나 본 실험에서 얻어진 C_2 래디컬은 연소의 진행과정에서 생성된 것이다. C_2 래디컬이 존재하는 영역이 매연의 전구물질이 존재하는 영역과 일치하고, 화염의 상류지역에서만 관측되는 점으로 보아, 탄소입자들이 합쳐져 매연으로 진행되는 과정에서 C_2 가 생성되는 것으로 보인다.

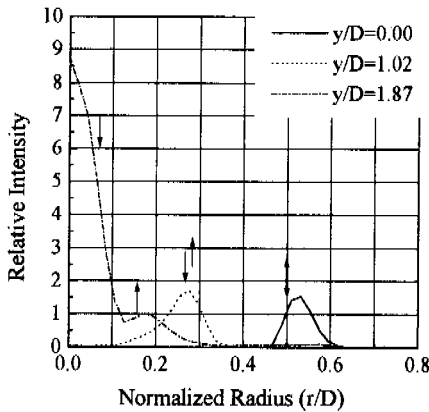


Fig. 5 Tomographic reconstructed intensities of background emissions in methane/air flame (↑ : blue flame edge, ↓ : yellow flame edge)

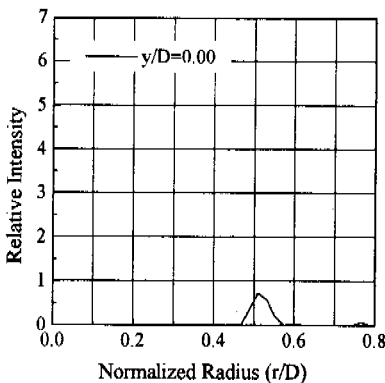


Fig. 6 Tomographic reconstructed intensities of C_2 radicals in methane/air flame

3.2 예혼합 프로판화염

Fig. 7은 이절에서의 측정대상인 부분 예혼합 축대칭 프로판화염사진이다. 버너는 내부직경

23.5mm 인 스테인리스관으로 구성되어 있으며, 프로판(C_3H_8) 0.19 l/min, 공기 1.6 l/min 를 혼합하여 당량비 (equivalence ratio) 2.65, C/O ratio 0.84 로 화염을 형성하였다. 실험은 3 가지 높이에서 수행하였는데, 그 위치는 $y/D = 0.26, 1.03, 1.19$ 과 같다. 여기서 y 는 버너출구로부터의 높이이며, D 는 버너 내부직경이다.

영상처리를 통해 얻어진 프로판화염의 파란색 화염의 경계와 노란색화염의 경계가 Table 2 에 정리되어 있다. 파란색화염이 노란색화염의 바깥쪽에 위치해 있고, 그 정도는 메탄화염과 비교하여 프로판 화염의 경우가 보다 현저함을 알 수 있다.

각 높이에서 노란색 화염의 경계부분에서의 복사스펙트럼을 Fig. 8 에 나타내었다. 화염의 상류부분에서 C_2 래디컬의 복사강도가 메탄화염에서보다 더 강함을 알 수 있다. 또한 메탄화염에서와 마찬가지로 화염의 상류부분에서는 매연의 전구물질에 의한 배경복사를, 화염의 하류부분에서는 매연에 의한 배경복사를 확인할 수 있다. Fig. 8 에 제시한 화염의 온도는 측정된 파장 영역 전체에 대해 최소사승법(least square fit method)을 적용하여 계산된 결과이며, 하류의 배경복사가 흑체복사 거동을 보인다는 것을 비교하기 위한 개형으로서만 의미가 있으며, 구체적인 온도값에는 큰 의미가 없다. 프로판 화염내의 CH 래디컬, C_2 래디컬, 배경복사강

도의 단면분포가 Fig. 9-11 에 나타나있다. 전체적인 경향에 있어서는 메탄화염의 경우와 일치한다. 하지만, Fig. 9 에 나타난 바와 같이 화염 하류에서 ($y/D = 1.19$) CH 래디컬이 급격히 감소한다. 또한 $y/D = 0.26$ 위치에서의 CH 래디컬이 존재하는 영역을 살펴보면, 메탄화염의 경우보다 더 넓은 영역에서 두껍게 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 영상처리를 통해 얻어진 결과에서 언급하였듯이, 파란색화염의 경계가 메탄화염에서보다 더 바깥쪽에 존재한다는 사실과 일치한다. 이와 같이 프로판 화염의 경우 메탄화염보다 CH 래디컬이 보다 넓게 분포하는 것은, 프로판화염의 경우가 탄화수소(hydrocarbon)가 메탄보다 더 많기

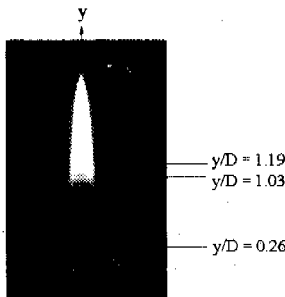


Fig. 7 Photograph of propane/air flame

Table 2 Results of visible edge detection in propane/air flame

Elevation (y/D)	Blue Flame Edge (r/D)	Yellow Flame Edge (r/D)
0.26	0.40	0.39
1.03	0.26	0.16
1.19	0.24	0.15

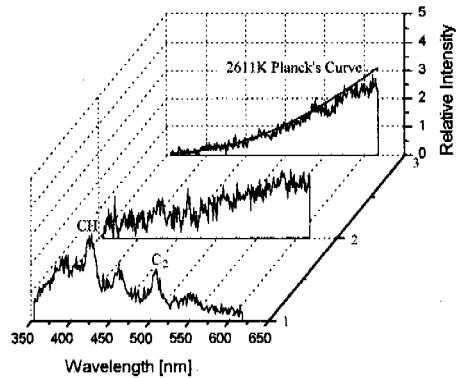


Fig. 8 Tomographic reconstructed spectrum in propane /air flame (1: $y/D=0.26, r/D=0.38, 2: y/D=1.03, r/D=0.17, 3: y/D=1.19, r/D=0.13$)

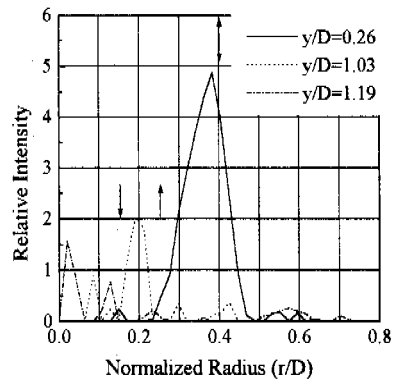


Fig. 9 Tomographic reconstructed intensities of CH radicals in propane/air flame (↑ : blue flame edge, ↓ : yellow flame edge)

때문으로 해석된다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 화염하류에서($y/D = 1.19$)의 매연 복사는 노란색 화염 경계의 안쪽에서 최대값을 보인다. C_2 래디컬 복사는 메탄화염에서와 같이, 화염의 상류부분에서, CH 래디컬이 존재하는 반경위치와 비슷한 위치에 존재한다. 하지만, 그 양을 CH 래디컬의 양과 상대적으로 비교해 볼 때, 메탄화염에서보다 많음을 알 수 있다 (Fig. 11). 이는 메탄화염에서의 C_2 는 탄소 입자의 결합에 의해서만 생성되는데 반해, 프로판의 경우는 프로판 체인의 파괴에 의해서도 생성될 수 있기 때문으로 추측된다.

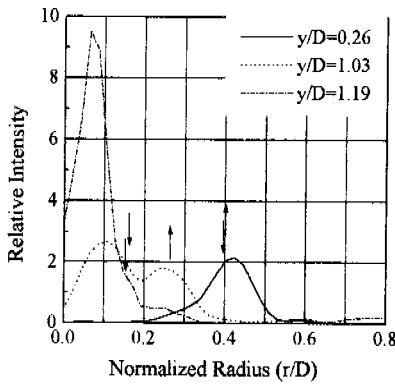


Fig. 10 Tomographic reconstructed intensities of back-ground emissions in propane/air flame (↑ : blue flame edge, ↓ : yellow flame edge)

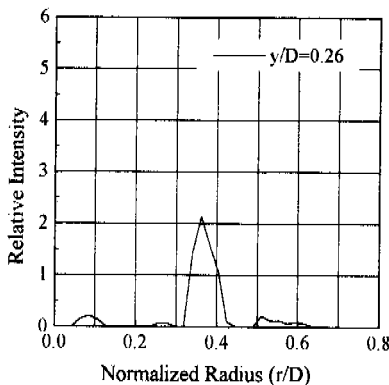


Fig. 11 Tomographic reconstructed intensities of C_2 radicals in propane/air flame

4. 결론

본 논문에서는 비교적 간단한 장비로 쉽게 측정할 수 있는 자발광 선적분 측정결과에, 래디컬 및 매연에 관한 단면분포로서의 의미를 부여하기 위해, 재구성 기법을 이용하여 선적분 데이터를 단면분포로 환산하였으며, 가시광선 영역의 스펙트럼 해석을 통해 래디컬 및 배경복사의 각 복사량을 분리해내었다. 즉, 축대칭 부분 예혼합 메탄화염과 프로판화염의 두화염을 대상으로, 화염으로부터 발생하는 자발광 스펙트럼을 측정하고, 이를 단층진단기법에 의해 단면해석하였다. 배경복사에 의한 영향을 인접 파장대를 근사함으로써 제거하여 CH, C_2 래디컬 및 배경복사의 반경방향분포를 구하였다. 또한 화염사진을 영상처리하여 파란색 화염의 경계(blue flame edge)와 노란색 화염의 경계(yellow flame edge)를 각각 구하고, 앞서 구한 래디컬 및매연 복사의 반경방향분포와 비교하였다. 이와같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 부분 예혼합 메탄화염과 프로판 화염 모두에서, CH 래디컬은 파란색 화염의 경계 부분에 존재하며, 반경방향의 최대값은 화염의 하류를 따라 가면서 감소하였다.

(2) 배경 복사는 매연의 전구물질에 의한 것과 매연에 의한 것으로 나눌 수 있었다. 매연의 전구물질은 화염의 상류에, 파란색 화염의 경계부분에 존재하며, 매연은 화염의 하류에 노란색 화염의 경계 안쪽에 주로 존재하였다.

(3) C_2 래디컬은, 반경방향으로는 파란색 화염의 경계부분인 CH 래디컬 분포위치와 거의 같은 위치에, 높이상으로는 화염의 상류부분에 존재하였다. CH 래디컬과의 상대적 C_2 래디컬의 양은 프로판 화염의 경우가 메탄화염에 비해 더 많았다. C_2 래디컬은 매연의 생성과정에서 발생하는 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) Yamaoka, I. and Tsuji, H., 1974, "The Structure of Rich Fuel-Air Flames in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," *15th Symp. (Int.) on Comb.*, pp.637~644.
- (2) Yamaoka, I. and Tsuji, H., 1976, "Structure Analysis of Rich Fuel-Air Flames in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," *16th Symp. (Int.) on Comb.*, pp.1145~1154.
- (3) Yamaoka, I. and Tsuji, H., 1978, "An Experimental Study of Flammability Limits Using Counterflow

- (4) Hura, H. S. and Glassman, I., 1988, "Soot Formation in Diffusion Flames of Fuel/Oxygen Mixture," *22nd Symp. (Int.) on Comb.*, pp.371~378.
- (5) Turns, S. R., Myhr, F.H., Bandaru, R. V., and Maund, E.R., 1993, "Oxides of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames: Part II - Fuel Dilution and Partial Premixing Effects," *Combustion and Flame*, Vol.93, pp.255~269.
- (6) Rokke, N. A., Hustad, J. E., and Sonju, O. K., 1994, "A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames," *Combustion and Flame*, Vol.97, pp.88~106.
- (7) Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, "Nox Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol.105, pp.414~427.
- (8) Mitrovic, A. and Lee, T. W., 1998, "Soot Formation Characteristics of Laminar Partially Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol.115, pp.437~442.
- Blevins, L.G., Renfro, M.W., Lyle, K.H., Laurendeau, N.M., and Gore, J.P., 1999, "Exp *International Journal, Series II*, Vol.32, No.3, pp.455~ 463.
- (9) Experimental Study of Temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH₄/Air Coflow Flames," *Combustion and Flame*, Vol.118, pp.684-696.
- (10) Mizutani, Y., Nakabe, K., Matsumoto, Y., Saeki, T., and Matsui, T., 1989, "Processing of Luminescent Radical Images for Flame Diagnostics," *JSME International Journal, Series II*, Vol.32, No.3, pp.455~463.
- (11) Ha, K. and Choi, S., 1994, "Interpretation of Emission Image of an Axisymmetric Diffusion Flame into 2-Dimensional Temperature Data Using a Simplified Computed Tomography," *KSME Journal*, Vol.8, No.1, pp.94~102.
- (12) Kim, K. S. and Kim, S. S., 1994, "Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging," *Atomization and Sprays*, Vol.4, pp.65~78.
- (13) Beretta, F., D'Alessio, A., D'Orsi, A., and Minutolo, P., 1992, "U.V. and Visible Laser Excited Fluorescence from Rich Premixed and Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.85, pp.455~470.
- (14) D'Alessio, A., D'Anna, A., D'Orsi, A., Minutolo, P., Barbella, R., and Ciajolo, A., 1992, "Precursor Formation and Soot Inception in Premixed Ethylene Flames," *24th Symp. (Int.) on Comb.*, pp.973~980.
- (15) D'Alessio, A., Gambi, G., Minutolo, P., and Russo, S., 1994, "Optical Characterization of Rich Premixed CH₄/O₂ Flames across the Soot Formation Threshold," *25th Symp. (Int.) on Comb.*, pp.645~651.
- (16) Balthasar, M., Heyl, A., Maub, F., Schmitt, F., and Bockhorn, H., 1996, "Flamelet Modeling of Soot Formation in Laminar Ethyne/Air Diffusion Flames," *26th Symp. (Int.) on Comb.*, pp.2369~2377.