

# 자발광 확산 사각화염 내부 구조의 단층 진단

양인영\* · 하광순\* · 최상민\*\*

## Tomographic Reconstruction of a Non-axisymmetric Diffusion Flame

Inyoung Yang, Kwangsoon Ha, Sangmin Choi

**Key Words:** Computed tomography, Non-axisymmetric flame, Self-emission, Soot emission, Flame edge, Flame temperature

### Abstract

The structure of a non-axisymmetric propane diffusion flame was investigated. Tomographic reconstruction method to convert the line-integrated self-emission data of a fuel-rich diffusion flame with square cross-section was applied to get the spatially reconstructed emission data. Modified Shepp-Logan filter and concentric squares raster were chosen for reconstructing arbitrarily shaped object in this process. Spatially reconstructed emission data were then interpreted to several physical quantities, such as flame edge, FWHM, perimeter and 3-D flame temperature distribution. Necessary assumptions were discussed and the results were interpreted. In comparison with axisymmetric flame, flame edge was developed higher, and sooting region of upstream was broader than in this non-axisymmetric one. At some height, the flame was shrunk very rapidly and finally formed circular cross-section.

기호설명			
$A$ ,	화염의 단면적	$I_b$ ,	흑체의 플랑크 복사 강도
$c$ ,	화염 단면의 둘레의 길이	$L$ ,	버너의 한 변의 길이
$g$ ,	측정 시스템의 파장별 감응도	$P$ ,	형상계수
$h$ ,	화염의 높이 방향의 좌표	$r$ ,	축대칭 화염의 반경 방향 좌표
$I$ ,	플랑크 복사 강도	$T$ ,	온도
		$(x, y)$ ,	화염 단면상의 무차원 좌표
		$z$ ,	화염의 무차원 높이
		$\epsilon$ ,	방사율
		$\lambda$ ,	파장

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서 론

연소 현상을 연구하는 데 있어서 화염의 구조 연구는 큰 부분을 차지하고 있다. 특히 확산화염은 자연계에 널리 존재하며, 산업 현장에서 사용되는 대부분의 고체·액체 연료의 연소도 확산화염의 형태로 이루어진다. 또한 예혼합 화염에 비해 위험성이 더 적어 기체 연료도 확산화염으로 연소되기도 하므로, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

이러한 확산화염의 연구에는 연소 진단의 광학적 방법이 광범위하게 사용되고 있다. 이는 확산화염의 경우 매연의 발생이 커서 열전대나 탐침을 삽입하기가 곤란하기 때문이다.

연소 진단의 광학적 방법을 사용한 연구에는 특히 축대칭 확산화염에서의 매연 입자 크기 및 농도 분포에 관한 연구들이 많으며, 여기에 광산란법[1] 및 광산란/소멸법[2~4]이 널리 사용되었다. 이 연구들에서 확산화염의 암영역(dark zone), 열분해 영역 및 화염대의 존재가 확인되었다.

또한 화염 내에서 생성되는 각종 입자들의 농도 측정에는 레일리 산란법[5]·FT-IR[6]·LII[7] 등이 사용되었으며, CH·CO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O·OH·H<sub>2</sub>·CO 등의 생성물들과 여러 가지 매연 전구물질들의 농도 분포가 연구되었다. 이로부터 이들 물질의 농도 분포와 매연 발생과의 관계가 제안되기도 하였다.

또 화염 내 유동장의 속도에 관해서는 LDA[8]와 PIV[9]를 사용한 연구가 있었다.

그러나 광학적 방법을 이용한 기존의 확

산화염 연구는 그 대상으로서 형상이 축대칭인 버너[1~7, 9] 혹은 1차원인 버너[8]를 많이 사용하였다. 따라서 다른 버너의 형상에 대해서는 화염의 구조가 어떻게 달라지는지에 관한 데이터는 없는 실정이다. 그러나 보일러 연소로나 소각로 등 실제 화염의 경우 그 형상도 여러 가지로 다양하므로, 앞으로 연소 진단의 광학적 방법을 실제에 응용하기 위해서는 임의의 형상을 가진 화염에 적용하는 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 연구 대상을 단면이 정사각형인 버너로 정하고 이 화염의 구조적인 특성을 파악하고자 하였다. 확산화염 연구에서 다루어지는 인자들을 기존의 축대칭 화염에 대한 연구와 비교하고자 하였으며, 재구성 알고리즘도 임의의 형상에 적용할 수 있는 기법을 사용하였다[10]. 이 과정에서 비축대칭 화염에 대한 연구에 있어서 고려하여야 할 점들을 살펴보고, 앞으로의 응용 가능성을 타진하였다.

이를 위해 본 연구에서는 확산화염 구조 연구에 있어 확산화염의 자발광을 매연 입자의 플랑크 복사에 의한 것으로 규정하고[11], 가시광선 영역에서의 화염의 광대역 총 자발광으로부터 화염 경계(flame edge), 화염의 형상 계수, 온도 등의 물리량을 평가하고자 하였다.

이러한 자발광 측정법은 대상이 되는 광원이 충분한 광량을 가진 경우에만 적용할 수 있는 방법이라는 제약이 있지만 레이저 등의 추가적인 광원을 필요로 하지 않고 실험 장치 및 절차를 간략하게 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 이 방법은 확산화염이 존재하는 실제 연소 기기에 적용하기에 적합하다고 할

수 있을 것이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치[Fig.1]

본 연구의 실험 대상으로서 단면 모양이 정사각형인 버너(25×25mm)를 제작하였다. 연료의 유동을 고르게 하기 위해 버너 출구에 honeycomb을 부착하였으며, 화염을 안정시키기 위해 버너 주위의 실린더(내경 110mm)를 통해 2차 안정화 공기를 미량 주입하였다. 연료로는 상용 프로판을 사용하였으며, 연료의 유량은  $55.0\text{cm}^3/\text{s}$ (유속 환산값  $8.8\text{cm}/\text{s}$ )로 하였다. 이와 같은 조건으로 비축대칭 확산 화염을 만들었으며, 이 때 가시적인 화염의 높이는 72mm이었다[Fig.2].

본 연구에서는 실험에 의해 대상 화염에

대한 multi-projection을 얻는 것이 요구되므로 대상을 회전시킬 수 있는 장치가 필요하다. 이를 위해 회전과 높이 조절이 가능한 수동 회전 stage를 제작하였다. 또한 화염의 반경 방향( $x$  혹은  $y$  방향)의 스캐닝을 위해 X-Y scanning mirror(General Scanning Inc., E00-XY3037Y, DE2000)를 사용했다. 이 장치는 반경 방향과 높이 방향으로 움직이는 두 개의 step motor에 거울을 붙인 구조로 되어있으며, 대상을 움직이지 않고 이 거울을 움직임으로써 측정점의 위치를 쉽게 바꿀 수 있다.

광검출기로는 광증배관(photo multiplier tube; Hamamatsu, R212)을 사용하였다. 이 장치는 가시 광선 영역에 걸친 광대역 검출기이다. 또한 광증배관의 출력 신호를 증폭하고 배경 잡음을 없애기 위해 lock-in amplifier(EG&G, 5210)와

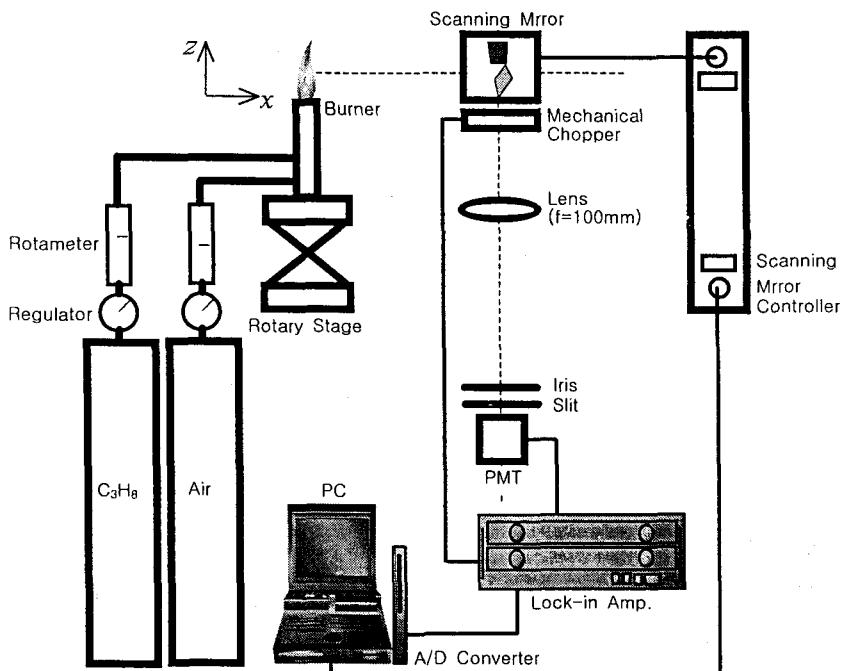


Fig. 1 Experimental set-up

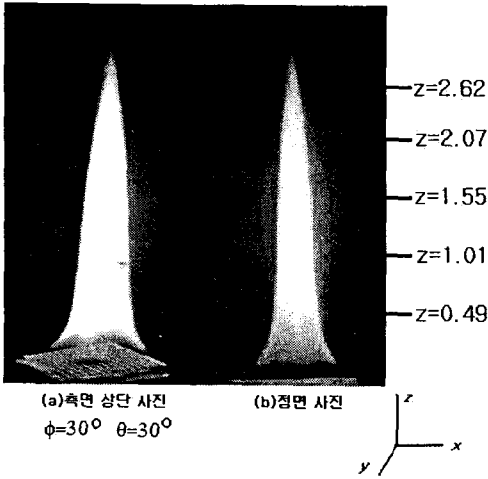


Fig.2 Flame shape

mechanical chopper(Monolight, 9000)를 함께 사용하였다.

데이터를 얻는 장치로는 Lab-PC+ 카드(National Instruments)를 사용하였다. 이 장치는 범용의 아날로그-디지털 변환기로서, 광증배관과 lock-in amp.를 거쳐 입력되는 아날로그 신호를 -5V~5V 혹은 0V~10V의 디지털 신호로 변환하여 PC로 출력한다. 또한 scanning mirror와 monochromator를 PC에서 제어할 수 있도록 제어기 인터페이스 프로그램을 작성하였다.

2.2 실험 과정

2.2.1 화염의 안정성과 rising time

본 연구에서 사용하는 사각화염은 x 방향 스캐닝과 multi-projection이 필요하므로, 한 개의 데이터 세트를 얻는 데 몇 시간 이상이 요구된다. 따라서 이 시간 동안 화염의 안정성이 보장되어야 한다. 이번 실험에서는 연료의 공급 압력이 떨어지지 않는지 알아보기 위해 3시간 동안 1분 간격으로 화염의 자발광 강

번호	측정 높이	무차원 높이 (z)	전체 높이에 대한 비율
5	66mm	2.62	91.7%
4	52mm	2.07	72.2%
3	39mm	1.55	54.2%
2	25mm	1.01	34.7%
1	12mm	0.49	16.7%

Table 1 Measurement heights

도를 측정하였다. 그 결과 이 시간 동안 화염의 자발광 강도는 평균 1.26V, 표준편차는 0.0139V로, 표준편차는 평균의 1.1%로 나타났다.

2.2.2 자발광 강도 측정

화염의 자발광 강도 측정은 Fig.2에 표시한 5개 높이에 대해 실시하였으며, 무차원 높이  $z = h/L$  ( $h$ : 실제 높이,  $L$ : 버너의 한 변의 길이)를 정의하였다 [Table 1]. 각각의 높이에 대해 화염을 180°의 범위에서 22.5°씩 회전시키며 측정해 8개의 projection을 얻었다. 1개의 projection당 x 방향으로 31개의 샘플링을 실시하였으며, 각각의 샘플링에서는 1초 간격으로 30회 측정해 그 평균값을 얻었다. 각각의 샘플링에서의 공간분해능은 1mm<sup>2</sup>로 하였다.

2.2.3 재구성 기법[10]

실험 과정에서 얻어진 선적분 데이터를 국소 데이터로 변환하기 위해 재구성 기법을 사용하였다. 대상이 측대칭인 경우에는 재구성 기법으로서 Abel 변환을 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 임의의 형상에 대해 사용할 수 있는 back convolution 기법을 사용하였다.

재구성 기법에 있어서 샘플링 간격을 정

하는 방법에는 polar raster와 concentric squares raster가 있다[12]. Polar raster는 회전축을 중심으로 하는 동심원들 위에서 일정한 각도에 따라 샘플링하는 방법으로, 주로 축대칭인 대상을 샘플링할 때 사용된다. concentric squares raster는 중심점이 모두 같은 사각형들 위에서 일정한 각도에 따라 샘플링하는 방법으로, 일반적인 비축대칭 대상을 샘플링할 때 사용된다. 이번 연구에서는 대상의 단면이 사각형이므로 이 raster를 사용했다.

Polar raster의 경우는 모든 각도에서 샘플링 간격이 일정하지만, concentric squares raster는 각도에 따라 샘플링 간격이 달라져야 한다. 이번 실험의 경우 25mm를 30개로 나누므로 샘플링 간격은 각도 0°, 90° 등에서 0.833mm가 되며, 이 때 45°, 135° 등에서는 간격이 1.179mm, 22.5°, 67.5° 등에서는 0.902mm가 된다.

한편 재구성 과정에서 filter의 선택이 결과의 정확성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데[13], 본 연구에서는 가장 일반적이고 최신의 것인 modified Shepp-Logan filter를 사용하였으며[14], 검증 결과 다른 filter를 사용한 것보다 가장 정확한 재구성 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용한 filter-raster 조합에 의한 재구성 오차는 평균 1.99%로 계산되었다.

#### 2.2.4 측정 시스템의 파장 특성

측정 시스템의 파장 특성  $g(\lambda)$ 의 곡선을 얻기 위해, 버너 화염 대신 파장에 대한 방사도(irradiance)가 알려져 있는 QTH(Quartz-Tungsten-Halogen) 램프

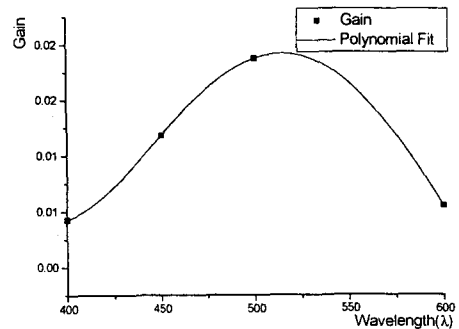


Fig.3 Wavelength characteristics of measurement system

(ORIEL, model 6333)를 광원으로 하고, monochromator(Aries, FF500MS; 초점 거리 500mm)를 측정계에 삽입하였다. 그리고 본 실험의 측정 시스템에 사용되는 광증배관의 파장에 대한 출력 특성을 측정하고, 이를 fitting하여 시스템의 파장 특성 함수를 구했다[Fig.3]. 그 결과 Eqn.1을 얻을 수 있었으며, 시스템의 유효 파장 범위는 350~650nm임을 알 수 있었다.

$$g(\lambda) = 0.697 - 4.94 \times 10^{-3} \lambda + 1.14 \times 10^{-5} \lambda^2 - 8.54 \times 10^{-9} \lambda^3 \quad (1)$$

### 3. 실험 결과

#### 3.1 자발광 강도 분포

5개의 높이에서의 재구성 결과 contour plot을 Fig.4에 나타내었다. Fig.4를 보면, 자발광이 발생하기 시작하는 높이는  $z=0.49$ (화염 전체 높이 대비 17%)이며,  $z=2.07$ (72%)에서 가장 강한 자발광이 있는 것으로 나타났다. 또한  $z=2.62$ (92%)에서는 자발광의 세기가 화염 상류 부분의 암영역과 비슷한 수준인 것으로 나타

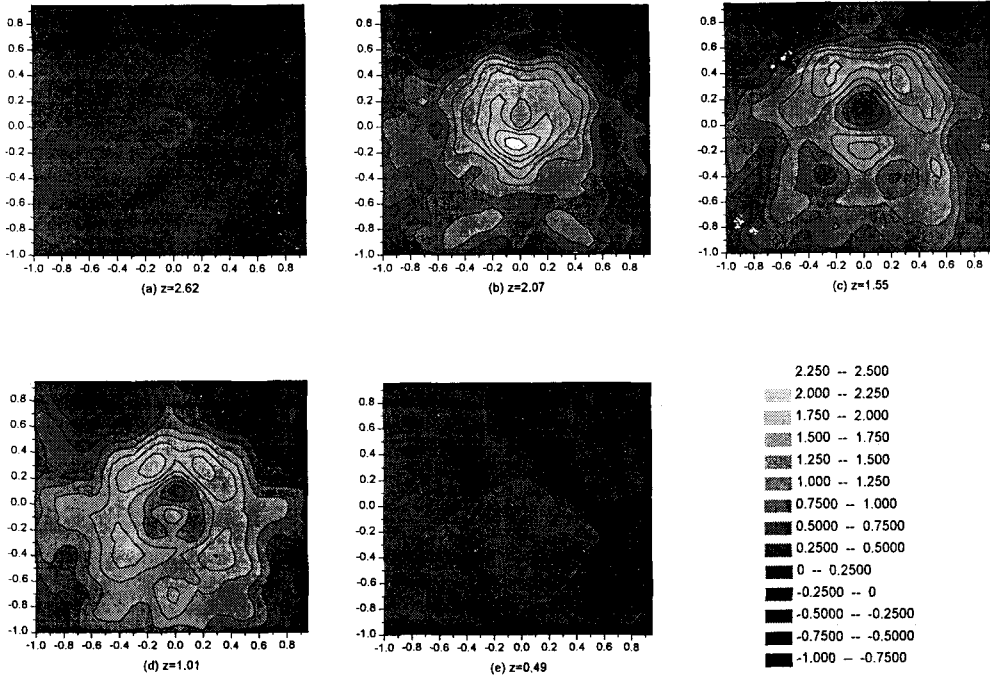


Fig.4 Contour plot of the self-emission

났다.

이번 연구에 사용된 사각화염을 육안으로 관찰했을 때 버너 출구 부분에서 사각형에 가까운 모양이었던 화염의 단면 형상이 하류로 가면서 원형에 가까워지는 것을 관찰하였다. 재구성 결과에서도  $z=1.01$ (35%)과  $z=1.55$ (54%)에서 사각형에 가까운 화염 단면이  $z=2.07$ (72%)에서 급격히 원형으로 변화해가는 현상을 보여 육안으로 관찰한 것과 대체로 일치했다. 이는 Sec.3.3에서 다시 설명할 것이다.

이렇게 화염의 단면 형상이 원형으로 변해가는 것은 연료와 공기의 확산에 의한 영향, 대기압에 의한 수축의 영향 및 연소에 의한 수축의 영향인 것으로 보인다. 특히 화염의 네 모서리 부분에서는 다른 부분에 비해 같은 체적에 대해 표

면적이 넓기 때문에 연소가 더 빨리 진행되어 더 급격하게 수축하는 것으로 생각된다. 이것은 높이에 따른 매연의 발생 경향을 보아도 알 수 있는데, 매연은 최초에 화염의 상류에서 화염의 네 모서리에 집중되어 발생되다가[Fig.4(d)], 더 하류로 갈수록 그 발생 범위가 네 변 쪽으로 넓어지는 것이 관찰되었다 [Fig.4(c)]. 이런 현상 역시 사각 화염의 네 모서리에서 연소가 활발하기 때문이다.

Fig.4에서  $x$ (혹은  $y$ )= $\pm 0.5$ 를 벗어나면 자발광 강도의 값이 음수가 되는 곳이 보이기 시작하며, 이 현상은  $x$ (혹은  $y$ )= $\pm 0.7$ 인 지점부터 확연해지는데, 이는 재구성 알고리즘의 불완전성에 기인하는 것으로서, 자발광 강도의 공간 주파수가 큰 지점에서 나타나는 현상이다. 이는

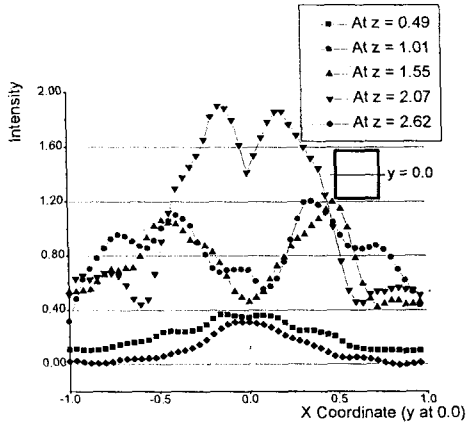


Fig.5 Self-emission distribution at  $y=0.0$

filter의 파라미터를 적절히 조절함으로써 줄일 수 있으나, 이 경우 화염의 바깥 부분에서 자발광 강도값이 0으로 떨어지는 속도가 느려진다[15].

한편  $y=0.0$ 인 중심 단면에서 높이에 따른 자발광 강도는 Fig.5와 같이 나타난다. 그림에서 자발광 강도의 최대값이 나타나는  $x$  좌표는  $z=1.55(54\%)$ 에서 가장 중심에서 멀며, 그 위와 아래로 가면 중심으로 가까워진다. 즉 자발광 강도의 최대값으로 본다면, 화염은 가운데가 불룩한 형상이 될 것이다. 반면 육안으로 관찰되는 화염은 높이가 낮은 곳에서 가장 넓고 높아질수록 점점 좁아지는 형상을 보이고 있다. 따라서 자발광 강도의 최대값과 육안으로 관찰되는 화염의 경계의 좌표는 화염의 상류 부분에서는 일치하지 않는 경향을 보인다.

연료로 에틸렌( $C_2H_4$ )을 사용하는 축대칭 확산화염에서의 입자의 수밀도에 관한 Santoro 등[3]의 연구에서는, 그 최대값이  $z=2.80(35\%)$ 에서는  $r=0.43$ 인 위치에서 나타나며, 무차원 높이  $z=4.89(62\%)$

전체 높이에 대한 비율	Santoro[3]	Ha[4]	이번연구
32%	-	0.53	-
35%	0.43	-	0.36
42%	-	0.47	-
54%	-	-	0.44
56%	-	0.40	-
62%	0.41	-	-
72%	-	-	0.18

Table 2 Radial positions of emission peak at various heights

에서는  $r=0.41$ 인 위치에서 나타나, 이 위치가 대체로 일정하지만 조금씩 좁아짐을 관찰했다. 한편 연료로 프로판을 사용하는 확산 화염의 매연 입자 크기 및 농도 분포에 관한 Ha 등[4]의 연구에서는, 측정 높이가 화염 전체 높이의 32%인 지점에서 매연 입자의 수밀도가 최대값이 되는 위치는  $r=0.53$ 이었으며, 42%인 지점에서는  $r=0.47$ , 56%인 지점에서는  $r=0.4$ 가 되어, 측정 높이가 높아질수록 계속 좁아지는 현상이 나타난다고 하였다. 이는 Santoro 등의 결과와 비슷하나 좁아지는 폭이 좀 더 급격하게 나타난 것이다[Table 2].

한편 위 연구들과 비교했을 때 이번 연구에서는 flame edge가 형성되는 높이가 더 높았는데, 이는 초기에 버너 입구 쪽에서 사각형인 화염 형상이 하류 쪽에서 원형으로 바뀌고 연료 흐름이 안정되는 데에 그만큼 더 시간이 걸림을 뜻한다.

### 3.2 화염 경계

본 연구와 같은 형태의 화염에서 화염 경계(flame edge)를 정하는 방법은 여러 가지를 생각할 수 있겠으나, 화염 경계

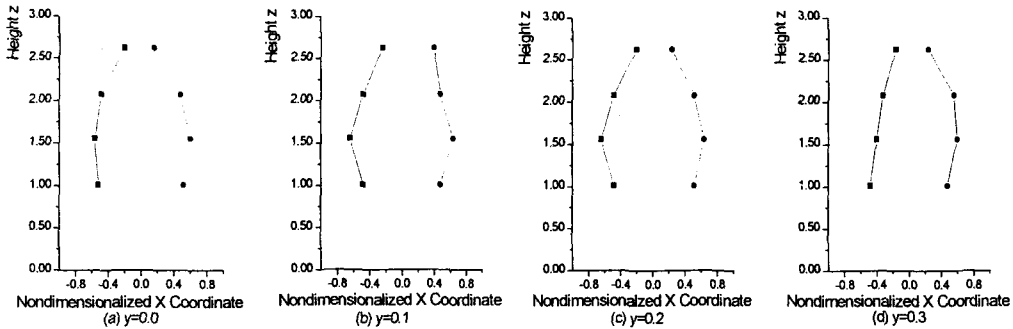


Fig.6 Flame edge

를 정할 때의 임의성을 없애고 모든 높이에서 정의될 수 있도록 하기 위해 본 연구에서는 자발광 강도의 미분값의 절대값이 최대가 되는 점(즉, 2차 미분값이 0이 되는 점)을 화염 경계로 정의했다 [16]. 자발광 강도의 미분값이 최대가 되는 점은 생성되는 매연 입자의 양이 가장 급격하게 바뀌는 부분을 의미하며, 화학반응이 일어나는 반응 영역의 경계가 된다. 이 값들을  $y$ 가 일정한 단면으로 그려보면 Fig.6과 같다.

Fig.6에서 화염 경계의 폭이 가장 넓은 높이는 대체로  $z=1.55(54\%)$ 이다. 화염 경계 역시 자발광 강도와 마찬가지로, 높이 방향으로 갈 때 넓어졌다가 다시 좁아지는 경향을 보인다. 이는 위 Sec.3.1에서 논의한 원인과 더불어,  $z=1.55(54\%)$  이하의 영역에서는 연소 현상에 의한 화염의 수축(shrink)보다 연료의 예열(pre-heating)과 확산(diffusion)이 더 주요한 역할을 함을 의미한다. 그러나 그 이상의 영역에서는 연료의 예열과 확산의 영향이 적어지고 연소 현상이 더 주요하게 되어 연소에 의한 화염의 수축이 나타나게 된다.

### 3.3 단면 형상계수

높이가 낮은 부분에서는 사각형인 화염의 단면이 높이가 높아질수록 원형에 가까워지는 현상을 정량화하기 위해 perimeter를 사용하여 화염 단면의 형상계수  $P=4\pi A/c^2$ 를 정의했다. 여기서  $A$ 는 화염 단면의 면적,  $c$ 는 둘레의 길이이다. 몇 가지 도형에 대한 형상계수를 Fig.7에 표시하였으며, 완전한 원형에 대해  $P=1.0$ 으로서 최대값이 된다. 따라서 각각의 높이에서 자발광 강도의 FWHM의 그래프에서 형상계수를 구해 그 값의 변화를 보면 단면의 모양의 변화를 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산한 화염의 형상계수는 Fig.7과 같다.

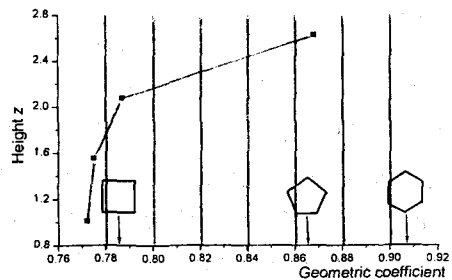


Fig. 7 Flame geometric coefficient



Fig.7을 보면,  $z=2.07(72\%)$ 까지는 정상계수가 조금씩 커지며  $z=2.62(92\%)$ 에서 급격하게 커진다. 한편 Sec.3.1과 Sec.3.2 등에서 볼 때,  $z=2.07(72\%)$ 까지는 자발광 강도의 peak가 2개이며  $z=2.62(92\%)$ 에서는 자발광 강도의 peak가 1개이다. 이런 점들로 보아 이 두 높이 사이에 화염이 가장 급격하게 축소하는 영역, 즉 연소 반응이 가장 활발한 영역이 존재함을 알 수 있다. 또한 Sec.3.1에서, 화염 전체에서 자발광 강도가 가장 강한 높이가  $z=2.07(72\%)$ 이라는 점도 이러한 사실을 뒷받침해 준다.

### 3.4 온도 해석

본 연구에서는 화염의 가시광선 영역에서의 광대역 자발광과 온도와의 관계를 모델링하기 위한 시도를 하였다. 본 연구에 사용된 화염은 확산 화염으로서, 화염의 자발광은 매연 입자에 의한 플랑크 복사광이 지배적이다. 매연 입자에 의한 복사광 신호는

$$I(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) \epsilon(\lambda, T) I_b(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $g(\lambda)$ 는 측정 시스템의 파장에 따른 출력 특성,  $\epsilon(\lambda, T)$ 는 매연 입자의 방사율,  $I_b(\lambda, T)$ 는 매연 입자의 온도에 해당하는 흑체의 복사 강도,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 측정 시스템의 측정 가능한 파장 범위를 나타낸다[Sec.2.2.4].

가장 단순한 형태의 모델링으로서 매연 입자가 회체(gray body)로서 거동한다고 가정하면( $\epsilon(\lambda, T) = \epsilon$ )[17], Eqn.2는

$$I(T) = \epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) I_b(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

이 된다.

만약 위 파장 범위 전체에서  $g(\lambda)$ 를 알고 있다면, 온도와 자발광 강도와의 관계를 알 수 있다. 즉, 몇 가지 온도에 대해 Eqn.3의 값을 수치 적분으로 구하고, 이를 curve fitting하는 방법으로 가장 간단한 형태의 온도-자발광 강도의 관계식을 얻는 것이 가능하다. 또한 매연 입자의 방사율  $\epsilon(\lambda, T)$ 의 형태를 모델링하여 Eqn.2에서 방사율을 고려한 온도-자발광 강도의 관계를 얻을 수도 있다.

다만 위 관계식에서 얻을 수 있는 것은 온도의 상대적인 값이며, 따라서 화염의 절대 온도를 얻기 위해서는 화염 내의 어느 한 점의 온도를 측정해 이 측정값으로부터 화염 전체의 온도 분포를 계산해야 한다.

위와 같은 방법으로 화염의 온도 해석을 시도하였다. 이번 연구에서는 온도와 자발광 강도와의 관계를  $T \propto I^{1/n}$ 의 꼴로 모델링하였으며, curve fitting 결과 지수  $n=2.04$ 로 계산되었다. 이러한 모델링에서는 자발광 강도 구배와 온도 구배의 최대값의 위치는 같고, 다만 그 기울기나 상대적인 값이 달라질 뿐이다.  $y=0.0$ 인 단면에서 온도의 최대값은  $x=-0.6$ 에서, 최소값은  $x=-0.15$ 에서 나타났으며, 그 상대적인 비는 2.06이었다.

Song 등[18]에서는 지름 15mm인 축대칭 프로판 층류 확산화염에 대해 높이 42%인 지점에서  $r=0.227$ 일 때 온도 1500K,  $r=0.533$ 일 때 온도 1750K이었다. 한편 Best 등[6]에서는 지름 11.1mm인 축대칭 층류 확산 화염에 FT-IR을 적용

한 결과 높이 38%인 지점에서  $r=0.0$ 일 때 온도 1640K,  $r=0.41$ 일 때 온도 1850K 이었다. 이번 연구의 결과를 보면 높이 54%에서  $y=0.0$ 일 때 온도 960K,  $y=0.4$ 일 때 온도 1440K로 나타났다. Song 등이 나 Best 등의 결과와는 여러 가지 조건이 다르므로 직접적인 비교는 어려우나, 이번 연구에서는 온도가 대체로 낮게 측정되었고, 온도의 최대값이 생기는 위치가 화염 중심쪽에 가깝게 나타났다.

#### 4. 결론

이상의 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 화염의 자발광 강도 분포는 버너 출구 부분에서는 사각형에 가까운 형상을 보이고 하류에서 원형에 가까워져 육안으로 관찰되는 화염 형상과 일치함을 관찰하였다. 이는  $\Delta$ 연료와 공기의 확산,  $\Delta$ 대기압,  $\Delta$ 연소에 의한 수축 등이 그 원인으로 보이나, 그 엄밀한 규명과 각 항목의 기여 정도를 논하기 위해서는 cold flow에 대한 연구와 비교해보아야 할 것으로 보인다.

둘째, 자발광 강도 분포로부터 정의한 flame edge를 보면, 애초에 2개의 peak를 보이는 flame edge가 화염의 하류에서는 1개로 모아지는 것은 축대칭 화염에서의 기존의 연구 결과와 일치했으며, 그 높이는  $z=2.07(72\%)$ 과  $z=2.62(92\%)$  사이이다.

셋째,  $z=2.07(72\%)$ 과  $z=2.62(92\%)$  사이에서 화염의 형상이 급격히 원형이 되는 현상이 나타났다. 이는 이 높이에서 연소에 의한 화염의 수축이 급격하게 일어나기 때문인 것으로 보인다.

이러한 결과들로 보아, 이번 연구에 사용한 화염의 경우 연료의 예열 및 확산 현상과 연소 현상 각각이 주도하는 높이의 경계는  $z=1.55(54\%)$ 이며, 연소가 가장 활발한 높이는  $z=2.07(72\%)$ 이다. 이 위치는 버너의 크기·연료의 유동 속도에 따라 달라지겠지만, 이번 연구의 경우 이 위치가 축대칭 화염의 경우보다 다소 높은 것으로 보인다. 이는 사각화염의 경우 버너 입구 근방에서 연료의 유동이 안정되고 연료가 충분히 확산되는 데에 그만큼 시간이 더 걸림을 의미하는 것으로 보인다.

이번 연구에서는 온도를 자발광 강도에 대해  $T \propto I^{1/n}$ 으로 표현하여 자발광 강도와 온도와의 상관 관계를 연구하였으나, 온도에 관한 더 정확한 결과를 얻기 위해서는 실험적 혹은 통계적인 자발광-온도 관계 모델을 개발하는 한편 흑체를 이용한 보정이 이루어져야 하며, 열전대를 이용한 온도 측정도 고속 삼입법[19]을 사용하는 등 더 엄밀한 방식으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

향후 이번 연구와 동일한 화염에 대해 총 자발광 강도가 아닌 파장 스펙트럼을 얻는다면 multi-wavelength pyrometry를 적용하여 화염의 색온도 분포를 얻거나 래디컬의 농도 분포를 얻을 수도 있을 것으로 보인다[20].

#### 참고문헌

- (1) M. Kunugi and H. Jinno, *11th Symp. Comb.*(1967) : 257-266
- (2) I. J. Jagoda, G. Prado and J. Lahaye, *Combust. Flame* 37(1980) : 261-274

- (3) R. J. Santoro, H. G. Semerjian and R. A. Dobbins, *Combust. Flame* 51(1983) : 203-218
- (4) Y. Ha and S. Kim, *Trans. KSME* 16 (1992) : 1796-1804
- (5) H. M. Hertz and G. W. Faris, *Opt. Lett.* 13(1988) : 351-353
- (6) P. E. Best, P. L. Chien, R. M. Carangelo, P. R. Solomon, M. Danchak and I. Ilovici, *Combust. Flame* 85(1991) : 309-318
- (7) Y. R. Sivathanu and J. P. Gore, *Combust. Flame* 110(1997) : 256-263
- (8) J. H. Kent, H. Jander and H. GG. Wagner, *18th Symp. Comb.*(1981) : 1117-1126
- (9) T. Blessing, P. Terhoeven and N. Peters, *Combust. Flame* 115(1998) : 335-353
- (10) R. J. Santoro and H. G. Semerjian, *Intl. J. Heat Transfer* 24(1981) : 1139-1150
- (11) J. D. Felske and C. C. Tien, *Comb. Sci. Tech.* 7(1973) : 25
- (12) D. E. Dudgeon and R. M. Mersereau, *Multidimensional Digital Signal Processing*, Prentice-Hall Inc.(1984) : 363-390
- (13) Y. S. Kwoh, I. S. Reed and T. K. Truong, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-24(1977) : 1990-1998
- (14) L. A. Shepp and B. F. Logan, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-21(1974) : 21-43
- (15) H. H. Barrett and W. Swindell, *Proceedings of IEEE* 65(1977) : 89-107
- (16) K. K. Kuo, *Principles of Combustion*, John Wiley and Sons, Inc.(1986) : 661-663
- (17) M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, Inc.(1993) : 772
- (18) S. Song, S. Park and S. Kim, *Trans. KSME* 17 (1993) : 2563-2573
- (19) J. H. Kent, H. Gg. Wagner, *Combust. Sci. Tech.* 41(1984) : 245-269
- (20) K. Ha and S. Choi, *16th KOSCO Symp.* (1998) : 119-131