

화상처리기법에 의한 예혼합 난류전파화염의 구조해석

김 준 효* · 라 진 흥**

The Structural Analysis of Premixed Turbulent Propagating Flames Utilizing the Image Process Technique

J. H. Kim · J. H. Ra

Key words : Turbulent Flame Structure(난류화염구조), Reactant Islands(미연혼합기괴), Laser Tomography(레이저토포그래피), Product Islands(기연가스괴), Image Process Technique(화상처리기법), Characteristic Flamelet Thickness(화염소면 대표 두께)

Abstract

The structure of premixed turbulent flames in a constant volume vessel was investigated by using a laser tomography. The flame structure was visualized by passing a laser sheet with 0.2 mm thick and 2 cm wide through the turbulent flames to obtain their 2-D images. From the obtained images, islands of reactants as well as of products were found, at least in the 2-D images, when the turbulence intensity was above 0.4 m/s. Moreover, in order to obtain the characteristic flamelet thickness, the light intensities of them were digitized and processed into three colors, incorporating two appropriate threshold values in the image analysis. As the result, the averaged value of characteristic flamelet thickness was found to be about two times compared to laminar one.

1. 서 론

최근, 엔진의 저연비화와 배기가스의 정화가 함께 요구됨에 따라 예혼합 난류연소에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 예혼합 난류화염구조의 해명은 엔진의 연소제어 및 연소모델의 작성상

중요한 과제이므로 많은 이론적 실험적 연구가 보고되고 있다¹⁻¹⁰⁾. 그러나, 복잡하게 뒤얽힌 여러 인자들의 상호작용으로 인하여 난류화염구조의 상세한 내용은 아직 충분히 밝혀지지 않은 상태이다.

난류화염구조의 해명에 있어서 미연혼합기괴(Reactant Islands)의 존재여부에 대한 정성적인

* 정회원, 목포해양대학교 기관공학부(원고접수일 : 99년 7월)

** 정회원, 부경대학교 수산과학대학 실습선

문제와 그 크기 및 발생조건에 대한 정량적인 문제가 많은 관심을 끌고 있다. Kido⁹⁾등은 예혼합 난류 연소의 화염구조 및 연소속도를 동시에 설명할 수 있는, 이른바 RIFF 모델을 제안하고, 모델에 의한 난류연소속도의 예측결과가 실측결과와 잘 일치함을 보였다. 이 모델은 기연가스와 미연혼합기체가 공존하는 군도상 화염(Reactant Islands Flame)과 화염소면의 자기상사성(Fractal of Flame Surfaces)을 가정하고 있다. 군도상 화염의 존재에 대해서는, 난류강도가 증가함에 따라 슈리렌 사진의 줄무늬 간격이 급격히 작아지고^{2,3)}, 또 정전탐침법^{4,5)}에 의해 난류화염영역에서는 여러 개의 화염소면이 탐침을 통과한 사실로부터 그 가능성이 높은 것이 실험적으로 제시되었다. 한편, 최근의 레이저 토모그래피^{7,8)}에 의하면, 화염소면의 자기상사성은 확인되었지만 기연가스와 화염면에 둘러 쌓인 미연혼합기체는 관찰되지 않았다고 보고하고 있다⁶⁾.

본 연구에서는 레이저 토모그래피를 이용하여 난류전파화염의 측면과 정면에서 화염구조를 관찰하고, 군도상 화염의 유무를 포함하여 난류화염면의 거동을 조사하였다. 또, 촬영한 토모그램을 화상처리하여 화염의 구조를 3색법으로 나타내고, 미연혼합기에서 기연가스로 친이하는 영역, 이른바 반응영역 두께의 대표치를 계측하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 이용한 정적 연소장치는 Fig. 1과 같이 화염을 한 방향으로 전파시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 분압충전법으로 용기내에 충전된 혼합기는 연소실(직경50mm, 길이 220mm)의 하부에 설치된 원심 팬에 의해 화살표 방향으로 순환된다. 난류는 연소실 입구에 마주 보게 설치된 다공판에서 분출되는 혼합기의 충돌에 의해 발생되며, 난류강도는 팬의 회전속도로 변화시켰다. 연소실에는 화염의 전파방향과 그것에 직각방향의 양면에 각각 관측창을 설치하여, 전파화염의 정면과 측면에서 관측할 수 있다. 또 원심 팬 쪽으로 화염이 침입하지 않도록 함과 동시에 산란입자의 순환을 위하여 평판격자를 0.3mm 간격으로 나열한 소염기를 설치하였다.

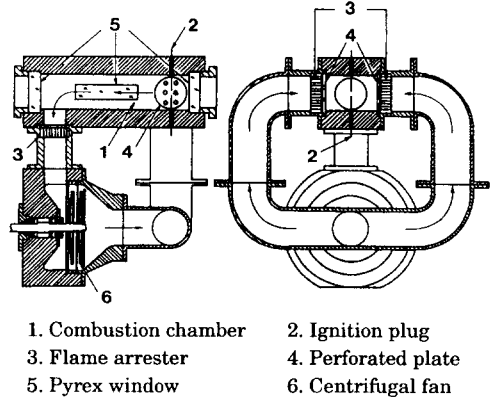


Fig. 1 Schematic diagram of combustion chamber

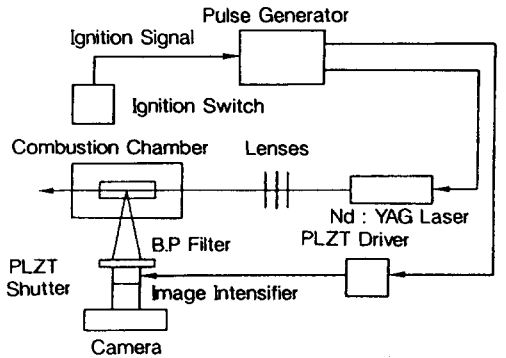


Fig. 2 Optical system for laser tomography

난류화염의 사진촬영에 이용한 광학계를 Fig. 2에 나타낸다. 출력이 약 2MW인 Nd : YAG 레이저와 평철 렌즈(plano-convex lense) 3개(초점거리 : 40, 500, 1000mm)를 이용하여 연소실의 중심 축 위에 높이 20mm, 두께 약 0.2mm의 레이저 셔트를 형성하였다. 산란입자는 평균입경 0.02~0.05 μ m의 초미립자 TiO₂를 사용하였다. 산란입자를 주입하였을 때와 주입하지 않았을 때의 연소압력을 비교한 결과, 연소과정에 있어서 산란입자의 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다. 한편, 입사광의 굴절을 변화 및 산란입자의 변형에 의해 가시화 단면의 산란광이 감소할 가능성도 있다. 그러나, 본 연구에 있어서 기연가스와 미연혼합기의 사이에는 항상 양호한 명암 대비가 얻어졌기 때문에, 화염소면의 형상 및 그 위치를 쉽게 결정할 수 있었다. 또한, 산란입자의 융점은 약 2100K로 화염

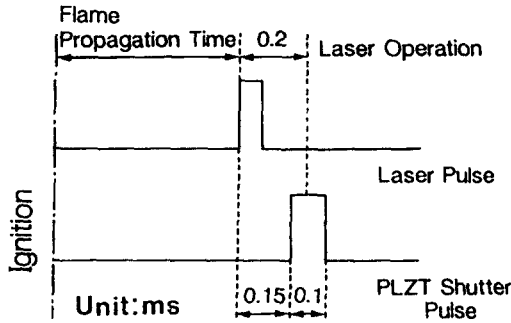


Fig. 3 Time interval of trigger signal between laser and PLZT shutter

의 예상온도보다 높기 때문에, 화염영역에서의 산란광 단면은 그다지 영향을 받지 않을 것으로 생각된다.

레이저는 점화 스위치의 트리거 펄스에 의해 화염소면이 관측영역의 일정 위치에 도달하였을 때 작동하며, 그 때 F2.8, 55mm의 카메라를 이용하여 전파화염의 측면과 정면에서 촬영하였다. 한편, 화염의 강한 자발광에 의한 영향을 적게 하기 위하여 카메라 앞에 밴드 패스 필터(Center Wavelength : 530nm, Halfwidth : 10nm)와 PLZT 초고속 전자 셔터를 설치하였다. 또한, 산란광을 증강시키기 위하여 영상증강관(Image Intensifier)을 내장한 고감도의 암시장치(Night Viewer)를 카메라에 부착시켰다. PLZT 셔터의 트리거 펄스는 레이저의 작동지연시간을 고려하여 Fig. 3과 같이 조정하였다.

3. 혼합기의 조성 and 난류장의 특성

실험에 이용한 혼합기는 2종류의 프로판 인공공기 혼합기이며, 그 조성은 Table 1과 같다. Table 1에서 S_{L0} 는 층류연소속도, δ_{L0} 는 층류화염의 반응역 두께, η_0 는 층류화염의 예열역 두께, ϕ 는 당량비, ν 는 혼합기의 동점도, T_b 는 정압 단일 화염온도이다.

연소용기내의 정상 난류장의 특성은 2대의 정온도형 열선유속계와 형상이 다른 3종류의 열선 프로브를 사용하여 공기에 대해 계측하였다⁵⁾. 난류강도 u' 는 점화플러그로부터 97mm 하류쪽의

Table 1 Properties of mixtures used

MIXTURE	MOLAR FRACTION				ϕ	S_{L0} m/s	δ_{L0} mm	η_0 mm	T_b K	$\nu \times 10^6$ m ² /s
	C ₃ H ₈	O ₂	N ₂	He						
24-P10-38	1.0	5.0	22.0	1.0	1.0	0.24	0.38	0.095	2089	1.51
33-P10-30	1.0	5.0	20.0	2.0	1.0	0.33	0.30	0.069	2168	1.50

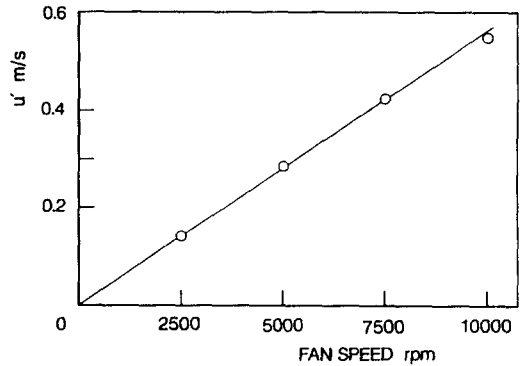


Fig. 4 Turbulence intensity vs. fan speed

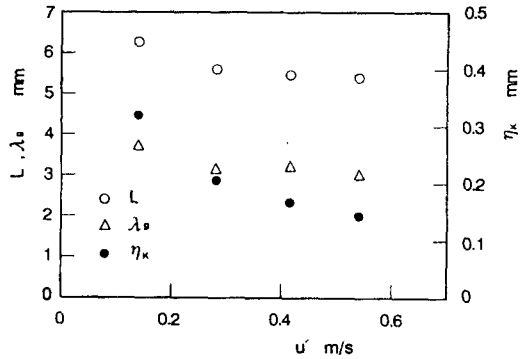


Fig. 5 Turbulence characteristics in the combustion chamber

동일 측정점에 설치하여 얻어진 복수의 계측결과로부터 계산하여 구하였다. 계산에 필요한 각 프로브의 방향감도 특성은 진자 검정으로 구하였다. Fig. 4에 난류강도 u' 의 3축 방향 평균치와 팬 회전속도와와의 관계를 나타낸다. Fig. 4로부터 난류강도 u' 는 팬 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 한편, 난류의 공간척도에 대한 계측결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서, L 은 종방향 적분공간척도, λ_g 는 Taylor 미세척도, η_k 는 난류의 에너지 소산율로부터 구한 Kolmogoroff 척도이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 토모그램에 의한 화염구조의 관찰

4.1.1 전파화염의 측면에서의 관찰

Fig. 6에 층류의 경우와 난류강도 u' 가 각각 0.28 m/s, 0.42 m/s, 0.54 m/s의 경우에 대하여 전파화염의 측면에서 촬영한 토모그램의 한 예를 보인다. 토모그램에 있어서 어두운 부분은 기연가스, 밝은 부분은 미연혼합기를 나타내며 이 명암은 산란입자의 공간 밀도 차에 의한 것이다. Fig. 6으로부터, 화염면의 왜형의 정도는 난류강도가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 또, u' 가 0.42m/s와 0.54 m/s의 경우에는, 기연가스 속에 미연혼합기괴가 존재하고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 소위 군도상 화염영역의 화염구조로 생각되지만, 2차원 단면상의 영상이기 때문에, 3차원적인 군도상 화염의 형성여부는 확인할 수 없다. 한편, 정전탐침법의 측정결과⁵⁾에 의하면, 난류강도가 0.3m/s 이하에서도 미연혼합기괴가 존재하였다. 그러나, 레이저 토모그래피에 의해 화염구조를 관찰한 결과, 그 조건에서는 미연혼합기괴의 존재를 확인할

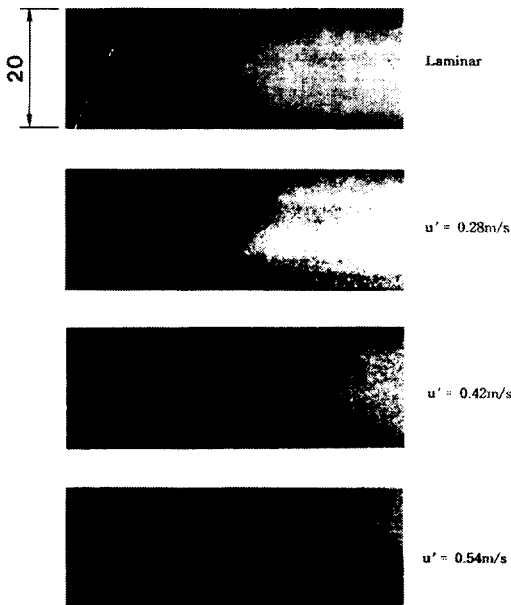


Fig. 6 Tomograms for mixture 33-P10-30 (laser emitted parallel to the flame propagating direction)

수 없었다.

난류강도가 동일한 조건에서도 화염전파속도의 편차에 의해 각각 다른 화염구조가 관찰되었다. 대표적인 관찰결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서도 기연가스와 화염면에 둘러 쌓인 미연혼합기괴를 관찰할 수 있다. 이것은 기연가스쪽으로 깊이 휘감겨 들어간 미연혼합기의 연소특성시간이 난류의 혼합특성시간보다 길기 때문에, 난류에 의한 화염면의 충돌이나 기연가스의 팽창 등에 의해 미연혼합기로부터 분리된 것으로 생각된다. 또한, 화염면에서 가까운 미연혼합기 쪽에 기연가스괴(Product Islands)도 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 화염의 신장(Flame Stretch)과 국소소멸(Local-Quenching)에 의한 것으로, Mantzaras⁶⁾ 등이 보고한 "Product Fingers"에 대응하는 것으로 생각된다. 약 500장의 토모그램에 대하여 미연혼합기괴와 기연가스괴의 발생 확률을 조사한 결과, 그 확률은 각각 43%와 10% 정도로 상당히 높은 값을 보였다.

4.1.2 전파화염의 정면에서의 관찰

화염영역의 안쪽 방향의 화염구조를 조사하기 위하여 전파화염의 정면에서도 화염구조를 관찰하였다. 대표적인 관찰결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림으로부터, 난류강도가 증가함에 따라 화염면의 요철이 심해지고 그 폭도 가늘어짐을 알 수 있다. 또, 기연가스 속으로 미연혼합기가 깊이 감겨 들어가는 모양이나 미연혼합기쪽으로 기연가스가 가늘고 길게 돌출하고 있는 모습도 확인할 수 있다.

화염의 관찰 결과로부터, 본 연소장치에서의 연소과정은 평균적으로 연소실의 벽면 가까운 곳에서 먼저 화염이 전파하고, 그 후 중심부에 휘감겨 들어간 미연혼합기가 연소하는 것으로 판단된다.

4.2 화상처리기법에 의한 화염구조의 해석

4.2.1 3색법에 의한 화상처리

전파화염의 측면에서 촬영한 토모그램에 있어서, 어두운 부분의 기연가스와 밝은 부분의 미연혼합기 사이에는 중간명도 영역(Intermediate-Light Region)이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 영역은 미연혼합기에서 기연가스로 천이하는 영역, 이른바 난류화염면의 반응영역을 대표하는 것

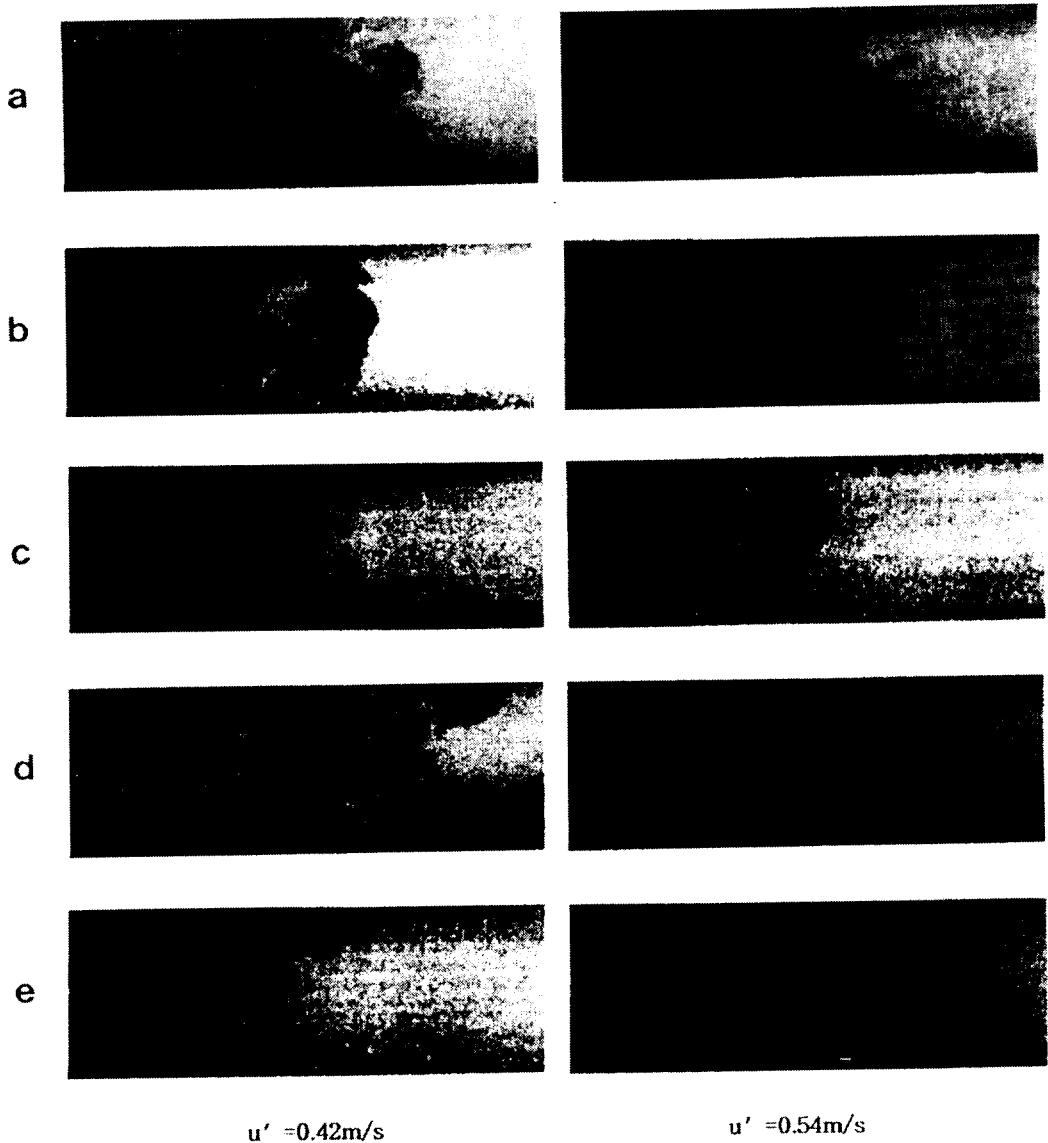


Fig. 7 Tomograms of turbulent flame for mixture 24-P10-38
(laser emitted parallel to the flame propagating direction)

으로 생각된다. 따라서, 비디오 카메라와 컴퓨터를 이용하여 토모그램을 화상처리하고, 화염소면의 반응영역 두께의 대표치를 측정하였다. 화상해석에는 6비트 분해능의 A/D 및 D/A 변환기와 화상 메모리를 내장한 이미지 메모리 보드를 이용하였다. 화상은 256(H)×240(V)의 화소(Pixel)로 구성되며, 계산에 의하면 공간 해상도는 1화소당 0.26mm이다.

화염소면의 반응역 두께의 대표치는 다음과 같이 정의하여 측정할 수 있다. 먼저, 산란광자의 수밀도(Number Density)는 산란광 강도에 비례한다고 가정하여 화염소면에 수직인 단면의 산란광 강도 그래프의 구배가 최대로 되는 점에서 접선을 긋는다. 이 접선과 산란광 강도의 최대치 및 최소치를 나타내는 직선의 교점을 구하고, 그 2점 사이의 수평거리를 화염소면의 반응역 두께의 대표치

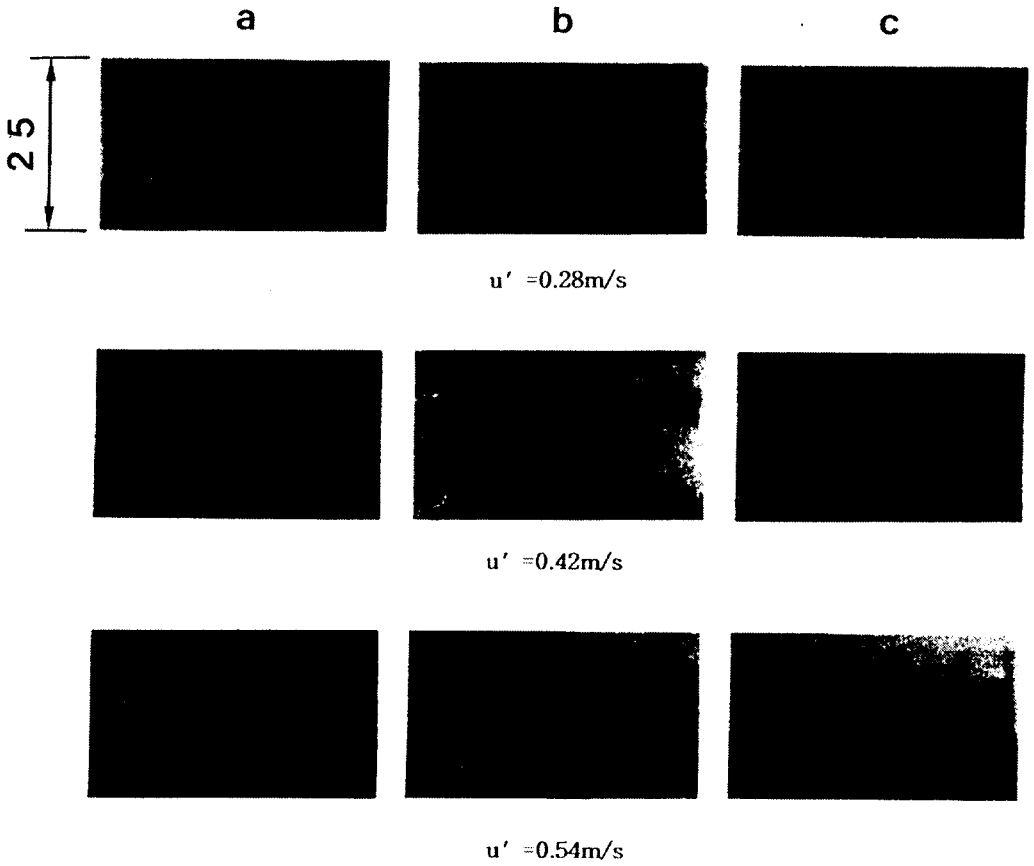


Fig. 8 Tomograms of turbulent flame for mixture 24-P10-38 (laser emitted normal to the flame propagating direction)

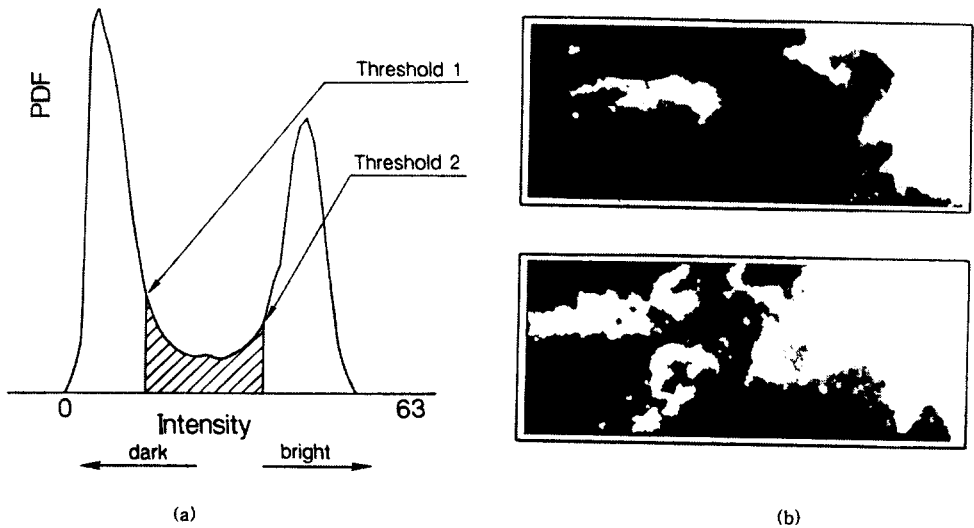


Fig. 9 (a) Intensity histogram of the tomogram, (b) Three-color flame images

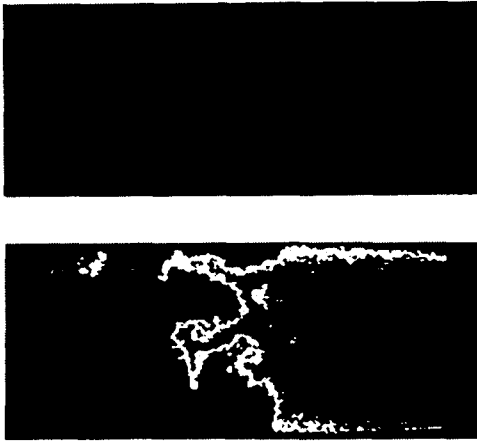


Fig. 10 Example of the image process

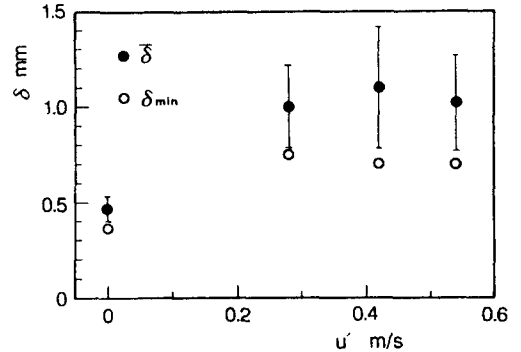
로 정의한다. 그러나, 이 계측방법은 난류화염의 경우 대단히 곤란하기 때문에 아래와 같은 방법으로 반응역 두께의 대표치를 구하였다.

Fig. 9 (a)에 보이는 바와 같이, 토모그램의 산란광 강도 히스토그램은 쌍봉 분포(Bimodal Distribution)를 보인다. 중간명도 영역을 결정하기 위해서, 산란광 강도 히스토그램의 양쪽 최대치에서 최소치를 뺀 값의 1/7을 각각 최소치에 더하여 얻어진 2개의 한계치를 이용하여 Fig. 9 (b)와 같이 토모그램을 3색으로 나타내었다. 즉, 한계치 1보다 작은 산란광 강도의 화소는 기연가스 영역, 한계치 2보다 큰 산란광 강도의 화소는 미연혼합기 영역이며, 그 중간영역의 화소가 반응영역의 두께를 의미한다. 화염소면의 반응역 두께의 대표치는 중간명도 영역의 면적을 계측하고, 그 면적을 중간명도 영역의 주위 길이의 1/2로 나눈 값으로 정의하여 구하였다. 이 방법에 의한 화상처리 결과의 한 예를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서, 화염면 가까운 곳의 작은 반점은 면적 및 주위 길이의 계산에서 제외하였다.

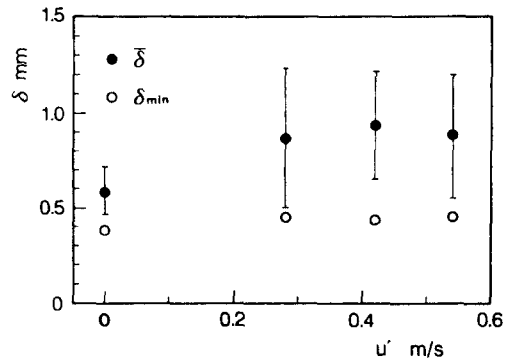
전형적인 층류화염의 토모그램을 1장 선택하여 위의 2가지 방법으로 화염소면의 반응역 두께의 대표치를 계측한 결과, 전자는 0.36mm, 후자는 0.39mm로 거의 같은 값이 얻어졌기 때문에 본 연구에서는 후자의 방법을 채택하였다.

4.2.2 화염소면의 반응역 두께

각 조건에 대한 토모그램을 10장씩 화상처리하



(a) Mixture 24-P10-38



(b) Mixture 33-P10-30

Fig. 11 Characteristic thickness of the reaction zone

여 계측한 화염소면의 반응역 두께의 평균치 $\bar{\delta}$ 와 표준편차 및 최소치 δ_{min} 을 Fig. 11에 나타낸다. 혼합기 24-P10-38에 있어서, 층류화염의 경우, 화염소면의 반응역 대표 두께의 평균치는 0.46mm, 최소치는 0.39mm(층류화염의 반응역 두께 δ_{L0} 와 다름)였다. 난류화염에서의 평균치 및 최소치는 각각 층류화염의 경우보다 약 2배로 증가하였다. 이것은 난류화염과 층류화염에 대한 화염소면 두께의 계측결과^{3,6)}와 잘 일치하고 있다. 한편, 혼합기 33-P10-30의 경우에는 층류화염에 대한 화염소면의 반응역 대표 두께의 평균치 및 최소치는 각각 0.59mm와 0.39mm였다. 그러나, 난류화염에서의 반응역 대표 두께의 증가 비율은 혼합기 24-P10-38의 경우와는 달리, 그 평균치는 약 1.5배로 증가하였지만 최소치는 약 1.1배로 평균치만큼의 증가는 보이지 않았다. 이 결과로부터, 난류화염의 반응역 대표 두께는 혼합기의 특성에 의존할 가능성

이 있음을 추측할 수 있다.

화상해석에 있어서 레이저 슈트에 대한 화염면의 경사각 등 아직 고려할 점은 있지만, 이상의 계측결과에 의하면, 난류화염영역에는 층류화염의 반응역 두께에 가까운 반응영역과 그보다 약간 두꺼운 반응영역이 공존하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

예혼합 난류화염의 심층구조를 해명하기 위하여, 레이저 토모그래피를 이용하여 난류화염의 구조를 관찰하고, 또 토모그램을 화상처리하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 화염소면의 왜형의 정도는 난류강도가 증가할수록 커지며, 적어도 2차원 단면에서는 미연혼합기과와 기연가스과의 존재를 관찰할 수 있었다.
- 2) 화염이 한 방향으로 전파하는 본 연소장치에서의 연소과정은, 평균적으로 연소실의 벽면 가까운 곳에서 먼저 화염이 전파하고 그 후 중심부에 휘감겨 들어간 미연혼합기가 연소한다.
- 3) 3색법에 의한 토모그램의 화상해석으로부터, 난류화염영역에는 층류화염의 반응역 두께에 가까운 반응영역과 그보다 약간 두꺼운 반응영역이 공존하고 있음을 추측할 수 있다.

참고문헌

1. Abdel-Gayed, R.G., Bradley, D. and Lung, F.K.-K., "Combustion Regimes and the Straining of Turbulent Premixed Flames", *Combust.Flame*, Vol.76, pp. 213~218, 1989.
2. Kido, H., et al., "A Study on the Fine Structure of Propagating Turbulent Flames in Premixed Mix-

- tures(An Analysis of the Schlieren Images Based on a Flame Structure Model)", *JSME Int. J., Series II*, Vol.33, No.2, pp. 362~369, 1990.
3. Smith, J.R., "Turbulent Flame Structure in a Homogeneous-Charge Engine", *SAE Trans.* Vol.91, Sec.1, pp. 150~164, 1982.
4. Kido, H., et al., "A Study on the Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames (An Investigation and Application of the Flame Plasma Potential Signals)", *Trans. JSME*, Vol.56, No.521, pp. 175~181,1990.
5. Kim, J.H. and Ahn, S.K., "A Study on the Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames Using a Microprobe Method", *Trans. KSAE*, Vol.3, No. 6, p. 78, 1995.
6. Kim, J.H. and Ahn, S.K., "A Study on Effects of Reynolds Number and Damkohler Number in the Structure of Premixed Turbulent Flames", *Trans. KSME*, Vol.19, No.4, pp.332~339, 1995.
7. Baritaud, T.A. and Green, R.M., "A 2-D Flame Visualization Technique Applied to the I.C. Engine", *SAE Trans.* Vol.95, Sec.1, pp. 1197~1204, 1986.
8. Mantzaras, J., et al., "Three-Dimensional Visualization of Premixed-Charge Engine Flames : Islands of Reactants and Products ; Fractal Dimensions and Homogeneity", *SAE Paper*, No. 881635, 1988.
9. Kido, H., et al., "A Premixed Turbulent Flame Structure Model Having Reactant Islands and Fractal Flame Surfaces (1st Report, Formulation and Test of the Model)", *Trans. JSME*, Vol.57, No.533, pp. 346~353, 1991.
10. Kim, J.H., "A Discussion of Combustion Regime Based on Laser Tomography and Flame Structure Diagram", *Trans. KSPSE*, Vol.2, No.1, pp.17~24,1998.