

예혼합 난류화염구조에 미치는 레이놀즈 수와 담켈러 수의 영향에 관한 연구

김 준 효* · 안 수 길*

A Study on the Effects of Reynolds Number and Damköhler number
in the Structure of Premixed Turbulent Flames

J. H. Kim · S. K. Ahn

Key words : Premixed combustion(예혼합 연소), Turbulent flame structure(난류화염구조), Electrostatic probe(정전탐침), Reactant islands(미연혼합기괴), Turbulence intensity(난류강도), Damköhler number(담켈러 수)

Abstract

The structure of premixed turbulent flames in a constant-volume vessel was investigated using a schlieren method and microprobe method. The schlieren method was used to observe the flame structure qualitatively. The microprobe method, which detects a flamelet by detecting its flame potential signal, was used to investigate the deeper flame structure behind the flame front. The flame potential signal having one to six peaks was obtained in the case of turbulent flames, each of them being regarded as a flamelet existing in the flame zone. Based on this consideration, the flame propagation speed, the thickness of the flame zone, the number of flamelets and the separation distance between adjacent flamelets in the flame zone were measured. Moreover, the thickness of flamelet which could not be attempted in the conventional electrostatic probe method was also investigated. The experimental results of this work suggest the existence of "reactant islands" in the reaction zone, and show that the averaged number of flamelets increases with an increase in the turbulence intensity and/or a decrease in the Damköhler number. The mean thickness of flamelet in the case of turbulent flames was found to be about two times compared to laminar values.

* 정희원, 부산수산대학교

1. 서 론

예혼합 난류화염구조는 엔진에서의 연소속도, 화염전파한계 및 화학반응 등의 현상과 밀접한 관계가 있으므로, 그 해명은 엔진의 연소제어 및 연소모델의 작성상 중요한 과제이다. 특히, 엔진의 저연비화(低燃費化)와 배기가스의 정화가 절실히 요구되고 있는 오늘날, 이를 동시에 만족시키기 위하여 회박연소에 의해 연소온도를 저하시키는 방법이 채택되고 있다. 그러나, 혼합기를 회박화할수록 연소속도의 감소 및 회박연소 한계 부근에서의 실화(失火)등과 같은 실용상의 한계가 있기 때문에 그 한계를 지배하는 난류화염구조의 해명이 필요하다.

난류화염의 구조에 관하여 Tabaczynski¹⁾ 등은 Tennekes의 난류구조 모델²⁾에 의거한 난류화염의 미세구조 모델을 제안하고, 엔진의 운전조건을 변화시킨 계측결과와 성능예측 계산결과가 잘 일치함을 보였다. 이 모델은 예혼합 난류화염의 화염영역내에 기연가스(Burned Gas)와 미연혼합기괴(Reactant Islands)가 공존하는, 이른바 군도상 화염이 존재하고 있음을 시사하고 있다. 난류화염구조의 해명에 있어서 미연혼합기괴의 존재여부에 대한 정성적인 문제와 그 크기 및 수량에 대한 정량적인 문제가 많은 관심을 끌고 있다. 이것을 조사하기 위하여 정전탐침법^{3,4)}, 슈리렌 사진 촬영법^{5,13)}, 단층사진 촬영법^{6,11)} 등을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 정전탐침법은 화염소면(Flamelet)에 존재하는 이온전류를 이용하여 화염소면을 검출하는 방법으로 가격이 싸고 취급이 간편하여 화염구조의 계측에 널리 사용되고 있다. 그러나 종래의 정전탐침법^{3,4)}에서는, 탐침에 전압을 가하기 때문에 탐침의 주위에 이온시스가 발생하여 탐침의 공간분해능력을 저하시키는 결점이 있었다. 한편, 무전원 정전탐침법^{5,6)}은 탐침에 전압을 가하지 않고서도 화염소면을 검출할 수 있으므로, 종래의 정전탐침법에 비해 공간분해능력이 뛰어나고 화염구조의 해명에 더욱 효과적이다.

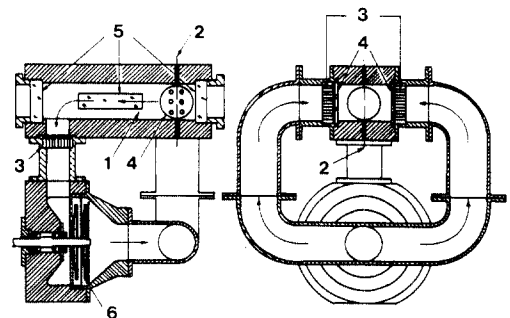
본 연구에서는 먼저 정성적인 난류화염의 구조를 슈리렌 사진으로 관찰한 후, 무전원 정전탐침법을 난류화염구조의 계측에 응용하여 화염의 전파

속도, 난류화염영역의 평균두께, 화염소면수의 분포 및 화염소면의 평균간격 등 화염구조에 관한 중요한 파라미터를 계측하였다. 또한, 종래의 정전탐침법에서는 시도할 수 없었던 화염소면의 두께도 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소장치 및 계측회로

예혼합 난류연소는 난류속의 화학반응으로, 그 화염구조나 연소속도는 난류장의 특성과 혼합기의 특성이라고 하는 화학적·동역학적 상호작용에 의해 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 난류화염구조에 미치는 그 영향을 조사하기 위하여 혼합기의 성분과 난류장의 특성을 각각 제어할 수 있는 정적 연소장치를 이용하였다. 정적 연소장치의 개요는 Fig. 1과 같으며 화염을 한 방향으로 전파시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 분압충전법으로 용기내에 충전한 혼합기는 연소실(직경 50mm, 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. 점화는 연소실 입구에서 이루어지며, 점화초기를 제외하면 화염은 한 방향으로 전파한다. 연소실에는 화염의 전파방향과 그것에 직각방향의 양면에 각각 관측창을 설치하여, 전파화염의 정면



1. Combustion chamber 2. Ignition plug 3. Flame arrester
4. Perforated plate 5. Pyrex window 6. Centrifugal fan

Fig. 1 Schematic diagram of combustion chamber

과 측면에서 관측할 수 있다. 또 원심 팬 쪽으로 화염이 침입하지 않도록 소염기를 설치하였다.

난류화염구조의 계측에 이용한 정전탐침의 구조 및 그 계측회로는 Fig. 2와 같다. 화염소면의 전위신호를 검출하기 위한 정전탐침은 공간분해능력을 높이기 위하여, 검출부의 길이를 0.6mm, 직경 0.2mm로 하였다. 탐침은 니켈선이며, 직경 0.8mm의 스테레스관에 의해 지지된다. Fig. 2에서, 회로중의 저항 R_{in} 은 기록장치의 입력저항이고, R_0 는 가변저항이다. 가변저항 R_0 는 신호의 SN비를 높이기 위하여 무한대로 하였다. 또, 보다 정확한 신호를 얻기 위하여 정전탐침의 검출부 이외의 전도체나 접화플러그의 표면은 열수축관으로 절연하고, 연소실의 내부도 절연용 도료를 칠했다.

2.2 혼합기 및 난류장의 특성

실험에 이용한 혼합기는 3종류의 프로판 인공 공기 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 당량

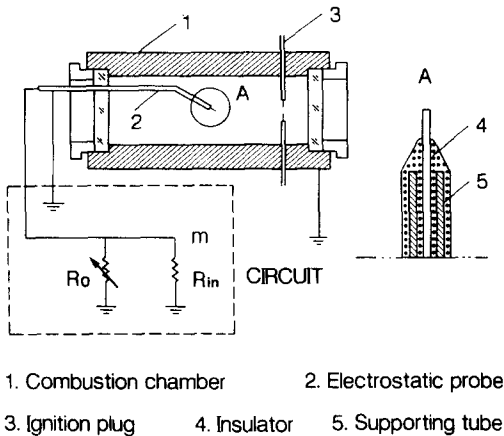


Fig. 2 Measurement circuit and electrostatic probe

비, v 는 혼합기의 동점도, T_b 는 정압 단일 화염 온도이다. 연소실험은 초기조건이 상온(295~300 K), 상압(1 atm)의 조건하에서 행하였다.

연소용기내의 정상 난류장의 특성은 2대의 정온도형 열선유속계와 형상이 다른 3종류의 열선프로브를 사용하여 공기에 대해 계측하였다. Fig. 3은 난류강도 u' 의 3축 방향 평균치와 팬 회전속도와 의 관계를 나타낸 것으로 난류강도 u' 는 팬 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 난류강도 u' 에 대한 종방향 적분공간척도 L 과 Taylor 미세척도 λ_g 및 난류의 에너지 소산율로부터 구한 Kolmogoroff 척도 η_k 를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, 종방향 적분공간척도 L 과 Taylor 미세척도 λ_g 는 u' 가 증가함에 따라 약간 작아지는 경향을 보이는데, λ_g 의 크기는 L 의 1/2 정도이다. L 및 λ_g 는 혼합기의 조성에 관계없이 거의 u' 만에 의존하지만¹²⁾, Kolmogoroff 척도 η_k 는 혼합기의 동점도에 의존하므로 Fig. 4의 η_k 는 공기에 대한 계산결과이다. η_k 는 난류강도 u' 가 0.14m/s의 경우를 제외하면, 0.2mm 이하로 극히 작고 u' 가 증가할수록 감소한다.

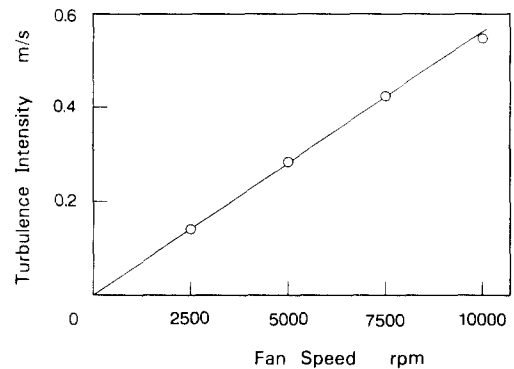


Fig. 3 Turbulence intensity vs. fan speed

Table 1 Properties of mixtures used

MIXTURE	MOLAR FRACTION				ϕ	S_{L0} m/s	δ_{L0} mm	η_0 mm	T_b K	$v \times 10^5$ m ² /s
	C ₃ H ₈	O ₂	N ₂	He						
33-P10-30	1.0	5.0	20.0	2.0	1.0	0.33	0.30	0.069	2168	1.50
43-P10-31	1.0	5.0	15.4	5.6	1.0	0.43	0.31	0.071	2262	1.76
43-P10-23	1.0	5.6	17.1	0.4	1.0	0.43	0.23	0.045	2329	1.43

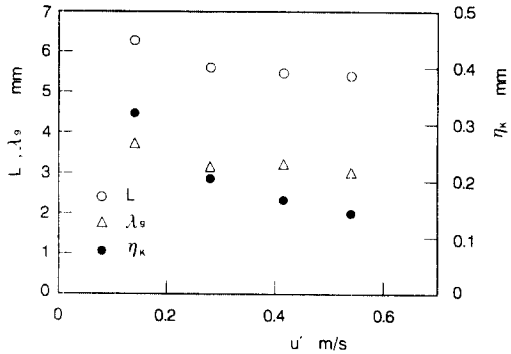


Fig. 4 Turbulence characteristics in the combustion chamber

3. 슈리렌 사진에 의한 화염구조의 관찰

예혼합 난류화염의 전파방향과 그것의 직각방향에서 촬영한 슈리렌 사진을 Fig. 5에 나타낸다. 직각방향의 사진에서 화염은 왼쪽에서 오른쪽으로 전파한다. Fig. 5로부터, 난류강도가 증가할수록 슈리렌 사진의 줄무늬 간격이 급격히 작아지는 것을 알 수 있다. 한편, 난류강도가 대단히 약한 경우($u'=0.06\text{m/s}$)에도 줄무늬 모양이 기연가스쪽으로 길게 돌출되어 있는 모양을 관찰할 수 있다.

슈리렌 사진에 의한 관찰결과로부터, 정성적인 난류화염구조를 추측할 수 있다. 예를 들면, 첫째, 줄무늬 간격이 난류강도가 증가함에 따라 급격히 작아지는 것은 화염소면 형상의 변화에 의한 영향뿐만 아니라 난류화염영역의 두께방향에 존재하는 여러 개의 화염소면이 중복되어 나타난 결과로 생각된다. 둘째, 화염소면은 여러 가지 척도로 휘어지며, 난류강도가 증가할수록 미세화됨을 알 수 있다. 이것은 최근의 단층사진 촬영법에 의해 확인된 화염소면의 자기상사성(Fractal)^{10,11}과 정성적으로 일치한다. 셋째, 줄무늬 모양이 끊어지는 것으로부터 화염의 국부적인 소멸현상도 판단할 수 있다¹⁴.

그러나, 슈리렌 사진의 줄무늬들은 광선이 통과한 전 광로상에서의 매질의 밀도 변화율의 적분효과를 나타내는 것이기 때문에, 정량적인 화염구조를 직접 얻을 수 없을 뿐만 아니라 그 화상해석도 일정한 모델¹³에 의거할 수 밖에 없다.

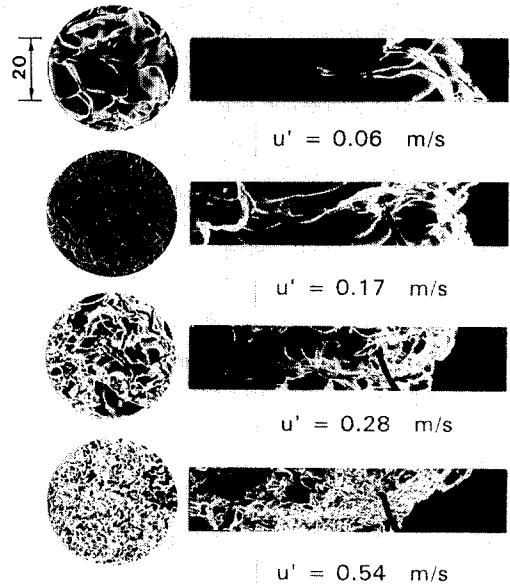


Fig. 5 Schlieren images of premixed turbulent flames(Mixture 43-P10-31)

4. 실험결과 및 고찰

4. 1 출력신호의 해석

화염소면의 전위신호를 검출한 결과, 층류화염의 전위신호 파형에는 1개의 peak 밖에 없는 것에 비해, 난류화염의 경우에는 여러 개의 peak를 가지는 것이 많았다^{5,6}. 이것은 여러 개의 화염소면이 탐침을 통과했기 때문이라고 판단되며, 따라서 난류화염영역의 전연(Front Edge)과 후연(Rear Edge)은 각각 Fig. 6에서 정의하는 t_{st} 와 t_{end} 에 대응하는 것으로 생각된다. 난류화염의 경우, 후연의 이동속도는 반드시 전연의 이동속도와 일치하지 않기 때문에, 본 실험에서는 전연과 후연의 전파속도를 각각 측정하였다.

화염영역의 전연과 후연의 전파속도를 구하기 위하여, 연소실의 중심축상에서 점화플러그로부터 하류쪽의 4점에 대한 전연과 후연의 도달시간을 각각 70회 이상 측정하였다. 각 측정점에서의 화염소면의 평균도달시간은 Fig. 7과 같이, 화염영역의 전연과 후연에 대응하는 2개의 거의 직선에 가까운 완만한 곡선으로 표시된다. 따라서, 화염영역의 전연과 후연의 전파속도는 곡선의 구배로부

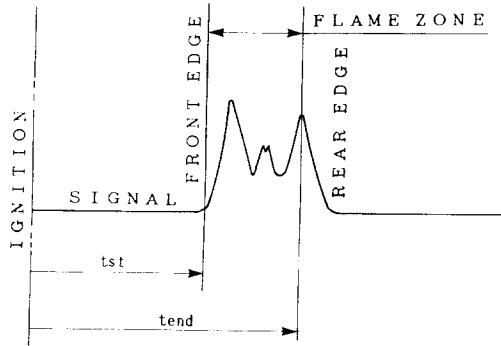


Fig. 6 Definition of turbulent flame zone

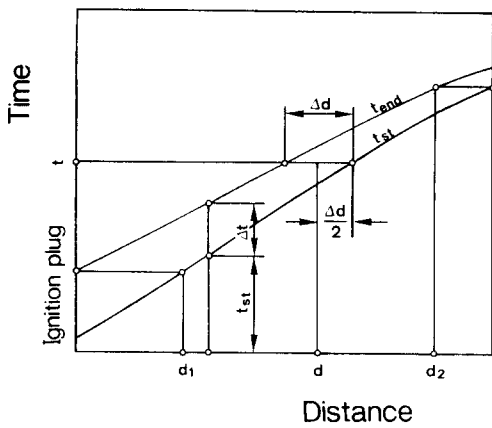


Fig. 7 Measurement of flame propagation speed and flame zone thickness

터 각각 계산할 수 있다. 한편, 화염영역의 두께는 Fig. 6의 t_{st} 에서 t_{end} 까지의 경과시간 Δt 에 대응하는 공간척도로 정의하여, 화염전파속도의 경우와 마찬가지로 각 측정위치에서의 화염영역의 전연과 후연의 평균 도달시간으로부터 구할 수 있다. 즉 Fig. 7에 보이는 바와 같이, 임의의 시각에서의 화염영역 두께 d_t 는 같은 시각 t 에 대한 전연과 후연의 공간거리의 차 Δd 로 주어진다.

4.2 화염전파속도 및 화염영역 두께

혼합기 33-P10-30에 대하여 난류강도가 0.42m/s, 0.54m/s일 때, 각 측정점에서 측정한 난류화염영역의 전연과 후연의 화염소면의 도달시간 t_{st} , t_{end} 와 이 도달시간으로부터 계산한 화염전파속도 V_{st} , V_{end} 및 화염영역 두께를 Fig. 8에 나타낸다. Fig.

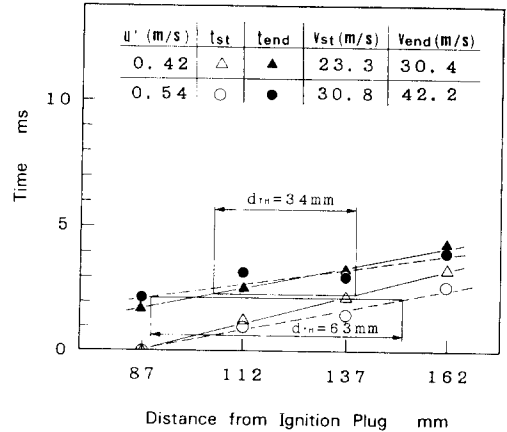


Fig. 8 Flame propagation speed and flame zone thickness(Mixture 33-P10-30)

8에서, 전연과 후연의 화염전파속도는 난류강도가 증가할수록 빨라지며, 같은 난류강도에서는 화염영역 후연의 전파속도가 전연의 전파속도보다 빠른 것을 알 수 있다. 이와 같이 화염영역의 후연은 전연보다 빠른 속도로 전연을 뒤쫓아 가기 때문에 화염영역의 두께는 화염이 하류쪽으로 진행함에 따라 작아지게 된다. 한편, 연소실의 중간 위치에서 측정된 화염영역의 평균 두께 d_{TM} 은, 동일한 혼합기의 경우 난류강도가 증가함에 따라 커지고, 동일한 난류강도의 경우에는 Damköhler수 Da (난류혼합 특성시간의 화학반응 특성시간에 대한 비율, $Da = S_{L0} \cdot L / u' \cdot \eta_0$)가 감소할수록 증가하였다 (Table 2 참조).

Fig. 9는 난류강도에 대한 화염전파속도의 평균치를 나타낸 것으로, 난류강도 $u' = "0"$ 는 층류화염을 의미한다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이, 평균 화염전파속도는 층류연소속도가 작을수록, 층류화염의 반응역 두께가 클수록 작아진다.

4.3 화염소면수 및 화염소면의 간격

난류화염영역에서의 화염소면수 및 화염소면의 평균 간격은 화염영역 두께와 함께 난류화염구조를 나타내는 중요한 파라미터이다.

화염소면의 간격은 Fig. 6에 보이는 전위신호의 인접하는 2개의 peak간의 평균적인 공간거리로 화염영역 두께와 화염소면수의 평균치로부터 구

Table 2 Measured average flamelet separation distance

MIXTURE	u'	L	Re	Da	d _{fl}	MFN	AFS
	m/s	mm			mm		mm
33-P10-30	0.28	5.6	105	96	21	2.2	9.5
	0.42	5.5	154	63	34	2.6	13.1
	0.54	5.4	194	48	63	3.2	19.7
43-P10-31	0.28	5.6	89	121	20	1.9	10.5
	0.42	5.5	131	79	33	2.3	14.3
	0.54	5.4	166	61	49	3.0	16.3
43-P10-23	0.28	5.6	109	191	18	1.7	10.6
	0.42	5.5	162	125	29	2.1	13.8
	0.54	5.4	204	96	38	2.5	15.2

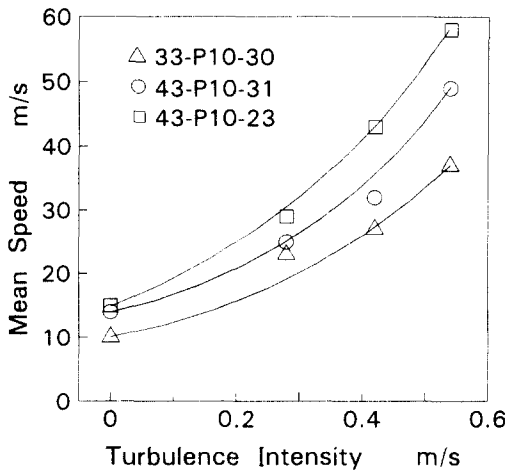


Fig. 9 Flame propagation speed vs. turbulence intensity

할 수 있다. 그 결과를 Table 2에 보인다. Table 2에서 Re ($Re = u' \cdot L / \nu$)는 Reynolds 수, Da 는 Damköhler 수, MFN은 평균 화염소면수, AFS는 화염소면의 평균 간격이다. Table 2로부터, 화염소면의 평균 간격은 난류강도가 증가함에 따라 커지며, 난류의 종방향 적분척도의 2~3배의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터, 화염소면의 평균 간격은 미연혼합기의 난류의 적분척도와 밀접한 관계가 있음을 추측할 수 있다.

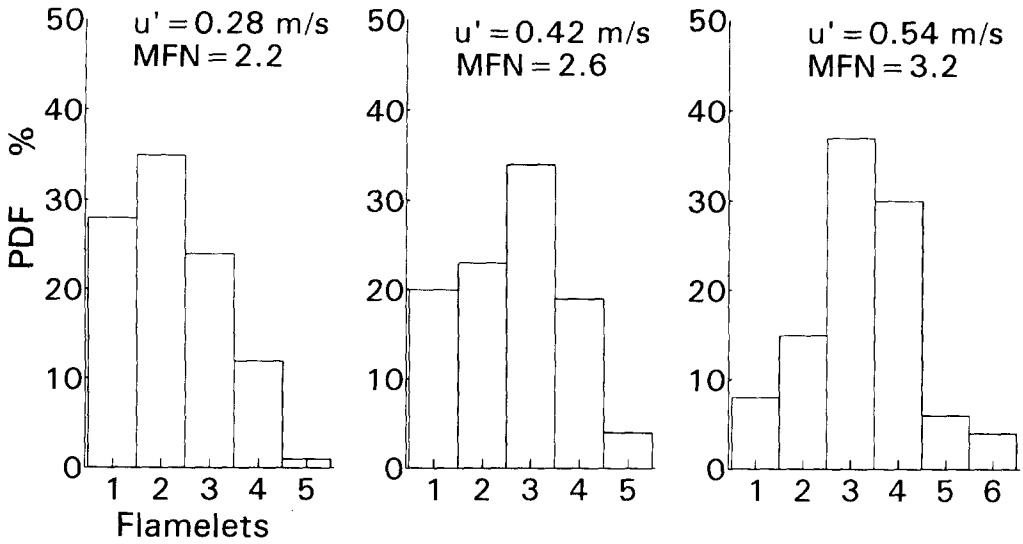
Reynolds 수와 Damköhler 수는 화염구조를 지배하는 매우 주요한 인자이며 본 실험에서는 Reynolds 수가 주로 난류강도에 의해 변화하므로,

난류강도 u' 와 Da 의 변화에 대한 화염소면수의 확률밀도 분포를 Fig. 10에 나타낸다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이, 화염소면수는 u' 가 증가함에 따라 증가하고, Da 가 감소할수록 많아진다. 화염영역내에 미연혼합기과 존재하기 위한 필요조건은 화염소면수 $FN \geq 3$ 이므로, 이 결과로부터, u' 가 증가하고 Da 가 감소할수록 난류화염영역내에 균도상 화염이 존재할 가능성이 높은 것을 확인할 수 있다.

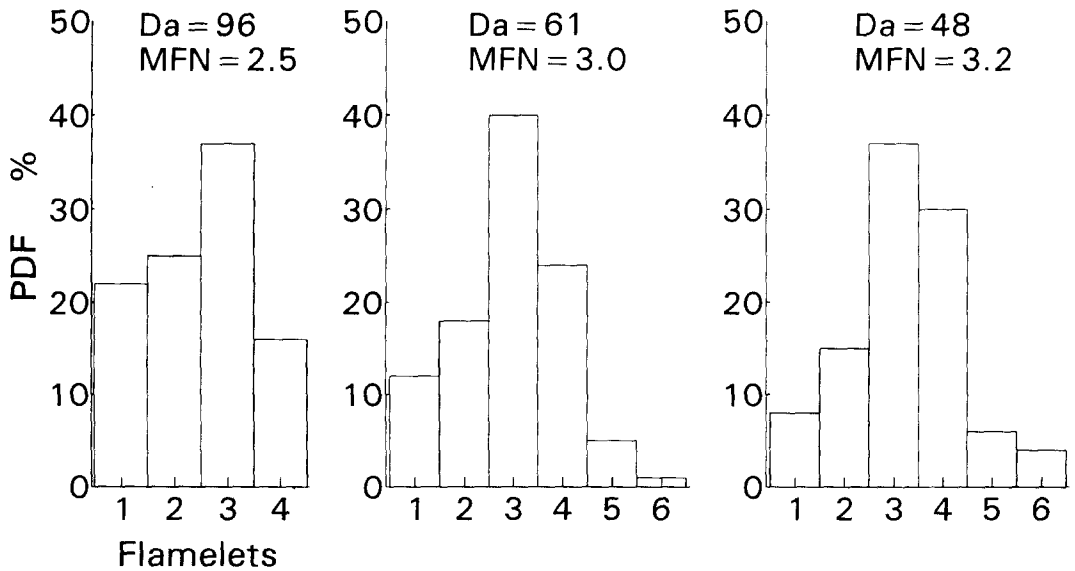
4.4 화염소면의 두께

화염소면의 두께는 Fig. 6의 t_{st} 로부터 첫번째 peak의 정점까지의 도달시간에 평균 화염전파속도를 곱하여 계산하였다. 그 결과를 Fig. 11에 나타낸다. 화염소면의 평균 두께는 혼합기의 특성에 관계없이 거의 일정한 반면, 난류화염의 경우에는 층류화염의 약 2배 정도로 증가하였다. 이것은 Smith에 의한 계측결과⁷⁾와 잘 일치하고 있으나, 난류강도가 증가함에도 불구하고 거의 일정한 값을 보였다.

화염소면은 대부분의 경우 탐침에 대하여 경사각을 가지기 때문에, 화염소면 두께의 계측결과는 실제 값보다 크게 나타날 것으로 생각된다. 따라서 각 조건에서의 최소치가 화염소면이 탐침에 직각 방향으로 진입한 가능성이 높은 것으로 판단하여 그 결과도 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이, 각 조건에 대한 화염소면 두께의 최소치는 약 2mm로 층류화염과 난류화염의 차



(a) Mixture : 33-P10-30



(b) Turbulence : $u' = 0.54 \text{ m/s}$

Fig. 10 Influences of turbulence intensity and Damköhler number on the number of flamelets in flame zone

이에 의한 변화는 보이지 않았다.

5. 결 론

(1) 평균 화염진파속도는 난류강도가 증가함에 따라 빨라지며, 층류연소속도가 작을수록 또 층류

화염의 반응역 두께가 클수록 작아진다.

(2) 화염영역의 후연은 전연보다 빠른 속도로 전파하므로 화염영역의 두께는 화염이 하류쪽으로 진행할수록 감소한다. 한편, 화염영역의 평균 두께는 난류강도가 증가함에 따라 커지고, 같은 난류강도에 대해서는 Damköhler 수가 감소할수록 증가

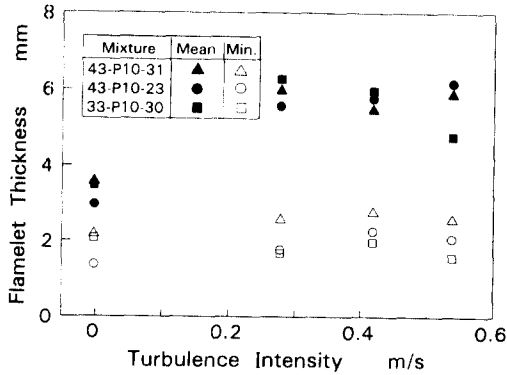


Fig. 11 Mean and minimum flamelet thickness vs. turbulence intensity

한다.

(3) 화염영역내의 화염소면수는 난류강도가 증가할수록 증가하고, 같은 난류강도에 대해서는 Damköhler 수가 감소할수록 많아진다. 또, 화염소면의 평균 간격은 난류의 종방향 적분척도의 약 2~3배였다.

(4) 난류화염의 화염소면의 평균 두께는 혼합기 및 난류강도와 관계없이 일정하고 층류화염의 약 2배 정도였다.

참고문헌

- 1) Tabaczynski, R. J., Trinker, F. H and Shannon, B. A. S., "Further Refinement and Validation of a Turbulent Flame Propagation Model for Spark-Ignition Engines", *Combust. Flame*, Vol.39, pp.111~121, 1980
- 2) Tennekes, H. and Lumley, J. L., *A First Course in Turbulence*, MIT Press, p.67, 1972
- 3) Calcote, H. F., "Ion and Electron Profiles in Flames", *Proc. 9th(Int.) Symp. Combust.*, pp.622~625, 1963
- 4) Hamamoto, Y., Yoshiyama, S., Tomita, E. and Izumi, M., "Measurement of Turbulent Premixed Flame in a Closed Vessel by Using an Ion Gap (Turbulence Characteristics and Wave Form of Ion Current)", *Trans. JSME*, Vol.55, No.512, pp.1224~1227, 1989
- 5) Kido, H., Huang, S. and Nakashima, K., "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

- 6) Kim, J. H. and Ahn, S. K., "A Study on the Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames Using a Microprobe Method", accepted for publication in *Trans. KSAE*, 1995
- 7) Smith, J.R., "Turbulent Flame Structure in a Homogeneous-Charge Engine", *SAE Trans.* Vol.91, Sec.1, pp.150~164, 1982
- 8) 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
- 9) Mantzaras, J., Felton, P. G. and Bracco, F. V., "Three-Dimensional Visualization of Premixed-Charge Engine Flames : Islands of Reactants and Products ; Fractal Dimensions and Homogeneity", *SAE Paper*, No.881635, 1988
- 10) Mantzaras, J., Felton, P. G. and Bracco, F. V., "Fractals and Turbulent Premixed Engine Flames", *Combust. Flame*, Vol.77, pp.295~310, 1989
- 11) Kido, H., Nakashima, K., Kim, J. H. and Kataoka, M., "Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames Determined by Laser Tomography", *Trans. JSME*, Vol.59, pp.3283~3289, 1993
- 12) Abdel-Gayed, R. G. and Bradley, D., "Dependence of Turbulent Burning Velocity on Turbulent Reynolds Number and Ratio of Laminar Burning Velocity to R.M.S. Turbulent Velocity", *Proc. 16th(Int.) Symp. Combust.*, pp.1725~1735, 1976
- 13) Kido, H., Huang, S., Nakashima, K. and Kitano, K., "A Study on the Fine Structure of Propagating Turbulent Flames in Premixed Mixtures(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
- 14) 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