

〈논 문〉

미연혼합기의 난류특성과 이중분류버너화염의 연소특성에 관한 실험적 연구

최경민* · 장인갑* · 최병륜***

(1996년 2월 9일 접수)

An Experimental Study on Turbulence Characteristics of Mixture and Combustion Characteristics of Doubled Jet Burner Flames

G. M. Choi, I. G. Chang and B. R. Choi

Key Words : High Loading Combustion(고부하 연소), Combustion Phenomena(연소 현상), Doubled Jet Burner(이중분류버너), Premixed Combustion(예혼합연소), Distributed Reaction Flame(분산반응화염)

Abstract

Premixed flame is better than diffusion flame to accomplish a high loading combustion. Since the turbulent characteristics of unburned mixture has a great influence on the flame structure, it is general that many researchers realize a high loading combustion with strengthening turbulent intensity of unburned mixture. Because turbulent premixed flame reacts efficiently on the condition of distributed reaction region, we made high turbulent premixed flame in the doubled impingement field. We investigated turbulent characteristics of unburned mixture with increasing shear force and visualized flames with direct and schlieren photographs. And the combustion characteristics of flame was elucidated by instantaneous temperature measurement with a thermocouple, by ion currents with a microelectrostatic probe, by radical luminescence intensity and local equivalence ratio. Extremely strong turbulent of small scale is generated by impingement of mixture, and turbulent intensity of unburned mixture increased with the mean velocity. As a result of direct photographs, visible region of flame became longer due to increasing central direction flux. But as strengthened turbulent intensity, visible region of flame turned to shorter and reaction occurred efficiently. As strengthened turbulent intensity of mixture with increasing flux of central direction, maximum fluctuating temperature region moved to radial direction and fluctuation of temperature became lower. The reason is influx of central direction which caused flame zone to move toward radial direction, to maintain flame zone stable and to make flame scale smaller.

*회원, 부산대학교 대학원

**회원, 부산대학교 기계기술연구소 연구원

***회원, 부산대학교 기계공학과, 부산대학교 기계기술
연구소 연구원

기 호 설 명

C : 상관 계수

I_{CH} : CH 라디칼 자발광강도(mV)

- L : Euler scale (mm)
 Q : 미연혼합기의 유량 (m^3/s)
 R : 노즐중심축에서 반경방향 좌표 (mm)
 U : 평균속도 (m/s)
 u' : 절대난류강도 (m/s)
 X : 노즐출구에서 중심축방향 좌표 (mm)
 η : Kolmogorov 스케일 (mm)
 λ : Taylor의 마이크로스케일 (mm)
 Φ_M : 측정된 국소당량비
 φ : 미연혼합기의 공급당량비
 τ : 지연시간 (ms)

하첨자

- 1 : 경사방향 미연혼합기류
 2 : 중심축방향 미연혼합기류
 I : Ion current
 M : 최대값 (Maximum)

1. 서 론

고부하, 저공해의 고성능연소기개발이 요구되는 오늘날, 산업계와 일반용도에 이용되는 화염의 대부분이 주름상층류화염이므로 고부하연소에 관한 연구는 필수적이라 할 수 있다. 고부하연소를 실현하기 위해선 확산화염보다 예혼합화염이 더 유리하다. 예혼합연소기에서 미연혼합기의 난류특성은 예혼합화염의 난류연소속도를 지배하고, 이 난류연소속도는 화염의 구조에 큰 영향을 미친다. 따라서 일반적으로 미연혼합기의 난류강도를 중대시킴으로써 고부하연소를 실현하는 연구가 진행되고 있다.

예혼합화염의 구조는 크게 주름상층류화염, 분산반응화염⁽¹⁾ 그리고 중간단계에 해당하는 천이화염으로 나뉘어진다.⁽²⁾ 일반적으로 분산반응화염에서 효율적인 연소가 일어난다는 견해가 지배적이나, 그 화염구조가 실현가능한 조건조차 명확히 밝혀지지 않은 실정이다. 일반적으로 분산형화염은 Damköler수를 작게함으로써 실현가능하다고 알려져 있다. 여기에 주목해서 희박가연범위 외의 미연혼합기를 전단류중에서 강제로 착화시키는 방법의 의해 분산형화염을 형성한 연구⁽³⁾도 있다. 그러나 이 방법은 화염구조의 특징을 파악하는 데에는 유효하나, 미연혼합기가 전파성을 갖고 있지 않다는 문제가 있다고 보고되고 있다.

또, 대향분류버너에 의해 매우 강한 난류를 일으

키는 고속의 미연혼합기중에서 안정된 난류예혼합화염을 형성시켜, 그 화염구조가 분산형화염임을 밝힌 연구⁽⁴⁻⁵⁾사례도 있다. 그러나 이 연구에서는 분산반응화염의 형성을 위해 미연혼합기의 유량을 증가시켜 난류강도를 강화시켰기 때문에 효율적이라 할 수 없다.

최근 저자의 연구중 이중분류버너를 대상으로 매우 강한 난류강도를 가진 고속의 미연혼합기중에서 안정된 난류예혼합화염이 형성되었고, 이 화염을 대상으로 마이크로슬리렌사진촬영과 이온전류치를 측정한 결과, 그 난류강도가 강하고 이중분류버너 화염의 스케일이 매우 작음을 확인하였다.⁽⁶⁻⁷⁾

따라서 본 연구에서는 이중분류버너화염중에 형성된 유동장에 대해서 비연소시의 난류특성을 자세히 조사하고 연소시의 직접사진, 순간 슬리렌사진, 변동온도, 이온전류치, 래디컬 자발광강도, 국소당량비 등을 측정하여 이중분류버너화염의 연소특성 및 강난류화염의 구조를 자세히 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용한 연소기의 구조와 노즐부의 상세도이다. 연료는 LPG를 사용하였다. 미연혼합기 Q_1 은 20°각도의 경사로 충돌되게 구성하였고, 동시에 미연혼합기 Q_2 는 중심축방향으로 분출되어 난류강도를 강화시키게 된다. 노즐분구는 14mm이고, 여기에 화염의 안정을 위해 스텝을 주었으며, 노즐출구경은 24mm이다. 경사충돌하는 미연혼합기 Q_1 은 4개의 공급관을 통하여 버너에 유입하므로 같은 양의 미연혼합기가 분류되어 충돌

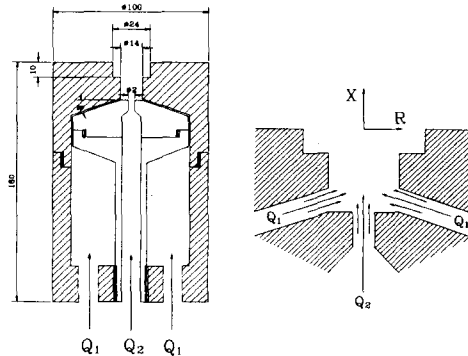


Fig. 1 Detail diagram of burner and typical nozzle

한다. 공급버너내의 유동은 충분히 발달한 난류이며, 분류가 고속으로 충돌하는 것을 이용하여 충돌분류장을 형성하였다. 여기에 전단력의 강화를 위해 중심축 방향 미연혼합기 Q_2 를 분류시켜 이중충돌분류장을 형성하였다. 여기서 좌표계는 버너출구 중심을 원점으로 축방향을 X 축, 반경방향을 R 축으로 하였다.

2.2 실험조건 및 실험방법

실험조건은 Table 1에 Q_1 의 1차 충돌에 Q_2 의 유량을 증가하여 전단력을 강화시킨 대표조건을 선정하였다. Q_1 의 공급당량비 φ_1 은 1.2, Q_2 의 공급당량비 φ_2 는 0.2로 고정하였다. φ_2 를 0.2로 고정한 것은 전보⁽⁶⁾에서 φ_2 를 0.2 이상으로 공급한 경우에 화염의 길이가 길어지며 효율적이지 못했기 때문이다.

전 조건에 있어서, 분류된 모든 혼합기가 1차 연소반응하는 영역만을 실험조건에 포함시켰다.

충돌장에서의 유동은 매우 복잡하고 분류주위에 순환류의 영역이 형성된다. 유동장이 매우 복잡하기 때문에 난류특성과 스케일이 일정하지 않다.

미연혼합기의 난류특성은 비연소상태에서 선경 $5\mu\text{m}$ 의 열선풍속계를 이용하여 측정하였다. Euler 스케일 L 은 비연소상태의 자기상관함수가 0이 될 때까지의 적분값에 평균유속을 곱하여 구하였다. Taylor 스케일과 Kolmogorov 스케일은 에너지 소산율을 먼저 구한 후, 이를 기준으로 계산하였다.

형성된 화염의 거시적인 구조파악을 위해 순간 슬리덴사진을 촬영하였으며, 광학계에서 두 개의 오목거울은 초점거리 1500mm, 유효경 200mm이다. 광원은 백색광을 발하는 스트로보스코프를 사용하고, 핀홀은 직경 2mm를 사용하였다. 촬영에는 35mm 카메라에 200mm 줌렌즈를 부착하여 관측부에 초점을 맞추었고, 상의 명암은 나이프에지

를 이용하여 초점위치의 후방의 상을 적절히 자름으로써 조절하였다.⁽⁶⁾

난류에혼합버너화염에서는 국소적인 반응대가 하류로 이동하고, 그 방향과 속도는 복잡하게 변동한다. 그러므로 반응대의 특정 부분을 추적하여 계속하는 것은 어려움이 많다. 따라서 난류화염내의 고정점에 있어서 화학종, 이온 등의 농도와 온도 등의 물리량을 계속하여 반응대의 특성을 해석한다.

Fig. 2는 순간온도측정계이다. 본 연구에서는 R-type 열전대, 선경 $50\mu\text{m}$ 의 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 이용하여 화염중의 맥동온도를 측정하고 이를 분석하였으며, 측정온도치가 이치에 맞도록 시정수를 조절하여 보상하였다. 또 화염중의 국소이온농도(이온전류)의 측정에 이용한 탐침의 세선은 고온의 화염중에서 내산성(耐酸性), 전도도(電導度)가 양호한 선경 0.1mm, 감응부길이 0.5mm의 Pt-13% Rh합금을 이용하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Fig. 3은 국소 래디컬 자발광계측을 위한 측정계이다. 광학계는 세 종류의 래디컬 자발광을 동시에 검출할 수 있도록 구성하였다.⁽³⁾ 화학발광은 화염

Table 1 Experimental condition for turbulent characteristics and combustion

(unit : $10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$)

	Q_1	φ_1	Q_2	φ_2	Re
Case 1	1.35	1.2	0.0	/	15559
Case 2	1.35	1.2	1.12	0.2	41430
Case 3	1.35	1.2	1.66	0.2	59091

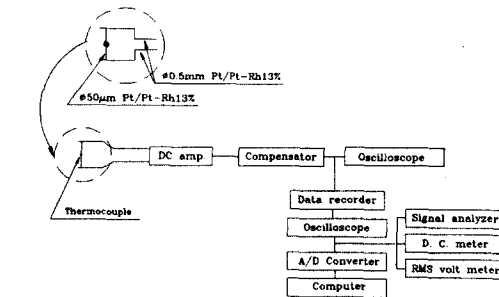


Fig. 2 Block diagram for fluctuating temperature and detail probe

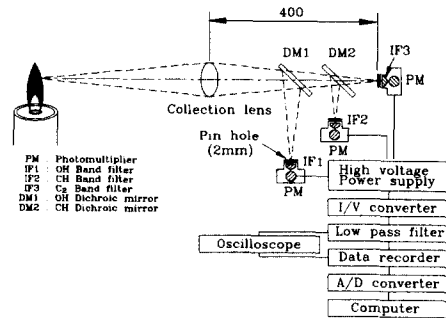


Fig. 3 Optical system for measuring local radical luminescence intensity

에서 400mm의 위치에 설치된 집광렌즈($f=200$ mm)로 집광되어, OH밴드를 포함하는 근자외역의 광은 다이크로익미러(OH용, 310nm)에 의해 반사되고, CH와 C_2 밴드를 포함하는 가시역에서 근적외역까지의 광은 투과된다. 이 투과된 광은 다이크로익미러(CH용, 430nm)에 의해 반사되어 C_2 밴드를 포함한 광만이 투과된다. 화염발광의 검출영역은 집광렌즈와 각 핀홀에 의해 직경 2mm로 제한된다. 그리고 광학계의 광축 및 렌즈의 초점은 소형 He-Ne Laser를 이용하여 맞추었다. 여기서 광전자증배관으로부터의 출력은 전류-전압변환기에 의해 전압으로 변환, 증폭되고 로우-패스필터에 의해 고주파의 잡음을 제거한 후 데이터레코더에 기록하였다.

Table 2는 본 연구의 래디컬 자발광 강도측정에 사용된 간섭필터의 특성을 나타낸 것이다. 여기서 λ_{max} 는 필터의 투과중심파장, $\lambda_{1/2}$ 는 반치폭, T_{max} 는 최대투과율이다.

연소가스성분에 의한 국소당량비측정은 가스크로마토그래프를 이용하였다. 프로브의 입구직경 0.6

mm, 내부직경 4mm로 흡입된 가스를 급격히 팽창시켜 반응을 종결시킨다. 샘플링 프로브로부터 흡입된 가스는 아이스박스를 이용하여 수증기 성분을 제거시킨 후, 건(乾)연소가스만을 가스크로마토그래프에 주입하였다. 연료성분인 C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 성분을 화염이온화 검출기에서 검출하고 검출된 산소농도와 비교하여 국소당량비를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 직접사진 및 슐리렌사진

Fig. 4(a)(b)(c)는 각 조건에 형성된 화염의 직접사진이다. 화염의 시간평균적인 형상은 원추형이다. Case 1의 경우, Q_1 의 충돌후 미연혼합기는 중심축방향으로 전환하여 노즐출구를 벗어나면서 스텝에 의해 순환류가 형성되어 화염이 안정된 형상이다. 화염의 반경방향두께가 노즐출구경정도이고 화염 발광부의 중심축방향길이는 약 65mm이며 발광부가 넓게 분포한다. Case 2의 경우는 Q_2 의 분류로 인해 중심축부근에서 압력강하가 발생하여 반

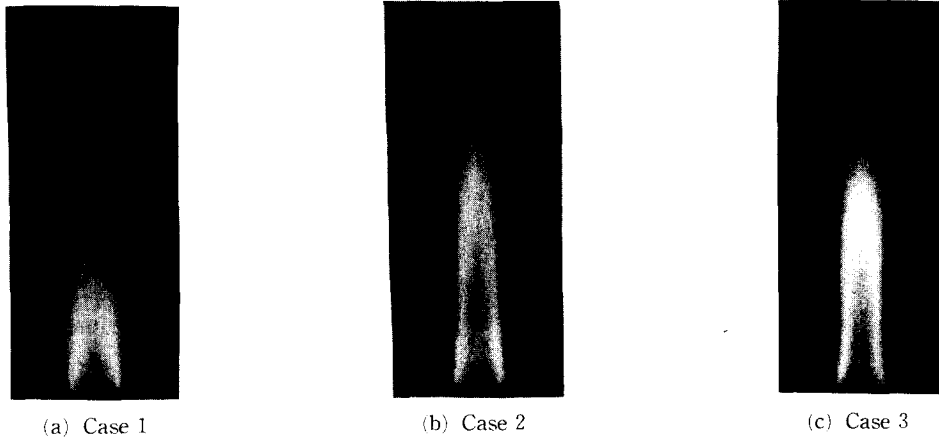


Fig. 4 Direct photograph of flames

Table 2 Band filter characteristics

Observed species	Observed spectrum (nm)	Band filter		
		λ_{max} (nm)	$\lambda_{1/2}$ (nm)	T_{max} (%)
OH	310	310.2	14.9	18.8
CH	431	432.3	1.2	49.2
C_2	517	516.5	1.6	65.0

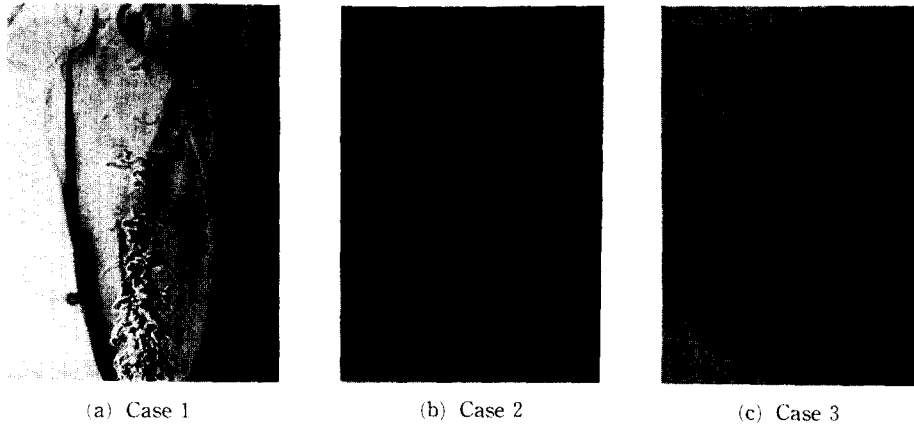


Fig. 5 Typical schlieren photograph of flames

경방향두께가 Case 1에 비해 훨씬 감소되었으며 화염발광부의 길이는 약 90mm 정도로 Case 1보다 길어졌다. 이는 Q_2 의 분류로 인해 중심축방향의 운동량이 증가하여 화염대가 하류에서 형성되기 때문이다. Case 3의 경우는 Case 2에 비해 공급유량은 증가했으나 화염발광부의 반경방향두께는 거의 변화가 없고, 길이는 Case 2와 비교하여 다소 짧아진 형상이다. 이는 강난류에 의해 연소속도가 증가했기 때문이라 생각된다.

Fig. 5(a) (b) (c)는 각 조건에 형성된 화염의 순간 슐리렌사진이다. Fig. 5(a)는 Case 1의 경우로 큰 와류의 형태가 뚜렷하며 그 속에 주름이져 있는 형상이고, Case 2는 큰 와류 사이의 골짜기가 작은 와류로 채워져서 큰 와류의 형태는 거의 볼 수 없고, 다치 기둥같은 모양이며 그 속에 작은 와류가 가득차 있는 형상이다. 또한, Q_2 의 유량을 더 증가시킨 Case 3는 작은 와류가 지배적인 형태로 되고 화염의 길이가 짧아지는 것으로 이루어보아 본 연구에서 목적으로 하는 분산반응화염에 가깝다고 생각된다.

3.2 미연혼합기의 난류특성

분류의 속도가 크기 때문에 충돌장에서의 유동은 매우 복잡하고 분류주위에 순환류의 영역이 형성된다. 유동장이 매우 복잡하기 때문에 난류특성이 일정하지 않다. 따라서 본 연구에서는 조건별 난류특성을 조사하기 위해 X축을 따라 $R=0$ 인 영역을 대상으로 평균속도, 변동속도, 난류스케일을 측정하였고, 대표단면의 반경방향으로 평균유속과 변동

속도를 측정하였다.

Fig. 6은 혼합기 분류 유량 Q_1 과 Q_2 의 변화에 따른 중심축상의 평균속도 U 의 분포이다. 충돌장의 하류부터 측정하였기 때문에 I형 열선풍속계를 이용하여도 무방하였다. Fig. 6에서 모든 경우에 X축상의 평균유속 U 는 거의 직선적으로 감소한다. 이는 유동주위에 발달하는 경계층의 영향이라고 생각된다.

Fig. 7는 난류강도 u' 의 X축방향 분포이다. Case 1의 경우, 노즐 출구에서는 난류강도가 약하나, 하류로 발달하면서 주위의 가속을 받고, 이에 따른 속도구배에 의해 발생하는 전단력으로 난류가 형성되어 난류강도는 증대된다. $X=50\text{mm}$ 부근에서 최대난류강도를 나타내고 이후, X축을 따라 직선적으로 감소된다. 그러나 Case 2, 3의 경우, 노

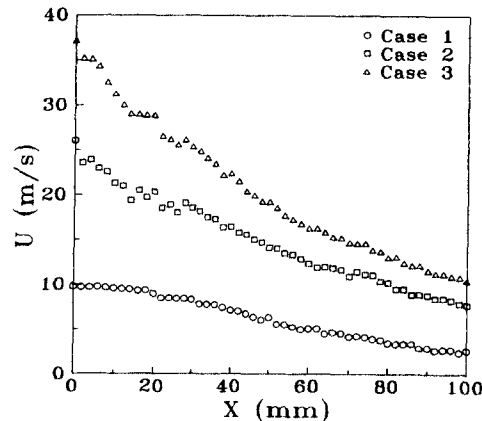


Fig. 6 Mean velocity distribution ($R=0$)

즐출구에서 최대를 나타내고, 하류로 진행하면서 직선적으로 감소되는 단순한 형상이다. 최대난류강도는 Case 1의 경우 $u'=2.2\text{m/s}$, Case 2의 경우 $u'=4.7\text{m/s}$, Case 3의 경우 $u'=7.1\text{m/s}$ 이다. 난류격자로 실현가능한 난류강도가 약 1m/s 인 것을 고려하면 매우 강한 난류가 발생되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 국소적인 평균속도에 대한 난류강도의 변화를 나타낸 것이다. 다소 편차는 있으나 Case 2, 3의 경우 거의 1차 함수로 나타낼 수 있으며 Case 1과 완전히 다른 형태를 보여, 그 유동특성이 일반적인 원형제트와는 완전히 다름을 알 수 있다. 따라서 이중분류장은 충분히 발달한 유동장에서 평균유속에 의해 난류강도가 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 정온도형의 열선풍속계를 이용하여 미연소시의 난류특성을 조사한 결과이다. 난류스케일

로서는 Euler 스케일 L , Taylor 스케일 λ , Kolmogorov 스케일 η 등이 있고, 난류특성은 조건별로 큰 차이가 없으므로 가장 난류강도가 약한 Case 1의 경우는 모두 나타내었고, Case 2, 3은 η 만 나타내어 비교하였다. Euler 스케일 L 은 노즐출구에서 하류로 감에 따라 증가하다가 $X=40\text{mm}$ 이후 단순히 감소하는 형상이다. Taylor 마이크로 스케일 λ 는 노즐출구를 제외하면 거의 모든 경우에 2mm 정도이고, Kolmogorov 스케일 η 분포는 노즐출구에서 다소 층류화염대(약 0.1mm)보다 큰 분포를 보이나 하류로 감에 따라 점점 감소하여 0.05mm 정도이다. Case 2, 3의 경우는 노즐출구에서 각각 $\eta=0.057, 0.054\text{mm}$ 의 값을 나타내어 하류까지 거의 비슷한 분포를 나타내는데 이는 이중분류에 의해 난류강도가 강해지고 에너지소산율이 떨어지기 때문이라 생각된다.

난류강도가 강해지면 분산반응영역이 형성된다고 생각된다. 이런 종류의 화염이 형성되었는지의 판단은 Kovaszny 수, $\Gamma=(u'/\iota)(\delta_L/S_L)$ 가 이용된다. 이때 u' 은 절대난류강도, ι 는 난류의 마이크로 스케일, δ_L 은 층류화염대두께, S_L 은 층류연소속도를 나타낸다. 일반적으로 $\Gamma \geq 1$ 의 범위에서 분산반응영역이 형성가능하다고 알려져 있다. 이 조건의 예혼합화염은 보편적으로 $u' \gg S_L$ 이고, 난류의 Komogorov 스케일 η 가 층류화염대의 두께 δ_L 보다 작다고 알려져 있다($\eta < \delta_L$).⁽⁸⁾ 또 참고문헌 (13)을 참고하면 $\Gamma=(\delta_L/S_L)/(\iota/u') \propto (u'/2S_L)/(\iota/\delta_L)$ 의 표현이 가능하므로 u' 이 크거나 ι 가 작으면 $\Gamma > 1$ 의 조건을 만족하게 되는 것을 알 수 있다.

위의 결과로부터 Case 1의 경우는 다소 난류가 약한 유동장에서 형성된 화염이고, 이중분류인

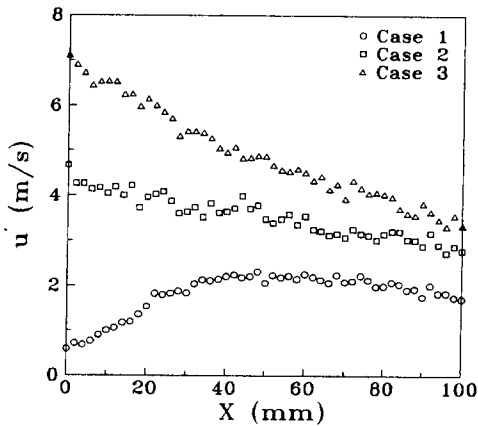


Fig. 7 Turbulent intensity distribution ($R=0$)

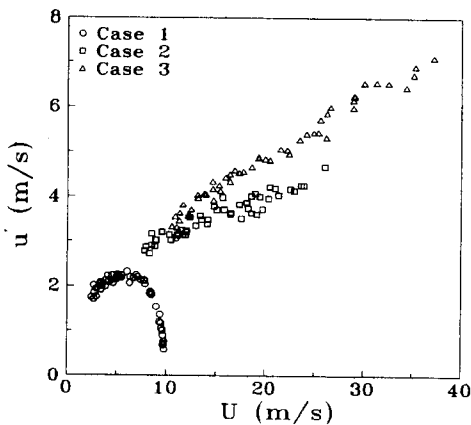


Fig. 8 Relation of mean and RMS velocity ($R=0$)

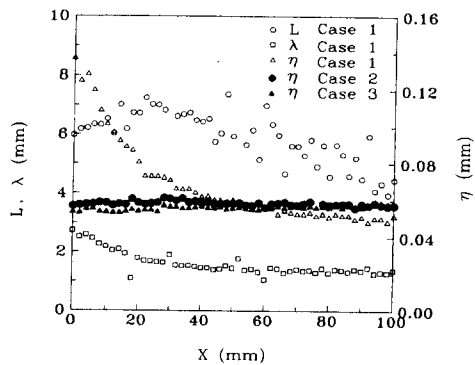


Fig. 9 Turbulent scales ($R=0$)

Case 2, 3은 $\delta_L > \eta$, $u' \gg S_L$ 의 조건을 만족하므로 참고문헌 (8)에서 언급한 바와 같이 $\Gamma \geq 1$ 임을 추측할 수 있다.

Fig. 10은 각 조건에서 미연혼합기의 평균속도와 변동속도의 반경방향분포를 단면별로 나타낸 것이다. 여기서는 Q_2 의 영향을 비교하기 위해 평균속도와 변동속도를 무차원화하였다. (U_M : 단면의 최대평균속도, u'_M : 단면의 최대변동속도) 모든 조건에서 평균속도는 중심축부근에서 최대를 나타내고 이후 반경방향으로 가면서 점차 감소하는 형태이다. 변동속도의 분포는 Case 1의 $X=0\text{mm}$ 의 경우, 평균속도의 구배가 큰 $R=7\text{mm}$ 부근에서 최대변동속도분포를 나타내고, $X=30\text{mm}$ 에서도 최대변동속도분포는 $X=0\text{mm}$ 와 비슷한 영역에서 나

타났다. $X=60\text{mm}$ 에서는 난류가 완전히 발달한 형태이다.

Case 2에서 $X=0\text{mm}$ 의 경우, Q_2 의 분류로 인해 최대변동속도가 중심축근처에서 나타났다. 이후 최대변동속도분포는 $X=30\text{mm}$ 로 가면서 중심축에서 약 3mm 정도 벗어나 분포하고, 60mm에서도 비슷한 분포를 나타낸다. 이는 하류까지 난류에너지가 보존되어 있음을 보여주는 것이다.

Case 3의 경우는 Case 2에 비해 변동속도가 높은 영역이 넓게 분포하는 것으로 관찰된다.

3.3 맥동온도 및 이온전류

화염구조를 보다 정량적으로 파악하기 위해 열전대를 이용하여 맥동온도를 측정하였다. Fig. 11(a)

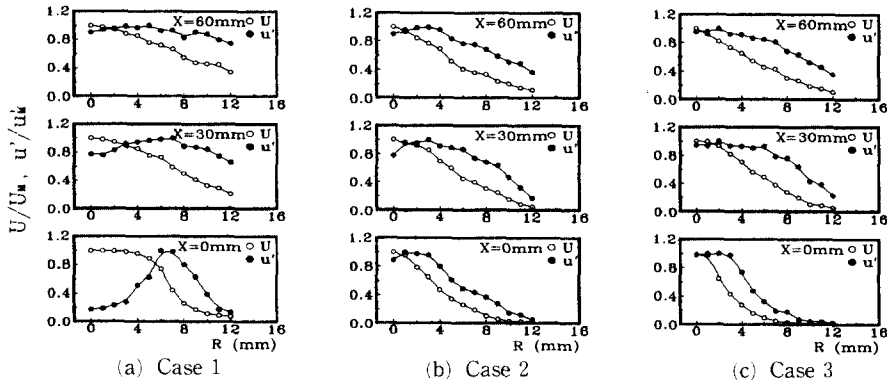


Fig. 10 Radial distribution of mean and fluctuating velocity

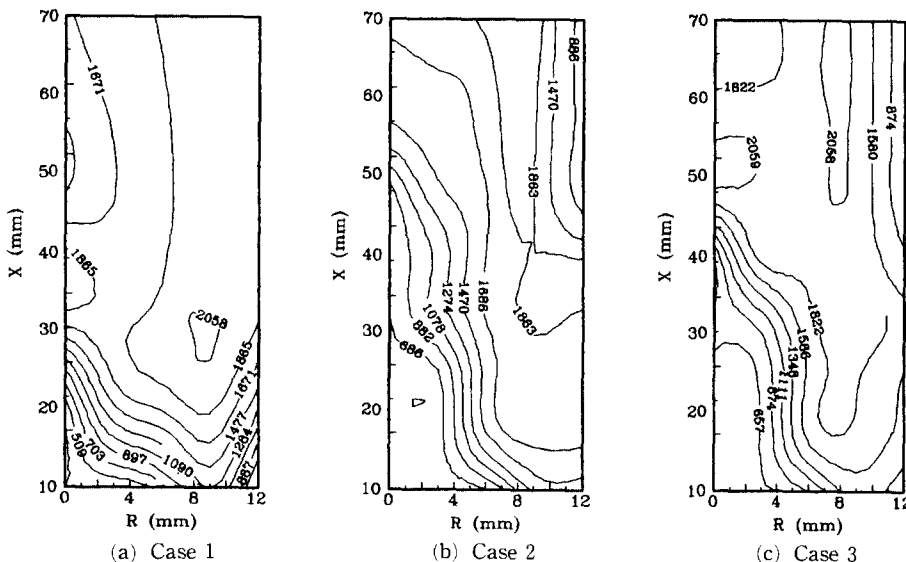


Fig. 11 Mean temperature contour

(b)(c)는 각 조건에서 형성된 화염의 등평균온도 선도이다. 노즐출구부근의 고온 영역은 재순환영역의 영향이고, 화염은 이 재순환영역에 의해 안정화된다. Fig. 11(a)는 Case 1의 경우로 노즐분구부근에서 충돌한 미연혼합기가 노즐출구로 분류되어 그 영향이 화염대중앙까지 미치고 있다. 평균온도는 화염대의 미연혼합기측에서 급속히 상승하고 미연혼합기가 원형제트로 분출하므로 화염의 형상은 원뿔모양으로 나타났다.

Fig. 11(b)는 Case 2의 경우로 중심축방향으로 분류되는 Q_2 의 영향으로 Case 1에 비해 미연혼합기의 영역이 넓어졌다. Fig. 11(c)는 Case 3의 경우로 Q_2 의 유속이 증가하여 Case 2보다 강난류장을 형성하게 되고 이 영향으로 연소속도가 빨라져 미연혼합기의 영역이 좁혀졌고, 화염대의 온도분포도 Case 2에 비해 조밀해졌음을 알 수 있다.

Fig. 12(a)(b)(c)는 각 조건에서 형성된 화염의 등변동온도선도이다. Case 1의 경우는 다른 조건에 비해 화염대의 미연혼합기측에서 변동온도가 높게 나타났다. Case 2의 경우, $R=5\text{mm}$ 부근에서 최대변동온도영역을 나타낸다. 이는 Q_2 의 분류로 화염대가 반경방향으로 이동하여 형성되었기 때문이며, Case 1에 비해 변동온도가 낮게 나타났다. Case 3의 경우, 최대변동온도분포는 화염대에서 반경방향으로 벗어난 영역에서 나타나며 변동온도치가 가장 작다.

Case 1의 $Q_2=0$ 인 경우, 중심축주위에서 변동온도가 높게 나타나나, Case 2, 3의 이중 충돌장에서 순간온도의 최대변동영역이 반경방향으로 벗어나 나타났다. 이러한 현상은 Fig. 5의 슐리렌사진과 관련되는데, Case 1의 경우, 노즐출구에서 큰 갈고리형 와류를 형성되고 이후 하류로 진행하면서 연소반응하여 서서히 소멸하는 형상으로 미연혼합기와 연소가스영역이 교대로 지나므로써 순간온도의 변동치가 크게 나타난다고 생각된다. 그러나 Case 2, 3의 경우, 노즐출구부터 형성된 기동처럼 생긴 화염원이 하류까지 그대로 진행하므로 중심축주위에서는 미연혼합기영역이므로 변동온도가 낮게 나타나고 최대변동온도는 반경방향으로 벗어난 영역에서 나타난다고 생각된다.

주름상충류화염에서는 연소가스와 미연혼합기가 화염대에 의해 분리되기 때문에 순간적인 온도는 미연혼합기온도에서 연소가스온도까지 변화하여 변동온도가 높게 된다. 반면에 연소가스측에서는 변동온도가 서서히 저하하여 연소가스중에서는 매우 낮게 된다. 이것은 분산반응화염의 특징으로 화염대가 반응도중단계의 가스덩어리에 의해 구성되어 있는 경우, 순간적인 온도는 미연혼합기온도까지 떨어지지 않기 때문에 변동온도는 저하된다.

Fig. 13(a)(b)(c)는 이온전류파형의 자기상관함수를 나타낸 것이다. 실험조건은 각 화염의 발광부 길이와 최대온도단면을 이등분한 단면으로 선정하

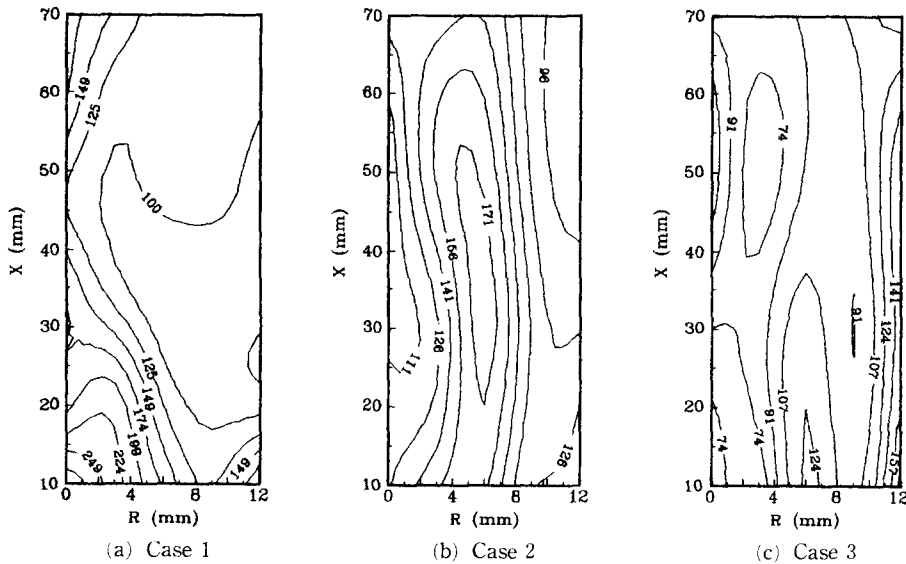


Fig. 12 Fluctuating temperature contour

였다. Case 1의 경우, $\tau=0$ 에서 두드러진 하나의 피크를 나타낸 후 비교적 큰 상관을 나타내는 피크를 관찰할 수 있다. 두드러진 피크의 폭이 화염대의 두께에 대응하고 두드러진 피크와 다음 높은 상관의 피크간의 간격이 층류화염의 주름 주기에 대응한다고 보면, 이 특징은 주름상층류화염의 구조와 일치한다.

Case 2와 Case 3의 경우도 $\tau=0$ 에서 두드러진 하나의 피크가 관찰되나, 이후 특정 위치를 제외하고 상관성 높은 피크가 존재하지 않는다. 따라서 주름상층류화염같이 얇은 반응영역이 주기적으로

통과하는 구조와는 완전히 다르고, 작은 스케일의 반응영역이 랜덤하게 분산되어 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 14(a)(b)(c)는 계측한 래디컬 자발광중 CH의 자기상관함수분포이다. 모든 경우의 화염에 대해서 $\tau=0$ 에서 예리한 피크가 존재하는 공통점이 있고, 피크의 반치폭은 비교적 작게 나타나 있다. 이는 화염형상이 3차원이기 때문에 광로적분에 의해 전후의 화염에서의 발광이 혼입되어 상관성이 떨어지기 때문이다.

여기서 Case 1의 경우는 $\tau=0$ 에서 두드러진 피

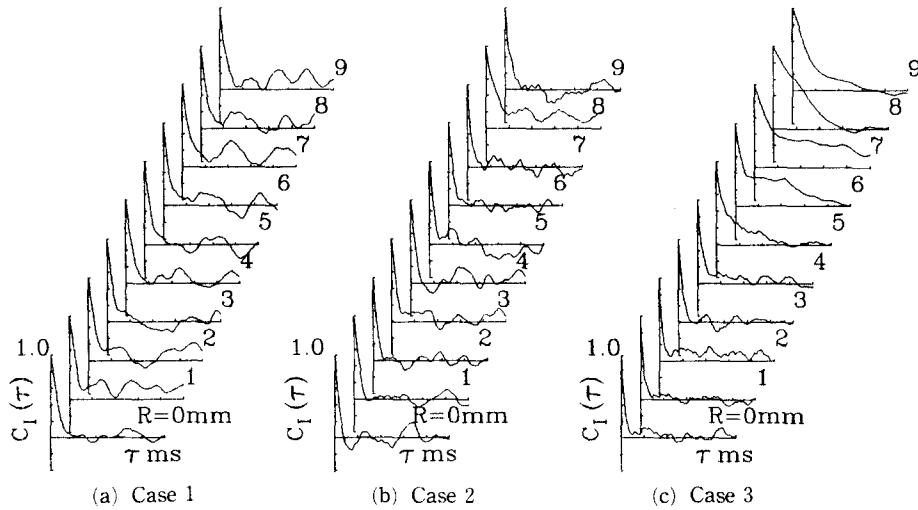


Fig. 13 Autocorrelation of ion currents

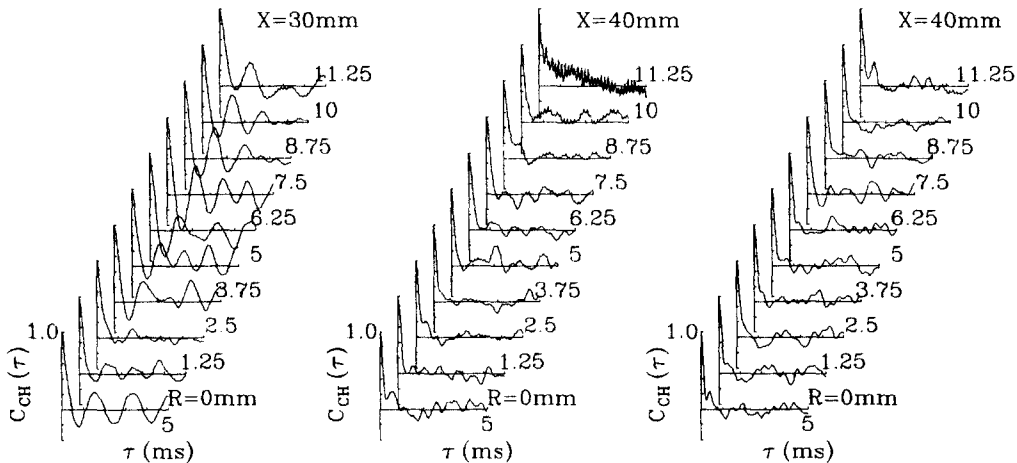
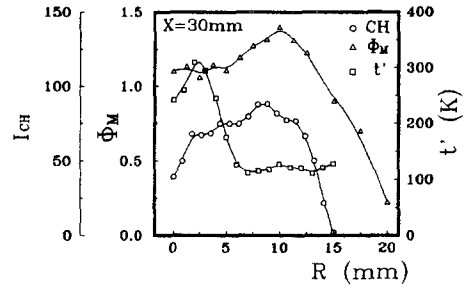


Fig. 14 Autocorrelation of CH radical luminescence

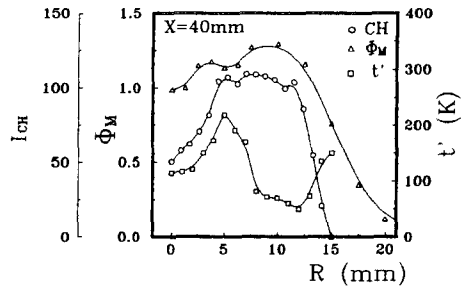
크를 나타낸 후, 비교적 높은 상관의 피크가 존재하는 것 같다. 여기에 반해 Case 2, 3의 상관함수에서는 이와 같은 현상이 관찰되지 않는다. 이런 점은 Fig. 13에서 나타난 이온전류의 자기상관과 일치한다. 이는 미연혼합기의 난류강도가 증대되어 국소반응대가 작은 스케일의 와류에 지배되어 래디컬 자발광의 주기성이 떨어지기 때문이라 생각되며, 래디컬 자발광은 연소반응중인 와류의 반응특성을 반영함을 알 수 있다.

Fig. 15(a) (b) (c)는 각 조건에서 형성된 화염에 대해 CH 래디컬 자발광강도, 변동온도, 국소당량비분포이다. Case 2, 3에서 변동온도가 극대치를 나타낸 후, 감소하였다가 다시 증가하는 것은 분류된 혼합기가 1차 반응한 후, 미처 반응하지 못한 연료성분이 주위의 공기와 2차 반응하기 때문이다. 모든 조건에서 CH 래디컬 자발광강도는 중심축부근에서 반경방향으로 가면서 서서히 증가하여 최대치를 나타낸 후, 다시 감소하는 형태이다. 국소당량비는 CH 래디컬 자발광강도분포와 유사한 형태를 나타내어 CH 래디컬 자발광강도가 강한 영역에서 높은 분포를 나타낸다. 변동온도분포는 Case 1의 경우, $R=2.5\text{mm}$ 부근에서 최대치를 나타내어 CH 래디컬 자발광강도와 국소당량비분포와는 판이한 형태이나, Case 2, 3의 이중분류의 경우는 변동온도의 최대치가 CH 래디컬 자발광강도와 국소당량비의 최대영역에 근접함을 알 수 있다. Case 1의 경우는 비교적 큰 와류에 의해 미연혼합기와 기연혼합기가 번갈아 교차하므로 미연혼합기 영역에서 변동온도가 높게 나타났다. 그러나 중심축방향의 유입이 있는 Case 2, 3는 반응대가 Q_2 에 의해 반경방향으로 밀려서 형성되므로 $R=5\sim 6\text{mm}$ 부근에서 최대변동온도분포를 보인다. 따라서 일반 원형제트의 특성을 갖는 Case 1은 비교적 넓은 영역에 걸쳐 반응이 일어나고, 이중분류인 Case 2, 3의 경우는 집약적으로 연소반응함을 알 수 있다. 특히 난류강도가 가장 강한 Case 3는 이같은 현상이 두드러지게 나타난다. 이처럼 온도변동치와 래디컬 자발광강도, 당량비가 비슷한 분포를 나타내는 것으로 미루어 다른 조건에 비해 난류연소속도가 높다고 생각된다.

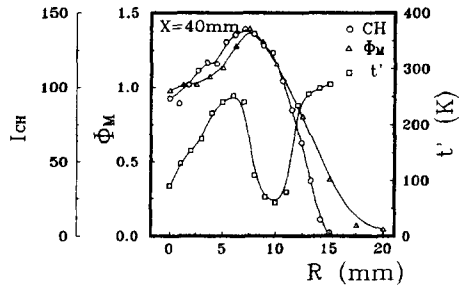
따라서 이중분류버너에서 이중충돌력을 강화함에 따라 순간온도의 변동치가 줄어든다는 점과 이온전류와 CH 래디컬 자발광강도의 자기상관함수에서 반응영역의 랜덤성 및 반응의 집약성 등을 미루어



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 15 Distributions of CH radical luminescence, equivalence ratio and fluctuating temperature

보아 공업적으로 효율적인 분산반응화염의 실현이 가능하다고 생각된다.

5. 결론

이중분류버너에서 형성된 원통형 유동장의 특성을 조사하고 또 화염의 솔리렌사진촬영 및 연소장의 온도, 이온전류, 래디컬 자발광강도, 국소당량비 등의 측정을 수행하여 강난류중에 형성된 예혼합화염의 연소특성과 화염구조를 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이중분류버너에서 매우 강한 난류강도의 유동장이 형성되었으며, 형성된 유동장의 난류강도는

평균속도에 지배된다.

(2) 이중충돌이 없는 경우는 중심축부근에서 큰 와류가 주기적으로 출현하는 형태로 순간온도의 변동이 심하고, 이온전류측정치와 CH 래디컬 자발광강도도 일정주기를 가지는 것으로 미루어 이 반응대는 주류상층류화염의 특성을 갖고 있다.

(3) 이중분류화염의 경우는 이중충돌력의 증대에 따라 화염대는 반경방향으로 이동하고, 큰 스케일의 와류는 소멸하고 화염대전체가 매우 작은 미소와류에 지배되어 맥동온도의 변동값이 작아지며 이온전류신호와 CH 래디컬 자발광강도가 랜덤하게 나타나는 것으로 미루어 보아 3영역모델 중 분산반응화염에 대응한다.

(4) 이중분류화염의 경우는 연소반응이 집약적으로 일어나므로 공업적으로 효율적인 강난류화염의 형성에 유리하다.

참고문헌

- (1) Damköhler, G., 1940, *Elektrochem.*, Z. 46, 601.
- (2) Ballal, D. R., 1979, "Further Development of the Three Region Model of a Premixed Turbulent Flame," *Proc. R. Soc., London, Ser. A*, 368, 283, 267, 295.
- (3) 高橋・香月・水谷, 1992, "稀薄亂流豫混合火焰の微細構造と燃燒機構," 58~547, B, 929.
- (4) Yoshida, A., 1988, "Structure of Opposed Jet Premixed Flame and Transition of Turbulent Premixed Flame Structure," *Proc. 22nd Symp. (Int.), Combust., The Combustion Institute*, 1471.
- (5) 吉田・成澤・辻, 1992, "未燃混合氣亂流特性と對向噴流バーナ火炎と構造," 58~552, B, 2571.
- (6) 최경민, 장인갑, 이중성, 최병륜, 1995, "미연혼합기의 난류특성과 화염 스케일에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(II), 535.
- (7) 최경민, 장인갑, 이중성, 최병륜, 1995, "이중분류버너화염의 미세구조에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), 623.
- (8) 古川純一, 原田營一, 平野敏右, 1989, "高强度亂流豫混合火焰の微細構造," *日機論 B*, 55~520.
- (9) 平野, 鈴木, 橋本, 益子, 1982, "豫混合變動火焰計測に用する圓柱靜電探針の基礎的性質," *日機論 B*, 46~405.
- (10) 古川純一, 丸田 薫, 平野敏右, 1991, "靜電探針による亂流火焰構造の計測に關する基礎的研究," *日機論 B*, 57~536.
- (11) 崔炳輪, 1991, "亂流豫混合火焰の構造に關する 研究," 博士學位論文, 大阪大學.
- (12) 이재득, 1991, "亂流豫混合火焰의 構造와 燃燒特性에 關한 研究," 博士學位論文, 釜山大學校.
- (13) 水谷幸夫, 1991, 燃燒工學, 第2版.