

<논 문>

## 난류확산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구(1)

최병륜\* · 장인갑\*\* · 최경민\*\*

(1995년 4월 19일 접수)

### An Experimental Study on Flame Structure and Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame ( I )

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

**Key Words** : Double Coaxial Air Jets(동축 이중 공기분류), Coherent Eddy(코히어런트 와), Turbulent Shear Layer(난류전단층), PDF(확률밀도함수), Skewness(비대칭도), Power Spectrum(파워 스펙트럼), Flatness(편평도)

#### Abstract

This study was focused on the examination of the flame structure and the combustion characteristics of diffusion flame which was formed the turbulent shear flow of a double coaxial air jet system. The shear flow was formed by the difference velocity of surrounding air jet( $U_s$ ) and center air jet( $U_c$ ). So experimental condition was divided S-type flame( $\lambda > 1$ ) and C-type flame( $\lambda < 1$ ) by velocity ratio  $\lambda (=U_s/U_c)$ .

For examination of the flame structure and the combustion characteristics in diffusion flame, coherent structure was observed in flame by schlieren photograph method. We measured fluctuating temperature and ion current simultaneously and accomplished the statistical analysis of its.

According to schlieren photograph, the flame was stabilized in the rim of the direction of lower velocity air jet, coherent eddy was produced and developed by higher velocity air jet. The statistical data of fluctuating temperature and ion current was indicated that reaction was dominated by higher velocity air jet. The mixing state of burnt gas and non-burnt gas was distributed the wide area at  $Z=100$  mm of C-type flame.

기 호 설 명	
$F$	: 편평도(Flatness)
$f$	: 주파수(Hz)
$G$	: 게인(dB)
$i$	: 이온전류의 세기
$i'$	: 이온전류의 R. M. S.

$P(T)$	: 온도의 확률밀도함수
$R$	: 노즐 중심축에서 반경방향좌표(mm)
$SK$	: 비대칭도(Skewness)
$T$	: 시간평균온도(K)
$t$	: 시간(sec)
$t'$	: 온도변동치의 R. M. S. (K)
$U_s, U_c, U_f$	: 노즐출구에서의 축방향 평균유속(m/s)
$Z$	: 노즐출구에서 축방향 좌표(mm)

\*회원, 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\*회원, 부산대학교 대학원, 기계공학과

$\lambda$  : 주위공기류 유속과 중심공기류 유속과 구조 및 연소특성을 실험적으로 조사하였다.  
의 비(=  $U_c/U_s$ )

하첨자

$c$  : 중심공기류  
 $s$  : 주위공기류  
 $f$  : 연료

1. 서 론

난류확산화염의 거동을 지배하는 인자는 기본적으로는 난류장에서 열, 물질 및 운동량의 수송현상(혼합과정)과 난류장에서 화학반응이다. 일반적으로 화학반응속도는 연료와 산화제의 확산속도에 비해 충분히 크기 때문에 반응 전단계에서의 난류에 의한 연료와 산화제의 혼합이 난류확산화염의 구조에 지배적인 영향을 미친다.

비반응응온류의 평면전단층 중에 2차원적인 대규모의 와(渦)구조가 존재하고, 와의 합체와 성장에 의하여 전단층이 발달하는 것이 명확하게 된<sup>(1)~(3)</sup> 이후 난류확산화염과 난류확산기구를 해명하는 수단으로써 평면전단층에 있어서의 물질수송에 관한 많은 실험이 행해지고 있다.<sup>(3)~(5)</sup>

山口 등<sup>(6)~(9)</sup>은 평면전단류 중에 형성되는 난류확산화염을 대상으로 비연소시에는 고속과 저속의 양측에서 휘말려 들어오는 Brown-Roshko<sup>(1)</sup>의 코히어런트 구조와 동일한 스케일의 와를 확인하였지만, 연소시의 코히어런트 구조는 고속측에서만 형성되고, 저속측으로는 휘말려 들어오지 않는 화염이 형성된다고 보고한 바 있다. 그러므로 공기를 고속류로, 기체연료를 저속류로 하게 되면 고속측인 공기류에 의해 연료와 산화제의 확산이 지배되어, 기존의 기체연료가 고속측인 확산화염보다 산화제(공기)의 확산이 더 크게 되어 단위시간당의 더 많은 연료가 연소될 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 두 공기류의 전단층 사이로 연료를 주입시켜 형성되는 동축 이중 공기분류층의 난류확산화염을 대상으로, 우선 슈리렌 사진을 통해 山口 등의 2차원 평면전단층의 코히어런트 구조와 근본적으로 동일한 형태의 3차원 화염에서의 코히어런트 구조를 확인하였다. 변동온도와 이온전류를 동시 측정하여, 그 변동량의 확률밀도함수, 비대칭도, 편평도 및 스펙트럼 분석 등의 통계 처리를 통해 난류전단층에 형성된 난류확산화염의

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도와 연소기의 상세도이다. 연료 노즐은 내경 18 mm, 두께 2 mm의 원판과 내경 26 mm, 두께 2 mm의 원판이 동심으로 설치되어 두 개의 동심원 사이(간격 2 mm)에서 연료가 공급되고, 이 연료 노즐은 출구직경 80 mm의 공기 노즐에 동심으로 설치되어 있다.

연소용 공기는 송풍기에서 공급되며 압력맥동을 최소화하기 위해서 서지 탱크를 거친 다음 중심기류와 주위공기류로 나누어져 연소기로 공급된다. 기체연료는 압력용기에서 공급되어 압력조정기를 거쳐 가스 유량 조절 밸브에 의해 연료 가스 유량이 조절되어 연소기에 공급된다.

내측원관으로 분출되는 공기류를 중심공기류, 외측원관의 주위에서 분출되는 공기류를 주위공기류라고 칭하고, 각각의 축방향 출구평균유속을  $U_c$ ,  $U_s$ 로 표기하였다. 중심공기류 및 주위공기류의 유속을 적절히 조절하면 여러 종류의 화염의 형태를

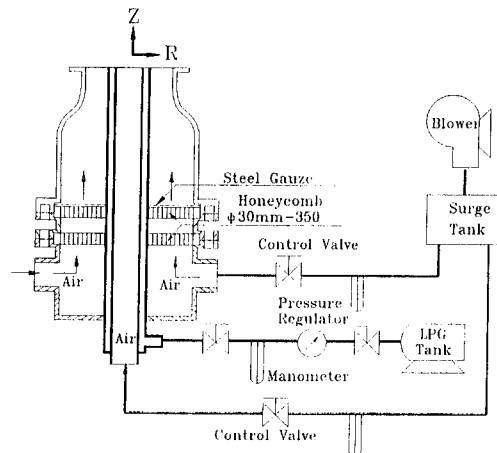
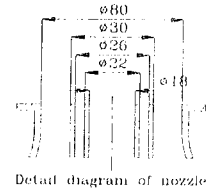


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

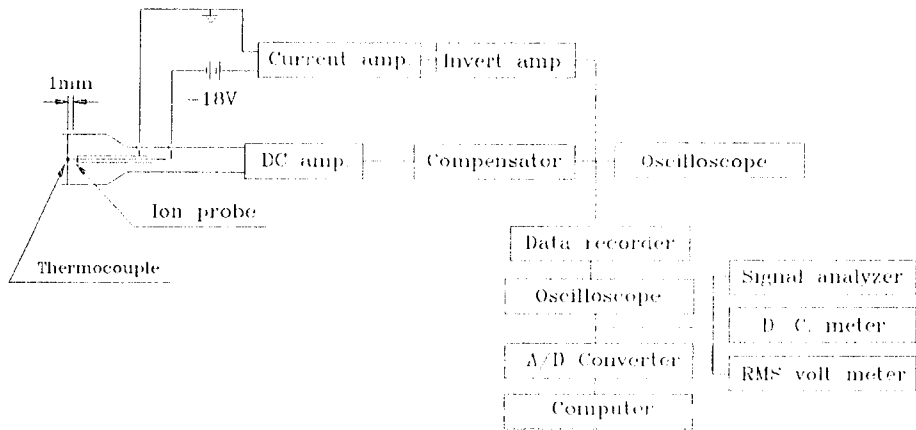


Fig. 2 Block diagram for simultaneous measuring of ion current and fluctuating temperature

Cabosieve S를 사용하였다.

이온전류측정은 고온의 화염 중에서 내산성이 좋고, 전도성이 우수한 소선경 0.1 mm의 Pt-Rh13% 합금을 테프론관에 넣고, 석영유리관 속에 삽입한 후 수냉식 프로브에 넣어 사용하였다. 정전탐침은 석영유리관보다 0.5 mm 돌출시켜 감응부로 하였으며, -18volt를 가해서 화염대의 양이온을 검출하였다.

연을 수 있으며, 본 연구에서는 고속측 공기류의 유속은 9 m/s로, 저속측 공기류는 1.5 m/s로 일정하게 유지하였다. S1화염은 유속비  $\lambda (= U_c/U_f)$ 가 1/6인 조건으로 주위공기류가 고속측인 화염이고, C1화염은  $\lambda=6$ 인 조건으로 중심공기류가 고속측인 화염이다. 사용된 연료는 상용 프로판가스(LPG)이고, 연료량은 프로판가스용 적산유량계로써 계측하고 연료량을 노즐 출구의 단면적으로 나눈 출구평균유속은  $U_f$ 로 표시하였다. 연료의 출구평균유속은 고속측공기류와 저속측공기류의 유속에 비해 상대적으로 낮은  $U_f=0.67$  m/s로 두 조건 모두 일정하게 하였다.

화염구조의 가시화를 위한 광학적 관찰은 유효직경이 200 mm이고 초점거리가 1500 mm인 두 개의 오목거울을 사용하여, 순간 슈리렌 사진을 촬영하였다. CO와 CO<sub>2</sub> 성분은 가스 크로마토그래프(HP-5890 SeriesII)로 측정하였으며, 검출기(Detector)는 열전도도 검출기(Thermal Conductivity Detector: TCD)를 사용하였으며, 샘플링프루브는 흡입구경을 0.4 mm에서 2 mm로 확대하여 반응을 동결시켜 사용하였다. 분석을 위한 칼럼은 변동온도 측정용 프로브는 세선의 직경이 50  $\mu$ m

인 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 세선과 같은 재질의 직경 0.5 mm의 지주에 용접하여 사용하였다. 이때 변동온도 측정용 프로브는 비 수냉식의 석영 자기관(외경 3.9 mm)에 넣고, 이온전류와 동시측정을 위해 수냉식의 이온전류 측정용 프로브에 고정시켜 사용하였으며, 이온전류 측정용 정전탐침과 변동온도의 열전대 점접과의 거리는 1 mm로 하였다. 열전대로 화염내의 온도 변동을 검출하는 경우, 주위의 가스 온도가 고주파로 변동함에 따라 발생하는 진폭의 감소나 위상지연을 전기적으로 보상하여 열전대의 주파수에 대한 응답성을 높였다.<sup>(10)~(12)</sup>

Fig. 2는 변동온도와 이온전류의 동시측정계의 블록 선도이다. 변동온도는 열전대에 의해 측정된 신호를 직류증폭기에서 증폭된 신호를 보상을 통하여 보상시키고, 이온전류는 미소전류증폭기에서 음(-)전압으로 변환한 후 반전증폭기에 의해 반전, 증폭시켜, 데이터 레코드에 저장시켰다. 저장된 변동온도와 이온전류의 신호를 오실로스코프와 신호분석기를 통하여 확인한 후, A/D 변환기를 거쳐 퍼스널컴퓨터에서 통계처리하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 가시화 관찰

일반적으로 확산화염이 휘염인 것에 비해 본 연구의 대상 화염중 S1화염은 전체적으로 청염이나 하류영역에 약간의 휘염이 존재하는 화염이고, C1화염은 전체적으로 청염이나 화염주변부는 약간의 보라색을 띠는 화염 형상이며, 외관상 S1화염에 비해 C1화염의 길이가 더 길게 관찰되었다. Fig. 3

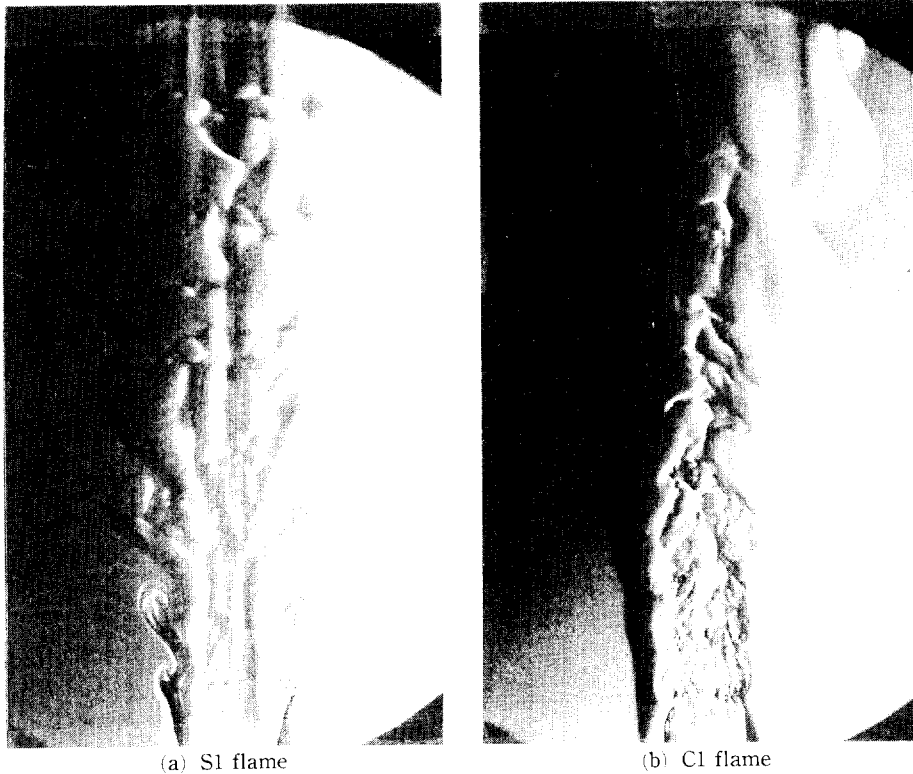


Fig. 3 Schlieren photographs of flames

은 화염의 순간 슈리렌 사진이다. 두 화염 모두 저속축의 노즐림 선단에 부착하고 있다. 즉 C1화염에서는  $R=13\sim 15$  mm에, S1화염에서는  $R=9\sim 11$  mm에 부착하고 있으며, 두 화염 모두 난류강도가 고속축 공기류보다 상대적으로 작은 값을 가지는 저속축 영역에서 화염안정을 위한 화염대가 형성되어 화염이 부착되는 것으로 사료된다. 와는 고속축 공기류에 의해 발달되고 있으며, 특히 S1화염은 주위공기류축(고속축 공기류)의 림선단에 명확한 코히어런트 와(coherent eddy)가 발생하여 하류로 감에 따라 성장하고 있다. 이것은 Brown and Roshko<sup>(1)</sup>가 비반응등온류의 두 평행류 사이의 혼합층에서 관찰한 바 있는 고속과 저속의 양측에서 휘말려 들어오는 코히어런트 구조와 본질적으로 동일한 것이고, 山口 등<sup>(6)~(10)</sup>이 발표한 바와 같이 연소시 코히어런트 와는 저속축 림에 부착되는 것과 일치한다.

3.2 온도분포

Fig. 4는 각 화염의  $Z=50, 70, 100$  mm 단면에

있어서의 시간평균온도와 변동온도의 RMS값의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. S1화염은 고속축 공기류축인 주위공기류의 강한 혼합작용으로 주위공기류 영역에서 변동온도의 RMS값이 높게 나타났으며, 반경방향의 분포 또한 넓게 나타났다. 시간평균온도의 극대치는 저속축 공기류 영역인 중심축 부근에 형성되며, 이곳에서의 변동온도의 RMS값은 극소치를 나타낸다.

C1화염은 중심공기류의 강한 혼합작용으로 중심공기류 영역에서 변동온도의 RMS값이 높게 나타났고, 반경방향으로 넓게 분포하고 있다. 시간평균온도의 극대치는 중심축에서 더 벗어난 저속축 공기류 영역에 형성되며, 이곳에서의 변동온도의 RMS값은 극소치를 나타내고 있다.

Fig. 5~Fig. 6은 각종 통계치 중 변동온도에 대한 확률밀도함수(PDF)와 비대칭도(Skewness) 및 편평도(Flatness)의 분포를 나타낸 것이다.

비대칭도는 전형적인 정규분포(Gaussian distribution)에서는 0의 값을 가지는 반면, 비대칭도가 0이 아닌 값을 가지는 것은 확률밀도함수가 원점을

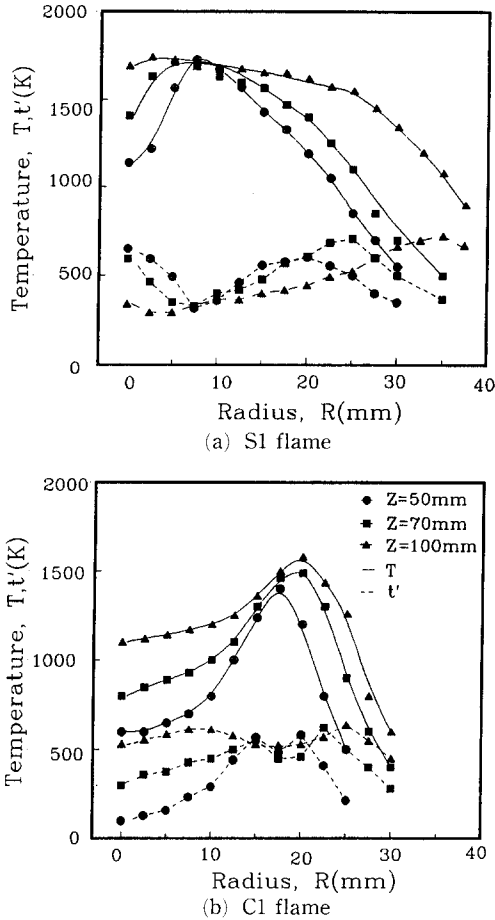


Fig. 4 Distribution of time mean temperature and R. M. S. of fluctuating temperature

기준으로 어느 한쪽에 편향된 비대칭을 보임을 의미한다. 화염주변부(공기영역, 미연 가스영역)에서 확률밀도함수는 정규분포와 비슷한 형상으로 대칭형이 되고, 변동온도의 상방(上方) 피크가 되어 정(正)의 비대칭도를 가지며, 비교적 저온의 가스 중으로 고온의 가스가 간헐적으로 존재하는 상황과 대응한다. 화염내에서 온도분포가 극대치를 가지는 영역 즉, 기연 가스영역에서는 변동온도가 하방(下方) 피크가 되어 부(負)의 비대칭도를 가지며, 이 영역은 고온의 가스중에 저온의 가스가 간헐적으로 존재하는 상황으로 대응된다.<sup>(12)</sup> 고온의 가스와 저온의 가스가 활발하게 교차되는 영역에서 변동온도의 확률밀도함수는 쌍봉성 또는 사다리꼴 형태의 분포를 가지며, 비대칭도는 영에 가까운 값을 가진다.

편평도는 변동성분의 4승의 order를 가지는 factor이다. 정규분포일 경우 편평도는 3이고, 편평도가 높다는 것은 난류에 의한 유동장의 불안정성이 증가되어 높은 주파수를 가지면서 많은 피크 값을 보이는 온도장이 형성됨을 의미한다. 또한 변동온도의 상방 및 하방 피크가 나타나는 영역에서는 비교적 높은 값의 편평도를 얻을 수 있고, 쌍봉성 또는 사다리꼴 형태의 확률밀도함수를 가지는 영역에서의 편평도는 상대적으로 낮은 값을 가진다. 따라서 변동온도의 확률밀도함수와 비대칭도 및 편평도 분포는 시간평균온도분포와 함께 난류 혼합된 연소가스의 정보를 나타낸다.

Fig. 5(a)는 S1화염의  $Z=70$  mm 단면에 있어서의 확률밀도함수의 분포를 나타낸 것이다. 시간평균온도분포가 극대치를 나타내고 있는 중심축 부근에서는 변동온도의 확률밀도함수의 분포 역시 주로 고온의 영역에 높은 확률을 나타내고 있고, 시간평균온도가 약 1200 K인  $R=25$  mm에서는 확률밀도함수의 분포가 거의 쌍봉성에 가까운 형상을 나타낸다. 따라서 S1화염은  $R=25$  mm 부근에서 고온의 연소가스와 저온의 미연 가스가 활발히 교차되고 있는 것으로 생각되며,  $R=2.5\sim 25$  mm 사이에서는 고온의 연소 가스중에 저온의 미연 가스가 간헐적으로 존재하는 기연 가스영역이 되며,  $R=25$  mm 이후 영역은 저온의 미연 가스 중에 고온의 연소 가스가 존재하는 미연 가스영역으로 생각된다.

C1화염의  $Z=100$  mm 단면에 대한 확률밀도함수의 분포는 Fig. 5(b)에 나타내었다.  $R=0\sim 15$  mm 영역에서는 고온의 연소가스와 저온의 미연 가스가 활발히 교차되고 있는 영역으로, S1화염에 비해 상당히 넓게 분포하고 있다. Fig. 4에 나타낸 시간평균온도분포에서도 C1화염의  $Z=100$  mm 단면은 중심축 부근에서 1200~1500 K로 거의 일정한 분포를 가지지만, 변동온도가 600~700 K으로 높은 값을 가지는 것과 대응된다. 시간평균 온도분포가 극대값을 가지는 영역인  $R=20$  mm 부근에서의 확률밀도함수는 주로 고온의 영역에 높은 확률을 나타내고 있는 것으로 보아  $R=17.5\sim 22.5$  mm 부근이 고온의 가스 중에 저온의 가스가 간헐적으로 존재하는 기연 가스영역으로 된다. 이것으로 중심공기류에 의해 이루어진 반응열이 차츰 주공기류의 반대측으로 이동되고 있는 것으로 사료된다.  $R=25\sim 30$  mm 영역에서는 고온의 연소가스와 반응 중

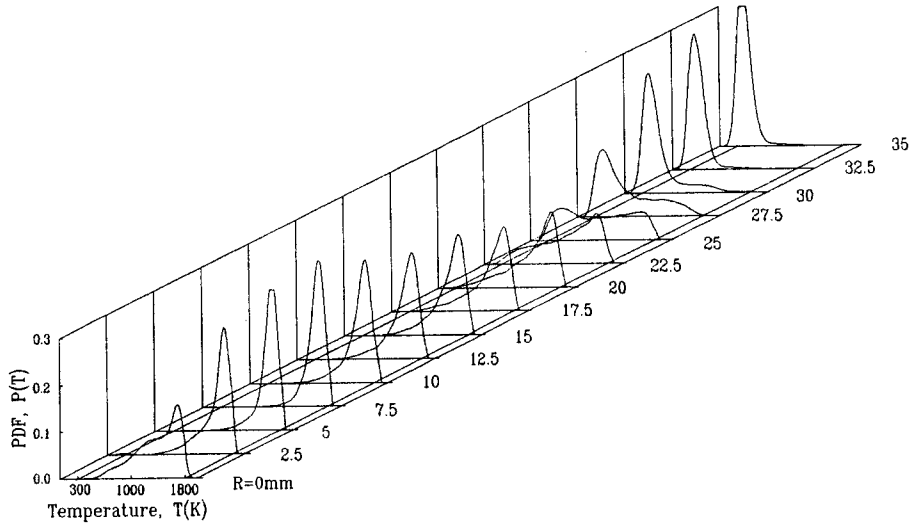


Fig. 5 (a) Probability density functions of fluctuating temperature (S1 flame, Z=70 mm)

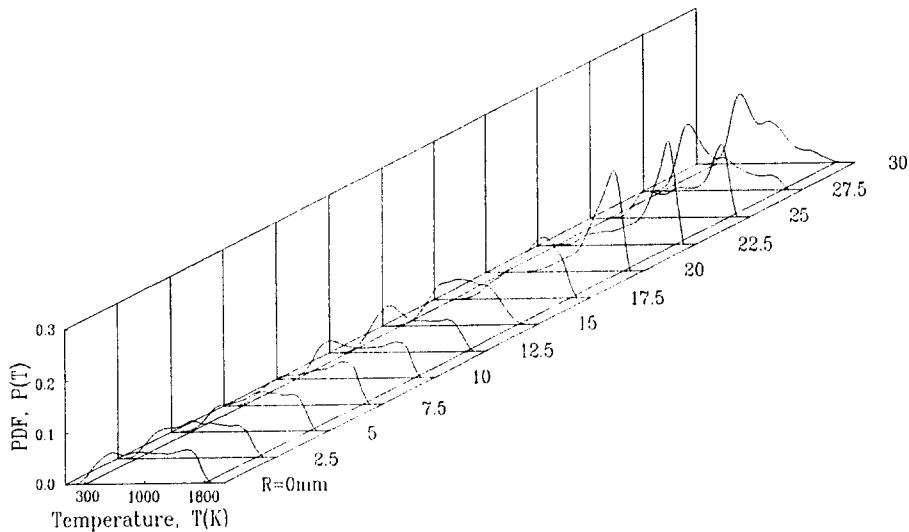


Fig. 5 (b) Probability density functions of fluctuating temperature (C1 flame, Z=100 mm)

의 가스 및 저온의 주위공기류에 대응하는 세 개의 피크를 나타내고 있으며 반경방향 즉, 주위공기류 쪽으로 갈수록 고온측 피크가 저하됨과 동시에 그 피크 위치온도도 저온측으로 이동하고 있는 것으로 보아 점차 주위공기류의 통과에 의한 미연혼합기의 화률이 높아짐을 알 수 있다.

이상의 온도 맥동의 화률밀도함수 분포로부터 반응은 고속측 공기류에 형성된 미연 가스영역에서 시작되고 있으며, 기연 가스영역은 저속측 공기류에서 형성된다. 주위공기류가 고속측인 화염은 고

온의 기연 가스영역이 비교적 상류영역에서도 반경 방향으로 넓게 분포되어 있다. 그러나 중심공기류가 고속측인 화염은 저온과 고온 가스가 활발히 혼합되어 있는 영역이 비교적 넓게 분포되어 있다. 이것은 스케일이 작고 난류강도가 높은 강난류 유동장의 기연 가스와 미연혼합기가 섞여 형성되는 분산반응화염(Distributed reaction flame)<sup>(13)~(16)</sup>에서 관찰한 변동온도의 화률밀도함수와 유사한 분포를 가진다.

Fig. 6(a)는 S1화염의 Z=50, 70, 100 mm 단면

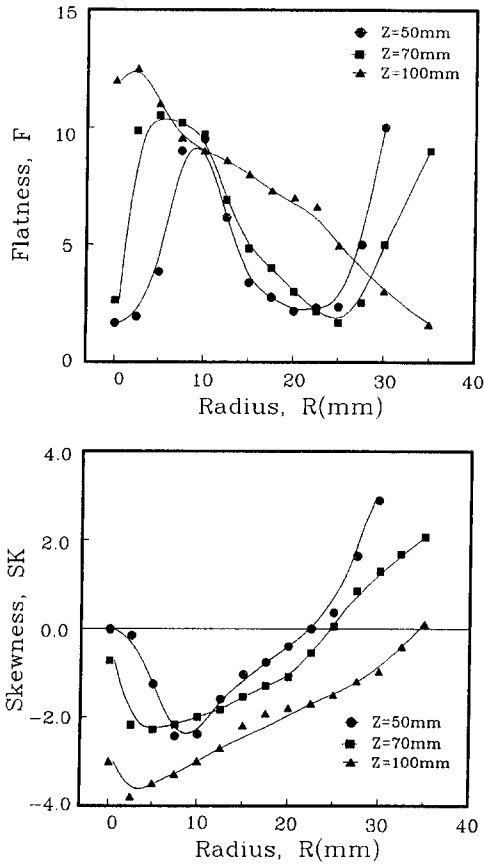


Fig. 6 (a) Skewness and flatness of fluctuating temperature (S1 flame, Z=70 mm)

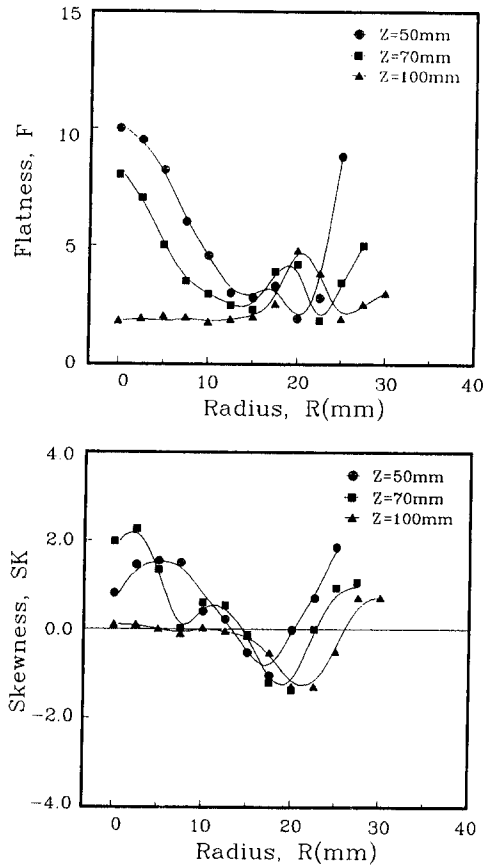


Fig. 6 (b) Skewness and flatness of fluctuating temperature (C1 flame, Z=100 mm)

에 있어서의 비대칭도와 편평도 분포를 나타낸 것이다. Z=50 mm 단면과 Z=70 mm 단면에서 R=0 mm 부근의 비대칭도가 -1~0의 값을 가지고, 편평도도 3정도의 값으로 비교적 작게 나타나는 것은 중심공기류의 모멘텀의 영향으로 저온의 가스가 존재하고 있는 것으로 보이며, 이것으로 인해 중심축 부근에서도 반응이 지속되고 있다고 생각된다. Z=100 mm 단면에서는 비대칭도가 -3.0의 값을 가지고, 편평도가 12의 값을 가지는 것으로 보아 중심공기류의 영향은 Z=100 mm 단면에서는 거의 보이지 않는다. 따라서 중심공기류는 Z=100 mm 단면 이전까지 영향을 주는 것으로 생각된다. 중심축 부근의 영역에서는 비대칭도가 극소값을 가지고 편평도가 극대값을 가지는 영역이 Z=50 mm 단면은 R=7.5 mm~10 mm, Z=70 mm 단면은 R=5 mm 부근, Z=100 mm 단면은 R=2.5 mm 부근에

분포하고 있는 것은 Fig. 4에서 나타난 시간평균 온도분포가 극대값을 가지는 영역과 일치하고 있다. 비대칭도가 영에 가까운 값을 가지면서 편평도도 3부근의 작은 값을 가지는 영역이 주로 주위공기류측에 분포되어 있는 것으로 보아 S1화염의 주반응영역은 주위공기류측에 존재할 것으로 사료된다. 비대칭도가 영의 값을 가지고 편평도의 극소값에 해당하는 영역이 Z=50 mm 단면은 R=22.5 mm, Z=70 mm 단면은 R=25 mm, Z=100 mm 단면은 R=35 mm 부근에 존재하고 있는 것으로 보아 주반응영역은 하류로 갈수록 모멘텀의 영향으로 중심축에서 차츰 멀어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 C1화염의 Z=50, 70, 100 mm 단면에 있어서의 비대칭도와 편평도 분포를 나타낸 것이다. Z=50 mm 단면과 Z=70 mm 단면에서 R=

10~15 mm 부근의 비대칭도가 영 부근의 값을 가지고, 평균도가 3부근의 값을 가지는 것은 중심공기류와 주위공기류에 의해 전단층이 발달되어 있는 영역으로, 이 영역에서 산화제와 연료의 혼합이 활발한 것으로 생각된다. 중심축 부근은 대칭도가 정의 값을 가지며 평균도도 5 이상의 값을 가지고 있는 것으로 보아 중심공기류에 의해 형성되는 미연 가스 영역에 해당하는 것으로 생각된다. 그러나 이 미연 가스영역은 하류로 갈수록 그 범위가 좁아지게 되고, Z=100 mm 단면에서는 중심공기류에 의

한 미연 가스영역이 소멸되고, 결국 고온의 가스와 저온의 가스가 활발히 혼합되는 영역이 형성된다.

중심공기류측의 비대칭도가 영인 영역이고 평균도가 극소값을 가지는 영역이 Z=50 mm 단면은 R=10~15 mm, Z=70 mm 단면은 R=7.5~15 mm, Z=100 mm 단면은 R=0 mm 부근에 존재하는 것으로 보아 주반응영역은 하류로 감에 따라 중심공기류측으로 이동해 감을 알 수 있다. 고온의 연소 가스가 존재하는 기연 가스영역은 주위공기류 영역에 존재하며 하류로 감에 따라 그 범위가 넓어지

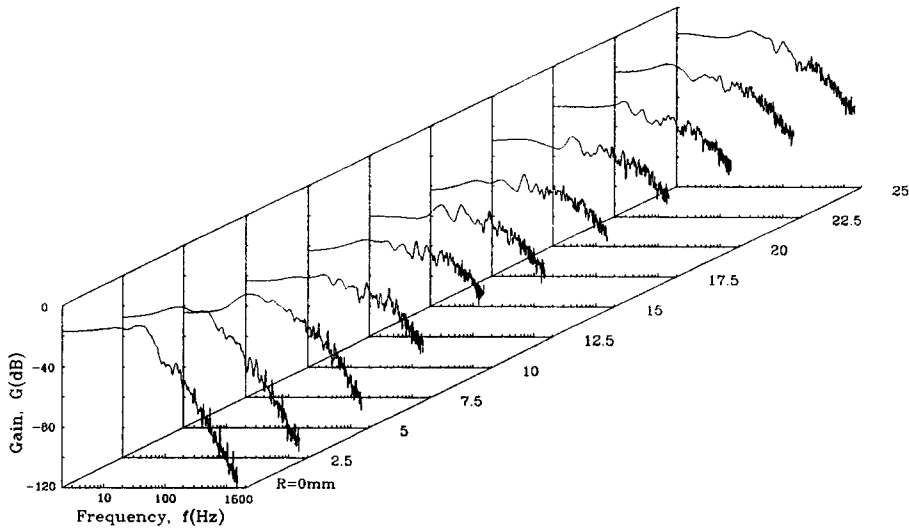


Fig. 7 (a) Spectral distribution of fluctuating temperature (S1 flame, Z=70 mm)

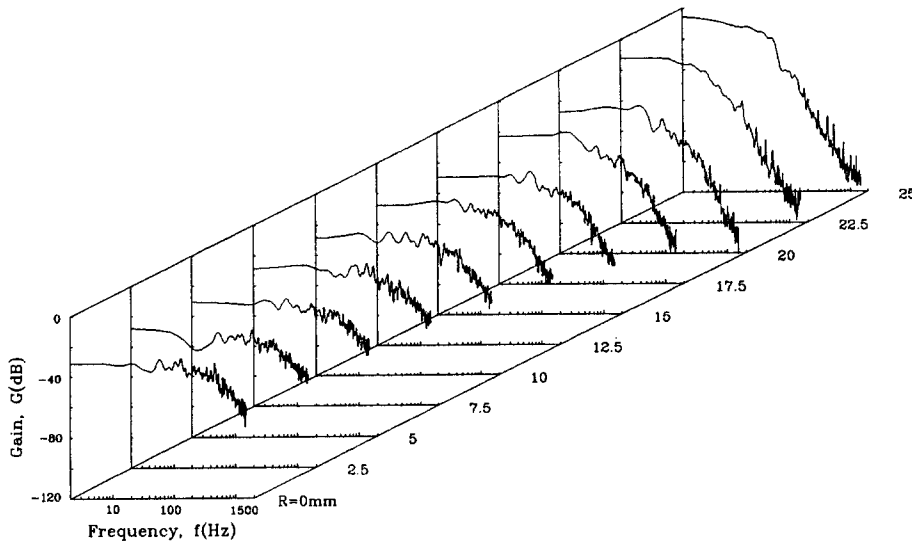


Fig. 7 (b) Spectral distribution of fluctuating temperature (C1 flame, Z=100 mm)



고, 이러한 분포는 Fig. 4의 시간평균온도 분포와 같은 경향을 나타낸다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 S1화염은 Z=70 mm 단면, C1화염은 Z=100 mm 단면에 있어서의 변동온도의 파워 스펙트럼 분포를 나타낸 것이다. 대체로 500 Hz 이하의 저주파수역에 그 에너지가 집중되어 있고 1 KHz 이상의 고주파수역에서는 감쇠가 현저한 형태를 나타내고 있다.

S1화염은 중심축 부근에서는 비교적 저주파수인 500 Hz 이하의 주파수역에 그 에너지가 집중되어 있다. 이것은 시간평균 온도분포 및 변동온도의 PDF 분포에서 고온의 확률이 높은 기연 가스영역이므로, 연소반응이 활발하지 않고 와의 성장여기

의 완료된 상태를 나타내고 있다. 주위공기류 영역에서는 작은 와에 대응하는 고주파수역에 에너지가 비교적 높게 분포하고 있다. 특히, R=7.5~15 mm 부근에서는 저주파수역의 에너지가 현저히 줄어든 반면, 고주파수역의 에너지가 눈에 띄게 증가하였다. 이곳은 중심공기류와 주위공기류에 의해 형성된 전단층 영역으로, 중심공기류 및 주위공기류에 의한 연료와 산화제의 혼합이 활발한 주변응역에

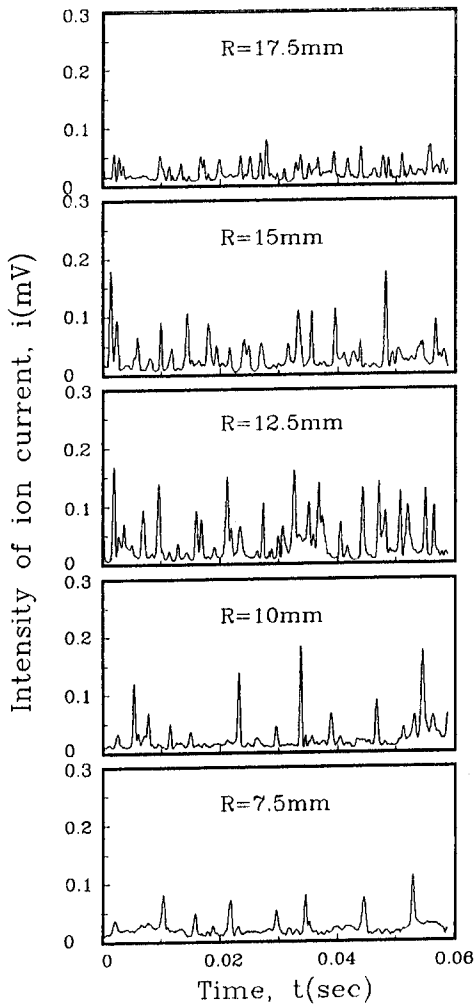


Fig. 8 (a) Waves of ion current (S1 flame, Z=70mm)

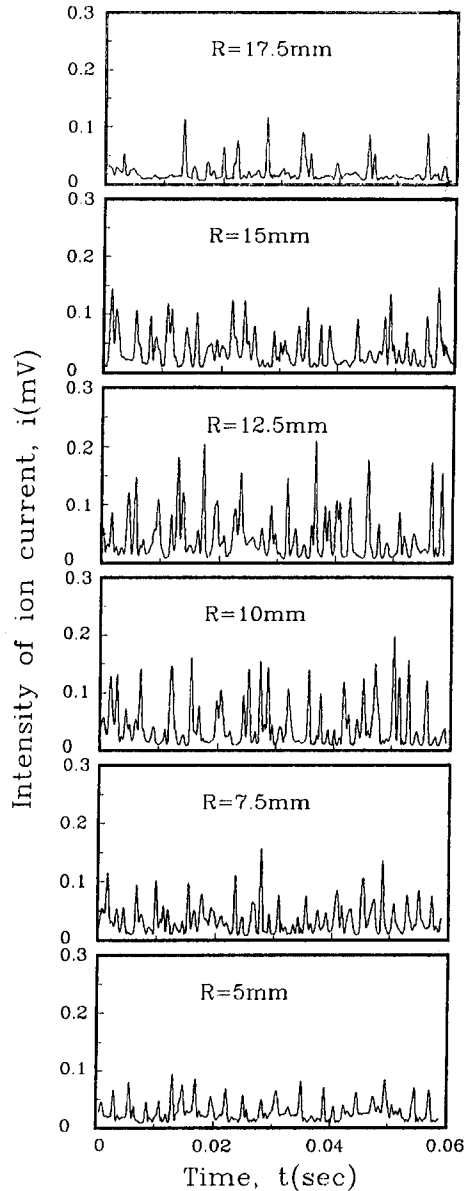


Fig. 8 (b) Waves of ion current (C1 flame, Z=100mm)

해당되며, 이 영역에서 와가 형성 및 성장하는 것으로 사료된다.

C1화염은 중심공기류영역에서 비교적 고주파수인 500 Hz 이상의 주파수역에 해당하는 에너지가 높게 분포되어 있고, 주위공기류 영역에서는 저주파수역에 해당하는 에너지에 지배된다. 이는 중심공기류에 의해 형성 및 성장된 와가 주위공기류 영역에서 성장이 완료됨을 나타낸다. 특히,  $R=0\sim 15\text{ mm}$  부근에서는 저주파수역의 에너지가 현저히 줄어든 반면, 고주파수역의 에너지가 눈에 띄게 증가하였다. 이것은 Fig. 5(b)에서 나타낸 C1화염의 화률밀도함수의 분포에서 중심공기류에 의해 고온의 연소가스와 저온의 미연 가스가 활발히 혼합되는 영역이 아주 넓게 분포하는 형상과 일치하는

경향을 보인다.

이상의 스펙트럼 분석에서는 고속측 공기류에 의해 형성된 전단층내에서 연료와 산화제의 원활한 혼합에 의해 와가 형성되고 성장하여 저속측 공기류측으로 이동하여 성장이 완료되는 것으로 생각된다.

3.3 이온전류분포

Fig. 8(a)는 S1화염의  $Z=70\text{ mm}$  단면에서의 이온전류의 파형을 나타낸 것이다. 주위공기류 영역인  $R=17.5\text{ mm}$ 에서 반응이 시작하여  $R=12.5\text{ mm}$  부근에서 반응이 활발히 이루어지고 있으며, 시간평균온도분포가 극대값에 해당하는 영역인  $R=7.5\text{ mm}$  부근에서 고온의 기연 가스 중에 간헐적인 반응이 존재하고 있는 상태를 나타내고 있다.

Fig. 8(b)는 C1화염의  $Z=100\text{ mm}$  단면에서의 이온전류의 파형을 나타낸 것이다. 중심공기류 영역인  $R=5\text{ mm}$  부근에서 반응이 시작되어  $R=10\sim 12.5\text{ mm}$ 영역에서 가장 활발한 반응이 이루어지고 있으며, 시간평균 온도분포가 극대값에 해당하는 영역인  $R=17.5\text{ mm}$  부근에서 고온의 기연 가스 중에 간헐적인 반응이 존재하고 있는 상태를 나타내고 있다.

S1화염보다 C1화염의 이온전류치가 더 높고, 반경방향으로 더 넓게 나타나고 있는데, 이것은 C1화염에 대한 변동온도의 PDF 분포의 형상이 사다리꼴 또는 쌍봉성의 형태가 반경방향으로 넓게 분포되어 있는 것과 대응된다.

Fig. 9는 Fig. 8(a), (b)의 이온전류파형에 대응하는 스펙트럼을 나타낸 것이다. 변동온도의 스펙트럼에서와 마찬가지로 와의 운동이 주기적이지도 않고 불규칙한 특성을 가지고 있고, 그 외에도 화염이 크기나 주기가 다른 수많은 와들로 이루어져 있기 때문에 특정 탁월주파수는 나타나지 않았다. S1화염은 고속측영역인  $R=12.5\text{ mm}$ 와  $R=17.5\text{ mm}$ 에서, C1화염은  $R=5\text{ mm}$ 와  $R=12.5\text{ mm}$ 에서 저속측영역에 비해 상대적으로 고주파수에도 많은 에너지를 가지는 특성을 가진다.

Fig. 10(a), (b)는 각 화염의  $Z=50, 100\text{ mm}$  단면에 대한 CO 및 CO<sub>2</sub> 농도와 이온전류 RMS 값의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 이온전류가 S1화염에서는  $Z=50\text{ mm}$  단면의  $R=12.5\text{ mm}$  부근에서,  $Z=100\text{ mm}$  단면의  $R=15\text{ mm}$  부근에서 극대값을 가진다. 또 C1화염은  $Z=50\text{ mm}$  단면과  $Z$

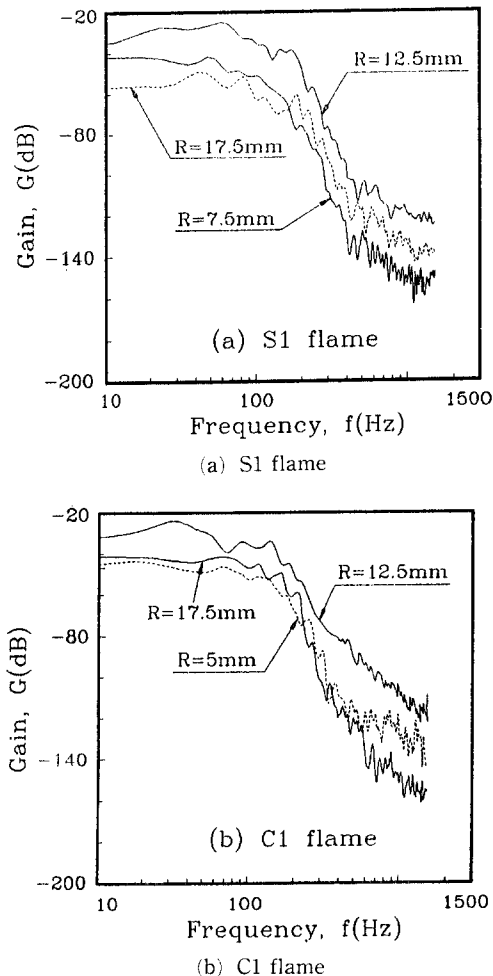


Fig. 9 Spectral distribution of ion current

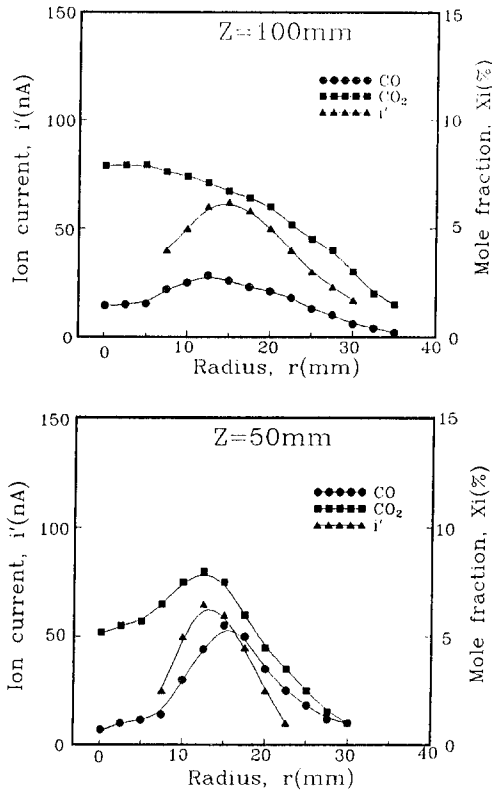


Fig. 10 (a) Distribution of ion current, CO and CO<sub>2</sub> concentration (S1 flame, Z=70 mm)

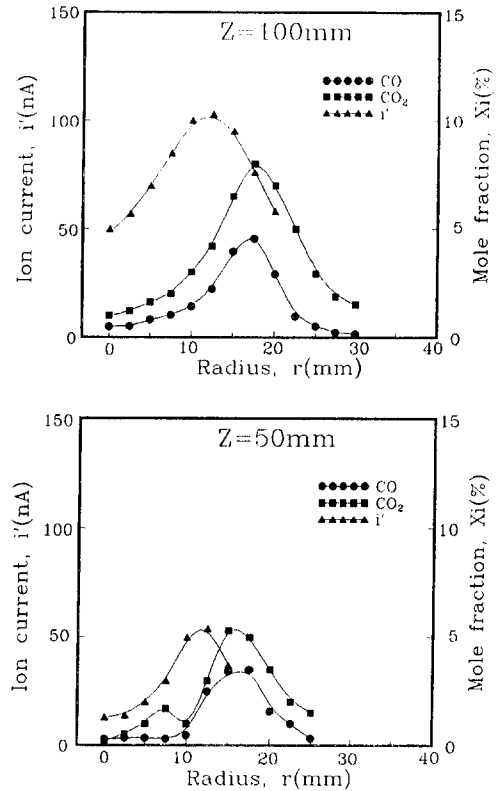


Fig. 10 (b) Distribution of ion current, CO and CO<sub>2</sub> concentration (C1 flame, Z=100 mm)

=100 mm 단면에서 모두 R=12.5 mm 부근에서 극대값을 가진다. 또한 연소생성물인 CO 및 CO<sub>2</sub> 농도 분포는 이온전류가 극대값을 가지는 영역에서 저속축 공기류로 이탈하여 극대값을 가지는 것으로 보아, 주반응은 고속축 공기류에서 발생하여 연소생성물은 저속축 공기류 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

속도차가 있는 동축이중 공기분류 사이의 전단층에 저속의 기체연료를 주입하여 연료와 산화제의 접촉면적을 증대시킨 난류산화염을 대상으로 화염의 구조 및 연소특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화염은 저속축 공기류의 난류강도가 상대적으로 낮아 화염안정을 위한 화염대가 형성되기 때문에 저속축 림에 부착해서 안정화되고, 또 상대적으로 난류강도가 더 큰 고속축 공기류에 의해 코허어

런트 와가 형성되어 성장한다.

2) 고속축 공기류에 의해 형성된 난류강도가 더 크게 되어 연료와 산화제의 혼합이 원활하기 때문에, 주반응영역은 고속축 공기류에 의해서 형성되고 하류로 감에 따라 고속축 영역 쪽으로 이동하지만, 연소 가스는 저속축 영역 쪽으로 이동한다.

3) 고속축 공기류가 주위공기류인 화염은 전체적으로 고온의 기연 가스영역에 해당하는 비대칭도와 편평도 및 화물밀도함수의 분포를 가지는 반면, 고속축 공기류가 중심공기류인 화염의 일부 영역(Z=100 mm 단면)에서는 기연 가스와 미연 가스가 혼재하는 영역이 넓게(R=0~15 mm 부근) 분포하여 분산반응영역에서 볼 수 있는 것과 유사한 형태의 PDF 분포와 비대칭도분포가 나타난다.

4) 연소장에서 전단층에 존재하는 와에 대해서 변동량의 스펙트럼 분석에서 특정 탁월주파수는 나타나지 않지만, 변동량의 에너지는 비교적 큰 와의 운동에 대응되는 저주파특성 및 랜덤성을 가지고 있으며, 특히 고속축 공기류의 에너지는 큰 스케일

에 대응되는 저주파특성 외에도 작은 스케일에 대응되는 고주파특성이 높게 나타났다.

### 참고문헌

- (1) Brown, G. L. and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers," *J. F. M.*, Vol. 64, part 4, pp. 775~816.
- (2) Winant, C. D. and Brown, F. K., 1974, "Vortex Pairing: the Mechanism of Turbulent Mixing Layer Growth at Moderate Reynolds Number," *J. F. M.*, Vol. 64, part 2, p. 237.
- (3) Roshko, A., 1976, "Structure of Turbulent Shear Flows: A New Look," *AIAA J.*, Vol. 14, No. 10, p. 1349.
- (4) Yule, A. J., 1978, "Large-Scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet," *J. F. M.*, Vol. 89, part 3, pp. 413~432.
- (5) Koochesfahani, M. M., Dimotakis, P. E. and Broadwell, J. E., 1985, "A 'Flip' Experiment in a Chemically Reacting Turbulent Mixing Layer," *AIAA J.*, Vol. 23, No. 8, p. 1191.
- (6) 山口, 大岩, 楠, 高間, 1980, "平面せん断流中の亂流擴散火炎," *日機論B*, 46~405, pp. 981~990.
- (7) 山口, 大岩, 中桐, 横井, 楠, 1983, "平面せん断流中の亂流擴散火炎(コヒーレント構造火炎の舉動ル)," *日機論B*, 49~440, pp. 893~900.
- (8) Hasegawa, T., Yamaguchi, S. and Ohiwa, N., 1987, "A Numerical Analysis of Mass Transfer in a Plane Shear Layer," *JSME (Int.)J.*, Vol. 30, No. 263.
- (9) 山口, 1989, "平面せん断流中の亂流擴散火炎," *日機論B*, 55-551, pp. 859~864.
- (10) Kunugi, M. and Jinno, H., 1959, "Measurement of Fluctuating Flame Temperature," *7th symp. (Int.) on Combustion*, pp. 942~948.
- (11) Lockwood, F. C. and Odidi, A. O., 1975, "Measurement of Mean and Fluctuating Temperature and of Ion Concentration in Round Free-Jet Turbulent Diffusion and Primixed Flames," *15th Symposium (International) on Combustion*, pp. 561~571.
- (12) Takagi, T., Shin, H. D. and Ishio, A., 1981, "A Study on the Structure of Turbulent Diffusion Flame: Properties of Fluctuations of Velocity, Temperature, and Ion Concentration," *Combustion and Flame*, Vol. 41, pp. 261~271.
- (13) Yoshida, A. and Günther, R., 1980, "Experimental Investigation of Thermal Structure of Turbulent Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 28, pp. 249~258.
- (14) Yoshida, A. and Tsuji, H., 1978, "Measurements of Fluctuating of Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame," *17th. Symp. (International) on Combustion*, Williams & Wilkins, pp. 945~956.
- (15) Günther, R. and Wittermer, V., 1981, "The Turbulent Reaction Field in a Concentric Diffusion Flame," *18th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 961~967.
- (16) 高橋丈雄, 1989, "亂流豫混合火炎の分散反應領域の觀察," *日機論B*, 55-511, pp. 859~864.