

<논 문>

난류확산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구(3) -선회화염의 구조와 라디칼 자발광 특성에 관하여-

장인갑* · 최경민* · 최병륜**

(1995년 9월 15일 접수)

An Experimental Study on Flame Structure and Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame (III) -For Swirl Flame Structure and Characteristics of Radical Luminous Intensity-

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

Key Words : Luminous intensity of Radicals(라디칼 자발광 강도), Flame Diagnosis(화염진단), Recirculation Zone(재순환 영역), Reverse Flow Boundary(환류영역경계), Double-Coaxial Swirl Combustor(동축이중선회연소기)

Abstract

So most practical combustor is considered to the swirl flame, it is very important to examine swirl flame structure and combustion characteristics. Recently, attention has been paid to the flame diagnostic by radical luminous intensity. For swirl flame structure and combustion characteristic, reverse flow boundary, temperature, ion current and radical luminous intensity were measured in the double-coaxial swirl combustor which was used principle of multi-annular combustor. This study had three experimental condition, S-type, C-type, SC-type. S-type and C-type flames were formed recirculation zone, but SC-type flame wasn't formed. C-type flame had two recirculation zone. The position with maximum value of ion current and CH-radical, temperature and OH-radical had similarity distribution almost. Therefore, it is possible that the macro structure of flame was measured by radical luminous intensity in the high intensity of turbulent combustion field which was formed by swirl.

기 호 설 명

E : 파워스펙트럼 (dB)

f : 주파수 (Hz)

I : 라디칼 자발광 강도 (mV)

\bar{I} : 시간평균이온전류치 (nA)

P : 화률밀도함수 (%)

R : 노즐 중심축에서 반경방향좌표 (mm)

T : 시간평균온도 (K)

t' : 온도변동의 R. M. S치 (K)

U : 축방향 노즐 출구 평균유속 (m/s)

Z : 노즐출구에서 축방향 좌표 (mm)

하첨자

c : 중심공기류

f : 연료

*회원, 부산대학교 기계공학과, 부산대학교 기계기술 연구소 연구원

**회원, 부산대학교 대학원

OH : OH-라디칼
 CH : CH-라디칼
 s : 주위공기류

1. 서 론

선회류는 보염효과를 높이고, 연소속도를 지배하는 난류강도의 증대 및 체류시간을 제어하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 선회류를 동반한 연소기내의 유동은 재순환 영역, 와류중심영역등이 발생하여 복잡한 유동을 형성하고 있다. 특히 재순환영역은 고강도의 난류에 의해 연소가스와 미연가스의 활발한 혼합이 이루어져 열과 물질전달을 지배하고, 또 열과 활성화합종을 저장하는 역할을 하므로 화염안정화에 중요한 역할을 한다⁽¹⁾.

각종 선회연소기와 가스터빈 연소기에 관한 연구의 대부분은 선회류에 의해 혼합을 제어할 목적으로 수행되고 있다. 선회류에 의해 형성되는 재순환 영역의 거동과 유동상태, 연료와 공기의 혼합, 온도 및 농도분포 등이 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 널리 알려지고 있다.^{(2)~(6)} 선회 화염 내에서의 운동과 열의 난류수송의 제어는 일반적으로 2 유속성분과 온도를 측정하고, 그 변동치의 상관을 구하면, 선회연소기의 혼합과 연소특성을 이해하고 제어하는데 많은 도움이 된다.⁽⁷⁾

최근 화염의 구조를 밝히기 위해 라디칼을 이용한 방법들이 많이 연구되고 있다. 화염색은 OH, CH, C₂ 라디칼의 발광강도에 따라 정해지므로,⁽⁸⁾ 화염의 고유한 색깔을 결정하는 발광 라디칼 속에 당량비, 화염온도, 연소형태 등의 다양한 정보를 얻을 수 있음이 밝혀졌다.⁽⁹⁾ 특히 OH-라디칼은 상대적으로 긴 수명을 가지고 있기 때문에 연소가스 중에 넓게 분포하고 있으며, CH-라디칼은 주로 탄화수소의 초기반응영역에서 관찰되고, C₂-라디칼과 함께 당량비를 결정하는데 중요한 역할을 한다.^{(10)~(11)} 그러나 이들 연구들은 주로 층류화염을 대상으로 행해졌다. 그러나 난류화염 및 분무화염에 대해 적용한 예는 적으며, 대부분 세 가지 라디칼 자발광 신호의 비교 및 각 신호간의 상관관계를 분석하고, 이를 통해 연소반응영역을 추정하여 화염구조를 밝히고 있다.^{(12)~(14)}

가스터빈 연소기와 공업용로 등의 실용연소기들은 대부분 선회류를 동반한 연소기를 채용하고 있

어, 선회화염의 구조와 연소특성을 규명하는 것이 대단히 중요하다. 최근 이러한 화염에 대해 라디칼 자발광강도를 이용한 화염진단법의 적용 가능성에 관심이 집중되고 있다.

본 연구는 유동장의 높은 전단응력영역과 과농영역이 일치되도록 연료와 유동의 방향을 조절함으로써 높은 연소부하율(Volumetric heat release rate)을 얻을 수 있고, 또 화염의 안정한계도 더 넓어진다는 보고⁽¹⁵⁾가 있는 다중선회연소기의 원리에 기초한 동축이중선회연소기에서 형성되는 난류확산화염을 대상으로 하였다. 그리고 라디칼 계측기법을 종래의 층류화염 및 비선회 난류화염에 대해 적용한 예와는 달리 선회화염에 대해 적용하였으며, 변동온도 및 이온전류치 분포와 비교·고찰하여 선회화염의 구조 및 연소특성을 조사·연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 동축이중선회연소기(Double Coaxial Swirl Combustor)와 연소용 연료 및 공기의 공급유로계를 나타낸 것이다. 연소용 공기는 송풍기에서 공급되며 압력맥동을 최소화하기 위해서 서지 탱크를 거친 후, 중심 선회류와 주위선회류로 나누어져 공급된다. 기체연료는 압력용기에서 공급되며, 압력조정기를 거쳐 가스유량 조절밸브에 의해 유량이 조절되어 연소기에 공급된다. 이때 내측원관으로 분출되는 선회류를 중심선회류, 외측원관에서 분출되는 공기류를 주위선회류라 칭하고, 각각의 유속을 축방향 노즐 출구 단면적으로 나누어 평균유속 U_c , U_s 로 표시한다. 연료노즐은 내경 18mm, 두께 2mm의 원관과 내경 26mm, 두께 2mm의 원관이 동축으로 설치되어 두 개의 동심원 사이(간격 2mm)에서 연료가 공급되고, 이 연료노즐은 출구직경 80mm의 공기노즐에 동축으로 설치되어 있다. 연소기 출구의 노즐 상세도를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 3은 중심공기류와 주위공기류의 선회류 발생기의 구조를 나타낸 것이다. 선회공기류는 실린더 벽면에 접선방향으로 설치된 네 개의 직사각형 슬롯(slot)에 의해 실린더 내부로 공급된다. 각 슬롯의 재원(폭(mm)×길이(mm)×개수)은 주위선회류 발생기가 5×50×4이고, 중심선회류 발생기가 2×10×4이다. 선회의 방향은 주위선회류와 중심선

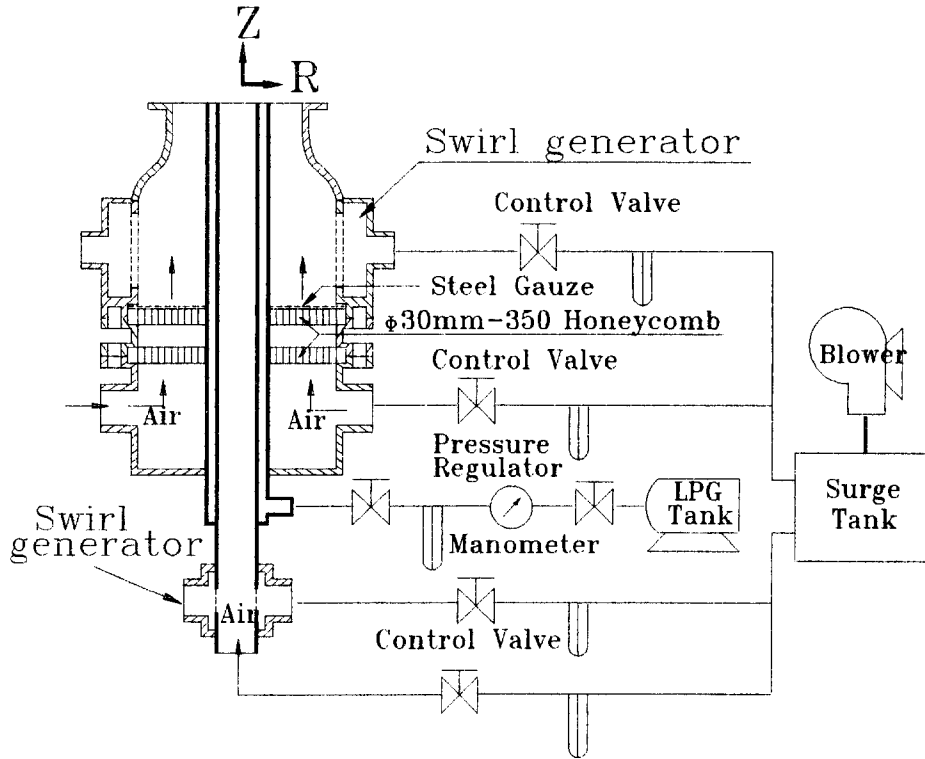


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

회류 모두 시계방향으로 동일하다.

중심선회류 및 주위선회류의 유속비 $\lambda (= U_s / U_c)$ 를 적절히 조절하면 여러 가지 형태의 선회류 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 유속이 빠른 쪽의 선회류를 주(主)선회류로 하였다. 따라서 실험조건은 $\lambda = 6$ 인 S-type과 $\lambda = 1/6$ 인 C-type 및 $\lambda = 1$ 인 SC-type의 세 조건에 대해 조사하였다. 그리고 사용된 연료는 상용 프로판가스(LPG)이며, 연료량은 프로판 가스용 적산유량계로 측정하고 연료의 평균유속(U_f)은 연료유량을 노즐 출구

단면적으로 나눈 것으로 표시하였다. 연료에는 선회를 부여하지 않았고, 평균유속은 공기선회류의 평균 유속에 비해 상대적으로 낮은 $U_f = 0.67\text{m/s}$ 로 세 조건 모두 일정하게 하였으며, 자세한 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

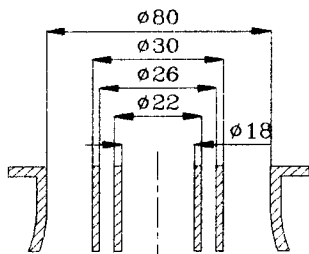


Fig. 2 Detailed nozzle exit

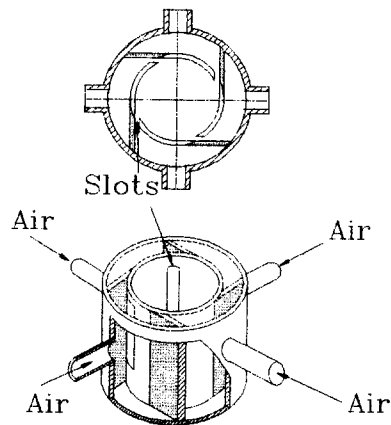


Fig. 3 Swirl generator

Table 1 Experimental condition.

	S-Type	C-Type	SC-Type
U_g (m/s)	0.67		
Re_g	255		
S	0		
U_c (m/s)	1.5	18	6
Re_c	1687	20250	6750
S	0.3	0.45	0.45
U_s (m/s)	9	3	6
Re_s	28125	9375	18750
S	0.68	0.68	0.68
$\lambda \left(= \frac{U_s}{U_c} \right)$	6	1/6	1

2.2 실험방법

Fig. 4는 환류영역의 경계(reverse flow boundary)를 측정하기 위한 프로브를 나타낸 것이다. 프로브는 내경 0.6mm, 두께 0.1mm인 한쌍의 총 압력(total pressure) 측정용 튜브의 끝단을 마주 보도록 제작하였으며, 환류영역경계는 순류(forward flow) 및 환류(backward flow)의 경계이므로, 축방향 유속이 짝인 위치로서 총 압력차(total pressure difference)가 짝이 되는 반경방향의 위치로 결정하였다. (1)~(2)

Fig. 5는 이온전류 및 변동온도를 동시에 측정하기 위한 계통도를 나타낸 것이다. 이온전류측정은 고온의 화염 중에서도 내산성이 좋고, 전도성이 우수한 소선경 0.1mm의 Pt-Rh13% 합금을 테프론관에 넣고, 석영유리관 속에 삽입한 후 수냉식 프로브에 넣어 사용하였다. 정전탐침은 석영유리관보다 0.5mm 돌출시켜 감응부로 하였으며, -18 volt를 가해서 화염대의 양이온을 검출하였다.

변동온도 프로브는 세 선의 직경이 50 μ m인 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 세 선과 같은 재질의 직경 0.5mm의 지주에 용접하여, 非수냉식의 석영 자기관(외경 3.9mm)에 넣어 사용하였다. 이때 변동온도 프로브는 이온전류와 동시측정을 위해 수냉식의 이온프로브에 고정시켜 사용하였으며, 이온전류 측정의 정전탐침과 변동온도의 열전대 온접점과의 간격은 1mm로 하였다. 열전대로 화염내의 온도변동을 검출하는 경우, 주위의 가스온도가 고주파로 변

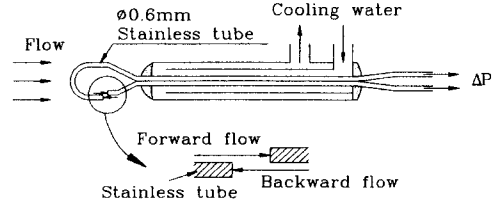


Fig. 4 Total pressure difference measuring probe

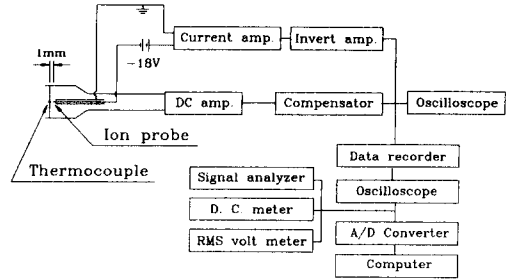


Fig. 5 Block diagram for simultaneous measurement of ion current and fluctuating temperature

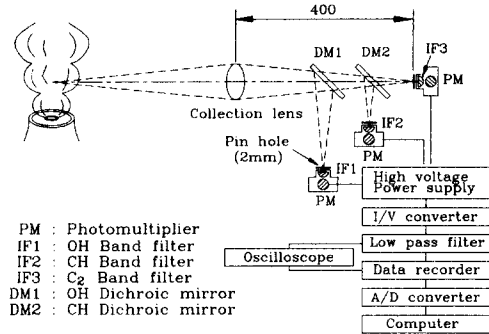


Fig. 6 Block diagram for simultaneous measurement of radical luminous intensity.

동함에 따라 발생하는 진폭의 감소나 위상지연을 전기적으로 보상하여 열전대의 응답성을 높였다.

Fig. 6은 라디칼 자발광 강도를 측정하기 위한 채광부 광학계와 광전측정장치의 계통도를 나타낸 것이다. 광학계는 세 종류의 라디칼 자발광 신호를 동시에 취득할 수 있도록 구성하였다. 화학발광은 화염으로부터 400mm위치에 설치한 석영렌즈(초점거리 $f=200$ mm)로 집광되어 다이크로익미러(Dichroic Mirror)에 의해 OH밴드를 포함하는 근자외역의 광은 반사되고, CH와 C_2 밴드를 포함하는 가시역에서 근적외역까지의 광은 투과된다. 분리된 근자외역 및 가시역의 화학발광은 각각 광전

Table 2 Band filter characteristics

Observed Species	Observed Spectrum (nm)	Band Filter		
		λ_{\max} (nm)	Half Width (nm)	Trans. of λ (%)
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

차증배관(HAMAMATSU, R106UH(OH용), IP28 A(CH, C₂용))에서 검출된다. 광전자증배관 PM과 핀홀 P(직경 2mm)의 사이에는 각각 공간섭 필터(IF1(C₂ 발광 밴드), IF2(CH 발광 밴드) 및 IF3(OH 발광 밴드))가 설치되어 있으며, 이에 대한 자세한 사양을 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 환류영역의 경계

Fig. 7은 선회화염인 경우에 형성되는 환류영역과 그 경계를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 환류영역의 경계를 나타낸 것이고, 점(Dot)으로 채워진 영역은 환류영역을 나타낸 것이다. 환류영역의 경계는 축방향의 각 단면에서 순류에서 환류로 유동방향이 바뀌는 경계이고, 축방향의 유속이 0으로 되는 반경방향의 위치로 결정되므로, 재순환 영역의 중심은 환류영역의 경계상에 위치하게 된다.⁽¹⁾⁻⁽²⁾

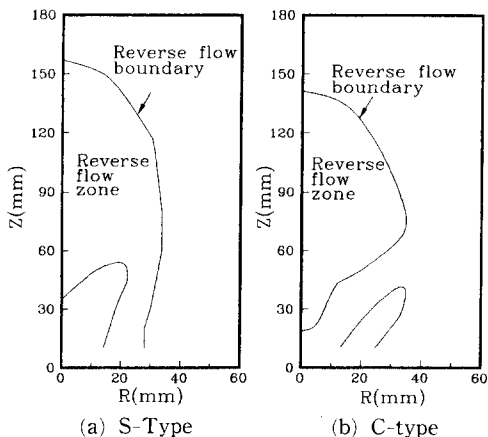


Fig. 7 Reverse flow zone and boundary in the swirl flame

Fig. 7(a)의 S-type의 선회화염은 주위선회류가 강한 조건으로, $Z < 30\text{mm}$ 단면에서는 주위선회류 영역에서만 환류영역이 형성되었지만, $Z > 50\text{mm}$ 단면에서는 중심축영역까지 넓게 형성되고 있다. 환류영역은 축방향거리 Z가 증가함에 따라 점점 폭이 넓어지고 있으며, $Z = 60\text{mm}$ 단면에서는 $R = 32\text{mm}$ 부근까지 형성되어 폭이 최대가 되며, 이후 점점 폭이 줄어들고 있다. 따라서 재순환영역은 주위선회류에 의해서만 형성되고, 약한 중심선회류가 있는 노즐출구의 중심축부근에서는 형성되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)의 C-type의 선회화염은 중심선회류가 강한 조건으로, 환류영역의 경계는 $Z = 20\text{mm}$ 단면의 중심공기류의 노즐 출구 영역인 $R = 5\text{mm}$ 위치에서 부터 형성되기 시작하고 있다. 이 환류영역은 축방향 거리 Z가 증가함에 따라 점점 증가하고 있고, $Z = 40\text{mm}$ 단면에서 환류영역의 폭이 급격히 넓어지고 있으며, $Z = 70\text{mm}$ 단면에서는 환류영역의 폭이 최대가 된다. 또한 C-type의 선회화염에서는 S-type의 선회화염과는 달리, 주위선회류에 의한 소규모의 환류영역이 $Z = 10\text{mm}$ 단면의 $R = 20\text{mm}$ 부근에서 형성되고, $Z = 40\text{mm}$ 단면의 $R = 35\text{mm}$ 위치까지 형성되어 있다.

그러나 SC-type의 선회화염에서는 환류영역이 형성되지 않았다.

3.2 온도 및 이온전류분포

Fig. 8은 각 선회화염에 대한 온도와 이온전류의 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)의 S-type의 선회화염은 각 단면 모두 주위선회류영역인 $R = 30\text{mm}$ 위치 부근에서 시간평균온도 및 이온전류가 높게 나타나고 있다. 이온전류는 주로 상류영역에서 높게 나타나고 있으며, $Z = 30\text{mm}$ 단면보다 하류영역에서는 이온전류치가

점차 감소하고 있다. 이것은 주로 주위선회류에 의해 노즐출구에서부터 반응이 활발하여, 비교적 상류영역에서 반응이 종결되기 때문이다. 중심축 영역에서 시간평균온도가 낮게 나타나고 있는데, 이것은 재순환영역 내부로 다량의 공기가 역류되기 때문이다.

Fig. 8(b)의 C-type 선회화염은 노즐출구부근에서 주위공기류에 의해 발생한 이온전류가 검출되고, Z=30mm 단면부터는 중심선회류에 의한 연소반응이 활발해지기 시작하고 있다. Z=50mm 단면은 중심선회류에 의해 형성된 재순환영역만 존재하는 영역으로 중심선회류에 의한 반응강도가 높게 분포하고 있다. 따라서 반응은 노즐출구부근에서는 주위선회류에 의한 반응이 지배적이나, 전반적인 반응은 주로 중심선회류에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. Z=10mm 단면의 R<15mm 위치 부근, Z=20mm 단면의 R=15mm 위치 부근, Z=30mm 단면의 R=17.5mm 부근에서 온도분포가 급격히 함몰되는 영역이 존재하고 있는데, 이곳은 재순환영역 사이에 해당하는 영역으로, 주위공기류 및 중심공기류에 의해 형성되는 미연가스는 두 재순환영역 사이로 흐르고 있기 때문이다.

Fig. 8(c)의 SC-type의 선회화염은 상류영역인 Z=20mm 단면까지는 주로 주위선회류에 의해서 화염이 형성되고 있으며, 중심선회류영역은 미연가스만이 존재하고 있다. Z=30mm 단면에서는 비로소 중심선회류 영역에도 주위공기류에 의해 생성된

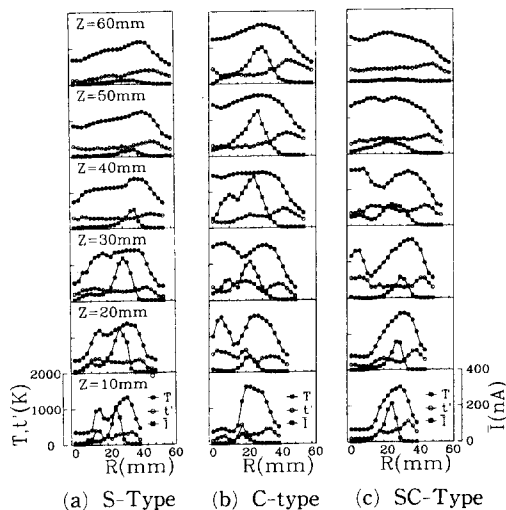


Fig. 8 Distribution of temperature and ion current

기연가스가 중심선회류의 미연가스와 혼합이 활발하게 이루어지고 있으나, 이온전류가 거의 검출되지 않는 것으로 보아 반응이 일어나기 전인 것으로 생각된다. 그러나 Z=40mm 단면에서는 Z=30mm 단면의 기연가스와 미연가스의 혼합으로 인한 중심축 부근에서의 반응도 일어나서 이온전류가 검출되고 있고, Z=50mm 단면에서는 중심선회류와 주위선회류에 의한 반응이 합쳐진 형태로 되고, Z=60mm 단면 이후에서는 반응이 거의 종결되는 것을 볼 수 있다.

3.3 변동온도의 확률밀도 분포

Fig. 9(a) (b) (c)는 각 화염에 대한 변동온도의 PDF 분포이다.

Fig. 9(a)는 S-type 선회화염의 Z=20mm 단면에 대한 변동온도의 PDF 분포를 나타낸 것이다. 중심축에서 R=10mm까지는 중심선회류에 의한 저온의 미연가스가 주로 존재하는 영역을 나타내고 있다. R=12.5~40mm 영역은 주로 저온의 미연가스와 고온의 기연가스가 혼재하는 영역이며, Fig. 8(a)에서 관찰된 바와 같이 R=15와 32.5~37.5mm 영역에서 고온가스의 유동확률이 높게 나타나고 있고, 이온전류의 분포가 최대가 되는 영역(R=27.5mm)이 포함되는 것으로 보아, 이 영역에서

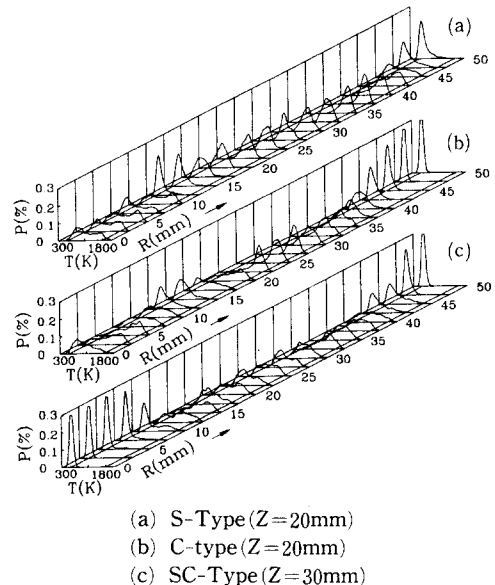


Fig. 9 Probability density functions of fluctuating temperature.

활발한 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7(a)에서 관찰된 환류영역의 경계가 이 영역에서 형성되는 것과 잘 일치하고 있으므로 반응은 재순환 영역의 내부에서 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

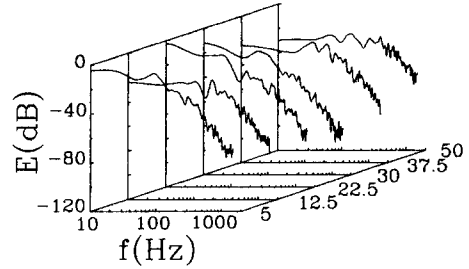
Fig. 9(b)는 C-type 선회화염의 $Z=20\text{mm}$ 단면에 대한 변동온도의 PDF 분포를 나타낸 것이다. $R=5$ 와 27.5mm 에서 기연가스의 유동확률이 높게 나타나며, $R=12.5\sim 15\text{mm}$ 위치에서는 주로 미연가스의 유동확률이 높게 나타나고, 또 이 영역을 사이에 두고 중심선회류영역과 주위선회류영역에서 미연가스와 기연가스가 활발하게 혼합되는 영역이 각각 형성되어 있다. 이것은 Fig. 7(b)에서 관찰된 환류영역의 경계가 두 군데($R<5\text{mm}$ 와 $17.5<R<27.5\text{mm}$)에서 형성되는 것과 동일한 경향을 보인다. 따라서 두 군데의 재순환 영역 사이에서 강한 난류흐름장이 형성되어, 재순환 영역과 열 및 물질 전달을 이루게 된다.

S-type과 C-type 선회화염의 재순환 영역의 내부는 미연가스와 기연가스의 효과적인 혼합이 이루어져 열과 물질전달이 활발하게 이루어져 변동온도의 PDF 분포가 쌍봉성 또는 사다리꼴의 모양의 분포를 나타내고, 이온전류의 분포가 최대가 되는 영역이 재순환영역의 내부에 존재하여, 재순환 영역이 반응을 지배하는 전형적인 선회화염의 분포 형태를 가진다.

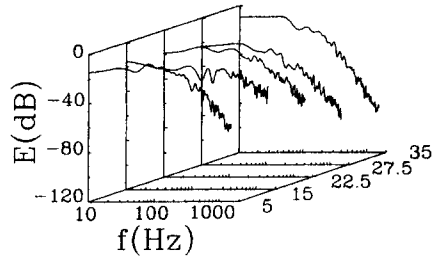
Fig. 9(c)는 SC-type 선회화염의 $Z=30\text{mm}$ 단면에 대한 변동온도의 PDF 분포를 나타낸 것이다. $R=5$ 와 37.5mm 에서 기연가스의 유동확률이 높고, $R=12.5\sim 15\text{mm}$ 에서 미연가스의 유동확률이 높은 분포를 가지며, 이 영역을 사이에 두고 기연가스와 미연가스가 활발하게 혼합되는 영역이 각각 형성되어 있다. Fig. 7에서 설명한 바와 같이 SC-type 선회화염은 재순환영역을 형성하지 않으므로, 중심선회류와 주위선회류의 경계에 형성되는 고강도의 난류에 의한 혼합이 증가되어 반응을 지배한다.

3.4 변동온도의 파워스펙트럼 분포

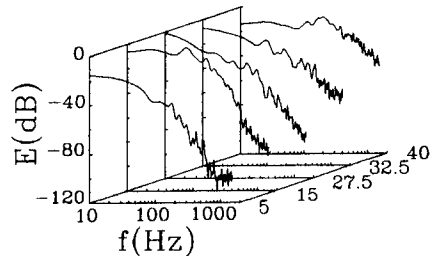
변동온도의 파워스펙트럼 분포는 큰 스케일의 와류에 대응하는 500kHz 이하의 저주파수특성과 작은 스케일의 와류에 대응하는 500kHz 이상의 고주파수특성을 나타내고 있으며, 일반적인 형상으로는 고주파수영역으로 감에 따라 고주파수 특성의 감쇄가 현저하게 나타난다.



(a) S-Type ($Z=20\text{mm}$)



(b) C-type ($Z=20\text{mm}$)



(c) SC-Type ($Z=30\text{mm}$)

Fig. 10 Spectral distributions of fluctuating temperature.

Fig. 10(a) (b) (c)는 각 화염에 대한 변동온도의 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 7의 환류영역 경계, Fig. 8의 온도 및 이온전류분포 및 Fig. 9의 변동온도의 확률밀도분포를 고려한 반경방향의 대표적인 위치에 대해서만 파워스펙트럼의 분포를 나타내었다.

Fig. 10(a)는 S-type 선회화염의 $Z=20\text{mm}$ 단면에 대한 변동온도의 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. $R=5\text{mm}$ 는 주로 저온의 미연혼합기만 존재하는 영역으로 고·저주파수특성이 낮게 나타나고 있어, 거의 화염이 존재하지 않는 영역으로 생각된다. $R=15\text{mm}$ 는 시간평균온도가 높고 변동온도의 RMS값도 비교적 높지만 저주파수특성을 나타낸다. 따라서 이 영역은 고온이지만, 난류혼합과 반

응이 활발하지 못한 것으로 추정된다. $R=27.5\text{mm}$ 에서는 이온전류치가 최대가 되는 영역으로 비교적 고·저주파수의 특성들이 점점 증가하고 있다. 시간평균온도가 최대인 $R=32.5\text{mm}$ 와 변동량이 최고인 $R=40\text{mm}$ 에서는 비교적 고주파수특성을 보이며, 특히 $R=40\text{mm}$ 영역은 변동온도의 RMS치가 높으며, 평균온도가 약 1100K 정도로 주위선회류에 의해 고주파수에 해당하는 작은 스케일의 와류를 형성하여 난류혼합이 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

따라서 S-type 선회화염은 변동온도의 PDF 분포와 파워스펙트럼 분포에서 연소가스와 미연가스의 혼합이 주위선회류 영역에서 활발한 분포를 보이며, 이것은 주위선회류에 의해 작은 스케일의 와류를 가지는 고강도 난류장이 형성되어 열과 물질전달을 원활하게 하여 반응을 지배하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 10(b)는 C-type 선회화염의 $Z=20\text{mm}$ 단면에 대한 변동온도의 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. $R=5\text{mm}$ 는 중심축 부근에서 시간평균온도가 최대값을 가지는 영역으로 S-type의 같은 위치보다 상대적으로 높은 주파수특성들을 나타낸다. $R=15\text{mm}$ 는 시간평균온도가 약 $700\sim 800\text{K}$ 정도로 낮고 변동온도의 RMS값도 낮지만, 파워스펙트럼은 고주파수특성을 나타내고 있으며, 이것은 중심선회류에 의해 고강도 난류장이 형성됨을 의미한다. $R=27.5\text{mm}$ 와 $R=35\text{mm}$ 로 갈수록 고주파수의 감쇠가 뚜렷하며, 차츰 저주파수 특성이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 C-type 선회화염은 중심공기류에 의해 고강도 난류장이 형성되고 연료 및 산화제의 혼합을 증대시켜 반응을 지배하고 있다고 사료된다.

Fig. 10(c)는 SC-type 선회화염의 $Z=30\text{mm}$ 단면에 대한 변동온도의 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. SC-type 선회화염은 전반적으로 저주파수의 특성을 나타내고 있으며, 이것은 재순환영역을 형성시키지 않기 때문에 재순환 영역내에서의 고강도 난류에 의한 혼합작용이 발생하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 그 중 비교적 고주파수특성을 나타나는 영역은 중심공기류와 주위공기류의 혼합이 일어나는 영역인 $R=12.5\text{mm}$ 영역이다. $R=37.5\sim 45\text{mm}$ 영역은 주위선회류에 의해 난류혼합이 지배되는 영역으로 비교적 고주파수특성이 상대적으로 높게 나타나고 있다.

3.5 라디칼자발광 강도의 특성

Fig. 11은 S-type 선회화염의 온도, 이온전류 및 라디칼 자발광 강도의 시간평균분포를 나타낸 것이다. 주위선회류 영역에서는 시간평균온도와 OH-라디칼은 $R=30\text{mm}$ 부근, 이온전류 및 CH-라디칼은 $R=25\text{mm}$ 부근에서 각각 최대값을 나타내고 있다. 중심선회류 영역에서는 시간평균온도와 OH-라디칼은 $R=15\text{mm}$ 부근, 이온전류 및 CH-라디칼은 $R=10\text{mm}$ 부근에서 역시 최대값을 나타내고 있다. 상류의 재순환영역에서 온도, 이온전류 및 라디칼들이 높은 분포를 나타내고 있고, 재순환영역 내부로 많은 역류가 일어나는 $Z>40\text{mm}$ 의 중심축 영역에서는 온도, 이온 및 라디칼들이 급격히 감소하고 있는 분포가 나타나고 있다.

노즐 출구영역인 $Z=10\text{mm}$ 에서는 OH-라디칼이 높게 나타나는 것은 노즐림 부근과 재순환 영역의 내부에서 회염이 많이 발생하고 있기 때문인 것으로 생각되지만, OH-라디칼의 분포는 비교적 온도 분포와 비슷한 모양을 나타내고 있다.

Fig. 12는 C-type 선회화염의 온도, 이온전류 및 라디칼 자발광 강도들의 시간평균분포를 나타낸 것이다. 이온전류는 $R=10\text{mm}$ 와 $R=20\text{mm}$ 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 이것은 C-type 선회화염이 두 군데의 재순환영역을 가지기 때문으로, CH-라디칼 역시 동일한 위치에서 두 군데의 최대값을 나타내고 있다. 온도 및 OH-라디칼은 조금 다른 분포를 보이고 있지만, 두 군데의 최대값을 가지고 있고, 그 중 OH-라디칼이 $Z=40\text{mm}$ 의 중심선회류 영역에서 최대값을 나타내고 있는 것은 재순환영역의 내부에서 발생하는 회염 때문인 것으로 생각된다.

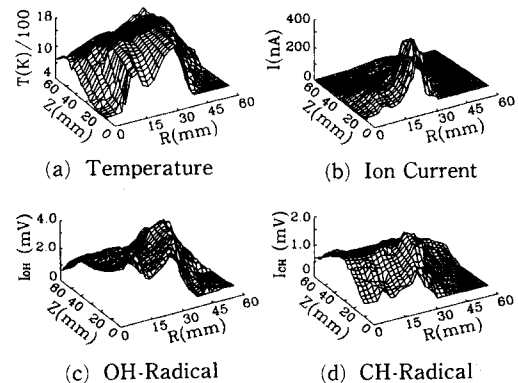


Fig. 11 Distribution of temperature, ion current and radicals (S-type)

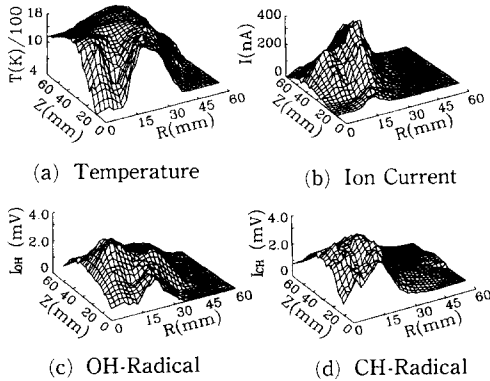


Fig. 12 Distribution of temperature, ion current and radicals (C-type)

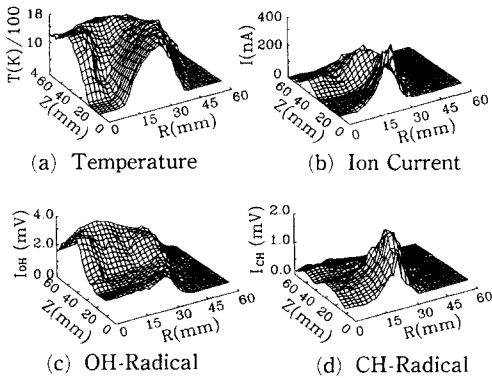


Fig. 13 Distribution of temperature, ion current and radicals (SC-type)

Fig. 13은 SC-type 선회화염의 온도, 이온전류 및 라디칼 자발광 강도들의 시간평균분포를 나타낸 것이다. 온도분포가 주로 주위선회류 영역에서 최대값이 나타나는 것과 마찬가지로 OH-라디칼도 주위선회류 영역에서 최대값을 나타내고 있다. 이온전류 및 CH-라디칼 역시 주위선회류영역에서 최대값을 나타내고, 중심축 영역에서 미약한 반응을 나타내는 동일한 분포를 나타낸다.

OH 라디칼은 온도와 CH-라디칼은 반응대의 지표를 나타내는 이온전류치와 관련이 있다.⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾

Fig. 14는 상호관련성을 가지는 각 물리량의 특징을 비교하기 위하여, 온도와 OH-라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치와 이온전류치 및 CH-라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 점(Dot)으로 표시한 영역은 이온전류와 CH-라디칼 자발광 강도의

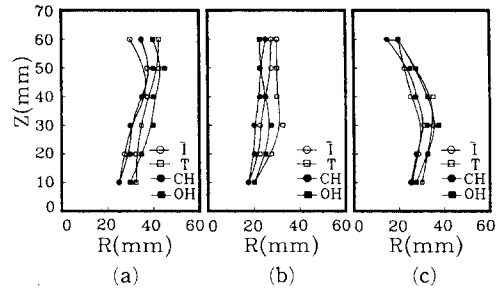


Fig. 14 Position with the maximum value of temperature, ion current and radicals

최대값을 나타내는 영역이다.

S-type 선회화염은 이온전류치와 CH-라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치가 거의 유사한 분포를 나타내고 있으나, 온도와 OH-라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치는 약 5mm 정도의 차이를 가지고 분포하고 있다. C-type의 선회화염은 이온전류와 CH-라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치는 약 2.5mm, 온도와 OH 라디칼 자발광 강도가 최대값을 나타내는 위치는 약 5mm 정도의 차이를 가지고 분포하고 있다. SC-type의 선회화염은 이온전류와 CH-라디칼 자발광 강도, 온도와 OH-라디칼 자발광 강도의 최대값을 나타내는 위치의 분포가 거의 유사한 분포를 보인다.

S-type의 선회화염은 프로브에 의해 측정된 이온전류치의 최대값이 광학계로 측정된 CH-라디칼 자발광 강도의 최대값보다 중심축 방향으로 조금 당겨져 분포하고 있고, 온도와 OH-라디칼 자발광 강도의 최대값을 비교하면 역시 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 C-type의 선회화염에 있어서는 이와 대조적으로 중심축의 반경방향으로 벗어난 분포하고 있다.

선회화염의 라디칼 자발광의 분포는 시간평균 온도 및 이온전류치와 거의 비슷한 분포를 보이지만, 중심축 영역과 휘염이 발생하는 영역에서는 그 값이 프로브로 측정된 온도 및 이온전류치 보다 높게 나타나고 있다. 이것은 실제 라디칼 자발광신호의 파형이 휘염에 의해 기준선의 상승이 발생하고, 또 라디칼 자발광이 광로를 따라 중첩되는 원인인 것으로 추측된다. 그러나 OH-라디칼은 온도와 관련이 있고, CH-라디칼은 반응대의 지표를 나타내는 이온전류치와 관련이 있다는 연구보고⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾와 마찬가지로 화염에서 OH-라디칼과 온도의 최대값이

동일한 위치에서 발생하고 있고, CH-라디칼과 이온전류치의 최대값이 유사한 위치에서 분포하고 있다. 따라서 프로브로 계측한 이온전류 및 온도분포의 결과와 라디칼 자발광 강도를 이용한 비접촉식 계측 결과가 거의 비슷한 분포를 나타내므로, 선회에 의해 형성된 선회화염이 비록 고강도의 난류연소장에서 형성되었지만, 라디칼 자발광 강도를 이용한 화염의 거시적인 구조의 계측이 어느 정도 가능한 것으로 확인되었다.

4. 결 론

동축이중류 확산연소기에 형성되는 세 가지 형태의 선회화염에 대해 온도, 이온전류 및 라디칼 계측을 통해 화염의 구조를 조사·연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재순환 영역은 작은 스케일의 와류에 지배되는 강한 난류장이 형성되고, 연소가스와 미연가스의 활발한 혼합에 의해 반응을 지배하고 있다.
- (2) S-type과 C-type의 선회화염은 재순환영역이 형성되었으나, SC-type의 선회화염은 재순환영역이 형성되지 않았다. 특히, C-type의 선회화염은 두 개의 재순환영역이 형성되어 있다.
- (3) S-type의 선회화염에서는, 이온전류의 최대값이 CH-라디칼 자발광 강도의 최대값보다 중심축 방향으로 조금 당겨져 분포하고 있고, 온도와 라디칼의 비교에서도 역시 같은 분포를 보인다. 그러나 C-type의 선회화염에서는 각각 중심축의 반대방향으로 벗어난 분포를 보인다.
- (4) 이온전류와 CH-라디칼 자발광 강도, 온도와 OH-라디칼 자발광 강도의 최대값을 나타내는 위치의 분포가 거의 유사한 분포를 보이므로, 선회에 의해 형성된 난류연소장에서도 라디칼 자발광을 이용한 화염의 거시적인 구조의 계측이 가능하다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-F-03)의 지원하에 수행된 연구결과로써, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

(1) Gupta, A. K. and Lilly, D. G., 1984, "Swirl

Flows", *Energy and Engineering Science Series*.
 (2) Yuasa, S., 1986, "Effects of Swirl on the Stability of Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 66, p. 181
 (3) Aoki, K., 1991, "Study on Cylindrical Combustor Flow with Swirl Flow (3rd Report, Effect of a Contraction Nozzle of Area Ratios and its Location)," *JSME (B)*, Vol. 57, NO. 539, p. 2301
 (4) Ikeda, Y., Hosokawa, S. and Nakajima, T. 1991, "Flow Structure in a Can-Type Model Gas Turbine Combustor (1st Report, Flow Field in a Primary Zone)," *JSME (B)*, Vol. 57, No. 535, p. 1167.
 (5) Ikeda, Y., Hosokawa, S. and T. Nakajima, 1991, "Flow Structure in a Can-Type Model Gas Turbine Combustor (2nd Report, Detailed Flow Structure and Turbulence Properties)," *JSME (B)*, Vol. 57, No. 535, p. 1175.
 (6) Okamoto, T. and Takagi, T., 1987, "Numerical Prediction of the Formation of a Recirculation Zone and Turbulent Mixing in Swirling Flows", *JSME (B)*, Vol. 53, No. 495, p. 3338.
 (7) Takagi, T., Okamoto, T., Taji, M., Nakasuji Y. and Kondoh, T., 1987, "Turbulent Transport of Momentum and Heat in a Swirling Flame (Retardation of Mixing and Counter-Gradient Diffusion)", *JSME (B)*, Vol. 53, No. 488, p. 1418.
 (8) Gaydon, A. G., 1957, "*Spectroscopy of Flame*", Wiley Press.
 (9) Miztani, Y., 1989, "Visualization and Image Analyses of Combustion Fields", *JSME Int. J (II)*, Vol. 32, No. 1
 (10) Dyer W. J. and Crosley, D. R., 1985, "Fluorescence Imaging for Flame Chemistry", *Proc. Int. Conf. of Lasers '84*, STS Press, p. 211
 (11) Ito, H., 1992, "Quantative Characterization of Flame Color and its Application", *JSME Int. J (II)*, Vol. 35, No. 2
 (12) Nakabe, K., Mizutani, Y., Fujioka, H. and Akamatsu, F., 1992, "Structure Observation of Spray Flames by Spectral Visualization and Mie-Scattering Techniques." *JSME. (B)*, Vol. 58, No. 546, p. 339.

- (13) Takahashi, T., Katuski, M. Mizutani, Y., 1992, "Fine Flame Structure and Combustion Mechanism of Lean Turbulent Premixed Flames", *JSME (B)*, Vol. 58, No. 547, p. 929
- (14) 최병륜, 장인갑, 최경민, 1996, "난류화산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구 (II) (라디칼 자발광 특성과 화염구조에 관하여)", *대한기계학회논문집(B)*, Vol. 20-3, pp. 1050~1060.
- (15) Gupta, A. K., Beer, J. M. and Swithenbank, J., 1979, "Concentric Multi- Annular Swirl Burner : Stability Limits and Emission Characteristics", *16th. Symp. (Int.) on Combustion*, p. 79