

# 중앙분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구( I )

## A study on the Structure of Turbulent Diffusion Flame Behind the Hollowed Flame Holder

강인구 · 이우섭 · 김태한 · 이도형

I. G. Kang, W. S. Lee, D. H. Lee and T. H. Kim

**Key Words** : Stabilization(안정화), PDF(확률밀도함수), Power Spectra(파워스펙트럼), Ion Current(이온전류)

**Abstract** : The purpose of study is to investigate the flame stability and Structure of turbulent diffusion flame behind the hollowed flame holder, which is located on the waste gas coming out from the test furnace. Fluctuating temperature and ion current measurement and their statistical treatment were used for the purpose. Three types of flame were stabilized and each of which were changed by adequate equivalence ration. And we found that have no periodicity near reacting zone.

### 1. 서론

최근 화석에너지의 수요가 증가함과 더불어 환경 오염문제가 날로 심각한 실정이다. 특히 가열로, 소각로 등 각종 산업로서 배출되는 배기가스는 불완전 연소생성물외에도 NOx와 다이옥신 등 다양한 대기오염물질을 포함하고 있어, 이들을 감소시키기 위한 노력이 시급하다.

최근에는 연돌 부근에 후연소실을 설치하여 불완전연소에 의한 오염물질을 제거하고자 하는 노력이 진행되어, 특히 소각로에서는 후연소실(2차연소실)에 공기제트와 연료를 주입하여 강한 난류에 의해 완전연소를 유도하고자 하는 노력은 일반화되어 있다. 그런 일반 산업로에 있어서 로내에서 고부하 연소를 시킬 경우, 로에서 배출되는 배기가스량은 많아지게 되고, 따라서 후연소실에서 완전연소를 피하기 위해서는 이 배기가스량의 대소에 대응하여 폭넓은 유속 범위에서 화염이 안정화 될 것이 필수적이다.申<sup>1)</sup>등은 고온공기류에 보염기를 설치하여 공기류의 온도와 산소농도의 변화에 따른 화염의 안정성을 조사하였다. 그러나 넓은 관점에서 보면, 중앙분공에서 안정되기 시작한 화염은 주위 조건

은 당량비의 변화에 따라 blow out 직전까지 세 종류의 화염형태로 안정화됨을 간과할 수 없다.

본 연구에서는 화염의 안정범위를 넓히기 위한 중앙분공형 보염기를 설치하여, 보염기 후류에서 안정되는 확산화염의 구조를 밝히기 위한 첫 시도로, 산업로를 모의한 시험가열로에서 배출되는 배기가스류에 보염기를 설치하고, 임의의 당량비 범위에서 안정되는 세 가지 형태의 화염을 가시화하고, 온도 및 이온전류를 측정하여 통계분석함으로써, 이들의 안정화기구를 조사하는 것을 목적으로 하였다.

### 2. 실험 및 방법

#### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 시험가열로에 주입되는 연료는 상용 LPG로, 조절밸브와 유량계(DC-2:PF 3/4, SINAGAWA)를 거쳐 들어가고, 공기는 루츠블로워(HL113SR202B, HL-SD, 5HP, 4P)에서 서지탱크를 통하여 압력맥동을 최소화하여 시험가열로로 공급된다. 이때 공기는 증류유량계에 의해 검증된 오리피스 수두를 조절밸브로 조절하여 필요유량을 공급한다. 한편, 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 연돌부근에 후연소기를 설치하고, 이때 공급되는 공기는 축방향으로 균일한 속도분포를 갖도록 하기 위하여, 내경 25mm의 강관 8개를 통하여 공급되며, 이 공기는 시험가열로에서의 배기가스와의 혼합을 촉진하기

접수일 : 1998년 9월 10일  
강인구, 이우섭 : 부경대학교 대학원  
김태한 : 동의공업대학 자동차과  
이도형 : 부경대학교 기계·자동차공학부

위하여 정류망(100mesh×2)과 직경 8.7mm의 강구(200개)를 거쳐 정류된다. 한편, 후연소기에 설치된 보염기는 외경 55mm, 내경 25mm의 정삼각형단면을 갖도록 제작하였으며, 연료노즐은 주류방향 45°로 직경 1mm, 8개의 구멍을 통하여 분출되도록 하였다. (Fig.2 참조)

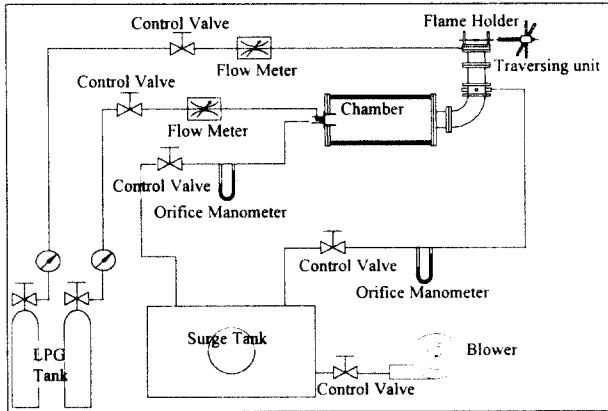


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 있어서는 화염의 가시화를 위한 직접사진(디지털 카메라 DC50, Kodak)과, 온도 및 이온전류를 측정하였다. 온도의 측정에 있어서는 기존의 열전대에 의한 측정의 신뢰도<sup>3)</sup>를 인정하여, 평균온도의 측정을 위해서는 직경 0.5mm의 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 사용하고, 변동온도의 측정을 위해 직경 50 $\mu$ m의 Pt/Pt-Rh 13%의 열전대를 이용하였다. 특히 변동온도의 측정에서는 신호기전력은 직류증폭기에서 증폭하고 보상기를 거쳐 1차 지연특성을 보상(시정수,  $\tau=12$ )하였으며<sup>4)</sup>, 이때 필터와 A/D변환기(DT2821-F-SE, Data translation. Co.)를 거친 신호 파형은 컴퓨터에 저장하여 통계 처리하였다. 이온전류의 측정에 있어서는 이온농도가도가 반응강도에 비례한다고 가정하여 Pt-Rh 13%(직경 0.1mm)의 정전탐침을 이용하여 화염내의 양이온을 검출하고자 하였다(Fig. 3참조).

Fig.4 는 변동온도와 이온전류를 동시에 측정하기 위한 프로브 조합을 나타낸 것이다.

검출된 이온전류는 미소전류증폭기와 반전증폭기를 거친 다음, A/D변환하여 컴퓨터에서 통계 처리하였다.

실험조건으로는 현 단계에서는 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 조건을 일정하게 해두고, 후연소실에 공급되는 연료와 공기의 양의 변화에 의해 형성되는 연료와 공기의 양의 변화에 의해 형성성

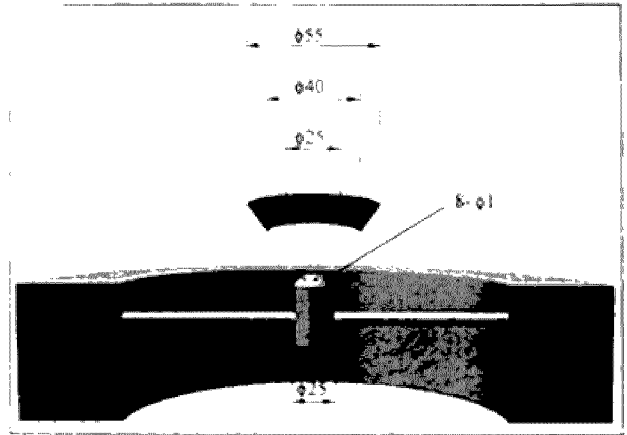


Fig. 2 Details of test section

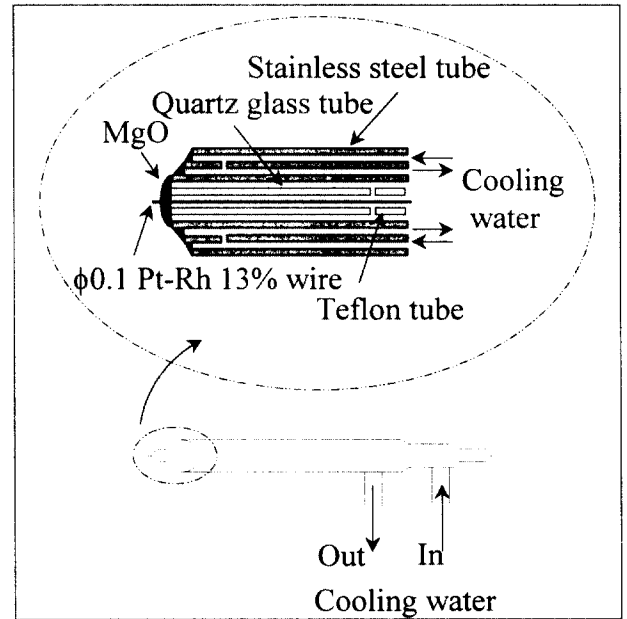


Fig. 3 Schematic diagram of ion current probe

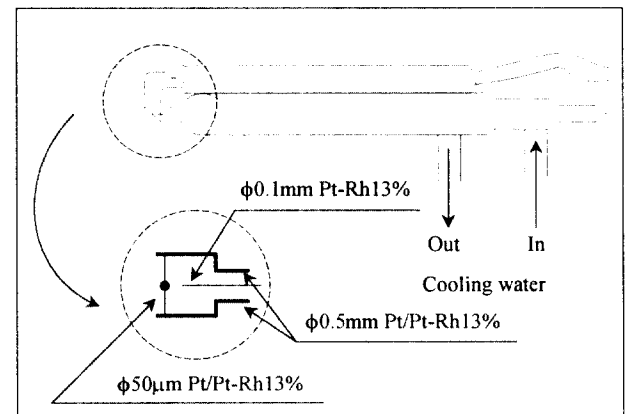


Fig. 4 Simultaneous measuring probe units of fluctuating temperature and ion current

되는 화염의 구조를 살펴보는 것이 목적이므로, Table 1의 당량비 범위에서 형성되는 세 가지 형태의 화염에 관하여 고찰하였다.

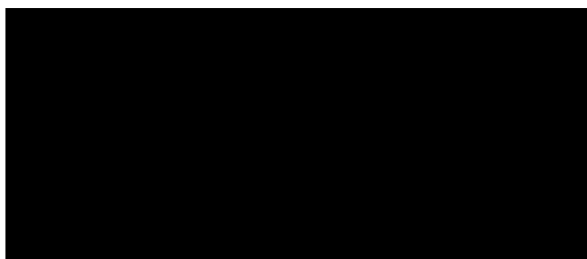
Table 1 Experimental condition (단위 : m<sup>3</sup>/s)

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	T(K)
Bud flame	0.311	0.008	16.22	49.27	902
Lotus flame	0.311	0.137	16.22	49.27	902
Envelope flame	0.311	0.226	16.22	49.27	902

단, Table 1에서의 당량비는 시험가열로와 후연소실에 공급되는 총연료와 공기의 비로 계산한 값이다. 이때, 시험가열로에서 배출되는 평균배기가스의 조건은 온도는 902K, O<sub>2</sub>농도는 7.8%이다. 또한 F<sub>1</sub>은 1차측 연료유량, F<sub>2</sub>는 2차측 연료유량, Q<sub>1</sub>은 1차측 공기유량, 그리고 Q<sub>2</sub>는 2차측 공기유량이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Table 1에 나타낸 세 가지 실험조건에서 형성된 화염의 직접사진이다. 본 연구에서의 실험조건에서는 당량비  $\psi=0.18$ 에서는 화염이 보염기의 중앙분공 부근에서만 안정되는 Bud flame이 형성되며,  $\psi=0.2$ 에서는 중앙분공과 보염기의 외측에서 화염이 안정되는 Lotus flame, 그리고  $\psi=0.25$ 를 넘어서면 중앙분공에서는 화염이 나타나지 않고, 외측에서만 화염이 안정되는 Envelope flame으로 천이하였다.

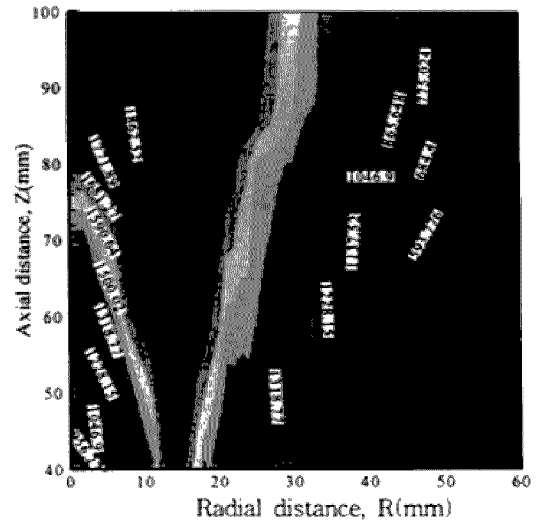


(a) Bud (b) Lotus (c) Envelope

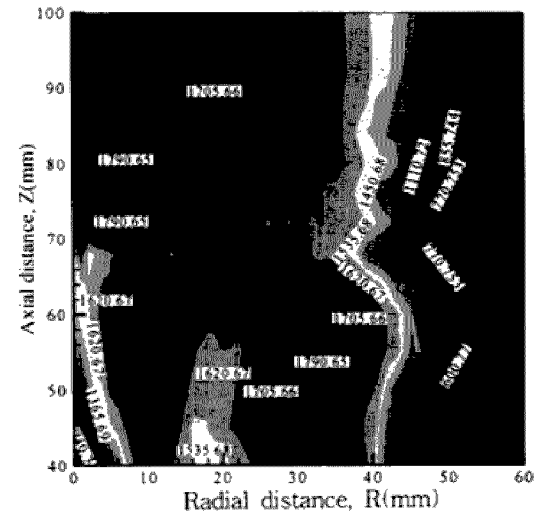
Fig. 5 Direct photographs of three different types of flame

Fig. 6에는 위 세 가지 화염의 임의 반경방향 단면의 평균온도 분포를 나타내었다. 이들은 전체적으로 각 화염 형상에 대응하는 분포를 잘 나타내고 있다.

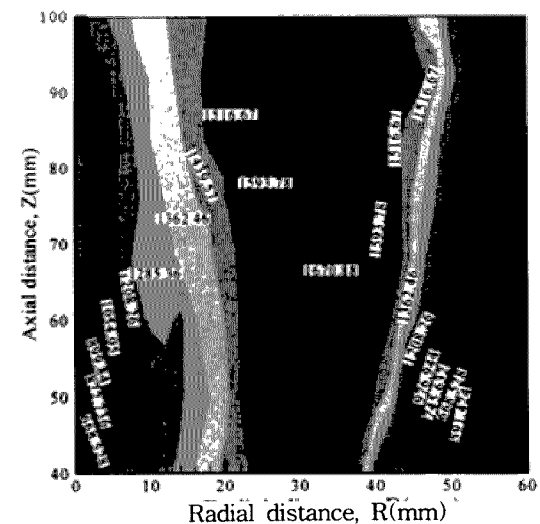
Fig. 7에 Bud flame인 경우의 보염기 중앙에서



(a) Bud



(a) Lotus



(a) Envelope

Fig. 6 Distributions of isothermal lines for Bud, Lotus, Envelope flame

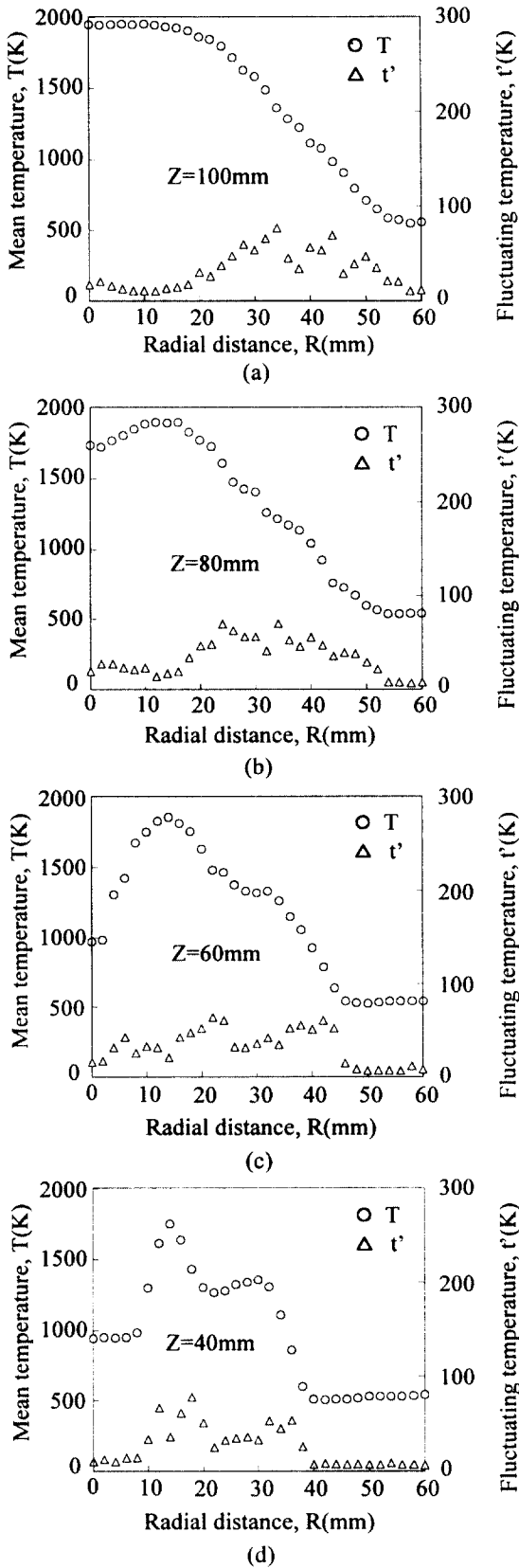


Fig. 7 Radial distributions of Mean temperature and RMS of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of Bud flame

축방향(Z방향) 40mm, 60mm, 80mm 및 100mm 단면에서, 반경방향(R방향)으로의 평균온도 T와 변동온도의 RMS값을 나타내었다.

Fig. 5의 직접사진과 비교해 보면, 대체로 R=10~15mm에서 화염이 형성됨을 알 수 있고, 화염의 끝지점인 Z=100mm 부근에서의 평균온도는 보염기 중심에서 R=20mm 지점에서 화염이 끌고루 퍼져 있음을 알 수 있다. 또한 Z=60mm까지는 중앙분공 내에서 화염은 형성되지 않으나, 화염으로 밀폐된 공간이므로 복사열전달 등에 의해 온도가 1000K 정도로 높아진 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Bud flame의 대표단면으로 Z=60mm에서 R방향으로의 변동온도(a)와 이온전류(b)의 확률밀도함수(PDF)를 나타낸 것이다. 먼저 변동온도(a)에 대하여는, R=10~14mm 부근에서 최대의 변동온도분포를 보이고 그 주위로 넓게 퍼져 있는 것을 볼 수 있다. 특히 이곳을 전후로 1500K 정도 이내의 분포가 반경방향으로 폭넓게 퍼져 고온의 기연가스와 저온의 공기류가 인접하여 활발히 교차하고 있음을 알 수 있다. 그러나 R=46mm 부근을 지나면 온도는 시험가열로에서 나오는 고온공기류와 후연소실에 들어오는 공기의 혼합 온도에 해당하는 500K 정도가 된다.

한편, 이온전류의 분포(b) 그림에서는 R=10~12mm 정도에서 많은 이온전류가 나타나고 있으며, R=6~14mm를 벗어나면 이온전류는 거의 나타나지 않고 있다. 이들로부터, 연소반응은 R=10~12mm

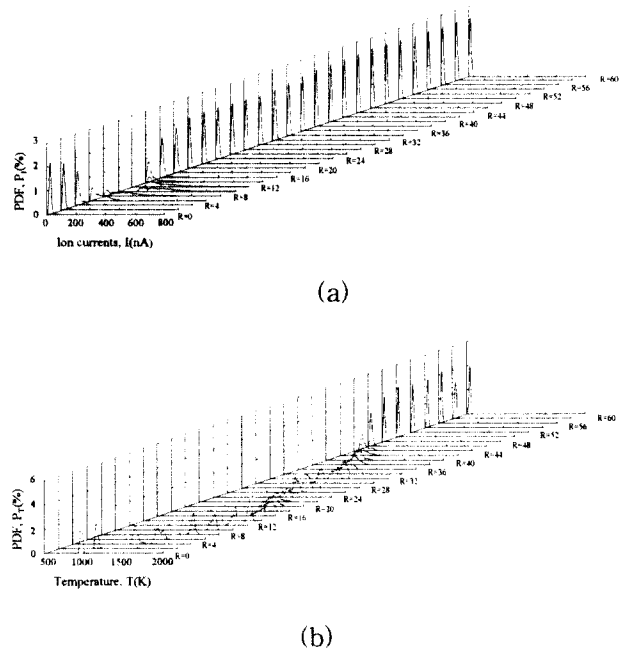


Fig. 8 PDF of fluctuating temperature(a) and ion current(b) at Z=60mm of Bud flame

정도에서 주로 활발한 반응을 하며, 이들 주위로 고온 공기류와 연료의 난류혼합 및 일부 반응이 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 9에는 대표단면 즉, Z=60mm에서의 이온전류의 파워스펙트럼 분포를 나타내었다. 예측한 바와 같이 반응대를 전후한 위치에서는 모든 주파수범위에서 높은 에너지분포를 나타내고 있다. 그러나 반응대 근방에서 탁월한 주파수영역은 보이지 않았다.

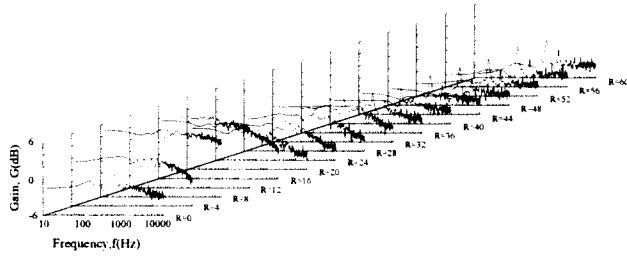
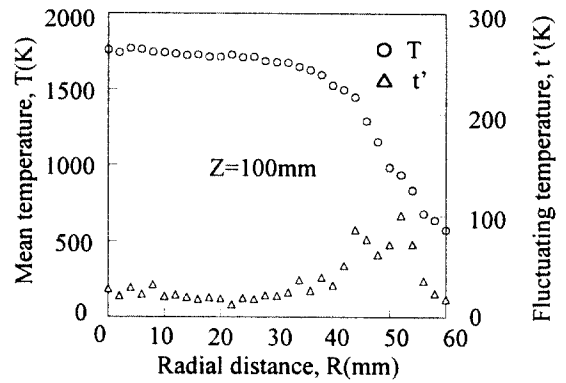


Fig. 9 Power spectra of ion current at Z=60mm of Bud flame

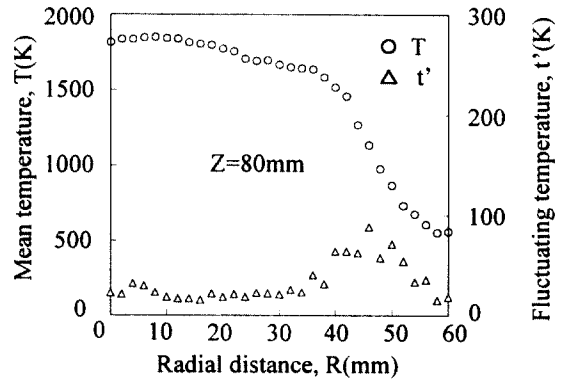
Fig. 10은 Lotus flame인 경우의 축방향 40mm, 60mm, 80mm 및 100mm 단면의 반경방향 평균온도 T와 변동온도의 RMS값을 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6의 현상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히, 평균온도의 기울기가 심한 곳에서 변동의 RMS값의 진폭이 커짐은 앞에서의 같다.

Fig. 11은 Lotus flame의 대표단면으로 Z=60mm에서 R방향의 변동온도(a)와 이온전류(b)의 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 변동온도는 Bud flame (Fig. 8(a))에 비하여 폭넓게 높은 값을 나타내고 있다. 그러나 이온전류는 R=8~10mm부근과 R=30mm 부근이 높고 그 주위에 높고 그 주위에 약간 넓게 퍼져 있음을 보아, 이 부근들이 반응대이며 주변에는 반응을 종결한 가스에 포함된 이온전류가 저온의 공기류와 활발히 섞이고 있음을 추측할 수 있다. 이는 이 단면에서의 이온전류의 파워스펙트럼 (Fig. 12)에서 나타난 바와 같이 이들 두 반응대 부근에서 비교적 높은 에너지를 갖고 있음을 보아 알 수 있다.

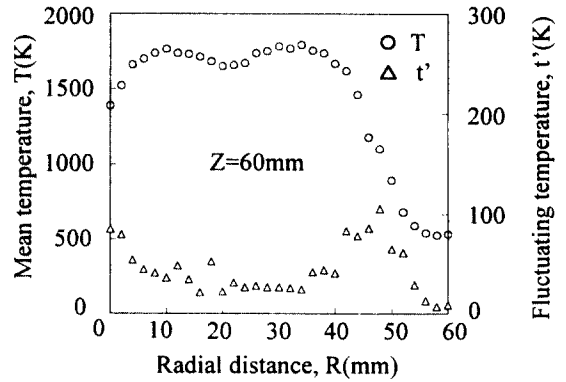
Fig. 13은 Envelope flame인 경우의 축 방향 40, 60, 80, 및 100mm 단면의 반경방향 평균온도 T와 변동온도의 RMS값을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 14는 Z=60mm 단면에서의 변동온도(a) 및 이온전류(b)의 확률밀도함수를 각각 나타내었다. 앞의 두 경우의 화염과 비교하면, 보염기 중앙부근에는 이온전류가 나타나지 않고 변동온도의 분포도 낮아서, 단지 R=32~34mm 부근에만 반응대가 형성됨을 알 수 있다.



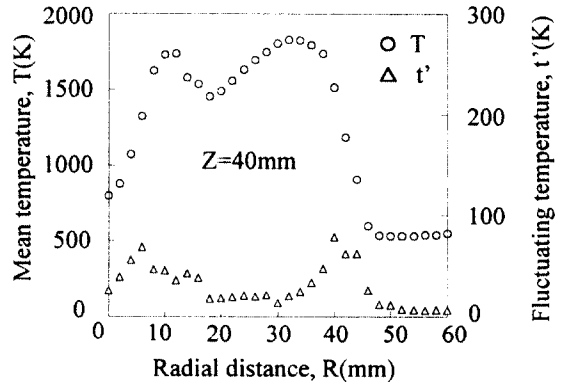
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Radial distributions of Mean temperature and RMS of Fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of Lotus flame

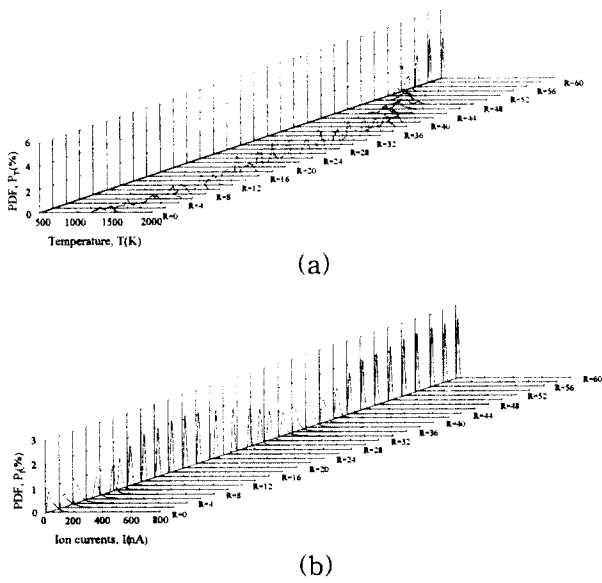


Fig. 11 PDF of fluctuating temperature(a) and ion current(b) at Z=60mm of Lotus flame

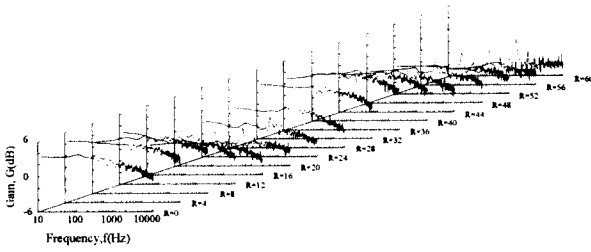


Fig. 12 Power spectra of ion current at Z=60mm of Lotus flame

또한 이온전류의 파워스펙트럼 분포(Fig. 15)에서 알 수 있듯이 이 부근의 에너지는 높으나 탁월한 주파수영역은 보이지 않았다.

#### 4. 결론

당량비 변화에 따른 중앙분공형 보염기의 후류에 안정된 세 종류의 화염형상에 대하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험조건의 경우 당량비  $\phi=0.18$ 에서는 화염이 중앙분공에서만 안정화되는 Bud flame으로,  $\phi=0.2$ 에서는 중앙분공부와 보염기 외측에서 안정화되는 Lotus flame으로, 그리고  $\phi=0.25$ 에서는 보염기 외측에서 안정화되는 Envelope flame으로 각각 천이 되었다.

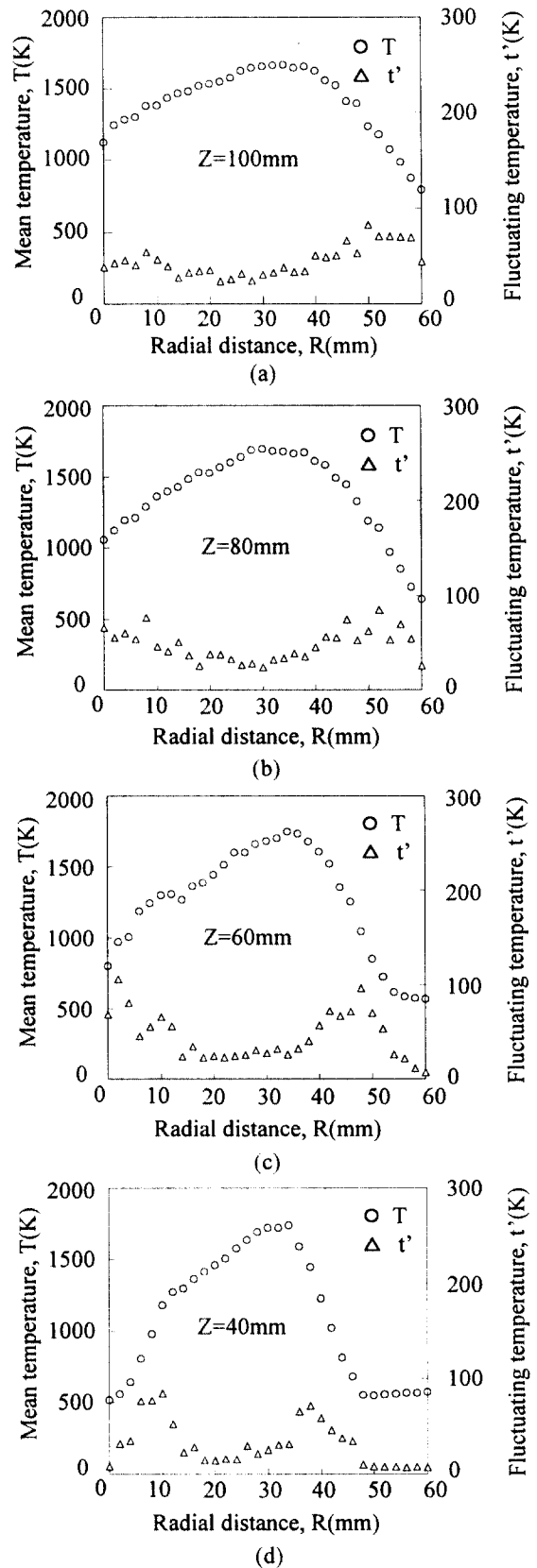
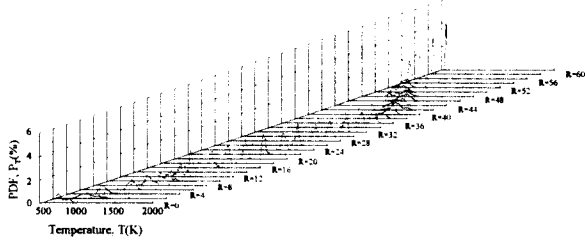
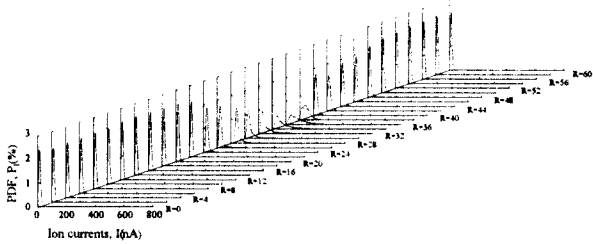


Fig. 13 Radial distributions of Mean temperature and RMS of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80, 100mm

참고문헌



(a)



(b)

Fig. 14 PDF of fluctuating temperature(a) and ion current at Z=60mm of Envelope flame

1. 신영삼, 천무환, “환형 보염기 후류에 형성된 확산화염의 구조에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술논문집, pp. 62~67, 1997
2. 송규현, 안진근, “Bluff-body 확산화염의 재순환 영역에서의 열, 화학, 공기역학적 특성에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술논문집, pp. 36~42, 1997
3. 水谷辛夫(崔炳輪, 李度衡 共譯), “燃燒工學”, 제2版, 東明社, pp. 97~166, 1992
4. M. Katsuki, “An Improved Thermocouple Technique for Measurement of Fluctuating Temperature in Flame”, Combustion and Flame 67 pp. 27~36, 1987
5. A. Yoshida, H. Tsuji, “Measurements of Fluctuating of Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame”, 17th Symp.(Int.), on Combustion, William & Wilkins, pp. 945~956, 1978

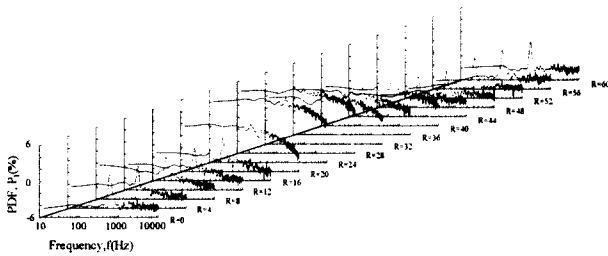


Fig. 15 Power spectra of ion current at Z=60mm of Envelope flame

- 2) 이때 축방향 60mm 단면에서의 반응대는 Bud flame에서는 10~12mm 부근에서, Lotus flame에서는 8~10mm와 30mm 부근에서, 그리고 Envelope flame에서는 32~34mm 부근에서 형성되며, 당량비의 증가와 함께 약간 공기류측으로 화염이 신장하는 경향을 나타내었다.
- 3) 각 화염의 반응대 부근에서 이온전류의 파워스펙트럼을 살펴본 결과, 세 종류 모두 반응대 부근에서는 높은 에너지를 가지나 탁월한 주파수 범위는 없고, 따라서 난류에 의한 랜덤한 3차원 와에 의해 지배되는 화염으로 생각된다.