

중앙분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구(II)

A Study on the Structure of Turbulent Diffusion Flame Behind the Hollowed Flame Holder(II)

강인구 · 이우섭 · 문중권 · 이도형

I. G. Kang, W. S. Lee, J. K. Moon and D. H. Lee

Key Words : Stabilization(안정화), PDF(확률밀도함수), Power Spectra(파워스펙트럼), Turbulent Shear Flow(난류전단류), Recirculating Flow(순환류)

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. PDFs and Power Spectra technique of fluctuating temperature and ion current measurement were needed for this purpose. We discussed that the three types of stabilized flames were found as the result of post study. In this paper, we established the stability mechanism near the flame holder.

1. 서 론

최근 각종 산업로의 효율을 높이기 위해 고부하 연소가 요구되는데, 이때 고부하에 대응하는 유해 배기가스의 문제를 고려해야 할 것이다. 이에 따른 불완전 연소에 의해 불완전 생성물과 NOx와 다이옥신 등의 오염물질에 의한 환경오염이 심각한 실정이다.

따라서 이들 오염물질을 감소시키기 위한 노력이 시급하다. 이러한 이유로 최근에는 연돌부근에 후연소실을 설치하여 넓은 유속범위에도 화염의 안정성을 도모하여 오염물질을 제거하고자 하는 노력이 진행되고 있다¹⁾. 또 후연소실 배후에 열교환기를 설치하여 배출되는 배기가스를 재이용함으로써 로의 효율은 물론 배기가스의 오염물질도 줄이는 방법도 많이 이용되고 있고 집진기를 이용하여 폐열을 재이용하는 기술도 많이 시행되고 있다. 특히 소각로 등에서는 후연소실에 공기제트와 연료를 주입하여 강한 난류에 의해 완전연소를 유도

하고자 하는 노력이 일반화되어 있다.

본 연구자들은 시험가열로에서 배출되는 배기가스류에 중앙분공형 보염기를 설치하여 넓은 유속범위에서도 안정화시켜 안정화범위를 넓히기 위한 중앙분공형 보염기후류의 확산화염의 구조를 밝히기 위한 첫 시도로, 임의의 당량비 범위에서 안정되는 세 유형의 화염구조를 임의의 반경반향으로 살핀 바 있다.²⁾ 그러나, 이들의 안정이 난류전단층에 의해 안정되는지 혹은 보염기에 의한 환류에 의해 안정되는지는 반응대를 전후하여 상세히 조사할 필요가 있다. 본 연구는 이러한 관점에서 특히, 반응대를 전후한 변동온도 및 이온전류를 측정하여 통계분석함으로써, 이들의 안정화기구를 조사하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 시험가열로에 주입되는 연료는 상용 LPG이며, 일정압력 유지를 위해 조절밸브와 유량계(DC-2, SINAGAWA)를 거쳐 들어가고, 공기는 루츠블로워(HL113SR202B)에서 서지탱크를

접수일 : 1999년 4월 23일
강인구, 이우섭, 문중권 : 부경대학교 대학원
이도형 : 부경대학교 기계·자동차공학부

통하여 다공판으로 압력맥동을 최소화한 다음 시험가열로로 공급된다. 이때 공기는 총류유량계에 의해 검증된 오리피스 수두를 조절밸브로 조절하여 필요유량을 공급한다. 한편, 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 연돌부근에 후연소기를 설치하여, 이 이후의 연소상황을 고찰하였다. 실험에 관한 상세한 것은 참고문헌[2]에 수록되어 있다.

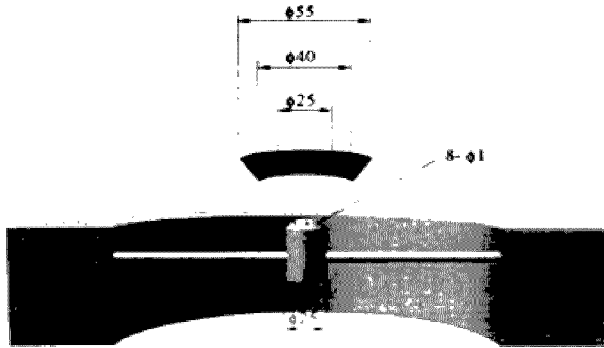


Fig. 1 Detail of the nozzle

다만, 이해를 돕기 위하여 Fig. 1에 후연소기 노즐부근의 상세도를 나타내었다. 실험에 있어서는 화염의 가시화를 위한 직접사진(디지털 카메라 DC50, Kodak)과 온도 및 이온전류를 참고문헌[2]와 동일한 방법으로 측정하였다.

실험조건으로는, 본 연구의 목적이 보염기 후류의 화염안정 메커니즘을 명확히 하는 것이므로, 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 조건을 일정하게 해 두고, Table 1의 당량비 변화에 의해서 형성되는 세 가지 유형의 화염에 관하여 고찰하였다.

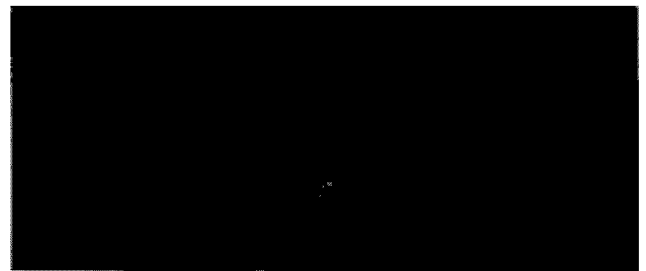
Table 1 Experimental conditions (Unit : $10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$)

	F_1	F_2	Q_1	Q_2	ψ	T(K)
Bud flame	0.311	0.008	16.22	49.27	0.18	902
Lotus flame	0.311	0.137	16.22	49.27	0.2	902
Envelope flame	0.311	0.226	16.22	49.27	0.25	902

단, Table 1에서의 당량비(ψ)는 시험가열로와 후연소실에 공급되는 총연료와 공기의 비로 계산한 값이다. 이때, 시험가열로에서 배출되는 평균배기가스의 조건은 온도는 902K, O_2 농도는 7.8%이다. 또한 F_1 은 1차측 연료유량, F_2 는 2차측 연료유량, Q_1 은 1차측 공기유량, 그리고 Q_2 는 2차측 공기유량이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 Table 1에 나타낸 세 가지 실험조건에서 형성된 화염의 직접사진이다.²⁾ 본 연구에서의 실험조건에서는 당량비 $\psi=0.18$ 범위에서는 화염이 보염기의 중앙분공 부근에서만 안정되고, $\psi=0.2$ 범위에서는 중앙분공과 보염기의 외측에서 화염이 안정되었으며, 그리고 $\psi=0.25$ 를 넘어서면 중앙분공에서는 화염이 나타나지 않고 외측에서만 화염이 안정되는 화염으로 천이하였다. 이후로는 편의상 화염의 형상을 기초로 하여 당량비가 0.18일 때의 화염을 Bud flame, 당량비 0.2일 때를 Lotus flame, 당량비 0.25일 때를 Envelope flame라 하여 세 화염을 구분하도록 한다.

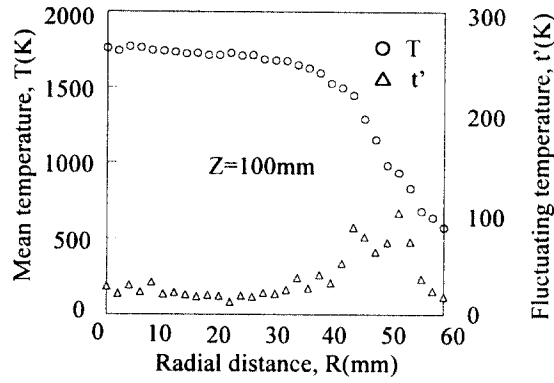


(a) Bud (b) Lotus (c) Envelope

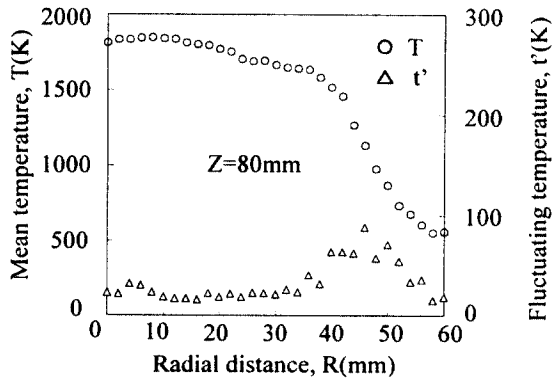
Fig. 2 Direct photographs of 3 type flames

Fig. 3은 당량비가 0.2인 Lotus flame인 경우의 보염기 중앙에서 축방향(Z방향) 40mm, 60mm, 80mm 및 100mm 단면의 반경방향 시간평균온도 T와 변동온도의 RMS값 t' 을 나타낸 것이다. 대체로 직접사진의 화염형상과 일치하는 경향을 보이고 있다. 단지, $R=40\sim 50\text{mm}$ 부근에서 평균온도의 기울기가 급하고 변동온도의 RMS값이 크게 나타났는데, 이 부근의 반응대를 약간 벗어나 주위의 고온기류와 활발히 혼합되는 영역이다.

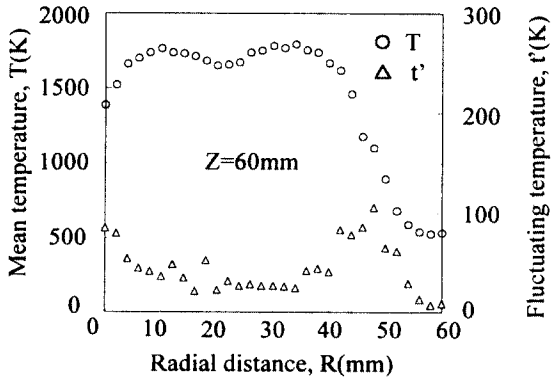
Fig. 4-1, 4-2는 Bud flame인 경우의 축방향(Z방향) 40mm, 60mm, 80mm 및 100mm 단면에서의 이온전류와 변동온도의 확률밀도함수를 각각 나타내고 있다. 이온전류의 경우에는 $Z=40\sim 100\text{mm}$ 단면에 걸쳐 $R=12\text{mm}$ 에서 $R=8\text{mm}$ 로 윗방향으로 갈수록 약간 좁혀진 듯이 최대치를 나타내고 있어, 이 부근들이 각 단면에서의 반응대라고 생각된다.



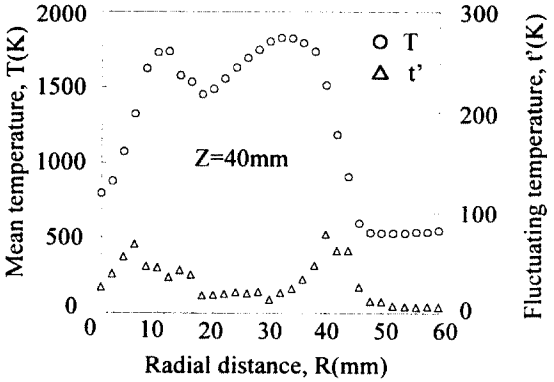
(a)



(b)

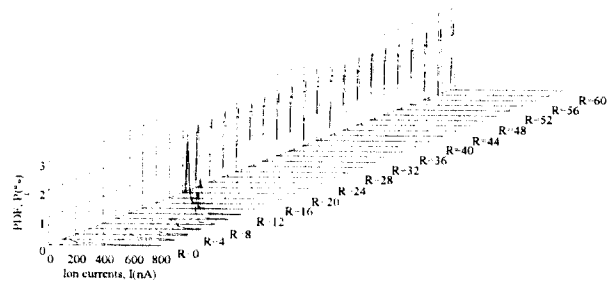


(c)

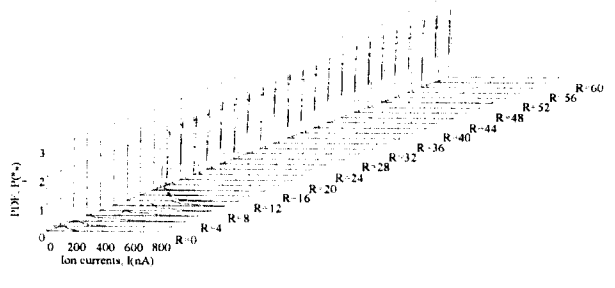


(d)

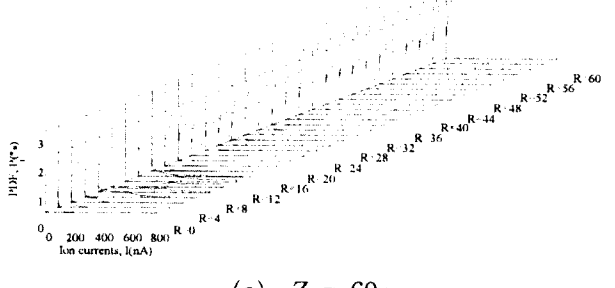
Fig. 3 Radial distributions of mean temperature and RMS of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of lotus flame



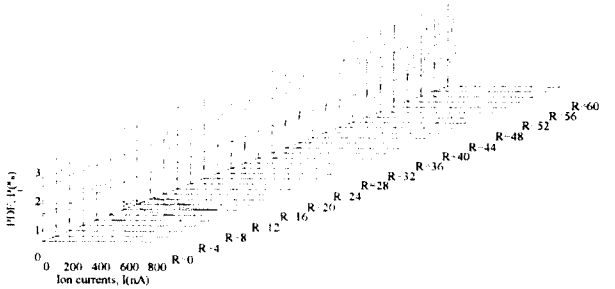
(a) Z = 100mm



(b) Z = 80mm



(c) Z = 60mm



(d) Z = 40mm

Fig. 4-1 PDF of ion current at Z=40, 60, 80 and 100mm of bud flame

Fig. 4-2의 변동온도에서는 Z=40mm단면에서 R=8mm보다 약간 우측에서 최대치가 나타나며, 이러한 경향은 이 이후의 Z방향 단면에서도 마찬가지로 지이다. 따라서 이 부근이 연소가스류가 존재하는 환류영역으로 추측된다. 한편, Z=40mm~60mm부

근에서는 보염기중앙에서 온도가 낮게 나타나 있어 여기서는 1차연소실로부터의 고온공기류가 유입될 뿐, 연소반응과는 무관함을 알 수 있다. 그러나 Z=80mm이후에서는 중앙의 온도가 높아짐을 보아 고온의 연소가스류가 유입되어 있음을 알 수 있다. 그러나 이 부근이 환류영역인지는 현 단계로서는 알기 힘들다.

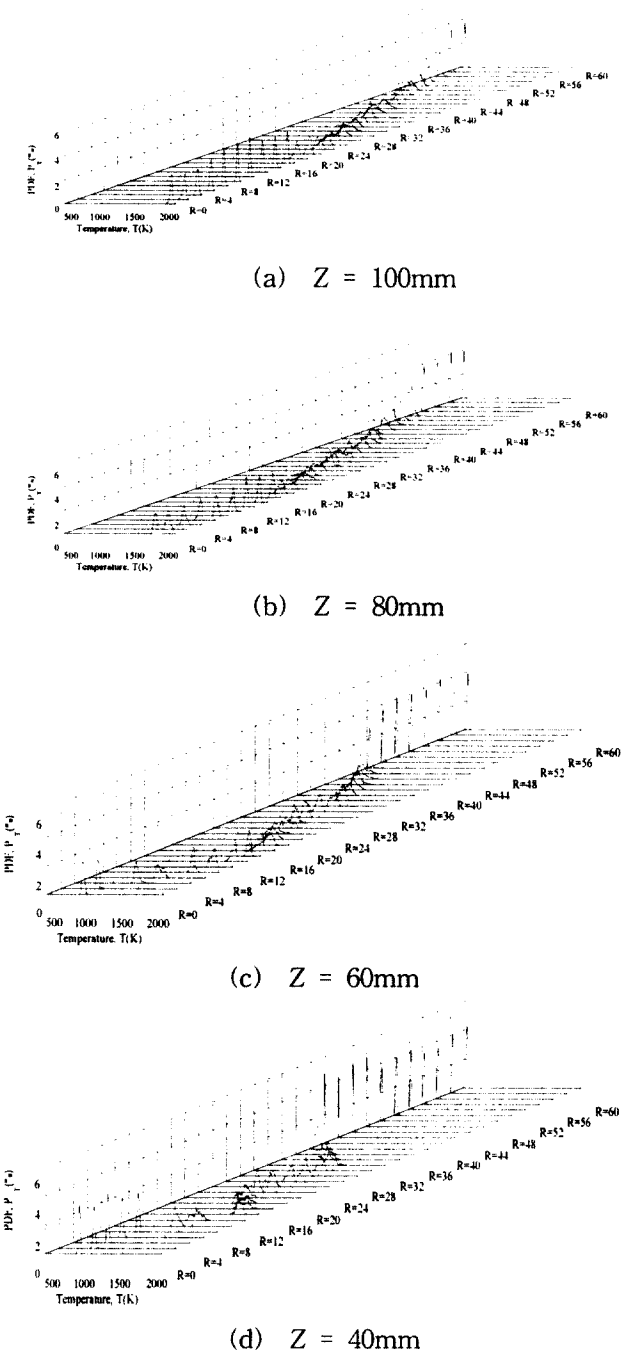


Fig. 4-2 PDF of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of bud flame

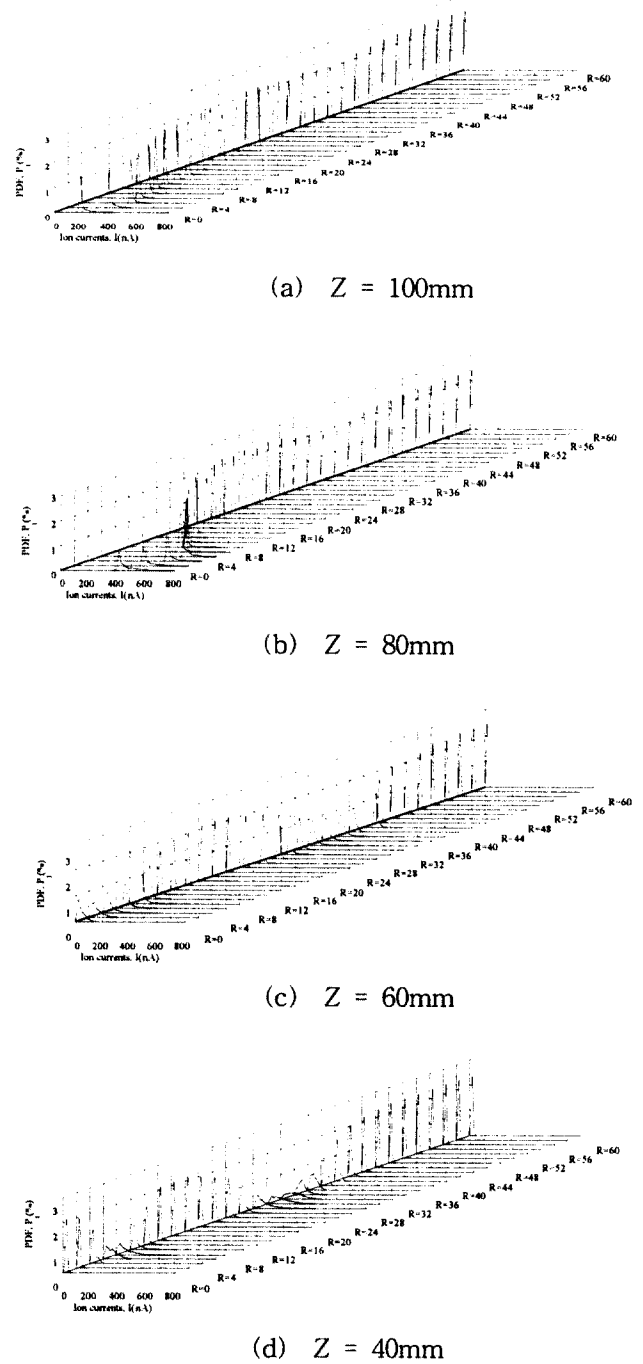
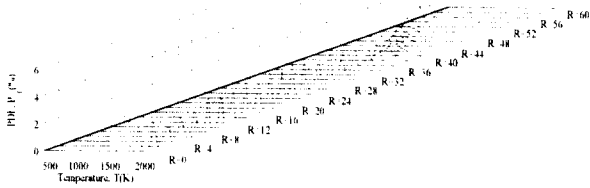


Fig. 5-1 PDF of ion current at Z=40, 60, 80 and 100mm of lotus flame

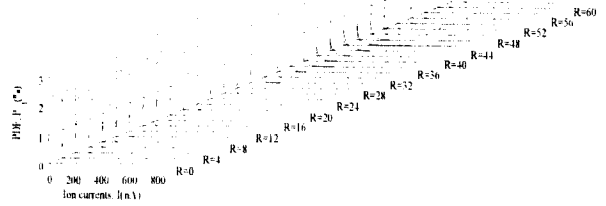
Fig. 5-1, 5-2는 Lotus flame의 이온전류와 변동온도의 확률밀도함수를 나타내고 있다. 이온전류는 Z=60mm단면까지는 중앙부근 R=8mm부근과 R=37mm~40mm부근이 높아서 두 개의 반응대가 존재하며 Z=80mm이상의 단면에서는 반경반향 R=32mm~40mm부근에서는 화염단면이 없어졌음을 알 수 있다. 그러나 변동온도는 여전히 높은 값

을 갖고 있음을 보아, 이 근처까지 고온의 연소가스가 존재하는 환류영역임을 알 수 있다.

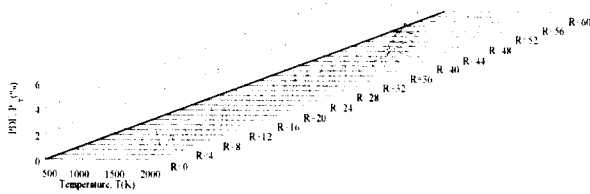
Fig. 6-1, 6-2에는 Envelope flame의 이온전류와 변동온도의 확률밀도함수를 나타내었다.



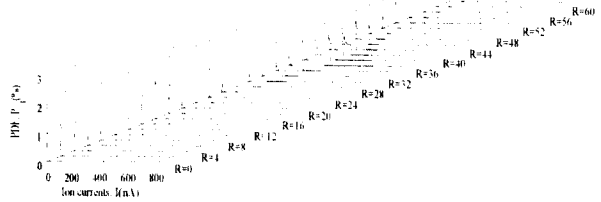
(a) Z = 100mm



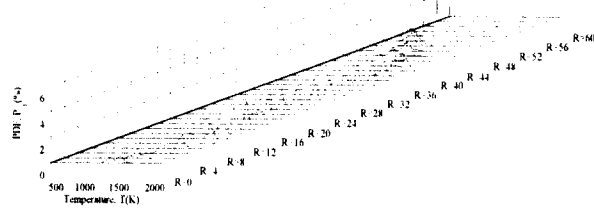
(a) Z = 100mm



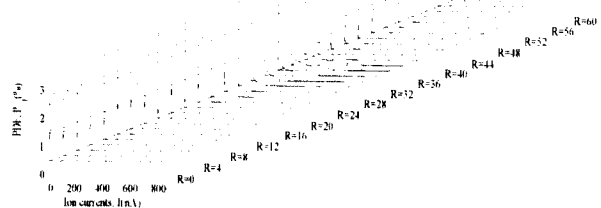
(b) Z = 80mm



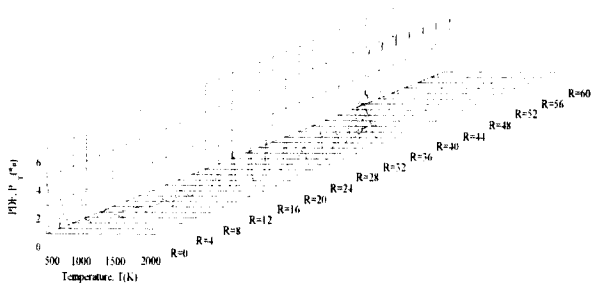
(b) Z = 80mm



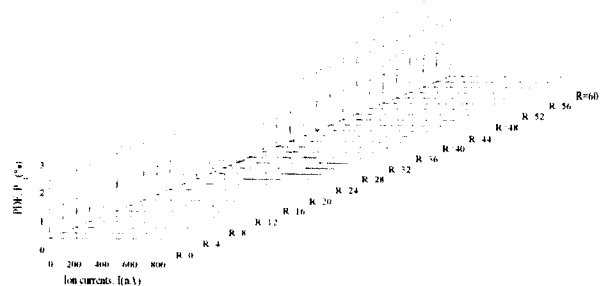
(c) Z = 60mm



(c) Z = 60mm



(d) Z = 40mm



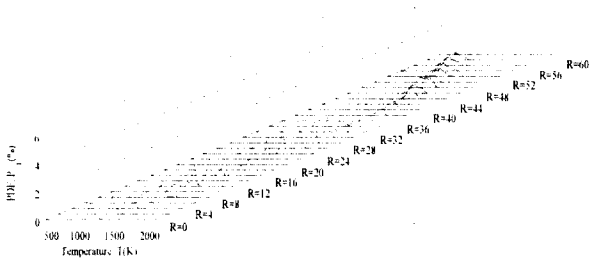
(d) Z = 40mm

Fig. 5-2 PDF of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of lotus flame

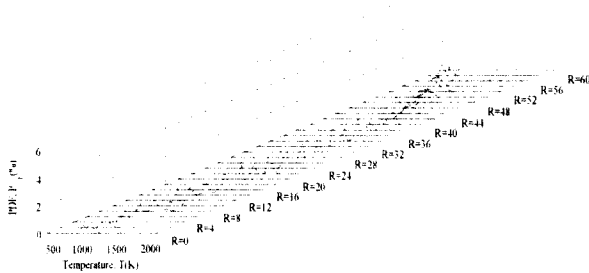
Fig. 6-1 PDF of ion current at Z=40, 60, 80, and 100mm of envelope flame

이온전류는 R=26~30mm부근에서 높고 중앙에서는 나타나지 않는다. 따라서 화염면은 이 부근에서 존재하는 Envelope형상의 화염이다. 온도는 대체로 이 부근에서 최대치를 나타내고 있다. 그러나

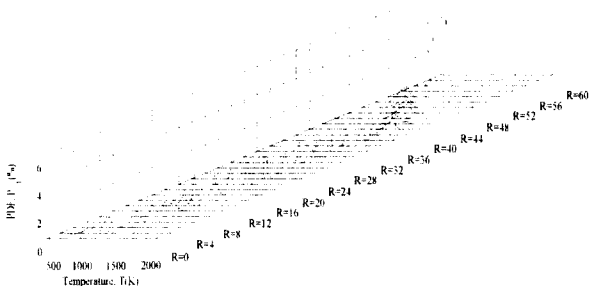
Z=40mm단면에서는 R=16mm에서 외측 화염대 부근까지 존재하고, 그 바깥쪽으로는 공기류와의 혼합이 활발한 것으로 보인다. 이런 현상은 Z=80mm 부근까지 유사한 경향을 보이며, 그 이후에는 중앙분공으로 들어간 고온의 공기류와 연소가스가 섞여 있는 것으로 추측된다. Fig. 7은 축 방향 Z=100mm에서의 세 화염의 이온전류의 power spectrum분포를 반경방향으로 나타내었다. Bud의 경우 중앙분공에서 높은 에너지를 가지며, 비교적 에너지의 감쇠가 적음으로 보아 작은 와류가 많이 존재하고, Lotus의 경우는 중앙분공과 외측에서 높은 에너지를 가지고 그 에너지의 감쇠가 Bud보다 크게 나타났다. 그리고 Envelope 반응대에서 높은 에너지를 가지는 공통성이 있으나 탁월한 주파수를 나타내지 않았는데 이는 화염의 경우는 보



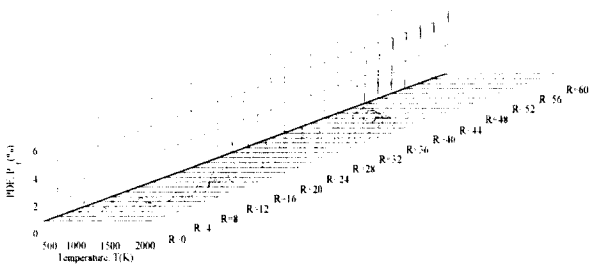
(a) Z = 100mm



(b) Z = 80mm

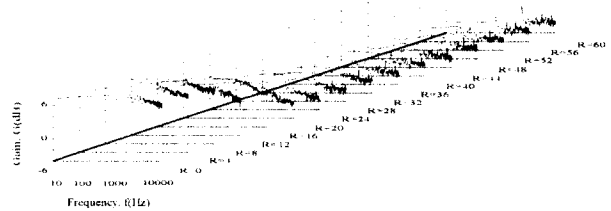


(c) Z = 60mm

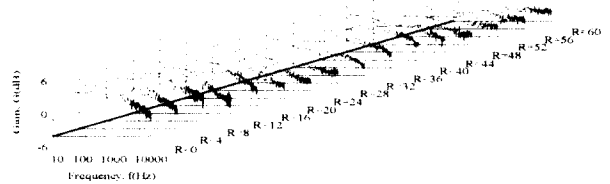


(d) Z = 40mm

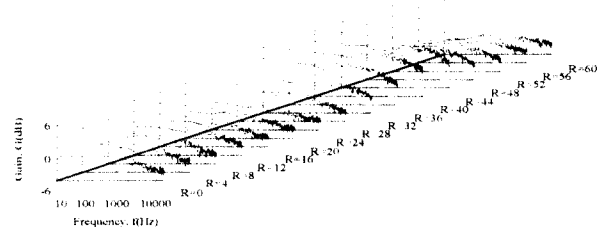
Fig. 6-2 PDF of fluctuating temperature at Z=40, 60, 80 and 100mm of envelope flame



(a) Bud flame



(b) Lotus flame



(c) Envelope flame

Fig. 7 Power spectra distributions of ion current of 3 type flames

염기 외측에서 에너지가 높게 나타났고 그 감쇠는 비교적 작았다. 그러나 세 화염모두 내의 와류가 주기성이 없는 랜덤한 3차원 와류임을 추측할 수 있다.

4. 결 론

보염기에 의한 화염의 안정메커니즘을 규명하기 위하여 당량비 변화에 따른 중앙분공형 보염기의 후류에 안정된 세 종류의 화염형상에 대하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Lotus flame인 경우 평균온도와 변동온도의 RMS값(Fig. 7)을 직접사진(Fig. 2의 (b))과 비교하여 보면, 축방향 $Z=60\text{mm}$ 이내에서 특히 보염기 중앙부근과, 보염기를 반경방향으로 약간 벗어난 두 위치에서 최대치를 나타내고 있어서, 이 두 곳 부근에서 화염이 안정 되고 있음을 알 수 있다.
- 2) 이온전류의 최대치를 나타내는 반응대를 기준으로 변동온도의 분포를 비교한 결과, Lotus 및 Envelope 화염의 경우, 대체로 80mm부근까지 보염기 후류에 의해 안정됨을 알 수 있다. 그러나 Bud화염인 경우에는 보염기 중앙 위쪽에서도 온도가 높고 이온전류가 꽤 존재하여, 현 단계로는 여기서도 환류가 존재하는지 혹은 난류 전단층에 의해 안정되는지는 알 수 없었다.
- 3) 한편, 반응대 부근의 power spectrum분포로 보아 와류의 크기는 작은 것이 많고 주기성은 나타나지 않아, 여기서는 대부분 난류 전단층의 불규칙한 3차원 와류에 의해 지배되는 화염임을 알 수 있다.

참고문헌

1. 水谷幸夫(崔炳輪, 李度衡 共譯), “燃燒工學”, 제 2版, 東明社, pp. 97~166, 1992
2. 강인구, 이우섭 외2명, “중앙분공형 보염기후류에 안정된 난류화염의 구조에 관한 연구 (I)”, 한국동력기계공학회지, 제2권, 제2호, pp. 13~19, 1998
3. 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
4. M. Katsuki, “An Improved Thermocouple Technique for Measurement of Fluctuating

Temperature in Flame”, Combustion and Flame pp. 27~36, 1987

5. F. C. Lockwood, “Measurement of Mean Temperature and Ion Concentration in Round Free-Jet Turbulent Diffusion and Premixed Flames”, 15th Symp. (Int.) on Combustion, pp. 561~571, 1975