

# 선회를 갖는 동축확산연소기의 화염구조에 관한 연구

## A Study on the Characteristics of Flame Structure in Coaxial Diffusion Combustor With Swirl

김규성 · 이우섭 · 강인구 · 이도형

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

**Key Words** : Coaxial Diffusion Combustor(동축확산연소기), Flame Structure(선회유동), PDF(확률밀도함수), Ion Current(이온전류), Power Spectra(파워스펙트럼), Equivalence Ratio(당량비)

**Abstract** : The purpose of this study is to investigate the flame structure and combustion characteristics in the model gas turbine combustor changing equivalence ratio. For this purpose, temperature and ion current were measured and these data were analyzed by the PDF and power spectra technique.

We found that the flame length is longer while increasing the equivalence ratio in experimental condition, and especially  $\psi=0.19$ , combustion reaction was active by the stable swirl flow. and these flames were governed by the random three dimensional eddy.

### 1. 서론

현재 에너지 사용량의 제한과 환경오염 등 에너지와 관련된 문제는 중요한 사회문제로 인식되고 있고 앞으로 더욱 증대될 것이다. 따라서 현실적인 방안으로 『에너지 이용 효율의 향상』이 실질적인 방안으로 대두되었다. 최근 동력기계분야에서도 연소기기는 고성능·저공해·연료다양화·연소제어의 고도화 등을 요구하는 에너지절약과 배출물질 저감을 실현할 수 있는 연소기술 개발이 중요한 연구과제로 되어있다.

실용 연소기기에 많이 사용되는 동축확산연소방식은 화염을 크게하여 연소부하율은 작게되지만, 조작범위가 넓고 역화 등의 위험도가 낮다. 또한 선회류는 연소속도를 지배하는 난류강도 증대 및 체류시간을 제어하고, 화염구조, 화염의 안정성 및 공해물질의 생성을 제어하고 연료와 공기의 혼합을 촉진하는 것으로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>.

Ikeda 등<sup>3)</sup>은 가스터빈 연소기에 대해 선회류를 동반한 연소기내의 재순환 영역의 거동을 포함한

유동상태, 연료와 공기의 혼합, 온도 및 농도분포를 조사하였다. Gupta 등<sup>4)</sup>은 유동장의 높은 전단 응력영역과 과농영역이 일치되도록 연료와 유동의 방향을 조절함으로써 높은 연소부하율을 얻을 수 있고, 또 화염의 안정한계도 더 넓어지는 다중선회 연소기기의 원리를 발표하였다. 그러나 선회 및 비선회 화염에 대한 안정범위와 같은 정보는 알려져 있으나 화염의 미시적인 구조 및 연소특성들에 대한 정보가 부족한 실정이다. 그러므로 에너지 절약과 저공해성 등을 고려한 최적의 연소기 설계를 위해서는 화염구조 및 연소특성에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 선회를 갖는 고속공기류에 당량비 변화를 통한 동축확산화염을 형성시켜 평균온도, 이온전류 분석을 통해 선회를 갖는 고속공기류에 당량비 변화가 화염구조와 연소안정성에 미치는 영향을 조사하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 동축확산연소기의 실험장치도를 나타낸 것이다. 연소용 공기는 송풍기(3HP)에서 공급되며 압력맥동을 최소화하기 위해 서지탱크를 거친 후, 층류유량계(Sokken LFE-

접수일 : 1999년 12월 21일

김규성, 이우섭, 강인구 : 부경대학교 대학원

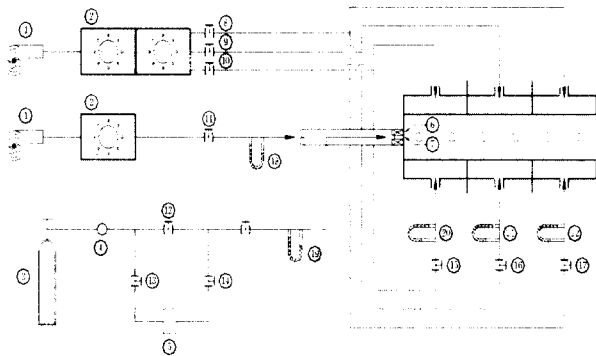
이도형 : 부경대학교 기계·자동차공학부

100B)에 의해 검증된 오리피스스의 수두를 조절밸브로 조절하여 필요 유량을 공급한다. 연료는 상용 LPG로서 압력용기에서 공급되며, 압력조정기와 가스유량계(DC-2, Sinagawa)를 거쳐 연소기에 공급된다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 연소기의 상세도이다. 연소기전체의 길이는 450mm이며, 직경 154mm 케이싱과 직경 102mm 라이너로 구분된다. 케이싱은 전체길이를 150mm 간격으로 3개의 영역으로 나누었으며 각각의 영역의 중간에 직경 20mm의 공기 주입구를 180° 간격으로 2개씩 각각의 영역에 배열하였다. 라이너 길이는 428mm이며, 또한 라이너 홀의 직경은 10mm로 라이너 둘레로 45° 간격으로 8개씩 있으며 각각의 영역에 2열씩 배열하였다. 주공기는 내경 52mm의 내측원관으로 유입되고 연료는 내경이 7mm(외경 17mm)인 노즐의 분공(직경 1.0mm) 4개를 통하여 연소기내에서 분사각 45°로 분사된다.

본 실험에서는 온도와 이온전류를 동시에 측정하여 단독측정에 따른 재현성의 논란을 없애고자 하였다. 평균온도 측정에는 기존의 열전대에 의한 측정의 신뢰도를 인정하여 직경 0.5mm, 재질

Pt/Pt-Rh 13%의 수냉식 열전대를 사용하였으며, 복사나 열전도에 의한 열 손실은 고려하지 않았다<sup>5)</sup>. 그리고 이온전류 측정 프로브는 고온의 화염 중에서 내산성이 좋고, 전도성이 우수한 세션 직경 0.1mm의 Pt-Rh 13% 합금을 석영유리관 속에 삽입한 후 수냉식 프로브에 넣어 사용하였다. 이때 정전탐침은 석영유리관보다 5mm 돌출시켜 감응부로 하며, -18V를 가해서 화염대의 양이온을 검출하였다<sup>6)</sup>.

Fig. 3은 이온전류를 측정하기 위한 측정계의 블록선도를 나타낸 것이다. -18V를 가해서 얻어진 이온전류는 미소전류증폭기에서 음(-)전압으로 증폭되어 검출된 후, 반전증폭기에 의해 반전·증폭되고, 저역필터(Low pass filter)를 거쳐 데이터 레코더에 기록되어 신호처리 된다.



- 1. Blower
- 2. Surge tank
- 3. Fuel tank
- 4. Regulator
- 5. Gasflow meter
- 6. Swirler
- 7. Nozzle
- 8-17. Valve
- 18-22. Orifice manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

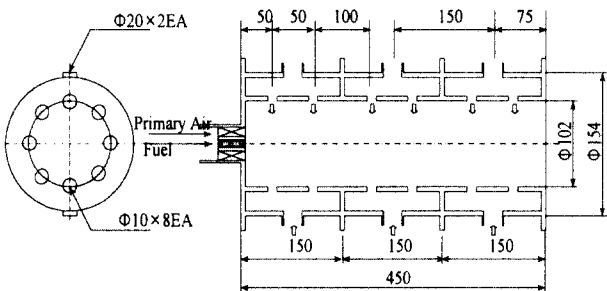


Fig. 2 Detail of combustor

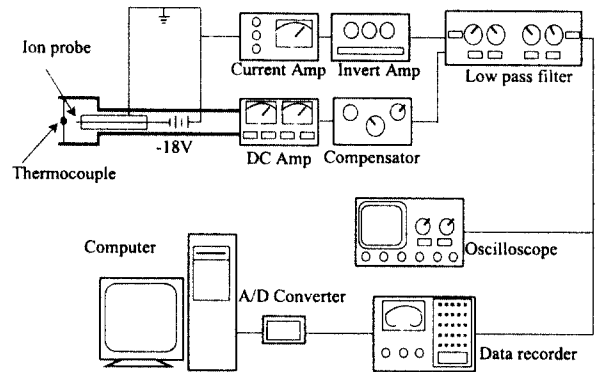


Fig. 3 Block diagram of ion current

본 연구의 목적은 공기유량을 일정하게 두고 당량비 변화에 의해 형성되는 선회유동에서의 화염의 구조 및 연소특성을 살피는 것으로, 이를 위한 실험조건은 Table 1의 세 가지 경우의 당량비 범위에서 우선 주방향 공기만 선회시켜 공급하였을 때의 화염구조를 밝히기 위하여 1, 2, 3차 공기는 주입하지 않고 실험을 수행하였다. 여기서, 좌표계는 연소기의 중심을 원점으로 하여 하류방향을 Z, 임의 반경방향을 R로 표시하였다.

Table 1 Experimental conditions

(단위: ℓ/sec)

	Fuel	Air	$\phi$
CASE 1	0.17	21.9	0.18
CASE 2	0.18	21.9	0.19
CASE 3	0.20	21.9	0.22

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4의 (a)는 Table 1에 나타낸 세 가지 실험 조건에서 형성된 화염의 직접사진이고, (b)는 연소기 중심축에서 임의 반경방향으로 온도분포를 측정하여 온도등분포선을 나타낸 것이다.

전체적으로 당량비가 증가할수록 화염이 커지고 화염길이는 길어지며 하류쪽에서의 온도분포가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고온의 영역이 다소 넓어지는 것으로 나타났다. 본 측정에서 노즐선단에서의 데이터는 의미가 없으므로, 이하의 그림에 나타낸 Z방향 0의 지점은 노즐선단에서 10mm인 위치를 Z=0으로 한다.

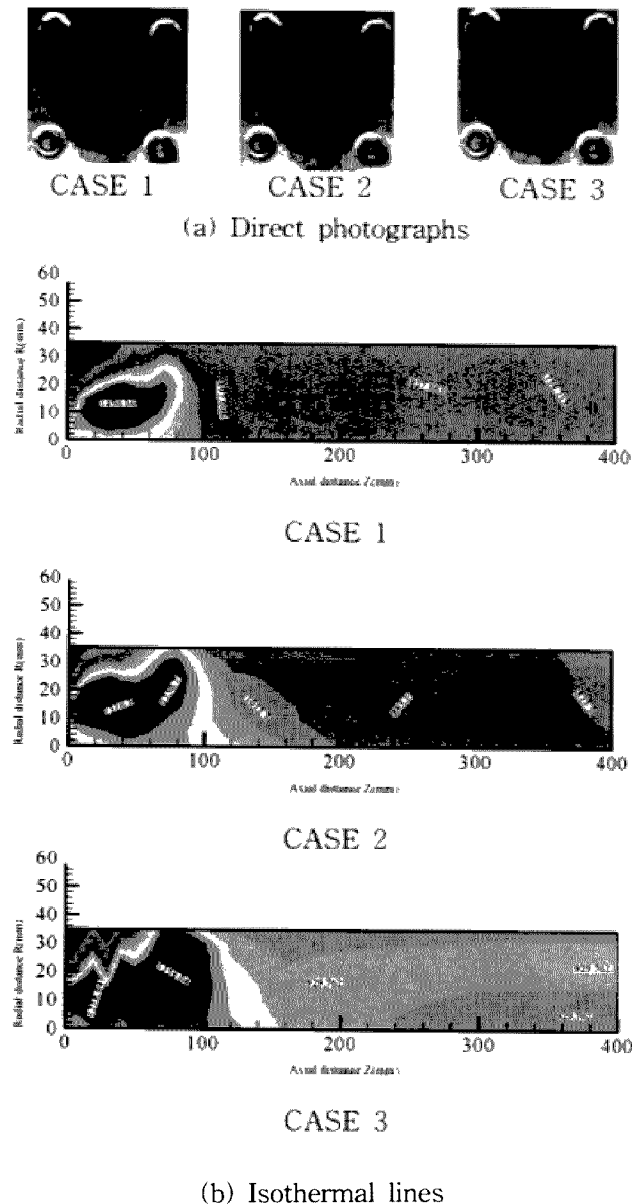
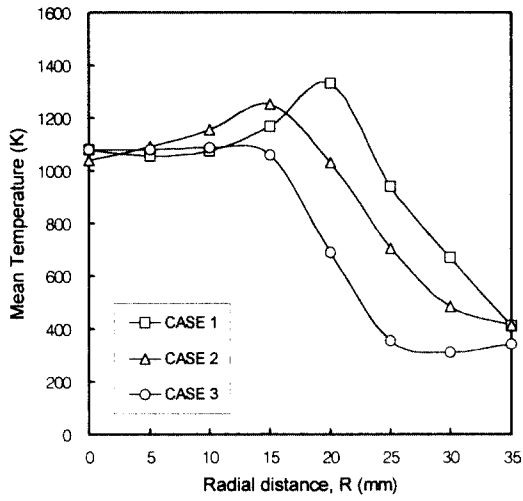


Fig. 4 Direct photographs and isothermal lines of three case of flames

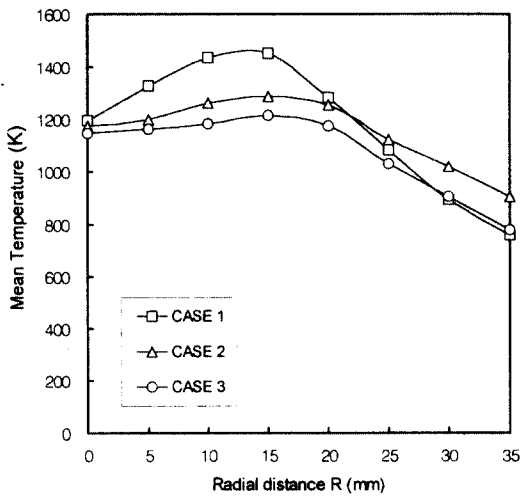
Fig. 5는 위 세 가지 실험조건에서 각각 Z=0, 50, 및 100mm 위치에서 반경방향 단면의 평균 온도 분포를 나타내었다. 이들은 전체적으로 각 화염 형상에 대응하는 분포를 잘 나타내고 있다. Z=0 (a)인 위치에서 평균온도분포곡선으로 보아 모든 경우에 대략 반경방향 R=10~20mm에서 연소가 활발히 일어나는 고온영역임을 알 수 있고, Z=50mm(b)에서는 CASE 1이 상대적으로 연료가 적지만 반경방향 온도분포가 높게 나타나는데 이것은 이 단면에서 CASE 1이 연소가 가장 활발한 영역임을 알 수 있으며, Z=100mm(c)전후에서는 반응이 완전히 종결된 영역임을 알 수 있다.

Fig. 6은 CASE 2의 임의 반경방향의 대표단면 이온전류의 확률밀도함수(PDF)와 이온전류의 파워스펙트럼 분포를 반경방향으로 나타낸 것이다. Z=0mm(a)는 이온전류가 임의반경방향 10~20mm에서 많은 이온전류가 나타났으며, 또한 임의 반경방향 0~10mm에서는 이온전류가 거의 나타나지 않고 있다. 이들로부터 연소반응은 임의반경방향 10~20mm 정도에서 주로 활발한 반응을 한다. 이것은 Fig. 5 (a)의 온도 고온부와 좋은 일치를 보여주며, 이 부근이 연소가 활발한 화염대 부근임을 알 수 있다. 한편, 같은 단면의 이온전류의 파워스펙트럼분포는 임의반경방향 10~20mm에서 높은 에너지를 가지며, 비교적 에너지 감쇠가 적은 것으로 나타났다. Z=50mm(b)와 Z=100mm(c)에서는 반경방향 15~25mm에서 이온전류치가 높게 나타나서, 이들 단면에서는 화염이 반경방향으로 넓게 퍼진 모양임을 알 수 있다. 한편 이온전류의 파워스펙트럼분포에서는 반응대 부근에서 비교적 높은 에너지를 가지는 것으로 나타났지만 탁월한 주파수는 나타나지 않았다. 그러나 이온전류로 예측한 바와 같이, 세 가지 실험조건 모두 반응대 전후한 위치에서는 모든 주파수 범위에서 높은 에너지분포를 가지는 공통성은 나타났지만 탁월한 주파수 범위는 나타나지 않았다. 이 원인은 화염내의 와 (eddy)가 주기성이 없는 랜덤한 3차원 와이기 때문으로 추측된다.

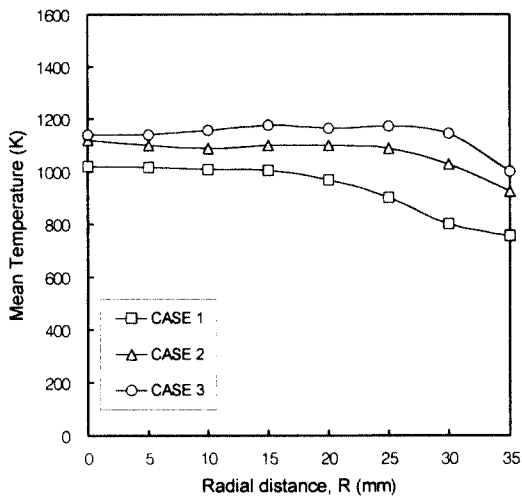
Fig. 7는 세 가지 실험조건에서의 단면 Z=100mm에서의 이온전류의 확률밀도함수와 이온전류의 파워스펙트럼 분포를 반경방향으로 나타낸 것이다. 이 단면에서는 이온전류가 나타나지 않고, 또한 이온전류의 파워스펙트럼도 높은 에너지분포와 탁월한 주파수범위가 나타나지 않았다. 이것으로 보아 이 단면 이후부터는 반응이 종결된 후류 영역임을 알 수 있다.



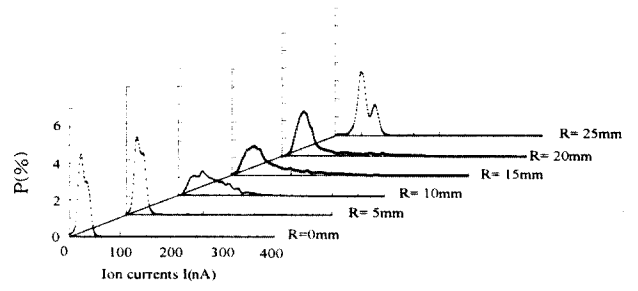
(a) Z=0mm



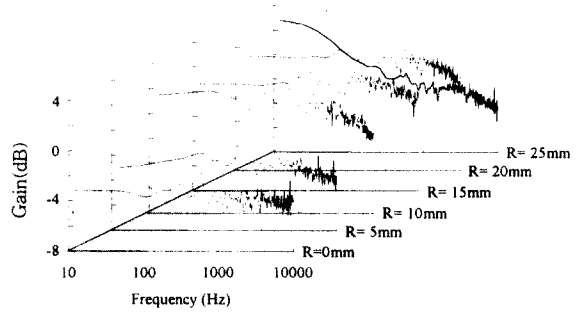
(b) Z=50mm



(c) Z=100mm

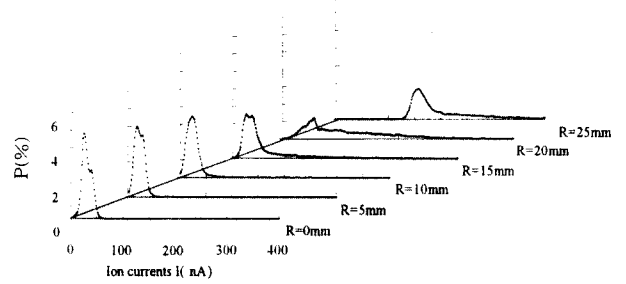


PDF

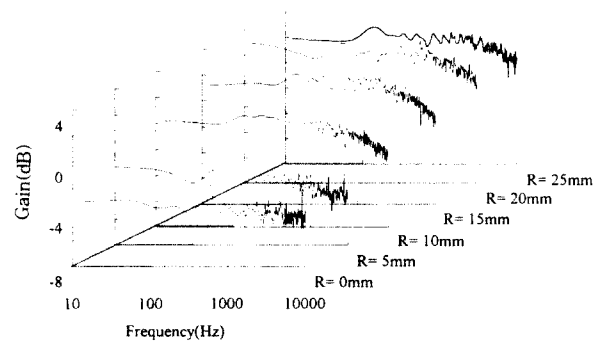


Power spectra

(a) Z=0mm



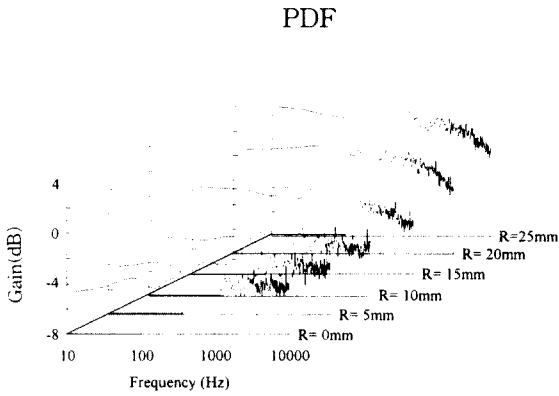
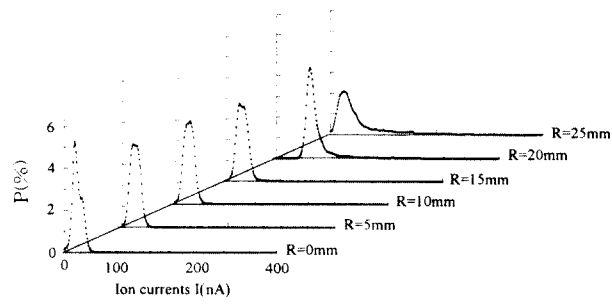
PDF



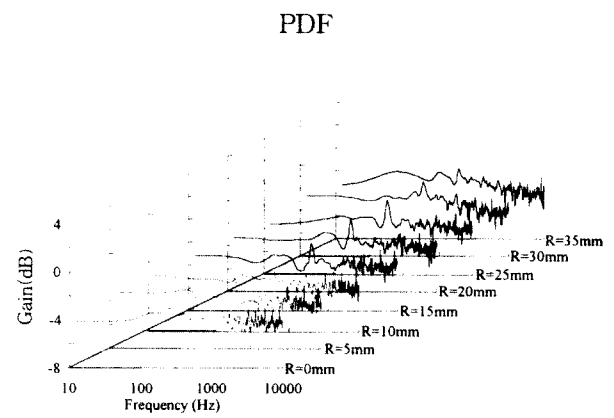
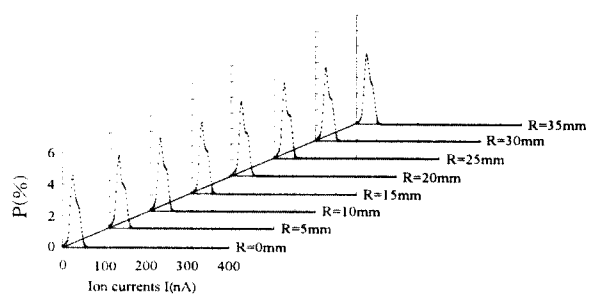
Power spectra

(b) Z=20mm

Fig. 5 Radial distributions of mean temperature at Z=0, 50 and 100 mm of CASE 1, CASE 2 and CASE 3

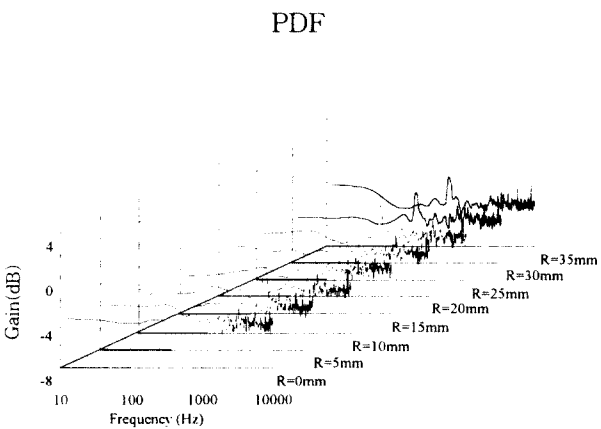
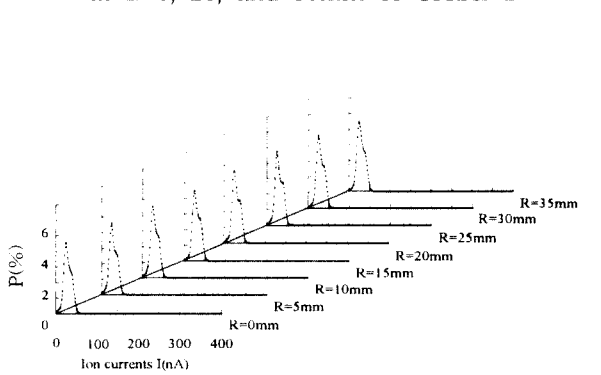


(c) Z=50mm

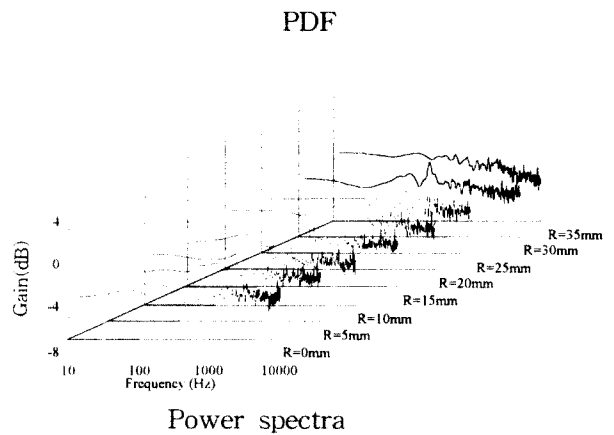
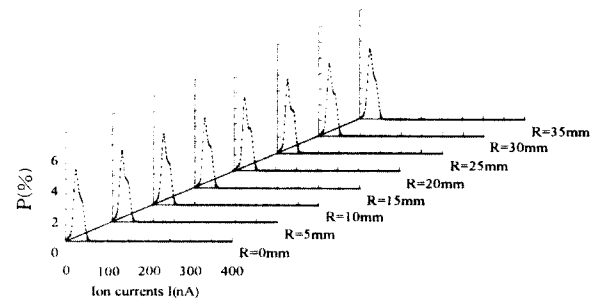


(b) CASE 2

Fig. 6 PDF of ion currents and power spectra at Z=0, 20, and 50mm of CASE 2



(a) CASE 1



(c) CASE 3

Fig. 7 PDF of ion currents and power spectra at Z=100mm of CASE 1, CASE 2 and CASE 3

#### 4. 결 론

당량비 변화에 따른 동축확산연소기에 형성된 세 가지 실험조건에 대한 화염에 대하여 분석한 결과 다음과 같은 결과들을 얻었다.

- 1) 본 실험조건에서는 당량비가 증가할수록 화염은 커지고 화염길이는 길어지는 것으로 나타났다.
- 2) 축방향  $Z=100\text{mm}$  전후에서 본 실험의 세 가지 실험조건 모두 이온전류가 거의 나타나지 않았고 이온전류의 파워스펙트럼에서도 높은 에너지분포가 나타나지 않는 것으로 보아 연소반응이 종결된 단면으로 나타났다.
- 3) 본 실험장치인 경우,  $\psi=0.19$ 인 경우가 다른조건에 비해 연소기 내부에서 안정된 선회유동으로 인한 연료와 공기의 혼합이 촉진되고 연소반응이 활발한 것으로 판단된다.
- 4) 세 가지 실험조건에 대한 반응대 부근에서 이온전류의 파워스펙트럼을 살펴본 결과 반응대 부근에서는 높은 에너지를 가지나 탁월한 주파수 범위는 나타나지 않았고, 반응이 종결된 영역에서는 높은 에너지 분포가 나타나지 않았다. 따라서 반응대는 난류에 의한 랜덤한 3차원 와(eddy)에 의해 지배되는 화염으로 생각된다.

정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구(II)", 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회 논문집, pp. 55~60, 1998

#### 참고문헌

1. S. Yuasa, "Effects of Swirl on the Stability of Jet Diffusion Flames", Combustion and Flame, Vol. 64, p. 181, 1986
2. K. Aoki, "Study on Cylindrical Combustion Flow with Swirl Flow(3rd Report, Effect of a Contraction Nozzle of Area Ratios and its Location)", JSME(B), Vol. 57~539, p. 2301, 1991
3. Y. Ikeda, S. Hosokawa and T. Nakajima, "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, 1991
4. A. K. Gupta, J. M. Beer and J. Swithenbank, "Concentric Multi Annular Swirl Bunner: Stability Limits and Emission Characteristics", 16th. Symp. (Int.) on Combustion, p. 79, 1979
5. 강인구 외 3명 "중양분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구(I)" 한국동력기계공학회 논문집, 제2권, 2호, pp. 13~20, 1998
6. 이우섭 외 3명, "중양분공형 보염기 후류에 안