

# 동축확산연소기 화염구조와 NO<sub>x</sub> 분포에 관한 연구

김규성\* · 이우섭\* · 강인구\* · 이도형\*\*

## A Study on the Flame Structure and NO<sub>x</sub> Distribution In Coaxial Diffusion Combustor

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

Key Words : Coaxial Diffusion Combustor(동축확산연소기), Swirl Flow(선회유동), PDF(확률밀도함수), Ion Current(이온전류), NO<sub>x</sub>(질소산화물), Equivalence ratio(당량비)

### Abstract

The purpose of this study is to establish the flame structure and NO<sub>x</sub> emission characteristics of the swirl flow coaxial diffusion combustion in the model gas turbine combustor. The mean temperature, ion currents and NO<sub>x</sub> emission measurement technique showed the effect of equivalence ratio into flame length and flame stability. As a result of this study, NO<sub>x</sub> emission was increased by increasing the equivalence ratio, and the peak value of the NO<sub>x</sub> was appeared near the flame front.

### 1. 서 론

현재 에너지 사용량의 제한과 환경오염 등으로 인한 에너지와 관련된 환경문제는 중요한 문제로 인식되고 있고 앞으로 더욱 증대될 것이다. 따라서 현실적인 방안으로 『에너지 이용 효율의 향상 과 저공해 연소』가 실질적인 방안으로 대두되었다. 최근

동력기계분야에서의 연소기기의 고성능 · 저공해 · 연료다양화 · 연소제어의 고도화 등은 연소기의 소형화에 따라 그 요구가 높아지고 있지만 그것에 수반되는 연소온도의 상승 때문에 저 NO<sub>x</sub>화가 매우 어려운 문제로 대두되고 있다. 따라서 NO<sub>x</sub>배출은 연소온도 및 연소기내의 체류시간에 따라 증가하므로, 이를 감소시키기 위해서는 연소온도 및 고온생성물의 체류시간을 줄여야 하지만, 이럴 경우 연소기 내에서의 연소 반응시간이 충분하지 못하기 때문에, 결국 연소효율은 감소하고 미연가스 배출은 증대된다. 반면에 연소 효율 향상을 위해서는 반응온도 및 체류시간

\* 부경대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부경대학교 기계공학부

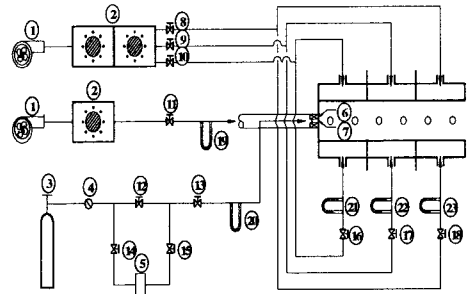
을 가능한 증가시켜야 하고 이는 NOx의 증가를 초래한다. 따라서, NOx발생과 미연가스의 발생은 상반되기 때문에 저 NOx연소는 연소효율 및 배출물의 검토가 함께 이루어져야 한다. 또한 선회류는 연소속도를 지배하는 난류강도 증대 및 체류시간을 제어하고, 연료와 공기의 혼합을 촉진하는 것으로 알려져 있다. 그래서 실질적으로 화염을 크게 하여 조작범위가 넓고 역화 등의 위험도가 낮은 확산화염방식을 많이 채택하고 있다. 따라서 에너지절약과 저공해성 등을 고려한 최적의 연소기 설계를 위해서는 선회유동을 동반하는 화염구조<sup>(1,2)</sup>와 NOx배출특성을 파악하여 그 저감대책을 제시하는 것이 중요하다<sup>(3,4)</sup>. 본 연구자들은 동축확산연소기에서 화염안정화 범위를 넓히고 연소생성물을 저감시키기 위해 당량비 변화를 통한 임의 반경방향으로 온도 및 이온전류를 측정하여 당량비 변화에 따른 안정화영역과 화염기구를 조사한 바가 있다<sup>(5,6)</sup>. 따라서 본 연구에서는 이에 부가하여 NOx분석을 통해 당량비변화에 따른 평균온도 및 이온전류분포와 NOx분포의 상관 관계를 밝히고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1는 본 연구에서 사용된 동축확산연소기의 실험장치도를 나타낸 것이다. 연소용 공기는 송풍기(3HP)에서 공급되며 압력 맥동을 최소화 하기 위해 서지탱크를 거친 후, 증류 유량계(SOKKEN, LFE-100B)에 의해 검증된 오리피스스의 수두를 조절밸브로 조절하여 필요 유량을 공급한다. 연료는 상용 LPG로써 압력용기에서 공급되며, 압력조정기와 가스유량계(DC-2, SINAGAWA)를 거쳐 연소기에 공급된다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 연소기의 상세도이다. 전체 연소기 길이는 450mm이며,

연소기는 직경 154mm 케이싱과 직경 102mm 라이너로 구분된다. 케이싱은 전체 길이에서 150mm 간격으로 3개의 영역으로 나누었으며 각각의 영역의 중간에 직경 20mm의 공기 주입구를 180° 간격으로 2개씩 배열하여, 앞으로 2차공기 주입에 관한 연구에 사용코져 제작하였다. 주공기는 내경 52mm의 내측원관으로 유입되고 연료는 노즐내경 7mm(외경 17mm)의 분공직경 1.0mm로 분공 4개를 통하여 연소기내에서 분사각 45° 로 분사된다.



- 1. Blower 2. Surge tank 3. Fuel tank
- 4. Rgeulator 5. Gasflow meter
- 6. Swirler 7. Nozzle 8-17. Valve
- 18-23. Orifice manometer

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

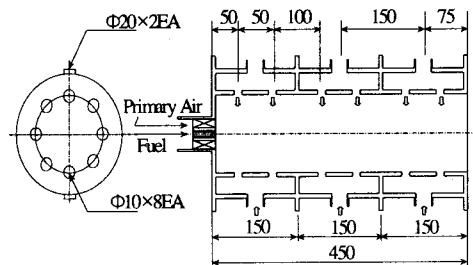


Fig.2 Detail of combustor

본 연구에서는 평균온도와 이온전류 및 NOx를 측정하였다. 평균온도 측정에는 직경 0.5mm, 재질 Pt/Pt-Rh 13%의 수냉식 열전대를 사용하였으며, 복사나 열전도에 의한 열 손실은 고려하지 않았다<sup>(7)</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. 또한 NOx측정은 화학발광식 분석법을 이용한 NOx 분석(SHIMADZU NOA-7000)를 사용하여 측정하였다. 농도측정 프로브는 흡입부 직경 1mm로 수냉식으로 제작하여 3축 이송대 위에 설치하여 측정하였다. 실험조건은 현 단계에서는 공기유량을 일정하게 두고 연료량의 변화에 의해 형성되는 화염구조와 NOx배출특성을 살피는 것이 목적이므로 Table 1의 당량비 범위에서 형성되는 세 가지 실험조건의 경우에 관하여 고찰 하였다.

Table 1 Experimental conditions ( $\ell$  /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

본 연구에서는 우선 주방향 공기만 선회시켜(선회강도=0.72) 공급하였을 때 형성되는 선회유동에서의 화염구조와 NOx배출물을 밝히는 것이 목적이므로 1, 2, 3차 공기는 주입하지 않고 실험을 수행하였다. 참고로, 본 측정에서 노즐선단에서의 데이터는 의미가 없으므로, 이하의 그림에 나타난 Z방향 0의 지점은 노즐선단에서 10mm인 위치를 Z=0로 한다. 여기서 좌표계는 연소기의

중심을 원점으로 하여 하류방향을 Z, 반경방향을 R로 표시 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

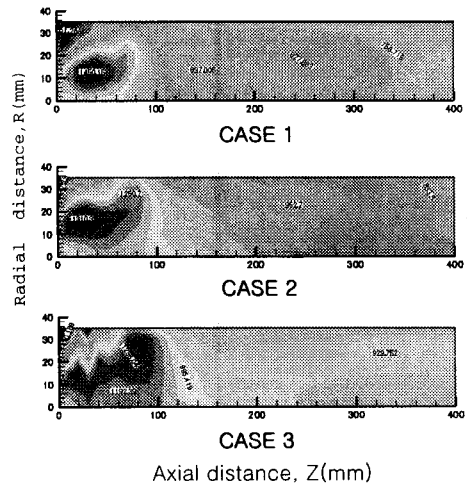
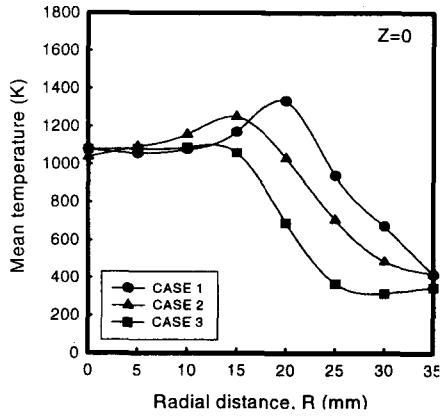


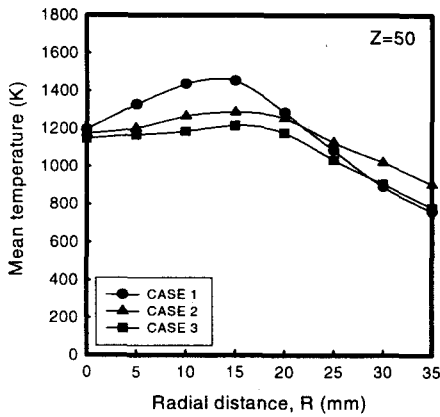
Fig. 3 Isothermal lines of CASE 1, CASE 2 and CASE 3

Fig. 3은 Table 1에 나타낸 세 가지 실험조건에서의 온도분포를 등온선으로 표시한 것이다. 전체적으로 당량비가 증가할수록 화염이 커지고, 화염길이는 길어지며 후류쪽에서의 온도분포가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고온의 영역이 다소 넓어지고 화염이 대체로 커지는 경향으로 나타났다.

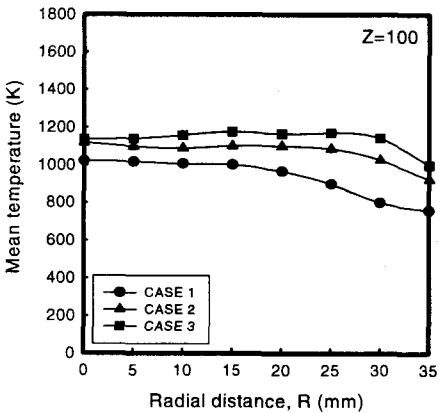
Fig. 4는 Table 1에 나타낸 세 가지 실험조건에서의 임의 반경방향 단면의 평균 온도 분포를 나타내었다. 이들은 전체적으로 각 화염형상에 대응하는 분포를 잘 나타내고 있다. 단면(a) 즉, Z=0 위치에서 평균온도 분포곡선으로 보아 반경방향 R=10~20mm에서 연소가 활발히 일어나는 고온영역임을 알 수 있고, 단면(b)는 CASE 1이 상대적으로 연료가 적지만 반경방향 온도분포가 높게



(a) Z=0mm

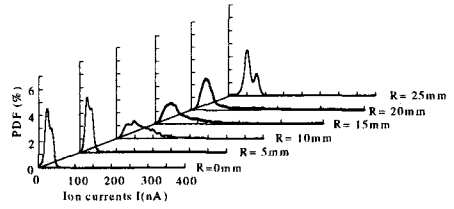


(b) Z=50mm

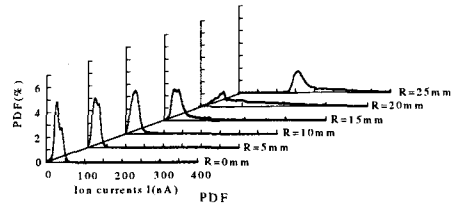


(c) Z=100mm

Fig.4 Radial distribution of mean temperatures at Z=0, 50 and 100mm of CASE 1, CASE 2 and CASE 3



(a) Z=0mm

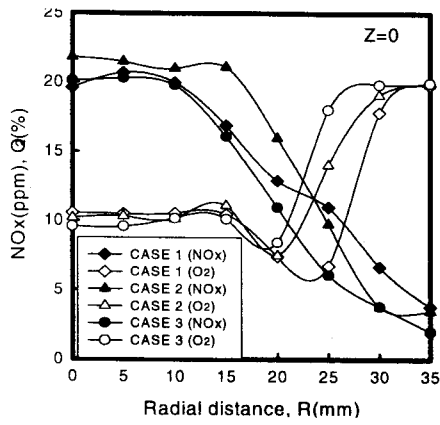


(b) Z=20mm

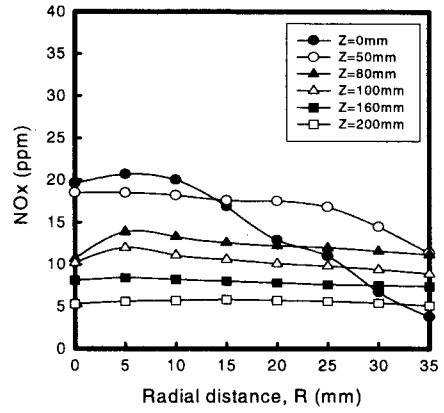
Fig. 5 PDF of ion current at Z=0, 20, and 50mm of CASE 2

나타나는 것으로 보아 이 단면에서 CASE 1 이 연소가 가장 활발한 영역으로 나타났고, 단면(c)는 이 지점 전후에서 반응이 완전히 종결된 영역임을 알 수 있다.

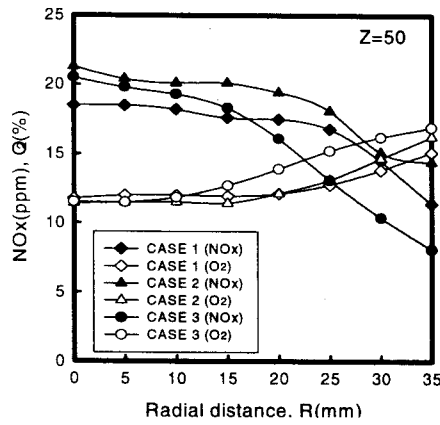
Fig. 5는 CASE 2의 임의의 반경방향의 대표단면 이온전류의 확률밀도함수(PDF)를 나타낸 것이다. 단면(a)는 이온전류가 임의의 반경방향 R=10~20mm에서 많은 이온전류가 나타났으며, 또한 반경방향 R=0~10mm에서는 이온전류가 거의 나타나지 않고 있다. 이들로부터 연소반응은 반경방향 R=10~20mm 정도에서 주로 활발한 반응을 한다. 이것은 Fig. 4 (a)의 온도고온부와 좋은 일치를 보여주며, 이 부근이 연소가 활발한 화염대 부근임을 의미한다. 단면(b)와 (c)에서는 반경방향 15~25mm에서 이온전류치가 높게 나타나서, 연소반응은 이 부근에서 활발한 반응을 하는 것으로 보아 이들 단면에서의 화염은 반경방향으로 넓게 퍼진 모양임을 알 수 있다.



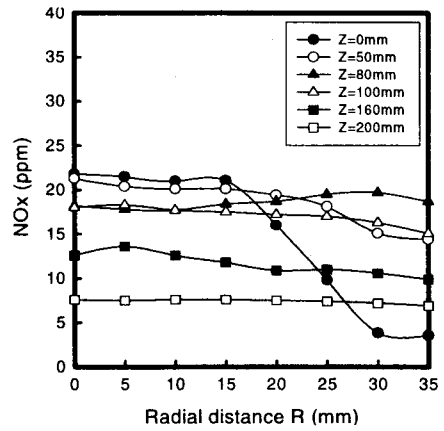
(a) Z=0mm



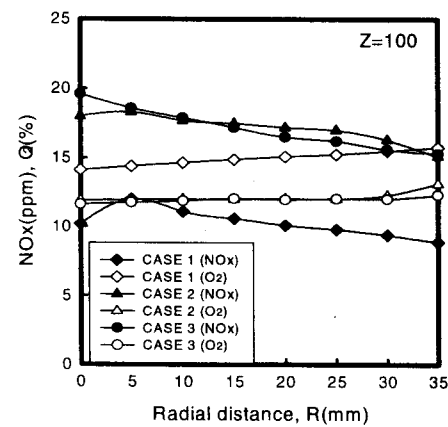
(a) CASE 1



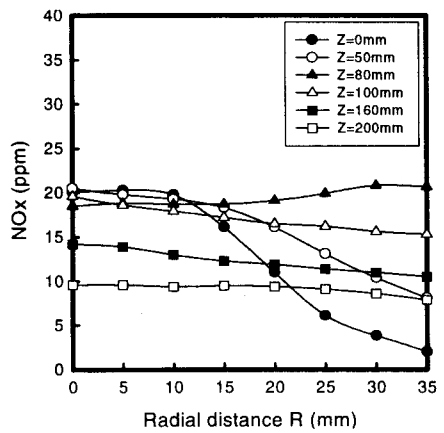
(b) Z=50mm



(b) CASE 2



(c) Z=100mm



(c) CASE 3

**Fig.6** Radial distribution of NOx, O<sub>2</sub> at Z=0, 50 and 100mm of CASE 1, CASE 2 and CASE 3

**Fig.7** NOx Distribution of CASE 1, CASE 2 and CASE 3

한편, Fig. 6 는 위 세 가지 실험조건외의 NOx 분포와 산소농도분포를 나타내었다. (a) 즉, Z=0mm인 단면에서 산소농도는 CASE 1 에서는 R=20~25mm, CASE 2 에서는 R=15~20mm, CASE 3 에서도 R=15~20mm에서 산소농도가 급격히 떨어져 이 부근에서 연소반응이 지역적으로 활발함을 보여주며, 이것은 Fig. 4의 평균온도분포와 Fig. 5의 이온전류가 많이 나오는 영역과 일치하는 화염대 부근임을 알 수 있다. Z=50mm단면 이후에서는 전체적으로 산소농도는 낮게 나타나고, 하류쪽으로 갈수록 산소농도가 조금 높아져 있다. 이것은 Z=50mm단면 부근까지는 연소반응이 활발하다가, 그 이후에는 선회에 의해 반응에 참여하지 않는 과잉공기류속의 산소가 연소가스와 희석되어 높아진 것으로 추측된다.

Fig. 7 은 세 가지 실험조건외의 축방향 NOx 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 화염대 부근 또는 화염대 안쪽에서 피크치를 나타낸다. 이것은 선회의 효과로, 연소가스류가 존재하는 영역에서 높은 값이 나타남을 의미한다. 또한 하류쪽으로 갈수록 온도가 낮아서 NOx생성이 적은 것으로 보아 대부분이 Thermal NOx임을 보여주며, 반응에 관여하지 않은 공기류와의 혼합에 의한 영향도 있을 것으로 생각된다. 본 실험조건에서는 당량비가 증가함에 따라 NOx도 증가하는 것으로 나타났고 peak 값은 20ppm 정도로, 화염대 또는 안쪽부근에서 나타나지만 화염길이를 지난 위치에서는 10ppm 이하로 떨어지며, 그 분포도 반경방향으로 균일한 형상을 보인다.

#### 4. 결론

동축확산연소기의 당량비변화에 따른 세 가지 실험조건에서 화염구조와 NOx 분포를 고찰하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

(1) 당량비의 증가에 따라 화염길이가 길어지는데 축방향 Z=100mm 전후에서 본 실험의 3가지 Case모두 균일한 온도분포와 산소농도가 나타나는 것으로 보아 이 부근에서 연소반응이 종결된 화염길이의 끝임을 알 수 있다.

(2) 예를 들어 CASE 2의 Z=50mm단면에서 보듯이, 평균온도가 높고, 이온전류치가 많이 검출되며, 산소농도도 가장 낮은 영역, 이 부근이 화염대임을 확인할 수 있다.

(3) 본 실험조건에서는 당량비가 증가할수록 NOx 배출이 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 평균온도 분포가 높은 고온영역에서 NOx 배출이 많은 것으로 보아 온도에 의해 지배되는 Thermal NOx가 대부분 인 것으로 나타났다.

(4) 본 실험조건에서는 이온전류치가 높게 나타난 화염대 또는 안쪽부근에서 NOx의 최대치가 나타났고 하류에서는 반경방향으로 균일한 형상으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) S. Yuasa, 1986, "Effects of Swirl on the Stability of Jet Diffusion Flames" *Combustion and Flame*, Vol.64, pp.181
- (2) K. Aoki, 1991, "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, pp.2301
- (3) 이태우 외 3명, 1995, "난류강도가 확산 화염의 구조 및 NOx 생성에 미치는 영향", 한국연소학회 심포지움, pp.45~54
- (4) 김상우 외 1명, 1996, "가스터빈 연소기내의 미립화현상이 연소특성에 미치는 영향", 한국연소학회 논문집, pp.59~68
- (5) 이도형, 이우섭 외 2명, 1999, "동축 확산연소기의 선회유동특성과 화염구조

에 관한 연구”, 한국동력기계공학회  
추계학술대회, pp.77~83

(6) 이도형, 강인구 외 2명, 1999, “동축  
확산형 가스버너의 선회강도 및 공기  
과잉률 변화에 따른 연소특성”, 한국  
동력기계공학회 추계학술대회, pp.27~33

(7) 강인구 이우섭 외 2명, 1998, “중앙  
분공형 보염기 후류에 안정된 난류확  
산 화염의 구조에 관한 연구(I)” 한  
국동력기계공학회 논문집, 제2권, 2호,  
pp.13~20