

고온 배기가스의 산소농도가 비예혼합화염의 NOx 발생에 미치는 영향

손 화 승[†] · 김 호 영^{*}

(2001년 10월 26일 접수, 2002년 4월 16일 심사완료)

Effects of Oxygen Concentration on the NOx Emission of Non-premixed Flame in Hot Exhaust Gas

Hwa-Seung Sohn and Ho-Young Kim

Key Words: NOx Emission(질소산화물 배출가스), Non-premixed Combustion(비예혼합연소), NOx Formation(질소산화물 생성), Exhaust Gas Reburning(EGR, 배가스 재연소)

Abstract

The present study examined the possibility of NOx reduction in the high temperature industrial furnaces, duct burner of gas turbine cogeneration and two-stage gas turbine combustor. The experimental study was carried out for the non-premixed flame of second stage combustor with the variations of oxygen concentration in the hot exhaust gas of first stage combustor. It also examined the flammability range, temperature and NOx, CO₂, O₂ formation in the combustor with respect to oxygen concentration in which the fuel(natural gas) is supplying into the hot exhaust gas. The results show that the inner temperature of flame reaches 1,200°C at EGR O₂ 23% and that 15ppm of NOx at EGR O₂ 15.5% increases up to 60ppm at EGR O₂ 23%. It is believed that Fenimore's prompt NOx mechanism is more influential on the NOx formation than Zeldovich's thermal NOx mechanism does.

1. 서 론

최근 화석연료의 사용 증가로 인하여 지구환경 오염문제가 크게 대두됨에 따라 에너지의 효율적 이용과 온실가스 규제에 대응할 수 있는 저공해 고효율 연소시스템의 기술개발이 더욱 필요하게 되었다. 고온 배가스 연소는 산업체 공장에서 대기중에 버려지는 고온의 배가스를 이용한 고효율 연소, 산업용 가스터빈에서의 2차 연소기(Power Combustor) 연소, 가스터빈 열병합발전시스템에서 수요측 열수지 균형을 위한 덕트버너 연소 등에서

필요한 기술이다. 이와같은 연소방식은 1차 연소에 의한 고온, 희박산소상태의 배가스에 연료를 공급하여 재 연소시키는 방식으로 에너지의 효율적 이용과 공해물질인 NOx 저감을 목적으로 국내외적으로 많은 연구가 수행중에 있다.^(1,2)

고온, 희박산소상태의 기류에 연료를 분사하여 연소시키는 방식은 연소기 불꽃 주위에 흐르는 기류의 온도가 고온인 반면 산소농도는 희박하기 때문에 산소와의 화학반응강도가 활발하지 못한 상태에서 연소가 진행되므로 화염이 불안정한 상태가 된다. 반면 기류가 대기상태보다 고온이므로 연료의 화학적 반응을 활성화하여 화염내 온도분포를 대체로 안정화시키며 화염에서 국부적 고온 영역발생을 억제하므로써 thermal NOx생성을 저감시키는 것으로 알려져 있다.^(3,4,5)

이와 같이 고온의 배가스 실험조건에서 연료공급을 예혼합 연소방식으로 수행한다면 당량비(equivalence ratio) 조건에 의하여 화염내 온도 및

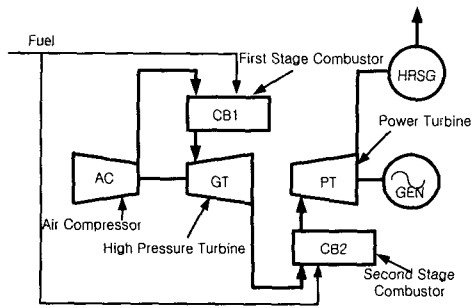
[†] 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원

E-mail : hssohn@kogas.or.kr

TEL : (031)400-75294 FAX : (031)406-1495

^{*} 고려대학교 기계공학과

NOx 등 성분조성에 영향을 미치며 특히 NOx 생성기구는 온도에 영향을 받는 thermal NOx 생성기구에 지배받는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험은 연료공급이 비예혼합화염 방식으로 화염중심부와 외부의 온도 및 성분조성에서 변화가 크며 국부적으로 반응이 불안정하여 soot생성율이 높고 NOx생성이 prompt NOx 생성기구에 지배받는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾



- AC : Air Compressor
- CB1 : First Stage Combustor
- CB2 : Second Stage Combustor
- GT : High Pressure Turbine
- PT : Power Turbine

Fig. 1 Concept of gas turbine cogeneration system

본 실험과 같이 배가스를 기류로 하여 배가스 내 산소농도별로 화염위치별 온도 및 NOx 등 성분조성을 분석하므로써 에너지 절약 및 NOx저감을 위한 NOx 생성기구를 이해하는데 중요한 방법이라고 판단된다.⁽⁷⁾

Fig.1은 배가스 재 연소방식을 응용하는 실례로서 가스터빈 열병합발전시스템의 개념을 나타내고 있다. 1차 연소기(CB1)에서 연료를 연소시켜 생성되는 산소농도 약 16%, 온도 약 500°C 상태의 배가스에 2차 연소기(CB2)에서 연료를 주입하여 재연소시키는 방식으로 1차연소 배가스의 잠열 에너지를 2차 연소기에서 이용함으로써 시스템 효율을 향상시키고 저산소 고온 배가스 연소에 의한 NOx 생성을 억제시킬 수 있는 방식을 사례로 보여주고 있다.⁽⁸⁾

1차 연소된 배가스를 기류로 하여 기류내에 확산화염을 형성시켜 기류의 산소농도별로 화염의 구조, 화염내 온도, NOx, CO₂, O₂등 성분 생성특성을 측정하여 상호 비교하므로써 특히 화염 온도에 따른 NOx생성 저감을 위한 특성을 규명하고자 수행하였다. 이와 같은 고온, 희박산소의 배가스 재연소 실험결과는 열병합시스템의 덕트버너, 저NOx 가스터빈 연소 및 산업용 연소로 등에 적용되어 에너지 절감 및 질소산화물 저감을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

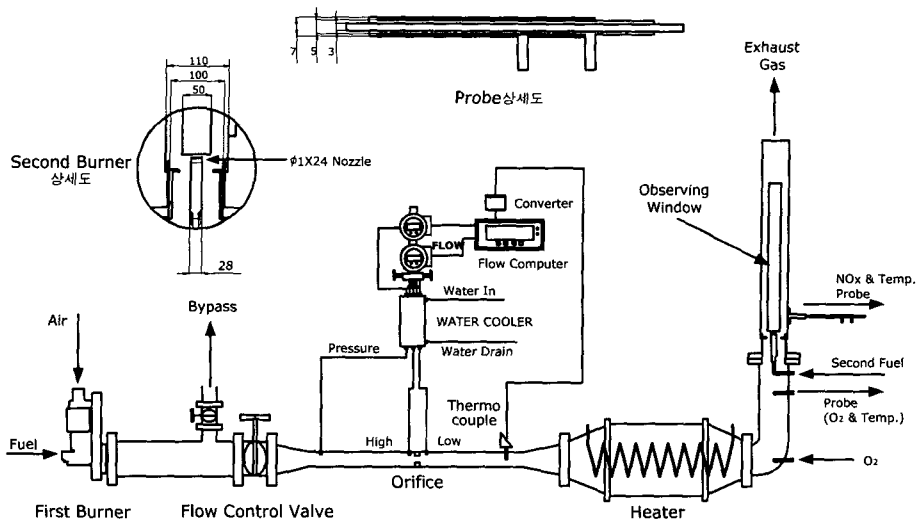


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig.2와 같이 1차 연소부, 배가스의 유량제어부, 산소농도 및 온도제어부, 2차 연소부 등 크게 4개 부분으로 구성되어 있다. 1차 연소장치는 건타입의 부분 예혼합식 상용버너를 개조하여 부착하였으며 1차 연소부에 공급되는 당량비와 유량은 항상 일정하게 공급되도록 공기와 유량공급 제어장치를 부착하였다. 배가스 유량제어부는 1차 연소부에서 연소된 배가스를 통하여 필요한 유량만 2차 연소부에 유입되고 잉여 배가스는 외부로 배출되도록 하는 장치로서 1차 연소부 후단에 부착하였다. 또한 배가스의 안정화를 위하여 $\phi 50\text{mm} \times \text{길이 } 1\text{m}$ 의 stainless관 중심부에 오리피스 장치를 부착하고, 전·후에 온도 및 압력센서를 배관내에 부착하여 유량컴퓨터에 의한 온도 및 압력을 보정하므로써 배가스의 온도 및 압력에 관계없이 항상 일정유량을 제어할 수 있도록 하였다. 산소 및 온도제어부는 유량제어부 후단에 배가스의 온도를 제어할 수 있는 24kW급 고온 전기히터와 산소공급장치를 부착하여 산소농도별, 기류온도별, 기류유량별로 실험할 수 있도록 하였다.

2차 연소부는 1차 연소부에서 생성된 배가스의 기류조건에 따라 화염 특성을 측정할 수 있는 부분으로 외부 공기와 차단된 $\phi 93\text{mm}$ (내경)의 원통형 주철관 중심부에 $\phi 1\text{mm} \times 24$ 개의 구멍이 기류에 직각으로 향하고 있어 이곳을 통하여 연료(천연가스)가 분사되어 화염을 형성시키는 부분이다. 주철관에는 화염을 외부에서 관찰할 수 있는 관찰창이 있고, 또한 화염내 수평 및 수직방향의 위치별로 온도 및 생성물(NOx, CO₂, O₂ 등)을 측정하기 위한 포집봉(sampling probe)이 장착될 수 있도록 관벽에 나사모양의 구멍을 내었으며 특히 이러한 부착물을 통하여 외부의 공기가 유입되지 않도록 하였다. 포집봉은 외경 $\phi 5\text{mm}$, 재질 stainless tube로서, 내부에 R-type 열전대($\phi 0.3\text{mm}$)가 내장되어 있는 ceramic tube를 삽입하여 온도와 화염내 성분의 포집이 가능토록 하였다. probe 끝 부분은 온도기록계와 화학발광법(chemiluminescent method)의 배가스 분석기(모델 PG250, Horiba사, 일본)에 연결하여 data를 수집

할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법 및 조건

본 연구목적에서와 같이 배가스 기류의 산소농도에 따른 화염내 온도 및 성분특성을 측정하기 위하여 우선 배가스 기류의 조건을 실험에 적합하도록 유지시켰다. 즉 1차 연소기에서 1차 연소에 의하여 형성된 배가스는 200℃, O₂ 15.5%, NOx 8.0ppm, CO 1,732ppm, CO₂ 3.64%의 성분으로 이루어 졌으며 이러한 배가스에 온도와 산소농도를 조절하여 2차 연소기에 유입토록 하였다.

1차 연소기에서 생성된 배가스는 자동온도조절 장치에 의하여 실험에 적합한 온도로 유지하며 또한 산소를 공급할 수 있는 장치가 부착되어 있다.

이와 같은 장치를 이용하여 고온 배가스 재연소 실험을 위한 기류의 조건 및 실험조건은 Table 1에서와 같다. 즉 기류의 온도는 항상 400℃, 유속 0.5m/s를 유지하면서 기류내 배가스의 산소의 농도를 15.5%, 19%, 23%로 변화시키면서 2차 연소기에서의 화염특성 실험을 수행하였다. 산업체의 연소로, 원동기의 배가스 등에 응용되는 배가스 온도가 대부분 400℃~500℃정도이므로 본 실험의 온도를 400℃로 설정하였으며, 실험용 노즐에서 실험시 기류의 산소농도가 소화(blow off)와 부상(lifting) 현상이 발생하는 시점의 산소농도인 15.5%를 시작점으로 하였다.

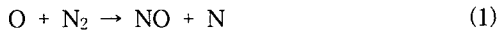
연료인 천연가스가 연소되는 과정에서 공해물질인 NOx생성은 대부분이 연소반응시 국부적인 고온현상으로 인하여 대기중의 질소가 산소와 반응하여 생성되는 thermal NOx와 공기대비 연료가 농후하며 화염의 온도가 비교적 저온인 1,500℃이하에서 화학반응에 의하여 지배하는 prompt NOx로 구분할 수 있으며 주요 반응과정을 보면 다음과 같다.

Thermal-NOx의 생성기구는 화학반응의 연쇄 반응기구(chain reaction mechanism)의 대표적인

Table 1 Experimental condition

속도 (m/s)	온도 (℃)	O ₂ 농도 (vol%)	측정 항목
0.5	400	15.5, 19, 23	NOx, CO ₂ , O ₂ , Temp.

반응으로 다음의 2가지 반응으로 설명된다.



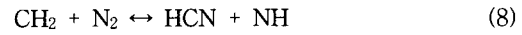
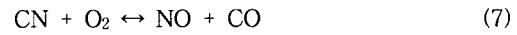
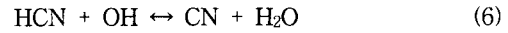
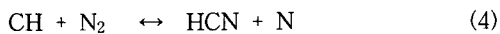
여기에 다음의 반응을 추가하여 extended Zeldovich mechanism이라 부른다.



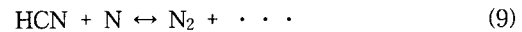
이 반응들은 복잡한 연소반응과정과 함께 일어나나 정상상태(steady state) 즉, 중간생성물들의 생성과 소멸이 같다고 가정할 수 있다. 이러한 상태는 중간생성물의 생성 반응이 매우 느리고, 또한 그 것의 소멸 반응이 매우 빠른 경우에 발생될 수 있으며 그 결과 반응물과 생성물의 농도에 비하여 라디칼의 농도는 상대적으로 매우 적게 된다. 이 경우 thermal NOx의 반응속도는 연료의 반응속도에 비하여 상당히 느리므로 O, OH, N₂의 농도는 평형상태로 가정할 수 있으며 N원자는 정상상태로 가정할 수 있다. 따라서 반응(1)은 느리며 반응(2)는 매우 빠르게 진행된다.

prompt NOx반응은 탄화수소계 연료를 사용하는 경우 NOx의 생성은 직접 N₂분자의 산화에 의하여 생성되어지는 것보다 초과하여 생성되어진다고 알려져 있다. 이러한 초과분에 대하여 Fenimore등이 실험적인 방법을 토대로 하여 prompt NOx를 처음 제시하였다. 특히 낮은 온도나 당량비가 농후한 경우와 잔류시간(residence time)이 작은 경우에 이러한 prompt NOx는 주요한 생성 요인이 된다고 알려지고 있다. 가장 대표적인 방식은 표면연소버너(surface burner), 다단연소(staged combustion systems), 가스터빈연소등이며 이들에서는 총 NOx의 발생량 중에서 큰 비중을 차지하고 있다. 그러나 대부분의 prompt NOx의 다단연소기(stationary combustor)에서의 총 NOx 생성에 대한 기여는 작지만, 현재의 연소기 형태의 급격한 발달로 총 NOx의 저감을 이루려는 목적에서 이러한 부분도 역시 중요한 요인으로 인식되고 있다.

Prompt NOx는 연료가 농후한 화염에서 특히 잘 나타내며 실제 생성은 복잡한 화학반응단계로 구성되어 있다. 이들 화학반응 단계에서는 많은 중간 성분이 다루어지고 있으며 대표적인 반응들은 다음과 같다.



여기서 많은 성분들이 화염 형성의 과정에서 나타나지만 탄화수소 화염에서 prompt NOx의 생성 근원은 CH와 CH₂이다.



특히 Prompt NOx의 생성은 단위 부피당의 C원자의 수에 비례하며 원래의 연료의 성질과는 무관하다. 당량비가 증가하여 탄화수소 중간생성물(radical)들이 증가하면 HCN의 생성량이 증가하게 된다. 그러므로 당량비가 증가하면 prompt NOx의 생성은 처음에는 증가하다 정점을 지나 산소의 영향으로 감소한다고 알려져 있다.⁽⁹⁾

최근의 연구결과에 의하면 NOx 생성률이 최대가 되는 위치는 CH의 분포가 최대가 되는 위치에 근접하여 있으며 연구결과에서 CH 반응(reaction)에서 prompt NOx가 생성된다는 것을 입증하고 있다.⁽¹⁰⁾

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염구조 특성

Fig. 3은 기류의 온도가 400°C인 조건하에서 산소농도에 따른 화염의 형태를 나타내는 사진이다. (a)는 산소농도 15.5%의 모양으로 화염이 노즐로부터 소화(blow off) 현상이 나타나는 한계점으로 연소상태가 극히 불안정하여 겨우 화염이 형성되는 상태이다. 산소농도가 15.5%이하로 감소하는 경우 화염은 즉시 부상(lifting) 현상과 함께 소화(blow off)가 된다. 화염의 길이는 130mm정도이며 청염의 색을 띠고 있으나 발광이 거의 없어 어두운 암실에서 육안으로 확인 가능한 상태이다. 이러한 현상은 온전한 확산화염 노즐이 아닌 다공의 노즐이 기류와 직각방향으로 연료를 분사하기 때문에 화염이 부상(lifting)현상이 나타남에 따라 화염중심부로 산소가 유입되어 부분적으로 예혼합 성격의 화염이 형성되기 때문으로 판단된다. (b)는 산소농도 19%로서 산소농도가 증가함에 따라 화염의 길이는 약 170mm로 길어지면서 불완전연소

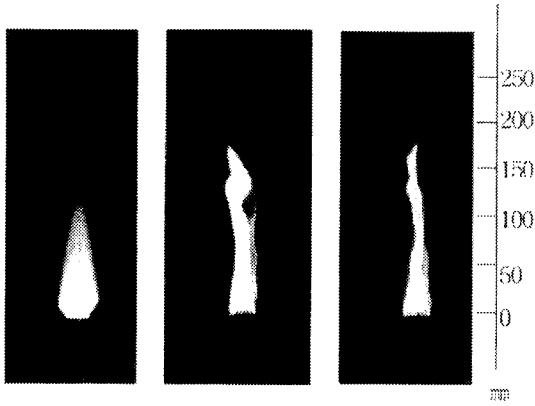


Fig. 3 Photographs of flame with respect to oxygen concentration

에서 볼 수 있는 황색 화염이 나타나기 시작한다. 기류의 산소농도가 23%인 (c)에서는 약 190mm 길이의 화염으로 19%에 비해 발광강도가 더욱 높아진 황색 화염으로 산소공급의 증가에 따라 화염의 요동이 감소하며 폭이 줄어들고 있다.

이와 같이 기류의 산소농도가 증가함에 따라 화염은 노즐에 부착하게 되며 이로 인해 기류중이 산소가 화염 중심부로 침투되지 못하여 확산화염 성격의 화염이 형성되기 때문으로 판단된다.

3.2 온도분포 특성

Fig. 4은 2차 연소기내에 형성된 화염에 대한 수직방향 높이 80mm 지점에서 수평방향으로의 산소농도별 온도분포를 나타내고 있다. 수직방향 80mm 지점은 산소농도별로는 차이가 있지만 화염길이의 약 65% 지점으로 온도와 NOx 생성 분포가 가장 높은 지점이다. 화염중심부에서는 산소농도 15.5%인 경우 약 1,150℃ 정도이며 수평방향으로 15mm지점에서 최대온도인 약 1,250℃ 정도를 나타내고 있다. 기류의 산소농도가 23%로 증가하면 화염중심부의 온도는 약 950℃, 수평방향 15mm 지점에서는 약 1,150℃ 정도까지 상승하는 것으로 나타나고 있다.

화염 중심부에서 수직방향에 대한 온도분포는 Fig. 5에 나타내었다. 수직방향의 온도분포에서도 산소농도가 15.5%인 경우 수직높이 40mm 부근에서 가장 높은 약 1,180℃ 정도이며 상층부로 올라갈수록 온도는 다소 감소하여 160mm 이상에서는 급격히 감소하고 있다. 또한 산소농도가 증가할수록 화염 중심부의 온도는 감소하여 23%인 경우

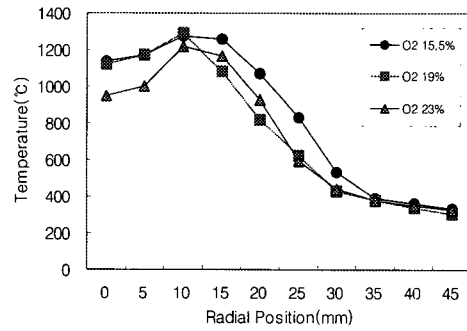


Fig. 4 Radial distribution of temperature with respect to oxygen concentration

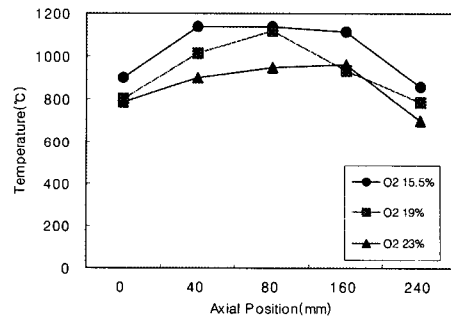


Fig. 5 Axial distribution of temperature with respect to oxygen concentration

대체로 위치에 관계없이 200℃ 정도 하락하는 경향을 나타내고 있다.

이와 같은 현상은 노즐의 특성상 산소농도 15.5%에서는 기류중의 산소가 화염중심부에 침투하여 청색화염을 나타내는 반면에 기류의 산소농도가 증가할수록 화염은 노즐에 부착하여 기류중의 산소가 화염중심부에 침투되지 못하여 황염을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 다량의 분진(soot) 생성과 복사열 손실로 인하여 화염내 온도는 다소 하락하는 것으로 판단된다.

3.3 NOx 분포 특성

Fig. 6은 수직높이 80mm지점에서 수평방향으로의 NOx분포를 나타낸 결과이다. 수평방향에서 산소농도에 관계없이 15~20mm 지점 근처에서 최대의 NOx생성량을 나타내고 있다. 이는 화염중심부에서는 산소가 중심부로 침투하지 못한 연소반

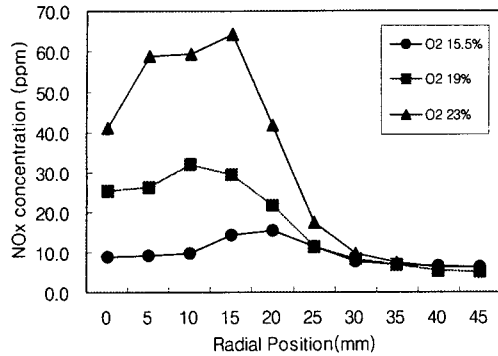


Fig. 6 Radial distribution of NO_x with respect to oxygen concentration

응 초기단계로 NO_x생성이 활발하지 않기 때문이며 화염표면으로 접근할수록 반응이 활발해져 NO_x생성이 급격히 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 산소농도 15.5%에서는 화염의 수평축 위치에 관계없이 약 10ppm 정도로 극히 적은량이 발생하고 있으며 산소농도가 증가할수록 NO_x생성량도 증가하여 23%에서는 최대 65ppm까지 생성되는 것으로 나타나고 있다. 산소농도 23%에서는 중심부에서 약 40ppm 수평축 15mm지점에서 최대인 65ppm까지 증가하다가 급격히 감소하고 있다. 이것은 화염중심부에서 보다는 화염표면에 접근할수록 연소화학반응의 증가로 NO_x생성량이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 화염 중심에서의 축방향에 대한 NO_x 발생량을 산소농도별로 분석한 결과이다. 산소농도가 15.5%인 경우 NO_x생성은 중심부에서 약 5ppm, 수직높이 240mm에서는 약 15ppm까지 증가하고 있다. 산소농도가 증가할수록 NO_x생성량은 급격히 증가하여 23%에서는 노즐 표면에서 약 30ppm, 수직높이 80mm에서 최대량인 약 40ppm까지 생성되고 있으며 80mm이상에서는 급격히 감소하고 있다. 이것은 화염이 약 80mm 정도까지 형성되고 있기 때문이다.

이상의 결과에서 화염내 온도분포와 NO_x생성 분포를 비교해 볼 때 기류내 산소농도가 증가할수록 화염내 온도는 약간 감소하는 반면에 NO_x생성 분포는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 일반적으로 화염온도가 1500℃ 이상인 조건에서는 thermal NO_x 생성기구 의하여 NO_x생성을 지배하지만 본 조건에서와 같이 연료가 농

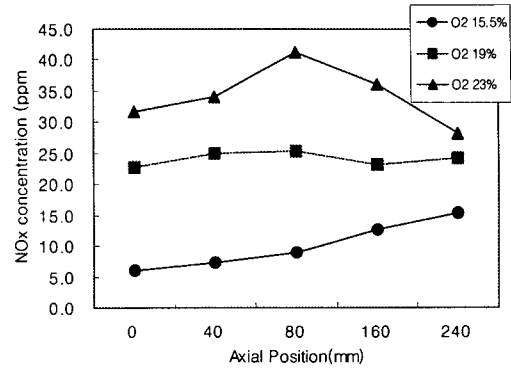


Fig. 7 Axial distribution of NO_x with respect to oxygen concentration

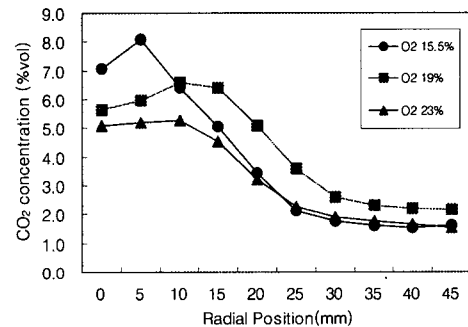


Fig. 8 Radial distribution of CO₂ with respect to oxygen concentration

후하고 화염이 저온인 확산화염(층류성 화염)에서는 prompt NO_x 생성기구가 지배하기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 CO₂ 분포 특성

CO₂는 연료중의 C성분이 1차로 불완전 산화되는 경우 CO가 생성되고 완전연소율이 증가되는 경우 CO₂는 증가하게 된다. 그러므로 일반적으로 화염내에서 CO 생성이 증가하면 CO₂는 감소하고 CO가 감소하면 CO₂ 생성은 증가하게 된다.

Fig. 8은 화염내 생성되는 CO₂의 수평분포를 나타낸 결과이다. 산소농도가 15.5%인 경우 최대량은 $x=5$ mm 지점에서 약 8% 정도 생성되고 있으며 19%에서는 $x=10$ mm 지점에서 최대인 6.8% 정도, 23%에서는 $x=10$ mm 지점에서 5.2% 정도가 생성되고 있다.

Fig. 9는 화염내 수직방향으로의 CO₂분포를 나타낸 결과로서 산소농도가 15.5%인 경우 y=80mm 지점에서 최대인 약 7% 정도 생성량을 보이고 있으며 산소농도가 증가할수록 화염의 상층부에서 많은 양이 생성되고 있다. 이상의 두 결과에서 볼 때 CO₂의 생성은 산소농도가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 CO₂생성 특성이 화염의 온도분포와 마찬가지로 실험장치의 특성상 산소농도가 증가할수록 화염표면에 예혼합화염에서 확산화염으로 변함에 따라 화염온도가 하락하고 동시에 CO₂생성량도 감소하는 것으로 판단된다.

3.5 O₂ 분포 특성

Fig. 10는 수평방향으로의 화염내 산소농도를 나타낸 결과이다. 화염중심부에서는 기류의 산소농도에 따라 약 7.5%, 9.5%, 12.5% 정도의 O₂를

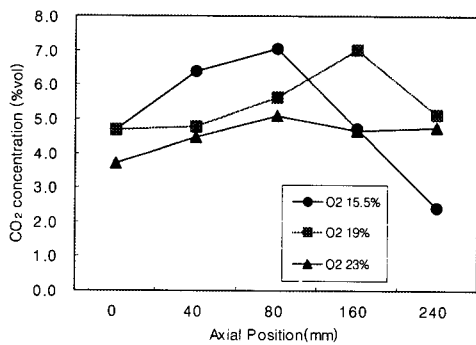


Fig. 9 Axial distribution of CO₂ with respect to oxygen concentration

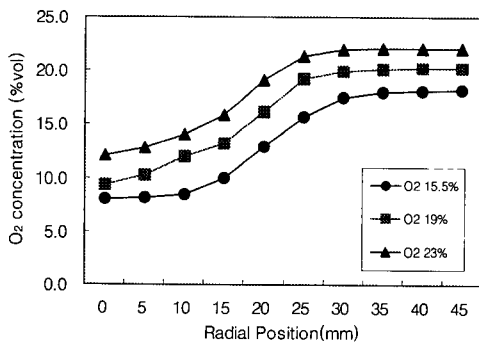


Fig. 10 Radial distribution of O₂ with respect to oxygen concentration

보이고 있으며 화염 중심부에서 표면으로 접근할수록 O₂ 농도는 증가하며, 화염형성 외부로 판단되는 20mm 이상에서는 약 17%, 19%, 21% 정도의 O₂ 분포를 나타내고 있다.

Fig. 11과 같이 수직분포에서도 하층부에서는 약 6~9.5%의 O₂ 분포를 보이며 상층부로 올라갈수록 증가하여 240mm에서 최대 18% 정도를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 화염중심부와 노즐 표면 근처에서는 연소반응 이전으로 연료가 농축하여 산소함유량이 적으며 화염표면에 접근할수록 화염 외부로부터 유입되어 산소농도가 증가하는 것으로 판단된다. O₂분포는 외부 기류의 농도와 화염위치에 따라 고른 분포를 나타내고 있다.

3.6 산소농도에 따른 배출특성 비교

화염내에서 생성되는 온도, NO_x 및 기타 생성

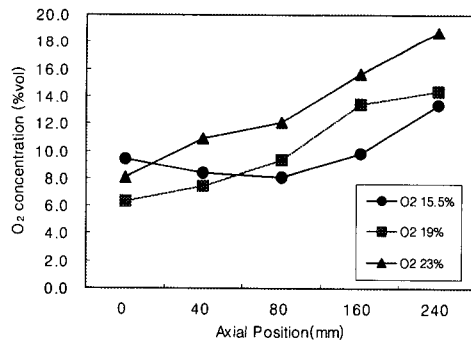


Fig. 11 Axial distribution of O₂ with respect to oxygen concentration

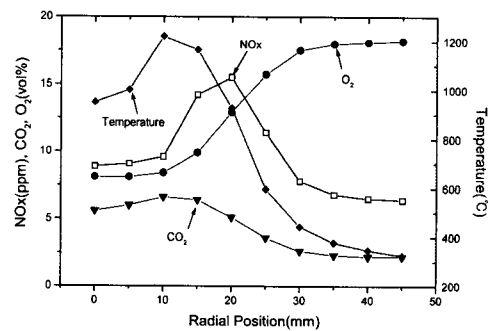


Fig. 12 Radial distribution of major gas species and temperature profile(O₂ 15.5%)

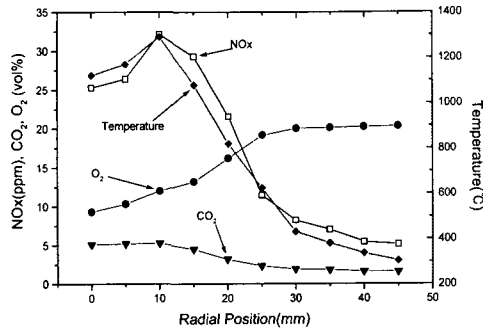


Fig. 13 Radial distribution of major gas species and temperature profile(O₂ 19%)

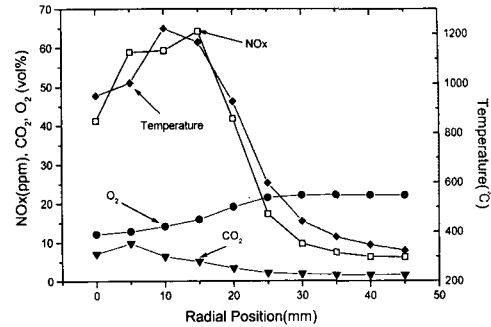


Fig. 14 Radial distribution of major gas species and temperature profile(O₂ 23%)

물은 상호 밀접한 관계가 있다. 이러한 상호관계를 비교 분석함으로써 NOx 등 공해물질을 저감시키는 대안제시가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 12은 기류의 온도 400℃, 산소농도 15.5%인 조건에서 화염의 수직높이 80mm 지점에서 온도, NOx, CO₂, O₂의 수평방향 분포를 나타내고 있다. 이때 수평방향 화염형성은 약 15~20mm 정도인 것으로 판단된다. 온도분포는 화염 표면에서 중심부방향으로 약 5mm 접근한 지점에서 최대인 약 1,200℃를 나타내고 있으며 NOx는 화염의 표면지점에서 최대인 약 16ppm 정도를 나타내고 있다.

온도분포는 연료의 반응시 발생하는 열이 기류에 전달되어 표면보다는 약간 중심부에서 최대를 나타내고 NOx는 연소반응이 가장 활발한 화염표면에서 최대를 보이는 것으로 판단된다. 이와 함께 CO₂의 분포는 온도 및 NOx 분포와 유사한 경향을 나타내고 있는데 이는 반응이 활발한 화염표면에서 산화반응에 의한 CO₂가 증가하기 때문이다.

Fig. 13는 기류의 산소농도가 19%인 조건에서의 분포를 나타낸 결과이다. 온도분포는 기류의 산소농도 15.5%보다 약간 상승된 반면에 NOx 분포는 2배 가까이 증가하고 있으며, 산소농도는 약간 증가하고 CO₂에는 영향이 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한 온도와 NOx의 최대생성 지점은 약간 줄어든 약 15mm에서 나타나고 있다.

Fig. 14는 기류의 산소농도가 23%인 조건에서의 결과이다. 여기에서도 기류의 산소농도가 증가함에 따라 화염내 온도는 다소 상승한 반면에

NOx 생성은 크게 증가하고 있다. CO₂의 분포는 기류의 산소농도에 의한 영향이 적으며 O₂분포는 약간씩 증가하며 수평방향에 따른 분포는 일정한 경향을 나타내고 있다.

기류의 산소농도에 따른 화염내 특성을 비교분석한 결과 기류의 산소농도가 증가함에 따라 온도 증가는 미미한 반면에 NOx는 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

화염 주위로 400℃의 배가스 기류를 속도 0.5m/s로 흐르게 하면서 기류의 산소농도를 15.5%, 19%, 23%로 변화시키면서 화염내에서 형성되는 온도, NOx, CO₂, O₂ 및 화염형태에 대한 특성을 조사하였다. 이때 2차 연소기의 노즐은 기류와 수직방향으로 $\phi 1\text{mm} \times 24$ 개의 구멍으로부터 천연가스가 분사되어 하나의 확산화염 형태로 형성되는 구조로서 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 노즐특성상 기류의 산소농도가 15.5%에서는 화염이 소화(blow off)와 부상(lifting) 현상이 나타나 산소가 화염내 유입되어 발광 빛이 거의 없는 청염(green color)를 나타내며 산소농도가 증가하는 경우 화염내부로 산소유입이 차단되어 확산화염 형태로 화염이 길어지고 강한 발광 빛에 황염(yellow color)의 색을 나타내었다.

(2) 기류의 산소농도가 15.5%에서의 화염내 최대 온도는 1,250℃ 정도이나 기류중의 산소농도가 증가함에 따라 약 1,150℃ 정도로 오히려 다소 감소하였으며, CO₂분포는 온도분포와 유사한 경향으로

로 나타났다.

(3) NOx생성은 화염 표면에서 최대량을 나타내고 화염중심부로 접근할수록 급격히 감소하고 있다. 온도는 NOx최대 생성지점보다 다소 화염 중심부에서 최대를 나타내고 마찬가지로 중심부에서는 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 화염내 NOx분포는 기류의 산소농도 증가에 따라 화염온도는 약간 하락함에도 불구하고 급격히 증가하는 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 1500℃ 이상의 높은 온도에서 지배하는 thermal NOx생성기구보다는 연료가 농후하고 낮은 온도 조건에서 지배하는 prompt NOx 생성기구에 의해 지배되기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 연소기기에서 실제로 응용되는 400~600℃ 정도의 배가스에 대한 재연소 연구는 에너지의 효율적 이용과 함께 공해물질인 NOx저감을 위한 방법으로서 지속적인 연구가 필요한 분야라고 판단된다.

참고문헌

- (1) Toshiaki Hasegawa and Ryoichi Tanaka, 1997, "Combustion with High Temperature Low Oxygen Air in Regenerative Burners," *The First Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 290~293, Japan.
- (2) Graham J. Nathan and R. E. Luxton, 1992, "Reduction NOx Emissions and Enhanced Large Scale Turbulence from a Precessing Jet Burner. 25 Symposium on Combustion Institute, pp. 1399~1405.
- (3) Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., 1997, "Experimental Study of NOx Reduction by lifted Turbulent Jet Flame in Highly Preheated Flows," *The First Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 298~301, Japan.
- (4) Yutaka Suzukawa, Shunichi Sugiyama, Yoshimichi Hino, Muneohiro Ishioka and Isao Mori, 1997, "Heat Transfer Improvement and NOx Reduction by Highly Preheated Air Combustion," *Energy Convers. Management*, Vol 38, No. 10-13, pp. 1061~1071.
- (5) Yutaka Suzukawa, Shunichi Sugiyama, Isao Mori, 1996, "Heat Transfer Improvement and Nox Reduction in an Industrial Furnace by Regenerative Combustion System," *Proceedings of the 31th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 804~809.
- (6) Fenimore, C. P., 1971, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames," *Thirteenth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 373~379.
- (7) Feese, J.J. and Turns, S. R., "Nitric Oxide Emission from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition," *Combustion and Flame*, Vol 113, pp. 66-78, 1998.
- (8) Ohono, Y. Hisazumi, Y., "Combustion Characteristics under Condition of Low-oxygen Atmosphere and High-level Steam Addition," *the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, October 2000, Kobe, Japan. A101.
- (9) 정대현, 양제복, 노동순, 김원배, "고온, 1998, "회박공기연소에 관한 실험적 연구," *한국연소학회*, Vol. 3. pp. 49~57.
- (10) 유현석, 이증성, 한정욱, 1999, "천연가스 선회예혼합 화염의 NOx생성 및 배출특성," *대한기계학회 논문집 B권*, 제23권 제6호, pp. 786~794.