

난류강도가 수소 동축분류 난류 확산화염의 NOx 생성에 미치는 영향

한지웅* · 정영식** · 이창언***
(1999년 12월 14일 접수)

The Effect of Turbulence Intensity on the NOx Formation of Hydrogen Coaxial Jet Turbulent Diffusion Flames

Ji-Woong Han, Young-Sik Jeong and Chang-Eon Lee

Key Words : Coaxial Jet Turbulent Diffusion Flames(동축분류 난류 확산화염), Hydrogen Flame(수소화염), Thermal NOx(서멀 NOx), Turbulence Intensity(난류강도)

Abstract

Experimental investigations were conducted for two hydrogen-nitrogen coaxial jet diffusion flames. A flame was a conventional coaxial jet diffusion flame and the other was a coaxial jet diffusion flame of which ambient air-jet turbulence was intensified. In this study, firstly two kinds of NOx measuring system were compared by using different convertors, secondly the NOx formation characteristics were investigated in order to examine the effect of turbulence intensity. In this study it is known that stainless convertor has some problem in the converting process from NO₂ to NO in fuel rich region but molybdenum convertor can detect the amount of NOx correctly. The increase of turbulence intensity reduces the thermal NOx less than a half in our experiment and this effect is conspicuous near the nozzle. The conversion rate from NO to NO₂ and the portion of NO₂ among NOx are increased with turbulence intensity. These NOx measurements will help to understand the influences of turbulence intensity on NOx formation.

1. 서론

연소가스중의 질소산화물(NOx)은 인체에 해로운 뿐만 아니라 광화학 스모그, 산성비를 유발하는 매우 유해한 물질이며, 그 발생기구 및 제어방법이 난해하여 연소기 설계 및 운전 등에 있어서 가장 심각하게 고려해야 할 오염물질이다. 또 NOx 생성에 대한 반응기구(reaction mechanism)는

비교적 잘 알려져 있으나, 실용 연소장에서의 NOx 생성은 이 반응기구 이외에도 반응과 유동간의 상호작용, 체류시간, 연료종류, 복사 및 부력 효과 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다.⁽¹⁾ 따라서 NOx 배출이 적고 고효율 연소가 가능한 실용 연소기를 개발하기 위해서는 위에 언급한 각종 인자가 NOx 생성에 미치는 영향을 체계적으로 규명할 필요가 있으며, 더 나아가서 이들 인자의 영향을 고려할 수 있는 연소 모델 개발이 시급한 실정이다.

이전부터, 난류 연소장의 각종 인자가 NOx 생성에 미치는 영향에 대한 많은 연구⁽²⁻¹⁰⁾가 수행되었다. Turns⁽⁴⁾는 동축분류 난류 확산화염(이하 "분류 화염")의 EINOx는 화염체적과 체류시간의 곱에 비례하여 증가함을 보였다. Chen,⁽⁵⁾ Driscoll⁽⁶⁾ 등

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
** 인하공업전문대학 기계과
*** 회원, 인하대학교 기계공학과
Email : chelee@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7323 FAX : (032)868-1716

은 수소 분류화염의 EINO_x는 체류시간과 연료유속을 노즐직경으로 나눈 값의 1/2승과의 곱에 비례하지만, 탄화수소계 분류화염에서는 복잡한 화학반응 및 soot에 의한 복사효과 등으로 인하여 수소화염에서와 같이 간단한 비례관계로 표현하기 어렵다고 하였다. Rokke⁽⁷⁾는 탄화수소계 분류화염에서 부력효과가 지배적일 경우 NO_x 발생량이 Froude수의 3/5승에 비례하여 증가한다는 사실을 밝혔다. 또한 Fujimori⁽⁸⁾ 등은 부상화염 및 부착화염을 비교 실험한 결과, 부상화염에서는 노즐 출구에 형성되는 예혼합 영역이 희박한 상태에서 연소하기 때문에 화염 상류지역의 온도가 감소하여 NO_x 배출이 부착화염에 비해 현저히 감소됨을 보였다. 한편 Hori⁽⁹⁾는 선회 연소기를 이용한 분류화염에서의 NO₂ 생성에 관한 연구를 통하여, NO₂는 고온의 연소가스와 저온의 공기가 혼합하는 비교적 저온 혼합영역에서 NO가 HO₂와 반응하여 발생함을 밝혔다. 최근 Feese⁽¹⁰⁾ 등은 CH₄ 분류화염을 대상으로 각각 연료 및 주위 공기류를 질소로 희석시킨 경우, 일반적으로 NO_x 발생량은 감소하나, 희석에 의해 복사 열손실이 감소하여 화염 최고온도가 상승하는 경우에는 오히려 NO_x 발생량이 증가한다고 보고하였다. 저자들⁽¹¹⁾도 연소장의 난류강도가 화염 구조 및 NO 생성에 미치는 영향을 규명하여, 연소장의 난류강도도 화염구조 및 NO 생성에 많은 영향을 미침을 보고한 바 있다. 그러나, 당시 연구에서 이용된 스테인리스 스틸 컨버터가 내장된 화학발광식 NO_x 분석기는 연료 과잉 영역에서 NO_x를 측정할 경우 NO₂ 변환과정에 문제점이 있어, NO₂ 생성이나 NO에서 NO₂로의 변환과정 등 NO_x 생성특성에 대해서 자세히 논의할 수 없었다.

본 연구에서는 우선, 연료 과잉 영역에서의 NO_x 측정시의 문제점을 화학발광식 분석기의 컨버터 재질을 바꾸면서 검토하여 NO_x 농도를 정확히 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 실험은 주위 공기 유로에 평균유속과 등방성을 그대로 유지하면서 난류강도만을 증가시키도록 고안된 난류발생장치를 장착한 연소기를 대상으로 하였으며, 연료로는 반응기구가 단순하고 복사 열전달 효과가 적으며, prompt NO_x가 발생하지 않는 수소를 사용하였다. 본 연구에서는 주위 공기의 난류강도를 인위적으로 강화시킨 분류화염과

통상의 분류화염을 대상으로, 위에 언급한 측정 시스템을 이용하여 연소장 전 영역에서의 NO, NO_x 농도 측정을 통하여, 난류강도가 수소분류화염의 NO 및 NO₂ 생성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 본 연구의 목적 중 하나는 여기서 얻어질 데이터를 NO_x 생성에 난류강도의 영향을 고려할 수 있는 소화염(flamelet) 연소 모델의 개발 및 검증에 이용하고자 하는 것이다.

2. 실험장치 및 실험방법

연구 대상인 화염은 Fig. 1과 같은 연소기에서 형성된 분류화염으로, 실험장치의 상세에 대해서는 문헌⁽¹¹⁾을 참고하기 바란다. 본 장치의 특징은 주위 공기류의 난류강도를 변화시키기 위해 공기 유로에 정사각형 단면을 갖는 5개의 ring이 계단식으로 배열되어 있는 난류 발생장치를 설치한 것이다. 이 난류발생장치는 주위 공기류의 난류강도를 크게 할 경우에만 설치하였으며, 통상의 분류화염인 경우에는 난류발생장치를 제거하고 실험하였다. 이하, 난류발생장치를 설치한 경우는 난류강도가 강한 분류화염, 제거한 경우는 난류강도가 약한 분류화염 혹은 통상 분류화염이라 하겠다. 두 화염에 대한 연소조건은 Table 1과 같으며, 난류발생장치는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 주위 공기류의 평균유속과 등방성을 그대로 유지하면서 난류강도만을 16배 증가시킨다. 따라서 두 분류화염의 차이점은 오직 주위 공기류의 난류강도만이 16배 큰 것으로 그 외 조건은 모두

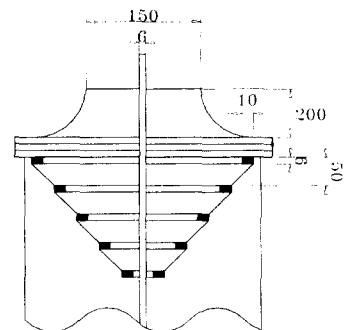


Fig. 1 Combustor with turbulence generator

동일하다. 그리고 이들 유속 데이터는 LDV를 이용하여 연료 노즐 직후 단면(x=1 mm)에서 측정된 것이다.

실험에서 평균온도 측정은 열전대(직경 0.1 mm, Pt-Pt/13%Rh)를 사용하였으며 복사에 의한 열손실은 보정하지 않았다. 질소산화물을 제외한 화학종 농도는 수냉 스테인리스 프로우브에 의해 흡입한 시료가스를 가스 크로마토그래피에 의해 분석하여 측정하였으며, 이들에 대한 상세한 내용은 문헌 (11)을 참조하기 바란다.

NOx의 측정은 화학발광식 분석기(TIA, Model 911)를 이용하였다. 화학발광원리를 이용한 NO 측정법⁽¹²⁾은 반응(R1)~(R3)식과 같이 여기(excited)된 상태의 분자가 기저상태로 전이할 때 방출되는 화학발광의 강도를 측정하여 NO농도를 분석하는 것으로, 샘플가스중의 NO양은 방출되는 빛의 양과의 비례 관계에서 결정된다. 또한 이 분석기를 이용하여 NO농도를 측정할 때는 시료가스가 컨버터를 통과하지 않지만, NOx(NO+NO₂)농도를 분석하기 위해서는 우선 컨버터를 이용하여 NO₂를 NO로 모두 변환시켜야 하며, 기존의 NO와 변환된 NO를 합하여 NOx농도를 측정하게 된다.

다. 이 컨버터의 재질에는 스테인리스 스틸, 몰리브덴 및 탄소 등이 있으며 재질에 따라서는 시료중의 공존가스의 영향으로 컨버터가 정상적인 작동을 하지 않아 측정된 NOx 농도치가 실제보다 작게 되는 경우가 있다.⁽¹³⁾ 스테인리스 스틸 컨버터를 사용한 기존의 연구⁽¹¹⁾에서는 이와 같은 변환과정에 문제점이 발견되어, 본 연구에서는 스테인리스 스틸 컨버터와 몰리브덴 컨버터를 병렬로 연결한 NOx 분석기를 제작하여 컨버터의 재질에 따른 문제점을 검토, 해결하였으며, 결과에 대해서는 실험고찰 부분에서 논의하기로 한다. NOx측정시 시료가스는 문헌 (3)에서 추천하는 석영 프로우브로 채집하였고, 채집직후 시료가스를 급속 팽창시켜 반응을 동결시키기 위해 프로우브 선단의 직경을 0.1 mm에서 10 mm로 확대시켰다. 각 화학종의 농도 측정은 수분을 제거한 건농도 상태에서 수행하여, 습농도로 환산하였다.

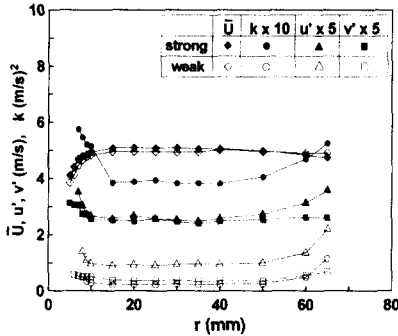
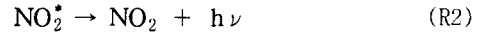
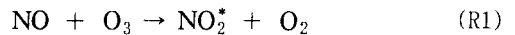


Fig. 2 Comparison of coaxial air inlet condition between two flames

3. 실험결과 및 고찰

3.1 컨버터 재질이 NOx 측정값에 미치는 영향

Fig. 3은 연료성분이 존재하는 축방향거리 x=30 mm 단면, Fig. 4는 연료성분이 존재하지 않는 x=300 mm 단면에서의 온도 및 농도분포를 도시한 것으로, (a)는 주요 화학종 및 온도분포, (b)는 스테인리스 컨버터와 몰리브덴 컨버터를 사용하여 측정된 NO 및 NOx의 농도분포이며, 연소 조건은 두 그림 모두 주위 공기류의 난류강도가 강

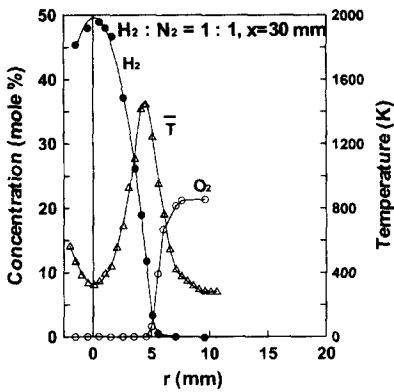
Table 1 Experimental conditions of two flames

| Air (Average Velocity : 5m/s) | | Fuel (Average Velocity : 25m/s) | | |
|------------------------------------|---------------------------|---|-------------------------|--------|
| Turbulence Intensity | Turbulence Kinetic Energy | Mixing Ratio (H ₂ : N ₂) | Low Heating Value | Re No. |
| Weak | 0.023 (m/s) ² | 1 : 1 | 5.4 MJ/m ³ N | 5400 |
| Strong | 0.37 (m/s) ² | | | |

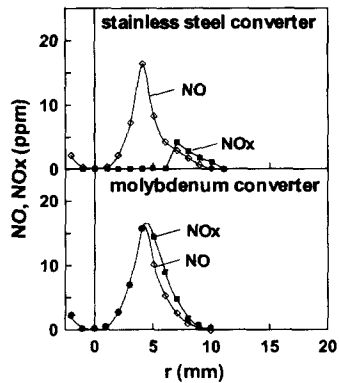
한 경우이다. 우선 Fig. 4를 보면 연료성분인 수소가 전 영역에서 존재하지 않으며, 두 컨버터에서 측정된 NO 및 NO₂ 농도값이 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 연료성분이 존재하지 않는 영역에서는 스테인리스 스틸 컨버터와 몰리브덴 컨버터 모두 사용 가능하다. 다음에 연료성분이 존재하는 Fig. 3을 보면 NO농도는 두 결과가 거의 일치하고 있으나, NO_x농도는 최소한 NO농도보다 높아야 함에도 불구하고 스테인리스 스틸 컨버터를 사용한 경우 수소가 존재하는 영역에서는 NO_x가 전혀 검출되지 않고 있다. 이 결과는 연료성분이 존재하는 영역에서 NO_x를 측정할 때 스테인리스 스틸 컨버터는 NO₂를 NO로 변환하는 과정에 문제점이 있음을 보여주는 것으로, 그

상세한 이유는 다음과 같다.

화학발광식 NO_x 분석기는 컨버터 내에서 샘플 가스중의 NO₂를 반응식(R4)에 의해 NO로 환원시킨다.⁽¹²⁾ 이때 스테인리스 스틸 재질의 컨버터인 경우 컨버터 내로 유입된 수소성분에 의해 NO는 다시 N₂로 환원된다고 알려져 있다.^(3,13) 이것은 스테인리스 스틸의 피막을 구성하고 있는 크롬산 화물의 촉매작용으로 수소와 함께 공존하는 NO가 반응식 (R5)를 통하여 다시 H₂O 및 N₂로 환원되기 때문⁽¹⁴⁾이라고 보고되어 있다. 따라서 Fig. 3 및 Fig. 4의 결과는 연료성분이 존재하는 영역에서 스테인리스 스틸 컨버터는 NO₂ 변환과정에 문제점이 있으며, 몰리브덴 컨버터를 사용하여야 정상적인 측정이 가능함을 보여주는 것이다.

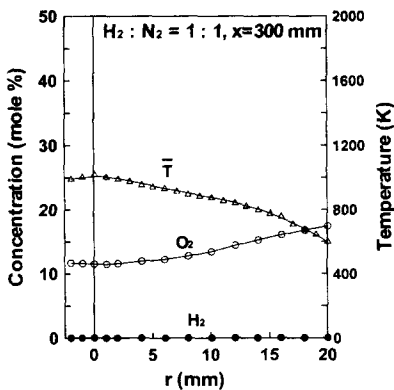


(a) Major species and temperature

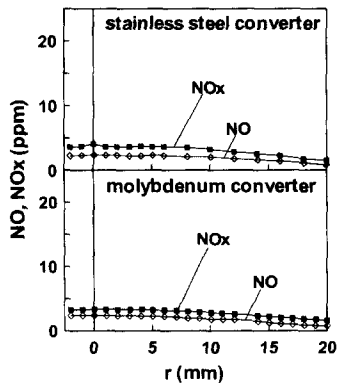


(b) NO and NO_x concentration

Fig. 3 Effect of different converter materials on Nitric Oxide concentration in fuel rich region

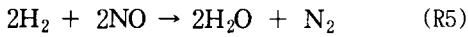
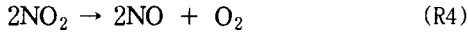


(a) Major species and temperature



(b) NO and NO_x concentration

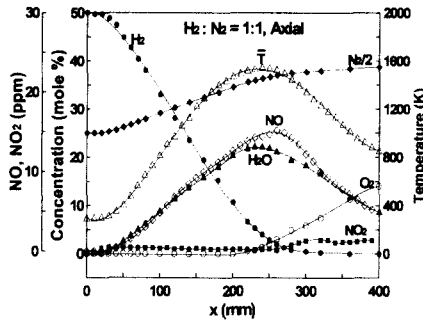
Fig. 4 Effect of different converter materials on Nitric Oxide concentration in oxygen rich region



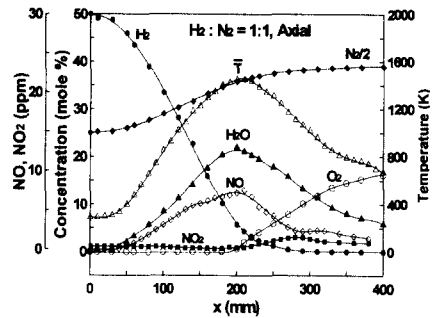
3.2 난류강도가 NOx 생성에 미치는 영향

Fig. 5는 분류화염 중심축상의 평균온도 및 각

화학종의 농도 분포를 도시한 것으로, (a)는 통상의 분류화염, (b)는 난류강도가 강한 경우의 측정 결과이다. 우선 난류강도에 따른 분류화염구조의 변화를 비교해 보면, 난류강도가 강한 경우에는 축방향 거리에 따른 수소 농도의 감소 및 산소 농도의 증가가 빠르게 진행되어 중심축상의 화염

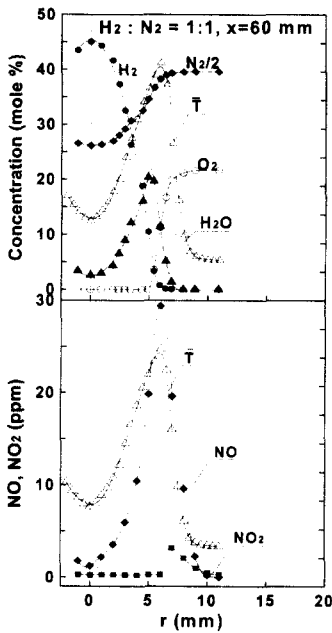


(a) Weak turbulence

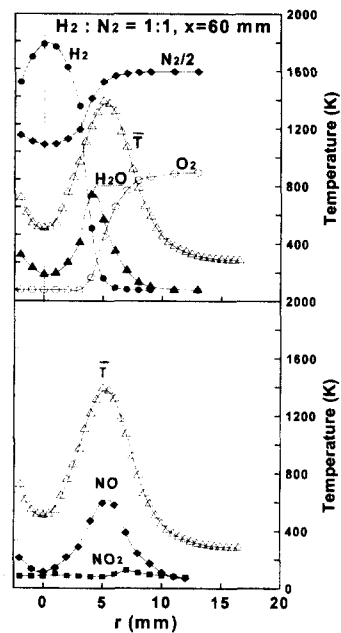


(b) Strong turbulence

Fig. 5 Centerline profiles of temperature, major species, NO and NO₂ concentration



(a) Weak turbulence



(b) Strong turbulence

Fig. 6 Radial profiles of temperature, major species, NO and NO₂ concentration at x=60mm

대 위치가 약간 상류로 이동하며, 더불어 평균온도의 최고점 위치도 상류로 이동하면서 그 최고치는 약 100 K 정도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 변화는 주위 공기류의 난류강도를 증가시키면 연료 분류와 주위 공기류 사이의 혼합이 촉진되기 때문에 발생하는 현상으로, 주위 공기류 난류강도의 변화가 화염구조에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그러나 이들에 대한 상세한 논의는 이미 보고한 바가⁽¹¹⁾ 있기 때문에 여기서는 생략한다. 다음에 NOx 농도를 살펴보면 현저한 차이가 있음을 알 수 있는데, 통상의 분류화염의 경우 약 15 ppm이었던 NO 농도의 최고치가 주위 공기류 난류강도가 강한 경우에는 8 ppm으로 크게 감소하나 NO₂ 농도에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 주위 공기류 난류강도의 증가는 고온의 연소가스와 저온의 주위 공기류간의 혼합을 증대시켜 NO 발생을 급속히 저감시키나, NO에서 NO₂로의 변환과정을 촉진시키기 때문이라 사료되며 이에 관한 상세한 논의는 다음에 제시하는 반경방향의 농도분포들을 이용

하여 고찰하겠다.

Fig. 6은 분류화염의 상류 단면에 해당하는 x=60 mm 단면에서의 분류화염구조 및 NOx 농도를 도시한 것이다. (a), (b)의 결과를 비교해 보면, 주위 공기류 난류강도가 강한 경우 수소 및 산소 농도의 구배가 완만하며 이들 공존영역이 폭도 넓어지고, 또한 온도, H₂O 등의 분포 형상도 완만해지는 등 난류강도 증가로 인한 혼합이 촉진되고 있음을 잘 보여주고 있다. 특히, 난류강도가 강한 경우 NO분포의 최고치는 30 ppm에서 10 ppm으로 급격히 감소하며, NO₂의 최고치도 현저히 감소되고 있음을 알 수 있는데, 이는 난류강도 증가에 따른 반응대에서의 화염 신장률(flame stretch)의 증가 및 주위 저온 기체와의 혼합촉진에 의해 화염의 평균온도가 하강하여 NO발생률이 급격히 저하하기 때문인 것으로 사료된다. 여기서 난류강도가 약한 (a)의 NO, NO₂의 분포경향을 보면, NO 농도는 화염대에서 최고치를 갖고 여기서 생성된 NO성분이 주변으로 확산되어 화염면 안쪽에도 다량 존재한다. 그러나 NO₂ 농도

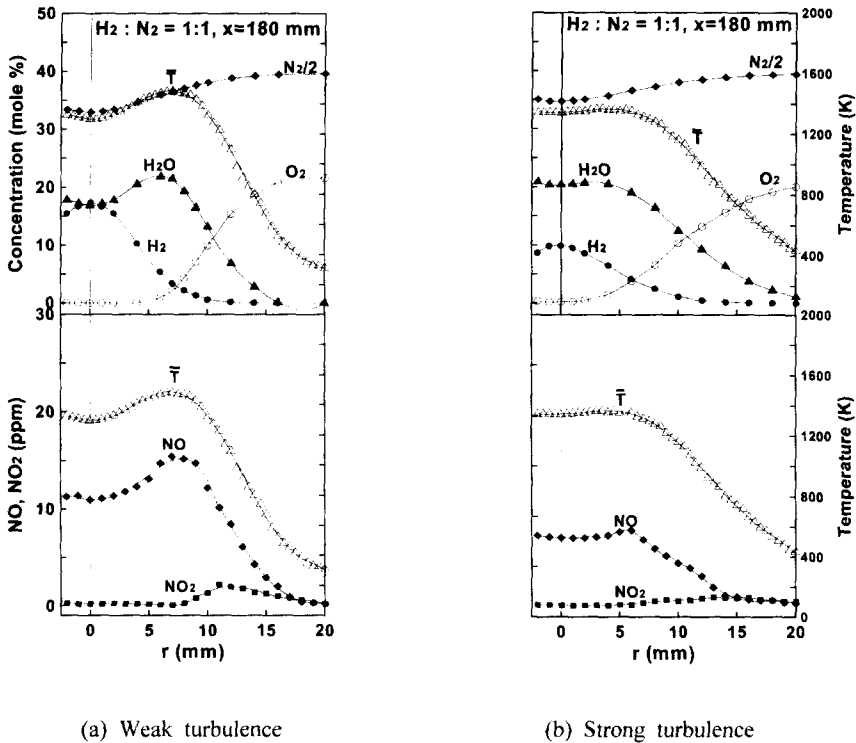


Fig. 7 Radial profiles of temperature, major species, NO and NO₂ concentration at x=180mm

는 최고치 위치가 화염대 외부의 저온 영역에 존재하며, 온도 최고점 영역에서 급속히 감소하여 화염면 안쪽에는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 이 경향은 난류강도가 강한 경우에도 유사하다. 이와 같은 분포경향은 층류화염의 경우^(15,16)와 유사하며, 그 이유로 NO₂는 NO와 HO₂의 반응에 의해 발생하는데, 이 HO₂ 라디칼은 고온가스가 주위의 저온공기와 혼합하여 급랭되면서 발생하므로 NO₂ 역시 화염외측의 온도구배가 큰 곳에서 발생하며, 그리고 여기서 발생한 NO₂가 내부로 확산되면서 고온인 화염대에서 NO₂가 NO로 다시 변환되기 때문에 화염대 내부에는 NO₂가 거의 존재하지 않는다고 알려져 있다. 따라서 위의 결과는 난류분류화염에 있어서도 분류초기 단면에서의 NOx의 생성 및 분포경향은 층류화염과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7은 중심축상의 화염대 직전인 x=180 mm 단면에서의 화염구조 및 NOx 농도를 도시한 것이다. (a), (b)를 비교해 보면 전체적인 화염구조는 서로 비슷하나 (b)의 경우가 수소 및 산소의 공존영역이 넓게 분포하고 있으며 또한 온도의

최고점도 중심축상에 더 접근하고 있어 앞에서 언급한 혼합증진효과에 의해 연소장의 발달과정이 빠르게 진행되었음을 알 수 있다. 이 단면에서도 난류강도가 강할수록 NO 농도는 현저히 감소하고 있으며, 난류강도가 약한 경우 온도 최고점 안쪽에서는 NO₂가 급속히 소멸되어 초기단면과 유사한 경향을 보인다. 그러나 난류강도가 강한 경우에는 NO₂의 절대농도는 적으나 상당히 넓은 지역에 분포하며, 전체 NOx중에 NO₂가 차지하는 비율도 난류강도가 약한 경우보다 높게 나타난다. 그 이유로서는 전술한 NO₂에서 NO로의 재변환 반응이 이 경우에는 온도가 낮아 거의 일어나지 못하고 있기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 x=300 mm 단면에서의 측정결과로서, 본 그림중의 수소 농도 및 Fig. 5의 중심축상 농도들을 살펴보면 두 경우 모두 이미 반응이 거의 완료된 상태라 보아도 무방하다. 따라서 두 그림에서 NOx 분포곡선의 하부 면적은 각 화염에서의 NOx 배출량에 비례한다고 할 수 있다. (a)와 (b)에서 NOx 배출량을 비교해 보면, 난류강도가 강한 경우의 NOx 배출량은 약한 경우에 비해 절

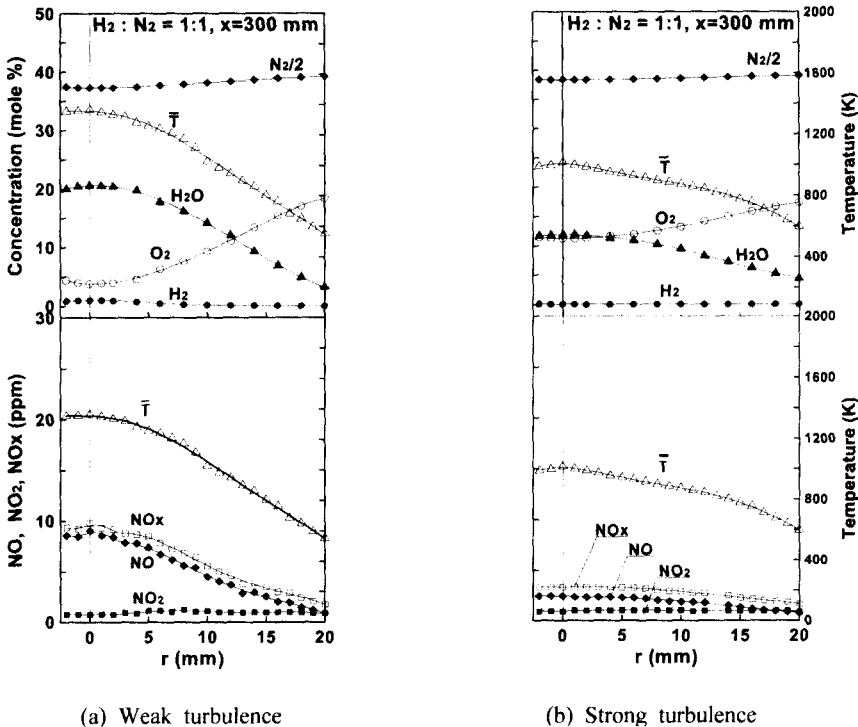


Fig. 8 Radial profiles of temperature, major species, NO and NOx concentration at x=300mm

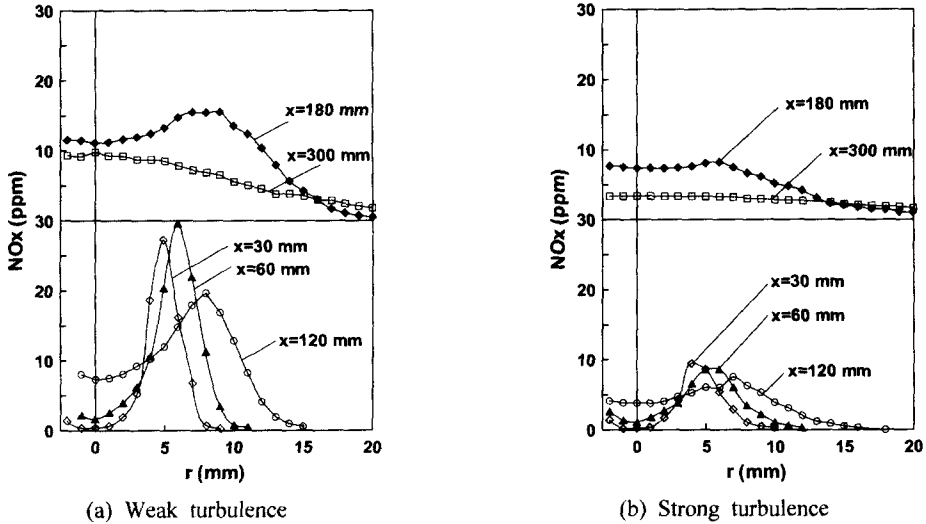


Fig. 9 Radial profiles of NOx concentration in several cross-sections

반 이하로 감소됨을 알 수 있다. 이 결과는 화염 주변부의 난류강도를 크게 하는 것이 thermal NOx의 저감법으로서 매우 유용한 방법이며, 이를 적극적으로 이용하면 연소장에서 발생하는 NOx를 현저히 감소시킬 수 있음을 시사하는 것이다. 그리고 NOx 농도는 이와 같이 현저한 차이가 있음에도 불구하고, NO₂ 농도는 난류강도에 관계없이 그 절대량은 유사한 분포를 보이고 있는데, 이는 난류강도가 강할수록 NO에서 NO₂로 전환되는 비율은 높으며, 또 전체 NOx중에 NO₂가 차지하는 비율이 높게됨을 의미한다.

Fig. 9는 분류화염의 여러 단면에서의 NOx 농도분포를 종합적으로 도시한 것이다. 통상의 분류화염인 (a)에서 NOx의 최고치는 potential core 직후 단면까지 계속 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 반면, (b)의 난류강도가 강한 경우에는 NOx의 최고치가 x=30 mm 이후 단면부터 감소하며, 그 절대량도 분류화염 초반부에서 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 이 결과는 주위 공기류의 난류강도 증가에 따른 NOx 저감효과가 주로 분류화염 상류부분의 국부 신장률 증가 및 주위 저온기체와의 혼합촉진으로 인한 평균화염온도의 저감에 의해 이루어짐을 시사하며, 분류화염에서 thermal NOx를 저감시키기 위해서는 화염 초반부의 난류강도를 제어해 주는 것이 매우 유효함을 시사하는 것으로 사료된다.

4. 결론

수소와 질소의 혼합기를 연료로 한 동축분류 확산화염의 주위 공기류의 난류강도를 인위적으로 증가시킨 분류화염과 통상의 분류화염을 대상으로, 연소장내의 NOx 측정시 화학발광식 분석기의 컨버터 재질에 따른 문제점을 검토하고, 난류강도가 분류화염의 thermal NOx(NO+NO₂) 생성에 미치는 영향을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연료 과잉 영역에서의 NOx 측정시 스테인리스 컨버터는 NO₂를 NO로 환원하는 과정에 문제점이 있으며, 몰리브덴 컨버터를 이용할 경우 이러한 문제점이 해결된다.

(2) 주위 공기류의 난류강도 증가는 화염면 신장률 증가 및 주위 저온기체와의 혼합을 촉진하여 화염평균온도를 저감시켜 NOx 배출량을 현저히 저감시키며, 본 실험 범위내에서는 난류강도가 강한 경우의 NOx 배출량을 약한 경우의 절반 이하로 감소시킬 수 있다.

(3) 난류강도 증가에 따른 NOx의 저감효과는 분류화염 상류부분에서 현저하며, 이 결과는 화염 초반부에서의 난류강도 제어가 NOx 저감에 매우 유효함을 시사한다.

(4) 난류강도가 강할수록 연소장내에서의 NO에

서 NO₂로 전환되는 비율이 높으며, 전체 NO_x 중
에 NO₂가 차지하는 비율이 높게된다.

후 기

본 연구는 98년도 인하대학교 교내 연구비의
지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Miller, James A. and Bowman, Craig T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (2) Barlow, R. S., and Carter, C. D., 1994, "Raman/Rayleigh/LIF Measurements of Nitric Oxide Formation in Turbulent Hydrogen Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 97, pp. 261~280.
- (3) Drake, M. C., Correa, S. M., Pitz, R. W., Shyy, W. and Fenimore, C. P., 1987, "Super-equilibrium and Thermal Nitric Oxide Formation in Turbulent Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 69, pp. 347~365.
- (4) Turns, Stephan R., 1995, "Understanding NO_x Formation in Nonpremixed Flames : Experiments and Modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 21, pp. 361~385.
- (5) Chen, Ruey-Hung and Driscoll, James F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *Twenty-Third Symposium on Combustion*, pp. 281~288.
- (6) Driscoll, James F. Chen, Ruey-Hung and Yoon, Youngbin, 1992, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combustion and Flame*, Vol. 88, pp. 37~49.
- (7) Rokke, N. A., Hustad, J. E., Sonju, O. K. and Williams, F. A., 1992, "Scaling of Nitric Oxide Emissions from Buoyancy-Dominated Hydrocarbon Turbulent-Jet Diffusion Flames," *Twenty-Fourth Symposium on Combustion*, pp. 385~393.
- (8) Fujimori, Toshiro, Riechelmann, Dirk and Sato, Jun'ichi, 1998, "Effect of Liftoff on NO_x Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Coflowing Air," *Twenty-Seventh Symposium on Combustion*, pp. 1149~1155.
- (9) Hori, Morio, 1986, "Experimental Study of Nitric Dioxide Formation in Combustion Systems," *Twenty-Fourth Symposium on Combustion*, pp. 1181~1188.
- (10) Feese, James J. and Turns, Stephen R., 1998, "Nitric Oxide Emissions from Laminar Diffusion Flames : Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition," *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 66~78.
- (11) 김종호, 김건상, 이창언, 1996, "난류강도가 확산화염의 구조 및 NO_x 생성에 미치는 영향," 한국항공우주학회지, 제24권, 제4호, pp. 66~74.
- (12) "Model 911 NO_x Stack Gas Emissions Analyzer Operator's Manual," Teledyne Analytical Instruments.
- (13) 技術資料 燃焼に伴う環境汚染物質の舉動 出版分科會, 1980, "燃焼に伴う環境汚染物質の生成構造と抑制法", 日本機械學會, p. 220.
- (14) England, Christopher, Houseman, John and Teixeira, D. P., 1973, "Sampling Nitric Oxide from Combustion Gases," *Combustion and Flame*, Vol. 20, pp. 439~442.
- (15) 오창보, 이창언, 1998, "CH₄-공기 분류 확산화염의 NO_x 생성특성에 관한 수치해석," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제2호, pp. 193~204.
- (16) Taeko Sano, 1982, "NO₂ Formation in the Mixing Region of Hot Burned Gas with Cool Air," *Combustion Science and Technology*, Vol. 38, pp. 1181~1188.