

천연가스 선회 예혼합 화염의 NOx 생성 및 배출 특성

유현석** · 이중성* · 한정옥**
(1999년 1월 11일 접수)

NOx Formation and Emission Characteristics of Premixed Swirl Flame of Natural Gas

Hyun-Seok You, Joong-Seong Lee and Jeong-Ok Han

Key Words : Thermal NOx(열적 질소산화물), Weak Swirl Flame(약선회 화염), Strong Swirl Flame(강선회 화염), Recirculation Zone(재순환 영역), Radical(라디칼)

Abstract

The swirl flame is mostly used to stabilize the flame on the burner nozzle in the industrial combustor. In the case of the weak swirl flame($S < 0.4$), the recirculation zone could not be formed, but in the strong swirl($S > 0.6$) flame, it could be formed in the center of the swirl flame. In this study, the measurement and analysis of emission species, temperature, radicals of premixed swirl flame in the combustor were performed to understand the NO formation and emission characteristics of the swirl flame of natural gas. The result of NO emission in the swirl flame is that the amount of NO emission in the strong swirl flame decreased about 60% compared with that of the weak swirl flame. The main region of NO formation of the weak swirl flame is positioned in the down stream($z=100\sim 200\text{mm}$) of the flame, but that of the strong swirl flame is positioned in the up stream($z=40\text{mm}$) where the recirculation zone seems to be formed. It is supposed that the increase of flame surface and the formation of inversed flame cause the reduction of the high temperature region on the production of NO in the strong swirl flame. The result of NO-temperature relation revealed that the factor of NO formation is not only temperature but also another parameters in the weak swirl flame, but in the strong swirl flame, NO is proportional to the temperature of higher than 1200K.

1. 서 론

천연가스 연소시 배출되는 공해물질인 질소산화물의 저감 기술 개발을 위해서는 질소산화물의 생성 특성과 주요 인자들에 대한 올바른 이해가 필요하다. 천연가스에는 질소성분이 포함되어 있지 않기 때문에 배출되는 질소산화물은 thermal NOx가 대부분이다.

NOx 저감은 주로 촉매나 플라즈마를 이용한 분해나 수증기 분사등과 같은 연소 후처리방식이 주류를 이루고 있어 시스템이 거대해지고 경제성도 떨어진다. 이에 비하여 근본적으로 연소방식을 개선하여 화염 내에서 저감시키는 방식은 간편하고 경제적이므로 화염 내에서 발생하는 NOx의

생성과정과 생성에 미치는 주요 인자에 대한 체계적인 연구가 필수적이나 지금까지 이러한 저감 기술이란 경험에 의존하고 있기 때문에 현장 적용에는 많은 시간과 노력이 수반되어 왔으며 그 효과도 비효율적이었다. 따라서 화염 내에서 NOx 저감에 대한 물리적 특성에 관계되는 기본 데이터를 확보하면 보다 효율적인 NOx 저감 기술이 확보될 수 있다. 이러한 연구는 여러 연구자들⁽¹⁻⁶⁾에 의해 수행되어 왔으나 주로 확산화염에 대한 것이며 예혼합 화염에 대한 연구⁽⁷⁻⁸⁾는 많이 보고되지 못했다.

따라서 본 연구에서는 예혼합화염의 NOx 배출 특성과 생성에 영향을 미치는 주요 인자에 대해 물리적 특성에 대한 상관관계를 파악함으로써 보다 효율적인 NOx 저감기술을 확보하고자 일련의 실험을 수행하였다.

* 한국가스공사 연구개발원

** 회원, 한국가스공사 연구개발원

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 실험에 사용된 연소기의 개략도가 나타나 있다. 연소방식은 예혼합 방식으로 예혼합실에서 혼합되어 선회발생기를 거쳐 노즐에서 분출된다. 선회도에 변화를 주기 위하여 선회발생기의 날개를 각각 35°, 45°로 제작하였고 선회각도에 따라서 화염의 안정성이 변화하므로 노즐 직경을 선회각도가 45°일때 22mm와 35°일때 26mm로 제작하였다.

연소기의 형상은 직경 200mm, 길이 1000mm의 원통형이며 화염의 관찰을 위하여 4개소에 관찰창(190x100mm)을 설치하였고 window의 재질은 pyrex이다. 유속 측정시 레이저의 산란을 최소화하기 위하여 외측 표면에 AR coating을 하였다. 온도와 농도 측정부는 연소기의 측면에 연소기 길이 방향으로 10mm 간격으로 200mm까지 설치하였고, 이후 500mm까지는 40mm 간격으로 설치하였다. 버너 연소장의 라디칼 측정을 위해 버너에 3축 이송대를 설치하였다.

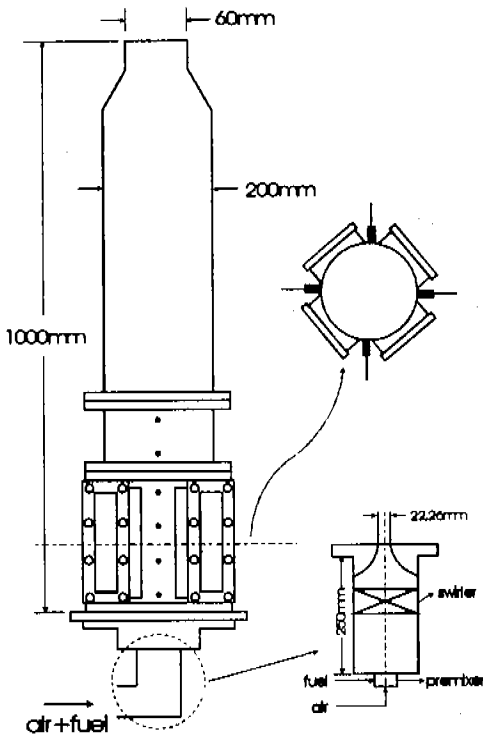


Fig. 1 Schematic diagram of the test burner.

연료는 국내에 공급되고 있는 천연가스(CH_4 : 89.78%, C_2H_6 : 7.48%, C_3H_8 : 2.02%, C_4H_{10} : 0.7%, N_2 : 0.02%)를 사용하였으며 가스의 유량 제어 및 계측은 질량유량계(Tylan General FC-280)를 사용하였다.

농도측정은 NO_x 와 기타성분($\text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CO}, \text{CH}_4$)으로 구분하여 측정하였다. NO_x 는 화학발광법(Rotork Analysis Limited series 440)으로 측정하였으며, 기타 성분은 gas chromatograph(HP 5890)로 분석하였다. NO 채취시 관내에서 NO에서 NO_2 로의 전환을 방지하고자 NO 채취압력은 235mmHg로 유지하였고 probe와 water trap 사이의 관내에서 수분이 응축되는 것을 방지하기 위하여 heated line을 설치하였다. NO_2 측정을 위하여 NO 전환 효율이 우수한 몰리브덴 converter를 사용하였다. Sampling probe는 직경 1/4"의 스테인레스 스틸관으로 제작하였으며 측정위치에서 화학반응을 동결시키기 위해 수냉식을 채택하였다. 한편 고온의 연소가스 온도를 측정하기 위하여 R-type(0.3mm) 열전대를 제작하였으며 복사열손실에 대한 보정은 행하지 않았다.

연소반응 중간 생성물을 측정하기 위하여 라디칼 자발광 측정 시스템을 사용하였다. Convex lens의 초점거리에서 집광된 연소중간생성물의 자발광은 색수차에 의한 신호의 손실을 방지하기 위하여 설치된 두개의 plano-convex lens를 통하여 spectroscope(ARC SpectraPro-500)의 slit으로 투사되어 각 파장대별로 분리된 후 ICCD(Princeton Instrument, active area: 1024x516) 카메라로 전송되어 강도가 측정된다. Spectroscope의 초점거리는 500mm이며 측정 가능 파장대는 200~700nm이다. 측정한 연소 라디칼은 OH(310.3nm)와 CH(431.5nm)이다.

2.2 실험방법

선회 예혼합 화염의 thermal NO_x 생성 특성 파악을 위하여 연료부하조건은 저위발열량기준으로 3780~8820kcal/hr 범위에서 화염장내부의 온도, 농도, 라디칼 분포를 측정하였으며 연소기 출구에서의 질소산화물 배출 특성도 관찰하였다. 당량비는 현장에서 가장 많이 적용되는 0.9로 고정하였고 연소기 출구에서 산소농도(2%)를 관찰하여 당량비를 항상 일정하게 유지하였다.

선회조건은 선회날개각도 35°와 45°를 이용하여 선회도가 0.25와 0.83인 화염을 형성하였다. 선회도의 정의는 노즐 출구에서 측정한 LDV 데이터를 사용하여 $S = G_\theta / G_x R$ 로 계산하였다. 여기서 G_θ 는 axial flux of angular momentum, G_x 는 axial thrust, R은 노즐 출구 반경이다. 일반적인 선회각도의 특성을 보면 약선회($S < 0.4$)는 유동의 중심부에 재순환 영역(recirculation zone)이 생성되지 않지만 강선회유동($S > 0.6$)의 경우는 중심부에 재순환 영역이 생성된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 실험조건으로 채택된 0.25와 0.83은 선회효과를 판단할 수 있는 적절한 범위로 판단되며 이후부터 선회도가 0.25를 약선회, 0.83인 경우를 강선회 조건으로 구분하였다.

가스분석기로 측정된 배가스의 각 성분 농도는 건가스 기준(dry gas base)이므로 연소장내에서의 각 성분 농도를 정확하게 알기 위해서는 습가스 기준(wet gas base)으로 환산할 필요가 있다.

건가스와 습가스의 관계는 다음 식과 같이 되며

$$\chi_{i,wet} = \chi_{i,dry} \frac{N_{mix,dry}}{N_{mix,wet}} \quad (1)$$

- $N_{mix,dry}$: 혼합기의 건가스 mole
- $N_{mix,wet}$: 혼합기의 습가스 mole
- $\chi_{i,wet}$: i 성분의 습가스 mole fraction
- $\chi_{i,dry}$: i 성분의 건가스 mole fraction

혼합가스의 습가스 mole 은 다음 식으로 구할 수 있으며

$$\frac{N_{mix,wet}}{N_{mix,dry}} = 1 + \frac{y}{2(4.76a - y/4)} \quad (2)$$

여기서 a 는 oxygen coefficient 이며 다음 식으로 계산된다.

$$a = \frac{x + (1 - \chi_{oxy,dry})y/4}{1 - 4.76\chi_{oxy,dry}} \quad (3)$$

여기서 x,y 는 각 탄화수소의 탄소원자수와 수소원자수를 의미한다. 실험에 사용된 천연가스의 경우 x 와 y 는 각각 1.137, 4.274 이다.

3. 연구결과

3.1 선회도에 따른 NO 배출 특성

본 연구에서 사용된 연소기의 시동특성은 점화 후 약 40 분 이후에 열적 평형상태에 이르게 된다. 따라서 모든 측정은 점화 후 40 분이 경과한 후에 온도,농도 등을 측정하였다.

약선회와 강선회 화염의 연소부하(combustion load)에 따른 NO 배출특성이 Fig. 2 에 나타나 있다. 여기서 연소부하는 저위발열량 기준이다. 그림에서 알 수 있듯이 약선회 화염에 비하여 강선회 화염의 NO 배출량이 약 60% 감소하였다. 약선회, 강선회 화염 모두 연소부하가 4500 kcal/hr 이상이 되면 오히려 NO 의 값이 약간씩 감소하는 것을 볼 수가 있는데 이는 잔류시간 감소, 난류강도 증가 등의 영향에 따른 미미한 결과라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 약선회와 강선회 화염의 NO 배출량 차이에 대한 구체적인 원인을 규명하고자 연소부하 4500kcal/hr 의 조건에 대하여 온도, 농도, 라디칼 등의 분포를 측정하여 서로의 상관

관계에 대하여 고찰하였다.

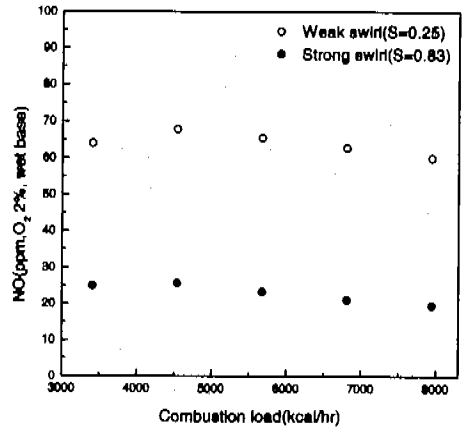


Fig.2 Comparison of NO emission characteristics measured at the flue gas outlet for two types of premixed swirl flame ($\phi=0.9$).

3.2 선회도에 따른 화염 형상

Fig.3 에 약선회 화염과 강선회 화염에 대한 직접사진이 나타나 있다. 약선회 화염의 경우 1 차 화염면이 노즐출구에서 원추형태로 형성되며 미연가스가 화염면을 통과하여 후류에서 2 차화염대역을 형성하는 분계화염 형태의 화염구조를 가지고 있다. 강선회 화염의 경우는 사진에서 알 수 있듯이 선회유동으로 인해 나팔모양의 inversed flame 의 형상을 나타내고 있으며 약선회 화염에 비하여 화염면적의 증가를 관찰할 수가 있다. 화염에 의해 둘러 싸인 중심 부분은 정체(stagnation) 또는 재순환(recirculation) 영역이 형성되는 것으로 판단되며 약선회 화염과는 달리 화염대가 노즐 출구에서 밀폐되어 있지 않고 내외부 영역으로 구분되는 원추형 판형태(sheet shape)임을 알 수 있다. 이와 같이 연소대역이 얇은 판형태를 형성함으로써 국부적인 고온영역을 형성할 수 있는 조건이 약선회 조건에 비해 상대적으로 작을 것으로 예상된다. 관찰된 두 화염의 길이는 약 40~50mm 정도이다.



(a) Weak swirl flame

(b) Strong swirl flame

Fig.3 Photograph of premixed swirl flame ($\phi=0.9$, $Q=8LPM$).

강선회 화염의 중심부에서 형성될 것으로 추측되는 재순환 영역을 LDV로 측정하기 위하여 TiO₂ 유동층 공급장치, TiCl₄ 증발 공급장치 등을 사용하였으나 산란입자가 화염의 중심부로 진입을 하지 못하여 유속측정 및 유동가시화가 곤란하였다. 이러한 현상은 중심부에서의 재순환영역이 형성되고 있음을 간접적으로 나타내는 결과라 판단되나 보다 구체적인 분석이 필요하겠다.

3.3 선회도에 따른 온도,농도분포

Fig.4는 연소기 중심에서 측방향으로 측정된 약선회 조건의 연소가스 성분 및 온도분포이다. 온도와 주요 가스성분을 볼 때 z=20~50mm 부근에서 연소반응이 활발히 일어남을 알 수가 있으며 이는 화염길이와 일치하는 영역이다. 이후부터는 연소반응의 완결로 연소 생성물의 농도가 일정하게 유지되는 것을 볼 수가 있다. NO와 CO의 농도분포는 정상 연소조건에서 볼 수 있듯이 CO가 감소하면서 NO의 증가가 나타나는 경향을 보이고 있는데 이는 연소 분위기가 1800K 이하에서는 thermal NO의 생성속도가 연소반응속도에 비하여 느리기 때문에 나타난 결과로 보인다.⁽¹¹⁾

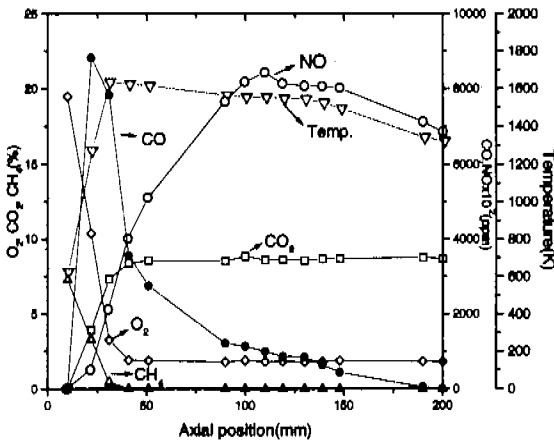


Fig.4 Major gas species and temperature profile along the axial position at the center of weak swirl flame ($\phi=0.9, Q_r=8LPM, S=0.25$).

강선회 화염에 대한 결과가 Fig.5에 나타나 있다. 강한 선회유동으로 인한 유동특성 변화로 약선회 화염에 비해 연소반응이 노즐 출구에서 시작되어 빠르게 완료되는 것을 CH₄, CO, CO₂ 관계에서 관찰할 수 있다. 이 경우 NO 농도는 약선회 조건에 비해 출구 가까에서 반응이 완료됨을 알 수 있다. CO 농도는 약선회 화염과 비교하여 볼 때 노즐 출구를 제외하고는 거의 유사하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 inversed flame이 CO의

배출증가 없이도 NOx를 효과적으로 저감시킬 수 있음을 나타내는 결과이다.

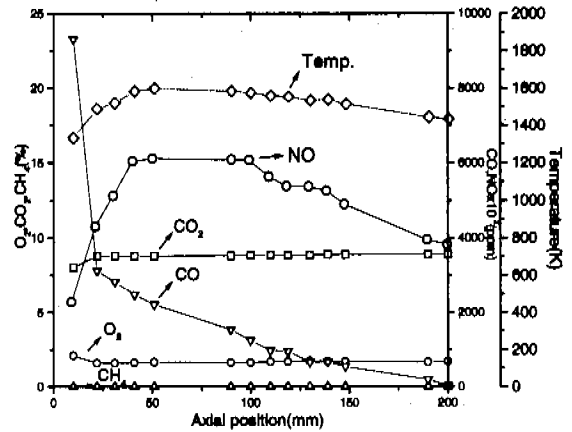


Fig.5 Major gas species and temperature profile along the axial position at the center of strong swirl flame ($\phi=0.9, Q_r=8LPM, S=0.83$).

연소기 내의 화염 중심에서 측방향에 따른 약선회, 강선회 화염의 온도 및 NO 분포에 대한 비교가 Fig.6에 나타나 있다. 약선회, 강선회 화염 모두 최고온도는 거의 유사하며 노즐 출구부근을 제외하고는 최고온도 이후의 분포도 거의 유사하다. 그러나 NO는 강선회 화염의 경우 NO의 배출이 약선회 화염에 비하여 상류로 이동하였고 최고온도가 유사함에도 불구하고 생성량은 낮게 나타났으며, z=100mm 이후부터 두 화염 모두 주위 생성물과의 혼합에 의한 희석효과로 감소하는 경향을 나타냈다.

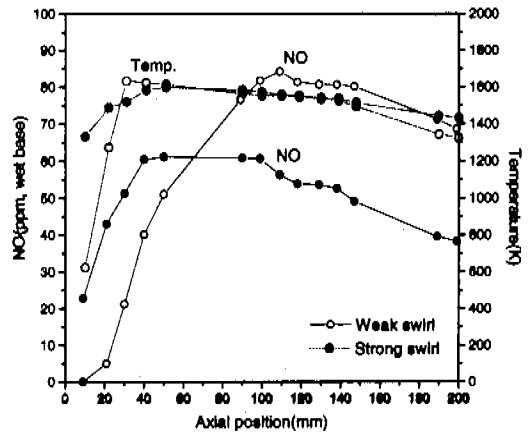


Fig.6 Comparison of NO and temperature profile along the axial position at the center of swirl flame ($\phi=0.9, Q_r=8LPM$).

이상의 결과를 종합해 보면 화염의 중심부에서 축방향에 따른 온도 분포는 거의 유사하나 NO 생성분포는 두 화염의 경우 다른 특성을 나타내고 있다. 따라서 NO 생성의 시작과 최대 및 최후 구간을 자세히 분석하기 위하여 $z=40, 100, 200\text{mm}$ 구간에 대해 반경방향으로 온도와 NO 농도를 측정하였다.

연소기 내에서 반경방향에 따른 온도분포가 Fig.7에 나타나 있다. 전체적 온도 분포 경향은 $z=40\text{mm}$ 부터 100mm 까지 고온영역이 $r=20\text{mm}$ 까지 존재하고 후부로 진행할수록 벽으로의 열손실 및 열평형으로 인해 온도구배가 완만해지는 것을 볼 수 있다. 연소기 내부의 반경위치 $r = 30\text{mm}$ 이후부터는 연소가스 온도가 1200K 이하를 나타내고 있다.

약선화 화염의 강선화 화염의 온도분포 경향을 보면 $z=100\text{mm}$ 이후에는 열손실과 열평형에 의해 온도 분포는 유사하나 연소반응에 의해 화염의 특성이 다른 상류측에서 차이를 보이고 있다. 약선화 화염에 비하여 강선화 화염의 고온부가 좁아졌음을 관찰할 수 있고 이는 화염의 형상에서 관찰한 화염면의 증가와 판형의 연소대역에 의한 고온부 감소 때문으로 판단된다.

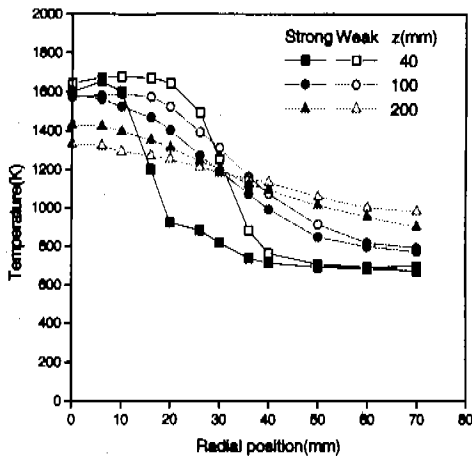


Fig.7 Various temperature profiles of swirl flame along the radial position ($\phi=0.9, Q_r=8\text{LPM}$).

반경방향에 따른 NOx 분포가 Fig.8에 나타나 있다. 전체적인 NO 분포는 온도분포 경향과 마찬가지로 화염의 중심부에서 주로 생성되는 것을 알 수 있다. 약선화 화염은 NO의 생성영역이 비교적 넓게 분포하고 있음을 관찰할 수 있으며 온도 분포 경향과 일치한다. 다만 $z=40\text{mm}$ 위치가 고온 영역임에도 불구하고 NO 생성이 낮게 나타나고 있으며 이는 Fig.4에서 고찰했듯이 NO 생성속도가 연소반응속도에 비해 느리기 때문인 것으로 판단된다.

강선화 화염은 노즐 출구에서부터 연소반응이 일어나 중심부 상류측에서 NO가 주로 생성되고 있다. 주 생성영역도 약선화 화염에 비하여 좁게 나타나고 있으며 이는 온도장 분포에서도 고찰하였듯이 고온 영역이 상대적으로 좁게 분포한 결과라 판단되며 약선화 화염과는 달리 NO 분포는 전 영역에서 온도분포와 유사한 경향을 나타내고 있다. NO가 최소로 배출된 $z=40\text{mm}, r=20\text{mm}$ 은 연소생성물과 노즐에서 분출되는 미연가스가 공존하는 영역이므로 미연가스의 회색에 의한 결과라고 판단된다.

화염대 주위의 NO 분포특성을 고찰해보면 thermal NO의 생성 온도는 1200K 이상이 되므로 그 이하의 온도가 되는 $r=30\text{mm}$ 지점부터는 NO의 농도 변화가 거의 없는 것으로 보아 이 지점에서는 더 이상의 NO 생성은 없고 평형상태에 있다고 할 수 있으며, 화염대로의 혼합에 의한 영향은 본 논문에서 나타내지는 않았지만 유동장 측정결과 attached recirculation zone의 생성은 없었으므로 그다지 크지 않다고 판단된다.

NO_2 의 농도는 전 영역에서 생성량이 매우 적으며 이는 NO_2 생성의 주 인자인 HO_2 의 발생이 다량의 공기를 필요로 하나⁽¹²⁾ 본 실험의 조건은 당량비 0.9로 이혼합비 근처임을 감안하면 타당한 결과라고 사료된다.

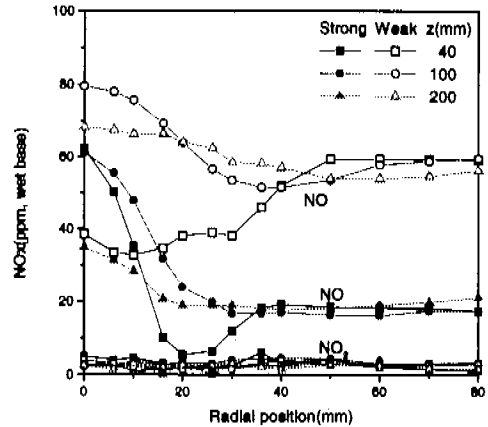


Fig.8 Various NOx emission profiles of swirl flame along the radial position ($\phi=0.9, Q_r=8\text{LPM}$).

이상의 결과를 종합해 보면 강선화 화염의 저 NO 배출 특성은 inversed flame 형상으로 인한 화염면적의 증가와 화염 형상 변화에 의한 고온영역의 감소 때문이라 사료되며 이는 thermal NO 생성 기구의 주요 라디칼인 OH의 생성역제로 나타날 것이다. 이를 확인하기 위하여 화염 중심부에서의 라디칼에 대한 상대적인 농도를 측정 비교하였다.

3.4 OH, CH 분포 특성

화염의 중심부에서 축방향에 따른 OH 라디칼의 상대적 농도와 거리에 따른 온도 변화율에 대한 분포가 Fig.9 에 나타나 있다.

약선회, 강선회 화염 모두 OH 라디칼의 최대 발생 영역이 연소반응이 활발히 일어나는 화염 상류측에서 생성되고 있는 것을 볼 수 있으며 축방향에 따른 온도변화(dT/dz)도 OH 분포와 일치하는 것을 볼 수 있다. Z=70mm 이후부터 라디칼과 온도 변화율은 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있으며 이는 Fig.6 의 온도분포에서 알 수 있듯이 이 지점부터는 연소반응이 거의 완결되며 NO의 생성이 활발히 일어나고 있음을 나타내주는 결과이다. 따라서 thermal NO의 주요 생성인자인 OH의 감소가 NO의 증가로 나타난 결과라 사료된다.

약선회와 강선회 화염을 비교해 보면 상류측(z<50mm)에서 약선회 화염에 비하여 강선회 화염의 OH 라디칼이 절반이상 감소하였다. 이는 앞에서 고찰하였듯이 고온영역의 축으로 연소 반응시 OH의 생성량이 감소된 것으로 판단할 수 있으며 이는 thermal NO 생성의 주요 요소가 OH라는 점(N+OH→NO)과 NO의 배출이 60%저감된 점을 고려하면 타당한 결과라고 할 수 있다.

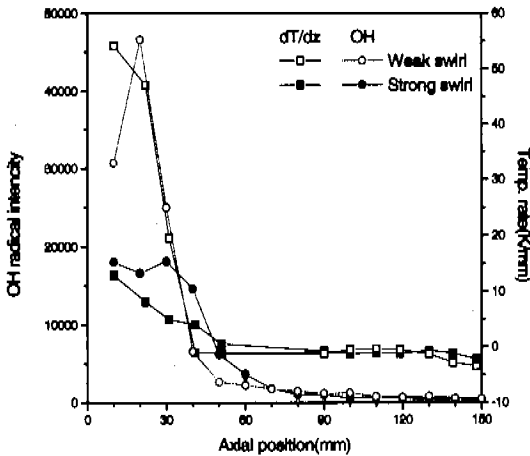


Fig.9 OH radical intensity and temperature variation rate profile of swirl flame measured by ICCD camera along the axial position(exposure time:200msec, gain:10, λc:310nm).

여기서 측정된 라디칼의 강도는 line-of-sight로 적분된 값이어서 그 영향을 배제할 수는 없으나 상기의 고찰에서 알 수 있듯이 전반적으로 온도와 농도와 연관되어 타당한 결과를 나타내고 있으므로 전체적인 연소장내에서의 NO 생성에 대한 데이터로서 유용하다고 판단된다.

Fig.10 에 화염의 중심축을 따라 측정한 CH 라디칼 분포결과가 나타나 있다. CH 라디칼은 연

소반응대에서 주로 생성되는 것임을 고려해 볼 때 강선회 화염에 비하여 약선회 화염의 반응이 강렬하게 일어남을 알 수 있으며 이는 고온영역부의 확대, NO 배출의 증가 등을 고려해 볼 때 당연한 결과라고 할 수 있겠다.

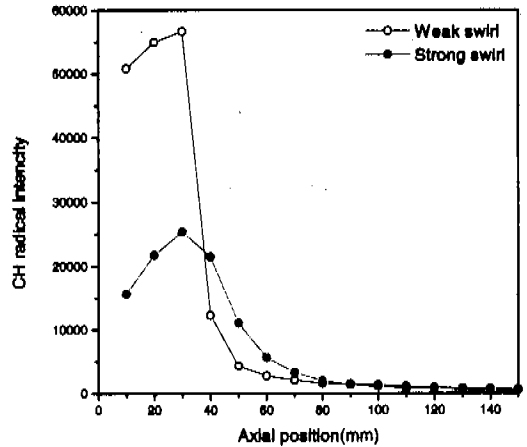


Fig.10 CH radical intensity profile of swirl flame measured by ICCD camera along the axial position(exposure time:100msec, gain:6.18, λc:431.5nm).

3.5 온도-NO 상관 관계

Fig. 11 에 약선회 및 강선회 화염에 대한 온도와 NO 농도의 관계가 나타나 있다. 이 결과는 화염대 이후의 측정결과로 z=40~200mm, r=0~80mm 범위에서 측정된 공간데이터를 정리한 것이다.

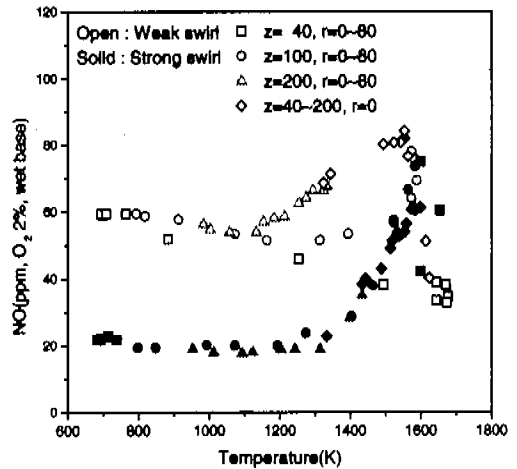


Fig.11 The correlation between NO and temperature on the swirl flame.

전체적인 경향은 thermal NO의 생성온도인 1200K 이상에서 온도와 비례하는 경향을 나타내고 있으며 온도와 무관한 저온영역에서의 NO는 고온부에서 생성된 NO가 공간적인 이동에 의한 잔류농도인 것으로 판단된다.

강선회 화염에 비해 약선회 화염의 온도-NO 분포 특성은 고온영역에서 산포가 크게 나타났으며 이는 앞 절의 결과에서 알 수 있었듯이 상류층 ($z=40\text{mm}$)이 고온영역임에도 불구하고 강선회 화염과는 달리 NO 생성율이 낮기 때문에 나타난 결과로 보인다.

결론적으로 NO는 1200K 이상에서 온도와 비례관계를 보임을 확인하였으며 이로부터 선회강도에 따른 NO 배출특성의 차이는 고온영역의 분포가 중요한 요인임을 알 수 있다.

4. 결 론

- (1) 천연가스 예혼합 연소에서 분체화염 형상의 약선회 화염에 비하여 inversed flame 형상의 강선회 화염은 NO 배출이 약 60% 저감되었다.
- (2) 선회 강도에 따른 온도, 농도 측정결과 강선회 조건이 고온화염 영역이 좁게 나타났으며 이는 원추관형의 inversed flame 형상으로 인한 고온부 감소때문으로 판단되며 이것이 강선회 조건의 NO 저감요인이라 판단된다.
- (3) 연소 라디칼 측정결과 OH, CH 특성은 연소반응 영역으로 대표되는 축방향에 따른 온도변화와 유사한 경향을 나타냈으며 선회강도에 따른 OH 라디칼 분포와 NO 배출특성은 서로 일치하는 경향을 보였다.
- (4) NO 배출은 1200K 이상의 조건에서 온도와 비례관계를 보임을 확인하였으며 이로부터 고온 화염면적의 감소가 NO 저감의 중요한 요인임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 日本機械學會, 1980, “燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と制御法”
- (2) 오창보, 이창언, 1998, “CH₄-공기 분류 확산화염의 NO_x 생성특성에 관한 수치해석”, 대한기계학회논문집, 제 22 권, 제 2 호, p.193
- (3) Yun-Ho Cho, Ho-Myung Chang, 1997, “A Kinetic Model for the Reduction of Nitric Oxide by Hydrazine”, *KSME International Journal*, Vol.11, No.5, p.428
- (4) M. C. Drake, S. M. Correa, 1987, “Superequilibrium and Thermal Nitric Oxide Formation in Turbulent Diffusion Flames”, *Combustion & Flame*, Vol.69, p.347
- (5) James F. Driscoll, 1992, “Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number”, *Combustion & Flame*, Vol.88, p.37
- (6) R.S. Barlow, C.D. Carter, 1996, “Relationship among Nitric Oxide, Temperature and Mixture Fraction in Hydrogen Jet Flames”, *Combustion & Flame*, Vol.104, p.288
- (7) Robert C. Steele, Philip C. Malte, 1995, “NO_x and N₂O in Lean-Premixed Jet-Stirred Flames”, *Combustion and Flame*, Vol.100, p.440
- (8) M. C. Drake, R. J. Blint, 1991, “Calculation of NO_x Formation Pathways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH₄/Air Flames”, *Combustion Science and Technology*, Vol.75, p.261
- (9) P. C. Malte, J. C. Kramlich, 1980, *Combustion Science and Technology*, Vol.22, p.263
- (10) A. K. Gupta, 1984, *Swirl flow*, Abacus press.
- (11) Stephen R. Turns 1996, *An Introduction to Combustion*, International edition, Mcgraw-Hill.
- (12) C. Cariappa, J. K. Narney, 1994, “Effect of Carbon Monoxide on NO in Exhaust Gases”, *Combustion Science and Technology*, Vol.100, p.355.