

고온 배기가스의 온도 및 유량이 확산화염의 구조 및 NOx 발생에 미치는 영향

손화승* · 장시웅* · 김호영**

The Effect of Temperature and Flow Rate in Hot Exhaust Gas on the NOx Emission and Flame Structure of Diffusion Flame

H.S Sohn, S.W Jang, H.Y Kim

Key Words: NOx reduction(질소산화물 저감), duct burner(덕트버너), diffusion flame(확산화염), NOx formation(질소산화물 생성)

Abstract

The experimental study was carried out for the diffusion flame characteristics of second stage combustor with the variations of temperature and supplying rate of hot exhaust gas from first stage combustor. It also examined the flame structure and NOx formation of the second stage combustor in which the fuel(natural gas) is supplying into the mixture of oxygen hot exhaust gas from first stage combustor. The results show that the increasement of temperature and flow rate of exhaust gas lead to increase the NOx up to 30ppm with 19% O₂ condition

1. 서론

최근 화석연료의 지나친 남용으로 인하여 지구환경오염문제가 크게 대두됨에 따라 에너지의 효율적 이용과 온실가스 규제에 대응할 수 있는 저공해 고효율 연소시스템의 기술개발이 더욱 필요하게 되었다. 고온 배가스 연소는 산업체 공장에

서 대기중에 버려지는 고온의 배가스를 이용한 고효율 연소, 산업용 가스터빈에서의 2차연소기(Power Combustor) 연소, 가스터빈 열병합발전시스템의 수요 측 열수지 균형을 위한 덕트버너 연소 등에서 필요한 기술이다. 이와같은 연소방식은 1차연소에 의한 고온, 희박산소상태의 배가스에 연료를 공급하여 재 연소시키는 방식으로 에너지의 효율적 이용과

* 한국가스공사 연구개발원

** 고려대학교 기계공학과

공해물질인 NO_x 저감을 목적으로 국내 외적으로 많은 연구가 수행중에 있다.^(1,5)

고온, 희박산소상태에 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. 한편 기류가 대기상태보다 고온이므로 연료의 화학적 반응을 활성화하여 화염내 온도분포를 대체로 안정화시키며 화염내 국부적 고온영역발생을 억제하므로써 Thermal NO_x생성을 저감시키는 것으로 알려져 있다.^(2,3)

고온, 희박산소상태의 기류조건에서 산소농도가 낮은 확산화염의 경우 불완전연소율이 높고 화염내 온도가 낮아 NO_x 생성량도 비교적 미량으로 발생하게 된다. Thermal NO_x는 Zeldovich에 의하여 1960년 제안되었으며 화염온도가 1200℃ 이상에서 활발하게 진행되며 공

기중의 O₂ 분해에 의한 O원자와 3중 결합된 질소와의 반응에 의하여 생성된다. 또한 Prompt NO_x는 1971년 Fenimore가 제안한 이론으로 Zeldovich 반응기구가 아닌 화염영역에서 NO_x가 생성된다고 제안하였으며 화염온도가 저온으로서 연료가 과도한 경우 발생한다고 하였다. 이러한 현상은 NO_x 생성반응이 기류의 온도에 따라 반응하는 상관관계와 NO_x 생성기구를 이해하는데 중요한 요소라고 할 수 있다.^(6,7)

본 연구에서는 천연가스를 연료로 사용하여 1차 연소기에서 연소시킨 희박산소상태의 배가스를 가열용히타를 이용하여 적절한 온도의 기류를 생성시키고, 이때 발생된 고온 배가스를 기류로 하여 유량별로 2차연소기에서 연소를 통한 화염온도에 따른 NO_x 생성 및 화염구조를 분석하였다. 이러한 연소에서의 NO_x 배출특성은 가스터빈 발전시스템, 열병합발전시스템의 연소기 및 산업용 연소로 등

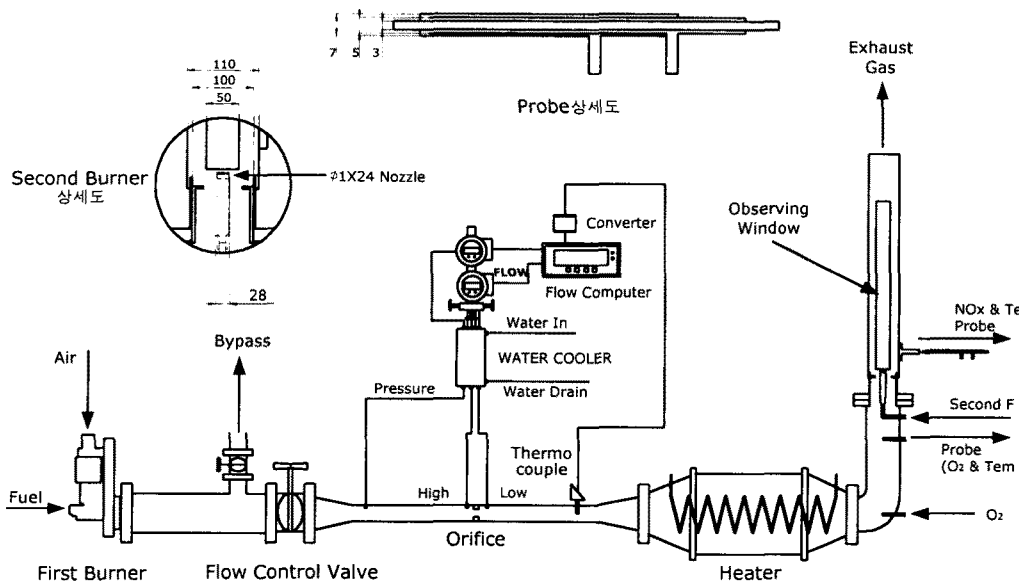


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

에 적용되어 에너지 절감 및 질소산화물 저감을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치는 Fig.1와 같이 1차연소부, 1차연소 배가스의 유량제어부, 산소농도 및 온도제어부, 2차연소부 등 4개부분으로 구성되어 있다. 1차연소부는 상용버니의 공기공급용 팬, 연료공급용 노즐 및 인소장치를 실험에 적합하도록 개조하여 제작하였다. 1차연소부에 공급되는 연료(천연가스)유량과 공기유량은 유량계를 부착하여 측정이 가능토록 하였으며 연소된 배가스는 배가스 유량조절밸브를 통하여 필요한 유량만 2차 연소부에 공급토록 하고 잉여 배가스는 외부로 배출되도록 하는 By-pass 장치를 1차연소부 후단에 부착하였다. 배가스유량계는 유량의 안정을 위하여 $\varnothing 50$ 에 길이 1m의 인입관 중심부에 오리피스를 이용한 장치로서 배가스의 온도와 압력측정 센서를 배관내에 부착하여 유체의 온도 및 압력 보정용 유량컴퓨터를 부착한 장치로 구성하였다. 유량제어부 후단에는 실험조건에 적합한 온도의 기류를 만들기 위한 22kW급 고온 전기히터와 산소공급장치 및 배가스성분 측정장치를 부착하여 기류온도별, 기류유량별로 유입기류를 조절할 수 있도록 구성하였다. 이러한 구성물로 기류유량은 0~20 l/h, 기류온도는 50~800℃, 기류의 산소농도는 5~25vol%까지 만들 수 있도록 하였다.

또한 2차연소부는 실험 및 측정코자

하는 화염의 여러 가지 특성을 측정할 수 있는 부분으로 $\varnothing 100$ 의 원통형 관을 통하여 실험조건에 적합한 기류가 2차연소부에 유입되며 중앙에는 $\varnothing 1 \times 24$ 개의 구멍을 통하여 기류에 직각방향으로 연료가스가 분출되도록 하는 노즐이 설치되어있다. 화염에 대한 성분(NO_x , CO, CO_2 , O_2 등) 측정은 배가스 흡입용 Probe를 제작하여 화염 성분을 흡입한 후 흡입성분의 변화를 최소화하기 위한 수냉식 냉각장치에 의한 급냉 후 배가스 성분분석기에 유입토록하였다. 배가스성분은 모델 PG250(Horiba사, 일본)를 사용하여 측정하였으며 연소불꽃의 온도상태는 그림과 같이 0.3mm R-type 열전대를 사용하여 측정하였다.

2.2. 실험방법 및 조건

본 연구의 목적에 적합한 실험을 수행하기 위하여 1차연소된 배가스 상태의 온도 및 유량변화가 화염의 성분 및 구조에 미치는 영향을 분석하였다. 1차 연소부에서 연소된 배가스는 실험코자하는 2차연소부의 화염이 가장 안정된 조건이될 수 있는 상태의 배가스를 제조하기 위하여 예비실험에 의한 화염을 비교한 후 1차연소부에 공급하는 연료와 공기유량을 확정하였다. 그결과 1차연소된 배가스의 성분은 O_2 15.5%, NO_x 8.0ppm, CO 1732ppm, CO_2 3.64%의 조건으로 조성하여 2차연소기에 유입토록 하였다. 이러한 성분의 배가스는 유량변화시 유량측정 및 제어할 수 있는 제어장치, 온도조건 변화시 가열할 수 있는 전기히터와 산소농도 변화시 산소공급할 수 있는 장치를 통과하면서 Table.1에서와 같은 조건별로 변화시켜 실험코자하는 2차연소부

에 공급하면서 연소특성을 실험하였다. 즉 산소농도를 19%로 고정시킨 후 기류의 온도를 200℃와 400℃에서 기류의 유량을 변화시키면서 화염내 발생하는 NOx와 온도 및 화염구조를 촬영하면서 특성실험을 실시하였다.

Table.1 Experimental condition

유량/ 유속	온도 (℃)	측정대상
5.0(m ³ /h)/ 0.86(m/s)	200	NOx, Temp., 화염구조
	400	
7.5(m ³ /h)/ 1.29(m/s)	200	NOx, Temp., 화염구조
	400	
10.0(m ³ /h)/ 1.72(m/s)	200	NOx, Temp., 화염구조
	400	

화염내의 성분은 배가스성분 흡입용 probe와 배가스 분석기를 사용하여 수직방향으로는 화염이 가장 안정화된 위치라고 판단되는 80mm지점에서 수평방향으로 5mm간격으로 측정하였으며, 또한 화염 중심부에서 수직방향에 대한 실험은 수직방향으로 40mm간격으로 각각의 배가스 성분과 온도변화를 온도와 기류의 유량변화에 따라 측정하였다. 2차연소부 노즐의 연료는 국내 공급되는 천연가스(Natural Gas)를 사용하였으며 노즐로 공급되는 연료는 기류의 유량에 관계없이 0.18Nm³/h씩 항상 일정하게 공급하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 온도분포

Fig.2는 200℃ 기류의 유량변화에 따른 수직높이 80mm에서 수평방향으로의 온도분포를 나타내고 있으며 유량 5m³/h인 경우 중심축에서의 온도는 약 800℃정도이며 10m³/h에서는 약 1000℃정도까지 상승하는 것으로 나타나고 있다. 또한 수평방향의 온도분포는 완만하게 하락하는 경향을 나타내고 있으며 약 25mm지점에서 500℃ 이하까지 감소하고 있다. 즉 이러한 온도분포는 화염이 25mm지점까지 형성되고 있음을 의미한다. Fig.3는 화염 중심에서 수직방향에 대한 온도분포를 나타내고 있다. 유량이 증가함에 따라 온도분포는 다소 상승하는 것으로 나타나고 있으며 수직높이 약 80mm정도에서 가장높은 온도를 나타내고 있다. Fig.4는 400℃ 기류에서 Fig.2과 같은 조건으로 실험한 결과이다. 기류온도 200℃에서는 유량변화에 따라 화염의 온도변화가 뚜렷하게 나타났으나 400℃에서는 기류의 유량변화에 따른 온도변화는 명확하게 구분되지 않는 것으로 나타났다. 또한 Fig.5는 Fig.3과 동일실험 조건하에서 기류의 온도를 400℃로 상승시킨 경우의 온도분포를 나타낸 그림이다. 기류의 유량에 의한 변화도 불명확하게 나타나고 있으며 수직방향 80mm지점에서의 온도가 가장높게 나타나고 있다. 기류의 온도가 400℃인 조건에서 기류의 유량에 의한 온도분포가 명확하게 구분되지 않는 것은 연료(천연가스)의 발화온도인 500℃에 근접해 있으므로 연소조건이 양호하여 본 실험의 유량조건 보다는 기류의 온도에 의하여 화염이 지배되기 때문인 것으로 판단된다.

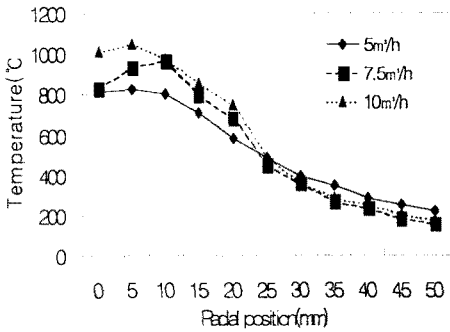


Fig.2 Distribution of temperature with respect to flow rate (temp. = 200°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

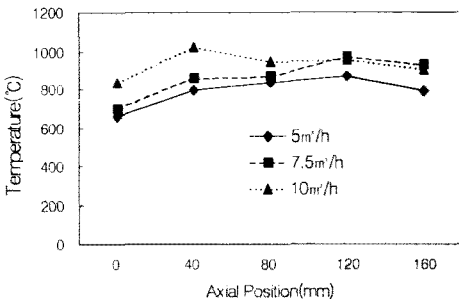


Fig.3 Axial distribution of temperature with respect to flow rate (temp. = 200°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

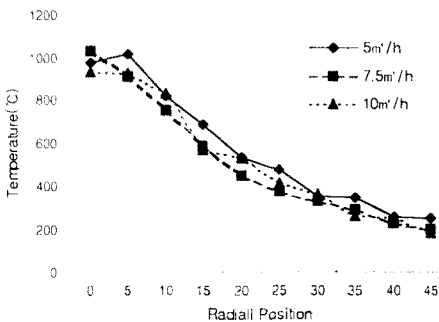


Fig.4 Distribution of temperature with respect to flow rate (temp. = 400°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

400°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

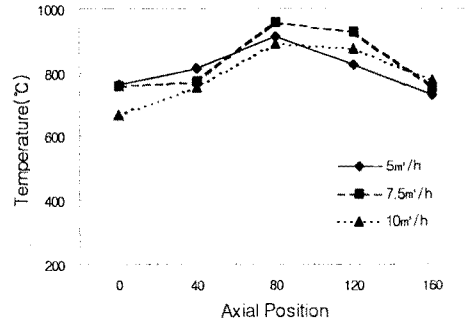


Fig.5 Axial distribution of temperature with respect to flow rate (temp. = 400°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

3.2. NO_x 생성

Fig.6, Fig.7은 기류온도 200°C에서, Fig.8, Fig.9은 400°C에서의 NO_x분포를 나타낸 그림이다. Fig.6은 수평방향에 대한 기류의 유량별 온도분포를 나타낸 결과로서 기류가 5m³/h에서는 중심축에서 약 22ppm정도의 NO_x가 생성되고 있으며 수평방향으로 약 15mm지점부터는 10ppm 이하로 감소하고 있다. NO_x생성도 온도분포와 마찬가지로 기류의 유량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 10m³/h에서는 약 35ppm정도까지 생성하고 있다. 수평방향으로의 NO_x생성분포는 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으며 약 20mm지점에서부터는 증감이 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 즉 20mm부터의 NO_x발생량은 대부분 1차연소기에서 발생한 것으로 판단할 수 있다. Fig.8은 400°C에서의 수평방향에 대한 NO_x생성 분포를 나타낸 그림이다. 기류온도 200°C인 경우보다 약 1.5배정도의 높은 NO_x발생을

나타내고 있으며 기류의 유량이 증가함에 따라 온도의 증가율에 비하여 월등이 높은 비율로 증가하고 있음을 나타내고 있다. Fig.7, Fig.9는 화염중심부에서 수직방향의 NO_x생성 분포를 나타낸 그림으로서 기류유량이 많을수록 NO_x 발생량은 감소하며 화염 표면에서는 기류유량이 많을수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 기류유량이 많을수록 연소가 활발해져 연료가 상대적으로 희박해지므로 prompt NO_x기구의 특성에 따라 NO_x생성기구가 화염온도 보다는 공연비 즉 연료의 혼합상태에 의해 지배되기 때문인 것으로 판단된다.

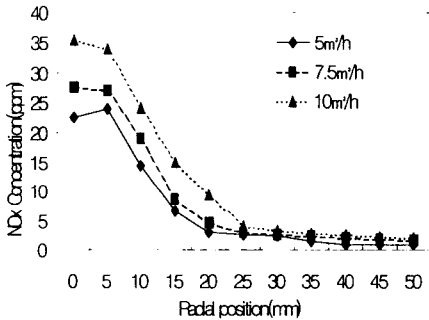


Fig.6 Distribution of NO_x with respect to flow rate(temp.= 200°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

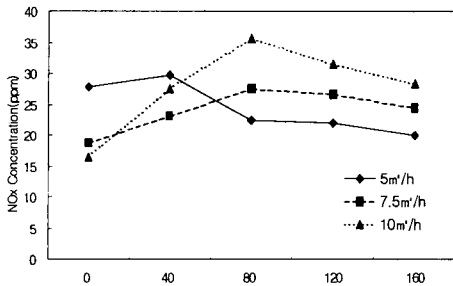


Fig.7 Axial distribution of NO_x

with respect to flow rate at 200°C

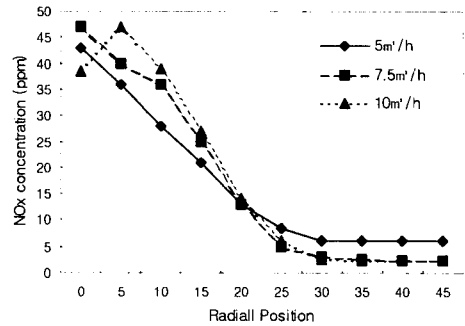


Fig.8 Distribution of NO_x with respect to flow rate(temp.= 400°C, y=80mm, O₂ = 19 vol%)

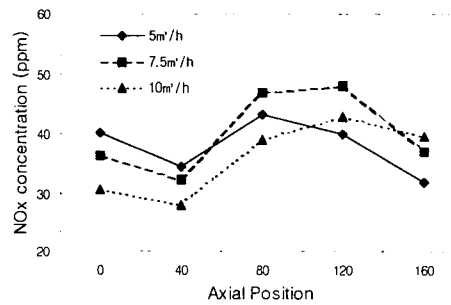
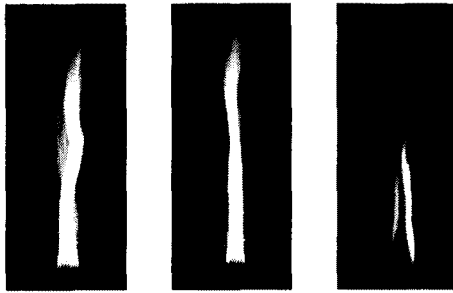


Fig.9 Axial distribution of NO_x with respect to flow rate at 400°C

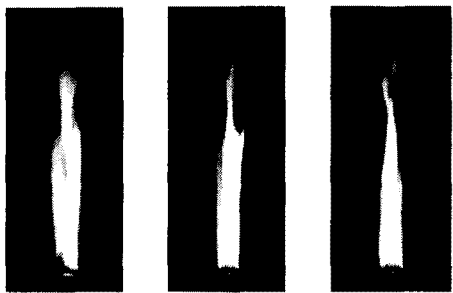
3.3. 화염의 가시화

Fig.10은 산소농도 19%, 기류온도 200°C에서 기류의 유량에 따른 화염의 구조를 촬영한 결과이다. (a)는 5m³/h의 유량에 대한 결과로서 화염폭이 넓고 붉은색을 나타내고 있으며 (b)는 7.5m³/h에 대한 결과로서 화염길이가 약간 짧아지고 폭이 좁아지는 모양을 나타내고 있다. (c)는 약한 청색으로 화염이 불안정된 모습을 나타내고 있다. Fig.11는 기류온도가 400°C 상태에서의 화염구조를 나타낸 결과이다. 기류의 유량이 증가할수록 200°C인 경우에 비하여

화염구조상 뚜렷한 변화를 보이지 않고 있다. 단지 연소시 화염이 붉은색이 강해지고 난류성이 증가한다는 것을 확인하는 정도이다. 기류온도 200℃, 400℃에서 기류유량이 10m³/h 인 경우 불꽃은 화입에서 침염으로 전환되는 분기점이며 이러한 형상은 Fig.10 (c)에 일부 나타나고 있다. Fig.10과 Fig.11를 비교해 보면 기류의 온도가 증가함에 따라 화염은 크게 안정화되고 화염폭이 넓으며 길이는 짧아지고 밝은색을 나타낸다. 이러한 현상은 기류의 온도증가에 따라 연소진행이 활발하며 이로 인해 붉은 발광색을 나타내는 것으로 판단된다.



(a) 5m³/h (b) 7.5m³/h (c)10m³/h
Fig.10 Photographs with respect to flow rate at 200℃



(a) 5m³/h (b) 7.5m³/h (c)10m³/h
Fig.11 Photographs with respect to flow rate at 400℃

4 결 론

확산화염 주위로 흐르는 기류조건으로 온도 200℃와 400℃, 산소농도 19%에서 유량을 5m³/h, 7.5m³/h, 10m³/h로 변화시키면서 이때의 화염온도, NO_x생성 및 화염구조를 실험한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 기류온도 200℃에서 화염 중심부의 온도는 약 1000℃ 정도이며 기류 유량의 증가에 따라 약 200℃정도 증가하였다.
- (2) 기류온도 400℃에서는 중심부의 온도는 약 1000℃정도로써 200℃와 비슷하게 나타났으나 유량의 증가에 따른 온도변화는 거의 없는 것으로 나타났다.
- (3) 기류온도 200℃에서의 NO_x생성량은 약 20~35ppm정도이며 유량의 증가에 따라 크게 증가하였다.
- (4) 기류온도 400℃에서의 NO_x생성은 약 35~55ppm정도이며 유량의 증가에 따라 크게 증가하며 또한 기류온도 200℃에 비하여 약 1.5배정도 많이 배출하였다.
- (5) 화염구조는 유량에 따라 사진 외관상 변화는 적은 것으로 나타났으나 기류의 온도가 200℃에서 400℃로 증가함에 따라서 화염이 안정화되고 화염길이는 짧아지고 폭은 넓어지는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Ohono, Y. Hisazumi, Y., "Combustion Characteristics under Condition of Low-oxygen Atmosphere and High-level Steam Addition", the

4th JSME-KSME Thermal Institute, Pittsburgh, 1971, pp. Engineering Conference, October 373-379 2000, Kobe, Japan. A101.

(2) 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 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, pp. 804-809

(3) 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

(4) J. Yuan and I. Naruse, 1998, "Modeling of Combustion Characteristics and NOx Emission in Highly Preheated and Diluted Air Combustion" International Journal of Energy Research, Vol. 22, pp 1217-1234

(5) 정대현, 양제복, 노동순, 김원배, 1998, "고온, 희박공기 연소에 관한 실험적 연구", 한국연소학회, vol. 3, pp 49-57.

(6) Tomeczk, J., Goral, H., and Gradon B., "Gasdynamics abatement of NOx emission from industrial natural gas jet diffusion flames." Combustion Science and Technology, 1995, vol. 105, pp.55~65

(7) Fenimore, C. P., 'Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames', Thirteenth International Symposium on Combustion, The Combustion