

고온 배기가스의 산소농도가 배기가스이용 확산화염의 NOx 발생에 미치는 영향

손화승* · 장시웅* · 최동수* · 김호영**

The Effect of Oxygen Concentration in Hot Exhaust Gas on the NOx Emission of Diffusion Flame in Exhaust Gas

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

Key Words: NOx emission(질소산화물 배가스), duct burner(덕트버너), oxygen enriched combustion(산소부하연소), NOx formation(질소산화물 생성)

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 diffusion flame of second stage combustor with the variations of oxygen concentration and supplying rate of hot exhaust gas from first stage combustor. It also examined the flammability range and NOx formation of the second stage combustor in which the fuel is supplying into the mixture of oxygen hot exhaust gas from first stage combustor. The results show that the enrichment of oxygen and increase of exhaust gas lead to increase the NOx up to 50 ppm with 23% O₂ condition

1. 서론

최근 화석연료의 지나친 남용으로 인하여 지구 환경오염문제가 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 2차연소기(Power Combustor) 연소, 가스터빈 열병합발전시스템에서 수요측 열수지 균형을 위한 덕트버너 연소 등에서 필요한 기술이다. 이와같은 연소 방식은 1차연소에 의한 고온, 희박산소상태의 배가스에 연료를 공급하여 재 연소시키는 방식으로

에너지의 효율적 이용과 공해물질인 NOx 저감을 목적으로 국내외적으로 많은 연구가 수행중에 있다.^(1,3)

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. 반면 기류가 대기상태보다 고온이므로 연료의 화학적 반응을 활성화하여 화염내 온도분포를 대체로 안정화시키며 화염내 국부적 고온영역발생을 억제하므로써 Thermal NOx생성을 저감시키는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

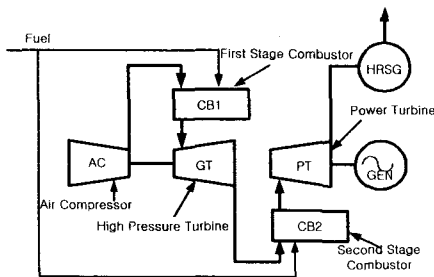
동일한 조건의 기류에 의한 예혼합연소에서는 기류의 산소농도가 증가하면 화학반응이 활발해지고 화염온도가 상승하면서 NOx 생성이 증가하게 된다. 본 실험과 같은 확산화염 연소에서는 기류의 유량이 적고 불완전연소 성격이 강한 조건에서 불꽃의 온도가 1000℃ 이하로서 prompt NOx에 영향을 많이 받으며 온도에 의한 영향은

* 한국가스공사 연구개발원

** 고려대학교 기계공학과

비교적 적은 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 산소의 농도에 따라 NO_x 생성반응이 기류의 온도에 따라 반응하는 상관관계와 NO_x 생성기구를 이해하는데 중요한 요소라고 할 수 있다.^(4,5)

Fig.1은 가스터빈 열병합발전시스템의 개념을 나타내고 있다. 1차연소기(CB1)에서 연료를 연소시켜 산소농도 약 16% 상태의 배가스에 2차연소기(CB2)에서 연료를 주입하여 재연소시키는 개념으로 1차연소 배가스의 감열에너지를 2차연소기에서 이용함으로써 시스템 효율을 향상시키고



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

저산소 농도의 연소에 의한 NO_x 생성을 억제시킬 수 있는 방식이다.⁽¹⁾

본 연구에서는 천연가스를 연료로하여 1차 연소기에서 연소시킨 희박산소상태의 배가스를 가열용히타를 이용하여 적절한 온도상태의 기류를 생성시키고, 발생된 고온 배가스를 기류로 하여 산소농도별로 2차연소기에서 연소를 통한 화염온도 및 NO_x 생성관계를 분석하였다. 고온, 희박산소상태를 기류로하는 연소에서의 NO_x 배출특성은 가스터빈 발전시스템, 열병합발전시스템의 연소기 및 산업용 연소로 등에 적용되어 에너지 절감 및 질소산화물 저감을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치는 Fig.2 와 같이 1차연소부, 1차연소 배가스의 유량제어부, 산소농도 및 온도제어부, 2차연소부 등 4개부분으로 구성되어 있다. 1차연소부는 상용버너의 공기공급용 팬, 연료공급용 노즐 및 연소장치를 실험에 적합하도록 개조, 제작하였다. 1차연소부에 공급되는 연료(천연가스)유량과 공기유량은 유량계를 부착하여 측정이 가능토록 하였으며 연소된 배가스는 배가스 유량

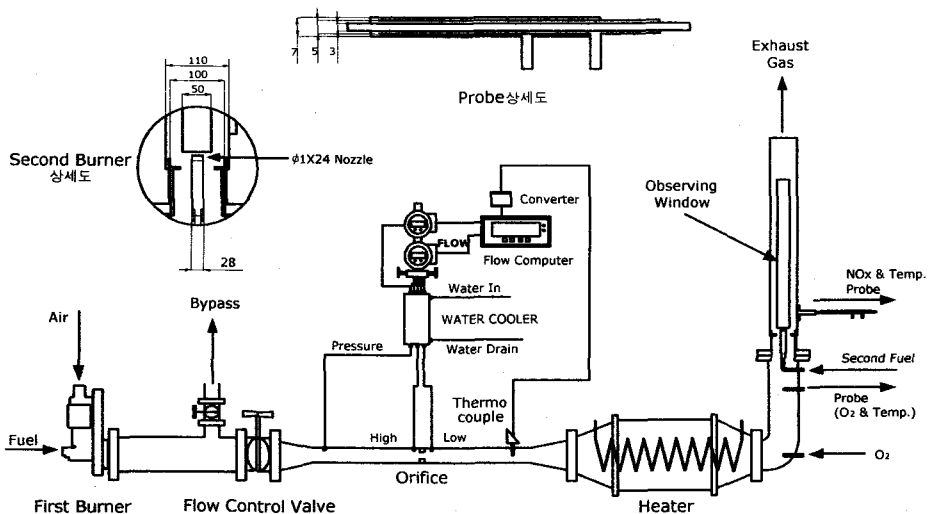


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

조절밸브를 통하여 필요한 유량만 2차 연소부에 공급토록하고 잉여 배가스는 외부로 배출되도록 하는 By-pass 장치를 1차연소부 후단에 부착하였다. 배가스유량계는 유량의 안정을 위하여 ϕ 50에 길이 1m의 인입관 중심부에 오리피스를 이용한 장치로서 배가스의 온도와 압력측정 센서를 배관내에 부착하여 유체의 온도 및 압력의 보정용 유량컴퓨터를 채택한 장치로 구성하였다. 유량계 어부 후단에는 실험조건에 적합한 온도의 기류를 만들기 위한 15kW급 고온 전기히터와 산소공급 장치 및 배가스성분 측정장치를 부착하여 산소농도별, 기류온도별, 기류유량별로 유입기류를 제조할 수 있도록 하였다. 이러한 장치로 기류유량은 0~20 l/h, 기류온도는 50~800℃, 기류의 산소농도는 5~25vol%까지 만들 수 있는 장치이다.

또한 2차연소부는 실험 및 측정장치에는 측정코자하는 화염의 여러 가지 특성을 측정할 수 있는 부분으로 ϕ 100의 원통형 관을 통하여 실험조건에 적합한 기류가 2차연소부에 유입되며 중앙에는 ϕ 1x24개의 구멍이 기류에 직각방향으로 연료가스가 분출되도록 하는 노즐이 설치되어있다. 화염에 대한 성분(NOx, CO, CO₂, O₂ 등) 측정은 Fig.2에서와 같이 배가스 흡입용 Probe를 제작하여 화염의 성분을 흡입한 후 흡입성분의 변화를 최소화하기 위하여 수냉식 냉각장치에 의한 급냉 후 배가스 성분분석기에 유입토록하였다. 배가스성분은 모델 PG250(Horiba사, 일본)를 사용하여 측정하였다. 연소꽃물의 온도상태는 그림과 같이 0.3mm R-type 열전대를 사용하여 측정하였다.

2.2. 실험방법 및 조건

본 연구목적에 적합한 실험을 수행하기 위하여 확산연소부 주변기류의 산소농도와 온도 변화에 따른 연소상태를 변수로하여 화염상태를 측정하였다. 1차 연소부에서는 2차연소부 전단에서 연소된 배가스의 성분을 측정하여 실험조건에 가장 적합하다고 판단되는 조건의 배가스를 제조할수 있는 상태의 연료와 공기를 공급하여 연소시켰다. 이때 1차연소 된 배가스는 산소농도 15%, 배가스 유량 5m³/h 상태에서 2차연소부에 공급되는 과정에 전기히터와 산소를 공급하여 Table.1에서

와 같은 조건별로 2차연소부에서 연소특성을 측정하였다. 본 실험은 배가스기류와 연료가 각각 공급되어 연소되며 기류의 산소가 희박한 상태에서 시작되므로 연소상태는 불완전연소 상태로서 산소농도 15%정도에서 소화(blow off)되며 연료과잉시 lifting 현상이 쉽게 일어나는 조건에서 실시하였다. 그러나 이러한 조건은 산소농도와 기

Table.1 Experimental condition

F1 (m ³ /h)	온도 (℃)	O ₂ 농도 (vol%)	측정대상
5.0	200	15.5, 17, 19, 21, 23	NOx, CO ₂ , O ₂ , Temp.
5.0	400	15.5, 17, 19, 21, 23	NOx, CO ₂ , O ₂ , Temp.

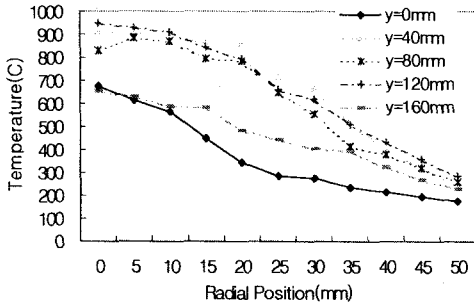
류의 온도변화에 반응이 명확하게 나타나므로 산소농도와 온도에 따른 NOx 생성반응을 규명하는데 적합하다고 판단되어 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

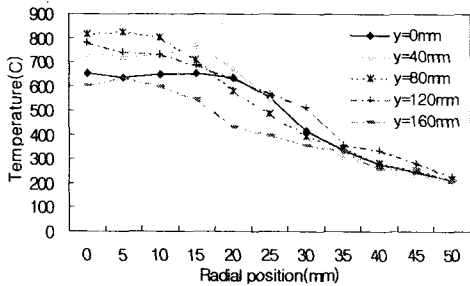
3.1. 온도분포

1차연소기에서 연소된 배가스 기류의 상태를 유량 5.8m³/h, 온도 200℃와 400℃, O₂ 15%가 되도록 연소시켜 2차연소기에 유입되도록 실험장치를 고정시킨 후 1차연소기 후단에서 산소를 공급하는 방식으로 산소농도를 조절하면서 실험한 결과이다. Fig.3은 이상의 조건에서 실험을 실시한 결과 연소가 이루어지기 위한 최소산소농도는 약 15.5%이었으므로 O₂ = 15.5, 19, 23 vol% 조건에서 수평방향에 대한 온도분포를 측정한 결과이다. 화염은 중심부로부터 대칭으로 20~30mm내에 타원형태의 확산화염으로써 수직방향으로는 약 180mm까지 생성됨을 알 수 있다. Fig.3 (a)에서는 중심부의 온도가 약 950℃인 반면 X=50mm에서는 약 750℃로서 약 200℃ 정도로 감소됨을 알 수 있으며 수직방향으로도 높이에 따라 약 300℃정도의 편차를 나타내고

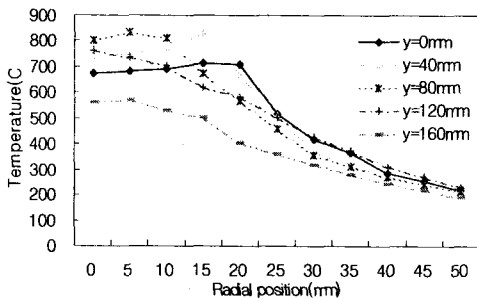
있다. (b), (c)에서는 중심부 온도가 약 850℃, X=50mm에서는 약 200℃ 정도로 감소되었으며 중심부의 온도는 산소의 농도가 증가할 수록 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 화염이 확산화염으로 연료가스와 산소가 예혼합되지 않은 상태로 단지 화염 주변은 접촉에 의해서만 반응이 일어나기 때문에 불완전 연소율이 높으며 이로 인해 산소의 농도가 증가할 수록 화염의 수직길이는 길어지고 진한 노란색을 나타내며 화염의 온도는 낮아지는 현상이 발생되는 것으로 판단된다.



(a) O₂ = 15.5 vol%



(b) O₂ = 19 vol%

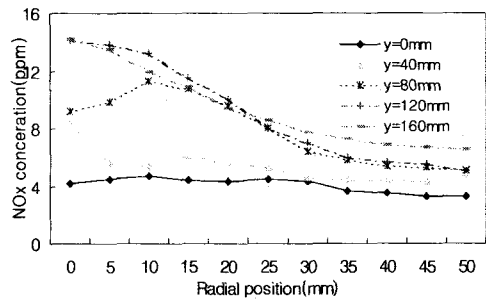


(c) O₂ = 23 vol%

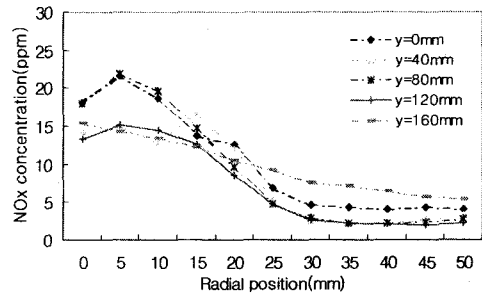
Fig.3 Distribution of temperature with respect to oxygen concentration at 200℃

3.2. NO_x 생성

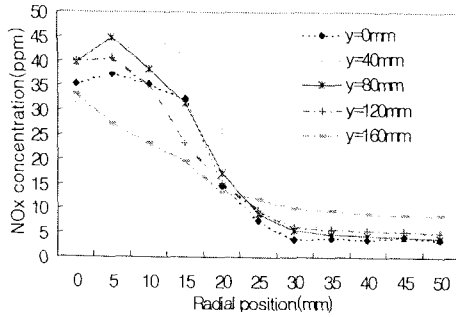
Fig.4는 연소부 내에서의 산소농도에 따른 NO_x 농도분포를 나타낸 결과이다. (a)의 경우 수직방향으로 약 80mm에서 NO_x 발생량이 약 15ppm정도이며 x=25mm 정도에서는 약 8ppm이하로 대체로 NO_x 발생량이 낮은 것으로 나타나고 있다. 반면 (b),(c)에서와 같이 산소농도가 증가할수록 화염 중앙부에서의 NO_x 발생량은 크게 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이와같이 산소농도 증가에 따라 Fig.3의 결과에서 언급되었듯이 화염온도는 산소농도의 증가에 따라 화염은 길어지지만 온도는 낮아지는 반면 NO_x 발생량은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 일반적으로 thermal NO_x의 Zeldovich 생성기구에서는 화염온도가 1000℃이상인 조건에서 NO_x생성을 지배하지만 본 조건에서와 같이 연료가 농후하고 화염이 저온인 확산화염(층류화염)에서는 prompt NO_x가 지배하기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험결과에서도 화염의 온도는 낮아지고 있으나 NO_x 생성량은 증가하고 있는 현상은 연소초기의 prompt NO_x와 또한 화염의 길이가 길어지므로 인해 NO_x생성 면적의 증가로 NO_x 생성량이 증가하는 것으로 판단된다.



(a) O₂ = 15.5 vol%



(b) O₂ = 19 vol%



(c) $O_2 = 23 \text{ vol}\%$

Fig.4 Radial distribution of NOx with respect to oxygen concentration at 200°C

Fig.5는 화염 중심에서의 축방향에 대한 NOx 발생량을 산소농도별로 분석한 결과이다. 산소농도가 15.5%인 경우 NOx생성은 약 5ppm정도이며 23%인 경우 약 45ppm 정도까지 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 수직 높이에 따른 NOx 생성량 변화는 대체로 적으며 단지 노즐부근에서 미연소 연료가 다량 존재하므로 NOx 생성량도 적은 것으로 판단되며 화염 상층부 일수록 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig.6은 기류의 온도를 400°C 조건에서 실험한 결과이다. 200°C와 유사한 경향을 나타내고 있으며 단지 NOx 발생량이 약 30ppm씩 증가하는 것으로 나타나고 있다.

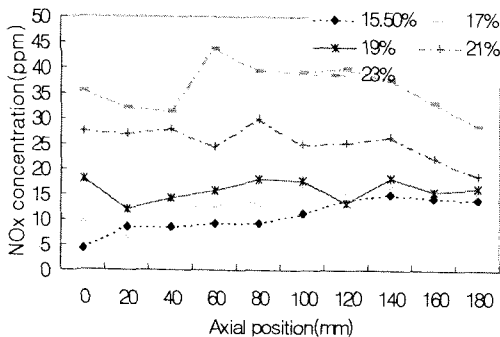
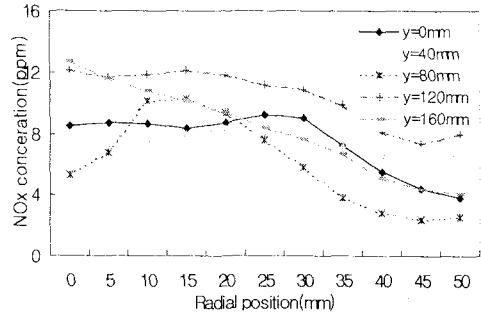
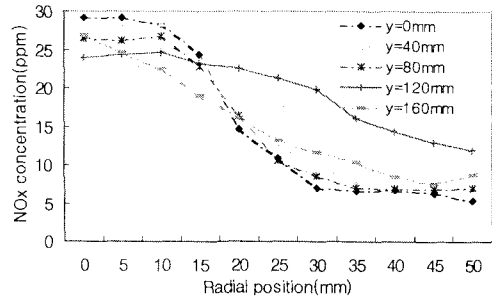


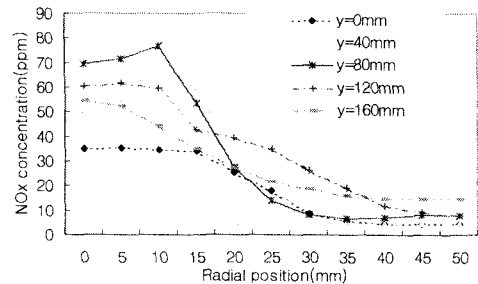
Fig.5 Axial distribution of NOx with respect to oxygen concentration at 200°C



(a) $O_2 = 15.5 \text{ vol}\%$



(b) $O_2 = 19 \text{ vol}\%$



(c) $O_2 = 23 \text{ vol}\%$

Fig.6 Radial distribution of NOx with respect to oxygen concentration at 400°C

3.3. 화염의 가시화

Fig.7은 기류의 온도가 500°C인 조건하에서 산소농도에 따른 화염의 구조를 나타내는 사진이다. (a)는 산소농도 15.5%로서 이하인 경우 blow off 현상이 나타나는 한계점이며 화염이 lifting 현상과 함께 약 8cm 정도의 화염길이에 청염의 모양을 나타내고 있다. (b)는 산소농도가 17%인 경우로서 화염이 15.5%보다 다소 안정화된 모양이며 약 10cm 정도 높이에 청염을 나타내고 있다. (c)는 산소농도 19%로서 산소농도가

증가함에 따라 높이는 약 16cm로 커지며 불완전 연소에서 볼 수 있는 yellow 화염이 나타나기 시작한다. 21%인 (d)에서는 화염 높이는 약 18cm 정도이며 red-yellow 화염이 강하게 나타나며 23%인 (e)에서는 약 17cm 높이에 (d)의 현상이 약간 강해지며 밝은색에 화염이 다소 안정화되어지는 것으로 나타났다.

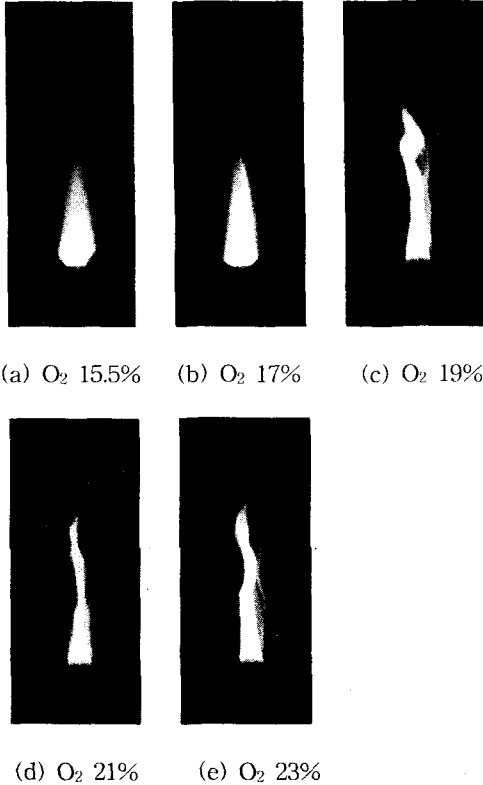


Fig.7 Photographs with respect to oxygen concentration at 200℃

4 결 론

확산화염 주위로 200℃의 기류를 5m/h 유량으로 흐르게 하면서 기류의 산소농도에 따른 화염 구조, 온도, NOx 생성특성을 실험한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 확산화염 주위의 기류가 저산소의 산소농도이며 200℃의 고온조건에서는 화염의 연소진행은 대단히 저조하며 불완전 연소현상이 강하게 나타났다.
- (2) 화염의 온도는 산소농도 15.5%에서 약 95

0℃이며 23%에서는 약 750℃ 정도로서 산소농도가 증가할수록 화염내 온도는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기류의 산소가 연료와 반응하면서 화염표면의 반응이 활발해지고 연료가 분사되는 것을 저해하는 현상이 발생하여 불꽃이 길어지는 반면 화염온도는 감소하는 것으로 판단된다.

(3) 산소농도의 증가에 따라 화염내 온도는 감소하는 반면 NOx발생량은 증가하는 것으로 나타났다. thermal NOx는 온도의 증가에 따라 특히 1000℃ 이상에서 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 온도감소에 따라 NOx 생성량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 화염온도가 1000℃ 이하인 층류성 화염에서는 NOx 생성이 thermal NOx 보다는 Prompt NOx에 의하여 지배되는 것으로 판단된다.

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 Engineering Conference, October 2000, Kobe, Japan. A101.
- (2) 신영삼, 천무환, 장인갑, 김태한, 김덕줄, 1997, "환경보염기 후류에 형성된 확산화염의 구조에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp 62-67.
- (3) 정대현, 양제복, 노동순, 김원배, 1998, "고온, 희박공기 연소에 관한 실험적 연구", 한국연소학회, vol. 3, pp 49-57.
- (4) 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
- (5) Fenimore, C. P., 'Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames', Thirteenth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1971, pp. 373-379