

## 다단 연소기를 이용한 LNG 화염의 NOx 발생에 관한 실험적 연구

한지웅\* · 안국영\*\* · 김한석\*\* · 정진도\*\*\* · 박경진\*\*\*\*

### An Experimental study on the NOx Formation of LNG Flame in Fuel Staged Combustor

Ji-Woong Han, Kook-Young Ahn, Han-seok Kim, Jin-Do Chung and Kyung-Jin Park

**Key Words:** Fuel/Air Staged(연료/공기 다단), Nozzle(노즐), NOx(질소산화물), Combustor(연소기), Primary Zone(주연소영역), Secondary Zone(후연소영역)

#### Abstract

An Experimental study on the NOx formation of LNG flame in fuel staged combustor has been studied. The design concept of multi fuel/air staged combustor is creation of two separate flame, a primary flame is act as a pilot flame for the secondary combustion stage combustion zone, where most of fuel burns. Experiments were performed on a semi-industrial scale (thermal input 0.233 MW) in a laboratory furnace and Liquefied Natural Gas(LNG) was used as primary and secondary fuels. The study included parametric study to identify the optimum operating conditions which are primary/secondary fuel ratio, and primary/secondary air ratio for reducing NOx emission with two types of nozzle. The test demonstrated that NOx emission can be reduced by >70% in accordance with operating conditions.

#### 1. 서론

삼림 면적이 감소되고, 산업의 발달과 인구의 증가로 말미암아 화석연료의 사용량이 급격히 증가됨에 따라서 자연이 정화할 수 있는 한계를 벗어나고 있다. 이러한 이유로 인해 현재는 화석 연료의 연소시 발생하는 오염물질을 최소한으로 줄이기 위한 노력이 환경규제의 강화와 더불어 한층 가속화되고 있다.

연소가스 중의 오염물질로서 대표적인 것은 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소 등이 있으며 그 중 질소산화물은 광화학스모그의 원인이 되며 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라, 산성비의 원인이 되는 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>.

대기 중에 존재하는 질소화합물로는 NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등이 알려져 있으며 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료의 연소시 발생하는 배출가스 중 광스모그 등을 발생시켜 인체에 직접적인 영향을 주는 NOx는 NO와 NO<sub>2</sub>로 구성되어 있고 일반 연소기의 경우 95% 이상이 NO의 형태로 배출되며 이후 대기 중에 확산되어 공기 중의 산소와 결합하여 NO<sub>2</sub>가 만들어지게 된다. 이러한 NOx의 발생은 연소조건에 많은 영향을 받기 때문에 연소영역에서 NOx의 발생을 최소한으로 하

\* 호서대학교 일반대학원 환경공학과  
\*\* 한국기계연구원 열유체환경연구부 연소환경기체그룹  
\*\*\* 호서대학교 환경공학과  
\*\*\*\* 캠퍼엔지니어링

는 것이 경제적인 측면에서 매우 효과적으로 알려져 있다.

연소시 NOx는 크게 세 가지 원인에 의하여 발생되는데, 첫째는 고온영역에서 공기중의 산소와 질소가 반응하여 발생하는 Thermal NOx가 있으며, 둘째로는 연료중의 질소성분과 공기중의 산소와 반응하여 발생하는 Fuel NOx, 그리고 탄화수소계 연료의 연소시 화염대 영역에서 공기중의 질소 성분과 탄화수소와의 반응에 의하여 발생하는 Prompt NOx이다. 이러한 Thermal NOx, Prompt NOx 및 Fuel NOx는 각각 생성 기구가 틀리기 때문에 NOx 저감을 위해서는 연료의 성상에 맞는 적정 연소기술의 선택이 필요하다<sup>(1)</sup>.

고온에서 주로 발생하는 Thermal NOx의 저감을 위하여 화염대 온도를 낮추는 방법으로 공기 다단 연소방식<sup>(2)</sup>, 연소가스 재순환 방식, 수분사 방식 등을 이용한 연구가 진행중이지만 그 중에서도 본 연구에서 채택한 공기/연료 다단연소를 통한 연소 반응속도 조절방식은 화염을 불안정하게 만들어 연소효율이 저감될 우려가 높으며 특히 선회기 등을 이용한 동축 다단 연소방식은 공기 역학적인 특성에 대한 정보가 발표되고 있지 않고 있어 연소기의 최적설계가 어렵기 때문에 이에 대한 많은 연구가 요구된다.

본 연구에서는 공기 역학적으로 연소 영역을 주 연소영역과 후연소영역으로 형성할 수 있는 2단 동축 공기 공급관과 2단의 연료공급관으로 구성된 연소기를 이용하였다. 이러한 연료/공기 다단 연소화염의 구조는 다음 Fig. 1과 같이 주연소 영역은 주로 화염의 안정화에 기여하는 소위 파이로트 화염의 역할을 하며, 후 연소 영역에서 대부분의 연료가 연소된다. 즉 주연소 영역은 고온 영역이지만 화염대의 크기가 적기 때문에 NOx 발생이 크지 않으며 대부분의 연료가 연소되는 후연소 영역은 주 연소영역에서 생성된 연소생성물이 연소영역을 회색시키기 때문에 화염온도와 산소의 농도를 낮출 수 있어 NOx의 발생이 적은 것이 특징이다.

본 연구에서는 이러한 연료/공기 다단연소기의 연소특성과 NOx 발생 기구를 규명하기 위하여 산화제인 공기와 연료의 혼합특성에 영향을 주는 연료 및 공기 각 단의 선회조건과 분배율을 변수로 하여 이것들과 화염 안정성에 영향을 주는 주 연소영역의 특징 및 NOx 발생과의 상관관계를

고찰하여 다단 연소기의 설계 및 연소 조건에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

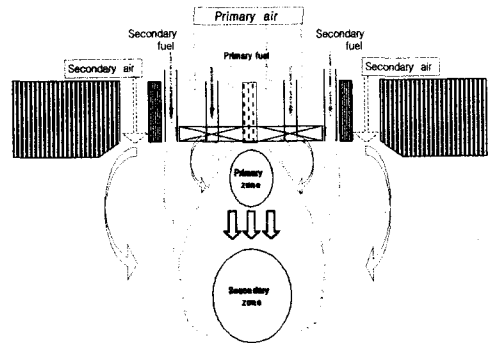


Fig. 1 Flame structure of Fuel/Air staged combustor

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 연소기 및 연소실

실험에 사용한 연소기는 Fig. 1에서와 같이 각 2단의 공기 및 연료공급장치로 이루어져 있다. 본 연구에서는 기존에 발표된 연료/공기 다단연소기의 연소조건을 참고로 하여 주 연소영역에서 연소용 공기의 70%, 연료 20%를 공급할 수 있는 연소기를 설계하였고, 각각의 공급비의  $\pm 30\%$  범위 내에서 실험을 수행하였다.<sup>(1,10)</sup>

또한, 다단연소방식의 문제점인 화염의 안정성을 확보하기 위하여 주연소 공기 공급단에 선회기를 부착하여 안정성을 높이고자 하였다.

공기 및 연료의 혼합 특성은 연소 특성을 결정해주는 주요 인자이다. 이러한 인자의 특성을 규명하기 위하여 주연소 연료의 공급은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 주연소 선회기를 관통하는 4개의 관을 이용하는 방식(이하, 노즐 A)과 중심의 공급관에 연료 분사구를 설치하여 주연소용 공기 방향에 수직하게 연료를 공급하는 방식(이하, 노즐 B)을 택하였으며 후 연소 연료의 공급은 주연소 선회기 외부에 10개의 공급관을 이용하였다.

연소기의 Quarl 형상은 반응 영역에 많은 영향을 줄 것으로 예상되어진다. 본 연구에서는 IFRF에서 적용한 Divergence Quarl을 제작하여 실험에 사용하였다.

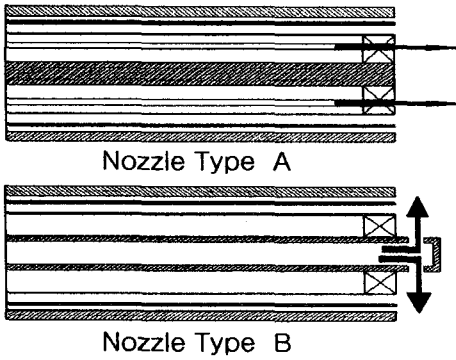


Fig. 2 Nozzle type

Divergence Quarl은 직경비 ( $L/A$ ) = 1.0, 확대비( $B/A$ ) = 2.0, 시작과 끝이  $0^\circ$ 의 각도를 갖는 3차 다항식의 경계조건을 갖는 형상을 이루도록 제작하였다.<sup>(6)</sup>

연소실은 100mm의 단열재를 사용하여 외부의 영향을 최소화하였다.

## 2.2 연료공급 및 계측장치

본 연구에서는 주연소 및 후연소 연료로 LNG를 사용하였는데, 물성치는 Table. 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of LNG

Main species	CH <sub>4</sub> (90%), C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (10%)
Specific gravities	0.55
Ignition point	537℃
Theoretical flame Temp.	2050℃
Combustion range	5~15%
Density	0.8kg/Nm <sup>3</sup>
Lower heating value	9500kcal/Nm <sup>3</sup>
Higher heating value	10537kcal/Nm <sup>3</sup>
Weber's number	13.338WI
Theoretical Air flowrate	10.5Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>

연료 및 연소용 공기의 유량측정은 표준상태에서 보정된 가변 면적 유량계(Rotameter)를 이용하였고, 연료가스와 공기의 유량을 보정하기 위한 온도측정은 T-type 열전대를 사용하였으며, 연소실 내부의 화염온도는 피복형 R-type 열전대를 화염중심으로부터 축 방향으로 10cm 간격으로 설치하여 측정하였고, 열전대로부터 측정된 고온가스의 온도에 대한 복사 열 손실 및 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다.

배가스 측정을 위해 수냉각 방식의 포집용 probe를 stack에 설치하였으며, 포집된 가스는 Electrochemical 방식의 가스분석기 (Greenline MK2)를 이용하여 분석하였다. 가스분석기는 각각의 표준가스를 이용하여 실험 전에 보정하여 사용하였다.

## 2.3 실험방법

본 연구에 사용된 다단연소기의 각 단의 총 연료량은 16.84kg/hr이며 과잉공기비 1.1을 기준으로 하여 (배가스 O<sub>2</sub>=2%) 총 연소공기량을 314.2kg/hr으로 다음 Table.2와 같이 설정하였다.

연료/공기 다단연소기의 경우 각 단에서 공급되는 공기 및 연료의 혼합 특성은 연소 특성을 결정해주는 주요 인자이기 때문에 이러한 인자의 특성을 규명하기 위하여 각 단의 공기/연료의 공급비 변화, 주연소 연료 노즐타입, 총 연료공급량을 변수로 하여 성능실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions

Total Air Flowrate	314.199 kg/hr
Total Fuel Flowrate	16.84 kg/hr
Air Temperature	30 ℃
Fuel Temperature	20 ℃
$\lambda$ (Excess air)	1.1

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 연소특성

Fig. 3은 노즐 A로 주연소 연료를 공급하고 각 주 연소 공기비율에 대한 주연소 연료비율을 변화시킨 경우에 대하여 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 나타낸 결과이다. 본 실험 조건에서는 주연소 공기비가 증가할수록 NO<sub>x</sub>의 배출이 감소되지만 75%이상에서는 NO<sub>x</sub>가 감소되지 않음을 알 수 있다.

초기 주연소 공기비가 증가할수록 배출이 감소되는 것은 서론에서 언급한 바와 같이 주연소 영역의 연소용 공기 공급이 증가 할 수록 희박 연소가 가능해지고 이에 따라 대부분의 연료가 연소되는 후연소 영역의 온도를 낮출 수 있어 NO<sub>x</sub>의 배출이 저감되며 75% 이상에서는 주연소의

연소량의 감소로 후연소 영역 증대되고 이에 따라 다단 연소효과가 감소됨으로서 NO<sub>x</sub> 배출의 저감이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

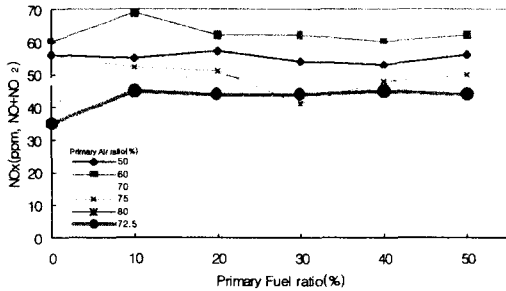


Fig. 3 Emissions of NO<sub>x</sub> Concentrations (Different Primary Air ratio)

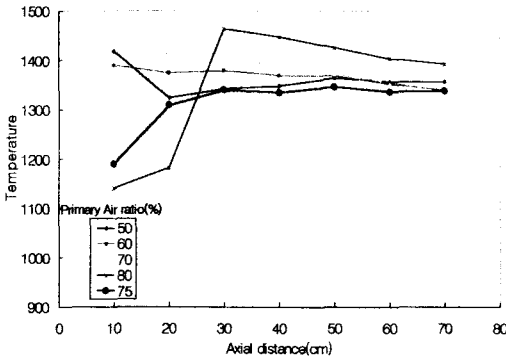


Fig. 4 Central temperature distribution (Different Primary Air ratio, Nozzle type A)

Fig. 4는 주연소 연료비를 20%로 하는 경우 주연소 공기비에 대한 연소실 중심의 화염 온도를 나타낸 결과이다. 주연소 공기비가 증가할수록 주 연소 영역인 노즐선단의 온도는 저하됨을 알 수 있는데 이것은 과잉 공기에 의한 영향임을 예상할 수 있다. 그러나 주연소 공기비가 80%인 경우 후류에서 온도가 상승됨을 알 수 있다. 이것은 노즐 선단의 연소영역이 과잉 공기에 의하여 냉각과 체류시간의 감소로 연소반응이 억제되어 후류에서 연료의 대부분의 연소가 이루어지기 때문으로 생각된다. 따라서 주연소 공기비가 80% 이상인 경우 후류의 화염영역 증대로 NO<sub>x</sub>의 발생이 증대되기 때문에 주연소 공기비가 75% 이

상에서는 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소되지 않음을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 사용된 연소기의 최적 조건을 공기공급률 75% : 25%, 연료공급률 20% : 80% 인 조건으로 선정하였다.

### 3.2 노즐변화에 대한 연소특성

주연소 화염은 3.1에서 언급한 것과 같이 연소시 화염 안정성에 중요한 역할을 하기 때문에 연료의 공급 방식은 연소기의 특성을 결정해주는 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 주 연료의 공급 방식에 대한 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2의 노즐 B를 이용한 연소특성 실험 결과를 노즐 A와 비교하였다.

Fig. 5는 비교적 화염이 안정된 조건인 주 연소 연료공급비를 20%로 하는 경우 각 공기공급량에 대한 화염의 형상을 가시화 한 결과이다. 이 결과로부터 각 노즐에 있어 주 연소 공기공급비가 증가할수록 화염대의 폭이 감소하였는데 이는 공기속도의 증가에 의한 유선의 변화로 생각된다. 그리고 연소영역이 후류로 향하는 것을 알 수 있는데 이것으로부터 과잉 공기에 의한 연소반응이 지연되고 있음을 확인할 수 있다.

주연소 공기 공급비가 약 85% 이상에서는 각 노즐에서 화염이 Blow out 되는데 이것은 주 연소영역의 냉각에 의하여 화염의 안정화에 기여하지 못하기 때문으로 생각된다.

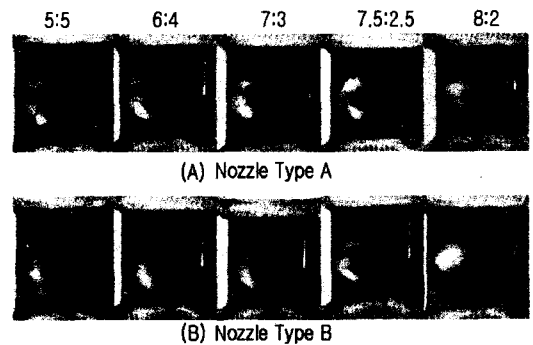


Fig. 5 Flame structure for Primary Fuel Nozzle Type (Fuel ratio 20:80)

Fig. 5의 결과로부터 노즐 B는 노즐 A에 비하여 반경방향으로 넓게 분포됨을 알 수 있는데, 이것은 노즐B의 분사방향이 반경방향이기 때문

으로 생각된다. 그러나 주연소 공기 공급비가 80%인 경우에는 노즐 B가 노즐 A에 비하여 화염 폭이 감소됨을 알 수 있는데, 이것은 주 연소 연료의 공급 위치에 따른 것임을 예상할 수 있다.

Fig. 6은 각 노즐에 대하여 주연소 연료를 20%로 하는 경우 주연소 공기비에 대한 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 나타낸 결과이다. 주연소 공기 공급비가 65% 이하에서는 노즐 B의 경우가 A보다 NO<sub>x</sub> 배출이 적게 됨을 알 수 있다. 이것은 주연소 공기 공급비가 적은 조건에서는 주 연소 연료가 재순환 영역을 관통하여 주 연소 영역이 확장되어 주연소 영역의 화염 온도가 저하되기 때문으로 생각된다. 그러나 주연소 공기 공급비가 65%이상에서는 주연료가 재순환영역을 관통하지 못하여 화염대가 오히려 줄어들게 되어 화염온도가 높아 NO<sub>x</sub>의 배출은 주 연료공급 위치가 중심에 있는 노즐 B의 경우가 A보다 NO<sub>x</sub> 배출이 오히려 증가됨을 알 수 있다.

이러한 결과를 좀더 자세히 알아보기 위해 공기공급률이 50% : 50% 인 조건과 75% : 25% 인 두 가지 조건에 대한 축 중심방향의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다.

공기공급률이 50% : 50% 인 (A) 에서 보는 바와 같이 전체적으로 노즐 B의 온도가 A보다 현저하게 낮음을 알 수 있는데, 이는 노즐 B의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 주연소 공기공급이 상대적으로 낮아 주연소 영역을 연료가 관통하여 화염대를 크게 해서 전체적인 온도가 떨어졌기 때문으로 생각된다. 또한 (B) 에서는 주연소 공기공급량이 많아지면서 화염폭이 작아져 화염온도가 상승하였기 때문에 전체적으로는 노즐 A에 비해 다소간 높은 NO<sub>x</sub> 배출량이 나타남을 알 수 있다.

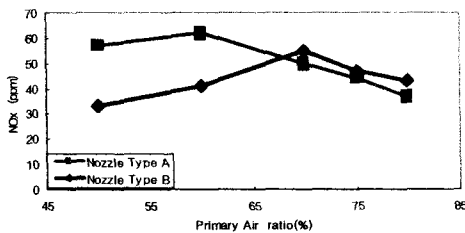
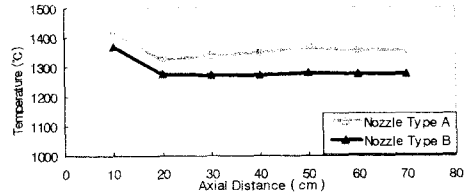
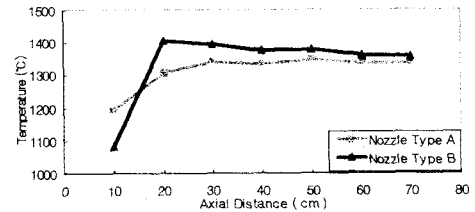


Fig. 6 NO<sub>x</sub> emission for nozzle types



(A) Air ratio : 50:50



(B) Air ratio : 75 : 25

Fig. 7 Central temperature distribution for nozzle types (Fuel ratio 20:80)

### 3.3 연료 공급량변화(Turn Down) 특성

산업현장에서는 연소기의 부하를 낮추어야 할 경우가 많이 발생되며 이 경우에도 각 연소 특성이 유지되어야 한다. Fig. 8은 주연소 공기 공급비를 75% 주 연소연료를 20%로 하여 과잉 공기비를 1.1로 일정하게 유지하는 경우 공급 연료량의 변화(Turn Down)에 대한 화염의 가시화와 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 나타낸 결과이다.

연료의 공급량을 감소시킬수록 화염 영역은 축소되나 NO<sub>x</sub>의 배출은 일정하게 됨을 알 수 있다. 화염 영역이 감소해도 연료 및 공기의 유속이 상대적으로 감소되기 때문에 고온 영역에서의 체류시간의 증가로 인하여 화염대의 축소에 의한 NO<sub>x</sub>의 저감은 발생하지 않는 것으로 생각된다.

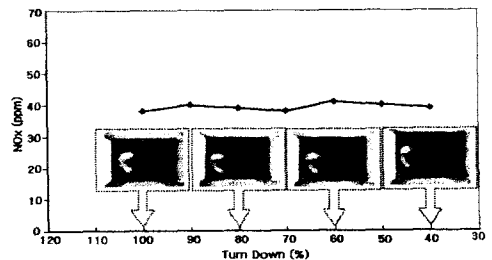


Fig. 9 NO<sub>x</sub> emission & Flame Structure for turn down ratios

#### 4. 결론

공기/연료 2단 연소기의 연소특성 및 NO<sub>x</sub> 발생기구를 예상하기 위하여 각단의 공기 및 연료량 및 노즐변화에 대한 연소실험을 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주연소 공기비가 증가할수록 과잉 공기에 의한 영향으로 인하여 노즐전단의 온도는 하강하는 경향을 보이며 공기비가 75% 이상에서는 후류에서 온도가 상승하면서 NO<sub>x</sub>도 증가함을 알 수 있었다. 이것은 노즐 전단의 연소영역이 과잉 공기에 의하여 냉각과 체류시간의 감소로 인해 연소반응이 억제되며, 후류에서 연료의 대부분의 연소가 되어 2단 연소 효과가 감소되기 때문이다.

(2) 각 노즐에서 주연소 공기 공급비가 약 85% 이상에서는 화염이 소멸되는데 이것은 주연소영역의 냉각에 의하여 주연소화염이 화염의 안정화에 기여하는 소위 파이로트 화염의 역할을 하지 못하기 때문이다.

(3) 노즐 A와 B를 비교하여 보았을 때, 주연소 공기공급량이 적은 경우에는 노즐 B의 NO<sub>x</sub> 배출량이 낮았으나, 공기공급량이 늘어감에 따라 다소간 높은 NO<sub>x</sub>를 배출하였다. 이것은 주연소 공기공급량이 적은 조건에서 노즐 B의 경우 주연소 연료가 재순환 영역을 관통하여 화염대가 커지기 때문에 노즐 A에 비해 전체적인 온도가 낮은 반면, 공기공급량이 많아지면 주연소 연료가 재순환영역을 관통하지 못하고 화염대가 오히려 축소되어 전체적인 온도가 다소간 높아지기 때문이다.

본 실험을 기초로 계속적인 성능실험을 통한 효율적인 NO<sub>x</sub> 저감기술로서 공기/연료 2단 연소 방법을 이용한 저 NO<sub>x</sub> 연소기의 개발이 기대된다.

#### 참고문헌

- (1) “大氣汚染防止の技術と機器”, 1988, 産調出版, pp. 26~64.
- (2) Fenimore, C. P., 1979, “Studies of

fuel-nitrogen in rich flame gases.”, 17th Sym(Int) Comb., The combustion Institute, Pittsburgh.

- (3) Ahn K. Y., Kim H. S., Cho E. S., Ahn J. H. and Kim Y. M., 1999, “An Experimental Study on Combustion Processes and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of the Air-Staged Burner.”, vol 13, KSME, pp. 477~486.

- (4) J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Fueyo, M. Hernandez and P. J. Vidal, 1997, “Investigation of low-NO<sub>x</sub> strategies for natural gas combustion”, Elsevier Science Ltd. Fuel Vol.76 No. 5. pp. 435~446.

- (5) J. M. Beer, N. A. Chigier, 1972, “Combustion Aerodynamics”, John Wiley & Sons, inc., p.107~117.

- (6) J. P. Smart, R. Weber, 1989, “Reduction of NO<sub>x</sub> and optimization of burnout with an aerodynamical air-staged burner and an air-staged precombustor burner”, Journal of the Institute of Energy, pp. 237~245.

- (7) Wendt J. O. L., Sterling C. V. and Matovich M. A., 1973, “Reduction of sulfur trioxide and nitrogen oxides by secondary fuel injection”, Fourteenth Symposium on Combustion, pp. 897~904.

- (8) Myerson A. L., 1974, “The reduction of nitric oxide in simulated combustion effluents by hydrocarbon - oxygen mixtures”, Fifteenth Symposium on Combustion, pp. 1085~1092.

- (9) Takahashi Y., Sakai M., Kunimoto T., Ohme S., Haneda H., Kawamura T., Kaneko S., 1983, “Proceedings of the 1982 Joint Symposium on Stationary NO<sub>x</sub> Control”, EPRI Report NO. CS-3182.

- (10) Han J. W., Ahn K. Y., Kim H. S., and Chung J. D., 2001, “An experimental study on the NO<sub>x</sub> formation of fuel staged combustor.”, 제22회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp. 163~171.