

연료다단 연소기의 NOx 발생특성에 관한 실험적 연구

정진도^{*1)} · 안국영²⁾ · 한지웅³⁾

호서대학교 환경공학과^{*1)} · 한국기계연구원²⁾ · 호서대학교 대학원 환경공학과³⁾

An Experimental Study on the NOx Formation of Fuel Staged Combustor

Jindo Chung^{*1)} · Kookyoung Ahn²⁾ · Jiwoong Han³⁾

^{*1,3)}Department of Environmental Engineering, Hoseo University, Baebang-myun, Asan-city, Chungnam 336-795, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery & Materials, Jang-dong, Yousung-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 22 July 2003 / Accepted 8 September 2003)

Abstract : The characteristics of NOx emission in multi fuel/air staged combustor have been experimentally 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 Petroleum Gas(LPG) was used as primary and secondary fuels. The study included parametric study to identify the optimum operating conditions which are primary/secondary fuel ratio, primary/secondary air ratio, primary swirl intensity and secondary swirl intensity for reducing NOx emission. The test demonstrated that NOx emission can be reduced by >70% in accordance with operating conditions.

Key words : Fuel/Air staged(연료/공기 다단), NOx(질소산화물), Combustor(연소기), Primary zone(주연소영역), Secondary zone(후연소영역)

1. 서론

화석 연료는 과거로부터 인간의 에너지원으로 주로 사용되어 왔으며 20세기 중반까지는 배출가스에 대한 부담없이 사용량이 증가되어 왔다. 그러나 삼림 면적이 감소되고 또한 산업발달과 인구증가로 화석연료의 사용량이 급격히 증가됨에 따라 자연이 정화할 수 있는 한계를 벗어나고 있으며 최근에는 지구 재앙 문제로 확대되고 있다. 이러한 이유로 화석 연료의 연소시 발생하는 오염물질을 최소한으로

줄이기 위한 노력이 환경규제의 강화와 더불어 한층 가속화되고 있다.

연소후 배출되는 가스중의 오염물질로서 대표적인 것은 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소 등이 있으며 그 중 질소산화물은 광화학스모그의 원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라, 산성비의 원인이 되는 것으로 알려져 있다.¹⁾

대기 중에 존재하는 질소화합물로는 NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 알려져 있으며 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료의 연소시 발생하는 배출 가스 중 광스모그 등을 발생시켜 인체에 직접적인

*To whom correspondence should be addressed.
jdchung@office.hoseo.ac.kr

영향을 주는 NOx는 NO와 NO₂로 구성되어 있고 일반 연소기의 경우 95% 이상이 NO의 형태로 배출되며 이후 대기 중에 확산되어 공기 중의 산소와 결합하여 NO₂가 된다. 이러한 NOx의 발생은 연소조건에 많은 영향을 받기 때문에 경제적인 측면에서 볼 때 반응영역에서 NOx의 발생을 최소한으로 하는 것이 연소기 후단에서 NOx를 제거하는 것보다 효과적이다.

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 탄화수소계연료의 연소시 화염대 영역에서 공기중의 질소 성분과 탄화수소와의 반응에 의하여 발생하는 Prompt NOx이다. 이 중에서 Prompt NOx는 비교적 최근에서야 규명되었다.²⁾

Thermal NOx, Prompt NOx 및 Fuel NOx는 각각 생성 기구가 틀리기 때문에 NOx 저감을 위해서는 연료의 성상에 맞는 적정 연소기술의 선택이 필요하다.¹⁾

고온에서 주로 발생하는 Thermal NOx의 저감을 위하여 화염대 온도를 낮추는 방법으로 공기 다단 연소방식,³⁾ 연소가스 재순환 방식, 수분사 방식 등을 이용한 연구가 진행되고 있으며, 그 중 가장 많이 사용되는 다단 연소방식은 공기 혹은 연료를 다단으로 공급하여 줌으로써 연소 반응 속도를 조절하여 화염대에 있어 고온 영역의 발생을 억제시키는 방식으로, 기존의 일반 연소장치를 비교적 용이하게 수정함으로 적용이 유리하기 때문에 최근까지 비교적 많이 연구되고 있다. 그러나 이러한 연소반응 속도 조절방식은 화염이 불안정화 되어 연소효율이 저감될 우려가 높기 때문에 이에 대한 많은 연구가 요구된다.

본 연구에서는 연소 영역을 주연소영역과 후연소영역으로 형성할 수 있는 2단 동축 공기 공급관과 2단의 연료공급관으로 구성된 연소기를 이용하였다. 이러한 연료/공기 다단연소화염의 구조는 다음 Fig.1과 같이 주연소 영역은 주로 화염의 안정화에

기여하는 이른 바 파이로트 화염의 역할을 하게 되고, 후연소 영역에서는 대부분의 연료가 연소된다. 즉 주연소 영역은 고온 영역이지만 화염대의 크기가 적기 때문에 NOx 발생이 크지 않으며 대부분의 연료가 연소되는 후연소 영역은 주연소영역에서 생성된 연소생성물이 연소영역을 희석시키기 때문에 화염온도와 산소의 농도를 낮출 수 있어 NOx의 발생은 전반적으로 일반 연소기에 비하여 낮을 것으로 예상된다. 그러나 연소조건에 따라 주연소 영역의 연료 공급이 과도하게 되면 연소영역이 확대되기 때문에 NOx의 발생이 증대되며 반대로 주연소 영역의 연료 공급이 감소되면 상대적으로 과잉공기에 의하여 연소영역이 냉각되어 화염이 불안정화될 우려가 높아지게 되어 주연소 화염은 파이로트 화염의 역할을 하지 못하게 된다. 따라서 각 단의 공기 및 연료 공급비는 연소기의 설계시 중요한 인자가 된다.

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 주연소영역의 특징 및 NOx 발생과의 상관관계를 고찰하여 다단 연소기의 설계 및 연소 조건에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

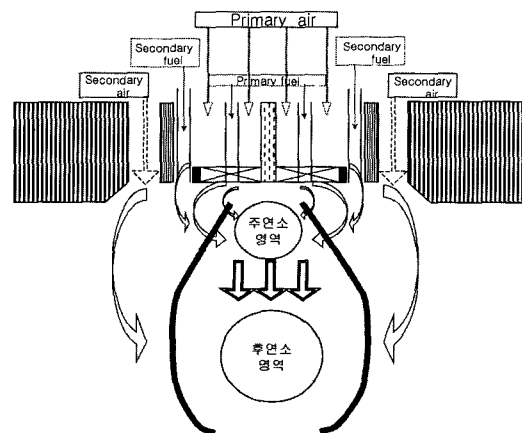


Fig. 1 Flame structure of Fuel/Air staged combustor

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소기 및 연소실

실험에 사용된 버너는 0.233 MW의 용량을 갖는 LPG 연소기로서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 주연소 및 후연소 영역 조성을 위한 각 2단의 공기 및 연료 공급장치로 구성되어 있다.

본 연구에서는 기존에 발표된 연료/공기 다단연소기의 연소조건을 참고로 하여 주연소 영역에 연소용 공기의 공급비를 80% 연료를 20% 공급할 수 있도록 연소기를 설계하였다.⁴⁾

화염 안정성을 확보하기 위하여 주연소 공기는 주연소 공기 선회기(이하, 주연소 선회기)를 통하여 주연소 영역에 공급되게 하였으며, 주연소 공기 공급부의 외부에 동축으로 설치되어 있는 선회강도를 조절($S=0\sim 0.8$)할 수 있는 후연소 선회기를⁵⁾ 사용하여 후연소 공기의 선회강도를 조절하였다.

중심부인 주연소영역에 공급될 연료는 주연소 선회기를 관통하는 4개의 관을 이용하여 공급하였으

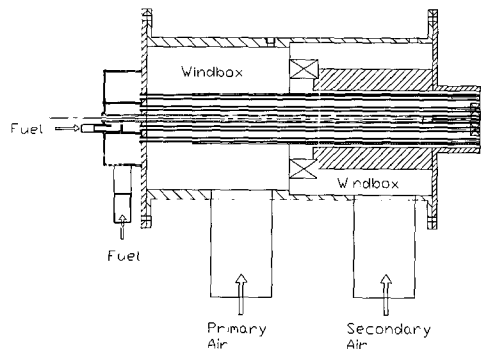


Fig. 2 Fuel/Air staged combustor

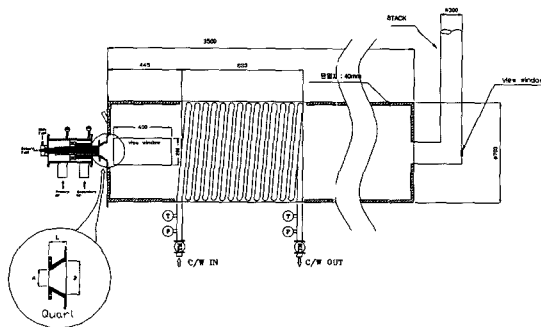


Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipment

며, 후연소영역에 공급될 후연소 연료의 공급은 주연소선회기 외부에 10개의 공급관을 설치하여 연소 실험을 수행하였다.

연소기의 Quarl 형상은 반응 영역에 많은 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 연구에서는 IFRF에서 적용한 Divergence Quarl을 제작, 실험하였다. Divergence Quarl은 직경비 (L/A) = 1.0, 확대비 (B/A) = 2.0, 시작과 끝이 0°의 각도를 갖는 3차 다항식의 경계조건을 갖는 형상을 이루도록 제작하였다.⁶⁾

연소실은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 내경 0.6m, 길이 3.5m의 원통형으로 연소실 내벽에 수관을 설치하여 연소실 내부온도 조절할 수 있도록 하였으며, 기타 외벽은 두께 40mm의 단열재를 사용하여 외부의 영향을 최소화하였다.

2.2 연료 공급 및 계측장치

본 실험에서는 주연소 및 후연소 연료로 상용 LPG (C3H8:90%, C4H10:10%)를 사용하였다. 연료 및 연소용 공기의 유량측정은 표준상태에서 보정된 가변 면적 유량계(Rotameter)를 이용하였다.

연료가스와 공기의 유량을 보정하기 위한 온도 측정은 T-type 열전대를 사용하였으며, 연소실 내부의 화염온도는 피복형 R-type 열전대를 화염중심으로부터 축방향으로 10cm 간격으로 설치하여 측정하였고, 열전대로부터 측정된 고온가스의 온도에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차 등은 무시하였다.

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 연구에서 사용된 0.233 MW 용량의 다단 연소기의 각단의 총 연료량은 LPG 10 Nm³/hr이며 과잉 공기비는 1.1을 기준으로 하여 총 연소용 공기량을 240 Nm³/hr을 기준으로 다음 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1 Experimental conditions

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Total air flowrate | 240 Nm ³ /hr |
| Total fuel flowrate | 10 Nm ³ /hr |
| Air temperature | 30°C |
| Fuel temperature | 11°C |
| λ (Excess air) | 1.1 |

본 연구에서 다단 연소기는 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, 선회강도 등을 변수로 하여 성능실험을 수행하였다. 특히 파이로트 화염의 역할을 담당하는 주연소 영역의 연소특성과 이에 따른 NOx의 발생을 축 중심 온도와 배가스 등을 분석하여 본 연소기의 연소 특성을 예상하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주연소영역의 연소특성

Fig. 4는 연소기에 있어 화염을 안정화시켜주는 역할을 하는 주연소영역의 연소특성을 평가하기 위하여 총 연료량의 23%를 주연소 연료공급단에 공급하고, 주연소 공기공급단의 공급비율에 대한 연소 실험 축 중심의 온도를 나타낸 결과이다. 주연소 공기량이 증가할수록 온도는 저하됨을 알 수 있는데 이것은 희박연소에 의하여 연소영역의 화염온도가 떨어졌기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일 조건에서 배가스 중 NOx와 CO를 분석한 결과이다.

NOx의 경우 주연소영역의 공기비가 증가함에 따

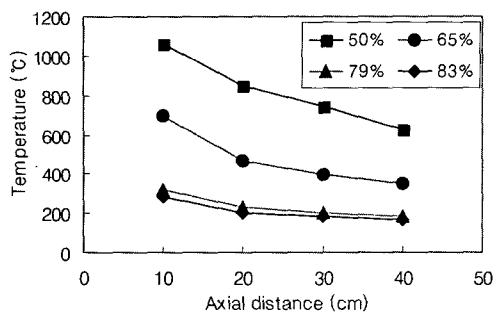


Fig. 4 Central temperature distribution of furnace

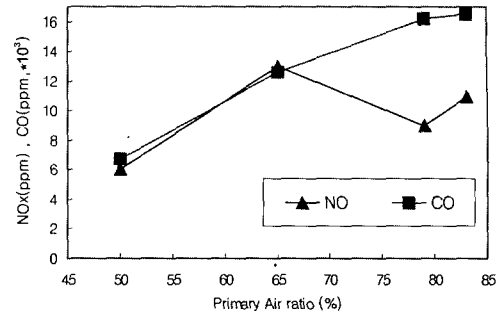


Fig. 5 Emission of NOx and CO concentrations (O₂ 4%)

라 증가하는 경향을 보인 후 감소함을 알 수 있다. 이것은 공기비가 상대적으로 적은 범위에서 공기비가 증가할수록 NOx가 증가하는 이유는 반응 영역에서 산소의 농도가 증가하기 때문으로 생각되며 임계치 이상에서 NOx가 감소하는 것은 연소영역의 냉각에 의한 것으로 NOx의 발생이 온도에 영향을 많이 받기 때문으로 생각된다. 그러나 CO의 경우 과잉공기비가 증가할수록 급격히 증가함을 알 수 있는데 CO의 경우 연소영역의 온도의 변화, 그중에서도 냉각(quenching)의 영향을 많이 받기 때문에 공기비가 증가할 때 발생하는 연소의 불안정화에 의한 것으로 예상된다. 그러나 실제 운전 조건에서 주연소 영역에서 발생된 CO는 후연소 영역에서 완전 연소된다.

Fig. 6은 각 주연소 연료량에 대한 가연한계를 나타낸 결과이다. 주연소 공기 공급량이 증가될수록 가연 범위내의 주연소 연료 공급량이 증가될 수 있음을 알 수 있는데 이것은 희박 연소의 특성으로 예상된다. 그러나 주연소 연료량이 25% 이상에서는 모든 공기비 조건에서 화염이 존재하지 않음을 알 수 있는데 이것은 주연소 연료의 분사속도가 증가하여 재연소 영역을 관통하였기 때문이다.

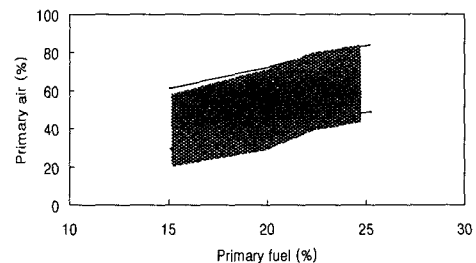


Fig. 6 Flammability of primary reaction zone

3.2 연소특성

3.2.1 주연소 선회기의 선회강도 영향

Fig.7은 주연소 공기비가 83%, 후연소 swirl수를 0.8로 한 경우 같은 조건에서 주연소 선회기의 선회강도를 달리하여 축 중심방향으로 화염 온도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 이 결과로 보면 비교적 주연소 선회기의 선회강도가 커질수록 축방향으로 고온부 영역이 커짐을 알 수 있다. 이것은 재순환 유동이 증가함에 따라 고온의 생성가스가 산소농도가 비교적 충분한 주연소 영역에 공급되어 온도를 상승시켜줌으로서 연소 반응속도가 증가되었기 때문에 노즐선단의 온도가 상승하게 되며 후연소부는 재순환가스의 공급으로 인하여 산소농도 저하 등으로 연소반응이 지연되기 때문에 온도가 상대적으로 저하된다고 생각된다.

Fig. 8은 NO_x의 발생특성을 나타낸 결과이다. 이 결과로 보면 전반적으로 주 선회기의 선회강도가 클수록 NO_x의 발생이 증가함을 알 수 있다. 이것은 위에서 언급한 것과 같이 선회강도가 클수록 재순환 유동이 커짐으로서 연소반응이 증가되어 고온부

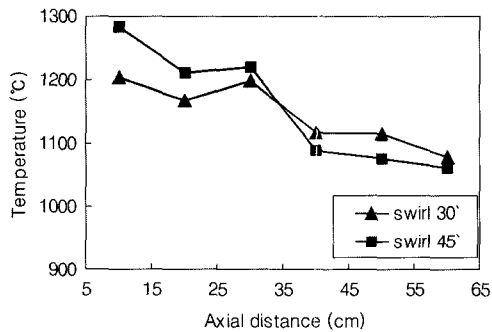


Fig. 7 Central temperature distribution (Primary Air 83%)

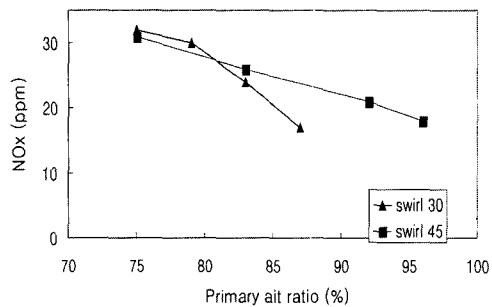


Fig. 8 Emissions of NO_x concentrations

의 화염온도가 증가되고 이에 따라 Thermal NO_x의 발생이 증가됨을 알 수 있다. 그러나 주연소공기량의 증가에 따라 NO_x의 발생이 감소되는 것은 위에서 언급한 것과 같이 주연소 영역에서 희박연소가 이루어져 주 연소 영역의 온도저하에 의한 주연소 영역의 NO_x 발생 감소와 후연소 영역의 점화 역할을 하는 주연소의 생성가스의 온도저하로 후연소 영역의 연소속도를 조절함으로써 후 연소 영역의 NO_x 발생억제도 원인이 된다. 선회각이 30°인 경우 주연소공기비를 85% 이상 공급하면 화염이 소멸되기 때문에 45°의 선회기를 사용하는 것이 주연소 영역의 희박 연소가 가능하며, 화염안정화 측면에서 주연소 선회기의 선회 강도가 클수록 유리하다.

3.2.2 후연소 선회기의 선회강도 영향

Fig. 9는 후연소 선회기의 선회강도 영향을 알아보기 위하여 주연소 선회각을 45°, 후연소 공기비가 20%인 경우 후연소 선회기의 swirl수를 0과 0.8로 한 경우 축 중심방향으로 화염 온도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 이 결과로 보면 비교적 후연소 선회기의 강도가 커질수록 주연소 영역의 온도는 상승하고 후연소 영역의 온도는 저하됨을 알 수 있다. 이것은 재순환 유동이 증가함에 따라 고온의 생성가스가 주연소 연료분출구주변의 온도를 상승시켜줌으로서 연소 반응속도가 증가되며 후연소영역은 생성가스의 희석에 의한 온도 저하로 예상되어진다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 조건에서 후연소 공기비에 NO_x의 발생분포를 나타낸 결과이다. 이 결과에서 후연소 공기비가 30% 미만인 경우 후연소선회강도가 클수록 NO_x의 발생이 적음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9에서 나타난 것과 같이 재순환유동의 강

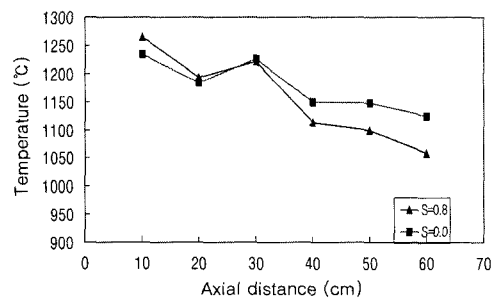


Fig. 9 Central temperature distribution (Secondary air 20%)

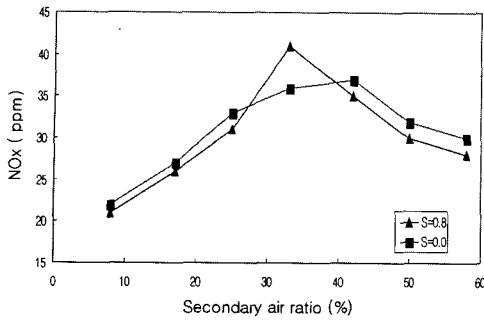


Fig. 10 Emissions of NOx concentrations

화에 의하여 산소농도가 줄어들므로 인해 NOx 발생량이 적게 됨을 확인할 수 있다.

3.2.3 주연소 연료비 영향

Fig. 11은 주연소 연료비를 각각 15%, 25% 공급하고 주연소공기를 83%로 공급하며 이 때 주연소선회기의 선회각을 45°와 후연소선회기의 swirl수를 0.8로 하는 경우 축 중심부의 온도분포를 나타낸 결과이다. 이 결과에서 보면 주연소 연료비를 적게 할수록 주연소 및 후연소영역에서 낮은 온도분포가 나타남을 알 수 있다. 따라서 Thermal NOx 발생 억제 관점에서 주연소영역을 희박연소를 시키는 것이 유

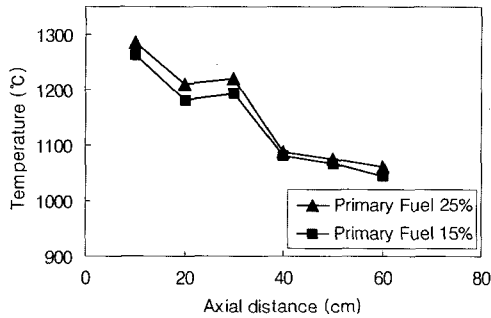


Fig. 11 Central temperature distribution (Primary Air 83%)

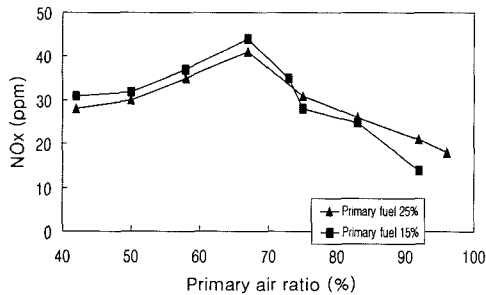


Fig. 12 Emissions of NOx concentrations

리할 것으로 예상된다.

Fig. 12는 Fig. 11과 동일 조건에서 주연소 공기비에 대한 NOx의 발생특성을 나타낸 결과이다. 이 결과에서 보면 주 연료 공급비가 15%, 주연소용 공기의 공급비가 90% 정도에서 NOx의 발생이 최고 70% 이상 저감됨을 알 수 있다. 따라서 주연소용 화염이 안정화되는 조건하에서 주연소공기의 공급비를 증대시킬수록 그리고 주연소 연료의 공급량이 감소될수록 NOx의 발생이 적게 됨을 확인할 수 있다. 이것은 3.2.1에서 언급한 것과 같이 주연소연료량이 증대되면 주연소영역에서의 고온영역의 증대에 의한 Thermal NOx의 발생 증대에 의한 것으로 예상된다. 따라서 주연소 영역은 가능한 최소한의 연료와 최대한의 연소용 공기를 공급하는 파이로트 화염의 역할을 하는 것이 NOx 발생 억제 관점에서 유리함을 알 수 있다.

4. 결론

공기/연료 2단 연소기의 연소특성 및 NOx 발생기구를 예상하기 위하여 각단의 공기 및 연료량 및 선회 조건에 대한 연소실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주연소 영역을 가능한 희박연소시키는 것이 NOx의 발생 억제에 유리하지만 파이로트 화염의 역할을 하는 주연소 화염의 안정성을 고려하여야 한다.
- 2) 총 연료의 15%를 주연소 연료로서 총 연소용공기의 90%를 주연소용 공기로 공급할 때 약 70%의 NOx 저감효과 얻을 수 있었다.
- 3) 주연소 연료를 25%이상 공급하는 경우 재순환영역을 연료가 관통하기 때문에 화염이 불안정 화됨을 알 수 있다.
- 4) 주연소 영역의 온도는 국부적으로 높지만 고온의 영역을 최소화하며, 후연소 영역에서는 주연소 영역에서 발생된 생성가스의 희석으로 산소농도를 저하시킴으로서 NOx의 발생을 억제시키는 것으로 예상된다.

본 실험을 기초로 계속적인 성능실험을 통한 효율적인 NOx 저감기술로서 공기/연료 2단 연소방법을 이용한 저 NOx 버너의 개발이 기대된다.

References

- 1) “大氣汚染防止の技術と機器”, 産調出版, pp.26-64, 1988.
- 2) C. P. Fenimore, “Studies of Fuel-nitrogen in Rich Flame Gases,” 17th Sym(Int) Comb, The Combustion Institute, Pittsburgh, p.661, 1979.
- 3) K. Y. Ahn, H. S. Kim, E. S. Cho, J. H. Ahn, Y. M. Kim, “An Experimental Study on Combustion Processes and NOx Emission Characteristics of the Air-Staged Burner,” KSME, Vol.13, pp.477-486, 1999.
- 4) J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Fueyo, M. Hernandez, P. J. Vidal, “Investigation of Low-NOx Strategies for Natural Gas Combustion,” Elsevier Science Ltd. Fuel, Vol.76, No.5, pp.435-446, 1997.
- 5) J. M. Beer, N. A. Chigier, Combustion Aerodynamics, John Wiley & Sons, Inc., pp.107-117, 1972.
- 6) J. P. Smart, R. Weber, “Reduction of NOx and Optimisation of Burnout with an Aerodynamically Air-staged Burner and an Air-staged Precombustor Burner,” Journal of the Institute of Energy, pp.237-245, 1989.
- 7) J. O. L. Wendt, C. V. Sterling, M. A. Matovich, “Reduction of Sulfur Trioxide and Nitrogen Oxides by Secondary Fuel Injection,” Fourteenth Symposium on Combustion, pp.897-904, 1973.
- 8) A. L. Myerson, “The Reduction of Nitric Oxide in Simulated Combustion Effluents by Hydrocarbon-Oxygen Mixtures,” Fifteenth Symposium on Combustion, pp.1085-1092, 1974.
- 9) Y. Takahashi, M. Sakai, T. Kunimoto, S. Ohme, H. Haneda, T. Kawamura, S. Kaneko, “Proceedings of the 1982 Joint Symposium on Stationary NOx Control,” EPRI Report NO. CS-3182, 1983.