

재연소 과정의 NOx 발생특성에 관한 실험적 연구

박종일* · 안국영** · 김한석** · 손민규* · 김용모***

An Experimental Study on the Characteristics of NOx Emission in Reburning Process

Jong Il Park, Kook Young Ahn, Han Seok Kim,
Min Gyu Son and Yong Mo Kim

Key Words: Reburn(재연소), Low NOx Burner(저녹스버너), NOx(질소산화물), Swirl(선회).

Abstract

The characteristics of NOx emission in reburning process have been experimentally studied. The design point of burner is creative of three distinct reaction zones; a primary flame zone that NOx produced, reburn zone to reduce the primary zone NOx and burnout zone. Liquefied Petroleum Gas(LPG) was used as main and reburn fuels. Process parameters investigated included main/reburn fuel ratio, primary/secondary air ratio, reburn fuel injector position and different designed quarl. The NOx emission characteristic of aerodynamic designed burner relied on reburn fuel ratio and was slightly affected by a reburn fuel injector position and quarl shape.

1. 서 론

최근에 대기오염 물질의 배출규제가 대폭 강화되고 있으며 이에 따라 산성비나 광화학스모그의 주원인이 되는 NOx 제어에 대한 연구가 가속되고 있다.

저 NOx를 위한 방법은 크게 저질소함유 연료를 사용하는 방법(연소전 대책), 공연비, 체류시간, 연소온도, 재연소, 다단계연소 등 연소조건과 방법 및 버너의 개선(연소기술개선), 배연탈질(연소후 처리대책)등으로 나눌 수 있으며⁽¹⁾, 이중 재연소(Reburning)기술은 고농도의 NOx를 발생하는 미분탄 연소의 NOx 제어에 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

재연소(Reburning)의 개념이 최초로 Wendt et

al.⁽²⁾에 의해 제안된 후, Myerson⁽³⁾은 매탄에 의한 NO 환원 반응의 총괄 반응식을 제시했으며, 1980년대 초반 Mitsubishi사에 의해 full-scale 보일러에 적용되었다⁽⁴⁾. 이를 배경으로 최근 대용량화에 대한 연구⁽⁵⁾와 NOx 저감율을 높이기 위한 AR(advanced reburning)⁽⁶⁾연구가 병행되고 있다.

재연소 방법에 의하여 발생하는 연소영역은 노즐의 선단부로부터 크게 3부분의 반응영역으로 나눌 수 있다. 노즐 선단부 부근에 존재하는 주연소 영역은 이론 당량비 혹은 연료희박 연소조건이며, 재연소 영역에서는 재연소 연료의 공급에 의하여 연료과농 영역으로 존재하게 되고, 연소원료 영역에서는 재연소 공기의 공급에 의하여 완전연소가 이루어진다. NOx의 저감은 주 연소 영역에서 발생한 NO가 재연소 연료의 탄화수소기(基)와 반응하여 N₂로 환원되는 영역인 재연소 영역에서 주로 이루어진다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 가스버너에 재연소 개념을 적용하여 NOx 저감 및 그 특성을 예상하였다. 위에서 언급된 반응영역을 형성하기 위해 공기역학적

* 한양대학교 대학원

** 한국기계연구원

*** 한양대학교 기계공학부

으로 설계한 버너를 제작하였으며, 재연소 연료의 유량, 주입위치, 주연소 및 재연소 공기의 배분량을 변수로 하여 특성실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너

실험에 사용된 버너는 232.6kW의 용량을 갖는 LPG 버너로서 Fig. 1에 나타내었다. 본 버너는 주연소 및 재연소를 위한 공기 및 연료 공급장치로 구성되어 있다.

화염 안정성을 위하여 주연소 공기는 날개각이 45° 인 선회기를 통하여 주연소 영역에 공급되게 하였으며, 재연소 공기는 주연소 공기 공급부의 외부에 동축으로, 공기 공급부를 설치하였으며, 공기의 선회강도를 조절($S=0\sim 0.8$)할 수 있는 Movable block swirl generator를⁽⁸⁾ 사용하여 연소완료 영역에 공기역학적으로 공급하여 주었다.

주 연료는 6개의 노즐을 통해 공급하였으며, 각 노즐은 선회기의 중간에 위치시켜 공기과 연료의 혼합효과를 높였다. 재연소 영역 연료의 공급은 주연소 내부 재순환 영역을 관통시키기 위해 버너 중심축에 재연소 노즐을 설치하여 공급하여 주었으며, 공급 위치에 대한 영향을 예측하기 위하여 공급관의 길이를 6, 12, 18cm로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다.

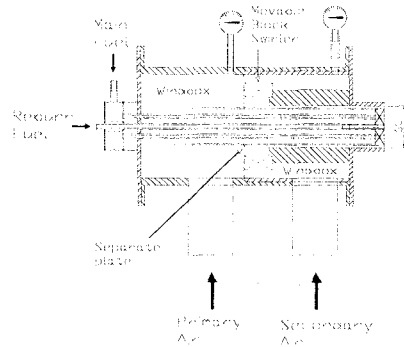


Fig. 1 The experiment burner

2.2 연소실과 Quarl

연소실은 Fig 2에서 보는바와 같이 내경 0.6m, 길이 3.5m의 원통형으로 연소실 내벽에 수관을 설치하여 연소실 내부온도 조절할 수 있도록 하였으며, 기타 외벽은 두께 50mm의 단열재를 사용하여 외부의 영향을 최소화하였다. 본 연구에서 재연소를 이용한 저 NOx 버너는 모든 반응영역이 공기 역학적인 조건에 의하여 형성되기 때문에 버너 Quarl 형상은 반응 영역에 많은 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 실험에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 급확대 Quarl과 IFRF에서 적용한 3차 다항식의 경계조건을 갖는 divergence Quarl을 제작, 실험하여 비교하였다. Divergence

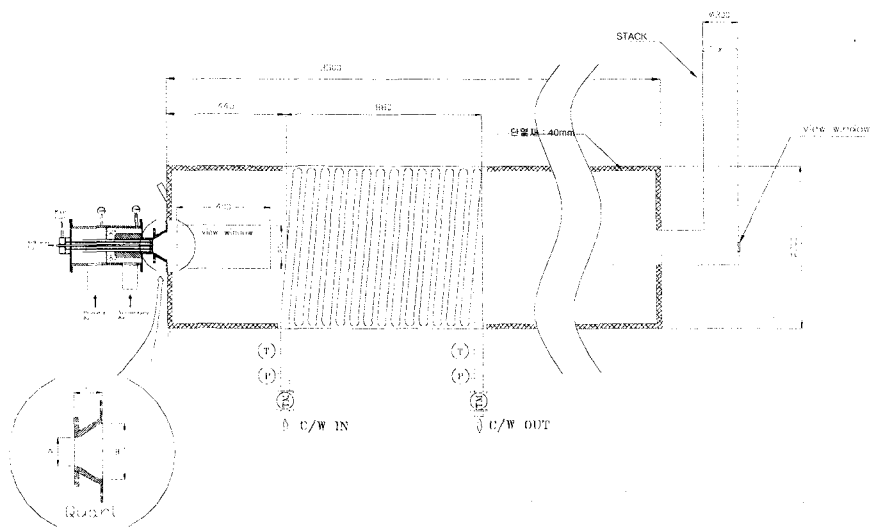


Fig. 2 The schematic diagram of experimental furnace and quarl

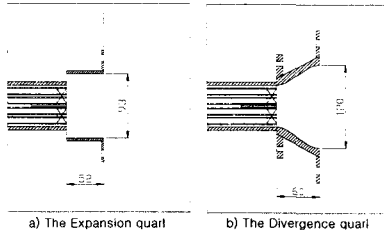


Fig 3 The burner quarl

Quarl은 직경비(L/A)=1.0, 확대비(B/A)=2.0, 시작과 끝이 0°의 각도를 갖는 3차 다항식의 형상을 이루도록 제작하였다.⁽⁹⁾

2.3 실험장치

본 실험에서는 주 연료 및 재연소 연료로 상용 LPG (C₃H₈:90%, C₄H₁₀:10%)를 사용하였다. 연료 및 연소용 공기의 유량측정은 표준상태에서 보정된 가변면적유량계(Rotameter)를 이용하였다.

연료가스와 공기의 온도측정은 T-type 열전대를 사용하였으며, 연소실 내부의 화염온도는 피복형 R-type 열전대를 화염중심에서 축방향으로 10cm 간격으로 설치하여 측정하였다. 그리고 열전대로부터 측정된 고온가스의 온도에 대한 복사열손실 및 전도에 의한 오차 등은 무시하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

재연소에 의한 NO_x 저감 특성은 총 공기 공급량과 총 연료 공급량을 일정하게 한 조건에서 재연소 연료와 재연소 공기의 공급량 및 선회각도를 조절하여 배가스와 중심 온도를 비교하므로써 예상하였다. Table 1은 본 실험을 위한 조건들이다. 그리고 본 연소 장치는 공기역학적으로 재연소 공기가 후류에 공급되는 구조이므로 quarl 형상 변화시 재연소 공기분배량에 의한 NO의 영향을 관찰하였다.

Table 1. Experimental condition

| | |
|----------------|-------------|
| 총 공기량 | 312 kg/h |
| 총 연료량 | 18.067 kg/h |
| 공기 온도 | 30 °C |
| 연료 온도 | 11 °C |
| λ (Excess air) | 1.1 |

3.1 비연소 유동특성

본 버너는 공기역학적으로 반응 영역이 형성되는 구조를 이루고 있기 때문에 연소실 내부의 유동 특성을 이해하는 것이 중요하다. Fig. 4,5는 Divergence Quarl과 급확대 Quarl에 대하여 각각 주연소 및 재연소의 공기량 분배에 따른 연소실 내부의 축방향 동압의 분포를 재연소 공기의 선회각도에 따라 비교한 결과이다. 이 결과에서 보는 바와 같이 재연소 공기의 선회가 없는 경우에 주연소 공기비가 80% 이상인 경우 중심부에 재순환 영역이 존재함을 알 수 있다. 그러나, 주연

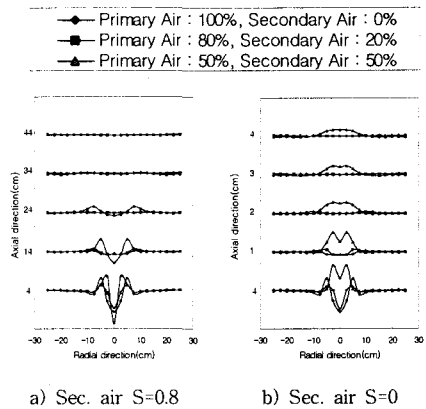


Fig 4 Axial ΔP profile on divergence quarl

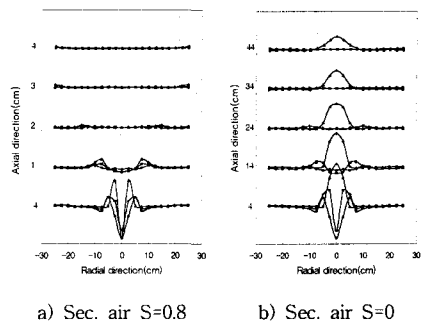


Fig. 5 Axial ΔP profile on expansion quarl

소 공기비가 50%정도로 감소되면 선회력을 갖는 주연소 공기비가 상대적으로 감소되기 때문에 재순환 영역이 생기지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 재연소 공기량이 많아질수록 재순환 영역이 좁아짐을 알 수 있다. 또한 Divergence Quarl에 비하여 급확대 Quarl의 경우 선회가 없는 경우 노즐 선단 부분에서 속도분포가 비교적 크게 측정되었는데 이것은 분출구의 크기가 적고 유동이 축방향으로 되어있기 때문으로 사료된다.

3.2 연료량 변화 실험

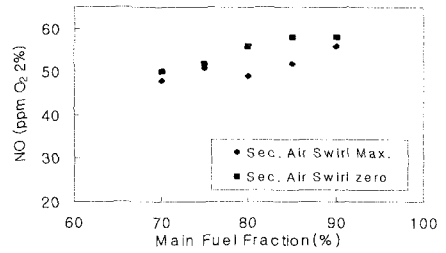
Fig. 6는 주연소 및 재연소 공기의 공급비율을 8:2과 5:5로하고 재연소 연료의 공급위치를 선회기 선단에 설치하는 경우 주연료와 재연소 연료의 변화량에 따른 NO의 발생특성을 재연소 공기의 선회강도에 따라 비교한 결과이다. 이때 축 중심부의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 결과로부터 재연소 공기의 선회가 있는 경우 NO의 발생이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4의 유동 분포에서 살펴본 것과 같이 선회가 있는 경우 재순환 영역이 넓어지게 되어 재연소 공기가 주연소 영역이나 재연소 영역에서 반응하지 않고 연소 종료영역에 주로 공급되기 때문으로 생각된다. 이것은 Fig. 7의 연소실 중심의 온도 분포로부터 동일 조건에서 선회가 있는 경우 주연소 영역으로 예상되는 연소실의 온도분포에서 확인할 수 있다.

Fig. 6 (a)의 경우 주연소 연료의 공급량이 증가하면 NO의 발생이 증가되지만 (b)의 경우 상반되는 결과를 얻을 수 있다.

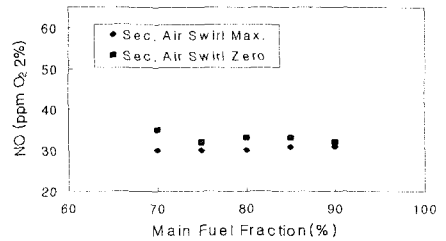
Fig. 6 (a)의 경우에는 주연소 영역에서는 연료 희박상태가 되며 이에 따라 주연료 공급량이 증가할수록 ϕ (당량비)=1에 가깝게 되므로 Fig.7에서 나타낸 것과 같이 주연소 영역의 온도가 상승되고 이에 따라 NO의 발생이 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6 (b)의 경우 주연소 영역이 연료과농 상태가 되기 때문에 주연소 연료가 공급량이 증가되면 온도저하에 의한 NO의 감소가 커지는 것으로 예상된다.

3.3 공기량 변화 실험

Fig. 8은 주연소 연료와 재연소 연료비가 7:3인 조건에서 재연소 공기의 선회력을 최대로 한 경우의 NO의 발생을 나타낸 결과이다. 주연소 공

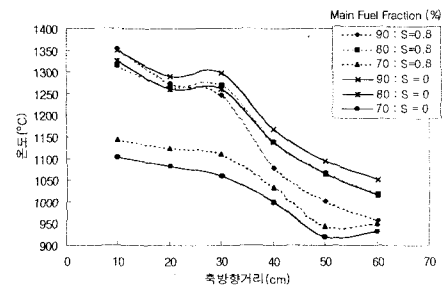


a) NO emission at air ratio 8:2

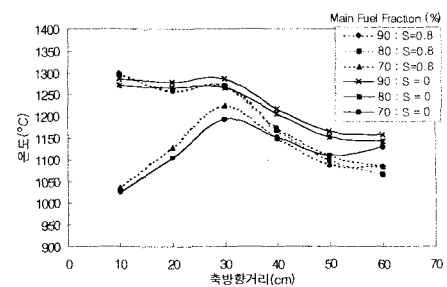


b) NO emission at air ratio 5:5

Fig. 6 Effect of main fuel fraction on NO emission



a) Temperature at air ratio 8:2



b) Temperature at air ratio 5:5

Fig. 7 Temperature distribution on axial direction by main fuel fraction

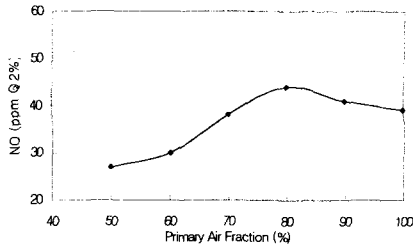


Fig. 8 Effect of primary air fraction on NO emission

기비가 50%에서 80%까지 증가할수록 NO의 발생이 증가함을 알 수 있는데 이것은 3.2절에서 언급한 것과 같이 주연소 공기비가 50%인 경우 주연소 영역은 연료과농 상태가 되며 주연소 공기량이 증가할수록 주연소 영역의 온도가 높아지기 때문에 NO의 발생이 증가함을 알 수 있다.

3.4 재연소 연료노즐 분사위치 변화의 영향

재연소용 연료는 주연소 영역이 종료되는 지점에서 주연소 영역에서 발생한 NO를 N₂로 환원시키기 위하여 사용된다. 따라서 재연소 연료가 주연소 영역에 공급되어 소비되면 재연소 효과를 얻을 수 없다. 또한, 주연소 영역으로부터 하류로 많이 이동된 곳에 재연소 연료가 공급되면 화염이 불안정해지거나 미연가스의 배출이 증가되어 연소효율이 저하될 우려가 높다. 따라서 적절한 위치에 재연소 연료를 공급하는 것이 필요하며 버너 설계시 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 버너 축 중심부에 위치하고 있는 재연소 연료의 공급구를 선회기 선단으로부터 6, 12, 18cm 위치시켜 연소실험을 하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 결과로부터 실험조건 내에서 재연소 공급위치가 선회기로부터 멀어질수록 NO가 조금씩 감소함을 알 수 있다. 공급구의 위치를 선회기 선단에서 멀리할수록 재연소에 의한 NO의 감소 효과가 나타남을 예상할 수 있지만 반면에 연료의 연소실내의 체류시간 감소와 화염불안정화로 미연분의 증가가 예상된다. NO저감율의 상승과 연소효율을 고려하여 연소조건 선정이 필요하며 이를 위하여 화염대 내의 가스조성, 온도 등에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

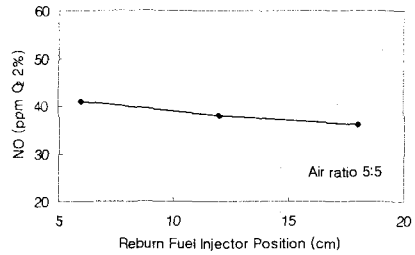
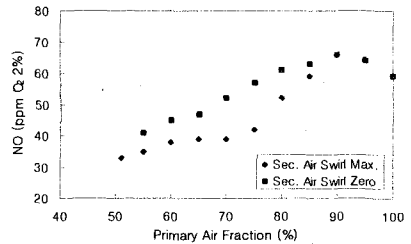


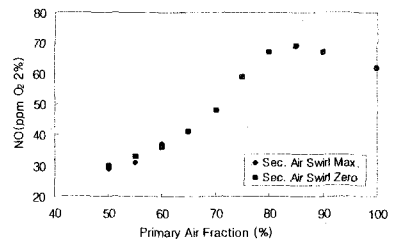
Fig. 9 Effect of reburn fuel injector position

3.5 Quarl 형상변화의 영향

Quarl 형상변화의 영향에 대한 연소특성을 예상하기 위해 총 연료량을 주연료 공급관에 공급하여 주연소 공기 및 재연소 공기량의 비율을 변화시켜 가면서 화염의 특성과 NO발생을 비교하였다. Quarl이 급확대형보다 3차 다항식 경계조건을 갖는 구조인 경우 여러 실험조건에서 화염이 안정되며 부상화염이 비교적 적게 발생함을 알 수 있었다. 급확대관에서는 3.1절에서 언급한 것과 같이 버너 출구부의 공기속도가 divergence 형태에서의 공기유속보다 커지게 되고, 재순환 영역이 축소되기 때문에 화염이 부상되기 쉽게 되는 것으로 생각된다. Fig. 10와 Fig. 11에서는 선회강도 변화 및 공기 배분율에 대한 NO의 발



a) The expansion quarl effect



b) The divergence quarl effect

Fig. 10 Effect of the secondary air swirl

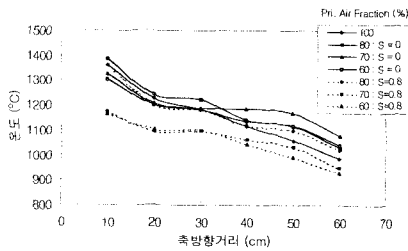


Fig. 11 Temperature distribution on axial direction using an expansion quarl

생과 중심 온도분포를 나타내었다. divergence형에서는 선회강도가 0과 0.8에서 NO발생특성의 변화가 없지만 급확대형에서는 선회강도가 0일 때 더 적은 NO배출 특성을 관찰할 수 있었다. 이는 급확대형에서 선회가 없는 경우 버너 선단에서 재연소 공기는 선회력에 의한 반경방향의 속도가 적어 주연소 영역 후류에 공급되는 것이 아니라 연료 과농상태인 주연소 영역으로 공급되기 때문에 Fig.11에 나타난 것과 같이 온도가 고온으로 되어 NO의 발생이 증가되기 때문으로 생각되며, divergence형에 있어서는 재연소용 공기가 quarl 면을 따라 유동되기 때문에 선회강도가 0인 경우에도 주연소 영역에 재연소 공기가 공급되지 않고 주연소 영역 후류로 원활히 공급되므로 상대적으로 주연소 영역의 온도가 저하되어 NO가 적게 발생됨을 관찰할 수 있었다.

4. 결론

본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) quarl의 형상은 버너 선단부의 유동에 많은 영향을 주며 이것은 화염대의 온도와 NO의 발생에 직접적인 관계가 있다.

(2) 주 연소영역의 공연비, 재연소 공기의 선회강도는 화염대의 온도 및 NO의 발생에 많은 영향을 준다.

(3) 재연소 연료노즐의 분사 위치에 따른 NO 발생량이 변화되는 것을 알 수 있었으며 화염의 안정성과 NO의 저감율을 동시에 고려하여 최적조건을 도출할 필요가 있다.

실험 조건에 따라 NO의 발생은 최고 대비 30% 정도의 차이가 발생하였다. 따라서 본 연구를 기초로 지속적인 성능실험을 통하여 효율적으

로 NOx를 저감할 수 있는 재연소 방법을 이용하여 저 NOx 버너의 개발이 기대된다.

참고문헌

- (1) 金慶浩, 1997, "최신 대기청정기술 질소산화물(NOx) 배출 저감기술", 산업기술정보원, p.1-14
- (2) 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
- (3) Myerson, A.L., 1974, "The reduction of nitric oxide in simulated combustion effluents by hydrocarbon-oxygen mixtures", Fifteenth Symposium on Combustion, pp. 1085-1092
- (4) Takahashi, Y., Sakai, M., Kunitomo, T., Ohme, S., Haneda, H., Kawamura, T., Kaneko, S., 1983, "Proceedings of the 1982 Joint Symposium on Stationary NOx Control", EPRI Report NO. CS-3182
- (5) Lanigan, E.P., Golland, E.S. and Rhine, J.M., 1995, "The demonstration of gas reburning at Longannet: leading the world in low-NOx technology", Proceedings-International Gas Reburn Technology Workshop, pp. D121-138
- (6) Folsom, B.A., Payne, R., Moyeda, D., Vladimir Zamansky, Golden, J., 1995, "Advanced reburning with new process enhancements", EPRI/EPA 1995 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control
- (7) J.P.Smart, D.J.Morgan, 1994 "The effectiveness of multi-fuel reburning in an internally fuel-staged burner for NOx reduction", Fuel, pp. 1437-1442
- (8) J.M.Beer, N.A.Chigier, 1972, "Combustion Aerodynamics", John Wiley & Sons, inc., p.107-117
- (9) J.P.Smart, R.Weber, 1989, "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