

산소부화 LPG 화염에서 혼합형 재연소 방법에 의한 NO_x 저감 효과

이창엽*† · 백승욱**

The Effect of Hybrid Reburning on NO_x Reduction in Oxygen-Enriched LPG Flame

Chang Yeop Lee, Seung Wook Baek

ABSTRACT

In order to enhance combustion efficiency, oxygen-enriched combustion is used by increasing the oxygen ratio in the oxidizer. However, since the flame temperature increases, NO_x formation in the furnace seriously increases for low oxygen enrichment ratio. In this case, reburning is a useful technology for reducing nitric oxide. In this research, experimental studies have been conducted to evaluate the hybrid effects of reburning/selective non-catalytic reaction (SNCR) and reburning/air staging on NO_x formation and also to examine heat transfer characteristics in various oxygen-enriched LPG flames. Experiments were performed in flames stabilized by a co-flow swirl burner, which were mounted at the bottom of the furnace. Tests were conducted using LPG gas as main fuel and also as reburn fuel. The paper reported data on flue gas emissions, temperature distribution in furnace and various heat fluxes at the wall for a wide range of experimental conditions. Overall temperature in the furnace, heat fluxes to the wall and NO_x generation were observed to increase by low level oxygen-enriched combustion, but due to its hybrid effects of reburning, SNCR and Air staging, NO_x concentration in the exhaust have decreased considerably.

Key Words : Hybrid reburning, Oxygen-enriched combustion, NO_x, LPG flame

기 호 설 명

Ω	Oxygen enrichment ratio	d	Nozzle diameter
Φ	Equivalence ratio	d_h	Vane hub diameter
S	Swirl number	θ	Vane angle

1. 서 론

지난 세기 동안 꾸준히 증가하고 있는 공기 중의 질소산화물(NO_x)은 광화학 스모그 및 산성비의 원인이 되어 동식물에 심각한 영향을 미치는

것으로 알려져 있으며, 다른 공해물질에 비해 감소 기술이 어렵고 생성기구가 매우 복잡하다. 질소산화물의 증가에는 자연적인 요인도 존재하지만 인간의 주된 에너지원인 탄화수소계열의 화석연료 연소 후 생성물에 의한 발생이 주요 원인으로 보고되고 있다.

지난 수십 년 동안 산업화된 국가들에서는 NO_x의 배출에 관한 규제를 법률로 제정하여 왔으며 배출 제한 한계는 계속 낮아지고 있는 실정

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

† 연락처, futurist@kaist.ac.kr

이다. 이는 경제적인 측면에도 매우 위협적이며, 오랫동안 많은 연구자들은 NOx를 감소시키는 다양한 방법을 연구해 오고 있다.

NOx를 저감하는 연소기술에는 크게 두 가지 방식이 사용된다. 화염대의 산소 농도나 온도 조건을 조절하여 NOx 발생을 줄이는 방식과, 발생된 NOx를 연소 후단에서 제거하는 후처리 방식이 있다.

화염대에서 NOx 발생을 억제하는 대표적인 방식으로는 배기가스 재순환(FGR, Flue Gas Recirculation), 수분사(WSI, Water/Steam Injection), 공기/연료 다단연소(Air/Fuel Staged Combustion) 등이 있다. 이 중 공기다단연소는 산화제인 공기를 여러 단계로 나누어 분사함으로써 연소반응을 억제하고 화염의 고온부 온도를 낮춤으로써 Thermal NOx와 Fuel NOx의 효율적인 저감에 효과가 있다고 알려져 있다.[1]

후처리 방식으로는 선택적 촉매 환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction)과 선택적 무촉매 환원법(SNCR, Selective Non-Catalytic Reduction)이 대표적이다. SCR은 초기 투자비 및 시설 유지비가 높고 넓은 설치공간을 필요로 하는 단점이 있으나, NOx 저감 효율이 매우 높아 상업용 설비로 사용되고 있다. 이에 비해 촉매를 사용하지 않는 SNCR은 설치비 및 유지비는 적으나, 적정 작동 환경이 갖추어져야 한다.[2, 3]

최근에는 실용화에 유리하고 NOx 저감 효율

이 높은 재연소(Reburning) 기반 방법들이 개발되고 있다. 재연소 방법은 주연소 영역 후류에 탄화수소 계열의 재연소 연료(Reburn fuel)를 분사하여 연료 농후 영역인 재연소 영역(Reburn zone)을 조성하고, 여기서 NOx가 질소로 환원되도록 한다. 재연소 방법은 40-60%의 NOx 저감이 가능하며, SOx의 저감에도 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 투자비 및 유지비가 비교적 저렴하고, 기존 연소로의 개장(改裝)에도 쉽게 적용 가능하다.[4-6]

산소부화연소는 산화제 중에 산소의 비율을 증가시켜서 연소성능을 향상시키는 방법이다. 연료-공기 연소에 비해서 화염의 온도는 상승하며 산화제 중의 희석제 양이 감소되어 열전달 효율이 높아지는 특징을 가지고 있다.[7] 그러나 화염의 온도가 상승함에 따라, 고온의 환경에서 발생하는 Thermal NOx가 급격히 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제의 해결을 위해, 본 연구에서는 다양한 산소부화 조건에서 재연소 방법을 기반으로 하여 SNCR과 공기다단연소를 각각 적용하는 혼합형 재연소 방법에 대해 실험적으로 연구하였다. 본 연구는 열전달 및 온도분포를 기초로 하여 혼합형 재연소 방법들에 의한 NOx 저감 효율을 파악하고자 하였으며, 산소부화도에 따른 혼합적 기술의 효용성을 분석하고, 최적 방법을 검토하였다.

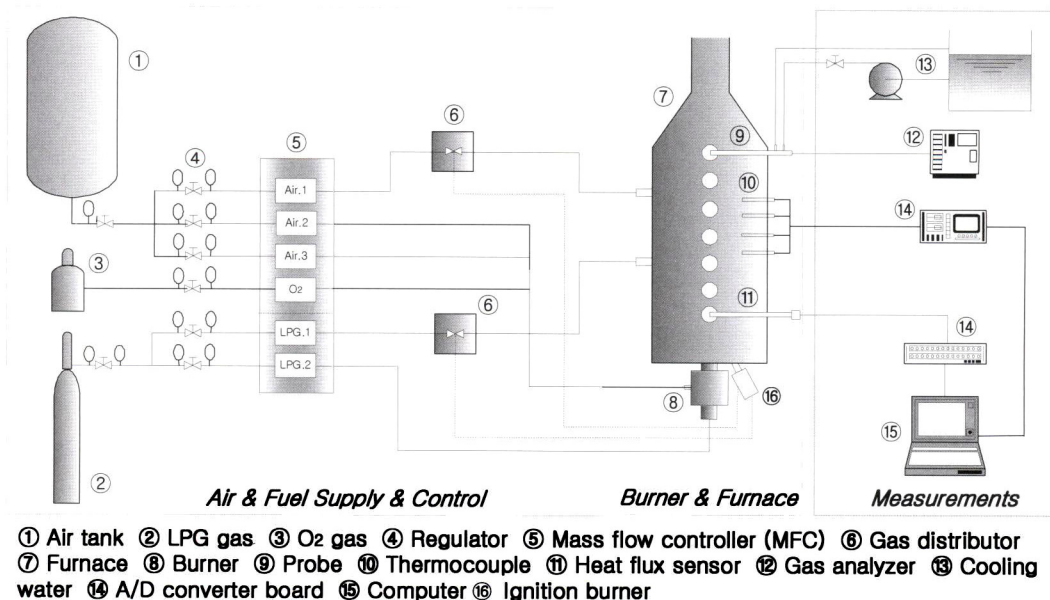


Fig. 1 Experimental setup

2. 실험

2.1 실험장치

실험을 위하여 실험실 규모의 연소로와 연소기를 제작하였다. 연료인 LPG와 산화제인 공기는 질량유량계를 사용하여 공급하였으며, A/D convert board를 이용하여 데이터를 수집하였다.

Fig. 1에 장비의 개략적인 구성을 표시하였다.

2.1.1 연소로

Fig. 2는 연소로의 내, 외부 형태를 나타내고 있다. 원통형 구조의 연소로는 높이 1.2m, 지름 0.5m이며, 연소로 외부와 배기구에는 벽면 온도 및 내부 온도 분포, 벽면으로의 열전달량, 연소 가스 분석기 프로브 삽입 등을 위한 다양한 크기의 측정구를 10cm 간격으로 설치하여 실험 데이터를 확보하도록 하였다. 연소로 내부에는 단열재인 세라크울을 설치하였다. 또한, 재연소 연료와 연소완료 공기를 다양한 위치에서 공급할 수 있도록 공급구들을 배치하였다.

2.1.2 노즐

Fig. 3은 노즐의 모습을 나타내고 있다.

재연소 연료와 연소완료 공기의 공급을 위해 flat형의 분사각 95°인 노즐을 사용하였다. 연소로 측면에서 연소로 중심축 방향으로 지면에 수평하게 분사되도록 설치되었으며, 일정한 높이에서 환형으로 설치된 6개의 노즐이 동시에 분사가 가능하도록 하였다.

2.1.3 연소기

Fig. 4에서 연소기의 형상을 표현하였다. 확산 화염을 생성하기 위해 동축관의 형태로 제작되었으며, 일반 연소기와 공기 2단 연소기의 두 가지 연소기가 사용되었다. 공기 2단 연소기는 Fig. 5와 같은 동축의 3중관 형태로 제작되었으며, 1단 공기와 2단 공기의 공급비율은 1:1이다. 연소기는 연소로 하단에 장착하였으며, 화염은 지면에 수직방향으로 형성된다. 화염의 안정화를 위해 쉘(Quarl)과 radial flow guide vane 타입의 선회기(swirler)를 제작하여 연소기 끝단에 설치하였다. 일반 연소기의 경우 선회각(vane angle, θ)이 45°이며, 2단 연소기의 경우 1단 산화제 분사부에 45°, 2단에 60°의 선회각을 가지는 선회각이 각각 사용되었다. 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같다.[8]

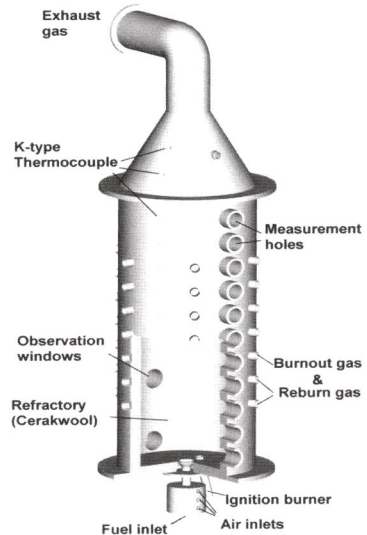


Fig. 2 Furnace

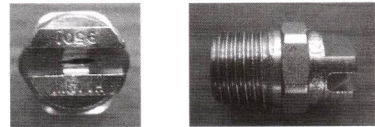


Fig. 3 Upside and side view of nozzle

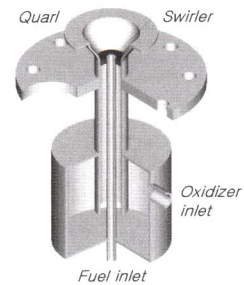


Fig. 4 Burner

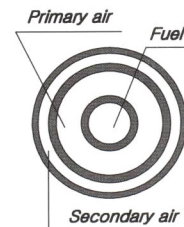


Fig. 5 Sectional diagram of air staged burner inlet

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right] \tan \theta$$

d는 노즐의 직경, d_h는 vane hub의 직경, θ는 vane의 각도이다.

본 실험에서는 산소부화도에 따라 산화제 공급부의 직경이 다양하나, 스윙수에는 큰 변화가 없다. 일반연소기의 경우 0.72-0.77의 범위이며, 공기 2단 연소기의 경우, 1단 공기공급부는 0.75-0.80, 2단 공기공급부는 1.65-1.67의 스윙수 값을 가진다.

2.2 측정장비

2.2.1 가스분석기

가스분석기는 이동형 가스 분석기(Greenline MK2)를 사용하였다. 산소농도 및 NO, NO₂, CO, SO₂의 공해물질의 측정이 가능하다. 수냉식 포집관을 사용하여 연소로 내부나 배기구에서 가스 시료를 채취하며, 내부에서 수분(H₂O)을 제거하고 성분을 측정한다.

2.2.2 열전대

열전대는 K-type과 R-type의 두 종류가 사용되었다. 열전대 정점(Bead)에서 복사에 의한 열손실을 보정하기 위해, 각기 다른 크기의 정점을 가지는 여러개의 열전대를 사용하였다.[9]

2.2.3 열유속계

열유속계는 입사되는 열유속에 비례하여 전압을 발생시키는 Gardon type의 열유속계를 사용하였으며, 전체 열전달량(Total heat flux)를 측정하는 센서와 복사열전달량(Radiative heat flux)를 측정하는 두가지 센서를 사용하였다.[10]

2.3 실험조건

본 연구에서는 크게 5가지 실험 조건을 고려하였다. 모든 실험에서 주 연료와 재연소 연료를 합한 전체 연료 공급량은 일정하게 설정하였다.(15kW) 주 연료 및 재연소 연료는 LPG를 기화시켜서 사용하였으며 모든 경우에서 배기구 O₂ 농도는 2-3%로 유지되었으며, CO는 전혀 발생하지 않았다. 측정 오차는 온도의 경우 최대 31℃ 이내이며, 열전달량의 경우 2.8kW/m², 가스분석값은 5% 이내이다. 또한, 모든 측정값 중 오류데이터는 Chauvenet's criterion에 의해 제외되었다.[11] 재연소 연료를 사용하는 모든 실험에서 재연소 연료 및 연소원료 공기 분사지

점은 같도록 고정하여 이에 의한 영향이 없도록 하였다.

산소부화도 0.5 미만의 낮은 산소부화도 조건들에서 다양한 재연소 기반 방법의 NOx 저감 효율이 분석되었는데, 여기서 산소부화도(Oxygen enrichment ratio, Ω)의 정의는 전체 산화제의 공급량에 대한 산소의 공급량으로 다음과 같다.[7]

$$\Omega = \frac{\text{Volume flow rate of } O_2 \text{ in the oxidizer}}{\text{Total volume flow rate of oxidizer}}$$

Case 1은 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)가 0.2인 상태에서 산소부화도를 다양하게 하여 재연소 방법의 NOx 저감 효과를 관찰하기 위한 실험 조건이다. 여기서 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)는 전체 연료량에 대한 재연소 연료의 질량 비율을 나타낸 것이다.

Case 2에서는 선택적 무촉매 환원법(SNCR)을 다양한 산소부화 화염에 적용하여 NOx 저감 효과를 파악하였다. SNCR 작용제로 암모니아(NH₃) 가스를 사용하였다.

Case 3은 2단 공기 연소기를 사용하여 공기다단연소에 의한 NOx 저감 실험을 수행하였다.

Case 4와 Case 5에서는 재연소/SNCR 혼합적 방법과 재연소/공기다단 혼합적 방법을 각각 적용하여 실험을 수행하였다. 두 조건에서 재연소 연료비는 0.2이다. Case 4에서 암모니아 공급비(NH₃ fraction)는 재연소 연료비가 0.2일 경우를

Table 1 Experimental conditions

Case		1	2	3	4	5
Thermal input (kW)	Primary fuel	12.00	15.00	15.00	12.00	12.00
	Reburn fuel	3.00	-	-	3.00	3.00
Equivalence ratio (Ω)	Primary zone	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
	Reburn zone	1.09	0.91	0.91	1.09	1.09
	Burnout zone	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Reburn fuel fraction		0.2	-	-	0.2	0.2
NH ₃ fraction		-	0.1	-	0.1	-
Oxygen enrichment ratio		0.209 ~	0.209 ~	0.209 ~	0.209 ~	0.209 ~
		0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
NOx reduction process		Reburning	SNCR	Air staging	Hybrid reburn /SNCR	Hybrid reburn /Air staging

기준으로 하여 공급되는 암모니아와 재연소 연료의 질량 비율을 의미한다.

Table 1에 전체 실험조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재연소 방법

질소산화물의 저감을 위해 재연소를 적용하였을 경우, NOx 저감율에 영향을 미치는 요소들로, 재연소 연료비, 재연소 영역비 등이 있다고 알려져 있다.[6] Case 1에서는 다양한 산소부화화염에 적용된 재연소 효과를 관찰하기 위해, 재연소 연료비와 재연소 영역비와 같이 NOx 저감에 영향을 주는 요소들은 각각 0.2와 0.25로 고정하였다. 육안으로 식별 가능한 가시적 화염 길이는 0.3m 정도이며, 재연소 연료는 연소기 끝단으로부터 0.4m 하류 지점에서, 연소연료 공기는 0.7m 지점에서 각각 연소로 벽면에 수직인 방향으로 분사된다.

Fig. 6은 0.25, 0.35, 0.45의 세가지 산소부화 조건에서의 연소로 중심 축방향 온도를 나타내고 있다. 그래프에서 나타나는 바와 같이, 산소부화도가 증가함에 따라 온도가 상승한다. 특히 화염 부분인 상류 부분의 온도 변화가 두드러지고 있다. 당량비를 일정하게 유지한 상태에서 산소부화도를 증가시키게 되면, 공급하는 산소의 총량은 같은 값을 유지하게 되므로, 공기를 산화제로 공급하였을 경우($\Phi:0.209$)와 비교하여 산화제 중의 질소 비율이 줄어든 효과가 나타난다. 질소는 화학적 연소 반응에 거의 참여하지 않고 단순히 열을 흡수, 저장하여 배기되는 성향이므로, 질소의 감소는 열효율의 증가 및 화염온도 상승으로 이어진다. 결국 산소부화도의 증가는 Fig. 6과 같이 연소로내의 온도 상승을 유발한다.

산소부화도 증가에 따른 온도의 상승은 벽면으로의 열전달량 증가를 유발한다. Fig. 7에서 이를 확인할 수 있다. 온도의 경우와 마찬가지로 열전달량도 산소부화도 상승에 맞추어 증가하고 있다. 특히 복사열전달의 경우 고온의 환경에서 더욱 그 비율이 높아지는데, 산소부화도 0.25에서 복사열전달이 전체 총열전달에서 차지하는 비율이 평균적으로 49.0% 이었으나, 산소부화도 0.45에서는 63.7%를 차지하고 있다.

산소부화도의 증가는 화염온도 상승과 함께 NOx 발생량의 증가를 동반한다. Fig. 8은 산소부화도 증가에 따른, 연소기 끝단으로부터 0.2m 떨어진 지점의 화염 온도 변화와 NOx 생성량의 변화를 나타내었다. Fig. 8을 보면 대기중의 공

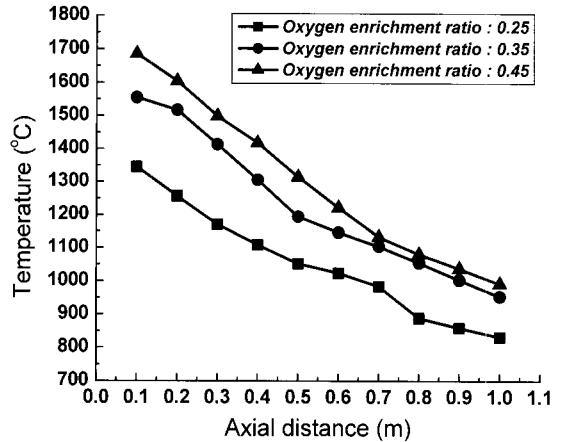


Fig. 6 Axial temperature distribution for case 1

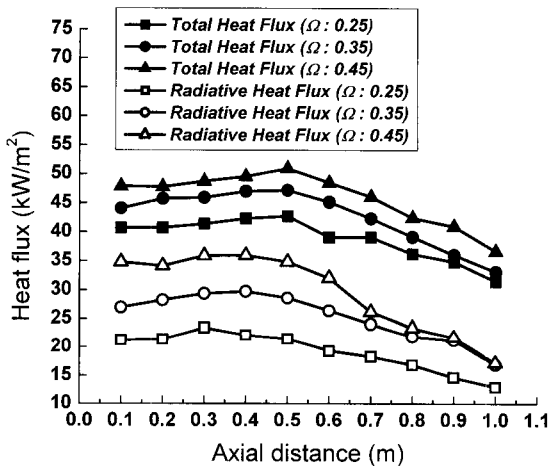


Fig. 7 Heat flux along the wall for case 1

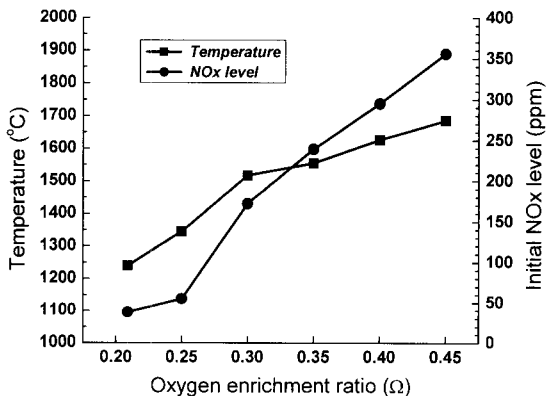


Fig. 8 Initial NOx level and flame temperature

기를 산화제로 사용하였을 경우인 산소부화도 0.209로부터 0.45까지 증가시키는 동안, 화염의 측정지점 온도는 446.6℃ 상승하였다. 그러나 같은 산소부화도의 변화 동안 NOx는 9배 정도 증가하였다. 동일한 연료를 계속 사용하였고, 화염의 형태도 크게 변화하지 않았음을 고려할 때, 결국 대부분의 NOx는 Thermal NOx로 파악된다.

Fig. 9는 재연소 연료비를 일정하게 유지한 상태에서, 산소 부화도의 변화에 따른 재연소의 NOx 저감 효율을 분석한 결과이다. 산소부화도의 증가에 따른 NOx 저감 효율이 소폭 높아지는 경향을 보이고 있는데, 이는 두 가지 변화 요인에 기인한다.

먼저 초기 NOx 생성량의 증가이다. Fig. 8에서 보여진 바와 같이 초기 NOx 발생이 증가하였고, NO가 재연소 연료와 접촉하여 반응할 수 있는 확률이 증가하여 다음 (1)식과 같은 저감 반응이 활발해 진다.[12]



두번째 원인은 연소로 내의 온도 증가 때문이다. 위의 (1)식에서 보면 탄화수소계열이 열분해 또는 부분산화되어 발생하는 C, CH, CH₂ 등이 NO와 반응하는 역할을 하는데, 고온일수록 탄화수소계열의 재연소 연료의 열분해가 쉽게 일어나며, 보다 많은 CH_i 라디칼이 발생하게 된다.

3.2 SNCR 및 재연소/SNCR 혼합적 방법

선택적 무촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)에 의한 NOx 및 CO의 변화는 상당한 것으로 알려져 있다. Case 2에서는 SNCR 방법만을 적용하여 다양한 산소부화연소 상태에서의 NOx 저감 효과를 검토하였다. SNCR 작용제로는 암모니아를 사용하였다. 또한 혼합적 방법과 비교를 위해 암모니아 공급비는 재연소 연료비가 0.2인 경우를 가정하여 0.1로 설정하였으며, 암모니아의 분사위치는 연소기 끝단으로부터 0.6m 지점의 화염 후류영역이다. SNCR 실험의 경우에 독성의 암모니아를 사용하므로, 반응하지 않은 암모니아가 그대로 배출되는 Ammonia slip을 주의해야 하는데, 실험에서 Ammonia slip은 1ppm 이하로 거의 발생하지 않았다.

위의 3.1절에서 고찰한 바와 같이 재연소 방법은 산소 부화도의 증가에 따라 NOx 저감율도 완만하게 증가하는 반면에, SNCR 방법은 산소 부화도 증가에 따라 급격한 변화를 보인다. Fig. 10에서 SNCR 방법 적용 시 산소부화도 변화에 따른 NOx 저감율을 나타내고 있다. 산소부화도

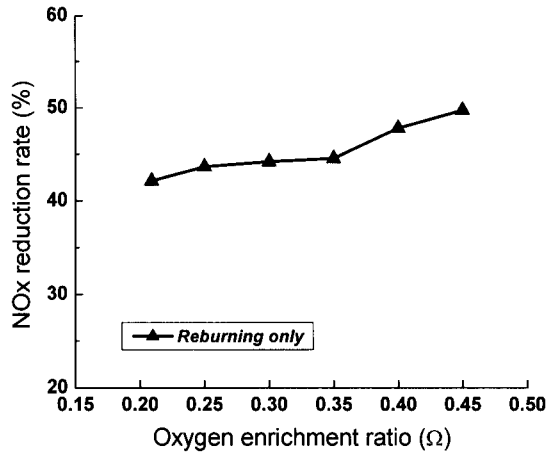


Fig. 9 Effect of Ω on NOx in case 1

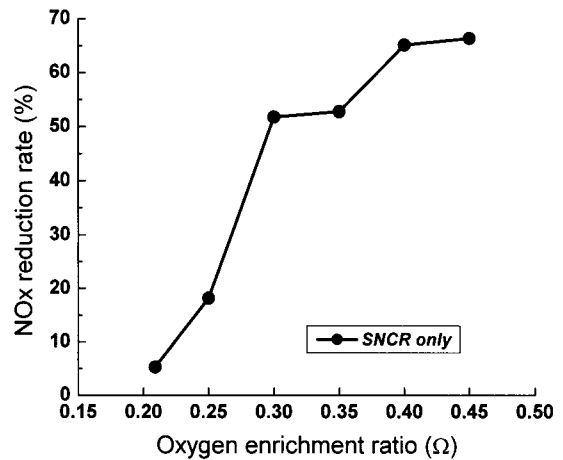


Fig. 10 Effect of Ω on NOx in case 2

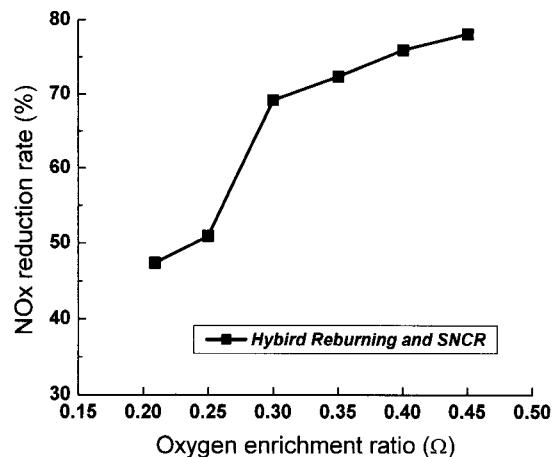
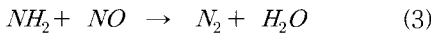
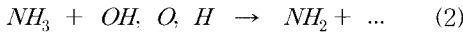


Fig. 11 Effect of Ω on NOx in case 4

0.25 이하에서는 NO_x 저감 효율이 20% 미만의 매우 낮은 수치를 보이고 있으나, 산소 부화도 0.3부터는 NO_x 저감 효율이 급격히 상승하여 50~70%의 수치를 기록하고 있다. 이는 온도에 의한 차이이다. 산소 부화도 0.209와 0.25의 실험에서 암모니아 분사 지점 평균 온도는 730~780℃로, SNCR 방법의 NO_x 저감 반응 적정 온도에 미치지 못한다. 즉, 아래 반응식 (2)-(3)의 과정이 활성화되기 어렵다. 아래 반응식은 암모니아가 NH₂를 생성하고, 생성된 NH₂가 NO와 반응하는 과정으로 800~1200℃ 정도의 적정 온도범위를 가진다.



이에 반해 산소 부화도 0.3~0.45 일 경우의 분사 지점 평균 온도는 각각 830~970℃ 로, 적정 온도 범위에 속한다.

Fig. 11은 재연소/SNCR 혼합형 방법을 적용하였을 경우(Case 4), 산소부화도 변화에 따른 NO_x 저감율을 나타내고 있다. 혼합형 방법의 NO_x 저감율은 실험 범위 내의 전체 산소 부화도에서 비교적 안정적인 수치를 보이고 있다. 산소부화도 0.209~0.25 의 낮은 산소부화화염에서도 45~55% 정도의 NO_x 저감이 확보되고 있으며, 0.3~0.45의 높은 산소부화화염 환경에서는 70% 이상의 NO_x 저감율을 기록하고 있다.

이는 재연소와 SNCR 방법이 다양한 온도범위에서 동시에 NO_x 저감을 유도하고 있기 때문이다. SNCR 작용제에 의한 NO_x 저감 반응이 활성적으로 일어나지 못하는 비교적 낮은 온도에서는 재연소 방법이 주요하게 작용하여 NO_x를 저감하고 있으며, 암모니아가 NO와 반응 가능한 온도가 확보되면 재연소에 의한 효과까지 더해지면서 높은 NO_x 저감이 실현되고 있다.

3.3 공기다단연소 및 재연소/공기다단 혼합적 방법

2단 공기 연소기를 사용하는 case 3에서의 산소부화도에 따른 NO_x 저감 효과를 파악함에 있어, 먼저 본 연구에서 사용한 공기다단연소의 열적 특성 분석을 위해 Fig. 12의 온도 그래프를 관찰하였다.

Fig. 12는 산소부화도 0.35에서 2단 공기 연소기를 사용한 경우와 일반 연소기를 사용한 경우의 연소로 내 온도 분포를 비교한 것이다. 그래프에서는 연소로 중심축을 따라 화염 영역으로부터 후류 방향으로 측정된 온도분포(Axial centerline), 중심축으로부터 0.1m 떨어진 지점의 축방향 온도분포(Middleline), 중심축으로부터 0.2 m 떨어진 지점의 축방향 온도분포(Edge line)의 세가지 데이터를 비교하고 있다.

Fig. 12를 보면 대부분의 영역에서 공기 다단 연소 상태의 온도가 더 낮음을 알 수 있다. 또한 Edgeline의 축방향거리 0.4~0.6m 지점의 온도를 살펴보면, 온도의 역전이 발생했음을 관찰할 수 있다. 결국 공기 다단 연소기로 인해 화염의 온도는 낮아지고 반응영역이 좀더 넓게 확대되었음을 확인할 수 있다. 이는 화염의 온도를 낮추어 thermal NO_x의 발생을 억제하는 공기다단연소의 특징을 보여주는 것이다.

Fig. 13은 case 3와 case 5에서 산소부화도 변화에 따른 NO_x 저감을 나타낸 것이다. 공기다단연소 방법만을 적용한 case 3를 보면 낮은 산소부화도 예서는 저감율이 -18%에서 -5%로 오히려 NO_x가 공기다단연소를 적용하지 않은 일반연소 조건에 비해 증가했음을 알 수 있다. 이는 NO_x의 생성기구가 다양하기 때문인데, 낮은 산소부화도(0.209~0.25)의 경우 공기다단연소에 의해 로내의 온도가 상대적으로 낮아지므로 thermal NO_x는 일반연소조건에 비해 오히려 감

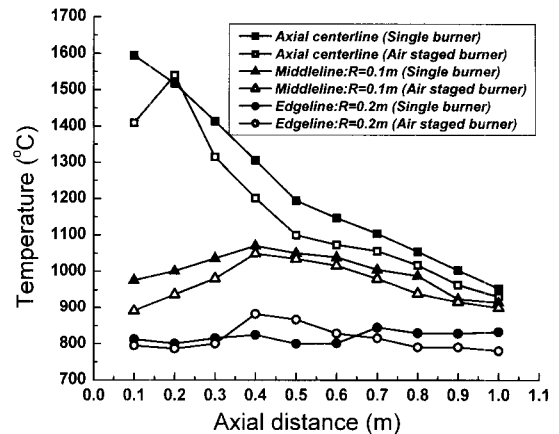


Fig. 12 Axial temperature distribution for case 1 and 3 (Ω : 0.35)

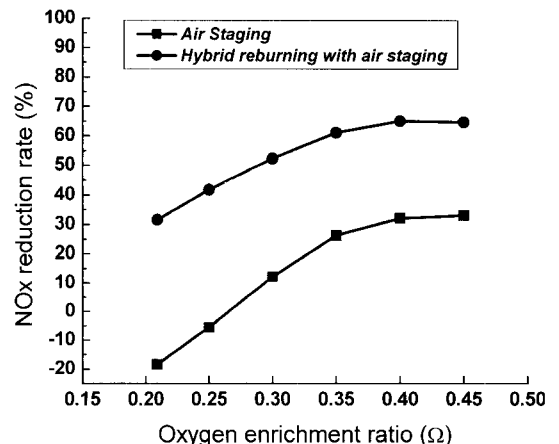


Fig. 13 Effect of Ω on NO_x in case 3 and 5

소해야 한다. 또한 같은 가스 연료를 사용하므로 Fuel NOx의 생성이나 변화는 기대하기 어렵다. 결국, 공기다단연소기를 사용하면 화염의 반응영역이 넓어지면서 온도가 낮아지므로, 화염면 주위에서 발생할 수 있는 prompt NOx가 증가하는 것이다. 낮은 산소부화도에서 공기다단연소를 적용하면 prompt NOx는 증가하는 반면, thermal NOx의 감소량은 그에 미치지 못하여, 오히려 전체 NOx의 양은 증가한 것이다. 이에 반해 산소부화도가 높은 경우는 화염의 온도가 증가하면서 발생하는 NOx의 대부분이 thermal NOx이므로, 공기다단연소를 적용하여 온도를 낮춤으로서 NOx 저감 효과가 커지게 된다.

재연소와 공기다단연소를 혼합적으로 사용한 case 5에서도 전단락에서 설명한 NOx 발생기구에 따른 영향이 나타난다. 그러나 재연소에 의한 NOx 저감 효과가 있으므로 NOx가 증가하는 경우는 없으며, 산소부화도가 낮은 환경에서 NOx 저감율이 비교적 낮고 산소부화도가 높아짐에 따라 최고 65%의 NOx 저감이 관찰되고 있다.

4. 결론

1. 재연소는 산소부화도가 높을수록 더 큰 NOx 저감 효율을 보였으며, 이는 높아진 온도에 의해 초기 NOx 생성량이 증가했고 재연소 연료의 열분해가 용이해졌기 때문이다.
2. 온도의 영향을 크게 받는 SNCR 방법에 비해, 재연소/SNCR 혼합형 방법은 다양한 산소부화도 조건에서 두가지 방법이 동시에 효과적으로 작용하며, 열부하가 다양하게 변화하며 작동하는 시스템에도 안정적으로 적용 가능하다.
3. 공기다단연소만 사용할 경우, 온도환경을 고려해야 한다. 혼합적 방법도 재연소에 의해 낮은 온도에서도 비교적 낮은 온도에서도 NOx 저감이 가능하나, 높은 온도 조건에서 보다 높은 효율적인 NOx 저감이 확보된다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 "미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발" 과제에 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Kim, H. S., Baek, S. W. and Yu, M. J., "Formation Characteristics of Nitric Oxide in a Three-Stage Air/LPG Flame," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, Issue 16, 2003, pp. 2993-3008.
- [2] Lyon, R. K., "Thermal DeNOx: Controlling Nitrogen Oxides Emissions by a Noncatalytic Process," Environ. Sci. Tech., Vol. 21, No. 3, 1987, pp. 231-236.
- [3] Miller, J. A., "Theory and Modeling in Combustion Chemistry," Proc. Combust. Instit., Pittsburgh, 1996.
- [4] Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T., Ohme, S., Haneda, H., Kawamura, T. and Kaneko, S., Proc. of the 1982 Joint Symposium on Stationary NOx Control, EPRI Report No. CS-3182, July, 1983.
- [5] Folsom, B. A., Sommer, T. M., Ritz, H., Pratapas, J., Bautista, P. and Facchiano, T., "Three Gas Reburning Field Evaluations - Final Results and Long Term Performance," EPRI/EPA 1995 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control, Kansas City, MO, May 19, 1995.
- [6] Lee, C. Y. and Baek, S. W., Effects of Reburning on Heat Transfer Characteristics and NOx Reduction," Trans. of the KOSCO, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 18-25.
- [7] Baukal, C. E., Oxygen-enhanced combustion, CRC press, New York, 1998.
- [8] Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., Swirl Flows, ABACUS PRESS, London, 1984.
- [9] Lee, C. Y., Choi, J. W. and Baek, S. W., "Effects of CO₂ on Heat Transfer from Oxygen-enriched Hydrogen Flame," Trans. of the KSME(B), Vol. 28, No. 8, 2004, pp. 937-994.
- [10] Gardon, R., "A transducer for the measurement of heat flow rate," J. Heat Transfer, Vol. 82, 1960, pp. 396-398.
- [11] Holman, J. P., Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, 2001.
- [12] Chen, S. L., Kramlich, J. C., Seeker, W. R. and Pershing, D. W., "Optimization of reburning for advanced NOx control on coal-fired boilers, JAPCA, Vol. 39, 1989, pp. 1375-1379.