

< 논문 >

## 무촉매 환원법이 적용된 응용 재연소 방법에 의한 NO<sub>x</sub>와 CO의 저감 효과

이창엽<sup>†</sup> · 김동민\* · 백승욱\*\*

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 6월 14일 심사완료)

### The Effects of Advanced Reburning with SNCR on NO<sub>x</sub> and CO Reduction

Chang Yeop Lee, Dong Min Kim and Seung Wook Baek

**Key Words** : Reburning(재연소), Selective Non-catalytic Reduction(선택적 무촉매 환원법), LPG Flame(LPG 화염), NO<sub>x</sub>(질소산화물), CO(일산화탄소)

#### Abstract

From the view of the environmental protection against the use of fossil fuels, the great of efforts have been exerted to find an effective method which is not only pollutant reduction but also high thermal efficiency. Reburning is a useful technology in reducing nitric oxide through injection of a secondary hydrocarbon fuel. In this paper, an experimental study has been conducted to evaluate the hybrid effects of reburning and selective non-catalytic reaction (SNCR) on NO<sub>x</sub>/CO reduction from oxygen-enriched LPG flame. Experiments were performed in flames stabilized by a co-flow swirl burner, which was 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<sub>x</sub> generation were observed to increase by oxygen-enriched combustion, but due to its hybrid effects of reburning and SNCR, NO<sub>x</sub>/CO concentration in the downstream has considerably decreased.

#### 기호설명

- Φ : 당량비(Equivalence Ratio)
- d : 선회기의 내부 직경
- d<sub>h</sub> : 선회기 허브의 직경
- S : 선회수(Swirl Number)
- θ : 선회기 vane의 각도
- Ω : 산소부화도(Oxygen enrichment ratio)

#### 1. 서론

현재 인류의 주된 에너지원은 탄화수소계열의 화석 연료이다. 그러나 이러한 화석연료의 연소 후 생성물에 의한 환경오염 문제가 심각하게 제기되고 있다. 주된 환경 오염원으로는 질소 산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 외에 연료의 불완전 연소로 인해 생기는 일산화탄소(CO)와 soot 등이 있다. 질소산화물은 광화학 스모그 및 산성비의 원인이 되며 동식물에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 오랫동안 많은 연구자들은 NO<sub>x</sub>를 감소시키는 다양한 방법을 연구하였다. 이로 인해 현재 시도되고 있는 저 NO<sub>x</sub> 방법으로는 배기가스 재순환, 물 또는 스팀분사, 공기 및 연

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공  
E-mail : futurist@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-5754 FAX : (042)869-3710

\* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

\*\* 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

료의 다단 연소 등이 있으며 최근 선진국에서는 후연소 영역에서 NO<sub>x</sub>를 제거하는 재연소방법 및 선택적 무촉매 환원반응(SNCR, selective non-catalytic reduction)을 시도하고 있다.

재연소(Reburning) 방법은 3개의 반응 영역으로 구분된다. 즉, 연료 노즐 선단으로부터 일차연소 영역(Primary Combustion Zone), 재연소 영역(Reburn Zone), 연소완료 영역(Burnout Zone)을 이룬다.<sup>(1)</sup> 일차연소 영역에는 일반적인 약간의 과잉 공기를 공급하고 화염을 형성한다. 일차연소 영역의 후류에 재연소 영역이 존재하는데, 이곳에는 재연소 연료(Reburn fuel)라고 하는 총 연료의 10~30% 정도의 연료만을 주입한다. 이로 인해 재연소 영역은 연료 과농의 상태가 되고, 일차연소 영역에서 발생한 NO는 재연소 연료와 반응하여 HCN을 생성하게 된다. 이는 다시 N<sub>2</sub>로 환원되어 NO를 저감시키게 된다. 그리고 재연소 영역 후류의 연소완료 영역으로는 공기(Burnout air)를 공급시켜 재연소 영역으로부터 배출된 미연연료가 완전 연소되도록 한다. 재연소 방법은 이러한 3 단계 반응과정을 거쳐 NO<sub>x</sub>를 저감한다.

재연소 방법은 1980년대 일본에서 처음 산업로에 시험 적용하여 NO감소에 성공하면서 많은 연구자들로부터 연구의 대상으로 대두되었다.<sup>(2)</sup> 그 후, 1990년대 Folsom et al.은 재연소를 통한 50~65%의 NO<sub>x</sub> 감소를 발표하였다.<sup>(3)</sup> 현재 재연소 방법은 미국, 유럽, 일본에서 다양한 방향으로 연구되고 있다.

SNCR은 연소 후 영역에 암모니아(ammonia)나 우레아(urea)를 분사하여 NO<sub>x</sub>를 제거하는 후처리 방법으로, 분사된 작용제의 라디칼과 질소산화물이 반응하여 NO<sub>x</sub>를 저감하는 방법이다.<sup>(4)</sup> 높은 NO<sub>x</sub> 저감을 실현할 수 있으며 설치 및 유지비용이 적은 기술로 각광 받고 있으나, 연소로 내부 온도분포나 초기 NO<sub>x</sub> 발생량 등의 운전 조건에 따라 그 효과는 매우 상이하다.<sup>(5)</sup>

NO를 환원시키는 재연소방법과 SNCR의 반응식은 매우 복잡하고 현재까지 완전히 규명되지 않고 있다. 하지만, 이들 기술을 최적화하여 적용하기 위한 연구는 다양하게 진행되고 있다. 본 연구는 재연소 기술과 SNCR의 적용 시 최대의 효율성을 얻기 위한 조건을 실험적으로 파악함과 동시에 이들 기술의 혼합 효과를 관찰하고, 열전달 및 온도분포를 기초로 하여 재연소 및 SNCR

메카니즘에 의한 NO<sub>x</sub> 및 CO의 저감 효율을 파악하고자 하였다. 또한 이들 저감 방법들을 접목한 혼합적 기술의 효율성을 분석하고, 최적 방법을 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

실험을 위하여 실험실 규모의 연소로와 연소기를 제작하였다. 연소기는 연소로 하단에 고정되어 연소로 내에서 화염이 상부 방향으로 형성되도록 구성하였다. 연료인 LPG와 산화제인 공기는 질량유량계를 사용하여 공급하였다.

Fig. 1에 장비의 개략적인 구성을 표시하였다.

#### 2.1.1 연소로

연소로는 높이 1.2m, 지름 0.5m의 원통형 구조로 이루어져 있다. 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.

또한 연소로에는 재연소 실험에 맞추어 옆면에서 재연소 연료와 연소완료 공기를 다양한 위치에서 공급할 수 있는 공급구들을 배치하였다. 연소로 내부에는 단열재인 세라크올을 설치하여 외부로의 열전달을 최소화 하였다. Fig. 2에 연소로의 모양을 도시하였다.

#### 2.1.2 연소기

연소기는 LPG와 산화제의 확산화염에 맞추어 제작하였다. Fig. 3에서 연소기의 형상을 표현하였다.

연소기 팁에는 화염 안정화를 위해 선회각(vane angle,  $\theta$ )이 45°인 radial flow guide vane swirler를 제작하여 설치하였다. 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같으며,<sup>(6)</sup> 본 실험에서는 선회수가 0.76인 선회기를 사용하였다.

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

d는 선회기의 내부 직경, d<sub>h</sub>는 선회기 허브의 직경,  $\theta$ 는 선회기 vane의 각도이다.

2.1.3 노즐

재연소 연료와 연소완료 공기의 공급을 위해 연소로 옆면에서 연소장 내부로 향하는 노즐을 설치하였다. 정해진 위치의 높이에서 환형으로 설치된 6개의 노즐이 동시에 분사가능 하도록 하였다. 노즐의 분사형태는 flat형이고 분사각은 95도이며, 연소장 내 고온에 견딜 수 있는 내열성 스테인레스 스틸로 제작되었다.

Fig. 4에 노즐의 모습을 나타내었다.

2.2 측정장비

2.2.1 열전대

열전대는 지름 0.1~0.8mm 굵기의 세선으로 만들어졌으며, 고온에서의 변형이나 산화의 영향이 적도록 열처리 되어졌다.

온도측정은 각기 다른 크기의 정점(bead)을 가진 여러개의 열전대를 사용하여 측정하고자 하는 한 지점에서의 온도를 측정한 후 측정된 온도 정보들을 가지고 선형으로 외삽하여 정점의 크기가 0일 때의 온도를 그 측정점에서의 온도로 정의하는 방법으로 보정하였다.<sup>(7)</sup>

2.2.2 열유속계

열유속계는 입사되는 열유속에 비례하여 전압을 발생시키는 Gardon type의 열유속계를 사용하였다.<sup>(8)</sup> 벽면으로의 총열전량과 복사열전달량을 측정할 수 있도록 두 종류의 센서를 사용하였다.

2.2.3 가스분석기

가스분석기는 이동형 가스 분석기로 NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>의 공해물질 및 산소 농도를 측정할 수 있다. 수냉식 포집관을 사용하여 가스 시료를 채취하며, 내부에서 수분(H<sub>2</sub>O)을 제거하고 측정한다. 자체적으로 보정기능이 있으며, 정밀도는 ±5%이다.

2.3 실험조건

본 연구에서는 크게 4가지 실험 조건을 고려하였다. 전체 실험에서 주연소기에 공급되는 연료량은 항상 일정하고 하였고, 재연소 연료와 연소완료 공기를 이용하여 재연소 영역의 공연비는 변화시키면서 주연소 영역과 연소완료 영역의 공

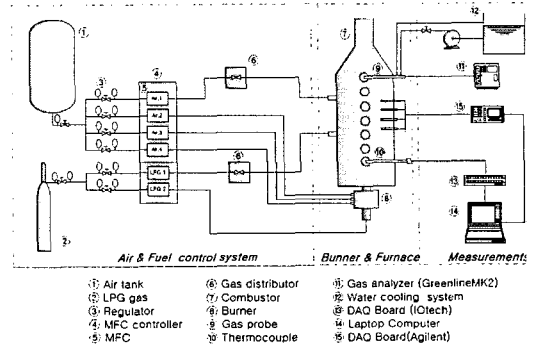


Fig. 1 Experimental setup

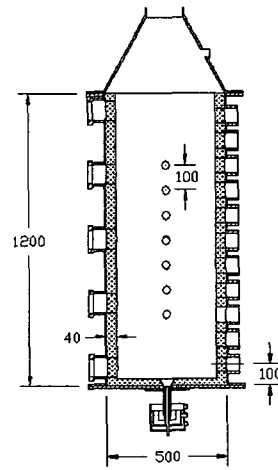


Fig. 2 Furnace

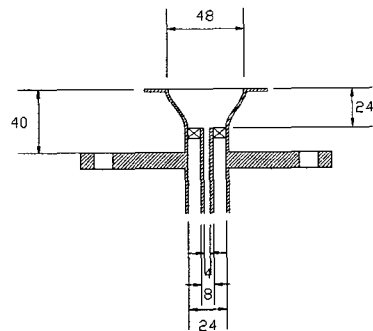


Fig. 3 Burner



Fig. 4 Upside and side view of nozzle

연비는 일정하게 유지되도록 하였다. 주연료 및 재연소 연료는 LPG를 사용하였으며 모든 경우에서 배기구 O<sub>2</sub> 농도는 2~3%로 유지되었다.

Case 1은 재연소 연료의 양을 다양하게 하여 그 효과를 관찰하기 위한 실험 조건이다. 여기서 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)는 전체 연료량에 대한 재연소 연료의 질량 비율을 나타낸 것이다.

Case 2에서는 제반 조건들이 일정한 상태에서 재연소 영역비(Reburn zone fraction)를 변화시켜 실험을 수행하였다. 재연소 영역비는 무차원 변수로, 연소기 팁으로부터 0.4m 거리의 재연소 연료 분사 지점과 연소기 팁으로부터 0.5m~0.9m 거리의 연소완료 공기 분사 지점 사이의 길이를 전체 반응영역(1.2m)길이로 나눈 값이다.

Case 3은 무촉매 환원법(SNCR)의 작용제로 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 사용하여 실험을 수행한 조건이다. SNCR 작용제의 분사 위치에 따른 3가지 세부조건으로 나누어지며, 분사량에 의한 NO<sub>x</sub> 및 CO의 저감 상태를 관찰하였다. Case 3에서는 산소 부화 연소의 개념을 도입하여, 산소부화도(Oxygen enrichment ratio, Ω)의 정의는 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

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

마지막으로 Case 4에서는 무촉매 환원법을 재연소방법에 적용한 혼합적 형태에서의 NO<sub>x</sub> 및 CO에 대한 영향을 연구하였다. Case 4에서도 SNCR 작용제의 분사 위치에 따른 3가지 세부조건으로 나누어지며, 암모니아의 양을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 여기서 암모니아 공급비(NH<sub>3</sub> fraction)는 재연소 연료비가 0.2일 경우를 기준으로 하여 공급되는 암모니아와 재연소 연료의 질량 비율을 의미한다. 모든 실험은 점화 후 벽면 온도의 변화로 정상상태를 확인한 후에 수행되었다. Table 1에 실험조건을 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재연소에 의한 NO<sub>x</sub> / CO 변화 특성

재연소에 의한 연소장의 변화를 분석하기 위해

Table 1 Experimental conditions

Case		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Thermal input (kW)	Primary fuel	15.00	15.00	15.00	15.00
	Reburn fuel	0 ~ 4.50	3.00	-	3.75
Air/fuel ratio	Primary zone	1.1	1.1	1.1	1.1
	Reburn zone	1.10 ~ 0.84	0.92	1.1	0.88
	Burnout zone	1.1	1.1	1.1	1.1
Reburn fuel fraction		0 ~ 0.23	0.167	-	0.2
Reburn zone fraction		0.25	0.08 ~ 0.42	-	0.33
NH <sub>3</sub> fraction		-	-	0 ~ 0.2	0 ~ 0.2
Remarks		Reburn fuel fraction was varied.	Reburn zone fraction was varied.	Injection location and quantity of NH <sub>3</sub> were varied. Ω=0.35	Hybrid Reburn/SNCR process was tested. Ω=0.35

Case 1의 실험 조건에서 내부 온도 분포와 벽면으로의 열전달을 확인하였다. 주연소 영역의 화염의 길이는 0.3m 정도이며, 재연소 연료는 연소기 끝단으로부터 0.4m 하류 지점에서, 연소연료 공기는 0.7m 지점에서 각각 연소로 벽면에 수직 한 방향으로 분사된다.

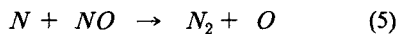
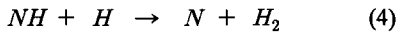
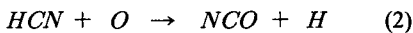
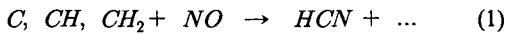
Fig. 5은 벽면으로의 총열전달량을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 축방향거리(Axial distance)는 연소기 끝단으로부터의 거리를 의미한다. 그래프를 보면 재연소를 분사하지 않은 상태(reburn fuel fraction : 0)에서는 화염으로부터 나온 연소 후 가스가 상승하면서 벽면으로 열전달을 이루는 축방향거리 0.5m 부근에서 열전달량이 최대임을 알 수 있다. 그러나 재연소 연료가 공급되면(reburn fuel fraction : 16, 23) 벽면에 수직 한 방향으로 분사되므로 이에 의한 유동의 변화가 일어난다. 벽면을 따라 진행되는 연소 후 가스의 흐름에 교란을 일으키게 되면서 최대 열전달 지점도 재연소 연료가 분사되는 0.4m 지점으로 바뀌게 된다. 또한 재연소 연료의 공급은 전체 열량 공급 증가의 효과도 동반하게 되고, 재연소 연료량을 증가함

에 따라 총열전달량도 증가한다.

Fig. 6에서는 연소로 중심축을 따라 측정한 온도를 나타내고 있다. 역시 앞서 언급한 바와 마찬가지로 재연소 연료량의 증가에 따라 온도가 상승함을 알 수 있다. 그러나 축방향거리 0.7m인 부분에서 온도의 역전이 일어나는데, 이곳은 연소완료 공기가 공급되는 부분으로, 이로 인한 유동 특성 때문이다. 재연소 연료의 양을 증가시키면 연소완료 공기의 양도 증가하게 되고, 유동 교란 및 냉각 특성은 더 강해지는 것이다.

Fig. 7은 재연소 영역에 공급되는 재연소 연료의 양을 조절하여 공급함으로써 재연소 연료비에 따른 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 나타낸 것이다. 현 실험 (Case 1)에서는 일차연소 영역에서는 공연비 1.1의 연료 회박 조건을 유지시키고, 재연소 영역비를 0.3 으로 고정하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 재연소 연료비가 0 ~ 0.18 정도에서는 공급량에 비례하여 NO<sub>x</sub>의 저감율이 증가한다. 그러나 그 이후부터는 공급량 증가에 따른 NO<sub>x</sub>의 저감율을 증가가 둔해지면서 0.2 이상에서는 더 이상 저감율이 증가하지 않고 일정함을 알 수 있다.

이러한 재연소 영역에서의 NO 저감은 아래의 주요한 반응 메카니즘들에 의해 진행되었다고 볼 수 있다.<sup>(10)</sup>



재연소 연료로 분사된 LPG가 열분해하는 과정에서 발생한 CH<sub>3</sub>계열의 라디칼들이 NO와 반응하여 HCN을 형성하고, HCN는 식 (1)~(5)의 과정을 거쳐 N<sub>2</sub>로 환원되는 일련의 과정이다. 그러나 산소가 충분한 연료 회박 조건에서는 CH<sub>3</sub>계열의 라디칼들이 오히려 산소 원자와 결합하여 CO를 생성할 수 있기 때문에 재연소 영역에서의 연료 농후 조건은 필수적이다. 결국 재연소 연료 공급량의 증가는 일차연소 영역에서 발생한 NO가 재연소 영역에서 N<sub>2</sub>로 환원되도록 주도하는 CH<sub>3</sub>라디칼들의 증가를 가져오게 되며, 이로 인해 NO<sub>x</sub> 감소율이 증가하는 것이다. 그러나 혼합율이나

반응율의 한계로 인해 재연소 연료비를 0.2 이상 증가시켜도 더 이상의 NO<sub>x</sub> 저감을 상승은 거의 없는 것으로 파악된다.

CO는 Case 1의 모든 실험 상태의 배기구에서 측정한 결과 전혀 검출되지 않았다. 이는 주연소 영역이나 재연소 영역에서 생성된 CO가 그보다 하류에 있는 연소완료 공기와 만나면서 모두 완전 산화되었음을 나타낸다.

Fig. 8에서 보이는 그래프의 특성도 위에서 설명한 반응 메카니즘과의 관계로 해석 가능하다. Fig. 8은 초기 NO<sub>x</sub> 발생량과 재연소 연료비를 고정한 상태에서 재연소 영역비를 변화시키며 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 파악한 실험 결과이다(Case 2). 재연소 연료비는 0.167 로 고정하였다.

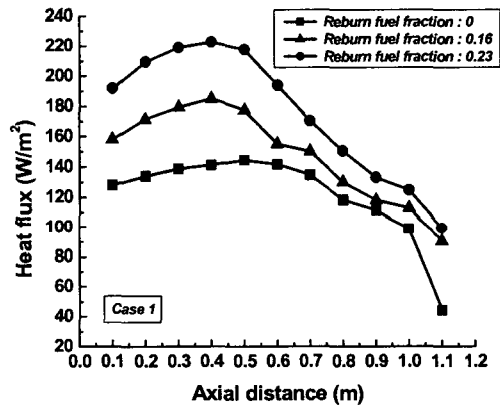


Fig. 5 Total heat flux at the furnace wall

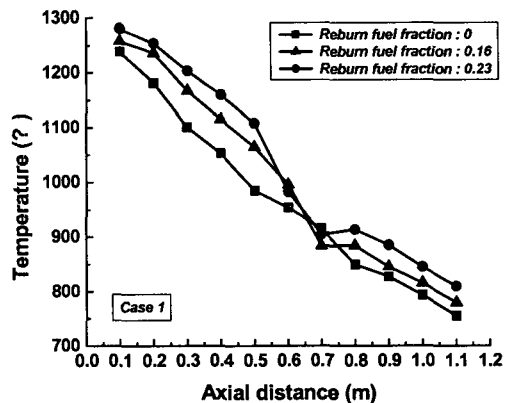


Fig. 6 Temperature distribution at the axial center

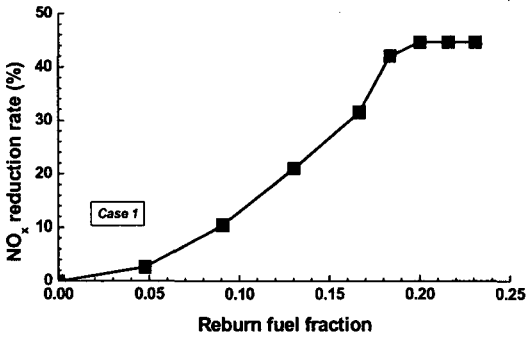


Fig. 7 Effect of reburn fuel fraction on NO<sub>x</sub>

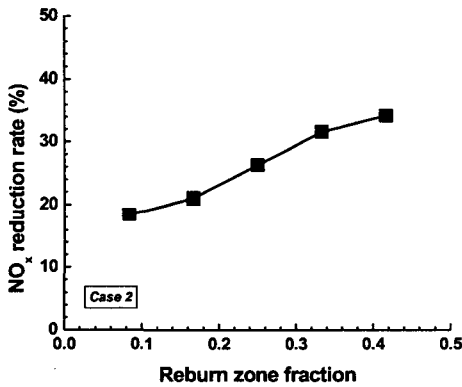


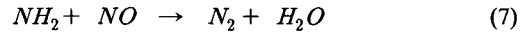
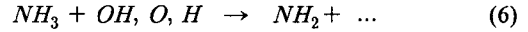
Fig. 8 Effect of reburn zone fraction on NO<sub>x</sub>

그래프를 보면 재연소 영역비가 0.08 일 때 18% 정도의 NO<sub>x</sub> 저감율을 보이고 있으며, 재연소 영역비가 커짐에 따라 NO<sub>x</sub> 저감율도 비례하여 증가하고, 재연소 영역비가 0.42일 때 35% 정도로 NO<sub>x</sub> 저감율이 최대가 됨을 알 수 있다. 이는 재연소 연료 존재 시간의 증가로 기인한 효과로 파악된다. 재연소 영역의 길이를 증가시키면 NO가 CH<sub>3</sub>와 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원되는 메카니즘이 일어날 수 있는 영역이 확장되면서 재연소 연료 존재 시간이 증가하게 되고, 이는 NO<sub>x</sub> 저감 반응이 일어날 수 있는 더 많은 기회를 제공하게 되는 것이다.

3.2 무촉매 환원법에 의한 NO<sub>x</sub> / CO 변화 특성  
 선택적 무촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)의 과정에서는 공급하는 작용제의 양이 연료 및 산화제의 양과 비교하여 매우

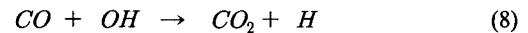
적다. 본 실험에서도 암모니아의 공급에 의한 열 전달이나 온도의 변화는 관찰되지 않았다. 그러나 이러한 SNCR 작용제에 의한 NO<sub>x</sub> 및 CO의 변화는 상당하다. Case 3은 이러한 SNCR 작용제의 영향을 파악하기 위한 실험 조건이다.

SNCR에서 NO저감 메카니즘은 아래와 같은 주요 반응을 거친다.



NH<sub>2</sub> 라디칼이 NO와 반응하여 NO<sub>x</sub>를 감소시키는 반응 과정이다. 그러나 이 과정은 일정한 적정 온도 범위 내에서만 일어나는 것으로 알려져 있다.<sup>(11)</sup> Case 3의 실험 조건에서는 산소부화연소가 적용된다. 산소부화연소의 경우 고온의 화염으로 인해 대부분의 NO<sub>x</sub>가 Thermal NO<sub>x</sub>로 관찰된다. 본 실험에서도 산소부화도 0.35의 경우에서 내부 온도 및 열전달량은 대략 10% 정도 증가했으나, NO<sub>x</sub>는 6배 정도의 급격한 증가를 보였다. 연료의 변화가 없었으며, 화염의 상태도 큰 변화가 없었음을 고려할 때, 대부분의 NO<sub>x</sub>는 Thermal NO<sub>x</sub>로 파악된다.

Fig. 9, 10은 암모니아 공급에 의한 NO<sub>x</sub> 및 CO의 변화를 나타낸 그래프이다. 암모니아 공급위치와 분사연료량에 따른 효과를 나타내고 있다. 그림에서 Case 3-1, 3-2, 3-3의 암모니아 분사위치는 각각 축방향거리 0.3, 0.6, 0.9m이며, 분사지점의 연소로 반경방향 평균 온도는 908, 877, 820℃이다. 각 조건에서 암모니아 공급비 0 ~ 0.2로 다양하게 하여 실험을 수행하였다. 암모니아 분사의 경우, 상당한 NO<sub>x</sub> 저감율을 얻을 수 있었다. NO<sub>x</sub> 저감율은 암모니아의 분사량이 증가함에 따라 상승하였으며, 최대 75% 정도의 NO<sub>x</sub> 저감율을 보였다. 그러나 CO도 작용제 분사량에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 NH<sub>3</sub>가 CO의 산화를 억제하는 역할을 하기 때문이다.



CO와 NH<sub>3</sub>가 둘 다 OH 라디칼과 반응하지만, 현 온도범위에서 식 (6)의 NH<sub>3</sub> + OH 반응이 식 (8)의 CO + OH 반응보다 빠르기 때문에, 결과적으로 NH<sub>3</sub>가 CO 산화의 억제제 역할을 하게 되는 것이다.

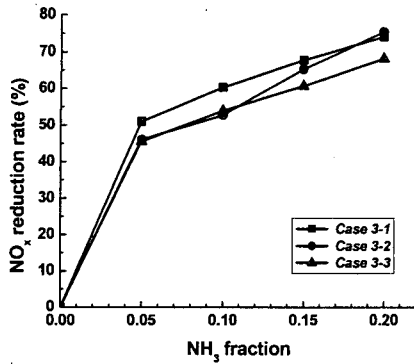


Fig. 9 Effect of NH<sub>3</sub> fraction on NO<sub>x</sub> (SNCR)

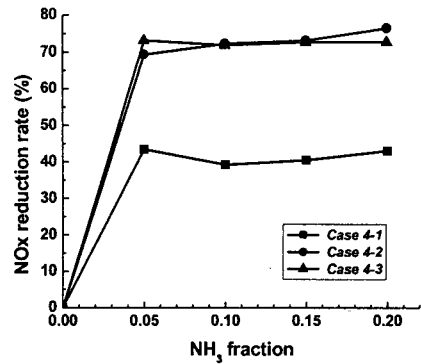


Fig. 11 Effect of NH<sub>3</sub> fraction on NO<sub>x</sub> (Hybrid)

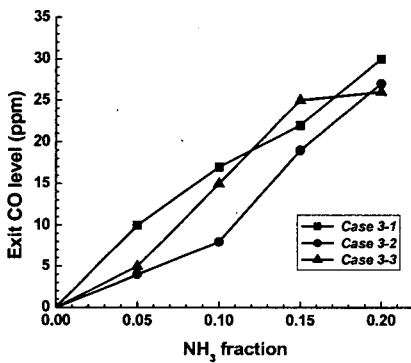


Fig. 10 Effect of NH<sub>3</sub> fraction on CO (SNCR)

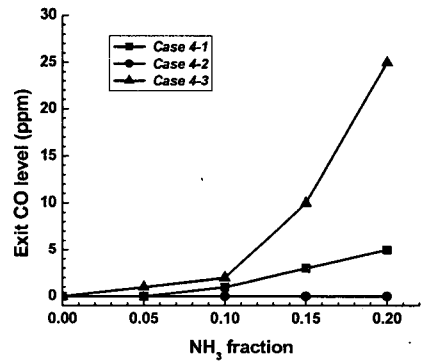


Fig. 12 Effect of NH<sub>3</sub> fraction on CO (Hybrid)

### 3.3 재연소와 SNCR 혼합적 방법에 의한 NO<sub>x</sub> / CO 변화 특성

Case 4는 재연소와 SNCR을 동시에 적용한 방법으로 연구가 수행되었다. 재연소 연료비는 0.2, 재연소 영역비는 0.33 으로 고정되었으며, 산소부화도는 0.35 이다. 암모니아 공급비 및 위치는 case 3의 경우와 마찬가지로 다양하게 하여 실험을 수행하였다. Case 4-1, 4-2, 4-3은 각각 암모니아 분사위치가 축방향거리 0.3, 0.6, 0.9m 지점이며, 재연소와 함께 사용되었으므로 순서대로 주연소 영역, 재연소 영역, 연소완료 영역에 암모니아를 분사한 형태가 된다.

Fig. 11, 12는 혼합형 방법을 적용하였을 때, NO<sub>x</sub> 및 CO의 변화를 나타낸 그래프이다. Case 3-1과 4-1을 비교하여 보면, 혼합형 방법이 SNCR 방법만 사용한 것에 비해 NO<sub>x</sub> 저감율이 낮음을 알 수 있다. 이는 재연소로 인해 암모니아 분사 지점의 온도 및 유동 특성이 달라졌기 때문이다.

재연소 연료의 공급으로 인하여 case 4-1의 분사 지점 평균온도는 1051℃로 상승하였으며 부분적으로는 최대 1254℃까지 관측되었다. 과도하게 높은 온도는 NH<sub>3</sub>의 NO 저감 반응 메커니즘을 비활성화 시킨다. 또한 앞서 언급했듯이 재연소 연료가 분사되면서 유동이 교란을 받게 되고, 재연소 연료 바로 아래에서 분사된 NH<sub>3</sub>도 일부가 화염으로 흘러들어가 오히려 NO로 산화된 것으로 보인다. 이러한 이유들로 주연소 영역에 SNCR 작용제를 분사한 형태의 혼합형 방법은 SNCR 방법에 비해 약간 낮은 NO<sub>x</sub> 저감율을 나타내었다.

혼합형 방법에서 각각 재연소 영역, 연소완료 영역에 SNCR 작용제를 분사한 Case 4-2와 Case 4-3에서는 최고 77% 정도의 상당한 NO<sub>x</sub> 저감이 관찰되었다. Fig. 11을 보면 Case 4-2, 4-3의 경우 SNCR 작용제의 양이 적을 때에도 70% 정도의 저감율을 나타내고 있다. 이는 혼합형 방법이 SNCR 작용제의 양을 적게 사용하면서 높은 NO<sub>x</sub>

저감이 가능한 유용한 저 NO<sub>x</sub> 방법임을 보여주는 결과이다. 또한 Case 4-2는 CO 배출 측면에 있어서도 매우 유리하다. Case 4-2는 암모니아가 재연소 영역에 분사되었고, 이 영역에서 산화되지 못한 CO는 후류의 연소완료 공기 분사지점을 지나면서 산화가 가능하다. 이에 반해 SNCR 방법만 단독으로 사용했을 경우에서는 이러한 CO 산화의 효과를 기대할 수 없다. Fig. 10과 12에서 이러한 차이를 확인할 수 있는데, Case 4-2의 경우 CO의 배출이 전혀 없다.

#### 4. 결 론

(1) 재연소 방법에서 재연소 연료량의 증가에 따라 NO<sub>x</sub> 저감율이 증가하며, 적절한 재연소 연료비는 0.18 ~ 0.2 정도이다. 또한 재연소 영역을 증가시키면 NO<sub>x</sub> 저감율도 상승한다.

(2) 산소부화연소에서 선택적 무촉매 환원법은 높은 NO<sub>x</sub> 저감을 얻을 수 있으나, 소량의 CO 배출을 동반한다.

(3) 재연소 방법에 SNCR 방법을 적용한 혼합형 방법에서는 재연소 영역에 SNCR 작용제를 분사한 경우에서, 70% 이상의 NO<sub>x</sub> 저감과 동시에 CO 배출은 없는 효율적인 결과를 나타내었으며, SNCR 작용제의 양이 적을 경우에도 높은 NO<sub>x</sub> 저감율이 관찰되었다.

#### 후 기

이 연구는 "미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발" 과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Prataps, J. and Bluestein, J., 1994, "Natural Gas

Reburn : Cost Effective NO<sub>x</sub> Control," *Power eng.*, Vol. 98, No. 5, pp. 47~50.

(2) Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T., Ohme, S., Haneda, H., Kawamura, T. and Kaneko, S., 1983, *Proc. of the 1982 Joint Symposium on Stationary NO<sub>x</sub> Control*, EPRI Report No. CS-3182, July.

(3) Folsom, B. A., Sommer, T. M., Ritz, H., Pratapas, J., Bautista, P. and Facchiano, T., 1995, "Three Gas Reburning Field Evaluations - Final Results and Long Term Performance," *EPRI/EPA 1995 Joint Symposium on Stationary Combustion NO<sub>x</sub> Control*, Kansas City, MO, May 19.

(4) Lyon, R. K., 1987, "Thermal DeNO<sub>x</sub>: Controlling Nitrogen Oxides Emissions by a Noncatalytic Process," *Environ. Sci. Tech.*, Vol. 21, No. 3, pp. 231~236.

(5) Miller, J. A., 1996, "Theory and Modeling in Combustion Chemistry," *Proc. Combust. Instit.*, Pittsburgh.

(6) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, ABACUS PRESS, London.

(7) Lee, C. Y., Choi, J. W. and Baek, S. W., 2004, "Effects of CO<sub>2</sub> on Heat Transfer from Oxygen-enriched Hydrogen Flame," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 937~994.

(8) Gardon, R., 1960, "A Transducer for the Measurement of Heat Flow Rate," *J. Heat Transfer*, Vol. 82, pp. 396~398.

(9) Baukal, C. E., 1998, *Oxygen-enhanced combustion*, CRC press, New York.

(10) Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J., 1993, "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Compliance," *Proc. of the Power - Gen Sixth International Conference*, Dallas, pp. 175~187.

(11) Jerald, A. C. and Xia, Z., 2004, "The Selective Non-Catalytic Removal of Nitric Oxides from Engine Exhaust Streams," *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 126, No. 2, pp. 234~240.