

# 재연소가 열전달 특성과 NO<sub>x</sub> 감소에 미치는 영향

이창엽\* · 백승욱\*\*\*

## Effects of Reburning on Heat Transfer Characteristics and NO<sub>x</sub> Reduction

Chang Yeop Lee\*, Seung Wook Baek\*\*\*

### ABSTRACT

An experimental study has been conducted to evaluate the effects of reburning on NO<sub>x</sub> reduction and also to examine heat transfer characteristics from 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 effects of reburn fuel fraction and injecting location of reburn fuel are studied. The paper reports data on flue gas emissions, temperature distribution in furnace and various heat fluxes at the wall for a wide range of experimental conditions. In a steady state, the total as well as radiative heat flux from the flame to the wall of furnace has been measured using a heat flux meter. Temperature distribution and emission formation in furnace have been also measured and compared.

**Key Words** : Reburning, Reburn fuel, Burnout air, NO<sub>x</sub>, LPG flame, Heat transfer

### 기 호 설 명

Φ : 당량비(Equivalence Ratio)

d : 선회기의 내부 직경.

d<sub>h</sub> : 선회기 허브의 직경.

S : 선회수 (Swirl Number)

θ : 선회기 vane의 각도

### 1. 서 론

화석 연료의 연소 시 발생하는 오염 물질을 최소화하기 위한 연구노력이 환경 규제 강화와 더불어 한층 가속화되고 있다. 연소가스 중 오염물질로 대표적인 것은 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소 등이 있다. 그 중 질소산화물은 광화학 스모그의

원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라, 산성비의 원인이 되며 식물에도 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 NO<sub>x</sub>를 감소시키는 방법으로 화염대의 온도를 낮추는 기술인 배기가스 재순환, 물 또는 스팀분사, 공기 및 연료의 다단 연소 등이 연구되어 왔다. 최근 선진국에서는 후 연소 영역에서 NO<sub>x</sub>를 제거하는 재연소방법이 시도되고 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)

\* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학전공

† 연락처자. swbaek@kaist.ac.kr

을 이룬다[1]. 일차연소 영역에는 약간 과잉공기를 공급한다. 일차연소 영역의 후류에 존재하는 연료 과농의 재연소 영역에서는 총 연료의 10~30%정도를 주입하게 된다[2]. 일차연소 영역에서 발생한 NO는 재연소 연료와 반응하여 HCN을 생성하게 되고 이는 다시 N<sub>2</sub>로 환원되어 NO를 저감시키게 된다. 그리고 연소완료 영역으로 공기를 공급시켜 재연소 영역으로부터 배출된 미연 연료가 완전 연소되도록 한다. 이러한 3단계 연소과정을 거쳐 NO<sub>x</sub>를 저감 시키게 된다.

재연소 방법은 1980년대 일본에서 처음 적용하여 NO감소에 성공하면서 많은 연구자들로부터 연구의 대상으로 대두되었다[3].

그 후, 1990년대 초, Folsom et al.은 실험실 규모의 실험에서 가스연료 재연소를 통해 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>를 각각 60%, 20% 저감시켰으며,[4] Folsom et al.은 1995년에도 재연소 실험을 수행하였고 여러 종류의 보일러에서 55~65%의 NO<sub>x</sub> 감소를 발표하였다[5].

EER(Energy and Environmental Research Corporation)에서는 NO<sub>x</sub> 저감을 위해 가스 재연소 시스템이 포함된 저 NO<sub>x</sub> 버너를 설계, 적용하여 성공적인 결과를 보이고 있다[6].

현재 미국에서는 산업용 석탄 보일러에 재연소 기술을 적용시키는 시도가 계속되고 있으며, 일본과 유럽에서는 고체연료 뿐만 아니라 액체, 기체연료를 사용하는 산업용 보일러나 소각로에 적용하는 연구가 계속되고 있다.

NO를 환원시키는 재연소 영역의 반응식은 매우 복잡하고 현재까지 완전히 규명되지 않고 있다. 하지만, 재연소를 최적화하기 위해서는 재연소 영역에서 탄화수소기를 NO에 최대한 노출시키고, 산소와의 반응을 최소화시키는 것이 필요하다고 알려져 있다[7]. 본 연구는 재연소 기술의 적용 시 최대의 효율성을 얻기 위한 조건을 파악함과 동시에, 열전달 및 온도분포를 기초로 하여 재연소 메카니즘의 실험적인 분석을 하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

실험을 위하여 실험실 규모의 연소로와 연소기를 제작하였다. 실험 장치는 크게 연소로와 연소기로 구성되어 있다. 연소기는 연소로 하단에 고정되어 연소로 내에서 화염이 상부 방향으로 형성되도록 구성되어 있다. 연료인 LPG와 산화제인 공기는 질량유량계를 사용하여 공급하였다. 열전대와 열유속계로부터 나오는 신호는 A/D converter board를 이용하여 획득하였다. Fig. 1에 실험장비의 개략적인 구성을 표시하였다.

### 2.1.1 연소로

연소로는 높이 120cm, 지름 50cm의 원통형 구조로 이루어져 있다. 연소로 외부와 배기구에는 벽면 온도 측정을 위한 지름 3mm의 13개 측정구가 있고 이곳에 K-type 열전대를 삽입, 고정한다. 내부 온도 분포와 벽면으로의 열전달량을 측정하기 위한 지름 10~40mm 측정구를 상부로부터 100mm간격으로 11개를 제작하였고 이는 R-type 열전대와 열유속계를 이용하여 데이터를 확보하는데 사용된다.

측정구 반대편에는 연소장 내 화염의 상태나 측정용 프로브 등의 상태를 파악할 수 있도록 5개의 관측창을 설치하였다.

또한 연소로에는 재연소 실험에 맞추어 옆면에서 재연소 연료와 연소완료 공기를 다양한 위치에서 노즐을 통하여 공급할 수 있도록 하였다. 7개의 위치에서 공급가능하며, 각 위치에서는 연소장 내 균일한 공급을 위하여 연소로를 둘러싸는 6개의 공급구를 같은 간격으로 배치하였다.

연소로 내부에는 단열재인 세라코울을 40mm의 두께로 벽면에 설치하여 연소로 내부로부터 외부로의 열전달을 최소화 하였다. Fig. 2에 연소로의 모양을 도시하였다.

### 2.1.2 연소기

연소기는 LPG와 산화제의 확산화염에 맞추어 제작하였다. Fig. 3에서 연소기의 형상을 표현하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 연소기는 연료 공급관과 산화제 공급관의 형태로 이루어진다.

연료 공급관은 연소기의 중심축에 위치하며 내경 4mm의 원관 형태로 이루어져 있다. 이를 둘러싸고 있는 산화제 공급관은 내경 24mm로 압축기로부터 공기가 공급된다.

연소기 틱에는 화염 안정화를 위해 선회기(swirler)를 설치하였다. 확산화염(diffusion flame)에서는 연료와 공기의 혼합과정이 연소과정을 좌우하는 인자가 되므로 공기-연료의 혼합특성을 향상시키는 방법으로, 본 연구에서는 공기에 선회(swirl)를 주어 혼합을 향상시켜 화염을 안정화 시켰다. 선회기의 형태는 vane angle이 45°인 radial flow guide vane swirler를 제작하여 사용하였으며, 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같다[8].

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

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

연소기의 점화를 위하여 연소로 하부에 점화용 버너를 설치하여 연소로를 개폐하지 않고도 점화가 가능케 하였으며 점화 후에는 점화용 버너를

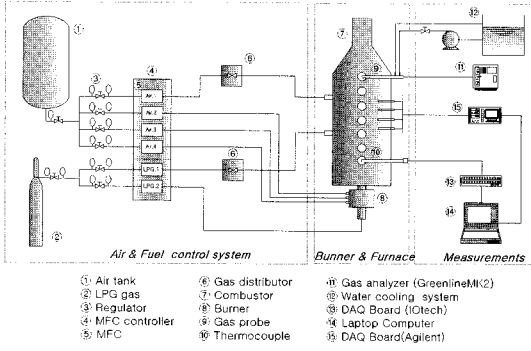
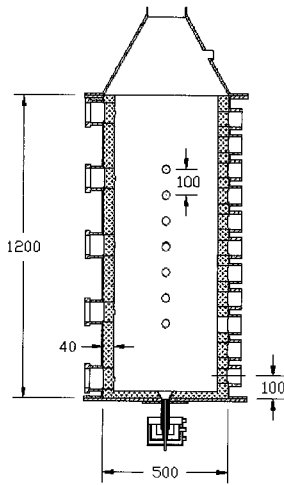
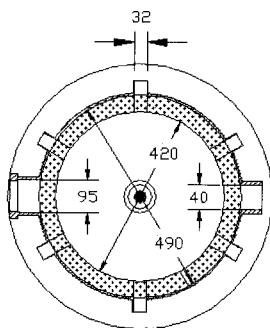


Fig. 1 Experimental setup



(a) Axial detail drawing of furnace



(b) Radial detail drawing of furnace

Fig. 2 Furnace

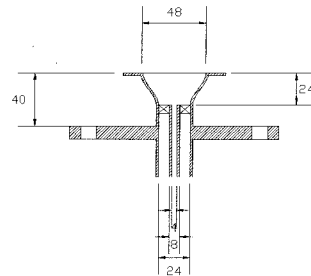
소기하여 이에 의한 영향이 없도록 하였다. 연소기 끝단은 공기 역학적인 조건에 의해 형성되는 반응영역을 고정하기 위해 Divergence Quarl 형상을 적용하였다.

### 2.1.3 노즐

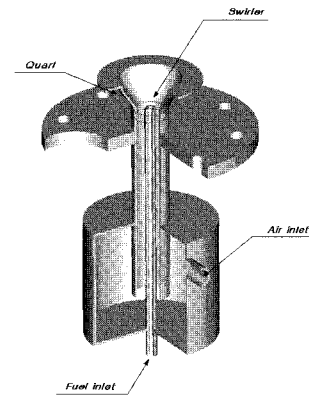
재연소 연료와 연소완료 공기의 공급을 위해 연소로 옆면에 연소장 내부로 향하는 노즐을 설치하였다. 노즐의 분사형태는 flat형이고 분사각은 95도이며, 연소장 내 고온에 견딜 수 있는 내열성 스테인레스 스틸로 제작되었다.

재연소 연료와 연소완료 공기는 연소기로부터 일정한 거리의 한 위치에서 연소로 주위를 환형으로 배치되어 있는 6개의 노즐에서 동시에 분사된다.

Figure 4에 노즐의 모습을 나타내었다.



(a) Detail drawing of burner



(b) Inside drawing of burner

Fig. 3 Burner

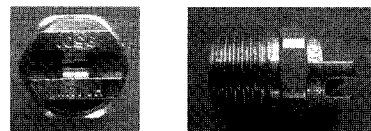


Fig. 4 Upside and side view of nozzle

### 2.2 측정장비

연소로 내부의 온도측정을 위하여 R-type 열전대를 사용하였다. 이를 이용하여 연소로 내부

의 온도를 상부로부터 하부까지 10cm 간격으로 반경 방향으로는 2cm 간격으로 측정하였다.

연소로 벽면으로의 열전달량 측정을 위해 Vatel사의 열유속 측정센서를 사용하였으며, 제조사로부터 센서의 보정표를 받아 이를 이용하였다.

가스분석기는 Eurotron사의 이동형 가스분석기를 사용하였다.

### 2.2.1 열전대

열전대는 지름 0.1~0.5mm 굵기의 세선으로 만들어졌으며, 고온에서의 변형이나 산화의 영향이 적도록 열처리 되어졌다.

온도측정은 각기 다른 크기의 정점(bead)을 가진 여러개의 열전대를 사용하여 측정하고자 하는 각 지점에서의 온도를 측정한 후 측정된 온도 정보들을 가지고 선형으로 외삽하여 정점의 크기가 0일 때의 온도를 그 측정점에서의 온도로 정의하는 방법으로 Fig. 5와 같이 보정하였다[9].

### 2.2.2 열유속계

열유속계는 입사되는 열유속에 비례하여 전압을 발생시키는 Gardon type의 열유속계를 사용하였다. 벽면으로의 총열전달과 복사열전달량을 측정할 수 있도록 두 가지 종류의 센서를 사용하였다.

센서의 안정적인 사용을 위해서 냉각수를 공급하였으며, 센서의 전압 출력을 열유속으로 전환하는 과정에서 공급업체에서 제시한 보정표를 이용하여 측정된 열유속을 보정하였다. Fig. 6에 열유속계의 구조를 나타내었다.

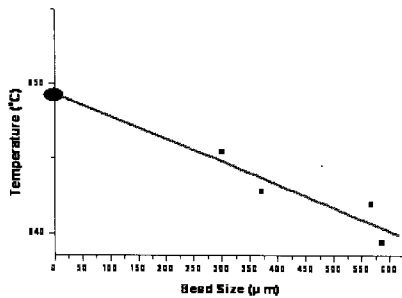


Fig. 5 Prediction of temperature

### 2.2.3 가스분석기

가스분석기는 이동형 가스 분석기로 NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>의 공해물질을 측정할 수 있다. 수냉식 포집관을 사용하여 가스 시료를 채취하며, 내부적으로 수분(H<sub>2</sub>O)을 제거하고 측정한다. 산소농

도도 측정가능하며, 물질의 양은 ppm 단위 또는 %로 측정된다.

가스분석기는 자체적으로 보정기능이 있으며, 정밀도는 ±5%이다. 또한 NO<sub>x</sub> 센서의 경우 열에 매우 민감하게 반응하므로 이에 대한 보호를 위해 수냉식의 포집관을 써야 했다. 측정결과를 기계에 탑재된 프린터를 통해 출력 가능하다.

Fig. 7은 가스분석기의 작동원리를 그림으로 나타낸 것이다.

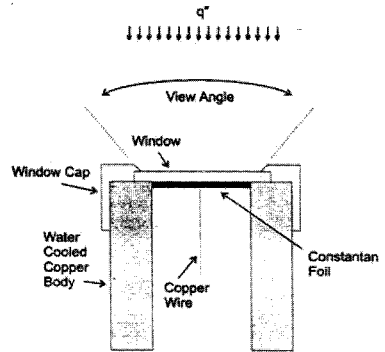


Fig. 6 Schematic diagram of radiative heat flux meter

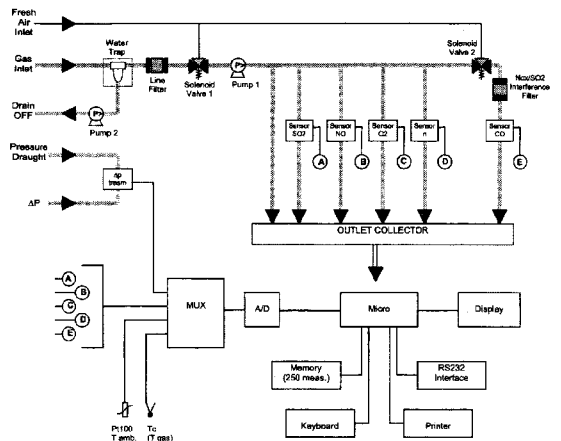


Fig. 7 Operation principle of gas analyzer

### 2.3 실험과정

점화기를 이용하여 연소로 내의 연소기 튜에 점화를 한 후 연소로가 정상상태에 도달할 때까지 연소로 벽면에서의 온도를 측정한다. 연소로 벽면에는 K-type의 열전대를 삽입하여 신호의

변화를 통해 정상상태를 확인한 후 열유속과 온도 및 가스성분을 측정하고 분석하였다.

## 2.4 실험조건

실험조건은 연소기에서의 발열량을 15KW로 고정시키고, 재연소를 하지 않는 경우를 참조기준으로 하였다. 그 후 재연소 연료와 연소완료 공기의 공급위치를 고정시킨 후 재연소 연료의 공급량을 변화시켜 가면서 6가지 조건에 대해 실험을 수행하였으며, 이때 재연소 연료 공급량 증가 비율에 맞추어 연소완료 공기의 공급량도 증가시켰다. 또 다른 실험 수행 조건은, 재연소 연료의 공급량과 위치를 일정하게 하고 연소완료 공기의 공급위치를 변화시킨 5가지 조건이다. 모든 실험에서 전체 당량비는  $\Phi=0.94$ 로 일정하게 유지하였고, 배기구에서  $O_2$  농도는 2~3%로 유지되었다. 주연료와 재연소 연료로 LPG가 사용되었다.

Table 1에서 모든 실험 조건을 나타내었다. 재연소 연료의 공급비율은 주연소기에서 공급된 연료량(발열량 15KW)에 대한 비율이며, 재연소 연료와 연소완료 공기의 공급위치는 화염이 생성되는 연소기 팁과의 거리이다.

Table 1 Experimental conditions

CASE	재연소 연료 공급비율(%)	재연소 연료 공급위치(cm)	연소완료공기 공급위치(cm)
Case 1	0	-	-
Case 2	5	40	70
Case 3	10	40	70
Case 4	15	40	70
Case 5	20	40	70
Case 6	25	40	70
Case 7	30	40	70
Case 8	20	40	50
Case 9	20	40	60
Case 10	20	40	70
Case 11	20	40	80
Case 12	20	40	90

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 재연소에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 특성

Figure 8은 재연소 영역에 공급되는 재연소 연

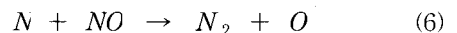
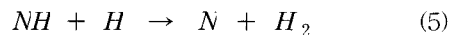
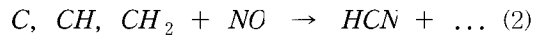
료의 양을 조절하여 공급함으로써 재연소 연료 공급비율에 따른 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 나타낸 것이다.(Case 1~Case 7)

현 실험에서는 일차연소 영역에서는 당량비  $\Phi=0.94$ 의 연료 희박 조건을 유지시키고, 재연소 영역 길이를 0.3m로 고정하여 재연소 영역에서의 재연소 연료 존재 시간을 일정하게 유지하면서, 재연소 영역에서는 연료 농후 환경을 조성하여 NO<sub>x</sub> 저감 효과가 발생토록 하였다. 재연소 연료는 연소기 팁으로부터 40cm 떨어진 위치로, 화염이 끝나는 지점에서 공급된다.

그래프에서 볼 수 있듯이 재연소 연료 공급비율이 0~20% 정도에서는 공급량에 비례하여 NO<sub>x</sub>의 저감율이 증가한다. 그러나 그 이후부터는 공급량 증가에 따른 NO<sub>x</sub>의 저감율 증가가 둔해지면서 25% 이상에서는 더 이상 저감율이 증가하지 않고 일정함을 알 수 있다. 결국 최적의 재연소 연료의 양은 주연료의 20~30%사이의 범위에 존재하게 된다.

또한 현 실험은 재연소 연료로 coal, natural gas, biomass fuel 등이 연구되어 그 효과가 입증되어 가고 있으나, 아직 연구되어진 바 없는 LPG의 재연소 연료로의 사용 가능성을 확인하는 것이다.

이러한 재연소 영역에서의 NO 저감은 아래의 주요한 반응 메커니즘에 의해 진행되었다고 볼 수 있다[10-12].



재연소 연료로 분사된 LPG가 열분해하는 과정에서 발생한 CH<sub>3</sub>계열의 라디칼들이 NO와 반응하여 HCN을 형성하고, HCN은 식(3)~(6)의 과정을 거쳐 N<sub>2</sub>로 환원되는 일련의 과정이다. 식(4)를 보면 중간생성물로 CO가 생성되기도 하므로 이에 대한 확인이 필요하다. 본 연구에서는 모든 실험 조건의 배기구에서 측정된 CO는 5ppm이하로 측정되었으며, 이는 생성된 CO가 연소완료영역에서 산소와 반응한 것으로 보인다. 또한 산소가 충분한 연료 희박 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.

Figure 9에서 보이는 그래프의 특성도 위에서 설명한 반응 메카니즘과의 관계로 해석 가능하다.(Case 8~Case 12) Fig. 9는 초기 NO<sub>x</sub> 발생량과 재연소 연료 공급비율을 고정된 상태에서 재연소 영역의 길이를 변화시키며 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 파악한 실험 결과이다. 재연소 연료의 공급비율은 20%로 고정하였다.

그래프를 보면 재연소 연료가 공급된 지점으로부터 연소완료 공기가 공급되는 지점 사이의 재연소 반응이 일어나는 영역인 재연소 영역의 길이가 0.1m 일 때 18% 정도의 NO<sub>x</sub> 저감율을 보이고 있으며, 재연소 영역의 길이가 커짐에 따라 NO<sub>x</sub> 저감 율도 비례하여 증가하고, 재연소 영역의 길이가 0.5m 일 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>4</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 재연소에 의한 온도분포 및 열전달 특성

연소장 내부의 온도를 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 0cm가 화염이 시작되는 지점이며, 모든 경우에서 40cm 지점이 화염의 끝단으로 재연소 연료가 공급되는 곳이다.

Figure 10 (a)에서는 연소로 중심축을 따라 Case 1, 3, 5, 7의 네 가지 조건에서 측정된 온도이다. 재연소 연료의 공급량이 증가함에 따라 연소로 내 대부분 영역에서 온도가 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 재연소 연료로 LPG를 추가적으로 공급하였고, 공급된 연료는 NO가 N<sub>2</sub>로 환원되는 반응뿐 아니라 연소반응에도 참여하였기 때문이다. 그러나 화염 시작점으로부터 70cm 떨어진 부분에서 온도의 역전이 일어나는데, 이곳은 연소완료 공기가 공급되는 부분이다. 연소로 열면에서 분사되는 연소완료 공기는 재연소 연료의 공급량과 비례하여 공급되며 그 양이 많을수록 유속이 빠르고 연소로 중심축까지 반응하지 않은 상태로 도달하는 양이 증가하기 때문이다.

Figure 10 (b)는 연소로 중심축에서 9cm 떨어진 곳에서 측방향을 따라 측정된 온도 분포를 나타낸 것이다. 그래프를 보면 버너 팁으로부터 40cm 지점에서 Case 1과 Case 7의 온도차는 143℃ 인데 반해, 90cm 지점에서의 두 조건의 온도차는 63℃이다. 즉, 재연소 연료가 공급된 40cm 근처 부분과 화염 영역인 그 아래부분에서 70cm 이상의 후류 영역에 비해 온도차가 크게

나타난다.

이는 연소로 내 화염영역 유동에 재순환 영역이 있음을 나타내는 것이다. 연소로의 선회기와 켈에 의한 유동특성이 반영된 것으로, 공급된 재연소 연료의 일부가 재순환 되는 유동흐름과 함께 일차연소 영역으로 진입하여 화염부의 온도 상승을 야기한다. 이에 반해 이러한 효과가 적은 70cm 이상의 후류영역은 온도차가 적은 것이다.

재연소 연료의 공급량 증가에 따라 Fig. 10 (a)에 비해 온도차가 크게 나타나는 것은 재연소 연료와 연소완료 공기가 연소로 벽면에서 공급됨에 따라 중심축에 도달하기 전, 즉 중심축으로부터 9cm 떨어진 지점에서 대부분의 활발한 화학적 반응이 일어나기 때문이다.

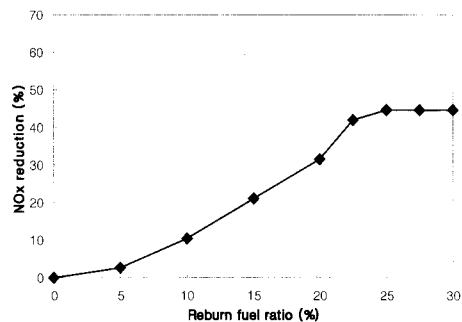


Fig. 8 Effect of reburn fuel ratio on NO<sub>x</sub> emission

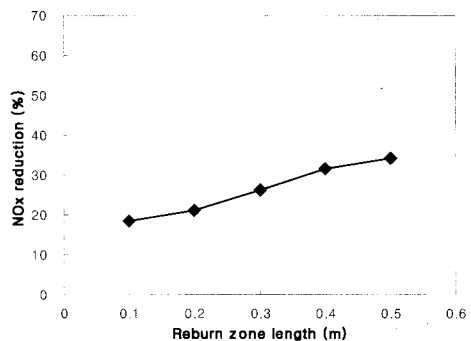
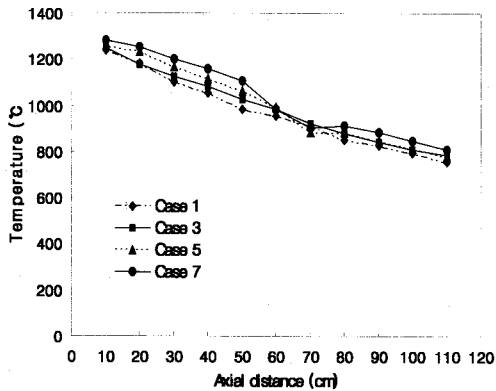
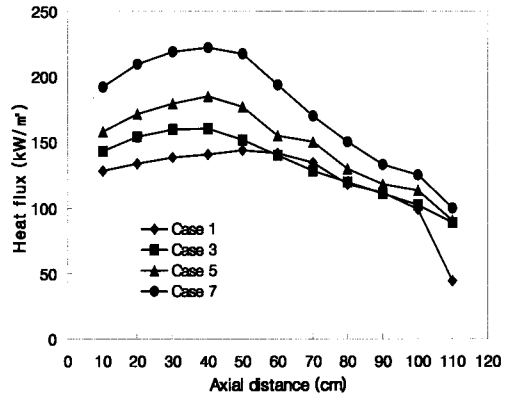


Fig. 9 Effect of reburn zone length on NO<sub>x</sub> emission

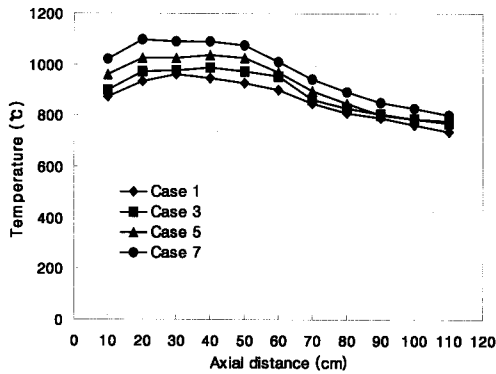
이러한 현상은 벽면으로의 열전달을 나타낸 Fig. 11에서도 파악된다. Fig. 11 (a)는 재연소 연료의 공급량 증가에 따른 총열전달량의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 11 (b)는 같은 조건에서 복사열전달량의 변화를 나타낸 것이다. 재연소 연료의 공급량이 증가함에 따라 화염영역과 재연소 연료 공급 지점 부근의 총열전달량 증가가 뚜렷



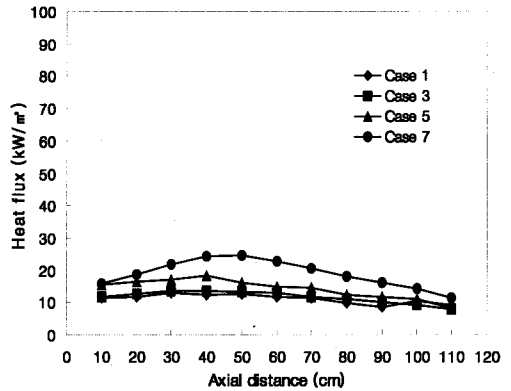
(a) Axial temperature distribution (At the centerline)



(a) Total heat flux



(b) Axial temperature distribution (Radial distance from the centerline : 9cm)



(b) Radiative heat flux

Fig. 10 Axial temperature distribution

Fig. 11 Incident heat fluxes

하다. 복사열전달의 경우도 뚜렷하진 않으나 화염의 전단부인 10~20cm 부분을 제외하고 대체적으로 비슷한 경향을 따름이 파악된다.

본 실험에서는 총열전달 중에서 복사열전달이 차지하는 비율은 10% 내외로 적게 나타나고 있다. 그러나 가장 온도가 낮은 Case 1에서는 총열전달량중 9.08% 차지하는 복사열전달량이 재연소 연료 공급량 증가에 따라 조금씩 증가하여, Case 7에서 10.74% 를 차지하고 있다. 이는 고온일수록 전체열전달 중 그 비율이 커지는 복사열전달의 특성이 반영된 것이다.

#### 4. 결론

1) LPG를 재연소 연료로 사용한 실험에서 재연소 연료 공급량만을 조절한 경우에서 50% 정도

의 NO<sub>x</sub> 저감이 관찰되었다. 이는 여타 제반 요소들의 조건을 최적화 하면 더욱 높은 저감이 기대되는 결과이며, LPG가 재연소 연료로 사용 가능함을 입증하는 결과이다.

2) 재연소 연료 공급량을 증가시킴에 따라 NO<sub>x</sub> 저감율도 증가하나 주연료량의 30%이상에서는 반응의 한계로 인해 재연소로 인한 NO<sub>x</sub> 저감 효율이 더 이상 증가하지 않는다.

3) 재연소 영역 길이의 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 저감율 상승은 재연소 연료 존재 시간과 관계된 것으로, 재연소 연료로 인한 NO<sub>x</sub> 환원 반응이 일어날 수 있는 영역 및 시간이 확대된 효과이다.

4) 재연소 연료량의 증가는 열에너지 추가 공급의 효과도 나타내며, 연소로 옆면에서 분사되는 유동특성으로 인하여 연소로 중심축 보다는 벽면과 중심축의 중간 지점에서의 온도 상승이 뚜렷하다.

5) 화염이 존재하는 상류부분이 하류부분에 비해 재연료 공급량 증가에 따른 온도 상승 및 열전달 상승 효과가 크며 이는 연소로 내 유동의 재순환 특성을 보여주는 것이다.

## 후 기

이 연구는 에너지 관리공단의 2004년도 에너지기술 학술진흥사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- [1] Prataps, J. and Bluestein, J., "Natural Gas Reburn : Cost Effective NO<sub>x</sub> Control," *Power eng.*, Vol. 98, 1994, pp. 47-50.
- [2] Chagger, H. K., Goddard, P. R., Murdoch, P. and Williams, A., "Effect of SO<sub>2</sub> on the Reduction of NO<sub>x</sub> by Reburning with Methane," *Fuel*, Vol. 70, 1991, pp. 1137-1142.
- [3] Y. Takahashi, M. Sakai, T. Kunimoto, S. Ohme, H. Haneda, T. Kawamura and S. Kaneko, *Proceedings of the 1982 Joint Symposium on Stationary NO<sub>x</sub> Control*, EPRI Report No. CS-3182, 1983.
- [4] Folsom, B. A., Sommer, T. M. and Payne, R., "Demonstration of combined NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> Emission Control Technologies Involving Gas Reburning," *AFRE/JERC International Conference on Environmental Control of Combustion Processes*, Honolulu, October 7-10, 1991.
- [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 NO<sub>x</sub> Control*, Kansas City, May 19, 1995.
- [6] Beshai, R. Z., Light, M. E., Sanyal, A., Folsom, B. A. and Payne, R., "First and Second-Generation Gas Reburning Technology for NO<sub>x</sub> Control," *ASME Paper 94 -JPGC - FACT - 3*, New York, 1994, pp. 1-10.
- [7] Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J., "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Compliance," *Proceedings of the Power - Gen Sixth International Conference*, Dallas, 1993, pp. 175-187.
- [8] Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., *Swirl Flows*, ABACUS PRESS, 1984.
- [9] Ahn, K. Y., "A Study on the Ignition and Combustion of Coal-Water Slurry Droplet," *Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Korea, 1994.
- [10] Baulch, D. C., Cobos, C. J., Cox, R. A., Esser, C., Frank, P., Just, Th., Kerr, J., Troe, J., Walker, R. W. and Warnatz, J., "Evaluated kinetic data for combustion modeling," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 21, 1992, pp. 411-737.
- [11] Li, B. W., Wu, K. T., Moyeda, D. K. and Payne, R., "Use of Computer Models for Reburning/Cofiring Boiler Performance Evaluation : Combustion Modeling, Cofiring and NO<sub>x</sub> control," *ASME Fact*, Vol. 17, 1993, pp. 87-94.
- [12] Burch, T. E., Tillman, F. R., Chen, W. Y., Lester, T. W., Conway, R. B. and Sterling, A. M., "Partitioning of Nitrogenous Species in the Fuel Rich Stage of Reburning," *Energy and Fuels*, Vol. 5, 1991, pp. 231-237.