

연료 희박 재연소 과정에 의한 NO_x 저감 및 CO 발생에 대한 실험적 연구

이창엽[†] · 김학영^{*} · 백승욱^{**} · 김세원^{***}
(2007년 9월 28일 접수, 2007년 11월 29일 심사완료)

Experimental Study on NO_x Reduction and CO Emission by Fuel Lean Reburning Process

Chang Yeop Lee, Hak Young Kim, Seung Wook Baek and Se Won Kim

Key Words: Reburning(재연소), Fuel Lean Reburn(연료희박재연소), LPG Flame(LPG 화염), NO_x (질소산화물), CO(일산화탄소)

Abstract

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 effect of fuel lean reburning on NO_x/CO reduction in 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 the reburn fuel as well as the main fuel. The effects of reburn fuel fraction and injection location of the reburn fuel were studied when the fuel lean reburning system was applied. The paper reports data on flue gas emissions and temperature distribution in the furnace for a wide range of experimental conditions. At steady state, temperature distribution and emission formation in the furnace have been measured and compared. This paper makes clear that in order to decrease both NO_x and CO concentrations in the exhaust when the fuel lean reburning system was adapted, it is important that the control of some factors such as initial equivalence ratio, reburn fuel fraction and temperature of reburn fuel injection region. Also it shows the fuel lean reburning is also effective method to reduce NO_x as much as reburning.

기호설명

- Φ : 당량비(Equivalence Ratio)
- d : 선회기의 내부 직경
- d_h : 선회기 허브의 직경
- S : 선회수(Swirl Number)
- θ : 선회기 vane의 각도

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_x), 이산화탄소(CO₂) 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_x를 감소시키는 다양한 방법을 연구하였다.

[†] 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공
E-mail : futurist@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-5754 FAX : (042)869-3710

^{*} 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

^{**} 한국과학기술원 항공우주공학전공

^{***} 한국생산기술연구원 생산시스템본부 산업설비팀

이로 인해 현재 시도되고 있는 저 NO_x 방법으로는 배기가스 재순환, 물 또는 스팀분사, 공기 및 연료의 다단 연소, 선택적 비촉매 환원반응(SNCR, selective non-catalytic reduction), 선택적 촉매 환원반응(SCR, selective catalytic reduction) 등이 있다. 최근 선진국에서는 후연소 영역에서 NO_x를 제거하는 재연소 방법이 시도되고 있으며, NO_x 저감률이나 경제성에 있어서 효율성이 높다고 알려져 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.⁽¹⁾

일차연소 영역에는 일반적인 약간의 과잉공기를 공급하고 화염을 형성한다. 일차연소 영역의 후류에 재연소 영역이 존재하는데, 이곳에는 재연소 연료(Reburn fuel)라고 하는 총 연료의 10~30% 정도의 연료를 주입한다. 이로 인해 재연소 영역은 연료 과농의 상태가 되고, 일차연소 영역에서 발생한 NO는 재연소 연료와 반응하여 HCN을 생성하게 된다. 이는 다시 N₂로 환원되어 NO를 저감시키게 된다. 그리고 재연소 영역 후류의 연소완료 영역으로는 공기(Burnout air)를 공급시켜 재연소 영역으로부터 배출된 미연연료가 완전연소되도록 한다. 재연소 방법은 이러한 3단계 반응과정을 거쳐 NO_x를 저감한다.

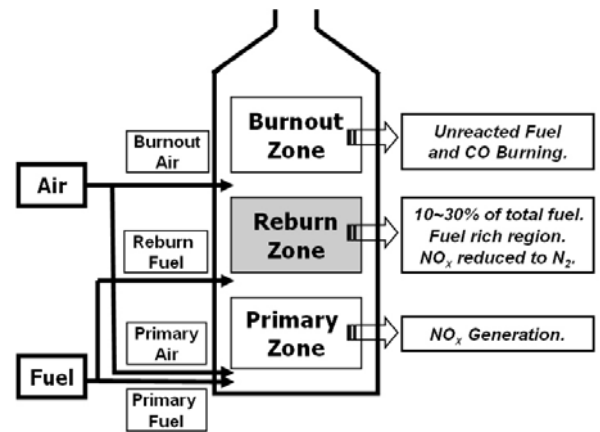
재연소 방법은 1980년대 일본에서 처음 산업로에 시험 적용하여 NO감소에 성공하면서 많은 연구자들로부터 연구의 대상으로 대두되었다.⁽²⁾ 그 후, 1990년대 Folsom 등은 재연소를 통한 50~65%의 NO_x 감소를 발표하였다.⁽³⁾ 현재 재연소 방법은 미국, 유럽, 일본에서 다양한 방향으로 연구되고 있다.

이에 비해 연료 희박 재연소(Fuel lean reburning)는 재연소의 응용 분야로, 재연소 연료를 최대한 적게 분사하고 연소완료 영역의 공기 공급을 생략하여, 보다 간략한 구조와 높은 경제성을 추구하는 실용적인 방법이다.

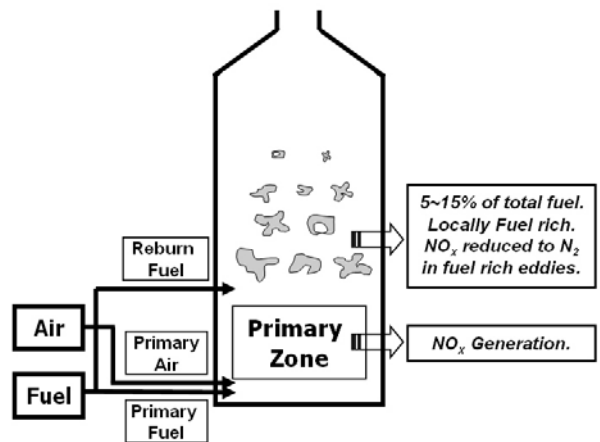
일반 재연소 방법이 재연소 영역이라는 연료 농후 지역에서 NO_x를 저감하는데 비해, 연료 희박 재연소 방법은 전체적으로는 연료 희박 상태를 유지하면서 국부적인 연료 농후 영역에서 NO_x를 저감한다. 또한 재연소 연료의 양도 전체

연료량의 5~15% 정도로 설정한다. 그러나 이로 인해 일반 재연소에 비해 낮은 NO_x 저감률을 나타내며, CO가 발생하는 문제점이 지적되고 있다. Fig. 1에서 두 방법의 차이점을 그림으로 설명하고 있다.

NO를 환원시키는 재연소방법 및 그 응용분야와 관련하여, 이들 기술을 최적화하여 적용하기 위한 연구가 현재 다양하게 진행되고 있다. 본 연구는 연료 희박 재연소 방법의 적용 시 온도분포를 기초로 하여 재연소 메카니즘에 의한 NO_x 및 CO의 저감 효율을 파악하고, 최대의 효율성을 얻기 위한 조건을 실험적으로 분석하여, 최적 조건을 검토하였다.



(a) Reburning system



(b) Fuel lean reburning system

Fig. 1 Schematic diagram of reburning and fuel lean reburning systems

2. 실험

2.1 실험장치

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

Fig. 2에 실험장치의 개략적인 전체 구성을 표시하였다.

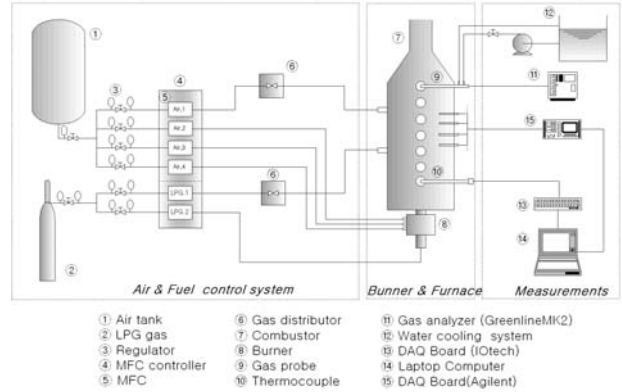


Fig. 2 Experimental setup

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 확보할 수 있도록 하였다.

또한 연소로에는 재연소 실험에 맞추어 옆면에서 재연소 연료와 연소완료 공기를 다양한 위치에서 공급할 수 있는 공급구들을 배치하였다. 연소로 내부에는 단열재인 세라크울을 설치하여 외부로의 열전달을 최소화 하였다. Fig. 3에 연소로의 모양을 도시하였다.

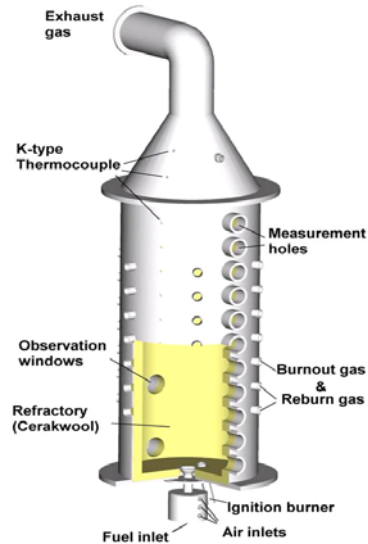


Fig. 3 Furnace

2.1.2 연소기

연소기는 LPG와 산화제의 확산화염에 맞추어 제작하였다. Fig. 4에서 연소기의 형상을 표현하였다.

연소기 팁에는 화염 안정화를 위해 선회각 (vane angle, θ)이 45°인 radial flow guide vane swirler를 제작하여 설치하였다. 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같으며,⁽⁴⁾ 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_h 는 선회기 허브의 직경, θ 는 선회기 vane의 각도이다.

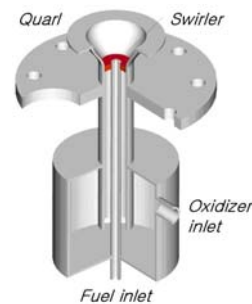


Fig. 4 Burner

2.1.3 노즐

재연소 연료와 연소완료 공기의 공급을 위해



Fig. 5 Upside and side view of nozzle

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 스테인리스 스틸로 제작되었다.

Fig. 5에 노즐의 모습을 나타내었다.

2.2 측정장비

2.2.1 가스분석기

가스분석기는 이동형 가스 분석기로 NO, NO₂, CO, SO₂의 공해물질 및 산소 농도를 측정할 수 있다. 수냉식 포집관을 사용하여 가스 시료를 채취하며, 내부에서 수분(H₂O)을 제거하고 측정한다. 자체적으로 보정기능이 있으며, 정밀도는 ±5%이다.

2.2.2 열전대

열전대는 지름 0.1~0.8mm 굵기의 세선으로 만들어졌으며, K-type과 R-type의 두 가지 열전대가 사용되었다. 또한, 고온에서의 변형이나 산화의 영향이 적도록 열처리 되어졌다.

온도측정은 각기 다른 크기의 정점(bead)를 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.⁽⁵⁾

2.3 실험조건

본 연구에서는 4가지 실험 조건을 고려하였다. 기준이 되는 재연소 실험조건이 1가지이며(Case 1), 연료 회박 재연소 방법의 특성을 파악하기 위한 실험조건이 3가지이다.(Case 3,4,5) 전체 실험에서 주연소기에 공급되는 연료량은 15kW로 항상 일정하게 하였으며, 주연료 및 재연소 연료는 LPG를 기화하여 사용하였다.

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 1에서는 재연소 영역비를 0.25로 고정하였는데, 재연소 영역비(Reburn zone fraction)는 무차원 변수로, 연소기 팁으로부터 0.4m 거리의 재연소 연료 분사 지점과 연소기 팁으로부터 0.7m 거리의 연소완료 공기 분사 지점 사이의 길이를 전체 반응영역(1.2m)길이를 나눈 값이다. 또한, 여기서 산소농도(O₂ concentration)는 재연소를 적용하지 않은 초기 상태의 출구에서의 배기가스 산소농도를 의미한다.

Case 2는 연료 회박 재연소 방법을 적용하고, case 1과 같은 방법으로 재연소 연료비를 변화시켜가며 그 특성을 관찰한 실험조건이다.

Case 3에서는 제반 조건들이 일정한 상태에서 공연비를 변화시켜 배기가스의 산소 농도를 다르게 하여 실험한 조건이다. 연료 회박 재연소에서는 전체적 또는 국부적인 공연비 상태가 NOx 저감 반응이나 CO 발생에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 검토가 필요하다.

마지막으로 Case 4에서는 연료 회박 재연소 방법을 구현함에 있어서, 제반 조건들을 고정시킨 상태에서 재연소 연료의 분사 위치를 바꾸면서 실험을 수행하였으며, 이에 의한 NOx와 CO의 변화를 확인하였다.

아래 Table 1에 전체 실험조건을 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Case		1	2	3	4
Thermal input (kW)	Primary fuel	15.00	15.00	15.00	15.00
	Reburn fuel	0 ~ 4.50	0 ~ 2.25	1.50	1.50
Reburn fuel fraction		0 ~ 0.23	0 ~ 0.13	0.09	0.09
Reburn zone fraction		0.25	-	-	-
Exit O ₂ concentration (%)		3.2	3.4	2.7 ~ 5.5	3.4
NOx reduction method		Reburn	Fuel lean reburn	Fuel lean reburn	Fuel lean reburn
Variation		Reburn fuel fraction	Reburn fuel fraction	Exit O ₂ concentration	Reburn fuel injection point

3. 결과 및 고찰

3.1 실험과정 및 오차분석

다양한 조건의 모든 실험 수행 과정에서, 연소로 벽면에 설치된 K-type 열전대의 신호를 DAQ 보드를 이용하여 측정하였고, 신호의 변화를 통해 정상상태를 확인한 후 온도 및 가스분석 데이터를 확보하였다.

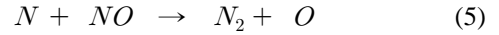
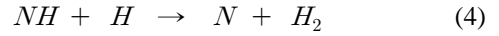
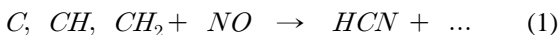
측정 오차는 온도의 경우 최대 31°C 이내이며, 가스분석값은 5% 이내이다. 또한, 모든 측정값 중 오류데이터는 Chauvenet's criterion에 의해 제외되었다.⁽⁶⁾

3.2 NO_x 저감 특성 비교

연료 희박 재연소에 의한 NO_x 저감 특성을 분석하기 위해, 일반 재연소 실험 조건인 case 1의 실험 결과를 기초로 하여 비교, 분석하였다.

Fig. 6은 일반 재연소와 연료 희박 재연소 시스템에서 각각 재연소 연료비를 다양하게 변화시킨 case 1과 case 2의 실험 결과를 비교한 것이다. 실험에서 주연소 영역의 화염의 길이는 0.3m 정도이며, 일반 재연소 시스템의 경우 재연소 연료는 연소기 끝단으로부터 0.4m 하류 지점에서, 연소연료 공기는 0.7m 지점에서 각각 연소로 벽면에 수직한 방향으로 분사하였다. 연료 희박 재연소는 연소완료 공기를 사용하지 않으므로 재연소 연료만 공급하였다. 재연소 연료를 공급하지 않은 상태에서 주연소 영역의 반응에 의한 출구 배기가스 산소 농도는 각각 3.2%와 3.4%로 유사한 조건이다.

Fig. 6을 보면 일반 재연소의 경우 재연소 연료비가 0~0.18 정도에서는 공급량에 비례하여 NO_x의 저감률(NO_x 생성량을 기준으로 한 NO_x의 저감 비율)이 증가한다. 그러나 그 이후부터는 공급량 증가에 따른 NO_x의 저감률 증가가 둔해지면서 0.2 이상에서는 더 이상 저감률이 증가하지 않고 일정하다. 이는 전형적인 재연소의 NO_x 저감 특성이며, 다음과 같은 주요한 반응 메커니즘들에 의해 진행되었다고 볼 수 있다.⁽⁷⁾



재연소 연료로 분사된 LPG가 열분해하는 과정에서 발생한 CH₃계열의 라디칼들이 NO와 반응하여 HCN을 형성하고, HCN는 식 (1)~(5)의 과정을 거쳐 N₂로 환원되는 일련의 과정이다. 재연소 연료 공급량의 증가는 NO_x의 N₂로의 환원을 주도하는 CH₃라디칼들의 증가를 유도하여 보다 많은 NO_x를 저감하나, 혼합물이나 반응물의 한계로 인해 일정 재연소 연료비 이상에서는 그 효과가 포화 상태에 이른다.⁽⁸⁾

연료 희박 재연소 시스템의 경우, 재연소 연료비에 따라 NO_x 저감률이 증가하는, 일반 재연소 시스템과 비슷한 경향을 보이거나 오히려 그 저감

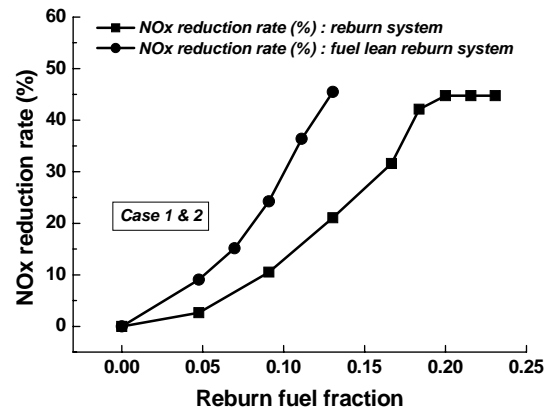


Fig. 6 Effect of reburn fuel fraction on NO_x reduction rate in case 1 and 2

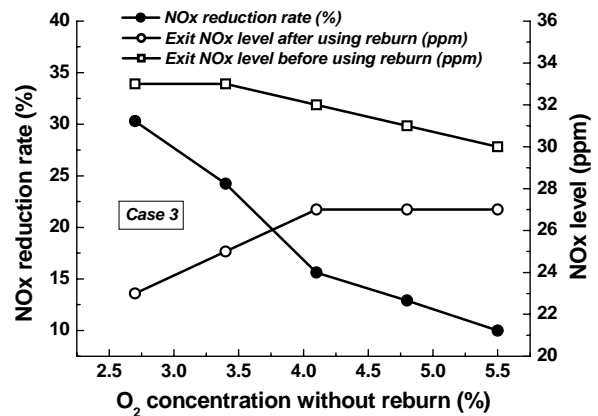


Fig. 7 Effect of O₂ concentration on NO_x reduction in case 3

효율이 높게 나타나고 있다. 재연소 연료비 0.13로 같은 양의 재연로 연료를 공급한 경우, 연료 희박 재연소 시스템에서 45.5%의 NOx 저감률을 나타내어, 일반 재연소 시스템의 21.1%에 비해 2배 이상의 효율적인 NOx 저감을 보이고 있다. 이는 재연소 연료비를 고정한 상태에서 재연소 영역비를 변화시키며 NOx 저감 효과를 파악한 Lee and Baek의 실험 결과에서 그 원인을 찾을 수 있다.⁽⁸⁾ Lee and Baek은 재연소 영역비를 증가시키면, 재연소 연료 존재 시간의 증가를 유도하게 되며, 이는 NO가 CH₄와 반응하여 N₂로 환원되는 메카니즘이 일어날 수 있는 영역이 확장되어, 보다 높은 NOx 저감이 가능함을 확인하였다.

연료 희박 재연소에서는 연소완료 공기를 사용하지 않으므로, 재연소에 비해 재연소 영역비가 크게 증가하는 효과를 가져온다. case 1과 2의 실험에서도, 일반 재연소에서는 재연소 영역비가 0.25이므로 전체 연소로의 1/4 정도가 재연소 연료에 의한 NOx 저감 영역인데 반해, 연료 희박 재연소에서는 전체 연소로의 약 3/4 정도가 NOx 저감 반응이 가능한 영역이다. 이로 인해 Fig. 6에서 보이는 바와 같은 두 시스템의 NOx 저감률 차이가 나타난다.

그러나 연료 희박 재연소 실험에서는 연소완료 공기를 사용하지 않기 때문에, 재연소 연료비 0.13을 초과하여 재연소 연료를 분사한 경우 CO가 급격히 증가하여 더 이상 재연소 연료비를 증가할 수 없었다. 재연소 연료비 0.13 이하에서는 CO가 2ppm 이하로 거의 발생하지 않았다. 일반 재연소에서 CO는 case 1의 모든 실험에서 전혀 검출되지 않았다.

Fig. 7은 재연소 연료비는 0.09로 고정한 상태에서, 재연소 연료 공급 전 주연소 영역 반응에 의한 배기가스 산소 농도를 2.7%에서 5.5%까지 변화시키면서 NOx 저감을 파악한 실험결과이다. 그래프를 보면 재연소 연료 공급 전 산소 농도가 높아짐에 따라 NOx 저감률은 감소함을 알 수 있다. 이는 연료희박 재연소에 의한 NOx 저감 반응에 필수적인 국부적 연료 농후 영역이 줄어들기 때문이다. 위의 반응식 (1)~(5) 과정이 일어나기 위해서는 연료 농후 영역 확보가 필수적이다. 연료가 희박한 영역이 확장되게 되면, 재연소 연

료에 의한 발생된 CH₄ 계열의 라디칼들이 오히려 산소 원자와 결합하여 소모되기 때문이다.

3.3 CO 발생 특성 비교

일반 재연소에 비해 연료 희박 재연소 시스템은 CO가 발생할 확률이 매우 높으므로 이에 대한 분석이 필요하다.

Fig. 8은 재연소 연료 공급 이전, 주연소영역의 반응 후 가스의 산소 농도 변화에 따른 CO 발생량 변화를 보여주고 있다.(Case 3) 본 실험조건에서는 재연소 연료 분사지점을 다르게 하여 같은 방식의 실험을 수행하였는데, 그래프에서 injection point는 재연소 연료 분사지점을 나타낸다. 즉, 화염이 시작되는 연소기 끝단을 기준으로 하여 그로부터 떨어진 거리를 의미한다.

먼저 재연소 연료를 가장 후류에 분사한 경우 (injection point: 0.7m)에서만 CO가 발생하였고, 산소 농도 조건에 따른 변화 특성이 나타나고 있다. 산소 농도가 낮을 경우 CO가 많이 발생한 반면, 산소 농도가 높을 경우 CO의 발생이 적다. 이는 CO가 반응하도록 주도하는 활성화 라디칼인 OH는 반응 환경의 산소 농도가 높을수록 풍부해 지기 때문이다. CO가 산화되는 화학 반응은 아래식 (6)의 과정이다.



Fig. 9에서는 재연소 연료비에 의한 CO 발생량 변화를 분석하였다. 주연소영역 반응 후 가스의 산소 농도는 3.4%로 고정하였다. Fig. 8과 마찬가지로

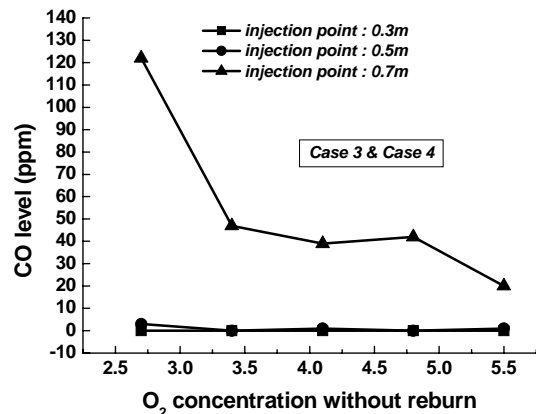


Fig. 8 Effect of O₂ concentration and injection location on CO emission in case 3 and 4

지로, 본 실험조건에서도 재연소 연료 분사지점을 다르게 하여 같은 방식의 실험을 수행하였다.

Fig. 9에서도 보다 후류에 재연소 연료를 분사한 경우(injection point: 0.6, 0.7)에서 재연소 연료비 변화에 따른 CO 발생 특성이 나타나고 있다. 재연소 연료비가 증가함에 따라 CO 발생도 증가하다가, 어느 시점 이후 CO 발생이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 재연소 연료가 증가하면 국부적인 연료 농후 영역이 확장되면서 반응영역내의 산소가 부족하게 되고, 산화 반응을 하지 못한 CO가 증가하는 것으로 파악된다.

Fig. 8과 9에서는 두 실험 결과에서 공통적으로 재연소 연료 분사 지점의 변화에 따라 CO 발생 특성의 차이가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8에서는 재연소 연료 분사 지점이 연소기 끝단으로부터 0.3m, 0.5m인 경우, Fig. 9에서도 재연소 연료 분사 지점이 연소기 끝단으로부터 0.3m~0.5m인 경우는 CO 발생이 거의 없다. 그러나 그 후류 지점들(injection point:0.6, 0.7m)에서 재연소 연료를 분사한 경우는 CO가 발생함을 관찰할 수 있다. 이는 재연소 연료를 분사한 지점의 온도 조건과 관련이 있다.

Fig. 10, 11은 재연소 연료를 0.09, 주연소 영역의 반응에 의한 반응 후 가스 산소 농도를 3.4%로 고정하였을 경우(case 4), 재연소 연료 분사 지점을 다양하게 하고, 각각 그 부근의 온도를 측정하는 것이다. Fig. 10은 재연소 연료를 분사한 지점의 연소로 중심축으로부터 반경 방향으로의 온도를 측정하는 것이며, Fig. 11은 재연소 연료를 분사한 지점으로부터 0.1m 후류 지점의 연소로 중심축 반경 방향 온도를 측정하는 것이다.

재연소 연료 분사 지점 및 그 가까운 후류의 온도는 재연소 연료의 화학반응에 밀접한 영향을 미칠 것이다. 두 그래프에서 볼 수 있듯이 후류 방향으로 진행 할수록 그 온도는 내려가게 되는데, 이에 의해 CO 발생특성이 변화한다.

CO는 일반적으로 1800~2400°F (980~1320°C)에서 쉽게 산화반응을 일으킨다고 알려져 있다. Fig. 10과 Fig. 11을 보면 재연소 연료 분사 지점이 화염 영역부터 비교적 가까운 후류인 injection point: 0.3~0.5m인 경우, 분사지역 온도가 CO의 주요 산화반응 온도 내에 있음을 알 수 있다.

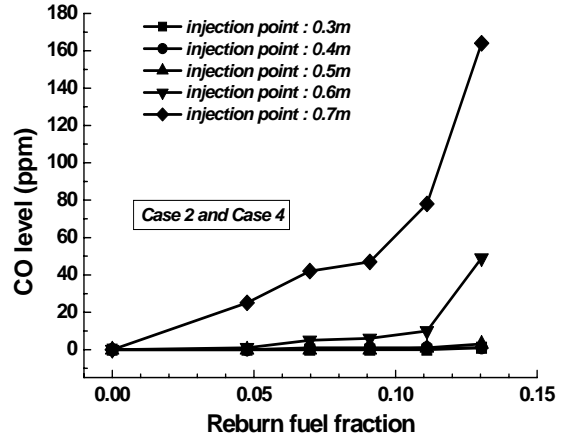


Fig. 9 Effect of reburn fuel fraction and injection location on CO emission in case 2 and 4

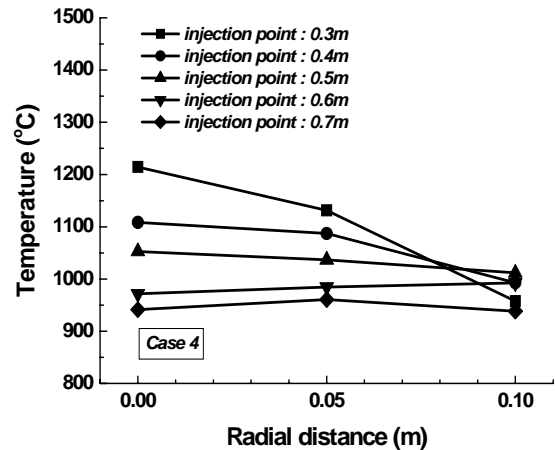


Fig. 10 Radial temperature distribution at the reburnfuel injection point

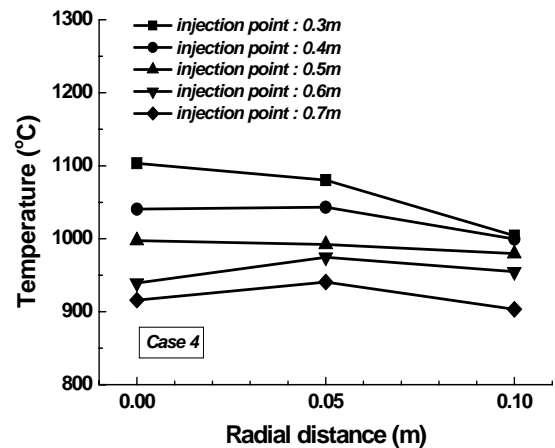


Fig. 11 Radial temperature distribution at 0.1m downstream of the reburn fuel injection point

그러나 화염 영역부터 비교적 먼 후류인 injection point: 0.6, 0.7m의 경우, 분사지역 온도가 CO의 주요 산화반응 온도에 미치지 못하며, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 온도가 충분하지 못한 두 지점에서만 CO가 발생하게 됨을 알 수 있다.

결국 산소가 충분하지 않은 환경 조건인 재연소 연료 반응 영역에서, CO의 산화반응은 그 반응온도가 매우 중요한 결정 인수일 것이며, 그로 인해 CO의 발생 특성이 결정되는 것이다.

4. 결 론

(1) 연료 회박 재연소 시스템의 NO_x 저감률은 재연소 연료비 증가에 따라 상승하며, 일반 재연소에 비해 효율적인 NO_x 저감도 가능하다.

(2) 재연소 연료를 공급하기 전 주연소 반응 후 가스의 산소농도는 NO_x저감 및 CO발생에 영향을 미치며, 두 공해가스의 최소화를 위한 최적 조절이 필요하다.

(3) 연료 회박 재연소 시스템에서 CO의 발생은 재연소 연료 분사 지역의 온도와 매우 밀접한 관련이 있으며, 온도 조건 관찰을 통한 재연소 연료 분사 위치 선정이 필요하다.

(4) 연료 회박 재연소 시스템을 이용하여, 재연소 연료비 0.13에서 최대 46%의 NO_x 저감이 관찰되었으며, CO는 발생하지 않았다.

후 기

이 연구는 "에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업"의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Prataps, J. and Bluestein, J., 1994, "Natural Gas Reburn : Cost Effective NO_x 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_x 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_x Control*, Kansas City, MO, May 19.
- (4) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, ABACUS PRESS, London.
- (5) Lee, C. Y., Choi, J. W. and Baek, S. W., 2004, "Effects of CO₂ on Heat Transfer from Oxygen-enriched Hydrogen Flame," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 937~994.
- (6) Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, 2001, McGraw-Hill, NewYork.
- (7) Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J., 1993, "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO₂ and NO_x Compliance," *Proc. of the Power - Gen Sixth International Conference*, Dallas, pp. 175~187.
- (8) Lee, C. Y. and Baek, S. W., 2007, "Effects of Hybrid Reburning/SNCR Strategy on NO_x/CO Reduction and Thermal Characteristics in Oxygen-Enriched LPG Flame" *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 179, Issue. 8, pp. 1649~1666.