

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.283

NOx 저감을 위한 하이브리드 연료희박 재연소 연구

김학영* · 백승욱** · 황창환*

* 한국과학기술원 기계항공시스템공학부

Experimental Investigation of NOx Reduction using a Hybrid Fuel Lean Reburning System

Hak Young Kim*, Seung Wook Baek** and Chang Hwan Hwang*

* Dept. of Aerospace Engineering, KAIST

(Received October 22, 2009 ; Revised December 16, 2009 ; Accepted December 17, 2009)

Key Words: Fuel Lean Reburning(연료희박 재연소) Air Staging(공기 다단화) LPG(액화 석유가스)

초록: 이 연구의 목적은 NOx 저감을 위한 연료희박 재연소 기법과 산화제 다단 연소 기법의 혼합 기법의 실험적 연구를 목표로 한다. 실험용 연소로에서 재연소 연료 분율, 재연소 노즐 직경, 산소부하도 및 재연소 연료 분사 위치등을 고려한 실험을 수행 하였다. 또한, 산화제 다단 연소를 통하여 생성된 유동장이 NOx 저감에 미치는 영향을 연료희박 기법의 NOx 저감율과 비교하는 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 연료희박 재연소와 산화제 다단연소 기법의 혼합 기법이 NOx 저감에 미치는 긍정적인 효과를 관찰 하였다.

Abstract: The main goal of this study is to examine the use of a hybrid -fuel lean reburning system with air staging for NOx reduction. The experimental variables include the reburn fuel fraction, sizes of reburn- fuel-injection nozzles, oxygen enrichment ratio, and location of reburn- fuel- injection. The effect of the flow field induced by air- staging combustion on NOx reduction is considered, and then, the NOx reduction rate is compared with only fuel lean reburning system. On the basis of the effectiveness of each De-NOx process, the advantage of using the hybrid reburning system with air staging is determined and discussed.

- 기호설명 -

- D : 노즐 입구 반경
- D_h : 스왈러 입구 반경
- S : 스왈 값
- x : 재연소 연료량
- f : 재연소 연료분율
- N_{avg} : 평균 NOx 저감율 (분사위치 0.4, 0.6m)
- F_{off} : NOx 저감율 차이
- ω : 산소부하도
- P : 총 공급 열량
- Φ : 당량비
- θ : 스왈 각도

1. 서 론

최근 온실가스 배출과 환경오염의 문제가 대두

되면서 새로운 연소 기술 개발 및 연소 효율 증대를 통한 화석 연료의 사용량 저감 및 온실 가스 배출 저감의 필요성이 더욱 커지고 있다.

각국에서는 이와 관련된 연구와 기술 개발에 대한 투자를 더욱 활발히 하고 있다. 화석 연료 사용 시 발생하는 배출 가스는 지구 온난화나 산성비, 스모그 현상과 같은 심각한 환경오염을 초래한다. 이러한 연소가스에 의한 대기 환경오염은 세계적으로 산업화가 점차 가속화 되면서 발전소나 산업용 보일러 자동차 선박 매연 등을 통해 더욱 심각해 질 것으로 예상되며 이에 대응하는 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

Fig. 1에서는 각 설비 및 장치에 따른 NOx 발생량의 추이를 나타내고 있다. 이를 보면 자동차 등 도로에서 발생하는 NOx의 비율이 최대 33%로 가장 많이 나타나지만 화석 연료의 연소에 의한 NOx 발생량도 전체 NOx 발생에 11%에 이르는 것을 볼 수 있다.

† Corresponding Author, swbaek@kaist.ac.kr

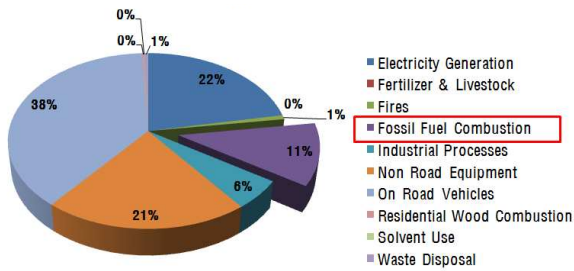


Fig. 1 Emission of nitrogen oxide

NOx는 공기를 산화제로 사용하는 대부분의 연소 시스템에서 필연적으로 발생하기에 배출량 저감이 특히 시급한 과제로 인식되고 있다.

최근 개발되고 있는 재연소(reburning) 기반 방법들은 실용화에 유리하고 NOx 저감 효율이 높다고 알려져 있다. 연료희박 재연소 기법은 기존 재연소 기법에 비해서 사용하는 재연소 연료의 양을 최소화 하면서도 높은 NOx 저감을 유도한다. 재연소 방법에서는 총 연료의 10~30% 정도의 재연소 연료가 필요하지만, 희박 재연소 기술에서는 5~10% 정도의 재연소 연료를 사용하여 기존 재연소 방식에 근접하는 NOx 저감을 목표로 한다. 소량의 재연소 연료를 고속으로 분사하여 국부적인 연료농후의 와류들(fuel rich eddies)을 유도하고 이로 인해 기존 재연소 영역의 NOx 저감 반응이 가능하도록 한다. 연료 희박 재연소 기술을 사용하면 재연소 연료의 양을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 연료 희박 영역이 유지됨으로써 미연 탄화수소나 일산화탄소 제거를 위한 연소 완료 공기 공급이 필요하지 않게 된다.⁽¹⁾

공기 다단분사(air staging) 기법은 산화제를 다양한 형태로 나누어 화염에 분사시켜 줌으로써 화염면의 분포를 균일하게 하는 동시에 열점(hot spot)을 제거한다. 결과적으로 이 방식은 화염의 온도를 낮추는 효과를 통해 thermal NOx 발생을 억제하는 역할을 한다. 재연소 방식이 주로 화학 반응에 의한 NOx 저감 효과를 그 목적으로 한다면 공기 다단 방식은 산화제의 공기 역학적 특성을 이용하여 초기에 발생하는 NOx를 저감시키는 것을 목적으로 한다. 이러한 형태의 저 NOx 버너는 연료 과농 영역에서 주로 발생하는 Fuel NOx가 후연소 영역에서 N2로 해리되기 때문에 Fuel NOx 저감에도 유리하다고 알려져 있다.⁽²⁾

이와 같은 연소기는 제작성이 용이하고 화염 안정성이 좋아 실용화에 유리하다. 또한, 혼합형

재연소 시스템에 적용될 산소부하 연소는 적용 시 질소에 의한 에너지의 손실을 줄일 수 있게 되어 전체 연소 영역에 걸쳐 매우 조용하며 높은 열효율을 기대할 수 있다.

공급되는 산소의 총량을 일정하게 유지하면서 송풍 공기 중의 산소 농도를 증가시킴으로써 운전 상태 및 운전 효율을 향상 시키고 2%의 산소부하로써 공급 공기량을 8.7% 감소시키고 연료를 약 10~15% 절감하는 효과를 얻을 수 있다.⁽³⁾ 본 연구의 목적은 연료희박 재연소 기법과 산화제 다단연소기를 혼합 적용 하였을 경우 NOx 저감 특성을 고찰 하고 산화제 다단연소기 적용에 따른 연소로 내부 유동장의 변화가 NOx 저감 반응에 미치는 영향을 실험적 방법을 통하여 고찰하는데 있다.

2. 실험적 연구

2.1 실험 장치

실험 장치는 연료와 산화제를 공급하는 장치와 실험용 연소로와 버너(15kW/hr) 그리고 연소가스 분석 및 온도측정 부분 등 세부부분으로 나뉜다. 본 연구에서는 95%의 프로판(C3H8)과 부탄메탄등이 나머지 5%를 이루는 LPG(Liquefied Petroleum Gas)를 주연소 연료 및 재연소 연료로 사용하였다. 산화제는 기본적으로 건조된 상태의 공기를 사용하는데 산소부하 연소 상태를 위하여 추가로 산소를 공급하였다. 연소로는 수직 방향(vertically oriented) 연소로로 연소로 바닥에 버너를 부착하여 수직방향으로 화염이 생성되도록 하였다. 또한, 연소로 벽면으로의 열손실을 줄이기 위하여 단열재의 한 종류인 세라쿠울(Cerakwool)을 이용하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서 자세한 연소로 및 LPG 버너를 나타내고 있다. 연소로는 내부 원활한 내부 재순환 유동을 위하여 높이 1.2m, 직경 0.5m로 설계 제작하였다. 주연소 연료는 4mm직경의 파이프를 통하여 공급되고 주위를 산화제 공급 파이프가 감싸고 있다. 다단버너의 경우 두 개의 산화제 공급 파이프가 이루어져 있다. 본 연구에서는 다단버너의 경우 두 개의 산화제 공급률을 같은 값으로 설정 하였다.

또한, 화염의 안정적인 생성 및 재순환 유동형성을 위하여 radial flow vane swirler를 장착 하였는데 일반버너의 경우 45°의 스윙 각도를 사

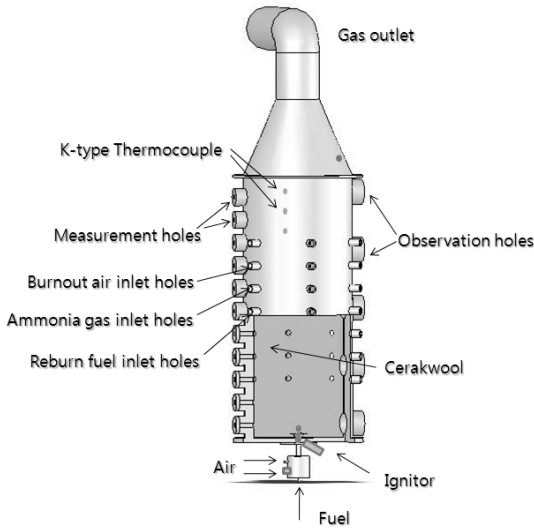


Fig. 2 Schematic of the furnace

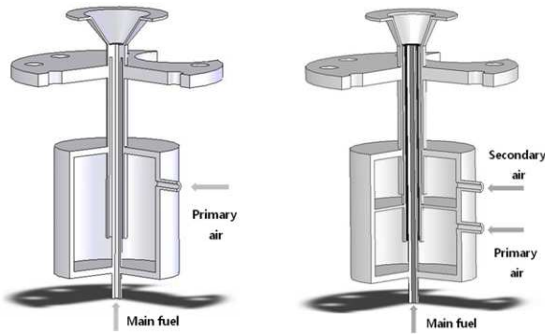


Fig. 3 Detailed drawing of the single and staged burner

용하였고, 다단버너의 경우 각 산화제 공급 스윙 각도를 45°, 60°로 설계 제작하였다. 스윙 값은 다음과 같은 관계식에 의하여 설정하였다.⁽⁴⁾

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

산소부하 연소시에는 산화제 공급 파이프 직경은 산화제의 일정한 공급 속도를 유지하기 위하여 다음과 같은 산소부하도(Oxygen Enrichment Ratio; OER)에 따라 다르게 설계하였다.⁽³⁾

$$\omega = \frac{\text{volumetric flowrate of } O_2 \text{ oxidizer}}{\text{total volume flowrate of oxidizer}} \quad (2)$$

연소가스의 NOx, CO 성분과 O2 농도를 측정하기 위하여 가스 분석을 실시하였다. 가스 분석기는 Eutron사의 Greenline MK2 제품을 사용하였

다. 연소 가스에 포함된 공해 물질 CO, NO, NO2와 SO2 등은 가스 분석기의 O2 농도를 기준으로 표시된다. 연소 가스가 가스 분석기 내로 들어오면 확산 막(diffusion membrane)을 통하여 수소가 제거되고 전기 화학적 산화 과정을 통해 각 공해 가스의 농도에 비례하는 전압을 생성하게 된다. 이러한 전압이 각각의 센서를 통하여 연소 가스의 농도를 검출하게 된다. 가스 분석기는 O2, CO, NO, NO2 및 SO2 가스에 대한 5가지 센서를 통해 농도 측정을 하고 수분을 제거하기 위한 water trap으로 구성되어 있다. 본 연구에서 측정된 NOx는 NO와 NO2의 합으로 고려하였다.

또한, 연소장내의 온도 분포를 측정하기 위하여 고온(~1600℃)에서 안정적인 측정이 가능한 R-type(Platinum 19% rhodium(+)) versus platinum(-) 열전대를 사용하였다. 열전대의 보정을 위하여 여러 가지 비드(bead) 크기를 이용하여 각 비드(bead) 직경 별로 같은 조건의 온도를 측정 한 후 비드(bead) 직경이 0(zero)일 때의 값으로 보정하는 방법을 선택 하였다.⁽⁵⁾

3. 실험 조건

3.1 실험 조건

연료희박 재연소 기법과 연료희박 재연소/다단 연소 혼합 기법의 다양한 산소부하 연소 조건에서의 열전달 특성 및 저-NOx 효과를 비교하기 위한 실험을 수행하였다.

LPG를 주연소 연료 및 재연소 연료로 사용하였고 모든 실험은 연소로내의 온도 분포가 일정해 지는 시점에서 수행하였다. 실험 조건은 Table 1과 같이 두 가지 경우의 실험 조건을 설정하였다. 연소기에 공급 되는 열량은 15kW/hr로 일정하게 유지하여 초기 생성 NOx 량이 일정하도록 하였다.

Table 1 Experimental Conditions

	Primary fuel	Remark
Case 1	15kW	Examination Thermal Characteristic of single and staged burner
Case 2	15kW	Comparing De-NOx effectiveness and CO Emission

ω: Oxygen Enrichment Ratio (OER)

Case 1에서는 일반버너와 다단버너를 사용한 환경의 열적 특성을 고찰하기 위하여 다양한 연소 환경에서 온도 및 열유속을 측정하고 비교하였다. 또한, Case 2에서는 일반버너에서의 연료희박 재연소 기법의 NOx 저감 특성과 다단버너를 사용한 연료희박 재연소 기법의 NOx 저감 및 CO 발생 특성을 고찰 하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 열적 특성 분석 : Case 1

연료희박 재연소 기법은 연소로내의 연소가스가 항상 연료희박 조건을 유지하여야 하므로 기존의 재연소 기법에 비해 주연소 영역에서 사용하는 산화제의 양이 많아지게 된다. 산화제의 양이 많아지면 연소 반응에 참여하지 않는 산화제 내의 질소의 증가로 열손실이 증가하게 된다. 그러므로 산소부하 연소(Oxygen Enhanced Combustion) 기법을 연료희박 재연소 기술로의 적용은 이러한 단점을 보완할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 여러 산소부하 연소 기법 중 공급되는 산소의 총량을 일정하게 유지하면서 공기 중의 질소의 양을 감소시켜 송풍 공기 중의 산소 농도를 증가 시키는 방법을 사용하였다.⁽³⁾

산소부하 연소 환경이 일반연소 조건에 비해 열효율을 향상 정도를 확인하기 위하여 산소부하 연소 상태의 열적 특성에 관한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 여러 산소부하도 조건에서 일반버너와 다단버너를 사용한 환경에서 연소로내 열적 특성을 고찰하였다. Fig. 4는 일반버너에서 다양한 산소부하 조건에서의 축방향 온도분포를 나타낸다. 그래프에서 나타나는 바와 같이 산소부하도가 증가함에 따라 온도가 상승한다. 특히 화염 생성 부분인 연소로의 상류 부분에서의 온도 변화가 두드러지게 나타나고 있다. 이것은 당량비를 일정하게 유지한 상태에서 산소부하도를 증가시키게 되면 산화제 내의 산소 양은 일정하게 유지되지만 연소 반응에 참여 하지 않는 질소의 감소로 열손실이 줄어들었기 때문이다.⁽⁶⁾

산소부하도 증가에 따른 온도의 상승은 벽면으로의 열전달량 증가를 유발한다. Fig. 5에서 산소부하도 변화에 따른 열전달량의 증가를 살펴 볼 수 있다.

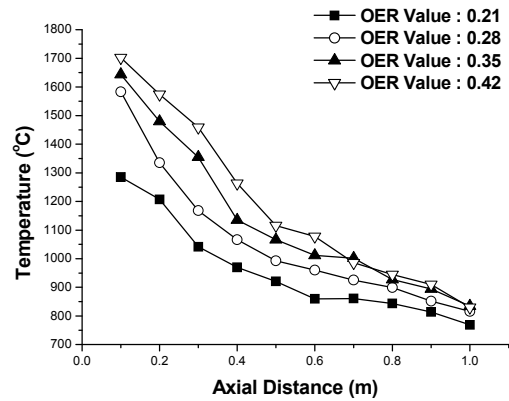


Fig. 4 Axial temperature distribution at the center line for different OER value

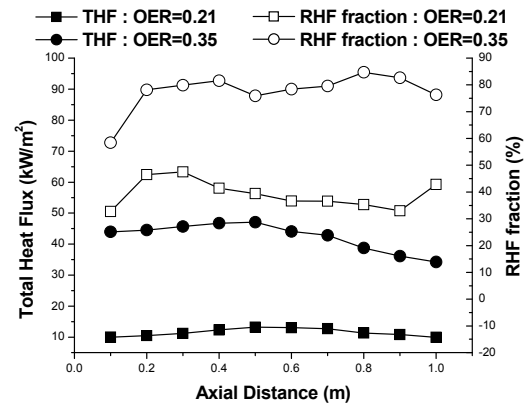


Fig. 5 Total heat flux (THF) and radiative heat flux (RHF) fraction along the wall for different Oxygen Enrichment Ratios (ω)

산소부하도(ω)는 OER=0.21과 OER=0.35 두 가지 경우에 대한 축방향의 총 열전달량과 복사 열전달량을 각각 비교하였다.

복사 열전달률은 총 열전달량에서 복사 열전달량이 차지하는 비로 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이 산소부하도가 높은 (OER=0.35) 조건에서는 연소로 전체적으로 높은 열전달률을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한, 복사 열전달률은 결과에서 볼 수 있듯이 OER=0.21 조건에서는 총 열전달량에 30~45%를 차지하지만 OER=0.35 조건에서는 60~85%의 높은 비율을 유지 하는 것을 알 수 있다. 즉, 산소부하도가 높아질수록 총 열전달 중 복사에 의한 열전달 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 전도 및 대류에 의한 열전달은 각각의 절대 온도 차에 비례 하지만 복사 열전달은 Stefan-Boltzman's Law에 의해 절대 온도의 4제

굽에 비례하기 때문이다. 일반버너와 다단버너 연소 조건에 따른 온도 및 열전달률에 관한 고찰을 하기 위하여 다양한 산소부하 연소 조건에 따라 축방향 온도 및 열전달률을 측정하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 온도와 열전달률 측정 결과를 나타내고 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 산화제 다단연소 조건에서는 일반연소 환경에 비하여 적은 열전달률을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 산화제 다단연소의 경우 주연소 영역의 연소 반응이 일반연소에 비하여 제한되기 때문이다.⁽⁷⁾ 또한, 다단연소에 의하여 화염 생성이 일반연소에 비해 반경 방향으로 퍼지게 되는데 이러한 현상에 의하여 화염대 영역에서 열점(hot spot)이 줄어들게 된다. 즉, 일반버너 연소장에 비하여 열점 생성이 줄어들어 Fig. 7과 같이 연소로 전체적으로 일반버너 보다 낮은 온도 분포를 유지 하게 된다. 또한, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 대부분의 영역에서 공기 다단연소 상태의 온도가 더 낮음을 알 수 있다. 하지만 축방향 거리의 0.4~0.6m 지점의 온도를 살펴보면 온도의 역전이 발생했음을 알 수 있는데 이것은 화염의 온도는 낮아지고 반응영역이 일반버너 연소장에 비해서 좀 더 넓게 확장되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 다양한 산소부하 조건에서의 일반버너 연소 및 다단버너 연소 조건에 따라 NOx 발생량의 차이를 나타내고 있다. 이론적으로 NOx 발생량은 연소로 전체적으로 온도가 낮아지는 다단버너의 경우 적은 NOx 발생이 예상된다. 산소부하도 값이 0.27 이상인 경우에는 일반버너와 다단버너의 NOx 발생량 차이가 점점 커지지만 산소부하도 값이 0.27 이하인 경우 다단버너의 NOx 발생량이 많은 것으로 나타난다. 이것은 온도에 따른 NOx 발생 특성에 기인한다. Thermal NOx의 생성은 높은 온도($T \geq 1520^{\circ}\text{C}$)에 큰 영향을 받는다고 알려져 있다.⁽⁸⁾ 반대로 산소 부하도 값이 낮은($\omega \leq 0.27$) 영역에서는 Prompt NOx에 의한 NOx 생성이 주요한 생성 기구가 된다. Prompt NOx는 일반적으로 화염면에서 발생하므로 낮은 산소부하도($\omega \leq 0.27$)에서는 다단연소에서 보다 높은 NOx 생성량이 관찰된다.

4.2 공해물질(NOx,CO)배출 특성: Case 2

연료희박 재연소 기법의 산소부하 연소 환경에서의 NOx 저감 및 CO발생 특성을 고찰하기 위

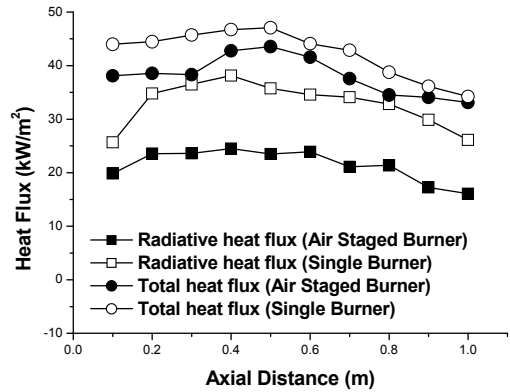


Fig. 6 Total and radiative heat flux along the wall for different burner type

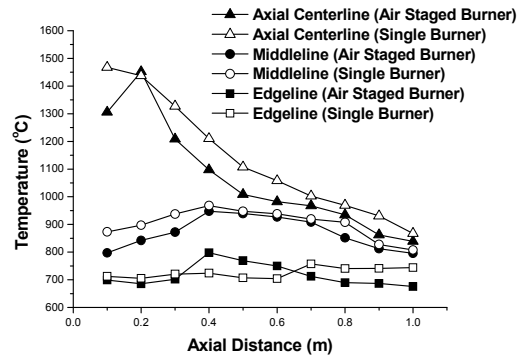


Fig. 7 Axial temperature distributions for different burner type

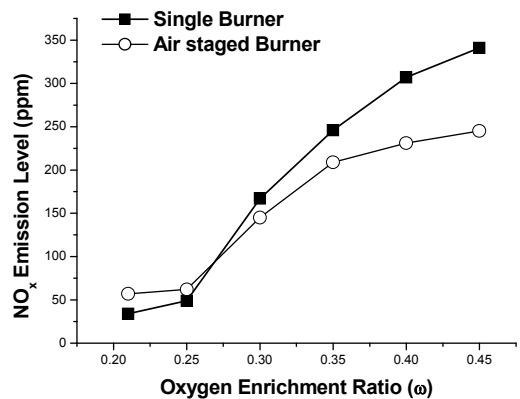


Fig. 8 NOx emission level versus Oxygen Enrichment Ratio (ω) for different burner type

한 실험을 진행하였다.

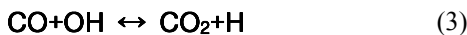
Fig. 9는 산소부하도 0.35조건에서 재연소 연료량과 재연소 연료 분사 위치에 따른 NOx 저감율을 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이 분사 위치가 버너 끝단에서 0.4, 0.6m 지점에서는 최대 52%의 NOx 저

감율을 나타내는 것을 볼 수 있다. 분사된 탄화수소 계열의 재연소 연료는 연소장내의 높은 온도장 내에서 탄화수소기(CHi radical)로 분해되고 NO와 반응하여 NOx 저감반응에 주요 반응 요소인 HCN radical을 생성하게 된다. HCN radical은 NOx 환원 반응을 거쳐 NOx를 N2로 환원하게 된다.⁽⁹⁾

한편 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 분사 위치에 따라 NOx 저감율에 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 재연소 연료 분사위치가 0.4m와 0.6m 지점에서는 NOx 저감율이 최대 52%의 유사한 결과를 나타내지만 분사 지점이 버너 끝단에서 0.8m 떨어진 지점에서는 NOx 저감율이 약 12% 낮은 최대 40%의 NOx 저감율을 나타내고 있다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 첫 번째로 연소가스의 채취지점이 버너 끝단에서 1.2m 떨어진 지점임을 고려할 때 분사된 재연소 연료의 반응 길이의 차이를 고려할 수 있다.

재연소 연료 분사 지점이 0.6m 지점 이하일 때는 연소가스의 채취 지점과 분사 지점이 0.6m의 거리 차가 존재하지만 분사 지점이 0.8m 지점에서는 반응 거리가 짧아져(0.6m→0.4m) 분사된 재연소 연료가 미처 다 반응하지 못한다고 고려할 수 있다. 또 다른 이유로는 내부 재순환 유동을 고려할 수 있다. Kim et.al.⁽¹⁰⁾의 논문에서는 재연소 연료 분사 지점에 따라 내부 재순환 유동에 의하여 분사된 재연소 연료가 연소로 상류 또한, 하류로 유입될 수 있다고 하였다.

그러므로 활발한 재순환 유동에 의하여 분사된 재연소 연료가 연소로 상류로 유입되는 분사 지점 0.4m와 0.6m 지점에서는 유사한 NOx 저감율을 보이지만 분사 지점에 0.8m 지점에서는 재연소 연료가 연소로 하류로 흘러나가 상이한 NOx 저감율을 얻을 수 있다. 연료희박 재연소 기법은 기존 재연소 방식과 다르게 완전연소를 위해 추가로 공기를 공급하지 않으므로 CO 발생에 관한 고찰이 필요하다. Hayhurst, A.N. and Parmar⁽¹¹⁾는 주연소 과정에서 CO와 CO2를 주된 생성 혼합물로 생각하고 다음과 같은 화학반응식에 의하여 CO가 CO2로 환원 된다고 하였다.



이러한 결과는 위의 CO의 산화 반응식은 기존의 실험을 통하여 약 950℃ 이상에서 활발히 반응하고 그 이하의 온도 범위에서는 산화 반응이

활발히 일어나지 않는다는 사실을 확인 하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 10의 결과를 보면 분사 지점이 0.4m와 0.6m 지점에서는 CO 발생량이 거의 나타나지 않지만 재순환 유동에 영향을 많이 받지 못하고 분사 지점의 온도 영역이 950℃에 미치지 못하는 분사 지점 0.8m 지점에서 NOx 저감율이 떨어지고 CO의 발생이 증가하게 된다. Fig. 11은 산소 부하도 0.35 환경에서 연료희박 재연소 기법과 하이브리드 재연소 기법(연료희박 재연소;FLR+다단연소)의 재연소 연료 분사량에 따른 NOx 발생량을 비교한 결과를 나타내고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 다단연소 기법을 연료희박 재연소 기법에 적용함으로써 NOx 발생량이 기존에 비하여 전체적으로 12% 감소하는 것을 볼 수 있다.

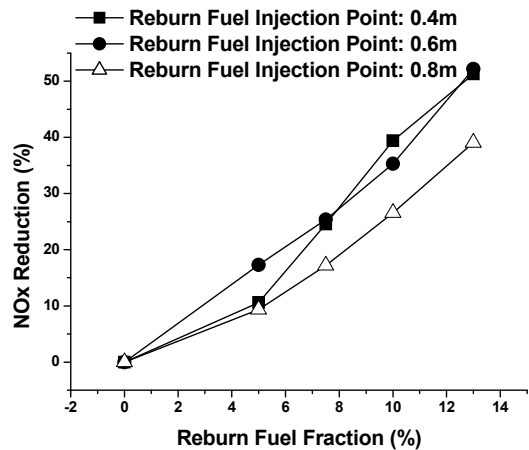


Fig. 9 NOx reduction rate for different reburn fuel injection point (FLR only)

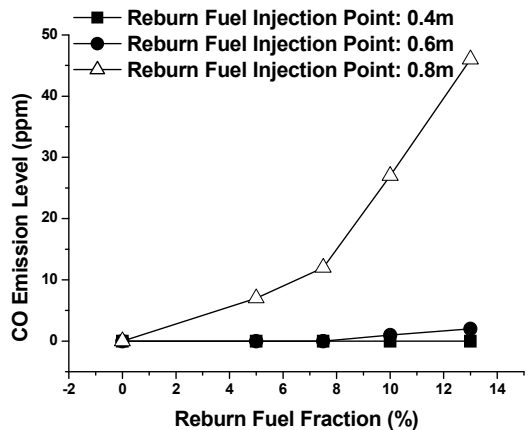


Fig. 10 CO emission level for different reburn fuel injection point (FLR only)

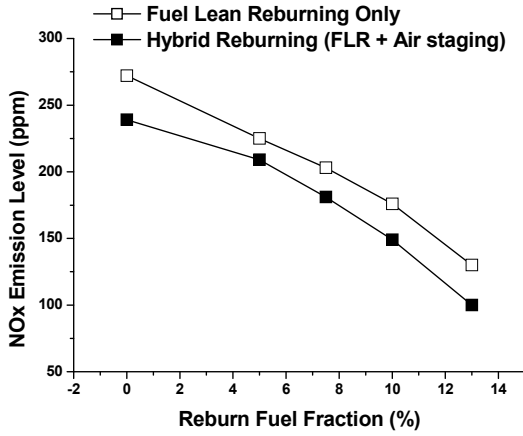


Fig. 11 NOx emission level for different De-NOx system

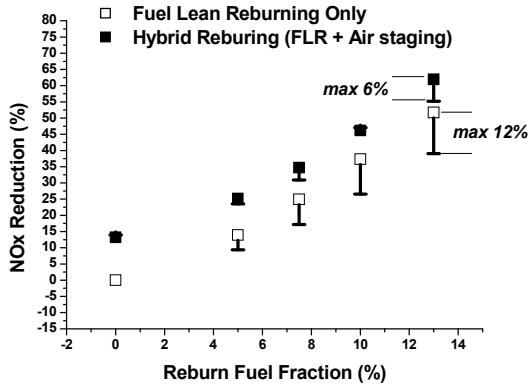


Fig. 12 Comparing the effect of NOx reduction for different De-NOx system

또한, 공기 다단연소 방식을 적용 하였을 경우 온도 저감에 의한 thermal NOx 저감 효과와 더불어 연소로 유동장 변화에 따른 재연소 효율에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 진행 하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 재연소 연료 분사위치에 따라 재연소 연료 반응 거리 및 내부 재순환 유동에 의하여 저-NOx 효율에 차이가 나타난다.

Fig. 12의 결과는 일반버너를 사용한 연료희박 재연소 기법과 다단버너를 사용한 하이브리드 연료희박 재연소 기법의 산소부하도 0.35 조건에서 재연소 연료 분사 위치가 버너 끝단에서 0.8m에 이를 때 재연소 반응의 거동 차이를 나타낸다. 거동 차이를 표현하기 위하여 아래의 관계식 (4), (5)를 이용하였다. N_{avg} 값은 유사한 NOx 저감율을 보이는 재연소 연료 분사 위치 0.4m, 0.6m 지점의 NOx 저감율 평균값을 나타낸다. 또한, F_{off} 는 N_{avg} 값과 재연소 연료 분사위치 0.8m 지점에

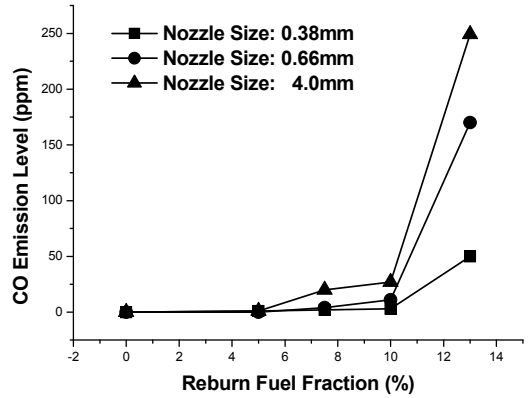


Fig. 13 Effect of reburn fuel fraction on CO emission level for different injection nozzle size

서의 NOx 저감을 차이를 나타낸다.

$$N_{avg} = \frac{NO_x reduction_{0.4} + NO_x reduction_{0.6}}{2} \quad (4)$$

$$F_{off} = N_{avg} - NO_x reduction_{0.8} \quad (5)$$

Fig. 12에서 볼 수 있듯이 일반버너를 사용한 연료희박 재연소 기법에서는 F_{off} 값이 재연소 연료의 증가에 따라 선형 적으로 증가하여 최대 12%차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 다 단연소 버너를 이용한 하이브리드 연료희박 재연소 기법의 경우 F_{off} 값이 최대 6% 이내로 유지 하는 것을 알 수 있다. 즉, 산화제 다단연소의 경우 연소로 내부 유동장의 변화로 재연소 반응 길이가 비교적 짧은 분사 위치 0.8m 지점에서 일반 버너와 비교하여 보다 높은 NOx 저감을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. Fig. 13의 결과는 재연소 연료의 분사지점이 버너 끝단에서 0.8m 지점일 경우에 하이브리드 재연소 기법을 이용하였을 경우 재연소 노즐의 직경에 변화에 따른 CO발생량을 비교한 결과를 나타내고 있다. 노즐직경의 변화는 분사되는 재연소 연료의 운동량을 증가시켜 연소장 내의 상승기류에서도 연소로 내부로 재연소 연료를 분사시킬 가능성을 높이게 된다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 재연소 노즐직경이 0.38mm와 0.66mm인 경우에는 CO발생량이 70ppm 이하로 유지되지만 재연소 노즐이 4mm인 경우 260ppm 이상의 CO가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 재연소 연료의 분사 운동량의 증가는 분사된 재연소 연료가 연소로 내부의 상승기류에 유입되어

외부로 흘러나가는 것을 방지하여 CO발생을 억제할 수 있다.

5. 결 론

연료희박 재연소 기법과 산화제 다단연소 방법을 적용한 하이브리드 재연소 기법의 연소 특성 및 공해물질 배출 특성을 규명하기 위하여 15kW/hr급 Lab-scale 재연소 실험 장치를 제작하여 실험연구를 진행하였다. 산소부하 연소 실험을 위하여 건조공기에 순산소를 같이 공급하는 방법을 사용하였고 주연소 및 재연소 연료는 LPG를 사용하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 일반연소 버너의 연료희박 재연소 기법의 경우 산소 부하도 0.35조건에서 최대 52%의 NOx 저감율을 달성 하였다. 또한, 분사위치에 따른 NOx 저감율의 차이를 확인하였다.

(2) 다단연소 버너의 경우 일반연소 버너에 비하여 NOx 발생량이 전체적으로 12% 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) 하이브리드 재연소(FLR+Air staging)의 경우 연소로 내부 유동장의 변화로 재연소 반응 길이가 비교적 짧은 분사 위치 0.8m 지점에서 일반버너와 비교하여 보다 높은 NOx 저감을 얻을 수 있다.

(4) 재연소 연료분사 지점이 0.8m에 이를 때에도 재연소 연료 분사 운동량을 증가시켜 분사된 재연소 연료가 연소로 내부 상승기류로 유입되어 흘러 나가는 것을 방지하여 CO발생을 억제할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 “에너지 자원 인력 양성사업”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Breen, B.P., Hura, H.S., 2001, "Method and Apparatus for NOx Reduction in Flue Gases," *United States patent*.
- (2) Wendt, J. O. L., Sternling, C. V. and Matovich, M. A., 1974, "Reduction of Sulfur Trioxide and Nitrogen Oxides by Secondary Fuel Injection," *Proc. Combust. Instit.* Vol. 14, p. 1085.
- (3) Baukal, C.E. Jr., 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion," *CRC press*, New York.
- (4) Gupta, A.K., Lilley, D.G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows," *Abacus Press*, London.
- (5) S.W. Baek, H.S. Kim, and S.H. Kang, 2002, "Effects of Addition of Solid Particle on Thermal Characteristics in Hydrogen-Air Flame," *Combust. Sci. Tech*, Vol. 74, No. 8, pp. 99~116
- (6) H.Y. Kim, 2008, "Experimental Study of Fuel Lean Reburning System for NOx Reduction and CO Emission," *Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Daejeon, Korea
- (7) Spliethoff, H., Greul, U., Rudiger, H. and Hein, K.R.G., 1996, "Basic Effects on NOx Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench-Scale Test Facility," *Fuel*, Vol. 75, No. 5, pp. 560~564
- (8) Bilbao, R., Millera, A. and Alzueta, M.U., 1994, "Influence of the Temperature and Oxygen Concentration on NOx Reduction in the Natural Gas Reburning Process," *Industrial and Engineering Chemistry Research* Vol. 33, No. 11, pp. 2846~2852
- (9) Smoot, L.D., Hill, S.C. and Xu, H., 1998, "NOx Control Through Reburning," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24, pp. 385~408
- (10) H.Y. Kim, S.W. Baek, S. Hee. and S.W. Kim., 2009, "Experimental and Numerical Investigation for NOx Reduction with Fuel Lean Reburning System." *KOSCO* Vol. 14, No. 2, pp. 18~25
- (11) Hayhurst, A.N. and Parmar, M.S., 1998, "Does Solid Carbon Burn in Oxygen to Give The Gaseous Intermediate CO or Produce CO2 Directly? Some Experiments in a Hot Bed of Sand Fluidized by Air," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 3, pp. 427~438.

(1) Breen, B.P., Hura, H.S., 2001, "Method and