

중유 화염 연소로에서 LNG와 왕겨분말의 재연소 효과 비교

신명철* · 김세원* · 이창엽**

The Comparison Study on Reburning Effects of LNG and Rice Husk in Heavy Oil Flamed Furnace

Myeung-chul Shin, Se-won Kim and Chang-yeop Lee

ABSTRACT

In commercial combustion systems, heavy oil is one of main hydrocarbon fuel because of its economical efficiency. Regarding heavy oil combustion, due to increasing concerns over environmental pollutants such as carbon monoxide, unburned hydrocarbon and nitrogen oxides, development of low pollutant emission methods has become an imminent issue for practical application to numerous combustion devices. Also a great amount of effort has been tried to developed effective methods for practical using of biomass. It is also an important issue to reduce carbon tax. In this paper, an experimental study has been conducted to evaluate the effect of biomass reburning on NOx formation in a heavy oil flamed combustion furnace. Experiments were performed in flames stabilized by a multi-staged burner, which was mounted at the front of the furnace. Experimental tests were conducted using air-carried rice husk powder and LNG as the reburn fuel and heavy oil as the main fuel. The paper reports data on flue gas emissions and temperature distribution in the furnace for several kinds of experimental conditions. NOx concentration in the exhaust has decreased considerably due to effect of reburning. The maximum NOx reduction rate was 62% when the rice husk was used by reburn fuel, however it was 59% when the LNG was used by reburn fuel. The result shows the positive possibility of biomass reburning system for optimal NOx reduction.

Key Words : Biomass reburning, NOx, CO, Rice husk, LNG, Heavy oil flame

1. 서론

연소기술은 산업 활동의 기본이 되는 에너지 공급 방법으로서 공해물질의 생성억제와 관련하여 선진 기술 개발이라는 난제를 안고 있다. 환경문제가 전 관심사가 되어 모든 경제 활동이 환경보존의 틀 안에서 이루어지는 추세이며, 특히 여러 지구 환경 변화 협약 회의에서 규제치 등이 구체화되면서 이는 경제적 중요성까지 지니게 되었다.

중유는 현재 산업용 보일러나 공업로의 연료로 주로 사용되며, 비교적 낮은 가격으로 인해 그 활용도가 높은 연료이다. 그러나 중유 연소는 soot particle 이나 NOx 등 환경문제에서 불리한 연료이다. 이에 따라 중유를 사용하는 경우 경제적인 방법으로 유해가스를 대폭 저감하여 환경규제에 적극 대응할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

재연소(Reburning) 방법은 생성된 NOx를 로내에서 후처리하는 방식으로 적용이 쉽고, 투자비 및 유지비가 비교적 저렴하여 최근 선호되는 NOx 저감 방법 중 하나이다. 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 화학적 반응을 유도하는 방법이다. 재연소 방법은 40~60%의 NOx 저감이 가능한 것으로 보고되고 있다[1]. 바이오매스를 재연소 연료로 사용하는 바이오매스 재연소(Biomass reburning)는 지구온난화 문제와 대체 에너지 사용 등과 맞물려 최근 개발되는 재연소 기술 분야중 하나이다. 1990년대 중반 Brouwer et al. 이 재연소 연료로 목재를 사용하는 시도를 시작하며, 바이오매스 재연소가 대두되기 시작하였다[2,3]. 이후 주로 목재류를 대상 재연소 연료로 하여 다양한 연구가 진행되었으며, 2000년대에 들어서는 폐기성 유기물이나 동물의 배설물 등으로 적용 대상이 다변화되는 추세이다. 최근, Duan et al.[4]은 바이오

* 한국생산기술연구원 고온생산기술연구부

† 연락저자, cylee@kitech.re.kr

매스 가스화 과정에서 발생한 바이오가스(Biogas)를 이용한 재연소 방법을 시도하였고, Carlin et al[5]은 축우장에서 발생하는 퇴비를 이용한 바이오매스 재연소를 시도하여 석탄 화력 발전 플랜트에 적용하기도 하였다. Cosaca와 Costa[6]는 고체 바이오매스를 재연소 연료로 사용하여 입자 크기에 따른 NOx 저감 효과를 분석하였다.

현재, 국내에서는 연간 100만톤 내외의 왕겨가 생산되어지나, 폐기물로 취급되어 대부분 폐기되고, 일부는 퇴비로 사용되고 있다. 그러나, 왕겨는 탄화수소물이므로 이를 재연소 연료로 사용하면 환경·에너지 측면에 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 저 NOx 연소기가 적용된 중유화염 연소로에서 LNG와 왕겨 분말을 사용하는 재연소 방법에 의한 NOx 저감 효율을 비교하고자 하였으며, 이를 통해 왕겨 분말을 사용하는 바이오매스 재연소의 효율성을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

연소 실험을 위해 최대 500,000 kcal/hr급 규모의 수평형 연소로가 사용되었다. 연소기에 공급되는 연료는 중유가 사용되었으며, 재연소 시스템에 적용되는 재연소 연료는 왕겨분말과 LNG가 사용되었다. 산화제로는 공기를 사용하였다. Fig. 1에 바이오매스 재연소 시스템 개념도를 나타내었다.

2.1.1 연소기

400,000 kcal/hr급 공기/연료 다단 연소 형태의 중유연소기가 설계, 제작되었다. 공기는 선회기를 통해 선회유동을 가지는 1차 공기와, 선회기를 거치지 않는 2차 공기로 나누어진다. 1차 공기는 전체 공기량의 70%를 차지하며, 30%의 2차 공기는 축과 수평 방향을 이루는 형태로 1차 공기 주변으로 공급된다. 연료도 2단으로 나누어 공급되어지는데, 1차 연료는 중앙의 노즐을 통해 분무되고, 전체 연료량의 30%를 차지하는 2차 연료는 쉘(Qural) 내부에 설치된 연료라인을 거쳐 예열되며, 환형을 이루는 6개의 보조노즐을 통해 공급된다.

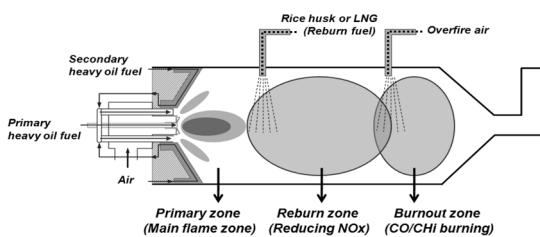


Fig. 1. Schematics of biomass reburning system.

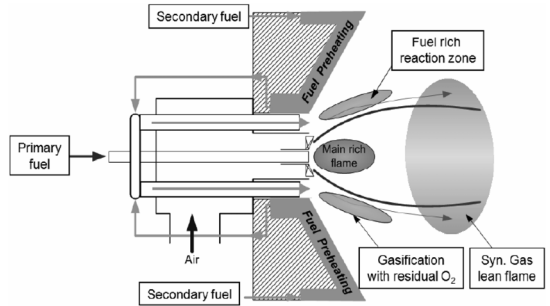


Fig. 2. Schematic diagram of heavy oil burner.

2차 연료의 예열은 별도의 가열장치 없이 연소로 내 자체화염의 복사 및 대류열전달을 통해 이루어지도록 설계되었다.

Fig. 2에 연소기의 구조를 나타내었다. Fig. 2 그림에서와 같이 공기/연료 다단 구조를 통해 부분적인 연료 농후와 연료 희박 반응영역을 조성하는 형태이며, 2차 연료의 예열로 인해 그 반응구조가 보다 쉽게 유도되도록 설계되었다.

2.1.2 입자 공급장치

재연소 연료로 사용하는 왕겨분말의 공급을 위해 입자 공급장치를 설계, 제작하였다. 스크류 타입의 장치이며, 분말 저장고 하단 스크류의 회전속도를 조절하여 분말의 이송량 조절이 가능하다. 저장고로부터 이송된 분말은 공기에 실어져 재연소 노즐을 지나 연소로 내부로 공급된다. Fig. 3은 입자 공급 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

재연소 노즐에서 재연소 연료가 분사되기 10cm 이전 이송라인에는 concentrator를 설치하여 연료 분말의 균일한 혼합을 유도하였다. Fig. 4는 재연소 노즐의 모습이다.

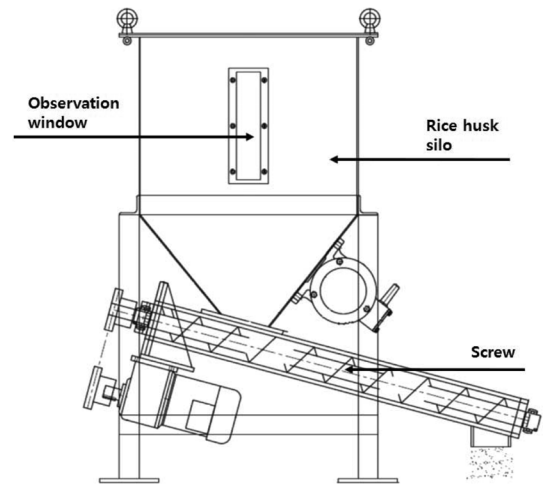


Fig. 3. Particle feeder.

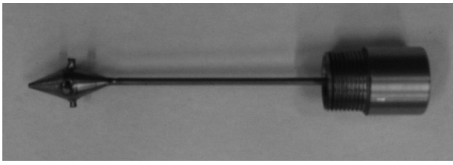


Fig. 4. Nozzle and concentrator.

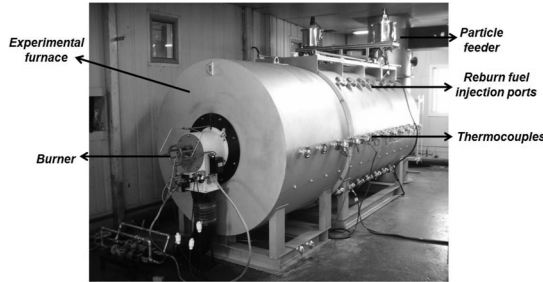


Fig. 5. Experimental setup.

2.1.3. 연소로

Fig. 5는 연소로 및 전체 실험 시스템을 나타내고 있다. 원통형 구조의 연소로는 외부지름 및 길이가 각각 1.6 m, 4 m이며, 내부는 0.2 m 두께의 내열 캐스타블이 설치되어 있다. 연소로 외부는 벽면 온도 및 내부 온도 분포 측정을 위한 다양한 크기의 측정구가 0.3 m 간격으로 설치되어 있으며, 배기구에는 가스 분석기 프로브 삽입을 위한 측정구를 설치하여 실험 데이터를 확보하도록 하였다. 또한, 재연소 연료 및 과급공기를 다양한 위치에서 공급할 수 있도록 일정간격으로 공급구들을 배치하였다.

2.2. 계측장비

포집가스는 Electro Chemical 센서 타입의 이동형 가스 분석기(TESTO 350)를 사용하여 실시간 분석하였다. 산소농도 및 NO, NO₂, CO의 공해물질의 측정이 가능하다. 연소로 배구에 프로브를 삽입하여 가스 시료를 채취하며, 내부에서 수분(H₂O)을 제거하고 성분을 측정한다. 채집된 배기가스의 채집관 및 기기 내에서의 응축수분에 의한 용해는 극히 작으므로 무시하였으며, 일부의 NO가 포집관 내에서 NO₂로 전이될 수 있으므로[7], 전체 NOx 량 데이터를 중심으로 실험 및 분석이 진행되었다.

열전대는 K-type과 R-type의 두 종류가 사용되었다. 복사에 의한 손실은 보정하지 않았다. 고온에서 선형적 특성을 가지는 R-type은 연소로 내부의 온도를 측정하는데 사용되었으며, 정상상태 확인을 위한 벽면온도의 측정에는 K-type 열전대가 사용되었다.

2.3. 실험조건

실험을 위하여, 0.2 wt%의 질소성분이 함유된 중

유가 주연료로 사용되었다. 또한, LNG와 왕겨분말을 재연소 연료로 사용하여, 기체 연료와 바이오매스 연료의 재연소 효과를 비교, 분석하였다. 사용된 LNG와 왕겨분말의 정확한 성분을 파악하기 위하여 공급업체로부터 성분 분석 및 물성치를 제공 받았으며, 이를 Table 1, 2에 나타내었다.

연구에서는 크게 2가지 실험 조건을 고려하였다. 모든 실험에서 연소기에 공급되는 중유의 양은 380,000 kcal/hr로 일정하게 하여 주화염의 발열량은 동일하게 유지하였다. 재연소 연료의 경우 기체와 고체 연료가 사용되므로, 발열량을 기준으로 하여 같은 양을 공급하여 비교하였다. 재연소는 연료 농후인 재연소 영역이 형성되므로, 후류에 과급공기를 다시 한번 공급하여 미연탄화수소나 CO의 산화반응을 유도하여야 한다. 본 실험에서는 재연소 연료량 증감의 경우, 과급공기의 양도 같은 비율로 증감하여, 모든 경우에서 배기구 O₂ 농도는 2.8~3.2%로 유지되었으며, 측정된 NO_x, CO의 값은 배가스 O₂ 농도 4%의 값으로 변환되어 결과 분석에 사용되었다. 가스분석값의 측정 오차는 5% 이내이며, 모든 측정값 중 오류테이터는 Chauvenet's criterion에 의해 제외되었다[8].

Table 1. Properties of LNG

Component (mol %)	CH ₄	90.16
	C ₂ H ₆	6.16
	C ₃ H ₈	2.41
	i-C ₄ H ₁₀	0.53
	n-C ₄ H ₁₀	0.56
	i-C ₅ H ₁₂	0.03
	n-C ₅ H ₁₂	0.01
WI		13,300
Specific gravity		0.62
Heating value (kcal/Nm ³)		10,500

Table 2. Properties of rice husk

Component	Moisture (wt%)	6.3
	Fat (wt%)	0.2
	Lignin (wt%)	20.6
	Cellulose (wt%)	59.9
	Ash (wt%)	13.2
Mean particle size (μm)		209
Specific surface area (m ² /g)		0.66
Real density (g/cm ³)		0.88
Bulk density (g/cm ³)		0.52
Heating value (kcal/kg)		3,888

Table 3. Experimental conditions

Case	Thermal input (kcal/hr)		Equivalence ratio (Ω)			Reburn fuel fraction
	Primary fuel	Reburn fuel	Primary zone	Reburn zone	Burnout zone	
1	380,000	67,000	0.86~0.90	1.01~1.05	0.86	0.15
2	380,000	0~95,000	0.88	0.88~1.09	0.86	0~0.2

Case 1은 연소기에 의해 형성되는 주화염의 당량비를 변화하여 재연소 효과를 비교한 것이다. 재연소에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나가 각 영역에서의 산소 농도이므로, 초기 화염에서의 당량비를 조절하여 재연소 영역의 산소 농도가 변화하도록 설정한 실험 조건이다.

Case 2는 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)를 다양하게 하여 공급된 재연소 연료의 NOx 저감 효과 및 공급 한계점을 관찰하기 위한 실험 조건이다. 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)는 재연소 연료의 발열량을 기준으로 아래와 같이 정의된다.

Reburn fuel fraction =

$$\frac{\text{Thermal input value of plied reburn fuel}}{\text{Total thermal input value of plied fuel}}$$

Table 3에 전체 실험조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염 및 내부온도 특성

Fig. 6(a), (b)는 연소기에 의해 생성된 화염의 모습을 연소로 측면 관측창에서 촬영한 것이다. Fig. 6(a)는 연소기 중앙의 노즐만을 사용한 화염의 모습이며, Fig. 6(b)는 중앙 노즐과 연소기 외곽의 6개 보조 노즐을 이용하여 2단으로 나누어 분사한 모습이다. 연료를 2단으로 나누어 공급한 경우, 화염이 지연되어 길어지고 넓은 면적을 이루어 고온열점(hot spot) 억제에 효과적이며, NOx 생성 억제에 유리하다.

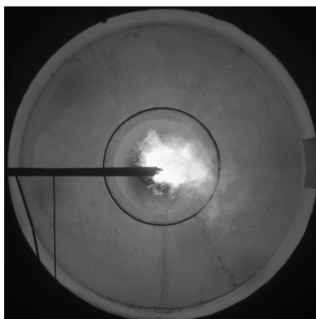
Fig. 7(a)~(c)는 연소로 내부를 연소로 후단 관측창에서 촬영한 것이다. Fig. 7(a)는 재연소를 하지 않은 경우의 연소로 내부의 모습이고, Fig. 7(b)는 LNG를 재연소 연료로 공급한 경우이다. 재연소의 경우 공급된 재연소 연료가 화염을 생성하지 않고 재연소 반응 또는 산화반응을 하므로 화염의 변화는 거의 관찰되지 않는다. 그러나 재연소 연료가 공급되어 연소로 내부에 연료 농후 영역이 형성되었고, 그로 인해 미연 재연소 연료에 의한 연기가 발생하여 내부가 일부 흐려진 것이 관측된다. 이에 반해 Fig. 7(c)는 왕겨분말을 재연소 연료로 공급한 경우이다. 공급된 분말에 의해 연료 농후 영역이 형성되어 미



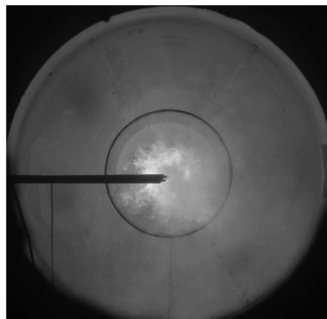
(a)



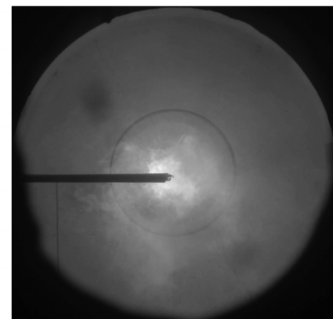
(b)

Fig. 6. Sideview of flames.

(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Features of flames.

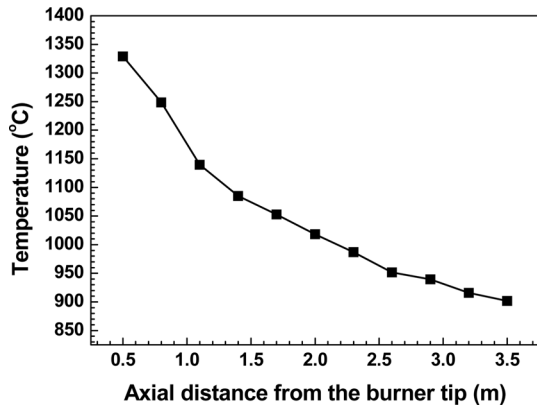


Fig. 8. Temperature distribution along the axial direction.

연 연료에 의한 연기가 발생함과 동시에, 반응 전 입자에 의한 산란 및 반응 후 ash 성분 등에 의해 전체적으로 더욱 흐린 모습이 관찰된다.

Fig. 8은 재연소 연료를 공급하지 않은 상태로 연소기의 화염에 의해 형성된 연소로 내부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 재연소는 연소로 내부의 온도 조건에 의해 NOx 저감 반응과 CO 산화 반응 여부가 결정될 수 있으므로, 연소로 내부의 온도 분포 확인은 중요한 의미를 가진다. 연소로 내부의 온도를 관측하여 재연소 연료 분사 지점과 과급 공기 공급 지점을 결정할 수 있기 때문이다. Fig. 8을 보면 연소로 후단에서도 900°C 이상의 온도가 관찰된다. 재연소에 의한 NOx 저감반응이나 과급공기 공급에 의한 CO 산화반응을 유도하기에 충분한 온도로 판단된다.

3.2. 당량비 변화에 의한 LNG와 왕겨분말의 재연소 효과 비교

본 실험은 Case 1의 실험조건에서 수행된 것으로, 재연소 연료비는 0.15로 고정되었다. 재연소 연료는 연소기 끝단으로부터 축방향으로 1.7 m의 거리에서 분사되었으며, 과급공기는 3.2 m 지점이다. 연소기에서 생성되는 화염의 당량비를 변화시키며 실험을 수행하였고, 재연소 연료의 공급량은 일정하기 때문에, 초기 주화염영역에서의 당량비가 변화되면, 재연소 영역의 당량비도 함께 변화하게 된다.

Fig. 9는 화염의 당량비 변화에 대한 연소장 내부의 온도를 분석하여 나타낸 것이다. 전체적으로 연소로 내부의 온도분포는 큰 차이가 없으며, 과급공기가 분사되는 시점인 3.2 m 부근의 일시적 온도 하락 현상도 동일하게 관측된다. 재연소 연료가 공급되지 않은 Fig. 8의 온도분포와도 큰 차이는 없으나, 재연소 연료 공급에 의해 전체적으로 각 측정지마다 10~20°C 정도의 온도 상승이 관찰된다.

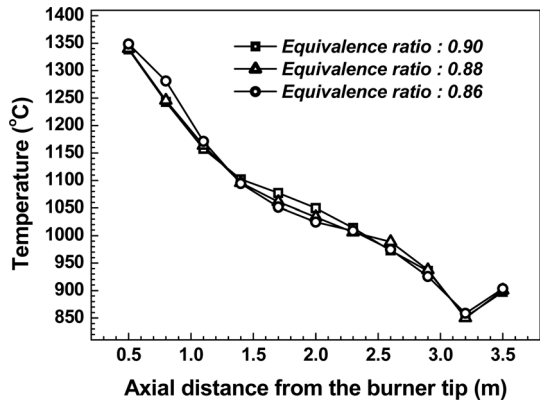
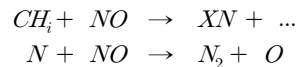


Fig. 9. Effect of equivalence ratio on temperature distribution.

Fig. 10은 당량비 변화에 따른 NOx 저감율을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 재연소 연료가 LPG와 왕겨분말인 경우 모두에서, 당량비 증가에 따라 NOx 저감율이 증가함을 알 수 있다. 그 차이도 14~15% 수준으로 작은 당량비 변화에도 민감한 증감을 보인다. 이는 재연소에 의한 NOx 저감 반응에 유리하도록 산소 농도가 줄어들었기 때문이다.

아래의 재연소 반응 메커니즘을 살펴보면[9], 먼저 재연소 연료의 열분해나 부분산화에 의해 탄화수소계열의 라디칼이 생성된다. 생성된 탄화수소계열의 라디칼은 NO와 반응하여 HCN과 같이 XN 형태의 라디칼로 전환된다. 이러한 XN 형태의 라디칼들의 환원반응이나 아래 두 번째 식의 N과 NO의 반응은, 무산소 조건에서 Zeldovich 반응의 역방향으로 진행하여 N₂로 환원될 수 있다. 재연소도 SNCR과 마찬가지로 반응 영역에서의 산소농도나 온도가 매우 중요하며, 당량비 증가는 산소농도의 감소를 의미하므로, NOx 저감에 보다 유리하게 작용하게 된다.



또한, Fig. 10에서 보면 모든 실험 조건에서 재연소 연료를 왕겨 분말로 사용했을 경우가 천연가스를 재연소 연료로 사용한 경우에 비해 높은 NOx 저감 효과를 나타냄이 확인된다. 천연가스를 재연소 연료로 사용했을 경우, 44~59%의 NOx 저감율을 나타내었으나, 왕겨분말인 경우 48~62%의 NOx 저감 효과를 나타내었다. 이는 고체 연료인 왕겨 분말이 가스 연료에 비해 같은 발열량의 연료량을 공급하여도 보다 많은 CH_i 라디칼이 생성 가능하기 때문이다. 왕겨분말이 재연소 연료로 투입되어 고온에서 열분해되고 재연소 반응에 참여하는 다량의 CH_i를 생성한 것으로 분석된다.

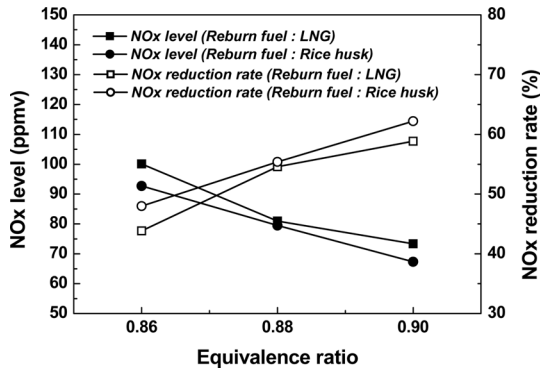


Fig. 10. Effect of equivalence ratio on NOx reduction.

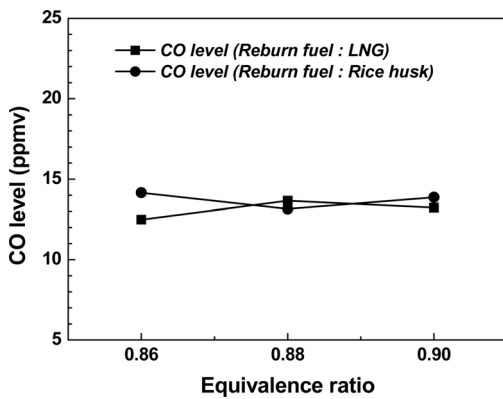


Fig. 11. Effect of equivalence ratio on CO emission.

Fig. 11은 당량비 변화에 의한 CO 발생 정도를 확인한 것이다. Case 1의 전체 실험조건의 배기구에서 측정된 CO는 12~14 ppm 수준으로, 재연소 공급 이전 연소기에서 발생한 CO가 11 ppm 수준임을 감안하면, 재연소에 의한 CO의 증가는 거의 없는 것으로 분석된다. 과급공기에 의한 미연 탄화수소나 CO의 산화도 원활히 이루어진 것이다.

3.3. 재연소 연료비 변화에 의한 LNG와 왕겨분말의 재연소 효과 비교

Case 2는 재연소 연료비를 변화시키며, LNG와 왕겨분말의 재연소 효과를 비교한 실험조건이다. 본 실험조건에서는 주화염영역에서의 당량비는 0.88로 일정하게 유지하고, 재연소 연료비 변화에 의해 재연소 영역의 당량비는 0.88~1.09로 변화하게 된다. 재연소 연료는 case 1과 같은 형태로, 재연소 연료는 연소기 끝단으로부터 축방향으로 1.5 m 거리의 지점에서, 과급공기는 3.2 m 지점에서 공급된다.

Fig. 12는 재연소 연료비에 따른 온도분포 특성을 나타낸 것으로, 재연소 연료비 증가에 따라 전체적인 온도 분포가 약간씩 상승함을 알 수 있다. 이는 재연소 연료의 추가공급에 의한 효과로, 일반적인

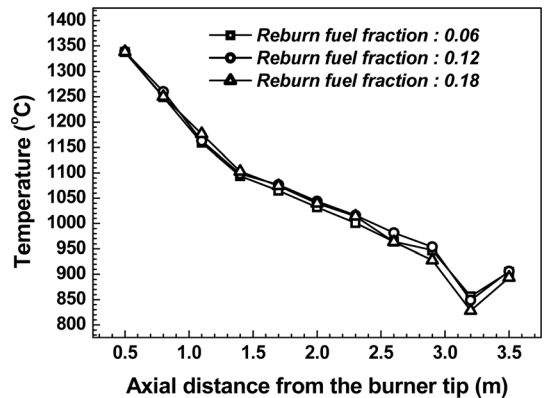


Fig. 12. Effect of reburn fuel fraction on temperature distribution.

재연소의 경향이다.

Fig. 13은 재연소 연료비 변화에 따른 NOx 저감 효과를 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 재연소 연료비가 0~0.18 정도에서는 LNG와 왕겨분말을 사용했을 경우 모두, 재연소 연료비에 비례하여 NOx의 저감율이 증가한다. 이는 3.2 단락에서 설명한 재연소 영역 내의 주요 반응 메커니즘에 의해 진행되었다고 볼 수 있다. 재연소 반응은 재연소 연료로 분사된 탄화수소계열 연료가 열분해하는 과정에서, 발생한 CH₄ 계열의 라디칼들이 NO와 반응하여 HCN을 형성하고, HCN는 다시 O, OH 등과 반응하여 N₂로 환원하는 일련의 과정이다. 그러나 산소가 충분한 연료 희박 조건에서는 CH₄ 계열의 라디칼들이 오히려 산소 원자와 결합하여 CO를 생성하거나 HCN 등의 성분이 다시 NO로 산화할 수 있기 때문에, 재연소 영역에서의 연료 농후 조건은 필수적이다. 결국 재연소 연료 공급량의 증가는 일차연소 영역에서 발생한 NO가 재연소 영역에서 N₂로 환원 되도록 주도하는 CH₄ 라디칼들의 증가와 동시에 산소농도의 저감을 가져오게 되며, 이로 인해 NOx 감소율이 증가하는 것이다.

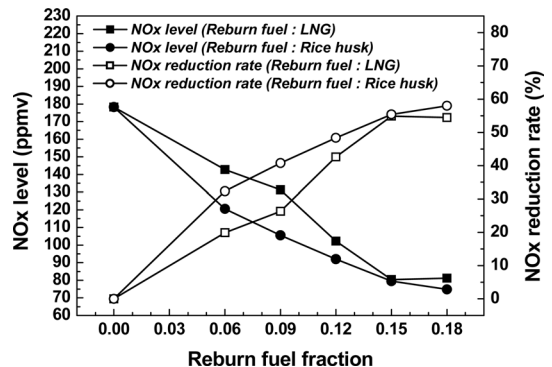


Fig. 13. Effect of reburn fuel fraction on NOx reduction.

Fig. 13에서 재연소 연료를 천연가스로 사용한 경우, 최대 54%의 NOx 저감율을 보였다. 재연소 연료비는 0.18 전후가 재연소 한계점으로 보이며, 더 이상의 재연소 연료를 투입하여도 보다 높은 NOx 저감은 기대하기 어려우며, CO 생성이 증가할 것으로 파악된다.

재연소 연료를 왕겨 분말로 사용한 경우, 최대 58%의 NOx 저감율로 천연가스를 사용한 경우에 비해 4% 정도 더 효율적으로 나타났다. 또한, 현재 실험에서는 재연소 연료비 증가에 따라 NOx 저감율 상승이 점점 둔해지기는 하나 여전히 상승하고 있는 경향이며, 재연소 연료비를 0.2 이후로 증가시키면 CO가 급증하여 NOx 량의 신뢰성이 확보될 수 없었다. 일반적인 재연소 연구에서 재연소 연료비 0.2~0.25 내외로 CO가 크게 증가하지 않는 상황에서 NOx 저감율이 일정해지는 지점이 나타나는데 반해[10], 본 연구에서는 그러한 경향을 확인할 수 없는 것으로 보아, 공급된 왕겨분말 연료가 충분한 반응을 하지 못한 것으로 파악된다. 이는 가스연료와 고체연료의 반응속도의 차이에서 비롯된 것으로, 왕겨분말의 경우에는 재연소 영역에서의 체류시간이 충분한 열분해 및 재연소 반응을 이루기에 부족한 것이다. 결국 왕겨분말을 사용하는 경우, 충분한 재연소 영역이 확보되어 재연소 연료의 체류시간을 늘리거나, 높은 온도조건이 형성되어 빠른 열분해 및 재연소 반응이 일어난다면, 현재의 연구 결과보다 높은 NOx 저감도 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 14는 재연소 연료비 변화시의 CO 발생량 변화를 보여주고 있다. 현재 실험조건에서는 재연소 연료비가 증가함에 따라 CO 발생이 미미하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 재연소 연료비가 증가하면 국부적인 연료 농후 영역이 확장되면서 반응 영역내의 산소가 부족하게 되고, 산화 반응을 하지 못한 CO가 증가하는 것으로 파악된다. 그러나, 최

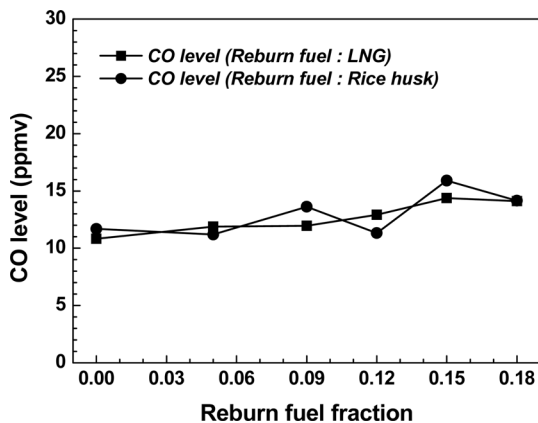


Fig. 14. Effect of reburn fuel fraction on CO emission.

대 16 ppm 수준으로, 주연료로 중유, 재연소 연료로 고체연료가 사용되었음을 고려하면 낮은 수치이다. 내부가 축열제인 캐스타블로 이루어진 연소로의 특성으로 인해, 연소로 후류까지 CO가 산화될 수 있는 충분한 온도가 유지되어 CO 산화가 원활히 유도된 것으로 파악된다.

4. 결론

본 연구에서는 중유 화염 연소로에서 천연가스와 왕겨분말을 재연소 연료로 사용하여 재연소 효과를 관찰, 비교하였으며, 몇 가지 실험을 통해 발생한 NOx를 연소로 내 후처리 기법인 재연소 방법을 적용하여 최소화하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 정리하였다.

- 1) 왕겨 분말과 같은 바이오매스 연료도 재연소 연료로 사용가능하며, 중유를 연료로 사용한 연소로에서 최대 62%의 NOx 저감에 성공하여, NOx 배출량을 67 ppm까지 억제하였다.
- 2) 왕겨 분말의 재연소 연료로의 사용은 LNG를 재연소 연료로 사용한 것에 비해 높은 NOx 저감이 가능하다. 그러나, 원활한 재연소 효과 구현을 위해서는 재연소 연료의 충분한 체류시간이나 높은 온도 조건이 확보가 필수적이다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원 에너지·자원기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Smoot, L. D., Hill, S. C. and Xu, H., "NOx control through reburning," *Progress in energy and combustion science*, Vol. 25, No. 5, 1998, pp. 385-408.
- [2] Brouwer, J., Owens, W. D., Harding, N. S. and Heap, M. P., "Co-firing Waste Biofuels and Coal for Emissions Reduction," *Proceedings of the Second Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture, and Industry*, National Renewable Energy Laboratory, 1995, pp. 390-399.
- [3] Brouwer, J., Harding, N. S. and Owens, W. D., "The Use of Wood as a Reburning Fuel in Combustion Systems," *Proceedings of the Sixth National Bioenergy Conference, Bioenergy '94*, Vol. 1, 1994, pp.123-130.

- [4] Duan, J., Luo, Y. H., Yan, N. Q. and Chen, Y., "Effect of Biomass Gasification Tar on NO Reduction by Biogas Reburning," *Energy & Fuels*, Vol. 21, 2007, pp. 1511-1516.
- [5] Carlin, N. T., Annamalai, K., Harman, W. L. and Sweeten, J. M., "The Economics of Reburning with Cattle Manure-Based Biomass in Existing Coal-Fired Power Plants for NO_x and CO₂ Emissions Control," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 33, 2009, pp. 1139-1157.
- [6] Casaca, C. and Costa, M., "NO_x control through reburning using biomass in a laboratory furnace: Effect of particle size," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No. 2, 2009, pp. 2641-2648.
- [7] Drake, M. C., Correa, S. M., Pitz, R. W., Shyy, W. and Fenimore, C. P., "Superequilibrium Thermal Nitric Oxide Formation in Turbulent Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 69, 1987, pp. 347-365.
- [8] Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 2001.
- [9] 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.
- [10] Nimmo, W., Singh, S., Gibbs, B. M. and Williams, P. T., "The Evaluation of Waste Tyre Pulverised Fuel for NO_x Reduction," *Fuel*, Vol. 87, 2008, pp.2893-2900.

접수일 : 2009. 11. 10
심사완료일 : 2009. 12. 25