

## 경유 화염에서 왕겨를 이용한 바이오매스 재연소의 NO<sub>x</sub> 저감 효과

김세원\* · 신명철\* · 이창엽\*\*

### The Effect of Biomass Reburning with Rice Husk on NO<sub>x</sub> Reduction in Light Oil Flame

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

#### ABSTRACT

Reburning is one of the most useful technologies for reducing nitric oxide in economically and technically. The reburning process was demonstrated as an effective NO<sub>x</sub> reduction method through injection of a secondary hydrocarbon fuel. An experimental study has been conducted to evaluate the effect of biomass reburning on NO<sub>x</sub> and CO formation in a light oil flamed combustion furnace. Reburning tests on NO<sub>x</sub> reduction of air-carried rice husk powder as the reburn fuel and light oil as the main fuel were performed in flames stabilized by a co-flow swirl and fuel staged burner, which was mounted at the front of the furnace. The results included flue gas emissions and temperature distribution in the furnace for several kinds of experimental conditions. It was observed clearly that NO<sub>x</sub> concentrations in the exhaust have considerably decreased due to effect of biomass reburning. The maximum NO<sub>x</sub> reduction rate was 42% when the reburn fuel fraction was 0.18. The CO emissions were kept under 42 ppmv in all experimental tests. And this paper makes clear that in order to decrease NO<sub>x</sub> concentration in the exhaust when the biomass reburning system is adapted, the control of some factors such as reburn fuel fraction and reburn zone fraction is very important.

**Key Words** : Biomass reburning, NO<sub>x</sub>, CO, Rice husk, Light oil flame

#### 기 호 설 명

##### Alphabets

$S$  : Swirl number

$d$  : Diameter of nozzle

$d_h$  : Diameter of vane hub

##### Greeks

$\theta$  : Vane angle

## 1. 서론

대기 중의 질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 광화학 스모그 및 산성비의 원인이 되어 동식물에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 다른 공해물질에 비해 감소 기술이 어렵고 생성기구가 매우 복잡하다. 질소산화물의 증가에는 자연적인 요인도 존재하지만 인간의 주된 에너지원인 탄화수소계열의 화석연료 연소 후 생성물에 의한 발생이 주요 원인으로 보고되고 있어, 지난 수십 년 동안 산업화된 국가들에서는 NO<sub>x</sub>의 배출에 관한 규제를 법률로 제정하여 왔으며 배출 제한 한계는 계속 낮아지고 있는 실정이다.

NO<sub>x</sub>를 저감하는 연소기술에는 크게 두 가지 방식이 사용된다. 화염대의 산소 농도나 온도 조건을 조절하여 NO<sub>x</sub> 발생을 억제하는 방식과, 발생된 NO<sub>x</sub>를 연소 후단에서 제거하는 후처리 방식이 있다.

화염대에서 NO<sub>x</sub> 발생을 억제하는 대표적인 방식으로는 배기가스 재순환(FGR, Flue Gas Recirculation), 공기/연료 다단연소(Air/Fuel Staged Combustion), 공기/연료 다단연소(Air/Fuel Staged Combustion) 등이 있다. 이 중 공기다단연소는 산화제인 공기를 여러 단계로 나누어 분사함으로써 연소반응을 억제하고 화염의 고온부 온도를 낮춤으로써 Thermal NO<sub>x</sub>와 Fuel NO<sub>x</sub>의 효율적인 저감에 효과가 있다고 알려져 있다. 후처리 방식으로는 선택적 촉매 환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction)과 선택적 무촉매 환원법(SNCR, Selective Non-Catalytic Reduction)이 대표적이다. SCR은 NO<sub>x</sub> 저감 효율이 매우

\* 한국생산기술연구원 고온생산기술연구부

† 연락처, cylee@kitech.re.kr

높아 상업용 설비로 사용되고 있으나, 높은 초기 투자비 및 시설유지비로 인한 경제성 문제가 있다. 이에 비해 촉매를 사용하지 않는 SNCR은 설치비 및 유지비는 상대적으로 적으나, 적정 작동 환경 및 온도 조건이 갖추어져야 한다[1,2].

이에 반해 재연소(Reburning) 방법은 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 한다. 재연소 방법은 40~60%의 NOx 저감이 가능하며, SOx의 저감에도 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[3-5].

바이오매스를 재연소 연료로 사용하는 바이오매스 재연소(Biomass reburning)은 지구온난화 문제와 대체 에너지 사용 등과 맞물려 최근 개발되는 기술 분야 중 하나이다. 1990년대 중반 Brouwer et al.[6,7]이 재연소 연료로 목재를 사용하는 시도를 시작하며, 바이오매스 재연소가 대두되기 시작하였다. 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.[8]은 바이오매스 가스화 과정에서 발생한 바이오가스(Biogas)를 이용한 재연소 방법을 시도하였고, Carlin et al.[9]은 축우장에서 발생하는 퇴비를 이용한 바이오매스 재연소를 시도하여 석탄 화력 발전 플랜트에 적용하기도 하였다.

본 연구는 왕겨 분말을 사용하는 재연소 방법에 의한 NOx 저감 효율을 파악하고자 하였으며, 중소형 산업용 연소로 적용을 목적으로 그 효율성을 분석하고, 최적 방법을 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

실험에는 최대 500,000 kcal/hr급 규모의 연소로와 연소기가 사용되었다. 주연료는 경유가 사용되었으며, 재연소 연료는 왕겨분말, 산화제는 공기를 사용하였다. 재연소에 의한 NOx 저감 효과의 상대적인 비교를 위해, 현재 재연소 연료로 가장 많이 사용되고 있는 천연가스도 실험에 사용하였다.

Fig. 1에 전체 실험 구성도를 개략적으로 표현하였다. 그림에서 Air 1은 과급공기를 공급하기 위해 사용되었으며, Air 2는 왕겨분말 공급을 위한 이송용 공기이다. LNG 공급장치 및 라인은 LNG를 재연소 연료로 하는 비교실험이 수행될 때 사용되었다.

#### 2.1.1. 연소로

Fig. 2는 연소로의 형태를 나타내고 있다. 원통형 구조의 연소로는 외부지름 및 길이가 각각 1.6 m 및 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 과

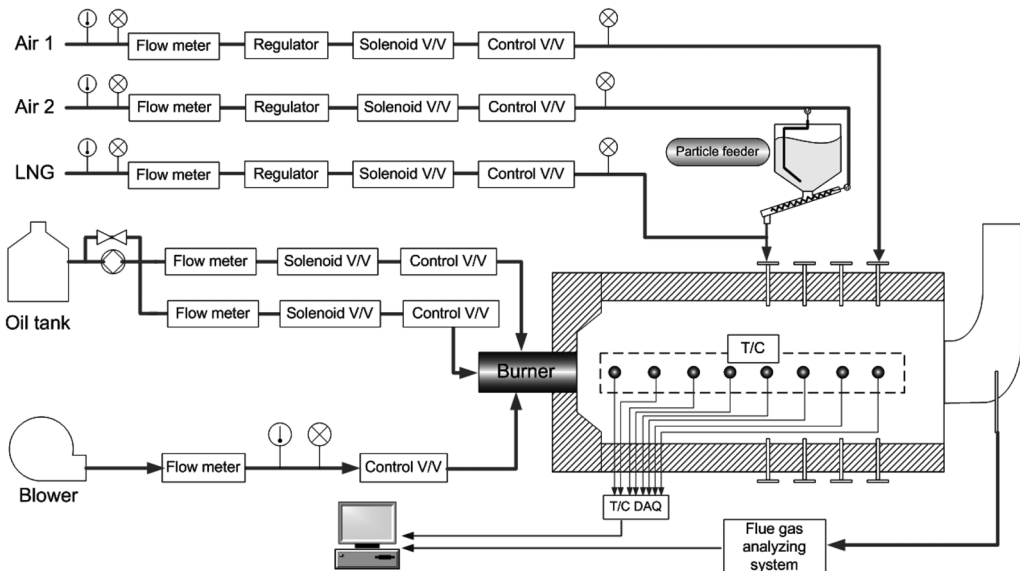


Fig. 1. Experimental setup.

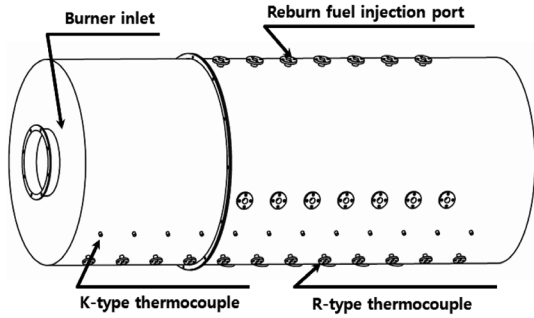


Fig. 2. Furnace.

급공기를 다양한 위치에서 공급할 수 있도록 0.3 m 간격으로 공급구들을 배치하였다.

2.1.2. 연소기

Fig. 3에서 연소기의 구조를 표현하였다. 확산화염을 생성하기 위해 동축관의 형태로 제작되었다. 주연료는 연소기 중앙의 노즐을 통해서 분무되어 진다. 주연료 노즐을 중심으로 공기가 2단으로 공급되며, 연소기 전체 공기 공급량의 70% 정도를 차지하는 1차 공기는 선회기(Swirlor)를 통해 선회유동을 형성하며 공급되고, 나머지 30%의 2차 공기는 1차 공기의 바깥쪽 동심원을 이루며 연소로 축방향으로 공급된다. 보조연료는 연소기 전체 공급 연료량의 30%를 차지하며, 2차 공기 바깥쪽으로 환형을 이루는 6개의 노즐에서 분사된다. 연소기는 연소로 전면 에 장착하였으며, 화염은 지면에 수평방향으로 연소로 축방향과 나란하게 형성된다. 1차 공기에 사용된 선회기는 radial flow guide vane 타입으로, 45°의 선회각을 가진다. 선회수(swirl number, S)는 0.8이며, 선회수의 계산은 다음 식 (1)을 사용하였다[10].

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

여기서, d는 노즐의 직경, d<sub>h</sub>는 vane hub의 직경, θ는 vane의 각도이다.

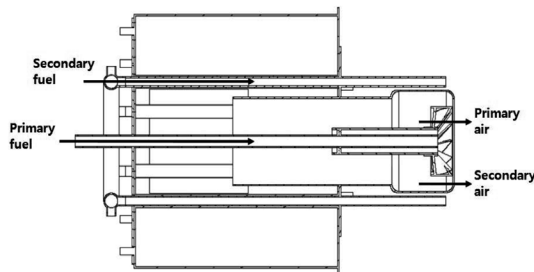


Fig. 3. Burner.

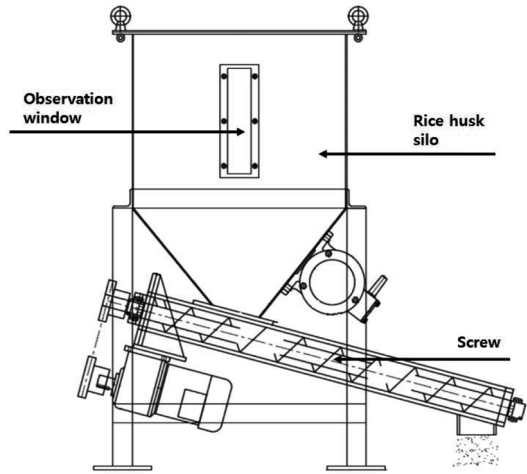


Fig. 4. Particle feeder.

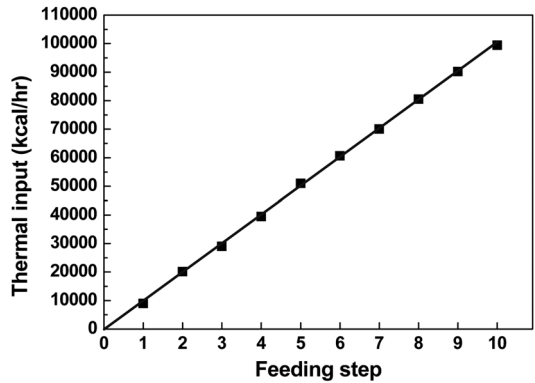


Fig. 5. Particle calibration graph.

2.1.3. 파티클 공급장치

재연소 연료로 사용하는 왕겨분말의 공급을 위해 파티클 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. 4에서 파티클 공급장치의 구성도를 나타내었다. Fig. 5는 회전수 단계와 그로 인해 공급된 왕겨분말의 발열량 관계를 그래프로 나타낸 것으로, 단계수 설정의 증가에 따라 선형적으로 공급량이 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

2.2. 계측장비

포집가스는 Electro Chemical 센서 타입의 이동형 가스 분석기(TESTO 350)를 사용하여 실시간 분석하였다. 산소농도 및 NO, NO<sub>2</sub>, CO의 공해물질의 측정이 가능하다. 연소로 배기구에 프로브를 삽입하여 가스 시료를 채취하며, 내부에서 수분(H<sub>2</sub>O)을 제

거하고 성분을 측정한다. 프로브는 고온 배기가스의 채집에 적합한 스테인레스 스틸 재질이 사용되었으며, 원형의 배기구 중심축 지점 및 반경 방향으로 0.1 m, 0.2 m 떨어진 지점의 총 3지점에서 측정값의 평균치를 결과데이터로 활용하였다. 채집된 배기가스의 채집관 및 기기 내에서의 응축수분에 의한 용해는 극히 작으므로 무시하였으며, 일부의 NO가 포집관 내에서 NO<sub>2</sub>로 전이될 수 있으므로[11], 전체 NOx 량 데이터를 중심으로 실험 및 분석이 진행되었다.

열전대는 K-type과 R-type의 두 종류가 사용되었다. 화염 및 화염 주위 등 연소로 내의 온도측정에는 표준 R-type 열전대를 사용하였다. 표준 R-type 열전대는 양극으로 Pt-13%Rh 소선을 사용하고, 음극으로는 Pt 소선을 사용하고 있다. 정상상태 확인을 위한 연소로 벽면온도의 측정에는 K-type 열전대가 사용되었다. 연소로 외벽에 구성되어 있는 직경 5 mm, 길이 0.1 m의 구멍에 열전대를 삽입하고 밀폐하는 방식으로, 총 12개의 K-type 열전대를 활용하여 정상상태를 확인하였다. K-type 열전대의 양극은 Ni-10%Cr 소선으로, 음극은 Ni-5%Al&Si 소선으로 이루어져 있다. 열전대 소선의 두께는 모두 0.8 mm이다.

### 2.3. 실험조건

왕겨분말에 의한 바이오매스 재연소 효과를 파악하기 위해 몇가지 기초 재연소 실험을 수행하여 결과를 도출하고자 하였다. 사용된 왕겨분말의 정확한 성분을 예상하기 위하여 공급업체로부터 성분 분석 및 물질치료를 제공 받았으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** 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 <sup>2</sup> /g)		0.66
Real density (g/cm <sup>3</sup> )		0.88
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )		0.52
Heating value (kcal/kg)		3,888

**Table 2.** Experimental conditions

Case	Thermal input (kcal/hr)		Equivalence ratio (Ω)			Reburn fuel fraction	Reburn zone fraction
	Primary fuel	Reburn fuel	Primary zone	Reburn zone	Burnout zone		
1	320,000	0~80,000	0.86	0.86~1.07	0.86	0~0.2	0.375
2	320,000	56,000	0.86	1.01	0.86	0.15	0.15~0.45

연구에서는 크게 2가지 실험 조건을 고려하였다. 모든 실험은 연소기에 공급되는 연료의 발열량을 320,000 kcal/hr로 고정하여 초기 화염 및 반응을 일정하게 설정하였다. 또한, 재연소 연료량 증감의 경우, 과급공기의 양도 같은 비율로 증감하여, 모든 경우에서 배기구 O<sub>2</sub> 농도는 2.8~3.2%로 유지되었으며, 측정된 NOx, CO 값은 배가스 O<sub>2</sub> 농도 4%의 값으로 변환되어 결과 분석에 사용되었다. 가스분석값의 측정 오차는 5% 이내이며, 모든 측정값 중 오류데이터는 Chauvenet's criterion에 의해 제외되었다[12].

Case 1은 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)를 다양하게 하여 공급된 재연소 연료의 기본 NOx 저감 효과 및 공급 한계점을 관찰하기 위한 실험 조건이다. 여기서 재연소 연료비(Reburn fuel fraction)는 아래 식 (2)와 같이 정의된다.

Reburn fuel fraction =

$$\frac{\text{Thermal input value of supplied biomass reburn fuel}}{\text{Total thermal input value of supplied fuel}} \quad (2)$$

Case 1의 실험에서는 재연소 연료비 변화에 따라 재연소 영역(Reburn zone)에서의 당량비가 변화된다. 초기 발열량, 주연소 영역(Primary zone)의 당량비, 재연소 영역비(Reburn zone fraction)와 같은 그 외의 모든 조건은 일정하게 유지된다.

Case 2는 공급된 바이오매스 재연소 연료가 고체 임을 고려하여 체류시간과 재연소 반응 영역에 대한 효과를 분석하기 위한 실험이다. 반응영역을 기준으로 하는 무차원 변수를 재연소 영역비로 식 (3)과 같이 정의하여 적용하였다.

Reburn zone fraction =

$$\frac{\text{Distance between reburn fuel injection and overfire air injection points}}{\text{Total length of reaction area restricted by furnace}} \quad (3)$$

Case 2에서는 재연소 연료비가 0.15로 일정하게 고정되며, 모든 영역에서의 당량비도 일정하게 유지된다.

Table 2에 전체 실험조건을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 연소로 내 온도분포 특성

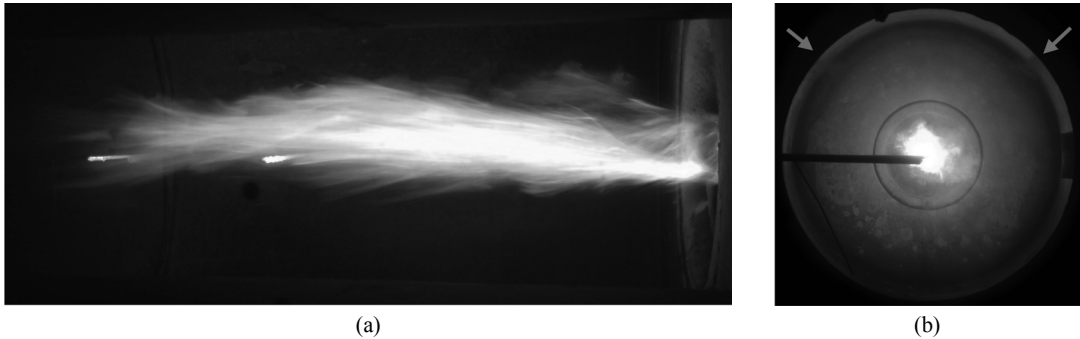


Fig. 6. Features of flame.

Fig. 6(a)는 연소기에 의해 생성된 화염의 모습을 연소로 측면 관측장에서 촬영한 것이다. 선회유동을 가지는 일반적인 경유화염의 모습이며, 가시화염의 길이는 연소기 끝단으로부터 약 1.5 m 내외이다. Fig. 6(b)는 재연소 연료 공급시에 연소로 후단 관측장에서 촬영한 것으로, 상부 화살표 위치에서 왕겨 분말이 유입되고 있는 것을 확인할 수 있다.

재연소 연료비 변화에 대한 연소장 내부의 온도를 분석하여 Fig. 7에 나타내었다(Case 1). 재연소 연료의 공급으로 인해 전체 온도장의 상승이 관찰되며, 그 효과는 재연소 연료비가 클수록 더 뚜렷하다. 후류에서는 재연소 연료 추가공급에 의한 온도의 상승효과가 둔화되며, 3.2 m 부분에서는 온도의 역전도 관찰된다. 이 위치가 재연소 연료 분사 후 후류에서 CO 및 미연 탄화수소 산화를 위한 과급공기의 공급 시점이기 때문이다. 재연소 연료비가 증가할수록 재연소 영역의 연료과농 상태는 높아지며, 이는 NOx 저감에는 유리하나 CO 및 미연 탄화수소의 배출 가능성이 커지는 것을 의미하므로 과급공기의 양도 보다 많이 필요해 지게 되어, 더 큰 폭의 온도 역전을 유도한다. 재연소 연료를 공급한 경우, 재연소 연료의 공급 시점인 1.7 m 부분보다 상류에서의 온도 상승도 관찰된다. 이는 연소기의 선회유동과 쉘(Quarl)에 의해 연소로 상류에 재순환 유동이 형성되었음을 의미한다. 공급된 재연소 연료의 일부가 재순환 유동과 함께 상류로 이동하여 연소반응과 온도상승에 기여한 것으로 파악된다.

Fig. 8은 재연소 영역비를 달리한 Case 2 실험에서의 연소로 내부 온도를 측정한 것이다. 모든 조건에서 재연소 연료비가 일정한 상태이므로 공급된 재연소 연료의 양은 동일하며, 재연소 영역비 증감에 의한 내부 온도장의 변화는 거의 미미하다. 결국, Fig. 7과 8은 재연소의 일반적인 경향을 잘 나타내고 있으며, Case 1, 2의 두 조건에서 배기가스 배출 경향을 통해 재연소 반응 효과를 분석함이 가능한 것으로 판단된다.

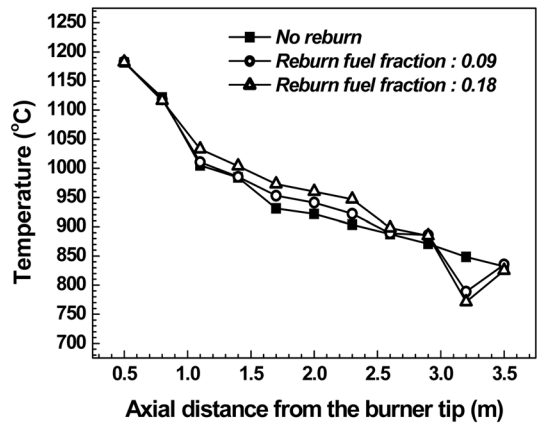


Fig. 7. Effect of reburn fuel fraction on temperature distribution.

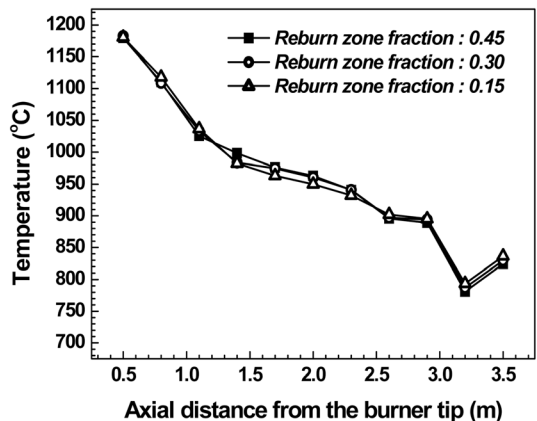


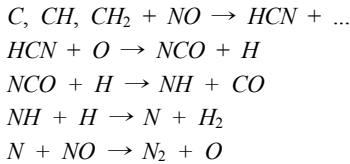
Fig. 8. Effect of reburn zone fraction on temperature distribution.

### 3.2. NOx 저감 특성

Fig. 9는 재연소 연료비 변화에 따른 NOx 저감 효과를 나타낸 것이다(Case 1). 현 실험에서, 일차 주 연소 영역에서는 당량비  $\Phi=0.86$ 의 연료 희박 조건을 유지시키고 재연소 영역비를 0.425로 고정하여,

국부적인 연료 농후 환경의 조성 및 NOx 저감 효과가 발생토록 하였다. 또한, 현재 미국 등에서 재연소에 가장 쉽게 적용되고 있는 천연가스를 같은 조건에서 실험하여 NOx 저감율을 비교하였다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 재연소 연료비가 0~0.18 정도에서는 재연소 연료비에 비례하여 NOx의 저감율이 증가한다. 이는 잘 알려진 아래와 같은 재연소 영역내의 주요 반응 메카니즘에 의해 진행되었다고 볼 수 있다[13].



재연소 연료로 분사된 탄화수소계열 연료가 열분해하는 과정에서, 발생한 CH<sub>i</sub> 계열의 라디칼들이 NO와 반응하여 HCN을 형성하고, HCN는 다시 O, OH 등과 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원하는 일련의 과정이다. 그러나 산소가 충분한 연료 희박 조건에서는 CH<sub>i</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>i</sub> 라디칼들의 증가를 가져오게 되며, 이로 인해 NOx 감소율이 증가하는 것이다.

그러나 재연소 연료비 0.18~0.2에서는 재연소 연료에 따라 다른 경향을 보이는데, 먼저 천연가스를 재연소 연료로 사용했을 경우, NOx의 저감율 증가가 둔해져 더 이상 저감율이 증가하지 않고 일정함을 알 수 있다. 그러나 왕겨분말을 재연소 연료로 사용했을 경우, 실험조건 내에서 재연소 연료비 증가에 따라 계속적으로 NOx 저감율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 가스연료와 고체연료의 반응속도의 차이에서 비롯된다. 천연가스의 경우, 주어진 재연소 영역에서의 체류시간이 재연소 반응 및 산화반응을 완료하기에 충분하였으나, 왕겨분말의 경우, 충분한 열분해 및 재연소 반응이 이루어지지 못한채 산화반응이 진행되고 배기된 것으로 파악된다. 왕겨분말이 재연소 연료로 사용된 경우 천연가스를 사용한 것에 비해 NOx 저감효과가 보다 낮은 것도의 반응속도, 체류시간과 관련이 있다. 가스연료에 비해 고체 연료의 경우, 같은 발열량의 재연소 연료비를 공급하였다더라도, 보다 많은 CH<sub>i</sub> 라디칼의 생성이 가능하고, 더 높은 NOx 저감을 기대할 수 있다. 그러나 실제 실험에서 천연가스에 비해 낮은 NOx 저감 효과를 보인 것은 충분한 반응시간이 확보되

지 못한 것으로 파악된다.

Fig. 10에서 보이는 그래프의 특성도 위에서 설명한 반응시간과의 관계로 해석 가능하다. Fig. 10은 재연소 연료비를 고정된 상태에서 재연소 영역비를 변화시키며 NOx 저감 효과를 파악한 실험 결과이다. 재연소 연료비는 0.15로 고정하였다.

재연소 연료가 천연가스인 경우, 재연소 영역비가 0.15일 때와 0.45일 때 NOx 저감율의 차이가 3% 정도이며, 재연소 영역비의 증가와 NOx 저감 효과가 비례의 관계라고 보기 어렵다. 그러나 재연소 연료가 왕겨분말인 경우 재연소 영역비 증가에 따라 NOx 저감 효과도 커지며, 재연소 연료비 0.15인 경우와 0.45인 경우의 NOx 저감율 차이는 10%에 이른다. 이는 위 단락에서 제시한 기체 연료와 고체 연료의 반응시간 차이에 따른 재연소의 NOx 저감 효과 증감을 보여주는 또 하나의 실험결과이다. 천연가스의 경우, 빠른 반응시간으로 인해 재연소 영역비의 영향을 받지 않았지만, 왕겨분말의 경우 재연소 영역비를 증가시키면, 고체연료가 분해되어 CH<sub>i</sub>가 형성되는 시간 및 NO가 CH<sub>i</sub>와 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원되는 메카니즘이 일어날 수 있는 영역이 확장되고, 이는 NOx 저감 반응이 일어날 수 있는 더 많은 기회를 제공하게 되는 것이다.

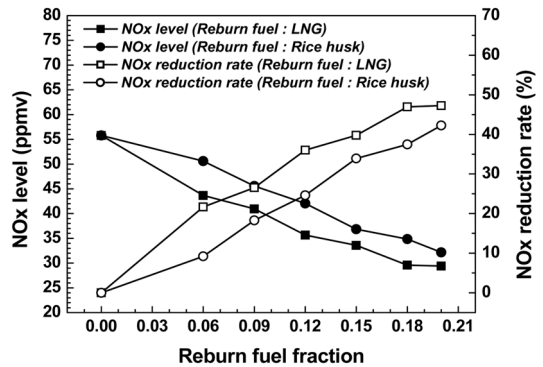


Fig. 9. Effect of reburn fuel fraction on NOx emission.

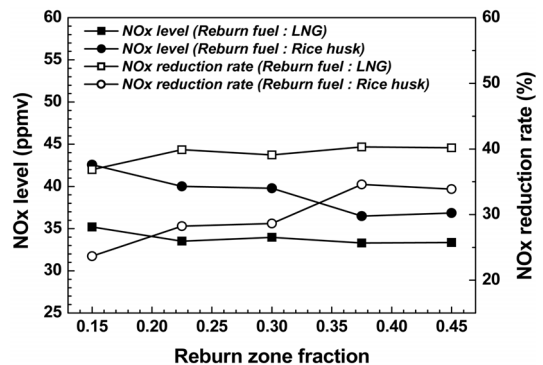


Fig. 10. Effect of reburn zone fraction on NOx emission.

### 3.3. CO 저감 특성

재연소는 연료농후 영역이 형성되어 CO가 발생할 확률이 매우 높으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

Fig. 11은 재연소 연료비 변화시의 CO 발생량 변화를 보여주고 있다(Case 1). 재연소 연료비가 증가함에 따라 CO 발생이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 재연소 연료비가 증가하면 국부적인 연료 농후 영역이 확장되면서 반응영역 내의 산소가 부족하게 되고, 산화 반응을 하지 못한 CO가 증가하는 것으로 파악된다. 그래프에서는 초기 CO 발생값도 보여주고 있다. 초기 CO 발생값은 재연소 연료를 공급하지 않은 상태의 연소기에서 발생한 CO값을 의미한다. 재연소 연료를 공급하지 않았을 경우, 4 ppm 정도 발생하였고, 재연소 연료비 0.18에서는 42 ppm 내외로 CO가 배출되었다. 재연소 연료가 고체인 왕겨 분말이 사용되었음을 고려하면 우려할 만한 수치는 아니다. CO의 증가는 활성화 라디칼인 OH 및 반응영역의 온도조건과 관련이 깊다고 알려져 있다. 본 실험조건에서는, 내부가 축열재인 캐스타블로 이

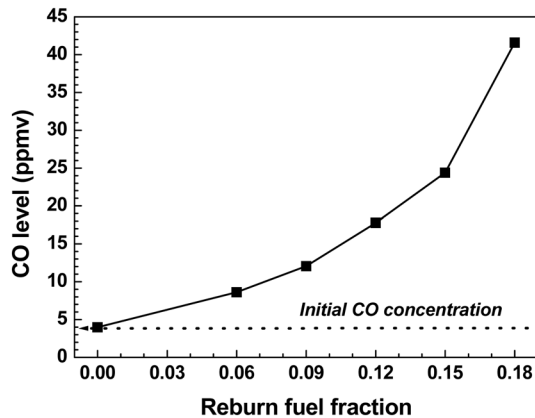


Fig. 11. Effect of reburn fuel fraction on CO emission.

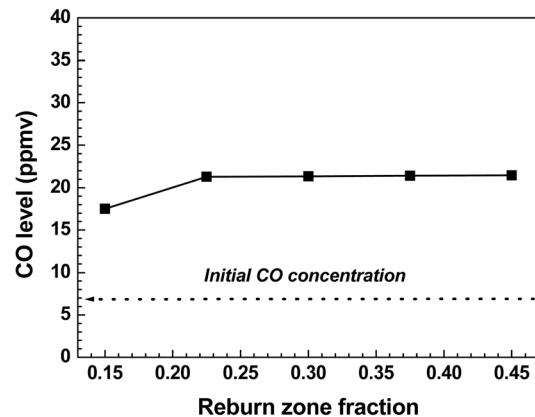


Fig. 12. Effect of reburn zone fraction on CO emission.

루어진 연소로의 특성으로 인해, 연소로 후류까지 CO가 산화될 수 있는 충분한 온도가 유지되어 CO 산화가 원활히 유도된 것으로 분석된다.

Fig. 12는 재연소 영역비에 따른 CO의 변화를 나타낸 것이다(Case 2). Case 2의 모든 실험 조건에서 재연소 영역비에 큰 관계 없이 일정한 양의 CO 배출이 확인되었으며, 17~22 ppm 수준으로 높지 않았다. 고체 분말의 바이오매스 연료를 재연소에 적용하여도, 기존의 재연소 연료 분사 및 과급공기 공급의 방식으로 충분한 CO 억제 가능하다는 것을 보여주는 결과이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 바이오매스 연료를 재연소 연료로 적용하기 위한 기초 실험 결과를 제시하였으며, 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 왕겨 분말을 재연소 연료로 사용한 경우, 가스 연료에 비해 약간 낮은 NOx 저감 효과를 보였으나, 최대 42%의 NOx 저감에 성공하였다. 이는 바이오매스를 이용한 재연소 방법도 NOx 저감에 효과적일 수 있음을 보여주는 결과이다.
- 2) 왕겨 분말을 사용한 재연소 방법은 고체 연료의 특성으로 인해, 원활한 재연소 효과 구현을 위해서는 재연소 연료의 충분한 체류 및 반응 시간이 확보되어야 한다.
- 3) CO의 발생은 최대 42 ppm이 발생하였으며, 연소로 내의 온도가 충분히 확보된 조건에서는 기존 재연소 시스템과 같은 과급공기 공급방식으로 CO의 산화가 가능하다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- [1] Lyon, R. K., "Thermal DeNOx: Controlling Nitrogen Oxides Emissions by a Noncatalytic Process," Environ. Sci. Tech., Vol. 21, No. 3, 1987, pp. 231-236.
- [2] Miller, J. A., "Theory and Modeling in Combustion Chemistry," Proc. Combust. Instit., Pittsburgh, 1996.
- [3] Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T., Ohme, S., Haneda, H., Kawamura, T. and Kaneko, S., Proc.

- of the 1982 Joint Symposium on Stationary NOx Control, EPRI Report No. CS-3182, July, 1983.
- [4] 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 NOx Control, Kansas City, MO, May 19, 1995.
- [5] Lee, C. Y. and Baek, S. W., "Effects of Reburning on Heat Transfer Characteristics and NOx Reduction," Trans. of the KOSCO, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 18-25.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 NOx and CO<sub>2</sub> Emissions Control," Biomass and Bioenergy, Vol. 33, 2009, pp. 1139-1157.
- [10] Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., Swirl Flows, ABACUS PRESS, London, 1984.
- [11] 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.
- [12] Holman, J. P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, NewYork, 2001.
- [13] 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.