

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.8.683>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 25W급 순환유동층반응기에서 석탄과 우드펠릿의 혼소 특성 연구

김진호\* · 양상열\*\* · 김규보\*\*\* · 전충환\*†

\* 부산대학교 기계공학부, \*\* 한국남부발전, \*\*\* 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

### The Co-Combustion Characteristics of Coal and Wood Pellet in a 25W Lab-scale Circulating Fluidized Bed Reactor

Jin Ho Kim\*, Sang Yeol Yang\*\*, Gyu Bo Kim\*\*\* and Chung Hwan Jeon\*†

\* School of Mechanical Engineering Pusan Nat'l Univ.,

\*\* Korea Southern Power CO., LTD.,

\*\*\* Pusan Clean Coal Center, Pusan Nat'l Univ.

(Received November 13, 2014 ; Revised June 23, 2015 ; Accepted June 27, 2015)

**Key Words:** Circulating Fluidized Bed(순환유동층), Coal(석탄), Wood Pellet(우드펠릿), Co-Combustion(혼소), Exhausted Gas Emission(배기배출물)

**초록:** 순환유동층연소기술은 적용 연료의 다양화, 설비의 경제성 그리고 환경성이 우수하여 최근 전력 생산기술로 관심이 증대되고 있으며 최근 전력생산을 위한 재생에너지 사용 의무규정에 따라 재생에너지의 연소특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 순환유동층반응기에서의 석탄과 우드펠릿을 혼소하여 혼소율에 따른 배기배출물 특성과 반응기 내부 가스온도특성의 환경성과 연소성을 실험적으로 분석하여 나타내었다. 총 공급 발열량을 기준으로 각 연료의 공급량을 변경하여 혼소율을 결정하였다. 베드물질로 강모래(7호사)를 적용하였다. 순환유동층반응기에서 우드펠릿 혼소율 증가에 따라 후단부에서의 가스온도가 감소하였고, CO, NO<sub>x</sub>, HC 및 SO<sub>x</sub>의 발생량은 우드펠릿의 혼소비가 30% 이하의 경우 혼소비 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었지만 30% 이상의 경우 CO, HC 및 SO<sub>x</sub> 발생량은 오히려 증가하는 경향을 나타내었다.

**Abstract:** Circulating Fluidized Bed(CFB) combustion has the several advantages which are the fuel flexibility, the economy, the efficiency and the environment. It is necessary to apply a renewable energy to produce electricity due to the Renewable Portfolio Standard(RPS) mandates recently. So, in this study, co-combustion with a coal and a wood pellet was investigated to evaluate the combustibility and the environment as function of blending ratio of them in a Lab-scale CFB reactor. To investigate the characteristics of the co-combustion, the blending ratio which is the weight of wood pellet by the total calorific value of the supplied, was considered. Bed material was a river sand(No. 7). As increasing the blending ratio, the exhausted gas emissions such as CO, NO<sub>x</sub>, HC and SO<sub>x</sub> were decreased. But in case of wood pellet over 30%, CO, HC and SO<sub>x</sub> emission were increased. And the gas temperatures at the downstream were decreased.

## 1. 서론

국내 석탄 화력발전은 국내 총 전력생산의 40% 이상을 차지하고 있는 주요 전력 생산원 중

하나이다. 대부분의 석탄은 인도네시아와 호주 등 해외로부터 수입되고 있는 실정이며, 지속적인 원가상승으로 인해 규격외 저열량탄 등 다양한 종류의 석탄이 에너지원으로 적용되고 있다.

특히, 최근 CO<sub>2</sub> 배출권을 확보하기 위한 방안으로 신재생에너지의무화(RPS)가 2012년부터 시행됨에 따라 발전소에서는 의무적으로 바이오매

† Corresponding Author, [chjeon@pusan.ac.kr](mailto:chjeon@pusan.ac.kr)

스 및 폐기물에너지와 같은 재생에너지를 적용하여 전력을 생산해야만 한다. 2012년도의 총 전력생산량에 2%를 시작으로 2022년까지는 그 비중을 10%로 늘려 나가야하는 상황에서 RPS 기반의 재생에너지를 이용한 CO<sub>2</sub>의 실질적 저감방안에 대한 관심이 집중되고 있다.<sup>(1)</sup>

이와 같은 석탄 화력발전의 상황은 저열량탄 사용 확대 및 바이오매스, 폐기물에너지 등의 다양한 에너지를 적용할 수 있는 발전기술 확보에 발전사들의 관심이 집중되고 있다.

국내에서는 동서발전의 동해화력발전소를 시작으로 남동발전의 여수화력발전소에서는 저열량탄 전용 순환유동층보일러가 상용운전 중이다. 그리고 세계최대규모의 남부발전 삼척화력발전소의 대용량 순환유동층 보일러 건설이 진행 중으로 순환유동층보일러에 대한 관심이 증대되고 있다.

석탄이용발전기술 중 순환유동층보일러기술은 다양한 석탄을 연소시킬 수 있을 뿐만 아니라 폐기물에너지 및 바이오매스 등 가연성 재생에너지를 혼합 연소시킬 수 있는 연소기술로 연료 다변화에 적합한 보일러 기술이다. 또한 순환 유동층 연소기술은 연소로 온도를 약 900℃ 정도로 낮게 유지하여 NO<sub>x</sub> 생성을 억제할 수 있고, 석회석으로 노 내에서 직접 탈황을 통해 SO<sub>x</sub>를 저감할 수 있어 설비 후단의 환경설비에 대한 건설 부담까지 줄일 수 있는 장점을 가지고 있어 다탄종 석탄 혼합연소, 석탄과 기타 화석연료 혼합연소 등을 통한 연료 다변화와 경제적이고 친환경적인 연료를 연소할 수 있는 기술력 확보에 많은 연구자들이 노력을 지속해 오고 있다. 특히 가연성 에너지원 중 우드펠릿의 경우는 국내 생산뿐만 아니라 해외법인 설립을 통한 해외도입까지 정책적으로 지원하고 있어 우드펠릿을 이용한 순환유동층 보일러 혼소기술에 대한 관심이 더욱 증대되고 있으며, 이미 일부 발전사에서는 자체적으로 적용성 검토를 마친 상태에 있다.<sup>(2-3)</sup>

Jeong 등<sup>(4)</sup>은 무연탄 전용 순환유동층보일러에 저열량탄을 혼소율에 따른 실험을 수행하여 순환부 온도, LOI, NO<sub>x</sub> 배출농도 등 전반적인 연소성향상을 보고하였다.

Lackner와 Karlsson<sup>(5)</sup>은 최초로 순환유동층보일러에서 혼소에 따른 배출특성 연구를 수행한 것으로 석탄과 우드 칩, 톱밥을 혼소하여 NO와 CO, SO<sub>2</sub>의 배출특성연구를 수행하였으며, 베드온

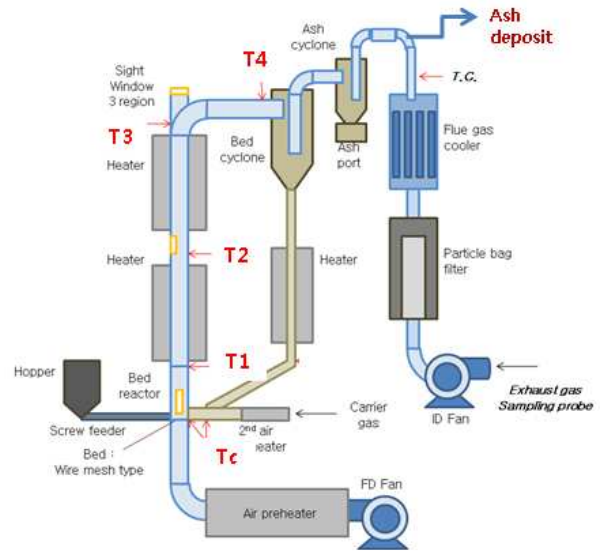


Fig. 1 Schematic of lab-scale CFB reactor to investigate the co-combustion with coal and wood pellet

도와 공기공급량, 부하를 실험변수로 하였다. NO의 경우 우드 칩에 포함된 N 성분에 의해 NO 배출이 지배됨을 확인하였고, 우드칩을 적용할 경우 NO 배출이 증가함을 확인하였고 석탄에 비해 베드온도나 공기공급량이 연소에 큰 영향을 주지 않음을 확인 하였다. CO의 경우는 우드 칩을 사용했을 경우 저감되는 것을 확인하였고, 미세한 우드칩의 경우는 연소실과 사이클론에 퇴적물을 형성시키는 현상을 확인하였다.

Gayan 등<sup>(6)</sup>은 0.1과 0.3MW급 실험용 순환유동층보일러에서 석탄과 바이오매스 중의 하나인 숲에서 획득한 소나무 껍질을 혼소하여 연소성을 평가, 분석하였다. 바이오매스의 혼합비, 공급공기온도가 증가할수록 연소성이 향상되고, 유속을 증가시킬 경우 연소성이 감소함을 확인하였다.

Lackner 등<sup>(7)</sup>은 선행연구에 연속선상에서 하수 슬러지를 포함하여 우드펠릿을 가지고 석탄과 각각의 배가스 특성 및 혼합비에 따른 배가스 특성을 연구하였다. NO의 경우 우드펠릿과 슬러지가 배출이 적었으며, CO는 우드펠릿이 높고 슬러지와 석탄은 유사한 경향을 나타내었다. NO의 경우는 혼소 시 건조시킨 슬러리의 함량이 증가하면 우드펠릿과 석탄 모두에서 NO가 증가하는 특성을 나타내었다. 유해배출물인 HCl에 대한 연구에서도 슬러리의 함량이 증가하면 다소 기준치를 초과하는 것을 보고하였다.

Teerachai Saikaew 등<sup>(9)</sup>은 30kWh CFBC에서 석탄과 palm, coconut, ricehusk, sawdust등 바이오매스의 종류 및 혼소율에 따라 NOx와 N<sub>2</sub>O등 배기 배출물의 배출특성에 관한 연구를 수행하여 반응기의 높이에 따른 온도, 후단부에서의 NOx와 N<sub>2</sub>O 배출특성연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 batch type lab-scale의 순환유동층반응기를 사용하여 초기점화 및 정상상태에 도달과정에서 저열량탄과 우드펠릿의 혼소율에 따른 연소성 및 환경성을 실험적으로 연구하였다. 연소 시 발생하는 반응기 내부의 가스온도 및 배출가스특성을 분석하여 재생에너지원 중의 하나인 우드펠릿의 혼소율에 따른 순환유동층 보일러 연소특성을 정리하여 나타내었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에는 석탄과 우드펠릿의 혼소율에 따른 순환유동층 연소특성을 연구하기 위해 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터(PC3)에서 설계/제작된 순환유동층반응기를 나타낸 것이다.

순환유동층반응기는 반응기 내부의 유동화 공기공급 및 압력을 조절할 수 있는 압입송풍기(FD fan)과 흡입송풍기(ID fan)을 설치하였으며, 각각의 송풍량을 조절하여 내부압력과 유량을 결정할 수 있도록 구성하였다. 유량은 압입송풍기 전단에 유속계를 설치하여 반응기 내부로 흡입되는 유량을 결정하였다. 반응기는 계략도에 나타난 것과 같이 베드 반응부(내경 42.7mm, 높이 220mm), riser(높이 1926mm), bridge(길이 524mm), bed cyclone, downer(높이 1304mm), junction leg(길이 720mm), ash cyclone, flue gas cooler, bag filter로 구성되어 있다. 반응기 내에서 순환유동

층의 순환된 가스온도를 형성시키기 위한 공기에 열기를 설치하였으며, 베드에서 최대 800K 까지 가열된 공기를 공급할 수 있도록 구성되었다. 베드 반응부는 가시화창을 설치하여 내부의 유동상태 및 연소상태를 확인할 수 있도록 구성하였으며, 베드는 와이어 메시(구멍직경= 100 $\mu$ m)를 구성하여 베드 층을 형성할 수 있도록 구성하였다. Riser부와 downer부에서는 실제 보일러와 같이 열량이 많지 않기 때문에 가스 및 유동매체의 온도를 유지하기 위해 최대 1200K까지 가열이 가능한 히터를 각각 설치하였다. Bed cyclone의 경우는 200 $\mu$ m 이상의 크기를 갖는 유동매체는 순환시키고 회분이나 고온가스만 후단부로 분리될 수 있도록 90 $\mu$ m 이하 입자만 통과할 수 있도록 설계, 구성하였다. 후단부에 회분을 포집하기 위해 ash cyclone을 설치하였으며, 설계는 후단부에서의 막힘 현상을 방지하기 위해 75 $\mu$ m 이하만 통과되도록 설계하였다. junction leg 끝단에는 가열된 2차 공기(최대 500K)가 공급될 수 있도록 2차 공기 예열기를 설치하였다. 반응기 내부의 유동매체와 가연분에 의한 가스온도를 검출하기 위해 베드반응부 상, 하부, riser의 중간지점과 상부, brige와 bed cyclone 결합부, downer 하부, 2차 공기 공급부, flue gas cooler 전단부에 K-type의 열전대를 각각 설치하여 반응부 전체의 가스온도를 검출할 수 있도록 구성하였다.

순환유동층 연소 시 연소성 및 환경성을 분석하기 위해 ID fan 후단부에 덕트를 설치하였고, 덕트 내로 배기가스분석기의 프로브를 삽입하여 설치하였다. 배기가스를 분석하기 위해 Eurotron사의 greenline MK2를 사용하였고, CO, NOx, SOx 및 HC를 측정하였다.

### 2.2 실험방법

순환유동층 반응기에서의 석탄 및 바이오매스인 우드펠릿을 이용한 혼소특성을 연구하기 위해 다음과 같은 실험방법을 적용하였다.

우선 각 연료의 고정층 상태에서 열 중량 분석법으로 각각의 연소정특성을 살펴보았으며, 순환유동층 연소특성을 살펴보기 위해 순환유동층 반응기에서 두 연료의 혼소에 따른 연소특성 및 후단부 영향에 관한 연구를 수행함으로써 본 연구의 목적인 바이오매스 혼소에 따른 특성변화에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

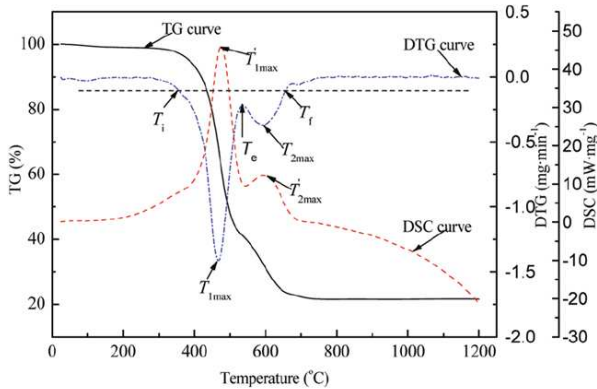


Fig. 2 Thermogravimetric analysis curves of typical blended solid fuels combustion<sup>(8)</sup>

### 2.2.1 연소 정특성 분석 실험

순환유동층 보일러에서의 석탄 및 바이오매스를 이용한 혼소특성을 살펴보기 전에 각 연료에 대한 연소 정특성을 분석하여 각 연료들이 갖는 고정층 상태에서의 연소특성을 분석하였다.

연소 정특성 분석을 위해 TGA-DSC(SDT Q600, TA instruments)를 이용하여 온도변화에 따른 중량 감량을 통해 반응특성 온도 및 반응율에 대한 특성을 분석하였다. 연소 정특성 실험을 수행하기 위한 조건으로 대기압하의 공기조건에서 온도 증가율을 20 K/min으로 고정하고 시료샘플을 20±0.5mg으로 공급하였다. 공기의 공급량은 100 ml/min이며 노내 온도를 최대 1173K까지 상승시키면서 중량 변화가 온도의 함수로서 연속적으로 기록되어지는 비등온열중량 분석법을 사용하였다.

또한 온도 상승에 따른 중량 감소를 표시한 TG(Thermo Gravimetric) 결과 및 온도 상승에 따른 중량 감소율을 표시한 DTG(Differential Thermo Gravimetric) 결과를 분석하여 각 연료에 대한 연소 정특성을 비교하였다. DTG 그래프에서 수분 증발 후 중량 감소율이 0.1mg/sec 이 되는 지점의 온도를 연소 개시온도, 중량 감소율이 최대일 때의 온도를 피크온도라 하였다.

그리고 순간 중량 감소율이 감소하다가 0.1mg/min 이하로 떨어지는 지점의 온도를 연소 종료온도라 정의하였다. 또한 DTG그래프의 피크 온도에서 최대 중량 감소율을 Rmax(%/min)라 정의하였다.<sup>(8)</sup>

### 2.2.2 순환유동층 연소특성 실험방법

석탄과 우드펠릿을 이용한 순환유동층 연소조

Table 1 Experimental conditions for co-combustion in circulating fluidized bed reactor

Contents	Unit	Value
Coal(Kedap) and Wood pellet	kcal/batch	10
Primary air flow rate	Nm <sup>3</sup> /h	7
Secondary air flow rate	Nm <sup>3</sup> /h	2
Bed material	-	Sand (200~400um, 2,557kg/m <sup>3</sup> , 공극율 0.458)
Flow velocity	m/s	3.4
Preheated primary air temperature	K	873
Preheated secondary air temperature	K	673
Reaction zone temp.	K	1073
Fuel supply type	g/batch	1.89~2.22
Blending ratio	%	0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100

건에서의 혼소특성을 살펴보기 위해 다음과 같은 방법으로 연구를 수행하였다.

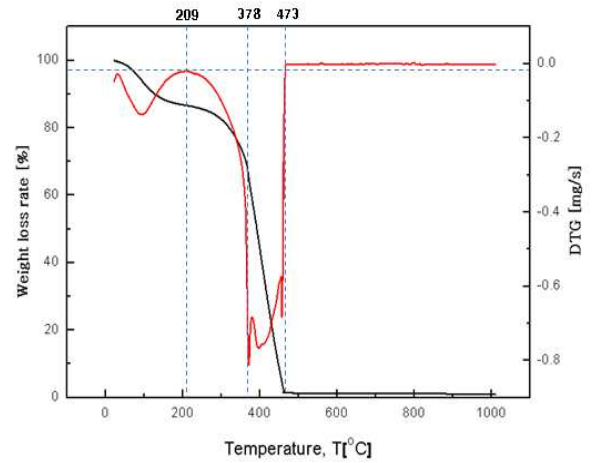
순환유동층 반응기에서 혼소특성을 살펴보기 위해 석탄과 우드펠릿을 적용하였으며, batch type으로 공급 열량 기준(10kcal/batch)으로 혼소율에 따라 1.89~2.22g씩 공급될 수 있도록 구성하였다. 공급석탄입자의 크기분포는 3~5mm로 분류하여 공급하였으며, 우드펠릿은 직경 6mm, 길이 5~25mm의 크기로 공급하였다. 연소용 공기로 1차 공기를 7Nm<sup>3</sup>/h로 공급하였으며 예열기를 이용하여 873K까지 가열, 공급하였으며, 이 때 반응기 내부 가스유동속도는 약 3.4 m/s 이었다. 순환된 유동매체(bed material)을 반응부로 원활하게 공급하기 위해서는 이차공기의 역할이 가장 중요한 변수라고 할 수 있으며, 이러한 이차공기는 약 1 Nm<sup>3</sup>/h로 공급하면서 공기히터를 통해 약 673K 조건으로 가열, 공급하였다. 순환유동층 연

**Table 2** Properties of Coal and wood pellet

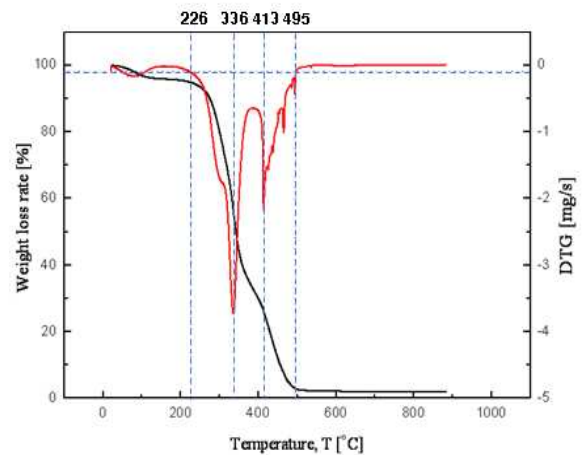
	Coal (Kedap)	Wood pellet
Proximate analysis[wt%, air dry base]		
Moisture	18.03	9.73
Volatile matter	43.83	72.33
Ash	3.82	0.94
Fixed carbon	34.32	17
Fuel ratio	0.78	0.24
Ultimate analysis[wt%, dry base]		
C	67.4	37.15
H	5.28	5.77
O	22.07	55.01
N	0.41	0.45
S	0.18	0.47
Ash	4.66	1.15
Heating value [kcal/kg]	5,278	4,500~

소조건에서의 유동매체는 7호의 강모래(sand)를 적용하였으며, 입자의 크기로 200~400 $\mu$ m로 분류하여 공급하였다. 안정적인 순환유동층 연소가 가능할 수 있는 조건으로 유동매체를 약 400g 공급하였다. Riser 및 downer에 주위온도를 조절하기 위해 설치된 히터를 통해 약 1073K로 설정하였다. 혼소특성을 실험하기 위한 조건으로 총발열량을 기준으로 혼소율에 따라 바이오매스의 공급중량을 결정하였으며, 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100%로 혼소율을 결정하였다. 5% 혼합비의 경우 대부분의 석탄화력 보일러 내에서 안정된 운전이 가능한 조건으로 잘 알려져 있어 선택하였으며, 50% 이상의 조건은 실제 시스템 적용에 가능성이 적어 혼소에 따른 특성을 분석하기 위한 혼소범위를 위와 같이 결정하였다.

혼소 시 연소특성을 분석하기 위해 반응부에서의 연료가 연소될 때 발생하는 고온가스(hot gas)의 온도를 반응기의 특정위치별 가스온도를 취득하여 연소성을 평가하였다. 또한 환경성을 확인하기 위한 방법으로 ID fan 후단부에서 배출되는 배기가스(NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HC, CO 등) 특성을 분석하였다.



(a) Coal(Kedap)



(b) Wood pellet

**Fig. 3** TG and DTG results for coal and wood pellet

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소 정특성 분석결과

순환유동층 반응기에서 석탄과 우드펠릿의 혼소 특성을 연구하기 위해 우선 연료를 선정하였으며, Table 2에 각 연료별 공급분석, 원소분석 결과를 나타내었다. 석탄은 국내 화력발전소에서 사용 중인 연료로 인도네시아산 아역청탄인 Kedap(5,278kcal/kg)를 적용하였으며, 바이오매스로는 우드펠릿(4,500kcal/kg이상)을 선정하였고 표에 나타낸 것과 같이 분석한 결과를 얻었다. 연소성을 간접적으로 나타낼 수 있는 연료비(FC/VM)의 경우 우드펠릿이 매우 작은 값을 가짐에 따라 착화 및 반응시간이 석탄에 비해 짧은 것을 예측할 수 있다.

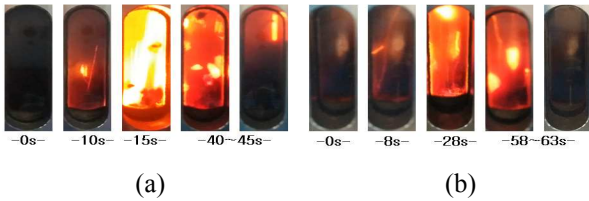


Fig. 4 Co-firing sample images in circulating fluidized bed reactor: (a) blending ratio 0%, (b) blending ratio 100%

석탄과 우드펠릿에 대한 연소 정특성을 살펴보기 위해 TGA-DSC에서 획득한 TG 및 DTG 결과를 DTG 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 공기조건에서 1,000℃까지 가열하면서 연소되는 특성을 살펴보았다. 우선 반응온도를 살펴보면 우드펠릿의 초기반응온도가 더 높으며 빠르며, 최대 반응율을 나타 낼 때의 온도는 낮지만 반응이 완료되는 burnout 온도는 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 바이오매스인 우드펠릿의 반응시간이 석탄보다 오래 걸리지만 낮은 온도에서도 반응이 가능하다는 것을 의미하며 좌의 연소에는 더 높은 온도가 필요하다는 것을 의미한다. 우드펠릿의 경우 최대 반응율 온도가 336℃로 석탄의 378℃ 보다 낮은 것으로 보이지만 휘발분을 상대적으로 많이 포함하고 있어 나타나는 결과로, 좌 성분의 최대 반응율 온도는 413℃와 378℃로 온도가 역전됨을 알 수 있어 초기 착화 조건은 우드펠릿이 우수하지만 결과적으로 좌 성분을 연소시키기 위해서는 더 높은 온도의 조건이 요구된다고 할 수 있다. 석탄의 경우는 오랜 시간 휘발분과 좌 성분이 함께 존재하던 연료라면, 우드펠릿은 목재부산물을 톱밥으로 만든 뒤 건조과정을 거쳐 고온, 고압으로 성형을 수행한 연료로 휘발분 연소구간과 좌 연소구간이 명확하게 구분되고 있는 것을 확인할 수 있다. DTG를 통한 좌 반응구간의 반응율을 살펴보면 석탄의 경우 0.8mg/s 정도이며, 우드펠릿의 경우 2mg/s로 좌에 대한 산화 반응율은 우드펠릿이 석탄의 경우보다 높은 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 순환 유동층 연소 특성

바이오매스 혼소에 따른 순환유동층 반응기에서의 혼소특성을 살펴보기 위해 혼소 시 반응기 내의 특정지점에서 고온가스의 특성을 조사하여 나타내었고, 후단부에서의 배출가스특성을 혼소율에 따라 조사함에 따라 순환유동층보일러에서

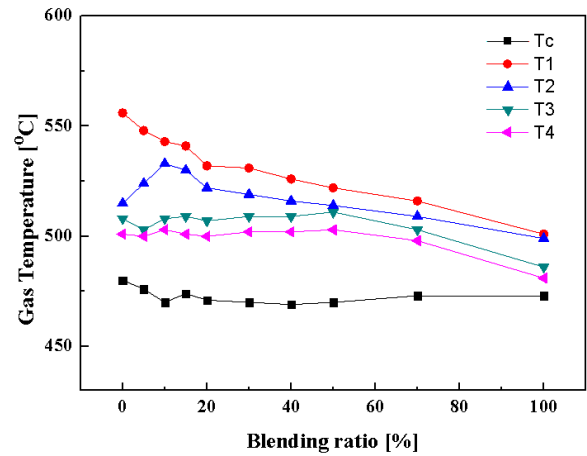


Fig. 5 Gas temperature at specific point as function of blending ratio in circulating fluidized bed reactor

의 연소현상에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. Fig. 4는 실제 순환유동층 반응기 내에서 석탄과 바이오매스가 각각 연소 될 때 착화, 탈휘발, 좌의 연소과정을 시간에 따라 나타내었다. 유동매체는 하부에 일정량 존재하면서 대부분 순환 유동 하고, 공급된 연료는 하부에서 베드부분의 일정 높이에서 연소되면서 크기가 작아진 연료들은 상승하면서 연소를 유지하는 실제 순환유동층 보일러 내에서의 연소현상을 나타내고 있었다. (a)는 Kedap탄만 연소시켰을 경우 착화까지 11s, 탈휘발 연소시간은 4s, 좌의 연소시간은 27s 소요 되었으며, (b)는 우드펠릿만을 연소시켰을 경우이며 착화까지 8s, 탈휘발 연소시간 21s, 좌의 연소시간은 33s 소요되었다. 석탄의 착화 시간이 많이 소요되는 이유는 고유수분이 18.03%로 우드펠릿의 9.73%보다 약 2배가량 높기 때문이며 우드펠릿의 탈휘발 연소시간이 5배 이상 소요되는 것은 휘발분 함량이 많고 입자 크기의 영향으로 사료되며 이는 TGA 결과에서도 유사하게 석탄의 초기반응 시간, 바이오매스의 총 반응 시간이 늦어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 우드펠릿과 석탄의 혼소율에 따른 특정지점에서의 온도를 나타낸 것으로 Tc는 bed 바로 아래에 설치하여 1차 공기(주 연소용 예열공기)와 2차 공기(2차 순환용 예열공기)에 의한 bed 로 공급되는 공기의 온도를 측정된 것이며 T1은 베드 바로 위에 형성되는 반응부 에서의 석탄입자 또는 바이오매스의 연소로 인해 발생하는 고온가스온도를 측정된 것이고, T2와 T3는 riser

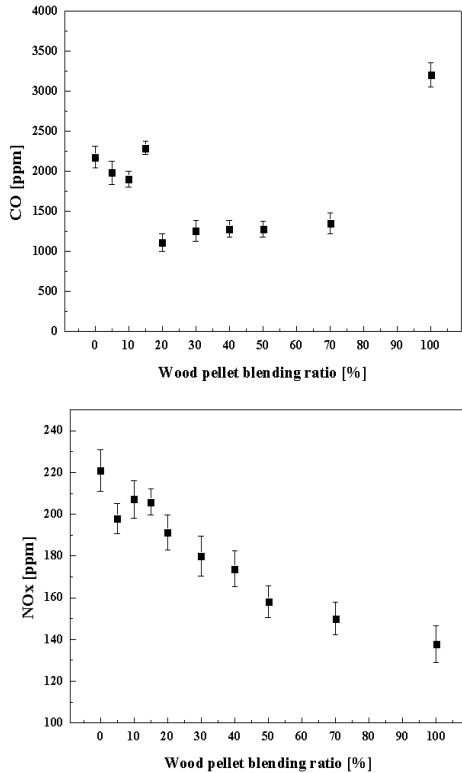


Fig. 6 CO and NO<sub>x</sub> emissions as a function of blending rate in circulating fluidized bed reactor

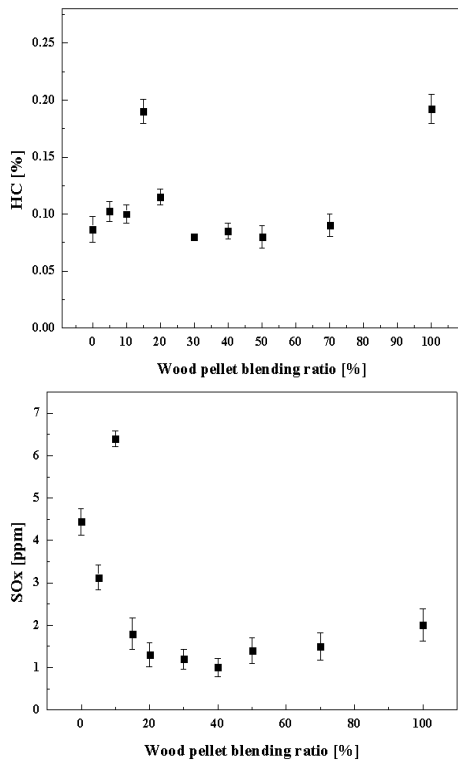


Fig. 7 HC and SO<sub>x</sub> emissions as a function of blending rate in circulating fluidized bed reactor

의 상부 높이별 온도, 그리고 T4는 riser와 bed cyclone이 결합되는 지점인 bridge 지점에서의 온도특성을 각각 나타낸 것이다. 전체적으로 연소전의 기준온도보다 연소에 의해 가스온도가 증가된 것을 확인할 수 있으며, 이것은 정상적인 연소상태를 확인할 수 있을 뿐만 아니라 혼소율에 따른 열전달 특성을 살펴 볼 수 있는 효율과 연관된 결과라 할 수 있다. 연소가 이루어지고 있는 베드반응부에서 가장 가까운 온도를 나타내는 T1의 경우 우드펠릿의 혼소율이 증가함에 따라 가스의 온도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 TGA결과에서도 알 수 있듯이 우드펠릿 최의 반응속도가 느리기 때문에 온도가 감소하는 것으로 사료된다. 그리고 과열기와 재열기 등 열교환부로 고온가스를 공급하고 유동매체를 분리 재순환시키게 될 bridge와 bed cyclone 입구온도인 T<sub>4</sub>의 온도특성을 살펴보면 석탄만 연소시킨 경우와 우드펠릿을 혼소시킨 경우 큰 차이가 없지만 70%, 100%의 경우 더 낮은 가스온도분포를 나타내고 있으며 이는 석탄과 우드펠릿의 혼소시에는 석탄 최의 반응으로 온도가 유지되지만 바이오매스의 혼소비가 70%, 100%의 경우 우드펠릿 최의 느린 연소속도의 영향으로 후단부에서의 온도를 감소시키는 결과가 나타난 것으로 사료된다. 만약 이러한 현상이 발생한다면 회분의 IDT가 석탄의 회분에서 보다 비교적 낮은 온도특성을 가지는 것으로 알려진 바이오매스의 경우 후단부에서 응축에 의한 fouling 현상을 초래할 것으로 사료된다.

Fig. 6~7에는 CO, NO<sub>x</sub>, HC와 SO<sub>x</sub>의 혼소율에 따른 배출특성을 나타낸 것이다. 공통적으로 15%~20% 구간에서 일시적으로 배기가스 발생농도가 증가하는 경향을 보이며 그 이후 구간에서는 NO<sub>x</sub>를 제외한 CO, HC, SO<sub>x</sub>의 배출특성은 유사한 경향을 보였다.

Fig. 6에는 CO와 NO<sub>x</sub>의 배출특성을 나타낸 것으로 CO배출의 경우 우드펠릿의 혼소비가 증가할수록 감소하다가 15%지점에서 상승, 그 이후 구간에서는 거의 일정하며 우드펠릿만 연소시켰을 경우 불완전 연소로 상당히 많은 CO가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면 NO<sub>x</sub> 배출의 경우 5%의 우드펠릿 혼소까지는 감소하다가 10%에서 상승하며 혼소비가 계속해서 증가할수록 배출량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 우드펠릿

의 N성분이 많음에도 불구하고 NOx발생량이 적은 것은 반응할 수 있는 국부적인 공기의 부족과 온도 결과에서도 나타났듯이 반응온도가 낮아져 thermal NOx의 감소의 영향인 것으로 사료된다.

Fig. 7에는 HC와 SOx에 대한 배출특성을 나타낸 것으로 HC발생량의 경우 CO발생량과 유사한 경향을 보이고 있다. 혼소율이 15% 및 우드펠릿만 연소시켰을 경우 HC 발생량이 약 0.18% 나타내었다. 이는 불완전연소의 영향으로 사료된다. SOx의 배출특성 경우, 원소분석결과 S 분율이 석탄보다 우드펠릿의 경우 2.6배 높았기 때문에 혼소율이 증가할수록 SOx의 배출이 높은 특성을 보일 것으로 예상되었지만 우드펠릿을 혼소함에 따라 10%에서 최대배출특성을 보이며 혼소율이 40%까지는 계속해서 감소하다가 그 이후에는 약간 상승하는 것을 확인할 수 있다.

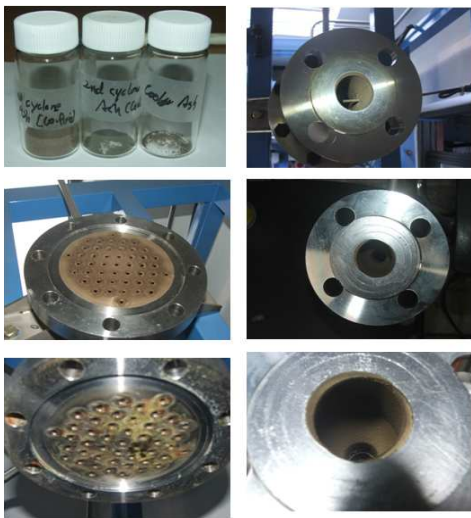


Fig. 8 Images of the fouling by the co-combustion with coal and wood pellet in the downstream equipments of the CFB reactor

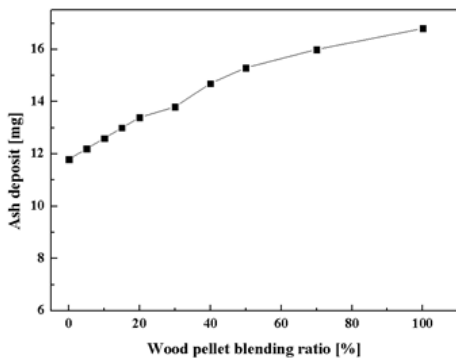


Fig. 9 Yield of ash deposit by the co-combustion with coal and wood pellet in the CFB reactor

위의 Fig. 6~7의 결과를 종합적으로 고찰해 볼 때 혼소비가 10~15%의 영역은 CO, NOx, HC, SOx 배기가스가 모두 증가하는 구간이다. 이는 증가된 휘발분의 함량과 산소량이 서로 경쟁하는 임계점으로 사료된다. 바이오매스의 함량 증가시 10~15%의 혼소율을 제외한 적절한 혼소율은 배출가스 저감의 효과를 가짐을 확인하였으며, 발열량이 낮음에 따라 동일출력을 유지하기 위해서는 더 많은 우드펠릿을 공급해야 하겠지만 설비의 운전한계에 영향을 주지 않는다면 우드펠릿의 혼소는 연소성 및 환경성에 좋은 결과를 가져올 것으로 판단된다.

Fig. 8와 Fig. 9에는 순환유동층 반응기의 후단 설비에 미치는 영향을 살펴보기 위해 후단설비의 실험 후 이미지로 분석하여 나타내었으며 포집된 발생량을 나타내었다. 좌측의 상부에서부터 ash cyclone으로부터 포집한 회분으로 좌측으로부터 혼소 시, 석탄연소 시, 그리고 혼소 시 배가스 냉각기 입구에서 포집한 회분의 사진을 보여준다. 그리고 아래쪽에는 배가스 냉각기 입구와 출구를 비교하여 나타낸 것이다. 우측의 이미지는 상부에서부터 bed cyclone의 후단부 출구부분과 아래로 ash cyclone 입구, 그리고 ash cyclone 출구를 각각 나타낸 것이다. 우선 포집된 회분의 특성을 살펴보면 혼소 시 상당히 많은 양의 회분이 발생된 것을 확인할 수 있으며, ash cyclone(<75 $\mu$ m)에서 입자크기가 분류되었음에도 불구하고 ash cyclone을 지난 배가스 냉각기 입구의 회분 직경이 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 시스템에서 가장 후단부에 위치한 배가스 냉각기 출구부분 이후에서는 이런 회분이 거의 포집되지 않았다. 즉 우측의 이미지처럼 bed cyclone 후단부부터 배가스 냉각기 입구까지는 배관벽면에도 상당량의 회분이 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 bed cyclone 후단부에서는 가스의 온도가 150-170 $^{\circ}$ C 정도로 급격히 감소되는데, 이것은 우드펠릿을 혼소할 경우 후단부에서 응축되는 fouling 현상으로 유동통로를 막음으로써 순환이 되지 않은 것을 통해 확인할 수 있었다. 석탄 순환유동층 연소 시에는 발견되지 않았던 것으로 우드펠릿을 혼소할 경우 보일러 후단부의 온도를 Fig. 3에 나타낸 결과에서와 같이 300 $^{\circ}$ C 이상을 유지해야만 하다는 것을 의미하며, 바이오매스인 우드펠릿의 혼소율을 부득 증가시켜야 할 경우



반드시 후단 열교환기부분에는 sootblower를 설치하여 fouling deposit을 제거해야만 할 것이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 순환유동층보일러에 신재생에너지 의무화(RPS) 및 연료비용의 저감을 목적으로 석탄과 바이오매스의 혼소특성을 연소성과 환경성 측면에서 고려하여, 혼소를 위한 기초자료를 제공하고자 석탄(Kedap)과 바이오매스(우드펠릿)를 이용하여 TGA-DSC를 통해 연소 정특성을 연구하였고, 실제 순환유동층보일러를 모사한 순환유동층 반응기에서 순환유동층 연소특성 연구를 수행함에 따라 다음과 같은 몇 가지의 결론을 획득하였다.

(1) 연소 정특성에서 우드펠릿의 경우 휘발분을 많이 포함하고 있어 반응율이 높고, 초기 반응시작 온도는 높고 최대 반응율 온도는 석탄에 비해 낮았지만 완전연소온도는 높았다. 또한 휘발분의 최대 반응율 및 좌의 반응율은 석탄과 비교해 2배 이상 빨랐다.

(2) 순환유동층 결과에서 석탄의 경우 착화시간이 11s, 연소종료까지 42s 소요되었으며 바이오매스의 경우 착화시간 8s, 최종 연소종료까지 62s가 소요되는 것을 확인하였으며 정특성 분석의 결과와 유사한 결과를 보였다.

(3) 순환유동층 연소특성에서 우드펠릿 혼소 시 반응기 내부의 고온가스온도가 일부 조건을 제외하고는 대체로 감소하였다. 배기가스는 10~15 혼소율 및 우드펠릿만 연소시켰을 경우 CO, HC, SOx 배출농도가 증가하였으며, 기타의 조건에서는 CO, NOx, HC 및 SOx 모두 우드펠릿 혼소율이 증가함에 따라 감소하였다.

(4) 순환유동층 연소에 따른 후단설비 영향에서 바이오매스 혼소에 따른 bed cyclone 이후 설비 내부에 fouling 이 발생하였으며 우드펠릿 혼소율이 증가할수록 Ash deposit 발생량이 증가하였다.

위와 같은 결론을 바탕으로 순환유동층 보일러에 바이오매스인 우드펠릿을 적용하여 혼소할 경우 연소성과 환경성을 확보할 수 있으나 우드펠릿 혼소에 따른 후단설비 fouling 현상을 효과적으로 제거할 수 있는 방안(예, sootblower)을 구축하여 설비의 안정성을 확보하거나 후단부 온도를 우드펠릿의 휘발분 연소 온도 이상으로 유지해야

할 필요가 있다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

### 참고문헌 (References)

- (1) [http://www.knrec.or.kr/knrec/12/KNREC\\_120700\\_02.asp](http://www.knrec.or.kr/knrec/12/KNREC_120700_02.asp).
- (2) Bae, D. H. and Shun, D. W., 2005, "Development of Circulating Fluidized Bed Boiler for Refused Derived Fuel," KOSCO SYMPOSIUM, No. 31, pp. 71~77.
- (3) Lee, J. S. Lee, E. L., An, M. H., Park, S. U., Shin, D., Hwang, J., 2004, "Combustion of RDF and RPF in a Lab-Scale Circulating Fluidized Bed," KOSCO SYMPOSIUM, No. 28, pp. 173~179.
- (4) Jeong E. D. and Moon S. J., 2010, "Co-combustion Characteristics of Mixed Coal with Anthracite and Bituminous in a Circulating Fluidized Bed Boiler," THE PLANT JOURNAL, Vol. 6, No. 2, pp. 70~77.
- (5) Leckner, B. and Karlsson, M., 1993, "Gaseous emissions from Circulating Fluidized Bed Combustion of Wood," Biomass and Bioenergy, Vol. 4, No. 5, PP. 379~389.
- (6) Gayan P., Adanez J., Luis F. de Diego, Garcia-Laiano F., Cabanillas A., Bahillo A., Aho M. and Veijonen K., 2004, "Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass," Fuel, 83, pp. 277~286.
- (7) Leckner, B., Amand, L. E., Lucke, K. and Werther, J., 2004, "Gaseous Emissions from co-combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in a Fluidized Bed," Fuel, 83, pp. 477~486.
- (8) Wang C. A., Liu Y., Zhang X. and Che D., 2011, "A Study on Coal Properties and Combustion Characteristics of Blended Coals in Northwestern China," Energy & Fuels, 25, 3634~3645.
- (9) Saikaew, T., Supudommak, P., Mekasut, L., Piumsomboon, P. and Kuchonthara, P., 2012, "Emission of NOx and N2O from Co-combustion of Coal and Biomasses in CFB Combustor," International Journal of Greenhouse Gas Control 10, pp. 26~32.