Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 436~447
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.436

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

Pilot 순환유동층 연소장치에서의 목재펠릿과 아역청탄 혼소 특성

김동원 · 박경일 · 이종민 · 배용채†

한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소

Characteristics of Co-Combustion of Wood Pellet with Sub-Bituminus Coal in A Pilot CFB Combustor

DONG WON KIM, KYEONG IL PARK, JONG MIN LEE, YONG CHAE BAE†

KEPCO Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

†Corresponding author : ycbaenw@kepco.co.kr

Received 10 October, 2019
Revised 20 October, 2019
Accepted 31 October, 2019

Abstract >> The circulating fluidized bed boiler has an advantage that can burn a variety of fuels from low-grade fuel to coal. In this study, for the design of a circulating fluidized bed boiler using wood pellets, a circulating fluidized bed combustion test device using no external heater was manufactured and used. According to the increase of co-combustion rate with wood pellet, combustion fraction and heat flux by combustor height were measured and pollutant emission characteristics were analyzed. In terms of combustibility, the effect on primary and secondary air ratio were also studied. In addition, as a result of analysis of the effect of corrosive nanoparticles on the combustion of coal with wood pellets, it was confirmed that coal is mostly composed of Ca and S, whereas wood pellets are mostly composed of K, Cl, and Na.

Key words : Circulating fluidized bed(순환유동층), Wood pellet(목재펠릿), Combustion fraction(연소분율), Heat flux(열흐름율), Co-combustion (혼소)

1. 서 론

순환유동층 보일러는 연소 온도가 900℃ 내외로 thermal NOx가 발생하지 않을 뿐만 아니라 연소로 내에 석회석을 직접 공급하여 연소 중 황산화물 제거가 가능한 친환경적인 발전시스템이다. 뿐만 아니라 연소시 화염 없이 연소로 내의 고온의 층물질에 의하여 연료가 연소되고, 연소로 내 체류시간이 길어 연소효율이 높아 저급 연료(폐기물연료, 바이오매스) 등의 다양한 연료를 연소할 수 있는 장점이 있다[1]. 이에 순환유동층 보일러는 전 세계적으로 매년 증가하고 있으며, 발전 효율의 증가를 위하여 증기조건은 초임계 조건으로 용량은 대용량화되어 가고 있는 추세이다[2]. 하지만 국내 순환유동층 보일러의 설계 기술은 아임계압 보일러 설계 기술만 보유하고 있어, 고효율 대용량화 추세에 맞게 초임계압 순환유동층 설계 기술 확보가 필요한 실정이다. 또한 발전 분야의 CO_2 배출 저감을 위하여 전 세계적으로 바이오매

2019 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

스 혼소 및 전소 순환유동층 보일러가 증가하고 있는 추세이다. 하지만 연료다변화에 우수한 순환유동층 보일러라고 할지라도 설계연료와 성상이 상이한 연료를 사용할 경우, 연소로 내 연소특성이 변화하여 보일러의 성능 변화를 일으키거나 환경오염물질의 배출특성이 변화될 수 있다[3,4]. 이에 문헌의 많은 연구는 순환유동층 연소시험장치를 이용해서 석탄과 바이오매스 혼소시 운전변수인 과잉공기비, 1, 2차공기비 및 바이오매스 혼소율에 따른 배기가스 배출 및 연소 효율에 대한 영향에 대해서 고찰하였다. 과잉공기비가 높을수록 촤 반응속도를 증가시키고 CO 발생량을 줄여 연소효율을 향상시킴을 확인하였다[5-9]. 특히 촤와 CO에 의한 NOx 환원반응이 덜 촉진되었기 때문에 NOx 발생량이 감소함도 알 수 있었으며, 다단 연소를 통하여 NOx 발생량을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 그리고 2차공기비를 증가시킴에 따라 연소로 하부 영역의 산소 농도가 감소하는 결과를 얻었다. 결과적으로 NO 산화는 N 산화가 감소함에 따라 크게 감소하지만 연소로 하부의 낮은 산소 농도로 인하여 CO 방출이 증가하여 촤 연소율이 감소하게 된다. 석탄과 혼소하는 바이오매스의 비율이 증가할수록 전체 연료의 N 함량이 감소되어 NOx 배출이 감소한다[9-11]. 그러나 바이오매스의 높은 휘발성 물질 함량으로 인하여 불완전 연소로 인한 CO 배출이 증가하게 되므로 반드시 혼소시에 고려하여야 한다[10]. 또한 안정적인 유동층 보일러 운영을 위해서는 연료의 연소시간과 연소로 내의 가연성 물질(고정 탄소 및 휘발성 물질)의 분포, 층물질 및 회성분의 용융, 소결, 응집, 기화에 의한 파울링, 휘발분 연소, 혼합/분리 문제가 고 휘발성 바이오매스 연료 사용과 관련하여 중요한 고려사항이다. 뿐만 아니라 유동층 연소로 내의 연료 및 가스 혼합과 유동층 보일러의 성능에 미치는 영향을 조사하였으며[12], 기포유동층에서의 연료와 층물질의 혼합 및 분리의 관련성을 다루었다[13]. 유동층의 천이영역에서 기체상의 미세 혼합 및 거대 혼합의 빠른 균일 반응의 겉보기 속도론과의 관련성을 분석하였다[14]. 연료 입자의 효과적인 측면 확산 및 풀 스케일 유동층 연소실의 층에 걸쳐 휘발성 물질의 균일한 방출에 대한 기준은 연료 입자 측면 분산의 겉보기 속도에 기초하여 확립되었다[15]. 하지만 앞서 소개한 대부분의 논문들은 순환유동층 연소 실험장치에 외부가열 히터를 사용하여 연소조건을 맞추어 실험하여 실제 연소에 의한 연소로 내부 온도변화 그리고 그에 따른 연소로 높이별 연소분율을 측정하거나 파악하기 어렵다. 뿐만 아니라 순환유동층 보일러 설계 중 가장 중요한 연소로 벽면에 설치된 증발기의 열흐름량(heat flux)을 측정할 수 없어 연소로 높이별 열전달계수를 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 연소로 외부에 온도조절용 히터를 설치하지 않고, 실제 발전소와 동일하게 연료의 연소열만으로 운전이 가능한 연소장치를 구성하였다. 본 실험장치를 이용하여 목재펠릿 혼소율 증가에 따른 연소로 내의 높이별 연소분율, 열전달 특성 및 환경오염물질 배출 특성을 분석하였으며 1, 2차공기비 조절에 따른 연소 및 환경 특성도 함께 고찰하였다. 아울러 순환유동층 보일러 대류전열부의 고온부식의 원인이 될 수 있는 부식성 나노입자도 연료에 따라 그 변화특성을 함께 확인하였다.

2. 실 험

2.1 연료 및 유동사

본 연구에서 사용된 연료들의 공업분석, 원소분석, 발열량, 회분 및 회융점 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 아역청탄 3종과 목재펠릿 2종의 연료특성 비교 결과, 대체적으로 목재펠릿은 아역청탄에 비하여 수분량, 회분량 및 고정탄소는 적은 반면, 휘발분 함량이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 원소분석 결과를 보면 fuel N 성분은 목재펠릿이 높고, fuel S 성분은 아역청탄이 높으며, 회융점은 크게 차이를 보이지 않았다. 원활한 연료공급을 위하여 아역청탄은 원탄을 6 mm 이하로 파쇄하여 사용하였으며, 목재펠릿은 직경이 8 mm로 길이를 약 10 mm 정도로 절단하여 사용하였다. 유동사는 모래에 비하여 상대적으로

Table 1. Properties of fuels

Description	Unit	S coal	H coal	K coal	Wood Pellet 1	Wood Pellet 2
Total moisture	% (m/m)	34.29	24.36	30.08	9.02	7.73
Proximate Analysis (as received basis)						
Volatile matter	% (m/m)	45.07	45.18	47.50	72.31	78.07
Moisture	〃	8.34	10.31	13.93	7.15	6.88
Fixed carbon	〃	40.62	39.05	34.94	17.68	10.61
ash	〃	5.97	5.46	3.83	2.86	4.44
Calorific value (gross as received basis)	kcal/kg	4,092	4,876	4,459	4,580	4,250
Ultimate analysis (as dry basis)						
Carbon	% (m/m)	67.23	68.61	65.90	52.73	49.51
Hydrogen	〃	4.35	4.86	4.54	7.48	5.54
Nitrogen	〃	1.01	1.37	1.28	0.22	1.56
Total sulfur	〃	0.38	1.67	0.49	0.04	0.21
Oxygen	〃	20.51	17.40	23.31	36.45	38.37
Ash	〃	6.52	6.09	4.48	3.08	4.81
Ash analysis	% (m/m)					
SiO_2	〃	31.11	40.83	24.21	27.73	34.52
Al_2O_3	〃	9.54	22.00	13.99	11.11	8.97
TiO_2	〃	0.58	0.80	0.38	0.56	1.09
Fe_2O_3	〃	30.86	13.58	21.66	6.12	6.30
CaO	〃	13.62	10.31	18.88	31.36	25.30
MgO	〃	5.40	3.76	7.23	3.36	8.25
Na_2O	〃	1.21	3.03	0.54	2.05	2.49
K_2O	〃	0.80	2.14	0.94	10.49	10.16
SO_3	〃	5.50	1.84	11.35	3.83	0.94
Ash fusion temp. (I.D.T)	℃	1,208	1,259	1,210	1,309	1,210

마모에 강한 평균입도 약 200 μm인 SiC를 사용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 순환유동층 연소장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 높이 8 m, 직경 150 mm의 연소로를 갖는 장치로써, 연료 및 회재 입자는 연소로에서 부유되어 1차 사이클론 분리기를 지나 하강관(직경: 50 mm)으로 유입되며, 유입된 고체는 룹실을 거쳐 다시 연소로로 재순환하게 된다. 1차 사이클론 분리기에서 포집되지 않은 고체 입자는 2차 사이클론과 백필터에서 포집된다. 연료 주입은 로터리 피터와 스크류 피터의 조합으로 인버터를 이용하여 로터리 피터의 회전수를 조절하는 방식으로 투입량을 조절하고, 연소로 내로 연료가 신속하고 용이하게 투입될 수 있도록 스크류 피터 연속공급 형태로 구성하였다. 또한 실제 연소시험 중 투입된 무게를 확인하여 제어하기 위하여 각 연료 사일로에 저울을 설치하였다. 1차, 2차, 3차 연소용 공기는 각각 질량유량제어장치(MFC)를 통하여 정량 주입할 수 있도록 구성하였으며, 각각에서 정량 조절된 공기는 예열기를 지나 연소로로 공급되도록 구성되어 있다. 순환유동층 연소로에서 배출된 배기가스는 1차와 2차 열

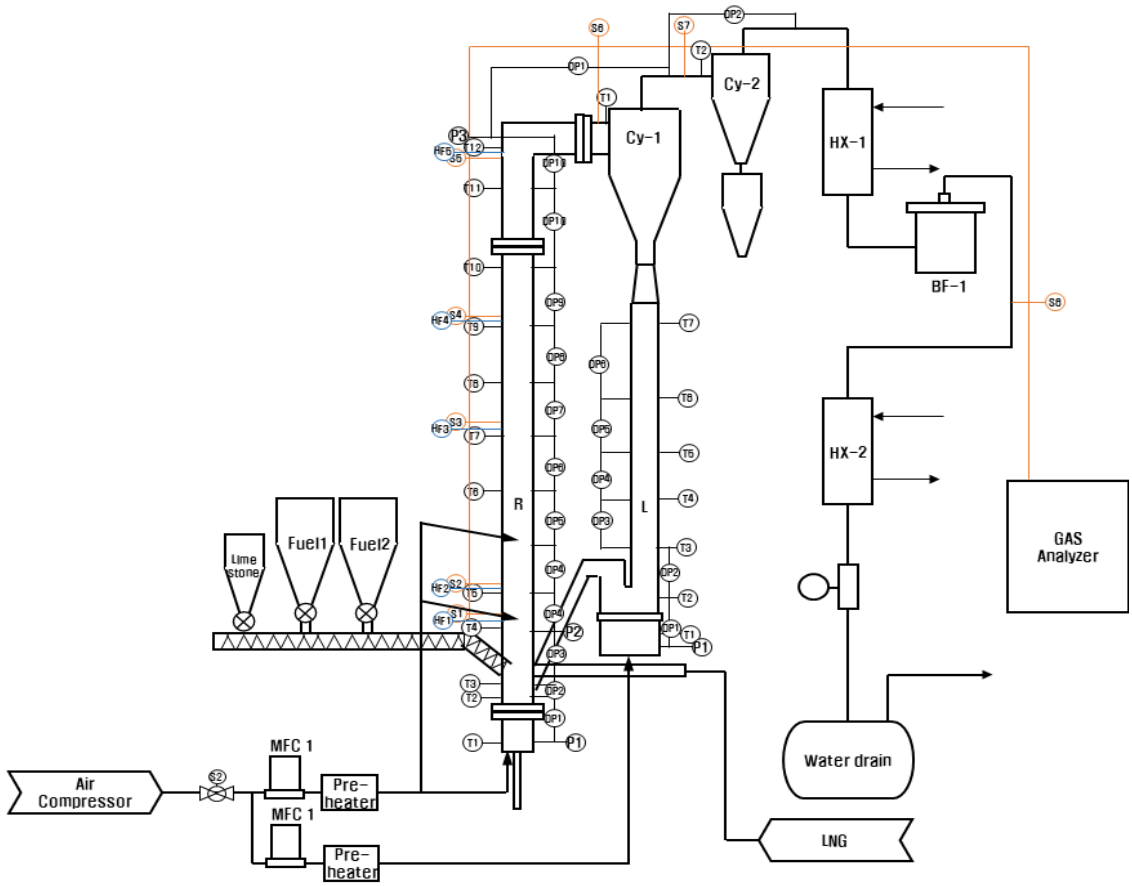

Fig. 1. Schematic diagram of a pilot-scale CFBC system

교환기를 지나 미세 입자 분리 제거 후, 가스분석기로 보내진다. 순환유동층 연소로는 크게 windbox, 분산판, 연소로, 사이클론 분리기, 하강관 및 룹실로 구성되어 있으며, 각 위치별로 높이에 따라 열전대, 압력계가 설치되어 있다. 열전대, 압력계는 연소로 분산판 기준으로 −80 (windbox), 30, 250, 700, 1,300, 1,900, 2,700, 3,700, 4,700, 5,700, 6,700, 7,965 mm 및 1차, 2차 사이클론 출구 측에 설치되어 있으며, 하강관에는 룹실 분산판 기준으로 −47 (windbox), 30, 80, 400, 2,400, 4,400, 6,460 mm의 위치에 설치되어 있다. 연소로 하부에는 가스버너를 설치하여 초기 기동시 연소로 온도를 제어할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 가스 샘플링 포트는 연소로 높이별 5곳과 사이클론 후단부 2곳 그리고 백필터 후단 1곳에 설치하였으며, 가스분석기와는 120℃ 이상으로 가열이 가능한 샘플링라인과 연결되어있다. 실험 중 포집된 배기가스는 물의 응축을 방지하기 위하여 가열된 샘플라인을 통하여 가스분석기로 공급되었으며, 배기가스 농도는 실시간으로 분석하였다. 실험에 사용된 분석기는 ABB사와 Gasmet사 2가지 분석기를 사용하였으며, 그 세부사항은 Table 2에 정리하였다.

2.3 실험조건

목재펠릿 혼소율 증가에 따른 연소로 내의 높이별 연소분율, 열전달 특성 및 환경오염물질 배출 특성 분석과 1, 2차공기비 조절에 따른 연소 및 환경 특성을 고찰하기 위한 실험 운전조건은 Table 3에 나타내

었다. 과잉공기비는 120%로 고정하여 실험하였다. 본 장치제작의 목적인 연소로 높이별 연소분율을 확인하기 위하여 각 조건에 대하여 연소로 높이별 가스 농도를 측정하였으며, 식 (1)을 이용하여 He 투입량과 농도를 통하여 각 높이별 연소가스량을 추정하였다.

$$Total\,flowrate\,(NL/\min) = \frac{He_{input}}{100 \times He_{measured}} \quad (1)$$

$$CO_{2,\,measured}(NL/\min) = CO_2\,농도\,(\%) \times Total\,flowrate \quad (2)$$

$$CO_{2,\,predicted}(NL/\min) = 연료량\,(kg/hr) \times 연료\,C\,량\,(kg/kg) \times 24.04/12 \times 16.66667 \quad (3)$$

$$Combustion\,fraction\,(\%) = \frac{CO_{2,\,measured}}{CO_{2,\,predicted}} \times 100 \quad (4)$$

여기서 투입되는 He의 양은 MFC로 제어되며, 연소반응 중 He은 생성되지 않으므로 연소로 각 높이별 측정되는 He 농도를 통하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 각 높이별 연소가스량을 계산할 수 있다. 미연탄소분이 미량이므로 없다고 가정하고, 연소로 높이별 측정된 CO_2 농도를 식 (2)를 이용하여 CO_2 유량을 계산하고, 식 (3)을 이용하여 이론적으로 완전연소가 될 때 발생하는 CO_2 유량과 비교하여 식 (4)와 같이 연소분율을 계산하였다.

또한 환경오염물질 배출 특성을 분석하기 위해서 식 (5)와 같이 모든 조건의 배기가스 농도는 산소 농도 6%로 보정하여 해당 원소가 배기가스로 전환되는 전환율(conversion ratio, CR)을 식 (6), (7), (8)을 이용하여 비교하였다.

$$[Gas]_{6\%O_2} = [Gas]_{측정\,값} \times \frac{[O_2]_{air} - [O_2]_{기준\,값}}{[O_2]_{air} - [O_2]_{측정\,값}} \quad (5)$$

Table 2. Analytical components and measurement methods

Maker	Analytical component	Measurement method
ABB	O_2	Paramagnetic
	He	TCD
	CO_2, CO, NO, SO_2, N_2O	NDIR
Gasmet	O_2 (Fuji)	Paramagnetic
	NH_3, HCl, HCN, HNCO, CO_2, CO, NO, SO_2, N_2O, Hydrocarbon	FTIR

Table 3. Operating conditions

Parameters	Range
Coal feeding rate (kg/h)	0-7.8
Wood Pellet feeding rate (kg/s)	0-8.0
Total air flowrate (lpm)	732-749
PA ratio (-)	0.6-1
Upper secondary air ratio (-)	0-0.3

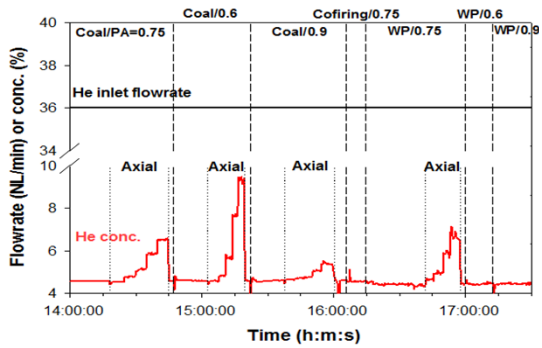

Fig. 2. He concentration according to furnace height

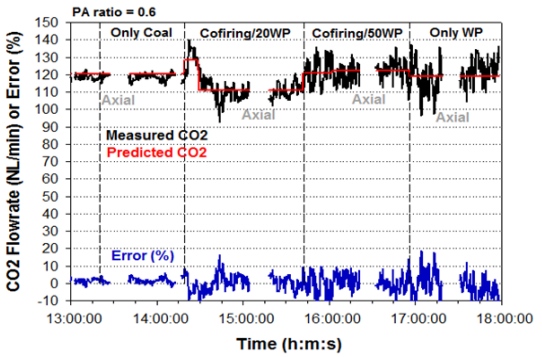

Fig. 3. Comparison predicted CO_2 concentration with measured CO_2 concentration

$$CR_{S\rightarrow SO_2} = \frac{[\frac{S^{SO_2}}{C^{CO_2+CO}}]_{flue\ gas}}{[\frac{S}{C}]_{fuel}} \quad (6)$$

$$CR_{N\rightarrow NO} = \frac{[\frac{N^{NO}}{C^{CO_2+CO}}]_{flue\ gas}}{[\frac{N}{C}]_{fuel}} \quad (7)$$

$$CR_{N\rightarrow N_2O} = \frac{[\frac{N^{N_2O}}{C^{CO_2+CO}}]_{flue\ gas}}{[\frac{N}{C}]_{fuel}} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 순환유동층 운전 특성

Fig. 4와 Fig. 5에 1차공기비에 따른 연소로의 운전압력과 고체입자 분율을 나타내었다. 그림과 같이 분산판 기준 약 1.3 m 이상에서는 압력(고체분율)이 일정함을 확인할 수 있으며, 이 높이를 기준으로 고체입자의 밀집상(dense bed)과 희박상(dilute bed)으로 나누어짐을 알 수 있다. 일반적인 상용 순환유동층 연소로 설계시 연소로를 밀집상과 희박상으로 나누어 연소분율을 고려하여 열교환기를 배치하게 되는데, 이에 본 실험 결과의 연소분율 계산시 분산판 기준 약 1.3 m 이상과 이하로 나누어 연소분율을 계산하였다. Fig. 6은 아역청탄 전소시 1, 2차공기비 변화에 따른 연소로 내 온도를 나타내었다. 이는 기존의 연구에서의 1, 2차공기비 변화에 따른 연소로 내 온도변화와 유사한 경향을 나타내었다[9,16].

Fig. 6에서 보듯이 2차공기비 증가시 연소로 높이별 온도 편차가 커짐을 확인할 수 있다. 2차공기비가 증가할수록 1차공기량이 감소하여 고체입자의 순환량이 감소할 뿐만 아니라, 연소로 하부 측 연소가 감소하고 2차공기의 주입 부근에서의 연소가 급격히 증가하기 때문이다.

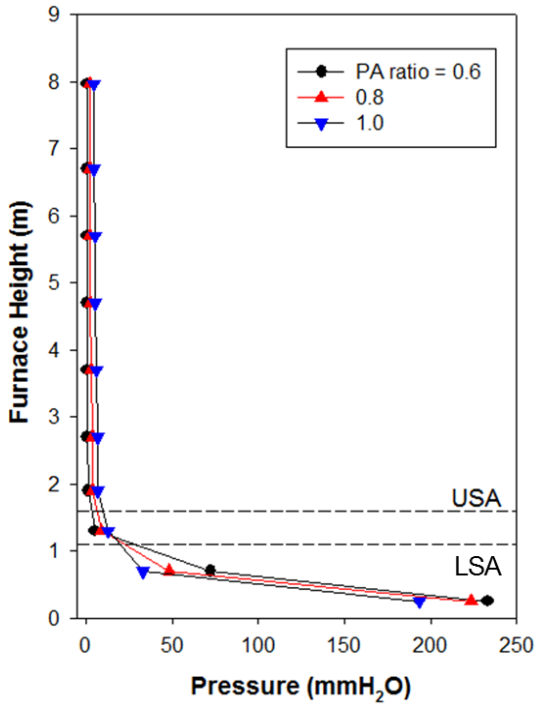

Fig.4. Axial pressure profile along furnace height according to primary air ratio

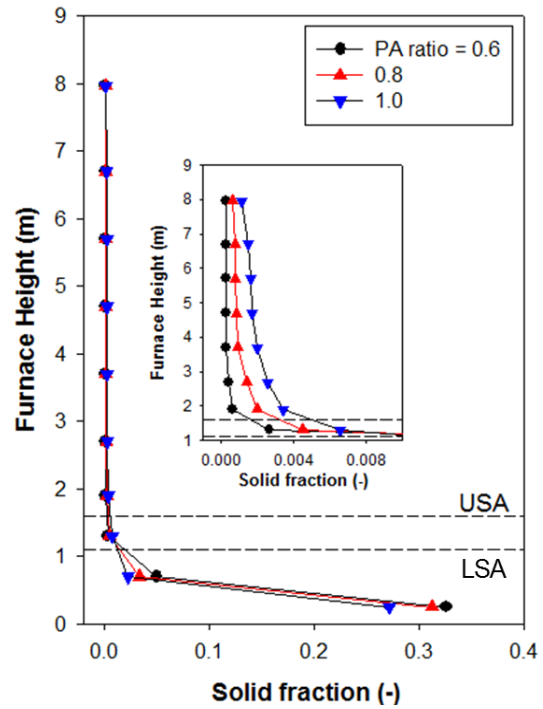

Fig. 5. Axial solid fraction profile along furnace height according to primary air ratio

3.2. 연소특성

Fig. 7은 아역청탄 전소시 1, 2차공기비 변화에 따른 연소로 하부 연소분율을 나타내었다. 석탄연소시 1차공기비가 0.6일 때, 2차공기 사용조건에 따라 연소분율이 60-80%로 나타났으며, 1차공기비가 0.75 이상에서는 90% 이상의 연소분율을 보였다. 이는 1차공기비 증가시 연소로 하부 연소가 활성화됨을 의미하며, 앞선 Fig. 4의 연소로 높이별 온도변화가 연소분율 변화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 1차공기비를 0.6으로 고정하고 아역청탄 전소를 기준으로 목재펠릿의 혼소율을 증가시킴에 따른 연소로 하부 연소분율을 나타내었다. 목재펠릿 혼소율 증가에 따라 밀집상에서의 연소분율은 석탄 전소시 78% 수준에서 목재펠릿 전소시 75% 수준으로 상대비교시 약 3%가 감소하였으며, 이에 따라 희박상에서의 연소분율은 20% 혼소시 약 3%가 증가함을 확인하였다. 다른 연구에서는 연료의 휘발분과 고정탄소의 비에 따라 밀집상에서의 연소분율을 아래 식 (9)와 같이 표현할 수 있음을 밝혔다[17].

$$Combustion\,fraction \propto \left(\frac{Volatile\,matter}{Fixed\,Carbon}\right)^{-0.25} \quad (9)$$

문헌식을 사용하여 계산할 경우, 목재펠릿 20% 혼소시 석탄전소의 경우보다 밀집상에서의 연소분율이 약 6%가 감소하는 것으로 나타났다. 본 실험 결과를 바탕으로 아역청탄과 목재펠릿 혼소시 연소로 하부 연소분율에 관한 식 (10)을 도출하였다.

$$Combustion\,fraction\,(\%) = -0.0705 \times 목재펠릿\,wt\% + 0.774 \quad (10)$$

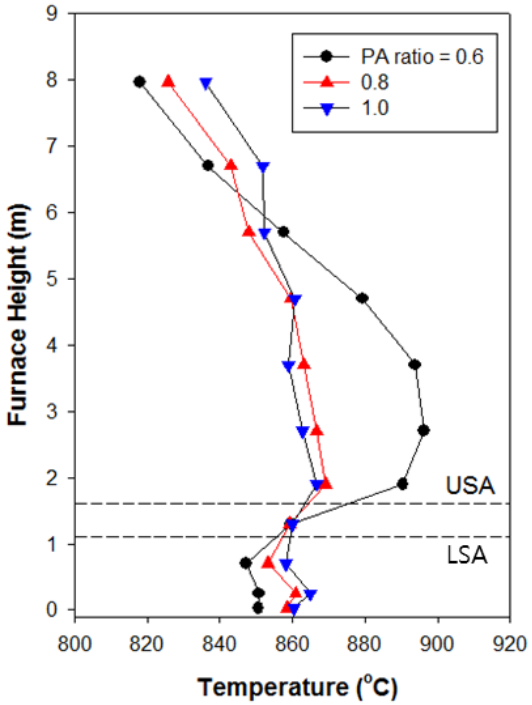

Fig. 6. Axial temperature profile inside the combustor related to primary air ratio

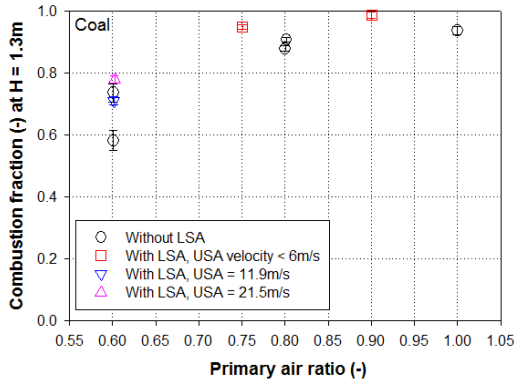

Fig. 7. Effect of primary & secondary air ratio on combustion fraction at dense bed

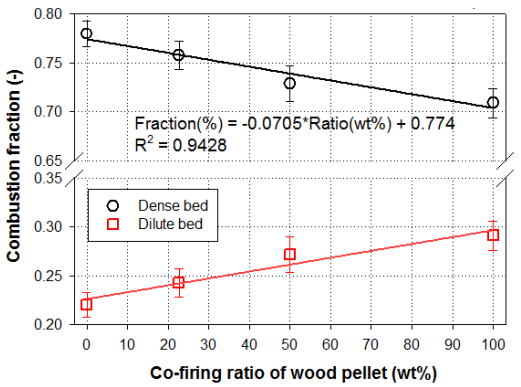

Fig. 8. Effect of co-combustion rate with woodpellet on combustion fraction at dense bed

Fig. 7과 Fig. 8을 종합하여 볼 때, 상용 유동층 보일러에서 일반적으로 사용하는 1차공기비 0.6의 조건에서 연료의 변화에 따른 연소분율 변화(약 8%)보다 2차 공기 주입 조건변화 lower secondary air (LSA) 여부와 upper secondary air (USA) 유속에 따른 연소분율 변화(약 25%)가 더 크게 밀집상에서의 연소분율에 작용하는 것으로 확인되었다.

Fig. 9는 1차공기비 증가에 따른 LSA의 사용 여부가 CO 농도 변화에 미치는 영향을 나타내었다. LSA를 사용한 경우, 1차공기만 주입한 경우보다 CO 농도가 감소하여 연소성이 개선되었으며, 1차공기비가 증가하여도 경향성이 유지됨을 확인할 수 있었다. 즉 연소로 하부 LS를 주입할 경우 연소성이 보다 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 LSA의 주입여부와 USA 유속 변화에 따른 연소로 하부의 연소분율 및 O_2, CO 농도변화를 나타내었다. LSA를 사용하지 않을 경우, 1차공기비와 상관없이 연소로 하부 산소농도는 0 부근으로 매우 강한 환원분위기가 형성됨을 알 수 있다. LSA와 6 m/s 이하의 낮은 유속의 USA를 사용할 경우에도 총 1차공기비가 높은 경우에는 약간의 산소농도가 나타나기는 하였지만 여전히 산소농도가 낮음을 알 수 있었다. 그러나 USA 유속을 12 m/s로 증가할 경우 1차공기비가 낮은 경우임에도 불구하고 산소농도는 1.5%로 상승하였으며, USA 유속을 22 m/s로 증가할 경우에는 산소농도가 2.5-3.0%까지 상승하였다. 이는 USA 유속이 증가함에 따라 침투 깊이가 증가하여 연소로 하부까지 투입되었음을 의미한다. 또한 이에 따라 횡방향 혼합이 증가하여 전체적으로 연소분율이 상승한 것으로 보아 2차공기 유속 최소조건을 확인할 수 있었다. 그러나 산소농도가 높음에도 불구하고 CO 농도 또한 2% 수준을 유지함을 볼 때, 연소로 하부는 산화와 환원분위기가 공존함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 아역청탄 전소 및 목재펠릿 20% 혼소시 연소로 높이별 Heat flux를 측정한 결과이다. 연료에 따라 연소로 높이별 Heat flux 값은 4-13 kW/m^{2}의 차이를 보였지만, 연료에 상관없이 연소로 상부(H=8 m)에서 제일 낮은 값을 보였다. 기존 연구에서 Heat flux는 고체밀도와 연소로 온도의 함수이므로[17], 이

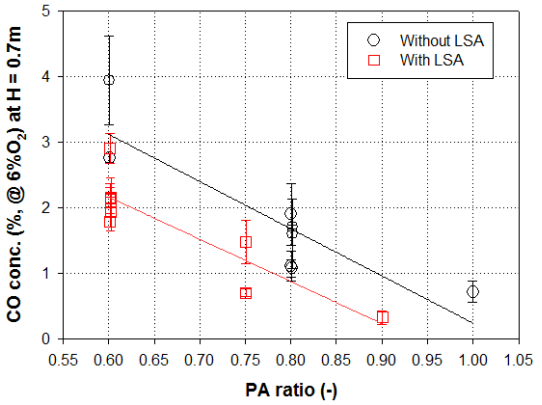

Fig. 9. CO concentration in dense bed (0.7 m) with or without LSA

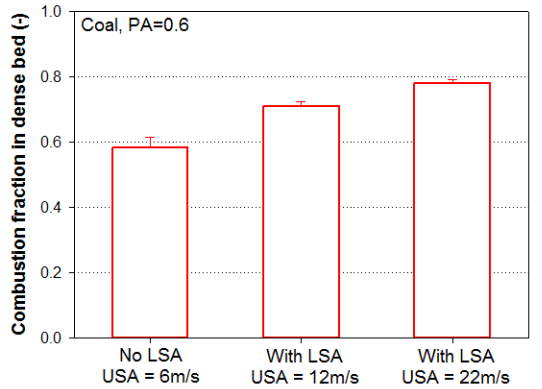

Fig. 10. Effect of combustion fraction in dense bed on LSA, USA velocity

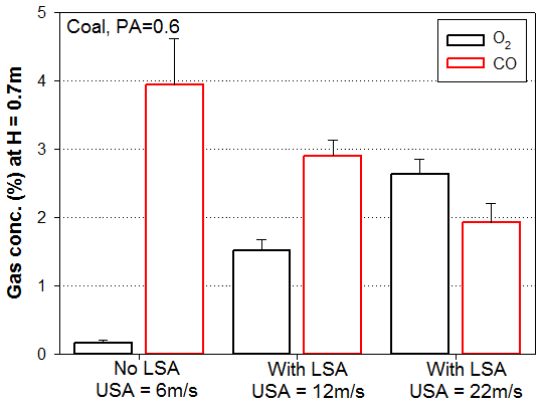

Fig. 11. Effect of O_2, CO concentration in dense bed on LSA, USA velocity

러한 상관관계를 살펴보기 위하여 측정위치별 고체 밀도와 연소로 온도를 Fig. 13에 도시하였다. 본 시험조건에서는 H=8 m인 최상부에서의 총 열유속은 82-95 kW/m^{2}이었으며, H=4.7 m에서는 96-108 kW/m^2, H=2.3 m에서는 102-106 kW/m^{2}로 상용 CFB 보일러 최대 Heat flux가 약 95 kW/m^{2}임을 고려할 때 적절한 결과임을 확인할 수 있었다. 이 중 복사열유속은 60-76%를 차지하고, 대류 열유속은 25-40%를 차지함을 확인할 수 있었다. 이에 연료별 열유속을 고체 입자 밀도와 온도의 함수로 피팅하여 상관식 (11, 12)를 도출하였다.

$$Heat\ flux_{coal}[kW/m^2] = 0.21\rho^{0.116}T^{0.898} \quad (11)$$

$$Heat\ flux_{20\%\ WP}[kW/m^2] = 0.24\rho^{0.053}T^{0.887} \quad (12)$$

이를 계산값과 비교한 결과 오차가 Fig. 14와 같이 12.5% 이내의 범위에 있음을 확인하였다.

3.3. 대기오염물질 배출 특성

Fig. 15는 목재펠릿 혼소에 따른 환경성 변화를 도시하였다. 아역청탄에 목재펠릿 혼소율 증가에 따라 N_2O는 감소하고 NO는 증가하는 경향을 보였으며, SO_2는 감소하는 경향을 보였다. NO 증가에 대하여 보다 자세히 살펴보면 20% 혼소까지는 약 9% 증가한 반면, 목재펠릿 전소시에는 42%가 증가하여 바이오매스 전소시에는 NO 농도 관찰이 필요함을 알 수 있다. 2차공기비 증감에 따른 NO 농도 변화를 Fig. 16에 도시하였다. 바이오매스의 경우 2차공기비 초기 증가(0.1→0.25)시에는 석탄보다 많이 감소하였지만, 추가로 더 증가할 경우(0.25→0.4)에는 석탄보다 NO 감소량이 작아, 바이오매스 연소의 경우 이차공기비 조절로 인한 NO 감소량은 석탄보다 적을 수 있음을 보여준다. 일차공기비 증가에 따른 NO, N_2O와 SO_2 농도 및 Fuel N, S 변화를 Figs. 17-19에 나타내었다. 1차공기비가 증가함에 따라 NO와 N_2O는 증가하였으며, SO_2는 감소하는 경향을 보였다. 즉, NO 저감을 위하여 2차공기비를 증가할 경우, SO_2 발생량이 증

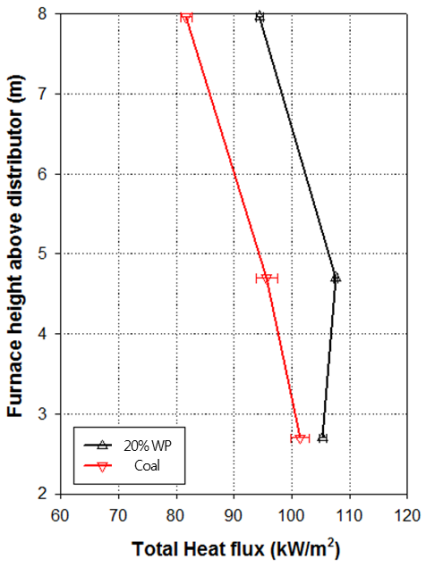

Fig. 12. Effect of heat flux on co-combustion rate with wood-pellet

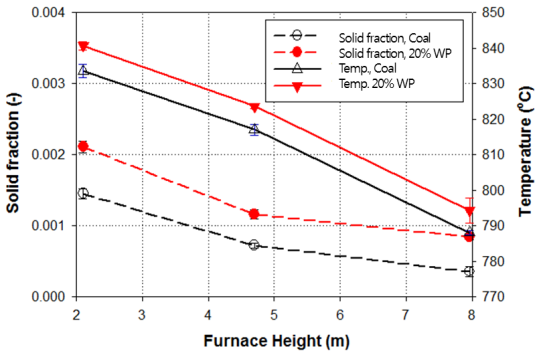

Fig. 13. Effect of solid fraction and furnace temperature on co-combustion rate with woodpellet

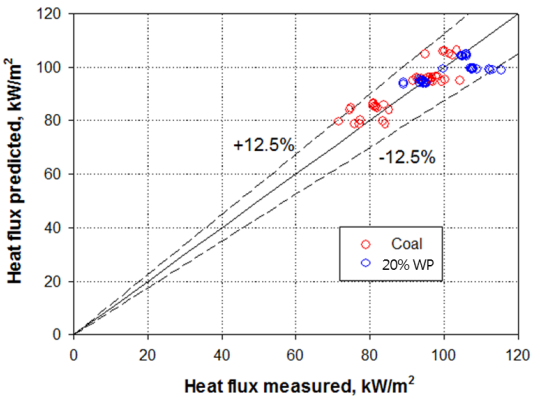

Fig. 14. Comparison of measured and predicted Heat flux

가할 수 있음을 보여주며, 이에 따라 석회석 사용량도 증가할 것으로 예측된다. 석탄의 경우 일차공기비가 높은 경우에도 NO 전환율이 10%를 넘지 않은 반면, 바이오매스 연소의 경우 37%까지 나타났다. SO_2의 경우에는 NO와 반대경향을 보였는데, 전반적으로 바이오매스 연소시 석탄연소시보다 낮은 Fuel S to SO_2 전환율을 보였다. 바이오매스 혼소에 따라 배기가스 중 부식성 나노입자의 영향을 확인하기 위하여 다단 입도분리기를 사용하여 배기가스 중 나노입자를 포집한 후 비교 평가하였다. Fig. 20에 석탄연소시 배기가스 중에 포함된 입자의 입도별 질량분포를 도시하였는데 1 μm 이하의 입자는 거의 생성되지 않았음을 볼 수 있다. 이때 포집된 입자를 XRF 분석기를 사용하여 구성성분 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 21, Fig. 22에 도시하였다. 목재펠릿 전소시에는 나노입자의 경우 대부분 K, Cl, Na로 구성된 반면, 석탄의 경우에는 대부분 Ca, S로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다.

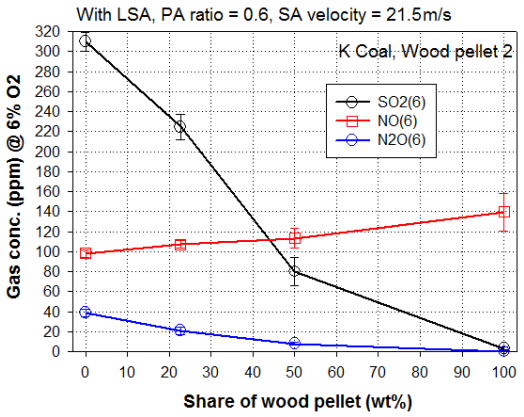

Fig. 15. Effect of co-combustion rate with woodpellet on SO2, NO, N2O emission

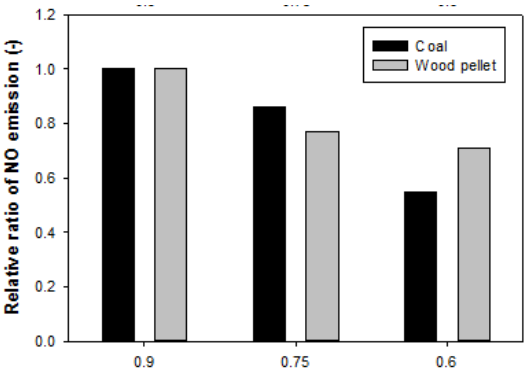

Fig. 16. Comparison of NO emission by changing PA ratio

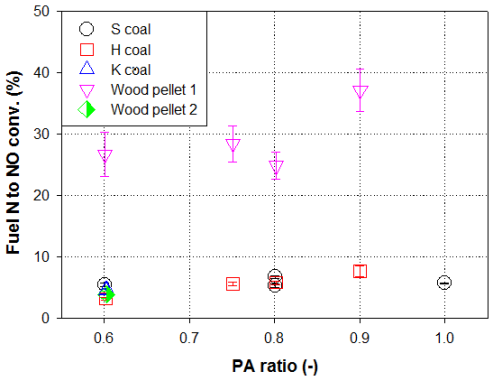

Fig. 17. Effect of PA ratio on conversion from Fuel N to NO

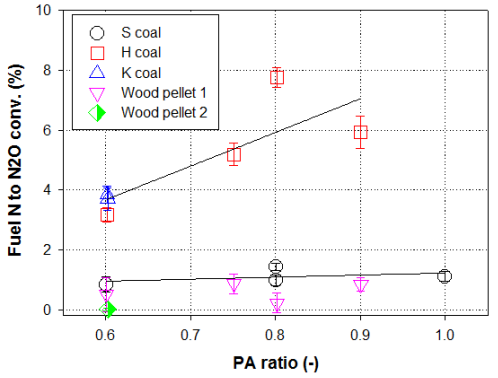

Fig. 18. Effect of PA ratio on conversion from Fuel N to N_2O

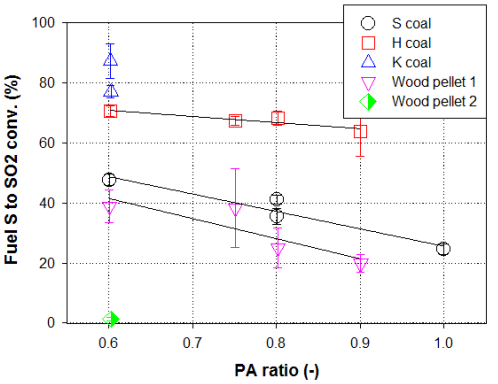

Fig. 19. Effect of PA ratio on conversion from Fuel S to SO_2

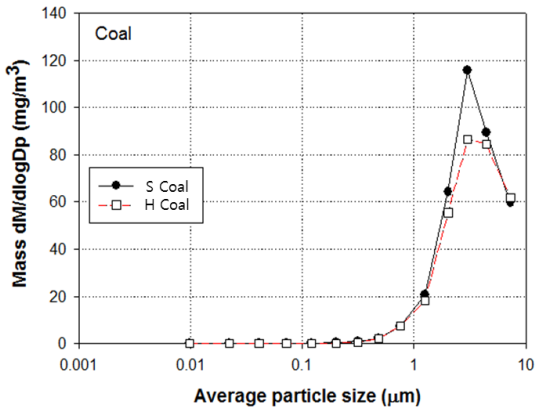

Fig. 20. Particle mass distribution in flue gas captured by cascade impactor

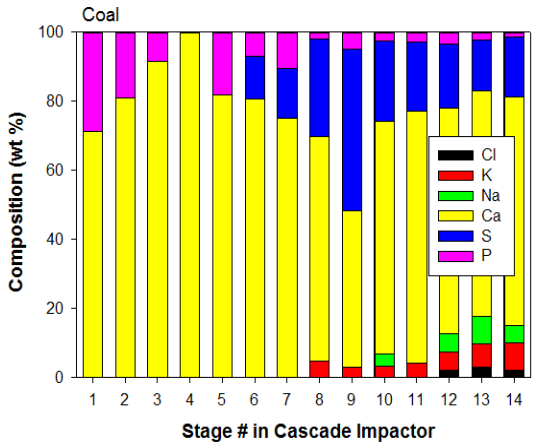

Fig. 21. Composition of coal ash particles by size captured in cascade impactor

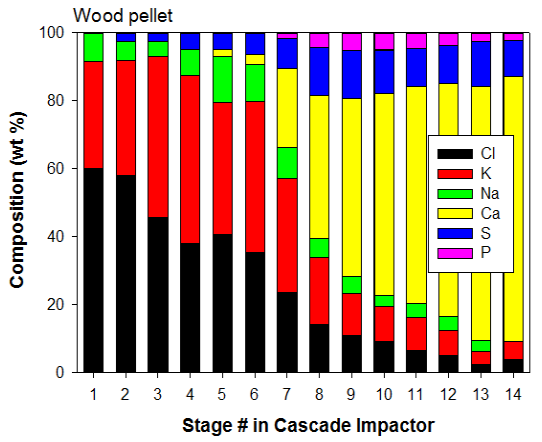

Fig. 22. Composition of wood pellet ash particles by size captured in cascade impactor

4. 결 론

목재펠릿을 보조연료로 하는 순환유동층 보일러 설계를 위해 외부가열로를 사용하지 않는 순환유동층 연소시험 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 기존 연소시험장치에서 측정이 불가하였던 연소분율 및 열유속을 측정하였다. 1차공기비가 0.6인 조건에서 목재펠릿 혼소율 증가에 따라 밀집상(연소로 높이 1.3 m 이하)에서의 연소분율은 석탄전소시 78% 수준에서 목재펠릿 전소시 71% 수준으로 약 7%가 감소하였다. 또한 2차공기비 증가시 연소로 하부의 연소분율 60%에서 80%로 증가함을 알 수 있었다. 또한 연소 중 연소로 내의 Heat flux를 측정하였으며, 석탄 전소시와 목재펠릿 20% 혼소시 Heat flux 변화를 비교하였다. H=8 m인 최상부에서의 총 열유속은 82-95 kW/m^{2}이었으며, H=4.7 m에서는 96-108 kW/m^2, H=2.3 m에서는 102-106 kW/m^2 정도로 나타남을 확인할 수 있었으며, 이 중 복사열유속은 60-76%를 차지하고, 대류 열유속은 25-40%를 차지함을 확인할 수 있었다. 목재펠릿 혼소율 증가시 환경오염물질 배출특성을 분석한 결과, N_2O는 감소하고 NO는 증가하는 경향을 보였으며, SO_2는 감소하는 경향을 보였다. 1차공기비 증가에 따른 NO, N_2O와 SO_2 농도 및 Fuel N, S 변화도 측정하였으며, 1차공기비가 증가함에 따라 NO와 N_2O는 증가하였으며, SO_2는 감소하는 경향을 보였다. 즉, NO 저감을 위하여 2차공기비를 증가할 경우, SO_2 발생량이 증가할 수 있음을 보여주며, 이에 따라 석회석 사용량도 증가할 것으로 예측된다. 석탄연소시 배기가스 중에 포함된 입자의 입도별 질량분포를 확인한 결과, 1 μm 이하의 입자는 거의 생성되지 않았음을 알 수 있었다. 이때 포집된 입자를 XRF 분석기를 사용하여 구성성분 분석을 수행하였으며, 목재펠릿 전소시에는 나노입자의 경우 대부분 K, Cl, Na (주로 KCl)로 구성된 반면, 석탄의 경우에는 대부분 Ca, S로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다.

References

1. M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, and R. Vellone, “Hydrogen economy for a sustainable development : state of the art and tehchnol ogical perspectives”, J. Power Sources, Vol. 100. 2001, pp. 171-187, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00893-X.
2. I. Barnes, “Operating Experience of Low Grade Fuels in Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) boilers”, IEA Clean Coal Centre, UK, 2015.
3. H. R. David, “McCoy Power Reports 2019”, McCoy, Singapore, 2019.
4. J. M. Lee, D. W. Kim, J. S. Kim, J. G. Na, and S. H. Lee, “Co-combustion of Refused Derived Fuel with Korean Anthracite in a Commercial Circulating Fluidized Bed Boiler”, Energy, Vol. 35, 2010, pp. 2814-2818, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.008.
5. D. W. Kim, J. M. Lee, J. S. Kim, and J. J. Kim, “Co-combustion of Korean Anthracite with Bituminus Coal in Two Circulating Fluidized Bed Combustors”, Korean J. Chem. Eng. Vol. 24. 2007, pp. 461-465, doi: https://doi.org/10.1007/s11814-007-0080-0.
6. H. Topal, A. T. Atimtay and A. Durmaz. “Olive cake combustion in a circulating fluidized bed.”, Fuel, Vol. 82, No. 9, 2003, pp. 1049-1056, doi: https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00404-0.
7. A. T. Atimtay, H. Topal, “Co-combustion of olive cake with lignite coal in a circulating fluidized bed”, Fuel, Vol. 83, No, 7-8, 2004, pp. 859-867, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.09.015.
8. P. Gayan, J. Adanez, L. F. Diego, F. Garcıa, A. Cabanillas, A. Bahillo, M. Aho, K. Veijonen, “Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass”. Fuel. Vol. 83, No. 3, 2004, pp. 277-286, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.08.003.
9. J. J. Xie, X. M. Yang, T. L. Ding, W. L. Song, W. G. Lin, “Emissions of SO2 , NO and N2O in a circulating fluidized bed combustor during co-firing coal and biomass”, J. Environmental Sciences. Vol. 19, No. 1, 2007, pp. 109-116, doi: https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60018-7.
10. M. A., Youssef, S. S. Wahid, M. A. Mohamed, A. A. Askalany, “Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed”. Applied Energy. Vol. 86, No. 12, 2009, pp, 2644-2650, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.021.
11. B. Leckner, L. E. Åmand, K. Lücke, J. Werther, “Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed”, Fuel. Vol. 83, No. 4-5, 2004, pp. 477-486.
12. T. Saikaew, P. Supudommak, L. Mekasut, P. Piumsomboon, P. Kuchonthara, “Emission of NOx and N2O from co-combustion of coal and biomasses in CFB combustor”, Int. J. Greenhouse Gas Control. Vol. 10. 2012, pp. 26-32.
13. B. Leckner, “Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation”, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24. 1998, pp. 31–61.
14. F. Scala, P. Salatino, “Modelling fluidized bed combustion of high volatile solid fuels”, Chemical Engineering science. Vol. 57. 2002, pp. 1175-1196.
15. Luecke, K., Hartge, E. U., Ragucci, R., Salatino, P., “'A 3-dimensional model of combustion in large-scale circulating fluidized bed boilers”, Int. J. Chemical Reactor Engineering, Vol. 43. 2004, pp. 5738-5753.
16. P. Basu, “Circulating fluidized bed boilers”, Springer, 2015, pp. 173-209.
17. R. Solimense, A. Marzocchella, R. Ragucci, P. Salatino, “Laser diagnos and gas-mixing induced by bubble bursting at the surface of gas-fluidized beds”, Chemical Engineering Science. Vol. 62. 2007, pp. 94-108.