

기포 유동층 반응기를 이용한 하수슬러지 및 우드펠릿 혼소에 관한 연소 특성 분석 및 비교

이영재^{1,*}, 김종민¹, 김동희^{1,2}, 이용운¹

¹한국생산기술연구원

31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

²과학기술연합대학원대학교 청정공정 및 시스템공학과

34113 대전광역시 유성구 가정로 217

(2016년 8월 30일 접수; 2016년 10월 4일 수정본 접수; 2016년 10월 6일 채택)

Experimental Study of Co-firing and Emission Characteristics Fueled by Sewage Sludge and Wood Pellet in Bubbling Fluidized Bed

Youngjae Lee^{1,*}, Jongmin Kim¹, Donghee Kim^{1,2}, Yongwoon Lee¹

¹Korea Institute of Industrial Technology

89, Yangdaegiro-gil, Ipiang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 31056, Korea

²University of Science and Technology

217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Korea

(Received for review August 30, 2016; Revision received October 4, 2016; Accepted October 6, 2016)

요 약

하수슬러지 고형연료 및 우드펠릿의 전소 및 혼소 실험을 위해 내경 0.1 m, 높이가 1.2 m인 기포 유동층 반응기를 적용하였으며, 장치는 유동층 반응기, 연료 공급장치, 사이클론, 냉각기, 그리고 가스분석기로 구성되었다. 층 물질의 평균입자크기는 460 μm 이며, 최소 유동화 속도는 0.21 m s^{-1} 이다. 실험에 사용된 연료는 국내산 하수슬러지 고형연료 및 캐나다산 우드펠릿을 적용하였으며, 우드펠릿 기준 혼합율 20, 50, 80%로 고위발열량을 기준으로 산정하였다. 실험 고정변수는 당량비 1.65, 산화제 100 L min^{-1} , 반응기 온도 800 $^{\circ}\text{C}$, 유동화수 4로 설정하였다. TGA 분석 결과, 하수슬러지의 고형 연료의 연소성이 우드펠릿에 비해 상대적으로 좋지 않았다. 연소시 반응기 온도는 800~900 $^{\circ}\text{C}$ 사이로 유지되었으며, 유동층 반응기에서 하수슬러지 고형연료의 낮은 연소성으로 인해 CO가 상대적으로 높게 측정되었다. 뿐만 아니라 NO_x 와 SO_x 는 하수슬러지 고형연료 내의 질소함량으로 인해 우드펠릿에 비해 높게 측정되었으며, 혼소율이 증가될수록 CO, NO_x , 그리고 SO_x 의 배출이 감소하였다. 혼소에 따른 회분의 거동 및 퇴적 경향에서 모든 조건에 대해 슬래깅/파일링의 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

주제어 : 기포유동층, 하수슬러지, 우드펠릿, 혼소

Abstract : The bubbling fluidized bed (BFB) reactor with a diameter of 0.1 m and a height of 1.2 m was used for experimental study of co-firing and emission characteristics fueled by sewage sludge (SS) and wood pellet (WP). The facility consists of a fluidized bed reactor, feeding system, cyclone, condenser and gas analyzer, The mean particle diameter and minimum fluidization velocity are 460 μm and 0.21 m s^{-1} respectively. SS produced from Korea and WP from Canada were examined. The various mixing ratios of WP were 20, 50, and 80% based on HHV. The equivalence ratio of 1.65, reactor temperature of 800 $^{\circ}\text{C}$, air flow rate of 100 L min^{-1} , and fluidization number of 4 were fixed in the BFB experiment. In TGA, the range of combustion temperature of SS was wider than that of WP. It represents that the combustibility of WP is higher than that of SS. The BFB reactor temperature was maintained between 800 and 900 $^{\circ}\text{C}$. CO emission of SS was high because of lower combustibility. NO_x and SO_x formation of SS were higher than that of WP since high nitrogen and sulfur contents of SS. CO, NO_x , and SO_x formation were suppressed as the mixing ratio of WP was increased. The slagging and fouling tendencies show high in all test conditions.

Keywords : Bubbling fluidized bed, Sewage sludge, Wood pellet, Co-firing

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: leeyj@kitech.re.kr; Tel: +82-41-589-8464; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2017.23.1.080 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

화력 발전 시장에서 고품위탄 사용 증가 및 화석연료 사용으로 인한 환경 문제로 인해 저품위탄 사용에 대한 요구가 증대되고 있는 현실에서 바이오매스 및 폐자원의 에너지화 기술 역시 함께 전세계적으로 주목을 받고 있다. 하지만 기존의 미분탄 화력발전소에서의 바이오매스, 반탄화 연료, 그리고 기타 폐자원을 이용한 발전은 그 한계를 보이고 있으며, 기술 개발을 통해서 에너지 안보 문제를 해결할 필요성이 야기되고 있다. 최근 우리나라에서 발생하는 하수슬러지의 에너지화 기술이 주목을 받고 있으나, 하수슬러지 내에 함유된 이물질로 인한 발전 설비의 악영향 및 배출 가스의 문제 등을 해결하기 위한 연구가 아직 미흡한 실정이다.

유동층 연소로는 연소기의 특성상 미분탄 연소기에 비해 상대적으로 연료의 크기나 구성 성분에 크게 영향을 받지 않으며, 바이오매스, 폐자원 그리고 하수슬러지와 같은 에너지를 별도의 공정을 거치지 않고도 연료를 직접 보일러 내에서 직접 연소하여 에너지로 활용할 수 있어 많은 연구가 진행되었다[1-3]. 특히 하수슬러지 에너지화 연구와 관련하여 Amand and Leckner [4]는 하수슬러지와 석탄 및 목질계 바이오매스와의 혼소를 통해 NO와 N₂O의 저감에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Salatino et al. [5]은 다양한 종류의 펠릿화된 바이오매스와 무독성 폐기물을 이용하여 유동층 연소와 관련된 연료 특성 인자를 도출하였다. 뿐만 아니라 연료 전환율과 좌연소에 대해 규명하고, 층 물질의 응집 현상에 대해 조명하기 위해 회분 입자의 크기 및 거동에 대한 연구도 수행하였다. Khan [6]은 기포 유동층 보일러에서 하수슬러지를 포함한 다양한 바이오매스를 적용하여, 유동층 보일러에서의 운전인자의 영향력 분석, 혼소에 따른 연소성 분석, 그리고 회분의 거동 및 층 물질의 응집에 관한 연구를 실험적, 수치적으로 접근하였다. Wang et al. [7]은 밀집 연소에서 문제가 되는 파울링 및 고온 부식을 저감할 수 있는 방안에 대해 연구하였으며, 밀집 연소시 하수슬러지를 약 5% 가량 투입하여 칼륨의 생성을 억제하고자 하였다.

본 연구는 하수슬러지를 건조, 고형연료화한 후 발전 에너지원으로서 활용 가능성을 확인하는 것에 목적이 있으며, 이를 위해 우선적으로 실험실 규모 기포 유동층 반응기를 이용하여 하수슬러지 고형연료와 대표적인 바이오매스인 우드펠릿의 전소 및 혼소 실험을 통해서 각 연료에 대한 연소 특성을 파악하고 이에 대한 회분 포집 및 분석을 통해서 슬래깅/파울링 가능성을 판단하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 층 물질 및 연료 선정

Table 1은 유동층 반응기에 적용된 층 물질의 물성치를 나타낸 것이다. 층 물질의 입도 분포를 기반으로 평균 입도를 도출하였으며, 실험에 사용된 층 물질의 평균입도는 460 μm이다. 층 물질의 particle density를 구하기 위해 bulk density를 측정하고 공극률을 측정하여 particle density를 구하였다. 측

Table 1. Properties of bed material

Property	Symbol	Unit	Value
Mean diameter	d_p	μm	460
Particle density	p_s	Kg m ⁻³	2800
Bulk density	p_b	Kg m ⁻³	1400
Sphericity	ϕ	-	0.62
Classification	-	-	B

정된 particle density는 2,800 kg m⁻³이며, bulk density는 1,400 kg m⁻³이다. 본 연구에 적용된 층 물질의 구형도는 층 물질의 particle density와 평균 입도를 기반으로 0.62인 land sand를 가정하였다. 또한 층 물질의 범위는 Geldart B [8]에 해당한다. 본 연구에서는 Equation (1), (2)을 바탕으로 최소 유동화 속도[9]를 규정하였다.

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (1)$$

$$Re_{mf} = U_{mf} \rho_g D_p / \mu_g \quad (2)$$

위 식에서 Re_{mf} 는 최소 유동화 속도에 대한 레이놀즈 수, Ar 은 아르키메데스 수이고, C_1 과 C_2 는 상수이다. 상압, 상온 상태 기준으로 ρ_g 와 μ_g 는 각각 유동화 매체의 밀도와 점도를 의미한다. 참고로 아래 첨자 p 는 층 물질, g 는 유동화 매체(산화제)를 의미한다. Grace [10]에 의해 제안된 Ar , C_1 그리고 C_2 를 바탕으로 본 실험에 적용된 층 물질의 최소 유동화 속도 0.21 m s⁻¹를 도출하였다.

본 실험에 적용된 고체 연료는 국내산 하수슬러지 고형연료(sewage sludge, SS)와 캐나다산 우드펠릿(wood pellet, WP)을 사용하였다. 또한 연료 투입 장치를 고려하여 두 연료를

Table 2. Ultimate, proximate and heating value analyses of SS and WP

Fuel	SS	WP
Ultimate analysis (wt%, DAF basis)		
C	69.7	52.3
H	7.5	5.2
N	8.9	0.9
S	0.7	0.01
O	13.2	41.6
Proximate analysis (wt%)		
Moisture	17.0	8.5
Volatile	53.5	80.0
Fixed carbon	5.6	11.2
Ash	23.9	0.3
Heating value (kcal kg ⁻¹)		
Higher Heating Value (HHV)	4,550	4,560
Lower Heating Value (LHV)	4,240	4,280

파쇄 후 재를 이용하여 직경 4~5 mm의 크기만을 추출하여 사용하였다. 실험에 적용된 SS와 WP에 대한 원소분석(ultimate analysis) 및 공업분석(proximate analysis)은 각각 ASTM E1915-97와 ASTM D7582-15를 이용하였고, 고위/저위 발열량 분석은 KS E3707의 기준을 적용하였다. 이에 대한 분석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2의 원소 분석 결과에서 SS의 경우 WP에 비해 질소 및 황의 함량이 높은 반면, 산소의 함량은 낮은 것으로 분석되었다. 특히 SS의 질소 함량은 WP의 약 10배 정도 높은 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 SS는 전체 질량의 약 24%가 회분으로 구성되어 있어, 연소 후 회분 양이 WP에 비해 많을 것으로 예측된다. 하지만 두 연료의 고위/저위 발열량은 차이가 없었다.

2.2. 실험 장치의 구성

본 실험에 적용된 실험실 규모의 기포 유동층 반응기 장치는 실제 공급 공기 및 최소 유동화 속도를 고려하여 직경 0.1 m, 높이 1.2 m의 기포 유동층 반응기의 형태로 구성되어 있으며, 구체적인 반응기 사양은 Table 3과 같다. 기포 유동층 반응기 하부에 층 물질의 유동을 위한 분산판이 설치되어 있

Table 3. Reactor specifications

Parameter	Unit	Value
Type	-	Bubbling fluidized bed
Temperature	°C	< 900
Reactor diameter	m	0.1
Reactor height	m	1.2
Fluidization velocity	m s ⁻¹	0.2~0.8

으며, 산화제 및 역류 방지 매체의 원활한 공급을 위해 MFC (mass flow control)를 매체별로 각각 N₂ (5850E brooks), air (5853s brooks)를 적용하였다. 연료 공급을 위해 single type의 screw feeder를 설치하고, 연료 이송부에 고온의 연소가스가 역류되는 것을 방지하기 위해서 N₂ 공급부를 추가적으로 설치하였다. 연소 후 생성된 입자(회분 및 비산된 모래) 포집 및 냉각을 위해 cyclone 그리고 condenser를 적용하였다. 그리고 free board의 압력을 조절하기 위해서 후단에 ID-Fan을 구성하여 일정한 압력을 유지하였다. 생성된 배기가스 분석을 위해서 TESTO 350 K [11]를 사용하였으며, 각 설비의 구성 및 위치에 대한 개략도는 Figure 1과 같다.

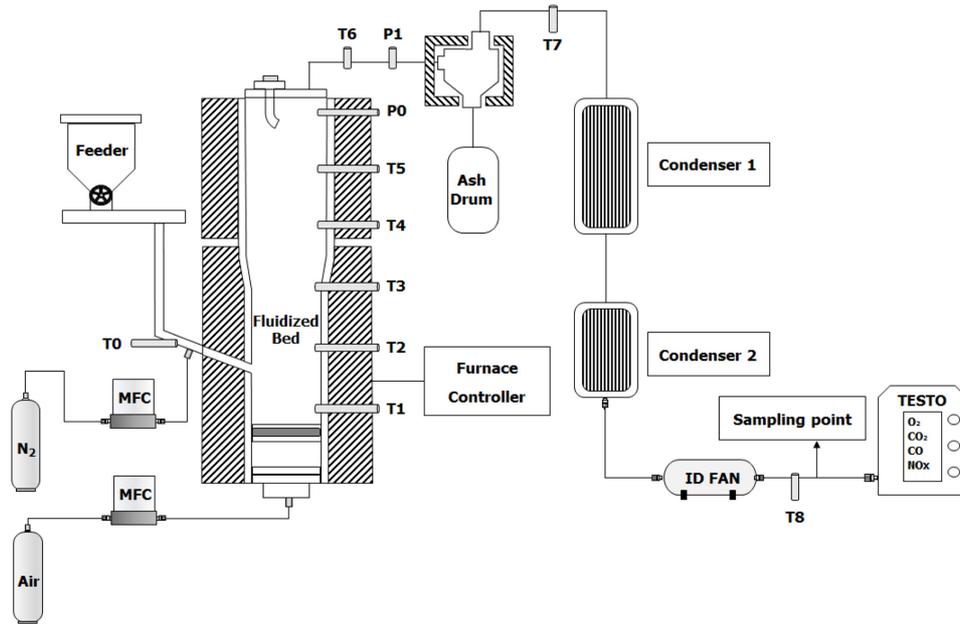


Figure 1. Schematic diagram of the lab scale BFB system (T: Thermocouple, P: Pressure gauge).

Table 4. Experimental conditions

	Unit	C1	C2	C3	C4	C5
Fuel type	-	SS (100%)	SS (80%) + WP (20%)	SS (50%) + WP (50%)	SS (20%) + WP (80%)	WP (100%)
Feeding rate	g min ⁻¹	8.5	9.4	10.75	12.1	13
Thermal input	kW	2.7	2.98	3.4	3.82	4.1
ER	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
Fluidization number	-	4	4	4	4	4
Air flow rate	L min ⁻¹	100	100	100	100	100

2.3. 실험 조건 및 방법

본 연구의 핵심은 하수슬러지 고형연료와 우드펠렛과의 혼소시 연소 특성을 분석하는 것에 목적을 두고 있다. 본 연구에 사용된 연료인 SS와 WP에 대해 발열량 기준으로 WP 기준 혼합율 20, 50, 80%의 혼소 실험과 SS와 WP 각 연료에 대한 전소 실험으로 구성되어 있다. Table 4에 나타나 있듯이 당량비는 1.65로 유지하였으며, 산화제는 공기를 투입하였다. 당량비를 유지하기 위해서 연료 공급량은 연료의 혼합비율에 따라 차이가 있으며, 투입 열량으로 3~4 kW 수준을 유지하였다. 산화제는 800 °C를 기준으로 4 U_{mf} 로 동일하게 적용하였으며, 투입 산화제는 100 L min^{-1} 으로 설정하였다. 연료 투입 장치인 screw feeder에서의 고온 생성 가스의 역류를 방지하기 위해 투입가스로 N_2 를 2 L min^{-1} 주입하였다.

Figure 1에 나타나 있듯이 screw feeder에서 반응기 측면으로 연결된 연료 투입구(T0), 기포 유동층 반응기의 위치별로 분산판으로부터 10 (T1), 20 (T2), 30 (T3), 60 (T4), 80 (T5) cm, cyclone의 inlet (T6)과 outlet (T7) 그리고 전체 반응기 출구(T8)에 각각 K-type의 열전대가 위치하고 있다. cyclone으로 유입되는 층 물질 및 회분에 의한 차압을 확인하고 free board의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 반응기 상단(P0)과 cyclone inlet (P1)에서 압력을 측정하였으며, 이 때 후단의 DC 인버터 모터를 사용하여 free board의 압력을 0~30 mmH₂O로 조절하였다. condenser는 상온의 fresh water를 사용하여 냉각하였다. 참고로 본 실험에서 층 물질의 높이는 분산판 기준 22 cm까지 위치하고 있다.

2.4. 회분의 슬래킹/파울링 인자

회분의 거동 및 퇴적의 경향은 바이오매스의 회분에 대한 경험적 인자를 바탕으로 예측되었다. 이들의 대표 인자에는 base-to-acid ratio (B/A), silica-alumina ratio (S/A), iron-calcium ratio (I/C), total alkali (TA), 그리고 bed agglomeration index (BAI)가 있다[12,13]. 본 인자들의 정의는 아래 Equation (3)~(7)과 같이 정의되어 있으며, 각각의 인자들에 대한 평가 지표는 Table 5와 같다.

Base-to-acid ratio

$$B/A = \frac{CaO + MgO + K_2O + Fe_2O_3}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (3)$$

Table 5. Ash deposition tendency

Index	Tendency		
	Low	Medium	High
B/A ratio	< 0.5	0.5 < B/A < 1	> 1
S/A ratio	< 0.31 or > 3	-	0.3 < S/A < 3
I/C ratio	< 0.31 or > 3	-	0.3 < I/C < 3
TA	< 0.3	0.3 < TA < 0.4	> 0.4
BAI	-	-	< 10

Silica-alumina ratio

$$S/A = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (4)$$

Iron-calcium ratio

$$I/C = \frac{Fe_2O_3}{CaO} \quad (5)$$

Total alkali

$$TA = Na_2O + K_2O \quad (6)$$

Bed agglomeration index

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{K_2O + Na_2O} \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 선정 연료의 연소 특성 분석

실험실 규모 유동층 반응기 실험에 앞서 본 실험에 적용된 연료에 대한 연소 특성 분석을 위한 기초 연구로 각 연료에 대해 산화조건에서의 thermogravimetric analysis (TGA) 연구를 수행하였다. 참고로 TGA 분석에 사용된 분석기는 Shinco, TGA N-100이며, 승온율 20 °C min^{-1} , 최고온도 800 °C이며, 산화제는 50 mL min^{-1} , 연료는 약 10 mg을 사용하였다.

Figure 2는 SS와 WP 연료에 대한 TGA 분석 결과를 나타낸 것이다. TGA 분석 결과에서 휘발분 및 최악의 연소 시점의 온도를 도출하기 위해서 각 그래프의 접선의 교차 지점을 연소 시점으로 규정하였다.

Figure 2(a)에서 SS의 휘발분 연소는 약 285 °C에서 형성되며, 이후 446 °C에서 최악 연소가 형성된다. 주변 온도가 증가함에 따라서 SS의 질량 변화는 WP의 질량 변화에 비해 두 단계 걸쳐서 특징적으로 나타난다. Table 2에서 SS의 휘발분이 약 50% 포함되어 있어 질량이 50% 감소하는 영역까지 휘발분의 연소에 의한 질량 변화로 판단되며, 이후 질량의 23% 지점까지 최악 연소가 진행되는 것으로 판단된다. 반면 Figure 2(b)에서도 두 단계에 걸쳐 연소가 일어나지만 SS에 비해 최악 연소 단계에서의 질량 변화는 휘발분 연소 단계에 비해 상대적으로 미미한 것으로 분석되었다. WP의 휘발분 연소는 325 °C에서 형성되며, SS에 비해 높은 온도에서 휘발분 연소가 형성됨을 알 수 있다. 또한 휘발분 연소가 시작되면 급격하게 WP의 질량이 감소하여 질량의 약 5% 지점까지 휘발분에 의한 연소가 급격하게 진행된다. 이는 WP의 휘발분 함량이 SS에 비해 30% 이상 높기 때문에 질량의 대부분이 휘발분 연소에 의해 소모되는 것으로 판단된다. SS에 비해 최악 연소 단계는 뚜렷하지 못하나 463 °C에서 최악 연소가 형성된다. 또한 회분의 함량이 SS에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 연소가 완료된 후 질량이 0~1% 정도만 남은 것을 분석을 통해 확인

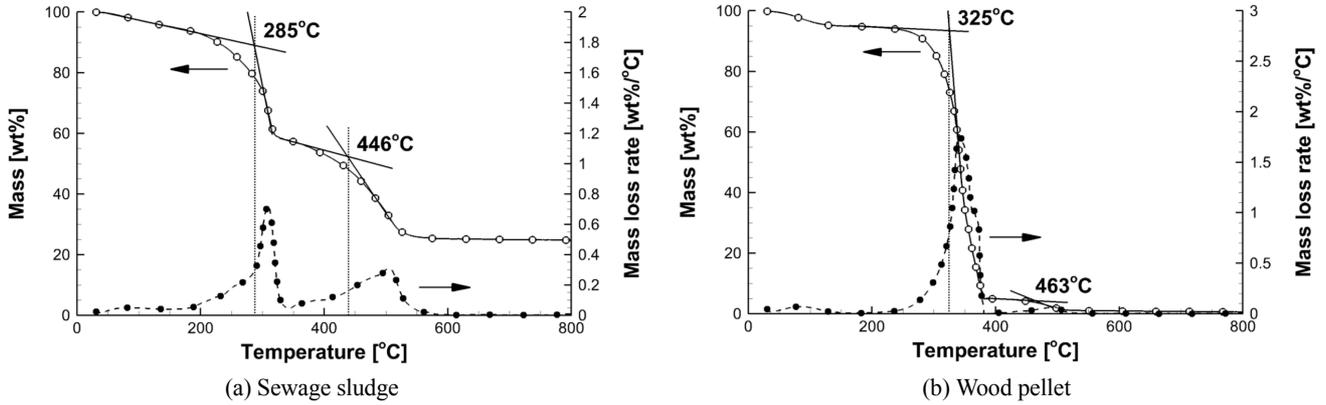


Figure 2. TGA results of (a) sewage sludge and (b) wood pellet.

할 수 있다. 본 TGA 분석을 통해서 SS의 연소 영역은 대략적으로 285~446 °C로 160 °C 정도의 구간을 보이는 것에 비해 WP의 연소 영역은 325~463 °C로 140 °C 정도의 구간을 형성하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 WP가 상대적으로 좁은 온도 영역에서 연소가 급격하게 진행되면서 휘발분에 의해 대부분 연소가 완료되므로 WP의 연소성이 SS에 비해 상대적으로 좋다고 판단할 수 있다.

3.2. 기포 유동층 반응기 연소 실험 결과

Table 6은 실험 조건 별로 반응기 각 측정 위치에 대한 온도/압력 측정 결과에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 전체 측정 시간은 연료 투입 후 유동층 반응기가 안정화된 후 약 30분 가량 실시간으로 측정하였으며, 이를 바탕으로 시간에 대한 평균값을 도출하였다.

C1~C5까지 온도와 압력의 측정 결과는 운전 조건 별로 다소 차이는 있으나 전체적인 경향은 정성적으로 매우 유사하게 나타났다. 본 실험실 규모 기포 유동층 반응기는 전기로를 통해서 전체 반응기 온도를 약 800 °C를 유지할 수 있도록

설정하여 반응기 전체적인 온도는 800~900 °C 사이를 유지하고 있다. 각 위치 별 온도를 살펴보면, 가장 높은 온도를 보이는 T4와 T5는 분산판을 기준으로 반응기 60, 80 cm에 각각 위치하고 있다. 연료가 분산판 기준 25 cm 측면에서 투입되는데 유동화된 층 물질과 연료, 산화제가 만나서 연소가 형성되어 주된 열 방출에 의해 가열된 배기가스가 반응기 60~80 cm에 위치하고 있기 때문으로 판단된다. T1~T3는 반응기 하단으로 층 물질의 유동화가 활발한 위치이며 연료에 의한 연소 및 층 물질에 의한 열 전달이 동시에 이루어지는 위치로 전체적으로 약 800 °C를 유지하고 있다. 본 연구에 적용된 운전 조건 별 연료량은 8~13 g min⁻¹으로 고위발열량 기준으로 3~4 kW 수준이기 때문에 연료에 의한 발열보다도 전기로에 의한 가열 열량이 지배적이라 할 수 있다. 이와 같은 이유로 반응기 전체의 온도 분포가 전기로에 의해서 유지되고 있는 800 °C 전후로 온도 분포가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 후단 설비인 cyclone 그리고 condenser를 지나면서 냉각되어 마지막 측정 위치인 T8에서는 상온으로 배출되게 된다.

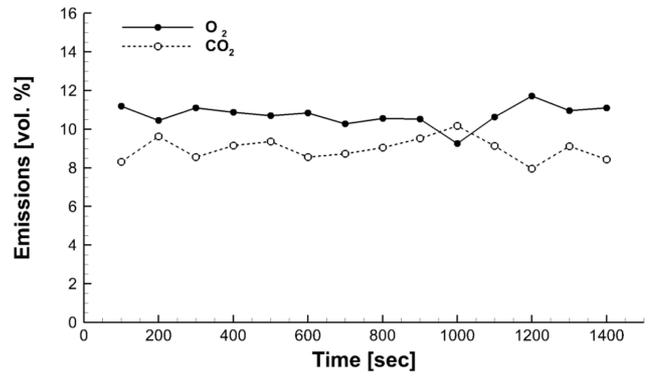
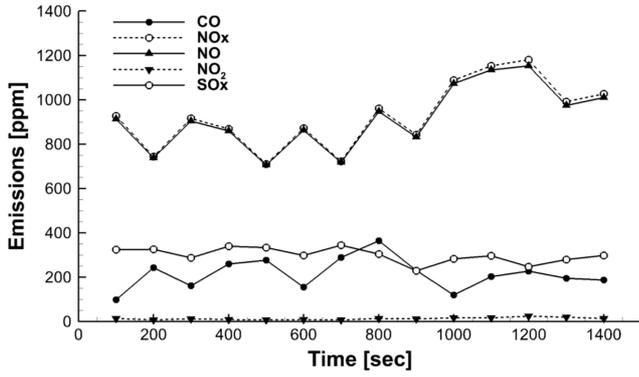
본 실험에서 압력은 연소실 내의 압력과 cyclone의 압력 차이를 유지시켜 연소를 안정적으로 유지시키는 것에 목적이 있다. Table 6과 같이 연소실 내의 압력(P0)과 cyclone에서의 압력(P1)의 차이는 약 15 mmH₂O를 유지하기 위해서 ID-Fan의 회전 속도를 조절하였다. 결과적으로 차압은 측정시간 동안 전반적으로 균일하게 유지되었다.

Figure 3은 Figure 1에서 도시한 샘플링 위치에서 실시간 배기가스의 조성을 측정할 결과이다. 배기가스 측정은 O₂, CO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, 그리고 SO_x를 모두 측정하였다. 그리고 배기가스 성분에 따라서 O₂, CO₂는 vol%, CO, NO_x, NO, NO₂는 ppm 단위로 나타내었다. 참고로 본 측정 데이터는 TESTO 350 K를 이용하여 측정하였다.

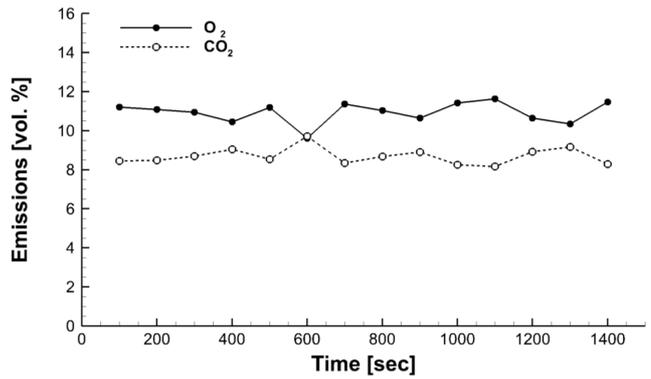
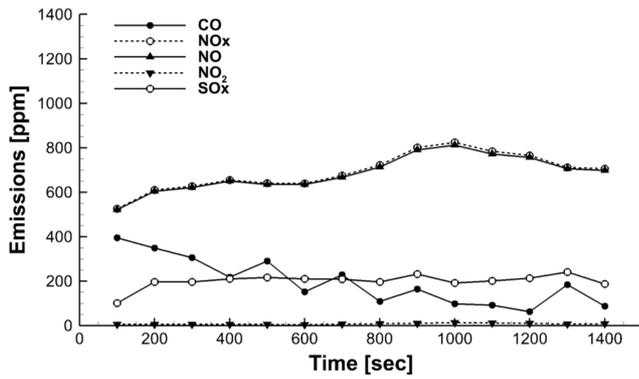
Figure 3에서 NO_x의 경우 C1~C5까지 평균적으로 변화의 폭이 가장 큰 배기가스 성분 중의 하나이다. 참고로 분석기 내에서 NO_x의 경우 NO와 NO₂를 구분하여 측정하였으며, 정량적으로 NO_x는 NO와 NO₂의 합으로 표현되었다. NO_x의 대부분은 NO이며, NO₂의 양은 NO_x 전체 생성량에 약 1.5% 정

Table 6. Mean temperatures and pressure drops at measured points

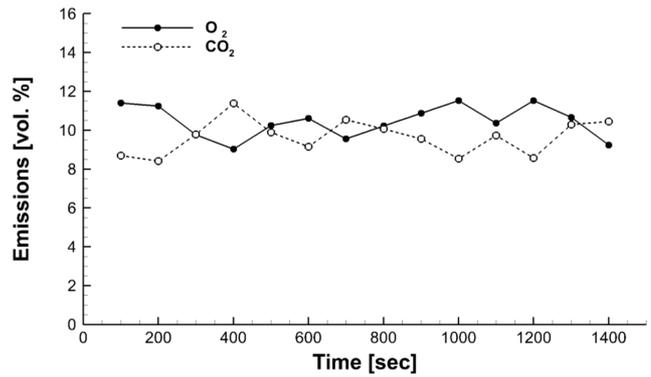
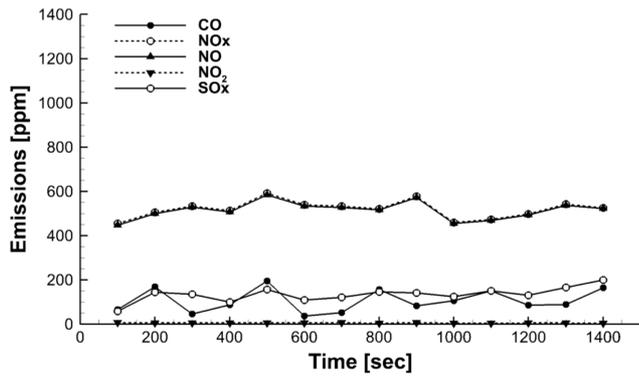
Parameter	Unit	Value				
Case	-	C1	C2	C3	C4	C5
T0	°C	44.1	44.2	44.4	48.2	44.4
T1		750.6	753.3	772.5	803.5	763.8
T2		772.8	775.2	795.8	824.0	784.7
T3		777.0	779.6	799.5	834.6	790.2
T4		887.9	889.4	899.2	894.0	895.6
T5		832.4	833.3	805.0	828.7	836.9
T6		411.4	417.5	407.9	436.5	442.1
T7		260.8	265.2	246.1	280.8	282.8
T8		27.3	27.4	26.5	34.1	27.5
P0	mmH ₂ O	23.7	23.6	24.0	24.0	23.4
P1		8.7	8.6	9.0	9.1	8.4



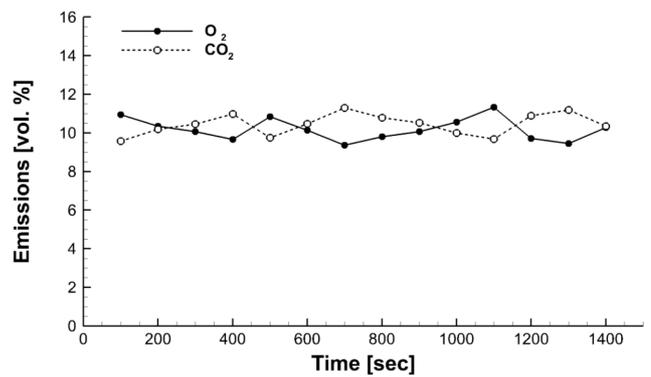
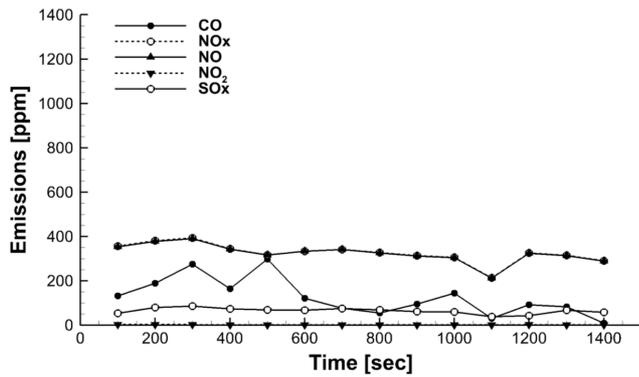
(a) C1



(b) C2

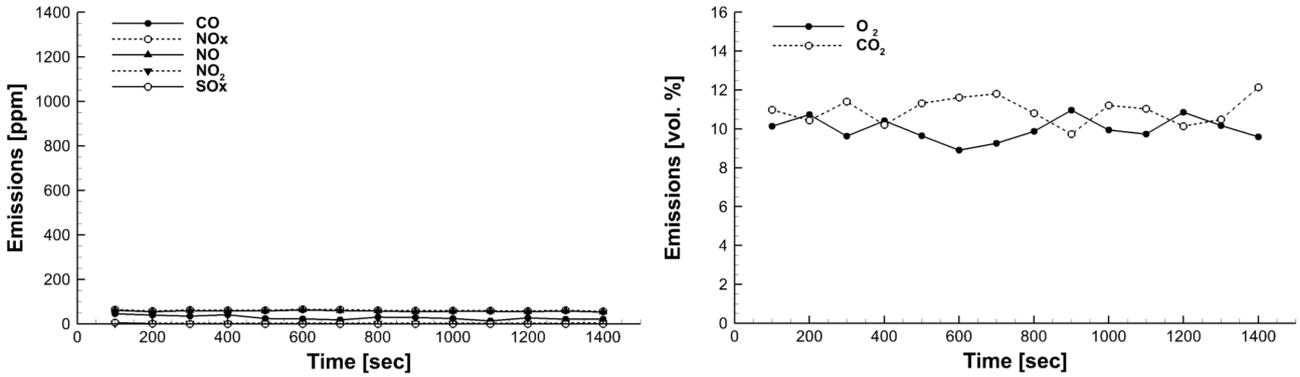


(c) C3



(d) C4

Figure 3. Measured emission profiles for the tested conditions.



(e) C5

Figure 3. Measured emission profiles for the tested conditions.

도를 차지하고 있다. C1~C5의 모든 조건에서 NO의 생성이 지배적이며, NO₂의 생성은 대부분의 조건에서 10 ppm 이하로 측정되었으므로 NO_x 생성 특성은 NO의 생성 특성과 동일하다고 보아도 무관할 것으로 판단된다. SS 전소인 C1 조건에서 NO_x는 800~1,000 ppm 정도의 결과를 보이는 반면에 WP 전소인 C5 조건에서는 NO_x가 100 ppm 미만으로 대략적인 정량적 비율로 보았을 때 C1 조건이 C5 조건에 비해 NO_x 생성량이 8~10배 정도 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 기포 유동층 반응기의 온도는 앞서 언급된 Table 6의 실험 결과와 같이 반응기 위치에 상관없이 900 °C를 넘지 않는 조건에서 연소 실험이 수행되었으므로 thermal NO_x의 생성은 그리 높지 않다고 판단이 된다. 이와 같은 연소 환경에서 NO_x의 생성에 영향을 미치는 것은 연료 자체의 fuel NO_x라고 생각할 수 있다. Table 2의 SS와 WP의 원소 분석 결과를 보면 SS를 구성하는 질소의 함량은 8.85%, WP를 구성하는 질소의 함량은 0.95%로 SS가 WP와 비교하여 질소가 약 9~10배 정도 높은 함량을 보이고 있다. 이 같은 결과는 Figure 3의 C1과 C5의 배기가스 내 NO_x 생성과 연관성이 매우 높다고 할 수 있다. 연료에 포함되어 있는 질소의 함량이 9~10배 정도 차이를 보이게 되는데, 이 같은 결과가 결국에는 NO_x 생성비율의 차이(8~10배)와 연관되어 있다고 판단된다. 따라서 SS의 전소 시 NO_x 처리를 위한 후단 설비의 설치가 필수적이라고 할 수 있을 것이다. 또한 C2~C4의 운전조건에서 NO_x의 생성은 점차적으로 감소하게 되는데 이는 WP의 혼소율을 증가시킴에 따라 반응기 내에 투입되는 연료 전체의 질소 함량이 감소하여, 결과적으로 fuel NO_x의 생성이 감소하였다고 판단된다.

이와 같은 결과는 SO_x의 결과도 동일하게 설명될 수 있다. SO_x 생성의 경우 연료 내에 포함되어 있는 황 혹은 산화제에 포함되어 있는 황에 의해서 대부분 결정된다. 본 연구에서는 산화제의 경우 공기를 사용하였기 때문에 산화제에 포함되어 있는 황의 영향력은 없다고 판단할 수 있다. 이와 같은 판단에서 연료 내에 포함되어 있는 황에 의해 SO_x의 형성이 결정된다고 볼 수 있다. Table 2의 SS와 WP의 원소 분석 결과를 비교해 보면, WP를 구성하고 있는 황은 거의 0에 가깝기 때문에 실제 C5의 배기가스 분석 결과에서도 황의 생성은 거의

없다고 봐도 무관하다. 하지만 C1의 경우 SS를 구성하고 있는 황의 함량이 약 0.7%이며, 이는 Figure 3(a) 결과에서 SO_x의 형성이 약 300~400 ppm 정도 생성되는 결과를 도출하게 된다. 또한 NO_x와 마찬가지로 WP의 혼소율을 증가시킴에 따라서 반응기에 투입되는 연료 전체의 황 함량이 감소하여, 결과적으로 전체적인 SO_x의 생성이 감소하였다고 판단된다. NO_x와 SO_x의 운전조건 별 생성 경향을 종합적으로 분석해 보면, 연소에 의한 생성물이 아닌 연료 자체에 포함되어 있는 성분에 의해 생성된 배출물이다. 따라서 후단 배기가스 처리 설비의 부하를 줄이기 위해서는 연료 전처리 과정을 통해서 연료 내의 질소와 황의 함량을 낮추는 것이 중요할 것으로 보인다.

CO는 WP의 혼소율을 증가시킴에 따라서 점차 생성량이 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 Figure 2의 TGA의 분석에서 SS와 WP의 연소성을 비교하였을 때, SS는 휘발분 연소 및 착 연소가 명백히 구분되며 연소 영역 온도 분포가 다소 넓게 분포하고 있는 것과 대조적으로 WP의 연소는 짧은 온도 구간에서 연료의 대부분이 연소되는 결과를 보이고 있다. 이는 시간에 따른 CO 측정 결과를 통해서 확인할 수 있다. Figure 3(a)에서는 시간에 따른 CO의 생성이 다소 불안정한 반면 Figure 3(e)에서는 CO의 생성이 상대적으로 안정적이다. 이 같은 결과를 통해서 WP의 연소성이 SS에 비해 좋으며, 이로 인해 CO의 배출량 역시 SS에서 WP에 비해 높게 나온 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 Table 2에서 SS 내에 탄소 성분의 함량이 약 20% 가량 높기 때문에 상대적으로 CO의 생성이 WP에 비해 높게 나타나는 것으로 판단된다. 이는 WP의 혼소율을 증가시키게 되면 CO가 점차 감소하는 결과를 도출하였다. 이를 통해 WP의 혼소율 증가가 연료 전체의 연소성을 좋게 하여 CO의 CO₂로의 전환을 증가시켰다고 판단된다.

Figure 3에 나타난 결과를 종합적으로 볼 때, SS의 연소 시 WP의 혼소율을 증가시킴에 따라서 CO, NO_x, 그리고 SO_x의 생성을 저감하는 효과를 보이고 있다. 이는 SS를 구성하고 있는 질소와 황 성분들에 의한 NO_x, SO_x 생성을 혼소를 통해서 저감되며, WP의 높은 연소성에 의해 CO의 생성이 억제되었기 때문으로 판단된다.

Table 7. Mean flue gas emissions at sampling point

Parameter	Unit	Value				
Case	-	C1	C2	C3	C4	C5
O ₂	Vol%	10.7	10.9	10.4	10.2	10.0
CO ₂		8.9	8.7	9.6	10.2	10.9
CO	ppm	215.0	195.4	105.9	125.9	20.0
NO _x		928.9	695.0	519.3	325.4	60.7
NO		916.1	684.2	513.6	323.9	57.5
NO ₂		12.8	7.8	5.3	1.4	3.2
SO _x		299.2	200.2	134.1	64.1	0.46

Table 7은 실험조건 별로 연소 의한 배기가스 측정 결과에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 기본적으로 본 평균은 시간 평균을 기반으로 수행되었으며, Figure 3에 나타난 실시간 측정 결과를 바탕으로 산출된 결과이다. 본 연구는 당량비를 1.65로 고정하여 수행되었으며, 이에 따라 O₂는 약 10~11% 내외로 결과를 보인다. 운전조건 별로 WP의 혼소 비율을 높일수록 O₂가 감소하게 되는데 이에 따라 CO₂는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 언급된 Figure 2의 TGA 분석 결과에서도 마찬가지로 SS와 비교하여 WP의 연소성이 좋기 때문에 동일한 당량비 조건에서도 상대적으로 WP의 혼소율을 높일수록 CO의 CO₂로의 전환을 증가시켰기 때문으로 볼 수 있다.

증가된 CO₂와 대비하여 CO의 생성량은 C1의 경우가 약 200 ppm, C5의 경우가 약 20 ppm로 C1에서 CO의 생성이 높게 측정되었다. 이는 연료 자체의 연소성으로 인해 CO가 CO₂로 전환되지 못하여, 이로 인해 C1에서 C5와 비교하여 상대적으로 낮은 CO₂와 높은 O₂를 보이게 된다. 뿐만 아니라 연료 자체에 탄소 함량에서 SS가 WP에 비해 약 20% 가량 높은 점도 CO의 생성량의 차이를 보이는 원인이 된다고 볼 수 있다.

평균적으로 C1의 NO_x는 약 930 ppm 정도이며 C5의 NO_x는 약 60 ppm로 대략적으로 약 15배 가량 차이를 보이고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 fuel NO_x의 생성이 지배적이며, WP의 혼소를 통해서 투입되는 연료 내의 질소 함량이 감소함에 따라서 생성된 NO_x가 감소하는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 이는 SO_x의 생성 과정 및 경향과 동일하다.

3.3. 기포 유동층 반응기 연소 후 회분 분석 결과

회분은 보일러 내에서 슬래깅과 파울링을 유발하여 연소기의 수명 및 발전효율에 큰 영향을 미친다. 본 연구는 실험실 규모 기포 유동층 반응기 연소 후 포집된 회분을 기반으로 실험조건 별로 회분의 X-ray Fluorescence (XRF) 분석 연구를 수행하였으며, 대표적인 성분들에 대한 결과는 Table 8에 나타내었다. 또한 XRF 결과를 바탕으로 회분의 거동 및 퇴적 경향과 관련된 인자를 Equation (3)~(7)을 통해 도출하였다.

Table 8의 XRF 분석 결과에서 실험조건 별로 회분 내 성분의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 즉, SS과 WP의 혼소를 통해서 연소성 및 배기가스 조성에서는 차이가 있었으나

Table 8. Chemical analyses of tested fuel ashes

Case	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Unit	wt%								
C1	8.17	3.88	13.28	20.84	2.81	12.46	1.23	2.29	11.34
C2	7.16	3.68	13.30	22.41	3.03	12.48	1.23	2.24	11.56
C3	9.17	3.65	12.50	21.04	3.21	13.02	1.25	2.36	11.14
C4	8.58	3.88	13.27	20.93	2.95	12.66	1.23	2.27	10.72
C5	6.65	1.11	10.74	28.69	3.71	11.52	0.47	1.01	29.68

회분 내의 성분에서는 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 두 연료의 회분 함량의 차이에 의한 결과로 판단된다. Table 2의 SS과 WP의 연료 내의 회분 함량을 보면 SS는 23.9%, WP는 0.3%로 약 70배 가량 차이를 보이고 있다. 결국 WP의 혼소율이 가장 높은 C4의 경우 WP의 혼소율이 80%이지만 회분의 함량으로 보았을 때 WP의 회분은 전체 질량의 약 24% 정도만 차지하므로 C1~C4의 운전조건에서 연소 후 포집된 회분의 대부분은 SS의 회분으로 판단할 수 있다. 이로 인해 WP 전소인 C5를 제외하고 C1~C4의 경우에는 SS의 회분이 지배적이며, 회분 분석 결과가 실험조건 별로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 하지만 C5에서는 SiO₂와 Fe₂O₃가 C1에 비해 상대적으로 높게 측정되었으며, Na₂O와 MgO가 낮게 측정되었다. 본 연구에 사용된 층물질은 SiO₂가 90.2%, Al₂O₃가 4.16%, 그리고 Fe₂O₃가 2.52%로 구성되어 있다. 이로 인해서 회분 내의 SiO₂ 성분과 Fe₂O₃에 영향을 미친 것으로 사료되며, 이는 실험에 사용된 연료의 종류에 따라 층 물질간의 상관관계에서 차이가 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 결과만으로는 층 물질과 연료간의 상관관계를 명확히 규명하기에는 어려움이 있으며 추가적인 분석 기법의 도입이 필요할 것으로 보인다. 향후 하수슬러지 고형 연료 및 우드펠릿의 회분과 층 물질 간의 상관관계 특성에 대한 정확한 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

Table 8의 분석 결과를 바탕으로 앞서 언급된 회분의 거동 및 퇴적 경향 분석을 위해서 B/A, S/A, I/C, TA, 그리고 BAI를 각 실험조건 별로 산출하였다. Table 9의 결과에서 각 실험조건 별로 미미한 차이는 있으나 정량적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 모든 조건에 대해서 B/A, S/A, 그리고 I/C를 통해 회분의 슬래깅/파울링에 대해 높은 가능성을 보이고 있으며,

Table 9. Slagging, fouling and bed agglomeration indices for tested fuel ashes

Case	B/A	S/A	I/C	TA	BAI
C1	1.09 h	1.57 h	0.91 h	10.75 h	1.03 h
C2	1.03 h	1.68 h	0.93 h	9.96 h	1.13 h
C3	1.16 h	1.68 h	0.86 h	11.88 h	0.90 h
C4	1.09 h	1.58 h	0.85 h	11.29 h	0.93 h
C5	1.32 h	2.67 h	2.58 h	10.36 h	2.87 h

* Slagging/fouling tendency h: high, m: medium, l: low

Table 10. Unburned carbon concentrations and combustion efficiencies for tested fuel ashes

Case	Unburned carbon (wt%)	Combustion efficiency (%)
C1	0.43	99.75
C2	0.43	99.81
C3	0.41	99.89
C4	0.33	99.96
C5	0.30	99.99

TA 역시 평가 기준 값에 비해 높아 파울링의 가능성이 높은 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 BAI가 10보다 작아 층 물질의 응집이 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 실험 후 층 물질을 분석해본 결과 소량의 층 물질의 응집이 발견되었으나 크기가 작았으며, 전체적으로 층 물질의 응집은 쉽게 발생하지 않았다. 이는 실험실 규모 기포 유동층 반응기 실험의 특성상 전기로를 통해서 반응기 전체의 온도를 800 °C로 조절하였기 때문에 타르를 포함하여 층 물질의 응집을 유발할 수 있는 성분들 역시 연소 과정에서 산화되었기 때문으로 판단된다. 뿐만 아니라 소량의 연료를 투입하여 연소 실험을 수행하였기 때문으로 사료되며, 층 물질의 응집이 발생할 만큼 충분한 연료가 투입되지 못하였기 때문으로 판단된다. 층 물질의 응집 발생을 관찰하기 위해서는 파일렛 규모 이상의 기포 유동층 반응기에서 대량의 연료 투입 및 연소를 통해 회분에 의한 층 물질 응집 현상을 규명할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Table 10은 실험조건 별로 포집된 회분 내의 미연분과 이를 기반으로 연소효율을 나타낸 것이다. 각 실험조건 별로 회분 내의 미연분을 통해 연소효율을 도출한 결과 모든 운전조건에 대해서 99% 이상의 연소효율을 보였다. Table 10에서 WP의 혼소율을 증가시키기에 따라서 연소효율이 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 기본적으로 99% 이상의 연소효율을 보이기 때문에 대부분의 탄소는 산화되었다고 볼 수 있으나, 정량적으로 C5의 경우 C1에 비해 약 0.24% 가량 연소효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 실험실 규모 기포 유동층 반응기를 통해 SS와 WP의 연소 특성을 분석하였다. 종합적으로 SS를 전소하는 것에 비해 WP와의 혼소를 통해 배가스 내의 CO, NO_x, 그리고 SO_x의 생성을 저감할 수 있으며, 더불어 연소효율을 소폭 증가시킬 수 있음을 본 연구를 통해 확인하였다. 이같은 결과를 토대로 적절한 SS와 WP의 혼소가 SS의 전소에 비해 연소 및 배기 특성 측면에서 유리할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 하수슬러지 고형연료(SS)와 우드펠렛(WP)과의 전소 및 혼소를 통한 연소 특성 분석 및 회분의 거동 및 퇴적 특성을 분석하는 것에 의의가 있다. 연료의 성상에 크게 영향을 받지 않는 유동층 반응기를 이용하여 두 연료의 전소 및 혼소에 대한 연소 실험을 수행하였으며, 온도와 압력, 그리고

O₂, CO₂, CO, NO_x, SO_x의 배가스 측정 결과를 통해 연소 특성을 분석하였다. 또한 연소 과정에서 발생한 회분의 포집 및 XRF 분석을 통해서 두 연료의 전소 및 혼소에 대한 회분의 거동 및 퇴적에 대한 연구를 함께 수행하였다. TGA 분석에서 연소 영역은 주변 온도가 증가함에 따라서 SS는 두 단계 걸쳐서 특징적으로 나타났다. SS의 연소 영역은 285~446 °C, WP의 연소 영역은 325~463 °C로 WP가 상대적으로 좁은 온도 영역에서 연소가 급격하게 진행되면서 휘발분에 의해 대부분 연소가 완료되는 것을 확인하였다. 이를 통해 WP의 연소성이 SS에 비해 상대적으로 좋다고 판단할 수 있다. 실험실 규모 기포 유동층 반응기의 위치별 온도는 800~900 °C 사이에서 균일하게 분포하였으며, 반응기 60, 80 cm에서 가장 높은 온도를 보이고 있다. 이는 반응기 내 주된 열 방출에 의해 가열된 배가스가 반응기 60~80 cm에 위치하고 있기 때문으로 판단된다. C1 조건에서 NO_x는 평균 900 ppm인 반면에 C5 조건에서는 평균 60 ppm으로 대략적인 정량적 비율로 보았을 때 C1 조건이 C5 조건에 비해 NO_x 생성량이 10배 이상 높은 것으로 나타났다. 이는 연료 내에 포함되어 있는 질소 함량의 차이에 의한 결과로 판단되며, SO_x 역시 동일한 원인으로 인해 생성된 것으로 보인다. 또한 SS 연소시 WP의 혼소율 증가에 따라 CO, NO_x, 그리고 SO_x의 생성을 억제하는 효과가 있는 것으로 분석되었다. 유동층 반응기 연소 후 포집된 회분 분석을 통해서 SS와 WP의 혼소에 따른 연소성 및 배가스 조성에서는 차이가 있었으나 회분 내의 성분에서는 큰 차이는 발견할 수 없었다. 이와 같은 결과는 두 연료의 회분 함량의 차이에 의한 결과로 SS의 회분 함량이 약 24%이므로 C1~C4 조건에서 SS의 회분이 지배적인 것으로 판단된다. 또한 회분의 거동 및 퇴적 경향 인자 분석을 통해서 모든 조건에 대해서 슬래깅/파울링 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 회분 내의 미연분 분석을 통해 연소효율이 모든 조건에서 99% 이상으로 나타났으며, WP의 혼소율 증가를 통해 연소효율을 0.24% 가량 증가시킬 수 있었다.

감사

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 에너지기술개발사업(20153010102130)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. La Nauze, R. D., "A Review of the Fluidized Bed Combustion of Biomass," *J. Inst. Energy*, **60**, 66-76 (1987).
2. Saxena, S. C. and Jotshi, C. K., "Fluidized-Bed Incineration of Waste Materials," *Prog. Energy, Combust. Sci.*, **20**, 281-324 (1994).
3. Anthony, E. J., "Fluidized Bed Combustion of Alternative Solid Fuels: Status, Successes and Problem of the Technology," *Prog. Energy, Combust. Sci.*, **21**, 239-268 (1995).
4. Åmand, L. E., and Leckner, B., "Co-Combustion of Sewage

- Sludge with Wood/Coal in a Circulating Fluidized Bed Boiler-A Study of Gaseous Emissions,” Chalmers University of Technology, Sweden (2001).
5. Salatino, P., “Fluidized Bed Combustion of Pelletized Biomass and Waste-Derived Fuels,” *Combustion and Flame*, **155**, 21-36 (2008).
 6. Khan, A. A., “Combustion and Co-Combustion of Biomass in a Bubbling Fluidized Bed Boiler,” Ph.D. Dissertation, Technical University Delft, Netherland (2007).
 7. Liang, W., Terese, L., and Ehsan, H., “Effect of Sewage Sludge Addition on Potassium Release and Ash Transformation during Wheat Straw Combustion,” *Chem. Eng. Trans.*, 2283-9216 (2014).
 8. Geldart, D., “Types of Gas Fluidization,” *Powder Technol.*, **7**, 285-292 (1973).
 9. Wen, C. Y., and Yu, Y. H., “Mechanics of Fluidization,” *Chem. Eng. Prog. Symposium Series*, **62**, 100-111 (1966).
 10. Grace, J. R., “Fluidized-Bed Hydrodynamics,” *In Handbook of Multiphase System*, Ed. Hetsroni, G. Hemisphere, Washington, **8**, 5-64 (1982).
 11. <http://www.testo.co.kr/productdetailpage/0632+3510> (accessed Jul. 2016).
 12. Vamvuka, D., Zografos, D., and Alevizos, G., “Control Methods for Mitigating Biomass Ash-Related Problems in Fluidized Beds,” *Bioresour. Technol.*, **99**, 3534-3544 (2008).
 13. Vamvuka, D., et al., “Ash Effects during Combustion of Lignite/Biomass Blends in Fluidized Bed,” *Renewable Energy*, **34**, 2662-2671 (2009).