실험실 규모 유동층 반응기를 이용한 하수 슬러지 고형 연료 연소 특성 분석

안형준, 이영재†, 김동희*
한국생산기술연구원, 포항공과대학교 기계공학과*
(leeyj@kitech.re.kr†)

Investigation on Combustion Characteristics of Sewage Sludge Solid Fuel using Lab-scale Fluidized Bed Reactor

Hyungjun Ahn, Youngjae Lee†, Donghee Kim*
Korea Institute of Industrial Technology,
Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology*
(leeyj@kitech.re.kr†)

서론

전 세계적으로 에너지 수요 증가에 따른 전통적 화석연료 소비량 증가, 온실가스 감축, 폐기물 관련 규제 강화 등에 대한 대책의 일환으로 바이오매스 등 대체 에너지원에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 국내에서는 목질계 원료가 바이오에너지의 상당 비중을 차지하는 가운데, 2016년 하수 슬러지의 해양 투기 전면 금지에 따라 발생량의 자원화 활용 필요성이 크게 증가하였다[1]. 석탄화력발전에서 신재생에너지 공급의무화 등과 관련하여 바이오매스 및 폐기물 등을 일부 혼소하고 있으나, 새로운 연료의 특성에 따른 설비 및 배출물 관리에 악영향을 미치는 경우가 발생하고 있다[2,3]. 하지만 이러한 문제들을 해결하기 위한 국내의 연구는 다소 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 실험실 규모의 유동층 반응기를 이용하여 하수 슬러지 고형 연료의 연소 특성을 살펴보았다. 화력발전에서의 연료 사용 형태를 고려하여 하수 슬러지 고형 연료를 석탄 및 목재 펠렛과 혼합하여 연소시 배가스 조성 및 회분 등을 확인하였다.

실험

실험에 사용된 하수 슬러지 고형 연료는 공기 건조된 일반 건조 하수 슬러지(DSS)와 수열탄화 하수 슬러지(HTCSS)의 두 종류가 고려되었으며, 아역청탄(Adaro49) 및 국산 목재 펠렛(WP)과 혼합하여 연소하였다. 사용 연료들의 조성은 Table 1과 같다. 본 실험에 적용된 실험실 규모 유동층 반응기는 직경 0.1m, 높이 1.2m이며 온도 조절은 외부 전기히터로 이루어진다. 연료 공급은 상부 스크루 피더를 통해 이루어지며, 배가스는 부유 입자 포집을 위한 사이클론, 냉각을 위한 콘덴서를 거쳐 배출되며 반응기 내 압력은 후단 ID-fan을 통해 조절된다. 전체 설비 구성에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Proximate and ultimate analyses with heating values of fuel samples

	DSS	HTCSS	Adaro49	WP
Proximate analysis (%, db)				
Volatile matter	73.41	65.84	47.3	88.7
Fixed carbon	11,31	13.18	49.8	9.9
Ash	15.28	20.98	2.9	1.4
Ultimate analysis (%, db)				
C	42.6	45.1	74.5	48.9
H	6.7	5.9	4.8	6.1
O	27.6	23.2	16.7	43.3
N	7.2	6.2	1.0	0.3
S	0.86	0.74	0.1	0.0
Higher heating value (kcal/kg)	4594	4713	5570	4680

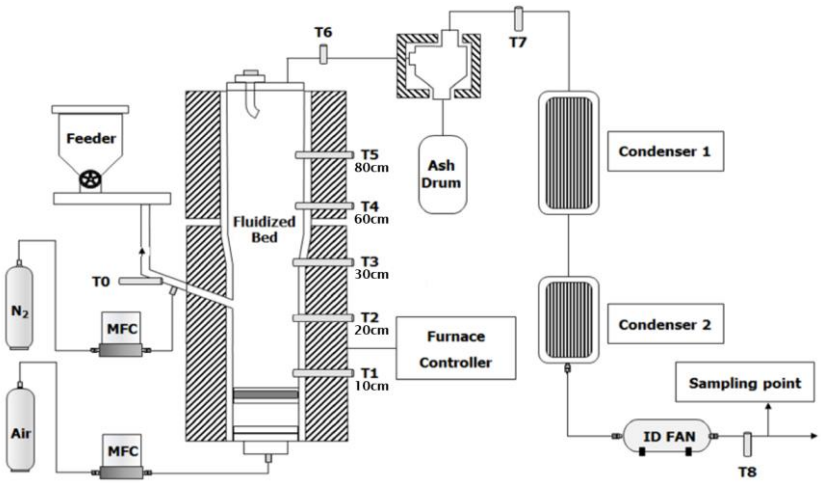

Fig. 1. Schematic illustration of the lab-scale fluidized bed reactor.

배가스 조성은 TESTO 350K를 이용하여 ID-fan 후단에서 측정하였으며, 반응기 내 온도 측정은 반응기 하부 기준으로 20cm, 30cm, 60cm, 80cm 높이 및 사이클론 입구 및 ID-fan 후단에서 이루어졌다. 층 물질 평균 입도는 349μm, 부피 밀도는 1400kg/m^{3}이며, Geldart B type에 해당한다. 최소 유동화 속도는 약 0.21m/s으로 확인되었다. 실험에 적용한 운전 조건은 Table 2와 같다. 연료 케이스는 앞서 언급한 바와 같이 DSS 및 HTCSS를 각각 석탄 및 목재 펠릿과 혼합하였으며, 혼합 비율은 열량 기준으로 50:50으로 준비하였다. 산화제는 별도 예열 없이 공기를 투입하였으며, 반응기 내 유속 및 유량 조건을 모든 케이스에서 동일하게 800℃ 기준 4U_{mf}, 100 L/min. 으로 설정하였다. 또한 과잉공기비 역시 1.65로 동일하게 고정하였다. 따라서 각 케이스 별로 서로 다른 연료 투입률 및 열입력을 갖는 조건으로 실험이 수행되었다.

Table 2. Fuel feeding conditions

Case	Fuel	Feeding rate (g/min.)	Thermal input (kW)
C1	DSS + Adaro 49	8.75	3.30
C2	HTCSS + Adaro 49	8.05	3.08
C3	DSS + WP	11.25	3.88
C4	HTCSS + WP	10.22	3.58

결과 및 토론

Table 3은 실험 케이스 별 반응기 위치에 따른 온도 측정 결과에 대한 시간 평균값을 나타낸 것이다. 본 실험실 규모 유동층 반응기는 외부 전기로를 통해 전체 반응기 온도를 약 800℃로 유지하도록 설정되었다. 따라서 분산판을 통한 공기 투입이 이루어지는 반응기 하부에서는 층 물질의 일부 냉각으로 인해 상대적으로 낮은 온도가 형성되다가 연소가 활발히 진행되는 상부로 갈수록 상대적으로 높은 온도를 보이고 있다. 케이스 별 높이 별 온도를 살펴보면 반응기로 연료가 투입되는 위치인 T3에서 C3, C4 케이스의 온도가 C1, C2 케이스보다 더 높았으며 이는 석탄 및 목재 펠렛 간 혼소 기준 연료 차이에 따른 투입 열량 차이로 보인다.

Table 3. Averaged bed temperature values (℃)

Point	C1	C2	C3	C4
T2	587.89	590.23	587.53	590.11
T3	795.85	799.72	849.34	832.45
T4	820.00	817.30	808.92	814.46
T5	807.88	808.76	799.16	806.47
T7	189.47	194.53	195.31	193.61

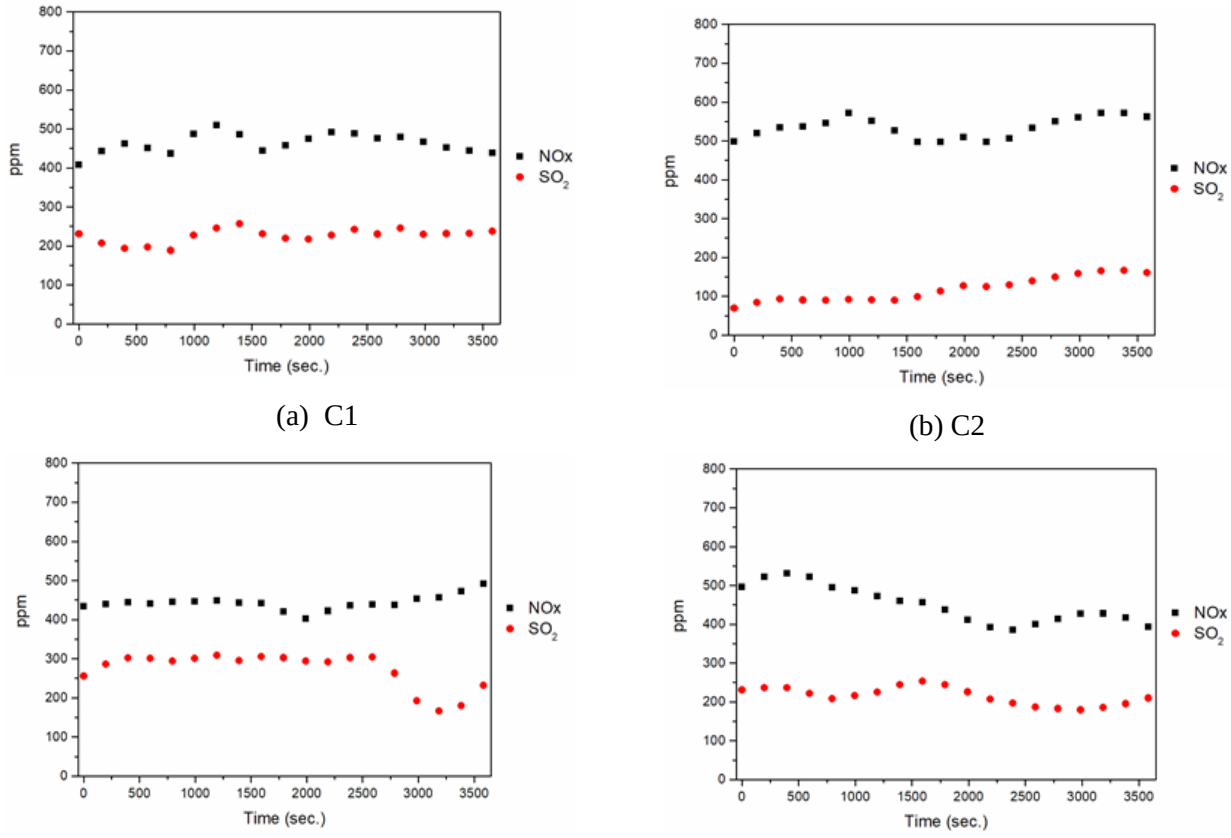

Fig. 2. Measured NOx and SO_2 in the exhaust gas for the cases.

Table 4. Averaged exhaust gas composition

Component	Unit	C1	C2	C3	C4
O_2	Vol.%	11.19	11.46	8.75	7.37
CO_2	Vol.%	7.15	6.85	8.95	10.20
CO	ppm	28.10	177.93	1093.66	1005.56
NOx	ppm	465.71	533.83	441.57	450.16
SO_2	ppm	225.03	118.15	274.66	215.04

Fig. 2 및 Fig. 3은 샘플링 위치에서의 실시간 배가스 조성 측정 결과이다. 측정된 배가스 조성은 O_2, CO_2, CO, NOx, NO, NO_2, SO_2이며 O_2 및 CO_2는 vol.%, 그 외에는 ppm 단위로 측정하였다. Fig. 2에서 NOx는 C1~C4까지 평균적으로 400~600ppm 수준의 결과를 보이고 있다. 하지만 투입 열량이나 온도 등 특정한 실험 결과와의 연관성을 찾을 수 없었고, 모든 케이스에서 비슷한 수준의 결과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 반응기의 온도는 앞서 언급된 바와 같이 반응기 위치에 상관없이 900℃를 넘지 않는 조건에서 연소 실험이 수행되었으므로 Thermal NOx의 생성은 그리 높지 않다고 판단이 된다. 이와 같은 연소 환경에서 NOx의 생성에 영향을 미치는 것은 연료 자체의 Fuel NOx라고 생각할 수 있다[4-9]. HTCSS와 DSS의 N 성분은 6.2~7.2%로 Adaro49와 WP의 0.3~1.0%인 수준에 비하여 높은 것을 확인할 수 있었다. Table 4에서 C1과 C2를 비교해보면, Adaro49와 HTCSS를 혼소한 C2에서 약 70ppm 정도 높은 NOx 수치를 볼 수 있었다. 또한 C3와 C4의 비교에서는 HTCSS의 혼소 케이스인 C4에서 근소하지만 약 9ppm 정도 더 높은 NOx 수치를 볼 수 있었다. 모든 케이스가 혼소 실험인 것을 감안하면 전체적으로 투입된 N 성분은 정량적으로 비

슷하고, 그에 따라 연소 가스 내 NOx의 수치도 비슷한 것을 확인하였다. 하지만 NOx 배출량은 표준 화력 발전의 배출량에 비해 높은 수치이기 때문에 NOx 처리를 위한 후단 설비의 설치가 필수적이라고 할 수 있을 것이다.

이와 같은 결과는 SO_2의 결과와도 동일하게 설명될 수 있다. SO_2 생성의 경우 연료 내에 포함되어 있는 황 혹은 산화제에 포함되어 있는 황에 의해서 대부분 결정되는데 본 연구에서 산화제의 경우 공기를 사용하였기 때문에 산화제에 포함되어 있는 황의 영향력은 없다고 판단할 수 있다. 이와 같은 판단에서 연료 내에 포함되어 있는 황에 의해 SO_2의 형성이 결정된다고 판단된다. 황의 함량은 Adaro49가 0.1%, WP는 0%인 반면에 HTCSS, DSS는 각각 0.74%, 0.86%로 하수 슬러지 고형연료가 상대적으로 높은 황을 가지고 있다. Table 4의 C1과 C2를 비교해보면, 두 케이스는 석탄을 베이스로 DSS와 HTCSS를 각각 혼소한 실험 케이스이다. 두 케이스 모두 반응기로 투입되는 황의 정량적인 수치는 비슷하지만, SO_2는 HTCSS를 혼소한 C2에서 약 절반 수준인 것을 확인하였다. 또한 C3와 C4를 비교해보면, 두 케이스는 목재 펠렛을 베이스로 DSS와 HTCSS를 각각 혼소한 실험 케이스이다. 앞서 C1과 C2의 SO_2 비교 결과와 같이 HTCSS를 사용한 C4에서 약 60ppm 낮은 수치를 보이고 있다. 실제로 HTCSS는 DSS보다 0.12% 낮은 황 함량을 보이고 있고, 유동층 반응기 내에서 연소시 배출되는 SO_2도 더 낮은 수준인 것을 볼 수 있었다.

측정 결과를 종합적으로 볼 때, 석탄이나 목재 펠렛을 베이스로 하수 슬러지 고형연료를 혼소할 때, DSS가 HTCSS보다 조금 더 나은 NOx 배출 특성을 보이고 있고, 반대로 SO_2 배출 특성에서는 HTCSS가 DSS보다 더 나은 특성을 보이고 있다.

감사

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

참고문헌

1. Korea Energy Agency, “New & Renewable Energy Statistics 2016 (2017 Edition)”, (2017).
2. Vamvuka, D., Zografos, D., and Alevizos, G., “Control Methods for Mitigating Biomass Ash-related Problems in Fluidized Beds.” *Bioresour. Technol.*, **99**, 3534-3544(2008).
3. Mun, T., Tefera, Z. T., Lee, U., Lee, J. W., Yang, W., “Evaluation of Plant Performance during Biomass Co-firing in Pulverized Coal Power Plant,” *J. Korean Soc. Combust.*, **19**(3), 8-1(2014)
4. Clean Air Technology Center, “Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled,” Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protecction Agency, (1999).
5. Kambara, S., Takarada, T., Yamamoto, Y., and Kato, K., “Relation between Functional Forms of Coal Nitrogen and Formation of NOx Precursors during Rapid Pyrolysis,” *Energy & Fuels*, **7**, 1013-1020(1993).
6. Solomon, P. R., and Colket, M. B., “Evolution of Fuel Nitrogen in Coal Devolatilization,” *Fuel*, **57**(12), 749-755(1978).
7. Pohl, J. H., and Sarofim, A. F., “Devolatilization and Oxidation of Coal Nitrogen,” *Symposium on Combust.*, **16**(1), 491-501(1977).
8. Baxter, L. L., Mitchell, R. E., Fletcher, T. H., and Hurt, R. H., “Nitrogen Release during Coal Combustion,” *Energy & Fuels*, **10**, 188-196(1996)
9. Glarborg, P., Jensen, A. D., and Johnsson, J. E., “Fuel Nitrogen Conversion in Solid Fuel Fired Systems,” *Prog. Energy and Combust. Sci.*, **29**, 89-113(2003).