

건조 하수 슬러지의 열분해 및 고정층 연소 특성 연구

김민수* · 이용운* · 박진제* · 류창국**

Pyrolysis and combustion characteristics of dried sewage sludge in a fixed bed reactor

Minsu Kim*, Yongwoon Lee*, Jinje Park*, Changkook Ryu**

The practical route for disposal of sewage sludge becomes energy recovery by combustion after its ocean dumping is banned in 2012 in Korea. Due to the high moisture content, however, sewage sludge is required to be dried before transport and combustion. In this study, pyrolysis and combustion characteristics of dried sewage sludge was investigated in a small-scale fixed bed reactor in order to provide fundamental data for energy recovery of the fuel. As the first step of combustion, the primary products of pyrolysis were analyzed in a fixed bed reactor for the condensable volatiles (tar), non-condensable gases, and char. For the combustion characteristics, another fixed bed reactor was constructed to monitor the weight and temperature of the fuel particles during ignition and combustion under different air flow rates. The test results were used to derive the ignition and burning rates.

Key Words : Fixed bed combustion, Ignition rate, Pyrolysis, Sewage sludge

하수처리공정에서 발생하는 하수 슬러지는 수분 함량이 80 % 이상이며, 다양한 중금속(Pb, Cd, As, Hg, Cr)과 미생물 분해가 어려운 유기물이 다량 포함[1]되어 있다. 기존 대부분의 하수 슬러지는 해양배출을 통해 처분하거나, 육상매립, 소각을 통해 처리하였다. 하지만 런던협약 준수와 해양 생태계 보호를 위해 해양배출이 금지되고, 육상매립 또한 2차 환경오염 발생으로 인해 처리상 어려움이 있다. 따라서 하수 슬러지는 건조 에너지화, 비료 개발, 시멘트 원료나 건축자재 등 재활용 기술[2]로 처리하고자 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 건조 에너지화는 하수슬러지를 수분 10 % 내로 건조 후 고형연료로 활용하는 방식으로, 열적 변환을 통해 에너지를 생산함과 동시에 효율적으로 처리가 가능하다. 건조된 하수 슬러지는 저위발열량 12-15 MJ/kg, 회분함량 20-30%로서 열적 변환 방식에 따라 전·혼소용 연료로 충분히 활용이 가능하다.

이 연구는 건조/고형화 하수슬러지를 대상으로 상용 연소방식 중 하나인 고정층에서의 연소특성과 이 때의 첫 반응단계인 열분해 특성을 분석한 것이다. 먼저 열중량분석을 통해 연료의 수분증발과 열분해가 일어나는 온도구간과 승온율에 대

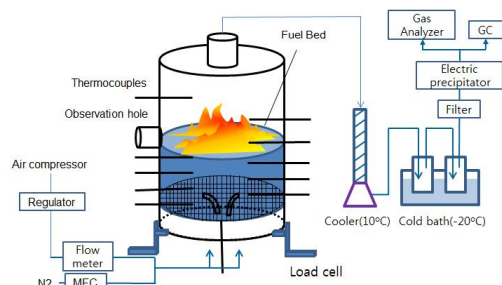


Fig. 1 Schematic of the fixed bed reactor

한 영향을 파악하고, 열분해 실험을 통해 타르를 포함한 휘발분 조성과 촉의 특성에 대해 분석하였다. 연소 특성은 고정층 반응기 내에서 공기유량 변화에 따른 화염전파속도, 연소율, 생성가스 조성에 대해 분석하였다.

분석대상 하수슬러지는 열수 건조 후 입자크기 10 mm의 구형으로 성형된 고형 연료로서, 공업 분석 결과 수분 5.73%, 가연분(휘발분+고정탄소) 58.0%, 회분 36.27%로 구성되어 있고 저위발열량은 14.28 MJ/kg로 측정되었다.

Fig. 1은 고정층 연소 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 반응기의 재질은 SUS 310이며, 크기는 직경 310 mm, 높이 720 mm이다. 열전대(K-type)는 연료층 하단면부터 높이별 50 mm 간격으로 총 10개가 설치되어 있으며, 관측창을 통해 내부상태를 확인할 수 있다. 연소 실험은 반응기

* 성균관대학교 기계공학부

† 연락저자, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-4841 FAX : (031)290-5889

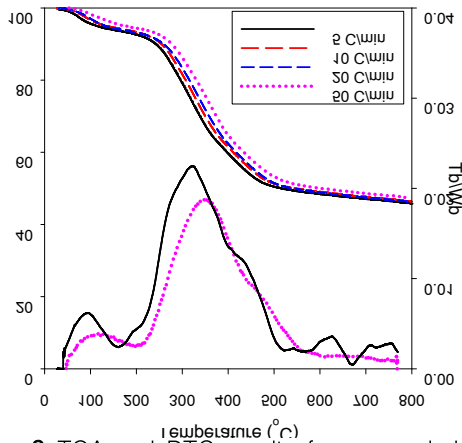


Fig. 2 TGA and DTG result of sewage sludge

에 샘플을 약 250 mm까지 넣은 후 보조연료(등유)를 통해 착화시킨다. 공기는 regulator를 통해 1.5 bar의 압력으로 유지하였으며, 유량은 100-400 l/min(97-398 kg/m²hr)으로 주입하였다. 발생한 연소가스는 10 °C, -20 °C의 응축시스템을 통해 응축된다. 응축되지 않은 가스는 전기집진기와 필터를 통해 미세 에어로졸을 제거한 후, 온라인 가스분석기와 Micro-GC를 사용하여 분석하였고, 무게감소량은 로드셀(PW6D)를 통해 측정하였다.

열분해 실험 장치는 기존 실험에 사용된 반응기 [1]를 통해 실험하였다. 실험에 사용한 샘플은 연소실험과 동일하며, 온도는 전기 히터를 통해 약 10 °C/min으로 상온에서 530 °C까지 승온하며, 질소분위기에서 실험이 진행되었다. 최종 원소분석을 통해 C, H, O, N, S에 대해 파악하였고, 생성된 오일은 원심분리기로 상분리 후 각각의 상에 대해 원소분석과 GC-MS를 통해 성분을 분석하였다.

Fig. 2는 5-50 °C/min의 승온율에 대한 열중량 분석(TGA) 결과를 나타낸 그래프이다. 수분증발

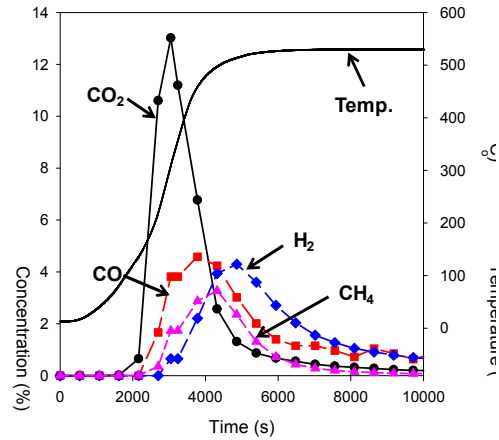


Fig. 3 Gas composition during pyrolysis with a final temperature of 530 °C

이 약 150-200 °C까지 진행되는 것을 확인할 수 있고, 열분해는 약 200-530 °C에서 활발히 진행됨을 확인할 수 있다. 하수슬러지는 수분증발 시 유기성 폐기물 내에 존재하는 결합수로 인해 많은 양의 에너지와 건조시간이 필요하며[2], 이에 상대적으로 높은 온도까지 수분증발이 진행된 것으로 판단된다. 각각의 승온율에 대한 무게감소량은 큰 차이가 나타나지 않았으며, 유사한 경향 보였다.

Table 1 Ultimate analysis of sewage sludge and its pyrolysis products (condensable and char).

Sample	C	H	O	N	S
	(wt.%)				
Raw fuel	32.5	4.7	57.4	4.2	1.2
Aqueous phase	15.1	10.3	68.2	6.1	0.4
Viscous phase	69.6	9.9	12.6	7.2	0.8
Char	77.7	2.5	10.8	7.4	1.6

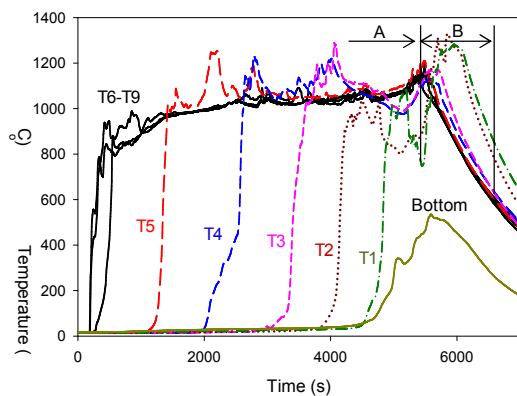


Fig. 5 Temperature and gas composition during combustion at air flow of 400 l/min (397.1 kg/m²h)

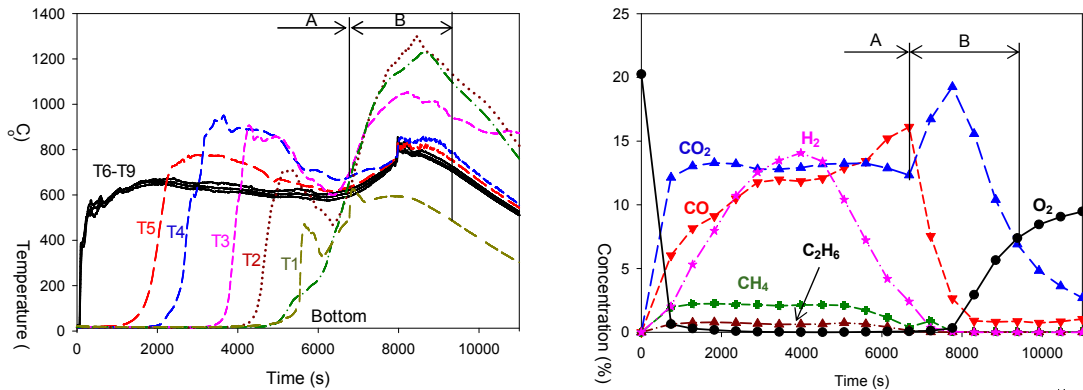


Fig. 4 Temperature and gas composition during combustion at air flow of 100 l/min (99.27 kg/m²h)

Fig. 3 은 열분해 실험에 대한 온도와 가스조성을 나타낸 그래프이다. 약 200 °C부터 열분해가 진행되며, CO₂와 CO가 먼저 생성되는 것을 확인할 수 있다. H₂와 CH₄는 상대적으로 높은 온도에서 생성되며, C₂+(C₂H₄,C₂H₆,C₃H₈ 등) 계열 가스는 1% 미만으로 거의 나타나지 않았다. 열분해에 의해 생성된 오일(타르+수분)의 총 수율은 36.89%이며, 이를 응축한 수분이 대부분 포함된 aqueous phase와 타르 성분인 viscous phase로 분리하여 분석하였다. 전체 오일 중 aqueous phase는 53.37 %, viscous phase는 47.63 %이다. 열분해 후 남은 찌꺼기의 수율은 49.86 %로 그 중 회분은 67.7 %로 나타났다. 찌꺼기에 남아있는 휘발분의 함량은 약 11 %로서 탈휘발 반응이 거의 완료된 것을 확인할 수 있다. 열분해시 생성된 가스는 13.25 %이며, CO₂가 31.9 vol %로 가장 많이 생성되었다. Table 1은 각각의 성분에 대한 원소분석 결과를 나타낸 것이다. 타르의 viscous phase에 C의 함량이 매우 높고, 최

는 탄소 외에 산소가 10.84 %로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4은 유량 100 l/min의 연소조건에서 온도분포와 가스조성을 나타낸 그래프이다. 온도분포의 경우 화염면이 하단으로 전파됨에 따라 순차적으로 온도가 상승하며, 화염면이 화격자에 도달한 후 고온의 최 연소 영역(B구간)이 형성[5]된 것을 확인할 수 있다. 최 반응은 불균일상(heterogeneous) 반응으로 반응속도가 느리며, 가스반응이 일어난 후 최 반응이 진행된다. 이에 당량비 1 이하의 산소부족상태에서는 가스반응으로 산소가 모두 소모되어, 가스반응이 완료한 후 최반응이 일어나 다음과 같이 두 개의 연소영역으로 나뉘는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 유량 400 l/min의 연소조건에서 온도분포와 가스조성을 나타낸 그래프이다. 유량이 증가함에 따라 화염면의 온도가 증가하였고, CO와 H₂는 낮게 나타나며, CO₂의 농도는 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 최 반응이 가스반

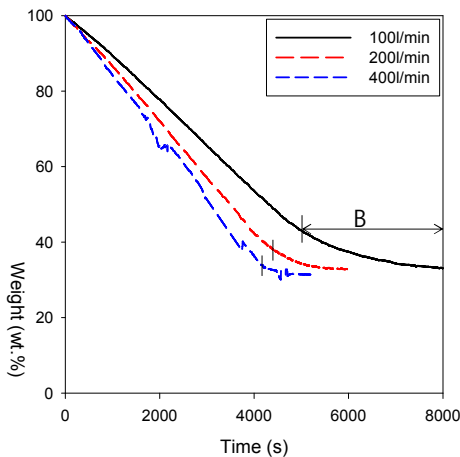


Fig. 6 Weight loss curves for sewage sludge

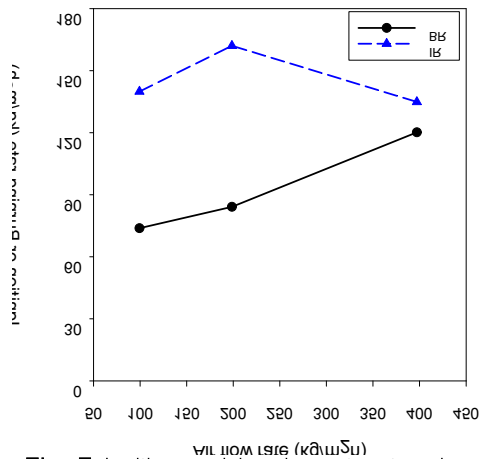


Fig. 7 Ignition and burning rate at various air flow rates

응과 함께 일어나며, 최 연소 영역이 줄어들어 드는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 6은 각각의 유량별 무게감소량에 대해 나타낸 그래프이다. 초기 착화의 불안전성으로 인해 초기 연료층의 온도가 상승하는 시점을 기준으로 무게감소량을 나타내었다. 유량이 증가할수록 무게감소량이 빠르게 진행되며, 화연소영역(B)이 점차 좁아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 공기유량 별 점화율(Ignition rate)과 연소율(Burning rate)을 나타낸 그래프이다. 점화율은 화염전파속도, 연소율은 화염전파 시 무게감소 속도를 의미한다. 1점화율의 경우 397.1 kg/m²h에서 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 공기유속의 증가로 인해 점화면 아래에 위치한 입자에서 대류열전달에 의한 열손실의 영향이 커져 화염전파속도가 감소하였다고 판단된다. 반면, 점화면 위에서 착화된 입자에서는 공기유량이 증가함에 따라 탈휘발에 의한 가스의 소모와 함께 최의 연소반응이 동시에 진행되면서 연소율이 증가하였다.

이 연구는 건조/고형화 하수슬러지의 연료특성을 파악하기 위해 열분해, 연소 특성에 대해 분석하였다. 열중량 분석과 열분해 실험을 통해 탈휘발시 생성되는 타르와 가스의 수율을 확인할 수 있었고, 타르의 특성과 최의 특성에 대해 파악할 수 있었다. 또한 연소실험을 통해 유량 별 온도분포, 무게감소량, 가스조성을 파악하였고 이를 통해 점화율, 연소율에 대해 분석하였다. 이러한 자료는 가스화, 연소 모델 개발의 기초자료로서 활용이 가능할 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상 자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (과제 번호: 20133030100860) 슬러지 샘플을 제공해 주신 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] D. Fytli, A. Zabaniotou, "Utilization of sewage sludge in EU application of old new methods-A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews vol.12, 2008, pp.116-140
- [2] 에너지기술평가원 "하수슬러지 건조 및 에너지 연료화", 2014
- [3] Y. Lee, P. Eum, C. Ryu "Characteristics of biomchar produced from slow pyrolysis of GeodaeUksae 1" Bioresource Technology

vol.130, 2013, pp.345-350

[4] S. Lee, K. Kim "A Study for Establishment of Proximate Analysis in Korea Waste" Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 31, 2014, pp. 413-417

[5] C. Ryu, A. Phan "Ignition and burning rates of segregated waste combustion in packed beds" Waste Management, vol 27, 2007, pp.802-810