

기포식 유동층에서 수분조건이 목재와 RDF의 가스화에 미치는 영향

김태현, 최상민
한국과학기술원 기계공학과

Effect of moisture content on gasification for Wood and RDF in a Bubbling Fluidized Bed

Taehyun Kim, Sangmin Choi
Department of Mechanical Engineering, KAIST

1. 서론

유동층은 열용량이 좋은 열매체를 사용하여 좋은 열전달과 넓은 범위의 연료를 다룰 수 있고 긴 체류시간과 다른 반응기와 비교하여 더 낮은 온도에서 운전이 가능하며 로체가 콤팩트한 것이 장점이다. 유동상 가스화로의 설계를 위해서는 우선 대상연료에 대한 적절한 모델을 이용하여 특성을 예측함으로써 각 설계변수의 최적범위를 미리 결정하는 것이 바람직하다. 또한 일반적인 로의 설계 시 성능에 영향을 미치는 여러 가지 변수들을 고려하여 적절한 설계가 가능하도록 하여야 한다 [1].

일반적으로 운전조건 및 연료 특성에 따라서 전체 설계 및 운전에 영향을 미치는 인자들은 반응성(반응 상수, 단계별 반응속도, 휘발분/생성물량), 온도상승률(덩어리 크기, 혼합 파쇄 특성, 덩어리 열전달 특성), 체류시간, 산소농도, 공기주입량(공기비), 공기 예열 온도, 연료 내 수분함량, 유동화율, 유동상 조건, 가스의 혼합 특성, 미연분량, 출구 가스 온도, 로의 크기 및 형상 등이 있다 [2]. Ogada 등[3]은 실험실 규모 및 반 파일롯트 규모의 유동상로에서의 실험을 통해 연소로 내에서의 하수 슬러지의 연소 과정을 나타내면서 슬러지 내 수분이 연소속도에 큰 영향을 끼치며, 건조, 탈휘발 및 고정탄소 연소의 각 단계들이 중첩되어 일어난다고 기술하였다. Choi 등[4]은 유동상로에서 온도, 입자 크기, 수분함량에 따라 탄소 전환의 개념을 이용한 해석을 통해 탈휘발 및 화 연소에 영향을 파악하였다. 가스화/열분해의 경우에서 Xiao 등[5]은 온도, 등가비, 유동화속도의 변화에 따른 합성가스 발열량, 가스화 효율에 관해 연구를 수행하였다. 하지만 설계 적용의 최적범위를 결정하기 위해서 연료 내의 수분이 가스화 속도와 연료 특성에 미치는 영향에 관해 보다 자세한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 대상 연료로써 RDF와 나무를 사용하여 실험실 규모의 실험로에서 부분 산화조건에서 수분함량이 입자의 가스화 과정에 미치는 영향을 알아본다.

2. 실험 및 방법

2.1 대상 연료의 공업, 원소 분석 및 열중량 분석

나무와 RDF의 수분을 제외한 건 기준으로 분석 결과를 표시하였다. 실험에 사용한 나무와 RDF의 원소 분석 및 공업 분석 결과를 Table 1 에 나타내었다. Fig. 1에는 나무와 RDF에 대한 열분해 열중량 분석 결과를 나타내었다. 본 실험은 20 mg 샘플에 대하여 이루어졌으며, 800°C 까지 분당 20°C 비율로 승온이 이루어졌다. 불활성 기체(질소)를 사용하여 무산소 분위기에서 TA instrument 사의 SDT Q-600 모델을 사용하여 열중량 분석장치를 이용하여 열분해 열중량 분석을 하였다.

나무의 경우 주된 중량 감소구간은 300~400℃ 사이의 온도에서 55.1%의 질량 감소를 보여 주고 있다. 500℃이후의 열분해 잔류물은 초기 질량의 약 22%이다. RDF의 경우 주된 중량 감소구간은 300~400℃ 사이의 온도에서 21.5%의 질량 감소를 보여주고 있다. 또한 400~500℃ 사이에서 32.33%의 질량 감소가 일어나며 500℃이후의 열분해 잔류물은 초기 질량의 약 30%이다.

Table 1 Proximate analysis and Ultimate analysis

	Proximate analysis			Ultimate analysis					발열량 kJ/kg
	회분	휘발분	고정탄소	C	H	O	N	S	
Wood	>.01	87.1	12.9	45.7	6.5	45.7	>.01	>.01	17287
RDF	11.2	77.4	11.4	51.8	8.2	28.1	0.7	>.01	23400

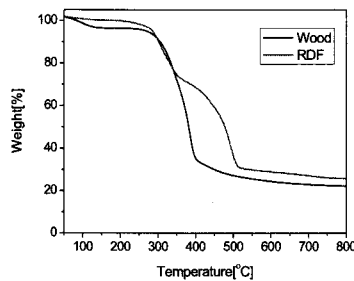


Fig. 1 TGA of Wood, RDF

2.2 실험장치

실험실 규모의 유동층 반응기의 개념도는 Fig. 2에 나타내었다. 직경 100mm, 베드 높이 200mm, 프리보드 높이 900mm 의 크기의 반응기로써, 유동화 공기는 MFC 를 이용하여 조절한다. 사용된 유동사는 평균 입경이 550 μ m, 밀도 2300kg/m³, 기공율 0.35의 모래를 사용하였다. 최소 유동화 속도는 상온(15℃)일때 0.15m/s 이다. 이때 저산소 분위기를 형성하기 위해 산소 농도를 낮추기 위한 질소를 섞어서 투입한다. 또 베드 온도를 유지하기 위해 반응기 외벽의 가열선과 베드에 공급되는 유동화 공기의 온도를 높이기 위한 예열기가 설치되어 있다. 베드의 온도는 K type 열전대로 측정하였다. 배출가스 중 CO, CO₂, CH₄ 측정에는 CIC Photonics FT-IR spectrometer를 사용하였고 H₂ 측정에는 Teledyne 2230 모델을 사용하였다. 분석기의 측정 결과는 자료 획득 장치와 컴퓨터를 이용하여 5초 간격으로 기록하였다.

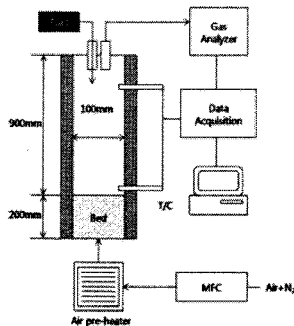


Fig. 2 Schematic diagram of bubbling fluidized bed reactor

2.3 실험방법

유동층에서 단입자 실험과 연속운전 실험을 수행하였다. 실험방법은 직경 약 2 cm 크기의 고체 연료 입자를 유동층 반응기에 투입하고 시간에 따라 배가스를 측정하였다. 나무 입자와 RDF에 대해서 수분함량을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 최소유동화속도는 0.15m/s 이고 공하여 유동화율을 2이상으로 설정하였다. 유동화 공기량은 52L/min으로 등가비를 0.6 으로 맞추어 질소와 공기를 혼합하여 사용하였다. 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental condition

항목	Condition
베드 온도	750℃
수분변화(나무)	0% ~ 50%
수분변화(RDF)	0% ~ 30%
수분변화(연속운전)	0% ~ 40%
유동화 가스	N ₂ : 30L/min + air: 22L/min
유동화율	2.08(=0.312/0.15)
등가비	0.6
투입량(연속운전)	500g/hr

2.4 계산 방법

원소분석을 통해 얻은 각 고체연료의 탄소량을 기준으로 연료의 무게를 결정하고 배가스 성분 중에서 CO, CO₂, CH₄를 분석하여 가스화 상황을 설명한다. 연료의 탄소 성분이 모두 CO, CO₂, CH₄로 전환되어서 배기가스로 빠져나간다고 가정하고 합성 가스의 조성을 측정하여 배출 탄소량을 계산하면 탄소의 연소량과 탄소의 전환 속도를 계산하여 가스화 상황을 설명할 수 있다. 합성가스에서 측정된 합성 가스의 농도(CO, CO₂, CH₄)와 합성 가스 유량(Q)을 이용하면 다음과 같은 식들을 정의하여 가스화 상황을 설명 할 수 있다 [9,10].

탄소 연소량의 계산식을 시간으로 미분하고 총 탄소량으로 나누는 식(1)과 같이 탄소의 전환 속도(rate of carbon conversion, dc/dt, 1/sec)를 정의할 수 있다.

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{n}{N}\right) = \frac{Q}{N}(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{C,H_2}) \quad (1)$$

탄소전환량(fraction of carbon conversion, f_{conv} , %)은 백분율로 표시되며 시간별 탄소의 양 전환된 탄소량을 나눈 후 탄소회수율을 곱하여 식(2)로 정의하였다.

$$f_{conv} = \frac{n}{N} \times C_{Rec} \times 100 \quad (2)$$

그리고 연속운전 시에 가스화를 위해 선정된 폐기물 원료 및 운전조건 등에 대한 가스화의 효율을 계산하기 위한 척도로서 냉가스효율(Cold gas efficiency)이 사용될 수 있다. 냉가스 효율을 계산하기 위해 폐기물이 갖고 있는 반응열을 가스화를 통한 생성가스의 열량, 미반응된 폐기물의 열량, 반응기를 통한 열손실 그리고 생성가스의 현열의 합으로 정의한다. 따라서 가스화의 효율을 계산하기 위한 냉가스효율은 식(3)과 같이 정의하여 사용한다 [6].

$$\text{냉가스 효율}(\eta) = \frac{\text{가스화를 통한 생성가스의 열량}}{\text{폐기물이 갖고 있는 반응열}} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 나무의 실험 결과

저산소 분위기에서 부분 산화를 유도하여 나무의 수분함량에 따라 유동층 반응기에서 한 개씩 입자를 투입하여 배출된 합성가스(CO, CO₂, CH₄, H₂) 측정 결과를 식(1)과 식(2)를 통해 탄소전환량과 탄소전환속도로 변환하여 결과를 해석하였다. Fig. 2는 나무의 수분함량에 따른 탄소 전환량을 나타낸 그래프이고 Fig. 3은 나무의 수분함량에 따른 탄소전환속도를 나타낸 그래프이다.

수분의 함량은 입자의 가열에 큰 영향을 주므로 전체적으로 입자의 반응성에 미치는 영향이 크다. 수분이 증가하면서 입자의 온도증가율이 입자의 수분잠열에 의해서 느려지게 되며 탈휘발되는 속도가 느려지게 된다. 건조된 나무 입자의 경우 CO의 농도가 다시 0이 되는 시간이 240초로 가장 짧으며 수분함량이 50% 인 경우에 335초로 약 90초 정도 지연된다. 수분이 증가할 경우에 입자 내의 온도 상승률이 둔화되어 가스화가 완료 되는 시간이 점점 늦어지는 것을 확인 할 수 있다.

탄소 전환율로 나타내었을 때에 이는 확연히 드러나게 되는데 수분함량이 증가할수록 탄소 전환율의 기울기가 둔화되는 것을 볼 수 있다. 나무의 경우 수분량이 증가하면서 입자의 온도 증가율이 감소하고 그 결과 온도에 지배를 받는 탈휘발 속도가 줄어들기 때문이다.

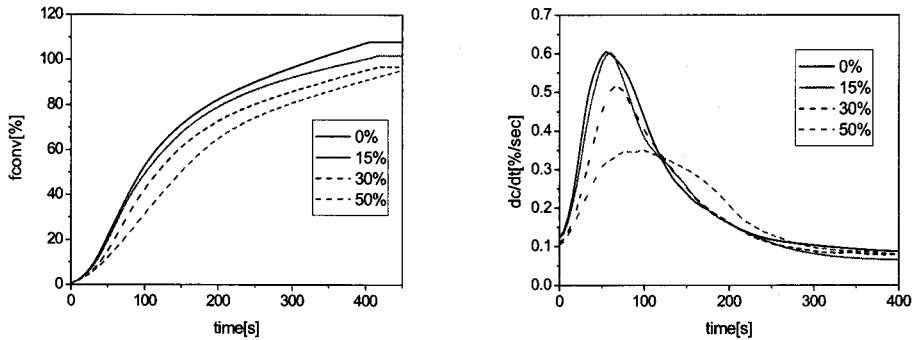


Fig. 2 Fraction of carbon conversion of wood Fig. 3 Rate of Carbon conversion of wood

연속운전을 통해 냉가스효율과 합성가스의 열량을 획득하였다. 입자의 수분함량에 따른 합성가스 농도의 평균값과 그 때 생성된 합성가스의 열량 그리고 냉가스효율을 Table 3에 나타내었다. 냉가스 효율은 발생가스의 생성열로 계산을 수행하였다. 수분함량이 20%일 경우에 합성가스의 품질이 가장 좋은 것을 확인 할 수 있다. 냉가스효율은 순서대로 40%, 52%, 46% 의결과를 나타내게 되는데 완전 건조 상태일 때 보다 20%일 경우가 더욱 높은 것을 볼 수 있다. 이는 입자내의 수분이 건조가 되면서 일종의 가스화제로 작용하여 가스화를 더욱 촉진시키게 된다. 하지만 너무 많은 수분량은 베드의 온도나 가스화로 운전의 불안정성을 야기 시켜 오히려 냉가스 효율이 떨어지게 되는 것을 볼 수 있다. 하지만 완전 건조 상태와 40%일 때를 비교 하면 냉가스 효율은 많은 차이를 보이지 않는데 이는 냉가스 효율의 정의에서 분모로 들어가는 부분이 투입되는 폐기물의 반응열로 표현되는데 수분함량이 늘어나면서 투입되는 반응열이 낮아지면서 효율이 비교적 높게 나왔다.

수분 함량	CO ₂ [vol%]	CO [vol%]	H ₂ [vol%]	CH ₄ [vol%]	합성가스열량 kJ/Nm ³	냉가스효율 (%)
0%	4.48	11.93	6.6	4.18	2220	40
20%	4.46	12.23	7.5	4.45	2355	52
40%	3.89	9.27	5.2	3.09	1733	46

Table 3 Syngas composition, Heating value and Cold gas efficiency

3.2 RDF의 실험 결과

앞서 수분함량이 영향을 비교적 뚜렷하게 볼 수 있었던 것은 사용된 시료의 크기가 분말형태가 아닌 덩어리로의 확장이 이루어졌기 때문이다. 입자의 내부와 외부의 온도차로 인해 입자의 내부까지의 열전달에 영향을 미쳤기 때문이며 또한 균일하지 못한 온도상승으로 위와 같은 결과를 보였다. 나무의 경우에는 입자의 모양이 유지되는 반면 RDF의 경우에는 결합력이 약한 입자의 특성으로 인해 수분함량의 영향을 덜 받는 것으로 실험결과 확인할 수 있었다. 비산된 입자로 인해 탄소전환량으로 나타내기 어려워 Fig. 4와 Fig. 5에 탄소 전환률과 탄소 전환 속도로 나타내었다. RDF는 나무 입자와 달리 수분에 따른 확연한 차이를 보이기 어려웠다. 일정한 수분 이상에서는 입자 형태를 갖출 수 있는 한계를 넘어서면서 쉽게 부서져 입자의 크기가 감소하면서 수분의 영향보다 입자의 크기의 영향을 더 받았기 때문이다.

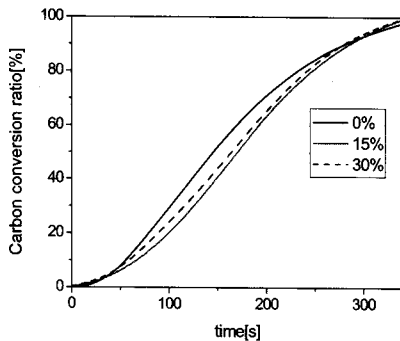


Fig. 4 Carbon conversion ratio of RDF

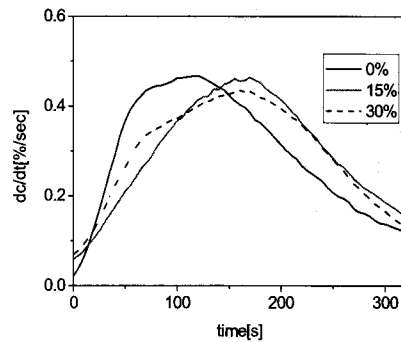


Fig. 5 Rate of Carbon conversion of RDF

4. 결론

수분함량의 영향으로 입자의 온도 증가율이 둔화되어 반응속도가 감소함을 확인하였다. 또한 연속운전을 통해서 입자내의 수분이 건조되면서 일종의 가스화제로 작용하여 가스화를 더욱 촉진시키게 됨을 확인하였다. 덩어리 입자의 영향으로 나무의 경우는 내 외부의 온도차로 인해 입자 내부의 열전달의 영향으로 반응 속도에 영향을 주었다. 하지만 RDF는 수분함량이 증가해도 입자의 크기나 강도의 영향으로 이동 정도가 크지 않았다. RDF의 특성상 입자의 결합력이 떨어져 수분의 영향보다는 입자의 크기에 의한 영향이 보다 컸다.

후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업, 연소기술 연구센터(CERC)와 Brain Korea21의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

5. 참고문헌

1. 전해수 외, “폐기물 유동층 소각”, 동화기술, 1993.
2. 양원, 최진환, 최상민, “하수 슬러지의 연료특성 파악을 위한 기초분석”, 대한환경공학회지, vol.23, no.1, pp.51-59, 2001.
3. T. Ogada and J. Werther, “Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed”, Fuel, vol.75, no.5, pp.617-626, 1996.
4. 최진환, 박영호, 최상민, “고체 폐기물 연료의 유동상 연소-연소특성 및 운전인자 변화”, 한국폐기물학회지, vol.18, no.3, pp.1-9, 2001.
5. Ni, M.-j., Xiao, G., Chi, Y., Yan, J.-h., Miao, Q., Zhu, W.-l., “Study on pyrolysis and gasification of wood in MSW”, Journal of environmental sciences (China), v.18 no.2, pp.407-415, 2006.
6. 김재호, 최영찬, 이재구, 한춘, 김용구, 나재익 “폐기물 가스화의 열역학적 냉가스 효율 분석”, 한국폐기물학회지, 20권, 2호, pp.193-203, 2003.
7. 최진환, 이상득, 최상민, “유동층 연소로에서 고체 폐기물 연료의 열분해 및 연소 특성”, 화학공학, 제40권, 제4호, 통권 213호, pp.523-528, 2002.
8. H. Lorenz and H. Rau, “A new method for investigating the combustion behavior of solid fuels in FBC”, Fuel vol.77, no.3, pp.127-134, 1998.
9. T. C. HO, P. KU and J. R. Hopper, “Kinetic study of biological sludge incineration in a fluidized bed”, AIChE symposium series, vol.84, no.263, pp.126-133, 1988.
10. I. T. Lau and F. D. Friedrich, “Influence of fuel properties on fluidized bed combustion”, AIChE symposium series, vol.84, no.262, pp.89-101, 1988.