

유동층 연소로에서 고체 폐기물 연료의 열분해 및 연소 특성 비교

최진환 · 이상득 · 최상민[†]

한국과학기술원 기계공학과
(2002년 3월 31일 접수, 2002년 6월 18일 채택)

Combustion Characteristics of Waste Fuels in a Fluidized Bed

Jin Hwan Choi, Sang Deuk Lee and Sang Min Choi[†]

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea
(Received 31 March 2002; accepted 18 June 2002)

요 약

가연분의 대부분이 휘발분인 고체 폐기물의 소각에서 탈휘발 과정과 휘발분의 연소 과정에 대한 정보는 고체 폐기물 연소로를 설계하고 운전하는 데 있어 매우 중요하다. 본 연구 목적은 폐기물 고체 연료의 종류에 따른 연소 특성 변화를 유동층 설계의 관점에서 평가하는 것이다. 고체 폐기물의 열분해/연소 특성을 실험적으로 조사하기 위해 제작된 시험 유동층 베드에 서 단일자 유동층 연소조건을 재현하였고, 이 장치를 이용하여 연료 입자의 반응 과정을 관찰하였다. 연구 대상 연료로 나무, 제지 슬러지, 하수 슬러지 그리고 폐기물 재생 연료를 선정하였다. 등온(700°C)으로 유지되는 유동층 연소로에 지름이 수 cm 인 연료 입자를 투입하였다. 연소 반응 후 가스상으로 배출되는 CO, C_xH_y, CO₂ 농도를 연소실 출구에서 연속적으로 측정하여 반응 특성을 탈휘발, 화 연소로 구분하여 확인하였다. 연료의 수분함량 변화가 연소 과정에 미치는 영향을 살펴보고, 입자의 크기가 반응에 미치는 영향을 평가함으로써 입자의 크기가 분쇄에 의해 작아지는 효과를 확인하였다. 실험적으로 확인된 연료의 연소 특성이 유동층 설계에 있어서 갖는 의미를 평가하고 연소 특성을 고려한 설계 방안을 제시하였다.

Abstract – The information on the processes of volatile combustion and devolatilization is important in designing and operating the combustor of solid waste fuels of which volatile proportion in the combustible is very high. The aims were to compare the reactions of the waste fuels having different origin and to sort out their own distinguishable characteristics that are important in designing the FBC(fluidized bed combustor). Waste fuels were selected to examine their characteristics of pyrolysis and combustion in a laboratory scale combustor in which a nearly single particle combustion condition was reproduced. Wood, paper sludge, sewage sludge and RDF were selected and the fuel particles whose characteristic lengths were a few centimeters were injected into a fluidizing environment of 700 °C sand in the thermally maintained reactor. By introducing some experimental parameters such as the rate and the fraction of carbon conversion, the combustion characteristics of the fuels were checked for the two separated processes of devolatilization and char combustion. Additional experimental work was carried out to determine the influence of the high water content of sludge fuels on its combustion process. The comminution effects on the combustion process of the large fuel particle were rechecked by performing the experiments for the wood particles of various size. The meanings of the fuel combustion characteristics in designing of FBC were checked and some design strategies were suggested.

Key words: Devolatilization, Solid Waste Fuel, Char Combustion, FBC

1. 서 론

유동층 연소로 시스템은 저급 석탄에서 폐기물류에 이르는 다양한 종류의 연료를 연소시킬 수 있다. 예를 들면 기존의 연소기에서 처리하기 어려운 수분 함량이 많은 슬러지류도 좋은 혼합과 긴 체류시간이 보장되는 유동층 연소로에서 비교적 안정적으로 소각시킬 수 있다[1, 2]. 폐기물 처리로서의 소각 방식은 폐기물을 무해화 하는 동시에 그 양

을 크게 줄일 수 있기 때문에 매력적인 처리 대안으로 여겨지고 있다. 이 점에서 앞으로 많은 폐기물류가 높은 연소 효율이 보장되는 유동층 연소로를 이용하여 처리될 것으로 전망된다[3].

고체 폐기물은 도시 폐기물에서 공장, 농업 폐기물에 걸쳐 그 종류가 매우 다양하다. 고체 폐기물은 휘발분 함량이 높고 수분이나 회분의 함량은 종류에 따라 크게 차이를 보이는 것이 특징이다. 종류의 다양성만 큼 고체 폐기물의 연소 특성도 종류에 따라 크게 차이를 보이기 때문에 폐기물 연소로 설계에 있어서 폐기물의 고유한 연소 특성은 매우 중요한 정보이다[4, 5].

지금까지 유동층 내 고체 연료의 연소 현상에 대한 연구가 광범위하

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: smchoi@kaist.ac.kr

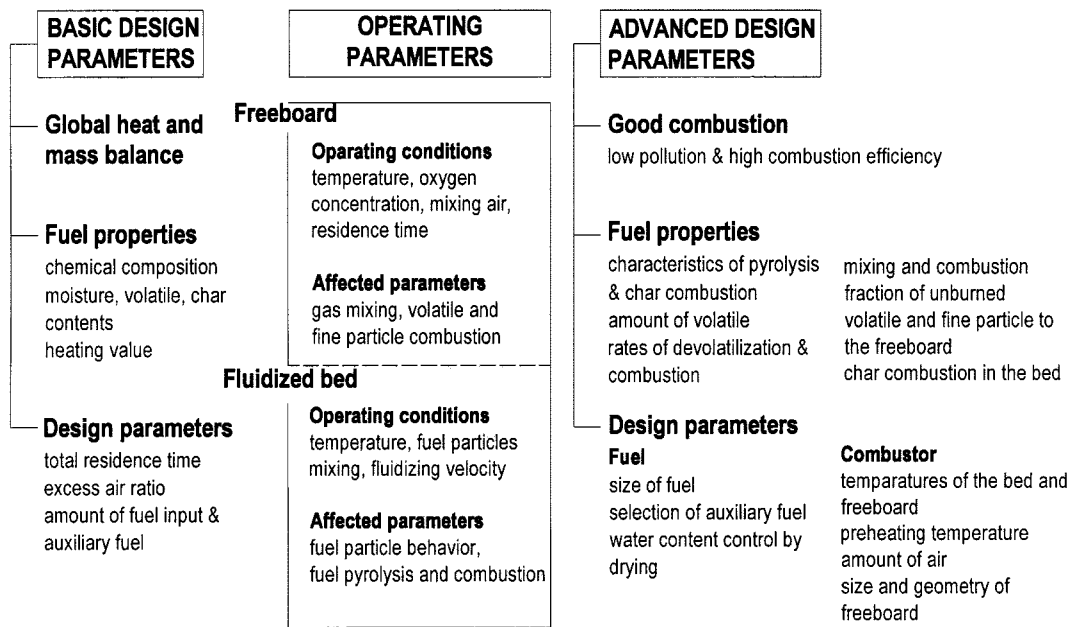


Fig. 1. Schematic diagram for the relation between fuel properties and FBC design parameters.

게 이루어져왔으며 특히 석탄에 대한 연구 자료가 많이 확보되어 있다. 이전의 연구로부터 고체 연료의 연소 특성에 대한 이해가 상당수준 정립되어 있으나 연료의 종류와 연소조건의 다양성을 반영하는 데는 한계를 보여 왔다[4]. 본 연구의 목적은 유동층 연소 조건에서 고체 폐기물의 열분해/연소 특성을 실험적으로 관찰하여 다양한 고체 폐기물 연료의 연소 특성을 비교함으로써 폐기물의 종류에 따른 대표적인 특징을 구분해 내고 폐기물의 연소 특성이 유동층 연소로 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것이다.

2. 연료 연소특성과 유동층 연소로 설계

Fig. 1에 유동층 연소로 설계 조건 설정에 있어서 필요한 연료의 특성과 상호 관계를 도식적으로 나타내었다.

연소로 설계에 있어서 기본적으로 수행되는 열 및 물질 정산 시에 원소 분석 및 공업 분석 그리고 발열량 측정 결과가 반영된다. 이 과정에서 공연비에 맞춰 연료 투입량, 연소 공기량, 연소실 열부하 등을 결정하며 수분 함유량이 높은 슬러지와 같이 발열량이 낮은 연료를 연소시킬 경우 보조 연료 사용량이나 건조율을 결정한다.

유동층 연소로는 크게 베드와 프리보드로 나뉘어지며 베드에서 연료의 연소과정이 진행되고 프리보드에서 휘발분 또는 동반 비산된 가연성 물질의 2차 연소가 이루어진다. 높은 연소 효율과 저공해 개념의 유동층 연소로를 설계하고 운전하기 위한 가장 중요한 사항의 하나는 베드/프리보드 온도의 유지 관리이다. 설계 단계에서 적정 온도를 설정하려면 베드와 프리보드 영역에 대한 투입 연료의 연소율을 결정하여 열 및 물질 정산을 해야 한다. 그러나 투입된 연료의 연소 특성에 관련된 정보가 없는 상태에서 두 영역의 연소 부하를 결정하는 것은 곤란하다. 유동층 설계 과정에서 연료 특성에 의해 결정된 열분해 속도 및 연소율을 적용하여 베드와 프리보드 연소실의 열 및 물질 정산식들을 결합할 수 있으며 이와 같은 설계 절차 중에 핵심이 되는 부분은 유동층 베드에서 프리보드로 방출되는 미연분의 양을 결정하는 것이다. 휘발분은 베드뿐만 아니라 프리보드에서도 연소되며 연소율은 유동화 속도, 베드에서의 산소 농도, 온도 등과 같은 유동층 운전 조건에 따라 달라진다. 휘발분의 비중이 높은 고체 폐기물의 경우에 휘발분의 베드/프리보드

연소율을 결정하는 것이 더욱 중요해진다. 유동층 설계에 있어서 베드/프리보드 온도를 설계 조건에 맞춰 유지하기 위해서는 폐기물 연료의 휘발분 함량, 탈휘발 속도, 휘발분 연소 과정에 대한 정보가 필수적이다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

실험 장치는 Fig. 2와 같이 지름 100 mm 스테인레스 관으로 만들어진 높이 1,100 mm의 원통 유동층 연소로이다. 유동층 베드는 평균 지름이 550 μm 인 모래로 이루어졌으며 높이는 200 mm이고 최소 유동화 속도는 상온에서 0.15 m/sec이다. 유동층 연소로와 유동화 가스를 외부 가열기로 가열하여 연소로 내부의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 설계하였다. 연소가스는 연소실 출구에서 연속적으로 채취되어 분석기에서 농도 측정이 이루어진다. CO 와 CO_2 가스 측정에는 비분산 적외선법 농도 측정기, 탄화수소(Hydrocarbon, C_xH_y)는 화염 이온화법 농도 측정기, 산소의 경우 상자성법 측정기가 이용된다. 분석기에서 출력된 신호는 데이터 획득 시스템에 의해 컴퓨터에 저장된다.

3-2. 실험방법

베드 온도가 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 실험실 규모 유동층 연소로에 고체 연료 입자를 단일 또는 수 개 단위(탄소 5 g에 해당되는 연료량)로 동시에 투입하고 시간에 따른 연소가스(CO_2 , C_xH_y , CO , O_2) 측정 결과를 통해 이 고체 입자의 열분해, 연소 과정을 관찰하였다. 유동화 가스로는 공기를 사용했으며 열분해 과정을 실험할 때에는 공기 대신 질소가스를 유동화 가스로 사용하여 입자가 채워지는 베드에서 무산소 분위기를 조성하였다[6]. Fig. 2에 표시된 것과 같이 프리보드에서 산소(20 Nl/min)를 주입하여 이 과정에서 발생된 열분해 생성물(휘발분)을 연소시켰다.

무산소 분위기의 열분해 조건 실험에서 탈휘발 과정 후에 남은 최는 탈휘발 과정이 끝나는 시점에 유동화 가스를 질소에서 공기로 전환하여 연소시켰다. 탈휘발 과정이 끝나는 시점은 일산화탄소 또는 이산화탄소의 발생이 더 이상 나타나지 않는 시점으로 선정했다. 이 방법으로 탈휘발 과정과 최 연소 과정을 분리해서 관찰할 수가 있었다.

측정된 CO_2 , C_xH_y 와 CO 농도를 이용하여 연소된 탄소량을 계산하

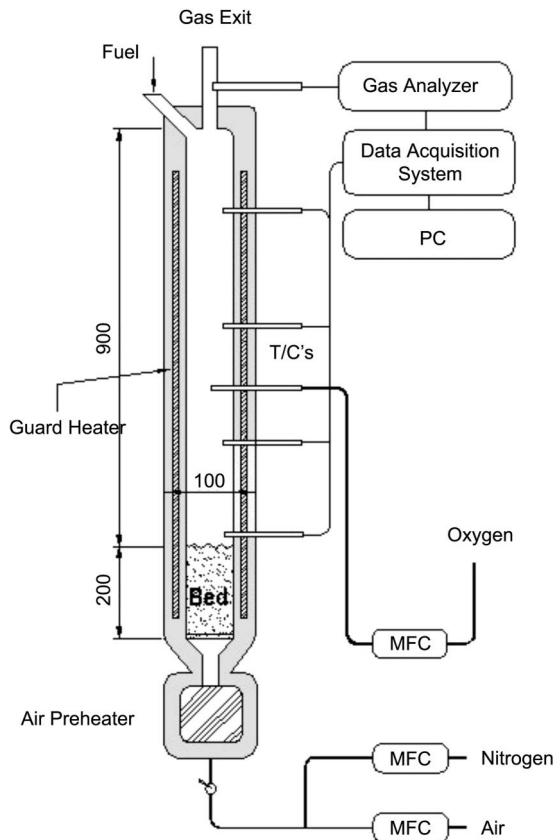


Fig. 2. Lab-scale fluidized bed combustor.

였으며 이것으로부터 탄소 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec), 탄소 회수율(carbon recovery, %)과 평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time, sec) 등을 계산하였다. 이들 인자는 Table 1에 정리되어 있으며 자세한 해석 방법과 한계는 이전에 발표된 논문에서 제시되었다[7-9].

3.3. 연료선택

이 연구에서는 실험 대상 고체 폐기물 연료로서 나무, 실제 유동층 연소에서 연소되는 하수 슬러지, 제지 슬러지, 그리고 펠렛(pellet)으로 성형된 RDF(refuse derived fuel)를 채택하였다. Table 2에 대상 연료의 기초 분석 결과를 나타내었다. 나무는 정육면체(2×2×2 cm), RDF는 원기둥(지름 2 cm, 높이 2 cm)의 형태이며 슬러지는 지름이 2 cm인 덩어리 형태로 뭉쳐졌다. 대상 연료의 가연분 중 휘발분 함량은 85%~88%로 매우 높다. 좌의 가연 성분을 탄소로 가정하고 원소 분석 결과를 이용하면 전체 탄소량 중 휘발분에 함유된 탄소량을 예측할 수 있다. 나무 70%, 하수 슬러지 68%, 제지 슬러지 68%, RDF 79%의 탄소가 휘발분 중에 존재하는 것으로 계산되었다.

Table 1. Equations for the determination of the parameters(C_{xHy} is measured on CH_4 base)

Experimental parameter	Definition
Rate of carbon conversion(sec^{-1})	$\frac{d}{dt}\left(\frac{n}{N}\right) = \frac{Q}{N}(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{C,H})$
Fraction of carbon conversion(%)	$f = \frac{n}{N} \times 100(\%)$
Mean carbon conversion time(sec)	$\bar{t}_c = \int_0^{t_s} \left(1 - \frac{n}{N}\right) dt$
Carbon recovery(%)	$C_Rec = \frac{N}{\text{carbon in fuel}} \times 100(\%)$ carbon in fuel = $\frac{f_c \times m_{fuel}}{12}$
Amount of carbon burnt up to specific time (t(n), and total carbon burnt(N)	$n = \int_0^t Q(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{C,H}) dt$ $N = \int_0^{t_s} Q(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{C,H}) dt$

4. 실험 결과

4.1. 시각관찰

입자의 크기가 수 cm인 비교적 큰 고체 연료의 연소과정에서 입자의 분쇄 과정은 매우 중요한 역할을 한다[10]. 유동층 상부의 관찰창을 통해 입자의 거동과 분쇄 과정을 관찰하였다. 나무와 건조된 하수 슬러지의 경우 좌 연소는 수 개의 입자로 나뉘어져 진행되며 건조된 제지 슬러지는 연소가 마무리될 때까지 초기 입자 형상을 유지하였다. 반면에 RDF는 착화 후 곧 이어 작은 입자로 부서져 타는 것을 관찰할 수가 있다. 다른 연료와 다르게 건조된 제지 슬러지와 하수 슬러지는 연소 후 유동층 베드에 입자 형태의 회분을 남긴다. 제지 슬러지의 회분 입자는 투입 초기 본래의 형태를 유지하고 있으며 하수 슬러지의 경우는 수 개의 작은 입자로 쪼개진 형태가 되었다.

4.2. 연료의 종류에 따른 연소 특성 실험

실험 대상이 된 4가지 연료에 대해 유동화 가스를 공기로 한 연소 조건 실험 결과와 질소로 전환하여 베드에서 연소를 배제한 열분해 조건 실험 결과를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었으며 3회 반복 실험한 결과의 평균이다.

탄소 회수율은 공기를 주입한 경우 모든 연료에 대해 90% 이상 도달하였으며 이 결과는 공기를 주입한 경우 고체 연료 입자로 투입된 대부분의 탄소가 가스상의 연소 가스(CO , CO_2 , C_xH_y)로 배출되어 가스 분석 시스템에 의해 회수된 것을 의미한다. 그러나 유동화 가스를 질소 가스로 바꾸면 휘발분이 연소되는 영역은 프리보드의 산소 주입구로부터 연소실 출구까지로되어 연소실 내 휘발분의 체류시간이 짧아진다.

연소실 출구에서 온도가 낮고 연소 시간이 충분하지 않기 때문에 미연 탄소 손실이 발생하여 탄소 회수율이 Table 3의 결과와 같이 연소 조건 실험에서보다 낮게 나왔다.

Fig. 3(a)는 탈휘발 과정에서 좌 연소로 전환되는 시점을 화살표로 표

Table 2 Results of ultimate analysis, proximate analysis and calorimetric analysis of the fuels

Fuels	Water (%)	HHV (cal/g)	Dry base								
			Combustible (%)								Ash (%)
			C	H	O	N	S	Volatile	Char	Sum	
Wood	6	4,200	49.8	5.2	44.5	<.01	<.01	85	15	100	<.1
Sewage sludge	74	2,100	17.6	3.0	14.6	2.8	<.01	32	6	38	62
Paper sludge	57	2,400	27.9	4.2	27.9	0.4	<.01	50	9	59	41
RDF	4	5,600	51.2	7.6	23	1.4	<.01	72	11	83	17

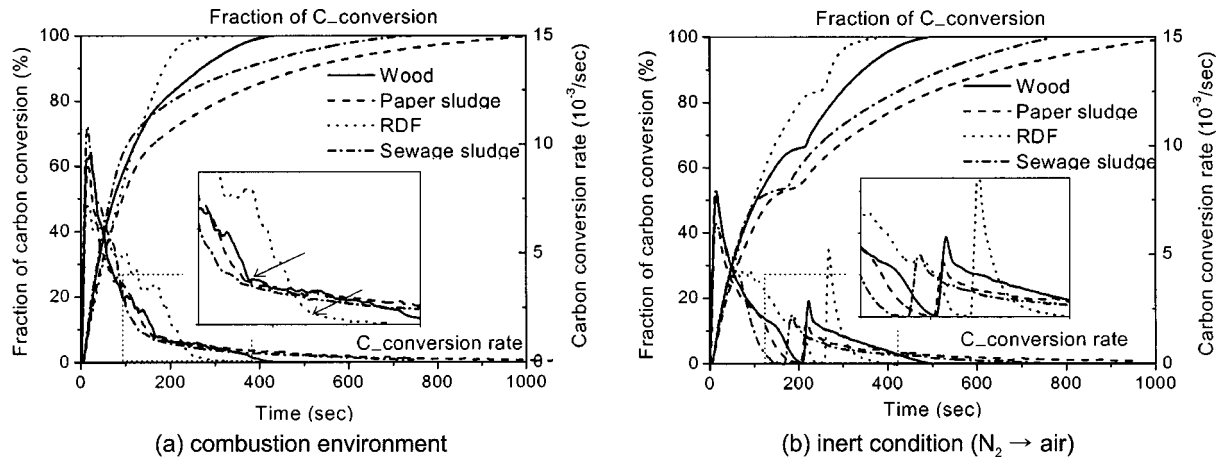


Fig. 3. Fraction and rate of carbon conversion: dry wood, paper sludge, RDF, sewage sludge, T_{bed} 700 °C, flow rate 120 NL/min(0.86 m/sec), size : 2 cm, fluidization gas : N_2 , air.

Table 3. Carbon recovery(%), mean conversion time \bar{t}_c (sec)

Case	Wood		Sewage sludge		Paper sludge		RDF	
Combustion environment Air Fig. 3(a)								
T(°C)	C_Rec.	\bar{t}_c	C_Rec.	\bar{t}_c	C_Rec.	\bar{t}_c	C_Rec.	\bar{t}_c
Total	95	113	91	134	92	192	97	93
Pyrolysis N ₂ →air Fig. 3(b)								
Total	85	151	89	186	90	249	89	124
Volatile	59	115	51	102	50	129	75	118
Char	26	36	38	84	41	120	14	6

시하였으며 이것에 대한 설명은 이미 발표된 논문에서 자세히 다루었다 [7]. 연료의 반응성에 따라 총 연소 시간은 다르지만 탄소 전환의 모습은 두 가지 형태로 구분될 수 있다. Fig. 3(a)에서 나무와 건조된 슬러지는 탈휘발 과정과 최종 연소 과정이 뚜렷이 구분되는 유사한 경향을 보이나, RDF는 최종 연소에 해당하는 구간이 눈에 띄게 나타나지 않을 것을 볼 수 있다. RDF 입자의 경우는 두 과정이 동시에 중첩되어 일어나고 있다. 입자 분쇄 특성이 연소 과정에 결정적인 역할을 한 것으로 판단된다. 휘발분 함량이 상대적으로 높으며 쉽게 부서지고 불균일한 크기의 수 많은 최 입자로 부서지는 성향이 큰 RDF의 경우 미세하게 부서진 입자를 만들어 냄으로써 반응이 매우 빠르게 진행된다. 부서진 입자의 작은 열용량과 입자의 부피에 비해 큰 표면적은 높은 가열 속도와 산소 확산 속도를 보장하기 때문에 탈휘발, 최종 연소 과정 모두가 빠르게 진행된다. 결과적으로 쉽게 부서지는 연료 입자의 경우 탈휘발 과정과 최종 연소 과정의 구분이 뚜렷하게 나타나지 않는다.

4.3. 열분해 연소 실험결과

Fig. 3(b)의 결과는 앞 절에서 설명한 열분해 실험 조건에서 실험한 결과이다. 유동화 가스로 질소를 사용한 탈휘발 과정과 공기로 전환한 다음의 최종 연소 과정이 뚜렷하게 구분되는 것을 볼 수 있다. 쉽게 부서져 최종 연소가 빠르게 진행되어 탈휘발 과정과 최종 연소 과정의 구분이 어려웠던 RDF의 경우에도 두 과정이 뚜렷하게 구분되고 있다. 연소 조건에서 실험한 결과와 비교하여 탈휘발 과정에서 탄소 전환의 형태는 크게 차이를 보이지 않는다.

탄소 전환 속도로부터 알 수 있는 탈휘발 속도는 무산소 환경에서 반응 초기에 연료의 종류에 따라 크게 다르지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에서 반응 초기의 100초 동안에 탈휘발 과정의 모양과 속도가 제지 슬러지를 제외한 나머지 연료가 모두 비슷하게 나타나고 있다. 탈

휘발 과정에 대해 계산된 평균탄소 전환 시간이 102-129초로 연료의 종류에 따라 크게 차이 나지 않는다. 입자의 형태가 유지되는 건조된 제지 슬러지의 경우는 입자 내부에서 탈휘발 과정에 의해 발생한 휘발분이 두꺼운 회분층을 통과해야 하기 때문에 탈휘발 과정이 여러 조각으로 부서지는 다른 연료와 비교하여 느리게 진행되는 것으로 판단된다. 그러나 최종 연소 속도와 연소 시간은 연료에 따라 다른 분쇄 특성 때문에 크게 달라지는 것이 확인된다. 최종 연소 속도는 쉽게 부서지는 RDF의 경우가 가장 높고 입자의 형태가 유지되는 건조된 제지 슬러지의 경우에 가장 낮다.

4.4. 입자 크기와 분쇄

앞 절의 실험 결과에서 입자의 크기가 2cm로 큰 경우 입자의 분쇄 효과가 반응성에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 탈휘발 과정 이후에도 입자의 형태가 비교적 잘 유지되는 나무 연료의 크기를 변화시켜 입자 크기가 반응에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다. Fig. 4는 나무 입자의 크기를 1, 2, 3 cm(변의 길이)로 변화시켜가면서 실험한 결과이다 [8]. 입자의 크기가 작을수록 빠르게 가열되기 때문에 연소 속도가 증가하는 것을 탄소 전환 속도로부터 알 수가 있다.

Table 4의 결과에서 입자 사이즈가 작을 때 나무의 경우 탄소 회수율이 떨어지는 것은 탈휘발 속도의 증가가 연소실의 연소 부담을 지나치게 높여 미연 탄소 손실을 일으켰기 때문으로 판단된다. 탄소 평균 반응 시간으로부터 크기가 커지면서 반응 시간이 증가하는 경향을 뚜렷하게 볼 수 있다.

4.5. 슬러지류 수분 함량 변화실험

슬러지류는 수분 함량이 높아 발열량이 낮기 때문에 보조 연료와 함께 연소되거나 연소로에 투입하기 전 건조기에서 건조된다. 슬러지의 수분 함량에 따른 반응 특성은 슬러지류 유동층 연소로 설계에 있어서 중요하다.

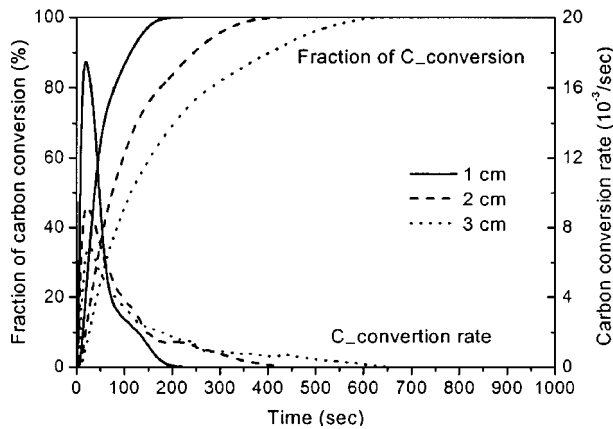
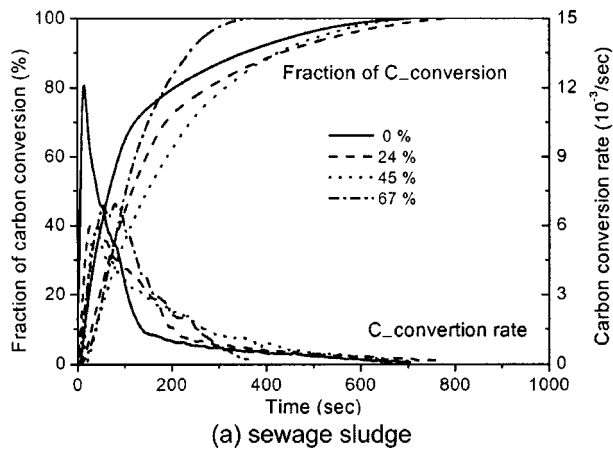


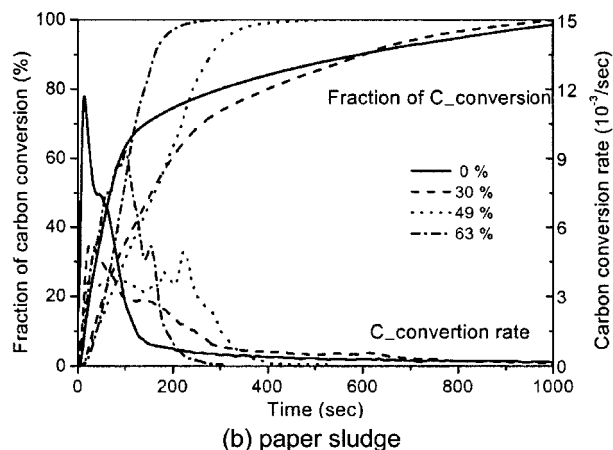
Fig. 4. Fraction and rate of carbon conversion : wood, T_{bed} 700 °C, flow rate 120 Nl/min(0.86 m/sec), size 1, 2, 3 cm cube.

Table 4. Carbon recovery(%), mean conversion time \bar{t}_c (sec)

case			wood(cube)	
Size (cm)	C_Rec.(%)	\bar{t}_c (sec)		
1	83	51		
2	94	105		
3	97	166		



(a) sewage sludge



(b) paper sludge

Fig. 5. Fraction and rate of carbon conversion: sewage sludge, water 0-67%, paper sludge, water 0-63%, T_{bed} 700 °C, flow rate : 120 Nl/min(0.86 m/sec), size : 2 cm, fluidization gas : air.

Table 5. Carbon recovery(%), mean conversion time \bar{t}_c (sec).

Sewage sludge			Paper sludge		
Water(%)	C_Rec.(%)	\bar{t}_c (sec)	Water(%)	C_Rec.	\bar{t}_c
0	89	125	0	89	182
24	87	174	30	98	235
45	99	193	49	94	163
67	96	121	63	97	100

Fig. 5에서 반응 속도를 나타내는 탄소 전환 속도를 보면 투입 초기에는 수분 건조 과정이 입자의 가열을 지연시키기 때문에 수분 함량이 많아질수록 그 값이 떨어지는 것이 관찰된다. 슬러지 입자는 수분 함량이 50% 이상으로 높아지면 강도가 약해져 수분 건조 과정에서 입자의 형태가 유지되지 못하고 분쇄되기 때문에 반응 속도는 수분 함량이 높은 경우에 오히려 빨라진다. 수분 함량이 입자 형태를 갖출 수 있는 한계를 넘어서면 쉽게 부서져 RDF와 같은 형태의 연소 과정이 진행되는 것을 알 수 있다. 탄소 평균 전환 시간을 보면 수분함량이 증가하면서 늘어나다가 다시 줄어드는 것을 Table 5에서 확인할 수 있다. 수분함량이 높은 경우에는 입자의 분쇄가 슬러지의 반응 과정을 지배하는 것을 알 수 있다.

연소실에 투입된 큰 입자는 건조 및 탈휘발 과정에서 수분과 휘발분이 빠져나가면서 생긴 내부 스트레스에 의해 분쇄된다. 좌 연소 과정에서 탈휘발 과정 이후 취약해진 입자는 유동상와의 접촉에 의해 작은 입자로 분쇄된다. 분쇄 과정은 입자의 크기를 줄이기 때문에 이 실험 결과와 같이 반응을 촉진시키는 역할을 한다.

5. 폐기물 고체 연료 특성과 유동층 연소로 설계

유동층 연소로 설계/운전에서 가장 중요한 사항의 하나는 배드/프리보드의 온도 유지 관리이다. 좌 성분비 비해 휘발분 함량이 높은 슬러지, 바이오매스, 고분자 폐기물의 연소에서 휘발분이 주요 열원이 되기 때문에 배드와 프리보드에서 휘발분의 연소량을 조절하여 열량 공급을 최적화해야만 배드와 프리보드에서 온도를 적절하게 유지할 수 있다. Fig. 6에 연료의 특성과 유동층 연소로 설계와의 관계를 간략하게 정리하였다. 유동층 시스템은 연료의 열분해/연소 조건을 제공하고 연료의 반응이 이 조건에 영향을 준다. 이와 같이 유기적으로 연결되어 있는 두 시스템의 상호작용으로 배드와 프리보드에서의 연소 부담율이 결정된다. 연소 부담율은 연료의 특성에 따라 달라지며 유동층 연소로 운전 조건을 변화시킴으로써 이것의 조절이 가능하다. 유동층 연소로의 설계 과정에서 연료의 열분해/연소 특성을 고려하여 이것을 제어할 수 있도록 설계 조건을 설정해야 한다.

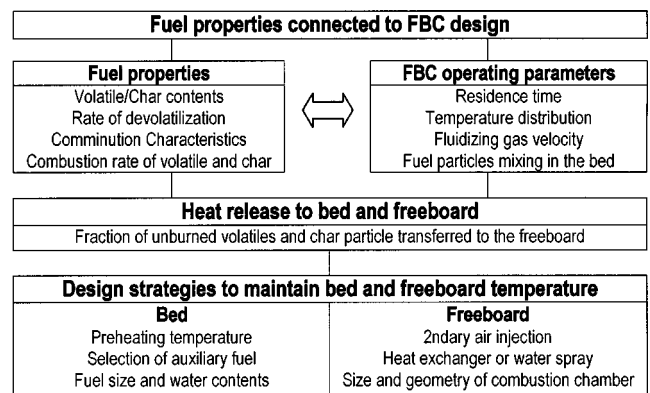


Fig. 6. Fuel properties connected to the FBC design.

유동층 연소로 실험 결과에서 보여준 대상 폐기물의 각기 다른 연소 특성을 유동층 연소로의 베드/프리보드 온도 유지라는 설계 관점에서 평가하는 것이 필요하다.

RDF와 같이 발열량이 높고 쉽게 부서지며 빠르게 반응하는 연료는 베드에서 체류시간이 짧고 부서진 미세 입자의 비산과 프리보드로 전이된 휘발분에 의해 프리보드에서의 연소 부담율을 가중시킬 수 있다. 이에 대비하여 프리보드의 온도 관리와 2차 연소를 위한 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다. 이 연료의 경우 발열량이 높기 때문에 베드 온도를 유지하는 것은 어렵지 않지만 최적 연소 조건에 도달하기 위해서는 프리보드 체류시간, 2차 공기 주입, 공연비, 공기 예열온도와 같은 설계 인자 설정에 세심한 주의가 요구된다.

수분을 다량 함유한 슬러지류는 발열량이 매우 낮기 때문에 베드 온도를 유지하기 위해서는 보조 연료와 같은 외부 열원이 필요하다. 건조기가 설치되어 슬러지가 연소로에 투입되기 전에 건조되는 경우, 건조율에 따라 연소 특성이 달라지는 것을 설계 조건 설정에 반영해야만 한다. 수분 함량이 많은 경우에 초기 반응 속도가 떨어지지만 건조 과정에서 쉽게 부서지기 때문에 전체 반응시간은 오히려 건조된 슬러지보다 짧아진다. 슬러지 입자의 수분 함량이 높을수록 입자의 베드 체류시간이 짧아지고 베드 온도가 떨어진다. 이 때 휘발분의 베드 연소율은 급격히 저하되어 휘발분 연소 영역이 프리보드 상부로 이동할 가능성이 있다. 베드 온도를 유지하기 위해서는 베드에서 열 방출량을 증가시킬 수 있는 석탄과 같이 화 성분은 많은 연료가 보조 연료로 적당하다. RDF나 나무와 같이 휘발분 함량이 많은 연료를 보조 연료로 사용할 경우 유동화 공기의 예열온도 설정에 주의가 요구되며 보조 연료 사용량이 제대로 설정되지 않을 경우 프리보드 연소 부담율을 지나치게 높일 위험이 있다.

6. 결 론

시험용 유동층 연소로 내에서 고체 입자 연소 및 열분해 실험을 수행하였다. 이 결과로부터 고체 폐기물의 종류에 따른 열분해 및 연소 특성을 평가할 수 있었다.

연료의 분쇄 특성은 연료의 연소 특성에 매우 큰 영향을 주었다. 탈휘발 과정에서 강도가 약해지는 RDF의 경우 유동층 베드에서 입자가 쉽게 분쇄되어 탈휘발과정과 화 연소 과정이 동시에 일어나며 전체적으로 반응이 빠르게 진행되는 것이 확인되었다. 입자의 분쇄가 적게 일어나서 입자의 형태가 유지되는 나무, 건조된 하수 슬러지와 제지 슬러지의 경우는 단계적으로 반응이 진행되었다.

무산소 베드 환경을 조성함으로써 분쇄 특성이 강한 연료를 포함한 모든 연료에 대해 탈휘발 과정과 화 연소 과정을 구분할 수 있었다. 탈휘발 과정은 연료의 종류에 따라 크게 변화가 없지만 화 연소는 연료의 분쇄 특성에 따라 크게 영향을 받았다.

슬러지의 경우 수분 함량에 따라 연소 특성이 변하는 것을 확인할 수

있었다. 수분 함량이 높아지면 초기의 수분 건조과정에 의해 탈휘발 과정이 느려지지만 이후 연료가 분쇄되면서 탈휘발 과정과 화 연소 반응 모두가 가속되는 것을 확인할 수 있다.

유동층 연소로의 베드/프리보드 온도 유지라는 설계 관점에서 실험 결과로 보여준 대상 폐기물의 각기 다른 연소 특성을 평가하였다.

사용기호

그리스 문자

C_* : concentration of CO, CO₂, C_xH_y(CH base) [mol/Nm³]

f : fraction of carbon conversion [%]

f_c : carbon mass fraction from element analysis

F_{rate} : flow rate [l/min]

HHV : higher heating value [cal/g]

MFC : mass flow controller

m_{fuel} : mass of fuel input [g]

n : mole number [mol]

N : total mole number [mol]

C_{Rec} : carbon recovery [%]

Q : combustion gas flow rate [Nm³/sec]

t : time [sec]

t_B : overall burnout time [sec]

t_c : mean carbon conversion time [sec]

참고문헌

1. Hodgkinson, N. and Thurlow, G. G.: *AIChE symposium series*, **73**, 109(1977).
2. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Lee, N. S., Lim, J. S. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 228(1992).
3. Jacobs, J. P.: *Chem. Eng. Science*, **54**, 5559(1999).
4. Bautista-Margulis, R.G., Siddall, R.G. and Manzanares-Papayanopoulos, L.Y.: *Fuel*, **75**, 1737(1996).
5. Winter, F., Prah, M. E. and Hofbauer, H.: *Combustion and Flame*, **108**, 302(1997).
6. Kim, J.-S., Kim, S.-J., Yun, J.-S., Kang, Y. and Choi, M.-J.: *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 465(2001).
7. Lau, I. T. and Friedrich, F. D.: *AIChE symposium series*, **84**, 89(1980).
8. Choi, J., Park, Y. and Choi, S.: *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 629(2001).
9. Choi, J., Park, Y. and Choi, S.: *J. Korean Solid Wastes Eng. Society*, **18**, 1(2001).
10. Arena, U., Cammarota, A. and Mastellone, M. L.: *Fuel*, **77**, 1185(1998).