

고체 폐기물 연료의 유동층 시험 연소로 특성 및 실험 인자 설정

최진환 · 박영호 · 최상민[†]

한국과학기술원 기계공학과
(2001년 6월 4일 접수, 2001년 8월 7일 채택)

Solid Waste Fuel Combustion in a Fluidized Bed-Characteristics of a Lab-scale Combustor and Experimental Parameters

Jinhwan Choi, Youngho Park and Sangmin Choi[†]

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea
(Received 4 June 2001; accepted 7 August 2001)

요 약

나무, 제지 슬러지, 폐기물 재생 연료를 대상으로 열분해/연소 특성을 실험적으로 조사하기 위해 실험실 규모 유동층 연소로를 제작하였다. 시험 유동층 베드에서 단입자 유동층 연소조건을 재현하였고 연료 입자의 반응 과정을 관찰하였다. 가스상으로 배출되는 CO, CO₂ 농도를 연소실 출구에서 연속적으로 측정하여 탄소 전환 속도, 총 탄소 회수율, 평균 탄소 전환 시간 등을 결정하였다. 600-800 °C의 온도범위에서 등온으로 유지되는 유동층 연소조건에 지름이 수 cm인 연료 입자를 투입하였고 입자의 반응 과정을 건조, 탈휘발, 촉 연소로 구분하여 반응 특성을 확인하였다. 전체 연소 과정과 단위 과정에 영향을 주는 주요 인자를 연료 특성과 연소조건으로 나누어 결정하였다.

Abstract – A laboratory scale fluidized bed reactor was developed to investigate the combustion characteristics of selected solid fuels (wood, paper sludge, refuse derived fuel). The aims were to introduce the means of experimental determination of the solid fuel particle characteristics through the pyrolysis and combustion processes. A nearly single particle combustion condition was reproduced in a fluidized bed and the progress of reaction was observed by determining the rate of carbon conversion, the overall recovery of carbon in gas phase, and the mean conversion time, which were determined by measuring the gas phase carbon containing species, namely CO and CO₂ at the exit of the combustor. For a fuel particle whose characteristic length was a few centimeter in a fluidizing environment of 600-800 °C sand in a thermally maintained reactor, the sub-processes of fuel drying, pyrolysis as well as the combustion of residual carbon were clearly identified. Major parameters which affect the overall and individual combustion processes were evaluated in terms of the fuel properties and the combustion environment.

Key words: Fluidized Bed, Combustion Characteristics, Mean Conversion Time, Rate of Carbon Conversion

1. 서 론

유동층 연소로에서는 유동화된 모래와 연료사이의 혼합과 접촉 성능이 뛰어나 열 및 물질 전달에서 탁월한 성능을 보이며, 이를 이용하여 넓은 범위의 고체 연료를 연소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 기존의 연소기기에서 처리하기 어려운 저급 연료도 유동층 연소로에서는 좋은 혼합과 긴 체류시간 덕분에 비교적 좋은 연소 특성을 보인다[1]. 앞으로 더욱 다양한 고체 연료가 유동층 연소로를 이용하여 에너지원으로 활용될 것으로 전망된다[2]. 연료가 다양해지면서 유동층 연소조건에서 고체 연료의 열분해/연소 특성은 유동층 연소로 설계 및 운전에 있어서 중요해지고 있다.

지금까지 유동층 내 고체 연료의 연소 현상에 대한 연구가 광범위하

게 이루어져왔으며 특히 석탄에 대한 연구 자료가 많이 확보되어 있다. 이전의 연구로부터 고체 연료의 연소 특성에 대한 이해가 상당수준 정립되어 있으나 연료의 종류와 연소조건 다양성을 반영하는 데는 한계를 보여 왔다. 또한 유동층 연소로의 경우 촉 연소에 대한 이해는 많은 진전을 보였으나 휘발분의 연소에 대한 것은 크게 진전되지 못했다. 다양한 연료에 대한 휘발분의 발생 속도와 양, 연소 과정에 관련된 정보가 부족하기 때문에 유동층 연소로의 설계과정을 고도화 시키는데 제약이 되고 있다[3]. 탈휘발 과정과 휘발분의 연소에 대한 정보는 휘발분 함량이 많은 고체 폐기물 유동층 연소로 설계에 있어서 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 유동층 연소 조건에서 고체 폐기물의 열분해/연소 특성을 실험적으로 관찰하여 고체 폐기물 연료의 연소 특성이 유동층 연소로 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 유동층 연소 조건을 모사할 수 있는 실험 장치에서 폐기물 고체 연료와 이와 조성이 비슷한 나무의 연소 과정을 관찰하는 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 고체 폐기물 연료의 유동층 연소 특성에 대한 구체적인 실험결과를 발표하

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

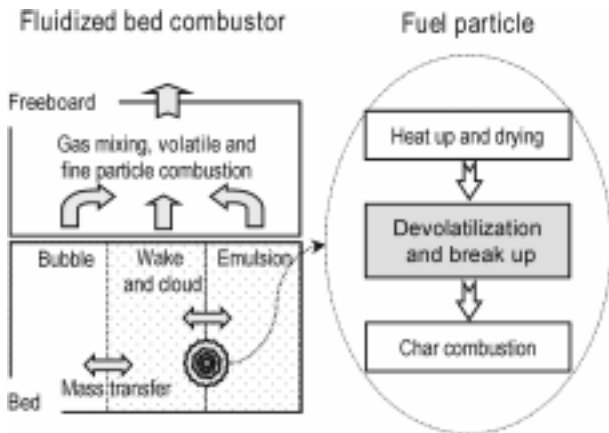


Fig. 1. Solid fuel particle pyrolysis and combustion process in a fluidized bed combustor.

기에 앞서 고체 폐기물 연료의 열분해/연소 과정을 파악하기 위한 실험 방법과 실험결과의 해석 방법을 제시하고 시험 연소로 특성과 고체 폐기물 입자 연소와 관련된 실험인자 설정에 대한 고려 사항을 제시하고자 한다.

2. 단입자 연소

유동층 연소로에서 고체 연료가 베드 물질의 1-2% 정도를 차지한다면 투입된 입자의 크기에 비하여 유동층 베드의 단면적 또는 체적이 매우 크기 때문에 투입된 연료 입자의 연소는 유동층 베드에서 균일한 주변 환경에 놓인 단일 입자의 연소와 같이 일어난다고 가정할 수 있다.

기포 유동층 베드는 기포(bubble) 영역, 기포에 의해 끌려 올라가는 웨이크(wake) 영역과 대부분의 유동층 충전물이 존재하는 농후(emulsion) 영역으로 구분할 수 있다. 유동층 연소로에서 기체의 흐름은 기포와 웨이크 상에서 큰 유속으로 흐르고 농후상에서는 작은 유속을 갖는다[4].

Fig. 1은 유동층에서 단 입자 연소 과정에 대한 개념도이다. 투입된 고체 입자는 농후상에서 존재하고 여기서 연소된다. 입자의 연소 과정은 가열 → 수분증발/탈휘발 → 분쇄/좌 연소 과정으로 나눌 수 있다. 휘발분이 빠져 나간 후 기계적 강도가 떨어져서 쉽게 부서지는 입자의 경우에 휘발분이 빠져나간 입자 바깥 껍질은 미세 입자들로 분리되고 이 입자들은 본 입자의 연소 과정과 별도로 연소가 빠르게 진행된다. 탈휘발 과정 후에도 형태가 유지되는 경우에는 입자 주변에서의 휘발분 연소에 의한 산소 결핍으로 좌 연소 과정이 지연된다. 탈휘발 과정에서 생긴 갈라진 틈을 따라서 좌 입자는 수개의 입자로 나뉘어지기도 한다.

입자로부터 방출되는 휘발분은 농후영역을 거치거나 기포에 유입되어 프리보드 영역으로 옮겨간다. 이 과정에서 충분한 산소 농도와 온도 조건이 확보되면 휘발분의 연소가 일어나며, 유동층 영역에서의 체류시간과 산소가 충분하지 못하면 프리보드로 가연성 기체 성분이 전이되어 휘발분의 프리보드 연소가 일어난다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

3-1-1. 기초 분석

발열량 측정은 표준시료로 보정된 Leco 350A 발열량 측정기를 통해 이루어졌다. 이 기기의 측정오차는 2% 이하이다.

삼성분 분석은 수분 측정의 경우 105 °C, 가연분 함량 측정의 경우 820 °C로 유지되는 가열로에서 시료가 완전 건조 또는 연소된 후의 질

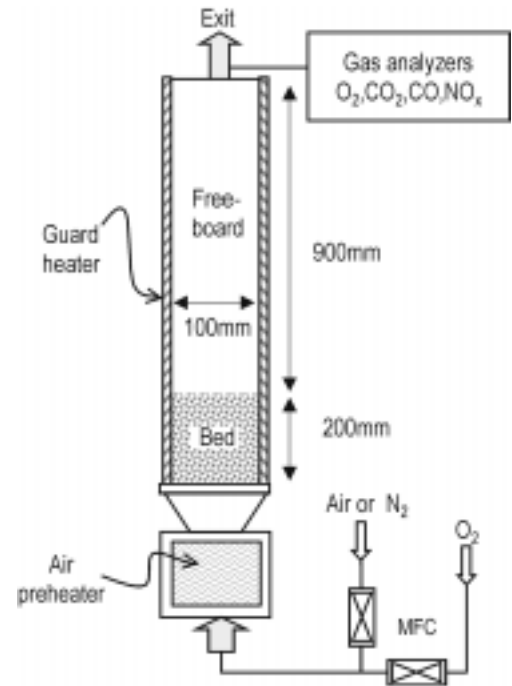


Fig. 2. Lab-scale fluidized bed combustor.

량 변화율을 계산하여 수행되었다. 휘발분 측정 방법은 가연분 측정과 동일하며 질소가스를 주입해 가열로에 유입되는 산소를 차단하는 것이 다른 점이다.

원소 분석은 EA1110-Fisonsion 원소 분석기(0.3% 이하 오차)를 이용하여 이루어졌다.

3-1-2. 유동층 연소로

실험실 규모 유동층 연소로의 개략도는 Fig. 2와 같다. 단입자 연소 실험을 위한 연소로 장치는 실험실 규모의 유동층 반응 연소기로서 직경 100 mm, 베드 높이 200 mm, 프리보드 높이 900 mm 규격의 크기이다. 유동화 공기는 질량 유동 조절기(mass flow controller)에 의해 자동으로 조절된다. 실험장치에는 베드의 온도를 유지하기 위한 연소기 외벽의 가열선과 베드에 공급되는 유동화 공기의 온도를 높이기 위한 예열기가 설치되어 있다. 베드 온도는 600-800 °C 범위에서 조절되었다. 유동사로는 평균 입경 550 μm, 밀도 2,300 kg/m³, 기공률 0.35의 모래를 사용하였다. 최소 유동화 속도는 상온(15 °C)에서 0.15 m/sec이다.

베드의 온도, 프리보드의 온도 및 입자의 온도를 K type 열전대로 측정하였다. 산소는 상자성 분석기(Rosemount, Model 755R), 이산화탄소와 일산화탄소는 비분산 적외선법 분석기(Rosemount, Model 880A)를 이용하여 측정되었으며 분석기는 표준가스(O₂ 21%, CO 7,114 ppm, CO₂ 8.4%)에 의해 보정되었다. 분석기 오차는 측정 범위에서 0.2% 이하이다. 분석기의 측정 결과는 자료 획득 장치와 컴퓨터에 의해 0.5초 간격으로 기록되었다. NO_x 농도도 측정되지만 본 연구 주제와 관련성이 적기 때문에 이 논문에서는 다루지 않았다.

3-2. 실험방법

고체 입자의 승온 열분해(탈휘발 과정)와 연소(좌 연소) 특성을 이해하기 위해서 실제 유동층 연소 조건을 모사하는 실험실 규모의 유동층 연소로 실험 방법이 개발되었다. 그 중 하나로 고체 연료 덩어리를 유동층 연소 실험장치에 투입하고 배가스 분석을 통해 연소 특성을 관찰하는 방법이 제시되었다[5-8].

이 연구에서는 실험 대상 고체 폐기물 연료로서 나무, 실제 유동층 연

소로에서 연소되어지는 제지 슬러지, 그리고 펠렛(pellet)으로 성형된 RDF(refuse derived fuel)가 채택되었다.

베드 온도가 700 °C로 유지되는 실험실 규모 유동층 연소로에 직경이 약 2 cm인 고체 연료 입자가 단일 또는 수 개 단위로 동시에 투입되고 시간에 따른 연소가스(CO₂, CO, O₂, NO_x)와 온도 변화 측정 결과를 통해 이 고체 입자의 열분해, 연소 과정을 관찰하였다. 유동화 매질은 공기이며 측정 대상 가스 농도는 연소가스 배출관에서 측정되었다. 측정된 CO₂와 CO 농도를 이용하여 연소된 탄소량을 계산하였으며 이로부터 탄소 전환 속도, 탄소 회수율과 평균 탄소 전환 시간 등을 계산하였다.

3-3. 해석방법

연소 가스에서 측정된 CO와 CO₂의 농도(C_{CO}, C_{CO₂})와 연소 가스 유량(Q)을 이용하여 다음과 같은 식으로 특정 시간까지 탄소의 연소량(n, mol)을 계산할 수 있다.

$$n = \int_0^t Q(C_{CO} + C_{CO_2}) dt \tag{1}$$

총 연소 시간을 t_b라 하면 연소된 탄소의 총량(N, mol)은 다음과 같다.

$$N = \int_0^{t_b} Q(C_{CO} + C_{CO_2}) dt \tag{2}$$

탄소 연소량의 계산식 (1)을 시간으로 미분하고 총 탄소량으로 나누는 식 (2)과 같이 탄소의 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec)를 정의할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{n}{N} \right) = \frac{Q}{N} (C_{CO} + C_{CO_2}) \tag{3}$$

탄소 전환량(fraction of carbon conversion, %)은 백분율로 표시되며 다음 식으로 정의하였다.

$$f = \frac{n}{N} \times 100(\%) \tag{4}$$

평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time, sec)은 유동층 연소로에서 탄소 잔류량 예측에 직접적으로 적용 가능한 인자로서 아래 식과 같이 계산된다[6].

$$\bar{t}_c = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{n}{N} \right) dt \tag{5}$$

투입된 탄소량과 배가스 측정을 통해 계산된 탄소량과의 비를 탄소 회수율(carbon recovery, %)로 정의하고 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$C_Rec = \frac{N}{\text{carbon in fuel}} \times 100 \tag{6}$$

$$\text{carbon in fuel} = \frac{f_c \times m}{12} \text{ fuel}$$

f_c는 원소 분석 결과로부터 주어지게 된다.

4. 결 과

4-1. 기초 분석 결과

연료의 기초 분석 결과는 Table 1과 같다. 가연분 중의 휘발분 비를 보면 나무 85%, 제지 슬러지 88%, RDF 86%로 이들 대상 연료는 휘발분의 함량이 많은 것이 특징이다. 최악의 가연성 성분을 탄소로 가정하고 원소 분석 결과를 이용하면 전체 탄소량 중에 나무 70%, 제지 슬러지 68%, RDF 79%의 탄소가 휘발분 중에 존재하는 것으로 계산되었다.

4-2. 단 입자 연소 실험결과

4-2-1. 측정 한계 및 오차

베드에 투입된 입자는 표면으로부터 빠르게 가열되어 수분 증발 및 열분해 온도에 도달한다. 입자 표면 또는 주위에서 연소가 시작되지만 분석기에서 연소 가스 농도로 측정하기까지 지연되는 시간은 분석기의 시상수(time constant)와 시료 채취 시스템에서의 체류시간에 의해 결정된다. 연소 가스를 검출하기까지 걸리는 시간을 유속, 온도, 시료 채취 유량, 분석기 시상수 등을 고려하여 계산한 결과는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 8-10초이다.

시간 지연은 시간축의 평행 이동을 의미하며 이 값은 전체 반응 시간(약 500초)에 비하면 작은 값이므로 배출관에서 측정된 가스 농도는 시간에 따른 입자의 연소 과정을 보여준다고 가정할 수 있다.

앞 절에서 제시한 탄소 기준으로 연료의 연소 특성을 관찰하는 실험 방법상의 오차는 원소 분석, 가스 측정 그리고 유량 측정에서 비롯된다. 원소 분석을 통해 투입된 연료의 탄소량을 계산하는데 분석기 자체의 오차는 0.1% 이하로 작지만 채취된 시료의 대표성이 주요 오차 원인이 된다. 가스 분석에서의 오차는 표준 가스를 이용하여 측정 범위에서 보정하였으므로 오차는 1% 이하이다. 그러나 분석기의 시상수가 5초로 지시된 값은 5초 동안의 평균값을 의미한다. 유량 제어기는 연소로 출구에서 측정된 유량을 이용하여 보정되었다. 유량은 유속측정을 통해

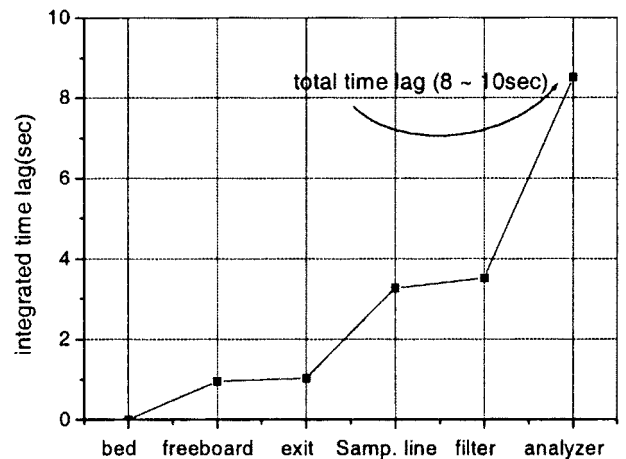


Fig. 3. Time lag of the system in measuring gas concentration from the time of fuel inlet.

Table 1. Results of ultimate analysis, proximate analysis and calorimetric analysis of the fuels

	Water (%)	HHV (cal/g)	Dry base								Ash (%)
			Combustible(%)								
			C	H	O	N	S	Volatile	Char	Sum	
Wood	6	4200	49.8	5.2	44.5	>.01	>.01	85	15	100	>.1
Paper sludge	57	2400	27.9	4.2	27.9	0.4	>.01	50.5	8.8	59	41
RDF	4	5600	51.2	7.6	23	1.4	>.01	72	11	83	17

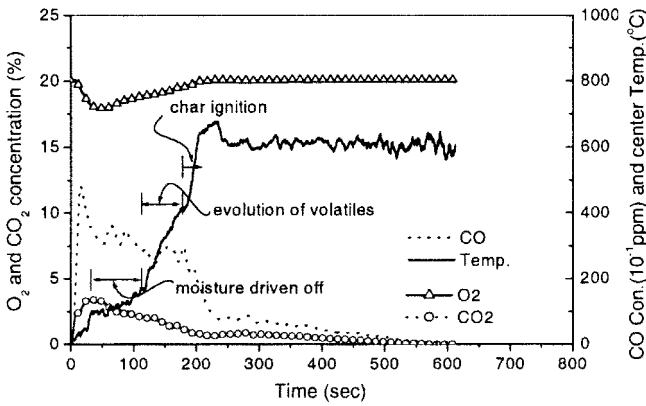


Fig. 4. Time-resolved gas concentration and particle center temperature, 16% water, wood(lateral length 2 cm, cube), T_{bed} 600 °C, flow rate 120 l/min(0.77 m/sec).

계산되었으며 유속 측정은 피토 튜브와 오차 1% 이하의 압력계(Furness controls, FCO12)를 이용하여 이루어졌다.

나무의 질량과 유량을 달리하여 연소시킨 후 탄소 회수율을 계산하여 탄소 물질 수지를 최고 오차 5% 이내로 확인할 수 있었다. 불완전 연소에 의한 탄화수소의 배출과 함께 앞에서 제시한 바와 같은 실험적 불확실성의 이유로 이와 같은 오차가 발생하였다.

4-2-2. 시각 관찰

고체 입자가 고온의 유동층 위로 투입되면 바로 휘발분 연소 화염으로 쌓이는 것을 볼 수 있다. 불발은 입자는 베드에서 부유하다가 유동층 베드로 사라지고 다시 떠오르는 과정을 되풀이 한다. 휘발분 연소 과정이 끝나면 가시적인 화염이 없어지고 붉게 달아오른 최 입자가 관찰된다. 나무의 경우 최 연소는 수 개의 입자로 나뉘어져 진행되며 최 연소 과정에서 유동사와의 접촉에 의해 마모된 미세입자가 프리보드로 비산되어 밝은 빛을 내며 타가는 것이 관찰된다.

RDF의 경우는 입자 주위에 형성되는 휘발분 연소에 의한 화염의 크기가 나무보다 크며, 착화 후 곧이어 작은 입자로 부서져 타는 것을 관찰할 수가 있다. 건조된 제지 슬러지는 나무처럼 입자 형태를 유지하면서 연소된다.

4-2-3. 가스 농도 측정과 입자 내부 온도 변화

Fig. 4는 나무 입자 연소 실험 결과의 예이다. O₂, CO, CO₂ 농도 측정 결과가 입자 내부 온도 측정 결과와 함께 표시되어 있다. 입자가 고온 환경에 투입되면서 바로 다량의 CO, CO₂가 발생한다. Fig. 4에서 시간이 약 200 sec를 지날 때까지 급격하게 방출되던 CO₂는 이후 500-600 sec까지 점진적으로 줄어들지만 지속적으로 방출된다.

입자의 중심부에 삽입된 열전대에 의해 측정된 입자 내부 온도를 보면 Fig. 4에 표시된 것과 같이 100 °C근처 또는 그 이하의 온도를 나타내는 건조 과정, 중심부 온도가 급격히 상승하는(Fig. 4의 경우 약 400 °C에서 600 °C 부근까지) 최 연소 과정과 그 사이의 탈휘발 과정으로 구분되고 있음을 보여준다.

수분 함량이 16%인 이 경우는 입자 투입 후 약 110초까지를 수분이 증발하는 건조 과정으로 볼 수 있다. 이 과정에서 휘발분 방출 및 산화 과정이 병행하여 일어나는 것을 연소 생성물인 CO, CO₂의 농도 측정 결과로부터 알 수 있다. 이것은 입자의 내부로 건조가 진행되고 있는 중에 건조가 끝난 입자의 표면에서는 탈휘발 과정이 진행되고 있다는 것을 의미하며 이는 Ogada와 Werther[8]가 유동층 연소로에서 하수 슬러지에 대해 실험한 결과에서도 동일하게 나타나고 있다.

입자의 열분해/연소 과정은 입자의 온도 분포를 결정하는 가열 과정에 의해 지배 받는다. 입자의 내부에 온도 분포가 존재하며 건조 및 열

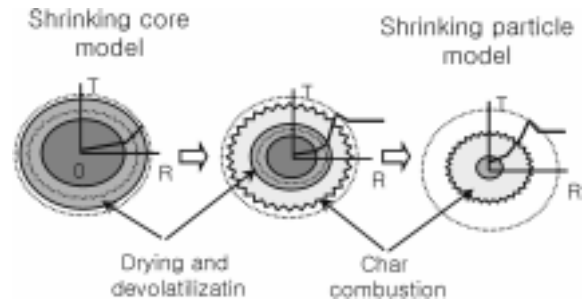


Fig. 5. Schematic representation of solid fuel particle combustion model.

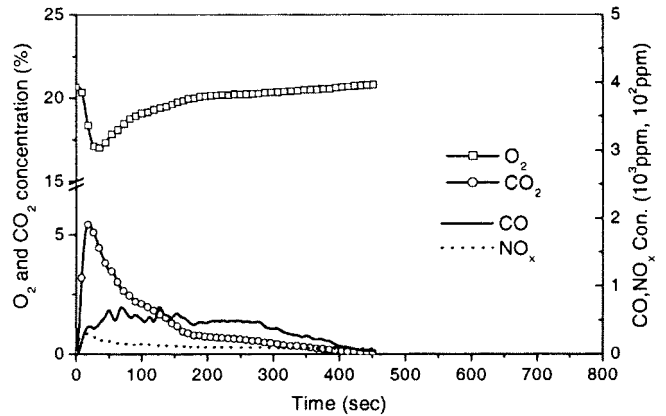


Fig. 6. Time-resolved flue gas concentration, dry wood(lateral length 2 cm, cube), T_{bed} 700 °C, flow rate 120 l/min(0.86 m/sec).

분해와 같이 입자 온도에 따라 결정되는 과정은 Fig. 5와 같이 수축핵(shrinking core) 연소 모형으로 묘사될 수 있고 표면 연소에 의한 최 연소는 수축입자(shrinking particle)연소 모형이 적용될 수 있다. 입자의 깊이에 따라 온도가 다르게 분포하기 때문에 깊이 방향으로 다른 과정이 진행되는 것을 알 수 있다. Winter 등[9]은 고체 연료 입자 연소 모델에서 역청탄과 나무에 대해 이와 같은 모델을 적용하여 입자의 연소 과정을 수치적으로 묘사한 사례가 있다.

4-2-4. 연료의 종류에 따른 연소 특성

Fig. 6-8에서는 연료를 투입한 다음 연소실 출구에서 시간에 따라 측정된 배가스 농도를 나타내었다. 투입 초기에 탈휘발 과정에서 휘발분 연소에 의해 CO₂의 농도가 급격히 증가한 다음 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

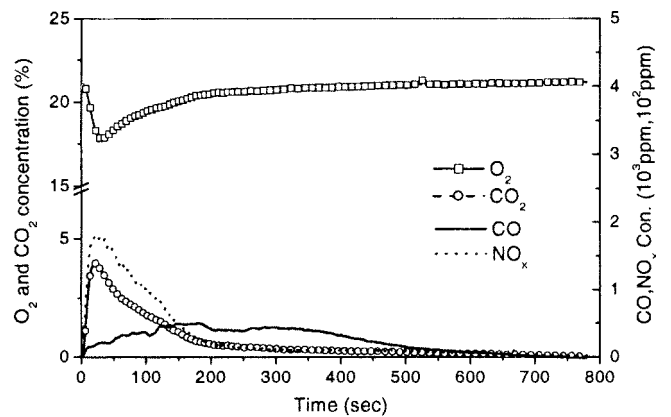


Fig. 7. Time-resolved flue gas concentration, paper sludge(ϕ 2 cm, sphere), T_{bed} 700 °C, flow rate 120 l/min(0.86 m/sec).

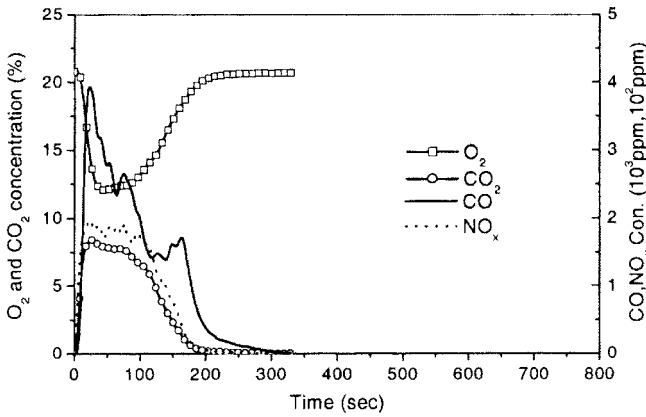


Fig. 8. Time-resolved flue gas concentration, RDF(ϕ 2 cm, L2 cm, cylinder), T_{bed} 700 °C, flow rate 120 l/min(0.86 m/sec).

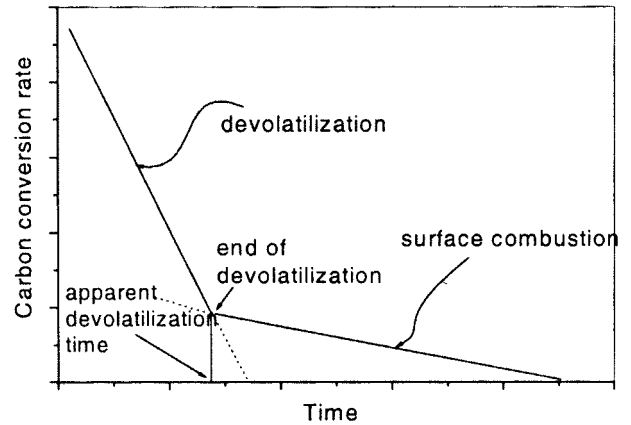


Fig. 10. Definition of devolatilization region and char combustion in the carbon conversion rate graph.

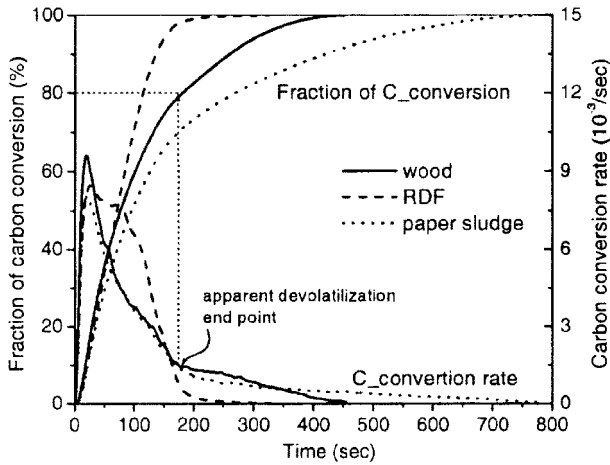


Fig. 9. Fraction and rate of carbon conversion: dry wood, RDF, paper sludge, T_{bed} 700 °C, flow rate 120 l/min(0.86 m/sec).

Fig. 6-7의 나무와 제지 슬러지의 경우에서 CO의 농도가 안정된 값을 나타내고 있으나 Fig. 8의 RDF의 연소 실험결과에서 CO 농도를 보면 연소 과정 전반에 걸쳐 높은 값을 나타내고 변동이 심한 것이 관찰된다. 이는 RDF의 경우에 입자 강도가 약하여 부서진 미세 입자 연소 현상이 두드러지고, 그 결과로 열분해 생성물의 양이 늘어나 연소실에서의 연소 부담율이 높아지며 제한된 체류시간과 산소공급 및 혼합 조건에서는 불완전 연소가 일어나는 것으로 해석될 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 6-8에 나타낸 CO, CO₂ 농도를 이용하여 앞 절에서 정의한 탄소 전환 속도와, 탄소 전환량을 계산한 결과이며 탄소 회수율과 평균 탄소 전환 시간이 Table 2에 정리되었다. 평균 탄소 전환 시간은 식 (5)에 나타낸 바와 같이 Fig. 9에서 탄소 전환량(Fraction of C_conversion) 커브의 위 쪽 부분을 적분한 면적에 해당된다. 탄소 회수율이 97-100%라는 것은 해당 연소 시험에서 투입된 탄소가 모두 기체 상태 탄소 화합물로 전환되어 측정기에 기록되었다는 뜻으로 본 실험 방식의 타당성을 보여주고 있다고 평가할 수 있다.

Table 2. Carbon recovery(%), mean conversion time(sec) : T_{bed} 700 °C, flow rate 120 l/min, dry fuel

T(°C)	C_Rec.(%)	t_c (sec)
Wood	99	121
Paper sludge	97	136
RDF	100	76

각각의 연료별 전환 속도에 따라 완전 전환에 도달하는 시간은 다르지만 전반적인 탄소 전환의 모습은 비슷하게 나타나고 있다. 이 전환 속도를 단순히 도식적으로 보면 Fig. 10과 같이 두 구간으로 나눌 수 있으며 이를 각각 탈휘발 과정과 표면 연소(좌 연소) 과정으로, 또한 전환 속도 곡선의 변곡점까지의 시간을 걸보기 탈휘발 종료시간(apparent devolatilization time)으로 부르기로 한다. Fig. 9에 나타난 나무, 제지 슬러지 그리고 RDF 연료의 실험결과를 보면 나무와 제지 슬러지는 유사한 경향을 보이나, RDF는 표면 연소에 해당하는 구간이 눈에 띄게 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 시각 관찰을 통하여 볼 때 나무와 제지 슬러지는 탈휘발 과정 동안에 입자로서의 외형을 유지하고 있는데 반하여 RDF는 탈휘발 과정이 진행되면서 입자와 유동사 사이의 접촉에 의해 입자가 부서지면서 작은 입자로 쉽게 나뉘어지는 것이 관찰되었다. 이 경우 작은 입자들은 질량당 표면 체적이 커지고 유동사와의 접촉으로 가열이 훨씬 빠르게 진행되면서 표면 연소도 탈 휘발과정과 구분이 어려울 정도로 급격하게 진행되는 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 9의 나무 연소 실험결과에 표시된 것과 같이 탈휘발 과정이 끝나는 시점은 180 sec이고 이 시점에서 탄소 전환은 80%이다. 이 값은 휘발분 중의 탄소 함량 70%보다 높은 값이다. 이것은 나무와 같이 탈휘발 과정과 좌 연소 과정이 구분되는 경우도 탈휘발 과정 동안에 좌 연소가 일부 진행되었음을 의미한다.

탄소 전환 속도는 고체 입자 투입 초기의 탈휘발 과정에서 큰 값을 갖고, 설정된 실험 조건에서 탈휘발 과정은 200초 이내에 거의 완료된다. 반응 종료 시간은 반응이 느린 좌 연소 과정에 의해 결정된다. 그러나 휘발분에 비해 적은 함량 때문에 좌 연소 과정이 평균 탄소 전환 시간에 미치는 영향은 적다.

4-3. 시험연소로 특성과 실험 인자

4-3-1. 연소로 특성

시험 연소로 베드의 온도는 공기 예열기와 보온 전열기에 의해 연료가 투입되기 전에 설정 온도로 조절될 수 있었다. 연료 투입 후에 연소에 의한 발열은 연료 입자가 체류하는 베드 온도를 높이지만 큰 열용량의 유동사가 완충작용을 하기 때문에 실험하는 동안의 온도 변화를 설정치의 10 °C 이내로 유지할 수 있었다.

질량 유동 제어기에 의한 유량의 안정적 조절과 유량 제어의 용이성은 물질 수지 계산 상의 오차를 줄였다. 입자의 총 반응 시간에 비해 빠른 배가스 측정 시스템과 엄격히 제어된 유량은 탄소 기준의 물질 수지 오차를 5% 이내로 만들었다. 탄소 물질 수지의 확인은 앞 절에서 제시한 탄소 기준으로 계산된 실험인자를 통해 고체 연료의 단일자 연소 과

정에 대한 특성 분석을 정량적으로 가능하게 하였다.

4-3-2. 연소 특성에 영향을 주는 요인과 특성

최 성분에 비해 많은 휘발분을 포함한 고체 폐기물의 연소에서 휘발분의 연소는 휘발분이 주요 열원이기 때문에 중요한 설계 인자가 된다 [8]. 탈휘발 과정은 입자의 가열 과정에 지배 받으며 입자의 가열과정에 영향을 주는 인자로 수분 함량, 입자 크기, 베드 온도 등을 들 수 있다. 탈휘발 과정보다 느린 최 반응은 베드에서의 입자 체류시간에 영향을 주는 인자로 최 반응과 관련된 인자는 베드 온도, 산소 농도, 유량 등이 존재한다. 위 두 과정은 모두 고체 연료의 고유 특성과 분쇄 특성에 크게 영향을 받는다.

이와 같은 고체 연료의 연소 특성에 영향을 주는 요인들은 크게 연료 특성과 연소조건 인자로 나눌 수 있다. 본 연구에서 조절 가능한 연료 특성은 투입 연료 종류, 수분 함량, 입자 크기이고 입자의 분쇄 특성은 크게 영향을 미치는 인자이지만 연료의 특성으로 조절이 불가능하다. 베드 온도, 유동화 가스 유량과 산소 농도가 중요한 연소조건 인자로 평가된다.

특성이 다른 연료를 혼합 연소하여 연료 특성을 보완하려는 시도가 이루어지고 있다. 이에 대한 실험적인 평가를 앞서 제시한 실험 인자를 통해 시험 연소로에서 달성할 수 있을 것이다.

고체 폐기물 입자의 연소 특성에 대한 실험 이외에도 시험 연소로를 이용하여 탈휘발 과정에서 발생된 휘발분의 연소 과정에 대한 실험이 프리보드에서의 온도, 농도분포를 측정함으로써 가능할 것이다

5. 결 론

고체 연료의 연소 특성을 실험적으로 관찰할 수 있는 실험실 규모 유동층 연소로를 설계 제작하여 특성 실험을 수행하였다. 유량, 산소농도, 베드 온도 등과 같은 연소조건을 설정하여 고체 연료의 연소특성을 배가스 측정의 방법으로 실험하였다. 고체 연료 입자의 연소 과정에서 입자 크기, 수분 함량, 종류, 강도 등의 연료 특성과 운전 조건에 의한 영향을 탄소 전환 속도, 탄소 회수율, 평균 탄소 전환 시간을 정의하여 평가하였다. 시험 연소로의 운전 조건을 조정하여 채택된 연료의 연소 특성을 파악하는 실험을 수행하였다.

입자의 건조, 열분해(탈휘발) 과정은 입자 가열과정의 요인에 의해 영향을 받는다. 유동층 연소조건에서 크기가 수 cm인 입자를 연소시킬 경우 입자 내부에 존재하는 온도 분포에 따라서 단계별 연소 과정이 진행되는 것을 확인할 수 있었으며 단계별 연소 과정은 연료의 종류에 따라 차이를 보였다.

사용기호

C^*	: concentration of CO and CO ₂ [mol/Nm ³]
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 [Nm ³ /sec]
t	: time [sec]
t_B	: overall burnout time [sec]
\bar{t}_c	: mean carbon conversion time [sec]

참고문헌

1. Hodgkinson, N. and Thurlow, G. G.: "Combustion of Low-grade Material in Fluidized Bed," AICHE Symposium Series, **73**(161), 109(1977).
2. Jacobs, J. P.: *Chemical Engineering Science*, **54**, 5559(1999).
3. Bautista-Margulis, R. G., Siddall, R. G. and Manzanares-Papayanopoulos, L. Y.: *Fuel*, **75**(15), 1737(1996).
4. Kunii, D. and Lavenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd Ed., Butterworth-Heinemann(1991).
5. Ho, T. C., Ku, P. and Hopper, J. R.: *AICHE Symposium Series*, **84**(263), 126(1980).
6. Lau, I. T. and Friedrich, F. D.: *AICHE Symposium Series*, **84**(262), 89 (1980).
7. Lorenz, H. and Rau, H.: *Fuel*, **77**(3), 127(1998).
8. Ogada, T. and Werther, J.: *Fuel*, **75**(5), 617(1996).
9. Winter, F., Prah, M. E. and Hofbauer, H.: *Combustion and Flame*, **108**, 302(1997).