

고체 연료의 유동층 연소 - 시험 연소로 특성 및 실험 인자 설정

최진환* · 박영호* · 최상민* ·

Solid fuel combustion in a fluidized bed - Characteristics of a lab-scale combustor and experimental parameters

Jinhwan Choi, Youngho Park and Sangmin Choi

Key Words : FBC(fluidized bed combustor), operating parameters, char combustion, drying, devolatilization

Abstract

A laboratory scale fluidized bed reactor was developed to treat the combustion characteristics of some fuels (wood, paper sludge, refuse derived fuel). The aims were to introduce the means of experiment and interpretation of the results and finally determine the particle characteristics on the pyrolysis and combustion process of the fuel. A single particle combustion process in the fluidized bed was closely observed. Understanding experimental facility characteristics and determining parameters were also carried out. The fuel combustion processes were observed by carbon conversion rate, recovery and mean carbon conversion time. They were estimated with the CO, CO₂ gas concentration monitored at the exit of the combustor. Fuel drying and pyrolysis process were governed by temperature distribution in the fuel particle. There was a significant overlap of the drying and devolatilization. However, transition process from devolatilization to char combustion seemed to be determined by mechanical solidity of the fuel particle after devolatilization process.

1. 서론

유동상식 연소로는 좋은 혼합, 큰 열 및 물질 전달, 안정되고 균일한 온도, 고체 기체의 높은 접촉 효율 등과 같은 장점을 가지고 있기 때문에 안정된 운

전이 가능하다. 이런 장점을 갖춘 유동층 연소로 시스템은 넓은 범위의 고체 연료를 연소시킬 수 있는 능력이 있는 것으로 알려져 있다. 기존의 보일러나 연소로에서 제대로 연소되지 못하는 저급 연료도 좋은 혼합과 긴 체류시간을 제공하는 유동상식 연소로에서는 비교

적 좋은 연소 특성을 보인다^{1,2}. 우리나라에서도 앞으로 다양한 고체 연료가 유동층 연소로를 이용하여 에너지원으로 이용될 것으로 전망된다.

고체 폐기물 연료에 대한 유동층 연소로 활용 분야의 국내 기술 수준은 선진국으로부터 연소로 설계기술이 도입되면서 일부 기업체는 유동층 연소로의 설계 기술을 부분적으로 확보한 예도 있으나 대부분 독자적인 설계 기술은 확보하지 못한 상황이다.

연료의 종류와 연소 특성이 유동층 연소로 효율을 결정하는 중요한 요인이라는 것이 많이 보고되고 있다³. 유동층에서 연료의 연소 특성은 유동층 연소로 설계나 운전 최적화에 필수적인 정보이다.

지난 20 년간 유동층 연소로에서 좌연소에 대한 이해는 많은 진전을 보였으나 휘발분의 연소에 대한 것은 크게 진전되지 못했다. 다양한 연료에 대한 휘발분 발생 속도와 양, 연소 과정에 관련된 정확한 정보의 부족은 현재 유동층 연소로가 전통적인 방법으로 설계되는 가장 큰 이유이다⁴. 입자 온도 이력 및 유동층 연소 환경에 지배를 받는 휘발분의 발생 속도와 양에 대한 정확한 정보는 유동상식 연소로 시스템 설계의 기초가 된다.

본 연구에서는 실험실 규모 유동상식 연소로를 통해 조성된 연소 환경에서 고체 연료의 연소 관련 인자에 따른 연소 특성 실험 방법을 소개하고 실험 결과 해석 방법을 제시하고자 한다.

2. 단입자 연소

유동상식 연소로에서 고체 연료와 증물질의 비는 1-2 % 정도 이다. 이것으로

부터 유동상식 연소로에서 고체 연료의 연소는 마치 단일 입자의 연소와 같이 일어난다고 가정할 수 있다.

고체 입자의 승온 열분해(탈휘발과정), 연소(좌연소) 특성을 이해하기 위해서 실제 유동층 연소로 환경에서 연료의 특성에 관련된 과학적인 연구가 진행되어야 했다. 실험실 규모의 유동층 연소로에서 고체 입자 덩어리의 연소과정을 보기 위한 실험적 방법이 개발되었다. 그 중 하나로 가장 쉽고 널리 쓰이는 방법은 고체 연료 덩어리를 유동층 실험 장치에 투입하고 연소 가스중의 CO, CO₂ 가스를 측정하여 시간에 따른 탄소 반응 속도를 계산하여 탈휘발 및 좌연소 과정에 대한 정보를 얻는 것이다⁵. 이 자료를 이용하여 평균 탄소 전환시간, 탈휘발/좌연소 과정의 시상수, 입자 연소 시간 등을 계산한다.^{6,7}

기포 유동층 베드는 기포와 기포에 의해 끌려 올라가는 웨이크와 대부분의 유동층 충전물이 존재하는 밀한 영역으로 구분할 수 있다. 유동층 연소로에서의 기체의 흐름은 기포, 웨이크상에서 빠른 유속으로 흐르고 밀한상에서는 느린 유속을 갖는다.

투입된 고체 입자는 밀한 상에 존재하면서 연소된다. 입자의 연소과정은 가열-증발/탈휘발-분쇄/좌연소 과정으로 나눌 수 있다. 휘발분이 빠져 나간 후 입자의 강도가 약해서 입자의 형태를 유지하지 못하는 경우 휘발분이 빠져 나간 입자 외피는 작은 입자로 떨어져 나가 좌연소가 진행되고 입자의 중심부는 탈휘발 과정이 계속 진행된다. 이 경우는 입자의 연소는 탈휘발과정과 좌연소 과정이 동시에 진행되는 것처럼 보인다. 탈휘발 과정 후에도 좌의

형태가 갖춰질 정도의 강도를 가진 입자의 경우 입자의 외피에서 최 연소는 휘발분 연소에 의한 산소의 결핍으로 지연되기 때문에 최 연소는 탈휘발 과정이 끝난 후 순차적으로 진행된다. 탈휘발 과정 동안 생긴 갈라진 틈을 중심으로 최 입자는 작은 입자로 나뉘어지기도 한다.

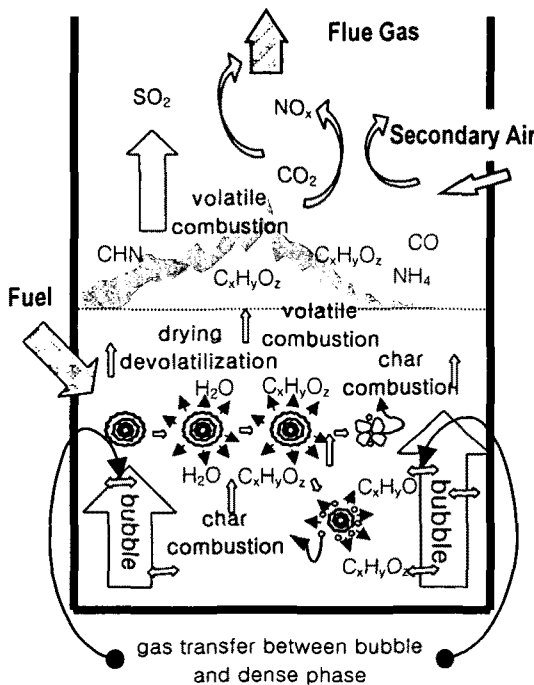


Fig. 1 Solid fuel particle pyrolysis and combustion process in a fluidized bed combustor.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

3.1.1 기초 분석

발열량 측정은 6400cal/g 표준시료로 보정된 Leco 350A 발열량 측정기를 사용하였다. 측정오차는 2% 이하이다. 발열량에서 수분 잠열의 고려 여부에 따라 고위 발열량과 저위 발열량으로 나

뉘는데 이 실험에서는 건조된 시료의 고위 발열량이 측정된다.

삼성분 분석은 수분, 가연분, 회분의 양을 측정하는 것을 말한다. 수분은 105°C, 가연분의 함량 측정은 820 °C 에서 시료가 완전 연소 된 후 질량의 변화율로부터 계산한다. 휘발분 함량 측정은 가연분 측정과 동일하며 다만 질소가스를 주입해 연료와 산소의 접촉을 막는다.

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

유동상식 연소로에서의 연소환경은 일반 연소로와 많은 차이를 보인다. 좋은 혼합, 높은 열전달 효율, 안정된 온도 등의 독특한 특징 때문에 유동층 연소로에서의 고체 연료 열분해/연소 특성에 대한 정보를 얻기 위해서는 유동층 연소로 환경에 가까운 실험 장치가 필요하다. 유동층 연소 환경을 조성하기 위해 실험실 규모 실험 장치가 만들어졌다.

3.1.2 유동상식 반응로

단입자 연소 실험에 쓰일 연소로 장치는 실험실 규모의 유동상식 반응 연소기로 직경 100mm 베드 높이 200mm 프리보드 높이는 1100mm 이다. 유동화 공기는 질량 유동 조절기(mass flow controller)에 의해 자동으로 조절된다. 연소로의 온도를 반응 온도로 유지하기 위해 전기 가열기가 내장되어 있다. 베드의 온도를 유지하기 위해 연소기 외벽에 설치된 가열선과 베드에 공급되는 유동화 공기의 온도를 높이기 위한 예열기가 2 기 설치되어 있다. 베드 온도는 600 ~ 800 °C 에서 조절 되었다. 유동사는 평균 입경 550µm, 밀도 2300 kg/m³, 기공율 0.347 의 모래를 사용하였다. 이 장치의 특징은 실제 연소 조건에 가

까운 환경을 제공하고 연소에 미치는 영향 인자의 제어가 용이하다는 것이다.

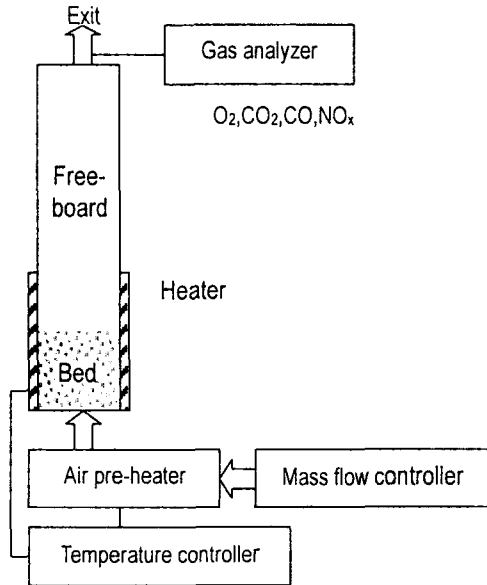


Fig. 2 Lab-scale fluidized bed combustor.

베드의 온도, 프리보드의 온도, 입자의 온도가 K type 열전대에 의해 측정되었다. 산소 측정은 산소 상자성 분석기 (Rosemount, Model 755R), 이산화탄소와 일산화탄소는 비분산 적외선법 분석기 (Rosemount, Model 880A), 질산화물은 화학발광법 분석기(Rosemount, Model 951A)가 이용되었으며 표준가스에 의해 보정되었다. 표준 가스 농도는 O₂ 21%, CO 7114ppm, CO₂ 8.4%, NO_x 400ppm 이다. 분석기 오차는 측정 범위에서 0.2% 이하이다. 분석기의 측정 결과는 자료 획득 장치와 컴퓨터에 의해 0.5 초 간격으로 기록된다.

3.2 실험 방법

실험 대상은 유동상식 연소기에서 주로 연소되는 고체 폐기물 연료와 성상

이 비슷한 나무, 그리고 실제 유동상식 연소로에서 연소되어지는 제지슬러지, RDF(refuse derived fuel)로 설정하였다.

수분 증발, 열분해(탈휘발 과정), 최종 연소 과정에 소요되는 시간을 일차적으로 측정하고 각 과정의 중첩 정도에 대해 알아보았다 실제 연소 환경에서의 열분해를 통해 얻어진 휘발분 양과 성분 분석 결과를 비교 검토하고 각 연료의 휘발분 함유량에 대한 자료를 얻었다. 연료의 종류와 베드 온도를 변화시키고 입자의 열분해/연소 특성을 관찰했으며 그 결과를 통해 고체 연료의 열분해 연소 특성을 살펴봤다.

베드 온도가 600 ~ 800°C로 유지되는 실험실 규모 유동상식 연소로에 직경이 2cm 정도의 고체 연료 입자가 단일 또는 수개 단위로 동시에 투입되었다. 고체 입자의 열분해, 연소 과정을 시간에 따른 연소가스(CO₂, CO, O₂, NO_x)와 온도 변화 측정 결과를 이용하여 관찰하였다. 유동화 가스는 공기를 이용하였다. 연소 가스중의 가스 농도는 프리보드에서 2 차 연소를 거친 다음의 경로인 배출관에서 측정되었다. 측정된 CO₂와 CO로부터 고체 입자 중에서 연소된 탄소량을 계산할 수 있으며 이것을 이용하여 탄소 전환율을 계산하였다.

탄소 전환율은 조성된 유동상식 연소로 환경에서 고체 연료의 연소 과정을 시간에 따라 관찰할 수 있게 한다. 이것은 연소 조건과 연료의 종류에 영향을 받는 반응 속도에 대한 정보를 제공하며 결과적으로 연료의 열분해/연소 특성을 쉽게 파악할 수 있게 한다.

배가스 농도로부터 구한 탄소 함량과 원소 분석 실험에서 결정된 탄소 함량과 비교하여 오차를 계산할 수 있다. 해석 방법은 다음 절에 자세히 다룬다.

3.3 해석 방법

연소 가스 중에 일산화탄소와 이산화탄소의 농도를 측정함으로써 탄소의 전환 속도를 다음과 같은 식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\frac{dn}{dt} (\text{mol/sec}) = \frac{Q}{22.4 \times 10^{-3}} (C_{CO} + C_{CO_2})$$

Q 유량(Nm^3/sec), n 탄소 몰수이다. 위 식을 적분하면 특정 시간까지 탄소의 연소량을 계산할 수 있다.

$$n(\text{mol}) = \int_0^{t_B} \frac{Q}{22.4 \times 10^{-3}} (C_{CO} + C_{CO_2}) dt$$

총 연소 시간을 t_B 라 하면 연소된 탄소의 총량 N 은 다음과 같다.

$$N(\text{mol}) = \int_0^{t_B} \frac{Q}{22.4 \times 10^{-3}} (C_{CO} + C_{CO_2}) dt$$

탄소 전환율은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\text{carbon conversion ratio (\%)} = \frac{n}{N} \times 100\%$$

Ivan T. Lau 등은 석탄의 반응성을 평균 탄소 전환 시간이라는 인자로 나타내었다⁷. 평균 탄소 전환 시간은 유동층 연소로에서 탄소 잔류량 추정에 직접적으로 적용 가능한 인자이다. 이 평균 탄소 전환 시간은 탄소의 유동층 내 평균 체류시간을 의미한다. 평균 탄소 전환 시간은 아래 식과 같이 유도된다.

$$\bar{t}_c = \int_0^{t_B} (1-f) dt$$

여기서 t_B 는 총 반응 시간을 의미한다. 연소율 f 는 다음과 같이 표현된다.

$$f = n/N$$

평균 탄소 전환 시간은 베드에서의

잔류 탄소량을 예측할 수 있게 한다.

4. 결과

4.1 기초 분석 결과

연료의 기초 분석 결과는 Table.1 과 같다. 회분을 제외한 가연분 중의 휘발분 비를 보면 나무 85%, 하수 슬러지 91%, 제지 슬러지 88%, RDF 86%로 계산되었다. 연구 대상이 된 연료는 휘발분의 함량이 많은 것이 특징이다. 최악의 성분을 탄소로 가정하고 원소 분석 결과를 이용하면 전체 탄소량 중에 휘발분에 함유된 탄소 함량을 계산할 수 있다. 계산 결과는 나무 70%, 하수 슬러지 89%, 제지 슬러지 84%, RDF 81%의 탄소가 휘발분 중에 존재하는 것으로 나타났다.

4.2 단 입자 연소 실험 결과

4.2.1 측정 한계 및 오차

열전달 계수가 큰 베드에 투입된 입자의 외피는 굉장히 빠르게 가열되고 탈휘발 가능 온도에 도달한다. 그러므로 고체 입자가 베드에 투입된 후 연소가 시작되기까지 걸리는 시간은 1~2 초 이내이며 대부분의 경우 고체 입자가 유동층 연소로에 투입되면 거의 동시에 화염이 관찰된다. 입자 연소 시작 후 분석기에서 연소 가스 농도 측정되기까지의 시간 지연은 분석기의 시 상수 (time constant)와 시료 채취 시스템에서

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	-	-	85	15	100	-
paper sludge	57	2400	30.7	4.1	23.7	0.5	-	52	7	59	41
RDF	4	3600	51.2	7.6	23	1.4	-	72	11	83	17

체류시간에 의해 지배 받고 유동층 체류시간과 배가스 배출관에서 걸리는 시간을 무시할 수 있다. 고체 입자 연소가스를 검출하기까지 걸리는 시간을 유속, 온도, 시료 채취 유량, 분석기 시상수 등을 고려하여 계산한 결과는 Fig.3에 나타낸 바와 같이 8~10초이다. 이 값은 고체 입자를 투입하고 분석기에서 신호가 검출되기까지 시간을 측정된 결과와 일치한다. 고체 입자의 연소 시점을 분석기에서 신호가 잡히는 시점으로 잡았을 경우 베드에서의 반응 시간과 비교할 때 시간 축이 10초 후로 평행 이동하는 효과를 나타낸다. 그 값도 전체 반응 시간(약 500초)에 비하면 작은 값이므로 배출관에서 측정된 가스 농도는 시간에 따른 입자의 연소과정을 보여준다고 가정해도 좋다.

CO, CO₂ 배가스 분석 결과를 이용하여 계산된 탄소량은 투입된 고체 연료의 탄소가 이 두 가스를 통해 배출된 양이다. 두 탄소량 비는 아래 식과 같이 계산되고 탄소 회수율로 정의 한다.

$$\text{carbon recovery}(\%) = \frac{12Q \int_0^t (C_{CO} + C_{CO_2}) dt}{22.4 \times 10^{-3} f_c \times \text{mass}} \times 100\%$$

여기서 C , f_c , mass 는 각각 가스 농도, 연료 중의 탄소 함량, 투입된 연료의 질량이다.

불완전 연소에 의한 탄화수소의 배출과 다른 실험적 오차로 탄소회수율을 100% 이하가 된다. 탄화 수소의 형태로 배출되는 탄소를 제외하면 연소된 탄소량에 대한 실험 오차는 적어도 미회수율보다 작다.

$$\text{error}(\%) \leq 100 - \text{carbon recovery}$$

실제 측정 결과 불완전 연소가 적은 대부분의 경우 탄소 회수율이 95%를 넘는 것으로 나타났다.

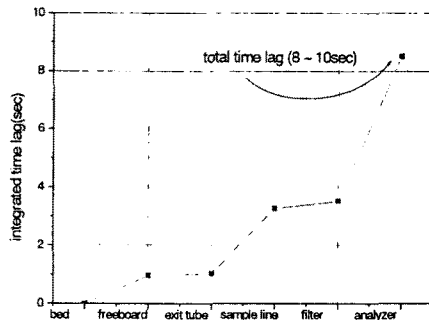


Fig. 3 Time lag of the system in measuring gas concentration from the time of fuel inlet.

4.2.2 시각 관찰

고체 입자가 고온으로 유지되는 유동상식 연소로에 투입되면 바로 연소가 일어나는 것을 휘발분 연소 화염을 통해 볼 수 있다. 불붙은 입자는 베드에서 부유하다가 다시 유동층 베드로 사라지고 다시 떠오르는 과정을 뒤풀이한다. 휘발분 연소 과정이 끝나면 가시적인 화염이 없어지고 붉게 달아오른 화 입자를 볼 수 있다. 나무의 경우 좌연소는 수 개의 입자로 나뉘어져 진행된다. 미세입자가 프리보드로 비산되어 밝은 빛을 내며 타는 것이 관찰된다. 좌연소과정에서 유동사와의 접촉에 의해 마모된 미세 입자가 타는 것이다.

RDF의 경우는 휘발분 화염의 크기가 나무보다 크며 작은 입자로 부서져 타는 것을 관찰할 수가 있다. 건조된 제지 슬러지는 입자 형태를 비교적 잘 유지하면서 연소된다.

4.2.3 연소과정과 내부 온도 변화

Fig.4는 나무 입자 연소 실험 결과의 예이다. 입자의 중심부에 삽입된 열전대에 의해 측정된 입자 온도를 보면 그림에 표시된 것과 같이 건조, 탈휘발, 그리고 좌연소 과정이 뚜렷이 구분되

고 있음을 보여준다. 탈휘발 과정에서 CO, CO₂의 농도가 높은 수치를 유지하다가 이 과정이 끝나면서 점차 줄어드는 것이 관찰된다. 두 가스의 농도 분포로부터 탈휘발 과정과 화 연소 과정을 나눌 수 있다.

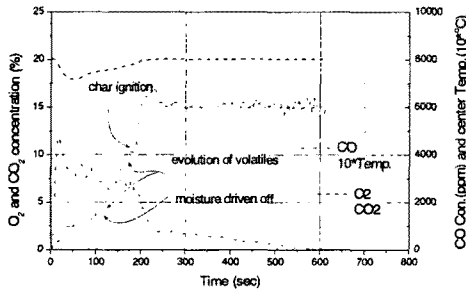


Fig. 4 Time-resolved gas concentration and particle center temperature, 2cm³, 16% water, wood, T_{bed} 600°C

수분 함량이 16%일 경우 수분이 완전히 증발하는 시간은 110 초 정도이고 건조 과정에서 휘발분 연소는 동시에 진행되는 것을 CO, CO₂의 농도 측정 결과로부터 알 수 있다. 이것은 입자의 내부에서 건조가 일어남에도 불구하고 건조가 끝난 입자의 외피에서는 탈휘발 과정이 진행되는 것을 의미한다. 탈휘발 과정과 화 연소 과정은 비교적 명확히 구분되는 것을 볼 수 있는데 이것은 발생된 휘발분이 입자 주위에서 연소되면서 산소를 소모하여 산소가 필요한 화 연소가 지연되기 때문이다. 이 실험 결과로부터 입자의 내부에 온도 분포는 존재하고 입자의 반경에 따라 다른 과정이 진행되는 것을 알 수 있다. 입자의 열분해/연소 과정은 입자의 가열 과정에 지배 받는다.

4.2.4 연료의 종류에 따른 연소 특성
Fig. 5 ~ Fig. 7 는 베드 온도를 달리하

여 단입자 연소에 대한 실험한 결과이다. 탄소 전환율을 시간에 대해 나타내었다.

탈휘발 과정이 끝나는 시점은 이산화탄소의 농도 발생 곡선과 탄소 전환율 곡선의 변곡점으로부터 알 수 있다. Fig. 4의 나무 연소 결과에서 온도의 증가 순서에 따라 탈 휘발과정이 끝나는 시점은 각각 170, 150, 130 초임을 알 수 있다. 탈휘발 과정이 온도의 증가에 의해 빨라졌음을 의미한다. 탈휘발 과정에서 화 연소로 전환되는 시점에서 탄소 전환율을 보면 70%, 77%, 80%가 된다. 온도가 높아지면 입자 외피에서 탈휘발 과정이 빨리 끝나 화 연소 과정에 돌입하여 내부의 탈휘발 과정과 외부의 화 연소과정이 더 중첩되어 일어난다. 그렇기 때문에 탈휘발 과정에서 소모되는 탄소량이 증가한다.

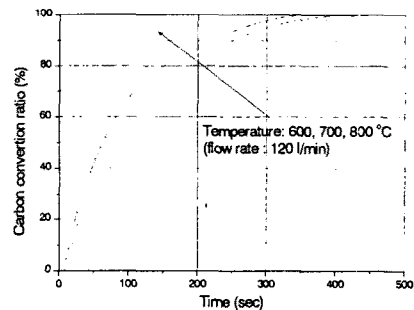


Fig. 5 Carbon conversion ratio: dry wood, T_{bed} 600~800°C

제지 슬러지 연소 실험 결과에서 베드 온도가 600 °C 일 때 일산화탄소의 발생량이 높고 탄소-일산화탄소/이산화탄소 (C-CO/CO₂) 회수율도 75 %에 못 미치는 값을 나타내는 것으로 보아 불완전 연소에 의한 불연 탄소 손실이 발생했다는 것을 알 수 있다. 그러나 탄소 회수율은 온도가 올라가면서 증가하

였다. 질산화물의 배출량은 이산화탄소와 같은 경향을 보이고 있다. 탄소 회수율이 낮은 600 °C에서는 질소-질산화물(N - NO_x) 전환율이 15% 미만이지만 700, 800°C에서는 28%에 이르렀고 이때 최고치는 200ppm 이었다.

제지 슬러지의 경우 휘발분 중의 탄소 함량이 전체 탄소의 84%로 높고 탈휘발 속도가 나무에 비해 느리기 때문에 전체 입자 연소 과정을 보면 탈휘발 과정과 좌 연소 과정이 겹쳐 두 과정이 뚜렷이 구분되지 않는다. 제지 슬러지의 반응 과정은 나무와 흡사하지만 반응 속도는 나무에 비해 떨어지는 것을 알 수 있다.

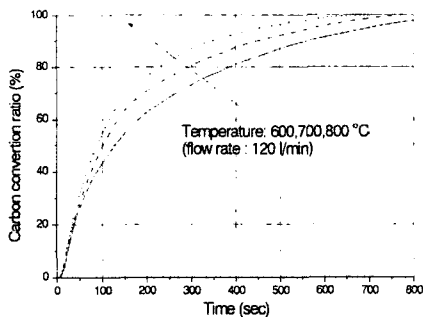


Fig. 6 Carbon conversion ratio: dry paper sludge, T_{bed} 600~800°C

RDF 는 낮은 온도에서의 열분해 속도가 앞의 두 고체 연료에 비해 크고 휘발분이 빠져 나온 다음 강도가 급격히 떨어지기 때문에 탈휘발과정이 끝나면 입자 바깥쪽부터 유동사와의 접촉에

의해 바로 부서져 작은 입자 형태로 연소가 일어난다. 떨어져 나간 분말은 빠르게 가열되고 산소와의 원활한 접촉에 의해 좌 연소가 쉽게 일어난다. RDF 의 좌 연소 과정은 휘발분 연소와 거의 동시에 이루어지며 이것은 앞의 두 연료와 다른 점이다. 질산화물의 발생량은 800°C 에서 최고치가 250ppm 이다. 질소-질산화물 전환율은 탄소 회수율과 비례하며 값은 9 ~ 15%로 그 값에 있어서는 제지 슬러지에 비해 낮다.

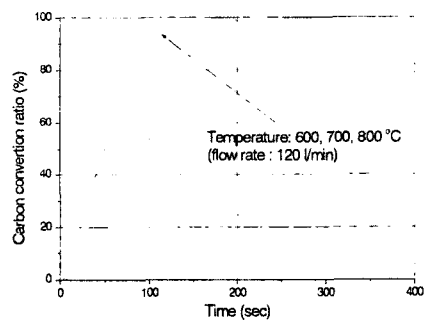


Fig. 7 Carbon conversion ratio: dry RDF, T_{bed} 600~800°C

4.2.5 탄소 반응속도/평균 전환시간

앞장에서 정의한 탄소 반응 속도와 평균 전환 시간을 계산하였다. 탄소 반응 속도는 단위 시간에 반응하는 탄소의 물수를 나타내며 이것의 시간에 따른 분포는 운전 인자에 영향을 받는다. 탄소 반응 속도가 입자 연소 반응의 각 과정에서 순간적인 반응 속도를 나타낸

Table. 2 Carbon recovery(%); input carbon estimated from proximate analysis, measured carbon from gas concentration.

case	wood			paper sludge			RDF		
	input(g)	Meas.(g)	Rec.(%)	input	measure	recovery	input	measure	recovery
600	5.5	5.3	97.0	6.4	4.6	73.0	5.9	5.6	94.9
700	6.0	5.9	98.9	6.5	5.7	88.0	5.4	5.5	100.4
800	6.1	6.07	99.8	6.7	5.8	85.6	5.4	5.4	99.6

다. 반면에 탄소 평균 전환 시간은 반응 전체에 걸친 반응 속도를 대변한다.

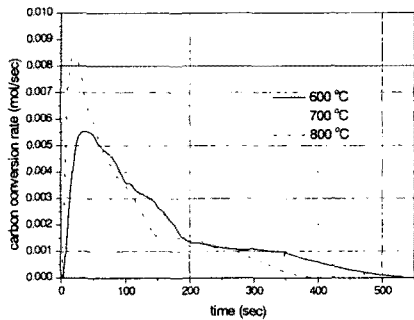


Fig. 8 Carbon combustion rate(mole/sec): dry wood, T_{bed} 600~800°C

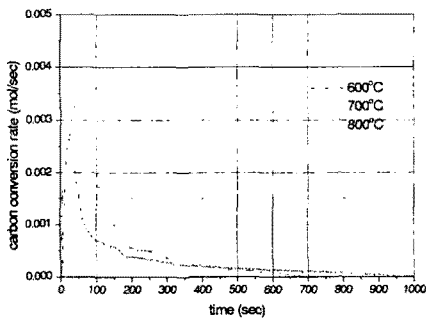


Fig. 9 Carbon combustion rate(mole/sec): dry paper sludge, T_{bed} 600~800°C

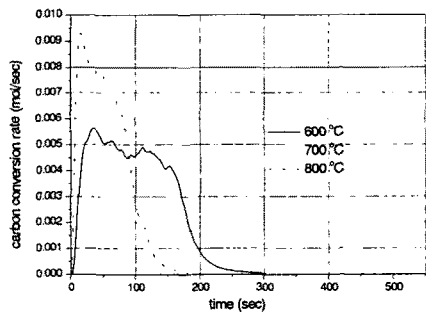


Fig. 10 Carbon combustion rate(mole/sec): dry RDF, T_{bed} 600~800°C

탄소 반응 속도는 탈 휘발 과정이 베드의 온도에 크게 영향을 받고 있다. 탈휘발 속도는 온도가 높아질 경우 급

격히 증가하는 것을 알 수 있다. 온도 증가에 따른 좌 연소 과정에서의 반응 속도 증가는 그다지 크게 나타나지 않고 있다. 탄소 평균 전환 시간을 보면 온도에 따라 전체 반응 시간이 줄고 있다(Table.3). 평균 반응 속도로부터 RDF-나무-제지 슬러지 순으로 반응성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

Table. 3 Mean carbon conversion time(sec).

T(°C)	wood	paper sludge	RDF
600	145	150	96
700	121	136	76
800	101	109	53

5. 토의 및 향후 연구

크기가 수 cm 인 입자는 연소 과정이 상당히 느리게 진행되고 반경 방향으로 온도 분포가 존재하며 온도에 따라 다른 연소 과정이 진행된다. 각 과정은 연소 환경과 연료의 특성에 의해 지배를 받는다. 입자의 물리 화학적 특성과 연소 환경을 고려하지 않은 상태에서 고체 입자의 반응성을 제시한다는 것은 의미가 없다. 고체 연료 특성과 유동층 연소로 운전 조건이 열분해/연소 과정에 미치는 영향을 살펴 봐야 한다. 고체 연료 특성으로는 입자 크기, 수분 함량, 종류, 강도 등이 있으며 운전 조건은 유량, 산소 농도, 베드 온도 등이 존재한다.

연료의 반응성은 연소 효율을 결정할 뿐만 아니라 유동상식 연소로 설계에 있어서 가장 중요한 인자이다. 고체 입자의 반응성을 나타내기 위해서는 입자의 내부 온도분포, 반응 과정을 제대로 모사할 수 있는 입자 연소 모델이 필요하다. 이 입자 모델은 입자의 반경방향

으로 다르게 진행되는 건조, 탈휘발, 최 연소 과정을 모사하며 유동사와의 접촉에 의한 마모 효과나 건조 열분해 과정에 의한 물성치 변화와 연소 환경을 고려할 수 있어야 한다.

입자 특성과 연소 환경을 고려할 수 있는 입자 반응 모델을 개발하여 입자 연소 과정을 모사하고 이 모델을 이용하여 입자의 특성 변화가 유동층 연소로 시스템에 미치는 영향을 살펴보는 것이 이 연구의 진행 방향 될 것이다.

6. 결론

고체 연료의 연소 특성을 실험적으로 관찰할 수 있는 실험실 규모 유동층 연소로를 설계 제작하여 특성 실험을 완료하였다. 유동층 연소로내에서 고체 입자 연소 과정을 심층적으로 관찰하였으며 시험로 특성 확인 및 실험 인자를 설정하였다.

건조 과정과 탈휘발 과정은 동시에 일어나는 반면 탈휘발 과정에서 최 연소 과정으로의 전이 과정은 휘발분이 빠져나온 후의 입자 강도에 따라 결정되는 것으로 판단된다. 탈휘발 연소 과정에서 연료의 기계적 강도가 약해지는 RDF의 경우 유동층 베드에서의 입자 마모와 분쇄 과정에서 떨어져 나온 미세 입자의 연소에 의해 최 연소가 진행되어 최 연소과정과 탈휘발과정이 중첩되어 일어난다. 반면에 최의 강도가 커 입자의 형태가 유지되는 나무와 제지 슬러지의 경우는 탈휘발과 최 연소가 구분되어 단계적으로 반응이 진행되는 것을 볼 수 있다. 그러나 제지 슬러지의 경우 탈 휘발 속도가 느리기 때문에 두 과정의 구분이 명확하지 않다.

입자의 건조, 열분해(탈휘발) 과정은

입자 내부 온도 분포에 의하여 결정되며 입자 온도 상승은 입자의 가열과정의 요인에 의해 영향을 받는다.

참고문헌

- (1) Norman Hodgkinson and George G. Thurlow, "Combustion of low-grade material in fluidized bed", AIChE symposium series, No. 161, Vol.73, 109 ~ 114
- (2) D. P. Naude and R. K. Dutkiewicz, "Fluidized bed combustion of poor quality coal", Fluidization, 280 ~ 285, 1978
- (3) R. Chirone, A. Cammarota, M. D' Amore, and L. Massimilla, "Fragmentation and attribution in the fluidized combustion of a coal", Process 7th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Philadelphia, 1023, 1982
- (4) R. G. Bautista-Margulis, R. G. Siddall and L. Y. Manzaneres-Papayanopoulos, "Combustion modeling of coal volatiles in the freeboard of a calorimetric fluidized bed combustor", Fuel, Vol. 75, No. 15, pp. 1737 ~ 1742, 1996.
- (5) H. Lorenz and H. Rau, "A new method for investigating the combustion behaviour of solid fuels in FBC", Fuel Vol. 77, No. 3, pp. 127~ 134, 1998.
- (6) 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.
- (7) 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.