

고체 연료의 고온 공기 연소 특성에 관한 연구

진홍중* · 최상민**†

Solid Fuel in the Highly Preheated Air Combustion

Hong-Jong Jin*, Sang-min Choi**†

ABSTRACT

A laboratory scale thermogravimetric analyser was developed to investigate the combustion characteristics of selected solid fuel(wood) in the highly preheated air. The aims are to introduce in the means of experimental determination of the solid fuel particle characteristics through the combustion process in the environment of highly preheated air. A nearly single particle combustion condition was reproduced in a thermogravimetric analyser and regenerating combustor. For a fuel particle whose characteristic length was a few centimeter, the sub-processes of fuel drying, pyrolysis as well as the combustion of residual carbon were identified. Fluidized environment of carrier gas was selected as the major parameter which affect the combustion process.

Key Words : Highly preheated air, Thermogravimetry, Solid fuel, Combustion, Drying, Pyrolysis, Char

기 호 설 명

TG	Thermogravimetry	ITG	Isothermal Thermogravimetry
DT	Differential Thermogravimetry	DTG	Dynamic Thermogravimetry

1. 서 론

화석 연료의 열에너지 전환, 폐기물 소각 등 연소에 대한 연구는 꾸준히 이뤄져 오고 있다. 최근에는 에너지 절약 문제와 환경 오염 문제로 인하여 고효율, 저공해 연소 기술이 절실히 요구되고 있다. 이러한 저공해, 고효율 연소 기술의 하나로써 고온으로 예열된 공기를 이용하여 연소시키는 방법이 있는데, 보통 고온의 연소 배가스

에서 회수된 열을 이용하는 재생에 의한 고온 공기 연소 기술이 있다.

일반적으로 고효율을 유지하면서 저공해 연소를 시키는 것은 서로 상충되는 것으로 알려져 있는데 고온의 공기를 이용한 연소는 공기 예열을 통해 화염의 온도를 상승시킴으로써 시스템의 열 에너지 효율을 극대화 시키고 CO나 NO_x와 같은 유해 물질도 줄일 수 있는 새로운 개념의 연소 기술로 소개되고 있으며 이미 수십 년 전부터 유리 용해로 등 대형 열 설비에 제한적으로 사용되어 왔으며 폐기물 처리, 전력 생산, 일반 산업용 보일러 등 적용범위가 넓어지고 있다. 이러한 연소 기술을 이용하면 ultra lean mixture나 저

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락지자. smchoi@cais.kaist.ac.kr

발열량 연료의 연소 영역 확보, 저 산소 농도에서의 안정적인 연소, 온도 분포 균일화 등 연소 효율을 높일 수 있게 된다. 이러한 고온 공기 연소 연구가 지금까지는 주로 기체 연료와 액체 연료에 많이 제한되어 왔다.

한편 고체 연료의 연소에 대해서도 많은 연구가 이뤄져 왔다. 고체 연료의 연소 메커니즘은 건조, 탈휘발 그리고 화연소라는 3단계에 걸쳐서 일어나고 연소 특성을 살펴볼 때는 크게 2가지 즉, 물성치, 열분해 특성, 표면 연소 특성과 같은 연료의 특성과 온도, 분위기 가스, 산소 농도와 같은 연소 조건에 의한 영향을 고려해야 한다. 특히 실험 대상으로 삼는 연료 크기에 대해 온도 분포를 무시할 수 있는 적은 크기의 단 입자, 입자내의 온도 분포를 고려해야 할 덩어리 입자 그리고 덩어리 그룹 등으로 분류되어 연소 특성을 분석하고 또 그러한 연소 특성 기술 방법 및 모델링에 대해서도 많은 연구가 이뤄져 왔다.

본 연구에서는 기체와 액체 연료에 대한 고온 공기 연소 특성과 일반적인 고체 연료의 연소 특성을 바탕으로 수 g 단위의 고체 연료에 대한 고온 공기 연소 특성을 살펴보았다. 대상 연료는 한변의 길이가 수 cm인 정육면체 크기의 나무 단입자를 사용하였으며 고온 공기 연소 환경을 만들어 주기 위하여 실험실 규모의 열중량 분석기와 재생 연소기를 이용하였다. 그리고 고체 연료의 연소 특성을 기술하는데 있어서는 여러 가지 방법이 있을 수 있지만 본 연구에서는 등온 조건에서의 열중량 분석을 위해 온도와 중량 감량을 측정하여 연소 특성을 기술하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 열중량 분석기

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 실험에서 제작된 열중량 분석기는 원통형 구조로 되어있고 세라믹 보드로 단열되어 있으며 열선을 이용하여 최고 1100°C까지 온도를 올릴 수 있도록 설계하였다. 내부 Heating zone의 크기는 직경 100mm, 높이 270mm이고 Temperature controller를 이용하여 Heating rate를 조절 할 수 있게 하였고 수직 이동 장치를 장착하여 최고 0.3m/sec까지 이동 속도를 조절 할 수 있도록 하였다. 중앙에 T/C를 설치하고 아랫 부분에는 가스 주입구를 만들어 산소 농도를 조절할 수 있고 윗 부분에 배가스 측정을 위한 포트를 설치하여 배가스 샘플링에 의한 연소 특성도 볼 수 있도록 하였다.

Fig. 2에서 열중량 분석기에 대한 schematic diagram을 살펴 보면 크게 반응 부분, 측정 부분 그리고 기록부분으로 구성된다. 반응 부분에는 furnace, 온도 조절 장치, mass flow controller가

있고 측정부분에는 가스 분석기, 저울, K-type 열전대가 있다. 그리고 측정부분에는 저울과 data acquisition system이 있는데 저울은 Ohaus E12140(capacity 210g, readability 0.1mg)을 사용하였고 RS-232C로 PC와 연결하였다. furnace의 중앙에는 연료를 올려놓는 stainless steel mesh가 위치하게 된다.

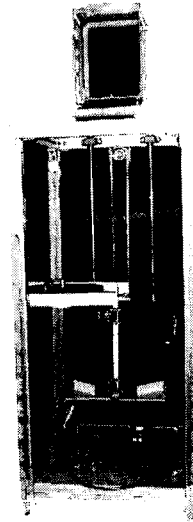


Fig. 1 Thermogravimetric analyser

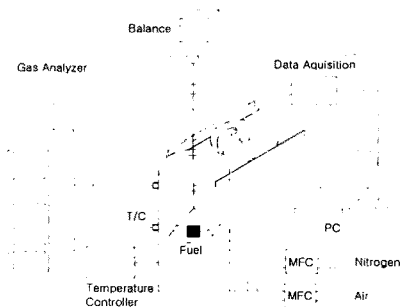


Fig. 2 Schematic diagram of thermogravimetric apparatus

비 등은 실험을 할 경우에는 Heating rate, 유량, 분위기 가스의 산소 농도 등 실험 조건을 세팅하여 놓고 furnace를 적절한 높이에 위치시켜 연료를 넣어 온도를 올리기 시작하지만 등은 실험의 경우에는 연소 조건을 세팅하고 난 후 furnace를 아랫부분에 위치시켜 놓고 furnace의 온도를 원하는 온도까지 올려놓는다. 원하는 온도까지 올라 갔을 때 받침대에 연료를 올려놓고 수직이동 장치로 furnace를 위로 이동시켜 연료를 연소로 안으로 삽입하게 된다. 그리고 산화 분위기를 유지시키기 위해서 공기를 10l/min 정

도로 주입한다.

2.2 재생 연소기

고온 공기 연소를 재현하기 위한 2번째 실험 장치로써 VOC(휘발성 유기 화합물)용 재생 연소기를 사용했는데 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 연소실은 직육면체 덕트형 구조로 단열 처리 되어있고 내부 heating zone은 길이가 470mm이고 단면의 가로, 세로 길이가 각각 100mm이다. 배가스가 세라믹 하나킴(Cordierite)으로 되어있는 촉열실을 지나면서 열을 빼앗기고 새로운 공기가 유입되면서 그 열을 다시 빼앗아 연소시키는데 이러한 과정이 일정한 시간 간격을 두고 4-way 밸브를 통해 좌우로 전환하는 것을 반복하게 된다. 앞면에는 연료 투입구가 있고 뒷면에는 보조 버너가 장착되어 있다. 연소실 길이 방향으로 T/C이 100mm 간격으로 그리고 좌우에 있는 세라믹 하나킴 전후단에 각각 설치되어 있다.

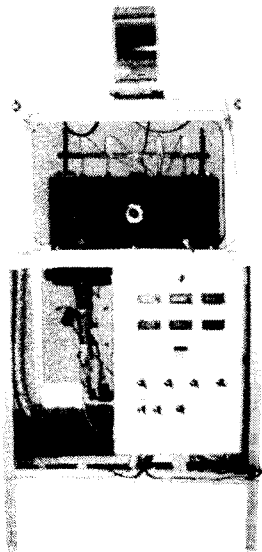


Fig. 3 Regenerating combustor

열중량 분석기와 관련하여 가스 분석기, 시용, data aquisition system, mass flow controller가 있고 가운데에 furnace와 연료 basket이 위치해 있다. 이 실험 장치에서 고온 공기를 만들어 주기 위한 기본적인 아이디어는 보조 연료인 propane을 연소 시킬 때 excess air를 50%이상으로 충분히 공급해주고 보조 연료 연소 후에 남아있는 고온의 excess air를 고체 연료 연소에 이용하는 것이다.

800°C이상의 고온의 분위기를 유지하기 위해서는 먼저 뒷면에 있는 보조 버너와 프로판 가스를

이용하여 노내의 온도를 700°C 이상으로 예열시키고 나서 좌우 한쪽에서 공기와 보조 연료 혼합 가스를 주입하고 다른 한쪽으로 배가스를 배출한다.

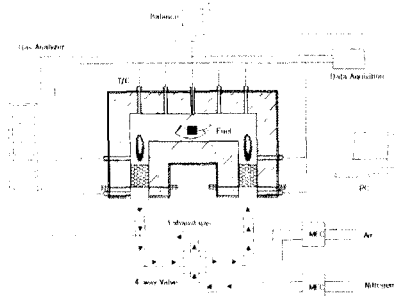


Fig. 4 Schematic diagram of regenerating combustor

Furnace가 예열된 상태에서 중앙의 온도가 원하는 온도가 되도록 한쪽에서 적당한 당량비로 혼합가스를 계속하여 주입시키게 되면 세라믹 하나킴 상단에서 보조 연료가 연소하면서 중앙의 온도가 유지되는데 이때 고체 연료를 중앙에 투입하여 중량의 변화와 온도 변화를 실시간으로 볼 수 있다. 이 실험 장치는 앞서 설명한 열중량 분석기에 비해 평균 유속이 10배 정도 크게 존재한다. 단면적을 조절하여 유속 변화를 10배 이하 또는 그 이상의 연소 환경으로 유지 할 수 있다. 이러한 연소 환경 변화에 따른 고체 연료의 연소 특성을 비교하고자 이 실험장치를 사용하였다.

2.3 연료에 대한 기초 분석

나무는 연소 후 남아 있는 ash의 양이 적고 연소가 비교적 잘 이뤄지며 쉽게 형상화 할 수 있고 또한 연료 확보에 있어서도 다른 연료에 비해 용이하기 때문에 본 실험에서는 수g 단위의 나무 단일자를 연료로 사용하였다.

발열량 측정은 표준 시료로 보정된 Leco 350A 발열량 측정기를 통해 이뤄졌고 이 기기의 측정 오차는 2% 이하이다.

삼성분 분석은 수분 측정의 경우 105°C, 가연분 함량 측정의 경우 820°C로 유지되는 가열로에서 시료가 완전 건조 또는 연소된 후의 질량 변화율을 계산하여 수행되었다.

휘발분 측정 방법은 가연분 함량 측정과 동일하며 질소 가스를 주입해 가열로에 유입되는 산소를 차단하는 것이 다른 점이다.

원소 분석은 EA1110-Fisonion 원소 분석기 (0.3% 이하 오차)를 이용하여 이뤄졌다.

2.4 해석 방법

2.4.1 고온 공기의 기준

먼저 고체 연료의 고온 공기 연소에 쓰이는 고온 공기에 대한 기준은 정의하기 나름이지만 현재 기체 연료에 대한 고온 공기 연소에서는 연료의 자동 착화 이상 온도에 놓인 연소용 공기를 말하는 것이 주를 이루고 있다. 본 실험에서는 고체 연료의 휘발분이 자동 발화되는 온도 이상에 놓인 공기를 고온 공기로 정의하여 사용하였다.

일반적으로 고체 연료의 탈휘발 생성물은 탄화수소(Hydrocarbon), H_2 , CO 등의 가연성 가스가 대부분이며 액상의 tar나 oil도 함께 생성된다. 본 실험에서 사용된 나무의 휘발분은 주로 아세틸(C_2H_2)과 메탄(CH_4)으로 구성되기 때문에 이들의 자동 발화 온도를 기준으로 하여 $800^\circ C$ 이상의 연소용 공기를 고온 공기로 정의하였고 그러한 조건에서 실험을 수행하였다.

2.4.2 열중량 분석

서론에서 언급하였듯이 본 실험에서는 고체 연료의 연소 특성을 기술하기 위해 열중량 분석 방법을 채택하였다. 기본적으로 열중량 분석은 일정온도 상승률을 갖는 가열로 내에서 복사 전도 등의 영향을 받는 입자가 놓여 있을 때 이 입자들의 중량 감소량을 관찰하는 실험을 말한다. 연소 환경의 완벽한 모사는 아니지만 반복성이 우수하다는 장점을 가지고 있고 그 절대값 보다는 각각의 특성들을 비교하는데 더 큰 의의를 갖는다고 볼 수 있다.

열중량 분석을 크게 2가지 즉, 등온법(ITG)과 비등온법(DTG)으로 구분할 수 있다. 전자는 일정한 온도를 유지한 furnace에 시료를 장착하여 순간적으로 일어나는 시료의 중량 변화를 온도와 시간의 함수로 나타낸 것이며 후자는 furnace에 시료를 장착한 후 상온에서부터 일정한 가열 속도로 시료를 가열할 때 시료의 중량 변화를 시간과 온도의 함수로 나타내는 것이다. 또한 분위기 가스에 따라서 산화, 환원(열분해) 반응이 결정되고 환원 반응에는 주로 질소나 아르곤 가스가 사용되고 산화 반응에는 산소가 이용된다.

2.4.3 결과 해석 방법

열중량 분석에서는 기본적으로 온도와 시간에 대한 중량 변화를 나타내는 TG 선도와 그의 미분치인 DT 선도를 통해 연소현상을 살펴볼 수 있다. TG 선도는 백분율로 표시함으로써 투입되는 연료의 질량이 다르더라도 온도와 시간에 대한 연소 상황을 정성적으로 비교할 수 있고 DT

선도에서는 최고 연소율이 나타나는 시점 그리고 연소 종료 시점 등 연소 특성을 기술 할 수 있다. 이러한 선도를 통해서 일반적으로 고체 연료의 연소에서 나타나는 건조, 탈휘발, 화 연소의 3 단계를 확인할 수 있고 특히 본 실험에서는 연소 환경에 있어서 유동 환경이 서로 다른 2가지 경우를 서로 비교해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기초 분석

본 실험에서 연료로 사용한 나무의 기초 분석 결과는 Table 1과 같다.

가연분 중의 휘발분 비는 85%로 휘발분의 함량이 많은 것이 특징이고 화가 50%에 가까운 것을 볼 수 있다. 화의 가연 성분을 탄소로 가정하고 원소 분석 결과를 이용하면 전체 탄소량 중에 70%의 탄소가 휘발분에 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Fuel Property

		HHV[cal/g]	4200
Dry base	Combustible[%]	C	49.8
		H	5.2
		O	44.5
		N	<.01
		S	<.01
		Volatile	85
		Char	15
		Sum	100
	Ash[%]		<.1

3.2 유동이 거의 없는 연소 환경

3.2.1 실험 조건

열중량 분석기를 이용한 실험은 유동이 거의 없는 연소 환경을 모사하였는데, 산화 분위기를 유지하기 위해서 Mass flow controller를 이용하여 10l/min으로 연소 종료될 때까지 furnace안으로 흘러 주었다. 로내의 공기 유속은 0.06~0.09m/sec으로 아주 적게 유지 되었고 체적을 고려하면 나무의 휘발분의 체류시간은 약 1.5~2.3sec 정도 된다. 산소 농도는 공기를 사용하여 21%로 유지했다. 노내 온도는 $700^\circ C$, $800^\circ C$, $900^\circ C$, $1000^\circ C$ 로 4가지 경우에 대하여 3회씩 반복 실험 하여 평균값을 구하여 비교하였고 투입된 나무 단입자의 질량은 3~4g 정도 되었다.

앞에서 살펴 보았듯이 나무 연료는 화 성분이 15%이기 때문에 fluctuation이 일어나는 연소 환

경에서 수 mg의 중량 변화를 겪는 최악 연소 과정을 측정하기 어렵다. 그래서 본 실험에서는 연소 과정 중 탈휘발 과정에 대해서만 언급하였다.

3.2.2 TG(Thermogravimetry)

나무 입자의 연소를 수분 증발, 탈휘발 그리고 화 연소로 나누어 생각하면 수분 증발을 변화시킬 수 있는 인자는 연료 수분의 양, 분위기 온도 등을 들 수 있고 탈휘발은 열분해 과정이기 때문에 가열 과정의 인자와 동일 시 되고 있다. 그리고 여기서 다루지는 않지만 화 연소는 산소의 화산과 관계가 있기 때문에 산소 유량을 변화시킬 수 있는 유량, 산소 농도 등을 들 수 있다. 연료가 놓여 있는 환경의 온도는 열전달율과 온도 상승율을 결정하는 인자로서 반응 속도에 많은 영향을 미친다.

Fig. 5에는 중량의 변화를 시간에 대해 백분율로 나타내었다. 그림에서 보면 건조 과정은 탈휘발 과정과 거의 구분이 안되어 동시에 일어나는 것으로 보이고 탈휘발 과정과 화 연소는 곡선이 꺾이는 점을 기준으로 구분해 볼 수 있다. 온도가 증가할수록 탈휘발 과정을 일으키는 부분의 기울기가 급하고 화연소로 전환되는 시점이 빨라지는데 그림에서 보면 알 수 있듯이 800°C 이상에서는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 700°C인 경우 약 150초 정도에서 탈휘발 과정과 화 연소가 구분되는 지점이 보이고 800°C 이상에서는 약 100초 지점에서 나타남을 알 수 있다. 앞에서 언급하였듯이 미량의 화 연소를 측정하기 어렵고 저음의 노이즈와 오차 요인이 많기 때문에 본 실험에서는 탈휘발과 화연소 구간을 확인할 수 있는 300초 이내에서 중량 변화를 관찰하였다.

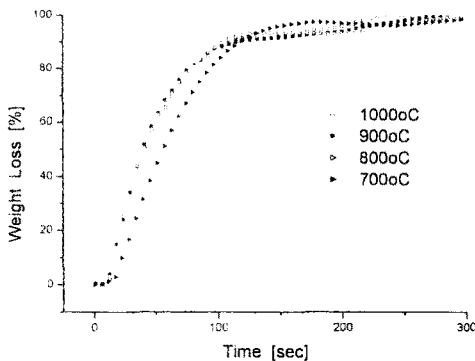


Fig. 5 열중량 분석기에서의 Weight Loss

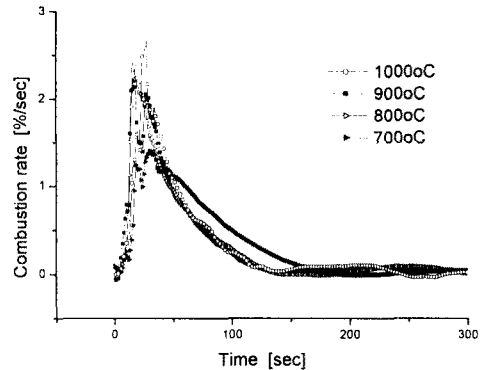


Fig. 6 열중량 분석기에서의 Combustion rate

3.2.3 DT(Differential thermogravimetry)

앞의 중량 변화 결과를 미분하면 Fig. 6과 같이 시간에 대한 중량 감소율 즉, 연소율을 확인해 볼 수 있다. 최고 연소율은 30~40초 지점에서 확인되고 온도가 높을수록 증가하며 700°C와 800°C 이상의 온도와는 큰 차이를 보이는 것으로 보이지만 800°C 이상의 온도에서는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 여기서도 연소율 곡선이 꺾이는 부분에서 탈휘발 과정과 화 연소 구간이 구분되는 것을 확인 할 수 있다.

3.3 유동이 있는 연소 환경

3.3.1 실험 조건

재생 연소기(Regenerator)를 이용하여 로내의 유동이 거의 없는 열중량 분석기에 비해 재생 연소기의 공기 유속은 0.6~0.9m/sec로 평균적으로 약 10배 정도 증가하여 유동의 영향이 있는 연소 환경을 모사 하였다. 800°C와 900°C의 2가지 경우에 대해 3회씩 반복 실험하였고 고온의 연소 분위기를 유지시키기 위해 프로판을 연소시키는데 excess air ratio를 100% 정도로 유지하면서 당량비는 0.3~0.9로 유지시켰다. 산소 농도나 투입 연료의 질량은 앞의 실험과 동일하다.

3.3.2 고온의 공기 분위기 유지 방법

앞의 실험 방법에서 설명하였듯이 Fig. 7그림에서 보는 것처럼 한쪽에서 보조 연료(Propane)를 연소 시키고 중앙의 고체 연료가 투입될 부분을 예열시키게 된다. 800°C와 900°C에 대해서 실험하였다.

재생 연소기의 특성을 이용하여 좌우로 스위칭 하면서 연소 분위기 온도를 상승시키고 고체 연

료를 연소시킬 때에는 연료가 투입될 중앙 부분을 steady 상태로 온도를 유지할 수 있도록 공연비를 조절하여 보조 연료를 계속 연소시킨다.

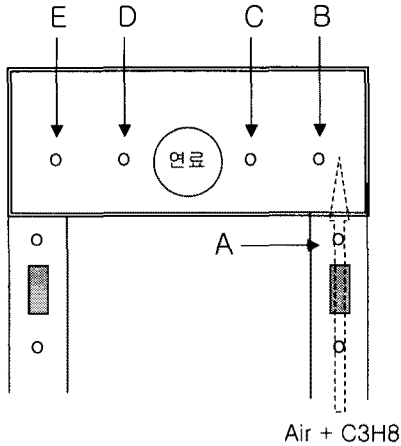


Fig. 7 Regenerator내 교체 연료 위치

3.3.3 TG(Thermogravimetry)

재생 연소기(Regenerator)에서는 보조 연료 연소를 통해 노내의 온도를 유지하였는데, 실험 장치의 한계 때문에 800°C와 900°C에 대해서만 실험하였다. 열중량 분석기에서의 실험 결과를 통해 보았듯이 재생 연소기에서도 온도가 증가할수록 탈휘발 과정이 빨리 일어나는데, 여기서는 유동이 없는 열중량 분석기에 비해 800°C이상에서도 온도에 따른 탈휘발 속도차가 분명한 것을 볼 수 있다. 탈휘발과 화 연소 전환 시점도 900°C에서 조금더 빨라 지는 것을 볼 수 있다.

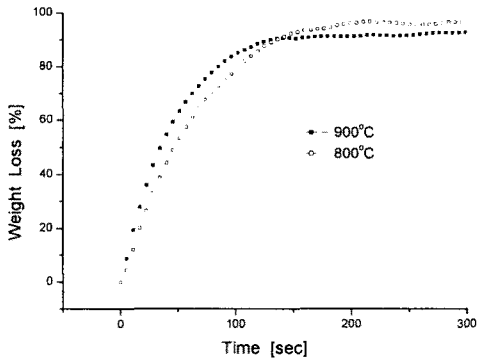


Fig. 8 Regenerator에서의 Weight Loss

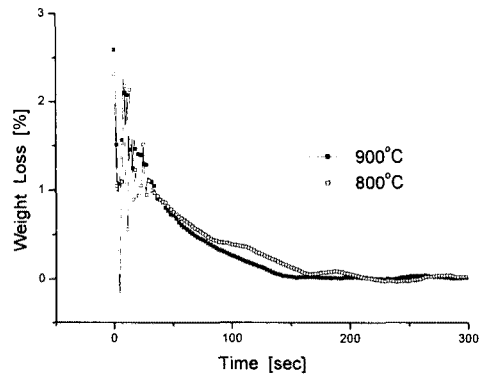


Fig. 9 Regenerator에서의 Combustion rate

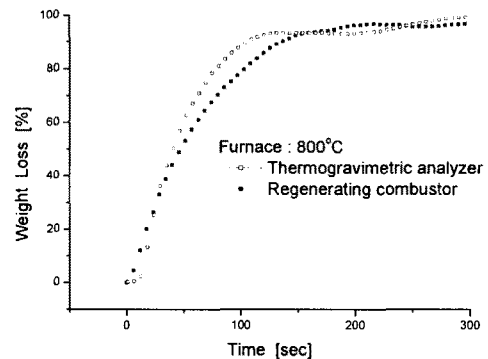
3.3.4 DT(Differential thermogravimetry)

Fig. 9은 유동이 있는 연소 환경에서의 연소율을 보여주는데 연소가 시작되는 부분에서는 fluctuation이 나타나는 것을 볼 수 있고 최고 연소율이 비교적 빨리 나타나며 또한 온도가 높을수록 증가하였다.

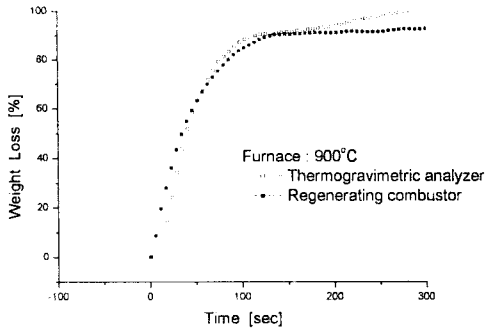
3.4 연소 환경이 다른 연소 특성 비교

Fig. 10와 Fig. 11에는 유동 환경이 서로 다른 조건에서의 중량 변화와 연소율을 비교한 것이다.

Fig. 10는 연소 환경 변화에 따른 열중량 분석기와 재생 연소기에서의 중량 변화를 비교한 것이고 Fig. 11은 두가지 조건에서의 연소율을 비교한 것이다. 중량 변화 곡선에서는 탈휘발 속도가 동일 온도 조건에서 유동이 없는 열중량 분석기에 비해 유동이 있는 재생 연소기에서 빠른 것으로 나타나고 연소율 곡선에서는 재생 연소기에서 최고 연소율이 높고 또 최고 연소율이 나타나는 시점이 빠른 것으로 나타났다.



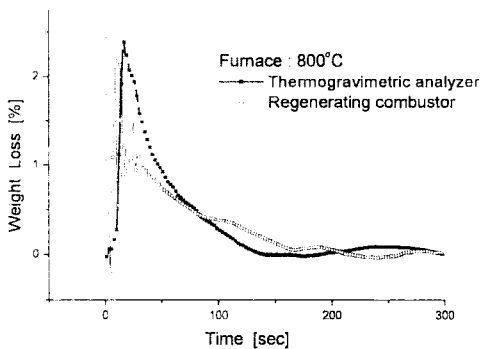
(a) 800°C



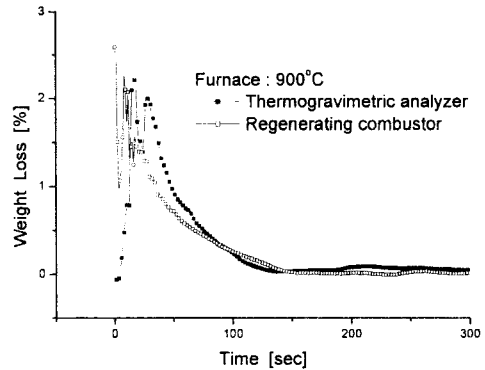
(b) 900°C

Fig. 10 2가지 연소 환경에서 Weight Loss 비교

앞에서도 언급했듯이 기본적으로 탈휘발 과정은 열분해 과정이기 때문에 가열 속도에 큰 영향을 받는다. 즉, 분위기 온도에 의한 영향이 유동에 의한 영향 보다 클 것으로 예상되고 본 실험에서도 유동 환경 변화에 의한 탈휘발 속도는 차이는 있지만 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 판단된다. 하지만 유동이 있는 환경에서는 Fig.5와 Fig. 8에서 비교해 볼 수 있듯이 800°C 이상의 고온에서 온도에 따른 탈휘발 과정이 큰 차이를 보이고 있다. 이는 어떠한 기준 온도 아래에서는 연소 분위기 온도에 의한 영향이 지배적이지만 그 이상에서는 유동 즉, 유량의 영향이 클 수 있음을 추측해 볼 수 있다.



(a) 800°C



(b) 900°C

Fig. 11 2가지 연소 환경에서 Combustion rate 비교

4. 결론

기존에는 수 mg 단위에 한정되었던 열중량 분석을 고온 환경에서 수g 단위의 고체 연료에 대해 연소 특성을 실험적으로 관찰할 수 있는 실험실 규모의 열중량 분석기를 제작하여 연소 환경이 다른 재생 연소기에서의 연소 특성과 비교하였다. 유량, 산소 농도, 분위기 온도, 투입 연료 등을 결정하여 중량 변화 측정 방법으로 실험하였다. 수 g의 나무 단입자를 가지고 등은 조건에서 시간에 따른 중량 변화를 보고 그에 따른 연소율을 살펴 보았고 온도에 따라서 그리고 연소 환경에 따라서 어떻게 달라지는지 탈휘발 과정에 한해서 살펴 보았다.

고온 환경(800°C 이상)에서 고체 연료 단입자를 투입했을 때 건조, 탈휘발 그리고 화 연소의 단계별로 연소 과정이 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 입자의 건조, 열분해(탈휘발) 과정은 입자 가열 과정의 요인에 의해 주로 영향을 받는다. 유동이 거의 없는 연소 분위기에서는 온도가 증가해도 탈휘발 과정에 큰 차이가 없지만 고온 환경에서는 유동에 의한 연소 분위기에 따라 온도가 증가할수록 탈휘발 속도가 크게 차이남을 실험 결과를 통해서 알 수 있었다.

후기

본 연구는 에너지 기술 연구소(노동순) 도움으로 수행되었습니다. 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 최진환 “고체 폐기물 연료의 기포 유동층 연소 특성”, 2002, 한국과학기술원 기계공학과 박사학위논문
- [2] 유영준 “고형폐기물 연소특성의 실험적인 고찰”, 1994, 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문
- [3] Frank G. Smith III and Ranie W. Pendarvis, Richard W. Rice, " Combustion of Cellulosic Char Under Laminar Conditions" Combustion and Flame, Vol 88, 1992, pp345-368
- [4] H. Lorenz and H. Rau, "A new metod for investigating the combustion behavior of solid fuels in FBC", Fuel Vol.77, No.3, pp.127-134, 1988.
- [5] Kennet K. Kuo "Principles of combustion", 1986
- [6] 양원, 최진환, 최상민, “하수 슬러지의 연료 특성 파악을 위한 기초 분석” KSEE, Vol.23, No. 1, 2001, pp. 51-59.
- [7] 최진환, 박영호, 최상민, “고체 폐기물 연료의 유동층 시험 연소로 특성 및 실험 인자 설정” KICE, Vol.39, No.5, 2001, pp. 629-634.
- [8] Masashi Katsuki, Toshiaki Hasegawa, "The science and technology of combustion in higly preheated air" Twenty-seventh symposium (International) on Combustion, 1998, pp. 3135-3146.
- [9] Shuyuan Li, Changtao yue, "Study of pyrolysis kinetics of oil shale" Fuel, 2002.
- [10] M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi, R. Kitamura, "Low NOx combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace" Energy conversion, Vol. 38, No. 10-13, 1997, pp.1353-1363.
- [11] Y. Suzukawa, S. Sugiyawa, Y. Hino, M. Ishioka, I. Mori, "Heat transfer improvement and NOx reduction by highly preheated air combustion" Energy conversion, Vol. 38, No. 10-13, 1997, pp.1061-1071
- [12] 윤석표, 김교근, 김석완 외 10, “폐기물 처리 시설 설계를 위한 폐기물 실험 방법” 2002.