

## 다양한 종류의 연소로 내 고체 연료의 연소 특성 고찰

최진환\* · 양 원\*\* · 이상득\*\* · 최상민\*\*\*

## Investigation of Solid Fuel Combustion Characteristics in Various Types of Combustors

Jinhwan Choi\*, Won Yang\*\*, Sangmin Choi\*\*\*, Sangdeuk Lee\*\*\*

### ABSTRACT

This study is aimed to characterize the combustion behavior of solid fuel in the various types of the combustors: stoker, rotary kiln and fluidized bed type combustors. Three different types of reduced-scale combustors are introduced, and temperatures and flue gas compositions are measured for various fuel sizes, water contents, initial temperature, and air flow rates. In case of the rotary kiln combustor, effects of rotating speed of the combustor are also investigated. Mean carbon conversion time (MCCT) and flame propagation rate (FPR) are used for the quantitative analysis. It is revealed that the reaction rates of the fuel are significantly influenced by the fuel characteristics, type of the combustors and air flow rate. Major design parameters for each type of the combustors are summarized through the reduced-scaled model analysis.

**Key Words** : Fixed bed combustor, Rotary kiln, Fluidized bed combustor(FBC), Fuel characteristics

### 기 호 설 명

$C_i$  : concentration of  $i$  gas,  $mol/Nm^3$

MCCT( $\overline{t_c}$ ) : mean carbon conversion time,  
sec

MFC : mass flow controller

$N$  : total mole number of carbon,  $mol$

$n$  : mole number,  $mol$

FPR : flame propagation rate,  $cm/min$

$Q$  : flow rate,  $Nm^3/sec$

$t_B$  : overall burnout time,  $sec$

$t$  : time,  $sec$

### 1. 서 론

고형 폐기물 처리에 있어서 소각은 폐기물을 무해화 하는 동시에 그 양을 크게 줄일 수 있기 때문에 매력적인 처리 대안으로 여겨지고 있으며 이로 인해 90년대 이후 소각로 건설이 활발히 진

행되어 있다. 그러나 소각로에서 발생하는 공해 물질이 사회적 문제로 대두되면서 공해 물질의 1차적인 저감을 위한 연소기의 올바른 설계 및 운전이 중요해 지고 있다[1,2].

고형 폐기물은 도시 폐기물에서 공장, 농업 폐기물에 이르기까지 그 종류가 매우 다양하다. 종류가 다양한 만큼 각 종류별 고체 폐기물의 연소 특성도 크게 차이를 보이기 때문에 폐기물의 연소 특성에 따라 연소로의 종류를 결정하고 설계 운전 방식을 최적화하는 것이 필요하다. 이 목적을 달성하기 위해서는 종류에 따른 연소로의 장

\* 삼성 테크윈 파워 시스템 연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 현대-기아 자동차 연구 개발 본부

† 연락 저자, 042-869-3030, smchoi@kaist.ac.kr

단점을 파악하여 연소로의 고유한 장점을 확대하고 설계 또는 운전 조건의 변화를 통해 단점을 보완해야 한다.

본 연구에서는 화격자식, 회전식, 유동층 연소로를 대상으로 실험실 규모 장치 실험으로부터 고체 연료 특성이 연소 과정에 미치는 영향을 연소로 형식별로 평가하고 각 연소로 형식에서 중요한 운전 인자들을 정리하였다.

## 2. 연소로 모형

Figure 1 은 유동층 연소로에서 입자의 연소에 대한 기본 개념을 보여주고 있다. 투입된 고체 연료는 유동층의 유동사가 존재하는 베드에 체류하며 여기서 반응이 진행된다. 유동층 연소로에서 고체 연료가 베드 물질의 1-2% 정도를 차지한다면 투입된 입자의 크기에 비하여 유동층 베드의 단면적 또는 체적이 매우 크기 때문에 입자의 연소는 유동층 베드에서 균일한 주변 환경에 놓인 단일 입자의 연소와 같이 일어난다고 가정할 수 있다[3]. 유동층 연소 환경의 유동층 베드를 실험실 규모 장치로 재현하여 유동층 베드에서의 연료 연소 거동에 대한 특성을 연소 실험을 통해 밝힐 수 있다. 이와 같은 실험적 방법은 유동층 연소로 연구에 널리 이용되고 있다[4-8].

Figure 2 는 화격자식 연소로 (stoker type combustor) 에서 연료가 연소되는 과정을 나타내고 있다. 호퍼와 피더 작용에 의해 화격자 위로 올려진 폐기물은 층을 이루고 화격자의 운동에 의해 경사면을 따라 하부로 운반되어진다. 화격자 위의 폐기물 층은 연소실로부터 복사열을 받아 상층부터 건조, 열분해, 휘발분 연소, 최종 연소 등의 반응 거치게 되고 하층까지 연소된 후의 최종 산물인 재는 재 호퍼를 통해 배출된다.

연속 운전되는 화격자 위의 폐기물층의 단면 방향 영역을(Fig. 2에 표시된 영역) 대상으로 공간축을 시간축으로 전환하면 고정층 연소로 형태

의 실험 장치로 모형화가 가능하다[9-11].

Figure 3 에는 회전식 로 (rotary kiln type combustor) 내에서의 고체 연료 연소 과정을 나타내었다. 회전식 로에서 연료는 로의 경사면을 따라 진행하면서 연소된다. 그림과 같이 로의 단면으로 자른 영역을 대상으로 하면 경사가 없는 짧은 길이의 회전로의 형태로 모형화 할 수 있다[12,13]. 이 경우 화격자 연소로 모형과 같이 로의 공간축은 시간축으로 바뀌게 된다.

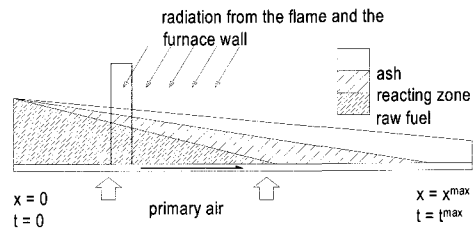


Fig. 2 Conceptual description of waste bed combustion in the grate type incinerator

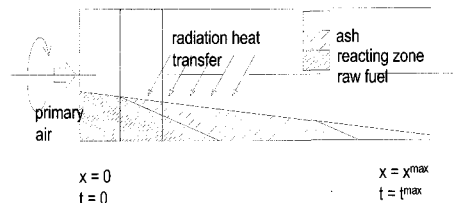


Fig. 3 Conceptual description of waste bed combustion in the rotary kiln

## 3. 실험 방법 및 장치

### 3.1 유동층 연소로

실험 장치는 Fig. 4와 같이 지름 100mm 스테인레스 강관으로 만들어진 높이 1100mm의 원통 유동층 연소로이다. 유동층 베드는 평균 지름이 550 $\mu$ m인 모래로 이루어졌으며 높이는 200mm 이고 최소 유동화 속도는 상온에서 0.15m/sec이다. 유동층 연소로와 유동화 가스를 외부 가열기로 가열하여 연소로 내부의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 설계하였다. 베드 온도는 700 $^{\circ}$ C로 유지하였으며 연료는 단일 또는 수 개가 동시에 연소실 상부의 투입구를 통해 투입된다. 연속적으로 기록되는 배가스 농도를 통해 연소 과정을 관찰하였다.

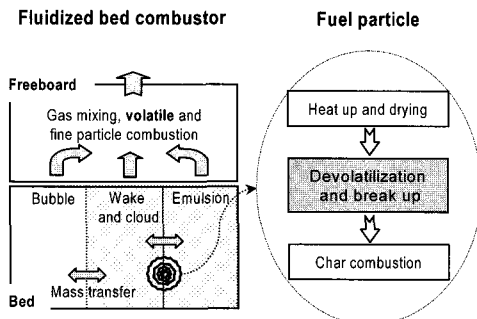


Fig. 1 Conceptual description of solid fuel combustion in a fluidized bed combustor

### 3.2 고정층 연소로

화격자 위에서의 고체 연료의 연소를 예측하기 위한 고정층 연소로의 개념도가 Fig. 5에 나타나 있다. 2차 연소실 상부에 설치된 전기 히터를 가동하여 복사열을 연료 층에 보낼 수 있도록 하였다. 벽면온도를 일반적 연소실 온도인 850°C 까지 올리고 난 다음에, 고형 연료가 담겨 있는 원통형 시료통 (지름 150mm, 높이 450mm) 을 끼워 넣도록 하였다. 연료층에 일정한 간격으로 설치된 열전대의 온도 측정 결과를 통해 연료층의 연소과정을 관찰하였다[9].

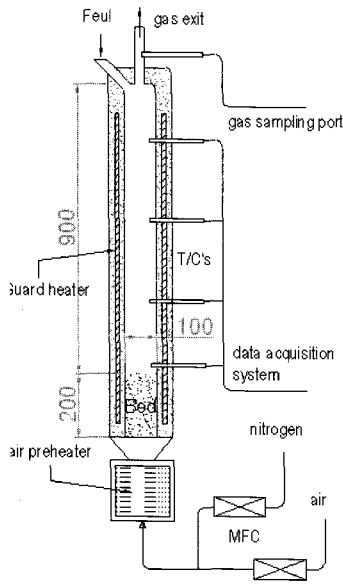


Fig. 4 Lab-scale fluidized bed combustor

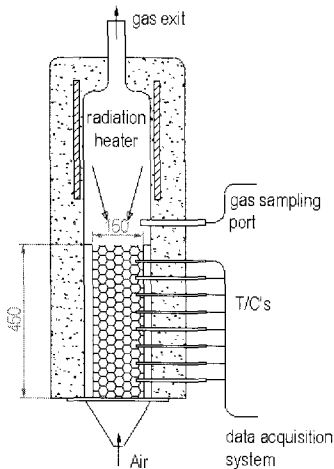


Fig. 5 Fixed bed combustor

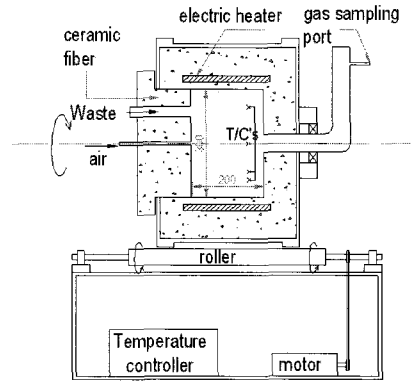


Fig. 6 Lab-scale rotary kiln

### 3.3 회전식 연소로

회전식 연소로를 Fig. 6과 같이 축소된 모형으로 제작하였다. 회전 속도 조절은 0-4 rpm 까지 가능하며, 연소실 온도는 가열기의 전압제어를 통해 일정하게 유지되었다. 연소실의 크기는 직경이 300mm, 깊이가 200mm이다. 연료가 투입되기 전에 로의 온도를 600°C로 설정하고 연료를 투입한 직후 회전 모터를 가동시켜 회전로의 연소 조건을 조성하였다. 유동층 연소 실험에서와 같이 연속으로 측정되는 배기 가스 농도를 통해 연소 과정을 관찰하였다.

### 3.4 개념 정의 및 분석법

이전 연구[3,14,15]에서 정의된 바와 같이 연소 가스에서 측정된 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도(C<sub>CO</sub>, C<sub>CO<sub>2</sub></sub>)와 연소 가스 유량(Q)을 이용하며 다음과 같은 식으로 특정 시간까지 탄소의 연소량(n, mol)을 계산할 수 있다.

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

총 연소 시간을 t<sub>B</sub>라 하면 연소된 탄소의 총량(N, mol)은 다음과 같다.

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

탄소의 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

탄소 전환량 (fraction of carbon conversion)은

백분율로 표시되며 다음 식으로 정의하였다.

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

평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time, MCCT)은 탄소의 유동상 베드 안에서의 평균 체류시간을 의미하며 유동상 연소로에서 탄소 잔류량 예측에 직접적으로 적용 가능한 인자로서 아래 식과 같이 계산된다.

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

원소분석 결과를 이용하여 계산한 투입된 탄소량과 배가스의 CO<sub>2</sub> 및 CO 가스 농도 측정치를 통해 계산된 탄소량과의 비를 탄소 회수율(carbon recovery, %)로 정의하고 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$C\_Rec = \frac{N}{\text{carbon in fuel}} \times 100 (\%)$$

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

$f_c$  는 원소 분석 결과로부터 주어진다.

고정층 연소로에서는 연료 층에서 측정된 온도를 이용하여 화염 전파속도 (FPR, Flame propagation rate, cm/min) 를 다음과 같이 정의하여 계산할 수 있다[9].

$$FPR(\text{cm/min}) = \frac{\text{Distance of the two points at 1000K (cm)}}{\text{Time consumed for propagation (min)}}$$

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 로의 형태에 따른 연소 현상

유동층 연소로에서 고체 연료 입자들이 고온의 유동층으로 투입되면 유동상와의 열전달 과정에 의해 착화가 이루어지며 입자끼리의 영향은 크지 않다. 유동층을 이루는 유동상의 큰 열용량 때문에 연소 과정이 끝날 때까지 유동층 베드 온도는 크게 변하지 않는다. 연소 가스 발생량은 입자의 연소 과정에 지배를 받는다.

고정층 연소로에서는 2차 연소실 벽면으로부터 복사열을 받는 연료 층의 상부로부터 시작되어 하부로 전파되는 과정으로 연소가 진행된다. 화염이 전파되는 동안 연소 가스 농도와 로의 온도는 거의 일정하게 유지된다.

회전로의 경우도 고정층 연소로와 마찬가지로 벽면으로부터 열전달에 의해 착화가 일어난다. 회전하는 로에 의해 입자들이 혼합되기 때문에 입자들은 같은 연소과정으로 연소된다. 이것은 층의 높이에 따라 건조, 탈휘발, 연소 과정들이 다르게 진행되는 고정층 연소로와 다른 점이다. 회전로의 경우 연소 진행 과정에 따라 로내 온도의 변화가 크게 나타난다.

### 4.2 운전 인자 변화 실험

실험 대상 연료는 폐기물과 같이 휘발분 함량이 높고 크기, 수분함량 등의 연료 입자 특성변화가 용이한 나무로 선정하였다. 입자 크기는 1-3cm, 수분 함량은 최대 43%까지 변화시켜 실험하였다. 유동층 연소로에서는 베드 온도를 변화시켜 온도의 영향을 관찰하고 회전로에서는 회전수의 변화에 따른 연소과정 변화를 관찰하였다. 고정층 연소로에서는 유량의 변화가 연소 과정에 미치는 영향을 실험하였다.

### 4.3 유동층 연소로 실험

Figure 7은 유동층 연소로 실험에서 다른 실험 조건에서의 연소 과정을 탄소 기준 인자로 나타낸 대표적인 결과이다. 연소 속도에 해당되는 탄소의 전환 속도를 보면 입자의 크기가 작은 경우와 수분 함량이 적을 때 연소 속도가 커지는 것은 건조된 2cm 크기의 입자 실험 결과와 나머지 결과를 비교함으로써 알 수 있다.

입자 크기가 작을 때 초기 반응(탈휘발 과정) 속도의 증가가 눈에 띄게 나타나고 있다. 수분 함량이 많아지면서 탈휘발 과정에서 연소 속도가 감소하지만 연소 속도는 시간이 지남에 따라 회복되고 있다. 수분 함량이 높을 경우에도 연소 시작 시점이 늦춰지지 않는 것을 관찰할 수가 있다.

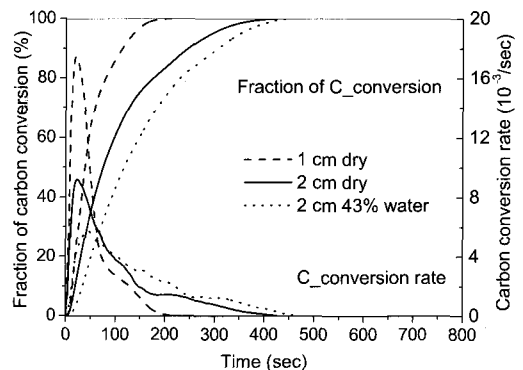


Fig. 7 Fraction and rate of carbon conversion : FBC,  $T_{bed}$  700°C

Figure 8 에는 유동층 연소로에서 나무 입자의 크기 변화에 따른 평균 탄소 전환시간 변화를 나타내었다. 입자의 크기가 클수록 연소 시간이 길어지고 있음을 보여주고 있는데, 이는 입자의 크기가 클수록 질량당 표면적이 줄어들기 때문에 가열 시간이 늦어지고 확산 속도가 감소하여 탈휘발 속도가 느려지며 표면 반응(surface reaction) 인 최 연소 속도 역시 느려지기 때문이다.

Figure 9 에는 나무 입자 내 수분 농도 변화에 따른 평균 탄소 전환시간 변화를 나타내었다. 수분의 함량이 증가할수록 연소 시간이 길어지고 있는데, 이는 수분함량이 증가하면 입자의 온도 증가율이 감소하여 입자 내부 온도에 지배를 받는 연소 속도가 줄어들기 때문이다. 그러나 입자 크기를 변화시키면서 실험했을 때와 비교했을 때 평균 탄소 전환 시간의 변화는 크지 않은 편이다. 이는 유동층 연소로에서는 수분 함량이 높은 연료가 투입되는 경우에도 유동층의 큰 열용량에 의해 베드 온도는 설정온도를 유지하기 때문이며, 건조가 끝난 표면에서는 연소가 동시에 진행되기 때문에 평균 연소 시간 변화량이 비교적 크지 않는 것으로 판단된다. 그러나 운전시에 고체 연료 내 수분 함량의 영향은 무시할 수 없음을 또한 확인할 수 있다. 특히 나무의 경우에는 최대 수분 함량에 있어서 한계를 가지고 있으나, 슬러지와 같은 연료의 경우에는 수분 함량이 80% 이상으로 높을 수 있기 때문에 이러한 경우에는 연소 진행 속도가 큰 영향을 받게 될 것으로 보인다.

Figure 10 에는 유동층 연소로 내 초기 온도 변화에 따른 평균 탄소 전환시간 변화를 나타내었다. 예상할 수 있는 바와 같이 초기 온도가 높을수록 연소 진행이 더 빨라지고 있음을 볼 수 있으나, 그 영향은 연료 내 수분 농도가 미치는 영향의 정도와 비슷하게 나타나고 있다. 베드 온도가 높아지면 입자의 가열이 가속되기 때문에 연료 입자는 빨리 연소되는데, 여기에서 유동층 내 온도를 안정적으로 높게 유지하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

결론적으로, 유동층 연소로에서는 베드 온도가 안정적으로 유지될 수 있고 유동층 베드에서 유동 매질의 활동에 의해 혼합 효과가 탁월하다는 장점이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 베드 온도유지와 유동화 특성을 제어하는 것이 매우 중요하다. 베드 온도를 유지하기 위해서는 폐기물의 연소 특성에 따른 예열온도 조절, 1,2차 공기량 배분을 통한 베드/프리보드 연소 부담을 조절 등이 필요하다. 이와 같은 제어 개념이 설계/운전 조건에 반영되어야 한다.

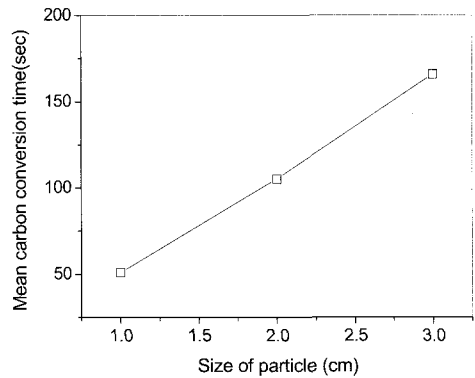


Fig. 8 MCCT : FBC size 1, 2, 3cm,  $T_{bed}$  70  $^{\circ}$ C

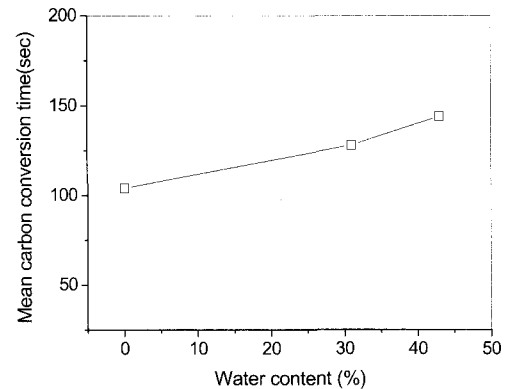


Fig. 9 MCCT : FBC size 2cm, water 0-43%,  $T_{bed}$  700  $^{\circ}$ C

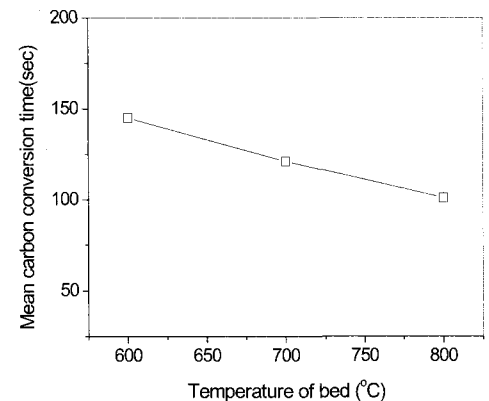


Fig. 10 MCCT : FBC size 2cm,  $T_{bed}$  600-800  $^{\circ}$ C

4.4 회전로 연소 실험

Figure 11은 회전로에서 조건 변화에 따른 연소 과정의 변화를 보여주는 대표적 결과를 나타낸 것이다. 유동층 연소로 실험 결과와 마찬가지로 입자의 크기가 작고 수분 함량이 적을 때 연소 속도가 빠른 것을 알 수 있다. 회전로에서는 유동층 연소로에서와 다르게 수분 함량이 높은 연료가 투입되었을 때 투입된 입자가 본격적으로 연소 될 때까지 시간이 지연된다. 이것은 입자 투입 초기에 수분 증발열에 의해 로내 온도가 떨어지기 때문이다.

Figure 12, 13, 14는 회전로에서 나무 입자의 크기, 수분함량 그리고 회전속도 변화에 대해 평균 탄소 전환 시간을 나타낸 결과이다.

입자 크기와 수분함량을 변화시켰을 경우 유동층 연소로 실험 결과와 같은 결과를 보이고 있다. 실험 조건이 다르기 때문에 두 연소로 실험 결과를 직접적으로 비교하는 것은 불가능하지만 상대적으로 비교했을 때 회전로의 경우가 이 두 인자의 영향을 크게 받는 것을 볼 수 있다. 회전로는 입자의 연소과정에서 발생한 열이 회전로의 온도를 변화시키기 때문에 베드 온도가 크게 변하지 않는 유동층 연소로보다 입자의 연소 특성에 영향을 더 받는다.

Figure 14는 로의 회전 속도에 따른 연료의 반응 과정에 대한 실험 결과이다. 회전 속도의 증가는 입자의 혼합을 좋게 하여 산소와 접촉 효율, 벽면으로부터의 열전달 효율을 높이기 때문에 반응 속도를 증가시킨다. 연료 투입량이 많다면 회전수가 연료 입자의 반응에 더욱 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

결론적으로, 회전로의 경우에는 유동층 연소로에 비해 연료의 연소 속도가 로내 조건에 미치는 영향이 훨씬 더 큼을 알 수 있었으며, 연소 속도를 안정적으로 유지하기 위해서는 연소로의 회전 속도를 조절함으로써 연료의 교반으로 인한 혼합을 증진시켜 층 전체에서 반응이 일어나도록 하는 것이 중요함을 알 수 있다. 이와 함께 회전식 로에서는 건조 영역, 열분해 영역, 촉 연소 영역이 길이 방향으로 구분되어 존재할 것으로 예측되므로, 로 온도, 회전속도, 경사각의 조절을 통한 연소 영역 위치를 제어하는 것이 필요하다.

4.5 고정층 연소로 실험

고정층 연소로의 경우 앞의 두 연소로와 다르게 연소 과정이 진행되기 때문에 같은 실험 인자를 적용할 수가 없다. 회전로와 유동층 연소로에서는 투입된 입자들이 동시에 같은 연소과정으로 시간에 따라 반응이 진행되지만 고정층 연소로의 경우 반응영역에서만 연소가 진행되고 나머지 영역에서는 연소가 일어나지 않는다.

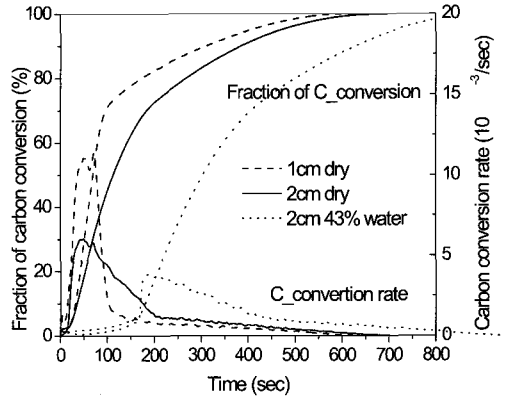


Fig. 11 Fraction and rate of carbon conversion : rotary kiln, T<sub>wall</sub> 600°C

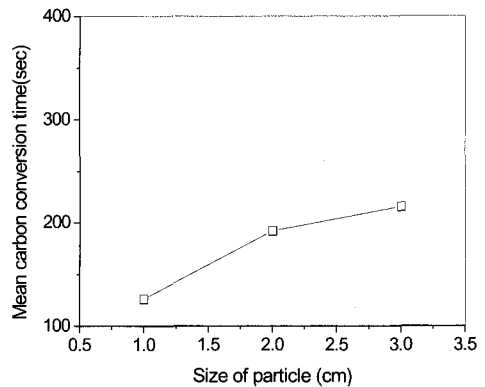


Fig. 12 MCCT : rotary kiln size 1, 2, 3cm, T<sub>wall</sub> 600°C

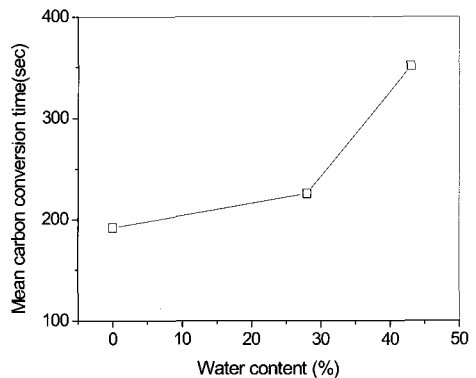


Fig. 13 MCCT : rotary kiln size 2cm, water 0-43%, T<sub>wall</sub> 600°C

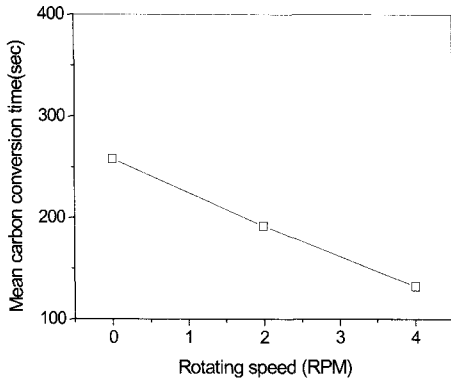


Fig. 14 MCCT : rotary kiln size 2cm, RPM 0~4  $T_{wall}$  600°C

고정층 연소로에서는 화염 전파 속도를 실험 인자로 선택하여 실험하였다. 화염 전파속도는 연료층 내부에서 화염이 전파되어 내려가는 빠르기를 의미하며, 이 실험에서 각 경우별로 연소상황을 대표하는 수치로 이용되었다[9].

화염 전파 속도는 연소로에 위치별 온도 측정 결과로부터 구한다. Fig. 15는 연소실 내부의 온도 측정결과와 예이다. 화염이 전파되어 측정되는 지점에 도달하면 온도가 급격히 상승하고 이후 연소 가스 온도와 평형을 이룬다. 위치별 온도 분포로부터 연소 영역의 위치를 파악할 수 있다.

Figure 16, 17, 18은 고정층 연소로에서 나무 입자의 크기, 수분함량 그리고 유량의 변화에 대한 실험 결과로 기존 논문[9]에서 발표된 결과이다. 크기와 수분함량이 증가할수록 연소 과정이 느려지는 것을 관찰 할 수 있다. 입자 크기 변화에 대한 연소 속도의 변화는 상대적으로 작은 것으로 나타난다.

Figure 18은 유량 변화에 대한 실험 결과이다. 유량이 200 l/min 보다 적은 경우 유량 증가는 산소 공급을 원활하게 하여 연소 속도를 증가시키지만 그 후 지나치게 많은 유량 공급은 연료층을 냉각시켜 연소를 지연시키는 결과를 초래한다.

고정층 연소로 실험 결과로부터 연소가 시작되어 전파되는 과정에서는 연소량이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다. 연료층 상부로부터 건조가 끝난 다음 연소가 시작되면서 연소량이 일정하게 유지되는 영역이 화격자 상부에 존재한다는 것을 위 실험 결과로부터 예측할 수 있다. 이 영역의 크기와 위치를 제어하는 것이 연소 효율을 높이는 데 중요하다. 연소 영역의 크기와 위치는 유량, 연료의 반응성, 층의 두께 등에 의해 결정될 것이다. 연료 층의 두께는 화격자 이송속도와 연료 피딩 속도에 의해 결정된다. 연소

영역이 결정되면 화격자 하부 유량 배분비를 조절하여 연료층에 유량 공급을 최적화하는 작업이 필요하며, 추가적으로 공기 부족 영역과 과잉 영역이 존재하지 않도록 해야 한다.

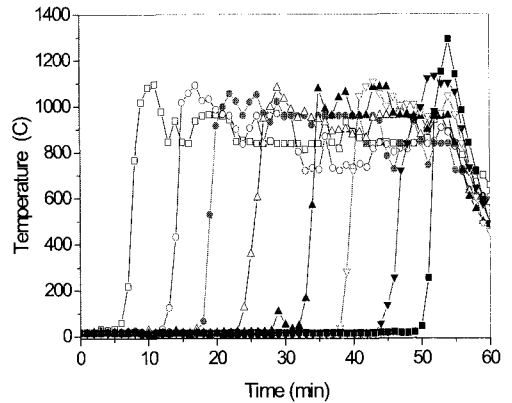


Fig. 15 Time-resolved temperature curves at the measuring points : size 1cm, 30% water

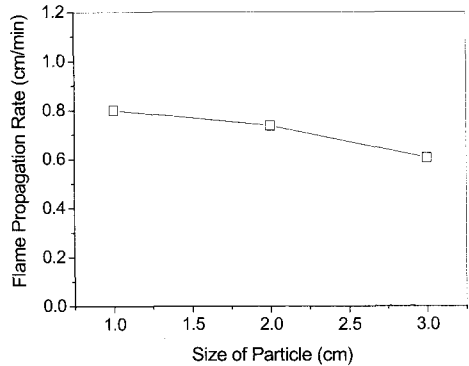


Fig. 16 FPR ; size 1, 2, 3 cm,  $T_{wall}$  850°C

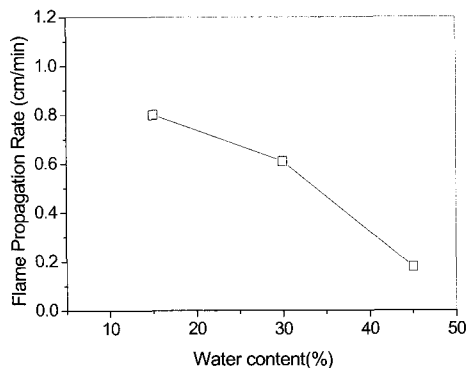


Fig. 17 FPR ; size 2.5cm, water 15, 30, 45%,  $T_{wall}$  850°C

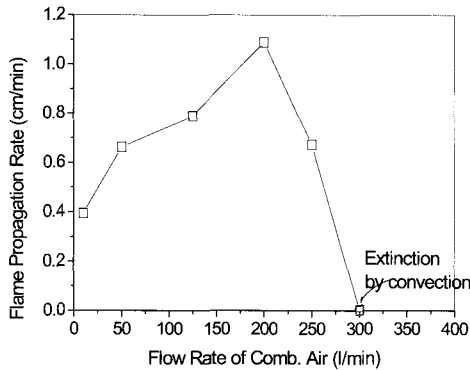


Fig. 18 FPR ; flow rate 10 - 300 l/min,  $T_{wall}$  850°C

#### 4.6 연소로 형식별 운전인자들의 영향

본 실험을 통해서 연료의 크기, 연료 내 수분 함량 및 공기 공급량과 같은 주요 운전 인자들이 연소로별로 미치는 영향의 정도를 파악할 수 있었다.

유동층 연소로에서는 연료 내 수분 함량이나 초기 온도보다 입자의 크기가 더 많은 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있었는데, 이는 앞에서 기술한 것처럼 유동층의 열용량이 다른 형식의 연소로에 비해 훨씬 크기 때문인 것으로 보여진다. 반면에 유동층 내 연료는 공기와의 접촉면이 비교적 넓기 때문에 입자의 크기에 의한 영향이 훨씬 더 큰 것으로 보여진다. 그러므로 유동층 연소로의 운전을 위해서는 연료의 물리적 성상을 설정하는 것이 훨씬 더 중요하다고 할 수 있다.

회전식 로에서는 유동층 연소로와는 달리 연료가 층을 이루고 있기 때문에, 입자의 크기에 의한 영향도 무시할 수는 없지만 연료 내 수분 함량이나 회전수의 변화에 따른 연료의 혼합이 더욱 중요한 운전인자가 되고 있음을 확인할 수 있었다.

고정층 로에서는 층내 교반이 다른 연소로에 비해 더욱 일어나기 힘든 환경이므로 입자 크기에 의한 영향은 훨씬 작고, 회전식 로와 같이 연료 내 수분 함량이나 공기 공급량이 더욱 중요한 운전인자가 되고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 회전식 로나 고정층 로 (또는 화격자식 연소로)와 같이 연료가 층을 이루는 경우에는 입자의 물리적 성상보다는 공기 공급량이나 층내 혼합 등에 관련된 운전 인자 설정이 매우 중요함을 알 수 있다. 물론, 연료의 물리적 성상 역시 무시할 수 있는 인자가 아니며, 이에 관련된 운전 인자 설정에도 주의를 기울여야 할 것이다.

## 5. 결론

유동층 연소로, 고정층 연소로, 회전식 연소로의 연소 현상을 실험적으로 관찰하기 위해 단순화된 실험 모형을 제작하여 형식별 연소 특성을 실험적으로 관찰할 수 있었다. 연료 입자의 반응성을 조절하기 위해 입자 크기, 수분함량을 변화시켰다. 반응성이 떨어지는 경우 연소 시간이 길어지는 경향을 보였으며 연소로 형식별로 차이를 보였다. 유동층 연소로의 경우에는 입자 크기와 같은 연료의 자체 특성이, 회전식 로나 고정층 로와 같이 연료가 쌓여 있는 경우에는 공기 공급량과 같은 운전 인자가 상대적으로 더 중요함을 확인할 수 있었다.

축소 규모 실험 장치에서 관찰된 연소 현상으로부터 실제 연소로 운전 상황을 제한된 범위에서 예측할 수 있었으며 각 연소로의 특성에 맞는 설계 인자를 정리하였다.

## 감사의 글

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원을 받아 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] 김성중, 최상민, "도시 쓰레기 소각로 기술 분석," 한국폐기물학회지, 제 11 권, 제 1 호, 1994, pp. 41-58.
- [2] 김승기, 유영돈, 김성중, 최상민, "소각로 개발 관련 연구," 대한기계학회지, 제 34 권, 제 8 호, 1994, pp. 632-642.
- [3] 최진환, 박영호, 최상민, "고체 폐기물 연료의 유동층 시험 연소로 특성 및 실험 인자 설정," 한국화학공학회지, Vol. 39, No.5, 2001.
- [4] 차왕석, 김성현, 홍성창, 오광중, 도동섭, "유동층 연소로에서 granulation에 의한 미세 입자의 연소효율 향상," 한국화학공학회지, Vol. 31, No.6, 1993, pp. 824-830.
- [5] 최정후, 손재익, 김상돈, "고회분 무연탄의 유동층 연소특성," 한국화학공학회지, Vol. 26, No.5, 1988, pp. 494-502.
- [6] 박영성, 김영성, 손재익, 맹기석, "석탄유동층 연소로에서의 Freeboard 연소특성," 한국화학공학회지, Vol. 28, No. 5, 1990, pp. 568-575.
- [7] F. Winter, M. E. Prah, and H. Hofbauer, "Temperature in a fuel particle burning in a fluidized bed," COMBUSTION AND FLAME, Vol. 108, 1997, pp. 302-314.
- [8] T. Ogada and J. Werther, "Combustion



characteristics of wet sludge in a fluidized bed," *Fuel*, Vol. 75, No. 5, 1996, pp. 617-626.

[9] 민지현, 신동훈, 최상민, "폐기물 소각로 베드에서의 연소현상 관찰을 위한 실험적 연구," *대한기계학회지*, Vol. 23, No. 2, 1999, pp. 159-165.

[10] J. E. Rojer, A. F. Sarofim, J. B. Howard, and G. C. Williams, "Combustion characteristics of simulated and shredded waste," 15th Int. Symp. on Combustion, 1974, pp. 1137-1148.

[11] M. I. Hobbs, P. T. Radulovic, and L. D. Smoot, "Modeling fixed-bed coal gasifiers," *AIChE Journal*, Vol.38, No.5, 1992, pp. 681-702.

[12] H. Henein, J. K. Brimacombe and A. P.

Watkinson, "Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns," *METALLURGICAL TRANSACTIONS B*, Vol. 14b, 1983, pp. 191-205.

[13] W. Kose and W. Wiest, "Experiments and mathematical modeling of maize pyrolysis in a rotary kiln," *Fuel*, Vol. 78, 1999, pp. 65-72.

[14] I. T. Lau and F. D. Friedrich, "Influence of fuel properties on fluidized bed combustion," *AIChE symposium series*, Vol.84, No.262, 1980, pp. 89-101.

[15] 최진환, 박영호, 최상민, "고체 폐기물 연료의 유동상 연소-연료 특성 및 운전 인자 변화," *한국폐기물학회지*, Vol. 18, No.3, 2001, pp. 1-9.