

다양한 종류의 연소로 형식에서 고체 연료 특성이 연소과정에 미치는 영향

최진환* · 양원* · 이상득* · 최상민*

Effects of solid fuel combustion characteristics in various combustor types

Jinhwan Choi, Won Yang, Sangdeuk Lee and Sangmin Choi

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

Abstract

Three Lab-scale combustors of different types were made to observe some basic phenomena of fuel combustion in the combustors ; grate type combustor, rotary kiln and FBC. The aims were to introduce how to simulate the combustion behaviors in the real plants by utilizing the reduced apparatuses and characterize the combustors relating to some important parameters such as fuel size, water contents, bed temperature, rotating speed of kiln, flow rate. The mean carbon conversion time and the flame propagation rate were adopted for the quantitative analysis.

기호설명

C_i : concentration of i gas, mol/Nm^3
MCCT(\bar{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. 서론

고체 폐기물 처리로서의 소각 방식은 폐기물을 무해화 하는 동시에 그 양을 크게 줄일 수 있기 때문에 매력적인 처리 대안으로 여겨지고 있으며 90년대 이후 소각로 건설이 활발히 진행되어 있다. 그러나 소각로에서 발생하는 공해 물질이 사회적 문제로 대두되면서 공해 물질의 1차적인 저감을 위한 연소기의 올바른 설계 및 운전이 중요해 지고 있다[1,2].

*한국과학기술원 기계공학과

고체 폐기물은 도시 폐기물에서 공장, 농업 폐기물에 걸쳐 그 종류가 매우 다양하다. 종류의 다양성만큼 고체 폐기물의 연소 특성도 종류에 따라 크게 차이를 보이기 때문에 폐기물의 연소 특성에 따라 연소로의 종류를 결정하고 설계 운전 방식을 최적화하는 것이 필요하다. 이 목적을 달성하기 위해서는 종류에 따른 연소로의 장단점을 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 정리하는 것을 목적으로 한다.

2. 연소로 모형

Fig. 1 은 유동층 연소로에서 입자의 연소에 대한 개념도이다. 투입된 고체 연료는 유동층의 유동사가 존재하는 베드에 체류하며 여기서 반응과정이 진행된다. 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[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].

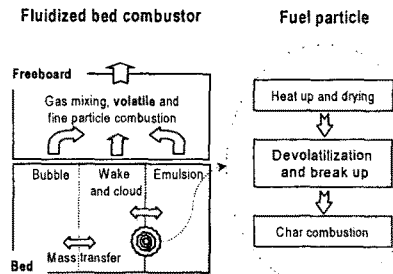


Fig. 1. Conceptual description of solid fuel combustion in a fluidized bed combustor.

Fig. 2 는 화격자식 연소로에서 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, 화연소 등의 반응 거치게 되고 하층까지 연소된 후의 최종 산물인 재는 재호퍼를 통해 배출된다.

연속운전되는 화격자 위의 폐기물층의 단면 방향 영역을(Fig. 2에 표시된 영역) 대상으로 공간축을 시간축으로 전환하면 고정층 연소로 형태의 실험 장치로 모형화가 가능하다[9,10,11].

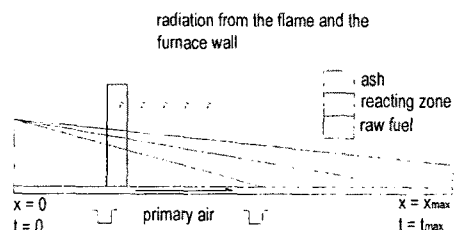


Fig.2 Conceptual description of waste bed combustion in the grate type incinerator

Fig.3에 나타낸 바와 같이 실제 회전식

로에서 연료는 로의 경사면을 따라 진행하면서 소각된다. 그림과 같이 로의 단면으로 자른 영역을 대상으로 하면 경사가 없는 짧은 길이의 회전로의 형태로 모형화 할 수 있다[12,13]. 화격자 연소로 모형과 같이 로의 공간축은 시간축으로 바뀌게 된다.

2. 실험 방법 및 장치

2.1. 유동층 연소로

실험 장치는 Fig. 4와 같이 지름 100mm 스테인레스 관으로 만들어진 높이 1100mm의 원통 유동층 연소로이다. 유동층 베드는 평균 지름이 550 μ m인 모래로 이루어졌으며 높이는 200mm 이고

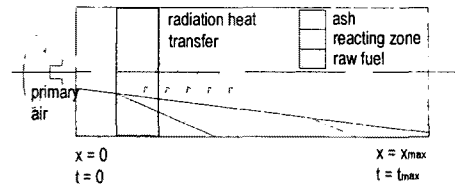


Fig. 3 Conceptual description of waste bed combustion in the rotary kiln

최소 유동화 속도는 상온에서 0.15m/sec 이다. 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.

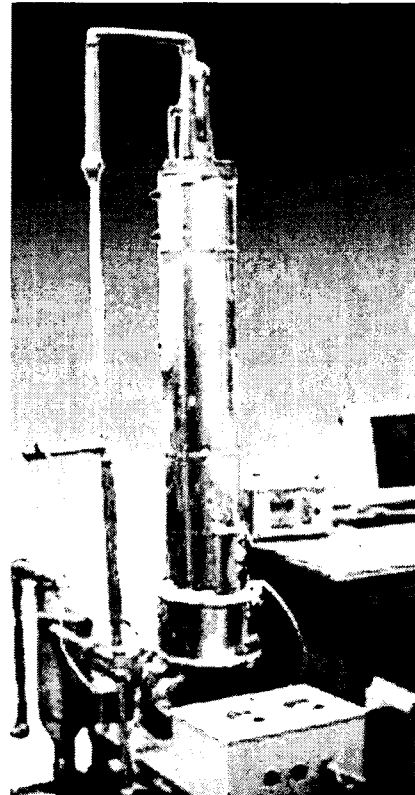
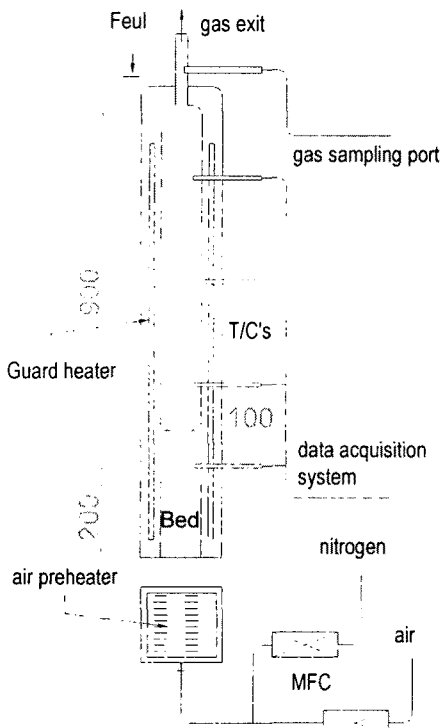


Fig. 4 Lab-scale fluidized bed combustor

연속적으로 기록되는 배가스 농도를 통해 연소 과정을 관찰하였다.

2.2. 고정층 연소로

화격자 위에서의 폐기물의 연소를 예측하기 위한 고정층 연소로의 개념도가 Fig. 5에 나타나 있다.

2차 연소실 상부에 설치된 전기 히터를 가동하여 복사열을 폐기물 층에 보낼 수 있도록 하였다. 벽면온도를 일반적인 연소실 온도인 850 °C까지 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].

2.3. 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.

2.4 개념 정의 및 분석법

유동층 연소로와 회전로 실험에서는 측정된 CO₂, C_xH_y와 CO 농도를 이용하여 연소된 탄소량을 계산하였으며 이것으로부터 탄소 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec), 탄소 전환량(fraction of carbon conversion, %)과 평균 탄소 전환 시간(MCCT, mean carbon conversion time, sec) 등을 계산하였다. 자세한 해석 방법과 한계는 이전에 발표된 논문에 제

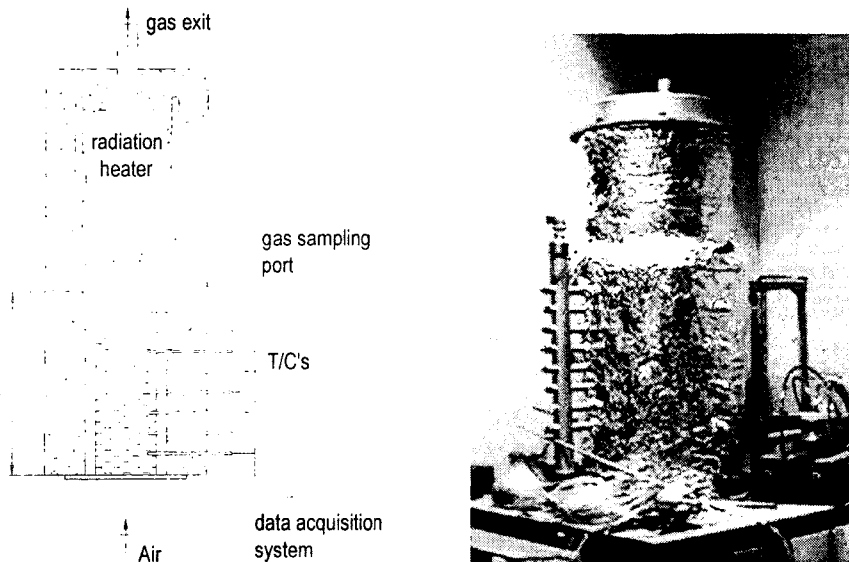


Fig. 5 Fixed bed combustor

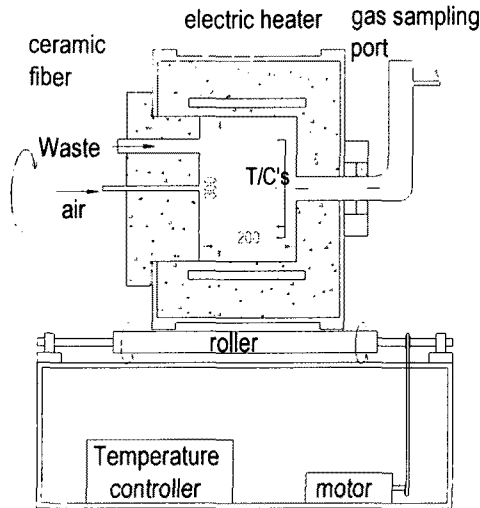


Fig. 6 Lab-scale rotary kiln



시되었다[3,14,15].

고정층 연소로에서는 연료 층에서 측정된 온도를 이용하여 화염 전파속도 (FPR, Flame propagation rate, cm/min)를 계산하였으며 이것에 대한 정의 역시 이전 발표 논문에 제시되었다[9].

3. 실험 결과

3.1. 로의 형태에 따른 연소 현상

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

고정층 연소로에서는 2차 연소실 벽면으로부터 복사열을 받는 연료 층의 상부

로부터 시작되어 하부로 전파되는 과정으로 연소가 진행된다. 화염이 전파되는 동안 연소 가스 농도와 로의 온도는 거의 일정하게 유지된다.

회전로의 경우도 고정층 연소로와 마찬가지로 로 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.

3.2. 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 실험하였

다. 유동층 연소로에서는 베드 온도를 변화시켜 온도의 영향을 관찰하고 회전로에서는 회전수의 변화에 따른 연소과정 변화를 관찰하였다. 고정층 연소로에서는 유량의 변화가 연소 과정에 미치는 영향을 실험하였다.

유동층 연소로 실험

Fig. 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.

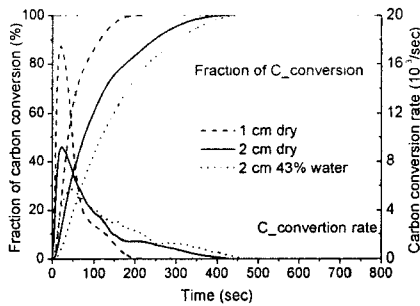


Fig. 7 Fraction and rate of carbon conversion : FBC, $T_{bed} 700^{\circ}C$

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 회복하고 있다. 수분 함량이 높을 경우에도 연소 시작 시점이 늦춰지지 않는 것을 관찰할 수가 있다.

Fig. 8, 9, 10은 유동층 연소로에서 나

무 입자의 크기, 수분함량 그리고 베드의 온도 변화에 대해 평균 연소 시간을 의미하는 평균 탄소 전환시간을 나타낸 결과이다. 입자의 크기와 수분의 함량이 증가할수록 연소 시간이 길어지고 높은 베드 온도에서 연소시간이 짧아진다.

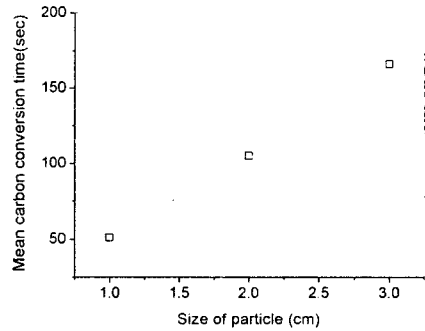


Fig. 8 MCCT : FBC size 1, 2, 3cm, $T_{bed} 700^{\circ}C$.

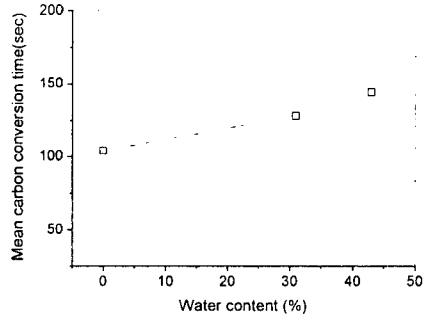


Fig. 9 MCCT : FBC size 2cm, water 0~43%, $T_{bed} 700^{\circ}C$.

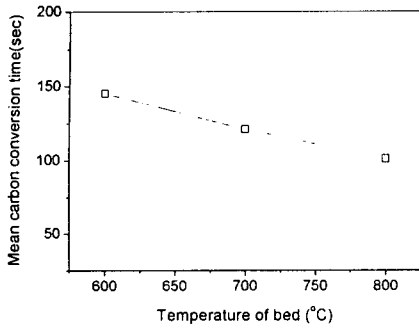


Fig. 10 MCCT : FBC size 2cm, T_{bed} 600~800°C.

입자의 크기가 작을수록 빠르게 가열되고 질량당 표면적이 증가하기 때문에 탈휘발 속도와 최 연소 속도 모두 증가하고 결과적으로 연소 시간이 줄어든다.

수분함량이 증가하면 입자의 온도 증가율이 감소하여 입자 내부 온도에 지배를 받는 연소 속도가 줄어든다. 수분 함량이 높은 연료가 투입되는 경우에도 베드의 큰 열용량에 의해 베드 온도는 설정온도를 유지한다. 건조가 끝난 표면에서는 연소가 동시에 진행되기 때문에 평균 연소 시간이 크게 변하지 않는 것으로 판단된다.

베드 온도가 높아지면 입자의 가열이 가속되기 때문에 연료 입자는 빨리 연소된다.

회전로 연소 실험

Fig. 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 입자

가 본격적으로 연소 될 때까지 시간이 지연된다. 이것은 입자 투입 초기에 수분 증발열에 의해 로내 온도가 떨어지기 때문이다.

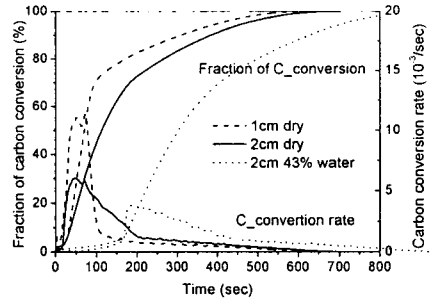


Fig. 11 Fraction and rate of carbon conversion : rotary kiln, T_{wall} 600°C

Fig. 12, 13, 14은 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.

Fig. 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 많아지면 회전수가 연료 입자의 반응에 더욱 중요

한 역할을 할 것으로 판단된다.

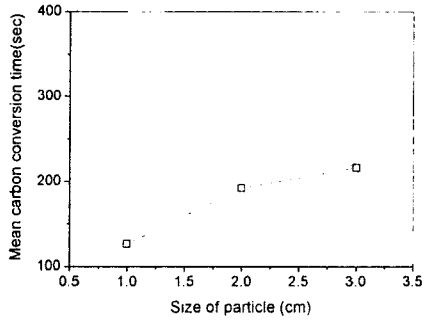


Fig. 12 MCCT : rotary kiln size 1, 2, 3cm, T_{wall} 600°C.

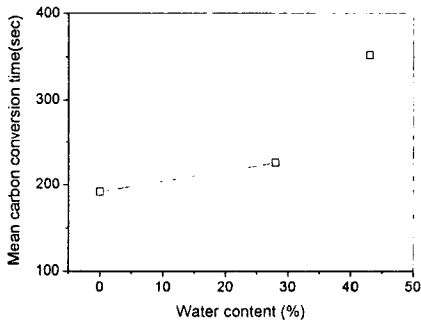


Fig. 13 MCCT : rotary kiln size 2cm, water 0 ~ 43%, T_{wall} 600°C.

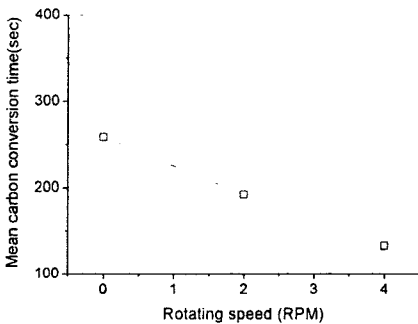


Fig. 14 MCCT : rotary kiln size 2cm, RPM 0 ~ 4 T_{wall} 600°C.

고정층 연소로 실험 결과

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.

고정층 연소로에서는 화염 전파 속도를 실험인자로 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 연소가스 온도와 평형을 이룬다. 위치별 온도 분포로부터 연소 영역의 위치를 파악할 수 있다.

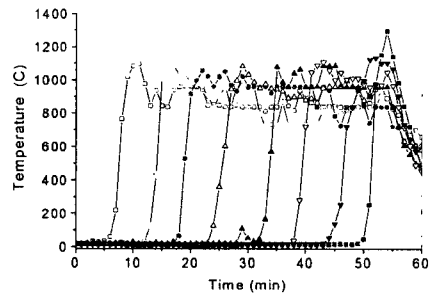


Fig. 15 Time-resolved temperature curves at the measuring points : size 1cm, 30% water

Fig. 16, 17, 18는 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.

Fig. 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.

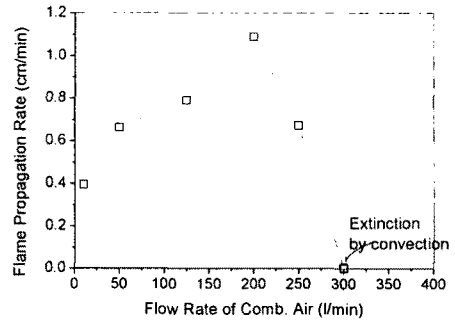


Fig. 18 FPR ; flow rate 10 ~ 300 l/min, T_{wall} 850°C

4. 연소로 설계 인자

4.1 유동층 연소로

베드 온도가 안정적으로 유지될 수 있고 유동층 베드에서 유동 매질의 활동에 의해 혼합 효과가 탁월하다. 베드 온도 유지와 유동화 특성을 제어하는 것이 필요하다. 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.

4.2 화격자식 연소로

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 의

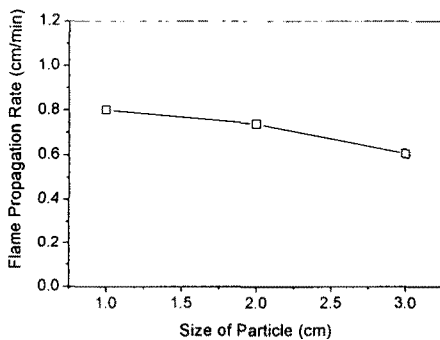


Fig. 16 FPR ; size 1, 2, 3 cm, T_{wall} 850°C

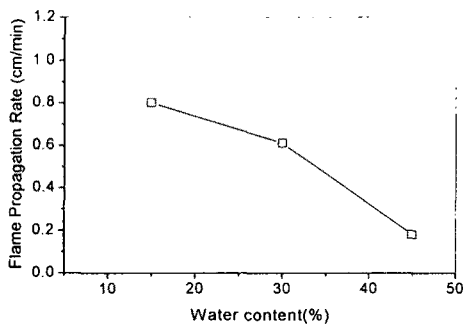


Fig. 17 FPR ; size 2.5cm, water 15, 30, 45%, T_{wall} 850°C

해 결정될 것이다. 연료 층의 두께는 화격자 이송속도와 연료 피딩 속도에 의해 결정된다. 연소 영역이 결정되면 화격자 하부 유량 배분비를 조절하여 연료층에 유량 공급을 최적화하여 공기 부족 영역과 과잉 영역이 존재하지 않도록 해야 한다.

4.3 회전식 연소로

회전로에서 연료가 투입되면 로의 회전운동과 경사에 의한 중력의 작용으로 화격자식 연소로에서와 같이 로 하부로 이송되어진다. 화격자식 연소로와 다른 점은 회전하는 로에 의해 층의 교반이 일어나 연료가 혼합되어 반응이 층 전체에서 일어난다는 것이다. 결과적으로 회전식 연소로에서는 건조 영역, 열분해 영역, 화 연소 영역이 회전로의 길이 방향으로 구분되어 존재할 것으로 예측된다. 회전로에서는 로 온도, 회전속도, 경사각의 조절을 통한 연소 영역 위치를 제어하는 것이 필요하다.

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.

축소 규모 실험 장치에서 관찰된 연소 현상으로부터 실제 연소로 운전 상황을 제한된 범위에서 예측할 수 있었으며 연소로의 설계 인자를 형식별로 정리하

였다.

참고문헌

- (1) 김성중, 최상민, "도시 쓰레기 소각로 기술 분석", 한국폐기물학회지, 제 11 권, 제 1 호, pp.41-58 (1994)
- (2) 김승기, 유명돈, 김성중, 최상민, "소각로 개발 관련 연구", 대한기계학회지, 제 34 권, 제 8 호, pp.632-642. (1994)
- (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, pp. 824-830, 1993
- (5) 최정후, 손재익, 김상돈, "고회분 무연탄의 유동층 연소특성", 한국화학공학회지, Vol. 26, No.5, pp. 494-502, 1988
- (6) 박영성, 김영성, 손재익, 맹기석, "석탄유동층 연소로에서의 Freeboard 연소특성", 한국화학공학회지, Vol. 28, No. 5, pp. 568-575, 1990 "
- (7) F. Winter, M. E. Prah, and H. Hofbauer, "Temperature in a fuel particle burning in a fluidized bed", COMBUSTION AND FLAME, Vol. 108, pp. 302-314, 1997
- (8) T. Ogada and J. Werther, "Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed", Fuel, Vol. 75, No. 5, pp. 617-626, 1996

- (9) 민지현, 신동훈, 최상민, "폐기물 소각로 베드에서의 연소현상 관찰을 위한 실험적 연구", 대한기계학회지, Vol. 23, No. 2, pp. 159-165, 1999
- (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, pp. 1137-1148, 1974
- (11) M. I. Hobbs, P. T. Radulovic, and L. D. Smoot, "Modeling fixed-bed coal gasifiers", AIChE Journal, Vol.38, No.5, pp. 681-702, 1992
- (12) H. Henein, J. K. Brimacombe and A. P. Watkinson, "Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns", METALLURGICAL TRANSACTIONS B, Vol. 14b, pp. 191-205, 1983
- (13) W. Kose and W. Wiest, "Experiments and mathematical modeling of maize pyrolysis in a rotary kiln", Fuel, Vol. 78, pp. 65-72, 1999
- (14) 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, 1980
- (15) 최진환, 박영호, 최상민, "고체 폐기물 연료의 유동상 연소 - 연료 특성 및 운전 인자 변화", 한국폐기물학회지, Vol. 18, No.3, pp.1-9, 2001