

폐기물 소각로 베드에서의 연소현상 관찰을 위한 실험적 연구

민지현* · 신동훈** · 최상민***

(1998년 2월 17일 접수)

An Experimental Study on the Bed Combustion Phenomena in MSW (Municipal Solid Waste) Incinerator

Jee Hyun Min, Donghoon Shin and Sangmin Choi

Key Words : Incinerator(소각로), MSW (도시폐기물), Solid Fuel Bed Combustion (고체연료 층연소), Combustion Chamber(연소실), Flame Propagation Rate (연소진행속도)

Abstract

Experimental studies have been performed to observe the basic phenomena of waste bed combustion in MSW incinerator. A reduced scale apparatus was utilized to simulate the combustion behavior in real plant with 1-dimensional transient behavior at the experimental setup, which uses wet cubic wood with ash content as simulated waste. LHV (lower heating value) of solid fuel, fuel particle size and flow rate of combustion air were taken as important parameters of the bed combustion. For the quantitative analysis, FPR (flame propagation rate), TBT (total burn-out time) and PBT (particle burn-out time) was defined. LHV represent the capability of heat release of the fuel, so that a higher LHV results in faster reaction rate of the fuel bed, which is shown by higher FPR. Fuel particle size is related with surface area per unit mass as well as heat and mass transfer coefficient. As the particle size increases, the FPR decreases owing to decreasing specific surface area. Air injection supplies oxygen to the reaction zone. However oversupply of combustion air increases convection cooling of the bed and possibly extinguishes the flame.

1. 서론

현재 우리나라 도시 폐기물 처리는 주로 화격자(Stoker)식 소각로에 의존하고 있다. 소각로를 구성하는 여러가지 장치들 중에서, 공해물질의 1차적인 저감을 위해서는 연소실의 올바른 설계와 운전이 무엇보다도 중요한 위치를 차지한다^[1]. 스토커식 소각로에서 연소실은 폐기물의 실질적인 연소가 발생하는 1차 연소실과 가스 유동의 혼합 및 미연가스의 파괴현상이 발생하는 2차 연소실로 구분된다. 지금까지 소각로 관련 연구들은 주로 2차 연소실에서의 열유동 최적화에 초점을 두고 진행되었다^[2-6]. 2차 연소실 각 부위의 온도, 체류시간, 난류와 산소 농도 등을 제어하여 효율적인 연소 분위기를 조성하기 위하여 연소실의 형

상이나 2차 공기 주입 방법 등 설계와 운전요소를 최적화하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 투입된 폐기물이 가장 먼저 거치는 단계는 화격자 위에서의 베드 연소이므로, 베드에서의 효과적인 연소는 공해물질 제어의 첫번째 전략이 된다^[7].

폐기물 연소는 기체와 고체, 그리고 고체와 고체간의 전도, 대류, 복사에 의한 열전달과 물질 전달이 연소와 함께 복잡하게 연관되어 일어나는 현상이다. 현재까지 고체 폐기물층 연소에 대한 연구로서 미세한 입자물 이용한 연소실험은 어느 정도 진행되었다^[8,9]. 그러나 소각로의 베드에서는 다양한 종류와 크기를 가진 입자들이 3차원으로 배열되어 있으며, 또한 시간에 따라 특성이 변화하는 불균일한 연소가 일어나는데, 아직까지 이에 관한 연구는 미비한 실정이다^[7,10]. 실제 플랜트에서 폐기물 베드의 상황 변화를 기준으로 각 장치들의 제어가 이루어지므로, 이에 대한 빠른 예측

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 화원, 한국과학기술원 기계공학과

은 매우 중요하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 실험적 방법을 통하여 스토커식 소각로에서의 폐기물 베드의 연소 특성을 알아보고자 한다. 1차원 파도적 (transient) 축소 규모 연소실험장치가 폐기물 베드에서의 2차원 연소 현상을 모델링 할 수 있도록 제작되었다. 다양한 조건에서의 실험을 수행함으로써 소각로내에서 폐기물 층의 효과적인 연소를 가능케 하는 인자를 찾아내는 것이 목표이며, 이 연구의 결과는 소각로의 연소효율 증진과 연소실 이후의 공해물질 제어 대책을 수립하는데 기본 자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 폐기물층 연소특성

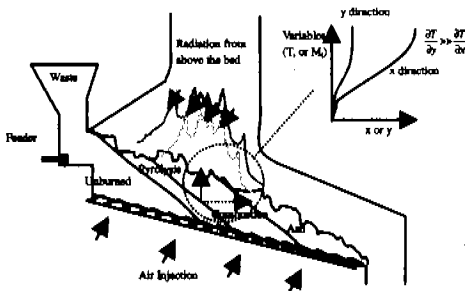


Fig. 1 Conceptual description of waste bed combustion phenomena.

Fig. 1 은 일반 화격자식 소각로의 폐기물층 연소 개념도를 보여준다^[7]. 호퍼와 피더작용에 의해 화격자위로 올려진 폐기물은 층을 이루어 연소가 진행된다. 화격자위로 투입된 폐기물 입자는 연소실로부터 복사열을 받으며 건조, 열분해, 휘발분 연소, 화연소 등의 반응을 거처서 최종 산물인 재는 재호퍼를 통해 배출된다. 한편, 폐기물층은 일종의 불균일한 다공성 매질에 해당하여 상부로부터의 복사 열유속은 층내부로 침투하지 못하고 표면에만 영향을 주게 된다. 대신에 폐기물층 상단에서 시작되는 고온의 연소영역이 복사 열유속 및 전도 열유속을 생성하여 아직 반응하지 않은 부위의 반응을 촉진시키게 된다. 이와 같은 메커니즘으로 반응대는 시간이 지남에 따라 (또는 화격자에서 하류로 이동함에 따라) 폐기물층 안쪽으로 이동하게 되고 화격자에 이르게 되면 대부분의 연소현상이 종료된다. 따라서 Fig. 1 과 같이 폐기물층은 반응특성별로 미반응층, 증발 및 열분해층, 연소층, 재층 등의 여러 구간으로 구분이 된다. 물론 현재까지 다양한 화격자가 개발되어 사용중에 있으며 화격자 별로 다른 구동방식을 갖고 있어

폐기물층내 물질들의 이동현상에 차이가 있을 수 있지만 대부분 개념적인 주장들이고 정량화된 근거는 보고되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 현상의 단순화를 위하여 화격자는 폐기물의 횡적 이동역할에 국한되고 폐기물층 내부의 혼합에는 영향을 주지 않는 경우를 연구대상으로 하였다.

화격자 길이와 폐기물 층 두께는 제작사 및 운전 방식에 따라 달라지지만 일반적으로 도시 폐기물 소각로에서 화격자의 길이는 6 ~10 m에 이르고 폐기물 층 두께는 1~1.5 m에 이르는 것이 보통이다^[12]. 따라서 폐기물층 높이 대 길이의 비는 대략 1/5 ~ 1/10 에 이르게 되고 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 온도, 폐기물 성상 등 연소 인자들의 변화량은 폐기물층 높이 방향이 길이 방향에 비해 훨씬 클 것으로 예상된다. 또한, 연소용 공기의 주입방향도 폐기물층 높이 방향이므로 이 방향으로의 가스 성분 변화폭이 길이방향보다 클 것이 예상된다. 따라서, Fig. 2 에 나타난 바와 같이 폐기물층의 연소현상을 길이방향으로의 열 및 물질전달을 무시한 1차원-파도적 연소현상으로 단순화할 수 있다^[7].

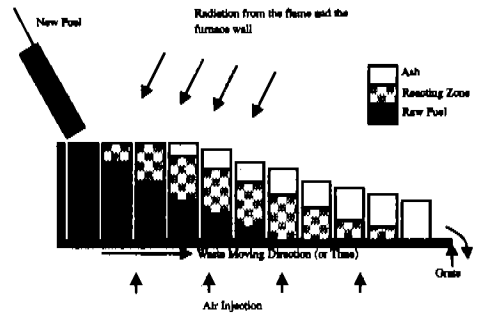


Fig. 2 1-dimensional transient model of the waste bed combustion phenomena.

3. 총연소 실험 설비

3.1 실험 장치의 개요

화격자위에서의 폐기물의 연소를 예측하기 위하여, Fig. 2 에서 보여진 제어 질량을 연소하기 위한 원통형 연소로를 제작하였다. 실험설비의 개념도가 Fig. 3 에 나타나 있다.

투입된 폐기물이 건조되어 착화하기까지의 주요 열원인 상부로부터의 복사열전달과 비슷한 조건을 만들어 주는 것이 필요한데, 이를 위해 2차 연소실의 벽면에 1200K 정도까지 올릴 수 있는 전기 히터를 장착하였다. 전기 히터를 가동하여

원하는 복사열을 폐기물층에 보낼 수 있도록 일정 벽면온도를 일반적 연소실 온도인 850 °C 까지 올리고 난 다음에, 고형 연료가 담겨 있는 원통형 시료통 (지름 15 cm, 높이 45 cm) 을 끼워 넣도록 하였다. 실제 화격자연소와 같이 연소용 공기는 연료층 하단부에서 주입이 되며, 시료통이 연소실에 삽입된 후 온도 측정을 위한 열전대 (K-type)와 화학종 샘플프로브 (probe)가 삽입이 되어 온도 및 화학종 농도를 측정하게 된다. 측정은 2초에 한번씩 수행하였으며 20 초 간격으로 평균을 내어 자료를 생성하였다. 수냉각판으로 채집된 연소가스는 분진 필터, 제습기 등을 거쳐서 O₂ (Paramagnetic) 가스 분석기로 분석되었다. 사용한 연료는 폐기물의 성상을 재현하기 위해 가연분으로는 나왕나무를, 재 성분으로는 내화재(세라크롬, 금강)을 사용하였고 나무를 일정시간동안 침수시켜 발열량을 조절하였다. 이상적으로는 구형으로 시료통 제작하는 것이 바람직하고 해석에도 편하지만 제작상의 어려움으로 정육면체로 제작하였다. 한편, 연료 입자중심의 온도를 측정하기 위해서 시료통에 연료 충전시 선택된 나무입자의 중심까지 구멍을 내어 K-type 열전대를 삽입하였다.

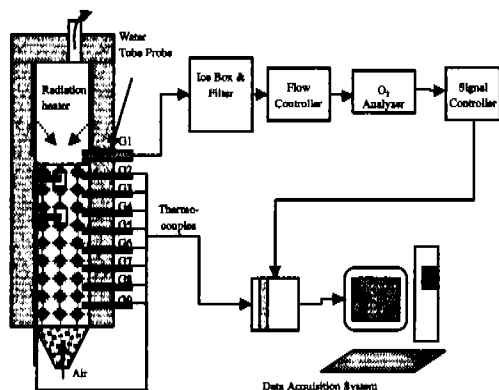


Fig. 3 Schematic diagram of the bed combustion experimental apparatus.

3.2 폐기물 연소의 영향인자

도시 폐기물은 다양한 물질들이 섞여 있으며 그 크기 역시 다양하여 물리 화학적 특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 폐기물 역시 일종의 고체연료로 고려할 수 있으며 고체연료의 전형적인 연소과정인 수분 증발, 열분해, 휘발분 연소, 화연소 등의 과정을 거쳐서 연소가 진행되는 것으로 생각할 수 있다^[7,8,11]. 고체 연료의 대표적인 석탄에 대해서는 비교적 많은 연구가 진행되

어 왔으며 연소에 관련된 인자들의 영향력이 밝혀져 왔다. 공업적으로 주요 인자로 인식되는 것으로는 연료의 발열량, 연료의 크기, 그리고 공기 유량이라 할 수 있다^[7,8,11]. 물론 이외의 석탄에 함유된 무기질의 농도, 다공도 등등의 다양한 영향인자들이 존재하지만, 성상을 예측하기가 불가능한 폐기물 연소에 적용하는 것은 효과적이지 못하다.

Table 1 Experimental condition for the selected cases.

Case	LHV (kcal/kg)	입자크기 (cm)	연소공기 유량 (l/min)
1	2200	2.5	125
2	1600	2.5	125
3	1000	2.5	125
4	1600	1.0	125
5	1600	1.5	125
6	1600	2.0	125
7	1600	3.0	125
8	1600	2.0	10
9	1600	2.0	50
10	1600	2.0	200
11	1600	2.0	250
12	1600	2.0	300

연료의 저위 발열량은 연소 과정에서 발생하는 열의 양을 나타내며, 발열량이 높을수록 많은 열을 방출하여 온도 상승에 따른 연소속도 증가 및 연소의 안정화를 기대할 수 있다. 또한 폐기물의 발열량은 연소지연효과가 있는 수분의 양과 밀접한 관련이 있기에 주요 인자로 고려된다. 연료입자의 크기 역시 주요 인자로서, 입자의 크기가 커질수록 입자내 온도구배가 심해지고 매질의 열 및 물질전달에 영향을 주는 단위체적당 표면적 (specific area)이 감소하게 된다. 폐기물로 유입되는 공기는 기체와 고체상으로 진행되는 반응대에 산소를 공급하여 연소를 촉진시키지만 과도하게 주입하게 되면 대류에 의한 냉각효과가 발생하여 오히려 화염을 소멸시킬 수 있다.

이상의 세가지 인자들은 고체연료 연소의 대표적인 영향인자로서 본연구에서는 폐기물층 연소에 미치는 영향을 평가하기 위하여 이들 인자들을 다양하게 변화시켜가며 실험을 수행하였다 (Table 1).

3.3 개념 정의 및 데이터 분석법

각 경우별로 실험을 수행한 후에는, 베드의 깊이 방향을 따라 5cm 간격으로, 시간에 대해 연속적으로 측정된 가스상의 온도와 입자의 온도, 그리고 역시 시간에 대해 연속적으로 측정된 연소가스 농도의 데이터를 얻을 수 있다. 이들 데이터를 정성적으로 관찰하는 것파 더불어, 정량적으로 분석하기 위하여 기초 실험을 수행하였고, 이를 통해 몇가지 기본적인 정의를 만들었다.

Fig. 4(a)는 Case 4 의 조건으로 실험한 결과로써 깊이 방향으로 5 cm 간격으로 있는 8 개의 측정구를 통해 가스장의 온도를 시간에 따라 연속적으로 측정하였고, 그와 동시에 베드의 상부에서 연소가스중 O₂ 의 농도를 측정한 결과이다 (Fig. 4(b)). 각 지점에서 측정된 온도값들은 연소에 의한 온도 상승후 시간에 따라 비교적 큰 변동폭을 보여주고 있다. 입자의 크기가 커질수록 이러한 현상은 증가하는데 Fig. 5 의 입자크기가 2.5 cm 인 경우는 각 지점에서 의 온도변화가 온도 상승후 매우 불규칙한 형태를 띄는 것을 알 수 있다. 입자의 크기가 커지게 되면 연소실의 지름이 15 cm 로 한정되어 있는 관계로 시료의 균일한 충전이 어려워진다. 이러한 큰 변동폭은 시료통내 공간온도를 임의의 한 점을 통해 측정하는 본 실험의 한계로 등장하였다. 또한 연소가 진행되면 점차 베드의 높이가 낮아지게 되고 때때로 재 성분이 연소실내로 삼입된 열전대에 걸리는 경우 등 예측치 못한 현상들이 발생하기도 하여 이와 같은 불규칙성을 증가시킨다. Fig. 4(b)의 산소 농도 측정결과 역시 불규칙하게 연소가 진행되는 것을 보여준다. 이러한 현상을 해결하기 위해서는 보다 큰 연소기를 사용해서 입자의 충전균일도를 증가시켜야 할 것이다.

a. 화염 전파 속도 (Flame Propagation Rate)

Fig. 4 의 온도 그래프에서, 첫번째 베드층 (G2, 최상단의 온도측정구)의 착화점과 마지막 베드층 (G9, 최하단의 온도측정구)의 착화점의 시간차를 구한 뒤, 두 포트간의 거리 (35 cm)를 이 시간으로 나눈 값을 화염 전파 속도라 정의한다. 이는 베드의 깊이 방향으로 화염이 전파되어가는 속도를 의미하는 값이다.

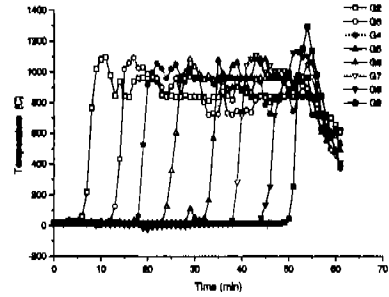
b. 총 연소 시간(Total Burn-out Time)

Fig. 4 (b)에서 연소가 종결되는 시점에서 산소 농도가 증가하다가 공기의 산소 농도인 21 %에 이르러 더 이상 변하지 않는 점이 존재하는데 이 시간은 전체 베드의 연소가 종결되는 시간을 의미하며, 이 시간을 총 연소 시간으로 정의한다.

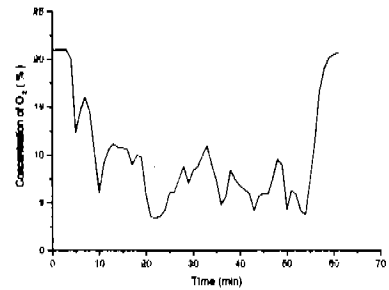
c. 입자 연소 시간 (Particle Burn-out Time)

입자의 연소에 있어서 입자 표면이 착화되는 시점으로부터 화염이 입자 내부로 전파되어 입자 중심에 도달하는 시간, 즉 시간차(time delay)가 존재한다. 입자표면에 화염이 형성되면 가스의 온도는 상승하기 시작하고 이후 화염이 전파됨에 따라 입자 중심의 온도도 상승하게 된다. 가스상과 입자 중심의 온도 구배가 최대가 되는 두 점 사이의

시간차를 입자 연소 시간으로 정의한다.



(a) Local bed temperature



(b) Oxygen at the top of the bed

Fig. 4 Typical measurement result of the bed combustor experiment (Case 4).

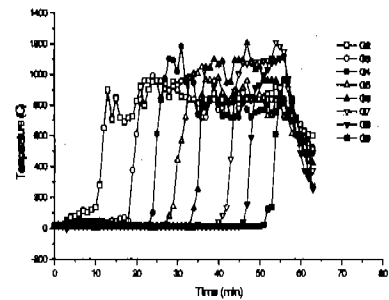


Fig. 5 Measurement result of a bigger particle case (Case 5).

4. 실험 결과 및 분석

4.1 LHV 값에 따른 결과

LHV 의 변화에 따른 연소 상황을 평가하기 위하여 Case 1, 2, 3 의 경우에 대해 실험을 수행하였고, 대표로 Case 1 에 대한 결과फल Fig. 6 에 도시하였다 (Case 2, 3 의 결과도 비슷한 형태임). 단, Fig. 4(a) 와 같은 형태의 그래프를 그리는 대신 시간

파 베드 깊이를 양 쪽으로 하는 등온선(contour)으로 실험결과를 정리하였다. 등온선도에서 Observed Bed Height 라고 표시된 선은 실험을 수행하면서 관측구를 통해 육안으로 관찰하여 표시한 베드의 높이이다. 육안을 통한 관측이라서 객관성이 결여되는 것으로 판단되지만 연소에 의한 베드의 물리적 변화를 알 수 있다. 결과적으로 연소가 모두 끝난 후에는 약 60% 정도의 부피 저감이 이루어진 것을 알 수 있다. 등온선도에서 x-축은 실제 소각로에서 화격자에서의 폐기물 이송속도를 곱하게 되면 화격자 위치로 전환된다. 즉, 이 결과로부터 소각로 폐기물층에서 화격자위치와 베드의 높이를 양 쪽으로 하는 정상상태(steady state)로 유지되는 공간내의 온도 분포를 유추할 수 있다.

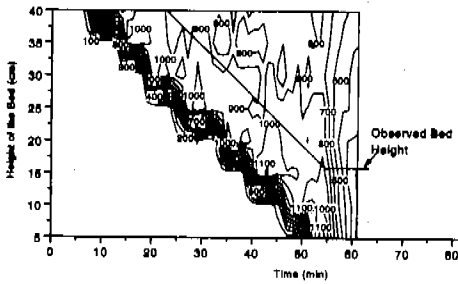


Fig. 6 Reconstructed temperature contour (Case 5).

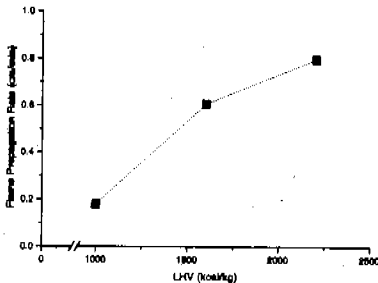


Fig. 7 Effect of LHV on FPR (Case 1, 2, 3).

앞서 3.3에서 제시한 화염 전파속도(FPR)는 베드내 화염이 전파되어 내려가는 빠르기를 의미하며, 이 실험에서 각 경우별로 연소상황을 대표하는 수치로 이용되었다. Case 1에서 Case 3까지의 실험을 통해 얻어진 온도 자료를 통해 각각의 경우의 연소진행속도를 계산할 수 있었다. 그 결과는 Fig. 7에 도시하였듯이 LHV가 커짐에 따라 화염전파속도는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 저위발열량이 풍부할수록 연소 진행구간에서 많은 열량이 발생하여 빠른 연소가 이루어지며, 저온의 영역으로의 열전달량도 커져 화염의 전파도 빨라

지는 것이다.

4.2 입자와 크기에 따른 결과

Case 2, Case 4 ~ Case 7의 실험을 통하여 유량과 LHV를 고정한 상태에서 폐기물 입자의 크기를 변화시켰을 때 연소 진행에 미치는 영향을 관찰할 수 있었다.

3.3에서도 기술하였듯이 전반적으로 입자의 크기가 커질수록 연소현상의 불규칙성이 커지는 것을 발견할 수 있었다. 입자가 커질수록 베드 위치별로 온도변화의 형태와 화염이 전파되는 시간간격이 불규칙해지는 경향이 심화된다. 이는 시료가 구형이 아닌 정육면체이며 입자의 크기가 커짐에 따라 균일한 연료의 충전이 어려워지고 베드내 공간분포(void fraction)가 불균일해지면서 발생하는 현상이다.

각 경우별로 앞서 정의한 화염 전파 속도와 총 연소 시간을 계산하였으며 그 결과는 Fig. 8에 도시하였다. 입자의 크기가 커질수록 단위 질량당 반응 면적은 줄어들게 되어 화염 전파 속도는 작아지고, 총 연소 시간은 늘어나는 경향을 보인다. 한편, Fig. 9에 보여진 입자 연소시간은 입자의 크기에 선형적인 결과를 보여주는데 이는 입자 표면에 형성된 화염은 비교적 균일한 속도로 입자 중심으로 전파함을 보여준다.

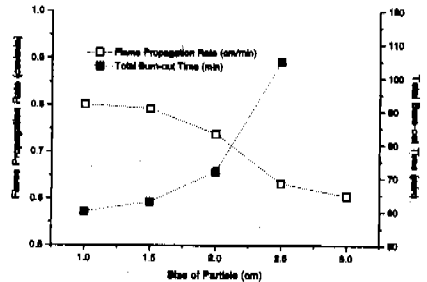


Fig. 8 The effect of particle size on FPR and TBT.

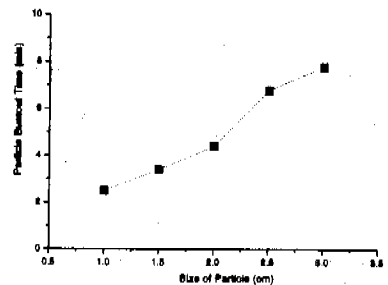
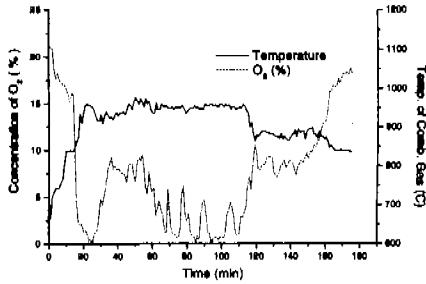


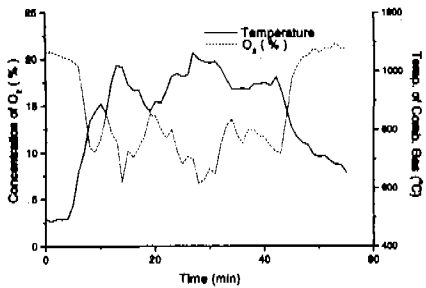
Fig. 9 The relation between size of particle and particle burn-out time.

4.3 연소공기 유량의 변화에 따른 결과

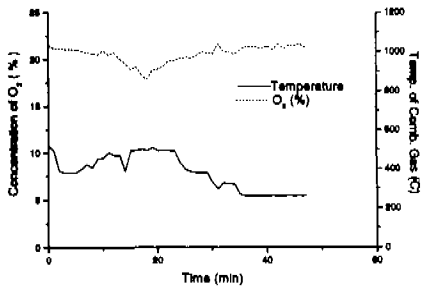
Case 6, Case 8 ~ Case 12 의 실험을 통하여 입자의 크기와 LHV 를 고정한 상태에서 연소용 공기의 유량을 변화시켰을 때 연소 진행에 미치는 영향을 관찰할 수 있었다.



(a) Case 8



(b) Case 10



(c) Case 12

Fig. 10 Oxygen and temperature of the exhaust gas.

전체적으로, 주입해 준 유량이 지나치게 작은 경우에는 산소의 농도가 0% 인 구간이 많아져 산소 부족 현상을 보이며, 연소 가스의 온도 또한 높이가 올라가지 못했다 (Fig. 10 (a)). 공기 주입량을 차츰 늘려감에 따라 이런 문제들은 해소되고 노의 온도도 높이가 유지되지만, 주입되는 공기가 200 l/min 을 넘어서면서 차가운 공기의 과잉주입으로 연소가스의 온도는 떨어지며 연소가스중의 산소농

도는 10 %를 웃돌아 오히려 불안정한 연소를 보인다 (Fig. 10(b)). 또한 연소공기가 300 l/min 에 이르면 대류에 의한 냉각효과로 화염이 아래쪽까지 전파되지 못하고 소멸된다(Fig. 10(c)).

Fig. 11 에서는 연소 공기의 유량에 대한 연소진행 속도의 그래프를 그려보았다. 200 l/min 근처에서 연소 진행 속도가 최고치를 갖는 것으로 추측되는데 이 critical point 에 이르기 전까지는 공기를 많이 주입할수록 찬 공기에 의한 냉각 효과보다는 원활한 산소 공급에 의한 연소 촉진과 혼합 효과가 더 크기 때문에 연소 진행 속도가 증가하게 되지만, 그 점을 지난 이후로는 대류에 의한 냉각효과가 커져서 오히려 연소를 지연시키는 결과를 받게 된다는 것을 알 수 있다.

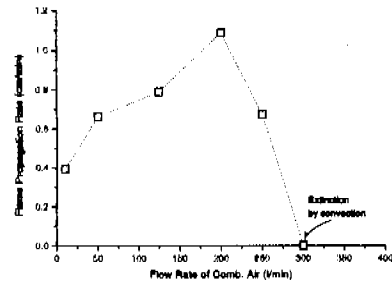


Fig. 11 Effect of flow rate of combustion air on FPR.

5. 결론

폐기물 베드에서의 기초적인 연소 특성을 알아보기 위한 축소 규모 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소각로 화적자위의 폐기물층에서 폐기물의 연소특성을 모델링 할 수 있는 1 차원 과도적 실험장치를 설계, 제작하여 운전하였다.
- (2) 폐기물 연소에는 다양한 인자들이 영향을 미치지만 그중에서도 폐기물의 저위발열량, 입자 크기, 그리고 연소공기의 유량은 주요 세가지 인자로 선택하여 다양한 변화실험을 수행하였다.
- (3) 연소 특성을 정량적으로 분석하기 위해 연소 가스의 온도와 화학종 농도의 관계를 알아볼 수 있는 기초 실험을 따로 수행하였으며 이를 통해 화염 전파 속도, 총 연소 시간, 그리고 입자 연소 시간이라는 세가지 정의를 도출하였다.
- (4) 폐기물의 가연분을 대표할 수 있는 재료로 나무를 사용하였으며, 실험조건에서 제시한 저위 발열량을 맞추기 위하여 적절한 양의 수분과 제성분을 첨가하여 연소시켰다. 실험을 수행하면서 연

료베드와 깊이별로 가스장의 온도와 입자 내부의 온도를 측정하였고, 연소된 배기가스의 온도와 화학종 농도를 동시에 측정하여 연소현상 평가를 위한 기초 데이터로 활용하였다.

(5) 폐기물의 저위발열량의 증가에 따라 연소 진행 속도는 증가하고 총 연소시간은 단축되는 현상을 관찰하였다. 또한 발열량이 증가함에 따라 연소 최고 온도역시 증가하여 저질 폐기물의 경우 화염이 바닥부분까지 전파되지 못하고 중간에 소멸되는 것을 볼 수 있었다.

(6) 폐기물 입자의 크기가 커질수록 단위 질량당 반응면적의 감소로 인하여 연소 진행 속도가 감소하고 총 연소시간은 늘어나는 경향을 보였다. 또한 입자가 클수록 입자 연소 시간이 선형적으로 비례하여 증가하였다.

(7) 연소공기 유량에 대해서는, 어느 한도에 이르기 전까지는 유량이 커질수록 연소 진행 속도가 증가하지만 그 점을 지난 이후로는 연소 진행 속도가 현저하게 줄어들어 관찰할 수 있었다. 그리고 공기를 지나치게 많이 주입했을 경우 대류에 의한 냉각효과로 화염이 진행되지 못하고 소멸되었다. 그러므로 다양한 종류의 폐기물에 대해 연소 속도를 최대로 할 수 있는 유량이 각각 존재할 것으로 예상되며, 또한 연소 화염의 안정화에 있어서도 적절한 공기의 유량 선정이 중요하다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) 김성중, 최상민, "도시 쓰레기 소각로 기술 분석", *한국폐기물학회지*, 제 11 권, 제 1 호, pp.41-58 (1994)
- (2) 김승기, 유영돈, 김성중, 최상민, "소각로 개발 관련 연구," *대한기계학회지*, 제 34 권, 제 8 호, pp.632-642. (1994)
- (3) 류창국, 김승기, 최상민, "소각로내 열유동의 계산과 실험," *대한기계학회지*, 제 18 권, 제 8 호, pp. 2184-2193. (1994)
- (4) Shin, D., Ryu, C. K. and Choi, S., "Computational fluid dynamics evaluation of good combustion performance in waste incinerators," *J. of Air & Waste Management Association*, 48:174-185 (1998)
- (5) Kim, S., Shin, D. and Choi, S., "Comparative evaluation of municipal solid waste incinerator designs by flow simulation," *Comb. & Flame*, 106:241-251 (1996)
- (6) Han, J. H., Jeong, K. K., Choi, J. H. and Choi, S., "A hot flow model analysis of MSW incinerator," *Int. J. of Energy Research*. 21:899-910 (1997)
- (7) 신동훈, "스토커식 도시폐기물 소각연소실의 저공해화를 위한 설계 최적화에 관한 연구," 박사학위 논문, 한국과학기술원 (1998)
- (8) Hobbs, M. L., Radulovic, P. T. and Smoot, L. D., "Combustion and gasification of coals in fixed-beds", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp.505-586 (1993).
- (9) Blasi, C. D., "Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 71-104 (1993).
- (10) Santos, A. M., "Study of a MSW incinerator: Overall operation and on-site measurement over the grate", *STEV Project, Report No. FBT-91/14*, Royal Institute Publishing Company, Sweden, (1991)
- (11) Smoot, L. D. and Smith, P. J., *Coal combustion and gasification*, Plenum Press, New York (1985).