

고체 폐기물 연료 특성을 고려한 유동층 연소로의 설계/운전의 고도화

최진환* · 최상민**†

Design and Operation of FBC Based on Characteristics of Solid Waste Fuels

Jinhwan Choi*, Sangmin Choi**†

ABSTRACT

Waste fuels, which originate from different sources, have unique combustion characteristics. The characteristics should be considered in applying FBC(fluidized bed combustor) technology to those fuels. The effects of fuel properties and operating conditions on FBC reactivity were investigated by means of carbon based parameter called mean carbon conversion time, rate of carbon conversion, fraction of carbon conversion and carbon recovery. And the basic physical and chemical mechanisms taking place in a fluidized bed were summarized.

Major parameters in designing and operating FBC were evaluated in terms of the fuel properties and the combustion environment.

Key Words : waste fuel, combustion characteristics, FBC, mean carbon conversion time.

기 호 설 명

C_i	i gas concentration, mol/Nm^3	r_c	carbon recovery, %
f_c	carbon mass fraction	Q	gas flow rate, Nm^3/sec
m_{fuel}	mass of fuel input, g	t	time, sec
n	mole number, mol	t_B	overall burnout time, sec
N	total mole number, mol	t_m	mean carbon conversion time, sec

1. 서론

유동층 연소로는 유동화된 모래와 연료사이의 혼합과 접촉 성능이 뛰어나 열 및 물질 전달에서 탁월한 성능을 보이며, 이를 이용하여 넓은 범위의 고체 연료를 연소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 기존의 연소기기에서 처리하기 어려운 저급 연료도 유동층 연소로에서는 좋은 혼합과 긴 체류시간 덕분에 비교적 좋은 연소 특성을 보인다[1]. 앞으로 더욱 다양한 고체 연료가 유동층

연소로를 이용하여 에너지원으로 활용될 것으로 전망된다[2].

연소기기의 설계 또는 운전 최적화를 위해서는 연료의 연소 특성을 파악하여 반영하는 것이 필요하다[3]. 지금까지 유동층 내 고체 연료의 연소 현상에 대한 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 특히 석탄에 대한 연구 자료가 많이 확보되어 있다.

기존 연구들을 통해 유동층 연소로에서 석탄 연소 특성에 대한 이해가 정립되어 있으나 연료의 종류와 연소환경의 다양성을 반영하는 데는 한계를 보여 왔다. 다양한 연료에 대한 휘발분 발생 속도와 양, 연소 과정에 관련된 정보의 부족이

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, smchoi@kaist.ac.kr

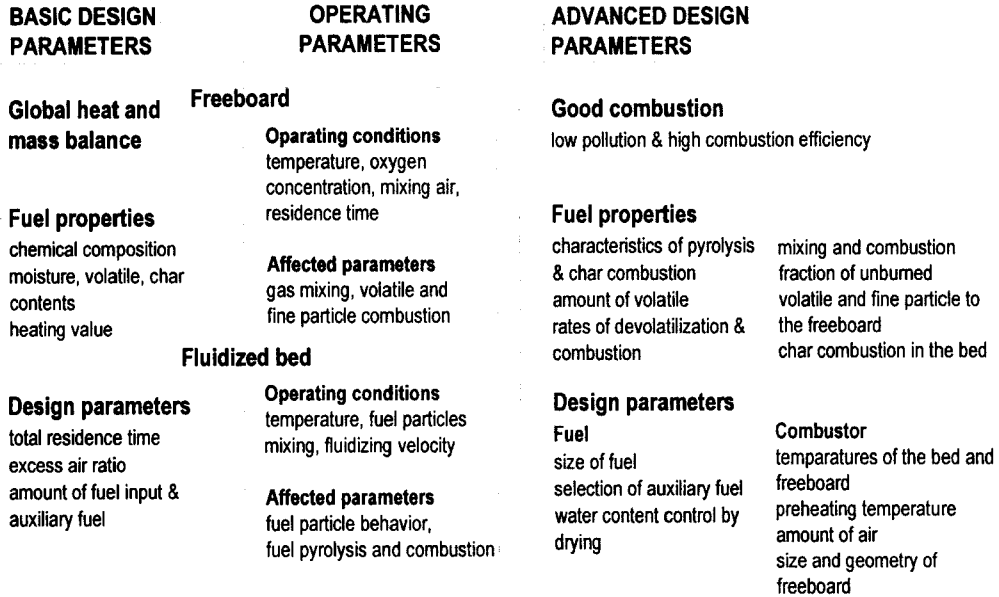


Fig. 1 Schematic diagram for the relation between fuel properties and FBC design parameters

유동층 연소로의 설계과정을 고도화 시키는데 제약이 되고 있다[4].

유동층 연소로에서 휘발분이나 화의 반응 특성은 모체인 고체 연료의 열적 처리과정에 의존하므로 기존의 방법으로 측정된 연료의 반응성은 유동층 연소로 내에서의 반응성과 많은 차이를 나타낼 수 밖에 없다. 화학적 반응뿐만 아니라 전체적인 연소 반응 역학은 연료의 분쇄, 마모등과 같은 과정에 의해 보다 복잡해진다. 그렇기 때문에 고체 연료의 물리적 특성으로 인해 반응성이 나쁜 고체 연료가 좋은 연료보다 빨리 연소되기도 한다[5].

본 연구는 고체 폐기물의 연소 특성과 유동층 연소로 운전 조건을 설계 관점에서 평가하고 정리하는 것을 목적으로 한다.

2. 유동층 연소로 설계/운전 인자

Fig. 1에 유동층 연소로 설계 조건 설정에 있어서 필요한 연료의 특성과 상호 관계를 도식으로 나타내었다.

연소로 설계에 있어서 기본적으로 수행되는 열 및 물질 정산 시에 원소 분석 및 공업 분석 그리고 발열량 측정 결과가 반영된다. 이 과정에서 공연비에 맞춰 연료 투입량, 연소 공기량, 연소실 열부하 등을 결정하며 슬러지와 같이 수분 함유량이 높고 발열량이 낮은 연료를 연소시킬 경우 보조 연료 사용량이나 건조율을 결정한다.

이와 같은 열 및 물질 정산의 조건 변화 외에도 연소로의 설계 및 운전에 있어서 연료의 완전연소를 고려해야 한다. 유동층부와 프리보드의 2단계로 연소공정이 구성된 소각로의 경우 유동층에서 배출되는 미연분들을 프리보드에서 완전연소시킬 수 있도록 연소실 내의 열유동 특성, 혼합 특성, 그리고 체류시간 등의 관점에서 설계가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 유동층에서 배출되는 미연분(휘발분과 불완전 연소 생성물)의 발생량과 이 미연분의 연소 특성이 파악되어야 각 연소실에서의 온도 조건 설정 및 유지를 검증할 수 있다.

발열량이 낮은 연료가 투입된 경우 베드의 온도를 유지하기 위해서 보조 연료를 필요로 하는 데 투입된 연료로부터의 충분한 열 방출이 베드에서 이루어지면 보조 연료의 사용량을 줄일 수 있다. 프리보드의 온도는 최소 850 °C 로 유지하는 것이 2차 연소를 위해 필요한 반면 회분이 녹아 내릴 정도로 지나치게 높은 프리보드 온도는 피해야 한다. 이와 같이 베드/프리보드 온도의 유지 관리는 경제성, 높은 연소 효율과 저공해화를 위한 전제조건이다.

베드/프리보드 온도 조건을 설계 단계에서 설정하기 위해서는 연료 특성에 의해 결정된 열분해 속도 및 연소율을 적용하여 베드와 프리보드 연소실의 열 및 물질 정산식들을 결합하여야 한다. 이와 같은 설계 절차 중에 핵심이 되는 부분은 유동층 베드에서 프리보드로 방출되는 미연분의

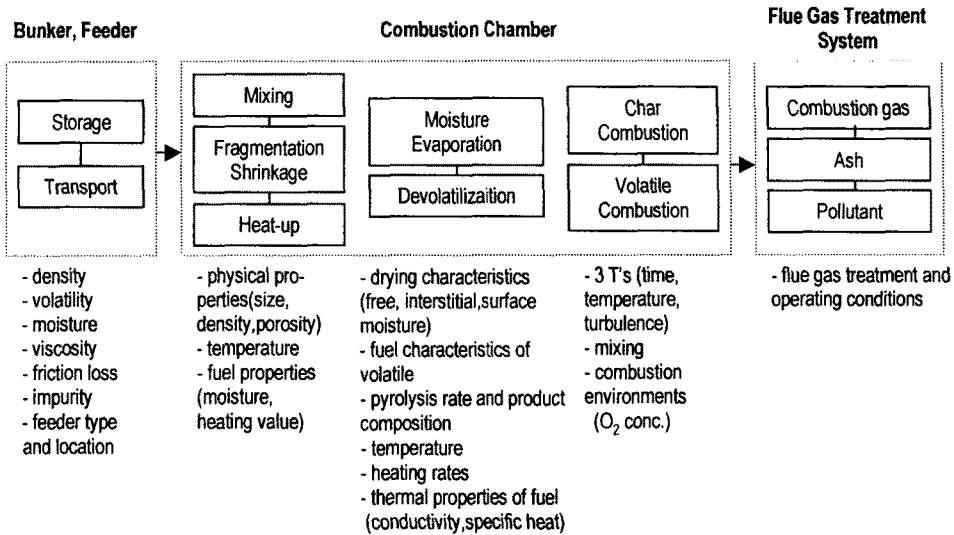


Fig. 2 Fuel behavior and main parameters [7]

양을 결정하는 것이다. 휘발분은 베드뿐만 아니라 프리보드에서도 연소되며 연소율은 유동화 속도, 베드에서의 산소 농도, 온도 등과 같은 유동층 운전 조건에 따라 달라진다. 휘발분의 비중이 높은 고체 폐기물의 경우에 휘발분의 베드/프리보드 연소율을 결정하는 것이 더욱 중요해진다. 유동층 설계에 있어서 베드/프리보드 온도를 설계 조건에 맞춰 유지하기 위해서는 폐기물 연료의 휘발분 함량, 탈휘발 속도, 휘발분 연소 과정에 대한 정보가 필요하다.

3. 연료 특성의 추가적 고려 사항

3.1 고체 폐기물의 연소

고형 물질의 연소 특성을 파악하기 위해서는 건조, 탈휘발, 촉 연소 과정으로 구분하여 연료 물질의 가열 및 온도상승과 함께 휘발분의 연소되는 과정도 밝혀야 한다. 또한 열분해 또는 연소가 일어날 때 발생하는 물리적인 현상으로 분쇄, 수축과 같은 고체물질의 형상변화도 고려하여야 한다[3]. Fig. 2에 연소의 과정 단계와 각 과정의 주요 영향 인자들을 요약하여 보여주고 있다. 연료의 물성은 투입 후 연료가 연소가스 또는 유동상에서 혼합되면서 온도가 상승되는 가열과정과 이 과정에서 발생하는 분쇄, 수축 등 형상 변화에 영향을 준다[7].

수분 함량이 높은 폐기물의 경우에는 건조과정이 큰 비중을 차지하게 된다. 열분해가 저온에서 시작되므로 건조과정이 탈휘발 속도에 영향을 끼치게 된다. 건조 및 열분해 특성은 무엇보다도 온

도조건에 가장 큰 영향을 받는다. 열분해 생성물 방출특성은 열분해 온도 및 연료 특성 등에 따라 달라지게 되며, 타르(tar) 및 촉(char)의 수율에도 영향을 끼친다. 온도가 올라갈수록 가스상 휘발분의 양이 늘어남과 동시에 타르나 촉의 수율은 줄어드는 것으로 알려져 있다[6]. 또한 탈휘발 과정에서 나오는 가스 중 80% 이상이 가연성 가스이므로, 소각로에서는 이러한 가연성 가스를 2차로 소각할 수 있도록 고려가 되어야 한다.

3.2 수분 함량

시험 유동층 연소로에서 입자 연소에 대한 실험 결과를 탄소 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec), 탄소 회수율(carbon recovery, %)과 평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time, sec)으로 나타내었다. 이들 인자에 대한 정의와 실험 장치에 대한 설명은 부록과 참고 문헌에 자세히 기록하였다[7]. 평균 탄소 전환 시간은 평균 연소 시간 즉 입자가 유동층에서 평균적으로 체류하는 시간을 의미하고 탄소 전환 속도는 연소 속도를 나타낸다.

Fig. 3에서 수분 30%와 건조 슬러지 연소 실험 결과를 비교해 보면 수분 함량이 높아지면 수분 증발 잠열에 의해 초기의 가열 속도가 감소하고 그로 인해 입자의 승온 과정에서 일어나는 탈휘발 과정이 지연된다. 그러나 수분 함량이 63%인 경우를 보면 특정 시점에서 급격히 반응하여 빠르게 연소가 종료되는 것이 관찰된다. 슬러지에서 수분 함량은 입자의 강도와 관련된 연료 특성으로 수분 함량이 증가할 경우 입자가 쉽게 부서

지기 때문에 이 실험 결과와 같이 수분 함량이 높은 경우에 오히려 반응 속도가 빨라지는 현상도 일어난다. 이것은 평균 탄소 전환 시간을 나타낸 실험 결과인 Fig. 4에서 재확인할 수 있다. Fig. 4를 보면 나무와 같이 수분 함량에 따라 입자의 물리적 강도가 변하지 않는 경우 수분 함량이 증가하면 평균 반응 시간이 길어진다. 반면 제지 슬러지나 하수 슬러지의 경우 수분이 증가함에 따라 평균 연소 시간이 길어지다가 다시 감소하는 것을 관찰할 수가 있다. 입자의 분쇄 특성이 수분 함량이 높은 슬러지의 반응을 지배하는 것을 알 수 있다.

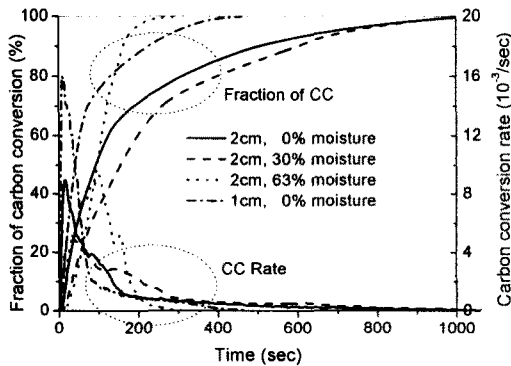


Fig. 3 Fraction and rate of carbon conversion: varying moisture and size of paper sludge, T_{bed} 700°C, superficial velocity 0.86m/sec.

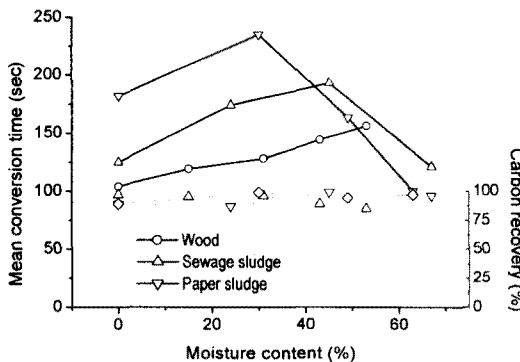


Fig. 4 Carbon recovery (%), mean carbon conversion time (sec): moisture content (%), T_{bed} 700°C

3.3 입자 크기

입자 크기는 고체 폐기물 연료의 전처리 과정이나 그 연료의 기원에 따라 다르다. 같은 연료에 대해서도 입자의 크기는 연료 입자의 반응성을 지배하는 인자이다. 입자의 크기가 큰 경우 가열

속도가 느리고 질량당 표면적이 작기 때문에 탈휘발 속도, 화연소 속도 모두 작은 입자에 비해 느리다. Fig. 3에서 입자 크기가 지름 1cm인 실험 결과를 2cm와 비교하여 보면 입자 크기가 작은 경우 반응이 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있고 초기 탈휘발 속도가 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 나무와 건조된 슬러지를 연료로 하여 입자 크기를 달리한 조건에서의 평균 탄소 전환 시간을 나타낸 것이다. 입자 크기가 커지면서 반응성이 떨어지는 것이 관찰된다. 입자의 크기 변화로 입자의 유동층 체류 시간을 조절 할 수 있음을 알 수 있다.

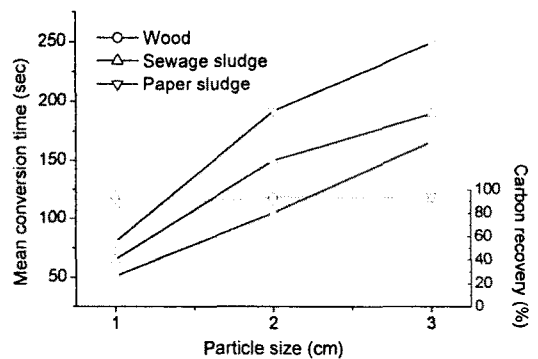


Fig. 5 Carbon recovery (%), mean carbon conversion time (sec), T_{bed} 700°C

3.4 입자 크기와 밀도 변화

비교적 크기가 큰 입자가 고온의 유동층에 투입되었을 때 건조 및 탈휘발 과정을 거치면서 밀도와 크기에 큰 변화가 발생한다.

건조, 탈휘발 과정에서 입자 내부의 스트레스에 의해 쪼개지는 입자의 분쇄(fragmentation)가 일어나 수 개의 불규칙한 입자로 나뉘어진다. 분쇄는 입자의 고유한 특성에 관련된 인자이다. 분쇄 현상은 연료의 종류와 기원에 따라 다르며 수분 함량에 따라 달라지기도 한다.

분쇄된 작은 입자는 빠르게 가열되고 산소 공급이 원활해지면서 반응성이 향상된다.

입자 표면에서 미세 입자가 떨어져 나가는 마모(attribution)는 투입된 고체 입자와 유동사 또는 유동층 구조물과의 접촉과 충돌에 의해 발생한다. 마모에 의해 본 입자로부터 떨어져 나온 미세 입자는 빠르게 가열되고 베드에서 자유로운 혼합이 허용되므로 반응이 빠르게 진행된다.

분쇄 과정과 마모 과정에서 발생하는 미세 입자가 베드에서 연소되지 못하고 프리보드로 비산되는 양이 증가하면 미연 탄소 손실이 발생할 수 있다.

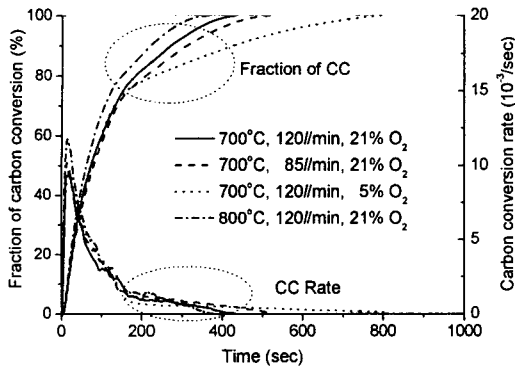


Fig. 6 Fraction and rate of carbon conversion: varying T_{bed} , flow rate and O_2 of dry wood.

4. 운전 조건의 영향

4.1 유량 및 산소 농도

유량과 산소 농도는 입자의 연소 과정 중 가열 과정에 지배받는 탈휘발 과정에 영향이 적으며 산소를 소모하는 최 연소 과정과 발생된 휘발분 연소에 영향을 크게 미친다[4]. Fig. 6에서 산소 농도와 유량을 변화시킨 결과에서 반응 전기의 탈휘발 과정과 후기의 최연소 과정을 비교하면 이것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 유량과 산소 농도 변화에 대한 평균 탄소 전환시간을 나타내었다. 유량과 산소 농도가 증가하면 최 연소 속도가 빨라지기 때문에 평균 탄소 전환시간도 짧아진다.

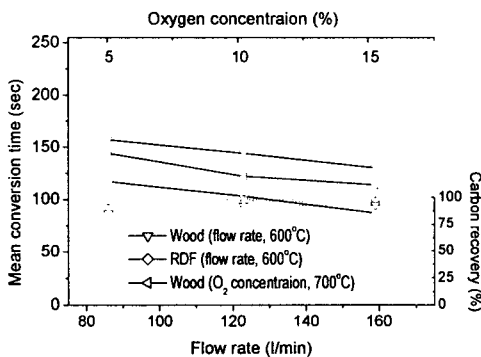


Fig. 7 Carbon recovery (%), mean carbon conversion time (sec): flow rate (l/min), O_2 (%)

4.2 베드 온도

베드 온도는 유동층에서 고체 폐기물 입자의 연

소 속도와 입자로부터 발생한 휘발분의 반응 속도를 결정하는 인자이다. 베드 온도가 증가하면서 입자의 연소 속도가 빨라지는 것을 Fig. 6과 Fig. 8에 나타낸 실험 결과로부터 알 수 있다.

베드 온도가 적절하게 유지되지 못할 경우 입자의 반응이 억제되고 베드에서의 휘발분 연소율을 감소시켜 프리보드 연소 부담율을 높이게 된다. 발열량이 낮은 슬러지의 소각에 있어 베드 온도 유지는 매우 중요한 설계/운전 인자이다. 공기 예열 온도, 보조 연료 투입량 조절을 통해 베드 발열량을 높이고 운전 조건과 입자 특성을 조절하여 슬러지에서 발생된 휘발분의 베드 연소율을 높여야 한다.

베드 연소율은 연료의 탈휘발 속도, 베드 산소 농도, 유량, 베드 온도 등의 인자에 영향을 받는다. 베드 연소율을 높이기 위해서는 베드에서의 산소 농도를 높이고 베드 온도를 높게 유지할 수 있도록 해야 한다. 투입 연료의 발열량이 낮아서 보조 연료 사용량을 증가시켰을 경우 베드 온도를 유지할 수 있으나 베드의 산소 농도가 보조 연료 연소에 소모되어 줄어들기 때문에 투입된 연료의 베드 연소율에 이득이 없게 될 수도 있다. 베드 온도를 유지하기 위한 방안으로 공기 예열 온도를 높이고 수분 건조를 통해 입자의 발열량을 높이는 것이 베드 연소율을 증가시키는 측면에서 바람직하다.

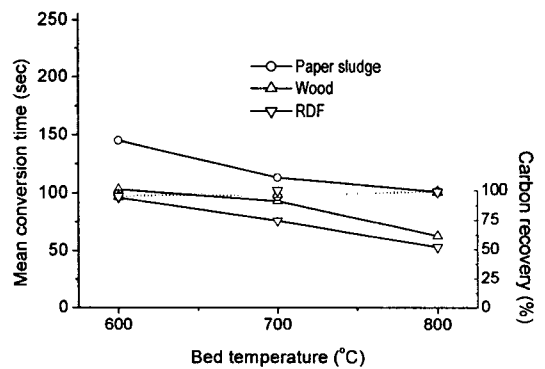


Fig. 8 Carbon recovery (%), mean carbon conversion time (sec): T_{bed} ($^{\circ}C$)

탈휘발 속도가 큰 연료의 경우 투입속도 변동에 따라 프리보드 연소 부담율이 순간적으로 높아질 수 있으므로 균일한 투입 속도를 유지해야 한다. 안정된 베드 온도를 유지할 목적으로 보조 연료를 사용할 경우 휘발분의 함량이 적고 최 성분이 많으며 연소 시간이 비교적 긴 연료가 유리하다.

4.3 베드에서의 혼합

베드에서의 혼합은 연료 입자 혼합과 가스 혼합

으로 나뉘어진다. 연료 입자와 유동사와의 혼합은 입자 밀도와 크기, 유동화 속도에 의해 영향을 받는다. 베드에서 입자 혼합 시간보다 탈휘발 시간이 짧은 경우는 연료 투입 위치를 조절하여 베드의 혼합을 증진시켜야 한다. 그 반대의 경우는 입자의 혼합이 탈휘발 과정보다 빨리 이루어지기 때문에 투입 위치 선정에 유연할 수 있다. 베드는 기포와 농후 영역으로 구분될 수 있는데 투입된 연료는 농후 영역에 체류하며 연소된다. 입자로부터 발생한 휘발분과 최 연소가 진행되는 농후 영역은 휘발분의 농도가 높고 산소가 부족하게 된다. 기포와 농후 영역간의 기체 혼합이 제대로 이루어지지 않을 경우 휘발분의 베드 연소율은 떨어지게 된다.

베드에서의 기체 혼합은 유속과 최소 유동화 속도가 커지고 기포 크기가 작을수록 좋아진다. 그러나 유속이 빨라지는 경우 휘발분의 베드 체류 시간을 줄여 혼합 증진에 의한 베드 연소율의 증가 효과를 상쇄시킬 수 있다.

5. 유동층 연소로 설계/운전에 필요한 고체 폐기물 연료 특성

5.1 입자 특성 및 운전 인자 정리

유동층 연소로 설계/운전에서 가장 중요한 사항의 하나는 베드/프리보드의 온도 유지 관리이다. 화 성분비에 비해 휘발분 함량이 높은 슬러지, 바이오매스, 고분자 폐기물의 연소에서 휘발분이 주요 열원이 되기 때문에 베드와 프리보드에서 휘발분의 연소량을 조절하여 열량 공급을 최적화해야만 베드와 프리보드에서 온도를 적절하게 유지할 수 있다. 유동층 시스템은 연료의 열분해/연소 조건을 제공하고 연료의 반응은 다시 이 조건을 변화시킨다. 이와 같이 유기적으로 연결되어 있는 유동층 시스템과 연료의 상호작용으로 베드와 프리보드에서의 연소 부담율이 결정된다. 연소 부담율은 연료의 특성과 유동층 연소로 운전 조건에 따라 달라지며 이 두 인자를 변화시킴으로써 조절이 가능하다. 유동층 연소로의 설계 과정에서 연료의 열분해/연소 특성을 고려하여 연소 부담율을 제어할 수 있도록 설계 조건을 설정해야 한다.

5.2 고체 폐기물 연료 특성 평가

유동층 연소로 실험 결과에서 보여준 대상 폐기물의 각기 다른 연소 특성을 설계 관점에서 평가하는 것이 필요하다. 발열량이 높고 쉽게 부서지며 빠르게 반응하는 고체 폐기물 연료는 베드에서 체류 시간이 짧고

부서진 미세 입자의 비산과 프리보드로 전이된 휘발분에 의해 프리보드에서의 연소 부담율을 가중시킬 수 있다. 이에 대비하여 프리보드의 온도 관리와 2차 연소를 위한 방안이 모색되어야 한다. 이런 연료의 경우 발열량이 높기 때문에 베드 온도를 유지하는 것은 어렵지 않다. 평균 연소시간이 짧은 고체 폐기물 연료의 투입 방법으로 주기적인 투입 방식보다는 연속 투입 방식을 채택하는 것이 유리하다. 발열량이 높은 고체 폐기물을 연소시킬 경우 공기 예열 온도는 높일 필요는 없고 순간적인 투입량 변화에 따른 불완전 연소 현상이 나타날 수 있으므로 프리보드에서 2차 공기 주입을 통해 공연비를 높일 필요가 있다. 지나친 프리보드 연소 부담율로 인한 프리보드 과열 문제가 발생할 수 있으므로 2차 공기 용량은 크게 하고 2차 공기 주입 위치는 베드와 가깝게 하는 것이 유리하다.

수분을 다량 함유한 슬러지류는 발열량이 매우 낮기 때문에 베드 온도 유지가 가장 중요한 설계 관점이다. 연소 공기의 예열, 수분 건조, 보조 연료와의 혼합 연소 등의 방식을 적용하여 베드 온도를 유지한다.

건조기가 설치되어 슬러지가 연소로에 투입되기 전에 건조되는 경우, 건조율에 따라 연소 특성이 달라지는 것을 설계 조건 설정에 반영해야 한다. 수분함량이 높은 슬러지를 연소시킬 경우 수분함량과 투입량을 일정하게 유지하는 것이 매우 중요한 운전 인자가 된다. 이것들의 변동이 심할 경우 순간적인 불완전 연소 현상이 심하게 나타날 것이다. 수분 함량이 높아지면 초기 반응 속도가 떨어진다. 그러나 쉽게 부서지기 때문에 전체 반응시간은 오히려 건조된 슬러지보다 짧아지는 경우도 발생한다. 수분 함량이 매우 높은 경우 슬러지 입자의 반응 시간이 짧아지고 베드 온도가 떨어지며 증발된 수분에 의해 유속이 빨라진다. 이 때 낮은 온도, 짧은 베드 체류 시간, 급격한 휘발분 방출 등의 영향으로 휘발분의 베드 연소율은 급격히 저하되어 휘발분 연소 영역이 프리보드로 이동할 가능성이 매우 높다. 베드 온도 유지를 보조 연료에 의존할 경우 지나친 보조 연료 사용으로 인한 베드에서 산소 농도 감소가 베드 연소율을 감소시키는 결과를 유발시킬 수 있다. 그러므로 공기 예열 온도와 수분 건조율을 높여 보조 연료 사용량을 줄이는 것이 경제적인 측면이나 베드 연소 효율 차원에서 바람직하다.

보조 연료를 사용할 경우 베드에서 열 방출량을 증가시킬 수 있는 화 성분이 많은 연료가 적당하다. RDF나 나무와 같이 휘발분 함량이 많은 연료를 보조 연료로 사용할 경우에 유동화 공기의 예열 온도 설정에 주의가 요구되며 보조 연료 사

용량이 제대로 설정되지 않을 경우 프리보드 연소 부담율을 지나치게 높일 위험이 있다.

6. 결론

종류와 처리 방법에 따라 연소 과정이 크게 달라지는 고체 폐기물의 소각에 유동층 연소로를 응용할 경우 고려해야 할 설계/운전 인자를 실험 결과와 기존 연구를 기초로 정리하였다.

유동층 연소로에서 휘발분 함량이 높은 고체 폐기물을 연소시킬 경우 발생할 수 있는 문제를 정리하고 설계 방안을 제한된 범위에서 제시하였다.

참고문헌

- [1] N. Hodgkinson and G. G. Thurlow, "Combustion of low-grade material in fluidized bed" *AIChE symposium series*, Vol 73, No. 161, 1977, pp.109-114.
- [2] S. C. Saxena, "Fluidized-bed incineration of solid pellets : combustion and co-combustion" *Energy Convers. Mgmt.* Vol.39, 1/2, 1998, pp.127-141.
- [3] 박영성, 김영성, 손재익, 맹기석, "석탄 유동층 연소로에서의 Freeboard 연소 특성 I. 실험적 연구" *한국화학공학회*, Vol.28, No.5, 1990, pp.568-575.
- [4] R. G. Bautista-Margulis, R. G. Siddall and L. Y. Manzanares-Papayanopoulos, "Combustion modeling of coal volatiles in the freeboard of a calorimetric fluidized bed combustor", *Fuel*, Vol.75, No.15, 1996, pp.1737-1742.
- [5] Ivan T. Lau, Development of reactivity parameters for characterization of coal in fluidized bed combustion, " *AIChE symposium series*, Vol.83, No.255, 1987, pp.29-41.
- [6] T. Ogada and J. Werther, "Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed", *Fuel*, Vol.75, No.5, 1996, pp 617-625.
- [7] 양원, 최진환, 최상민, [하수 슬러지의 연료특성 파악을 위한 기초분석], *대한환경공학회* Vol.23, No.1, 2001, pp.51-59.
- [8] 최진환, 박영호, 최상민, "고체 폐기물 연료의 유동층 시험 연소로 특성 및 실험 인자 설정", *한국화학공학회*, Vol.39, No.5, 2001, pp.629-634.

부 록

실험 방법 및 장치

실험 장치는 Fig. 7와 같이 지름 100mm 스테인레스 관으로 만들어진 높이 1100mm의 원통 유동층 연소로이다. 유동층 베드는 평균 지름이 550 μ m인 모래로 이루어졌으며 높이는 200mm이고 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°C로 유지하였으며 연료는 단일 또는 수 개가 동시에 연소실 상부의 투입구를 통해 투입된다. 연속적으로 기록되는 배가스 농도를 통해 연소 과정을 관찰하였다.

탄소 기준 실험 인자 정의

측정된 CO₂, C_xH_y와 CO 농도를 이용하여 연소된 탄소량을 계산하였으며 이것으로부터 탄소 전환 속도(rate of carbon conversion, 1/sec), 탄소 회수율(carbon recovery, %)과 평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time, sec) 등을 계산하였다. 이들 인자는 Table. 1에 정리되어 있으며 자세한 해석 방법과 한계는 이전에 발표된 논문에 제시되었다[5,8].

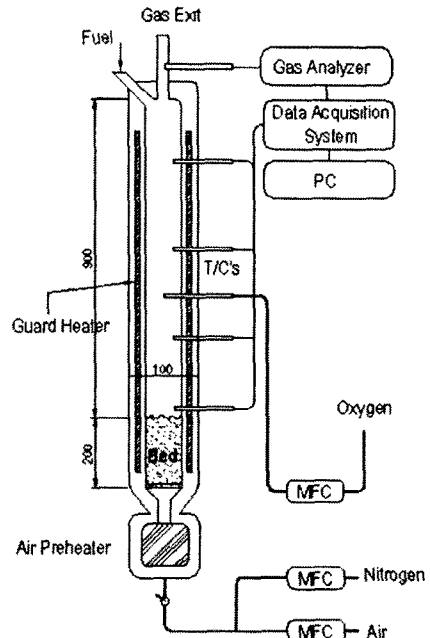


Fig.9 Laboratory scale FBC

Table. 1 Equations for the determination of the parameters (C_{CxHy} is measured on CH_4 base)

Experimental parameter	Definition
Rate of carbon conversion (sec ⁻¹)	$\frac{d}{dt} \left(\frac{n}{N} \right) = \frac{Q}{N} (C_{CO} + C_{CO_2} + C_{CxHy})$
Fraction of carbon conversion(%)	$f = \frac{n}{N} \times 100(\%)$
Mean carbon conversion time(sec)	$t_m = \int_0^{t_n} \left(1 - \frac{n}{N} \right) dt$
Carbon recovery (%)	$r_c = \frac{N}{\text{carbon in fuel}} \times 100$ $\text{carbon in fuel} = \frac{f_c \times m_{fuel}}{12}$
Amount of carbon burnt up to specific time t (n), and total carbon burnt (N)	$n = \int_0^t Q(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{CxHy}) dt$ $N = \int_0^{t_n} Q(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{CxHy}) dt$