

폐기물 층 연소와 노내 유동 해석

류창국* · 신동훈** · 최상민***

Combined Bed Combustion and Gas Flow Simulation for a Grate Type Incinerator

Changkook Ryu, Donghoon Shin and Sangmin Choi

Key Words: Waste Bed, Bed Combustion, CFD, Incinerator

Abstract

Computational fluid dynamics(CFD) analysis of the thermal flow in a municipal solid waste(MSW) incinerator combustion chamber provides crucial insight on the incinerator performance. However, the combustion of the waste bed is typically treated as an arbitrarily selected profile of combustion gas. A strategy for simultaneous simulation of the waste bed combustion and the thermal flow fields in the furnace chamber was introduced to substitute the simple inlet condition. A waste bed combustion model was constructed to predict the progress of combustion in the bed and corresponding generation of the gas phase species, which assumes the moving bed as a packed bed of homogeneous fuel particles. When coupled with CFD, it provides boundary conditions such as gas temperature and species distribution over the grate, and receives radiative heat flux from CFD. The combined simulation successfully predicted the physical processes of the waste bed combustion and its interaction with the flow fields for various design and operating parameters, which was limited in the previous CFD simulations.

1. 서 론

소각로 연소실 내의 가스 유동장에 대한 전산유체역학(CFD)의 적용은 온도,

속도, 화학종 분포 등 다양한 정보를 제공함으로써 설계, 운전 방식의 평가와 개선에 많은 역할을 해 왔다. 소각로에 대한 해석에 있어서 어려운 점은 폐기물 층 연소는 매우 복잡한 과정을 통해 일

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 한국과학기술원 기계기술연구소

*** 한국과학기술원 기계공학과

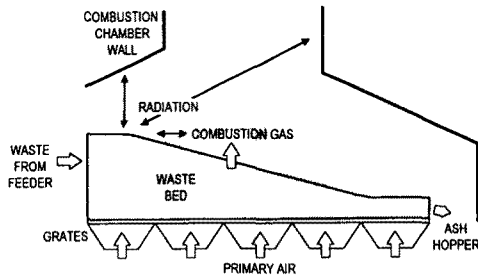


Fig. 1 Interaction of the waste bed and the gas flow region in the incinerator

어나며, 유동장과 밀접한 관계에 있다는 것이다. Fig. 1에 개략적으로 나타낸 바와 같이 폐기물 층 연소로부터 발생한 연소가스는 연소실 내부의 온도 분포 등을 결정한다. 연소실 벽면과 유동장의 온도는 다시 폐기물 층과의 복사열교환을 통해 폐기물의 건조와 연소과정이 개시되는 데 중요한 역할을 한다. 폐기물 층에서 발생한 연소가스는 유동장의 관점에서 입구 경계조건으로 볼 수 있다.

기존의 CFD 해석에서는 폐기물 층의 연소를 무시하거나[1], 또는 CH_4 [2], $CxHy$ [3,4], $CxHyOz$ [5]와 같은 탄화수소 계열의 가스가 CO , CO_2 등의 가스와 함께 발생하는 것으로 가정하였다. 그 발생량은 화격자 위치에 따라 임의로 결정되었다. 이와 같은 방식은 폐기물 층 전체에 대한 열 및 물질 발란스 외의 세부적인 현상들을 고려할 수 없기 때문에 유동 해석 결과의 유용성을 제한해 왔다. 이러한 한계에도 불구하고, 전산해석은 폐기물 층에서 떨어진 후류에서 연소실 형상이나 2차공기의 효과를 평가하는 데 효과적으로 이용되었다. 또한 여러 경우에 대한 비교 연구에서 유동장에 대한 정성적인 관찰과 함께 반응 및 혼합 성능을 평가하기 위한 정량적인 분석 방식도 제시되었다[6].

폐기물 층 연소에 대한 연구는 실제

소각로에서의 측정이 매우 어렵기 때문에 고정상(fixed bed) 시스템과 같은 단순화된 조건에서 수행되어 왔다. 실험적인 연구의 경우, 가상의 연료에 대해 연료 층이 시간에 따라 연소되는 과정을 층 내부의 온도, 화학종 분포를 측정하고[7], 연소와 관련된 공기 유량 공급, 연료 조성 등 다양한 인자들의 영향을 살펴보는 것이었다[8,9]. 모델링 연구에서 먼저 0차원 비정상 상태, 즉 폐기물 층을 화격자 상의 위치에 따라 단일한 상태로 보고 투입 후의 경과 시간에 따라 해석하는 연구가 시도되었으나 결과가 만족스럽지 못했다[10,11]. Ruh 등[12]의 연구에서는 층 내부의 건조, 탈휘발, 최종 연소 과정의 전파면을 추적하는 방식의 모델링이 제안되었다. 저자의 기존연구에서는 폐기물 층 내부의 열 및 물질전달 및 연소과정을 고려하여 1차원 비정상상태로 해석하는 모델이 제시되었다[13].

이 연구는 가스 유동장 해석과 폐기물 층의 연소에 대한 해석을 병합하기 위한 방식을 제시하기 위한 것이다. 두 영역 사이에 일어나는 상호작용은 연소가스 발생과 폐기물 층으로의 복사열유속을 매개로 구현하였다. 그리고, 이 방식의 효과를 확인하기 위해 대표적인 몇 가지 인자들에 대한 해석을 수행하였다.

2. 유동장과 폐기물 층의 해석

유동장과 폐기물 층을 병합하여 해석하는 방식을 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. CFD는 경계조건 및 난류, 복사, 화학반응 모델들을 이용해 가스 유동장의 온도, 속도, 화학종 분포 등을 예측한다. 그 결과 중 하나인 폐기물 층으로 전달되는 복사열유속은 폐기물 층 연소 해석의 입력 조건 중 하나로 이용된다. 폐기물 층

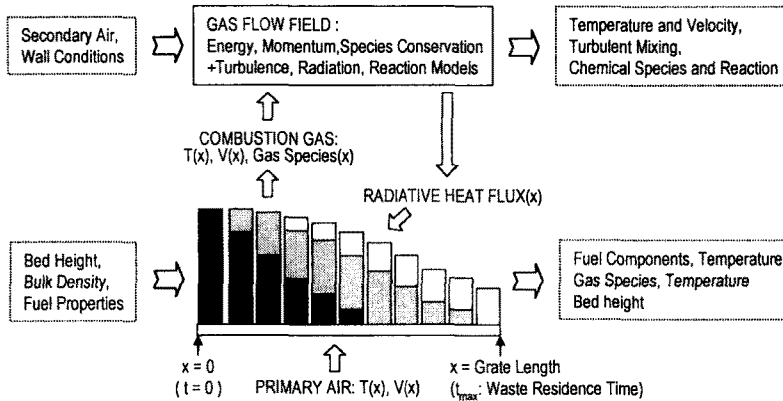


Fig. 2 Combined simulation method of the waste bed combustion and the gas flow region.

연소모델은 복사열유속 및 연료 특성 등의 초기 조건과 경계조건으로부터 층 내부 화염의 발생과 전파, 연소 생성물의 발생을 예측하게 된다. 여기에서 구한 폐기물 층을 빠져나가는 연소가스의 온도, 속도 및 화학종 분포는 유동장 계산의 경계조건으로 이용된다. 이와 같은 CFD와 폐기물 층 연소모델의 계산 과정을 반복하여 폐기물 층 연소과정과 유동장에 대해 수렴된 결과를 얻을 수 있다.

폐기물 층 연소모델은 저자의 기존 연구에서 제시된 모델을 수치해석 방식을 개선하고, 일반적인 연료를 고려할 수 있도록 확장한 것이다. 이 모델에서 연료는 수분, 회분을 포함한 탄화수소로서 증발, 열분해, 화 연소과정을 거치게 된다. 열분해에 의해 생성된 휘발분과 좌는 각기 다른 조성의 탄화수소로 고려되었다. 휘발분($C_xH_yO_z$) 및 CO , H_2 의 가스 반응은 탄화수소의 반응모델을 이용해 계산하였다[14].

3. 해석 사례

이 연구에서 제시한 해석 방식의 성능을 확인하기 위해 연소실 내의 중요한

자들을 바꾸어 가면서 해석을 수행하였다. 폐기물 층 연소와 유동장에 영향을 주는 인자들은 크게 연료 특성, 설계조건, 운전조건으로 구분할 수 있다. 연료 특성은 폐기물의 삼성분, 발열량, 크기, 겔보기 밀도 등이다. 설계조건은 고정된 값으로서 연소실 체적 및 형상, 화격자 크기, 2차공기 주입 위치 등이 있다. 운전조건은 운전자에 의해 제어되는 가변 값으로서 폐기물 투입량, 연소공기량과 분배, 폐기물 층 높이 및 체재시간, 화격자 구동 방식 등으로 볼 수 있다. 이 연구에서는 표준 경우(Case 1)에 대해 폐기물 층 높이 및 체재시간(Case 2), 연소실 형상(Case 3) 조건이 다른 세 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

해석에서 설정한 소각로는 150톤/일 규모이며 화격자의 크기는 $12m \times 3.2m$ 이다. 폐기물은 수분 40%, 가연분 ($CH_{1.76}O_{0.58}$) 45%, 회분 15%로 구성되어 발열량은 $1790kcal/kg$ 이며, 겔보기 밀도는 $400kg/m^3$ 으로 보았다. 표준 경우에서 폐기물 층의 높이는 68cm, 체재시간은 100분으로 보았다. 1차연소실 측면은 단열면으로 가정하고 1차연소실 상벽과 2차연소실 벽면은 수관벽으로 보았다. 1차

공기는 총 연소공기의 70%이며, 화격자 중앙부에 집중되어 주입된다($V/V_{ave}=1.3$ at $x=6m$, $V/V_{ave}=0$ at $x=0, 12m$). 2차공기는 역류식의 경우 1차연소실 출구 부분의 좌, 우에서, 병류식의 경우 1차 연소실의 상벽 두 곳에서 노즐을 통해 제트 형태로 주입된다.

폐기물 층 연소를 해석하려면 폐기물에 대한 더 자세한 자료가 필요하다. 폐기물 입자의 크기는 특성크기를 결정하기 어려운데, 연소 속도는 불균일한 입자 형태에서 가장 작은 길이 혹은 두께에 큰 영향을 받는 반면, 열전달의 경우 입자의 가장 큰 길이의 영향도 같이 받기 때문이다. 여기에서는 폐기물 입자를 크기 3cm의 정육면체로 보았다. 층의 다공도(Void fraction)는 0.54로 가정하였다. 해석시에 폐기물 층은 150개의 셀로 구성되어 1초 단위로 체재시간까지 계산하게 된다.

유동장 해석에서는 사용 모델과 격자 수 등에 있어서 계산의 부하와 결과의 정확성을 고려한 적절한 선택이 필요하다. 여기에서는 전형적인 방식을 이용하였다. 격자는 대칭면(symmetric plane) 조건을 이용해 연소실의 반에 대해 $60 \times 61 \times 23$ 개(84,180)의 셀로 구성하였다. 해석은 상용코드인 FLUENT v5.1을 이용하였다. 난류는 RNG k- ϵ 모델, 난류 반응은 Magnussen-Hjertager 모델을 이용하였다. 복사열전달은 Discrete-ordinate 모델을 이용하고 CO_2 와 H_2 의 참여를 WSGGM 방식을 이용해 고려하였다. 경계조건에서 수냉벽의 경우 증기온도를 고려해 500K으로, 화격자 투입구에 해당하는 벽면에서는 473K으로 가정하였다.

CFD에서 계산한 폐기물 층층으로의 복사열유속은 텍스트 파일로 저장되며, 폐기물 층 연소모델에서 계산한 결과 중

유동장 경계조건에 해당하는 값은 FLUENT의 'boundary profile'기능을 이용해 입력하였다. 두 입출력 값의 갱신은 유동장이 어느정도 안정화된 후에 이루어지며, 수렴 조건은 복사열유속을 복사온도로 표시할 때 1% 이내로 변화가 감소하였을 경우이다.

4. 해석 결과

4.1 Case 1 : Standard Case

폐기물 층에서 발생하는 연소가스의 온도와 미연분의 양은 복사열전달과 밀접히 연관되어 있다. 복사열유속이 큰 경우 폐기물 층의 연소가 빠르게 진행되면서 많은 미연분이 발생하고 가스의 온도 또한 낮다. 이로 인해 다시 복사열유속이 감소하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 얻은 최종적인 복사열유속이 Fig. 3(a)에 나타나 있다. 이 분포는 벽면의 영향위에 가스의 영향이 합쳐진 형태를 보인다. 폐기물 층에서 연소가 진행되는 과정은 Fig. 3(b)의 층내 가스 온도 분포로 나타내었다. $x=1m$ 경부터 본격적인 연소가 시작되어 $x=10.5m(t=87min)$ 에서 종료된다. 가스 유동장의 경계조건으로 쓰이는 폐기물 층을 빠져가나는 연소가스의 온도, 속도 및 화학종 분포가 Fig. 3(c), 3(d)에 나타나 있다. 화학종 분포에서 미연분(PIC)은 휘발분($CxHyOz$), CO , H_2 를 합한 것인데 폐기물 층 상부에서 연소가 개시되는 $x=0.5\sim 3m$ 경까지 휘발분이 직접 가스 유동장에 유입되며, 그 이후 CO , H_2 , H_2O 등으로 분해되어 유입된다. 유동장의 특성은 Fig. 4의 온도 및 CO 분포로 나타내었다. 고온의 연소가스는 중앙으로 모여 2차 연소실로 빠져나가며, 주로 2차공기에 의해 미연분의 산화과정이 진행된다.

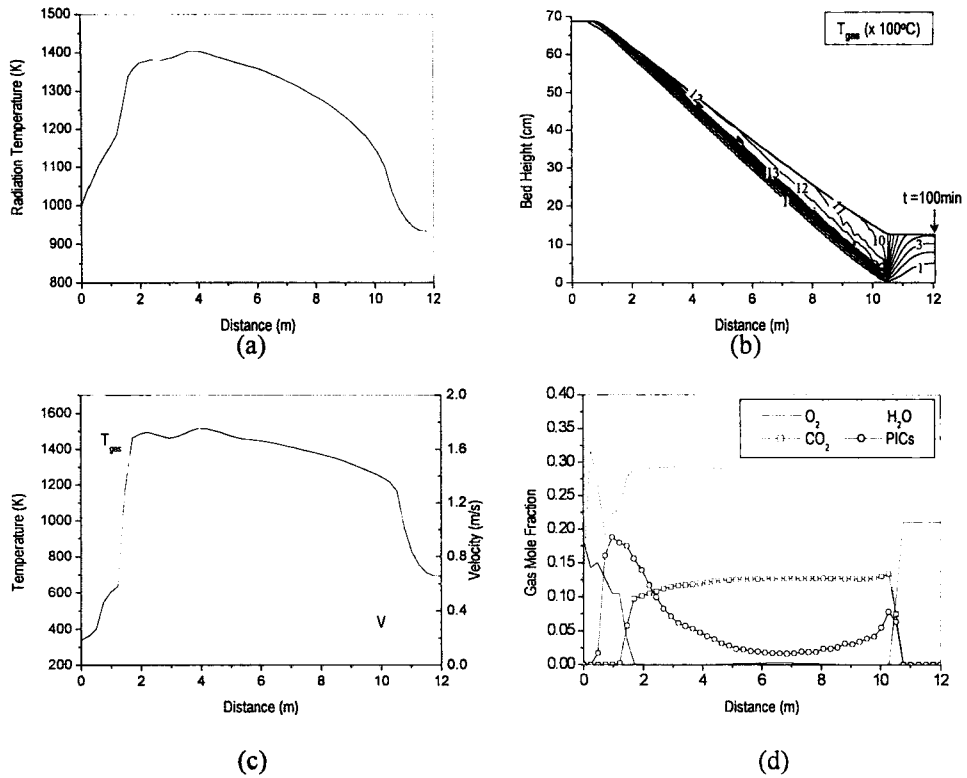


Fig. 3 Predicted waste bed combustion; (a) the radiation temperature at the top, (b) gas temperature within the bed, (c) gas temperature and velocity at the top, (d) gas species distribution at the top.

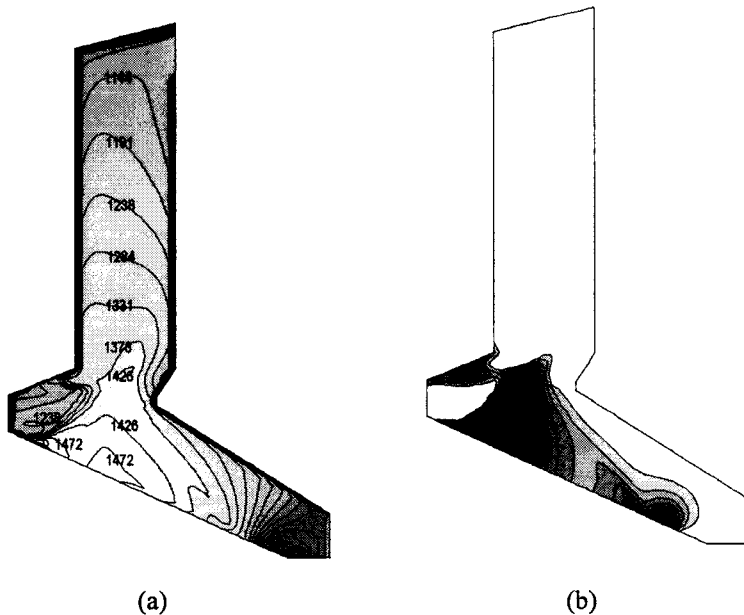


Fig. 4 Temperature(a) and CO mole fraction(b) on the symmetric plane for Case 1

4.2 Case 2: Half height and half residence time

복사열유속은 폐기물 층의 연소가 시작되기까지 유일한 열 공급원이다. 복사열유속이 일정한 분포로 주어진 경우 폐기물 층의 높이에 따른 연소 특성의 차이는 나타나지 않는다. 그러나 병합해석의 경우 똑같은 투입량에 대해 폐기물 층의 높이가 반으로 감소하면 체재시간 역시 반으로 감소하게 된다. 이 경우 연소개시 시점까지 길이가 두 배로 증가하게 되는데 이는 투입 초기에 유동장에서 폐기물 층으로 전달되는 복사열유속을 추가로 감소시키는 역할을 한다. 이로 인해 Fig. 5(a)와 같이 폐기물 층의 연소개시가 두 배 이상 늦게 진행된다. 또한 폐기물 층 내부의 온도가 낮기 때문에 Fig. 5(b)와 같이 미연분의 발생량이 증

가하게 된다.

가스 유동장 인해 폐기물 투입구 쪽에 저온 영역이 크게 발생하게 된다. 미연분의 양이 많기 때문에 2차공기를 만나면서 반응하는 연소실 중앙부분에서 가스의 온도가 더 상승하게 된다.

가연분의 발생량을 위치에 따라 가정하는 기존의 단순해석방식에서는 폐기물 층의 높이나 체재시간의 차이를 고려할 수 없지만 이 연구에서 제시된 해석 방식은 이로 인한 폐기물의 연소 특성과 유동장의 특성을 살펴볼 수 있다. 반면, 2차연소실 이후에서는 온도의 감소 과정이나 유속의 분포가 2차공기에 의해 진행되기 때문에 Case 1과 2가 비슷한 경향을 보인다. 즉, 기존의 해석 방식은 폐기물 층과 떨어진 후류에서의 유동에 초점을 맞추어 2차공기나 연소실 형상의 영향을 비교 분석하는 경우 타당성이 있음을 알 수 있다.

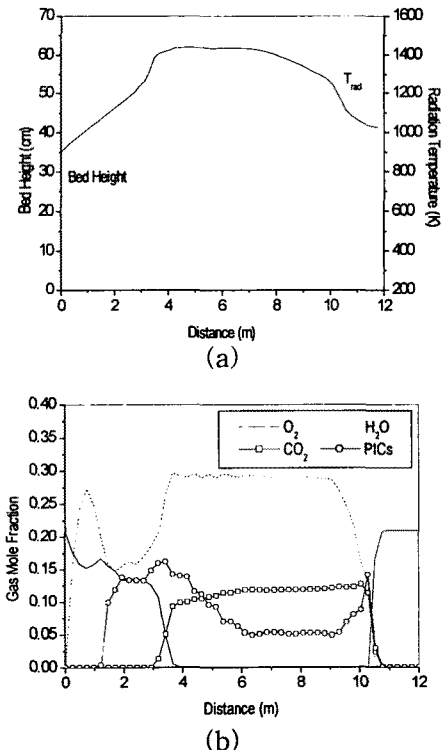


Fig. 5 Radiation temperature, bed height(a) and gas species at the top for Case 2

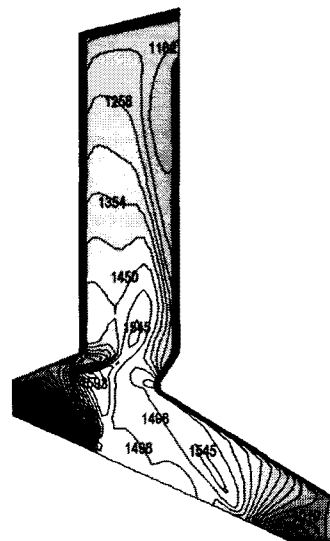


Fig. 6 Temperature on the symmetric plane for Case 2

4.3 Case 3: Alternate furnace shape

병류식 형상에 대한 폐기물 층 연소 해석 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 연소실의 형상이 달라지는 경우 벽면의 위치나 고온 가스의 흐름이 달라지기 때문에 폐기물 층에 전달되는 복사열유속에 차이가 있게 된다. 이 형상의 경우 유동이 재 호퍼 쪽으로 집중되어 빠져나가기 때문에 고온의 연소가스로부터 투입 초기의 폐기물 층에 전달되는 복사열유속이

감소하여 Case 1과 비교할 때 200K 가까이 낮아진다. 다른 연소조건이 모두 같지만, 이와 같은 복사열유속의 차이로 인해 연소가 늦게 진행되어 100분의 체재시간 동안 연소가 완전 종료되지 않는다. 이 경우는 연소실의 형상에 따른 차이를 보기 위한 것이므로 모든 조건을 같게 한 것이다. 만약 완전연소를 달성하려면, 수분량이 낮아 초기 연소 개시가 더 빨리 일어나는 폐기물을 투입하거

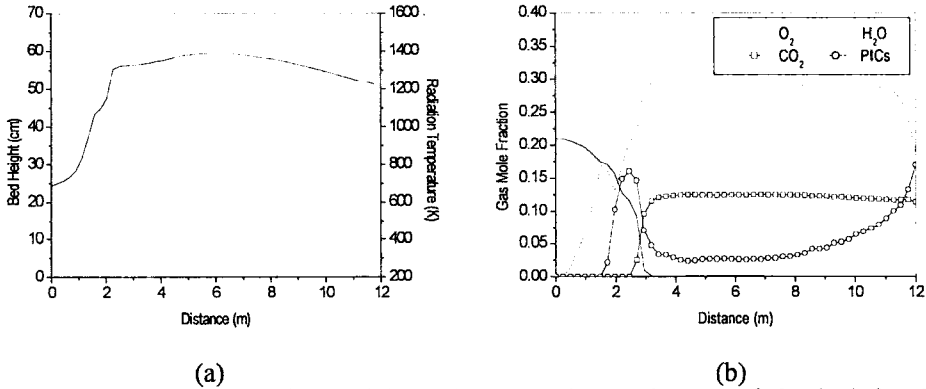


Fig. 7 Radiation temperature, bed height and gas species at the top of the bed for Case 3

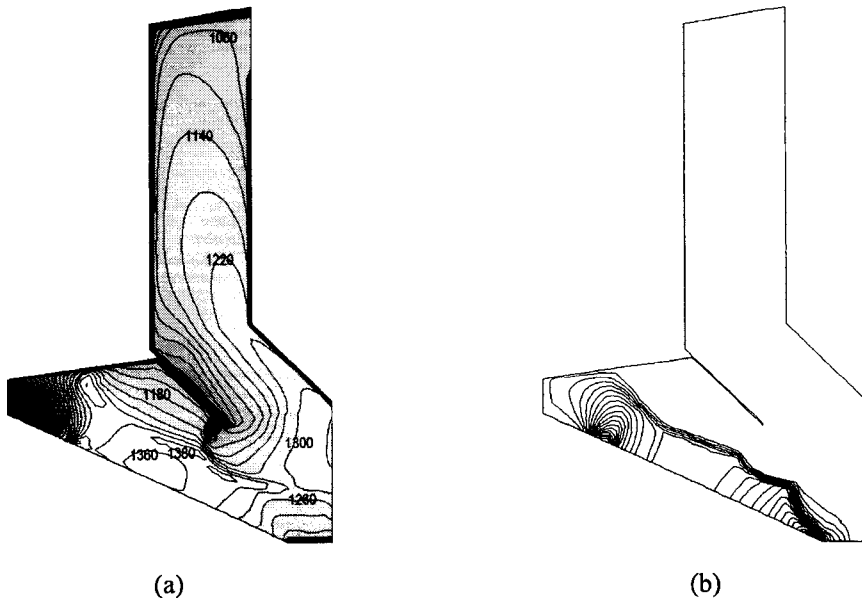


Fig. 8 Temperature(a) and CO mole fraction (b) on the symmetric plane for Case 3

나, 건조단 상벽을 내화벽으로 바꾸어 초기 폐기물 층으로의 복사열유속을 증가시키거나, 연소공기 주입 방식을 바꾸어 연소 개시까지의 양을 줄이고 그 이후의 양을 증가시켜 연소개시를 촉진하는 방식이 있을 수 있다.

Fig. 8에는 유동장 해석 결과가 나타나 있다. 1차 연소실에서 온도 분포는 건조단 상벽과 중앙 패널 끝에 존재하는 2차공기에 의해 지배되며 유동이 패널을 돌아 진행한 후에는 완만한 혼합과 온도 감소과정만이 존재한다. 이러한 유동 패턴은 미연분의 반응에도 차이를 가져온다. Fig. 8(b)의 CO 몰분율에서 연소 초기에 발생한 미연분은 그 상부에서 주입되는 2차공기와 만나고 1차연소실 윗쪽벽을 따라 진행하면서 파괴과정이 일어나는 데, 이는 Case 1, 2와 비교할 때 더 빠르며 그 이후의 가스 체재시간이 길게 되므로 미연분의 파괴 효율이 매우 높다고 볼 수 있다.

노 형상에 따른 연소 조건의 차이를 고려할 수 없는 기존의 해석방식에서는 Case 1과 Case 3에 나타나는 폐기물의 연소와 유동장의 특성 차이를 살펴볼 수 없다.

5. 고찰

계산과정에서 나타나는 폐기물 층 연소와 유동장 해석 결과의 변화는 여기에서 제시된 해석 방식이 두 영역 사이에서 일어나는 상호작용의 물리적인 과정을 고려할 수 있음을 의미한다. 선택된 인자들의 영향은 폐기물 층 연소의 진행 속도나, 연소가스의 발생 특성, 유동장에서 고온 영역 분포 및 반응 특성 등으로 명확히 나타났다.

이 해석 방식은 기존의 방식에서 불가

능한 많은 인자들의 영향을 살펴볼 수 있다. 폐기물의 특성은 층 연소모델에서 연료의 초기 조건으로 표시되거나, 연소 속도, 반응열의 발생 및 전파 등의 특성을 결정하는 인자가 된다. 설계 조건 중 하나인 연소실의 형상은 유동장의 형태 뿐 아니라 폐기물 층 연소에 있어서도 복사열전달의 형태로 영향을 준다. 운전 인자인 폐기물 투입량, 층의 높이 및 체재시간은 폐기물 층 연소의 초기값이나 계산의 최대시간 등을 의미한다. 특히 층의 높이와 체재시간의 영향은 연소모델에 의한 독자적인 해석으로는 나타나지 않는다.

한편, 폐기물 층 연소모델이나 유동장 해석 방식이 더욱 개선되어야 한다. 연소모델의 경우, 단일한 하나의 연료를 가정하고 있기 때문에 폐기물의 다양한 조성에 따른 연소 특성의 차이를 살펴볼 수 없다. 또한 가스 반응 모델은 실제 연료 층에서 나타나는 채널링(channeling) 효과나 난류 반응을 고려하지 않았기 때문에 반응속도가 훨씬 빨라서 1차공기 유량이 많은 경우 연소 진행속도가 실제에 비해 더 크게 나타난다. 이 외에 많은 현상을 단순화했지만, 폐기물 특성의 불균일함으로 인해 복잡한 모델의 도입이나 확장이 정확성의 향상을 의미하지는 않으므로 신중한 접근이 필요하다.

유동 해석의 경우, 복사열전달의 정확한 예측이 필수적이다. 소각로는 내화벽, 수냉벽 등이 함께 이용되고 복잡한 형상으로 인해 타당성 있는 벽면 경계조건을 설정하는 것이 필수적이다. 그리고 해석 방식의 한계 등을 인해 복사열전달 계산에서 무시된 화학종이나 검댕(soot), 비산재 등의 영향을 평가할 필요가 있다. 이와 함께 폐기물 층 영역을 가스 유동장 영역으로 가정하였는데 이를 다공층이나

벽면으로 처리할 수 있다. 비록 이 영역에서 가스의 혼합이나 반응은 무시할만 하지만 복사열유속의 경우 더 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다.

6. 결론

소각로에 대한 유동 해석에 있어서 기존의 단순해석 방식을 대체하는, 폐기물 층의 연소와 가스 유동을 함께 해석하는 방식을 제시하였다. 폐기물 층 연소모델은 가스 유동의 경계조건을 제공하고, 층 상부에서의 복사열유속을 받는 방식으로 CFD와 결합되었다. 이 방식을 이용해 폐기물 층의 높이, 체재시간, 공기 주입 방식을 바꾼 경우들에 대해 해석한 결과 기존 방식에서는 불가능했던 유동장과 폐기물 연소 특성의 차이를 볼 수 있었다. 이 방식은 폐기물 층 연소와 유동장을 지배하는 물리적인 현상들을 타당성 있게 고려할 수 있기 때문에 다양한 설계, 운전조건의 영향을 평가할 수 있다. 또한 유동장 해석 결과와 함께 폐기물 층에 대한 결과를 제공하기 때문에 소각로에 응용되는 CFD의 유용성을 크게 증가시킬 수 있다. 또한 이 방식은 연료 층과 가스 유동장의 상호작용이 존재하는 연소로에 응용 가능하다.

참고문헌

- (1) Ryu, C. and Choi, S., Comb. Sci. Tech., Vol.119 (1996), pp.155-170.
- (2) Madsen, O.H., Binner, S. and Jorgensen, K., 1st Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, (1997), Sheffield, UK.
- (3) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Schofield, C., Scott, D.W., Loader, A., Leonard, A., Russell, R. and Winn, D., Trans IChemE, Vol.71(B) (1993), pp.269-279.
- (4) Klasen, T. and Gorner, K., 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, (1999), Sheffield, UK.
- (5) Riccius, O., Walther, A. and Stoffel, B., 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, (1999), Sheffield, UK.
- (6) Shin, D., Ryu, C. and Choi, S., J. Air and Waste Management Association, Vol.48 (1998), pp.345-351.
- (7) Rogers, J.E.L., Sarofim, A.F., Howard, J.B., Williams, G.C. and Fine, D.H., 15th Symp.(Int.) on Combustion, (1974), pp.1137-1148, The Combustion Institute, Tokyo, Japan.
- (8) Gort, R, Ph.D. Thesis, (1995), Univ. of Twente, The Netherlands.
- (9) Stubington, J.F. and Fenton, H., Combust. Sci. Tech. Vol.37 (1984), pp.285-299.
- (10) Ahmed, S., Kumar, R. and Helt, J.E., JAPCA, Vol.39 (1989), pp.1328-1333.
- (11) 김형래, 유영돈, 최상민, 한국폐기물학회 논문집, Vol.11, No.4 (1994), pp526-634.
- (12) Goh, Y.R. et al., J. the Institute of Energy, Vol.71 (1998), pp.110-118.
- (13) Shin, D. and Choi, S., Comb. and Flame, Vol 121 (2000), pp. 167-180.
- (14) Jones, W.P. and Lindstedt, R.P., Comb. and Flame, Vol.73 (1988), pp.233-249.
- (15) FLUENT v5 Users Guide, (1999), FLUENT Inc.