

도시폐기물 소각로내 열유동 해석을 위한 수치해석적 연구

Numerical Simulation of Flow and Thermal Performance in the Municipal Solid Waste Incinerator

박병수, 이진욱, *이정환, **허일상

고등기술연구원 전력에너지연구실

* 대우중공업 선박해양기술연구소

** 대우건설 환경·소각로 설계팀

요 약

도시폐기물의 효율적인 소각 처리를 위해서 폐기물 처리량 50 ton/day의 화격자 소각로를 대상으로 화학반응을 고려하여 연소실 내부의 열유동 현상을 전산모사하였다. 수치해석 프로그램으로 상용코드인 PHOENICS를 사용하여 3차원 모사를 하여 실험으로 파악할 수 없는 연소실 내부의 유동 및 폐기물과 산화제와의 반응을 계산하였다. 건조부, 주연소부, 후연소부에 1차연소용 공기, 연료의 분포 및 폐기물의 발열량이 노내 열유동 현상에 미치는 영향을 조사하였다. 1차연소용 공기의 분포에 따라 노내 유동장의 형태에 변화가 있었으며, 벽면에서의 복사열전달을 고려한 경우 2차연소실과 출구근처에서의 온도분포가 파일럿 플랜트 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

1. 서론

대규모 도시 폐기물을 소각시키는 방식으로 주로 적용되는 스토커(소각 방법으로 화격자 이용) 소각 방식에서는 쓰레기가 화격자 위에 넓게 펼쳐져 있는 상(床) 형태의 연소가 일어난다. 상위에서의 폐기물 연소형태는 쓰레기의 조성 및 공급량, 주입공기 조건, 소각로의 형상에 따라 좌우된다. 소각로의 형상과 폐기물과 연소가스의 상대적인 흐름 방향에 따라 소각로 형식은 역류식, 병류식, 중간류식으로 나누어지며 화격자 위에서의 쓰레기 이송 방향과 화격자가 쓰레기를 혼합시키기 위하여 이송하는 방향에 따라 역송식, 순송식 화격자로 분류된다. 이러한 소각로 방식과 화격자의 방식에 따라 쓰레기의 온도 분포 및 연소 진행 정도를 이해하고 예측하는 것은 설비의 설계뿐만 아니라 최적 운전 조건, 공해 물질의 발생 최소화 등에 필수적이다. 그러나 실제 소각로 내의 연소 현상을 실험적으로 관찰 그리고 국부적으로 온도나 속도 그리고 농도 분포를 측정하는 것은 실제적으로 매우 어렵다.¹⁾

실제 소각로와 유사한 연소조건에서 도시폐기물의 연소와 열유동이 소각로의 효율에 미치는 영향과 공해물질 배출에의 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 소각로 내의 화격자 상에서의 연소반응이 중요한 1차연소실에서 폐기물과 산화제와의 연소반응과 그에 따른 2차 연소실에서의 온도분포와 유동양상의 변화에 중점을 두었다. 쓰레기입자의 휘발화와 쿼(char)와 공기와의 연소반응은 직접적으로 고려하지 않고 쓰레기입자가 공기와 균일하게 혼합되어 있다고 가정한 LHFМ(Locally Homogeneous Flow Model)을 사용하였다.

2. 수학적 모델 및 경계조건

본 연구에 적용된 코드인 PHOENICS에서 사용된 지배방정식 및 수치해석방법은 다음과 같다. 질량, 운동량, 에너지, 화학종의 농도를 나타내는 일반 지배 방정식은 아래와 같이 나타난다.²⁾

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S$$

위 식에서 왼쪽으로부터 유동항, 확산항 그리고 生成項을 각각 나타내며 ϕ 는 단위질량당 물리량으로 x, y, z 방향의 속도 u, v, w , 난류변동에너지 k 와 그의 소산율 ϵ , 엔탈피 h , 연료의 질량분율 m_{fi} , mixture fraction을 표시한다. 또 ρ 와 Γ 는 밀도와 확산 계수를 각각 나타낸다. 위 식은 검사체적에 기초한 유한차분방법(finite difference method)에 의해 이산화하였으며 이산화 방정식은 line-by-line TDMA(Tri Diagonal Matrix Algorithm)방법에 의해 解를 구하였다. 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 계열의 SIMPLEST 알고리즘을 사용하였으며 유동이 결부된 종속변수의 보간을 위해서는 hybrid differencing scheme을 사용하였다. 비선형 유동항의 시간 평균에 따른 Reynolds 전단력의 해결은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 각 종속변수의 수렴향상을 위하여 false-time-step relaxation을 사용하였고, 복사모델은 Six-flux model을 사용하였다.

본 연구에서 고려한 스토커 소각로의 경계 조건은 다음과 같다. 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였고 벽근처 지역에서는 벽함수로 equilibrium logarithmic wall function을 사용하였다. 입구에서의 난류 강도는 2%로 가정하여 난류에너지의 입구 조건으로 설정하였고 소각로의 형상 중 높이 방향(y 축 방향)의 속도(v)에 입구유속을 주었다.

쓰레기층의 연소를 모델링하기 위해서는 화격자의 구동에 의한 쓰레기의 이송과 그에 따른 쓰레기의 건조, 쓰레기의 열분해시 발생하는 가스와 산화제의 기상반응, 쿼와 산화제와의 반응 등이 종합적으로 포함되어야 한다. 즉, 쓰레기입자의 궤적, 휘발율, 공기와 입자간의 물질, 운동량

및 에너지 전달의 상호 관계를 기술하는 모델이 필요한데 현재의 이론 및 수치해석적 방법으로는 화격자상의 쓰레기층에서 발생하는 연소현상을 수학적으로 정확하게 모델링하는 데에는 상당한 어려움이 있다.³⁾ 본 연구에서는 비교적 간단한 모델을 사용하여 계산하였는데 이 모델은 쓰레기 입자를 기상의 hydrocarbon 연료로 가정하여 쓰레기입자가 공기와 균일하게 혼합되어 있다고 가정하는 것으로서 반응모델은 PHOENICS의 SCRS(Simple Chemically-Reacting System) 모델을 이용하였고 연료와 산화제와의 반응률의 계산은 전통적인 EBU(eddy-breakup) 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

스토커 소각로내에 쓰레기가 투입되었을 때 쓰레기와 산화제와의 반응을 고려하여 소각로내의 유동특성 및 온도분포를 파악하였다. 쓰레기는 $C_xH_yO_z$ 의 기상연료로 가정하여 화격자단에서 유입되고, 화격자 각 단에서 기상연료와 공기가 유입된다고 가정하였다. 쓰레기투입량, 연소용공기량, 쓰레기 발열량 등을 달리하여 3가지 경우로 나누어 계산을 수행하였는데 <Table 1>에 각 경우에 대한 설정치들을 기술하였다. 본 계산에서는 이차 연소용 공기는 주입하지 않고 일차 연소용 공기만을 고려하였다. [Fig. 1]에는 본 연구에서 시뮬레이션 대상인 파이롯트 플랜트의 형상과 본 계산에서 사용된 도식도를 나타내었다.

<Table 1> 계산에서의 경우 설정

	case1	case2	case3
쓰레기 투입량 (kg/hr)	2083	2083	2175
1차연소용 공기 (m ³ /s)	3.397	3.397	2.43
저위발열량 (kcal/kg)	1600	1600	2000
벽면온도조건 (°C)	단열	800	900

[Fig. 2]는 case3의 노내 3차원 유동장을 나타낸 것이다. 유동은 전반적으로 화격자하부에서 유입된 공기가 연소실 중심부쪽으로 진행해 가고 출구쪽으로 나가는 양상을 보인다. 연소실 중심부에서 오른쪽 윗부분으로 속도가 커지고 2차연소실 왼쪽 상단에 미약하게 재순환 영역이 형성된 것을 볼 수 있다. 그리고 출구쪽으로 갈수록 속도가 커지고 출구쪽 하부에 재순환 영역이 형성되었다. 연소실 왼쪽 상단의 재순환 영역으로 인해 일부 비산 먼지가 로 출구로 빠져나가지 못하고 순환하거나 체류시간이 늘어날 수 있고 출구쪽 하부에 형성된 재순환 영역에서는 분진이 침강될 것으로 판단된다. [Fig. 3]은 case3의 노내 온도 분포를 나타낸 것이다. 2차연소실의 온

도는 벽면에 의한 복사의 영향으로 1차연소실 출구 부분에서의 온도보다 약 100K 정도 낮은 온도로 연소실 출구로 빠져나가는데 연소실 출구 온도는 1200K로 연소가 효과적으로 이루어진 것으로 보여진다. 1차연소실에서는 주연소부에서 온도가 약 1600K로 가장 높게 나타났고 화격자 끝단에서는 정체영역을 형성해 750K로 낮게 나타났다. [Fig. 4]는 노내 연소실에서 파이롯트 플랜트 운전시 측정된 온도와 본 연구에서 행한 수치해석의 결과를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 1차연소실에서 화염대의 위치를 알게 되면 1차 연소실의 온도분포와 폐기물의 건조, 연소, 냉각의 상황을 알 수 있다. 실험결과에서 1차연소실 출구부분의 온도가 낮고 2차연소실로의 중간부분으로 갈수록 온도가 높아지다가 다시 출구로 갈수록 온도가 떨어지는 양상을 보인다. 이것은 화염이 건조단에서부터 생성되어 폐기물의 건조와 연소가 함께 일어나면서 불완전연소물이 2차연소실로 갈수록 연소가 진행된 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과는 case2와 case3이 1차연소실에서 2차연소실 출구로 갈수록 온도가 낮아지는 경향을 보이는데 이것은 벽면에 의한 복사의 영향 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

스토커 소각로에서 일어나는 현상은 多相, 3차원 난류연소반응에 복잡한 열전달현상이 관여하는 시스템이고 화격자의 이동으로 인한 폐기물의 이동과 폐기물의 건조, 가스화, 고상 및 기상 연소 등이 일어나는 매우 복잡한 시스템이다. 이를 해석하기 위해서 먼저 도시폐기물 소각로 내 3차원 유동해석 모델을 정립하였다. 그리고 화격자위에서 고체쓰레기가 연소되는 현상을 모델링하기 위해서 연소반응 모델 및 복사열전달 모델을 적용하였다. 결과로서 연소실내 유동장, 온도장, 농도장을 계산하였다. 1차연소용 공기 및 연료의 배분에 따라서 연소실내 온도 및 유동장의 변화가 있었으며 발열량의 변화에 따라서 노내 온도분포의 차이를 알 수 있었다. 계산결과는 실측 데이터와 비교하여 정성적으로 만족할만한 결과를 얻었다. 도시폐기물은 성분과 종류가 매우 다양하기 때문에 추후 실측 data를 활용하여 화격자상의 연소반응 모델링을 계속적으로 보완해 나갈 계획이다.

참고문헌

1. 저공해 소각기술 대도시형 저공해 소각 시스템 개발, 1단계 최종 보고서, 환경부, 과학기술처, 1996.
2. Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere publishing, Washington, 1980.
3. Nasserzadeh, V., J. Swithenbank, B. Jones, "Three Dimensional Mathematical Modelling of Sheffield Municipal Solid Waste Incinerator (35 MW) Using Experimental Data and Computational Fluid Dynamics", *Journal of Institute of Energy*, vol. 64, pp.166-175, 1991.

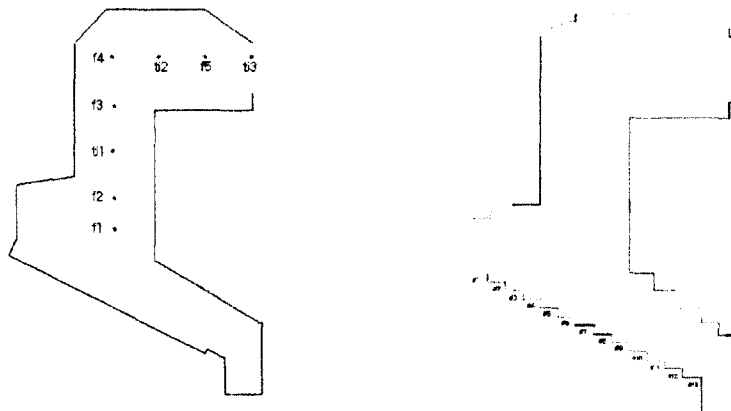


Fig. 1 Real and computational view of combustion chamber

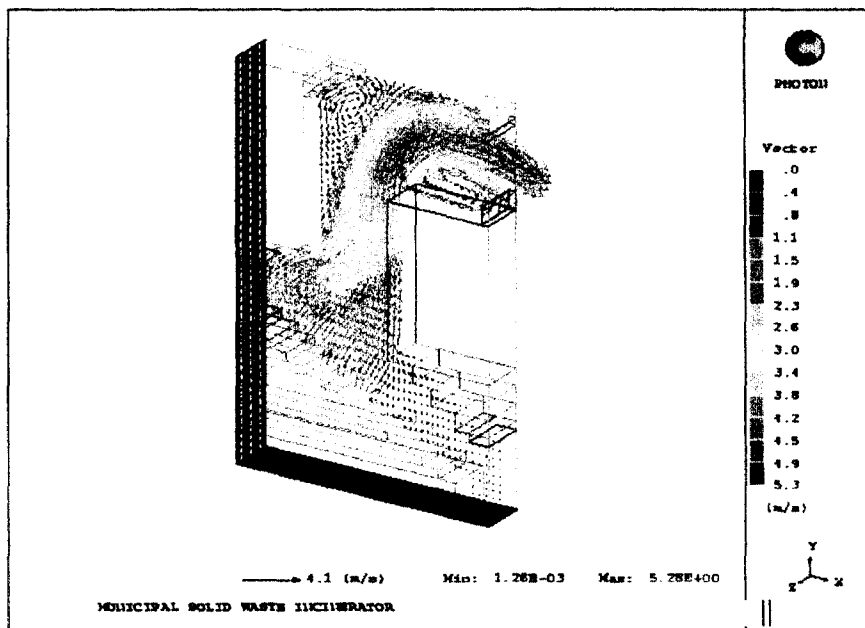


Fig. 2 The velocity vector plot for municipal solid waste incinerator

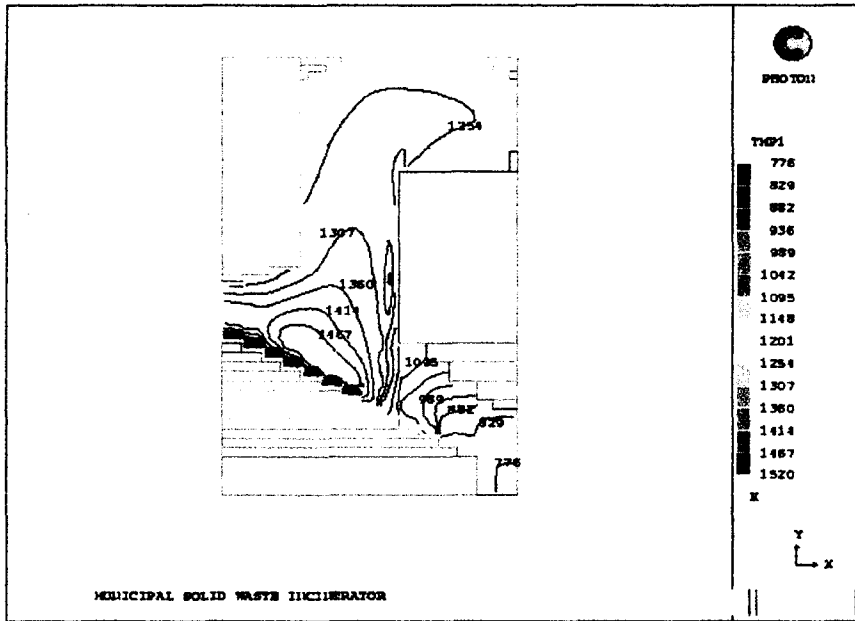


Fig. 3 The two dimensional view of temperature contour

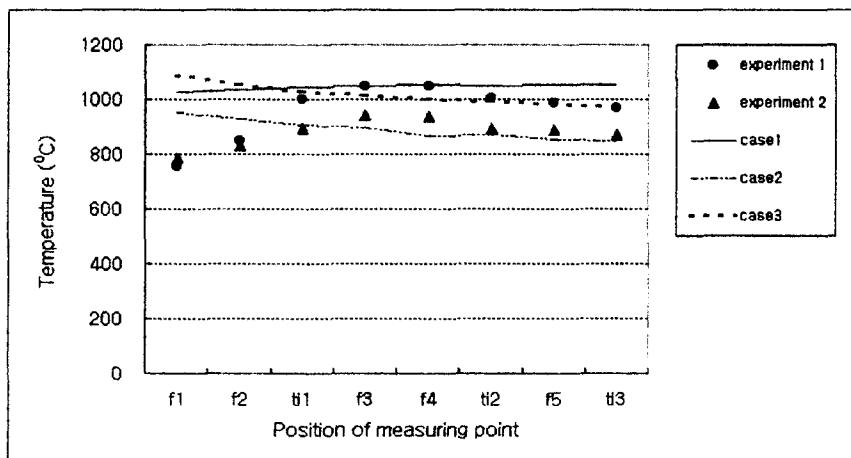


Fig. 4 Comparison of temperature profiles between computed results and experimental data