

한국에너지공학회(1998년도)  
추계 학술발표회 논문집P138-143

## 50 톤/일 스토커소각로 연소특성에 관한 실험 및 수치해석

박병수, 이진욱, 서정대\*, 허일상\*\*

고등기술연구원 에너지/환경연구실, 대우중공업(주) 선박해양기술연구소\*,  
(주)대우-건설 환경사업팀\*\*

### Experiment and Simulation for Combustion Characteristics in the 50 ton/day Stoker Incinerator

Byung Soo Park , Jin Wook Lee, Jung Dae Seo\*, Il Sang Huh\*\*  
Institute for Advanced Engineering, Daewoo Heavy Industry\*, Daewoo Corpoartion\*\*

#### 1. 서론

국내의 도시쓰레기는 미국이나 유럽의 쓰레기에 비하여 고수분 및 저발열량의 특성을 가지므로 외국의 소각기술을 그대로 도입하여 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 현재 국내의 도시쓰레기를 안정적으로 연소시키며, 이에 따르는 공해물질의 발생을 최소화하는 소각 기술의 개발이 필요한 실정이다. 이러한 목적의 일환으로 고등기술연구원에서는 50톤/일 처리용량의 파일롯 플랜트에 관한 수치해석적 연구를 수행하고 있다.

본 연구의 대상이 되는 도시폐기물 소각로에서는 연소실로 투입된 쓰레기가 화격자의 구동에 의해 이송되면서 화격자상에서 수분의 건조, 휘발분의 탈휘발화, 고체 성분의 표면연소가 일어난다. 그리고 1,2차 연소실에서는 휘발분 및 비산된 고체의 연소가 일어나는데, 이때 대류 및 복사열전달 등의 복잡한 현상을 수반하는 유동장이 형성된다. 더욱이 불균질한 특성을 갖는 쓰레기층 내에서의 복잡한 현상때문에 발생하는 경계조건 설정의 불확실성으로 연소실내의 연소 현상을 전산해석하는데 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 화격자상의 연소현상에 대한 적절한 가정을 통하여 수분의 건조 및 탈휘발분화 과정을 모델링하였으며, 휘발성분과 산화제와의 연소반응을 해석하였다. 설정된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 50톤/일 파일롯 플랜트에서의 노내 온도, 연소가스 농도 그리고

속도분포를 측정한 후 전산해석결과와 비교, 검토하였다.

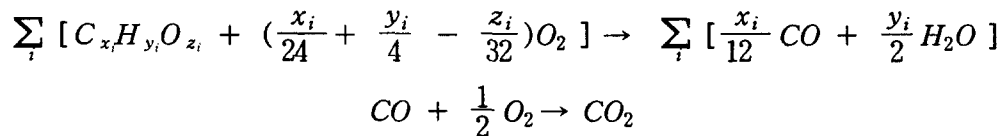
## 2. 수학적 모델

질량, 운동량, 에너지 및 화학종의 농도를 나타내는 지배 방정식은 3차원 직교좌표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}] + S_\phi$$

위 식에서 좌변항은 유동항(convection term), 우변의 첫 번째 항과 두 번째 항은 확산항(diffusion term)과 생성항(source term)을 각각 나타낸다.  $\phi$ 는 해석하고자 하는 변수로서  $\phi$ 가 1인 경우는 연속방정식,  $\phi$ 가 속도성분인 경우는 운동량방정식,  $\phi$ 가 엔탈피인 경우는 에너지방정식,  $\phi$ 가 화학종인 경우는 화학종방정식을 각각 나타낸다. 그리고  $\rho$ 와  $\Gamma_\phi$ 는 밀도와 확산 계수를 나타낸다. 한편 Reynolds 전단력의 모델을 위하여 표준 k- $\epsilon$  모델을 사용하였고, 난류반응 해석을 위해서는 Eddy Breakup 모델을, 복사 모델은 P-1 모델을 사용하였다.

연소실내 화격자상에서 쓰레기의 연소반응 모델링을 위해 쓰레기 성상 중 수분은 건조 및 연소부에서 증발하는 것으로 하고, 가연분은 기체상태의 연료인  $C_xH_yO_z$ 의 형태로서 연료와 연소용 공기의 2단 연소반응(two-step reaction)으로 모델화하였다. 쓰레기에서 방출되는 휘발성분과 연소용 공기와의 연소반응은 다음과 같다.



파일럿 플랜트 실험 결과와 비교 검토해 본 결과 휘발분의 연소반응은 다수의 연소반응으로 모델링되어야 한다고 판단되었으며, 본 연구에서는 휘발분의 연소반응을 두 개로 고려하여 해석을 수행하였다.

## 3. 결과

본 연구에서는 파일럿 플랜트의 실규모를 적용하였는데, 도시폐기물 조각로의 연소로내 열유동 해석을 위하여 상용 코드인 FLUENT를 사용하였다. [Fig.1]은 계산에 사용된 연소실의 도식도를 나타낸 것으로, 연소용 공기가 건조

부인 inlet 1, 주연소부인 inlet 2, inlet 3, 후연소부인 inlet 4, inlet 5로 각각의 hopper를 통하여 공급된다.

98년 상반기 파일롯 플랜트 운전자료 중 두가지 경우를 택하여 전산모사의 유입조건으로 사용하였는데 쓰레기의 조성, 쓰레기 투입량, 연소용 공기량 그리고 연소용공기 예열온도를 <표 1>에 나타내었고, 각 hopper 별 연소용 공기의 주입율을 <표 2>에 나타내었다.

<표 1> 쓰레기 성상 및 계산 조건

	case 1	case 2
쓰레기 조성 (%)	C:22.24, H:2.99, O:16.74, N:0.74 Water:42.76, Ash: 14.03	C:22.37, H:3.01, O:16.8, N:0.74 Water:42.62, Ash:13.96
쓰레기투입량 (kg/hr)	1249	1930
과잉공기비	2.04	1.49
연소공기온도 (°C)	123	123
저위발열량 (kcal/kg)	1692	1707

<표 2> 연소용 공기 분배율

hopper 연소용공기	1	2	3	4	5
case 1 (%)	14.5	55	15.5	12	3
case 2 (%)	12.4	28	55	4	0.6

[Fig.2]는 case 1의 CO 농도를 보여준다. 연소실 내에서 폐기물의 효율적인 연소를 위해서는 고온의 노내 환경에서 산화제와 연료와의 충분한 혼합이 있어야만 공해물질의 발생을 최소화할 수 있다. 그러나 노내 상태를 직접적으로 알 수 있는 모든 반응물질의 측정이 어렵기 때문에 이러한 노내 연소상태를 효율적으로 파악하기 위한 연소생성물로서 CO가 제시되고 있다. CO의 농도는 건조부와 주연소부 화격자 위에서 가장 높게 나타나고 있는데 이것으로 대부분의 쓰레기가 이 부분에서 일차연소반응으로 CO를 생성하는 것을 알 수 있다. 생성된 CO는 연소가 활발히 일어나는 2차연소실에서 출구쪽으로 갈수록 농도가 낮아지

고 있으며, 2차연소실 상단부 대부분의 영역에서 300 ppm 이하를 나타내고 있다. 출구에서의 CO 농도는 약 10 ppm으로 실험측정치인 3 ppm과 비교하여 만족스러운 결과를 나타내었다. 연소실 출구에서 CO의 농도가 낮다는 것은 연료와 산화제가 적절히 혼합되어 반응이 잘 일어나고 있음을 의미하므로, 파일롯 플랜트 실험 및 전산모사 결과에서 나타난 CO의 농도 분포에 의하면 노내 쓰레기의 연소가 활발히 일어난 것으로 판단된다. [Fig.3]의 (a)와 (b)는 각각 case 1과 case 2의 소각로내 연소실의 온도 분포도를 나타낸 것이다. 그리고 이러한 노내 온도 분포를 통하여 소각로의 성능 및 연소 상태를 예측할 수 있는데 연소실의 출구 온도가 1123K 이상 되고, 2차연소실의 온도를 장시간 1173K 이상 유지시켜야 안정된 연소가 일어나며 독성물질인 다이옥신도 저감시킬 수 있다. 전산모사 및 실험 결과, 두가지 경우 모두 연소실 내부 온도는 주된 유동의 흐름 방향으로 높게 나타났으며 2차연소실 왼쪽 상단부와 출구쪽 하부의 재순환 영역에서는 중심부 온도보다 약 30~50K 낮게 나타났다. 그리고 화격자단 상부 중 건조부에서는 쓰레기의 수분증발로 인해 연소가 활발히 일어나는 주연소부에 비하여 온도가 50~100K 낮게 나타났고 쓰레기의 연소가 대부분 완료되는 후연소부의 온도는 case 1이 약 700K, case 2가 약 800K로 나타났다. 5번째 hopper로 유입되는 공기량은 전체 공기량의 3% 미만으로서 매우 미량이므로 5번째 hopper 상부는 유동의 흐름이 미약하거나 정체영역이 형성된다. 따라서 이 부분에서는 열 및 물질전달이 확산에 의해 이루어지게 되어 주연소부에서 발생된 고온의 열량이 전달되기 어렵고, 쓰레기의 연소가 대부분 완료되었기 때문에 후연소부의 온도가 주연소부보다 400~500K 낮게 측정된 것으로 판단된다. Fig. 2와 3에서 숫자로 나타낸 것은 실험에서 측정된 데이터로서 노내 온도는 case2가 case1에 비하여 약 100K 정도 높게 나타났는데 이는 쓰레기 투입량의 증가 및 공기비의 감소에 의한 것이다. 한편 과잉공기비가 1.3 이하로 공기가 너무 적게 공급되면 잉여공기의 부족으로 인하여 불완전 연소가 일어날 수 있고, 반면에 과잉공기비가 2.2 이상으로 공기가 너무 많이 공급되면 연료와 산화제와의 반응이 느려지며, 연소실의 온도가 낮아지게 되는 원인이 될 수 있다. case 1과 case 2, 두가지 경우 모두 전산모사 결과와 실험결과가 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

소각로 연소실내 쓰레기의 연소반응 및 CO의 생성·소멸에 대한 수학적 모델을 정립하였고, 50톤/일 도시쓰레기 소각로 파일롯 플랜트에서의 노내 온도, 연소가스 농도 그리고 속도분포를 측정된 실험 결과와 계산결과를 비교, 검토함으

로써 설정된 모델의 타당성 및 정확도를 검증하였는데 본 연구에서 정립한 쓰레기 연소반응모델은 만족할 만한 결과를 나타냈다.

쓰레기의 연소현상에 따른 연소실 내부의 위치별 온도, 연소가스 농도, 그리고 공해물질(CO, NO) 분포의 파악은 소각로의 설계 및 운전에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되며, 나아가 이러한 전산유체역학 기법에 의한 해석은 파일럿 플랜트 실험의 보완 및 보조 수단으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 환경부에서 지원하는 G-7 “도시폐기물 소각로 화격자 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다. 환경부 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. V. Nasserzadeh, J. Swithenbank and B. Jones, "Three-dimensional modeling of a municipal solid-waste incinerator", *Journal of the Institute of Energy*, vol. 64, pp. 166-175, 1991.
2. Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere publishing, Washington, 1980.
3. Huotari, J., Paakinen, K., "Staged Combustion of Pulverized Peat in a 5 MW Single Burner Furnace", IFRF 9th members conference, 1989.
4. 저공해 소각기술 도시폐기물 소각로 화격자 개발, 1차년도 보고서, 환경부, 1997.
5. 도시형 저공해 소각로의 종합 시스템 설계에 관한 연구, 3차년도 보고서, 환경부, 1995.
6. EPA, "Municipal Waste Combustion Study-Combustion Control of Organic Emissions", 1987.
7. Westbrook, C., Dryer, F., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", *Combustion Science and Tech.*, vol. 27, pp. 31-43, 1981.
8. V. Nasserzadeh, J. Swithenbank, D. Scoot, and B. Jones, "Design Optimization of a Large Municipal Solid Wastes Incinerator", *Journal of Waste Management*, vol. 11, pp. 249-261, 1991..

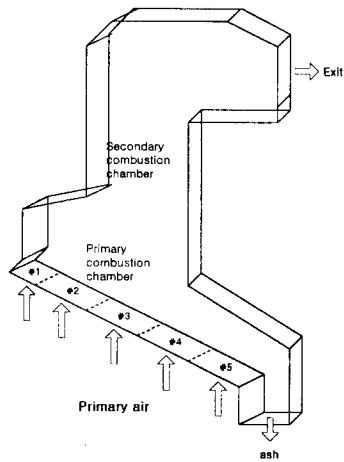


Fig. 1 Schematic of Pilot Plant incinerator.

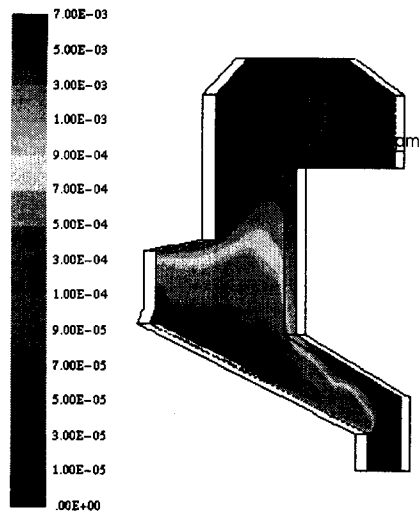
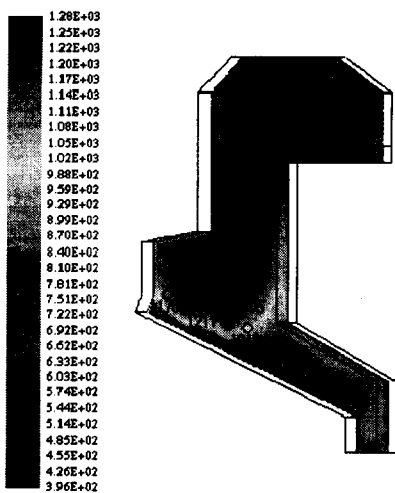
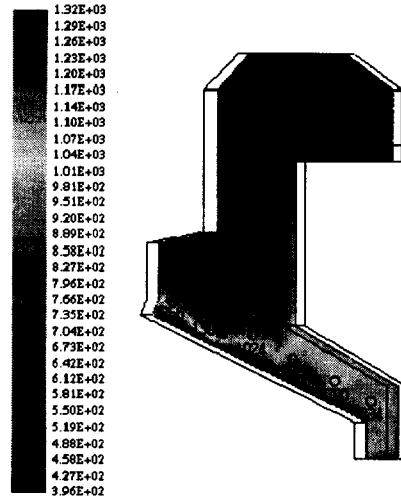


Fig.2 Comparison of CO concentration between predicted result and experimental data (circle with number is an experimental datum).



(a) case 1



(b) case 2

[Fig. 3] Comparison of temperature distribution between predicted result and experimental data (unit:K, circles with number are experimental data)