

고형 폐기물층 연소에 관한 연구

A study on the bed combustion of solid waste

신 동 훈, 최 상 민

한국과학기술원 기계공학과

Abstract

Waste combustion above a grate is the core process of incineration systems, stability of which should be guaranteed for emission minimization. However, complicated reactions and heat and mass transfer phenomena make understanding the process difficult.

One dimensional bed combustor with a numerical combustion model is utilized to investigate the combustion process of the bed, using cubic wood particles as a simulated fuel. Bed combustion behavior is characterized with apparent flame propagation speed, which has close relationship with air supply rate and chemical and physical characteristics of the fuel. Base on the availability of oxygen, two distinct reaction zone is identified; the oxygen-limited and the reaction-limited zone leading to the extinction by excessive convection cooling. The numerical modeling shows good agreement with the experimental results. The transient bed combustion behavior of local temperature and oxygen consumption rate is adequately reproduced. The numerical model is extended to model the waste bed combustion of a commercial incineration plant, which shows meaningful results as well.

1. 서론

최근 도시폐기물 소각로의 다이옥신 발생이 심각한 사회문제가 되면서 다이옥신 생성의 억제와 파괴를 위한 설계, 운전 방안의 개선이 시급하게 요구되고 있다. 연소실 내에서는 폐기물의 완전연소를 이루는 것이 필요하며 이를 위해서는 폐기물의 안정적인 연소와 함께 적정 온도 및 산소량과 연소가스 체류시간을 유지해야 한다. 도시 폐기물 소각로의 경우 폐기물의 성상이 불균일하고 폐기물이 화격자 위에서 층을 이루어 연소하기 때문에 열 및 물질전달과 연소과정이 매우 복잡하다. 이로 인해 연소 제어에 있어 가장 기본이 되는 폐기물의 연소과정에 대한 이해가 부족한 실정이다[1-3].

Figure 1은 폐기물 층의 주요 열전달 및 연소과정을 보여준다[4]. 폐기물은 피더에 의해 연소실로 투입된 후 주로 연소실로부터의 복사열전달에 의해 층 상부에서부터 수분이 건조되고 탈휘발과정이 시작된다. 여기에서 발생한 휘발분과 폐기물 입자 내의 좌가 산소와 반응하여 발생하는 열은 국부적으로 폐기물 층의 온도를 상승시키고 다시 복사 및 전도열전달에 의해 층 내부로 전달되면서 연소가 진행된다. 1차 연소공기는 화격자의 하부로부터 주입되며 일반적으로 100℃내외로 예열되므로 대류열전달에 의해 폐기물의 건조를 촉진시킨다. 폐기물 층 내에서 또는 상부에서의 직접 측정이 매우 어렵기 때문에 여기에 대한 연구는 극히 제한적이다. Santos는 실제 플랜트 연소실의 폐기물 층 상부 1m에서 온도 및 화학종의 분포를 측정하여 이로부터 폐기물의 연소과정을 대략적으로 예측하였다[5]. 단순화를 통해 폐기물 층에 대한 연구를 진행한 경우로는 가상 폐기물에 대한 고정상 실험으로 층 내부의 온도 및 화학종 조성을 측정한 Rojers[6]등의 연구가 있다.

폐기물층의 연소현상은 Figure 1에 나타난 바와 같이 다양한 물리 화학적 현상들이 복합적으로 발생하며 또한 연료의 성상도 정확한 예측이 불가능할 정도로 변화하기에 적절한 연소 모

[연락처] 대전 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과 최상민

tel: 042-869-3030, fax: 042-862-1284 email: smchoi@hanbit.kaist.ac.kr

델을 세우기에 어려운 점이 많다. 본연구에서는 고정상에서의 폐기물층 연소과정을 실험 및 이론적인 방법으로 규명하는 한편, 연소현상에 영향을 미치는 인자들을 도출하고 영향평가를 수행하는 기초적인 폐기물층 연소특성과약을 목적으로 한다. 나무를 연료로 이용한 고정상 연소로에서의 실험과 층연소시 발생하는 물리화학적 현상들을 고려한 계산 모델을 이용하여 다양한 변수 변화실험을 수행하였으며 실제 소각로에서의 측정자료와 비교 검토를 수행하였다.

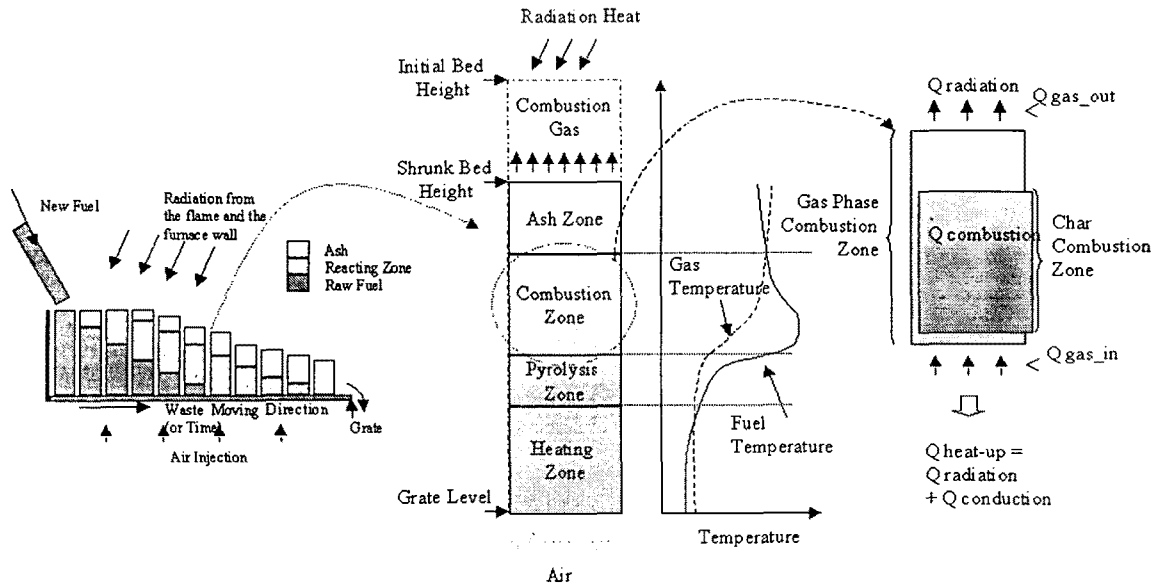


Figure 1 Physical & chemical phenomena occurring in waste bed combustion

2. 고체연료 고정상 연소실험

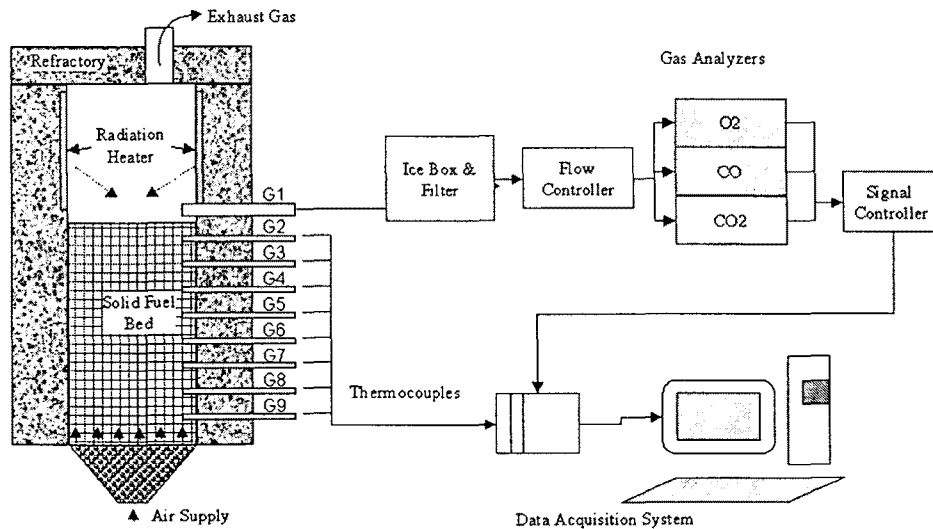


Figure 2. Flow diagram of the experimental apparatus

Figure 2는 연소실험에 사용된 실험장치들의 구성을 보여준다. 연소로는 두께 15 cm의 원통형 내화재로 단열되어 있으며 직경 15 cm 높이 45 cm의 실험용 연료시료는 전기로가 850 °C로 가열된 이후 연소로 아래에서 주입된다. 이때 공기는 화격자연소에서와 같이 시료 아래에서 균일한 속도로 주입되며 연료시료 높이에 따라 8개의 K-type thermo-couple(G2 - G9)이 유입되어 층내부의 온도를 연속적으로 측정한다. 시료표면근처에 위치한 측정구(G1)로 가스를 흡입하여

수냉각식 가스 샘플링과정을 거쳐 연소가스 화학종 농도분포를 연속적으로 측정한다. 사용한 연료시료는 나무와 세라크올 그리고 수분을 혼합하여 일반 폐기물의 발열량에 맞도록 제작하였다. 실험은 Table 1에 나타난 바와 같이 연료의 발열량, 연소공기의 주입량 그리고 입자의 크기를 변화시켜가며 17개의 경우에 대하여 수행하였다.

Table 1 Experimental cases for solid fuel bed combustion

	Water/Ash Content(W%)	LHV(kcal/kg)	Particle Size (m)	Air Supply Rate (l/min)
Case 1	5/10	2200	0.025	125
Case 2	25/10	1600	"	"
Case 3	45/10	1000	"	"
Case 4	"	"	"	50
Case 5	25/10	1600	0.01	125
Case 6	"	"	0.015	"
Case 7	"	"	0.02	"
Case 8	"	"	0.03	"
Case 9	"	"	0.02	10
Case 10	"	"	"	50
Case 11	"	"	"	200
Case 12	"	"	"	250
Case 13	"	"	"	300
Case 14	5/10	2200	0.03	400
Case 15	"	"	"	550
Case 16	"	"	"	750
Case 17	"	"	"	850

3. 수치해석적 연소 모델

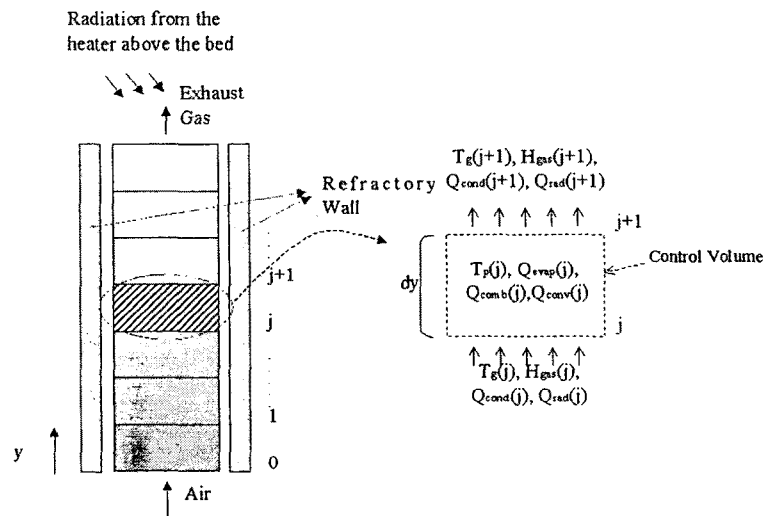


Figure 3 Numerical description of the bed combustion process

연소기의 폐기물 층은 Fig. 3에서와 같이 여러개의 유한체적으로 구분되며 계산에서 고려된 열 및 물질 전달현상들은 Table 2에 정리되어 있다[7-14].

각 유한체적내의 열 및 물질 전달 발란스식은 다음과 같다:

$$\frac{dC_p M_p T_p}{dt}(j) = Q_{comb}(j) + Q_{evap}(j) + (Q_{cond+H_{gas}} + Q_{rad})(j) - (Q_{cond} + H_{gas} + Q_{rad})(j+1) \quad (1)$$

$$Q_{comb}(j) = (Q_{char} + Q_{vol} + Q_{CO})(j)$$

한편, 가스매질의 열 및 물질 전달은 다음과 같다.

$$H_{gas}(j+1) = H_{gas}(j) + Q_{vol}(j) + Q_{CO}(j) + Q_{conv}(j) \quad (2)$$

식 (2)를 (1)에 대입하여 고체 연료에 대한 식을 이끌어내면 다음과 같다.

$$\frac{dC_p M_p T_p}{dt}(j) = Q_{char}(j) + Q_{evap}(j) - Q_{conv}(j) + (Q_{cond} + Q_{rad})(j) - (Q_{cond} + Q_{rad})(j+1) \quad (3)$$

위의 식 (2) 와 (3)은 Euler 적분법을 이용하여 시간에 따라 계산하여 연료층과 가스매질의 시간 및 높이에 따른 물리적 변수들의 값을 계산하게 된다 [15].

Table 2 Considered heat & mass transfer mechanisms in the computational model

	Transfer Mechanisms	Related Equation
Heat Transfer	Conduction between the particles	$Q_{cond}(j) = k_f A \left(\frac{dT_p}{dy} \Big _j - \frac{dT_p}{dy} \Big _{j+1} \right)$
	Convection between the bed and the combustion gas	$Q_{conv}(j) = h S_c (T_g - T_p)$ $Nu = 2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{1/3}$
	Radiation between the particles & between the bed and the chamber above the bed	Two Flux Radiation Model
Mass Transfer & Reaction	Convective mass transfer	$Sh = 2 + 1.1 Re^{0.6} Sc^{1/3}$
	Diffusion and evaporation of moisture	$\frac{dM_w}{dt} = 18 k_m S (C_{w_s} - C_{w_e})$
	Pyrolysis (Blassi)	$\frac{dM_{vol}}{dt} = 5.16 \times 10^6 \exp(-10700/T_p) M_{wood}$
		$\frac{dM_{char}}{dt} = 2.66 \times 10^{19} \exp(-12800/T_p) M_{wood}$
	Char reaction (Smith)	$\frac{dM_{char}}{dt} = -60 S_a C_{\alpha} \frac{1}{1/k_s \xi + 1/k_m}$
	Volatile reaction (Siminski)	$\frac{dC_{charO}}{dt} = -59.8 T_p^{0.3} (C_{charO})^{0.3} (C_{\alpha}) \exp(-12200/T_p)$
Carbon monoxide reaction	$\frac{dC_{CO}}{dt} = 1.3 \times 10^{11} C_{CO} C_{H_2O}^{1/2} C_{\alpha}^{1/2} \exp(-15,105/T_p)$	

4. 결과 및 토의

850 °C로 가열된 연소기 내부로 연료시료가 투입되면 시료의 상부는 연소실 상부로부터 복사열전달에 의해 가열되며 탈휘발화, 휘발분 연소, 최연소의 과정을 겪게 된다. 상부로부터 시작된 화염대는 점차로 전도 및 복사에 의해 아직 반응이 일어나지 않고 있는 하단부로 이동하게 된다. 시간에 따라 시료층내 온도변화를 측정한 결과인 Fig. 4는 각부위(G2-G9)의 온도가 일정한 시간간격을 갖고 급격히 상승하는 것을 보여주고 있는데 이는 측정부위에 화염이 전파된 것을 의미한다. 실험에 의하면 화염이 전파하는 속도는 시료층내 위치에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. Fig. 4 (b)의 계산결과에서도 동일한 경향을 보이는데, 초기에 화염이 발생하는데는 연소기 상부로부터의 복사 열전달이 주된 역할을 하지만 화염이 진행되면 상층부에 싸이는 재층이 상부로부터의 복사열전달을 차단하게 되고 화염대가 전파해 나가는 주요 원인은 연료자체의 발

열반응에 의한 열전달이 된다. 연료 입자의 크기가 커지면 측정되는 결과는 계산결과와는 달리 Fig. 4 (a)에 나타난 바와 같이 불규칙한 성향을 보이게 된다. 이는 연료 입자를 충전시킬 때 크기가 커지게 되면 층내 물질의 균질성을 완벽하게 만족시킬 수가 없기 때문이다.

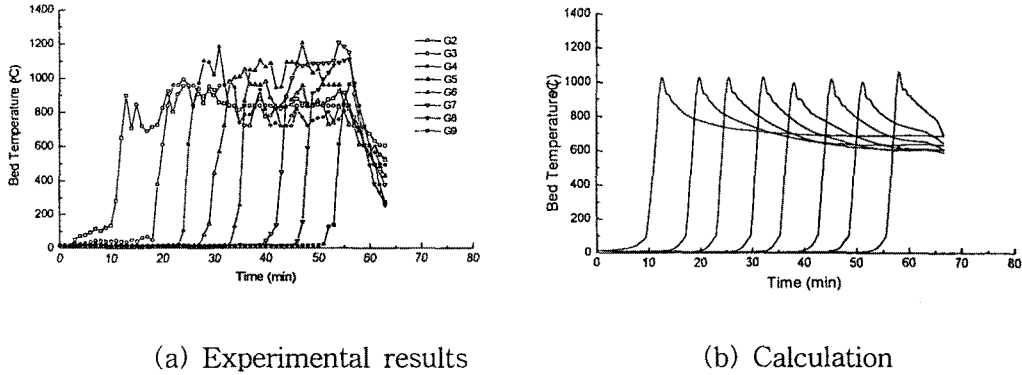


Figure 4 Transient temperature change at the 8 measurement point in the fuel bed

Figure 5는 실험과 계산결과를 비교하기 위해서 시료층내 높이와 시간을 축으로 한 등온선을 보여주고 있다. 측정점의 개수가 제한되어있어서 실험결과는 부드럽지 못한 경향을 보여주지만 시간에 따른 화염대의 전파속도, 연료층의 높이의 감소등의 중요한 인자들에 있어서 실험과 계산결과는 유사성을 보여주고 있다.

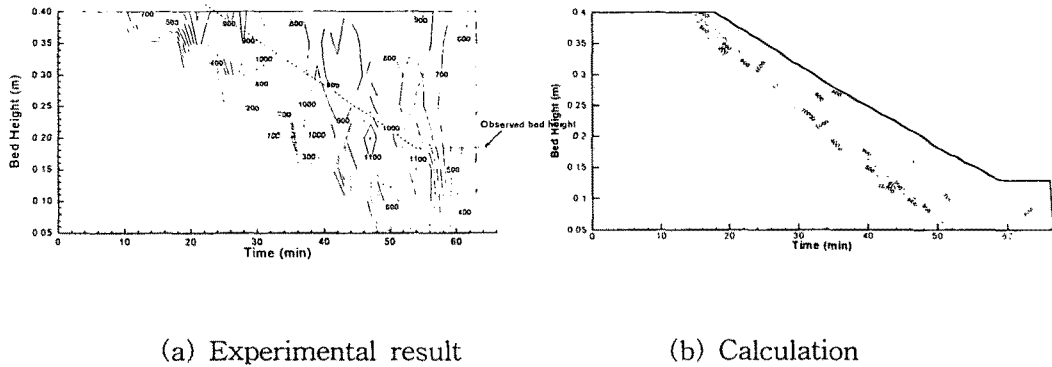


Figure 5 Reconstructed temperature contour

Table 1에 나타나 있는 실험들 모두 화염대가 전파되어 나가는 속도가 Fig. 4에 나타난 바와 같이 일정하였다. 각 실험경우별 화염대의 전파속도 측정 결과가 Table 2에 나타나 있다. 연소공기 유량, 연료의 발열량 그리고 연료 입자의 크기 모두 층연소의 영향을 주는 인자들임을 알 수 있다.

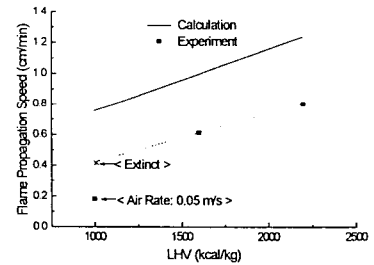
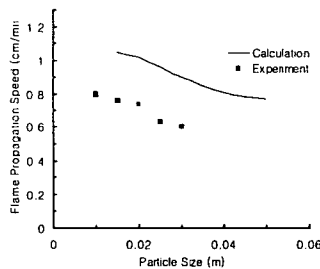
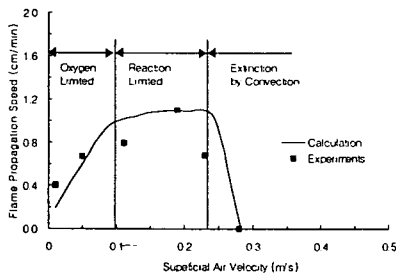
Figure 6(a)는 공기 주입량의 변화가 화염대의 전파속도에 미치는 영향을 보여준다. 공기의 주입량이 적은 경우 반응하고자 하는 연료의 산소 수요를 충분히 만족시키지 못하여 산소 부족 현상에 의해 연소가 활발히 진행되지 못한다 (Oxygen-limited condition). 공기의 주입량이 증가함에 따라 연소율도 증가하게 되고 이는 화염전파속도의 증가로 나타나게 된다. 공기의 주입량이 충분해지면 연소반응이 최대에 이르게 되고 연소율의 증가가 둔화된다 (Reaction-limited condition). 공기의 주입량이 더욱 증가하게 되면 공기 주입에 의한 대류냉각율이 증가하게 되어 임계점을 지나면 급격한 연소율 감소를 보여서 소멸된다(Extinction condition).

Figure 6(b) 에 나타나있는 연료입자의 크기에 따른 화염전파속도는 입자의 크기가 커질수록 감소하는 결과를 보여준다. 입자의 크기가 커지게 되면 단위 질량당 반응 면적이 감소하게 되며 이에 따라 연소율도 감소하게 되는 것이 주된 원인이다. 계산에 의한 화염전파속도 예측결과는 실험결과에 비해 높게 나타나고 있는데 이는 실험시 벽면이 완벽한 단열조건을 만족시키지 못하고 전도, 대류 및 복사열전달 현상이 존재하는데 반해 계산에서는 벽면을 완전 단열로 고려한 것이 한 원인으로 사려된다. 또하나의 가능한 원인으로서는 계산에서는 입자내부 온도분포를 일정하다고 고려한 점이다.

Figure 6(c)는 연료의 발열량이 화염전파속도에 미치는 영향을 보여준다. 발열량은 재성분과 수분의 함유량에 의해 결정이 되는데 발열량이 낮을수록 수분 증발 또는 재성분에 의한 연소 지연효과 및 단위 질량당 열 방출량이 줄어들게 되어 화염전파속도가 작으며 적은 공기 주입량에서도 소염현상이 발생하게 된다.

Table 2 Measurement result of flame propagation speed

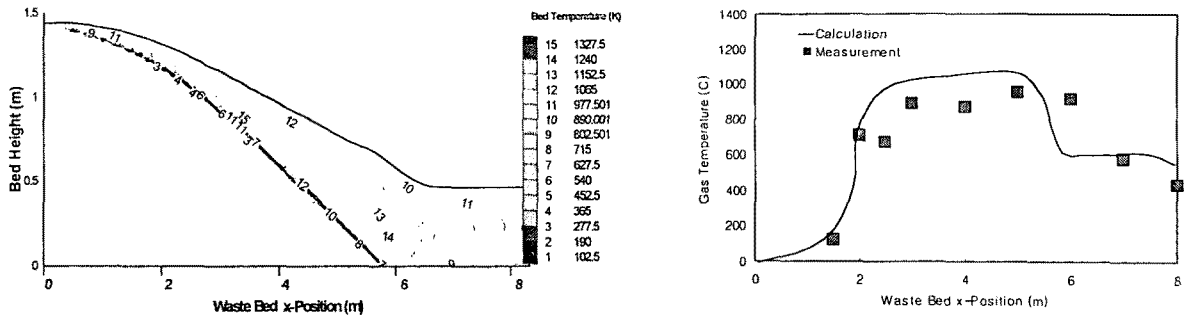
Case	Flame Speed (cm/min)	Case	Flame Speed (cm/min)
1	0.797	10	0.66
2	0.63	11	1.09
3	Extinguished	12	0.67
4	0.19	13	Extinguished
5	0.8	14	1.34
6	0.76	15	1.2
7	0.74	16	1.2
8	0.6	17	Extinguished
9	0.4		



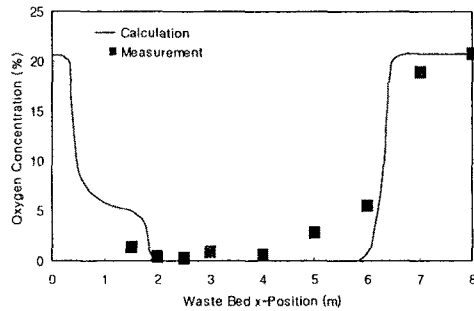
(a) Effect of air supply velocity (b) Effect of particle size (c) Effect of calorific value

Figure 6 Effects of selecte parameters on the flame propagation speed in the bed

Santos 가 측정연구를 수행한 실제 운전중인 대형소각설비에 대하여 화격자상에서의 폐기물층 연소현상에 대한 예측결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 입자의 평균 크기, 폐기물 층의 두께가 알려져 있지 않기에 입자의 크기는 5 cm 폐기물 층의 두께는 1.4 m로 고려하였다. 폐기물층 내부에서 발생하는 현상들에 대한 측정은 불가능한 상황이기에 폐기물층 윗부분에서의 가스 농도 및 온도 측정결과가 보고 되었으며 계산과 비교 결과 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 폐기물층 연소가 시작되는 위치, 그 이후 급격한 온도상등, 그리고 화염이 꺼지는 구간등에 있어서 실험결과와 계산에 의한 예측결과는 근사한 결과를 보였다. 가스 온도 및 산소 농도결과도 실험과 유사한 경향을 보여주어 계산모델의 연소현상에 대한 접근방법이 효과적임을 알수 있다.



(a) Bed temperature contour (b) flue gas temperature above the bed



(c) oxygen concentration above the bed

Figure 7 Prediction of waste bed combustion processs for a commercial waste incineration system (Santos[])

5. 결론

도시 폐기물 소각로에서 핵심 공정은 화격자위에서의 폐기물의 연소라 할 수 있다. 최적의 연소조건은 연소실 이후의 보일러 및 배가스 세정설비에서의 유해물질 생성 및 저감에 선도적인 영향을 주는 인자이다. 본 연구에서는 1차원 고체 연료층 연소기 실험과 이론적 모델링을 통하여 폐기물층의 연소현상에 대한 이해를 도모하였으며 실험과 계산모델의 비교에 의해 수치모델의 검증작업과 실제 소각로에로의 모델 확장 가능성 확인작업을 수행하였다.

폐기물층 연소에 영향을 미치는 주요 인자로는 연소용 공기 주입량, 연료입자의 크기, 그리고 연료의 발열량이다. 연소용 공기 주입량에 따라 산소 제한 반응조건 (Oxygen-limited), 반응 제한 반응조건 (Reaction-limited), 그리고 대류냉각에 의한 소멸조건 (Extinction by convection) 구간들이 존재하는 것을 확인하였다. 연료입자의 크기는 연소반응의 표면적에 관련된 인자로서 입자의 크기가 커질수록 단위질량당 반응표면적은 감소하게 되어 연소율이 감소하는 것으로 나타났다. 폐기물의 발열량은 단위질량당 열방출량과 관련된 인자로서 발열량이 높을수록 연소율이 증가하는 것으로 나타났다.

이론적 계산 모델에 의한 예측결과는 실험에서 도출된 결과들을 예측하는데 적절하였으며 실제 소각로에서의 측정결과와의 비교에서도 몇가지 부족한 정보에 대한 가정이 포함되었지만 폐기물층 연소현상에 대한 예측모델로 효과적임을 보여주었다.

6. 참고문헌

1. 최상민, "소각로 및 폐열회수 보일러 플랜트의 열설계," 대한기계학회지, 제 34 권, 제 12 호, pp. 1-21. (1994)
2. 김승기, 신동훈, 류창국, 최상민, "소각로내 열유동의 계산과 실험," 한국폐기물학회지, 제 11 권, 제 4 호, pp. 545-555. (1994)
3. 민지현, 신동훈, 최상민, "도시 폐기물 소각로 베드에서의 연소현상 관찰과 연소 최적화에 관한 연구," 대한기계학회, (심사중)
4. Shin, D., Ryu, C., Min, J., Choi, S., "Waste bed combustion process above grate," The 27th Symp. (International) on Combustion, The Combustion Institute, USA, 1998. 8.(poster presentation)
5. Santos, A.D, Study of MSW Incinerator: Overall Operation and On-site Measurements over the Grates, Royal Institute of Technology, Sweden, STEV-FVT-91/14, 1991
6. Rojers, J.E., Sarofim, A.F., Howard, J.B., and Williams, G.C., 1974, 15th Int. Symp. Comb., 1974, pp1137-1148
7. Blasi, C. D., Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 90, pp. 315 (1993).
8. Hottel, H. C., Williams, G. C., Nerheim, N. M. and Schneider, G. R., Kinetic studies in stirred reactors: combustion carbon monoxide and propane, *10th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 111; also see pp. 1413 (1965).
9. Siminski, V. J., Wright, F. J., Edelman, R. B., Economos, C. and Fortune, O. F., Research on methods of improving the combustion characteristics of liquid hydrocarbon fuels, *AFAPL TR 72-74*, Vols. I and II, Air Force Aeropropulsion Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, OH (February 1972).
10. Howard, J. B., Williams, G. C. and Fine, D. H., Kinetics of carbon monoxide oxidation in postflame gases, *14th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 975-986, (1973).
11. Wakao, N. and Kaguei, S. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*, Gordon & Breach Sci. Pub. Inc. (1982).
12. Shaw, D. W., Zhu, X., Misra, M. K. and Essenhig, R. H., Determination of global kinetics of coal volatiles combustion, *23rd Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1155, (1990).
13. Merrick, D., Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 2. Specific heats and heats of reaction, *Fuel*, Vol. 62, pp. 540 (1983).
14. Modest, M.F., Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill Inc. (1993)
15. Hornbeck, R.W., Numerical Methods, Quantum Publishers, Inc. (1975)