

소각로내의 폐기물층 연소특성 파악을 위한 연소모델 개발

A Development of Combustion Model for the Investigation of the Waste Bed Combustion Characteristics in a Waste Incinerator

전 영 남* · 김 승 호

조선대학교 환경공학부

(2003년 1월 7일 접수, 2003년 6월 9일 채택)

Young Nam Chun* and Seung Ho Kim

Dept. of Environmental Engineering, Chosun University

(Received 7 January 2003, accepted 9 June 2003)

Abstract

This study is to establish a waste bed combustion model that can be available to assist the design of incinerators for efficient operation control of municipal waste incinerators. An unsteady one-dimensional bed combustion modeling was developed which incorporates the various sub-process models and solves the governing equations for both gases and solids in the waste bed combustion phenomena. The combustion characteristics and the properties of the combustion gas released from the bed were investigated by using a developed model. Besides, a sub-model which predicts the formation and destruction of nitrogen oxides in the waste bed was also developed as a post-processor for the waste combustion model. It is found that the reduction rate of nitrogen oxides is enhanced in the char layer.

Key words : Combustion model, Incinerator, Nitrogen oxide, Waste bed

1. 서 론

최근 도시 고형폐기물 소각처리가 증가되면서 폐기물의 연소로 인한 유해 오염물질인 SO_x, NO_x, CO, Dioxin 등이 생성되므로 소각에 대한 논란이 되고 있다. 오염물질을 제어할 저공해 연소를 위한 소각로 연소실 형상에 따른 소각로 내의 유동특성

의 연구 (Nasserzadeh *et al.*, 1991), 소각로내 냉간유동실험을 통한 가스유동 연구 (Fehr and Vaclavinek, 1992)로 오염물질의 저감 방법을 제시하고 있다. 이러한 연구는 연소과정 중 폐기물 층에서 발생하는 미연분과 공해 물질의 발생을 구체적으로 예측할 수 없으므로 소각기작을 밝히는데 제한적이다. 오염물질의 발생을 최소화하고 소각로 내의 폐기물을 완전연소 시키기 위해서는 화격자의 연소과정에 대한 지식이 요구되며, 폐기물 층 연소에 대한 물리적, 화학적인 기초에 대한 분명한 이해가 필요하다.

* Corresponding author

Tel : +82-(0)62-230-7156, E-mail : ynchum@chosun.ac.kr

Santos(1991)는 스토커 소각로 화격자 상단의 배기 가스에 대한 실험에서 가스 화학종과 온도 측정, Cooper and Hallett(2000)는 폐기물 층의 연소모델 개발에 관해 고정상에서 화 연소모델을 제시하여 폐기물의 연소특성 연구, 화격자상에서 폐기물이 건조, 탈휘발, 화 연소과정의 연소모델이 제시되었다(Goh *et al.*, 1998). 하지만 연소실 내의 폐기물 층에 대해 온도와 화학종 가스 측정의 어려움과 폐기물 연소의 열전달과 물질전달을 충분히 묘사해 주는 연소모델에 대한 연구가 많이 부족하다.

본 연구는 폐기물 층 내부에서 일어나는 연소과정을 고체 연소모델과 열전달 모델로 해석하였다. 이를 위해 폐기물을 균질 연료로 보고 비정상 1차원 연소모델을 개발하여 폐기물 층에서 내부화염의 발생과 전파, 온도와 화학종 농도분포를 예측하였으며, 특히 질소산화물의 분포에 대한 결과를 제시하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 폐기물 층 해석

폐기물은 화격자를 지나면서 가열된 뒤 층 표면에서부터 연소실 내 가스와 벽면으로부터의 복사열로 인해 수분이 증발되며, 증발이 끝나면 열분해가 시작된다. 층 표면에서 열분해나 화연소 중에 방출되는 열이 폐기물 층 아래쪽으로 전달되어 층 아래쪽에서 증발이 일어나기까지 시간이 필요하므로 층 위쪽에서 열분해 및 화연소와 아래쪽에서 수분 증발이 동시에 일어나게 된다. 열분해 과정이 끝나면

화연소가 시작되며, 가연분이 모두 빠져나가면 재가 연소용 공기에 의해 냉각된다.

그림 1에 폐기물 층 연소모델을 위한 비정상 일차원적인 기본 개념도를 나타내었다. 실제의 폐기물 층은 입자의 조성과 성상이 불균일하고 화격자에 의한 이송과정에서 복잡한 혼합을 보이기 때문에, 주요한 거시적인 현상인 건조, 열분해, 기체연소, 화연소를 고려할 수 있는 범위 내에서 단순화하는 것이 필요하다. 1차원 모델은 폐기물 입자가 연속적이고 정적인 상태로 화격자 위에서 이송된다고 가정하고, 열 및 물질 전달은 변화가 큰 폐기물 층 깊이 방향만을 고려하였다. 이 때 화격자 위에서 위치 x 는 층 내부의 혼합을 무시하고 정적인 상태로 이송하고 있다고 가정하면, 투입 후 경과 시간 t 와 이송 속도 v_x 에 의해 $x = t \times v_x$ 가 결정된다.

2.2 수치해석 모델 및 방법

2.2.1 고체연소 모델

폐기물은 노내 복사열을 받아 휘발하기 시작한다. 일반적으로 열분해시 CH_4 , CO , CO_2 , O_2 , H_2 등의 탄화수소 계통의 휘발가스가 발생한다. 열분해는 500 K 전후에서 일어나며 열분해 모델은 Blasi(1993)가 나무의 열분해에서 제안한 식(1)의 반응상수를 이용하였다.

$$k = 1.5 \times 10^8 \exp(-126/RT_w) \quad (1)$$

여기서, R 은 기체상수이며, T_w 는 폐기물 온도이다. 본 모델에서는 이러한 열분해가스를 CH_4 로 가정하였다.

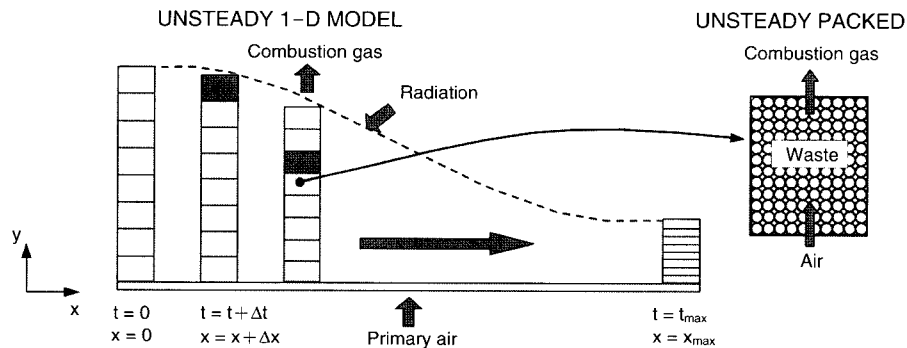


Fig. 1. Schematic diagram of unsteady one-dimensional bed combustion model of the solid waste bed.

최와 기체 반응은 입자의 표면에서 일어나므로 기체의 확산 및 입자 크기의 변화가 중요한 인자이며 최반응율은 식 (2)로 구한다 (Smith, 1979).

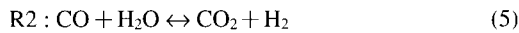
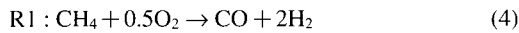
$$R_{char} = -W_{char}A_p C_{O_2} \frac{1}{(1/k_m + 1/k_r)} M_{char} \quad (2)$$

여기서, R_{char} 는 최의 반응율, W_{char} 는 최의 분자량, A_p 는 폐기물 입자의 표면적, C_{O_2} 는 산소의 농도, k_m 은 고체와 기체의 물질전달 계수, M_{char} 는 폐기물의 최량이다. k_r 은 산화와 가스화의 반응율 상수로써 식 (3)에 나타내었다 (Field *et al.*, 1967). T_g 는 가스의 온도이다. 최연소는 탄소가 산소와 결합하여 가연성 기체인 일산화탄소를 생성하는 것으로 석탄의 최연소모델을 고려하였다.

$$k_r = 2.3T_w \exp(-11100/T_g) \quad (3)$$

2. 2. 2 기체연소 모델

열분해에서 발생하는 가스와 최연소에서 발생하는 가스의 산화가 일어나는 반응은 식 (4)~(6)와 같다.



각각의 반응율은 John and Lindstedt (1988)가 제안한 탄화수소의 반응모델을 사용하였다. 표 1에 가스 반응율을 나타내었으며, A는 아레니우스 상수, E는 활성화 에너지, β 는 온도지수를 나타낸다.

2. 2. 3 복사 모델

본 연구에서 사용한 two flux 복사모델은 Shin and Choi (2000)에 의해 제안한 식 (7)을 사용하였다. 에너지 방정식에 필요한 단위 부피당 복사열은 식 (8)이 적용된다.

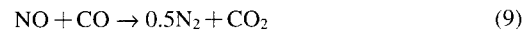
$$\frac{1}{2} \frac{dI^+}{dt} = I_b - I^+, \quad -\frac{1}{2} \frac{dI^-}{dt} = I_b - I^- \quad (7)$$

$$q_{rad} = \pi(I^+ - I^-)/\Delta y \quad (8)$$

여기서, I^+ 는 폐기물 층 위쪽으로 향하는 복사강도, I^- 는 아래쪽 방향의 복사강도이다. I_b 는 흑체 복사강도, q_{rad} 는 체적당 복사열을 나타낸다.

2. 2. 4 NO_x 모델

폐기물 연소시 주로 생성되는 질소산화물은 연료 NO_x이며 형성된 NO는 최영역에서 식 (9)처럼 CO에 의해 N₂로 환원되며, 반응율은 식 (10)으로 구한다 (Chan *et al.*, 1983).



$$\gamma_{NO} = \frac{k_1 P_{NO}(k_2 P_{CO} + k_3)}{k_1 P_{NO} + k_2 P_{CO} + k_3} W_{NO} \quad (10)$$

여기서, P_i 는 i 의 부분압력, W_{NO} 는 NO의 분자량, $k_1 = 2.1 \cdot 10^{-1} \exp(-13, 100/T)$, $k_2 = 7.4 \cdot 10^{-4} \exp(-9, 560/T)$, $k_3 = 1.5 \cdot 10^{-2} \exp(-20, 100/T)$ 는 반응상수이다.

2. 2. 5 지배방정식

폐기물 층을 고체상과 가스상의 균일한 연속체로 가정하고 제어체적에 의한 지배방정식을 수립하였다.

(1) 고체상

① 성분 보존방정식

$$\frac{\partial \rho_w(1-f_v)m_i}{\partial t} = (1-f_v) \dot{M}_{combustion, i} \quad (11)$$

② 에너지 방정식

$$\frac{\partial(1-f_v)h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left((1-f_v)k_w \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) + \frac{hA_p}{V} (T_g - T_w) + \frac{Q_{rad}}{V} + (1-f_v)q_{combustion} \quad (12)$$

(2) 가스상

① 질량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho_g f_v}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g f_v v}{\partial y} = -(1-f_v) \dot{M}_{combustion} \quad (13)$$

② 화학종 보존방정식

Table 1. Reaction kinetics of gas species.

	Reaction rate	A	E (kJ/mol)	β
R1	$kT^\beta C_{CH_4}^{0.5} C_{O_2}^{1.25}$	4.4×10^{11}	125	0
R2	$kT^\beta C_{CO} C_{H_2O}$	2.75×10^{10}	83.7	0
R3	$kT^\beta C_{H_2}^{0.5} C_{O_2}^{1.25} C_{H_2O}^{-1}$	3.0×10^{17}	167.5	-1

$$\frac{\partial \rho_g f_v m_{g,j}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v f_v m_{g,j}}{\partial y} = f_v \dot{M}_{\text{reaction},j} - (1 - f_v) \dot{M}_{\text{combustion},j} \quad (14)$$

③ 에너지 방정식

$$\frac{\partial f_v h_g}{\partial t} + \frac{\partial v f_v h_g}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(f_v k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + \frac{h A_p}{V} (T_w - T_g) + f_v q_{\text{reaction}} \quad (15)$$

④ 이상기체 방정식

$$\rho_g = p/R \sum \frac{m_j}{W_j} T_g, p = 1.013 \times 10^5 \text{ pa} \quad (16)$$

2.2.6 수치해석 방법

비정상 상태의 2차 편미분 지배방정식으로 식 (17)과 같이 일반화하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (17)$$

여기서, ϕ 는 일반적인 종속변수로 온도(T), 화학종의 질량분율(m_{CH_4} , m_{O_2} , m_{CO} , m_{CO_2} , m_{H_2O} , m_{H_2})을 나타내며, Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 ϕ 의 대해 각각 확산계수와 생성항이다.

지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사 체적에 기초한 유한체적법 (finite volume method)을 사용하였고, 비정상 1차원을 풀기 위해서 시간간격에 영향을 받지 않는 완전암시도식 (fully implicit scheme)을 사용하였으며, 대류항의 선형화를 위해 상류도식 (upwind scheme)을 이용하여 이산화방정식 (discretization equation)을 유도하였다. 각 검사체적에 대한 이산화방정식은 line-by-line TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm)에 의해 해를 구하였다. 본 모델은 Fortran을 이용하여 프로그래밍하였다.

2.3 연구방법

본 연구에서 설정한 소각로는 185 ton/day 규모이며 화격자의 크기는 10.83 m × 폭 4.2 m이다. 폐기물은 표 2에 나타내었다. 폐기물 층 높이는 0.563 m이며, 화격자상에서 체류시간은 60분으로 보였다. 주입공기는 공기비가 1.24로 화격자 위치에 따라 공기의 분포를 달리하였으며 시간에 따른 3차 방정식으로 공기유속이 주어진다. 폐기물 입자를 2 cm의

Table 2. Parameters of fuel characteristics of the municipal waste.

Physical and chemical analysis							
Paper	Plastics	Food & vegetables	Wood & garden trimmings	Textile	Non combustible		
22.87	14.26	41.75	6.95	3.13	11.04		
Proximate analysis							
Moisture	Volatile	Fixed carbon	Ash	Specific gravity (ton/m ³)	LHV (kcal/kg)		
55.55	27.61	4.49	12.35	0.32	1,760		
Ultimate analysis							
C	H	O	N	S	Moisture	Ash	Total
18.35	2.64	10.1	0.82	0.19	55.55	12.35	100

정육면체로 보았으며, 폐기물 층의 기공율은 0.54로 가정하였다. 해석시에 폐기물 층은 150개의 셀로 구성되어 1초 단위로 체류시간까지 계산하게 된다.

3. 결과 및 고찰

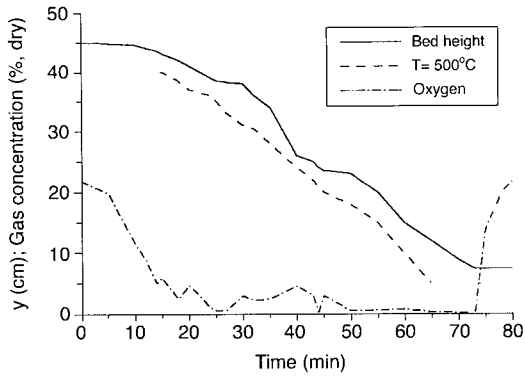
3.1 연소모델의 검증

본 연구에서는 연소모델의 검증을 위하여 고정상 연소 실험장치에서 행한 결과 (Ryu, 2001)와 비교하였다. 실험장치 구성에서 연소로는 두께 15 cm의 원통형 내화재로 단열되어 있으며 직경 15 cm 높이 45 cm의 연료는 전기로가 850°C로 가열된 이후 연소로 아래에서 주입된다. 연료는 수분 30%, 가연분 60%, 회분 10%로 구성되며 발열량은 2,138 kcal/kg 고, 밀도는 335 kg/m³이다. 공기유량은 100 l/min이며, 유속은 0.1 m/s로 80분 동안 공급해 준다.

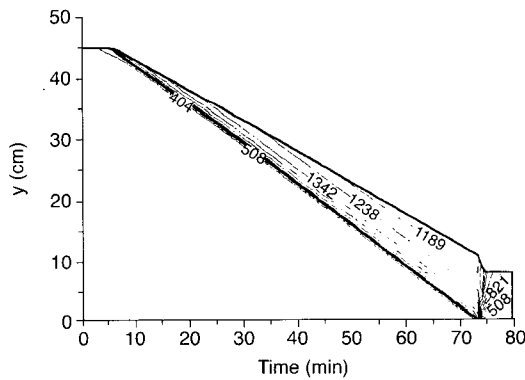
그림 2는 연료 층의 온도분포와 연소가스의 조성을 나타내었다. 그림 2(a)는 연료 층 높이와 온도가 500°C의 가진 높이에서 연소점과 산소 농도분포의 실험 데이터를 나타내었다.

그림 2(b)는 연료 층의 온도분포를 나타낸 것으로 수치해석에서 얻어진 가스 온도와 연료 층의 높이 변화를 실험에서 얻어진 결과와 대체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 연소가 종료되는 시점에서 연료 층의 높이는 7 cm 정도로 나타난다. 그러므로, 이 모델을 통해 화염진파 속도에 영향을 주는

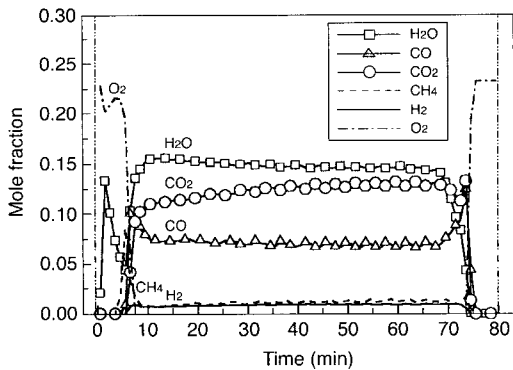
고체 연소와 가스 반응에 의한 열전달을 예측할 수 있다.



(a) Measured bed height and oxygen concentration



(b) Predicted gas temperature



(c) Predicted gas composition escaping the bed

Fig. 2. Comparison of measured and predicted data profiles.

그림 2(c)는 연료 층 표면으로 배출되는 연소가스이다. 시간의 경과에 따른 산소 농도분포를 비교하였다. 산소농도는 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있으며 주연소영역에서 가장 낮은 농도분포를 보여준다. 연소모델의 연소현상에 대한 접근방법이 효과적임을 알 수 있다.

3.2 폐기물 층 연소특성

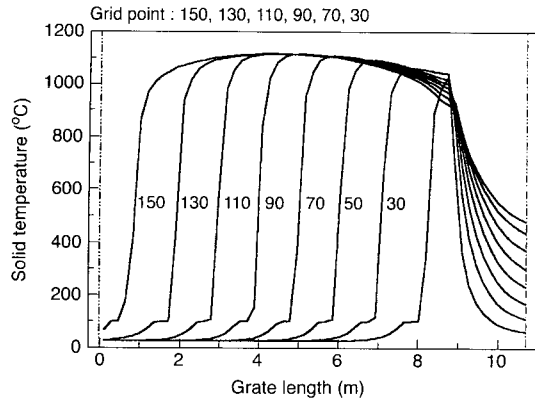
3.2.1 폐기물 층 온도

그림 3에 폐기물 층 내 온도를 나타내었다. 폐기물층 상부는 연소실 상부로부터 복사열전달에 의해 가열되며 탈휘발화, 휘발분 연소, 착연소의 과정을 겪게 된다. 상부로부터 시작된 화염대는 점차로 전도 및 복사에 의해 아직 반응이 일어나지 않고 있는 하단부로 이동하게 된다. 폐기물 층 상부에서 제어체적의 20개 간격으로 화격자 길이 방향에 따라 폐기물층 내의 온도변화를 나타내었다. 그림 3(a)에 고체온도를 나타내었다. 최상부 층부터 온도가 100 °C 부근에서 지속되는 경향을 볼 수가 있는데 이는 폐기물에 함유된 수분이 연소실 내의 복사열전달과 공기의 대류에 의해 열을 공급받아 증발하면서 시간이 지연되고 있다. 이후 온도구배는 폐기물이 건조되는 영역보다는 크게 보이고 있으며 260°C 정도에서 폐기물의 열분해가 시작된다. 고체 폐기물 온도는 전반적으로 일정한 1100°C로 유지되면서 연소를 이루고 있다.

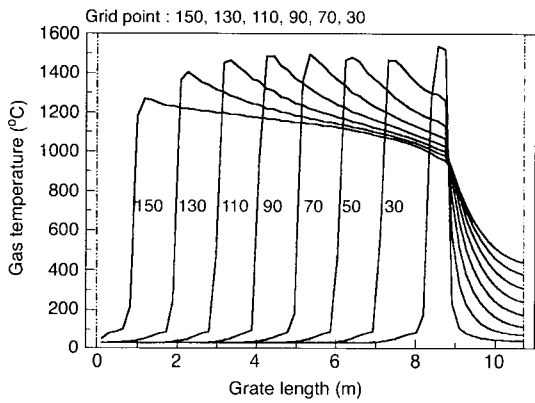
그림 3(b)는 가스온도를 나타낸다. 열분해에 의해 휘발분 가스가 생성된 이후에 가스의 온도 구배가 급격하게 변화하는데 가스가 연소되면서 열을 방출함에 따라 온도가 1,270°C까지 급속히 올라간다. 폐기물의 착화가 일어나고 나면 많은 양의 연소열이 발생하게 되며, 이 열에 의해 아래로부터 공급되는 연소용 공기가 가열된다. 가열된 연소공기는 화학반응에 참여하여 점차적으로 폐기물층 아래로 화염이 전파되면서 온도가 올라가기 시작한다. 화격자 거리 9m 부근에서 연소가 종료되며 연소용 공기에 의해서 가스온도가 냉각되어진다.

3.2.2 폐기물 변화율

그림 4에 폐기물 연소에 의한 폐기물 변화율을 나타내었다. 그림 4(a)에 수분, 휘발분, 최가 시간에 따라 변화하는 과정을 나타내었다. M_{time} 은 시간에



(a) Solid temperature

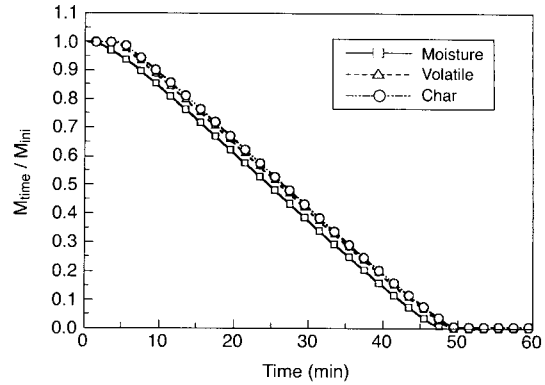


(b) Gas temperature

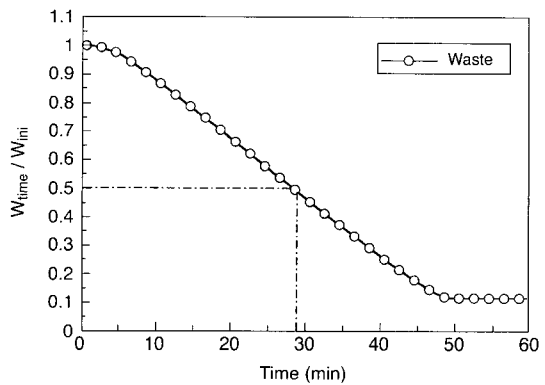
Fig. 3. Predicted solid temperature and gas temperature distribution in the waste bed.

다른 각 성분의 량, M_{ini} 은 주입 폐기물에 함유된 각 성분의 량을 의미한다. 수분은 2분 되어서 증발과정이 시작하게 된다. 연소가스에 의한 대류 열전달과 화격자 상부에서의 복사열전달에 의해서 증발한다. 폐기물 층 표면의 상부로부터 하부까지 수분증발은 대략 47분 걸리며 일정한 속도로 줄어들게 된다. 가연성 휘발성분은 폐기물이 건조된 후 열분해 온도에 도달되었을 때 약 5분에 시작하여 49분 정도가 되어서 끝나게 된다. 화 연소는 6분에서 시작하여 후연소부분에서 최의 연소가 빨라지는 경향을 보이면서 50분에 종료된다.

그림 4(b)에 폐기물 질량 감량곡선을 나타내었다. W_{time} 은 시간에 따른 폐기물 량, W_{ini} 은 주입 폐기물



(a) Moisture, volatile and char



(b) Waste mass reduction

Fig. 4. Moisture evaporation rate, pyrolysis rate of volatile, char burn out rate and waste mass reduction according to elapsed time.

량이다. 폐기물이 착화될 동안에는 질량의 변화율이 크지 않다. 10분 정도 되었을 때 폐기물이 활발하게 연소되어 폐기물 소모량이 증가하게 된다. 화격자에 폐기물이 투입되어 약 30분 경과될 때 전체 폐기물의 약 50%가 줄어들는다. 50분 정도되어 폐기물의 연소가 종료되며 12% 정도의 재만 남는다.

3. 2. 3 폐기물 층 높이

그림 5에 폐기물 층 높이 변화를 나타내었다. 그림 5(a)에 폐기물 연소가 진행됨에 따른 폐기물 층 높이 변화와 고체온도를 나타내었다. 초기 폐기물 층 높이는 53cm로 폐기물이 연소되면서 입자의 부피가 줄어들어 층의 높이가 줄어든다. 화염영역은 일정한 속도로 폐기물 층의 아래방향으로 이동하며

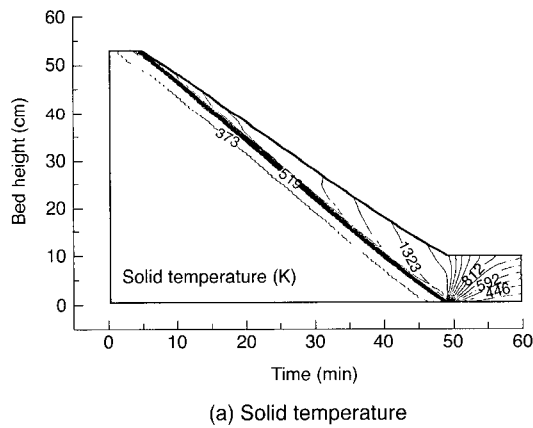
8.8 mm/min의 화염전파속도를 보이고 있다. 연소가 종료되는 시점에서 폐기물 층 높이가 10 cm 정도로 된다. 결과적으로 연소가 모두 끝난 후 폐기물 층 높이를 비교하면 81% 정도의 부피 저감을 보여주고 있다.

그림 5(b)에 좌 소모율과 폐기물 층 높이를 나타내었다. 좌연소가 시작되는 6분에서 층의 높이가 감소하게 된다. 폐기물 입자의 부피는 좌연소가 일어나면서 줄어들게 되며 입자의 부피 변화율에 의해서 폐기물 층 높이가 결정된다. 50분되어 좌연소가 완료되면서 층 높이도 최소화된다.

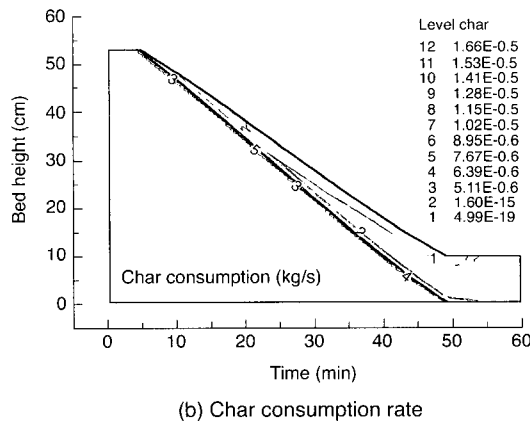
3.2.4 폐기물 층 열전달

그림 6에 폐기물 층 열전달을 나타내었다. 열전달로 인하여 화염이 폐기물 층 상부에서 하부로 이동

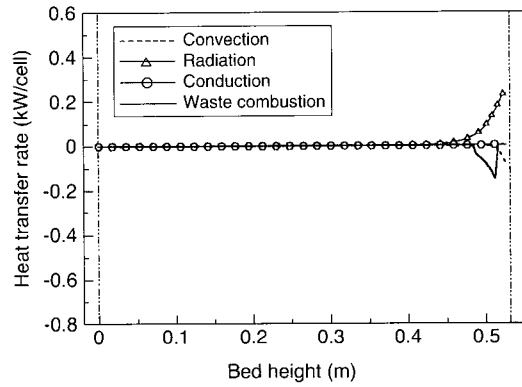
하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6(a)는 경과시간 5분일 때 열전달을 나타낸 것으로 폐기물이 착화되



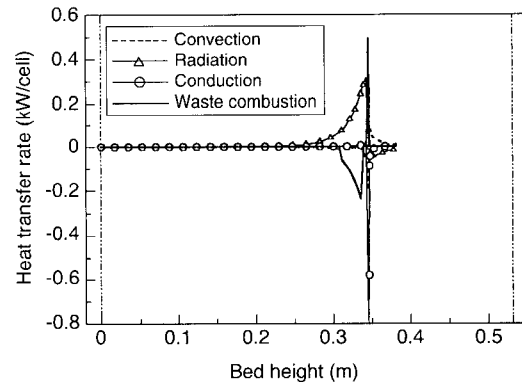
(a) Solid temperature



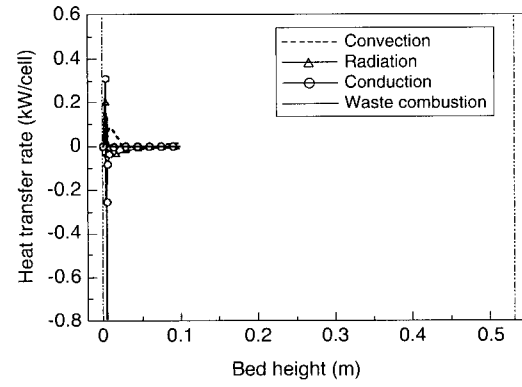
(b) Char consumption rate



(a) 5 min



(b) 20 min



(c) 50 min

Fig. 5. Predicted bed temperature and char consumption rate distribution in the waste bed.

Fig. 6. Heat transfer modes for the fuel phase in the waste bed.

기 전이다. 폐기물층 표면은 수분을 많이 포함한 차가운 연료로 되어 있다. 초기에 연소실 벽으로부터 복사열전달에 의해서 건조에 필요한 열량을 공급받게 된다. 폐기물은 가열되면서 연소할 수 있는 상태에 이르게 된다.

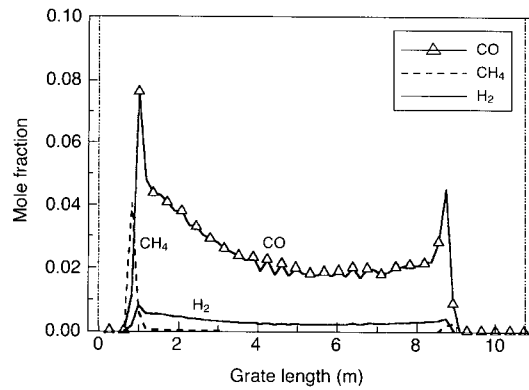
그림 6(b)에 20분에서 대류열, 전도열, 복사열, 폐기물 연소열 등을 통한 열적 평형관계를 볼 수 있다. 복사열은 폐기물을 가열하는데 사용되어지며 점점 감소함을 볼 수가 있다. 대류열은 폐기물이 연소되지 않는 부분에서는 열전달율이 음이지만 폐기물이 연소되면서 연소가스에 의해 양으로 바뀐다. 전도열도 대류열과 같은 현상을 갖는다. 폐기물 연소열은 가열된 폐기물이 연소에 의해 열이 발생하면서 화염을 형성하게 된다. 복사열과 연소열에 의해 화염이 폐기물층으로 전파됨을 알 수 있다.

그림 6(c)에 50분에서 폐기물의 연소가 끝나는 시점을 나타내었다. 복사열과 폐기물의 연소열은 줄어드는 반면 전도열이 커진다. 이는 주입되는 공기에 의한 폐기물층이 냉각되어서 발열량이 줄어들었기 때문이다.

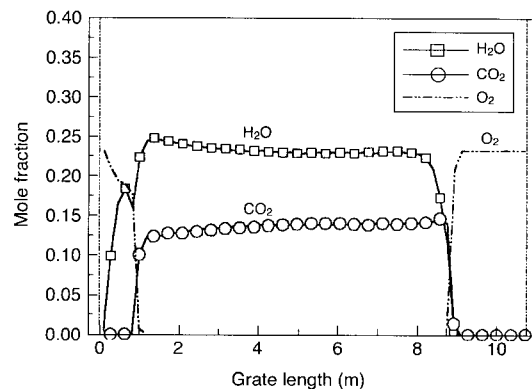
3.2.5 폐기물 층 가스 화학종

그림 7에 화격자의 위치에 따른 폐기물 층 표면에서 배출된 연소가스의 조성을 나타내었다. 폐기물의 온도가 상승함에 따라 화격자 1m 정도 부근에서 열분해가 이루어져 가연성 미연가스인 CH₄, CO, H₂가 급속히 증가한다. 이 미연가스는 주위의 산소와 반응이 빠르게 진행되므로, 산소의 농도가 급격하게 줄어드는 경향을 보인다. 연소가 진행되면 폐기물 층 내부에서 연소층 두께가 두꺼워져 반응을 일으킬 수 있는 공간과 시간이 충분하게 되면 열분해 성분이 충분히 연소되어 미연분 발생량이 줄어들게 된다.

CO₂는 폐기물 층 상부의 화염이 형성되는 부분에서 증가하기 시작하며 탄화수소 계통의 미연분의 가스가 산화되면서 일정한 값으로 유지된다. CO는 폐기물이 연소되는 부분에서는 낮게 유지되지만 폐기물 층 내의 연소가 시작되는 부분과 종료시점에서 높게 나타난다. 이는 고정탄소인 최가 연소되면서 미연분의 발생량이 증가하게 된다. 화격자 거리 9m 지점에서 CO₂, CO 가스가 급격하게 줄어들고 O₂ 가스가 증가하는 경향이 있는데 이는 연소가 중



(a) CH₄, CO and H₂



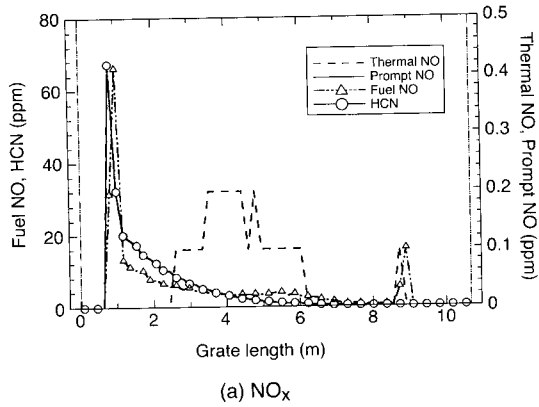
(b) H₂O, CO₂ and O₂

Fig. 7. Predicted gas composition at the top of the waste bed.

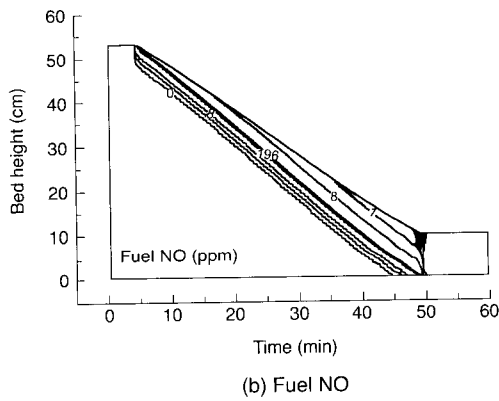
료됨을 의미한다.

3.2.6 질소산화물 농도분포

그림 8에 질소산화물 농도분포를 나타내었다. 그림 8(a)에 폐기물 층 상부에서 가스 유동장으로 방출되는 NO, HCN의 농도를 나타내었다. 폐기물 연소에 있어서 thermal NO와 prompt NO는 거의 발생되지 않음을 볼 수가 있다. 상부의 폐기물이 휘발온도에 도달하면서 화격자 1m 정도의 지점에서 휘발가스와 함께 HCN 가스가 빠르게 증가한다. 산소가 있는 범위에서 HCN은 NO로 전환된다. 열분해 과정이 끝나면 착연소를 이루는데 최에 결합되어 있는 질소는 산소와 결합하여 NO로 전환된다. HCN과 NO는 주로 폐기물 휘발가스의 주 반응영역대와



(a) NO_x



(b) Fuel NO

Fig. 8. Predicted NO_x concentrations at the top of the bed and fuel NO in the waste bed.

주 연소영역 전반부에서 많이 발생한다. 화격자 9 m 지점에서 화격자 하단에서 최연소가 이루어지기 때문에 이 부분에서 NO 발생량이 증가하게 된다.

그림 8(b)에 폐기물층 내의 연료 NO 발생량을 나타내었다. 폐기물층 내로 화염전파를 이루는데 주 연소를 이루는 폐기물층 영역에서 NO의 발생이 많은 반면 최가 존재하는 영역에서는 감소됨을 알 수 있다. 연소가 진행될수록 최층의 두께가 증가하게 된다. 최표면이 촉매역할을 하여 CO와 NO가 반응을 하므로 NO의 감소량이 증가하게 된다.

그림 9에 폐기물이 열분해되는 면에서 상부거리 에 따른 NO 저감율을 나타내었다.

시간 1200초일 때 화격자 높이 34.4 cm인 열분해 면으로부터 상부로 갈수록 NO의 저감율이 증가하고 있다. 10 mm 지점에서 90%의 NO 감소율을 보이

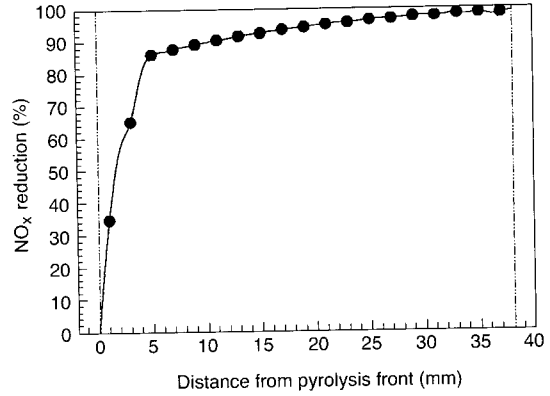


Fig. 9. Computed NO_x reduction according to distance from pyrolysis front.

고 있다. 이것으로부터 열분해 이후 최영역에서 NO가 감소하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비정상 1차원 연소모델을 개발하여 Ryu (2001)의 행한 실험 결과와 비교하여 수치 모델의 적용성을 검증하였다. 스토커 소각로에서 폐기물층 연소 특성을 파악하기 위해 개발된 연소모델을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 폐기물 연소에서 수분증발, 열분해, 최연소의 순서에 따라 연소과정이 이루어져 종료됨을 알 수 있었으며, 폐기물의 부피 감소율이 81%이다.

둘째, 열분해 시 미연분 가스가 증가하며 연소층 두께가 증가하는 주연소 영역에서 미연분의 발생량이 감소하게 된다.

셋째, 폐기물연소에서 NO_x의 발생은 연료 NO가 지배적이다. 열분해면 상부인 최영역에서 NO_x의 감소가 90% 이상 보이고 있다.

참 고 문 헌

- Blasi, C.D. (1993) Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels, Prog. Energy Combust. Science, 19, 71-104.

- Chan, L.K., A.F. Sarofim, and J.M. Beer (1983) Kinetics of the NO-carbon reaction at fluidized bed combustor condition, *Combustion and flame*, 52, 37-45.
- Cooper, J. and W.L.J. Hallett (2000) A numerical model for packed-bed combustion of char particles, *Chemical Engineering Science*, 55, 4451-4460.
- Fehr, M. and J. Vaclavinek (1992) A cold model analysis of solid waste incineration, *Int. J. of Energy Research*, 16, 227-283.
- Field, M.A., D.W. Gill, B.B. Morgan, and P.G.W. Hawksley (1967) *Combustion of pulverized coal*, The British Coal Utilization Res. Assoc., Leatherhead, England, 238-263.
- Goh, Y.R., R.G. Siddall, V. Nasserzah, R. Zakaria, J. Swithenbank, D. Lawrence, N. Garrod, and B. Jones (1998) Mathematical modelling of the burning bed of a waste incinerator, *J. the Institute of Energy*, 71, 100-118.
- John, W.P. and R.P. Lindstedt (1988) Global reaction schemes for hydrocarbon combustion, *Combustion and Flame*, 73, 230-249.
- Nasserzadeh, V., J. Swithenbank, and B. Jones (1991) Design optimization of a large municipal solid waste incinerator, *Waste Management*, 11, 249-261.
- Ryu, C. (2001) Fuel combustion and gas flow characteristics of the municipal solid waste incinerator, Ph.D. thesis, KAIST.
- Santos, A.M. (1991) Study of MSW incinerator: Overall operation and on-site measurements over the grate, STEV-FBT-91-14.
- Shin, D. and S. Choi (2000) The combustion of simulated waste particles in the fixed bed, *Combustion and Flame*, 121, 167-180.
- Smith, P.J. (1979) Theoretical modeling of coal or gas fired turbulent combustion or gasification, Ph.D. thesis, Dept. Chem. Eng., BYU.