

# 스토커형 소각로의 연소특성 및 연소 모델에 관한 연구

김호영\* · 전철균\*\* · 황호영\*\*\*

(1997년 9월 26일 접수)

## The Study on the Combustion Model and Combustion Characteristics for Stoker Type Incinerator

Ho Young Kim, Chul-Kyun Chun and Ho-Young Hwang

**Key Words :** Stoker(스토커), Incinerator(소각로), MSW(도시고형쓰레기), Physical Composition(물리적 성분), Combustion Model(연소모델)

### Abstract

A combustion model for the incineration of municipal solid waste(MSW) in the stoker type incinerator was developed by considering the variation of physical composition of MSW. Theoretical analysis and numerical simulation for the combustion characteristics in incinerator were conducted by using the present model and the effects of compositional variation on the incineration characteristics of MSW was examined theoretically. It is found that large excess air enhances drying, but depresses volatilization. For the large value of moisture content, pyrolysis is fast but drying is slow. As the value of plastic content increases, devolatilization becomes slower. Larger amount of primary air supply to the rear side of stoker leads to increase the possibility of delaying the combustion.

### 1. 서 론

현재 도시 생활쓰레기 및 산업쓰레기의 처리시 매립지 부족과 침출수등으로 인한 2차 오염등으로 인하여 폐기물의 매립처리 방법은 좁은 공간만을 가지고 있는 우리나라에서는 어려운 실정이다. 이에 비하여 쓰레기의 소각으로 인한 열작감량이 매우크고 (5% 이내) 폐에너지 회수의 장점도 있는 쓰레기 소각처리 방법은 매력적인 것이다. 그러나 소각처리는 연소시 NOx, SOx, CO, Dioxin, 분진등 대기오염물질을 생성 배출함으로써 이에 대한 대책이 필요하다. 오염물질 배출억제에 대한 대책

으로는 일단 생성된 오염물질의 후처리에 의한 제거도 중요하지만 근본적으로는 이같은 물질의 생성이 억제되도록 소각로를 설계하고 적절히 운전해야 하므로 이에 대한 지속적 연구가 필요한 실정이다.

연소시 오염물질 생성에 대한 해석을 위하여 소각로 설계 단계에서 소각처리 과정을 타당성 있게 모사할수 있는 이론적인 해석방법이 있다면 이를 이용하여 연소효율과 오염물질 배출특성등에 대한 해석과 소각로를 최적으로 설계할수 있는 자료를 확보하여 이용할수 있으며, 또한 적절하게 설계 제작된 소각로라 할지라도 효율적인 운전을 위해서는 투입 쓰레기 성분 및 상태의 변화에 따른 운전조건 조정의 필요하며, 이를 위하여 쓰레기의 성분변화가 연소특성에 미치는 영향에 대한 구체적인 자료가 요구된다. 쓰레기는 수집여건에 따른 구성 변화가 다양하여 실험적인 방법으로는 다양한 조건의

\*회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

\*\*회원, 목포대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\*회원, 생산기술연구원

변화를 수용할수 있는 자료를 확보하기가 어려우므로 적절한 이론적 방법을 통하여 다양한 쓰레기 구성에 따른 연소 및 배기가스 특성을 규명하여야 한다. 이론적 해석에는 쓰레기의 조성변화에 따른 운전조건을 확립할수 있는 폐기물의 연소모델의 개발이 필요하며 이 모델을 적용하여 적절한 운전조건이 확립이 수행되어야 한다. 그러나 현재까지 소각로의 연소특성 해석에 대한 연구들의 대부분은 적절한 쓰레기 연소모델을 적용한 예는 없는 실정이다.

도시 생활 쓰레기의 대부분은 스토커형 소각로에서 처리하며 스토커형 소각로에 관한 주요연구들은 다음과 같다. Fehr 등<sup>(1)</sup>은 소각로내 냉간유동실험을 통하여 공해물질 생성절감에 효과적인 가스유동에 대하여 연구한바 있으며, Nasserzadeh 등<sup>(2,3)</sup>은 수치모사를 통하여 기존 소각로 형상의 개선책을 제시하고 연소효율 및 열전달율을 향상시킨 모델을 제시한바 있다. 또한 Ravichandran,<sup>(4)</sup> Kitamura,<sup>(5)</sup> Shin<sup>(6)</sup> 등, Kim 등,<sup>(7)</sup> Ryu 등,<sup>(8)</sup> Choi 등<sup>(9)</sup>과 Ryu 등<sup>(10)</sup>은 실험 및 수치적 연구를 통하여 2차공기 공급의 중요성을 제시하였다. 또한 황등<sup>(11)</sup>은 소각로의 형상에 따른 소각로내의 유동특성을 연구하였으며, 이<sup>(12)</sup> 등은 2차 공기 공급을 포함하는 소각로내의 유동, 열전달 및 연소특성을 수치적으로 계산하였으며 Chun 등<sup>(13)</sup>은 쓰레기 성상에 따른 연소모델을 포함시켜 소각로내의 연소특성을 이론적으로 연구하였다. 또한 최 등<sup>(14,15)</sup>은 소각로 모형을 이용한 냉간 및 열간유동실험의 유용성을 제시하였으며 유동특성을 측정하였다.

이상의 연구들은 주로 소각로내 유동특성에 중점을 둔 연구이거나 공기의 공급 방식에 따른 연소특성의 규명에 대한 연구들로서 투입 쓰레기의 연소특성을 고려한 연구는 거의 없는 실정이다. 즉, 소각로 내부의 연소특성의 해석에 대한 연구들<sup>(11,12,16)</sup>도 연료로서 쓰레기의 성상 및 조성을 고려하기 보다는 그 발열량에 해당하는 기체연료로 열생성항을 대체함으로써 쓰레기의 조성에 의한 연소 특성을 고려하지 못했다. 실제로 쓰레기는 수분을 다량 함유하는 다양한 물질들로 구성되며 고온부로부터 열을 전달받아 건조, 열분해와 연소, 고체연소 등의 과정을 성분에 따라 차등적으로 겪는다. 이러한 실제 쓰레기의 연소 특성을 소각과정 해석에 적절하게 고려하기 위해서는 해석과정에 쓰레기의 다성분적 특성을 고려한 연소모델이 도입되어야 한다.

이에 관한 연구들중 쓰레기의 조성특성을 고려한 연구로는 스토커상 연소모델의 개발에 관한 최의 연구<sup>(17)</sup>와 Yang 등<sup>(18)</sup>의 연구가 있으나 이 모델은 쓰레기를 수분, 가연회발분, 가연성 고체와 회분등으로 구성된 석탄으로 대체함으로써 실제 쓰레기의 다양한 성분들을 고려하지 않았다.

따라서 본 연구는 투입되는 쓰레기의 조성특성이 고려된 연소 모델을 개발하고 이를 이용하여 2차공기 공급을 포함하는 실제 운전조건 하에서 소각로내의 유동, 열전달 및 연소특성을 해석할수 있는 이론적인 해석방법을 구성하는 것을 목적으로 한다. 또한 이를 이용한 수치모사를 수행하여 쓰레기의 조성 성분변화가 소각과정에 미치는 영향을 규명하여 효율적인 운전에 대한 기초자료를 도출하고자 한다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 쓰레기의 연소모델

스토커식 소각로는 Fig. 1과 같이 쓰레기가 스토커 위로 투입된 후 스토커의 운동에 따라 이동하면서 점차 가열되어 건조, 연소 및 후연소과정을 수행한다. 이때 가열은 노내의 고온 가스 및 하부에서 공급되는 1차 공기와의 접촉에 따른 대류열전달과 노내 고온가스, 화염 및 노벽으로부터의 복사열전달, 그리고 화격자와 먼저 투입된 쓰레기로부터의 전도열전달 등에 의하여 이루어진다. 이렇게 가열되는 쓰레기에서는 먼저 수분이 증발 방출되며

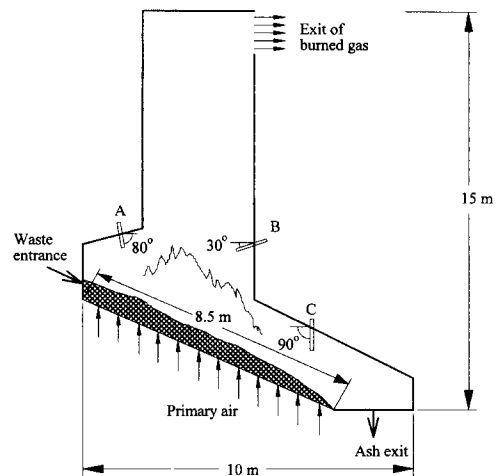


Fig. 1 Schematic diagram of stoker type incinerator.

이후 건조된 상태의 쓰레기는 온도가 상승함에 따라 물질 일부에 열분해 과정이 일어나서 가연성 기체를 방출하는 열분해 과정을 겪게 된다. 이때 배출되는 기체는 하부에서 공급되는 1차 공기와 혼합되어 가연성 혼합기를 형성하고 이것이 가열 착화되면 화염을 형성한다. 열분해과정이 끝난 뒤에는 고정탄소와 불연성 물질들이 화격자 상에 남게되며 이 중 고정탄소는 탄소와 공기중의 산소가 반응하는 고체연소과정을 겪게된다. 이같은 가연분의 연소가 끝나게 되면 남은 불연물과 회분 혹은 재는 점차 냉각되면서 스토커의 운동에 따라 외부로 배출된다. 이상에서 건조, 열분해, 기체연소와 고정탄소연소의 각 단계는 쓰레기를 구성하는 조성의 변화에 따라 달라진다. 이러한 스토커상 쓰레기의 연소 모델을 구성하기 위하여 본연구에서는 다음과 같은 가정과 단순화를 채택한다.

쓰레기는 매우 다양한 물질들이 섞여 있으므로 모든 구성 물질들을 고려한 모델을 구성하기는 어려우므로 본 연구에서는 물리적으로 동질감 있으며 연소특성이 유사한 물질군으로 쓰레기를 분류한후 각 물질군에서 대하여 건조, 휘발, 고정탄소 연소 특성을 파악한뒤 이들을 조합한 물리적으로 타당한 연소 모델을 구성하는 방법을 택하였다. 쓰레기의 성분에 대한 분석자료는 일반적으로 세종류이다. 공업분석은 수분, 가연분과 회분의 중량비를 측정하며, 원소분석은 구성 원소의 중량비를 측정하는 것이고, 물리적 분류(시각적 분류)는 물리적으로 동질감 있는 물질군으로 쓰레기를 분류하는 것이다. 따라서 쓰레기의 다양한 성분 특성을 고려한 단순화된 모델을 구성하기 위하여는 물리적 분류 자료에 근거한 연소 모델이 타당하다고 생각된다. 따라서 본 모델에서는 쓰레기를 종이류, 섬유류, 플라스틱류, 주방쓰레기(식품)류, 목재류, 고무 및 피혁류, 유리 및 도자기류, 금속류와 기타의 9종으로 구성된 것으로 한다. 또한 수분, 목탄(char) 및 재를 쓰레기 구성요소에 포함시키고 연소진행에서 이들의 영향을 고려한다.

실제 소각로내에서 쓰레기가 소각될때는 쓰레기 층 깊이 방향으로의 전도와 복사에 의한 열전달이 존재한다. 이들의 영향을 고려한 모델을 구성하기 위하여는 쓰레기 구성물의 형상, 표면적, 접촉면적과 쓰레기 층에 분포된 공간에 대한 자료가 필요하나 현재 까지의 보고된 자료가 불충분함은 물론 불확실성을 가지고 있어 본 연구에서는 평균적인 효

과만을 고려한 깊이 방향으로의 열전달을 무시한 모델을 구성하였다. 즉 노벽으로부터의 복사 열전달과 쓰레기덩이 간의 전도 열전달은 무시하며, 쓰레기는 먼저 수분이 증발한 후 열분해가 시작되고 뒤이어 고정탄소가 연소되는 것으로 본다. 휘발 및 고정탄소연소에 있어서는 Arrhenius형태의 반응식을 적용하며, 고정탄소연소는 탄소가 산소와 결합하여 가연성 기체인 일산화탄소를 배출하는 것으로 한다. 유의 연구결과<sup>(14)</sup>에 의하면 건조된 주방쓰레기, 종이, 섬유 및 목재류는 유사한 열분해 특성을 가지고 있으므로 이들 모두는 건조된 목재와 같은 열분해 특성을 갖는 것으로 한다. 스토커 위에 적층된 쓰레기의 한 미소요소에 대하여 이상의 내용을 고려한 지배방정식은 다음과 같다.

○ 질량 보존 방정식

$$\sum_k \Delta \dot{m}_{s,k} = \sum_k (\Delta \dot{m}_v + \Delta \dot{m}_w + \Delta \dot{m}_c)_{,k} \quad (1)$$

○ 에너지 보존 방정식

$$[C_{ps} T_s \sum_k \dot{m}_{s,k} + \dot{m}_a C_{pa} T_a]_{in} - [C_{ps} T_s \sum_k \dot{m}_{s,k} + \dot{m}_a C_{pa} T_a]_{out} + \sum_k (\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} + \Delta \dot{m}_c H_c - \Delta \dot{m}_v L_v - \Delta \dot{m}_w L_w)_{,k} = 0 \quad (2)$$

여기서

$$C_{ps} = \sum_k (\dot{m}_c C_{ps})_{,k} / \sum_k \dot{m}_{s,k} \quad (3)$$

$$T_s = \sum_k (\dot{m}_s C_{ps} T_s)_{,k} / \sum_k (\dot{m}_s C_{ps})_{,k} \quad (4)$$

$$\sum_k \dot{Q}_{rad} = A \epsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad (5)$$

$$\sum_k \dot{Q}_{conv} = h A (T_g - T_s) \quad (6)$$

$$\Delta \dot{m}_i = k_i m_i, \quad i = v, c \quad (7)$$

$$k_i = A_i \exp\left(\frac{-E_i}{RT_i}\right) \quad (8)$$

$$\Delta \dot{m}_w = \frac{\sum \dot{Q}}{L_w} \quad (9)$$

윗 식들에서  $\Delta \dot{m}$ 은 질량변화율,  $C_p$ 는 정압비열,  $T$ 는 온도,  $\dot{Q}$ 는 열전달율이며 발열량  $H=8000\text{kJ/kg}$ , 증발잠열은  $L=2257\text{kJ/kg(water)}$ ,  $756\text{kJ/kg(wood)}$ 와  $1890\text{kJ/kg(PMMA)}$ 를 택하였고,  $A$ 는 면적,  $\epsilon$ 은 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan Boltzmann 상수이다 또한 대류 열전달계수  $h=100/\text{m}^2\text{K}$ ,  $A_i$ 는  $i$ 종의 선지수계수(pre-exponential factor)로서  $7 \times 10^7\text{ l/s(wood)}$ 와  $2.82 \times 10^9\text{ l/s(PMMA)}$ ,  $E_i$ 는  $i$ 종의 활성화 에너지로서  $126,000\text{ kJ/kmole(wood)}$ 와  $130,200\text{ kJ/kmole(PMMA)}$ 이며,  $R$ 은 일반가

스상수이다. 하첨자  $k$ 는 쓰레기의 각성분,  $s$ 는 고체쓰레기,  $v$ 는 휘발분,  $w$ 는 수분,  $c$ 는 고정탄소분,  $a$ 는 공기,  $g$ 는 연소가스,  $rad$ 는 복사,  $conv$ 는 대류를 의미한다. 이상의 식에 필요한 상수값들은 기존의 자료<sup>(19~24)</sup>로부터 구하며 건조 주방 쓰레기의 비열은 나무에 준하는 것으로 하며, 기타 물질로 분류된 성분의 비열은 연탄재, 플라스틱은 PMMA의 값을 사용한다. 이상의 식들은 각 미소 요소에 대해 이산화방정식(discretized equation)으로 유도하여 수치해를 구하였다.

## 2.2 소각로내 유동 및 연소특성 해석

앞절에서 개발한 쓰레기의 연소모델을 소각로의 연소특성 해석에 적용하기 위하여는 연소모델을 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 성분보존 방정식의 경계조건 및 쓰레기 연소에 의한 생성-소멸항에 적용하여야 한다. 본 연구에서 채택한 소각로 형상은 Fig. 1과 같이 A, B와 C 세곳에서 2차공기를 공급하는 것으로서 2차공기 공급에 따른 연소상태에 대한 연구<sup>(12)</sup> 결과중에서 소각로 내부 유동장, 온도분포 및 화염의 위치등이 비교적 적절한 경우를 택한 것이며, 실제 소각로 운전시 분진의 산란 효과에 대한 것은 고려하지 않았다. 채택한 모델 소각로에 대한 연소특성 해석을 위한 지배 방정식들은 다음과 같다. 이때 난류 계산모델은  $k-\epsilon$ 모델을 사용하며 복사모델은 노내가스의 흡수율과 벽면의 방사율을 모든 과정에 대해 적분한 회체복사로 가정하여 가스의 흡수율을  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 농도에 의해 계산하며 광선추적방법을 채택한 DTRM(Discrete Transfer Radiation Model)을 사용한다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (10)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j) \quad (11)$$

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$u_i = \overline{u_i} + u'_i$$

이때  $u_i$ =평균속도,  $u'_i$ =요동속도성분이고 레이놀즈 응력은,

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (12)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

- $k$ -방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (14)$$

- $\epsilon$ -방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (15)$$

여기서

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

이때  $C_\mu=0.09$ ,  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ 을 택하였다.

- 성분보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) + S_i \quad (17)$$

여기서, 질량확산계수는

$$J_{i,i} = \rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (18)$$

이며,  $D_{i,m}$ 은 혼합기의  $i'$  성분에 대한 확산계수이다.

- 에너지보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \quad (19)$$

- 복사 모델(DTRM)

$$\frac{dI}{ds} = (a_{abs} + \alpha_s) I + \frac{a_{abs} \sigma T^4}{\pi} \quad (20)$$

여기서  $a_{abs}$ 는 흡수계수,  $\alpha_s$ 는 산란계수,  $I$ 는 전체반구복사강도이고  $\sigma$ 는 Stefan Boltzmann 상수( $5.672 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^2$ )이다.

본 연구에서 해석할 스토커식 소각로의 형상과 체원은 Fig. 1에 도시된 것 같이 높이 15 m, 너비 10 m, 폭 6.5 m이며 화격자의 길이는 8.5 m이고 쓰레기의 노내 잔류 시간은 2시간이다. 3개의 2차 공기 공급 노즐이 그림과 같이 일정 각도로 일정위

**Table 1** Composition of municipal solid waste.

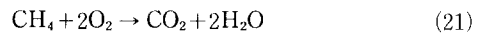
Proximate analysis								
Moisture		Combustible				Ash		
47.3		38.7				14.0		
Physical composition (%)								
Foods	Paper	Plastic	Textile	Rubber	Wood	Glass	Metal	Others
54.7	18.1	12.1	2.1	0.3	1.8	6.2	2.6	2.1
Ultimate analysis (%)								
Carbon		Hydrogen		Oxygen		Nitrogen		Sulfur
40.9		5.6		25.1		1.0		0.3
Fractions of physical composition (%)								
Components	Foods	Paper	Plastic	Textile	Rubber	Wood		
Moisture	73.6	22.1	14.3	15.2	8.0	37.0		
Combustible	23.6	69.3	82.8	83.6	87.0	60.0		
Ash	2.8	8.6	2.9	1.3	5.0	3.6		
Lower Heating Values (kcal/kg)								
Foods	Paper	Plastic	Textile	Rubber	Wood	Average		
906	2827	7650	3661	4741	2287	2057		

치에 부착되어 있으며 이 노즐의 폭은 0.01 m로 동일하다. 1차 공기는 화격자 하부에서 공급되고 2차 공기는 3개의 노즐을 통해서 공급되며, 수차 시물레이션은 2차원으로 수행하였다. 1차와 2차 공기의 공급비는 65%와 35%로 한다. 노벽은 열전도율 0.5 W/mK의 단열재로 둘러싸여 있고 수냉되어 그 온도는 500K로 일정하게 유지 된다고 가정한다. 벽면의 열복사 방사율(emissivity)은 0.9이며 산란계수(scattering coefficient)는 DTRM 모델사용의 편의상 산란이 없는 경우 즉 0.0으로 가정하고 노내 압력은 1기압으로 한다. 연소되는 쓰레기의 성분은 Table 1에 나타낸 도<sup>(25)</sup>의 자료를 사용하고 쓰레기 투입 온도는 300K로 한다. 공급되는 1, 2차 공기 온도는 423K으로 한다.

이상의 조건하에 스토커상 연소모델을 해석하여 그 결과를 소각로내 연소특성 해석을 위한 지배방정식의 경계조건으로 사용한다. 계산에서 화격자상의 모든 격자점 위치로부터 쓰레기의 각 성분이 방출하는 가연기체의 양과 발열량을 계산하고 이를 모든 성분에 대해 합한 다음 이와 동일한 발열량을

갖는 메탄(CH<sub>4</sub>)의 량을 계산하여 이를 노내에 공급한다. 이전의 연구들에서는 쓰레기 발열량에 맞추어 환산된 메탄량을 임의의 분포로 전체 화격자에 공급하는 등의 해석을 했으나 본 모델에서는 화격자상의 각 위치에서 발생하는 기체의 성분 및 공간적분포에 부합하는 경계조건을 부여하는 것이 가능해진다. 본 연구에서 소각로 특성 해석을 위한 지배방정식의 계산은 상용코드인 FLUENT를 본 모델에 맞게 보완하여 사용하였다. 연소반응은 메탄과 산소의 1단계 반응으로 보며 반응물은 Arrhenius 반응률과 Magnussen & Hjertager<sup>(26)</sup>의 반응률 중 최소값으로 취한다.

본 연구에서의 연소반응은 메탄과 산소의 Single-Step global chemical reaction에 의해 이산화탄소와 수증기가 발생한다고 다음과 같이 가정한다.



반응을 계산에서 *i* 성분들의 반응에 의한 화학반응의 생성항은 반응에 참여한 화학종들의 *k* 반응에 대한 반응 생성항들의 합으로 계산한다.

$$R'_i = \sum_k R'_{i,k} \quad (22)$$

$R'_{i,k}$ : 반응에서의  $i$  화학종의 생성/소멸율  
순수 화학반응에 대한 Arrhenius 반응률은 다음과 같다.

$$R'_{i,k} = -\gamma'_{i,k} M_i T^{\beta_k} A_k \prod_j C_j^{\nu'_{j,k}} \exp\left(\frac{-E_k}{RT}\right) \quad (23)$$

$j'$  reactants

이때  $\gamma'_{i,k}$ 는  $i'$  성분에 대한 몰 양론계수,  $M_i$ 는  $i'$  성분의 분자 질량,  $\beta_k$ 는 온도 지수,  $A_k$ 는 선 지수 계수,  $C_j$ 는 각  $j'$ 성분 반응물에 대한 몰 농도,  $\nu'_{j,k}$ 는 반응  $k$ 에서의 각  $j'$ 성분의 농도지수이고  $E_k$ 는 반응에 대한 활성화에너지이다. 난류-화학반응간의 상호작용을 고려한 반응율에 대한 난류의 영향은 다음의 Magnussen과 Hjertager의 Model을 사용한다.

$$R'_{i,k} = -A \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{m'_i}{\nu'_{i,k}} \quad (24)$$

A: 실험상수 (0.5: 생성물, 2.0: 반응물)

반응율은 위의 두 방법으로, 즉 (23)과 (24)식으로부터 계산된 값 중 작은 값을 택하여 계산한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연소모델 및 쓰레기의 스토커상 연소 특성

개발한 연소모델의 특성을 파악하고 소각로 연소 해석에 필요한 자료를 얻기 위한 계산에 사용한 쓰레기의 조성은 Table 1의 자료를 이용하여 조성을

정하였다. Fig. 2는 1차 공기온도 150°C, 노내 평균온도 850°C, 1차공기가 화격자 전체에 균일하게 공급되고 쓰레기 투입량 300 ton/day이며 과잉공기비가 1.2에서 1.8까지 변화할때 과잉공기비 (AR)가 스토커상 쓰레기 온도에 미치는 영향을 대한 것으로 D=0 m인 쓰레기의 투입점부터 D=8.5m인 연소 잔류물 배출점까지의 온도분포가 비교 도시되어 있다. 그림에서 초기 D=0에서 약 1 m까지는 가열과정, D=1.0에서 3.5m까지의 수평선은 건조과정, 약 D=4에서 5.5m까지는 열분해 및 휘발과정이고 D=5.5-7m의 큰 피크곡선은 휘발분 연소과정을 지난후 고정탄소 연소과정에 해당한다. 쓰레기 건조시는 전열량이 모두 수분증발에 사용되므로 온도변화가 없다. 건조된 쓰레기는 주위로 부터의 가열로 인하여 온도가 상승하는데 열분해에 의한 기체방출(휘발)시는 기화열을 빼앗겨 자체 온도 증가가 둔화된다. 쓰레기의 각 성분이 열분해되는 온도에서 온도증가 둔화의 경향은 반복되고 있다. 휘발과정이 끝난 쓰레기는 불연물과 고정탄소가 남게되고 고정탄소가 연소되면서 발열량 자체 흡수에 따라 큰 온도 상승이 나타난다. 연소가 종료되면 온도는 급격 강하하고 이후의 온도는 연소 잔류물의 온도이다. 이 같은 경향은 공기비와 관계 없이 공통적으로 나타나고 있는데 이중 공기비가 큰 경우일수록 수분의 증발은 빠르나 휘발성분의 방출은 늦어지며 고정탄소연소 시작이 늦다. 주입 1차공기의 온도는 수분증발 온도보다 높지만 건조 쓰레기 열분해 온도(600-700K) 보다는 낮다. 따라서 건조시에는 쓰레기에 가열효과를 주고 열분해시에는 냉각효과를 주게된다. 그러므로

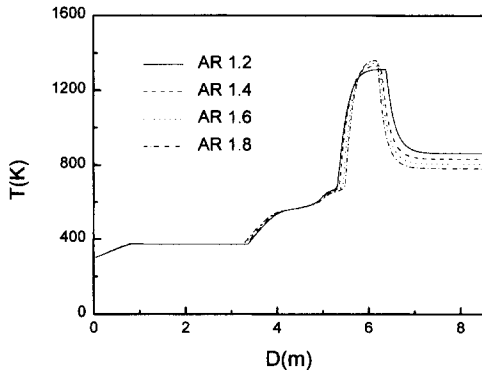


Fig. 2 Temperature of solid waste on the stoker (variation of excess air ratio).

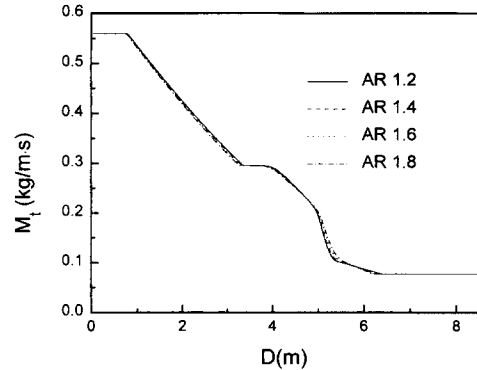


Fig. 3 Total mass of solid waste on the stoker (variation of excess air ratio).

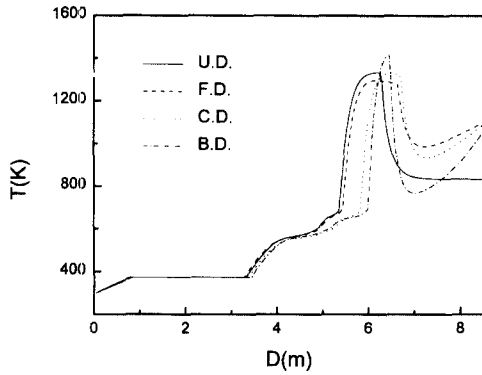


Fig. 4 Temperature of solid waste on the stoker (variation of distribution of primary air).

공기비가 큰 것일수록 건조가 빠르지만 열분해에 따른 휘발은 늦게된다. 고정탄소의 연소는 공기비가 클수록 짧은 시간 내에 완료되며 최고 온도도 높다. 이는 본 모델에서 고정 탄소의 연소율이 공기 중에 포함된 산소량에 의하여 좌우되기 때문에 나타나는 현상이다. 즉 공기비가 큰 경우 공급되는 산소량이 커서 연소율이 증가되어 짧은 시간 내에 연소가 종결되며 또한 온도도 높다. 한편 연소 종결후에는 공기비가 큰 것일수록 냉각 효과가 커서 연소 잔류물의 온도가 낮게 된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 경우에 대하여 고품 쓰레기에 대한 공기비의 변화에 대한 총질량의 변화를 비교 도시한 것이다. 투입후 가열 기간은 질량의 변화가 없으며 이후 수분증발로 거의 직선적으로 감소한다. 건조완료 후는 성분별 열분해로 인한 기체 방출로 질량이 감소되고 다음에 고정탄소의 연소에 따른 질량 감소가 이어진다. 공기비가 큰 것일수록 수분 증발이 빠른 반면 열분해에 의한 질량 감소는 늦다. 여기서 질량 감소량은 방출 가스량이라 할 수 있다.

Fig. 4는 과잉공기비 1.4이고 나머지 조건은 Fig. 2와 동일한 경우로써 1차 공기의 공급분포를 여러 가지로 변화시켰을 때의 온도분포를 비교 도시한 것이다. 공기분포는 같은 양의 공기를 화격자 전체에 균일하게 공급한 경우(균일분포: U.D.), 투입구 쪽에 집중시킨 경우(전방집중분포: F.D.), 중앙에 집중시킨 경우(중앙집중분포: C.D.)와 배출구 쪽에 집중시킨 경우(후방집중분포: B.D.)의 네 경우를 비교 검토 하였다. 집중분포의 경우는 Fig. 5에 나타난 것처럼 동일유량에 대하여 화격자의 1/

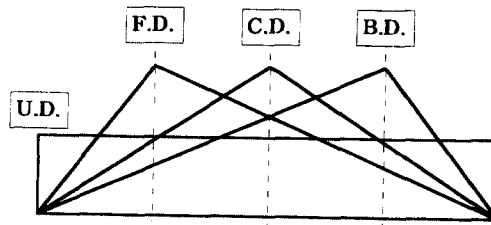


Fig. 5 Distribution of primary air.

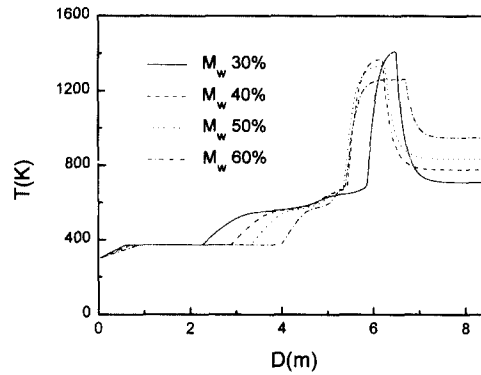


Fig. 6 Temperature of solid waste on the stoker (variation of moisture content).

4, 2/4, 3/4의 등분점에서 최대유량을 갖는 삼각형 유량분포를 취한 것이다. Fig. 4의 온도분포로부터 쓰레기의 건조는 공기의 집중점이 후방으로 갈수록 공기로 부터의 가열이 적어지므로 수분의 증발, 즉, 건조가 늦어지며 휘발성 물질의 열분해 또한 늦어짐을 알 수 있다. 공기가 후방으로 집중되어 공급될수록 건조부위에 공급되는 공기량이 적어 건조가 지연되고 열분해 영역에 많은 공기량이 공급되어 역시 휘발이 지연되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 과잉공기비(1.4)와 수분함량을 제외한 나머지 조건들이 Fig. 2와 동일한 경우로써 쓰레기에 포함된 수분의 함량의 변화에 따른 온도분포의 변화를 도시한 것으로 수분의 함량이 변화된 쓰레기의 조성은 Table 1의 자료를 기준으로 구성하였다. 즉, 먼저 수분의 함량을 정하고 그 나머지 성분의 조성비는 원래의 자료에 제시된 조성비와 동일한 것으로 하여 비례에 따라 양을 결정하였다. 공기량은 변화된 쓰레기와 원 쓰레기의 발열량 비에 따라 증감시켰다. 그림에서 수분함량이 적을수록 건조가 빠르고 열분해의 시작이 빠르지만 종료는 늦다. 수분 함량이 적으면 건조 쓰레기 양이 많

으므로 가열이 늦어지며 따라서 열분해에 따른 휘발과정도 늦은 것으로 해석된다. 반면 수분함량이 많으면 건조는 늦지만 휘발은 빠르게 진행된다.

Fig. 7은 과잉공기비 1.4와 플라스틱함량을 제외한 나머지 조건들이 Fig. 2와 동일한 경우로써 저온 열분해성 물질인 플라스틱의 함량 변화가 쓰레기의 온도분포에 미치는 영향을 살펴본 것이다. Fig. 6과 마찬가지로 방법으로 플라스틱 함량을 변화시킨 쓰레기를 구성했다. 그림에서 플라스틱의 함유량이 클수록 휘발분 방출 종료가 늦어지는 것을 알 수 있다. 그러나 쓰레기 건조 과정은 플라스틱

함유량에 따라 별 차이를 나타내지 않는다. 플라스틱 함유량이 클수록 저온 휘발물질이 많아 이들이 방출되는 시간이 길어지므로 가연기체 방출이 오래 지속되는 것으로 볼 수 있다.

이상 살펴본 바와 같이 본 연소모델은 스토커상 쓰레기 연소과정에 있어서 건조, 열분해 및 휘발, 고정탄소연소 등의 주요 특징을 나타내 주고 있으며 성분변화에 따른 차별적 연소과정을 보여 준다. 또한 본 모델을 사용하면 쓰레기의 질량변화로부터 방출 가스량을 계산할 수 있다.

### 3.2 소각로내의 연소특성

본 연구에서 개발한 연소모델의 적응성을 검토하고 쓰레기의 성분 변화가 소각로내 연소특성에 미치는 영향을 파악하기 위한 계산을 수행하였다. 개발된 연소모델로부터 스토커상의 쓰레기가 방출하는 기체량을 계산하여 이를 소각로 연소해석에 경계조건으로 사용하였다.

Fig. 8의 (a), (b)와 (c)는 1차공기온도 150°C, 1차공기 중앙집중분포, 쓰레기 투입량 300 ton/day, 과잉공기비 1.4, 노즐유량비 A : B : C = 20 : 10 : 5이고 Table 1의 성분을 갖는 쓰레기를 소각로에 투입했을 때 노즐의 속도, 온도 및 연료의 질량분율 분포를 도시한 것들이다. Fig. 8(a)의 속도 분포에서 노즐 A의 우측에 큰 재순환 영역이 형성

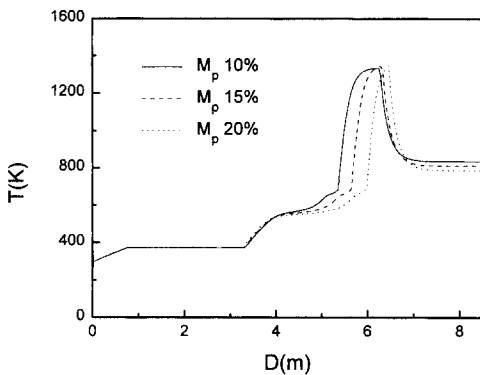


Fig. 7 Temperature of solid waste on the stoker (variation of plastic content).

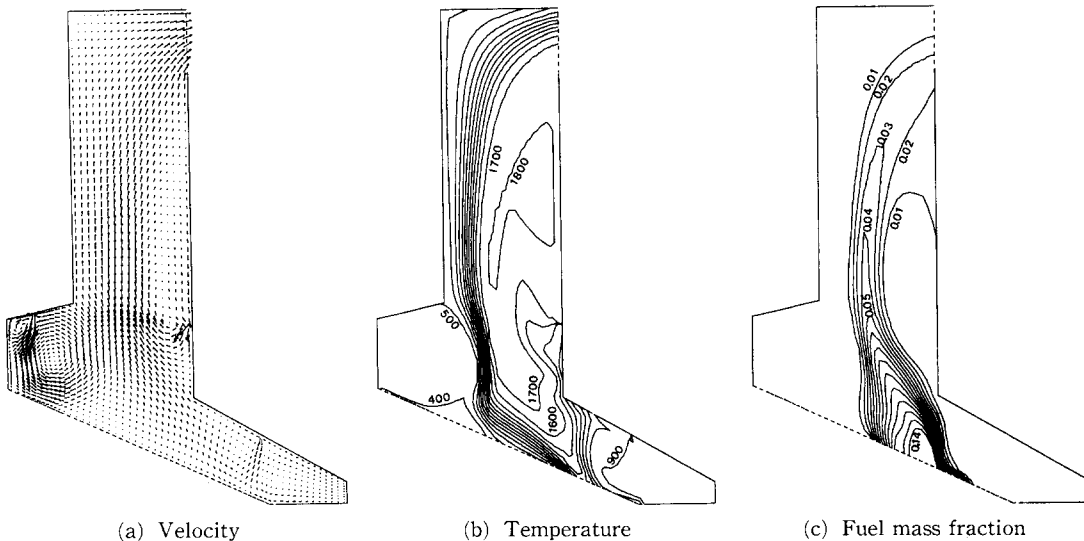


Fig. 8 Velocity, temperature and fuel distribution in incinerator(excess air ratio=1.4, nozzle flow rate A : B : C=20 : 10 : 5, centered distribution for primary air, moisture content=47.3%, plastic content=10%).



되며 노즐 좌측에도 약한 재순환 영역이 형성된 것을 알 수 있다. 노즐 B의 윗면에는 벽을 따라 길게 재순환 영역이 형성되며 노즐 C의 좌우에도 약한 재순환 영역이 형성된다. 노즐 A와 B가 형성하는 두 개의 재순환 영역 사이, 즉 소각로 중심에서 좌측벽 사이 구간이 연소가스의 주유동 경로가 되는 것을 알 수 있다. (b)의 온도분포에서 B 노즐이 부착된 우측벽을 따라 고온대가 넓게 형성되어 있음을 알 수 있으며 이같은 고온대가 연소가스 배출구까지 이어져 있어서 고온 상태의 연소가스가 배출됨을 알 수 있다. 노 하부의 1차연소실에는 좌우측에 저온대가 형성되며 1, 2차연소실 모두 고온대 주변에 급한 온도변화가 있음을 알 수 있다. 저온대는 2차 연소실 좌측벽을 따라 배출구까지 주유동 경로를 따라 이어져 저온상태의 가스가 배출되고 있음을 알 수 있다. 큰 온도구배와 고, 저온가스 동시배출은 전반적으로 기체간의 혼합이 잘 이루어지지 않은 채 연소가 진행되고 있음을 보여준다. 또한 저온가스 속에 유독성 가스가 동반 배출될 가능성이 있고 우측 수직벽의 열손상이 우려된다. 따라서 2차공기의 공급 조건을 조정하여 침투 거리를 크게 하고 혼합 촉진책을 강구할 필요가 있다고 보여진다. (c)는 연료기체의 질량분율을 도시한 것이다. 대략 스토커의 중앙에서부터 후반부에 걸쳐서 가연기체가 집중적으로 방출되고 있다.

방출된 기체는 노즐 B가 설치된 우측벽을 따라 진행하다가 노즐 B로부터 분출되는 공기제트의 영향으로 노의 중심부근으로 밀려나면서 위로 상승한다. 노즐 B의 공기가 이같은 연료층 속으로 침투하여 충분한 혼합효과를 낼 수 있다면 연료층은 연소되어 소멸되겠지만 이런 현상은 나타나지 않고 미연 연료는 출구까지 상승, 배출되고 있다.

Fig. 9(a), (b)와 (c)는 과잉공기비 2.3, 노즐간 유량비  $A : B : C = 10 : 20 : 5$ 이고 나머지 조건은 Fig. 8과 동일한 경우의 속도, 온도, 연료질량분율의 분포를 도시한 것이다. (a)의 속도분포를 Fig. 8(a)와 비교하면 A노즐에 비하여 B노즐의 유량이 2배로 됨에 따라 B노즐 하부쪽으로 큰 재순환 영역이 형성되고 A노즐 부근의 재순환 영역은 Fig. 8의 경우에 비교하면 크게 작아지며 B노즐 상부에 길게 형성되었던 재순환 영역이 없어졌다는 점을 알 수 있다. (b)의 온도분포는 Fig. 8(b)와 비교할 때 노 하부 1차연소실 좌우의 저온영역이 많이 줄어들었으며 1차연소실 내부에 고온영역이 폭넓게 형성되고 특히 최고온대는 1차연소실 내부에서 종결되며 노의 상부인 2차연소실에서는 온도경사가 비교적 완만한 온도분포를 보이고 있다. 연소가스의 주유동부가 고온대를 통과하며 최고온부가 1차연소실 중앙부에 위치하고 전반적으로 노 내부 온도구배가 줄어든 점등 Fig. 8의 상황이 많이 개선

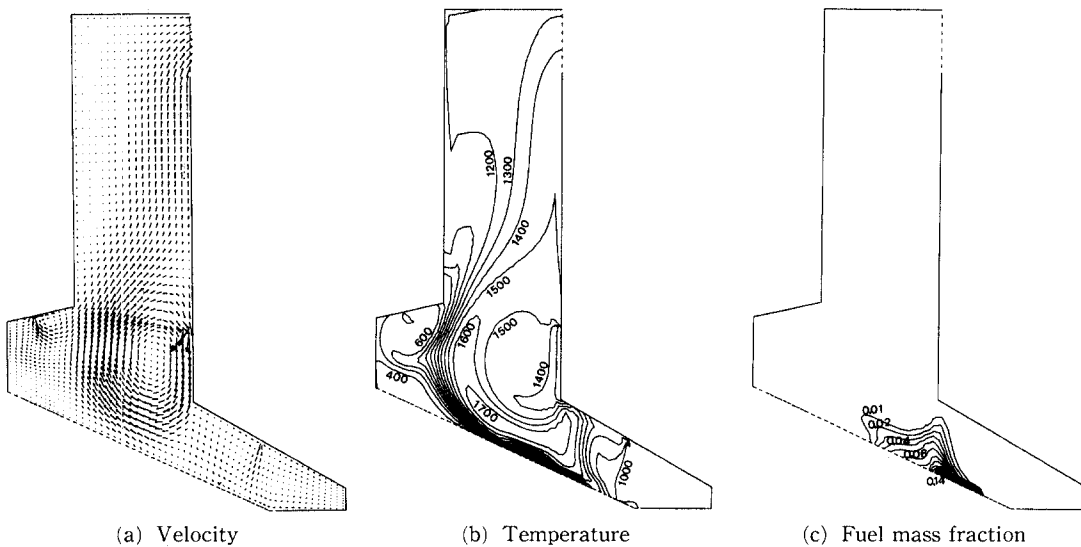
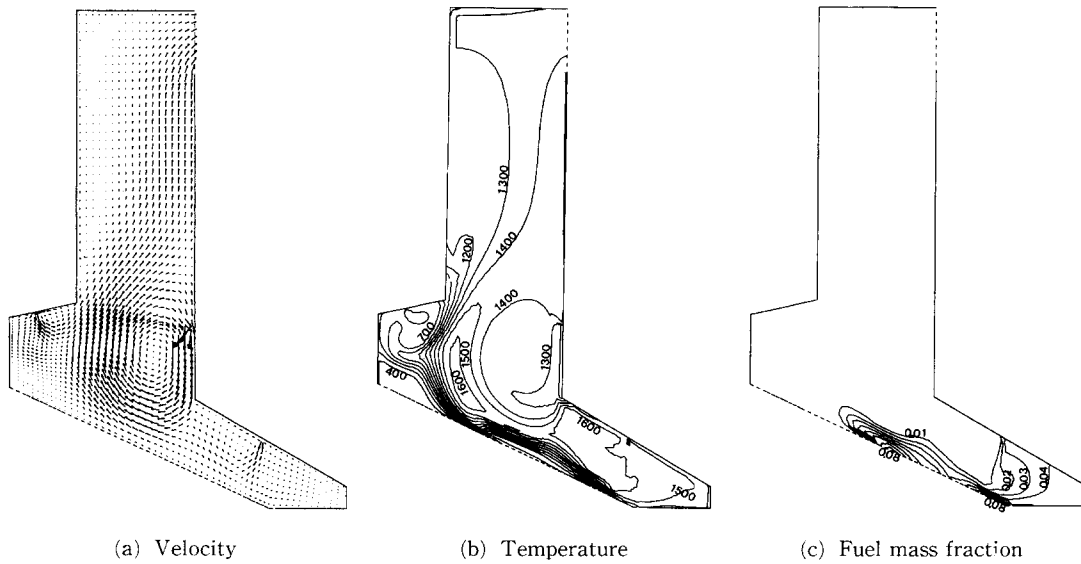


Fig. 9 Velocity, temperature and fuel distribution in incinerator(excess air ratio=2.3, nozzle flow rate  $A : B : C = 10 : 20 : 5$ , centered distribution for primary air, moisture content=47.3%, plastic content=10%).



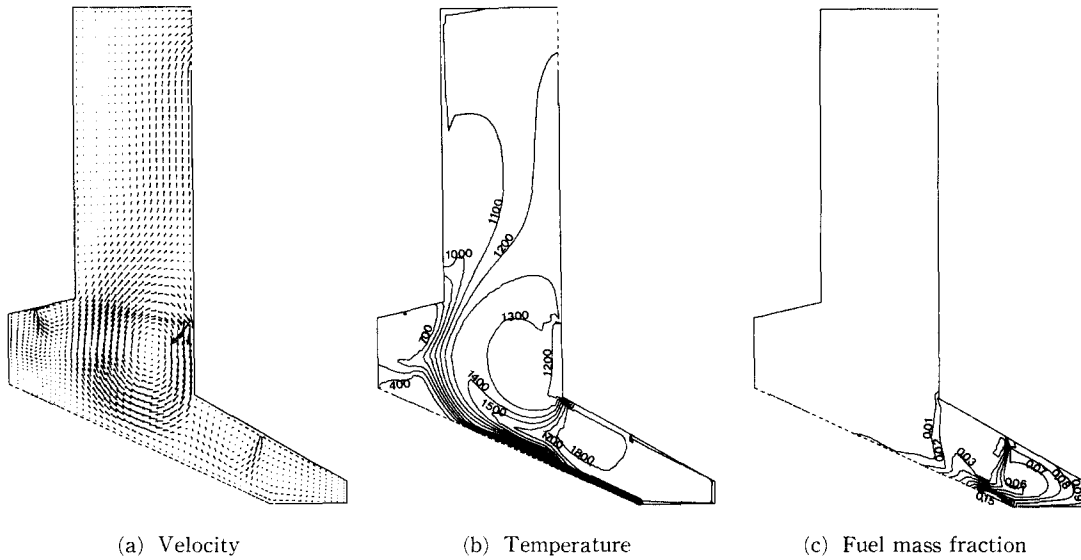
**Fig. 10** Velocity, temperature and fuel distribution in incinerator (excess air ratio=2.3, nozzle flow rate A : B : C=10 : 20 : 5, backward distribution for primary air, moisture content=47.3%, plastic content=10%).

된 것을 알 수 있다. (c)의 연료가스분포를 보면 스토커상에서 발생한 연료가스가 우측벽쪽으로 접근하다가 강한 공기제트의 영향으로 생긴 재순환 흐름을 만나 혼합되며 소멸되는 분포를 보이고 있다. 혼합이 증가하여 연소가 촉진되므로 연료가 신속하게 소모되고 연소가 빠르게 종결됨을 알 수 있다. Fig. 8(c)와 비교할 때 연료가 존재하지 않는 범위가 현저하게 줄어들었을 뿐만 아니라 미연소가스가 배출되는 현상도 없어지는 등 연소상태가 개선되었다. 이상으로부터 스토커 후반부에서 집중적으로 쓰레기가 연소되는 경우 B노즐의 공기유량을 A노즐에 비해 크게 하는 것이 소각로내의 연소상태를 개선하는데 도움을 줄 수 있음을 알았다.

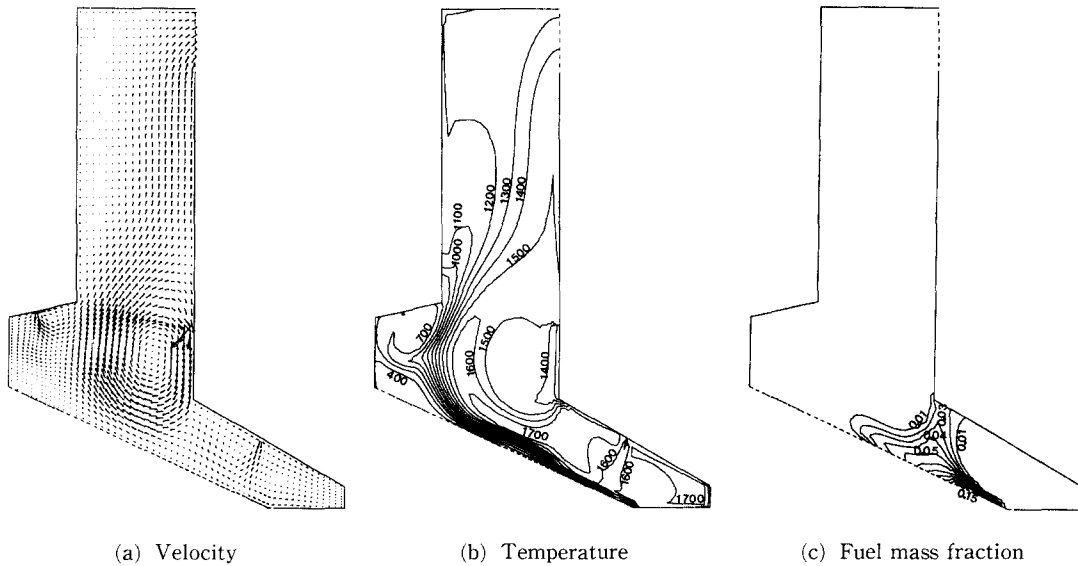
Fig. 10(a), (b)와 (c)는 1차공기를 후방집중분포로 공급하고 나머지 조건은 Fig. 9와 동일한 경우의 속도, 온도 및 연료질량분율 분포이다. 속도분포는 중앙집중분포인 Fig. 9와 유사하다. 온도분포를 Fig. 9(b)와 비교하면 후방집중분포인 경우 노즐C 주변에 중앙집중분포보다 현저히 온도가 높은 영역이 폭 넓게 형성되며 특히 온도가 높은 부분이 노즐C에 가까운 벽 근처에 형성된다. 이것은 쓰레기 재 배출구 가까운 영역에까지 연소반응이 활발하게 일어나고 있음을 의미하며 또한 노즐C의 좌측 상부벽에 과열 가능성이 있음을 나타낸다. B

노즐로부터 좌측 공간의 온도분포는 Fig. 9와 Fig. 10 두 경우간에 큰 차이를 보이지 않으나 후방집중분포인 경우가 전반적으로 약간 낮은 온도값을 보여준다. 연료분포를 Fig. 9(c)와 비교하면 후방집중분포에서는 고연료농도점이 스토커의 중앙부 및 끝부분에서 나타나며 연료가체가 재 배출구 가까이 존재함으로써 미연가스의 배출 가능성이 있음을 알 수 있다. 1차공기는 쓰레기 열분해에 냉각효과를 주어 기체의 방출을 지연시키는 효과가 있다. 후방집중분포의 경우는 이같은 열분해 영역에 집중적으로 1차공기가 공급되는 것으로 분해가 지연되어 뒤늦게 발생한 가연기체 중 일부는 C노즐 부근에서 연소하며 고온대를 형성하고 일부는 공기와 충분한 혼합을 하지못해 재 배출구에 이르기까지 미연상태로 남아있게 된다. 이상으로부터 스토커의 후방에 1차공기를 다량 공급하는 것은 쓰레기의 연소를 지연시킬 우려가 있고 소각로의 재 배출구 부근에 미연상태를 유발하여 미연가스 방출의 가능성을 야기함을 알 수 있다.

Fig. 11(a), (b)와 (c)는 쓰레기의 수분함량이 30%인 경우에 대한 계산 결과이며 수분함량이 47.3%인 Fig. 9와 수분을 제외한 나머지 조건은 동일하므로 비교가 가능하다. 두 경우를 비교해 보면 비록 속도의 절대값에는 차이가 있을지라도 유



**Fig. 11** Velocity, temperature and fuel distribution in incinerator (excess air ratio=2.3, nozzle flow rate A : B : C=10 : 20 : 5, centered distribution for primary air, moisture content=30.0%, plastic content=10%).



**Fig. 12** Velocity, temperature and fuel distribution in incinerator (excess air ratio=2.3, nozzle flow rate A : B : C=10 : 20 : 5, centered distribution for primary air, moisture content=47.3%, plastic content=20%).

동장의 형태나 경향은 모두 일치하는 것을 알 수 있다. 온도분포에 있어서는 수분함량이 적으면 Fig. 11의 경우와 같이 C노즐 부근에 폭 넓은 고온 영역이 형성되며 특히 C노즐 좌측에 소각로내 최고온부가 있게 된다. 수분함량이 크면 C노즐 부근

의 온도가 내려가는 대신 최고온도 영역이 왼쪽으로 이동하여 노 중심부에 있게 된다. 연료분포에서는 수분함량이 적을수록 연료기체 농도 최대점이 스토커 후방에 나타나며 쓰레기 재 배출구쪽에서는 연소용 공기가 부족하여 미연상태의 연료가스가 남

아있다. 수분함량이 적을수록 건조는 빠르지만 휘발의 진행은 지연되며 따라서 가연기체 발생이 스토커 끝 부근에 집중됨으로써 나타나는 현상이다.

Fig. 12는 쓰레기의 플라스틱함량이 20%인 경우로 플라스틱함량이 10%인 Fig. 9와 나머지 조건은 동일하므로 비교가 가능하다. 두 경우는 전체적으로 속도분포에 별 차이가 없으나, 온도분포에 있어서는 플라스틱함량이 많을수록 C노즐 부근의 온도 증가가 커지며 특히 노즐 좌측영역에서 최고온 영역이 크게 나타난다. 연료분포는 플라스틱함량이 클수록 농도최대점이 스토커 끝 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 플라스틱함량이 증가할수록 동성분의 열분해가 늦어지므로 이에 따라 스토커 후방의 연료농도가 증가한다. 이때 발생연료의 일부는 연소하여 주변 온도를 증가시키지만 일부는 공기가 부족하여 미연가스가 남을 가능성도 있는 것으로 해석된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 쓰레기의 물리적 조성변화를 고려할 수 있는 스토커상 쓰레기 연소 모델을 개발하였으며 그 정성적 특성을 검토하고 이를 소각로 연소 해석에 적용하였다. 개발한 모델을 사용하여 물리적 조성상의 성분 변화가 전체 쓰레기의 연소에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 이 모델을 사용하여 쓰레기 성분변화에 따른 소각로 운전조건 변화를 규명하였다. 이밖에 쓰레기 연소모델의 검토 및 소각로의 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

1차공기는 건조를 촉진하지만 열분해를 억제하는 효과가 있어 큰 과잉공기비에서 쓰레기의 건조는 빨라지고 휘발은 지연된다. 1차공기를 스토커 후방에 집중공급하면 건조 및 휘발 모두 지연되며 소각로 후반부의 온도가 증가하고 미연가스 누출 우려가 나타난다. 쓰레기중 수분의 함량이 높아질수록 건조는 늦어지며 휘발은 빠르게 진행된다. 쓰레기중 플라스틱류의 함량이 커지면 휘발이 지연되고 소각로 후반부의 온도 증가 및 미연가스 누출 우려가 있다. 스토커의 후방에서 쓰레기의 열분해가 집중적으로 이루어질 때 노즐 B의 유량을 늘려주는 것이 연소에 효과적이다.

#### 후 기

이 연구는 1995년도 교육부 기계공학 연구분야 지원과제로 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Fehr, M. and Vaclavinek, 1992, "A Cold Model Analysis of Solid Waste Incineration," *Int. J. of Energy Research*, Vol. 16, pp. 227~283.
- (2) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J. and Jones, B., 1991, "Three-Dimensional Modelling of a Municipal Solid-Waste Incinerator," *J. of the Institute of Energy.*, Vol. 64, pp. 166~175.
- (3) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Scott, D. and Jones, B., 1991, "Design Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator," *Waste Management.*, Vol. 11, pp. 249~261.
- (4) Ravichandran, M. and Gouldin, F. C., 1992, "Numerical Simulation of Incinerator Overfire Mixing," *Comb. Sci. and Tech.* Vol. 85, pp. 165~185.
- (5) Kitamura, R., Morinishi, Y., Suzuki, T., Kawabata, H., and Itoh, T., 1993, "Secondary Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste Incinerator," *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 43, pp. 79~81.
- (6) 신동훈, 1993, "도시 폐기물 소각로내 열유동 현상에 관한 수치적 연구," 한국과학기술원 석사논문.
- (7) Kim, S., Shin, D. and Choi, S., 1996, "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Design by Flow Simulation," *Comb. and Flame*, Vol. 106, pp 241~251.
- (8) Ryu, C. and Choi, S., 1996, "3-D Simulation of Air Mixing in the MSW Incinerators," *Comb. Sci. and Tech.* Vol. 119, pp 155~170.
- (9) Choi, S. Lee, J., Kim, S. and Shin, D., 1996, "Cold-Flow Simulation of Municipal Waste Incinerators," *the 25th Symp. (Int.) on Comb., The Combustion Institute, UCI, USA* pp 317~323.
- (10) Ryu, C. and Choi, S., 1995, "Design Considera-

- tion for the Cross Jet Air Mixing in the Municipal Solid Waste Incinerators," 1995 ASME IMECE Symposium on Fire and Combustion System.
- (11) 황호영, 김호영, 1993, "스토커식 소각로의 형상에 따른 유동특성," 대한기계학회 1993년 추계학술대회 논문집, pp. 533~536.
- (12) 이종석, 황호영, 김호영, "소각로 모형의 모델링," 1994, 대한폐기물학회 1994년 추계학술발표회 논문집, pp. 132~137.
- (13) Chun, C. K., Kim, H. Y. and Hwang, H. Y., 1997, "The Study on the Combustion Model and Combustion Characteristics for Stoker Type Incinerator," Proc. of the First Asia-Pacific Conference on Combustion, " pp. 611~614.
- (14) 김승기, 신동훈, 류창국, 최상민, 1994, "소각로내 열유동의 계산과 실험," 한국폐기물학회지 제11권 제4호, pp. 545~555.
- (15) 한재현, 정광국, 최진환, 최상민, 1995, "폐기물 소각로 모형의 열간유동실험," 한국폐기물학회지 제12권 제5호, pp. 618~625.
- (16) 엄태인, 장동순, 채재우, 1993, "로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구Ⅲ : 3차원 CCl<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> 기상난류 반응 모델," 한국에너지공학회지 제2권 제1호, pp. 54~67.
- (17) 김형래, 유영돈, 최상민, 1994, "도시폐기물 연소상의 단순다단계 모델," 한국폐기물학회지 제11권 제4호, pp. 526~534.
- (18) Yang, W., Shin, D. and Choi, S., 1997, "A Process Simulation Model for a 2ton/hr Incinerator," *The 16th Int. Conference in Incineration & Thermal Treatment Technologies*, UCI, USA.
- (19) 유영준, 유영돈, 최상민, 1994, "고형 폐기물 연소 특성의 실험적 고찰, 한국폐기물학회지 제11권 제3호, pp. 398~408.
- (20) Dougal Drysdale, 1985, *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley & Sons.
- (21) Anderson, Larry L. and Tillman, David A., 1977, *Fuels from Waste*, Academic Press.
- (22) Kung, H. C., 1976, "The Burning of Vetical Wooden Slabs," *15th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 243~253.
- (23) Kanury, A. Murty, 1976, "Modelling of Pool Fires with a Variety of Polymers," *15th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 193~202.
- (24) Ravinovich, Bernard, 1965, "Regression Rates and the Kinetics of Polymer Degradation," *10th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1395~1404.
- (25) 도갑수, 이근원, 권기홍, 1994, "강남지역의 쓰레기 배출량 및 특성에 관한 조사연구," 한국폐기물학회지 제11권 제4호, pp. 505~513.
- (26) Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., 1976, "On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," *15th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 719~727.