

## 대형 도시폐기물 소각로의 연소특성을 파악하기 위한 수치 해석적 연구

전영남<sup>†</sup> · 엄태인<sup>\*</sup> · 송형운

조선대학교 환경공학부

\*한밭대학교 환경공학과

(2001년 11월 26일 접수, 2002년 8월 19일 채택)

## The Study of Numerical Simulation for Investigation of Combustion Characteristics in Municipal Waste Incinerator

Young Nam Chun<sup>†</sup>, Tae In Ohm<sup>\*</sup> and Hyoung Oon Song

Department of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

\*Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received 26 January 2002; accepted 19 August 2002)

### 요 약

도시 폐기물의 효율적인 처리방법중의 하나인 소각은 폐기물을 감량화시키고 폐열도 이용할 수 있어 점차 증가하고 있다. 본 연구는 3차원 수치모델을 개발하여 대형 도시 폐기물 소각로인 상무소각로에 연소특성과 최적의 운전조건을 파악하기 위하여 적용하였다. 아울러 개발된 3차원 수치모델을 실제 운전시와 동일한 조건으로 수치해석하여 얻어진 온도와 실측치 온도를 비교하여 모델의 적용성을 검증하였다. 본 모델을 적용하여 상무소각로의 소각시에 로내 연소특성을 파악한 결과 1차 공기가 충분하지 못하여 후연소영역에 불완전 연소생성물의 발생이 높지만 주화염대에서 2차 연소되어 불완전 연소생성물이 낮게 배출되고 연소효율이 좋은 특성을 가진다.

**Abstract** – The interest of incineration, which is one of the effective methods for municipal waste disposal, has gradually increased because the incineration could reduce the volume and weight of the waste, and produce useful energy from the waste. This study has developed the 3-dimensional numerical model, and applied for the investigation of combustion characteristics and optimized operating conditions in MSW incinerator in Gwangju. The model developed in this study has been verified through the comparison between the predicted and the measured temperature in combustion chamber which is operating. By predictive results, the Sangmoo incinerator has a good characteristics of combustion efficiency and a low emission by the second burning in the main flame zone, even though after burning zone produces incomplete products by which primary air is introduced not enough.

**Keywords:** MSW, Incinerator, Combustion Model, CFD, Turbulent Flow

### 1. 서 론

현대사회가 다변화되면서 도시 폐기물의 양이 증가하여 폐기물 처리는 이제 심각한 사회문제가 되었다. 이에 폐기물을 감량화시키고 폐열도 이용할 수 있는 소각처리에 대한 관심이 증대되면서 도시 폐기물(MSW)의 소각이 점차 증가되는 추세에 있다. 국내에 설치 가동중인 대형 도시 폐기물 소각로의 경우 선진외국기술이 그대로 도입되어져 국내 폐기물 소각에는 적합하지 않다. 따라서 국내 폐기물 성상에 맞는 운전조건의 선정을 위한 소각로내 물리화학적 현상을 예측하기 위한 연구로 실험적인 방법[1]과 수치해석적인 방법[2]의 두 범주로 크게 나뉘어져 연구가 진행되고 있다. Park 등[3]과 Shin 등[4]은 50 ton/일 용량에

파일로트 플랜트의 연소특성을 파악하기 위해 실측치와 수치해석 데이터를 비교분석하였다. 하지만 국내 폐기물 성상에 맞는 대형 도시 폐기물 소각로의 연소특성 및 최적의 운전조건을 파악할 수 있는 연구가 미흡하다.

본 연구에서는 대형 도시폐기물 소각로에 열유동을 해석할 수 있는 3차원 수치모델을 개발하여 현재 광주 상무 신도심에 하루 200톤 소각 규모로 설치 가동중인 소각로와 동일한 운전조건을 적용하여 개발된 모델을 검증하고 연소특성과 연소가스 배출특성을 파악하였다.

### 2. 연구내용 및 방법

#### 2-1. 소각로 연소실 구성

본 연구에서 수치 해석한 상무 소각로의 연소실에 크기는 Fig. 1에서 보는 것처럼 실제와 동일한 크기로 길이 13.97 m × 폭 4.2 m × 높이 21.98 m이다. 상무 소각로는 소각로의 형상 분류중 역류식의 형상을 하

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: ynchun@chosun.ac.kr

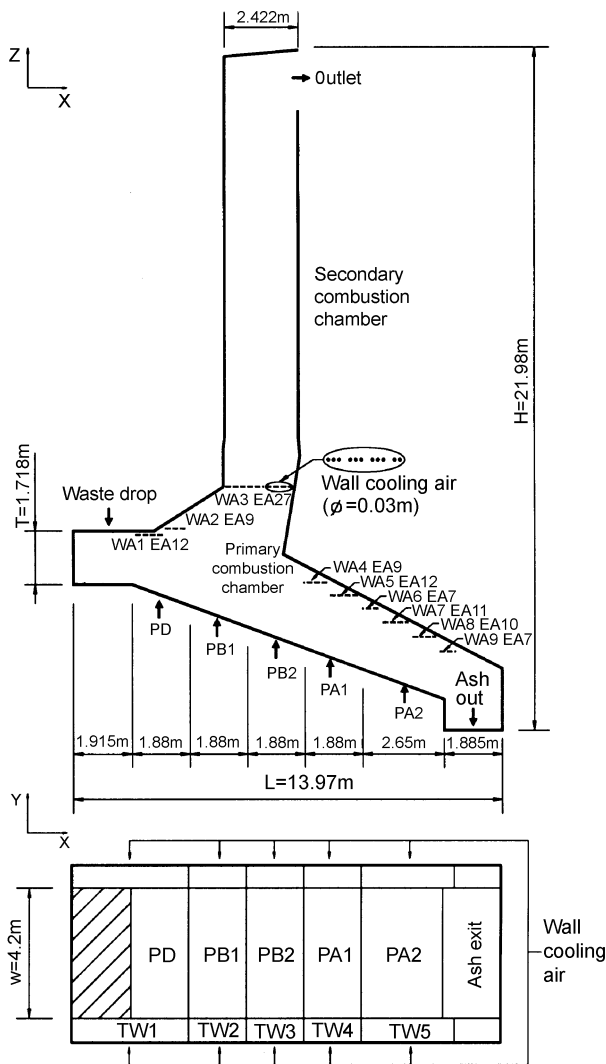


Fig. 1. Schematic diagram of combustion chamber.

고 있으며 연소용 공기는 1차 공기와 노벽냉각공기(이하 노벽공기), 2차 공기, 그리고 오수분무노즐에서 분사되는 공기로 구분하고 있다. 현재 운전중에는 2차 공기와 오수분무는 노내의 평균온도가 950°C이상이 올라가면 로 냉각의 개념에서 간헐적으로 분사되고 있어 본 연구에서는 2차공기와 오수분무의 영향을 배제시켰다.

화격자의 크기는 길이 10.17 m×폭 4.2 m로 건조영역(PD), 주연소 영역(PB1, PB2), 후연소 영역(PA1, PA2)에 한 개 또는 두 개의 영역으로 나뉘어져 있고 2차 연소실出口的 크기는 높이 1.96 m×폭 4.2 m이다. 노벽공기는 폭방향 양쪽(전·후)벽의 공기자켓(air jacket)에서 노내를 향해 원형의 노즐( $\phi=0.03$  m)이 각각 104개가 존재하고 있다.

## 2-2. 수치해석 모델 및 방법

### 2-2-1. 수치해석 모델

연소모델은 2단계 3가지 반응(two-step three reaction)으로 이루어진 유한반응모델(finite-rate chemistry model)인 ESCRS(Extended Simple Chemically-Reacting System)를 사용하였고 연소반응은 식 (1)과 같다.

Table 1. Expression of  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for enthalpy and species mass fraction

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
$m_{\text{CH}_4}$	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{CH}_4}}$	$w_{\text{CH}_4}$
$m_{\text{CO}}$	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{CO}}}$	$w_{\text{CO}}$
$m_{\text{H}_2}$	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{H}_2}}$	$w_{\text{H}_2}$
$h$	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_h}$	$(m_{\text{CH}_4}H_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}}H_{\text{CO}} + m_{\text{H}_2}H_{\text{H}_2}) - S_{\text{rad}}^*$

\* $S_{\text{rad}}$  is in Eq. (3)

Constant in combustion models

$$\sigma_{\text{CH}_4} = \sigma_{\text{CO}} = \sigma_{\text{H}_2} = \sigma_h = 0.9$$

각각의 반응율( $w_i$ )은 Magnussen과 Hjertager[5]가 제안한 반응모델을 이용하였으며 식 (2)에서처럼 화학반응속도와 혼합속도를 고려하였다.

$$w_i = \text{minimum of } \left[ \rho A m_i \frac{\epsilon}{k}, \rho A \frac{m_{\text{ox}} \epsilon}{s k}, \rho A' \frac{m_{\text{pr}} \epsilon}{1 + s k} \right] \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 시간평균 밀도,  $s$ 는 연료의 단위 질량당 화학양론적인 산화제의 요구량,  $m_i$ 는 각각  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ 의 질량분율,  $m_{\text{ox}}$ 는 산화제의 질량분율,  $m_{\text{pr}}$ 는 생성물의 질량분율,  $A$ 와  $A'$ 는 Lockwood 등[6]이 제시한 경험상수로 4.0이다. 화학종의 비열, 밀도, 온도는 CHEMKIN(chemical kinetic code)[7]의 열역학 데이터를 이용하여 계산하였다.

Table 1은 ESCRS 연소모델을 사용하여 일반 지배방정식 (12)를 계산할 경우 각각 변수들을 나타내었다. 평형 난류연소모델에서  $\Gamma_\phi$ 와  $S_\phi$ 는 각각  $\phi$ 에 대한 확산계수와 생성항이며  $\sigma$ 는 Schmidt수이다.

본 연구에서 사용한 Radiosity 복사모델은 Spalding[8]에 의해 제안된 것으로 P-1 구조화 근사법(P-1 spherical-harmonics approximation)에서 복사강도(radiation intensity)가 RTEs(radiative transfer equations)[9]에 사용된 것과 같다. 소각시 발생하는 연소 생성물 중  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ 는 강한 흡수(absorber) 및 방사체(emitter)이지만 산란복사(scatter radiation)는 거의 없다. 또한  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ 는 흡수가 거의 없이 복사열전달이 이루어진다.

복사유속( $R$ )은 복사지배방정식 (11)에서 구한다. 흡수계수(absorption coefficient;  $a$ )와 산란계수(scattering coefficient;  $s$ )는  $1.45 \text{ m}^{-1}$ 와  $0 \text{ m}^{-1}$ 를 적용하였고,  $E$ 는 흑체방사력(black-body emissive power)이다. 복사열전달에 의한 열손실을 고려하기 위해 에너지방정식 (9)의 생성항에 식 (3)이 적용된다.

$$S_{\text{rad}} = 4a[R - E] \quad (3)$$

난류유동은 연소로의 수치모사를 위하여  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고, 난류 전달력은 Boussinesq 가정에 의하여 에디 또는 난류점성계수( $\mu_t$ )와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수( $\mu_t$ )는 Prandtl-Kolmogorov 관계식으로부터 산출된다.

벽 근처에서 유체 흐름의 형태가 층류저층(viscous sublayer)이 형성되기 때문에 벽함수[10]를 이용하여 난류점성계수를 새로이 정의하였다.

국부체류시간(local residence time)은 계산영역 내 임의의 점에서 계산이 필요한 주입된 유체가 그 점에 도달하여 얻어진 시간이다. 국부체류시간은 일반 지배방정식 (12)의 종속변수  $\phi$ 를 체류시간  $t$ 로 하고, 생성항  $S_\phi$ 는 식 (4)와 같이하여 계산한다.

$$S_\phi = \Delta t \sum_j \dot{m}_{inj} = \frac{\rho \text{Vol}}{\sum_j \dot{m}_{inj}} \sum_j \dot{m}_{inj} = \rho \text{Vol} \quad (4)$$

여기서, Vol은 셀의 체적,  $\dot{m}_{inj}$ 는  $j$ 면을 통하여 셀에 유입되는 질량 유

량,  $\Sigma$ 는 모든 면에서 합을 의미한다.

### 2-2-2. 지배방정식

소각로 내 3차원 난류유동의 해석을 위해 정상류 유체라 가정하였으며, 종속변수들을 계산하기 위해 지배방정식을 벡터 텐서(vector tensor) 형태로 나타내면 다음 식들과 같다.

#### (1) 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

#### (2) Navier-Stokes 운동 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (6)$$

#### (3) $\kappa$ - $\epsilon$ 난류모델 지배방정식

##### ▶ 난류 운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_{eff} \sigma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (7)$$

##### ▶ 난류에너지 소산율 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_{eff} \sigma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1k} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2k} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ G_k &= \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ C_{1k} &= 1.44, C_{2k} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \end{aligned} \quad (8)$$

#### (4) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_{eff} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (9)$$

#### (5) 화학종 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \sigma_i \frac{\partial m_i}{\partial x_j} \right) + w_i \quad (10)$$

#### (6) 복사 지배방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{4}{3} (a + s) \frac{\partial R}{\partial x_i} \right] + 4a(E - R) = 0 \quad (11)$$

### 2-2-3. 수치해석방법

질량, 운동량, 에너지, 난류 에너지, 복사 열유속, 화학종 농도는 2차 편미분 지배방정식의 다음 식 (12)와 같이 일반화 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (12)$$

위 식에서  $\phi$ 는 일반적인 종속변수로서 속도성분( $u, v, w$ ), 압력( $p$ ), 엔탈피( $h$ ), 화학종의 질량분율( $m_{CH_4}, m_{O_2}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{CO}, m_{H_2}$ ) 및 난류 에너지( $k, \epsilon$ ), 온도( $T$ ), 복사열유속( $R$ ), 체류시간( $t$ )이다.

일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사 체적에 기초한 유한차분법과 대류항의 선형화를 위해 power law scheme을 이용하여 이산화방정식(discretization equation)을 유도하였다. 수치해석은 Patanker방법[11]을 사용하였으며 차분화된 운동방정식으로 셀 압력(cell pressure) decoupling을 없애기 위하여 엇갈린 격자망(staggered grid arrangement)을 사용하였다. 각 검사체적에 대한 이산화 방정식은 Line-by-line TDMA(TriDiagonal Matrix Algorithm)에 의해 해를 구하였으며, Navier-Stokes 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계는 빠른 수

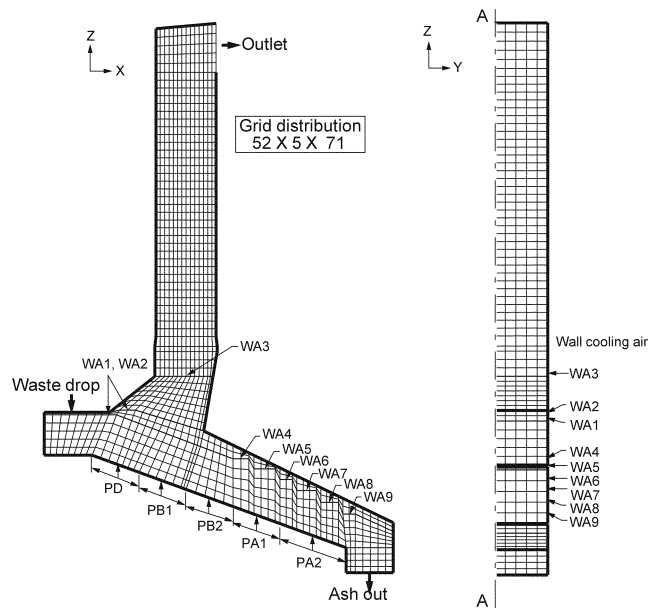


Fig. 2. Grid generation for computational analysis.

렴을 위하여 SIMPLE(Semi Implicit Methods for Pressure Linked Equation) 알고리즘에서 변형된 SIMPLEST알고리즘(Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened)을 사용하였다.

본 연구에서는 난류유동 및 화학반응에 대한 해석적인 해를 얻기 위해 상용 유체역학 코드인 PHOENICS V3.3을 사용하였고 수치계산을 위하여 Pentium III-500인 일반 PC를 이용하였다. 각각의 제어체적에서 수렴기준(convergence criteria)은 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종에 모든 나머지(residuals)의 합이  $1 \times 10^{-3}$ 이하로 하였다. 수렴시간은 1차 공기의 양이 적을수록 3,000분이상의 CPU time이 필요하였으며 1차 공기량이 많을수록 수렴속도는 빨라졌다.

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것처럼 최적의 계산격자를 형성하고 자 BFC좌표계를 적용하였고, 소각로 폭(y축방향)은 측대칭을 이루고 있어 계산시간의 절약을 위해 절반의 형상으로 수치해석을 행하였다.

### 2-2-4. 입구 경계조건

본 연구에서 주입 폐기물은 매우 빠르게 탈휘(devolatilization)되는 것으로 가정하고 저위발열량에 해당하는 메탄가스로 단순화하여 노내의 연소현상을 수치 모사하였다. Table 2는 상무소각로에서 8월에 소각되는 폐기물의 물리·화학적 조성과 저위 발열량에 분석값을 나타낸 것이다.

Table 3에서는 소각로에 주입되는 연소공기의 입구 경계조건을 나타낸 것으로 연소공기의 입구유속은 실제상태로 보정한 유속값을 이용하였고 1차 공기는 화격자의 기공률(porosity)을 0.4로하여 분사하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 3차원 수치모델의 적용성 검증

개발된 3차원 수치모델의 적용성의 검증을 위해 온도를 비교인자로 하여 실제 가동중인 상무소각로 기준 운전시에 실측치의 온도와 동일 조건으로 하여 수치해석시 얻어진 온도를 비교하였다. 비교인자인 온도는 식 (8)의 에너지 방정식에서 열전달, 화학반응, 난류유동이 연계되어 계산되는 엔탈피를 통해 구해진다. Fig. 3은 기준 운전시에 일일 시간대별 노내 실측치 온도와 수치해석에서 얻어진 온도를 비교하여 나타내었다. 실측에 의한 2차 연소실의 온도는 주입폐기물의 성상 및 노내 연소상황의 연속적인 변화로 최저 903°C에서 최고 952°C의 온도변화를

**Table 2. Parameters of fuel characteristics of the municipal waste on august**

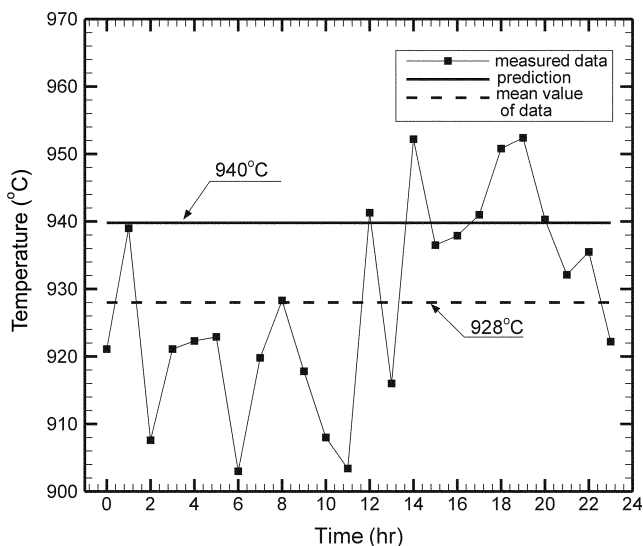
Results of proximate analysis									
Combustible					Non combustible	Moisture	Ash	Specific gravity (ton/m <sup>3</sup> )	LHV (kcal/kg)
Paper	Plastics	Food-Vegetables	Wood-Garden trimmings	Textile					
22.87	14.26	41.75	6.95	3.13	11.01	55.55	12.35	0.32	1,760
Results of ultimate analysis									
C	H	O	N	S	Moisture		Ash	Total	
18.35	2.64	10.1	0.82	0.19	55.55		12.35	100	

**Table 3. Boundary conditions of combustion air**

Primary air <sup>1)</sup>										
Zone	Drying zone			Burning zone		After burning zone				Total
	PD			PB1	PB2	PA1		PA2		
Injection velocity(m/s)	0.161			0.268	0.322	0.214		0.076		0.20
Wall cooling air <sup>2)</sup>										
Zone	WA1	WA2	WA3	WA4	WA5	WA6	WA7	WA8	WA9	Total
Number of injection hole	12	9	27	9	12	7	11	10	7	104
Injection velocity(m/s)	13.05	13.05	20.29	13.05	13.05	7.83	7.83	7.83	7.83	11.53

<sup>1)</sup> Preheating temperature: 178.3 °C

<sup>2)</sup> Preheating temperature: 200 °C

**Fig. 3. Comparison of measured data and prediction in secondary combustion chamber.**

보이고 평균온도는 928 °C이다. 수치해석에서 얻어진 온도는 940 °C로서 평균온도와 약 1.3%의 오차를 보이고 있지만 노내 실측치 온도의 변동폭내에 존재하므로 본 연구에서 개발한 3차원 수치모델이 실제에 적용성이 있음을 확인하였다.

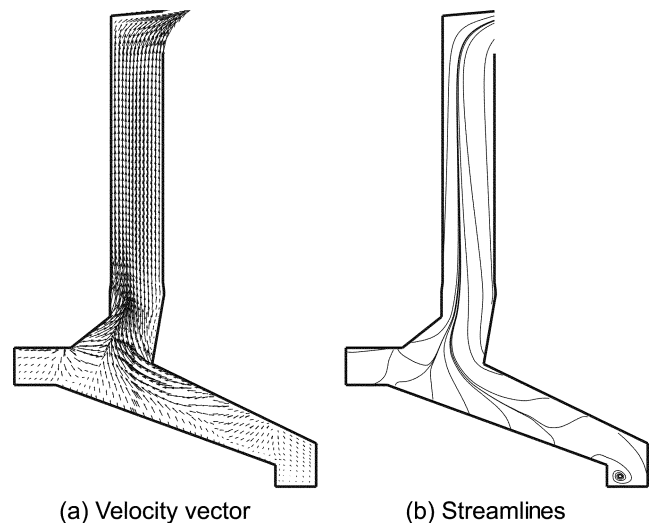
### 3-2. 운전시 연소 및 배출특성

실제 소각로의 형상 및 크기, 운전조건을 동일하게 수치모사를 수행하여 노내의 연소특성과 연소가스의 배출특성을 파악하고자 상부소각로의 폭(y축)방향 중심(Fig. 2의 A-A'단면)에 데이터를 해석하였다.

#### 3-2-1. 속도벡터 및 유선

Fig. 4는 소각로내의 속도벡터와 유선을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)는 노내의 속도벡터를 나타낸 것으로 건조 영역과 후연소 영

**Fig. 4. Velocity vectors and streamlines plot in combustion chamber.**

역에서 발생한 연소가스들이 상부에서 분사되는 노벽공기의 영향으로 주연소영역 상부에서 흐름이 크게 혼합되어 2차 연소되며 주유동이 상쇄되므로 2차 연소실로 유입시 고른 유동분포를 이루고 있다.

Fig. 4(b)는 유선을 나타낸 것으로 2차 연소실에 재순환영역에 의한 dead zone이 형성되지 않아 연소실 체적의 감소가 없다. 따라서 연소가스들이 2차 연소실에서 연소되면서 충분히 체류할 수 있는 시간적인 여유를 가질 수 있어 오염물질의 생성이 감소된다.

Fig. 5에서는 소각로의 3차원 속도벡터와 유적선(path lines)을 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에 화격자면에서 출구방향으로 두 번째 단면에 속도벡터는 노벽공기(WA3)에 의해 속도벡터가 폭방향 중심으로 치우친 모습을 볼 수 있지만 2차 연소실의 속도벡터는 대체적으로 고른 분포를 보이고 있다.

Fig. 5(b)는 소각시 발생하는 비산재(fly ash)의 이동경로인 유적선을 보여주고 있다. 대부분의 입자는 본 유적선을 타고 움직이므로 비산재

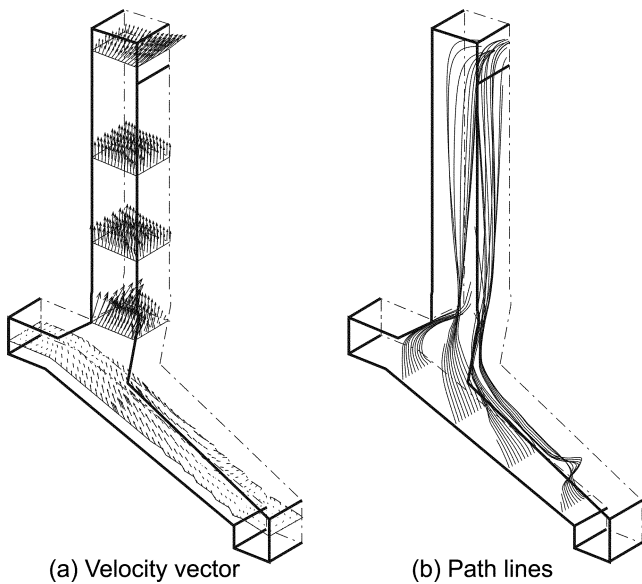


Fig. 5. Velocity vectors and path lines plot in combustion chamber.

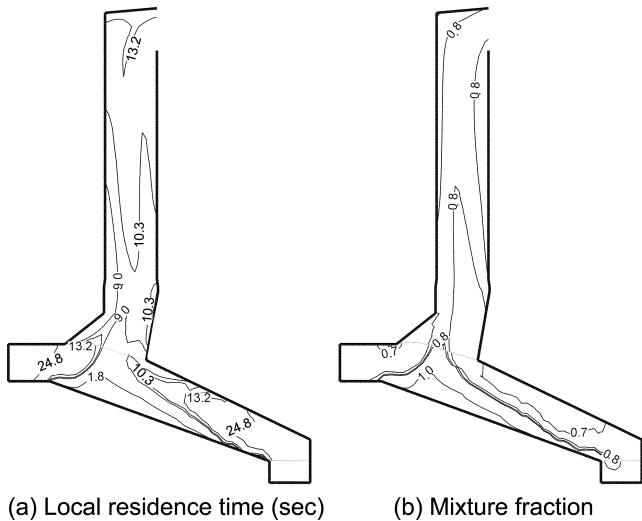


Fig. 6. Local residence time and mixture fraction contours in combustion chamber.

의 이동경로를 확인할 수 있다. 2차 연소실에 불필요한 재순환영역에 의한 고속부가 형성되지 않음으로 다이옥신류의 전구물질을 함유한 비산재의 고속에 의한 이월을 방지할 수 있다.

### 3-2-2. 체류시간과 혼합율

Fig. 6은 소각로내의 국부적체류시간과 혼합율을 나타낸 것이다.

상무소각로의 2차 연소실의 노내 체류시간(bulk residence time)은 4.76 초이며, Fig. 6(a)의 국부적 체류시간(local residence time)을 보면 2차 연소실은 10초 안팎의 긴 국부적 체류시간을 보이고 있는데 이는 1차 과잉공기비가 낮게 운전되고 있기 때문이다.

Fig. 6(b)는 화격자에서 분사되는 연소가스와 노벽공기의 혼합정도를 나타내고 있다. 건조 영역과 후연소 영역 화격자 상부의 노벽공기가 상대적으로 분사유속이 약한 건조영역과 후연소영역의 연소가스에 깊숙이 침투하여 혼합이 이루어지고 있다. 미국의 EPA 보고서[12]에 의하면 완전혼합높이(fully mixed height)라는 개념을 강조하고 있는데 상무소각로는 2차 연소실 입구로부터 대체적으로 고른 혼합율을 보이고 있다.

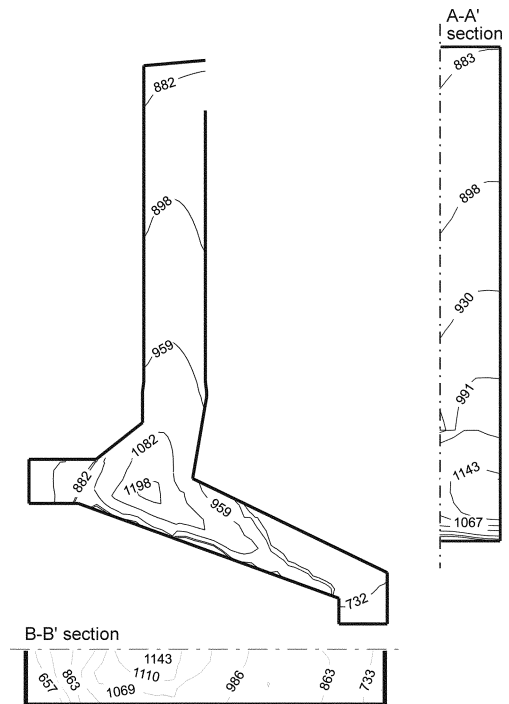


Fig. 7. Temperature contours in combustion chamber.

### 3-2-3. 노내 온도

Fig. 7에 1차 연소실의 온도분포를 보면 미연성분이 후연소 영역에서 연소가 진행되므로 후연소 영역에 온도가 높게 나타나고 있다. 연소실 내부의 온도는 2차 연소실 입구부분에서 약 1,000 °C를 보이고 있고 출구부분으로 진행함에 따라 연소실 벽면으로 대류 및 복사열전달에 의한 열손실로 인하여 온도가 점차로 하강하여 연소실 출구에서 배출되는 온도는 880 °C이다. A-A'단면은 화격자에서 2차 연소실 출구방향으로 중심부의 온도분포를 나타낸 것이고 B-B'단면은 1차 연소실의 주화염대가 형성되고 있는 길이방향으로의 중심부에 온도분포를 나타내고 있다.

### 3-2-4. 노내 화학종 농도분포

Fig. 8에 메탄가스와 산소의 농도분포를 보면 화격자면에서 가장 높은 값을 보이다가 주연소 영역 화격자 상부에서 급격히 감소함을 볼 수 있는데 이는 이 영역에서 연소반응이 가장 활발하게 진행되고 있기 때문이다. 주입연료인 메탄은 주연소 영역 상부에서 거의 완전연소가 일어나고 연소실 출구에서 배출되는 산소농도는 6.6%정도를 보이고 있다. 일산화탄소의 농도는 1차 연소실 화격자면 상부에서 고농도를 보이고 있는데 이는 본 연구에서 적용한 2단계 3가지 반응으로 이루어진 연소 모델의 중간단계 반응이 일어나고 있기 때문이다.

1차 연소실에서 발생한 일산화탄소는 주연소 영역 상부의 주화염대에서 2차 연소됨으로 농도가 10 ppm정도로 급격히 감소하고 생성물인 이산화탄소의 농도는 6.3%로 높아지고 있다. 하지만 2차 연소실 출구부로 갈수록 일산화탄소의 농도가 30 ppm정도로 다시 증가하는 이유는 1차 연소실에서 충분히 산화반응하지 못한 일산화탄소가 2차 연소실 중심부로 유입되고 있기 때문이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 대형 도시폐기물 소각로의 열 유동을 파악할 수 있는 3차원 수치모델을 개발하였고 본 모델을 적용해서 얻어진 온도가 실측치 온도와 서로 일치함을 확인하여 실제의 적용성을 검증하였다.

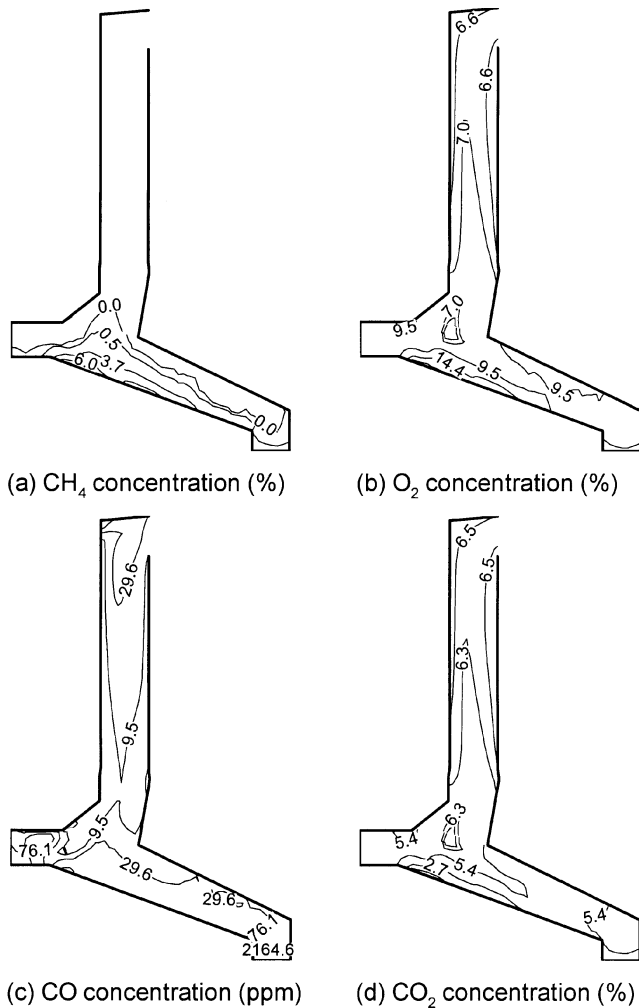


Fig. 8. Concentration contours of chemical species in combustion chamber.

상무소각로의 소각시에 연소특성과 연소가스의 배출특성을 파악한 결과를 보면 건조 영역과 후연소 영역에서 발생하는 저온의 연소가스는 주연소 영역 상부의 주화염대에서 2차 연소가 일어나므로 불완전 연소 생성물의 농도가 낮아진다. 2차 연소실로 유입되는 연소가스의 유동이 고르게 분포하여 2차 연소실에 불필요한 재순환영역이 생성되지 않는다. 2차 연소실 출구에 배출가스의 온도는 880 °C 이상이며, 일산화탄소의 배출량은 30 ppm 정도로 저공해 연소특성을 보이고 있다.

## 감 사

본 연구를 위해 운전 자료를 제공해주신 상무소각로 관계자분들께 감사드립니다.

## 사용기호

$a$  : absorption coefficient [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $C_1, C_2, C_\mu$  : empirical constants

$E$  : block-body emissive power [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $G_k$  : production of turbulent kinetic energy  
 $k$  : turbulent kinetic energy [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]  
 $h$  : enthalpy [ $\text{J}/\text{kg}$ ]  
 $m_i$  : mass fraction of  $i$  species ( $i = \text{CH}_4, \text{CO}, \text{H}_2$ )  
 $p$  : pressure [ $\text{Pa}$ ]  
 $R$  : radiation flux  
 $s$  : scattering coefficient [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $S_h$  : enthalpy source term  
 $u$  : velocity vector [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $w_i$  : reaction rate of  $i$  species

## 그리스 문자

$\epsilon$  : turbulent kinetic energy dissipation rate [ $\text{m}^2/\text{sec}^3$ ]  
 $\rho$  : density  
 $\mu$  : molecular viscosity  
 $\mu_t$  : turbulent viscosity  
 $\mu_{eff}$  : effective turbulent viscosity  
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  : prandtl numbers

## 참고문헌

1. Han, J. H., Jeong, K. K., Choi, J. H. and Choi, S. M.: *Int. J. Energy Res.*, **21**, 899(1997).
2. Kwon, S. W. and Yi, J. H.: *HWAHAK KONGHAK* **36**, 353(1998).
3. Park, B. S., Yun, Y. S., Seo, J. D. and Lee, J. W.: *J. Korean Solid Waste Engineering Society*, **17**, 899(2000).
4. Shin, D., Choi, J. H., Nasserzadeh, V., Choi, S. and Swithenbank, J.: *J. Institute of Energy*, **72**, 56(1999).
5. Magnussen, B. F. and Hjertager, H.: "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," 16th Symp. (Int.) on Comb., The Combustion Institute, Pittsburgh, 719(1976).
6. Lockwood, F. C., Salooja, A. P. and Syed, S. A.: *Comb. and Flame*, **38**, 1(1978).
7. Kee, R. J. and Jefferson, T. H.: "A General Purpose, Problem Independent," Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package, Sandia National Laboratories Report SAND80-8003(1981).
8. Spalding, D. S.: "Proposal for a Diffusional Radiation Model, Unpublished Technical Memorandum," CHAM, London(1994).
9. Viskanta, R. and Menguc, M. P.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **13**, 127(1987).
10. Launder, B. W. and Spalding, D. B.: "Mathematical Models of Turbulence," Academic Press, New York(1972).
11. Patanker, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere Publishing Corporation, New York(1980).
12. Seeker, W. R. and Lanier, W. S.: "Municipal Waste Combustion Assessment: Combustion Control of Organic Emission," EPA report(1997).