

## 덤프 소각기에서 유해폐기물 분해에 대한 수치해석 A Numerical Simulation of Hazardous Waste Destruction in a Dump Incinerator

전 영 남 · 정 오 진 · 채 종 성<sup>1)</sup>

조선대학교 환경공학부 <sup>1)</sup>조선대학교 환경공학부 대학원

(2000년 5월 31일 접수, 2000년 11월 8일 채택)

Young-Nam Chun, Oh-Jin Jung and Jong-Seong Chae<sup>1)</sup>

*Department of Environmental Engineering, Chosun University*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Graduate School, Chosun University*

(Received 31 May 2000; accepted 8 November 2000)

### Abstract

A major source of the hazardous waste generated is from chemical industries producing plastics, herbicides, pesticides and chlorinated solvents. All of these processes produce a class of hazardous waste termed the chlorinated hydrocarbons (CHCs), either directly or from undesirable side reactions.

In this study, we investigated the destruction characteristics of hazardous waste through incineration. A nonequilibrium combustion model was used to describe the effect of the chemical kinetics due to the flame inhibition characteristics of  $\text{CCl}_4$  which was used as the surrogate of hazardous waste.

A parametric screening studies was made in a dump incinerator proposed in this study. The dump incinerator showed high  $\text{CCl}_4$  DRE (Destruction and Removal Efficiency) as 5 nines.  $\text{CCl}_4/\text{CH}_4$  ratio appeared to be most important in the destruction of  $\text{CCl}_4$  through incineration.

**Key words** : dump incinerator, hazardous waste, nonequilibrium model, carbon tetrachloride

### 1. 서 론

산업의 발달로 인하여 유해폐기물의 양과 종류가 날로 증가하고 있다. 유해폐기물은 고온에서 분해가 어렵고 소각시 인체에 유해한 성분을 생성하는 Chlorinated Hydrocarbons과 Acetonitrile,  $\text{SF}_6$  등이 있다. 특히  $\text{CCl}_4$ 는 염화탄화수소(chlorinated hydrocarbons, CHCs) 계통의 대표적인 유해폐기물이며 플라스틱제조업, 제초제와 살충제를 제조하는 농약제조

업, 유기용제 제조업 등에서 다량 배출되며 해마다 발생량이 증가하는 추세이다 (Bose and Senkan, 1983). 지금까지 유해폐기물은 처리가격의 저렴성과 기술적 어려움이 적은 매립 및 밀봉 등의 방법에 의존해 왔으나, 최근 들어 에너지 회수와 저공해 소각로 기술의 개발로 소각에 의한 처리가 증가 추세에 있다.

이러한 유해폐기물을 소각처리하기 위해서는 일반 도시폐기물(MSW)의 소각로와는 달리 고온에서의 체류시간이 충분하고 소각기 자체 연소유지(self-

sustaining combustion)를 위한 열보유 능력이 우수한 특성을 가진 소각기가 요구된다. 이러한 요구에 적용될 수 있는 소각기가 덤프 소각기이다 (Stull et al., 1974).

본 연구에서는 폐기물이 발생된 장소에서 소각처리가 가능한 새로운 형태의 저공해 유해폐기물 덤프 소각기를 제안하기 위하여 수치 해석적 연구를 수행한다. 또한 덤프 소각기에서 CCl<sub>4</sub> 분해에 영향을 미치는 변수별 연구를 수행하여 소각기 설계와 최적의 운전조건을 제시한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

덤프 소각기내 3차원 난류유동의 해석을 위해 정상상태, 비압축성, 뉴우턴 유체로 가정하고 일반중속 변수에 대한 지배방정식은 대류 및 확산항과 이들 항의 유속(flux)에 의한 변화량의 생성과 소멸을 나타내는 생성항의 합으로 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w} \bar{\phi}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} \right) + S_{\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서  $\bar{\phi}$ 는 일반적인 종속변수로서 속도( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ) 및 압력( $\bar{p}$ ), 엔탈피( $\bar{h}$ ), 화학종의 질량분율( $\bar{m}_{CH_4}, \bar{m}_{CCl_4}, \bar{m}_{O_2}, \bar{m}_{CO_2}, \bar{m}_{HCl}, \bar{m}_{H_2O}$ ) 등을 포함한다.  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 각각  $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 이들을 각각 표 1과 표 2에 나타내었다.

난류유동은  $k$ - $\epsilon$ 모델을 사용하였다. 난류 전단력 항은 Boussinesq가정에 의하여 난류였다. 또는 에디 점성계수( $\mu_t$ )와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov관계식으로부터 산출된다(Samaniego and Candel, 1993).

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

벽 근처에서 생성되는 층류 저층은 Launder and Spalding (1972)에 의해서 제안되어진 벽함수(wall function)를 사용하였다. 표 1과 표 2에서  $G_{\mu}$ 은 난류에너지 생성을 나타내며  $\mu_{eff}$ 는 점성계수( $\mu$ )와 난

Table 1. Expression for  $\Gamma_{\phi}$  and  $S_{\phi}$  for  $k$ - $\epsilon$  turbulence model.

$\phi$	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$
$\bar{u}$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial x}$
$\bar{v}$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y}$
$\bar{w}$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z}$
$k$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{\mu} - \rho \epsilon$
$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{\mu} - C_2 \rho \epsilon)$

$$\begin{aligned} G_{\mu} = \mu_{eff} & \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \right. \\ & \left. + \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned}$$

Constant in turbulence model  
 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.314, \sigma_{\epsilon} = 1.0$

Table 2. Expression for  $\Gamma_{\phi}$  and  $S_{\phi}$  for enthalpy and species mass fraction.

$\phi$	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$
$\bar{m}_{CH_4}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CH_4}}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{CH_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{CCl_4}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CCl_4}}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{R \cdot M_{CCl_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{O_2}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{O_2}}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{HCl}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{HCl}}$	$\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{4R \cdot M_{HCl}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{CO_2}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO_2}}$	$(1 + 2R) \overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{H_2O}$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO_2}}$	$2(1 - R) \overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$h$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot H_{fu} - S_{rad}$

$$H_{fu} = \frac{(8.02 + 1.73R) \cdot 10^8}{16 + 154 \cdot R} [J/kg]$$

Constant in combustion models  
 $\sigma_{C_2H_6} = \sigma_{O_2} = \sigma_{HCl} = \sigma_{CO_2} = \sigma_{H_2O} = 1, \sigma_{CH_4} = \sigma_h = 0.9$

류점성계수( $\mu_t$ )의 합으로 주어지는 유효점성계수(effective turbulent viscosity)를 나타내며  $\sigma$ 는 Prandtl수 또는 Schmidt 수를 나타낸다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

### 2.2 비평형 반응모델

예혼합 CH<sub>4</sub>-CCl<sub>4</sub>-공기 화염내의 난류 반응을 모델링하기 위해서는 CCl<sub>4</sub>의 낮은 열량과 화염역제

작용이 고려되어야 하므로 기존의 일반 연소모델의 적용이 곤란하다(Cundy *et al.*, 1987). 따라서 CH<sub>4</sub>-CCl<sub>4</sub>-공기 혼합기의 반응율을 계산하려면 난류혼합 뿐만 아니라 화학반응(chemical kinetic)이 고려되어진 비평형 연소모델이 적용되어야 한다(Jang and Acharya, 1990).

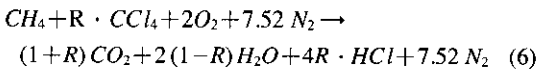
CH<sub>4</sub>의 반응율( $RR_{CH_4-CCl_4}$ )은 Magnussen and Hjertager (1976)가 제안한 eddy break-up 모델을 이용하였으며 다음과 같다.

$$RR_{CH_4-CCl_4} = \text{minimum of} \left[ \rho A \frac{\bar{m}_{fu}}{k} \frac{\epsilon}{k}, \rho A \frac{\bar{m}_{ox}}{s} \frac{\epsilon}{k}, \rho A' \frac{\bar{m}_{pr}}{1+s} \frac{\epsilon}{k} \right] \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 시간평균 밀도,  $s$ 는 연료의 단위 질량당 화학 양론적인 산화제의 요구량,  $A$ 와  $A'$ 는 Lockwood *et al.* (1980)가 제시한 경험상수이다. 식(4)에서 사용한 CH<sub>4</sub>-CCl<sub>4</sub>-공기 혼합기에서 CH<sub>4</sub>의 반응율을 계산하기 위해 사용한 각 성분들의 질량분율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{m}_{fu} &= \bar{m}_{CH_4} + \bar{m}_{CCl_4} \cdot \frac{M_c}{M_{CCl_4}} \\ \bar{m}_{ox} &= \bar{m}_{O_2} + \bar{m}_{CCl_4} \cdot \frac{M_{Cl_4}}{M_{CCl_4}} \\ \bar{m}_{pr} &= \bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{HCl} \end{aligned} \quad (5)$$

CH<sub>4</sub> 반응율이 식(4)와 같이 구해지면 각 화학종의 반응율은 다음 식(6)에 의해 결정된다.



식(6)에서  $R$ 값이 증가되면 화학종 질량분율  $\bar{m}_{CH_4}$ 와  $\bar{m}_{O_2}$ 가 감소되어 결과적으로 반응율이 감소되어 연소반응이 억제된다.

예를 들어 CCl<sub>4</sub>의 반응율( $RR_{CCl_4}$ )을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R}R_{CCl_4} = \bar{R}R_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{R \cdot M_{CCl_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}} \quad (7)$$

여기서  $M$ 은 분자량을 나타낸다. 또한 식(4)에서의 이론적인 산화제 요구량  $s$ 는 다음과 같다.

$$s = \frac{2M_{O_2} + 2RM_{Cl_2}}{M_{CH_4} + RM_C} \quad (8)$$

### 2.3 복사모델

소각시 발생하는 연소 생성물중 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O는 강한 흡수( absorber) 및 방사체( emitter)이지만 산란복사( scatter radiation)는 거의 없다. 또한 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>는 흡수가 거의 없이 복사전달이 이루어진다. 본 연구에서는 지금까지 연소로동에 잘 적용되어진 composite flux model (Gosman and Lockwood, 1973)을 사용하였다. 흡수와 산란계수는 1.45 m<sup>-1</sup>와 0 m<sup>-1</sup>를 적용하였다. 복사 열전달에 의한 열손실을 고려하기 위해 에너지 방정식의 생성항에 아래 식(9)이 적용되었다.

$$S_{rad} = 2a [\bar{R}_x + \bar{R}_y + \bar{R}_z - 6E] \quad (9)$$

여기서  $a$ 는 흡수계수,  $E$ 는 흑체 방사,  $R_x, R_y, R_z$ 는 복사속 밀도이다.

### 2.4 체류시간

유해 폐기물이 분해하는데 소각기 내에서의 체류시간은 중요하다. 소각기 내의 각 셀에서의 국부 체류시간(local residence time)의 생성항은 아래 식(10)과 같다.

$$S_\phi = \frac{\rho Vol}{\sum_j \dot{m}_{inj_j}} \sum_i \dot{m}_{inj_i} = \rho Vol \quad (10)$$

여기서  $Vol$ 은 셀의 부피,  $\dot{m}_{inj}$ 는 셀로 유입되는 유량이다.

### 2.5 수치해석방법

식(1)과 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 유한차분법(control volume based finite difference method)과 power law scheme을 이용하여 이산화 방정식을 유도하였다. 본 논문에서 사용한 수치해석은 Patanker (1980)방법을 사용하였으며 차분화된 운동방정식의 셀-압력의 decoupling을 없애기 위해 엇갈린 격자망(staggered grid)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 격자의 갯수는 41 × 26 × 18를 사용하였다(그림 1 참조). Line-by-line TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm)알고리즘에 의해 해를 구하였으며 압력

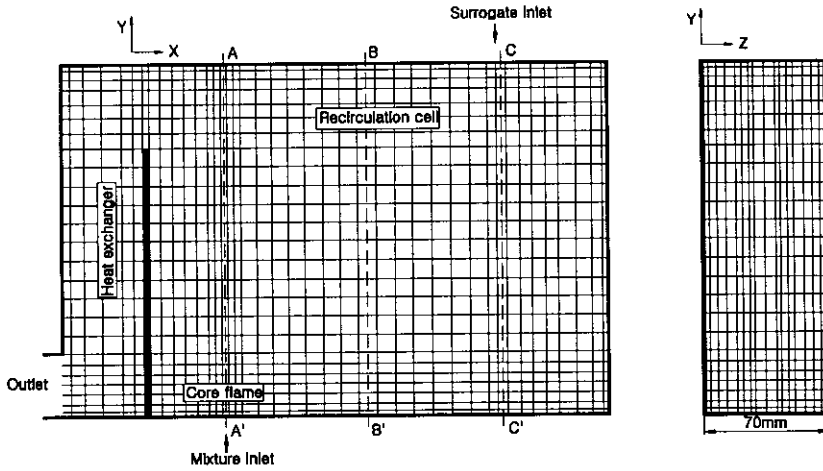


Fig. 1. Computational grid generation.

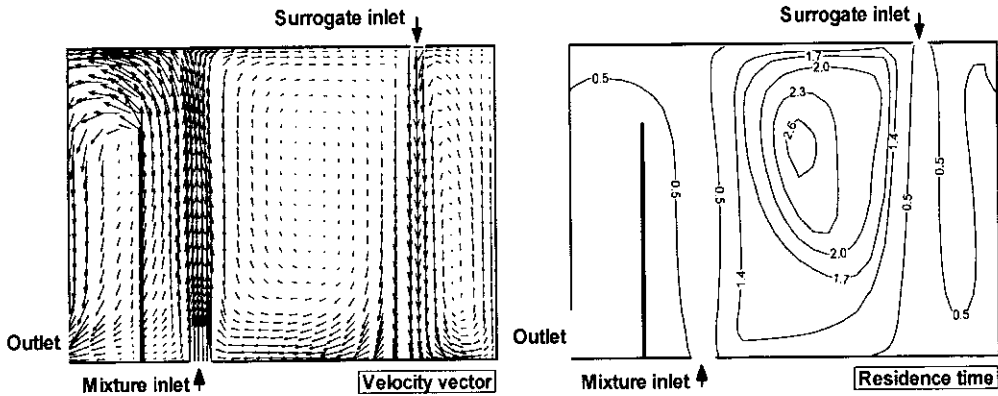


Fig. 2. Velocity vector and residence time contours.

과 속도의 연계는 SIMPLE (Semi Implicit Methods for Pressure Linked Equation) 알고리즘에서 변형된 SIMPLEST (Spalding, 1989) 알고리즘을 사용하였다. 모든 가스의 성질들 (properties)은 CHEMKIN 열역학 데이터를 이용하였다 (Kee and Jefferson, 1981).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기준 소각기 (Standard Incinerator)

본 연구에서는 다양한 형상에 대한 수치해석을 수행하여 새로운 덤프 소각기의 형상 (그림 1 참조) 과 운전조건을 제시하였으며, 이를 본 논문에서는

기준 소각기로 정하였다.

Mixture (이하: 보조연료)는  $CH_4$ /공기를 공급하고 이때 유속은 3.5 m/sec, 당량비는 0.8이다. Surrogate (이하: 폐기물)는  $CH_4/CCL_4$ /공기 혼합기를 공급하며 이때 유속은 5 m/sec, 당량비는 1.0이다. 보조연료와 폐기물이 공급되는 입구온도는 각각 293 K로 수치 해석하였다. 폐기물로 공급된  $CCL_4/CH_4$ 비 R은 0.6이다. 그림 2에 덤프 소각기내의 속도벡터와 체류시간을 나타내었다. 연료와 공기가 예혼합되어 연소됨에 따라 덤프면 (dump plane)에서 화염이 유지되면서 급격한 팽창이 일어나기 때문에 덤프 소각기 중앙에 커다란 재순환 영역이 형성되며 폐기물 주입

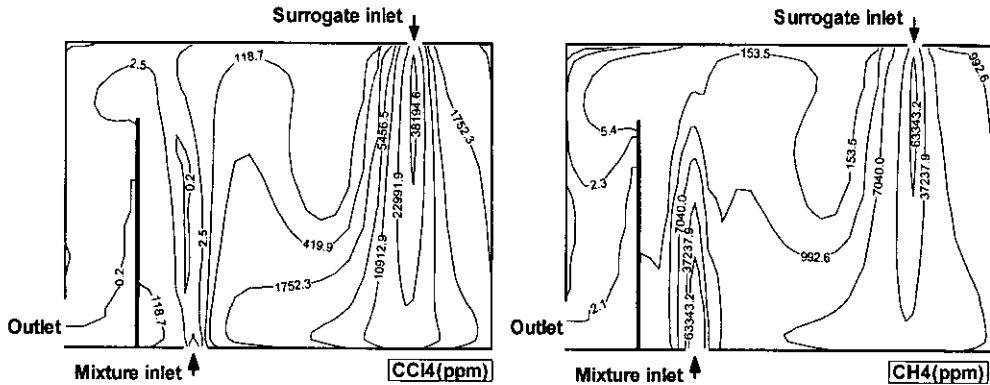


Fig. 3. CCl<sub>4</sub> and CH<sub>4</sub> concentration contours.

구와 우측 벽면사이에도 규모는 작으나 재순환 영역이 형성된다.

본 연구에서 사용한 소각기는 기존의 덤프 연소기와는 달리 배기구가 소각기 옆면에 위치하고 벽이 존재하기 때문에 배기가스에 의한 대류 열손실을 최대한 회수할 수 있는 구조로 되어있다. 본 연구에서 사용한 소각기의 재순환 영역에서의 체류시간은 약 2초 이상이며 고온영역에서 체류시간이 필요한 유해폐기물을 충분히 분해할 수 있다. 폐기물 주입구와 우측 벽면 사이에서 형성되는 재순환 영역에서의 체류시간은 1초 이하로 짧으나 유해폐기물이 커다란 재순환 영역으로 유입되기전에 가열되는 효과가 기대된다. 재순환 영역의 크기와 형태 및 난류강도는 화염의 안정과 반응물질의 혼합에 매우 큰 영향을 미치므로 소각로 설계에 있어서 중요한 변수이다.

그림 3에 소각기내의 CCl<sub>4</sub>와 CH<sub>4</sub>의 농도를 나타내었다. 할로젠 화합물은 화염억제 (flame inhibition) 작용을 하기 때문에 보조연료로 사용한 CH<sub>4</sub>는 연소에 필요한 열량공급이라는 본래의 목적과, 수소기 (hydrogen radical)을 공급하는데 중요한 역할을 한다. 보조연료는 수소기의 공급을 크게 하기 위해 주로 H/C비가 높은 LNG나 CH<sub>4</sub> 등을 사용하는데 본 연구에서는 CH<sub>4</sub>를 사용하였다.

유해폐기물로 사용한 CCl<sub>4</sub>는 폐기물이 주입되는 지점에서 가장 높게 나타나며 소각기 하단으로 내려갈수록 CH<sub>4</sub>과 반응하여 농도가 감소된다. 분해되지 못한 CCl<sub>4</sub>는 소각기 중앙에 형성된 재순환 영역

으로 유입되어 보조연료와 폐기물로 주입된 미연 CH<sub>4</sub>과 반응하여 농도가 크게 감소된다. 재순환 영역에서도 분해되지 못한 CCl<sub>4</sub>는 좌측 벽면을 통과하여 배기구로 빠져 나가면서 미연 CH<sub>4</sub>과 재반응한다. 재순환 영역에서 농도가 57 ppm인 것에 비하여 출구쪽의 농도는 0.2 ppm이다.

이때 CCl<sub>4</sub>의 분해율인 DRE (destruction and removal efficiencies)는 CCl<sub>4</sub>의 입구와 출구유량이 각각 M<sub>in</sub>, M<sub>out</sub>라고 할 때 다음 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$DRE (\%) = (M_{in} - M_{out}) \times 100 / M_{in} \quad (11)$$

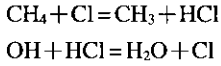
윗식과 같이 계산한 본 연구의 CCl<sub>4</sub>분해율은 99.9996%이다.

CH<sub>4</sub>의 농도는 연소에 의하여 보조연료가 소비되기 때문에 화염 하향류쪽으로 갈수록 농도가 급속히 감소된다. 재순환 영역에서 CH<sub>4</sub>의 농도는 폐기물이 주입되는 지점에서 가장 높게 나타나며, 보조연료와는 달리 CCl<sub>4</sub>의 화염억제 작용으로 반응이 늦어져 소각기 하단부분까지도 큰농도를 나타낸다. 연소되지 못한 미연 CH<sub>4</sub>은 재순환 영역으로 유입되어 열교환에 의하여 재반응을 하게되어 농도가 크게 감소하며 재순환 영역에서도 반응하지 못하고 배기가스로 빠져나가는 CH<sub>4</sub>은 좌측 벽으로 인한 체류시간 증가와 열교환에 의하여 CCl<sub>4</sub>와 재반응하여 배기구 쪽에서의 CH<sub>4</sub>의 농도는 거의 감소된다.

그림 4에 x축 방향 위치에 따른 소각기 단면의 CCl<sub>4</sub>의 농도를 나타내었는데 각 위치는 그림 1에서 나



소반응이 지연되어 화염억제 반응이 일어난다(Bose and Senkan, 1983).



HCl의 농도는 폐기물이 유입되어  $\text{CCl}_4$  분해반응이 일어나는 지점에서 최고농도를 나타내며 재순환 영역으로 유입되거나 배기구로 빠져나가면서 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 HCl 자체가 분해되는 것이 아니라 보조연료로 공급된 공기로 인하여 희석된 것이다. 수치해석시 소각기내의 농도를 건가스 기준으로 나타내었기 때문에 전체적으로 생성물인 HCl의 농도가 높게 나타난다.

소각기내의 온도는 보조연료가 주입되는 지점에서 가장 높게 나타나며 폐기물이 주입되는 지점은

염소성분으로인한 화염억제 작용으로 화염온도가 낮다. 재순환 영역에서의 온도가 화염억제 작용으로 감소되었음에도 불구하고 1,400 K 이상으로 유해폐기물을 분해할 수 있는 1,000°C보다 높게 유지된다. 소각기 배출구쪽의 온도도 높게 유지되는데 이것은 화염대 좌측에 위치하는 벽면이 열을 축열하여 복사열을 방출하기 때문이다.

### 3.2 변수별 연구

#### 3.2.1 주입비율 R값 변화에 따른 $\text{CCl}_4$ 농도 특성

그림 7에 다른 조건은 기준 소각기와 같고  $\text{CCl}_4/\text{CH}_4$  주입비율인 R을 각각 0.3, 0.9로 변환시킨 소각기 내의  $\text{CCl}_4$  농도를 나타내었다. 주입비율이 0.3인 경우 대부분의  $\text{CCl}_4$ 가 소각기 중앙의 재순환영역내에서 분해되어 재순환영역의 농도와 배기구쪽의 농

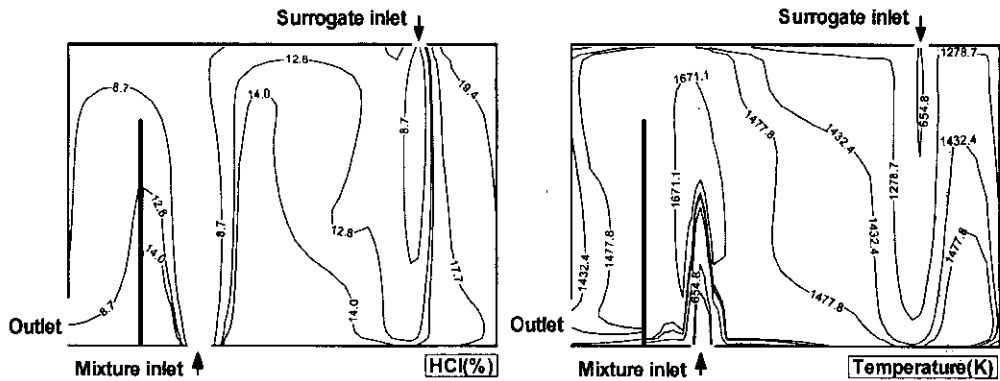


Fig. 6. HCl concentration and temperature contours.

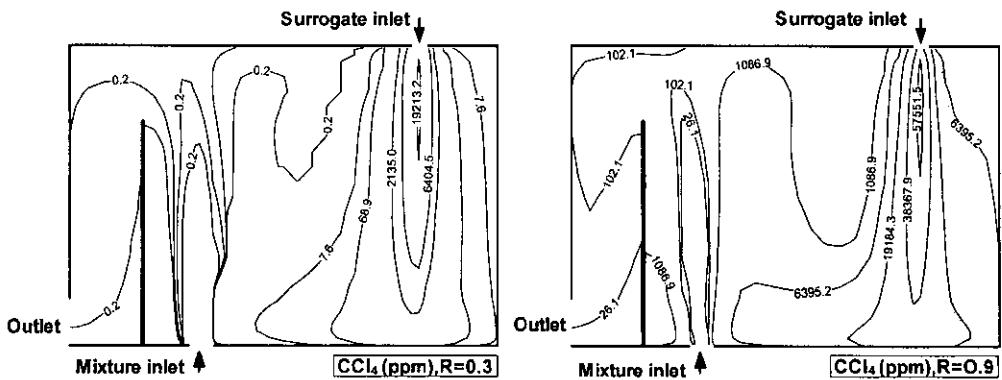


Fig. 7.  $\text{CCl}_4$  concentration contour changed the ratio of  $\text{CCl}_4/\text{CH}_4$ .

도가 0.2 ppm으로 같음을 알 수 있다. 주입비율이 0.9인 경우는 0.3인 경우와 비교해보면 재순환영역에서의 농도 뿐만 아니라 배기구쪽에서의 농도도 높게 나타나는데 이는 실제적으로 반응하는 Cl/H몰비의 한계가 존재함을 알 수 있다.

유해폐기물인 CCl<sub>4</sub>의 농도가 낮은 경우에는 재순환영역에서 거의 반응이 끝나므로 좌측 벽면으로 인한 열회수 및 체류시간 증가 효과가 미비하나, 농도가 높은 경우에는 효과가 크다. 본 연구에서 사용한 덤프 소각기는 폐기물로 주입된 보조연료와 CCl<sub>4</sub>의 주입비율 R이 0.6일 때가 많은 양의 유해폐기물을 분해시키면서 배기구쪽에서의 농도를 저농도를 유지할 수 있기 때문에 최적 상태이다

3. 2. 2 Surrogate 당량비 변화에 따른 CCl<sub>4</sub> 농도특성

그림 8에 폐기물의 당량비를 각각 0.8, 1.2로 변환시킨 소각기내의 CCl<sub>4</sub>의 농도를 나타내었다. 당량비가 0.8로 작아지면 산화제인 산소는 풍부하고 폐기물에 혼합되어 공급되는 CH<sub>4</sub>과 유해폐기물인 CCl<sub>4</sub>의 양은 작아진다. R값이 0.6으로 동일하고 당량비가 1.0인 그림 3과 비교해보면 폐기물이 주입되는 지점과 주입지점 하향류쪽의 농도가 낮게 나타나는데 이는 주입되는 CCl<sub>4</sub>의 양이 줄어들었기 때문이다.

또한 좌측벽면을 통과하면서 1.2 ppm으로 농도가 급격히 감소하는데 이는 재순환영역으로 유입되지 않고 배기구로 바로 빠져나가는 일부 미연 CH<sub>4</sub>과 반응하여 분해되었기 때문이다. 최종적으로 배기구쪽의 농도는 0.2 ppm으로 당량비가 1.0일 때와 같은 농도를 나타낸다. CH<sub>4</sub>의 양이 감소되면 염소와

반응할 수 있는 수소가 적어져 CCl<sub>4</sub>의 분해반응이 폐기물 주입구에서는 느려지나, 당량비가 작아지는 것은 같은 비로 CH<sub>4</sub>의 양과 CCl<sub>4</sub>의 동시에 감소하기 때문에 최종 배기구쪽의 농도에는 영향을 미치지 않는다.

당량비가 1.2로 증가하면 재순환영역에서의 농도는 약간 증가하나 배기구쪽에서의 농도는 0.2 ppm으로 같게 나타난다. 당량비가 1.0인 경우보다 좌측벽을 통과하는 지점까지는 농도가 높게 나타나나 배기구에서의 농도가 같게 나타나는 것은 배기구로 빠져나가면서 분해되었기 때문이다. 폐기물의 당량비 변화는 R값 변화와 비교하여 배출구쪽의 CCl<sub>4</sub> 농도변화에 영향을 주지 않는다.

3. 2. 3 폐기물 주입 온도변화에 따른 CCl<sub>4</sub> 농도특성

그림 9에 주입 온도변화에 따른 소각기내의 온도장과 CCl<sub>4</sub>의 농도를 나타내었다. 폐기물 주입온도를 500 K, 보조연료 주입온도는 293 K이다. 그림 6의 기준 소각기의 온도장과 비교해 보면 폐기물의 주입온도를 증가시키면 폐기물 주입구쪽의 온도가 상당히 증가하고 고온영역이 확장되나, 재순환영역의 온도나 배기구쪽의 온도는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 폐기물의 주입 온도를 높이면 주입구에서의 온도가 크게 상승하고 고온영역이 확장되는데 이는 폐기물에 혼합되어 주입되는 CCl<sub>4</sub>의 화염 억제 작용을 일부 극복하였기 때문이다.

3. 2. 4 유량변화에 따른 CCl<sub>4</sub> 농도특성

그림 10에 유입되는 유량변화에 따른 체류시간과 CCl<sub>4</sub> 농도를 나타내었다. 보조연료와 폐기물 주입구의 직경을 각각 2배로 증가시켰으며 다른조건은 기

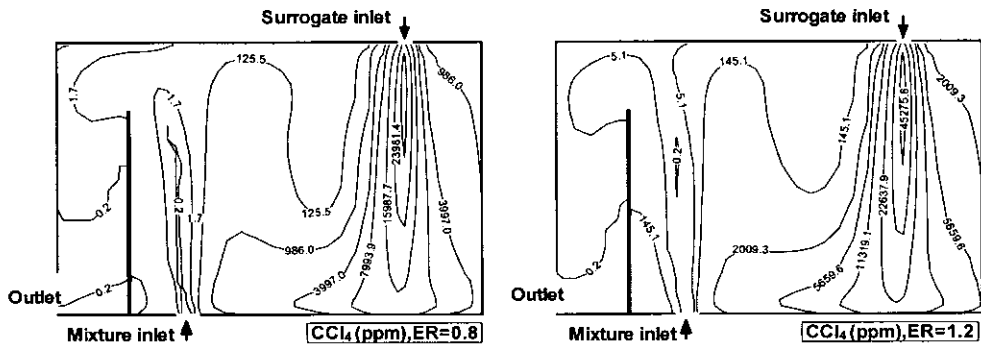


Fig. 8. CCl<sub>4</sub> concentration contour changed of surrogate equivalence ratio.



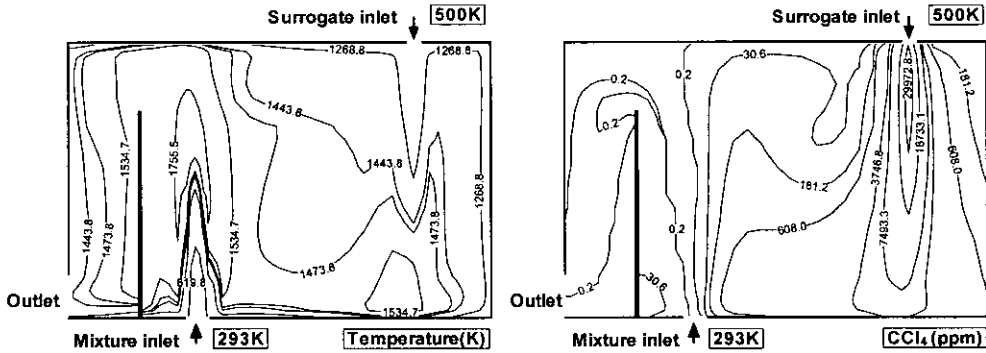


Fig. 9. Temperature and CCl<sub>4</sub> concentration contours changed of surrogate inlet temperature.

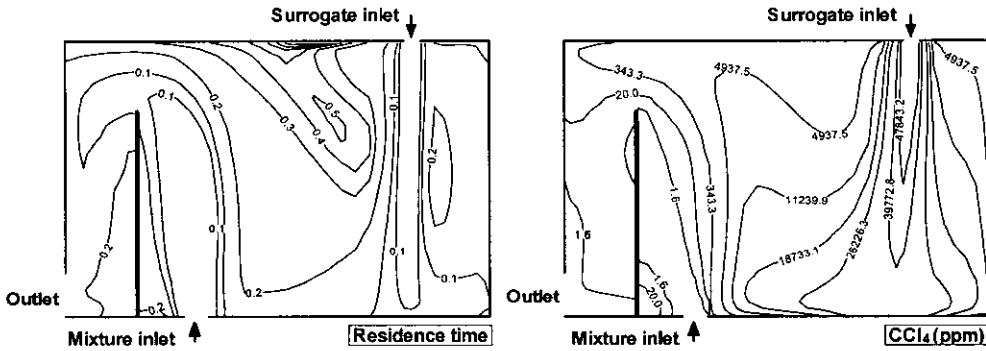


Fig. 10. Residence time and CCl<sub>4</sub> concentration contours changed mass inflow.

준 소각기와 동일하다. 그림 3의 기준 소각기의 체류시간이 2.6초인데 비하여 재순환영역의 파괴로 가장 긴 체류시간이 0.4초로 짧아진다. 식 (7)에서 알 수 있듯이 유량이 증가하면 mass inflow가 커져 체류시간이 짧아진다. 유속이 일정하더라도 주입유량의 변화가 소각기내의 체류시간에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. CCl<sub>4</sub>의 농도는 주입량의 증가로 인하여 고농도를 나타내며 특히 소각기 중앙의 재순환영역의 파괴로 인하여 재순환영역에서의 농도 감소가 거의 이루어지지 않는다. 비록 좌측벽면을 통과하면서 재반응을 하여 농도가 감소하기는하나 배기구쪽의 농도가 1.7 ppm으로 기준 소각기의 0.2 ppm보다 고농도를 나타낸다.

#### 4. 결 론

유해폐기물 발생장소에서 소각처리가 가능한 새

로운 형태의 덤프 소각기를 제안하고자 비평형 반응 연소모델을 이용하여 수치 해석적 연구를 수행하였다. 그 결과 CCl<sub>4</sub>의 분해효율이 "5 nine"으로 높게 나타났다. 따라서 고온에서 분해가 어려운 유해 폐기물을 효과적으로 소각하기 위해 고온에서의 열 재순환 영역을 크게 한 덤프 소각기가 효과적으로 이용될 수 있다.

덤프 소각기에서 최적 설계 및 운전조건을 제시하기 위하여 CCl<sub>4</sub> 분해에 관한 영향 변수별 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 주입비율(R)이 0.6 이하일 때는 배기구에서 CCl<sub>4</sub>의 농도가 차이가 없으나 0.6 이상이 되면 배기구의 CCl<sub>4</sub> 농도가 높아진다.
- 2) 폐기물의 당량비가 증가함에 따라 소각기내의 CCl<sub>4</sub> 농도는 같이 증가하나, 배출농도는 거의 변화가 없다.
- 3) 폐기물을 예열하면 재순환 영역에서의 CCl<sub>4</sub>의

농도는 감소한다.

4) 폐기물의 유입유량을 크게 하면 배기구의  $CCl_4$  농도가 증가된다.

### 참 고 문 헌

- Bose, D. and S.M. Senkan (1983) On the combustion of chlorinated hydrocarbon I Tri-chloroethylen, *Combustion Science and Technology*, 35, 189.
- Cundy, V.A., J.M. Morse, T.W. Lester, and D.W. Sencer (1987) An investigation of a near stoichiometric  $CH_4/CCl_4$ /Air premixed flat flame, *Chemosphere*, 16(5), 989.
- Gosman, A.D. and F.C. Lockwood (1973) Incorporation of a flux model for radiation into a finite-difference procedure for furnace calculations, 14th Symp. Combustion, 661.
- Jang, D.S. and S. Acharya (1990) A numerical simulation of  $CCl_4$  destruction in a two-dimensional kiln incinerator, *Energy R&D*, 12(3), 94-111.
- Kee, R.J. and T.H. Jefferson (1981) CHEMKIN: A General Purpose, Problem Independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package, Sandia National Laboratories Report SAND 80-8003.
- Launder, B.W. and D.B. Spalding (1972) *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, New York.
- Lockwood, F.C., A.P. Salooja, and S.A. Syed (1980) A Prediction Method for Coal-Furnaces, *Combustion and Flame*, Vol. 38, 1-15.
- Magnussen, B.F. and H. Hjertager (1976) On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, 16th symposium (International) on combustion, the combustion institute, pittsburgh, 714.
- Patanker, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Samaniego, J.M. and S. Candel (1993) Low frequency combustion instability mechanisms in a side-dump combustor, *Combustion and Flame*, 94, 363-380.
- Spalding, D.B. (1989) PHOENICS Training Course Notes, TR/300, CHAM.
- Stull, F.D., R.R. Craig, and J.T. Hojnacki (1974) Dump combustor parametric investigation, ASME Fluid mechanics of combustion joint fluids engineering and CSME conference, 135-152.