

## 사염화탄소( $\text{CCl}_4$ ) 소각을 위한 로타리 킬른 소각로 3차원 난류반응 컴퓨터 프로그램 개발(I)

### Development of a 3-Dimensional Turbulent Reaction Computer program for the Incineration of a Carbon Tetrachloride( $\text{CCl}_4$ ) (I)

엄태인\* · 장동순\*\*  
Tae-In Ohm · Dong-Soon Jang

#### ABSTRACT

In this study, it is investigated that the possibility of the numerical simulation for the incineration of the hazardous material, carbon tetrachloride( $\text{CCl}_4$ ). A 3-dimensional numerical technology is applied for turbulent reacting flows of the full-scale Dow Chemical incinerator. The calculations are made by a CRAY-2S, super computer. The major parameters considered in this study are kiln revolution rate (rpm), filling ratio of the solid waste(f), burner injection velocity and angle, and turbulent air jets for swirl. And the employed turbulent reaction model is the eddy break-up model which is a kind of fast chemistry model assuming general equilibrium and used for a premixed flame.

The calculated flow fields are presented and discussed.

- 1) The presence of turbulent air nozzles for swirl gives rise to visible increase of the convective motion over the region of the solid waste. This implies the possibility to enhance the mixing of the waste with the surrounding air and thereby to reduce thermal and species stratification, which were reported in a large rotary kiln operation.
- 2) Considering that the location of the recirculation region has a strong relation with the heating rate of the solid waste, the control of the recirculation region by the burner injection angle is quite desirable in the sense of the flexible design of the rotary kiln incinerator for a carbon tetrachloride.
- 3) Finally, it is found that the eddy break-up model is not suitable for carbon tetrachloride( $\text{CCl}_4$ ) because this model is not incorporated the flame inhibition trend due to the presence  $\text{CCl}_4$  compound.

---

\* 충남전문대학 산업안전과

\*\* 충남대학교 환경공학과

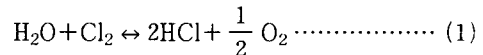
## 1. 서 론

본 연구는 산업안전보건법에서 정한 염소성분을 포함하는 유해물질중 대표적인 사염화탄소(CCl<sub>4</sub>) 처리를 위한 하나의 방법으로서, 최근 많은 연구가 수행중인 저공해 소각기술을 활용하고자 하는 것이다. 종래의 소각기술은 폐기물의 감량에 초점이 맞추어졌으나 현재는 소각과 공해물질의 제거는 물론 폐열 회수를 통한 에너지 이용의 극대화에 까지 이르고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 사염화탄소에 포함된 염소성분이 소각될 때 발생하는 유해 물질의 배출량을 저감할 수 있는 소각로내의 소각현상을 컴퓨터를 이용하여 난류 반응장을 수치 해석하였다. 본 연구에서는 소각로 설계에 필요한 각종 변수를 슈퍼컴퓨터인 CRAY-2S를 이용하여 분석하므로써 저공해 로타리 킬른 소각로 설계기술 제고 및 에너지 생산에 기여하고자 하는 것이다. 본 연구에서 모델로 선정된 미국 Dow Chemical사 로타리 킬른 소각로는 킬른의 길이가 10.7m, 직경 3.2m인 대형 산업폐기물 소각로이다.

본 연구에서는 킬른의 회전 속도(rpm), 염소성분이 포함된 액상/고형폐기물의 종류 및 처리량 또는 충전율(filling ratio), 버너의 위치 및 용량 등과 같은 제반 변수에 대한 킬른내의 열유동 및 반응 현상을 수치해석함으로써 액상/고형폐기물 혼소에 의한 처리 효율증진, 완전연소 유도 및 공해물질(NO<sub>x</sub>, 분진, Cl<sub>2</sub>) 생성의 원천적 제어, 화염의 안정성 및 소각로 설비의 내구성 증가 등 로타리 킬른 소각로의 운전 및 설계의 최적 조건을 확립하고자 한다.

산업용 폐기물 중에서 염소를 포함한 폐기물 예를 들면 PVC(poly-vinyl chloride), PCB(polychlorinated biphenyls), PCP(penta chlorophenol) 등의 소각에서는 염산가스(HCl)와 보다 훨씬 제거가 어렵고 독성 및 부식성이 강한 염소가스(Cl<sub>2</sub>)가 발생된다. 또한 이 염소가스는 소각로에서 발생된 비산분진 등을 촉매로 하여 인류에게 가장 유독한 물질 중의 하나로 알려진 Dioxin(PCDD, polychlorinated dibenzo-p-dioxins)이나 Furan(PCDF, polychlorinated dibenzo furans)을 발생시킨다 하여 소각로 산업이 발달한 유럽 및 캐나다 등에서 민감한 사회적인 문제로 대두되고 있다.

유해물질 소각은 연소에서와 같이 온도(Temperature), 체류시간(Residence Time)과 난류(Turbulence)의 3T에 의해 결정된다. 난류에서의 온도 및 체류시간 등에 의한 난류소각 반응은 비선형적인 제반 변수들에 의해 좌우되기 때문에 복잡 다단하며 분석에 많은 오류가 발생할 가능성이 높다. 그러나 이제까지 소각로 설계는 'Black Art'식의 시행 착오적인 방법 위주로 되어 왔으며, 그 결과로 소각시스템의 설계는 항상 'Over-Design'되어 그 운영이 필요 이상의 고온과 긴 체류시간 등으로 인하여 비효율적이었다. 유해물질 처리의 한가시 방법인 소각기술의 어려움은 복잡한 난류 연소외에 다른 실예는 일반 폐기물 소각에서 완전연소를 유도하기 위하여 다량의 과잉공기를 주입하는 것이 전통적인 현장 소각 기술이었으나, 본 연구에서와 같이 염소성분을 포함한 폐기물의 소각 처리장치에서는 과잉공기 주입에 의한 완전연소 처리는 새로운 문제점을 야기시킨다. 그것은 아래 식 (1)의 Deacon 반응으로 표시할 수 있다.



즉, 염소를 포함한 폐기물의 최종 연소 생성물 중 하나인 HCl은 과잉공기(O<sub>2</sub>)로 인하여 식 (1)의 평형상태를 왼쪽으로 이동시키면서 염소가스(Cl<sub>2</sub>)를 생성시킨다. 이 염소가스는 이미 앞에서 언급한 바와같이 HCl 보다 훨씬 제거하기가 어렵고 부식과 독성이 강한 물질이기 때문에 다량의 과잉공기에 의한 Cl<sub>2</sub>의 생성은 억제되어야 한다. 그러므로 과잉공기의 양은 완전연소와 최소한의 Cl<sub>2</sub> 생성 관점에서 최적량을 결정하여야 한다.

## 2. 수학적 모델

3차원 원통극좌표(cylindrical polar coordinate)에서 가스의 평균유동을 기술하기 위한 운동방정식은 정상상태, 비압축성, 뉴우톤 유체로 가정하고 중력항을 고려하여 유도하였다. 종속변수는 속도 성분  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ 와 압력( $\bar{p}$ ), enthalpy( $\bar{h}$ ) 화학성분의 질량분율(구체적으로  $\bar{m}_{Cl_2}$ ,  $\bar{m}_{HCl}$ ,  $\bar{m}_{O_2}$ ,  $\bar{m}_{H_2O}$ ,  $\bar{m}_{H_2}$ ,  $\bar{m}_{Cl}$ )이며 이들 종속변수에 대한 일반적인 지배방정식(general governing equation)은 다음식으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \bar{u} \bar{\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_r \bar{v} \bar{\theta}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{\theta}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \theta} \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_{\theta r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\theta z} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) \\ & + S_{\theta} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

윗 식에서  $\bar{\theta}$ 는 일반적인 종속변수이고  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ 는 평균속도,  $\Gamma_{\theta}$ 와  $S_{\theta}$ 는 각  $\bar{\theta}$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 이를 Table 1에 제시하였다. 여기서  $G_k$ 는 난류에너지 생성을 나타내며  $\sigma$ 는 난류 Prandtl수 또는 Schmidt 수를 상징한다. 난류유동은  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 난류전달력 항을 Boussinesq 가정에 의하여 난류 또는 eddy점성계수( $\mu_t$ )와

평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov 관계식으로부터 얻어진다.

$$\mu_k = C_{\mu} \frac{\rho k^2}{\epsilon} \dots \dots \dots (3)$$

앞에서 언급한 바와같이 염소성분이 포함된 사염화탄소의 소각처리에는 다량의 에너지가 필요하므로 이를 충당하기 위하여 수소/탄소(H/C)비가 높은 메탄(CH<sub>4</sub>)을 보조연료로 사용하였다. 본 연구에서는 타당한 예혼합 CH<sub>4</sub>/CCl<sub>4</sub>/공기 혼합기의 난류반응 모델 개발에 주안점이 주어졌으며, 이들 혼합기의 반응율은 난류혼합과 화학반응에 의해 결정된다고 생각된다. 이것은 CCl<sub>4</sub>는 낮은 연소 반응열과 화염억제 작용으로 인하여 보조연료 없이는 화염을 유지할 수 없기 때문이다.

Table 1 Expressions for the diffusion coefficients  $\Gamma_{\theta}$  and source terms  $S_{\theta}$  for a general dependent variable  $\theta$

Conservation of	$\theta$	$\Gamma_{\theta}$	$S_{\theta}$
Mass	1	0	0
Angular Momentum	$\bar{u}$	$\mu_{eff}$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} - \bar{u} \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\mu_{eff}}{r} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + 2\bar{v} \right) \right) + \frac{\mu_{eff}}{r} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{r \partial \theta} - \frac{u}{r} \right) - \frac{\rho \bar{u} \bar{v}}{r} - \rho g \cos \theta$
Radial Momentum	$\bar{v}$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\bar{u}}{r} \right) \right) - 2 \frac{\mu_{eff}}{r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}}{r} \right) + \rho \frac{\bar{u}^2}{r} - \rho g \sin \theta$
Axial Momentum	$\bar{w}$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)$
Kinetic Energy	k	$\mu_{eff}/\sigma k$	$G_k - \rho \epsilon$
Dissipation Rate	$\epsilon$	$\mu_{eff}/\sigma k$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$

$$G_k = \mu_{eff} \left[ 2 \left( \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]$$

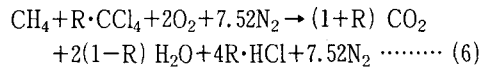
이미 언급한 바와같이 할로젠 화합물을 포함한 폐기물 소각에서는 이 물질의 비평형 반응 때문에 일반적인 연소 반응모델을 직접 사용 하는것은 적 합하지 않다. 그러나 본 연구에서는 할로젠 화합물 인 CCl<sub>4</sub>의 존재 영향을 고려하기 위한 초기 단계로 서 평형 난류반응 모델을 사용하였으며, 이 모델의 이론적 배경으로 CCl<sub>4</sub>의 연소는 CH<sub>4</sub>의 연소가 일 어남에 따라서 화학양론적으로 비례하여 일어난다 는 것을 가정하였다. 그러므로 CH<sub>4</sub>/CCl<sub>4</sub>/공기 혼 합기에서 CH<sub>4</sub>의 난류 반응율을 결정하는 것이 중 요한데 CH<sub>4</sub>의 반응율(RR<sub>CH<sub>4</sub></sub>)은 Magnussen과 H-jertager가 1976에 제안한 에디브레이크(Eddy Break-up) 모델에 의해 아래식과 같이 표시할 수 있다.

$$RR_{CH_4} = \text{minimum of } \left| \frac{\bar{\rho} A \bar{m}_{fu}}{\bar{\rho} A \bar{m}_{ox} \left( \frac{\epsilon}{sk} \right)}, \frac{\epsilon}{k} \right|, \frac{\epsilon}{k} \left| \frac{\bar{m}_{pr}}{1+s} \right| \dots \dots \dots (4)$$

위 식에서 s는 연료의 단위 질량당 완전연소에 필요한 산화제의 질량이고, A와 A'는 Lockwood 가 제시한 경험상수이다. 또한 식 (4)에서 사용한 CH<sub>4</sub>/CCl<sub>4</sub>/공기 혼합기에서 CH<sub>4</sub>의 반응율을 계산 하기 위해 사용한 화학종의 질량분율은 다음 식과 같다.

$$\bar{m}_{fu} = \bar{m}_{CH_4}; \bar{m}_{ox} = \bar{m}_{O_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{HCl} \dots \dots \dots (5)$$

식 (4)에서 주어진 CH<sub>4</sub>의 반응율은 일반적으로 순수 CH<sub>4</sub>/공기 혼합기(즉 (CCl<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub>) 몰비인 R = 0)인 경우보다 연료의 몰분율인  $\bar{m}_{fu}$ 가 작아지며 이것이 CCl<sub>4</sub>가 존재함으로써 생기는 반응율의 저 하를 설명하게 된다. 일단 CH<sub>4</sub>의 반응율이 얻어지 면 CCl<sub>4</sub>의 분해속도, 즉 RR<sub>CCl<sub>4</sub></sub>는 아래의 반응식 에 의해 결정된다.



그러므로 CCl<sub>4</sub>의 단위시간당 반응율은 다음 식 과 같이 표현된다.

$$RR_{CCl_4} = RR_{CH_4} \cdot R \cdot \frac{M_{CCl_4}}{M_{CH_4}} \dots \dots \dots (7)$$

위의 식 (7)에서 M은 분자량을 나타내며, s는 아래식과 같다.

$$s = \frac{2M_{O_2} + 2R \cdot M_{Cl_2}}{M_{CH_4} + R \cdot M_C} \dots \dots \dots (8)$$

식 (6)에서 CCl<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> 몰비인 R값을 증가시키면 화학종 질량분율 중에서 연료에 해당하는  $\bar{m}_{CH_4}$ 와 산화제에 해당하는  $\bar{m}_{O_2}$ 는 감소하게 되어 식 (4)에 의해 결과적으로 반응율이 줄어들게 되어 연소반응 이 억제된다. 그러나 이 모델에서는 화학반응을 개

Table 2 Source Term Expression for Enthalpy and Species Mass Fraction

∅	Model 1	Model 2
$\bar{h}$	$-\overline{RR}_{CH_4} \cdot H_{fu} \left( 1 + R \frac{M_{CCl_4}}{M_{CH_4}} \right)$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot H_{fu}$
$\bar{m}_{CCl_4}$	$-\overline{RR}_{CH_4} \cdot R \frac{M_{CCl_4}}{M_{CH_4}}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{R \cdot M_{CCl_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{CH_4}$	$-\overline{RR}_{CH_4}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{CH_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{O_2}$	$-2\overline{RR}_{CH_4} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{CH_4}}$	$-\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{HCl}$	$4\overline{RR}_{CH_4} \cdot R \frac{M_{HCl}}{M_{CH_4}}$	$\overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{4R \cdot M_{HCl}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{CO_2}$	$(1+R) \overline{RR}_{CH_4} \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}}$	$(1+R) \overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$
$\bar{m}_{H_2O}$	$2(1-R) \overline{RR}_{CH_4} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{CH_4}}$	$2(1-R) \overline{RR}_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}}$

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

넘은 정량적으로 도입되지 못했으며 개선의 여지가 있는 것으로 판단되었다.

일단 CH<sub>4</sub>/CCl<sub>4</sub>/공기 혼합기의 연소속도가 구해지면 각각의 화학종에 대한 반응율은 식 (6)에서 이론 반응식을 이용하여 계산할 수 있으며, 비근한 예를 들면 CCl<sub>4</sub>의 반응율은 다음 식과 같다.

$$RR_{CCl_4} = RR_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{R \cdot M_{CCl_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}} \dots\dots\dots (9)$$

반응모델에서 사용한 엔탈피와 모든 화학종의 질량분율에 대한 생성항은 Table 2에 제시하였다. 난류반응 유동장 해석에는 복사열전달에 대한 모델이 심도 있게 고려되어야 하나, 본 연구에서는 복사모델을 단순화한 현열손실 모델(sensible heat loss model)을 이용하였다. 또한 본 연구에서 사용한 모든 화학종에 대한 비열 및 기타 필요한 성질은

Svehla가 제안한 함수관계로 부터 계산하였다.

### 3. 수치해석 방법

2차 편미분 방정식을 풀기 위한 수치 해석 알고리즘에 대해서는 여러 문헌에 잘 나타나 있으며 3차원 알고리즘 개발에 대한 상세한 설명은 향후 제시할 예정이므로 본 논문에서는 논문 전개에 필요한 사항을 간단히 요약하고자 한다. 식 (2)로 주어지는 일반적인 2차편미분 방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 유한차분 방정식(control-volume based finite difference method)을 도입하여 선형적인 이산화 방정식(discretization equation)을 유도하였다. 이 이산화 방정식의 z, r 방향은 line-by-line TDMA(Tridiagonal Matrix Algorithm)에 의해 해를 구하였으며, θ 방향은 시작점

Table 3 Inlet Stream Conditions

Rotary Kiln Incinerator	Length (m)	10.7
	Diameter (m)	3.2
	rpm	2.0
	Circumferential Velocity at the inner Wall(m/sec)	0.34
Burner I (Top Burner)	Fuel Composition (%)	9.2
	Temperature(°K)	353.0
	Gaseous Composition (%)	2.8
	Waste Temperature(°K)	353.0
	Air Composition (%)	88.0
	Temperature(°K)	353.0
	Total Axial Velocity( $\bar{w}$ )m/sec	20.0
	Tangential Velocity( $\bar{u}$ )m/sec	-0.074
Radial Velocity( $\bar{v}$ )m/sec	-4.14	
Burner II (Bottom Burner)	Turbulence Intensity (%)	10.0
	Jet Injection Angle	11° Toward center 4° down
	Fuel Composition (%)	9.5
	Temperature(°K)	353.0
	Air Composition (%)	90.5
	Temperature(°K)	353.0
	Total Axial Velocity( $\bar{w}$ )m/sec	10.0
	Tangential Velocity( $\bar{u}$ )m/sec	0.037
Radial Velocity( $\bar{v}$ )m/sec	-2.027	
Burner II (Bottom Burner)	Turbulence Intensity (%)	10.0
	Jet Injection Angle Fuel	11° Toward center 4° down

과 종점이 같아지므로 이에 적용할 수 있는 "Cyclic TDMA" 방식을 도입하였다.

$$\bar{\phi}(0) = \bar{\phi}(2\pi) \dots\dots\dots (10)$$

또한 운동 방정식( $\bar{\phi} = \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ )에서 야기되는 압력과 속도의 상호 연계 방법은 SIMPLER(Semi-Implicit Methods for Pressure-linked Equations Revised) 알고리즘을 이용하였고, 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power-Law Scheme에 의하여 실행하였다. 본 연구에서 압력-속도연계를 해결하기 위한 여러가지 알고리즘 즉 SIMPLE, SIMPLE-Consistent, SIMPLER 등을 비교하였으며 이 중에서 SIMPLE가 안정성 및 수렴성능에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 격자계의 크기는 24×15×20이며 더 큰 격자계는 컴퓨터 계산시간의 제약 때문에 수행되지 않았다. 한편 프로그램에서 사용한 이산화방정식은 비선형 편미분 방정식을 선형 방정식으로 변환한 것이므로 반복계산 과정에서 발산을 방지하고 수렴성능을 극대화 하기 위한 이완화 인자(relaxation factor,  $\lambda$ )를 0.05~0.3범위에서 사용하였다. 이러한 이완화 인자의 적절한 설정은 수렴성능 및 계산의 안정성에 관계되며 특히 3차원 컴퓨터 프로그램인 본 논문에서는 매우 민감하게 작용한다.

$$\phi = \lambda \phi_{new} + (1 - \lambda) \phi_{old} \dots\dots\dots (11)$$

본 계산의 수렴 조건은 각 검사체적에서 계산한 질량보존 오차의 최대값이 10<sup>-3</sup> 이하이고 일정한 지점(예 킬른출구 중심, 버너의 일정하류 축 중심 등)에서 주요변수들의 반복계산 결과가 반복회수에 따라 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판정하였다. 이러한 계산은 시스템공학연구소의 CRA-Y-2S를 사용하여 4500회 반복계산을 수행한 결과이며 CPU 시간은 대략 110분 정도가 소요되었다. Table 3에 본 논문에서 수치해석에 사용한 로타리 킬른과 버너의 규격 및 유동조건들을 요약 기술하였다.

#### 4. 결과 및 토론

본 연구에서 유해물질인 사염화탄소(CCl<sub>4</sub>)의 저공해 소각로 개발을 위한 모델로 이용한 Dow Chemical사의 로타리 킬른 소각로에 대하여, 난류반응장에 대해 슈퍼컴퓨터를 이용한 고도 공간해석을 수행하였다. 그 결과 평형난류 반응 모델인 Fast

Chemistry 모델을 수정한 평형 난류반응모델을 본 연구의 난류반응장 해석에 도입하여 유동장 및 연소생성물의 농도분포와 온도의 변화를 관찰하므로써 유해물질 처리량을 최적화 하여 저공해 소각로 개발에 이용할 수 있는 자료를 획득하였다.

이 소각조건에서 폐기물 CCl<sub>4</sub>, 보조연료인 CH<sub>4</sub>와 공기의 혼합기로 유입되는 상부버너의 유속은 20m/sec이고 보조연료인 CH<sub>4</sub>와 공기의 혼합기인 하부버너는 10m/sec로 유입되고 있다. 또한 CCl<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub>의 몰비인 R = 0.18, 고행폐기물이 차지하는 충전율은 10%, 킬른의 회전속도는 2rpm, 고행폐기물에서 발생하는 생성물은 무시하고 선회공기의 유입은 없는 경우이다.

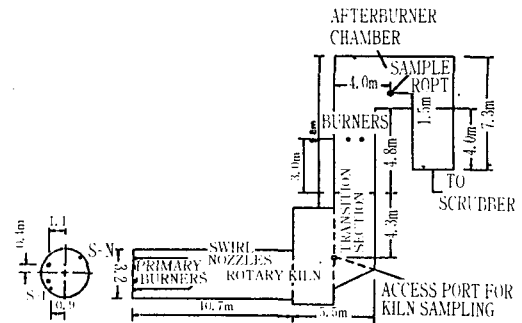


Fig. 1 Dow chemical rotary kiln incinerator facility

본 연구의 모델인 로타리 킬른 소각로는 대형이며 소각시 로내의 온도가 고온이므로 부력에 의한 중력항의 영향을 무시할 수 없다. 또한 킬른 내벽의 온도는 킬른 입구에서 0.8m까지는 400°K, 3m 이상의 위치에서는 700°K, 이 두위치 사이의 주 소각 영역에서는 내벽의 온도를 1000°K로 가정하였다. 그리고 상하 두버너의 입구 온도는 CCl<sub>4</sub>의 비등점이 76.8°K 이므로 80°K로 정하였다.

Fig. 2는 위의 표준조건에서 난류 평형 모델을 적용하여 반응장을 해석한 킬른의  $\theta$ -r 단면에서 u-v 속도벡터를 z = 0.75m, 1.5m, 3.0m, 6.5m인 위치에서 각각 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 상부버너 주위에서 흡수유동(entrainment)이 킬른 입구에서 1.5m 이상까지 길게 발생하고 있다. 또 하나의 특이한 결과는 반응에 의해 기체의 체적이 증가하여 전체적인 단면의 선회유속이 증가한 반면 비반응 유동장에서 구하지 못한 것으로서 킬른 입구에서 약 3m까지는 고행폐기물 상부에 선회속도

가 큰 반면 킬른 출구 근처인 6.5m에서는 고행폐기물 상부의 선회속도가 현저히 줄어들어서 앞에서

우려되었던 고행폐기물로부터 회전하면서 발생될 수 있는 비산분진을 억제할 수 있는 특징이 있다.

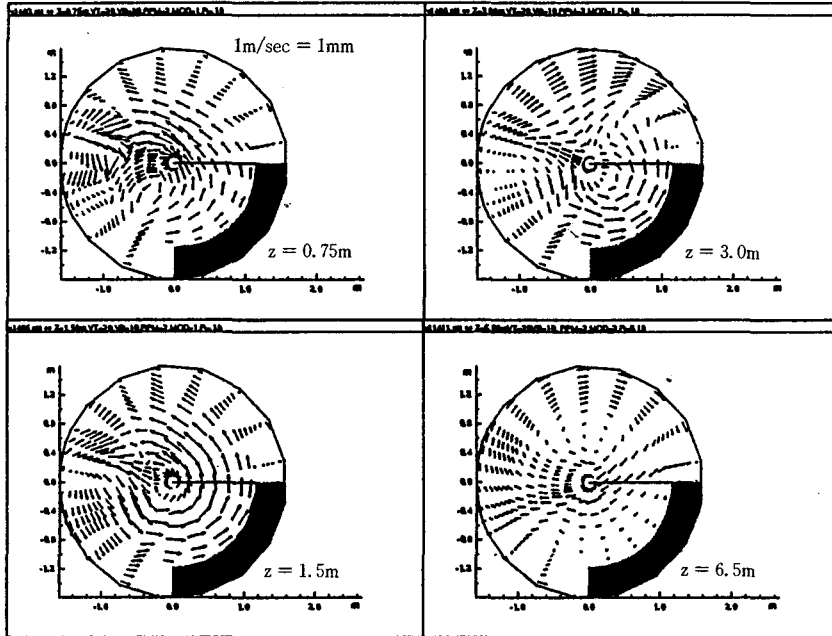


Fig. 2  $\theta$ - $r$  Plane  $u$ - $v$  vector plots of the model 1 for  $R = 0.18$  at a number of axial locations  $z = 0.75, 1.50, 3.0, 6.5$ m

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 킬른 축방향 속도인  $w$ 의 등속도선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 빗금친 부분은 재순환 영역을 의미하며 검게 칠한 부분은 고행폐기물을 나타내고 있다. 비반응 유동장 해석에서 얻은 결과보다 재순환 영역이 고행폐기물 상부에서 축방향으로 3m 이상까지 길게 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 폐기물로 주입한  $CCl_4$ 의 농도 분포를 킬른 축 방향 즉  $z = 0.75$ m,  $1.5$ m,  $6.5$ m,  $9.5$ m에서 킬른 단면에 표시하였다. 본 그림에서 조각된  $CCl_4$ 의 농도분포를 관찰하여 보면 킬른 입구에서 약 2m인 위치에서  $CCl_4$ 는 대부분 조각됨을 알 수 있다. 이것은 평형 난류반응 모델의 특징으로서  $CCl_4$  연소속도가  $CH_4$ 의 연소속도에 화학량론적으로 비례하기 때문이며, 화염역제 작용을 반영하지 못하고 있다.

또한 Cundy 그룹이 수행한 대형 로타리 킬른 소각로 실험에서 관찰되었던 킬른 출구단면에서 수직 방향으로 농도 성층화 현상을 극명하게 나타나지 않고 있다. 그러므로 이 평형 난류반응 모델은 화염역제 작용을 보다 정확히 해석하기 위해서는 화학 속도론적인 수정이 요구된다.

Fig. 5는  $CCl_4$ 가 주입되는 상부버너가 위치한 곳에서 윗쪽 그림은 버너가 위치한 안쪽( $r = 0.62$ m)이고 아래 그림은 버너가 위치한 지점( $r = 1.16$ m)에서 킬른 길이 방향에 따른  $CCl_4$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  농도를 그린 것이다. 위 그림에서 보면 킬른 입구에서 약 0.5m 떨어진 위치에서 상부버너의 유동이  $r = 0.62$ m인 지점에 도달하게 되므로  $CCl_4$ 의 농도가 급격히 증가한 후  $z = 3.5$ m인 위치에서 거의 조각된 모습을 보여주고 있다.

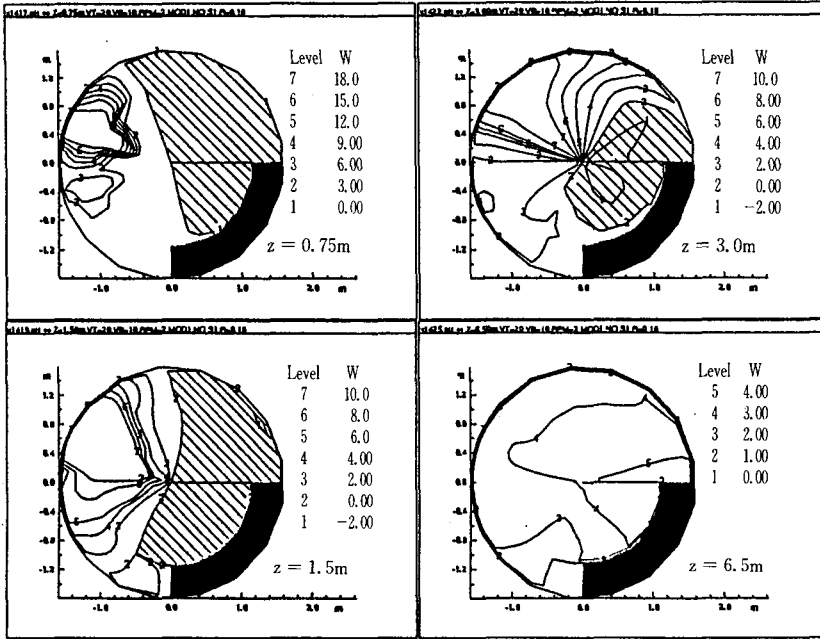


Fig. 3 Axial Velocity(w) Contour Plots of the model 1 for R = 0.18 at a Number of Axial Locations z = 0.75, 1.50, 3.0, 6.5m

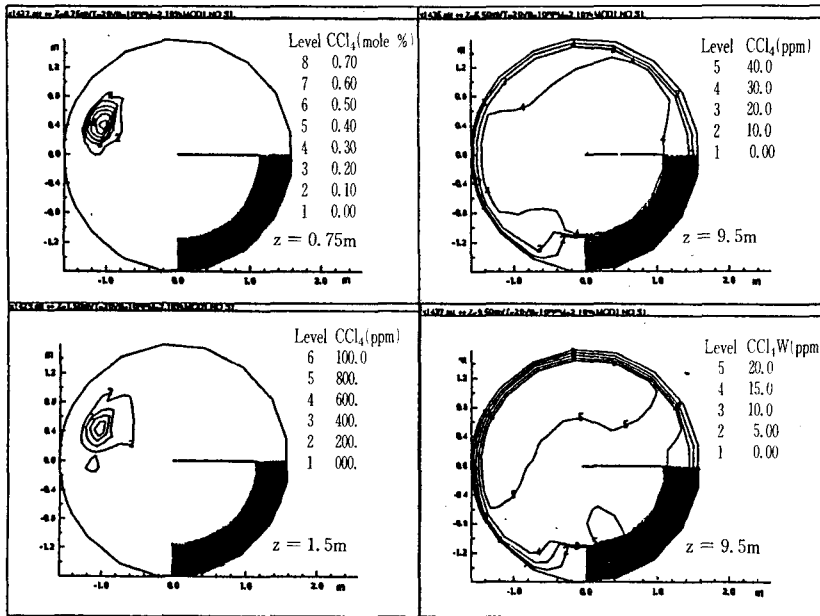


Fig. 4 CCl<sub>4</sub> Concentration Contour Plots of the model 1 for R = 0.18 at a Number of Axial Locations z = 0.75, 1.50, 6.5, 9.5m



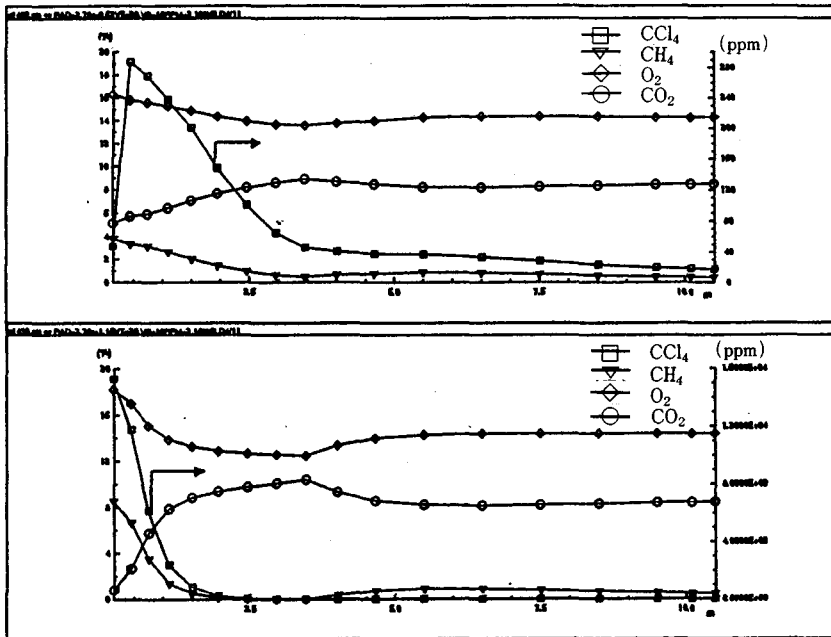


Fig. 5 CCl<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Concentration of model 1 along Axial Distance for R = 0.18 at Top Burner

### 5. 결 론

염소성분이 포함된 화합물인 사염화탄소를 소각 처리 방법에 의하여 컴퓨터를 이용한 난류 반응장 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 버너의 경사각에 의해 킬른내에서 선회유동이 발생되므로 고형폐기물 상부에 재순환 영역이 길게 형성되어 고온의 재순환 가스에서 고형폐기물로 유동가열(convective heating)이 일어나므로 고형폐기물에 포함된 유해성분의 소각 특성에 따라 설계 조건을 비교적 간단히 조절할 수 있다.
- 2) 평형 난류반응 모델을 화염억제 작용이 있는 사염화탄소 소각에 직접 적용한 결과 실제보다 연소속도가 빨랐으며 이로 인하여 킬른 출구에서도 실험에서 발견되었던 수직방향의 농도 성층화현상이 분명하게 나타나지 않고 있다.

그러므로 유해물질에 다량 포함된 염소성분과 같이 화염억제 작용이 강할 경우 연소 반응모델을 수

정한 난류반응 모델개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 향후지속적으로 유해물질 소각시 필요한 소각 메카니즘과 난류 반응모델을 개발할 계획이다.

### 참 고 문 헌

- 1) Cundy, V. A., Lester, T. W., Sterling, A. M., Morse, J. S., Montestruc, A. N., Leger, C. B., Acharya, S. Rotary Kiln Incineration I. An Indepth Study-Liquid Injection, JAPCA Vol. 39, pp.63~75, 1989.
- 2) 엄태인, 장동순, 채재우, Acharya, S., 로타리킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 I : 3차원 로타리킬른 난류장 수치 모사, 한국폐기물 학회지 Vol.9, No.2, pp.9~21, 1992.
- 3) 엄태인, 장동순, 채재우 로타리킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 II : Dow Chemical 소각로 운전 변수 심층 수치분석, 한국폐기물 학회지 Vol.10, No.1, pp.9~23, 1993.

- 4) 임태인, 장동순, 채재우 로타리킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구Ⅲ : 3차원 CCl<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> 기상난류 반응 모델, 한국에너지공학회지 Vol.2, No.1, pp. 54~67, 1993.
  - 5) Jang, D.S. and Acharya S., Calculation of Non-equilibrium effects in Turbulent Non-premixed Combustion ASME paper No.87-HT-52, 1987.
  - 6) Jang, D.S. and Acharya S. Two-dimensional Modeling in a kiln presented in AIChE Nat'l Spring Meeting, New Orelans, March 6~10, 1988.
  - 7) 장동순, S.Acharya A Numerical Simulation of CCl<sub>4</sub> Destruction in a Two-dimensional Kiln Incinerator, 한국에너지기술연구소, 에너지 R & D, Vol,12, No,3 p.94, 1990.
  - 8) 장동순, 김영대 A Study on the LNG-Fired Combustor Modeling 한국화학공학회, 1990년도 춘계학술발표회 논문초록집 pp.121~122, 1990.
  - 9) 임태인 로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 3차원 난류반응 컴퓨터 프로그램 개발, 인하대학교, 박사학위 논문집, 1993.
-