

로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 III: 3차원 CCl₄/CH₄ 기상난류 반응 모델

엄태인 · 장동순* · 채재우**

충남전문대학 산업안전과

*충남대학교 환경공학과

**인하대학교 기계공학과

A Study for the Advanced Design of Rotary Kiln Incinerator III : 3-Dimensional CCl₄/CH₄ Gas-phase Turbulent Reaction Model

Tae In Ohm, Dong Soon Jang* and Jae Ou Chae**

Department of Industrial Safety, Chungnam Junior College

**Department of Environmental Engineering, Chungnam National University*

***Department of Mechanical Engineering, Inha University*

요 약

CCl₄/CH₄/공기로 이루어진 예혼합 화염에 대한 2종류의 난류반응 모델을 Dow 케미칼사의 3차원 로타리 킬른 소각로에 적용하여 그 타당성을 확인하였다. 첫번째 난류반응 모델은 반응물이 반응물질의 난류혼합 속도에 지배된다는 fast chemistry 모델(모델 1)이고, 두번째 모델은 비평형 난류반응 모델(모델 2)로서 열량이 낮고 화염 억제 작용이 있는 산업폐기물인, CCl₄ 존재에 따른 반응감속을 연소속도 자료에 의해 고려한 모델이다. 수치해석의 결과에 의하면 CCl₄의 화염억제 작용을 적절히 고려한 두번째 비평형 난류반응 모델은 Dow 케미칼사 로타리 킬른의 출구에서 실험적으로 나타나는 농도 상층화 현상을 정성적으로 규명할 수 있었으며, CCl₄/CH₄ 몰비 변화에 따른 연소반응 지연 양상도 확인할 수 있었다. 기타 두 모델에 대한 비교 및 유동의 결과를 자세히 제시하였다.

Abstract—Two turbulent reaction models of the premixed CCl₄/CH₄/air mixture are successfully incorporated in a 3-dimensional computer program and is applied for Dow Chemical incinerator equipped with two main off-center burners. The first reaction model is fast chemistry model(model 1), in which chemical reaction is governed by the turbulent mixing itself. And the second one is nonequilibrium model(model 2), where the effect of the chemical kinetics due to the presence of CCl₄ is considered by the incorporation of the burning velocity data of CCl₄. The second model not only shows the flame inhibition trend due to the presence CCl₄ compound, but also predicts qualitatively the vertical stratification of the CCl₄ concentration appeared experimentally at the kiln exit. Other comparisons of two models are made in detail.

1. 서 론

본 연구는 대형 로타리 킬른 소각로에 대한 설계변수 및 운전조건 최적화라는 궁극적인 연구목표를 달성하기 위한 일련의 연구중 세번째로서 기상 난류 반응모델

개발에 대한 결과이다. 이미 발표한 첫번째 연구논문은 3차원 난류 유동 컴퓨터 프로그램의 개발이며 이를 미국의 Dow 케미칼(Dow Chemical)사가 가동 중인 2개의 편심버너로 이루어진 로타리 킬른 소각로에 적용하였다 (Fig. 1)^{ref[1]}. 이 연구의 중요결과 중의 하나는 두 개의

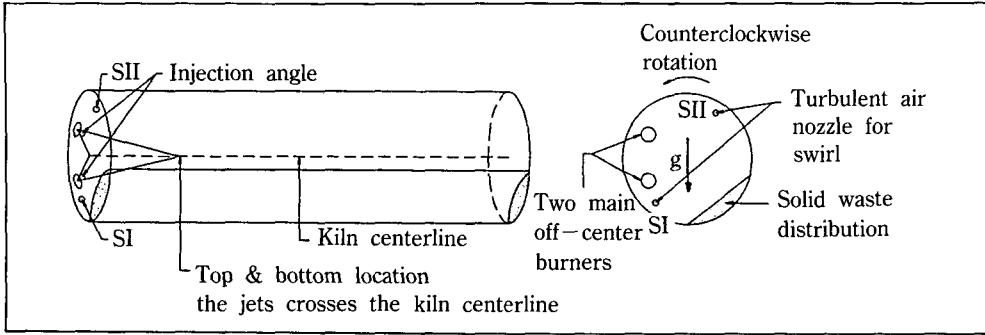


Fig. 1. Dow Chemical Rotary Kiln Incinerator Facility

편심 주 버너로 이루어진 로타리 킬른의 유동장 특성으로서 킬른하부에 위치한 고행폐기물의 상부에 완만한 속도를 가진 긴 재순환 영역이 형성되는 것이다. 이 완만한 속도의 재순환 영역은 고행폐기물에서 발생하는 비산분진(fly ash)을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 고행 폐기물이 건조/휘발/열분해/연소과정에서 필요한 다량의 열에너지를 공급하는 화염유지(flame holder) 기능이 있음을 확인하였다.

두번째 연구논문에서는 폐기물 소각에 중요한 영향을 미치는 제반 변수들에 대하여 비반응 난류 유동장을 해석하여 로타리 킬른 소각로 설계시 고려해야할 내용을 파악하였다^{2,3}. 이 논문에서 고려한 변수는 (1)로타리 킬른의 회전속도(rpm), (2)고행폐기물의 충전율(filling ratio, f), (3)두개의 주 편심버너에서 분출되는 제트의 속도 및 입사각(jet injection angle), (4)선회공기의 영향 등이다. 이 결과에 의하면 킬른 내부의 유동에 가장 큰 영향을 주는 변수는 본 연구에서 해석한 변수 영역내에서는 주 버너제트의 입사각과 선회회전이며, 주 버너제트의 입사각을 증가시킬 경우 고행폐기물 상부에 형성되는 재순환 영역의 위치가 킬른하류에서 입구쪽으로 축소이동되는 양상을 보였다. 이러한 유동 변화가 시사하는 바는 고행폐기물의 초기 가열속도(initial heating rate)를 버너 입사각 조절에 의하여 제어 가능함을 확인한 것이다. 한편, 선회공기의 주입은 고행폐기물 주위의 유동을 증가시켜 비교적 휘발성이 약한 산업폐기물 소각 처리시 킬른 출구, 즉 후연소실의 입구에서 실험적으로 발견되는 연소 생성물 농도의 심한 성층화 현상을 완화하는데 기여할 수 있을 것으로 판단되었다. 후연소실 입구에서 PIC(Products of Incomplete Combustion)이나 POHC(Principal Organic Hazardous Constituents)의 성층화 현상 파악은 후연소실의 설계 및 운전 조건 설정시 매우 중요한 것이다. 위에서 언급된 여러 결론들은 다우 케미칼사의 각종 운전조건에서 실험한 여러 자료와 그 정성적 경향이 일치하고

있다^{Cundy⁴}. 실험자료와 정량적인 비교는 로타리 킬른의 회전부위에서의 공기 유입 및 기타 구체적인 실험 자료의 부재 등으로 가능하지 않음을 밝힌다.

이미 언급한 바와같이 본 논문은 세번째 연구로서 그 목적은 앞의 연구에서 수행한 비반응 유동 프로그램의 결과를 실제로 반응이 존재하는 대형 로타리 킬른 소각로에 적용하기 위한 것으로서 CCl₄와 CH₄의 예혼합 난류 기상반응 모델의 개발이다. 본 연구에서 소각 물질로 CCl₄를 선택한 것은 알려진 바와같이 CCl₄가 산업 폐기물의 상당 부분이 플라스틱, 제초제, 살충제와 유기용제 등을 생산하는 화학공장의 공정에서 발생하는 염화탄화수소(chlorinated hydrocarbons, CHCs)계통의 대표적 폐기물이기 때문이다^{Jang⁵와Acharya⁵,Jang⁶}. 이러한 염화탄화수소 화합물 소각에 대한 많은 연구결과에 의하면 기초 열분해 및 소각 실험에서는 이들 물질을 99.99% 이상 처리할 수 있는 방법임을 입증하였으나, 실제 대형 킬른에 대한 소각 기술은 경험적이고 개선의 여지가 많은 것으로 알려져 있다^{Robinson⁷}.

그러므로 소각로에 대한 고도 설계를 위해서는 난류 반응 모델에 대한 보다 발전된 모델 개발과 이 모델의 대형 킬른에 대한 적용이 불가피하게 요구되며 이는 소각처리에 발생하는 각종 유독물질에 대한 규제가 점점 엄격해짐을 고려할때 매우 절실한 문제라 하겠다. 그러나 난류 반응모델은 난류 유동의 Reynolds 전단력과 같이 비선형 난류 상관항의 모델이 요구되며 이것은 아래식(1)과(2)에 제시한 질량분율(m)과 엔탈피(h)의 지배방정식에 비선형 화학 반응 생성량(w_i)에서 가시화 된다.

$$\rho \frac{\partial m_i}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla m_i = \nabla \cdot (\Gamma \nabla m_i) + W_i \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\Gamma \nabla h) - \sum_{j=1}^N h_j w_j \quad (2)$$

윗식에서 m_i, w_i, h_j 는 질량분율, 화학반응에 의한

생성항, 반응에서 고려한 N개의 화학종의 생성 엔탈피이다. 이미 언급한 바와같이 식(1), (2)에서 생성항(w_j)이 난류유동에서 고려될 경우 모델링에서 어려운 문제를 야기시키는 원인이 된다. 이는 티록 반응 전체를 단순한 비가역 1단계 2차 반응(irreversible one-step, second order reaction)으로 가정한다 하여도 이 생성항의 난류에서 평균값 \bar{w}_j 는 아래와 같은 제변수의 복잡한 평균 및 변동(fluctuation) 상호 관계항으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} \bar{w}_j &= \overline{\rho^2 k_j m_j} = \overline{\rho^2 A m_j} \exp(-E/RT) \\ &= \overline{\rho^2 m_j} A \exp(-E/RT) \left\{ 1 + \frac{\overline{\rho'^2}}{\rho^2} + \frac{\overline{m'_j m'_j}}{m_j} + 2 \right. \\ &\quad \left. \frac{\overline{\rho' m'_j}}{\rho m_j} + \frac{E}{RT} \cdot \left(\frac{\overline{m'_j T'}}{m_j T} + \frac{\overline{m'_j T'}}{m_j T} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left(\frac{E}{2RT} - 1 \right) \frac{\overline{T'^2}}{T^2} + \dots \right) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

위 식에서 - 와 ' 은 각각 평균값과 난류변동값을 나타내며, 이 식에서 시간평균 이외의 상호 관계항은 온도, 밀도, 화학종 농도의 변동값이 평균값에 비하여 무시할 정도로 작지 않기 때문에 매듭(closure)의 문제가 야기된다. 위식에서 나타난 항들을 검토해 볼 때 난류반응에서 전체 반응률, 즉 생성항의 크기 w_j 는 화학반응률(chemical kinetics)과 반응물질의 난류 혼합속도(turbulent mixing rate)가 상호 연계된 복잡한 문제로 파악된다. 이를 현상학적으로 단순화시키면 전체 난류반응률은 아래와 같이 화학반응률과 난류혼합속도의 조화 평균으로 나타내어진다고 볼 수 있다.

$$\text{전체난류반응률} = \frac{1}{\frac{1}{\text{화학반응률}} + \frac{1}{\text{난류혼합속도}}} \quad (4)$$

그러나 대부분의 실질적인 연소는 반응물이 연료의 난류혼합 과정에 비해 그 특성시간이 매우 짧다고 볼 수 있으므로 식(4)에서 그 크기가 작은 난류혼합이 전체 반응률을 제약하는 요소로 작용하며 난류 혼합시간이 반응시간을 대표한다고 할 수 있다. 즉 혼합이 일어나면 반응은 순간적으로 종결된다고 볼 수 있으므로 대부분의 난류반응 모델은 화학적으로 매우 빠른 반응, 즉 화학평형을 가정하는 것이 보통 사용되는 개념이다. 이러한 모델을 보통 fast chemistry 모델이라 부르며 예혼합화염에 대해서는 eddy break-up 모델이 사용되고 있으며 확산화염에서는 보존 스칼라(conserved scalar)방법이 대표적인 예이다. Spalding^[8], Bitzer^[9] 이와같이 난류만을 이용한 모델의 기본 개념은 식(5)와 같이 표현되는 반응시간 τ_c 가 와동의 신장(vortex stretching)에 의한 난류 에디의

파괴에 의한 혼합시간보다 훨씬 짧다는 것이다.

$$\tau_c = \overline{m_1 m_2} \rho A \exp(-E/RT) \quad (5)$$

그러나 이 모델은 다음과 같은 여러 상황에서의 적용이 적합하지 않다. 즉 국부 화염 냉각에 의한 화염비화(lift-off), NO_x의 생성 및 소멸, 광화학 스모그 현상 그리고 제반 반응률이 느린 화학반응로의 문제에서는 화학반응률이 전체 반응률에 중요한 역할을 하기 때문에 난류 혼합뿐만 아니라 화학반응률 또한 모델에 고려되어야 한다. 이러한 문제는 본 연구에서 대상 물질로 삼고 있는 할로겐 화합물, 즉 CCl₄의 경우에도 적용되며 이는 CCl₄의 낮은 발열량과 화염억제 작용 때문이다.

최근 Jang과 Acharya는 CH₄/CCl₄/공기 혼합물 연소에 대한 난류반응 모델로서 CCl₄농도의 일정한 범위내에서 CCl₄의 분해율이 CH₄반응률에 직접적으로 비례한다는 개념을 도입한바 있고, 나아가서 비평형 반응 난류모델에 대한 연구로서 CH₄/CCl₄/공기 혼합기의 반응률에 대해 보다 현실적인 모델을 제안하였다. 이것은 화염전파의 열적이론에서 나타난 연소속도와 반응물 사이의 상관관계를 이용한 모델이었다^{Jang 등^[5]}. 그러나 이와같은 모델들에 대한 적용은 2차원 컴퓨터 코드에 국한되었고 이 결과에 대한 이론적인 추론만이 가능하였다. 본 논문에서는 이와같은 CCl₄ 난류반응 모델들을 3차원 대형 로타리 킬른에 적용하여 그 결과를 위에서 언급한 Cundy그룹의 실험적 결과와 비교 검토함이 기본적인 목적이다^{Cundy^[4]}.

본 연구에서 고려하고 있는 로타리 킬른 소각로에 대한 버너 시스템에 대해 보다 구체적으로 설명하면, 두개의 버너중 상부버너에서는 CH₄/CCl₄/공기가 혼합되어 주입하고 하부버너에서는 CH₄/공기를 공급하는 시스템으로서, 상·하 두 버너의 모두 예혼합 화염으로 가정하였다. 이때 CH₄는 보조 연료로서 공급되는데 이것의 역할은 연소화합물을 소각하는데 필요한 열량 공급뿐만 아니라 화염억제 반응에서 소모된 수소기(hydrogen radical)를 공급하는 일반적인 폐기물 소각기술에 근거하는 것으로서, 특히 할로겐 화합물을 포함한 산업폐기물 소각시에는 보조연료로서 H/C비가 가장 큰 CH₄나 LNG를 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 CCl₄가 기체상으로 주입되며 하단 고히물질은 일정 온도를 가졌으나 반응에 참여하지 않는 폐기물로 가정하였다.

2. 수학적 모델

3차원적 원통극좌표(cylindrical polar coordinate)에서 가스의 평균유동을 기술하기 위한 운동방정식은 정상상태, 비압축성, 뉴우튼유체로 가정하고 중력항을 고

Table 1. Expressions for the Diffusion Coefficients Γ_ϕ and Source Terms S_ϕ for a general Dependent Variable ϕ

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

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

$$\left. + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]$$

려하여 유도하였다. 종속변수는 속도성분 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} 와 압력 (\bar{p}), enthalpy(\bar{h}) 화학성분의 질량분율(구체적으로 \bar{m}_{CCl_4} , \bar{m}_{CH_4} , \bar{m}_{O_2} , \bar{m}_{CO_2} , $\bar{m}_{\text{H}_2\text{O}}$, \bar{m}_{HCl})이며 이들 종속변수에 대한 일반적인 지배방정식(general governing equation)은 다음식으로 표시될 수 있다.^{Gupta[10]}

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \bar{v} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{\phi})$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_\phi r \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} \right) + S_\phi \tag{6}$$

위 식에서 $\bar{\phi}$ 는 일반적인 종속변수이고 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} 는 평균속도, Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 각 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 이를 Table 1에 제시하였다. 여기서 G_k 는 난류에

너지 생성을 나타내며 σ 는 난류 Prandtl 수를 또는 Schmidt 수를 상징한다. 난류유동은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류전단력항을 Boussinesq 가정에 의하여 난류 또는 eddy 점성계수(μ_t)와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수 μ_t 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov 관계식으로부터 얻어진다^{Bird 등[11]}.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

앞에서 언급한 바와같이 본 연구에서는 예혼합 CH_4/CCl_4 공기 혼합기의 난류반응 모델 개발에 주안점이 주어졌으며 이들 혼합기의 반응물은 난류혼합과 화학 반응물에 의해 결정된다고 생각된다. 이것은 CCl_4 는 낮은 연소 반응률과 화염억제 작용으로 인하여 보조연료 없이는 화염을 유지할 수 없기 때문이다.

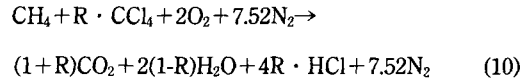
이미 언급한 바와같이 할로겐 화합물을 포함한 폐기물 소각에서는 이 물질의 비평형 반응 때문에 일반적인 연소 반응모델을 직접 사용하는 것은 적합하지 않다. 그러나 본 연구에서는 할로겐 화합물인 CCl_4 의 존재 영향을 고려하기 위한 두개의 모델 1,2를 도입하였는데 첫번째인 모델 1의 이론적 배경은 CCl_4 의 연소가 CH_4 의 연소가 일어남에 따라서 화학양론적으로 비례하여 일어난다는 것을 가정하였다. 그러므로 CH_4/CCl_4 공기 혼합기에서 CH_4 의 반응률(RR_{CH_4})은 Magnussen과 Hjertager가 1976에 제안한 에디붕괴(Eddy Break-up) 모델에 의해 아래식과 같이 표시할 수 있다^{Magnussen 등[12]}.

$$\text{RR}_{\text{CH}_4} = \text{minimum of } \left| \bar{\rho} A \overline{m_{\text{pr}}} \frac{\epsilon}{k}, \bar{\rho} A \overline{m_{\text{ox}}} \left(\frac{\epsilon}{s k} \right), \bar{\rho} A' \frac{\overline{m_{\text{pr}}}}{1+s} \frac{\epsilon}{k} \right| \quad (8)$$

위 식에서 s 는 연료의 단위 질량당 완전연소에 필요한 산화제의 질량이고, A 와 A' 는 Lockwood가 제시한 경험상수이다^{Lockwood[13]}. 또한 식(8)에서 사용한 CH_4/CCl_4 공기 혼합기에서 CH_4 의 반응률을 계산하기 위해 사용한 화학종의 질량분율은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{m_{\text{in}}} &= \overline{m_{\text{CH}_4}}; \quad \overline{m_{\text{ox}}} = \overline{m_{\text{O}_2}} \\ \overline{m_{\text{pr}}} &= \overline{m_{\text{O}_2}} + \overline{m_{\text{H}_2\text{O}}} + \overline{m_{\text{HCl}}} \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)에서 주어진 CH_4 의 반응률은 일반적으로 순수 CH_4 공기 혼합기(즉 CCl_4/CH_4 몰비인 $R=0$)인 경우보다 연료의 물분율인 $\overline{m_{\text{in}}}$ 가 작아지며 이것이 CCl_4 가 존재함으로써 생기는 반응률의 저하를 설명하게 된다. 일단 CH_4 의 반응률이 얻어지면 CCl_4 의 분해속도, 즉 RR_{CCl_4} 는 아래의 반응식에 의해 결정된다^{Bose 등[14]}.



그러므로 CCl_4 의 단위시간당 반응률은 다음식과 같이 표현된다.

$$\text{RR}_{\text{CCl}_4} = \text{RR}_{\text{CH}_4} \cdot R \cdot \frac{M_{\text{CCl}_4}}{M_{\text{CH}_4}} \quad (11)$$

위의 식(11)에서 M 은 분자량을 나타내며, s 는 아래 식과 같다.

$$s = \frac{2M_{\text{O}_2} + 2R \cdot M_{\text{Cl}_2}}{M_{\text{CH}_4} + R \cdot M_{\text{C}}} \quad (12)$$

식(10)에서 CCl_4/CH_4 몰비인 R 값을 증가시키면 화학종 질량분율 중에서 연료에 해당하는 $\overline{m_{\text{CH}_4}}$ 와 산화제에 해당하는 $\overline{m_{\text{O}_2}}$ 는 감소하게 되어 식(8)에 의해 결과적으로 반응률이 줄어들게 되어 연소반응이 억제된다. 그러나 이 모델에서는 화학반응물 개념은 정량적으로 도입되지 못했으며 개선의 여지가 있는 것으로 판단되었다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 모델 2인 비평형 난류반응모델을 적용하여 두 모델 사이의 차이점을 상호 비교하고자 한다. 이 모델은 예혼합 CH_4/CCl_4 공기 혼합기의 반응률을 정량적으로 나타내기 위한 것으로서 반응률 RR 을 화염연소속도(S_u)를 이용하여 아래와 같이 주어지는 관계식을 이용하였다^{Glassman[15]}.

$$S_u \propto (\alpha \text{RR})^{1/2} \quad (13)$$

이는 화염전파의 열역학적 이론에 기초한 것으로서 여기서 α 는 열확산 계수를 나타내며 화염의 연소속도 S_u 는 본 논문에서는 변수 R 과 당량비 β 의 함수로 주어지며 이에 필요한 자료는 분철편화에서 얻은 결과를 사용하였다^{Robinson[7]}. 식(11)과 S_u 대 R 의 상관 관계를 이용하면 CH_4/CCl_4 공기 혼합기의 반응률을 다음과 같이 R 과 β 의 함수로 표시할 수 있다.

$$\text{RR}_{\text{CH}_4 - \text{CCl}_4} \Big|_{\text{at } R, \beta} = \left(\frac{S_u^2}{\alpha} \right)_{R, \beta} \cdot \text{RR}_{\text{CH}_4} \Big|_{R=0, \beta} \quad (14)$$

식(14)에서 $\text{RR}_{\text{CH}_4} \Big|_{R=0, \beta}$ 는 순수 CH_4 공기 혼합기 반응에서 CH_4 의 반응률을 나타낸다. 이 항을 계산하기 위하여 식(8)에서 사용한 에디 붕괴에 의한 난류모델이 도입되었으나 연료와 산화제로서의 역할을 동시에 하는 CCl_4 역할 분할은 아래식과 같이 사용하여 계산하였다.

Table 2. Source Term Expression for Enthalpy and Species Mass Fraction

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

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

$$\overline{m_{fu}} = \overline{m_{CH_4}} + \overline{m_{CCl_4}} \cdot \frac{M_C}{M_{CCl_4}}$$

$$\overline{m_{ox}} = \overline{m_{O_2}} + \overline{m_{CCl_4}} \cdot \frac{M_{Cl_4}}{M_{CCl_4}} \quad (15)$$

일단 CH₄/CCl₄/공기 혼합기의 연소속도가 구해지면 각각의 화학종에 대한 반응률은 식(10)에서 이론 반응식을 이용하여 계산할 수 있으며, 비근한 예를 들면 CCl₄의 반응률은 다음식과 같다.

$$RR_{CCl_4} = RR_{CH_4-CCl_4} \cdot \frac{R \cdot M_{CCl_4}}{M_{CH_4} + R \cdot M_{CCl_4}} \quad (16)$$

모델 1과 2에서 사용한 엔탈피와 모든 화학종의 질량분율에 대한 생성항은 Table 2에 제시하였다. 난류 반응 유동장 해석에는 복사열전달에 대한 모델이 심도 있게 고려되어야 하나 본 연구에서는 복사모델을 단순화한 현열손실모델(sensible heat loss model)을 이용하였다[Fletcher^[16]]. 또한 본 연구에서 사용한 모든 화학종에

대한 비열 및 기타 필요한 성질은 Svehla가 제안한 함수관계로부터 계산하였다[Svehla^[17]].

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^[18]. 식(6)로 주어지는 일반적인 2차 편미분 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 시작점과 종점이 같아지므로 이에 적용할 수 있는 "Cyclic TDMA" 방식을 도입하였다.

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 Waste Composition (%)	2.8
	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
	Turbulence Intensity (%)	10.0
Jet Injection Angle	11° Toward center 4° down	
Burner II (Bottom Burner)	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
Turbulence Intensity (%)	10.0	
Jet Injection Angle Fuel	11° Toward Center 4° Down	

$$\bar{\phi}(0) = \bar{\phi}(2\pi) \quad (17)$$

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.^{Patankar * [19]} 본 연구에서 압력-속도연계를 해결하기 위한 여러 가지 알고리즘 즉 SIMPLE, SIMPLE-Consistent, SIMPLER 등을 비교하였으며 이 중에서 SIMPLER가 안정성 및 수렴성능에서 가장 효과적임 것으로 나타났다. 이에 대한 구체적인 성능 비교는 다른 논문에서 추후 발표할 예정이다. 본 연구에 사용된 격자계의 크기는 $24 \times 15 \times 20$ 이며 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 극대화하기 위한 이완화 인자(relaxation factor, λ)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.

$$\phi = \lambda\phi_{\text{new}} + (1-\lambda)\phi_{\text{old}} \quad (18)$$

본 계산의 수렴 조건은 각 검사체적에서 계산한 질량보존 오차의 최대값이 10^{-3} 이하이고 일정한 지점(예 킬른출구 중심, 버너의 일정하류 축 중심 등)에서 주요 변수들의 반복계산 결과가 반복회수에 따라 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판정하였다. 이러한 계산은 시스템공학연구소의 CRAY-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

난류반응 모델을 적용하기 위한 대형 로타리 킬른소각로의 운전조건은 상부에 있는 주 폐기물 주입 버너

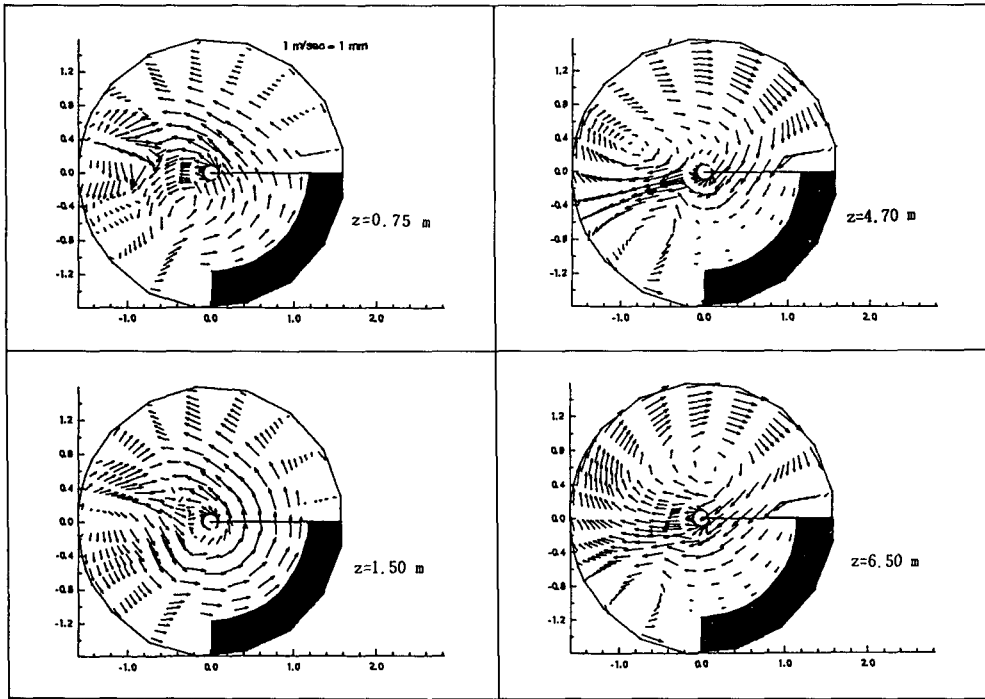


Fig. 2. r-θ Plane Vector Plots for RIX0.18 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 4.70, 6.50 m. (model 1)

에서는 상부에서는 CH₄/CCl₄/공기 혼합기를 예혼합된 상태에서 20 m/sec로 공급하였으며, 하부버너에서는 CH₄/공기 혼합기를 10 m/sec로 공급하였다. 이 상·하버너의 조건은 여러사항을 고려하여 Cundy 그룹의 실제소각 조건과 유사하게 결정한 것으로서 잉여공기는 없는 것으로 가정하였다. 킬른의 회전속도는 2 rpm이고 고행폐기물의 충전율은 10%를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 좌측으로 편심된 상·하 두개의 버너는 킬른축의 중심을 향하여 각각 11° 만큼 경사지고, 상·하 방향으로는 상부버너는 아래로 4° 하부버너는 위로 4° 만큼 경사져 운전되고 있다.

킬른에서 주입하는 CCl₄/CH₄의 몰비는 R=0.18, 0.30 인 두 경우를 고려하였고 킬른하부의 고행폐기물에서 발생하는 휘발분 및 발생가스의 유출량은 무시하였다. 본 연구의 모델인 로타리 킬른 소각로는 대형이며 소각각로내의 온도가 고온이므로 부력에 의한 중력항의 영향을 고려하였다. 또한 킬른 내벽의 온도는 구체적으로 나타내었는데 킬른입구에서 0.8m까지는 400° K, 3m이상의 위치에서는 700° K, 이 두 위치 사이의 주 소각 영역에서는 내벽의 온도를 1000° K 로 가정하였다. 그리고 상·하 두 버너의 입구 온도는 CCl₄의 비등점이 76.8°C 이므로 기체상태를 유지하는 80°C 로 정하였다.

Fig. 2는 평형모델인 Fast Chemistry 난류 반응모델 (모델 1)의 r-θ평면에서 일련의 속도벡터를 나타낸다. 이 경우의 운전조건을 요약하면 상부버너에서 CH₄/CCl₄/공기 혼합기체가 20 m/sec, 80°C 로 주입되고 하부버너에서는 CH₄/공기 혼합기가 10 m/sec, 80°C 로 주입 된다. 한편 킬른의 회전속도는 2 rpm, R=0.18, 고행폐기물의 충전율이 10%, 그리고 중력항에 의한 부력효과를 포함시켰다. 또한 고행폐기물에서 휘발성 기체의 발생은 없다고 가정하였다. 킬른 단면에서의 속도분포는 z=0.75 m, 1.50 m, 4.70 m, 6.50 m인 위치에서 제시하였다. 이 그림에서 보면 난류반응장의 속도벡터 특성은 시계 또는 반시계 방향으로 유동됨을 알 수 있다. 이와같은 특성은 본 논문에는 나타내지 않았지만 비반응 유동장의 결과보다 선회현상이 강조된 것으로서 반응에 따른 고온 기체의 유속 증가에 기인한 것으로 판단된다. 이와같은 결과로 폐기물 상단의 유동 또한 비반응 유동장에 비해 가시적으로 증가된 양상을 나타내고 있다.

Fig.3은 Fig. 2의 축방향 속도(w)의 등속도선을 나타내는 것으로서 재순환 유동장의 양상이 비반응 유동장의 형태와 유사하나 좀더 후류영역으로 확대 이동되었다. 이 재순환 영역의 하류쪽 확대현상은 반응에 따른 난류로의 전이가 지연되는 층류화 효과(laminarization ef-

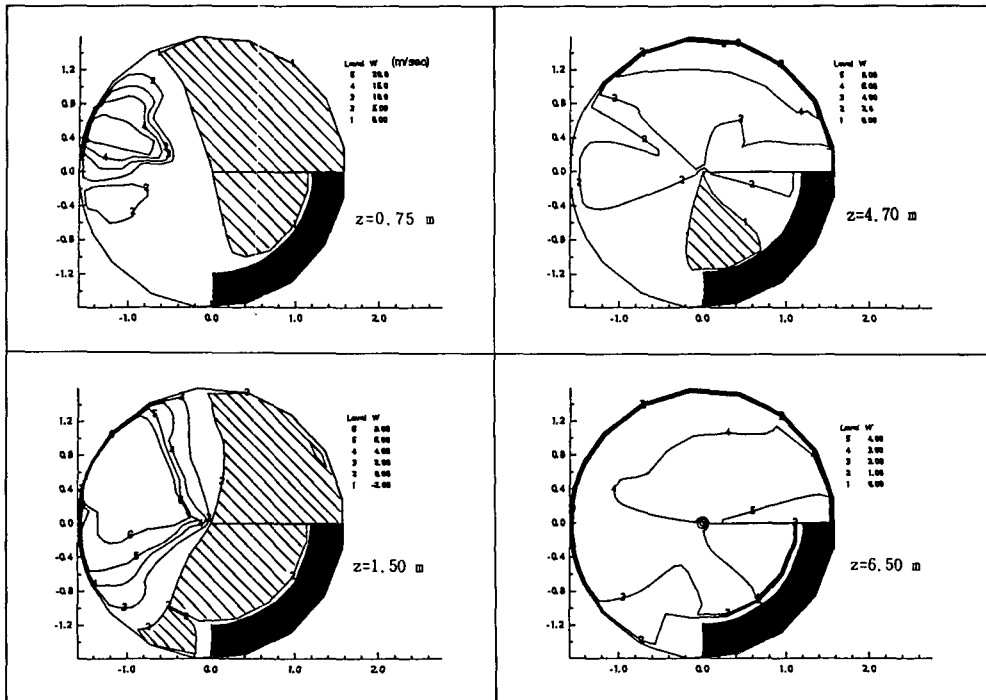


Fig. 3. Axial Velocity(w) Contour Plots for R=0.18 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 4.70, 6.50 m. (model 1)

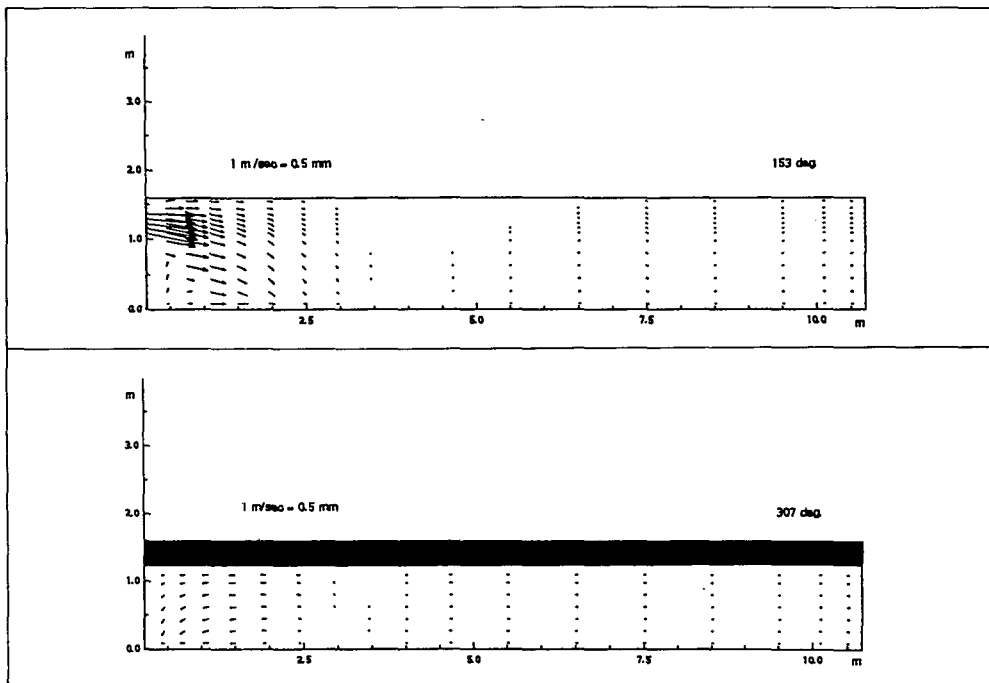


Fig. 4. r-z Plane Vector Plots for R=0.18 along Axial Distance at $\theta=153, 307$ degree (model 2)

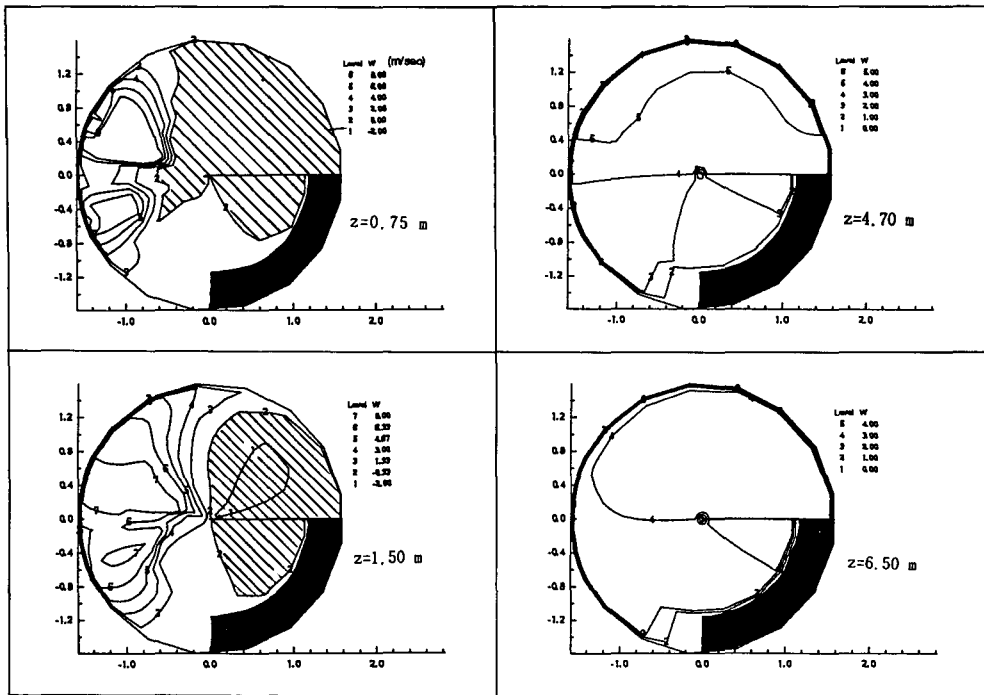


Fig. 5. Axial Velocity(w) Contour Plots for R=0.18 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 4.70, 6.50 m. (model 2)

fect)이거나 반응에 따른 속도 증가에 기인한 것으로 판단된다^{참고문헌[20]}.

Fig. 4는 비평형 난류반응 모델(모델 2)을 적용하여 Fig. 2와 동일한 소각조건에서 난류반응장을 해석한 결과로서 킬른의 r-z평면 속도분포를 나타내고 있다. 본 논문에서는 제시하지 않았지만 킬른 단면인 r-θ평면의 전체적 유동형태는 Fig. 2와 유사하나 반응에 의해 형성된 빠른 선회 현상이 매우 약화된 양상을 보여주고 있다. 이는 비반응 유동에서 선회 현상이 매우 약하게 나타난 점을 고려할 때 일관성이 있는 사실이다.

Fig. 5는 Fig. 4에 대한 축방향의 속도인 w의 등속도선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 전체 재순환 영역의 크기는 평형 난류반응 모델과 유사하나 재순환 영역의 길이가 킬른 입구에서 4m까지로 축소되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 평형 난류반응 모델인 모델 1을 사용하여 해석한 결과로서 킬른 축방향으로 z=0.75 m, 1.50 m, 6.50 m, 9.50 m인 단면에서 CCl₄의 농도분포를 나타내고 있다. 모델 1에서는 CCl₄의 열적파괴(thermal destruction)가 CH₄의 연소속도에 비례하여 나타남으로 대부분 CCl₄는 킬른 입구에서 약 1.5m인 하류에서 대부분 소각이 완료되고 3m인 지점부터는 농도가 100 ppm이하

로 줄어들게 된다. 킬른 출구 부분인 9.50 m인 지점에서 CCl₄의 농도분포가 약 15 ppm정도를 나타내고 있다.

Fig. 7은 비평형 난류반응 모델인 모델 2의 결과로서 CCl₄의 농도가 킬른입구로부터 약 6.5m인 지점에 도달하여 비로소 CCl₄가 거의 소각됨을 나타내고 있다. 주목할만한 특이한 사실은 z=6.50 m에서는 CCl₄의 농도가 0-300 rpm사이에서, z=9.50 m인 킬른 출구 부근에서는 CCl₄의 농도가 0-20 ppm까지 성층화 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이것은 앞의 fast chemistry 모델(그림 6)에서는 볼 수 없는 주목할 만한 현상이며, Cundy그룹이 대형 로타리 킬른 소각로에서 소각 실험시 측정된 킬른 출구의 상·하단에서 1-18 rpm사이의 농도분포와 정성적으로 그 경향이 일치한다.

이와같이 농도의 심한 성층화 현상은 소각로 설계시 매우 중요한 설계요인으로 판단되며 이러한 농도 성층화 현상은 후연소실에서 완전 소각이 가능하도록 설계되어야 하므로 전체적인 소각시스템의 규모가 커질 우려가 있다. 이것은 미량의 CCl₄나 중간 생성물의 반응이 화학적으로 비교적 느릴 수 밖에 없는데 그 이유가 있다.

Fig. 8은 평형난류 반응모델인 모델 1을 사용하여 CCl₄/CH₄ 몰비인 R의 값은 0.18에서 0.3으로 증가시켰을

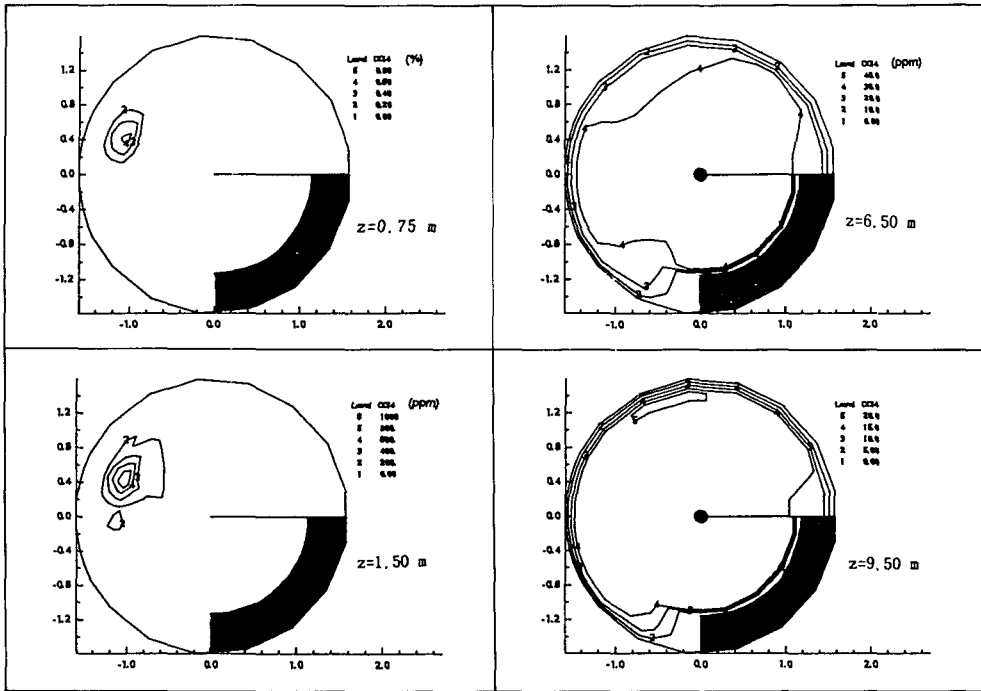


Fig. 6. CCl₄ Concentration Contour Plots for R=0.18 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 6.50, 9.50 m. (model 1)

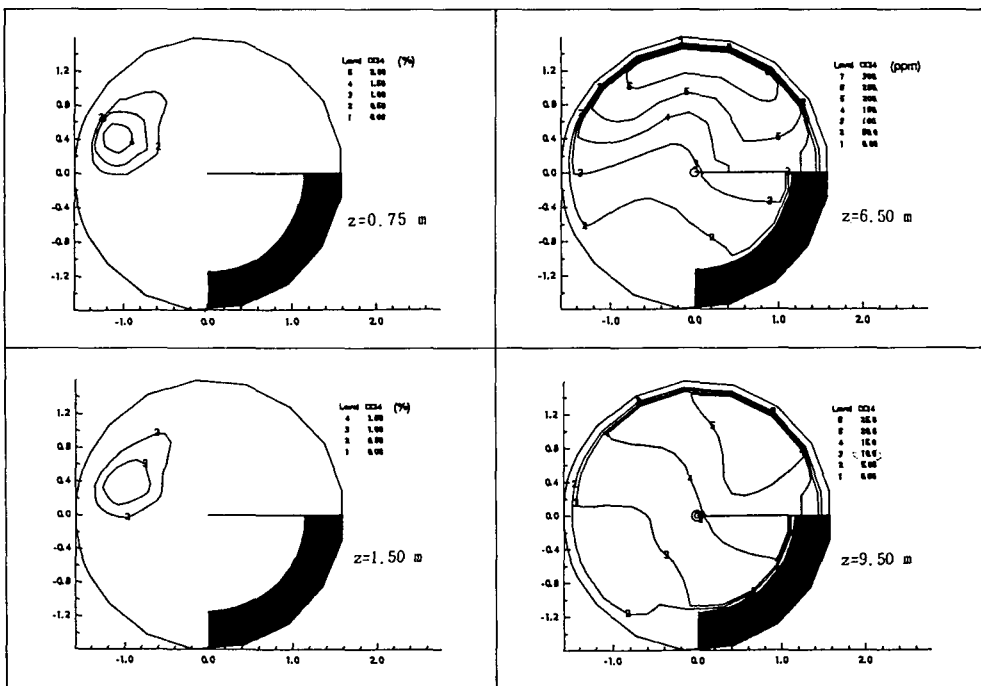


Fig. 7. CCl₄ Concentration Contour Plots for R=0.18 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 6.50, 9.50 m. (model 2)

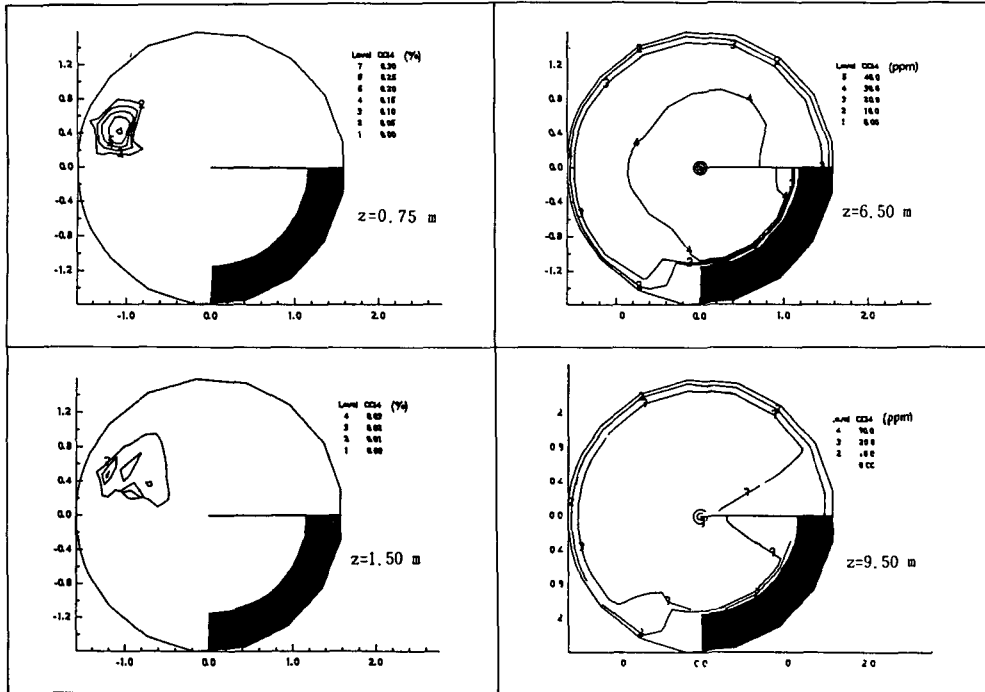


Fig. 8. CCl₄ Concentration Contour Plots for R=0.30 at a Number of Axial Locations z=0.75, 1.50, 6.50, 9.50 m. (model 1)

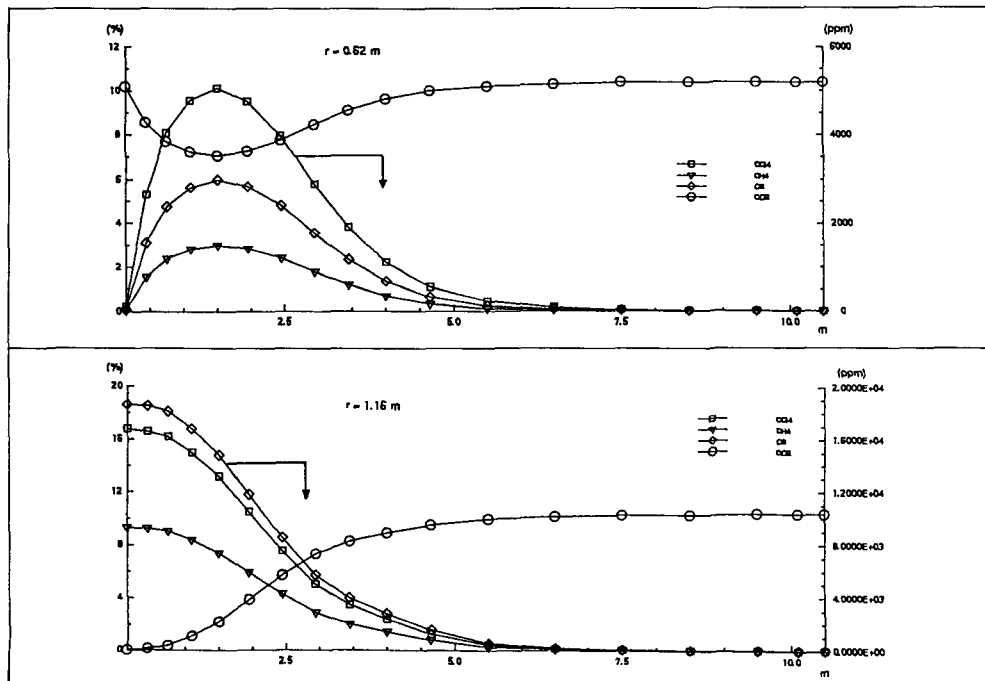


Fig. 9. CCl₄, CH₄, O₂, CO₂ Concentration for R=0.18 along Axial Distance at Top Burner (model 2)

경우 R의 변화에 따른 CCl₄의 소각 특성의 변화이다. 킬른 입구에서 거리에 따른 CCl₄의 농도 변화는 앞의 Fig. 6과 비교할 때 전체적으로 조금 증가하였으나 농도의 분포 형태는 유사하다. 이 그림과 앞의 Fig. 6을 관찰하여 보면 Cundy그룹이 실험한 결과인 킬른 출구에서의 농도 성층화 현상은 나타나고 있지 않다.

모델 2를 이용하여 CCl₄/CH₄ 몰비가 0.3으로 증가하였을 때 킬른의 각 단면에서 CCl₄의 농도분포는 CCl₄ 농도가 증가하였을 경우는 킬른 출구에서도 CCl₄가 미소각된 상태인 0.02%(200 ppm)까지 발생되고 있으나 본 논문에서는 제시하지 않았다. 그러나 모델 2를 이용한 CCl₄의 소각특성이 앞의 모델 1보다 Cundy그룹이 실험한 결과와 잘 일치하고 있다. 일반적으로 모델 2는 CCl₄의 화염억제 효과는 비교적 정확히 모사하고 있으나 R 값의 변화에 따른 소각 특성은 추후 다른 실험을 통하여 좀더 보완될 필요가 있다.

Fig. 9는 R=0.18 일때 모델 2를 이용하여 CCl₄가 주입되는 상부버너가 위치한 곳에서 킬른 길이 방향에 따른 CCl₄, CH₄, O₂, CO₂ 농도를 표시한 것으로서 윗쪽 그림은 버너가 위치한 안쪽(r=0.62 m)이고, 아래 그림은 버너가 위치한 지점(r=1.16 m)의 농도 분포이다. 위 그림에서 보면 킬른입구에서 약 0.5 m 떨어진 위치에서 상부버너의 유동이 r=0.62 m인 지점에서 도달하게 되므로 CCl₄의 농도가 급격히 증가한 후 z=6.0 m인 위치에서 거의 소각된 모습을 보여주고 있다.

5. 결 론

로타리 킬른 소각로의 3차원 난류반응 컴퓨터프로그램을 개발하여 이를 Dow 케미칼사의 CCl₄ 소각처리 시스템에 적용하였다. 난류반응 결과로 나타난 유동장은 반응의 강도가 강할수록 비반응 유동장에 비해 강한 선회유동을 나타내고 있으며 재순환 영역에서도 일관성 있는 사실을 나타내었다. 두 모델 중에서 비평형 난류 모델인 모델 2는 fast chemistry 모델인 모델 1에 비해 CCl₄ 존재에 따른 화염변화 특성을 좀더 사실적으로 예측하였고 킬른 출구에서의 CCl₄ 농도 성층화 현상을 정성적으로 잘 나타내었다. 이러한 사실에 비추어 모델 2는 CCl₄ 소각처리에 대한 일반적인 난류반응 모델로서 가능성을 보여 주었다. 기타 다른 폐기물 화학종에 대해서도 유사한 접근이 가능하다고 보여지며 복사 열전달을 포함한 다른 세부모델에 대한 향후 연구가 요망된다.

감 사

본 연구는 시스템공학연구소의 슈퍼컴퓨터설비

(CRAY-2S)를 이용하여 수행하였으며 충남대학교 환경공학과 폐기물 실험실에 대한 회원제 혜택에 감사를 드립니다.

Nomenclature

eff	: effective
fu	: fuel
g	: gravity force(9.81 m/sec ²)
h	: enthalpy
k	: turbulent kinetic energy
m	: mass fraction
M	: molecular weight
OX	: oxygen
p	: pressure
pr	: product
r	: radial coordinate
R	: CCl ₄ /CH ₄ molar ratio
s	: stoichiometric oxidizer mass per unit mass of fuel
t	: turbulent
T	: temperature
u	: tangential velocity
v	: radial velocity
w	: axial velocity
z	: axial coordinate
α	: thermal diffusivity
β	: equivalence ratio
Γ	: turbulent diffusion coefficient
ε	: turbulent kinetic energy dissipation rate
ρ	: density
φ	: general dependent variable
θ	: tangential coordinate
μ	: viscosity
σ	: Schmidt number
τ	: reaction time

참고문헌

1. 엄태인, 장동순, 채재우, Acharya, S., "한국폐기물학회지", Vol. 9, No. 2 pp. 9-21 (1992).
2. 엄태인, 장동순, 채재우, "한국폐기물학회지", Vol. 10, No. 1 pp. 9-23 (1993).
3. 엄태인, 송은영, 장동순, 채재우, "대한환경공학회 논문초록집", pp. 179-182 (1992).
4. Cundy, V. A., Lester, T. W., Sterling, A. M., Montestruc, A. N., Morse, J. S., Leger, C. B. and Acharya, S. "JAPCA", Vol. 39, No. 7 pp. 994-952 (1989).
5. Jang, D. S. and Acharya, S. "에너지 R & D", 제

- 12권 3호, pp 94-111 (1990).
6. Jang, D. S., "M. S. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering", Louisiana State University, Baton Rouge, L. A. (1984).
 7. Robinson, J. M., "M. S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology", Department of Chemical Engineering (1981).
 8. Spalding, D. B., "13th Symposium (International) on Combustion", The Combustion Institute (1971).
 9. Bilger, R. W., "Prog. Energy Combustion Science", Vol. 1, p. 87 (1976).
 10. Gupta, A. K., D. G. Lilley, N. Syred, "Swirl Flows", ABACUS PRESS, USA pp. 172-187 (1984).
 11. Bird, R. B., W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons New York (1960).
 12. Magnussen, B. F. and Hjertager, H., "16th Symposium (International) on Combustion", The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p. 714 (1976).
 13. Lockwood, F. C., Salooja, A. P. and Syed, S. A., "Combustion & Flame", Vol. 38, P. 1 (1980).
 14. Bose, D. and Senkan, S. M., "Combustion Science and Technology", Vol. 35, P. 189 (1983).
 15. Glassman, L., Combustion, Academic Press, New York (1974).
 16. Fletcher, T. H., "Ph. D. Dissertation, Department of Chemical Engineering", Brigham Young University, Provo Utah (1983).
 17. Svehla, R. A., "NASA Technical Report", R-132 (1963).
 18. 임태인, "인하대학교 기계공학과", 박사 학위 논문 (1993년 예정).
 19. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flows, Hemisphere, Washington, D. C. (1980).
 20. 임태인, 장동순, 윤형기, "한국에너지기술연구소 Energy R & D", Vol. 12 No. 3, pp. 83 (1990).