

## 당량비 변화에 따른 복사 특성이 3차원 난류 연소에 미치는 영향 연구

김태국\* · 윤경범\*\* · 민동호\*\* · 장희철\*\* · 김진수\*\*\*

### Study of the Radiation Effect by Equivalence ratio change on the 3-D Turbulent Combustion

Tea-Kuk Kim, Kyung-Beom Yoon, Dong-Ho Min, Hee-Chul Chang and Jin-Soo Kim

#### ABSTRACT

Radiative heat transfer is very important in many combustion systems since they are operated in high temperature. Fluid flows in most of the combustion systems are turbulent to promote fast mixing of the hydrocarbon fuel and oxidant. Major combustion products are  $CO_2$  and  $H_2O$ . The turbulent flow is modeled by using the standard  $k-\epsilon$  model and the radiation transfer is modeled by using the discrete ordinates method where the radiative gas properties are calculated by using the weighted sum of gray gases model with a gray gas regrouping(WSGGM-RG). Effect of the radiation on the combustion characteristics in a three-dimensional rectangular enclosure is studied by changing the equivalence ratio. Results show that the radiation plays a significant role on the heat transfer in the combustion systems by resulting in a temperature drop of 16% as compared to that obtained without radiation. The equivalence ratio also affects the combustion by different contribution of the radiative transfer with different gas compositions.

**Key Words** : Turbulent Combustion,  $k-\epsilon$  model, WSGGM-RG, Radiation, Eddy Break-Up Model, Discrete Ordinates Method, Equivalence ratio

#### 기 호 설 명

$I$	복사강도 [ $W/m^2sr$ ]	$\phi$	당량비
$\kappa$	흡수계수 [ $m^{-1}$ ]	$\mu$	x방향 여현
$\kappa_{i0}$	흡수계수 모델상수 [ $K^2/atm$ ]	$\omega_m$	각도 가중치
$L$	통과거리 [m]	$\Delta\eta$	밴드두께 [ $\mu m$ ]
$M$	회색가스 수	$\tau$	통과율
$N_i$	i 번째 그룹의 회색가스 수		
$P$	대기압 [atm]		
$q$	복사열유속 [ $W/m^2$ ]		하첨자
$T$	온도 [K]	$fu$	fuel
$u, v, w$	속도 성분	$ox$	oxidant
$X$	물분율	$pr$	product
$Y$	질량분율	$eff$	effective
$W$	가중치	$i$	i 번째 회색가스
		$b$	흑체
		$mix$	혼합가스
	그리스 문자		
$\alpha_i$	흡수계수 모델상수 [K]		

\*† 중앙대학교 기계공학부, kimtk@cau.ac.kr

\*\* 중앙대학교 대학원

\*\*\* 중앙대학교 대학원, 벽산엔지니어링

## 1. 서 론

연료를 연소시켜 생활에 필요한 에너지를 만드는 여러 가지 열기기들(산업용 가열로, 보일러, 가스터빈, 자동차용 엔진 등)의 연소실 내부에서는 고온의 화염, 연소가스 및 연소생성물 등이 발생되며, 연소열은 고온의 화염 및 연소가스에 의하여 복사에너지의 형태로 흡수, 방출 및 산란되며 이러한 복사열전달은 전도 및 대류에 의한 열의 전달에 비하여 일반적으로 더 큰 비중을 차지하게 된다. 따라서 연소현상과 복사열전달의 상관관계에 대한 연구는 연소에 의한 열기기를 해석하는데 필수적이며 열기기의 성능 및 효율 평가 및 향상에 도움을 줄 것이다.

복사열전달에 가장 큰 영향을 미치는 연소가스로는  $\text{CO}_2$  및  $\text{H}_2\text{O}$ 가 있으며 연소를 해석하기 위해서는 유동해석이 필수적이고 열역학 및 화학적 지식들이 종합적으로 적용되어야 한다. 실제 연소장치에서 연소되는 연료의 연소는 여러 단계의 물리적 및 화학적 반응을 거치게 된다. 그리고 각 단계의 화학반응을 거치는 동안에는 수많은 종류의 화학 반응물들이 생성 및 소멸되는 복잡한 현상을 동반하고 있으며, 연소모델에서 이러한 각각의 화학종에 대한 생성 및 소멸을 고려하여 각 화학종의 보존을 따지는 것은 계산상 많은 어려움이 예상된다. 여기에 사용되는 연료가 고체 또는 액체 상태인 경우에는 연소실 내부의 고온 유동장내에서 연료 입자가 기화하여 연소되면서 어떠한 경로를 따라서 어떠한 속도로 유동되고 있는지를 파악하여야 하는 추가적인 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 유동 양상이 비교적 간단한 기체연료의 연소를 가정한 단상의 난류유동장 내에서의 확산화염(diffusion flame)에 의한 연소 현상을 고려하고자 한다.

복사열전달은 파장, 온도, 압력 및 복사에너지의 통과거리 등에 따라 현저한 변화를 보이며, 파장에 따른 변화가 가장 크게 나타난다. 시스템에서 생성되는 연소가스 중 복사열전달에 영향을 미치는 주된 참여 매체인  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  등은 파장에 따라서 복사물성이 심하게 변화하는 비회색 성질을 지니고 있기 때문에 비회색 가스의 복사물성의 해석은 매우 중요하다. 가스의 복사물성치를 모델링하는 방법으로는 파장의 해상도에 따라 선별법, 밴드모델 및 총괄 스펙트럼 모델로 구별할 수 있으며, 이 중 총괄 스펙트럼 모델은 파장에 따라 변화가 없는 복사물성치를 이용하여 복사특성을 나타내는 방법이다. 이 중 비교적 간단하며 높은 정확도를 보이는 회색가스가중합법(Weighted Sum of Gray Gases Model, WSGGM)은 여러 개의 회색가스의 가중합으로 총괄 방사율을 모델링하는 방법이다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 연소와 복사열전달과의 상관관계를 알아보는 기초적인 연구단계로 간단한 연소모델과 Park과 Kim<sup>[2]</sup>에 의해 제안된 흡수계수의 크기에 따라 사용되는 회색가스들을 지정된 수의 그룹으로 재조합하는 WSGGM-RG를 DOM(Discrete Ordinates Method, 구분종좌표법)에 적용하여 복사열전달을 해석하겠다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 보존방정식

실제 연소장치에서 연소되는 연료로는 가스 상태의 기체연료, 고형입자연료 또는 액적으로 분무되는 액체연료 등이 있지만, 이러한 연료들의 연소는 여러 단계의 물리적 및 화학적 반응을 거치게 된다. 따라서 이를 해석함에 있어서 총류인 경우에도 많은 양의 계산을 해야 하는 어려움이 있다. 미소한 크기로 분무된 액적 또는 미세한 분말 상태의 고형연료를 사용하고 있는 열기기의 연소는 유동양상이 비교적 간단한 기체연료의 연소를 가정한 단상류 연료의 연소로 가정하여 해석할 수 있다. 연소장치 내부의 유동장은 표준  $k-\epsilon$ 모델<sup>[3]</sup>을 이용하였으며, 온도장을 구하기 위하여 비회색 가스 복사를 포함하여 에너지 방정식을 해석하였다<sup>[2]</sup>.

#### 2.1.1 1단계 반응 연소모델

난류화염의 총체적인 특징을 이해하는데 있어서 복잡한 단계의 화학반응을 거치는 동안에 생성되는 여러 종류의 화학성분들에 대한 해석이 반드시 필요하지 않다는 것이 여러 연구자들에 의하여 논의 되고 있으며, 실험에 의한 결과와도 잘 일치하고 있다<sup>[3],[4],[5]</sup>. 따라서 여러 화학종의 보존을 고려하는 대신 연료성분, 산화제성분 및 생성된 연소가스 성분에 대한 보존을 고려한 간략발열 연소모델을 이용하며 각 성분에 대한 질량 평형 및 보존방정식은 다음과 같다.

$$m_{fu} + m_{ox} + m_{pr} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{m}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{m}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_i \frac{\partial \bar{m}_i}{\partial x_j} \right) + \bar{R}_i \quad (2)$$

$$(i = fu, ox \text{ 또는 } pr)$$

여기서  $m_{fu}$ ,  $m_{ox}$ ,  $m_{pr}$ 은 각각 연료, 산화제 및 생성물의 성분율을 나타내며,  $\bar{R}$ 은 각각의 성분율을 나타낸다. 이들 세 가지 성분들 중에서 두 가지 성분(예를 들어  $\bar{m}_{fu}$  와  $\bar{m}_{ox}$ )에 대한 성분

보존방정식의 해를 구하게 되면 다른 하나의 해는 식 (1)로부터 결정되기 때문에 식 (2)의 연료 및 산화제 성분을 방정식만 고려하면 된다. 단위 질량 (1 kg) 의 연료가 연소되어 소멸됨과 동시에 s kg 의 산화제가 소요되기 때문에 연료 성분율에 대한 보존방정식의 생성항은 산화제 성분의 생성항과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\overline{R_{fu}} = \overline{R_{ox}}/s \quad (3)$$

그리고, 연료 성분율에 대한 보존방정식과 산화제 성분율에 대한 보존방정식에서 각각의 성분율에 대한 확산계수가 동일한 경우 ( $\Gamma_{fu} = \Gamma_{ox}$ ) 두 성분을  $\overline{m_{fu}}$  및  $\overline{m_{ox}}$  는 새로운 하나의 변수로 조합될 수 있으며, 이러한 새로운 변수에 대한 보존방정식에서는 생성항이 소거되어 영으로 되는 장점이 있다. 이러한 새로운 변수로는 다음과 같이 정의되는 조합성분율  $\overline{f}$  가 될 수 있다.

$$\overline{f} = \overline{m_{fu}} - \overline{m_{ox}}/s \quad (4)$$

여기서 s는 이론공연비를 나타내며, 이론 연소 반응인 경우에는  $\overline{m_{fu}} = \overline{m_{ox}}/s$  가 되며  $\overline{f} = 0$  인 값을 갖는다. 따라서,  $\overline{m_{fu}}$  와  $\overline{m_{ox}}$  에 대한 미분방정식을 해석하는 것보다  $\overline{m_{fu}}$  (또는  $\overline{m_{ox}}$ ) 와  $\overline{f}$  에 대한 미분방정식을 고려함으로써 다른 하나의 성분에 대한 반응율을 고려하지 않는 것이 편리하다.

조합 성분율  $\overline{f}$  에 대한 보존방정식은 식 (2-1)로부터 식 (2-2)를 s로 나눈 식을 빼면 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial(\overline{\rho f})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho f} u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_f \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$\Gamma_f = \Gamma_{fu} = \Gamma_{ox}$  이며, 조합 성분율  $\overline{f}$  에 대한 확산계수를 나타낸다. 일반적으로  $\Gamma_f = \mu_{eff}/\sigma_f$  인 형태로 표시하며, 실험결과에 의하면  $\sigma_f = 0.9$  인 상수 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

연료성분, 산화제성분 및 기타 물리량들의 시간에 따른 변동에 의한 영향을 고려하기 위하여는 새로운 변수를 도입하는 것이 필요하며, 다음과 같이 정의 되는 성분변동율의 RMS 평균값이 이러한 목적을 위하여 적절한 량으로 인식되고 있다.

$$g = \overline{(f - \overline{f})^2} = \overline{f'^2} \quad (6)$$

성분변동율의 RMS 평균값 g에 대한 보존방정식은 식(5)을 시간 평균하기 전 식으로부터 식(5)을 뺀 후 f를 곱하여 시간 평균하여 구할 수 있으며, 난류모델을 도입하여 정리된 최종 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\overline{\rho g})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho g u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_g \frac{\partial g}{\partial x_j} \right) + C_{g1} \mu_{eff} \left( \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_j} \right)^2 - C_{g2} \overline{\rho} \frac{\epsilon}{k} g \quad (7)$$

여기서,  $\Gamma_g = \mu_{eff}/\sigma_g$  이며, 난류모델 상수들은 실험결과로부터 각각  $\sigma_g = 0.9, C_{g1} = 2.8, C_{g2} = 2.0$  으로 주어진다.

### 2.1.2 Eddy Break Up모델

예혼합화염과 확산화염에 모두 적용 가능한 유한속도로 반응하는 연소모델은 연료와 산화제가 같은 위치에서 동시에 존재할 수가 있으며, 반응속도는 온도, 난류의 강도 및 성분율 등의 함수로 표시되는 유한한 크기의 값을 갖는다. 일반적으로 이러한 반응율은 Arrhenius형태의 수식으로 표현되고 있으며, 온도에 대하여는 지수함수에 의한 강한 함수 관계를 표시되고, 반응 매체들의 성분율에 대하여는 다소 약한 선형적인 함수관계로 표시되고 있다. 난류 유동 내에서의 연소는 난류의 영향이 매우 중요한 인자로 인식되고 있으며, 이러한 난류의 영향을 고려하여 반응율을 산출하기 위한 다른 형태의 수식으로서 Eddy Break-Up모델이 제안되고 있다<sup>[6],[7]</sup>.

$$\overline{R_{fu}} = -C_{EBU} \overline{\rho} g^{1/2} \epsilon/k \quad (8-1)$$

$$\overline{R_{fu}} = -C_{EBU} \overline{\rho} (\overline{m_{fu}}')^2 \epsilon/k \quad (8-2)$$

일반적으로 반응율은 위의 두 모델 중에서 작은 값을 반응율로 채택하고 있다. 식 (8)에서  $C_{EBU}$  는 난류 예혼합 연소에 대한 상수이며, Khalil<sup>[8]</sup> 은 컴퓨터를 이용한 최적화의 결과  $C_{EBU} = 1.07$  인 값을 얻었다.

## 2.2 비회색 복사가스 열전달

### 2.2.1 Discrete Ordinates Method

DOM은 고려하고자하는 격자에서의 복사강도는 물론 경계에서의 복사강도를 고려하여 복사강도를 구하는 방법이다. DOM 중 S-N DOM은 복사강도의 방향에 관한 함수 관계를 완화시키기 위하여 임의의 방향( $\mu_m, \eta_m, \xi_m$ )을 중심으로 각 도구역 ( $\mu_m \pm d\mu_m/2, \eta_m \pm d\eta_m/2, \xi_m \pm d\xi_m/2$ ) 범위 내의 평균복사강도  $I_m(\vec{r})$ 을 사용하여 복사열전달 방정식을 표시하고, 복사생성항  $S_x$  에 나타나는 각도에 대한 적분항은 위치  $\vec{r}$ 에서 모든 각 도구역의 평균복사강도를 고려한 합이다. 복사열전달 방정식을  $x-y-z$  공간좌표 내에 위

치한 반지름이 1인 구면을  $M$ 개의 각도구역으로 나누어 고려할 때, 즉  $m=1,2,\dots,M$ 에 대하여 다음과 같은 S-N 근사식( $M$ 개의 연립편미분 방정식)으로 나타낼 수 있다<sup>[15],[16],[17]</sup>.

$$\left[\mu_m \frac{\partial}{\partial x} + \eta_m \frac{\partial}{\partial y} + \xi_m \frac{\partial}{\partial z} + \beta(x,y,z)\right] I_m(x,y,z) = S_m(x,y,z) \quad (9)$$

여기서,  $S_m$ 은  $m$ 번째 각도에 대한 복사생성항이며, 총 각도구역 수  $M$ 은 S-N 법의 차수  $N$ 과 3차원인 경우에  $M=N(N+2)$ 인 관계가 있다. 복사장도의 생성항에 포함된 각도에 대한 적분은 Gaussian 적분법을 이용한다.  $w_m$ 은  $m$ 번째 각도 구역에 대한 가중치(weighting function)이다.

## 2.2.2 혼합가스의 WSGGM-RG

CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 혼합가스에서 각각의 좁은 밴드 통과율은 상관되어 있지 않다는 것이 널리 인지되어 있다<sup>[9],[10]</sup>. 혼합가스의 통과율은 각각의 가스의 좁은 밴드 통과율의 곱으로 나타낼 수 있으며<sup>[11]</sup>, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 혼합가스에 대한 통과율의 회색가중합 표현은 다음과 같다<sup>[12],[13]</sup>.

$$\overline{\tau_{mix}}(\eta) = \overline{\tau_{CO_2}}(\eta) \cdot \overline{\tau_{H_2O}}(\eta) \quad (10)$$

$$\overline{\tau_{mix}}(\eta) = \sum_{ic=1}^{M_{CO_2, H_2O}} \sum_{ih=1}^{M_{CO_2, H_2O}} W_{ic, CO_2}(\eta) \times W_{ih, H_2O}(\eta) e^{-(\kappa_{ic, CO_2} + \kappa_{ih, H_2O})} \quad (11)$$

여기서  $W_i(\eta)$ 는  $i$ 번째 회색가스의 파장별 가중치이며,  $M$ 은 단일가스(CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O)의 회색가스의 수이고,  $\kappa_i$ 는  $i$ 번째 회색가스의 흡수계수를 나타낸다. 또한 식 (10)에서 보인 좁은 밴드 통과율은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{\tau_{mix}}(\eta) = \sum_{i=1}^{M_{mix}} W_{i, mix}(\eta) e^{-\kappa_{i, mix} L} \quad (12)$$

총괄 가중치는 혼합가스의 파장별 가중치의 플랑크평균 형태로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{mix}(\eta) \Delta\eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta\eta} \quad (13)$$

여기서  $\Delta\eta$ 는 좁은 밴드모델의 밴드두께를 나타낸다. 본 연구에서는 정확한 결과를 보이는 Kim과 Song<sup>[14]</sup>이 제안한 흡수계수를 이용하여 혼합가스의 흡수계수를 다음과 같이 표현하였다.

$$\kappa_{mix} = \kappa_{i_0, CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i, CO_2}/T}}{T^2} P X_{CO_2} + \kappa_{i_0, H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i, H_2O}/T}}{T^2} P X_{H_2O} \quad (14)$$

여기서  $\kappa_{i_0}$ ,  $\alpha_i$ 는  $i$ 번째 회색가스의 모델링 상수를 나타내며  $P$ ,  $T$ ,  $X$ 는 각각 압력, 온도, 물분율

을 나타낸다.

좁은 밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스가 필요하다. Park과Kim<sup>[13]</sup>은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합을 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 재조합된  $i$ 번째 그룹의 파장별 가중치는 그룹에 속하여 있는 모든 가중치를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i, new}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, mix}(\eta) \quad (15)$$

여기서  $N_i$ 는  $i$ -번째 그룹에 속하게 되는 회색가스의 수를 나타내며 하첨자  $new$ 는 재조합 과정 이후의 값을 나타내고 있다.

$i$ 번째 그룹의 흡수계수  $\kappa_{i, new}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용함으로 구할 수 있다. 플랑크평균 흡수계수는 평균될 흡수계수를 각각에 해당하는 흑체에너지로 가중합한 값을 해당하는 온도에서의 전체 흑체에너지로 나눈 값으로 표현된다. 이 개념을 회색가스가중합법에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa_{i, new} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \kappa_{j, mix} W_{j, mix}}{W_{i, new}} \quad (16)$$

## 3. 해석결과 비교 검토

### 3.1 해석시스템의 조건

해석시스템은 가로1m×세로1m×높이2m인 직육면체의 연소로를 고려하였으며 연료와 산화제가 바닥면의 가운데(0.2m×0.2m)에서 1000K, 1m/s로 유입되는 것으로 가정하였다. 벽의 온도 조건은 500K로 일정하고 천정은 Open되어 있는 것으로 하였다. 난류 유동장 해석 모델로는  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며, 연구실에서 개발한 복합열전달 해석프로그램인 CCRHT-3D를 이용하여 유동장 및 온도장을 해석하였다. WSGGM-RG를 이용한 복사물성치로 복사에 대한 영향을 평가하였으며 입구의 당량비 조건에 따라 CASE를 구분하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Operating condition

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
$V_{inlet}$		1 m/s	
$T_{inlet}$		1000 K	
Fuel		CH <sub>4</sub>	
Oxidant		O <sub>2</sub>	
$\phi$	1.9	1	0.855

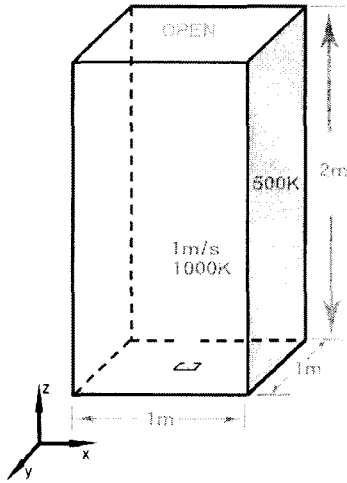


Fig. 1 Condition of the system

### 3.2 난류 유동장의 타당성 검증

난류 연소를 해석함에 있어 난류 유동장의 해석이 필수적이며 CCRHT-3D의 유동해석을 검증하기 위하여 상용프로그램인 FLUENT v6.2.16의 결과와 비교하였다. Fig. 2와 Fig. 3에 각각 폭(y축) 0.5m, 높이(z축) 1.0m의 위치에서 너비방향으로의 w-속도와 온도의 분포를 나타내었다. w-속도와 온도 모두 유입되는 중앙부의 유속과 온도가 높았으며 최대 유속과 최고 온도는 입구 조건과 동일한 1m/s 및 1000K의 결과를 보였다. 난류의 영향으로 벽면에서 0.1m 떨어진 위치에서 벽면 사이에 바닥을 향하는 유동이 나타나 좁은 입구에서 확장된 공간으로의 거동이 물리적으로 타당하였으며, CCRHT-3D와 FLUENT v6.2.16의 결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

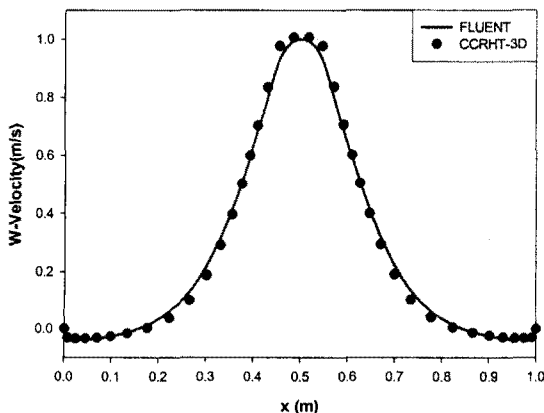


Fig. 2 W-Velocity (x, 0.5m, 1.0m)

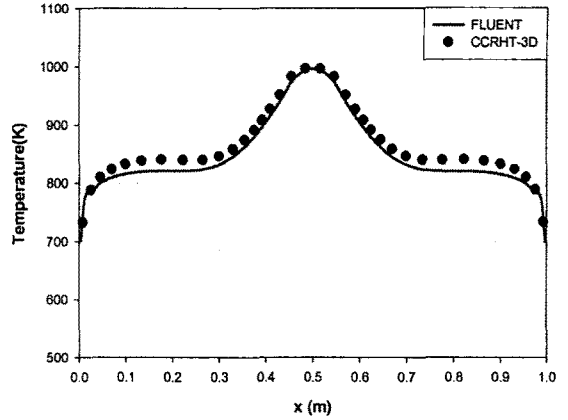


Fig. 3 Temperature (x, 0.5m, 1.0m)

### 3.3 당량비 변화에 따른 영향

복사의 영향을 확인하기 위하여 폭(y축) 0.5m의 위치에서 높이(z축)로 각각 0.5m 1.0m 및 1.5m의 너비 방향(x축)의 온도 분포를 Fig. 4 ( $\Phi=0.855$ ), Fig. 5( $\Phi=1.0$ ) 및 Fig. 6( $\Phi=1.9$ )에 나타내었다.

모든 경우에 복사를 고려한 경우가 온도분포가 낮았으며 벽의 온도는 500K로 화염과 유입되는 온도에 비해 낮은 온도를 유지하는 것으로 조건을 주었기 때문에 복사는 온도가 낮은 벽과의 열 전달에 의해 화염과 벽 사이에서 온도를 떨어뜨렸다. 당량비가 1인 경우에 최고온도가 2318°C로 복사를 고려하지 않은 경우에 나타났으며, 최고 온도는 복사를 고려한 경우 높이(z축) 1.5m를 제외하고 중심에서 양 방향으로 0.1m 떨어진 부분에서 나타났다. 복사를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 당량비( $\Phi$ )가 1인 경우에 최고 온도가 나타났으며, 상대적으로 반응을 덜 하는

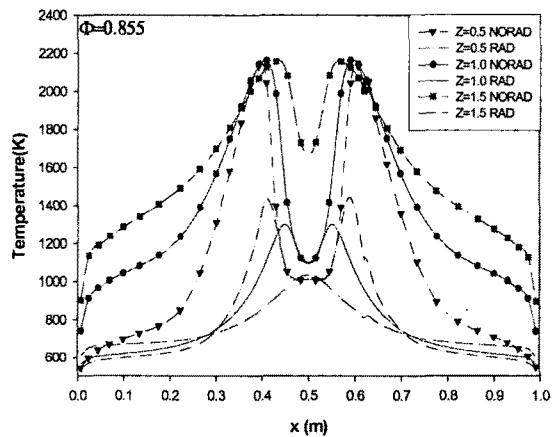


Fig. 4 Temperature distribution (y = 0.5m,  $\Phi = 0.855$ )

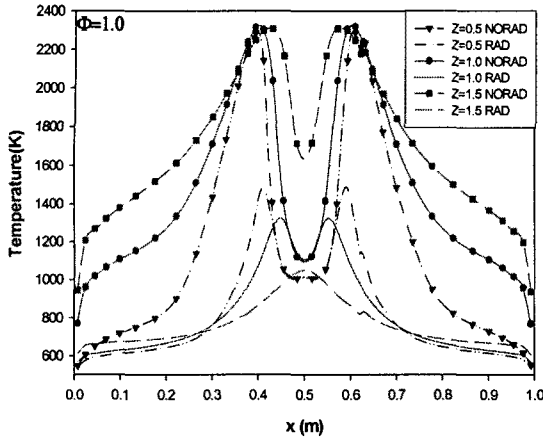


Fig. 5 Temperature distribution  
( $y = 0.5m, \phi = 1.0$ )

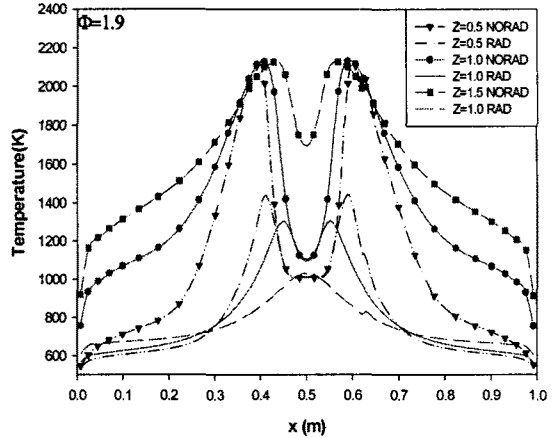


Fig. 6 Temperature distribution  
( $y = 0.5m, \phi = 1.9$ )

높이(z축) 1.5m와 0.5m에서 복사에 의한 영향이 더 크게 나타났다. 당량비는 성분분포에 영향을 주어 간접적으로 온도에 영향을 주며 당량비에 따라 복사를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 최고온도의 차이가  $\phi=1$ 인 경우  $1004^{\circ}C$ ,  $\phi=0.855$ 인 경우  $867^{\circ}C$  및  $\phi=1.9$ 인 경우  $833^{\circ}C$ 로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치적인 방법으로 3차원에서 CH<sub>4</sub>/Air 1단계 난류연소의 특성과 복사에 의한 영향을 분석하였다. 난류 유동장 모델로  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 비회색 혼합가스에 의한 복사 열전달 해석은 WSGGM-RG를 이용하였다. 입구에서의 당량비에 따라 시스템 내부의 온도 분포의 변화를 살펴보았으며 복사 열전달을 적용한 결과와 적용하지 않은 결과를 비교하였다.

벽면의 온도가 낮은 조건에서 난류 연소 시 복사열전달의 영향으로 온도가 하강하는 것으로 나타나 물리적으로 타당한 결과를 나타냈으며 당량비가 1인 경우에 복사에 의한 온도차가 가장 크게 나타났다. 당량비에 따라 최고온도가 최대 16%의 차이를 보였으며 연소반응이 상대적으로 적은 벽과 가까운 곳에서의 복사의 영향이 더 크게 나타나는 것을 확인하였다. 향후 입구의 산화제 및 온도조건에 의한 복사영향을 검토하고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] H.C Hottel Radiant heat transmission, in Heat Transmission, ed. W.H.McAdams, 3d ed., ch. 4, McGrawHill, New York, 1954.
- [2] W. H. Park, T.K Kim, 2003, "Study on regrouping of gray gas in spectral WSGGM for arbitrary mixtures of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O," Journal of Korean Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 27, No. 2, pp. 227-35.
- [3] Spalding, D.B., "Mixing and Chemical Reactions in Steady Confined Turbulent Flame," Proc. 13th Int. Symp. on Combustion, pp. 649, 1971.
- [4] Khalil, E.E., Spalding, D.B. and Whitelaw, J.H., "The Calculation of Local Flow Properties in Two Dimensional Furnaces," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp.775, 1975.
- [5] Hutchinson, P., Khalil, E.E. and Whitelaw, J.H., "The Calculation of Wall Heat Transfer Rate and Pollution Formation in Axisymmetric Furnaces," Proc. 4th Members Conference, of IFRF, 1976.
- [6] Spalding, D.B., "Development of the Eddy Break-Up Model of Turbulent Combustion," Proc. 16th Symp. (int.) on Combustion, pp.1657, 1967.
- [7] Spalding, D.B., Combustion and Mass Transfer, Pergamon Press, London, 1979.
- [8] Khalil, E.E., "Flow and Combustion in Axisymmetric Furnaces," Ph.D Thesis, London University, 1977.

- [9] W.H.Park, T.K.Kim, Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting, 2002
- [10] R. M. Goody, R. West, L. Chen, D. Chrisp, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 42:539-550, 1989
- [11] A.A.Lacis, V.Oinas, Journal of Geophysical Research, 96(D5):9027-9063, 1991
- [12] W.H.Park, T.K.Kim, JSME International Part B, accepted 2005
- [13] W. H. Park, T.K Kim, 2003, "Study on regrouping of gray gas in spectral WSGGM for arbitrary mixtures of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O," Journal of Korean Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 27, No. 2, pp. 227-35.
- [14] O.J. Kim, T.H. Song, 1996, "Implementation of the weighted sum of gray gases model to a narrow band: application and validity," Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals , Vol. 30, No. 4, pp. 453-468.
- [15] Carlson, B. G. and K. D. Lathrop, 1968, "Transport Theory The Method of Discrete -Ordinates," in Computing Methods in Reactor Physics, edited by H. Greenspan, C. N. Kelber and D. Okrent, Gordon and Breach, New York, pp. 165-266
- [16] Lewis, E. E. and W. F. Miler, Jr., 1984, "Computational Methods of Neutron Transport," John Wiley and Sons Publishing Co., N. Y.
- [17] Kim, T. K., 1990, "Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analyses in Absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using The S-N Discrete Ordinates Method," Ph. D Thesis, University of Minnesota.