

회체가스 가중합산모델을 적용한 미분탄 연소의 해석

유 명 종* · 백 승 욱**

Modeling of a Pulverized Coal Combustion With Applying WSGGM

Myoung Jong Yu, Seung Wook Baek

Key Words : Pulverized Coal, WSGGM

Abstract

A numerical study for simulating a swirling pulverized coal combustion in axisymmetric geometry is done here by applying the weighted sum of gray gases model (WSGGM) approach with the discrete ordinate method (DOM) to model the radiative heat transfer equation. In the radiative transfer equation, the same polynomial equation and coefficients for weighting factors as those for gas are adopted for the coal/char particles as a function of partial pressure and particle temperature. The Eulerian balance equations for mass, momentum, energy, and species mass fractions are adopted with the standard $k-\epsilon$ turbulence model, whereas the Lagrangian approach is used for the particulate phase for soot. The eddy-dissipation model is employed for the reaction rate for gaseous mixture, and the single-step first-order reaction model for the devolatilization process for coal. By comparing the numerical results with experimental ones, the models used here are confirmed and found to be one of good alternatives for simulating the combustion as well as radiative characteristics.

기호설명			
d	Particle diameter, m	s	Distance traveled
I	Radiation intensity, $W/(m^2 \cdot sr)$	t	Time, s
		T	Temperature, K
		u	Axial velocity, m/s
		v	Radial velocity, m/s
		V	Volume, m^3

* 한국과학기술원 항공우주공학과 (써니테크)

** 한국과학기술원 항공우주공학과

1. 서론

여러가지 연소 가스 및 다중 분산된 입자들을 포함하고 있는 미분탄 연소기에서 열복사의 계산은 매우 중요한 요소이다. 그러나 복잡한 열화학적 성질과 함께 물리적인 현상들이 복잡하게 섞여있어 아직은 만족할 만한 모델링이 완성되고 있지 않다. 따라서 미분탄 화염에서 복사 열전달의 모델링은 아직도 발전시켜야 할 중요한 분야중 하나이다. 특히 본질적으로 수분 및 이산화 탄소 같은 비회체 가스가 혼합물 안에 섞여 있으므로 가스의 적절한 모델링이 필요하다. 지금까지 기체의 비회체 성질을 정확하게 모델링하기 위한 많은 노력들이 수행되어 왔다. 그중에서도 비회체 가스를 등가의 유한개의 회체가스로 대체하는 weighted sum of gray gases model (WSGGM)은 간단하면서도 실제 문제에 적용할 수 있는 것 중의 하나이다. Hottel and Sarofim (1) 이 zonal method와 관련하여 개념을 개발한 이래, spray combustion system (2) 과 gas-fired furnaces (3)와 같이 다양한 분야에서 복사 효과를 조사하기 위하여 적용되어 왔다. Liu *et al.* (3) 은 gas-fired furnace에 대한 전체 모델링에서 WSGGM 이 단순 회체 모델에 비하여 더 정확한 열유속 및 가스 온도에 대한 분포의 결과를 제공해 주는 것을 보였다. Smith *et al.* (4) 등은 WSGGM 에서 요구되는 가중치를 결정하기 위한 연구를 수행하였으며 total emissivity 에서 야기되는 오차는 line-by-line spectral analysis 와 비교할 때 5 or 10% 이내에 있다고 알려져 있다. 일부 연구자들은 가스-매연 혼합물에 대한 회체 가스 가중치를 결정하였다 (5). 그러나, 가스와 입자의 혼합물에서

의 복사 효과를 검사하기 위한 가중치에 대한 수치는 아직 명확하게 확립되지 않았다.

또한, coal/char 입자의 온도가 주변 가스 온도에 비하여 높거나 낮다는 것은 실험적으로 잘 알려져 있다. 이러한 사실은 복사 열전달의 계산에 있어서 심각한 어려움을 일으키게 될 것이다. Truelove (6), Chui *et al.* (7), 및 Denison and Webb (5)을 제외한 대부분의 복사 모델은 입자의 온도가 주어진 위치에서 기체의 온도와 같다고 가정하였다. 복사 열전달의 모델링에서 연소기 내부에서 soot의 복사가 우세하다는 가정하에 점유 매체에 대하여 단순 회체 가스 모델이 일반적으로 적용되어 왔다. (6-8). 하지만 Modest (9)는 부유 입자의 크기가 다양한 경우에 회체 가스 가정이 사용될 수 있다고 제안하였다.

Denison and Webb (5) 은 산업용 크기의 보일러 벽에 입사하는 복사 열유속에 대한 char/coal 입자와 가스의 온도 차이 효과를 조사하였다. 복사 특성에 대하여 geometric mean beam length 접근 방법을 사용하였으며, 국부의 가스 온도와 다른 입자의 온도는 로벽에서의 복사 열유속에 매우 큰 효과를 가진다는 것을 찾아내었다.

그러나 복잡한 형상을 가진 미분탄 연소기에 있어서 geometric mean beam length 를 구하는 방법은 아직 명확하지 않다. Yuen and Ma (10)는 geometric mean beam length 접근 방법은 산란이 있는 경우에는 1 차원 형상에서조차도 커다란 오차를 발생시킬 수 있다는 것을 보였다. 결론적으로, 적절한 geometric mean beam length 를 규정하기가 어려운 다차원 미분탄 연소기에서는 더 심각한 오차가 야기될 수 있다. Effective

geometric mean beam length 를 정의하는 어려움은 주어진 부분압과 path-length 의 곱의 범위내에서 부분압과 온도에 기초를 둔 WSGGM 을 사용하여 피해갈 수 있을 것이다.

이 연구의 목적은 미분탄 연소에서의 복사 열전달을 예측하는데 WSGGM 을 확장하여 적용하는 것이다. 복사 열전달을 해석하기 위하여 DOM 이 WSGGM 과 함께 적용되었다. 확인을 위하여 Hassan *et al.*(11)의 실험 결과와 비교하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 복사 모델: DOM 과 WSGGM

Modest (9) 는 비회체 매질을 대응하는 흡수 계수와 함께 등가의 회체 매질로 대체하여 어떤 형태의 복사 방정식 해법에서도 사용될 수 있다는 것을 보였다. 비회체 가스 혼합물이 비산란 매연 및 산란하는 입자를 포함하고 있을 때, RTE 는 유한개의 회체 가스, 매연 및 입자에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$\frac{dI_k}{ds} = -(\kappa_{g,k} + \kappa_{p,k} + \kappa_{s,k} + \sigma_{sp,k}) I_k + \kappa_{g,k} w_{g,k} I_{b,g} + \kappa_{p,k} w_{p,k} I_{b,p} + \kappa_{s,k} w_{s,k} I_{b,s} + \frac{\sigma_{sp,k}}{4\pi} \int_{\Omega} \Phi(\hat{s}, \hat{s}') I_k(\hat{s}') d\Omega' \quad (1)$$

여기서 $\kappa_{g,k}$, $\kappa_{s,k}$ 및 $\kappa_{p,k}$ 는 가스, 매연 및 입자의 일정한 흡수 계수이며, $w_{g,k}$, $w_{s,k}$ 및 $w_{p,k}$ 는 기체, 매연 및 입자에 대하여 상응하는 가중치이다. 만일 매연 및 입자가 회체라고 가정하면, 흡수 계수는 $\kappa_{s,k} = \kappa_s$, $\kappa_{p,k} = \kappa_p$, $k = 1, 2, \dots, N$ 가 된다. 그리고 총 복사

강도 $I(s)$ 는 다음과 같이 k -th 회체 밴드의 복사 강도를 모두 더해줌으로써 구할 수 있다.

$$I(s) = \sum_{k=0}^N I_k(s) \quad (2)$$

$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{clear-gas}$ 혼합물에 대하여 k -th 회체 가스 성분 에 대한 방사 가중치를 가스의 온도, T_g , 에 기초한 3 차 다항식으로 나타낸 Smith *et al.* (3)의 결과를 적용하였다.

또한, 가스, 입자 및 매연이 같은 회체 밴드를 공유한다면, 입자의 가중치 역시 가스와 같은 형태의 온도의 함수 즉, $w_{p,k} = w_{g,k}(T_p)$, $w_{s,k} = w_{g,k}(T_s)$ 가 된다. 자세한 유도 과정은 Yu *et al.* (12)에 나타나있다. 매연과 기체 사이에 열평형을 유지한다면, Eq. (1) 은 다음과 같은 단순한 형태로 바뀌게 된다.

$$\frac{dI_k}{ds} = -(\kappa_{g,k} + \kappa_p + \kappa_s + \sigma_{sp}) I_k + w_{g,k}(T_g)(\kappa_{g,k} + \kappa_s) I_{b,g} + w_{g,k}(T_p) \kappa_p I_{b,p} + \frac{\sigma_{sp}}{4\pi} \int_{\Omega} I_k(\hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega' \quad (3)$$

2.2 기상 지배방정식

축대칭 좌표에서 정상, 비압축성, 난류에 대한 시간 평균 기상 방정식은 다음과 같은 형태로 쓸 수 있으며;

$$\frac{\partial(\rho u \Phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v \Phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S_\sigma + S_{p,\sigma} \quad (4)$$

여기서 Φ 와 Γ_p 는 전형적인 종속변수와 유효 확산 계수이다. S_p , 및 $S_{p,p}$ 는 각각 기상 및 고상에 대한 생성 및 소멸항이다. Φ 가 1 일 때 연속 방정식이며 u , v 및 w 를 대입할 경우 각 축 방향의 운동량식을 나타낸다. 여기서 난류 효과는 광범위하게 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하며 유효 난류 점성을 다음과 같은 형태로 나타낸다.

$$\mu_{eff} = \mu_i + \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

화학종의 질량 분율 및 엔탈피에 대한 보존식 역시 Eq.(4)의 형태를 가지며, Φ 는 질량 분율 Y_i ($i=$ volatiles, O_2 , CO_2 and vapor H_2O) 혹은 엔탈피, h , 이다. Eq.(4) 에서의 값 들을 Table 1 에 요약하였다. 엔탈피 보존식에서 복사 열유속의 발산항은 다음과 같이 표시할 수 있다 (2);

$$\begin{aligned} \nabla \cdot q_{gr} &= \sum_{k=1}^N q_{gr,k} \quad (6) \\ &= \sum \kappa_{g,k} \left(4\pi w_{g,k} I_{b,k} - \int_{4\pi} I_k d\Omega \right) \end{aligned}$$

기상에서의 균질 반응률은 난류 시간 정도 및 연료, 산소, 혹은 생성물중 가장 작은 값에 비례하는 것으로 생각한다.

$$R_{fi} = \frac{\rho \cdot \epsilon}{k} \cdot \min \left\{ am_{fi}, \frac{am_{ox}}{s}, \frac{bm_{pr}}{(1+s)} \right\} \quad (7)$$

여기서 s 는 연료에 대한 산소의 당량 비이고, $a=4$, $b=2$ 는 eddy dissipation model 에서 사용되는 empirical constants 이다 (13). 수치적인 계산을 위해서는

통상적인 TEACH code 를 수정하여 사용하였다.

2.3 고상 지배방정식

입자의 궤적을 추적하기 위해서는 라그랑지안 접근 방식을 사용한다. 축대칭 좌표계에서 입자의 운동량 방정식은 다음과 같이 쓴다 (8);

$$M_p \left(\frac{d\vec{U}_p}{dt} \right) \quad (8)$$

$$= C_D \rho_g \left(\frac{A_p}{2} \right) (\vec{U}_g - \vec{U}_p) \times |\vec{U}_g - \vec{U}_p| + M_p \vec{g}$$

$$\frac{d\vec{s}_p}{dt} = \vec{u}_p \quad (9)$$

위의 관계식들에서 \vec{s}_p 입자의 궤적이며, M_p 와 A_p 는 입자의 질량 및 단면적이다. \vec{U}_p 와 \vec{U}_g 는 각각 입자 및 가스의 속도이다. ρ_p 와 \vec{g} 는 입자의 밀도와 중력 가속도이다. C_D 는 입자의 항력 계수이다.

석탄의 탈휘발은 단반응 모델을 사용하여 모사하며 차 반응은 산소가 입자의 표면으로 물리적 확산과 표면에서의 화학 반응에 의하여 제어되는 것으로 생각한다. (8). 입자 내부 온도는 균일한 것으로 가정하며 변화율은 다음의 식으로부터 계산한다 (8).

$$C_p \frac{dT_p}{dt} = q_i - L_v \frac{dm_p}{dt} \cdot \frac{1}{m_p} \quad (10)$$

여기서 q_i 는 외부로부터 총 열량이며, 가스로부터 전도에 의해 전달되는 열 전달되는, q_{pc} , 차 반응에 의하여 입자의 표면으로부터 발생하는 열, q_{pb} 과

복사 열교환에 의한 입자의 내부 에너지 손실, q_{pr} 을 포함하고 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$q_{pc} = \pi d_s^2 Nu \frac{\lambda_g}{d_s} (T_g - T_p) \quad (11)$$

$$q_{pb} = K \pi d_s^2 P_{O_2} H_c \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot q_{pr} &= \sum_{k=1}^N \kappa_{p,k} \left(4\pi w_{p,k} I_{b,p} - \sum_l I_l' \omega_l' \right) \cdot \frac{1}{m_p} \\ &= \varepsilon_p \pi r_p^2 \left(4\pi I_{b,p} - \sum_l I_l' \omega_l' \right) \cdot \frac{1}{m_p} \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 K 는 carbon-oxygen 반응의 화학 반응률 계수 및 확산 반응 계수와 관련된 인자이다. 한편 $I_{bpi} = \sigma T_p^4 / \pi$ 는 입자의 흑체 복사강도이다.

2.4 경계 조건

2.4.1 유동장

입구의 축 방향 속도는 초기 조건으로 고정하고 반경 방향의 속도는 0으로 정의하였다. 한편 접선 방향의 속도는 Lockwood and Mahmud (8)의 식을 사용한다.

입구에서 충분히 멀리 떨어진 출구의 축 방향 속도는 밀도를 $\partial\rho/\partial x = 0$ 이라 가정하고, 전체 유동장의 질량 보존식을 만족할 수 있도록 계산한다. 반경 방향 및 접선 방향의 속도는 $\partial v/\partial x = 0, \partial w/\partial x = 0$ 의 조건으로부터 계산한다. 화학종의 경계 조건은 입구를 제외한 모든 면에서 $\partial Y_k/\partial x_i = 0$ 의 조건으로부터 구한다.

2.4.2 온도

단열 벽면에서 대류에 의한 열유속과 복사에 의한 열유속은 평형을 이루어야 하므로 다음과 같이 구할 수 있다 (2).

$$-C_p \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_l}{Pr_l} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w + q_{r,x} \Big|_w = 0 \quad (14)$$

2.4.3 복사열 전달

고온 기체장과 연결된 복사열전달 문제에서 경계 조건은 해의 안정성에 매우 치명적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 벽면의 온도를 알고 있는 경우와 단열 벽면인 경우에 대하여 구분하여 사용하였다. 여기에서는 확산적으로 방사 및 반사하는 불투명한 왼쪽 벽면과 대칭인 면에서 각각 복사 강도의 계산 방법을 제시한다.

가. 들어오는 복사 강도와 온도를 알고 있는 벽면

흑체가 아닌 벽면일 때 Denison and Webb (5)은 각 회체 밴드에서 다음과 같은 경계 조건을 제안하였다.

$$I_{k,w} = \varepsilon_w w_k I_B + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \sum_{\mu' < 0} I_l' \mu_l' \omega_l' \quad (15)$$

여기에서, 우변의 첫 항은 방사, 둘째 항은 반사된 복사 강도를 나타낸다. 한편 w_k 는 k 번째 회체 밴드에서의 가중치이다.

나. 단열 벽면

표면을 떠나는 순수 복사 에너지는 방사 복사열유속 (radiosity, J_w) 과 입사 복사열유속 (Irradiation, G_w) 의 차이로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{r,x} \Big|_w = J_w - G_w \quad (16)$$

이와 함께 단열 벽면에서 대류 및 복사에 의한 열유속의 평형식 (14) 와 결합하여 회체 가스 가중 합산 모델에 적용

하면

$$I_{k,w} = \frac{1}{\pi} \left(\sum_{\mu' < 0} I_k'' |\mu'| \omega' - w_k C_p \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_{i,w}} \right) \quad (17)$$

가 된다

다. 대칭면

$$|\mu^i| = |\mu^j| \text{ 이고 } \xi^i = -\xi^j \text{ 일 때}$$

$$I_w^i = I_w^j \quad (18)$$

3. 물리적 특성

3.1 연소기 형상 및 작동 조건

이 연구에서 원통형 미분탄 연소기는 지름이 0.6 m 이고 길이가 3 m 인 모양을 가지고 있다. 예선회 버너의 개략도는 Fig. 1 에 보여주었으며 작동 조건은 Table 1 에 정리하였다. 작동 조건 및 미분탄의 분사 및 입자 크기의 분포에 대한 자료는 Hassan *et al.* (11)의 실험 결과로부터 취하였다.

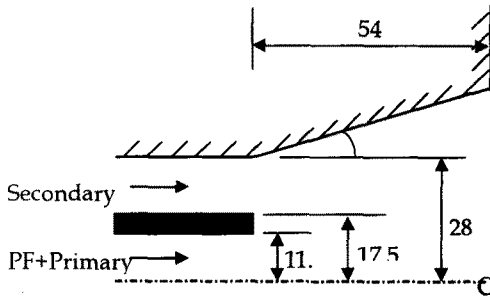


Fig.1 Schematic of the swirl burner (unit: mm)

Table 1 Furnace operating conditions

Variable	Value
Coal flow rate, kg/hr	11.66
Primary air mass flow rate, kg/hr	21.7
Secondary air mass flow rate, kg/hr	116.8
Secondary air swirl number	1.0
Primary air preheat temperature, °C	80
Secondary air preheat temperature, °C	327

3.2 복사 특성

이 연구의 주요 목적인 열적 비평형 상태에 있는 이상 혼합물에 초점을 맞추어 입자의 흡수 및 산란에는 회체 복사만을 가정한다. 입자에 의한 흡수 및 산란 계수는 다음과 같이 정의한다 (7).

$$\kappa_p = \varepsilon_p \sum_i N_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (19)$$

$$\sigma_{sp} = (1 - \varepsilon_p) \sum_i N_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (20)$$

식 (27) 및 (28)에서, N_i 와 $\pi d_i^2/4$ 는 각각 group i 에 속하는 입자의 수밀도 및 투영 면적이다. 입자의 방사율 ε_p 는 입자가 연소함에 따라 다음과 같이 변하는 것으로 가정한다.

$$\varepsilon_p = X_{nb} + 0.6(1 - X_{nb}) \quad (21)$$

여기서, X_{nb} 는 미연 차의 질량 분율이다 (7).

Modest (9)에 따르면, 매연의 흡수 계수는 다음과 같이 정의되며

$$\kappa_s = \frac{3.72 f_o C_o T}{C_2}, \text{ m}^{-1} \quad (22)$$

여기서,

$$C_o = 36\pi mk / \left[(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2 k^2 \right],$$

$C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$ 이다. 한편 n 은 굴절의 복소 지수의 실수부이며, k 는 흡수 지수이다.

4. 계산 결과

(NI × NJ)=81 × 71 의 계산 격자를 사용하고 *quarl* 부위는 *blocked-off* 방법을 도입하였다. 비회체 모델인 WSGGM 과 세가지의 회체 모델을 사용한 결과를 비교하였다. 첫번째 회체 모델에서는 기체와 매연의 흡수 계수는 각각 $\kappa_g = 0.1$ 과 $\kappa_s = 0.4 \text{ m}^{-1}$ (7)를 사용하였다. 두번째 회체 모델은 기체와 매연의 총 흡수 계수가 다음과 같이 온도의 함수 $\kappa_g + \kappa_s = 0.32 + 0.28e^{-T/1135} \text{ m}^{-1}$ 로 하는 경우를 사용하였다. 마지막 세번째 회체 모델은 기체 농도의 함수 $\kappa_g = 0.2Y_{\text{volatiles}} + 0.1(Y_{\text{CO}_2} + Y_{\text{H}_2\text{O}}) \text{ m}^{-1}$ 와 매연은 일정한 값 $\kappa_s = 0.4 \text{ m}^{-1}$ 을 가진다고 가정하였다.

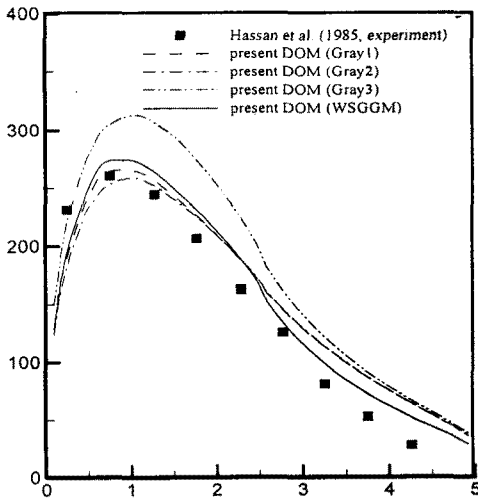


Fig. 2 Axial distribution of incident wall radiation flux

축방향으로 벽면으로 입사하는 복사 열유속을 Figure 2에서 실험 결과와 비교하였다. 그림에서 x 는 입구로부터의 축방향 거리이고 D_f 는 로의 직경이다.

세번째 회체모델을 제외하고는 계산 결과와 실험 결과는 잘 일치한다. 특히 수관에 의한 냉각 지역에서는 WSGGM 의 결과가 다른 경우에 비하여 잘 일치하는 것을 보여준다.

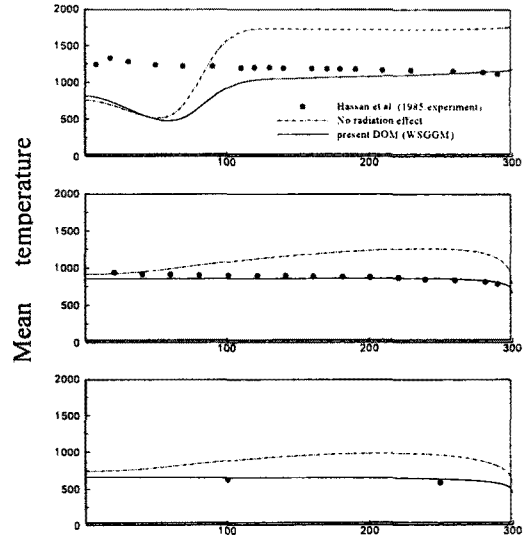


Fig. 3 Radial temperature profiles

Fig. 3 에 온도에 대한 계산 결과와 실험 결과를 비교하였다. 버너 입구 부분에서의 실험과 계산상의 오차는 미분탄 연소의 수치해석에서 자주 나타나는 현상이다 (6)(7). 이러한 오차를 발생시키는 요인으로는 실험적인 이유와 수치모델의 불완전성에 의한 이유를 생각할 수 있다. 실험시 온도 프로브를 삽입하면 국부적으로 연소가 일어나 실제 온도보다 더 높게 측정될 수 있다는 가능성이 Chui et al.(6) 에 의하여 제기되고 있다. 수치해석적인 오차 발생은 난류 모델과 연소 모델로부터 발생된다고 볼 수 있다. 실제 선회수가 높은 유동은 비등방성이 강하나 이 연구에서 eddy dissipation model 과 함께 사용된 $k-\epsilon$ 난류 모델은 등방성을 가정하여 얻어진

모델이므로 실제 현상을 모사하는데 오차를 발생시킬 수 있으며 이러한 오차를 줄이기 위한 노력들이 많은 연구자들 (3)에 의하여 수행되고 있다. 연소영역을 벗어난 후류부분에서 복사효과를 고려하지 않은 경우에 심한 오차를 발생시키고 있으며 회체가스 가중합산 모델의 적용에 의한 수치해석 결과와 실험결과는 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

비회체 복사 모델을 축대칭 미분탄 연소기의 해석에 사용하였다 주요 목적은 수치해석결과를 실험결과와 비교하여 복사효과를 찾아내고 보다 유용한 수치해석 방법을 개발하는 것이다. 복사 열전달 방정식의 해석을 위해서는 구분종좌법을 적용하였으며 CO_2 와 H_2O 비회체 특성을 계산하기 위해서는 회체가스 가중합산모델을 도입하고 등방산란한다고 가정한 석탄입자 및 매연은 회체특성을 보이는 것으로 생각하였다. 이러한 접근 방법은 복사 열유속의 예측을 성공적으로 수행하였으며 실험치와도 잘 일치함을 보여주었다. 온도분포의 예측은 버너 근처의 2차 선회류에 의하여 발생하는 오차를 제외하고는 실험 결과와 잘 일치함을 보여주었다

실험 결과와의 추가적인 비교에 의한 검증이 요구되나, 현재의 결과는 구분종좌법과 결합한 회체가스 가중합산법이 미분탄 연소의 문제에서 복사열교환의 해석에 활용할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있음을 보여준다.

참고문헌

- (1) H. C. Hottel, and A. F. Sarofim, 1967, *Radiative Transfer*, Mc-Graw Hill, Inc.
- (2) C. E. Choi, and S. W. Baek, 1996, "Numerical Analysis of a Spray Combustion with Nongray Radiation Using Weighted Sum Gray Gases Model," *Combust Sci. Tech.*, Vol. 115, pp. 297-315.
- (3) T. M. Liu, W. Y. Lien, , and P. W. Hwang, 1994 Large-Eddy Simulations of Turbulent Reacting Flows in a Chamber with Gaseous Ethylene Injecting through the Porous Wall. *Combust. Flame*, Vol. 99. pp. 591-600.
- (4) T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman, Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602-608
- (5) M. K. Denison, , and B. W. Webb, 1993, "A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray Gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115. pp. 1004-1012.
- (6) J. S. Truelove, 1984, "The Modeling of Flow and Combustion in Swirled, Pulverized-Coal Burners," *20th Symposium (International) on Combustion*, 523-530.
- (7) E. H. Chui, P. M. J. Hughes, and G. D. Raithby, 1993, "Implementation of Finite Volume Method for Calculating Radiative Transfer in a Pulverized Fuel Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 92, pp. 225-242.
- (8) F. C. Lockwood, and T. Mahmud, 1988, "The prediction of swirl burner pulverized coal flames," *22nd Symposium (International) on Combustion*, 165-173.
- (9) M. F. Modest, 1993, *Radiative Heat Transfer*, Mc-Graw Hill, Inc.
- (10) M. M. Yuen, A. Ma, ,1992, "Evaluation of Total Emittance of an Isothermal Nongray Absorbing, Scattering Gas-Particle Mixture Based on the Concept of Absorption Mean Beam Length," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 114. pp. 653-658.
- (11) M. A. Hassan, K. A. Hirji, F. C.

- Lockwood, and H. A. Moneib, 1985, "Measurements in a Pulverized Coal-Fired Cylindrical Furnaces," *Experiments in Fluid*, 3: 153-159.
- (12) M. J. Yu, S. W. Baek, and J. H. Park, 1999, "An Extension of the Weighted Sum of Gray Gases Non-Gray Gas Radiation Model to a Two Phase Mixture of Non-Gray Gas with Particles." To appear in *Int. J. Heat and Mass Transfer*.
- (13) B. F. Magnussen, and B. H. Hjertager, 1977, "On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," 16th symposium (International) on Combustion, 719-729.