

이상 회체가스 가중합산모델을 적용한 미분탄 연소의 수치적 연구

유명종* · 강신재* · 백승욱**
(2000년 3월 29일 접수)

Numerical Study on Pulverized Coal Combustion Applying Two-Phase WSGGM

Myoung Jong Yu, Shin Jae Kang and Seung Wook Back

Key Words : 2 Phase WSGGM (이상 회체가스 가중합산법), Thermal Non-Equilibrium (열적 비평형), Pulverized Coal Combustion (미분탄 연소).

Abstract

A numerical study on swirling pulverized coal combustion in an axisymmetric enclosure is carried out by applying the 2-phase 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 and RNG $k-\epsilon$ turbulence model, whereas the Lagrangian approach is used for the particulate phase. The eddy-dissipation model is employed for the reaction rate for gaseous mixture, and the single-step and two-step first-order reaction model for the devolatilization process for coal. Special attention is given to establish the thermal boundary conditions on radiative transfer equation. By comparing the numerical results with experimental ones, the radiation model used here is confirmed and found to provide an alternative for simulating the radiative transfer.

기호설명

d	: 입자 직경, m
E_b	: 흑체 방사, W/m^2
I	: 복사 강도, $W/(m^2 \cdot sr)$
Nu	: Nusselt 수
q	: 열유속, W/m^2
r	: 반경 방향 좌표, m
\hat{s}	: Angular direction
s	: 입자의 계적 혹은 연료에 대한 산소의 화학량론적 질량비
t	: 시간, s
T	: 온도, K

u	: 축방향 속도, m/s
v	: 반경방향 속도, m/s
V	: 부피, m^3
w	: WSGGM 에서의 가중치 혹은 접선방향 속도, m/s
W	: 분자량, kg/kmol
x	: 축 방향 좌표

그리스문자

ϵ	: 방사율
κ	: 흡수 계수, 1/m
σ_p	: 산란 계수, 1/m
σ	: Stefan-Boltzmann 상수, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
Φ	: 산란 위상 함수
ρ	: 밀도, kg/m^3
μ, ξ	: x 및 r 방향의 방향 여현

* 전북대학교 공과대학 기계공학부
 ** 회원, 전북대학교 공과대학 기계공학부
 E-mail : sjkang@jnplab.chonbuk.ac.kr
 TEL : (063)270-2387 FAX : (063)270-2472
 ** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

상첨자

' : 입사 방향

하첨자

- b : 흑체
- c : 중심선
- g : 기체
- p : 입자
- s : 매진
- w : 벽
- η : 파수

1. 서론

석탄은 지구상에서 가장 풍부하면서도 경제적인 화석연료 자원이다. 많은 양의 석탄이 전력 생산을 위한 미분탄 연소로 및 산업용 보일러 내에서 연소 되는 것으로 추측된다. 최근에는 환경 문제 및 연소로의 효율 때문에 미분탄 화염에 대한 정확한 계산 모델링을 필요로 하고 있다.

미분탄 연소기 내에는 여러 가지 연소 가스 및 다중 분산된 입자들을 포함하고 있으며 이러한 요소들을 고려한 열복사의 계산은 매우 중요한 문제이다. 그러나 복잡한 열화학적 성질과 함께 물리적인 현상들이 복잡하게 섞여있어 아직까지도 만족할 만한 모델링이 완성되고 있지 않다. 따라서 미분탄 화염에서 복사 열전달의 모델링은 아직도 발전시켜야 할 중요한 분야 중 하나이다. 특히 본질적으로 수분 및 이산화 탄소 같은 비회체 가스가 혼합물 안에 섞여있으므로 가스에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 지금도 기체의 비회체 성질을 정확하게 모델링하기 위한 많은 노력들을 기울이고 있으며 그 중에서도 비회체 가스를 등가의 유한개의 회체 가스로 대체하는 회체가스 가중합산 모델(WSGGM)은 간단하면서도 실제 문제에 적용할 수 있는 유용한 모델 중의 하나이다. Hottel 과 Sarofim⁽¹⁾이 zonal method 와 관련하여 개념을 개발한 이래로, 회체가스 가중합산모델은 분무연소 시스템⁽²⁾과 기체연료 연소⁽³⁾와 같이 다양한 분야에서 복사 효과를 조사하기 위하여 적용되어 왔다. Liu 등⁽³⁾은 기체연료 연소에 대한 전체 모델링에서 WSGGM 이 단순 회체 모델에 비하여 열유속 및 가스 온도에 대한 분포 등에서 더 정확한 결과를 제공해 주는 것을 보여주었다. 가중치에 대한 연구 수행자들 중 Smith 등,⁽⁴⁾ Coppalle 과 Vervish⁽⁵⁾ 등과 같이 화석 연료의 연소에서 발생하는 CO₂-

H₂O 혼합매질 내에서 회체가스 가중합산모델을 적용하기 위한 가중치의 결정에 공헌한 연구자들도 있다. Lallemant 등⁽⁶⁾은 총 방사율에서 야기되는 오차는 각선 스펙트럼 분석과 비교할 때 5 내지 10% 이내에 있다고 평가하였다. 일부 연구자들은⁽⁷⁻⁹⁾ 가스-매연 혼합물에 대한 회체 가스 가중치를 결정하여 발표하였으나 가스-매연과 입자가 혼합된 경우에 가중치를 결정할 수 있는 방법을 제시한 연구 결과는 최근어야 일부 제시되고 있다.^(10,11)

또한, 석탄/차 입자의 온도가 주변 가스 온도에 비하여 높거나 낮다는 것은 실험적으로 잘 알려져 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 이러한 사실은 복사 열전달의 계산에 있어서 심각한 어려움을 일으키게 될 것이다. Truelove,⁽¹⁶⁾ Chui 등,⁽¹⁷⁾ 및 Denison 과 Webb⁽¹⁸⁾을 제외한 대부분의 복사 모델은 입자의 온도가 주어 진 위치에서 기체의 온도와 같다고 가정하였다. 이러한 어려움으로 인하여 이상의 기체가 존재하는 연소기 내부에서 복사 열전달의 모델링에는 soot 의 기여가 우세하다는 가정을 바탕으로 단순 회체 가스 모델이 일반적으로 적용되어 왔다.⁽¹⁶⁻²⁰⁾ 비록 Modest⁽²¹⁾가 부유 입자의 크기가 다양한 경우에는 회체 가정이 수용될 수 있다고 제안하였지만 복사 전달식을 풀기 위해서는 흡수 계수에 대한 최적화가 이루어져야만 하는 어려움이 존재한다. 따라서 흡수 계수의 최적화 과정을 필요로 하지 않는 회체가스 가중합산법을 이상 문제에 적용할 수 있다면 실제 문제를 해석하는데 좋은 방법이 될 것이다.

Denison 과 Webb⁽¹⁸⁾은 석탄/차 입자와 가스의 온도 차이로 인하여 변하는 산업용 크기의 보일러 벽에 입사하는 복사 열유속에 대하여 조사하였다. 복사 특성에 대하여 기하학적 평균 통과거리 접근 방법을 사용하였으며, 주변의 가스와 온도가 다른 입자가 부유되어 있을 경우 로벽에 대한 복사 열유속 변화에 매우 큰 효과를 가진다는 것을 찾아내었다.

그러나 복잡한 형상을 가진 미분탄 연소기에 있어서 기하학적 평균 통과거리를 구하는 방법은 아직 명확하지 않다. Yuen 과 Ma⁽²²⁾는 기하학적 평균 광행로 접근 방법은 산란이 있는 경우에는 1 차원 형상에서조차도 커다란 오차를 발생시킬 수 있다는 것을 보였다. 결론적으로, 적절한 기하학적 평균 통과거리 길이를 규정하기가 어려운 다차원 미분탄 연소기에서는 더 심각한 오차가 야기될 수 있다. 유효 기하학적 평균 통과거리를 정의하는 어려움은 부분압과 온도에 기초를 둔 회체가스 가중합산법을 사용하여 피해갈 수 있을 것이다.

이 연구의 주요 목적은 미분탄 연소에서의 복사 열전달을 예측하는데 회체가스 가중합산법을 확장하여 적용하는 것이다. 추가적으로 난류 모델에 따른 해의 변화를 관찰한다. 복사 열전달을 해석하기 위하여 구분종좌법이 회체가스 가중합산모델과 함께 적용되었다. 해석 방법의 확인을 위하여 Hassan 등⁽²³⁾의 실험 결과와 비교하였다.

2. 수학적 모델링

이 연구의 해석에서 이상 반응 유동에 대한 지배방정식은 기상에 대해서는 Eulerian 접근 방법을 사용하고 입자상에 대해서는 Lagrangian 접근 형태로 한다. 한편 기상-입자상의 상호 작용은 질량, 운동량, 화학종 및 에너지의 교환을 지배 방정식에서 적절한 생성항으로 다루는 소위 particle-source-in-cell (PSIC)라고 불리는 방법을 기본으로 한다.⁽²⁴⁾ 난류 유동의 계산에는 표준 및 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델 그리고, 휘발분의 연소에는 eddy dissipation model 을 사용한다. 석탄의 탈휘발과정에 대한 모델은 크게 네가지 부류로 나누어져 있으나 특정 모델의 우위는 단정할 수 없으며 이 연구에서는 1 단계 단반응 모델만을 사용한다. 차연소가 입자의 표면에서의 화학반응과 입자의 표면으로의 산소 확산률에 의하여 지배받는 비균질 차반응모델을 사용한다. 복사 열전달 방정식의 해를 구하기 위한 방법으로는 구분종좌법이 CO₂ 와 H₂O 의 비회체 효과를 위한 회체가스 가중합산법과 함께 적용된다.

2.1 기상

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

$$\frac{\partial(\rho U \varphi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho V \varphi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + S_{\varphi} + S_{\rho, \varphi} \quad (1)$$

여기서 φ 와 Γ_{φ} 는 전형적인 종속변수와 유효 확산 계수이다. S_{φ} , 및 $S_{\rho, \varphi}$ 는 각각 기상 및 고상에 대한 생성 및 소멸항이다. φ 가 1 일 때 연속 방정식이며 u , v 및 w 를 대입할 경우 각 축방향의 운동량식을 나타낸다. 여기서 유효 난류 점성은 다음과 같은 형태로 나타낸다.

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

화학종의 질량 분율 및 엔탈피에 대한 보존식 역시 식(1)의 형태를 가지며, φ 는 질량 분율 Y_i (i =volatiles, O₂, CO₂ and vapor H₂O) 혹은 엔탈피, h , 이다. 식(1)에서의 값 들은 다른 문헌들⁽²⁵⁾에 나와 있으므로 여기에서는 제시하지 않는다. 엔탈피 보존식에서 복사 열유속의 발산항은 다음과 같이 표시할 수 있다.⁽²⁾

$$\nabla \cdot q_{gr} = \sum_{k=1}^N \nabla \cdot q_{gr,k} = \sum_{k=1}^N \kappa_{g,k} \left(4\pi w_{g,k} I_{b,g} - \int_{4\pi} I_k d\Omega \right) \quad (3)$$

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

$$R_{\mu} = \frac{\rho \cdot \epsilon}{k} \cdot \min \left\{ am_{\mu}, \frac{am_{ox}}{s}, \frac{bm_{pr}}{(1+s)} \right\} \quad (4)$$

여기서 s 는 연료에 대한 산소의 당량비이고, $a=4$, $b=2$ 는 eddy dissipation model 에서 사용되는 실험 상수이다.⁽²⁶⁾ 수치적인 계산을 위해서는 통상적인 TEACH code 를 수정하여 사용하였다.⁽²⁷⁾ 난류 모델에 사용되는 상수 들은 Versteeg 과 Malalasekera,⁽²⁸⁾ Xia 등⁽²⁹⁾의 값 들을 수정 없이 사용하였다.

2.2 입자상

입자의 궤적을 추적하기 위해서는 Lagrangian 접근 방식을 사용한다. 축대칭 좌표계에서 입자의 운동량 방정식은 다음과 같이 쓴다.⁽³⁰⁾

$$M_p \left(\frac{d\bar{U}_p}{dt} \right) \quad (5)$$

$$= C_D \rho_g \left(\frac{A_p}{2} \right) (\bar{U}_g - \bar{U}_p) \times |\bar{U}_g - \bar{U}_p| + M_p \bar{g} \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{S}_p}{dt} = \bar{u}_p$$

여기서,

$$A_p = \frac{3}{4} \cdot \frac{\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot C_D \cdot \text{Re}_p \quad (7)$$

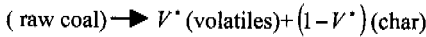
위의 관계식들에서 \bar{s}_p 는 입자의 궤적이며, u_p 와 u_g 는 각각 입자 및 가스의 속도이다. ρ_p 와 g 는 입자의 밀도와 중력 가속도이다. C_D 는 다음과 같은 입자의 항력 계수이다.

$$C_D = \begin{cases} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) / (\text{Re}_p / 24) & \text{for } \text{Re}_p \leq 1000 \\ 0.44 & \text{for } \text{Re}_p > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 입자의 레이놀즈 넘버는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Re}_p = \rho \cdot |\bar{u}_g - \bar{u}_p| \frac{d_p}{\mu} \quad (9)$$

석탄의 탈휘발 과정에 대한 단단계 1 차 반응 모델은 가장 간단한 형태의 화학적 표현 방법이며



휘발물은 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{m}_v = \frac{dV}{dt} = k_v (V^* - V) \quad (10)$$

여기서 $k_v = A_v e^{-E_v/RT}$ 이고, V^* 는 공업 분석에 의한 휘발 물질의 질량 분율이다. Truelove,⁽¹⁶⁾ Lockwood 등,⁽³¹⁾ 그리고 Chui 등⁽¹⁷⁾은 이 모델을 적용하여 적절한 예측치를 제시하였다

차 반응은 산소가 입자의 표면으로 물리적 확산과 표면에서의 화학 반응에 의하여 제어되는 것으로 생각한다.⁽³²⁾ 입자 내부 온도는 균일한 것으로 가정하며 변화율은 다음의 식으로부터 계산한다.⁽³³⁾

$$C_p \frac{dT_p}{dt} = q_i - L_v \frac{dm_p}{dt} \cdot \frac{1}{m_p} \quad (11)$$

여기서 q_i 는 외부로부터 총 열량이며, 가스로부터 전도에 의해 전달되는 열, q_{rc} , 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.

$$q_{rc} = m d^2 \text{Nu} \frac{\lambda_g}{d_s} (T_g - T_p) \quad (12)$$

$$q_{pb} = K \pi d_s^2 P_{O_2} H_c \quad (13)$$

$$q_{pr} = \sum_{k=1}^N \kappa_{p,k} \left(4\pi w_{p,k} I_{b,p} - \sum_{l=1}^{4\pi} I'_k w'_l \right) \cdot \frac{1}{m_p} \quad (14)$$

여기서 K 는 carbon-oxygen 반응의 화학 반응률 계수 및 확산 반응 계수와 관련된 인자이다. 한편 $I_{b,p} = \sigma T_p^4 / \pi$ 는 입자의 흑체 복사강도이며, $\kappa_{p,k} = \kappa_p$ 는 입자의 회체 흡수 계수이며 3.2 절에 정의되어 있다.

2.3 복사 모델; WSGGM 과 DOM 의 결합

Modest⁽¹⁹⁾ 는 회체가스 가중합산모델이 비회체 매질을 대응하는 흡수 계수와 함께 등가의 회체 매질로 대체하는 방법으로 어떤 형태의 복사 방정식 해법에서도 사용될 수 있다는 것을 보여 주었다. 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,

$$\begin{aligned} \frac{dI_k}{ds} = & -(\kappa_{g,k} + \kappa_{p,k} + \kappa_{s,k} + \sigma_{sp,k}) I_k \\ & + \kappa_{g,k} w_{g,k} I_{b,g} + \kappa_{p,k} w_{p,k} I_{b,p} + \kappa_{s,k} w_{s,k} I_{b,s} \\ & + \frac{\sigma_{sp,k}}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\hat{s}, \hat{s}') I_k(\hat{s}') d\Omega' \end{aligned} \quad (15)$$

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 가스, 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 번째 회체 가스의 복사 강도를 모두 더해줌으로써 구할 수 있다.

$$I(s) = \sum_{k=0}^N I_k(s) \quad (16)$$

식 (15)에서 가스, 입자 및 매연에 상응하는 가중치는 각각 다음과 같은 함수이다.

$$w_{g,k} = \frac{\sum_j \int_{\eta'_j}^{\eta''_j} E_{g,b\eta}(T_g, \eta) d\eta}{E_{g,b}(T_g)}, \quad (17)$$

$$w_{p,k} = \frac{\sum_j \int_{\eta'_j}^{\eta''_j} E_{p,b\eta}(T_p, \eta) d\eta}{E_{p,b}(T_p)}, \quad (18)$$

그리고,

$$w_{s,k} = \frac{\sum_j \int_{\eta'_j}^{\eta''_j} E_{s,b\eta}(T_s, \eta) d\eta}{E_{s,b}(T_s)} \quad (19)$$

여기서 Plank's 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{b\eta} = \frac{2\pi hc_o^2 \eta^3}{e^{hc_o \eta / k_s T} - 1} \quad (20)$$

CO₂/H₂O/clear-gas 혼합물에 대하여 Smith 등⁽⁴⁾은 k 번째 회체 가스 성분에 대한 방사 가중치를 가스의 온도, T_g,에 기초한 다음과 같은 형태의 3차 다항식을 발표하였다.

$$w_{g,k}(T_g) = \sum_{j=1}^4 b_{g,k,j} T_g^{j-1} \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^4 w_{g,k}(T_g) = 1 \quad (22)$$

또한, 가스, 입자 및 매연이 같은 회체 밴드를 공유한다면, 입자의 가중치 역시 gas와 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 문헌⁽²⁵⁾에 나타나 있으므로 여기에서는 생략한다. 여기에 매연과 가스 사이에 열평형을 유지한다는 가정을 추가하면, 식 (15)는 다음과 같은 단순한 형태로 바뀌게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dI_k}{ds} = & -(\kappa_{k,k} + \kappa_p + \kappa_s + \sigma_w) I_k \\ & + w_{g,k}(T_g)(\kappa_{g,k} + \kappa_s) I_{b,g} + w_{p,k}(T_p) \kappa_p I_{b,p} \\ & + \frac{\sigma_{wp,k}}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\hat{s}, \hat{s}') I_k(\hat{s}') d\Omega' \end{aligned} \quad (23)$$

2.4 경계조건

Fig. 1에서 버너의 경사진 부분은 Fig. 2에서와 같이 계단 형태의 경계면을 가진다고 가정한다. 이 영역에서 해의 정확성을 향상시키기 위하여 많은 양의 격자점을 집중적으로 배치한다. 또한 이

영역에서도 다른 부분과 마찬가지로 벽함수를 이용한다. 내화 벽면은 단일 벽면으로 생각할 수 있으므로 에너지 식의 경계조건은 대류에 의한 열유속과 복사에 의한 열유속의 평형을 고려한 다음의 식을 적용한다.⁽²⁾

$$-C_p \left(\frac{\mu_i}{Pr_i} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w + q_{r,x} \Big|_w = 0 \quad (24)$$

윗 식의 첫 번째 항은 벽면을 떠나는 대류 열유속의 항이며 두 번째 항은 표면을 떠나는 복사 열유속이다.

중심축에서는 속도, 에너지 및 화학종과 같은 종속 변수 들에 대한 반경 방향의 변화는 없다고 생각한다. 출구에서 에너지 및 화학종에 대한 축방향의 변화는 없으며 속도는 질량 보존을 만족하도록 하였다.

복사 열전달 방정식(RTE)의 해석에서 모든 벽면은 회체이며 난반사한다고 가정한다. 복사에 관한 벽면에서의 경계 조건은 두 가지의 영역으로 나누어 생각한다. 냉각 영역에 대해서는 벽면의 온도를 알고 있다는 조건을 적용하며 내화 벽면에 대해서는 단일 벽면으로 처리한다.

2.4.1 일정 온도(냉각 벽면)

로의 냉각 영역에서 벽의 온도는 인위적으로 제어될 수 있으며, Denison 과 Webb⁽³³⁾은 다음과 같은 벽면 경계 조건을 제안하였다.

$$I_{k,w} = \epsilon_w w_k I_b + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{\mu'' < 0} I''_{k'} \mu'' \Omega'' \quad (25)$$

식 (25)의 우변에서 첫번째 항은 벽면의 온도에 상응하는 방사를 나타내며, 두번째 항은 복사 강도 I''_{k'}를 모든 입사 방향 μ'' < 0에 대하여 합한 값의 반사 성분을 나타낸다.

2.4.2 단일 조건(내화 벽면)

로의 내화벽은 단일벽면이라고 생각한다. 식 (25)의 첫 번째 항은 벽면의 온도를 알고있을 경우에만 사용 가능하며 단일 벽면에 대해서는 직접적인 적용이 불가능하므로 이 영역에서는 식 (24)의 경계 조건을 활용한다.

식 (24)에서 표면을 떠나는 순 복사 에너지인 두번째 항은 로 표면의 방사 복사 열유속과 입사 복사 열유속의 차이이다.⁽³⁴⁾ 만일 모든 표면이 회

체이고 난반사를 한다면, 표면 방사 열유속은,

$$J_w = \pi I_w \quad (26)$$

그리고 입사 복사 열유속은

$$G_w = \sum_{\mu' < 0} I' |\mu'| w' \quad (27)$$

따라서 식 (24),(25) 및 (26)을 조합하면 표면을 떠나는 복사 강도는 다음과 같고⁽¹⁷⁾

$$I_w = \frac{1}{\pi} \left(\sum_{\mu' < 0} I' |\mu'| \omega' - C_p \left(\frac{\mu_i}{Pr_i} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w \right) \quad (28)$$

k -번째 회체 밴드의 복사 강도는 식 (16)을 바탕으로 대류 열유속에 대한 가중치를 복사 열유속의 가중치와 동일하게 부여하여 다음 식을 사용한다.

$$I_{k,w} = \frac{1}{\pi} \left(\sum_{\mu' < 0} I_k' |\mu'| \omega' - w_{g,k}(T_w) C_p \left(\frac{\mu_i}{Pr_i} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w \right) \quad (29)$$

2.4.3 대칭축

$r=0$ 에서 $|\mu'| = |\mu^r|$ 와 $\xi^i = -\xi^r$ 일 때,

$$I'_{k,w} = I''_{k,w} \quad (30)$$

3. 물리적 성질

3.1 연소기 형상

이 연구에서 원통형 미분탄 연소기는 지름이 0.6 m 이고 길이가 3 m 인 모양을 가지고 있다. 선회 버너의 개략도는 Fig. 1에 보여주었으며 작동 조건은 Table 1에 정리하였다. 작동 조건에 더하여 미분탄의 분사 및 입자 크기의 분포에 대한 더 이상의 자료는 Hassan 등⁽²³⁾의 실험 결과로부터 취하였다.

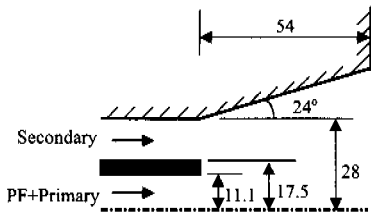


Fig. 1 Schematic of the swirl burner (unit: mm)

3.2 복사 특성

이상 혼합물에 대한 회체가스 가중합산모델은 Denison 과 Webb⁽³⁵⁾이 수행한 것처럼 입자산란의 비회체 효과를 고려하여 수행할 수도 있으며, 그들은 k -distribution 방법을 사용하여 열적 평형 상태에 있는 이상 혼합물 문제를만 해석하였다. 하지만 이 논문에서는 논문의 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.⁽¹⁷⁾

$$\kappa_p = \epsilon_p \sum_i N_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (31)$$

$$\sigma_w = (1 - \epsilon_p) \sum_i N_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (32)$$

식 (31) 및 (32)에서, N_i 는 group i 에 속하는 입자가 통과하고 있는 셀에서의 단위 부피당 입자의 숫자이며 $\pi d_i^2/4$ 는 투영 면적이다. 입자의 연소에 따른 입자 방사율 ϵ_p 의 변화는 다음과 같이 가정하며;

$$\epsilon_p = X_{ub} + 0.6(1 - X_{ub}) \quad (33)$$

여기서 X_{ub} 는 미연탄의 질량비이다.⁽¹⁵⁾

Modest⁽²¹⁾에 따르면, 매연의 흡수 계수는 다음과 같이 정의되며

$$\kappa_r = \frac{3.72 f_v C_o T}{C_2}, \text{ m}^{-1} \quad (34)$$

여기서 $f_v = 1.0 \times 10^{-6}$ 는 매연의 부피비이고,

$C_o = 36\pi m k / [(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2 k^2]$ 는 매연의 굴절

Table 1 Operating conditions for furnace

Variable	Value
Coal flow rate, kg/hr	11.6
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

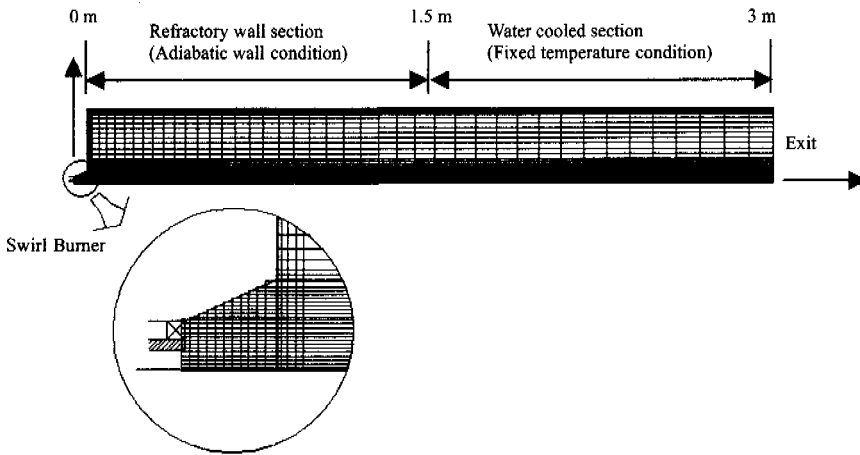


Fig. 2 Computational coordinates and grid system

지수에만 종속적인 상수이며 $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot K$ 는 2 차 Plank 함수 상수이다. 한편 $n = 1.85$ 와 $k = 0.22$ 는 각각 역청탄에 대한 굴절 복소 지수의 실수부와 흡수 지수이다.⁽²¹⁾ 수냉 벽면의 방사율, ϵ_w , 은 0.8 로 고정하였다.

기체에 대한 가중치, $w_{g,k} = w_{g,k}(T_p)$ 와 입자에 대한 가중치, $w_{p,k} = w_{p,k}(T_p)$ 는 분리하여 계산한다. 기체에 대한 가중치의 계산은 매우 고전적이므로 여기에서는 언급하지 않는다. 하지만 입자에 대해서는 각 셀 내에서 입자의 온도를 필요로 한다. 각 셀에서 입자의 온도는 입자가 셀에서 변하는 온도의 평균 값을 취하였다.

4. 결과 및 토론

미분탄 화염의 계산을 위해서 수차례의 시행 오차를 수행한 후 $(NI \times NJ) = 81 \times 71$ 격자계를 채택하였으며 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 계산 영역에 포함되는 얇은 quartz 부분은 blocking-out 시키는 방법을 채택하였다

회체(gray)를 가정한 3 가지 경우와 더불어 회체가스 가중합산법의 적용에 의하여 기체의 비회체 특성을 고려한 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 회체 경우 1 에 대해서는 기체와 매연의 흡수 계수를 각각 $\kappa_g = 0.1$ 과 $\kappa_s = 0.4 \text{ m}^{-1}$ 이다.⁽¹⁷⁾ 회체 경우 기체와 매연의 총 흡수 계수는

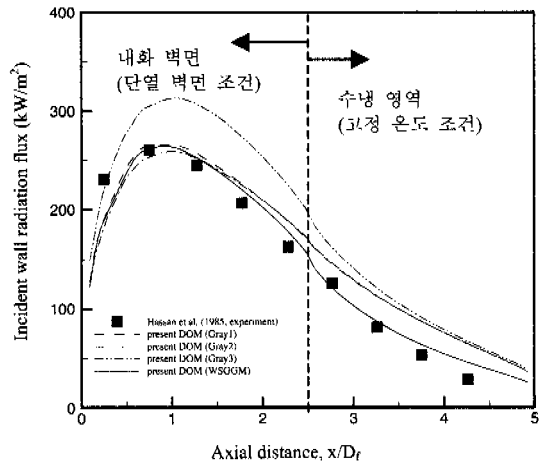


Fig. 3 Axial distribution of incident wall radiation flux

$\kappa_g + \kappa_s = 0.32 + 0.28e^{-T/1135} \text{ m}^{-1}$ ⁽³⁶⁾ 으로 로내의 온도 분포의 함수이다. 마지막으로, 회체 경우 3 에 대해서는 기체의 농도에 관한 함수인 $\kappa_g = 0.2 Y_{volatiles} + 0.1(Y_{CO_2} + Y_{H_2O}) \text{ m}^{-1}$ ⁽³⁷⁾와, 매연의 흡수 계수 $\kappa_s = 0.4 \text{ m}^{-1}$ 이다. 회체가스 가중합산 접근 방법에서 기체에 대한 가중치는 Smith 등 ⁽⁴⁾으로 부터 구하였다.

축 방향을 따르는 벽면에 대한 입사 복사

열유속을 수치적으로 계산하여 Fig. 3 에 실험 값과 비교하였다. x 는 입구에서부터 축방향의 거리이고 D_r 는 로의 직경이다.

입사 복사 열유속은 다음의 식으로 계산한다.

$$q_w = \sum_{k=1}^N \sum_{\Omega'_k > 0} I'_k \Omega'_k \quad (35)$$

gray3 의 경우를 제외하고는, 모든 수치 해석 결과가 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 수냉 영역에서 회체가스 가중합산법에 의한 계산 결과가 미분탄 연소의 실험결과를 바탕으로 흡수계수를 최적화한 gray1 과 gray2 의 경우에 비하여 더 낮은 결과를 제공해 줌을 볼 수 있는데 이러한 결과로부터 본 논문에서 적용한 회체가스 가중합산모델이 매우 유용한 도구임을 알 수 있다. 한편 기체의 흡수계수는 기체연료 연소로에 대한 결과로부터 얻고 매연의 흡수계수는 미분탄 연소에 적용하는 값을 적용한 gray3 의 경우에 대해서는 다른 결과에 비하여 좋지 않은 결과를 보여준다. Fig. 3 에서 보듯이 회체 모델의 경우에는 흡수 계수에 대한 약간의 수정과 최적화를 통해야만 좋은 결과를 얻어 낼 수

있음을 알 수 있다.

Fig. 4 에서는 내화 벽면 영역의 축방향으로 세 위치, $x/D_r=0.25, 1.25$ 와 2.25 에서 반경 방향의 온도 분포를 계산하여 실험 결과와 비교하였다.

기체의 복사 효과를 고려하지 않은 경우에는 실험값과 비교할 때 차의 반응 지역에서 약 500 ~ 600 °C 까지 차이를 보이지만 복사에 의한 열손실을 고려한 경우에는 실험 값에 더 가까운 값들을 보여주고 있다. 고온 지역에서의 복사 효과에 의한 차이는 일반적으로 생각할 수 있는 범위를 벗어나 보인다. 이러한 현상은 차 연소동안 입자의 온도가 주변 기체의 온도에 비하여 약 200~300°C 정도 높은 것으로 알려져 있으며⁽¹²⁻¹⁵⁾ 식 (14)로 표현되는 고온의 입자로부터 기체로의 복사 에너지 전달 효과는 두 경우 모두에서 무시하지 않아 추가적으로 발생하는 차이로 볼 수 있다. 결과를 정리해보면 석탄 입자와 같이 자체 연소하는 입자가 혼합된 고온 연소장의 수치해석에서 기체의 복사 효과는 기체 연료의 연소에서보다 더 크며 필히 적용되어야만 하는 것을 알 수 있다. 단열 벽면 영역에 대한 온도장을 도식한 Fig. 4 에서 열역학 제 1 법칙의 위배 가능성을 제기할 수 있으나 복사 효과를 고려한 경우 식 (24)의 두번째 항으로 표현된 벽면에서의 복사 열유속과 개방된 후류 방향으로의 복사 열 손실이 발생하므로 에너지의 보존 법칙을 만족하려면 기체의 복사효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 온도 분포에 차이가 발생해야 함을 알 수 있다. 기체의 복사 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 입구에서는 실험값보다 낮은 값을 예측하고 있다. 따라서 복사 효과를 고려하였을 때 발생하는 과 예측된 값을 보정해 주나 중심축 상에서의 저 예측된 값이 보정되지는 않는 것을 알 수 있다. 버너 근방에서 보이는 실험 값과 계산 값의 차이는 그리 놀랄 만한 사실은 아니며 다른 연구자들^(16,17)의 결과에서도 흔히 나타나는 현상이다. 이러한 차이를 발생시키는 요인으로 두 가지 가능성을 생각할 수 있다. 첫 번째는 이 연구에서 사용한 $k-\epsilon$ 난류 모델과 eddy dissipation model 에 의하여 발생하는 수치적인 오차를 들 수 있다. $k-\epsilon$ 난류 모델링은 유동의 등방성을 가정한 모델이나 선회류가 강하게 나타나는 실제 연소기 내부의 유동은 강한 비등방성을 가지고 있으므로 모델링과 실제 현상간의 차이로 인한 오차로 생각할 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위한 노력은 다른

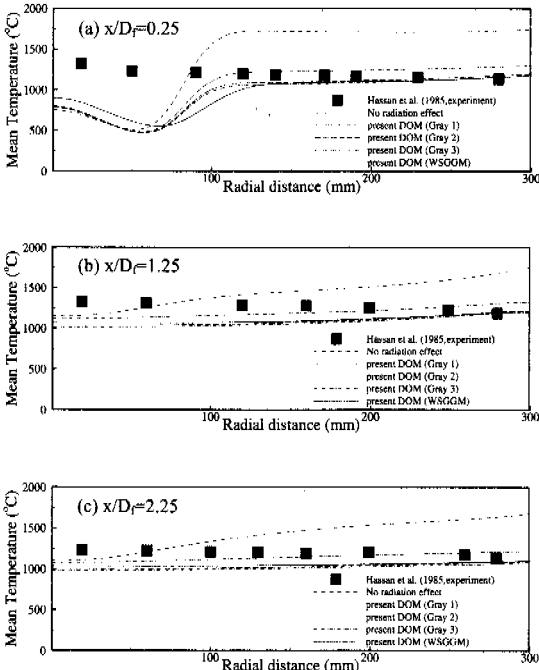


Fig. 4 Radial temperature profiles. (Refractory wall section; Adiabatic wall boundary)

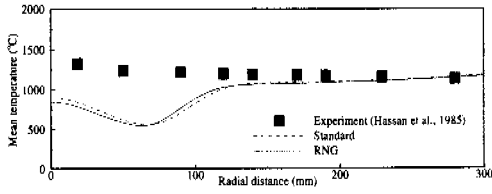


Fig. 5 Comparison of the results due to turbulence modeling at $x/D_f=0.25$

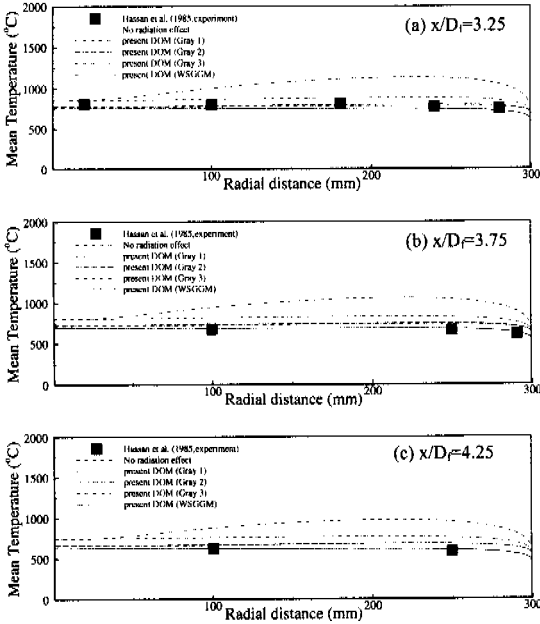


Fig. 6 Radial temperature profiles. (Water cooling section; Fixed temperature boundary)

연구자들(38,39)에 의해서 계속 수행되고 있다. 표준

$k-\epsilon$ 의 적용에 의한 오차의 감소를 위한 노력으로 선회류가 존재하는 경우에 해의 정확성 향상을 위해 제시된 RNG $k-\epsilon$ 모델링의 적용은 만족할만한 결과를 제시하여 주지 못하였다 (Fig. 5 참조).

한편, 측정 오차를 생각해 볼 수 있다. Chui 등(17)은 Fig. 4에서 실험 값이 계산 값에 비해 높은 이유로 온도 프로브의 삽입에 의한 국부연소의 발생에 의한 결과일 수 있다고 언급하였다. $x/D_f=1.25$ 와 2.25 에서의 결과는 회체가스 가중합산모델을 포함한 복사 효과를 고려한 모델들로부터 계산된 값들이 고려하지 않았을 경우와 비교할 때 실험치와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 특히 계산 과정에서 어떠한 최적화

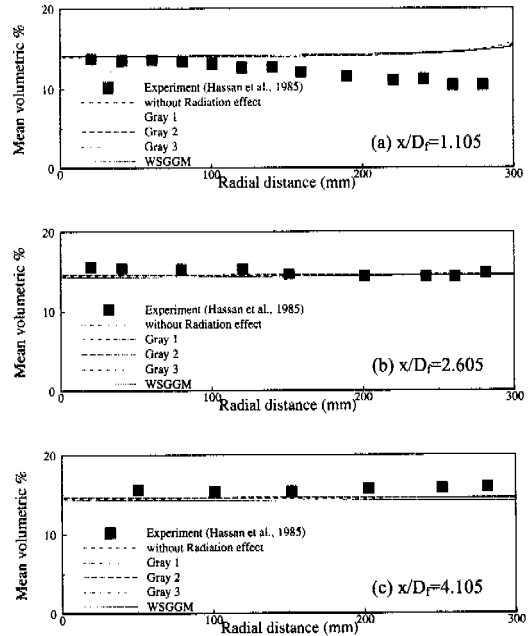


Fig. 7 Concentration profiles of CO_2

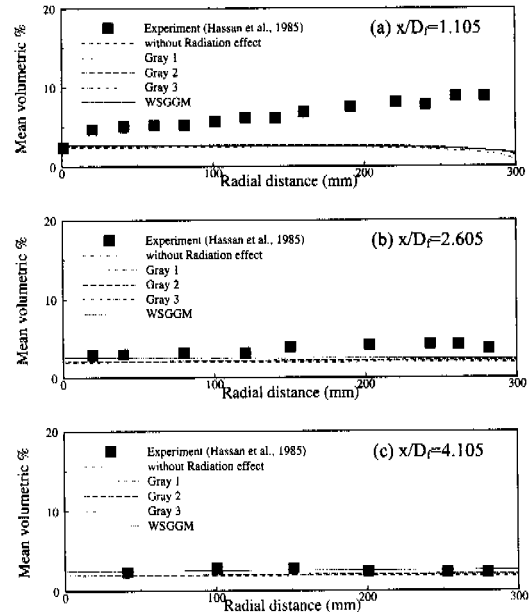


Fig. 8 Concentration profiles of O_2

과정도 고려하지 않은 회체가스 가중합산모델을 사용한 결과가 실험 값 및 최적화 과정을 거친 다른 회체가스 모델 결과와 잘

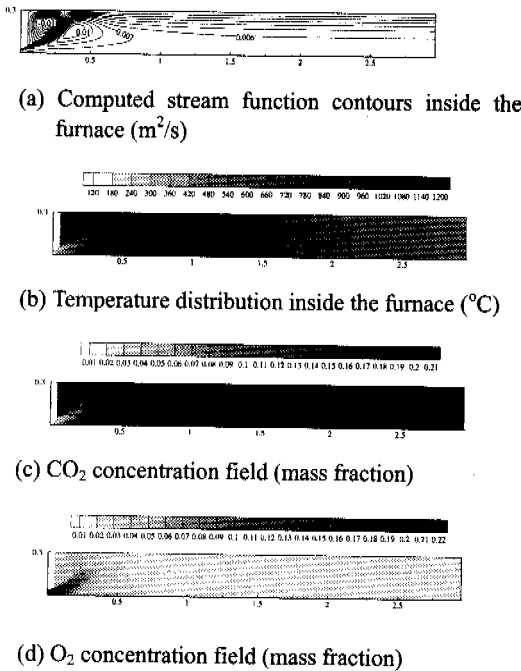


Fig. 9 Various plots computed with present DOM (WSGGM).

일치하는 것은 매우 고무적인 결과이다.

Fig. 6 에 수냉 영역을 따라 $x/D_f=3.25, 3.75$ 와 4.25 인 위치에서의 반경 방향 온도분포를 실험 값과 비교하였는데 Figure 4 에 대한 설명에서 언급한 것과 유사한 결과를 제공하여 주고 있다.

$x/D_f=1.105, 2.605$ 와 4.105 에서의 CO_2 와 O_2 에 대한 분포를 Fig. 7 및 8 에서 비교하였다. CO_2 의 경우 거의 모든 영역에서 계산값이 실험값에 비하여 낮게 나타남을 볼 수 있다.

내부 재순환 영역인 $x/D_f=1.105$ 에서 실험 값과의 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 이러한 결과는 Fig. 4(a)에 대한 설명을 참고하면 될 것이다. 그러나 내부 재순환 영역을 제외한 후류 영역에서는 실험 값과 계산 값이 잘 일치함을 볼 수 있다.

5. 결론

유선, 온도, CO_2 및 O_2 에 대한 분포도를 Figure 9에 도시하였다. 이 그림 들은 입구에서의 선회에 의한 제트의 확장 및 축 상에 발생하는 내부 재순환 영역의 발생을 정성적으로 보여준다.

이 연구에서는, 복사 열전달 계산을 위하여 단순 회체 모델뿐만 아니라 비회체 모델을 질량, 운동량, 에너지 및 화학종 보존 방정식과 결합하여 축대칭 연소기 내부에서 미분탄의 연소에 대한 계산을 실시하였다. 주요 목적은 미분탄 연소에서의 복사 열전달을 지금까지와는 다른 방법으로 처리하여 계산하고, 계산 결과를 실험 결과와 비교함으로써 공학적인 목적에 부합하는 새로운 계산 방식을 제시하는 데 있다. 복사 열전달 방정식의 해법에는 구분 종좌법을 적용하였다. CO_2 와 H_2O 에 대한 복사 특성은 회체가스 가중합산모델을 적용하여 계산하고, 매연과 등방 산란을 하는 입자에 대해서는 회체로 가정하였다. 미분탄 화염과 같은 이상 유동에서의 복사 열유속 계산을 위해 도입한 구분 종좌법과 회체가스 가중합산법은 성공적으로 수행되었으며 실험 값과 정량적으로 잘 일치함을 보여주었다. 온도 분포 및 화학종의 농도에 대한 계산 값도 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다. 버너에 근접한 영역에서 내부 재순환 영역의 존재에 기인하는 실험 결과와의 차이점을 볼 수 있었으나 복사 모델과는 연관이 없다.

더 많은 실험 들과의 비교를 통한 검증이 필요하겠지만, 이 논문에서 제시된 미분탄 연소에서의 계산 결과는 열적 비평형 상태에 있는 이상 기체 내에서 회체가스 가중합산모델을 적용하여 복사 열교환을 계산하는 것이 공학적으로 타당한 결과를 제공해주는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 1999 년도 전북대학교 의 지원연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Hottel, H. C., and Sarofim, A. F., 1967, *Radiative Transfer*, Mc-Graw Hill, Inc.
- (2) Choi, C. E., and Baek, S. W., 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) Liu, F., Becker, H. A., and Binder, Y., 1998, "A Comparative Study of Radiative Heat Transfer Modelling in Gas-Fired Furnaces using the Simple Gray Gas and the Weighted-Sum-of-Gray-Gases Models," *Int. J. Heat Mass Transfer*, pp. 3357~3371.

- (4) Smith, T. F., Shen, Z. F., and Friedman, J. N., Nov. 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.
- (5) Coppalle, A., and Vervisch, P., 1983, "The Total Emissivities of High-Temperature Flames," *Combust. Flame*, Vol. 40, pp. 101~108.
- (6) Lallemand, N., Sayre, A., and Weber, R., 1996, "Evaluation of emissivity correlations for H₂O-CO₂-N₂/Air Mixtures and Coupling with Solution Methods of the Radiative Transfer Equation," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 22, pp. 543~574.
- (7) Johnson, T. R., and Beer, J. M., 1972, "Radiative Heat Transfer in Furnaces: Further Development of the Zone Method of Analysis," *Fourteenth Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 639~649.
- (8) Felske, J. D., and Charalampopoulos, T. T., 1982, "Gray Gas Weighting Coefficients for Arbitrary Gas-Soot Mixtures," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 25. No. 12. pp. 1849-1982.
- (9) Soufiani, A., and Djavdan, E., 1994, "A Comparison between Weighted Sum of Gray Gases and Statistical Narrow-Band Radiation Models for Combustion Applications," *Combust. Flame*, Vol. 97. pp. 240~250.
- (10) 박재현, 1998.2, 복사 효과를 고려한 기체-입자 직접 접촉식 열교환기 해석, 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (11) Yu, M. J., Back, S. W., and Park, J. H., 2000, "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," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1699~1713.
- (12) Ohtake K, Okazaki K., 1988, "Optical CT Measurement and Mathematical Prediction of Multi-temperature in Pulverized Coal Combustion Fluid," *Int. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 31, pp. 397~405.
- (13) Farzan, H., and Essenhigh, R.H., 1982, "High Intensity Combustion of Coal," *Nineteenth Symposium (Int.) on Combust. pp./The Combustion Institute*, pp. 1105~1111.
- (14) Mackowski D.W., Altenkirch R.A., Peck R.E., and Tong T.W., 1983, "A Method for Particle and Gas Temperature Measurement in Laboratory-Scale, Pulverized-Coal Flames," *Combust. Sci. Tech.* Vol. 31, pp. 139~153.
- (15) Butler, B. W., Denison, M. K., and Webb, B. W., 1994, "Radiation Heat Transfer in a Laboratory-Scale, Pulverized Coal-Fired Reactor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 69~79.
- (16) Truelove, J. S., 1984, "The Modeling of Flow and Combustion in Swirled, Pulverized-Coal Burners," *Twentieth Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp.523~530.
- (17) Chui, E. H., Hughes, P. M. J., and Raithby, G. D., 1993, "Implementation of Finite Volume Method for Calculating Radiative Transfer in a Pulverized Fuel Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 92, pp. 225~242.
- (18) Denison, M.K., and Webb, B.W., 1993, "Modeling of Radiative Transfer in Pulverized Coal-Fired Furnaces: Effect of Differing Particle and Gas Temperature," *Transport Phenomena in Thermal Eng.* Vol.1, pp. 191~196, Begell House.
- (19) Lockwood, F. C., Salooja, A. P., and Syed, S. A., 1980, "A Prediction Method for Coal-Fired Furnaces," *Combust. Flame*, Vol. 38, pp.1~15.
- (20) Lockwood, F. C., and Mahmud, T., 1988, "The prediction of swirl burner pulverized coal flames," *Twenty-Second Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 165~173.
- (21) Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, Inc.
- (22) Yuen, M. M., Ma, A., 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.
- (23) Hassan, M. A., Hirji, K. A., Lockwood, F. C., and Moneib, H. A., 1985, "Measurements in a Pulverized Coal-Fired Cylindrical Furnaces," *Experiments in Fluid*, Vol. 3. pp. 153~159.
- (24) Crowe, C. T., Sharma, M. P., and Stock, D. E., Jun., 1977, "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows," *J. Fluid Eng.*, pp. 325~332.
- (25) 유명종, 2000.2, 열복사를 고려한 미분탄의 연소 및 NOx 배출 현상에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위 논문.
- (26) Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1977, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," *Sixteenth Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 719~729.
- (27) Gosman, A. D., and Ideriah, F. J. K., 1976, *TEACH-T : A General Computer Program for Two-Dimensional, Turbulent Recirculating Flow*, Imperial College, London, U. K.
- (28) Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Longman Scientific & Technical
- (29) Xia, J. L., Yadigaroglu, G., Liu, Y.S., Schmidli, J., and Smith, B. L., 1998, "Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor,"

- International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 41, No. 11, pp. 1485 ~ 1497.
- (30) Anagnostopoulos, J. S., Sargianos, N. P., and Bergcles, G., 1993, "The Prediction of Pulverized Greek Lignite Combustion in Axisymmetric Furnaces.," *Combust. Flame*, Vol. 92, pp. 209~221.
- (31) Lockwood, F. C., Rizvi, S. M. A., Lee, G. K., and Whaley, H., 1984, "Coal Combustion Model Validation Using Cylindrical Furnace Data," *Twentieth Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 513~522.
- (32) Baum, M. M., and Street, P. J., 1971, "Predicting the combustion Behavior of Coal Particles," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 3, pp. 231~243.
- (33) Denison, M. K., and Webb, B. W., 1993, "A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of Gray Gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 1004~1012.
- (34) Holman, J. P., 1989, *Heat Transfer*, , Mc-Graw Hill, Inc.
- (35) Denison, M. K., and Webb, B. W., 1994, "k-Distribution and Weighted-Sum-of-Gray-Gases—A Hybrid Model," *Proceed. of the tenth Int. Heat Transfer Conference*, Vol. 2, pp. 19~24.
- (36) Boyd, R. K., and Kent, J. H., 1986, "Three-Dimensional furnace computer modeling," *Twenty-First Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 265~274.
- (37) Khalil, E. E., Spalding, D. B., and Whitelaw, J. H., 1996, "The Calculation of Logical Flow Properties in Two-Dimensional Furnaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 775~791.
- (38) Liou, T. M., Lien, W. Y., and Hwang, P. W., 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.
- (39) Gran, I. R., Mclaaen, M. C., and Magnussen, B. F., 1994, "Numerical Simulation of Local Extinction Effects in Turbulent Combustion Flows of Methane and Air," *Twenty-Fifth Symp. (Int.) on Combust. /The Combustion Institute*, pp. 1283~1291.