

미분탄 연소로의 난류 유동장 및 반응장 해석을 위한 3차원 모델

이경옥 · 서경원* · 최병선**

한국과학기술원

*아주대학교

**한국전력기술공사

3-Dimensional Model for Pulverized Coal Combustion

Lee Kyung Ok, Seo Kyung Woon* and Choi Byung Sun**

Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul, Korea

*Department of Chemical Engineering, Ajou University, P.O. Box 441-749 5

Wonchun-dong Kwonsong-Gu Suwon Korea

**Korea Electricity Power Corporation, 117-15 Yongjeon-dong Dong-Gu Daejeon Korea

요 약

현존하는 미분탄 연소로의 난류 유동장 및 반응을 해석하는 3차원 모델을 제안하였다. 미분탄 불균일 반응, 휘발, 복사 및 서로 다른 방향에서 유입되는 1차 공기와 2차 공기의 혼합, 열 손실 등의 연소로 내에서 일어날 수 있는 제반 현상을 종합적으로 고려하여 비선형 미분 방정식을 세우고 유한 미분법을 적용하여 연소 현상을 모사하였다. 본 연구에서 제안한 모델을 이용하여 연소로 내에서의 미분탄 연소 거동을 예측하고 연소 효율에 중요한 영향을 미치는 1차 공기와 2차 공기의 주입 속도와 석탄 입자크기가 연소 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

Abstract

A three-dimensional model has been developed for pulverized coal combustors and gasifiers. Coal devolatilization, heterogeneous char oxidation, gas particle interchange, radiation, gas phase oxidation, primary and secondary stream mixing, and heat losses are considered. A finite difference method was used to solve the ordinary non-linear differential equations. The effects of primary and secondary stream flow ratio and coal particle size are investigated.

1. 서 언

산업의 발달 및 생활 수준의 향상과 더불어 전력의 수요도 급증하고 있어, 이에 대응하기 위하여 새로운 발전 설비의 증설 및 현존하는 에너지발전 설비의 효율적인 이용이 매우 중요한 과제로 대두되어 왔다. 본 연구는 이러한 노력의 하나로 현존하는 발전 설비에서 생산되는 에너지의 효율적인

이용을 도모하기 위하여, 발전 설비의 대표적인 형태인 화력 발전소를 대상으로 발전소의 중심부라 할 수 있는 연소로 내부의 현상을 모사하는 연구의 일부로써 미분탄과 공기가 함께 유입되는 연소로내에서의 각각 미분탄과 공기의 유동장 거동과 과열 공기의 온도를 예측하고자 하였다.

미분탄 연소계의 해석은 기체·고체 상의 유체 역학과 반응을 함께 고려하여야 하므로 매우 복잡한

모델이 요구된다. 이러한 복잡성을 극복하기 위하여 간단한 가정을 토대로 모델이 세워져 오다가 임페리얼 대학에서 최초로 기체 연소로 모델을 석탄 연소로 모델로 확장하여 다차원 모델을 제안하였다 (Gosman *et al.*, 1969).

이전에는 o'Vulis(1961), Hedley와 Jackson(1966), Horn 등(1966), 그리고 Field 등(1967)이 plug-flow로 해석한 미분탄 연소 모델을 제안한 바 있다. Beer와 Lee(1965)는 완전히 혼합된 반응기와 plug-flow 반응기의 복합적 형태로 연소 모델을 해석하였으며 Lewellen(1977) 등은 swirling-coal 연소로 모델을 개발하였고 Stickler 등(1979)은 1차원 연소 모델을 제안하였다. Richter와 Quack(1974), Gibson과 Morgan(1970)은 2차원 난류 유동 모델에 대하여 연구한 바 있으며 Blake(1977)와 Sprouse(1977)는 일반적인 다차원 반응 모델을 제안하였다. 또한 Smith 등(1980)은 체계적으로 1차원 미분탄 연소를 해석한 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 1) 연소로 내에 유입되는 입상의 연료와 기체의 흐름을 예측하기 위한 3차원 기상 및 입상 유동장 수학적 모델의 이론적 배경 및 모사 대상인 연소로에 적절한 가정을 도입하고 2) 유입된 연료와 기체의 반응장을 해석하기 위하여 수식 모델을 세우고 관련된 물성치를 이용하여 연소로 내부 현상을 모사하였다. 모사 대상 연소로는 서천 화력 발전소 보일러이며 본 연구의 최종 목적은 연소로 내의 제반 현상을 예측 및 진단하여 궁극적으로 조업조건을 개선하는 것으로 연구가 계속 진행 중에 있다.

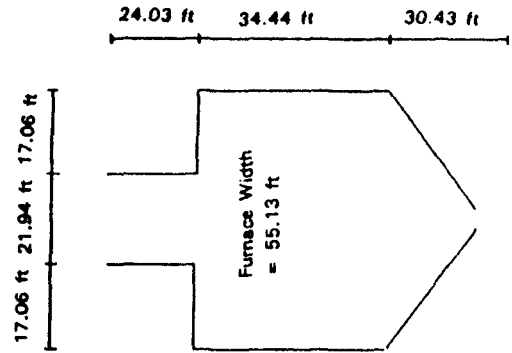


그림 1. 서천 화력 발전소 실보일러의 크기.

2. 3차원 3속도 기상 유동장 방정식

연구대상인 서천 화력 연소로는 그림 1과 같은 구조로써 rectangular coordinate를 이용하는 것이 적합하며 다음과 같은 가정을 세울 수 있다.

① 기상을 일반적인 보존식에 의하여 지역적으로 묘사될 수 있는 turbulent, reacting continuum field라고 가정한다.

② 기체는 시간에 대하여 정상상태라고 가정한다.

③ 연소로 내의 여러 기체의 물성(밀도, 점도) 및 변수(온도, 조성)은 turbulence의 특성에 따라 임의로 변한다고 가정한다.

④ 기상의 body force는 무시한다.

⑤ 기체는 Newtonian fluid라고 생각한다.

⑥ 기체의 dilatation은 작은 값을 갖는다고 가정하여 momentum식에서 무시한다.

열거한 가정으로부터 기상 유동장방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

· x방향 유동장 방정식(x-momentum equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) - \frac{\partial}{\partial x}(\mu_c \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu_c \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\mu_c \frac{\partial u}{\partial z}) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_c \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_c \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_c \frac{\partial w}{\partial x}) + u S_p^m + \bar{S}_p^v \end{aligned} \quad (1a)$$

· y방향 유동장 방정식(y-momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) - \frac{\partial}{\partial x}(\mu_c \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu_c \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\mu_c \frac{\partial v}{\partial z})$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right) + v S_p^m + \bar{S}_p^v \quad (1b)$$

· z방향 유동장 방정식(z-momentum equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho w u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho w v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w w) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) + w S_p^m + \bar{S}_p^w \end{aligned} \quad (1c)$$

· κ식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \kappa) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \kappa) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \kappa) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ & = -2\mu_e \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_e \left[\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

· ε식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \epsilon) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_e}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ & = \frac{2\epsilon c_1}{\kappa} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\epsilon c_1}{\kappa} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{\epsilon^2 c_2 \rho}{\kappa} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 난류 유동장 모델

난류에 관한 활발한 연구는 불과 백년 안팎의 짧은 역사를 지니고 있으며 근래에도 계속 연구가 진행 중에 있다. 이들 연구 중에서 k-ε 모델이 가장 일반적으로 받아들여지고 있으며 본 연구에서도 기상 유동장의 난류현상을 해석하기 위하여 turbulent kinetic energy, k와 이의 파괴속도인 dissipation rate, ε를 도입하여 식 (1)과 함께 유동장을 해석하였다. 각각 k와 ε에 대한 관계식은 (2)~(5)식과 같다.

· k-ε식

$$\mu^t = \frac{C_\mu \kappa^2}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\mu_e = \mu^e + \mu^t \quad (5)$$

식 (3)~(5)에 사용된 c_μ , c_1 , c_2 , σ_κ , σ_ϵ 는 수많은 실험을 거쳐 최적화된 universal constants로 표 1에

표 1. 난류 모델 상수

상수	c_μ	c_1	c_2	σ_κ	σ_ϵ	κ
상수값	0.09	1.44	1.92	0.9	1.22	0.42

수록하였다.

4. 입상 3차원 3속도 유동 모델

미분탄 입자의 거동은 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법으로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 계산 처리량을 감안하여 Lagrangian 방법에 의거한 Particle Source In Cell 방법에 따라 3차원 3속도 유동장을 해석하며 3차원 3속도 유동장 해석의 단순화를 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다.

① 입자의 크기는 모두 동일하다.

② 입자는 유입, 유출 위치에서 모두 동일한 양

표 2. 식 (7)의 변수값의 관계식

변수	변수명	관 계 식
C_D	Drag 계수	$C_D = 24/Re(1 + 0.15 Re^{0.68}) / (1 + B_m)$
Re	Renold수	$Re = \rho_g \bar{V}_g - \bar{V}_{pc} d_p / \mu_g$
B_m	blowing parameter	실험상수
d_p	입자의 지름	상수
m_p	입자 질량	$m_p = \rho_p \pi d_p^3 / 6$
ρ_p	입자의 밀도	상수
A_p	입자 단면적	$A_p = \pi d_p^2 / 4$
ρ_g	기상의 밀도	상수
g	중력 가속도	9.8 m/sec ²

표 3. 식 (9)에 사용된 변수의 상관 관계식

변수	변수명	관 계 식
D_{pt}	입자의 확산계수	$D_{pt} = v_{pt} / \sigma_{pt}$
v_{pt}	난류입상 kinematic viscosity	$v_{pt} = v_{gt} / (1 + (t_p/t'))$
v_{gt}	기상만의 난류 kinematic vis- cosity	상수
t_p	입자 relaxation time	$t_p = m_p / 3\pi \mu_g d_p$
t'	난류의 time scale	$t' = 1.5 C k_2 / \epsilon$
σ_{pt}	난류 입자의 Schmidt수	상수
ρ_b	입자평균밀도	$\rho_b = m_p \cdot n_p$
n_p	단위체적당 수밀도	식 (10)

만큼씩 유입, 유출된다.

③ 입자끼리의 뭉침, 깨짐, 충돌은 고려하지 않는다.

④ 연소로 내부에서 입자의 수가 보존된다.

미분입자의 운동속도 구하는 관계식은 가스의 유동장의 난류 정도에 관계하는 convective 항 V_{pc} 와 입자의 diffusion에 관계하는 항, V_{pd} 의 합으로 다음과 같이 나타낸다.

$$V_p = V_{pc} + V_{pd} \quad (6)$$

이때 V_{pc} 는 입자의 운동량 수치로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{dV_{pc}}{dt} = \frac{A_p \rho_g C_D}{2} \left| V_g - V_{pc} \right| (V_g - V_{pc}) + m_{p,g} \quad (7)$$

식 (7)에서 사용된 변수들은 아래 표 2로부터 구한다.

한편 유동장의 난류 정도와 입자의 지협적인 밀도에 따라 결정된다고 가정하여 Fick's 법칙으로부터

$$V_{pd} \rho_b = D_{pt} \nabla \rho_b = \frac{v_{pt}}{\sigma_{pt}} \nabla \rho_b \quad (8)$$

(8)은 표 3의 식들로부터

$$V_{pd} \rho_b \cdot \bar{n}_p = \frac{v_{pt}}{\sigma_{pt}} \nabla \rho_b \quad (9)$$

식 (9)에서 사용된 변수들의 관계식은 아래 표 3와 같다. 가정 ④에 따라 다음과 같은 입자수에 대한

연속식을 도입한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} \cdot \bar{n}_p) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} \cdot \bar{n}_p) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w} \cdot \bar{n}_p) \\ & - \frac{\partial}{\partial x} (D_{pt} \frac{\partial n_p}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (D_{pt} \frac{\partial n_p}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (D_{pt} \frac{\partial n_p}{\partial z}) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 식 (6)을 생각하면 식 (7)의 속도값과 식 (9)의 속도값의 합이 순입자의 속도값이 된다.

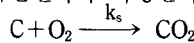
5. 난류 2상 반응 모델

난류 2상 반응 모델은 가능한한 실제에 근사하게 반응장을 모사하기 위하여 다음과 같은 가정을 전제로 하였다.

〈석탄 입자에 대한 가정〉

① 석탄 입자의 swelling은 무시한다.

② 석탄 반응 모델은 아래의 최-산화 반응식에 국한된다고 가정한다.



[B(s) + A(g) → gaseous products]

(1) Chemical Reaction Control Step(k_s, k'_s)

$$k_s = \frac{4.32 \times 10^{11}}{\sqrt{T}} e^{-44,000/RT}$$

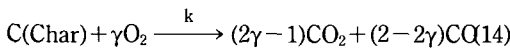
$$k'_s = T(-0.0168 + 0.0000132T) \quad (12)$$

(2) Gas Film Diffusion Control Step(k_g)

$$\frac{k_g d_p y_{O_2}}{D_{O_2, N_2}} = 2.0 + 0.6(Sc)^{1/3}(Re)^{1/2} \quad (13)$$

$$*Re = \frac{d_p [v_p - v_g] \rho}{\mu} \quad *Sc = \frac{\mu}{\rho D_{O_2, N_2}}$$

③ 반응 생성물은 이산화탄소와 일산화탄소로 이때 이들의 생성비는 주위 산소의 농도에 의하여 결정된다.



이때 반응속도는 산소의 1차 반응으로 가정한다.

④ 석탄 입자의 반응 모델은 Shringking Core model을 사용한다.

⑤ ④에 근거하여, 반응이 일어난 후에 입자의 크기는 반응 초기와 동일하지만 생성되는 재에 의하여 입자의 밀도는 변한다.

⑥ 석탄 입자에 함유된 Volatile들은 석탄 반응과 더불어 석탄에서 분리되어 기상에 존재하게 되며, 이때 증발된 Volatile은 미량에 불과하므로 반응에는 참가하지 않는다고 가정한다.

⑦ 이러한 증발성분이 증발되는 양을 다음의 Gregory와 Littlejohn이 제안한 식을 이용하여 구하였다.

$$VV = VM - R - W \quad (15)$$

$$R = 10^{(11.47 - 3.961 \cdot \log_{10} T_g + 0.005 VM)} \quad (16)$$

$$W = 0.2(VM - 10.9) \quad (17)$$

여기서 VV는 석탄에서 증발되어 나온 증발 물질의 총량에 대한 무게 분율이며 VM은 석탄에 포함되어 있는 증발 물질의 무게 분율, T_g 는 기상의 온도($^{\circ}C$)이다.

가정 ②~⑤로부터 반응속도식은 아래와 같이 유도된다.

$$r_p = 4\pi \left(\frac{\rho_p - \rho_{Ash}}{\rho_{core} - \rho_{Ash}} \right)^{1/3} \cdot R^2 \cdot \frac{M_p}{V} \cdot k_s \frac{\rho_{O_2}}{M_{O_2}} \quad (18)$$

여기서 V는 control volume을 나타내며 ρ_p 는 입자 하나의 밀도이고, M_p 는 석탄 입자의 분자량을 나타낸다. ρ_{core} 와 ρ_{ash} 는 core와 입자를 둘러싸고 있는

재의 밀도이다. R은 재를 포함한 석탄 입자의 반경을 나타낸다.

기상을 구성하는 성분과 석탄 미분탄에 대한 연속식은 다음으로 계산할 수 있다. 이때 i가 C이면 CO_2 이면 산소, CO_2 이면 이산화탄소, CO이면 일산화탄소, 그리고 N_2 이면 질소에 해당한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(u\rho_i)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho_i)}{\partial y} + \frac{\partial(w\rho_{i2})}{\partial z} \\ & = D_i \left(\frac{\partial^2 \rho_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial z^2} \right) + R_i \end{aligned} \quad (19)$$

(19)식에서 반응항에 해당하는 관계식은 다음과 같다.

$$R_C = r_p - VV \cdot \rho_p \quad (20)$$

$$R_{CO_2} = -(2\gamma - 1) \cdot r_p \quad (21)$$

$$R_{CO} = -(2 - 2\gamma) \cdot r_p \quad (22)$$

$$R_{O_2} = r_p \quad (23)$$

$$R_{N_2} = 0.0 \quad (24)$$

6. 연소로 내에서의 에너지 수지 모델

에너지 수지식을 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho_i' C_{pi} \left(u \frac{\partial T_i}{\partial x} + v \frac{\partial T_i}{\partial y} + w \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \\ & = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \kappa T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \kappa T_i}{\partial y} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \kappa T_i}{\partial z} \right) \right] + S_{h,i} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 C_{pi} 는 입자의 열용량을 나타내며, T_i 는 control volume에서의 온도이다. 이때 i가 g이면 기상, p이면 입상을 의미한다.

(25)식에서 미분탄의 경우 Source $S_{h,p}$ 항은 입자의 반응에 관련된 항인 첫번째 항은 control volume내에서의 반응에 의한 생성열, 입자의 복사열 및 입자의 기체간의 열전달량을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

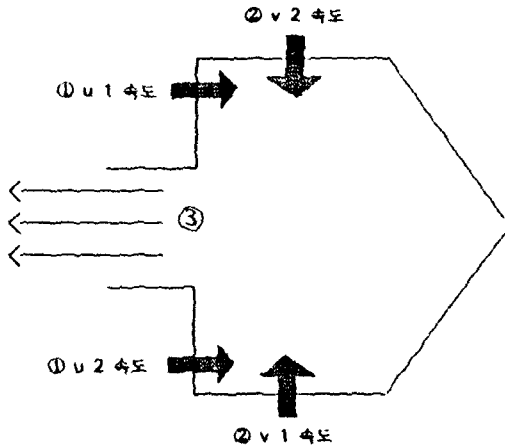


그림 2. 서천 화력 발전소 보일러에서의 공기 및 미분탄의 유입 및 유출.

$$S_{h,p} = -\{\epsilon\sigma(T_p^4 - T_g^4) - k_g \cdot I(T_p - T_g)\} \times n_p/V + \left(\frac{dN_p}{dt}\right) H_{com}/V \quad (26)$$

기체의 경우는 Source S_b 항은 control volume내에서 에너지 변화의 주된 요인을 입자와 기체간의 대류, 주변 환경과의 열전달, 그리고 입자의 운동 에너지 변화라 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{h,g} = -UA(T_g - T_w) + k_g \cdot n_p(T_p - T_g) \quad (27)$$

7. 경계조건 설정

본 연구에서 모사하고자 하는 대상인 서천 화력 발전소에서 사용되고 있는 연소로는 다음 그림 2와 같은 형태로써 공기의 주입부는 ①, 그리고 ②이고 미분탄은 ①에서만 주입된다. 그리고 과열기체와 연소 후 남은 석탄 입자는 ③을 통해 나간다. 기상과 미분탄입자 유동장을 계산할 때 벽면에 대한 경계 조건은 벽면으로 수직인 성분이 있는 경우에 한하여 2차 근사법을 이용하여 구했다. 기상과 미분탄 입자의 온도 분포를 계산할 때 벽면의 경계조건은 실제 벽의 온도를 사용했다.

8. 계산 알고리즘

본 연구에서의 편미분방정식을 풀기 위하여 cent-

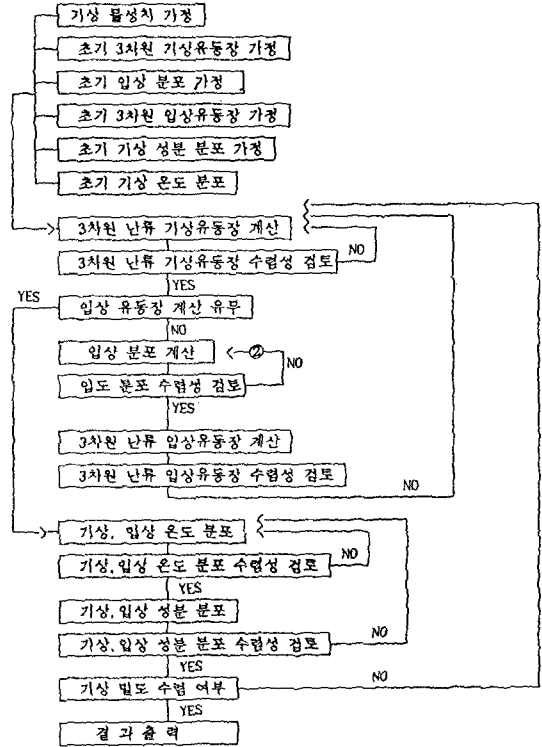


그림 3. 3속도 3차원 기상 및 입상 난류 유동장 해석을 위한 프로그램의 제어 루프.

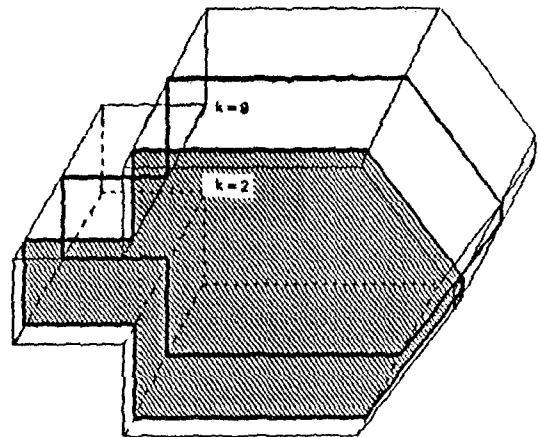


그림 4. 계산 결과를 도식화할 단면들.

ral integration method를 사용하였으며 grid point간의 간격은 계산오차를 최소화하기 위하여 각 방향에 대해서 동일하게 취하였다. 이때 사용한 grid point는 $20 \times 16 \times 18$ 개이며, 그림 1의 기하학적 비를 고려하여 실제 모형을 그대로 살려 유한요소법과

표 4. 표준 문제 계산을 위하여 사용한 조건

	① 속도 m/sec	② 속도 m/sec	입자지름 μm
1	8	12	100
2	12	8	100
3	11.5	11.5	100
4	11.5	11.5	10

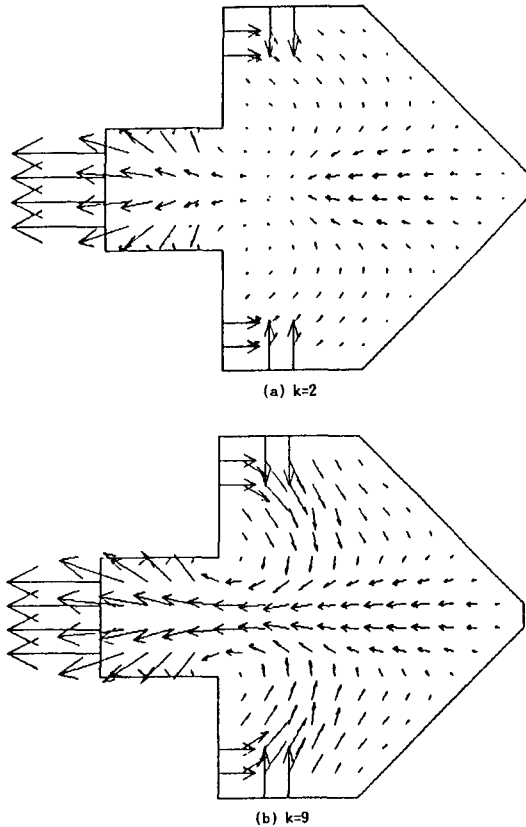


그림 5. 표 4에서의 경우 1에 해당하는 기상 유동장.

유사한 방법으로 grid point를 취했다. 계산에 이용한 점은 계산 알고리즘은 그림 4로 간단히 설명될 수 있다.

9. 결과 및 토론

계산은 표 4와 같이 유입 속도비와 입자 크기의 영향을 알아보기 위하여 4가지 경우에 대해서 계산하고 각 경우에 대하여 계산 결과인 기상유동장과

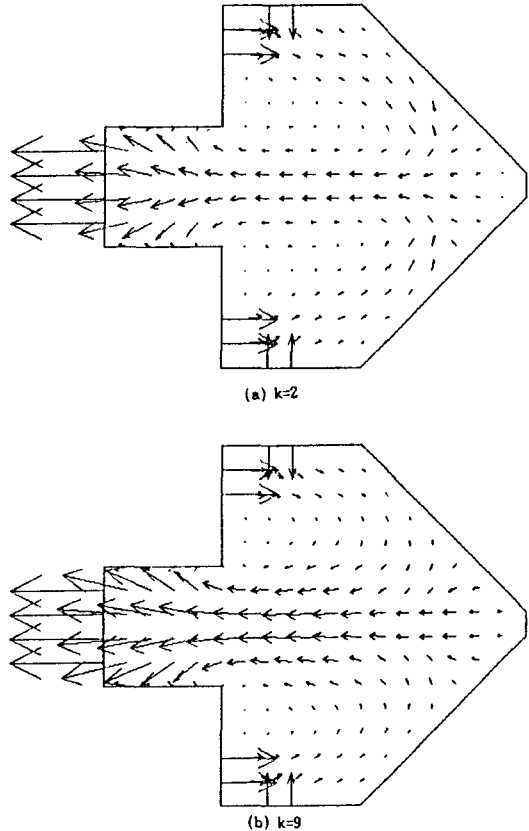


그림 6. 표 4에서 경우 2에 해당하는 기상 유동장.

기상온도분포를 각각 z방향으로 2번째(벽면에 가장 가까운 면), 9번째(중앙인 단면) 단면을 도시하였다. 이때 각 경우에서 공기와 석탄의 비는 1 대 1로 주었다.

그림 5와 그림 6과 같이 기상 유동장을 도시한 결과 유입되는 속도비에 따라 흐름이 중앙으로 몰리는 경향이 달라지는 것을 볼 수 있었으며 각 그림에서 모두 벽면에서의 흐름이 중앙에서의 흐름보다 약하게 나타났는데 이는 벽면에서는 유체가 벽면에 의한 마찰의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

그림 7과 그림 8은 석탄의 입자 크기에 따른 기상 유동장의 변화를 도시한 것으로 입자 크기에 따른 영향은 별로 없는 것으로 나타났다.

그림 9와 그림 10은 유입되는 속도비에 따라 온도분포를 도시한 것으로 각 그림에서 벽면에서의 온도가 중앙보다 더 높은 온도분포를 나타내었는데

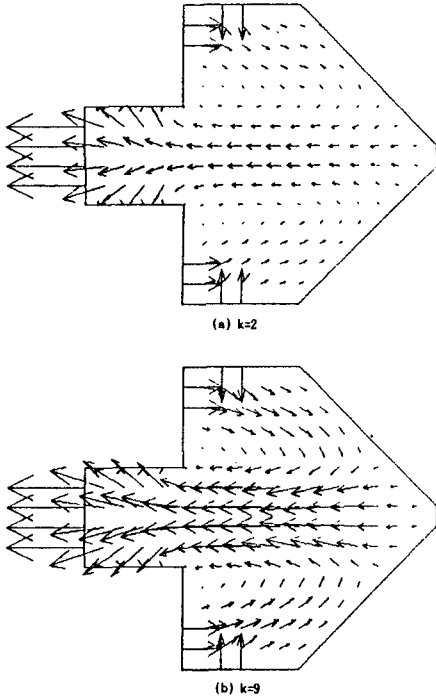


그림 7. 표 4에서 경우 3에 해당하는 기상 유동장.

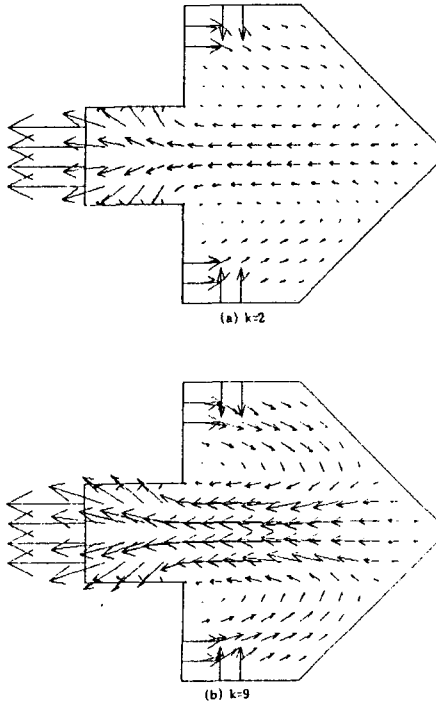
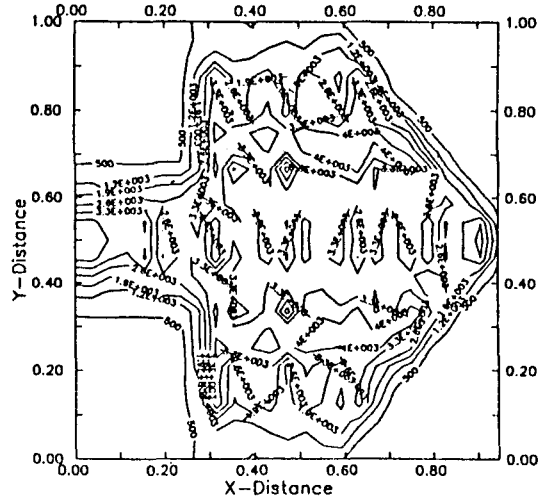
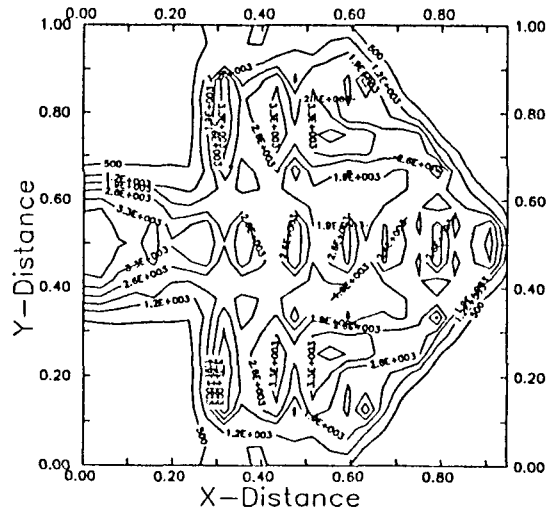


그림 8. 표 4에서 경우 4에 해당하는 기상 유동장.



(a) k=2

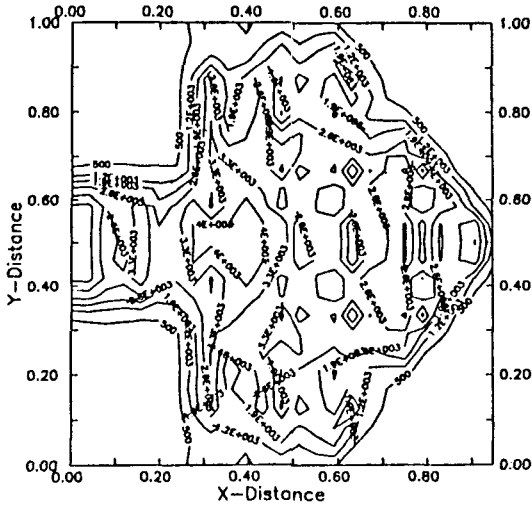


(b) k=9

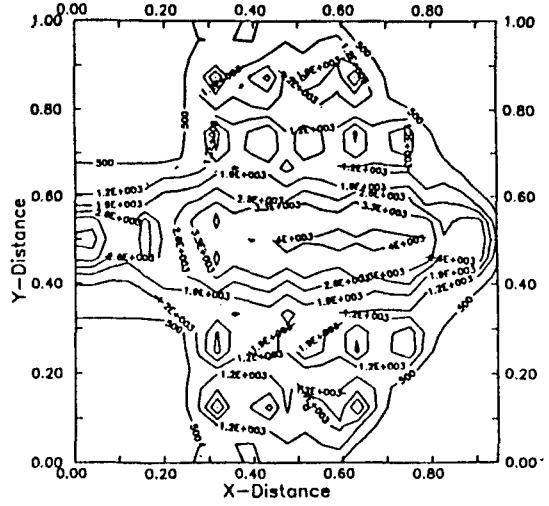
그림 9. 표 4에서 경우 1에 해당하는 기상온도분포.

이는 연소로를 단열계로 가정하여 외부로의 열손실이 없고 벽면에서의 입자의 체류시간이 중앙보다 길기 때문인 것으로 예측되며 앞으로 개선이 요구된다. 또한 1차 공기의 유속을 2차 공기의 유속보다 크게 하였을 때 열효율이 더 좋은 것으로 나타났는데 이는 입자의 연소로 체류시간이 더 길어지기 때문인 것으로 생각된다.

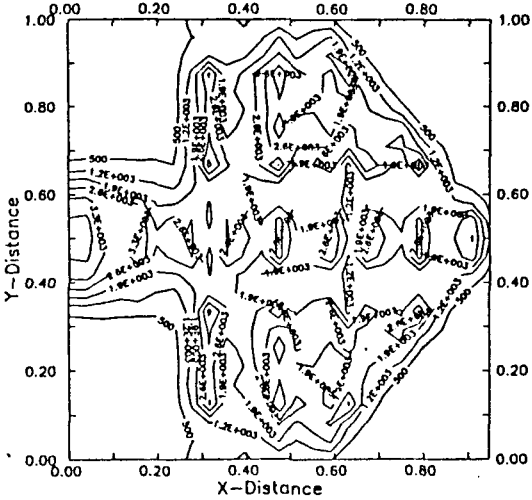
그림 11과 그림 12는 석탄의 입자 크기에 따른 기상온도분포를 도시한 것으로 입자의 크기가 작을



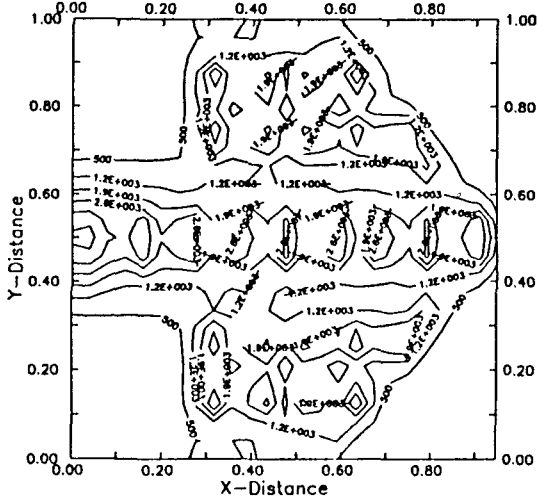
(a) k=2



(a) k=2



(b) k=9



(b) k=9

그림 10. 표 4에서 경우 2에 해당하는 기상온도분포.

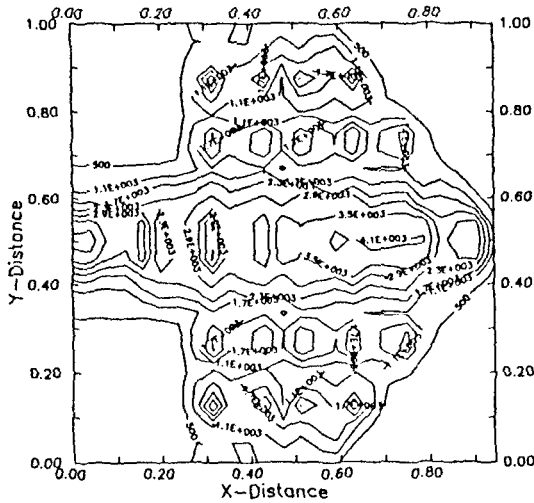
그림 11. 표 4에서 경우 3에 해당하는 기상온도분포.

수록 열효율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 반응이 입자 표면에서 일어나므로 입자의 크기가 작을수록 입자의 총 표면적이 커져 반응량이 많아지기 때문인 것으로 생각된다.

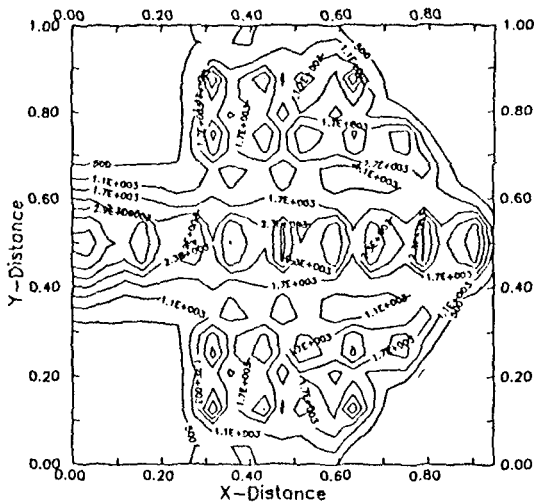
10. 결 언

현존하는 발전 설비에서 생산되는 에너지의 효율적인 이용을 도모하기 위하여, 미분탄과 공기가 함께 유입되는 연소로 내에서의 난류 유동장 및 반응을

해석하는 3차원 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 1) 연소로 내에 유입되는 입상의 연료와 기체의 흐름을 예측하기 위한 3차원 기상 및 입상 유동장 수학적 모델의 이론적 배경 및 모사 대상인 연소로에 적절한 가정을 도입하고 2) 유입된 연료와 기체의 반응장을 해석하기 위하여 수식 모델을 세우고 관련된 물성치를 이용하여 연소로 내부 현상을 모사 하였다. 여기서 미분탄의 불균일 반응, 휘발, 복사 및 서로 다른 방향에서 유입되는 1차 공기와 2차 공기의 혼합, 열손실 등의 연소로 내에서 일어날 수



(a) $k=2$



(b) $k=9$

그림 12. 표 4에서 경우 4에 해당하는 기상온도분포.

있는 제반현상이 고려되었으며 이를 수식화한 비선형 미분 방정식의 해를 구하기 위하여 유한 미분법을 적용하였다.

본 연구에서 제안한 모델을 이용하여 연소로 내에서의 미분탄 연소 거동을 예측하고 연소 효율에 중요한 영향을 미치는 1차 공기와 2차 공기의 주입속도와 석탄의 입자 크기가 연소 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

본 연구에서 모사하고 있는 대상 연소로는 서천

화력 발전소 보일러이며 본 연구의 최종 목적은 국내에서 조업 중에 있는 제반 연소로 내의 제반 현상을 예측 및 진단할 수 있는 모사 프로그램을 완성하고 나아가 조업조건을 개선하는 것으로 현재 연구가 계속 진행 중에 있다.

감 사

이 연구는 한국전력공사에서 주관하는 “석탄 연소 컴퓨터 프로그램 개발연구” 사업의 1차년도 연구 결과입니다. 그동안의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. H.H. Lowry, *Chemistry of coal Utilization*. Supplementary Volume, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1963.
2. M.A. Field, D.W. Gill, B.B. Morgan, and P.G.W. Hawksley. *Combustion of Pulverized Coal*. The British Coal Utilization Research Association, Leatherhead, Surrey, England, 1967.
3. K. A. Bueters, J. G. Cogoli, and W. E. Habelt. *Performance Prediction of Tangentially Fired Utility Furnaces by Computer Model*. 15th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1974, pp. 1245-1260.
4. D.G. Lilley, “Flow Field Modeling in Practical Combustors: A Review.” *Journal of Energy*, 3, 1979, pp. 193-210.
5. F.A. Williams and P.A. Libby. *Some Implications of Recent Theoretical Studies in Turbulent Combustion*. Proceedings from AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting, Pasadena, California, January 1980.
6. W.P. Jones and J.H. Whitelaw, “Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows,” *Prediction of Turbulent Reacting Flows in Practical Systems*, Presented at the Fluids Engineering Conference, Boulder, Colorado, edited by T. Morel, June 1981.
7. M.M. Gibson and B.B. Morgan. “Mathematical Model of combustion of Solid Particles in a Turbulent Stream with Recirculation.” *Journal of the Institute of Fuel*, 43, 1970, pp. 517-523.

8. T.H. Fletcher. *A Two-Dimensional Model for coal Gasification and Combustion*. Ph.D. Dissertation, Chemical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah, 1983.
9. S.V. Patanker. "Numerical Prediction of Three-Dimensional Flows." *Studies in Convection*, **1**, Edited by B.E. Launder, London: Academic Press, 1975.
10. A.K. Mehta, *Mathematical Modeling of Chemical Processes for Low BTU gasification of Coal for Electric Power Generation*. Final Report, ERDA Contract No. E(49-18-1545), Combustion Engineering, Inc., Windsor, Connecticut, August 1976.
11. K.M. Sprouse. *Theory of Pulverized Coal Conversion in Entrained flows*. Presented at 87th National Meeting of the AIChE, Boston, Massachusetts, 1979.
12. L.D. Smoot and D.T. Pratt. *Pulverized coal Combustion and Gasification*. New York: Plenum Press, 1979.
13. F.C. Lockwood, A.P. Salooja, and S.A. Syed. "A Prediction Method for Coal-Fired Furnaces." *Combustion and Flame*, **38**, 1980, pp. 1-15.
14. P.J. Smith. *Theoretical Modeling of coal and Gas-Fired Turbulent Combustion and Gasification Process*. Ph.D. Dissertation, Chemical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah, 1979.
15. J. Oh Hinze. *Turbulence*, 2d ed. New York: McGraw-Hill, 1967.
16. H. Tennekes and J.L. Lumley, *A First Course in Turbulence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1972.
17. B.E. Launder and D.B. Spalding. *Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 1972.
18. R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. New York: John Wiley and Sons, 1960.
19. G.L. Mellor and H.J. Herring. "A Survey of the Mean Turbulent Field Closure Models." *AIAA Journal*, Vol. 11, No. 5. May 1973, p. 590.
20. H.W. Liepmann. "The Rise and Fall of Ideas in Turbulence." *American Scientist*, Vol. 67, 1979.
21. E.K. Melville and N.C. Bray. "A Model of the Two-Phase Turbulent Jet." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **22**, 1979, pp. 647-656.
22. C.T. Crowe, M.P. Sharma, and D.E. Stock. "The Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows." *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 1977, pp. 325-332.
23. G.B. Wallis. *One-Dimensional Two-Phase Flow*. New York: McGraw-Hill, 1969.
24. Gregory, D.R., and Littlejohn, R.F., *The BWBR Monthly Bulletin*, **29**, 173, 1965.