

## 석탄 가스화기내의 유동장 특성 연구

조석연 · 서경원

아주대학교 화학 · 생물공학부

### A Study on the Characteristics of Flow Fields in a Coal Gasifier

Seok Yeon Cho and Kyung Won Seo

School of Chemical Engineering and Biotechnology, Ajou University

#### 요 약

본 연구에서는 실린더형의 가스화기로 주입되는 아역청 미분탄을 가스화시켰을 때 가스화기내의 반응성 유동장을 해석하였다. 입자크기에 대한 영향을 고려하기 위해 미분탄 입자를 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  및 100  $\mu\text{m}$ 의 크기로 각각 나누는 경우와 이들 4종류의 입자를 균일하게 혼합한 경우에 대하여 전산모사하였다. 모사결과, 석탄 입자크기가 커질수록 재순환 영역이 커짐을 알 수 있었으며, 4종류의 입자가 균일하게 혼합된 석탄입자를 가스화시킨 경우 한 종류의 크기를 각각 사용했을 때와는 다른 형태의 재순환영역이 주입벽과 측면벽에 각각 양분되어 형성됨을 알 수 있었다. 입자 수밀도가 높은 작은 석탄입자가 가스화될 경우 다량의 산소와 산화반응이 일어나기 때문에 수밀도가 작은 커다란 석탄입자가 가스화될 경우보다 주입구 부분에서 더 높은 온도분포를 보였지만 가스화기의 하단부에서는 복사에 의한 열손실과 더불어 산소가 고갈되어 산소의 농도가 급격히 낮아짐으로 인해 석탄입자들과의 반응이 미비하게 일어나 상대적으로 큰 입자가 가스화된 경우보다 가스온도가 더 낮았다. 출구에서의 온도분포는 석탄입자의 크기가 40  $\mu\text{m}$ 일 때 1,400~1,580°C, 60  $\mu\text{m}$ 일 때 1,480~1,700°C, 80  $\mu\text{m}$ 일 때 1,600~1,740°C, 100  $\mu\text{m}$ 일 때 1,630~1,790°C 그리고 4종류가 균일하게 섞였을 때 1,500~1,680°C로 각각 예측되었다.

**Abstract**— In this study numerical computations were performed to predict reacting flow fields of gasification processes of pulverized subbituminous coal in a cylindrical coal gasifier. To check the size effects of particles on flow fields in the gasifier, simulations were performed for five cases with four sizes of particles such as 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$ . Each case has a unique size of particles with one more case that has evenly mixed four sizes of particles. Predictions showed that the gasification which uses coals of the mixed sizes reveals more preferable gas velocity and temperature distributions than that uses coals of a unique size. Predicted gas temperature at the exit of the gasifier ranged 1,400 to 1580°C, 1,480 to 1,700°C, 1,600 to 1740°C, 1630 to 1790°C and 1500 to 1680°C for particle sizes of 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  and the evenly mixed four sizes, respectively.

#### 1. 서 론

석탄 가스화 복합 발전시스템의 핵심장치중에 하나인 석탄 가스화기는 설계 및 최적 운전조건을 선정하기 위해서 가스화기내 반응성 유동장을 해석할 필요가 있다. 그러나 석탄가스화기내로 주입되는 석탄은 가스화기내에서 복잡한 물리·화학적 과정, 난류성 거동을 나

타내기 때문에 가스화기내 반응성 유동장을 예측하기 매우 어렵다. 그러므로 미분탄의 연소 또는 가스화의 해석은 기체·고체상의 유체역학과 화학반응, 복사 열전달을 함께 고려하여야 하므로 매우 복잡한 모델이 요구된다. 이와같은 어려움에도 불구하고 대표적으로 알려진 미분탄 연소와 가스화 모델링에 대한 연구는 미국 Brigham Young University(PCGC-2)와 Imperial College

**Table 1. Review of pulverized coal-fired comprehensive computer program & applications<sup>2)</sup>.**

Authors	Description/Applications
Gibson & Morgan <sup>3)</sup> Lockwood <i>et al</i> <sup>4)</sup>	2-D axial-symmetrical cylinder type, stream function-vorticity method (1970) initiation of promoted intergral computer program, 2-D axial-symmetrical cylinder type, in dustrial boiler scale (1980, 1983, 1984)
Smith <i>et al</i> <sup>5)</sup> Hill <sup>6)</sup>	2-D axial-symmetrical cylinder type, lab. scale (PCGC-2) (1981) NO <sub>x</sub> model development, 2-D axial-symmetrical cylinder type (PCGC-2) (1983)
Boysan <i>et al</i> <sup>7)</sup> Benesch & Kremer <sup>8)</sup> Truelove <sup>9)</sup>	2-D axial-cylindrical type, cyclone furnace (1986) 3-D tangentially fired furnace, cross-section area 20 m×20 m utility boiler (1984) 2-D axial-symmetrical cylinder type, the modeling of flow in swirled pulverized-coal burners (1984, 1986)
Boyd & Kent <sup>10)</sup> Sowa <sup>11)</sup>	3-D tangenal inject furnace of 500MW power generation, 10.69×8.86×3.16 m utility boiler (1986) effects of injector on BYU gasifier performance (PCGC-2) (1987)
Gorner & Zinser <sup>12)</sup> Jang & Acharya <sup>13)</sup> Jang & Acharya <sup>14)</sup> Lee, Seo and Choi <sup>15)</sup> Smoot & Smith <sup>16)</sup>	3-D utility boiler brown coal, 300 MW (1988) improved moment model of coal particle in 2-D axial-symmetrical cylinder furnace (1988) Fuel NO <sub>x</sub> model development, 2-D axial-cylindrical type (1991) 3-D modelling of actually burner scale of seo-chun thermoelectric power plant (1992) coal swelling, devolatilization, and reactivity of char (FG-DVC) model development (PCGC-2) (1993)
Smoot & Smith <sup>16)</sup>	influence of buonacy and wall function development (PCGC-3)

에서 각각 개발한 프로그램을 주된 예로 들 수 있으며, Table 1에 제시된 바와 같이 그외의 많은 연구자들이 미분탄에 대한 연소 또는 가스화에 대한 해석용 프로그램을 개발하였다<sup>1,2)</sup>.

본 연구에서는 93-PCGC-2을 이용하여 특정 미분탄에 대한 가스화 반응을 해석하였으며, 이 93-PCGC-2는 미국 BYU(Brigham Young University)의 ACERC(Advanced Combustion Engineering Research Center)에서 1993년에 기존의 버전을 향상시킨 프로그램이며 기존의 PCGC-2<sup>16)</sup>에 여러 가지 개선된 점을 첨가하였다. 즉, 석탄의 팽윤, 화의 반응성, 석탄의 탈휘발화, thermal NO<sub>x</sub> 반응 등의 부모모델과 층류영역과 전이영역을 추가하였고, 에너지 방정식을 보강하였으며 1차 흐름이상의 주입구에서 고체를 주입할 수 있도록 하였다<sup>10)</sup>. 또한 93-PCGC-2을 이용하여 가화기내로 유입되는 입자상의 석탄연료와 기체의 반응성 유동장을 예측하기 위해 2차원 기상 및 입자상의 유동장에 관한 수학적 모델 및 모사대상인 가스화기에 대해 적절한 가정을 도입하여 가스화기의 내부 현상을 모사하였다. 특히 주입되는 석탄의 입자크기를 공경변수로 택하여 석탄 입자크기가 석탄 가스화 반응성 유동장에 미치는 영향을 집중적으로 연구하였다.

## 2. 수치모델 및 모사

본 연구에서 사용된 수치모델은 미분탄 연소, 가스화 및 여러 기-고, 기-기 반응성 흐름 및 비반응성 흐름의

2차원 정상상태 모델을 기본으로 하며, 기상에 대해서는 Eulerian계 해석법 그리고 입자상에 대해서는 Eulerian계와 Lagrangian계의 혼합 해석법을 모델화하여 난류성 화염내의 난류 유체역학과 난류 연소과정을 해석하였다. Table 2에는 기체-입자에 대한 Eulerian계 기상의 보존방정식들을 나타내었다. 대부분의 기상반응은 혼합정도에 의해 제한되어진다고 가정하였기 때문에 기상의 연소는 혼합분율을 근거로 하는 통계적 확률밀도 함수로 모델화하였다. 기상에 대해서는 (κ-ε)의 두 난류에 관한 식들을 사용하였으며, 입자상은 공기역학적 입자 항력과 난류성 입자분산의 영향을 포함하고 있다. 이런 입자들의 반응은 기상의 난류시간 크기에 비해 느린 것으로 고려하였다. 석탄의 탈휘발화, 화의 반응에 대한 속도는 시간 평균인 기체 물질들을 근거로 고려되었다. 이러한 석탄 화의 반응은 산소, 수증기, 이산화탄소에 의해 산화되는 비균일 반응으로 모델화하였다. 또한 비등방성이고 다중 산란인 입자와 기체의 복사 열전달도 포함하였다. 이러한 입자계의 지배방정식, 석탄의 반응 모델, 복사 열전달 모델들은 Smoot 등<sup>10)</sup>의 자료에 기술되어 있다.

공정의 모사를 위한 수치해석에는 기본 편미분방정식을 유한차분적분법으로 바꿔서 해를 구하는 TEACH CODE<sup>20)</sup>와 압력장 계산을 위한 SIMPLER(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, Revised) 알고리즘<sup>21)</sup> 및 미세입자계와 기상계를 연결하기 위하여 PSI-Cell(Particle Source-In-Cell)법<sup>22)</sup>을 도입하였다. 이런 수치 해석법을 이용하여 원하는 해를 얻기 위한 알고리즘

**Table 2. Gas phase conservation equations for the gas-particle/gas-droplet Eulerian reference frame<sup>24)</sup>.**

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \bar{u} \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \phi) - \frac{\partial}{\partial x} (D_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r D_{\phi} \partial \phi / \partial r) = S_{\phi}$$

$\phi$	$D_{\phi}$	$S_{\phi}$
$\bar{u}$	$\mu_c$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\mu_c \partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_c (\partial \bar{v} / \partial x)) + S_p^u + \bar{u} S_p^m$
$\bar{v}$	$\mu_c$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\mu_c \partial \bar{u}}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_c (\partial \bar{v} / \partial r)) - \frac{2 \mu_c \bar{v}}{r^2} + \frac{\bar{\rho} \bar{w} \bar{w}}{r} + S_p^v + \bar{v} S_p^m$
$\bar{w}$	$\mu_c$	$-\frac{\bar{\rho} \bar{v} \bar{w}}{r} - \frac{\bar{w}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_c)$
$\kappa$	$\mu_c / \sigma_k$	$\Phi - \bar{\rho} \epsilon$
$\epsilon$	$\mu_c / \sigma_{\epsilon}$	$(\epsilon / k) (C_1 \Phi - C_2 \bar{\rho} \epsilon)$
$\bar{f}_p$	$\mu_c / \sigma_f$	0
$g_{\epsilon}$	$\mu_c / \sigma_g$	$C_{g1} \mu_c [(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \bar{f}}{\partial r})^2] - \frac{C_{g2} \bar{\rho} \epsilon g_{\epsilon}}{k}$
$\bar{\eta}$	$\mu_c / \sigma_{\eta}$	$S_p^m$
$g_{\eta}$	$\mu_c / \sigma_g$	$C_{g1} \mu_c [(\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial r})^2] - \frac{C_{g2} \bar{\rho} \epsilon g_{\eta}}{k}$
$\bar{h}$	$\mu_c / \sigma_h$	$q_{h\epsilon}' + \bar{u} (\partial \bar{p} / \partial x) + \bar{v} (\partial \bar{p} / \partial r) + S_p^h + \bar{h} S_p^m$

where

$$\Phi = 2 \mu_c [(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \bar{v}}{\partial r})^2 + (\frac{\bar{v}}{r})^2] + (\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x})^2 + [r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{\bar{w}}{r})]^2 + (\frac{\partial \bar{w}}{\partial r})^2$$

$$\mu_c = \mu_t + \mu_l$$

$$\mu' = C_{\mu} \bar{\rho} k^2 / \epsilon$$

은 Fig. 1에 도시하였으며 그 절차는 다음과 같다.

1) 처음 Eulerian 기상 영역에 대한 변수들의 해는 입자들을 고려하지 않고 SIMPLE 또는 SIMPLER 알고리즘을 통하여 푼다.

2) 복사장은 플럭스 방법(Flux method)을 사용하여 푼다.

3) Lagrangian 입자상 영역은 대표되는 입자궤도들을 고려하여 풀어 입자의 생성항(source term) 영역을 계산한다.

4) 다시 갱신된 생성항 영역을 가지고 기상 영역에 대한 변수들을 푼다.

5) 단계 2의 복사장을 다시 계산하며 전체계산이 수렴될 때까지 계산은 반복된다.

단계 2에서부터 단계 4까지는 Fig. 1의 단계 7에서부터 단계 11까지를 의미한다. 전체 수렴은 단계 2-4의 입자 반복계산(particle iteration)이 여러번 수행되는 과정에서 기상의 변수들이 현저하게 변화되지 않을 때 도달되어진다. 유한차분식을 통한 수렴기준은 Smoot 등<sup>19)</sup>의 자료에 의해서 기술되어 있다. 본 연구에서는 효율적인

해석을 위하여 수치모델 정의시 기상과 입자상에 대해 다음과 같이 가정하였다<sup>19)</sup>.

기상계의 가설

1) 계는 정상상태의 축대칭 실린더형의 좌표계를 사용하고 기하학적인 구조는 2차원 축대칭의 구조로 해석한다.

2) 일반적인 보존식에 의하여 지역적으로 묘사될 수 있도록 기상을 난류, 연속 반응장이라고 가정한다.

3) 기체는 시간에 대해 정상상태라고 가정한다.

4) 여러가지 기체의 물성(밀도, 온도, 조성 등)은 확률 밀도함수(Probability Density Function)나 난류의 특성에 따라 임의로 변한다고 가정한다.

5) 기체의 body force는 무시한다.

6) 기체는 뉴턴 유체라고 가정한다.

7) 기체의 팽창은 작은 값을 갖는다고 가정하여 운동량 방정식에서 무시한다.

8) 미분탄 입자가 기체의 난류정도에 미치는 영향은 경험식을 이용한다.

고체 입자계의 가설

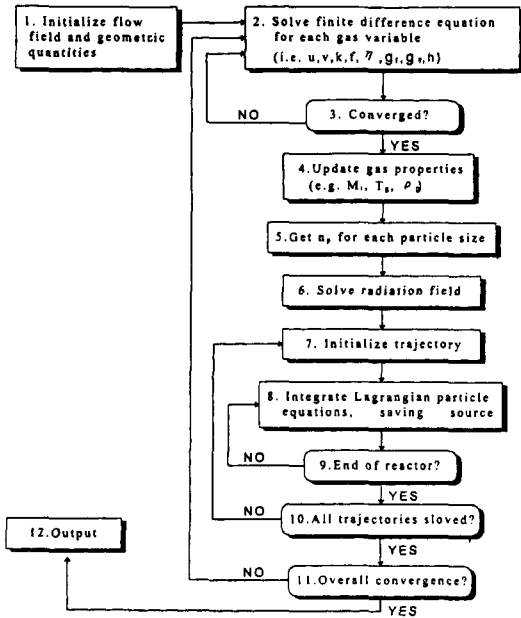


Fig. 1. Information flow for simulation<sup>19)</sup>.

1) 입자들은 기상으로 분산되어지며 입자와 입자사이의 영향은 무시한다.

2) 기상계와 같이 열적평형에 있다고 가정한다.

본 연구에서는 Fig. 2에서 나타낸 것과 동일한 외형을 갖는 계를 반경방향과 축방향으로 37×100의 격자로 나누어 수치해석을 실행하였으며, 특히 3차 흐름이 있는 지역에서는 계의 종속변수들의 수치가 급하게 변할 것을 예상하여 격자를 밀집되게 나누었다. 이러한 제어 체적(control volume)에 대한 2차 편미분 지배방정식을 유한차분법을 이용하여 선형의 유한 차분방정식을 유도하였으며, line-by-line TDMA(Tri-diagonal matrix algorithm)를 이용하여 이것의 해를 구하였다.

### 3. 모사 결과 및 토론

#### 3-1. 모사조건

본 연구에서 사용된 계는 2차원 축대칭의 실린더형 가스화기로서 Fig. 2에 보인 바와 동일한 외형을 가지고 있다. 모사를 위한 반응기의 크기, 각 흐름의 유속, 기체·고체입자의 물리적 성질과 기체·고체의 유입비율 등의 모사조건을 Table 3에 제시하였다. 모사대상인 미분탄은 Alaska Usibelli 아역청탄(원소분석 C: 66.18%, H: 4.97%, O: 15.81%, N: 0.54%, S: 0.27%, Cl: 0.04%, Ash: 12.19%)이며<sup>20)</sup>, 이 미분탄은 1차 주입구 흐름을 통해 아르곤 기체와 함께 주입되는데 이때 미분탄의 주입

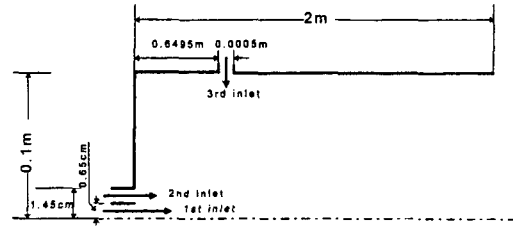


Fig. 2. Schematic diagram of a coal gasifier.

선속도는 유체와 동일한 선속도로 유입되는 것으로 가정하였다. 그리고 2차 주입구 흐름에서는 산화제인 산소가 주입되며, 흡착제는 황화합물을 흡착시키기 위해 측면벽을 통해서 3차 주입구 흐름으로 주입된다. 미분탄 입자를 40 μm, 60 μm, 80 μm 및 100 μm의 크기로 각각 나눈 경우와 4가지의 입자가 균일한 양으로 섞여 있는 경우에 대해서 모사를 실시하였다.

#### 3-2. 모사결과 및 토론

본 연구에서는 Fig. 2에서 보인 바와 같은 유형의 계를 기본 가스화기로 설정하여 전산모사를 하였으며, 이때 1차 주입구 흐름으로 공급되는 석탄입자의 크기가 가스화기 내부의 유동특성 및 입자들의 거동, 가스의 온도 등에 미치는 영향을 고려해 보았다. 1차 주입구 흐름으로는 온도가 356 K인 아르곤과 석탄이 각각 4.0, 16.0 kg/h로 주입된다. 2차 주입구 흐름은 산화제인 산소가 온도 586 K, 15.3 kg/h로 흐르며, 3차 주입구 흐름(측면 주입구)에서는 온도 356 K인 아르곤과 흡착제가 각각 4.7, 48.0 kg/h로 흐른다. 3가지 주입구에서의 난류세기는 0.1이며, 선회수는 고려하지 않았다.

Fig. 3은 가스화기내에서 석탄입자 크기에 따른 유선과 속도벡터를 나타낸 것이다. 이 그림은 대칭인 실린더형의 가스화기를 나타내며, 중심선 상단은 유선으로, 하단은 속도벡터로 가스화기 내부의 유동장 흐름을 각각 묘사하였다. 그리고 Fig. 4는 지정된 10개의 시작점으로부터 출발하는 단일 입자들의 궤도를 나타내고 있으며, 이 궤도들은 단일 입자들이 가스화기 내에서 이동하는 경로를 구체적으로 보여주고 있다. Fig. 3(a)에 도시한 그림은 1차흐름으로 40 μm의 직경을 갖는 균일한 석탄을 아르곤과 함께 축방향으로 유입시켰을 때의 유동장 결과이다. 이 그림을 통하여 주 흐름과 분리된 재순환 영역이 주입벽과 측면벽 사이에 형성됨을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)부터 (d)에 도시한 결과에서 볼 수 있듯이, (a)에 보인 결과와 동일한 형태의 유동장이 형성됨을 알 수 있다. 그러나 이렇게 형성된 재순환 영역들은 석탄입자의 크기가 커질수록 더 확대되었다. 이는 유체로부터 항력을 받아 흐르는 석탄입자들은 입자가 커질수록 관

**Table 3. Input parameters for coal gasification.**

feed rates	primary gas(kg/h)		3.996
	secondary gas(kg/h)		15.300
	tertiary(sidewall) gas(kg/h)		4.680
	coal in primary(kg/h)		15.984
	sorbent in tertiary(kg/h)		47.952
inlet gas properties	primary	swirl number	0.0
		turbulent intensity	0.1
		temperature(K)	356.0
		mole fractions(Ar)	1.0
	secondary	swirl number	0.0
		turbulent intensity	0.1
		temperature(K)	589.0
		mole fractions(O <sub>2</sub> )	0.0
	tertiary	swirl number	0.0
		turbulent intensity	0.1
		temperature(K)	356.0
		mole fractions(Ar)	1.0
particle solid density(kg/m <sup>3</sup> )		134.0	
coal particle parameters	initial analysis	raw coal	0.941
		ash	0.059
		C	0.754
	elemental analysis(daf)	H	0.0566
		O	0.1801
		N	0.0062
		S	0.0031
sorbent particle parameters	particle solid density(kg/m <sup>3</sup> )		1793.0
	BET surface area(sq m/g)		1.0E+05
geometry	primary tube diameter(m)		0.013
	secondary tube diameter(m)		0.029
	chamber diameter(m)		0.2
	chamber length(m)		2.0
reactor parameters	reactor outlet pressure(N/m <sup>2</sup> )		1.84E+05
	side wall temperature(K)		1100.0
computational grid		37×100	

성력이 커지기 때문에 반경방향보다는 축방향으로 더 크게 운동하기 때문일 것이다. 이로 인해 큰 입자는 주입 벽과 측면벽사이를 더 떨어져서 흐르므로 재순환영역은 그 만큼 더 크게 확장되었다. Fig. 3(e)에 도시한 그림은

각 크기별(40, 60, 80, 100 μm) 입자가 균일하게 혼합된 석탄을 가스화시켰을 때 얻어진 유동장 결과이다. (e)에 도시된 결과를 통해 크기가 다른 입자들이 균등하게 섞인 석탄을 가스화시킨 경우 재순환 영역내로 난류 확산

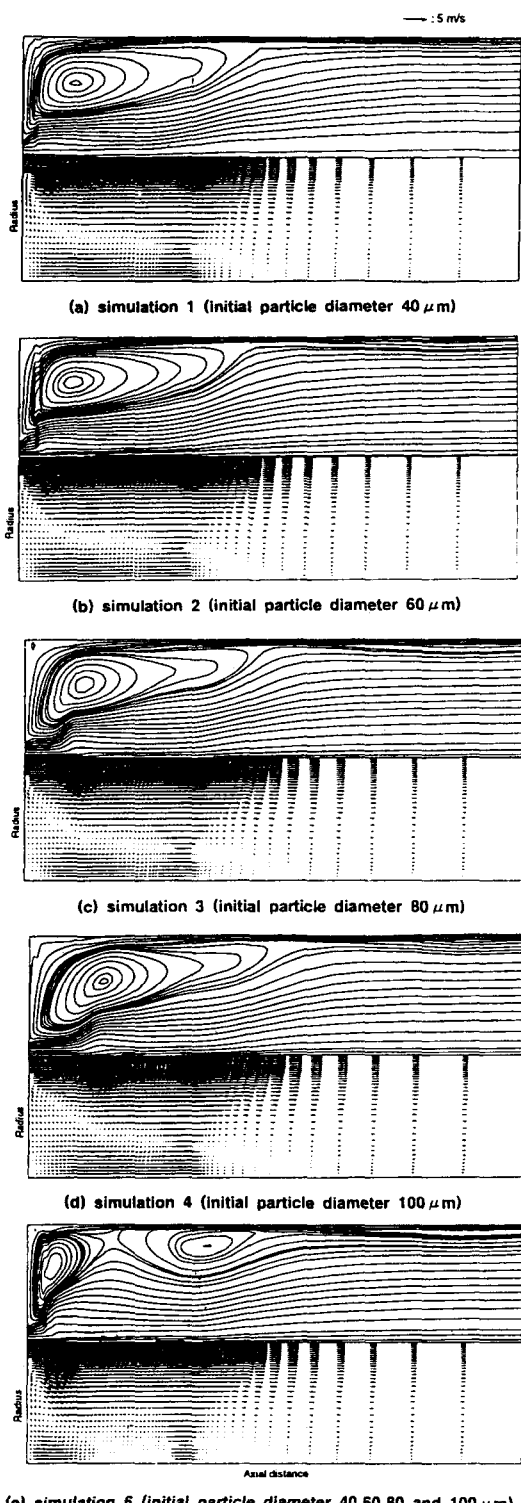


Fig. 3. Gas phase velocity field and stream line in a coal gasifier.

되어 온 서로 다른 입자가 이 영역내에서 유체로부터 받는 항력이 다르며 이로 인하여 작은 입자부류와 큰 입자부류들의 크로마토그래픽 분리(chromatographic separation) 현상에 의해서 재순환 영역이 둘로 나누어지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3에 보인 가스화기내의 속도분포를 보면, 입자크기에 관계없이 1차 주입구 흐름에서는 선속도가 3.3 m/s이었으며, 2차 주입구 흐름에서는 선속도가 6.9 m/s이었다. 그러나 유체의 점성력때문에 축을 중심으로 속도가 크게 분포되었다. 또한 유체가 입자에 미치는 항력의 영향으로 가스화시킬 석탄입자가 작을수록 가스화기내의 속도분포는 더 크게 분포되었다.

Fig. 4에서는 가스화기 내에서의 입자궤도를 도시한 결과로써, 그 중 (a)에 도시한 결과를 보면 10번째의 시작점에서 출발하는 입자들은 재순환 영역을 한 번 순회한 뒤 빠져나가는 특징을 가지고 있다. 또한 이 그림에서 나타난 결과와 (b)-(d)에 도시된 결과를 비교해 보면, 입자궤도들이 가스화기 상단부터 넓게 퍼져나감을 알 수 있다. 그러나 더 큰 입자를 가스화시킨 경우 (b)-(d)에 도시된 결과와 같이 석탄 입자가 커질수록 가스화기 상단부터 서로 밀집된 입자궤도들이 서서히 퍼져나감을 알 수 있었다. 이는 입자가 커질수록 관성력이 커지게 되어 반경방향보다는 축방향으로 더 크게 운동하기 때문이다. (e)-(h)에 도시된 결과는 4 종류(40, 60, 80, 100 μm)의 입자크기를 균일하게 섞은 석탄을 가스화시켰을 때의 입자궤도들이다. 10개의 시작점중 4개의 시작점을 선택하여 각각 입자의 운동 궤도들을 나타내었다. 각 시작점에서는 4종류의 입자가 동시에 출발하여 각자의 입자궤도들을 가진다. 그러므로 특정한 지점에 동시에 존재하는 같은 크기의 입자라 할지라도 각 입자들이 거처온 경로들이 다르기 때문에 각 입자들의 특성은 다르다. 이렇게 도시된 Fig. 4는 Fig. 3에 나타난 유동장 흐름의 특성을 보충 설명해 준다. Fig. 4(a)부터 (d)에 보인 결과들은 Fig. 3(a)부터 (d)에 도시한 결과를 검증해 줄 수 있다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이, 석탄입자의 크기가 커질수록 관성력의 영향을 더 받으므로, 큰 석탄 입자를 가스화시킬 경우 입자궤도와 유체의 주흐름 경로가 재순환 영역의 경계에서 완만하게 되어 재순환 영역이 그만큼 더 확대됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(e)부터 (h)에 도시된 결과들로부터 Fig. 3(e)에 보인 흐름의 특성을 검토하면 Fig. 3에서 언급한 재순환 영역의 분리로 인해 (h)에 도시된 10번째의 시작점에서 출발된 입자궤도는 이 영역의 외곽을 따라 흘러 지나감을 알 수 있다. 결국, 이렇게 형성된 재순환 영역에 존재하는 고온의 기체들이 가스화기로 들어오는 반응물에 열을 전달하여 반응물들이 초기에 쉽게 연소할 수 있도록 도와준다.

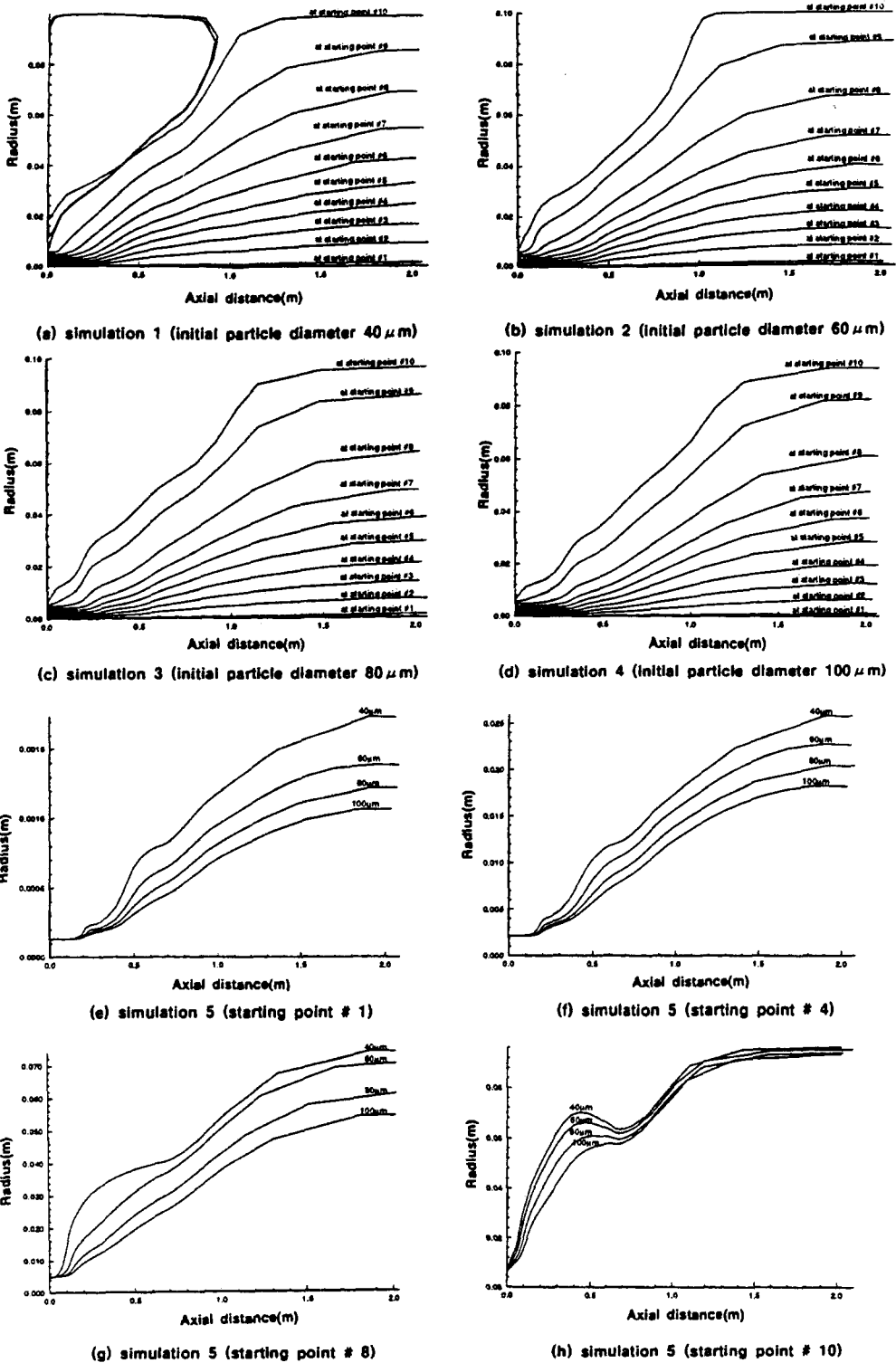


Fig. 4. Predicted particle trajectory plots in a coal gasifier.

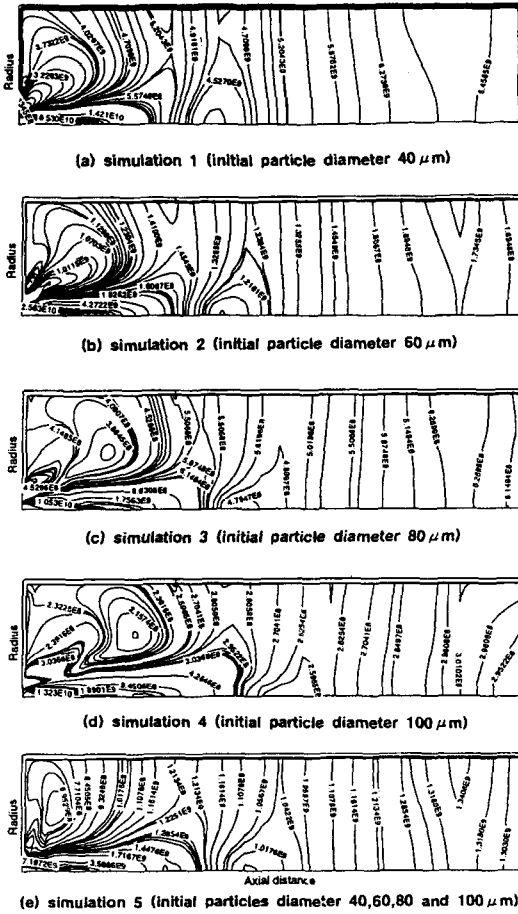


Fig. 5. Predicted particle number densities in a coal gasifier.

Fig. 5는 단위부피당 입자 수를 나타내는 입자 수밀도 그림이다. Fig. 5(a)부터 (e)에 도시한 결과에서 볼 수 있듯이 입자 수밀도가 주입구 부분에서 높게 나타났으며, 주입구로부터 점차 멀어질수록 체류시간이 긴 재순환 영역과 가스화기 전방부분으로 석탄입자가 분산되어 낮은 입자 수밀도를 보이다가 가스화기 중간이후 부터는 재순환 영역에서 다시 유출된 석탄입자들과 주 흐름에 동반된 석탄입자들에 의해 입자 수밀도가 점차 증가함을 보였다.

Fig. 6은 가스화기 내의 온도분포 그림이다. Fig. 6(a)부터 (e)에서 볼 수 있듯이 입자 수밀도가 높은 지역인 주입구 부근에서 높은 온도분포가 형성되었다. 이는 과량의 산화제가 다수의 입자들과 조우하여 산화반응을 일으키기 때문이다. 이렇게 형성된 높은 온도분포는 석탄입자의 크기에 따라 다소 그 위치가 변했다. 석탄입자가 클 경우 기체와 함께 동일한 속도로 주입되는 석탄

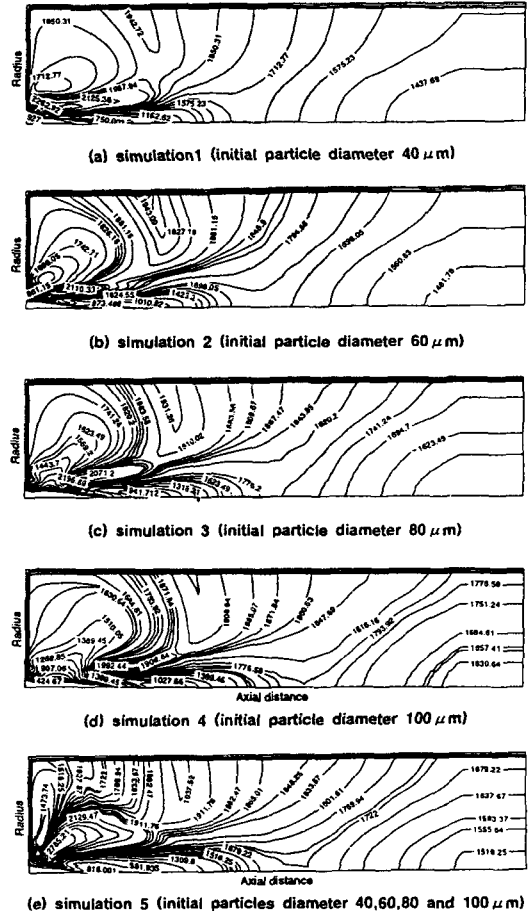


Fig. 6. Predicted contours of gas temperature in a coal gasifier.

입자는 기체에 의해 큰 항력을 받으므로써 석탄입자의 분산정도가 낮아져 산화제와 쉽게 섞이지 않는다. 그러나 주입구에서 이격된 지점에서는 가스의 선속도가 줄어든 만큼 항력이 작아지므로 주입된 다량의 산화제와 석탄입자들이 쉽게 섞이고 반응하여 가스온도가 높아지게 된다. 특히, Fig. 6(e)에 도시한 결과에서 볼 수 있듯이 여러 종류의 입자가 균일하게 섞여 있을 때가 단일 크기의 입자만을 가스화시킬 때보다 가스화기 상단에서 높은 온도분포를 보임을 알 수 있다. 이것은 입자크기가 작은 석탄입자들이 먼저 연소하여 발생된 높은 열을 주입구 부근에 있는 다른 입자들에게 제공해 주므로써 큰 석탄입자가 산소와 쉽게 반응하도록 도와주기 때문이다. 단일 크기의 작은 석탄입자를 가스화시킨 경우에 입자 수밀도가 높으므로 산화제와 접촉면적이 넓어져 가스화기 상단에서는 다량의 산화제와 석탄입자가 산화반응을 일으켜 산화제를 거의 다 소모시킨다. 이 결과로 인해



작은 입자로 가스화시킨 경우 가스화기의 상단부에서는 빠른 산화반응으로 가스온도가 높았지만 가스화기의 중간이후 부터는 더 큰 크기의 석탄입자로 가스화를 시킨 경우보다 낮은 온도분포를 보였다. 이는 큰 입자를 가스화를 시킨 경우 가스화기의 중간이후 부터는 소모되지 않은 산화제와 석탄입자들이 계속 산화반응을 진행하기 때문에 오히려 가스의 온도가 높아지게 되는 것으로 추론된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 출구에서의 가스의 온도분포는 석탄입자의 크기가 40  $\mu\text{m}$ 일 때는 1,400°C부터 1,580°C, 60  $\mu\text{m}$ 일 때는 1,480°C부터 1,700°C, 80  $\mu\text{m}$ 일 때는 1,600°C부터 1,740°C, 100  $\mu\text{m}$ 일 때는 1,630°C부터 1,790°C로 각각 예측되었으며 4종류의 크기가 균일하게 혼합되었을 때는 1,500°C부터 1,680°C로 예측되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실린더형의 가스화기로 주입되는 아역청 미분탄을 가스화시켰을 때 가스화기내의 반응성 유동장을 해석하였다. 이 때 입자크기에 따른 속도분포 및 온도분포의 영향을 고려하기 위해 미분탄 입자를 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  및 100  $\mu\text{m}$ 의 크기로 각각 균일하게 나누는 경우와 4가지의 입자가 균일한 양으로 혼합된 경우에 대하여 전산모사를 하였다. 해석결과, 석탄입자 크기가 가스화기 내의 속도분포와 온도분포에 상당한 영향을 줌을 확인하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 주입구의 화염불꽃을 안정화시키는 재순환 영역은 석탄입자의 크기가 커질 수록 주입벽과 측면벽사이내에서 점차 확대되었으며, 4종류의 입자크기가 균일하게 혼합된 경우에 있어서는 주입벽과 측면벽에 각각 양분되어 재순환 영역이 형성되었다.

2) 입자 수밀도가 높은 작은 석탄입자가 가스화될 경우 다량의 산소와 산화반응이 일어나기 때문에 수밀도가 작은 커다란 석탄입자가 가스화될 경우보다 주입구 부분에서 더 높은 온도분포를 보였지만 가스화기의 하단부에서는 산소가 고갈되어 급격히 산소의 농도가 낮아짐으로 인해 석탄입자들과의 반응이 미비하게 일어나 상대적으로 큰 입자가 가스화된 경우보다 가스온도가 더 낮았다.

3) 작은 석탄입자를 가스화시킨 경우 석탄입자의 운동 궤도는 가스화기 상단부터 넓게 퍼져 나가는 경향을 갖지만, 작은 입자보다 큰 관성력을 받는 커다란 석탄입자들의 운동 궤도는 밀집된 형태로 서서히 가스화기내로 퍼져나갔다. 그 결과, 커다란 석탄입자를 가스화시킨 경우 입자 분산에 영향을 주어 상단과 하단의 입자 수밀도차가 커졌고 유체의 유동에 있어서는 재순환 영역

을 확장시켰다. 그러므로 단일입자 크기의 석탄 보다는 여러종류의 크기가 섞인 석탄을 사용하는 것이 가스 온도 분포와 속도 분포면에서 가스화 반응에 더 유리할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 '3톤/일급 건식 석탄 가스화기 특성에 관한 연구'의 일환으로 대우 고등기술연구원으로부터 지원받아 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 사용기호

$x, r$	: axial radial coordinate
$u$	: favre average axial velocity, m/s
$v$	: favre average radial velocity, m/s
$u$	: favre average tangential velocity, m/s
$\rho$	: reynolds average density, $\text{kg/m}^3$
$\mu_e$	: effective viscosity, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$
$\mu_t$	: turbulent viscosity, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$
$\mu_l$	: laminar viscosity, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$
$C_{11}, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	: turbulence model constansts
$C_{g1}, C_{g2}, \sigma_g, \sigma_g, \sigma_h$	: turbulent combustion model constansts
$g'_{18}$	: the net volumetric heat addition due to radiation, $\text{W/m}^3$
$k$	: turbulent kinetic energy, $\text{m}^2/\text{s}^2$
$\epsilon$	: dissipation rate of turbulence energy, $\text{m}^2/\text{s}^3$
$f$	: mixture fraction
$\tilde{f}_p$	: favre-average mixture fraction corrected for h
$g_\epsilon$	: variance of the mixture fraction
$g_n$	: variance of the coal-gas mixture fraction
$\tilde{\eta}$	: favre-average coal gas mixture fraction
$\tilde{h}$	: faver-average enthalpy, J/kg
$S_p^u, S_p^v$	: aerodynamic drag effects of the particle on the axial and radial components of momentum
$S_p^m$	: net rate of mass addition per unit volume due to particle reaction
$g$	: gas
$p$	: particle

#### 참고문헌

- 이진욱, 윤용승: "석탄 가스화기내의 기체-고체 이 상유동장에 대한 수치해석 연구", 한국에너지공학 회지, 4(3), 331-337 (1995).

2. 이선경 외: "전산유체역학을 이용한 분류층 석탄가스화기 설계연구", 한국에너지공학회지, **4**(1), 23-30 (1995).
3. Gibson, M.M. and Margan, B.B.: "Mathematical model of combustion of solid particles in a turbulent stream with recirculation", *J. Fuel* **43**, 517-553 (1970).
4. Lockwood, F.C., Salooja, A.P and Syed, S.A.: "A prediction method for coal-fired furnaces", *Combustion and Flame* **38**, 1-15 (1980).
5. Lockwood, F.C. and A.P. Salloja: "The prediction of some pulverized bituminous coal flames in a furnace", *Combustion and Flame*, **54**, 23-32 (1983).
6. Lockwood, F.C., Rizvi, S.M.A., Lee, G.K. and Whaley, H.: "Coal combustion model validation using cylindrical furnace data", Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 513-522 (1984).
7. Smith, P.J., Fletche, T.J. and Smoot, L.D.: "Model for pulverized coal-fired reactor", 18th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA 1285 (1981).
8. Hill, S.C.: "Modelling of nitrogen pollutants in turbulent pulverized coal flames", Ph.D, Dissertation Chemical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah (1983).
9. Boyd, R.K. and Kent, J.H.: "Three-dimensional furnace computer modeling", presented at the 21st Symposium (Int'l) on Combustion, Munich, Germany (1986).
10. Benesch, W. and Kremer, H.: "Mathematical modeling of fluid flow and mixing in tangentially-fired furnaces, Twentieth Symposium (Int'l) on Combustion/The Combustion Institute, 549-557 (1984).
11. Truelove, J.S.: "The modeling of flow and combustion in swirled pulverized-coal burners", Twentieth Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, 523-530 (1984).
12. Truelove, J.S.: "Prediction of the burner flow and combustion in swirling pulverized-coal flames" presented at 21st symposium (Int'l) on Combustion, Munich Germany (1986).
13. Boysan, F., Weber, R., Swithenbank, J. and Lawn, C.J.: "Modeling coal-fired cyclone combustors", *Combustion and Flame* **63**(73), (1986).
14. Gorner, K. and Zinser, W.: "Prediction of three dimensional flows in utility boiler furnaces and comparison with experiments", *Combustion Science and Technology*, **58**, 43-57 (1988).
15. Jang, D.S. and Acharya, S.: "Improved modeling of pulverized coal combustion in a furnace", the Trans. of ASME, *J. Energy Resources Tech.*, **110**, 124-132 (1988).
16. Jang, D.S. and Acharya, S.: "Moment closure model for nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion", Accepted for publishing in *ASME J. Energy Res. Tech.*, **113**, 117 (1991).
17. 이경옥, 서경원, 최병선: "미분탄 연소로의 난류 유동장 및 반응장 해석을 위한 3차원 모델", 한국에너지공학회지, **1**(1), 76-86 (1992).
18. Smoot, L.D. and Smith, P.J.: "User's Manual for a Computer Program for 2-Dimensional Pulverized Coal Gasification and Combustion Model (PCGC-2)", Combustion Laboratory, Brigham Young University (1983).
19. Smoot, L.D. and Smith, P.J.: "User's Manual for a Computer Program for 2-Dimensional Pulverized Coal Gasification and Combustion Model (93-PCGC-2)", Combustion Laboratory, Brigham Young University (1993).
20. Gosman, A.D. and Pun, W.M.: "Lecture Notes for Course Entitled, Calculation of Recirculating Flow", Imperial College, London (1973).
21. Patankar, S.V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Co., New York (1980).
22. Crowe, C.T., Sharma, M.P. and Stock, D.E.: *J. Fluid Engineering, Trans, ASME*, **325**, (1977).
23. 석탄가스화 복합사이클 발전시스템 실용화 개발(II) 년차 보고서, 상공자원부 (1994).
24. Smoot, L.D. and Smith, P.J.: "Coal Combustion and Gasification", Plenum Press, New York, p. 245-264, 349-371 (1985).
25. Badzioch, S. and Hawksley, P.G.W.: "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", *I&C Proc. Des. Dev.*, **9**, 521-530 (1970).
26. Sunavala, P.D.: "Mixing and Combustion in Pulverized Coal Flames", *J. Fuel*, **41**, 477-482 (1968).
27. Launder, B.E. and Spalding, D.B.: "Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, Loondon (1972).
28. Roache, P.J.: "Computational Fluid Dynamics", Hermosa Publishers, Albuquerque, NM (1976).
29. Brown, B.W., Smoot, L.D., Smith, P.J. and Hedman, P.O.: "Measurement and Prediction of Entrained-Flow Gasification Processes", *J. AIChE*, **34**(3), 435-446 (1988).