

## 전산유체역학을 이용한 분류층 석탄가스화기 설계연구

이선경 · 나혜령 · 장동순 · 정진도\* · 지평삼\*

충남대학교 환경공학과

\*한전기술연구원

### A Study on the Design of Coal Gasification Unit using Computational Fluid Dynamics

Sun Kyong Lee, Hye Ryung Na, Dong Soon Jang, Jin Do Chung and Pyung-Sam Ji

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

\*Korea Electric Power Corporation Research Center

#### 요 약

분류층 가스화기 설계를 위한 일차연구로서 가스화기의 종횡비, 주입방법, 선회강도 및 주입속도 등에 따른 비반응 난류장 특성을 수치해석적 방법에 의해 파악하였다. 수치해석은 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분방법을 이용하였으며 압력과 속도의 연계문제는 SIMPLEC 알고리즘을, 레이놀즈 전단력은  $\kappa$ - $\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 입자계적 계산은 공기역학적 항력만을 고려하였으며 비선형적인 공기저항력에 의한 난류변동상관모델은 고려하지 않았다. 이차공기 주입방법(parallel injection과 nonparallel 30° injection)에 따른 수치해석을 수행하여 Ar tracer의 질량분율 및 기타 속도에 대한 實驗資料와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 나아가서 假想的인 가스화기 모델을 대상으로 가스화기의 종횡비, 선회강도, 주입속도 및 주입각등에 따른 와류 形成 위치등을 포함한 유동장 특성 및 입도에 따른 궤적분석을 시도하였다.

**Abstract**—A series of numerical study has been performed for the preliminary study for the design of the coal gasification unit as a function of a number of important parameters such as gasifier aspect ratio, injection angle of secondary air, swirl intensity and injection velocity. A control volume based finite-difference method is used by incorporating the Patankar's SIMPLE methodology: the resolution of the pressure-velocity coupling is made by the SIMPLEC algorithm and the standard  $\kappa$ - $\epsilon$  model is used for the modeling of Reynolds stress. In order to calculate the particle trajectory, aerodynamic drag is taken into account, but the turbulent correlation of fluctuation velocity between particle and gas is not considered at this stage. The predicted result of the concentration Ar tracer and velocity data are compared well with the experimental data. Further a systematic investigation has been made in term of swirl intensity and injection velocity for a hypothetical gasification unit in order to figure out vortex motion and other fundamental flow characteristics.

#### 1. 서 론

석탄은 연료로서  $SO_x$ 와  $NO_x$  같은 산성가스와 분진등 다양한 公害物質 배출源이라는 비판적인 시각에도 불구하고 풍부한 매장량, 공급의 안정성 및 경제적인 면에서 다른 에너지 자원에 비해 有利하여 발전용 또는 산업용으로 지속적으로 사용되고 있다. 이와같은 석탄

사용에 따른 환경오염 저감기술 개발 또한 국내외적으로 꾸준히 이루어지고 있는데 그 代表的인 例가 thermal  $NO_x$ 의 효과적인 제어를 위한 석탄의 유동층연소, 석탄 가스화 복합발전, 그리고 저공해 直接연소 方法으로서 강한 선회를 동반한 'slagging combustion' 기술 등이 다<sup>1-3)</sup>. 이 중에서 IGCC(integrated coal gasification combined cycle), 즉 석탄가스화 복합발전은 열효율면

서나 황화합물 및 분진 등의 공해배출 저감면에서 우수하여 차세대 발전기술로 각광 받고 있다.

그러나 이 IGCC 기술 중 단위 요소기술로서 가장 중요한 것은 석탄가스화기 기술로서 현재까지 국내외적으로 많은 연구가 행하여졌으나 실제 상업화된 기술은 불과 4~5개 공정에 불과하다. 상업화된 공정자체도 설계기술에서 큰 차이를 나타내고 있을 뿐만 아니라 같은 방법으로 설계된 가스화기가 없음은 가스화기 설계의 어려움을 반영하는 사실로 잘 알려져 있다<sup>4)</sup>. 이러한 가스화기 설계의 다양성 및 복잡성은 연료인 석탄의 큰 성상 차이에도 원인이 있겠지만 석탄의 가스화과정 특히 분류층 가스화 과정에서 일어나는 현상이 보통 多相, 3차원 열복사가 관여하는 복잡다단한 비선형 난류반응으로 나타나기 때문이다<sup>5)</sup>. 이와같은 난류반응을 동반한 시스템의 성공적인 설계를 위해서는 'combustion chemistry'와 더불어 난류장에 대한 지식이 불가피하게 요구된다. 가스화기 설계에 있어서 일/이차 공기 주입부 변화에 따른 난류유동장 해석의 중요성은 아래에 언급한 McIntosh와 Coates의 말에서 찾아 볼 수 있다. 즉, "가스화기 주입구 노즐부분의 작은 변화가 석탄의 전환율에 미치는 영향은 연소기 자체의 큰 변화보다도 훨씬 크다"<sup>6)</sup>. 위에서 토론한 논지에서 볼 때에 분류층 석탄가스화기의 효과적 설계를 위해서는 신뢰성 있는 컴퓨터 코드에 의한 난류 반응장 해석이 매우 중요하며 이는 구체적인 가스화기 모형의 난류장에 대한 기본理解를 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라 파이롯트 플랜트급이나 상업용 규모의 운전 및 실험결과에 대한 상호보완적인 분석역할을 한다. 국제적으로 알려진 대표적인

미분탄 연소 컴퓨터 프로그램은 미국 Brigham Young University(BYU)의 Smoot 그룹의 PCGC-2와 Imperial College의 Lockwood 그룹의 프로그램을 주된 예로 들 수 있으며 그의 많은 사람들이 미분석탄 연소로 해석용 프로그램을 개발하였다. Table 1에 종합적인 코드를 이용한 미분탄연소 및 가스화기 설계에 사용예를 나타내었다.

그러나 이와 같은 일련의 많은 연구에도 불구하고 汎用 가스화기 설계 및 최적 운전조건 선정을 위해서는 종합 컴퓨터 코드의 세부모델에 대한 지속인 개발 및 보완, 그리고 석탄의 연소특성에 대한 데이터 축적이 요구된다. 이러한 연구의 일환으로 본 연구는 일차적으로 가스화기 비반응 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 선택한 가스화기 모형은 두 종류가 사용되었는데 첫번째는 BYU에서 석탄연소 및 가스화기 실험<sup>22)</sup>을 위해 사용된 것으로 이차공기 주입형태에 따른 유동장 변화 추이가 그 주된 관찰의 대상이었다. 본 연구에서는 개발한 컴퓨터 프로그램의 성능을 이 실험자료와 비교함으로써 검증하였다. 두번째 가스화기는 가상적인 형상으로서 중횡비, 와류의 형성여부를 포함한 유동장 특성을 파악하는데 사용하였다.

## 2. 수학적 모델 및 해법

난류유동 및 석탄입자의 궤적을 계산하기 위해 2차원 원통좌표(cylindrical coordinate)에서 가스 유동을 기술하여야 하며 이는 정상상태, 비압축성, 뉴우튼유체를 가정했을 때 기체상태의 운동량 지배방정식(Navier-

Table 1. Review of pulverized coal-fired comprehensive computer program & applications.

Authors	Year	Description/Applications
Gibson & Morgan <sup>7)</sup>	1970	2-D 원통 대칭형, stream function-vorticity 방법
Lockwood <i>et al.</i> <sup>8-10)</sup>	1980, 1983 1984	증진된 종합 컴퓨터 프로그램 시작, 2-D 원통 대칭형, 산업용 보일러 규모
Smith <i>et al.</i> <sup>11)</sup>	1981	2-D 원통 대칭형, 실험실적 규모(PCGC-2)
Hill <sup>12)</sup>	1983	NO <sub>x</sub> 모델 개발, 2-D 원통 대칭형(PCGC-2)
Boysan <i>et al.</i> <sup>13)</sup>	1986	2-D 원통 대칭형, cyclone 연소로
Benesch & Kremer <sup>14)</sup>	1984	3-D 접선 방향 분사 연소로(tangentially fired furnace) 단면적 20 m×20 m utility boiler.
Truelove <sup>15,16)</sup>	1984, 1986	2-D 원통 대칭형 와류 연소로 버너 근처에서의 유동장 조직적 연구
Boyd & Kent <sup>17)</sup>	1986	3-D 발전용 500 MW 용량의 접선방향 분사 연소로 10.69×8.86×3.16 m utility boiler
Sowa <sup>4)</sup>	1987	BYU 가스화기 성능에 대한 injector 영향 연구(PCGC-2)
Gorner & Zinser <sup>18)</sup>	1988	3-D utility boiler brown coal, 300 MW
Jang & Acharya <sup>19)</sup>	1988	2-D 원통 대칭형 연소로 석탄 입자 운동모델 조직적 연구
Jang & Acharya <sup>20)</sup>	1991	Fuel NO <sub>x</sub> 모델 개발, 2-D 원통 대칭형
이경욱, 서경원, 최병선 <sup>21)</sup>	1992	서천화력발전소 실보일러 크기의 3차원 모델

**Table 2. Expressions for  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for governing equation.**

	$\phi$	$\Gamma_\phi$	Source ( $S_\phi$ )
Axial momentum	u	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial momentum	v	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ $- 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}$
Angular momentum	w	$\mu_{eff}$	$-\left( \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) w$
Kinetic energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho \epsilon$
Dissipation rate	$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$

$C_1=1.44, C_2=1.92, \sigma_k=0.9, \sigma_\epsilon=1.22$

$$G_{k1} = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

Stokes equation)으로 나타내어 진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho \bar{u} \bar{\phi} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \bar{v} \bar{\phi} \right]$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \Gamma_\phi r \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r} \right] + S_\phi \quad (1)$$

윗식에서  $\bar{\phi}$ 는 일반종속변수로서 축방향(axial), 직경 방향(radial), 접선방향(tangential)의 평균속도성분과 단위질량당의 난류에너지 k 및 그의 소산율  $\epsilon$ 을 각각 나타내고  $\Gamma_\phi$ 와  $S_\phi$ 는 각 종속변수  $\bar{\phi}$ 에 대한 확산 계수와 생성항을 나타내며 이를 Table 2에 제시하였다. 여기서  $G_k$ 는 난류에너지생성을 나타내며,  $\sigma$ 는 난류 prandtl/schmidt수를 지시한다.  $\mu_{eff}$ 는 유효점성계수(effective turbulent viscosity)로서 역확점성계수  $\mu$ 와 난류점성계수  $\mu_t$ 의 합으로 표현된다.

식 (1)과 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 검사 체적에 기초한 유한차분법(control-volume based finite-difference method)을 이용하여 線型的인 이산화방정식을 유도하였다. 이산화방정식은 line-by-line TDMA(tridiagonal matrix algorithm)에 의해 해를 구하였으며 Navier-Stokes 운동방정식에서 나타나는 속도와 압력의 연계 문제는 SIMPLE의 발전된 형태인 SIMPLEC(semi-implicit method on pressure-linked equations consistent) 알고리즘을 사용하였다<sup>23)</sup>. 한편 격자점 사이의 임의의 함수값 보정

은 power-law scheme에 의해 실행되었다.

입자 궤적 계산을 위해서는 Lagrangian 방법을 擇했으며 입자의 궤적계산에서 공기저항만을 고려한 경우에 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = C_D A_p \frac{1}{2} |\vec{v}_g - \vec{v}_p| (\vec{v}_g - \vec{v}_p) \quad (2)$$

윗식서  $\vec{v}_p$ 와  $\vec{v}_g$ 는 각각 입자 및 기체의 속도벡터이며  $m_p, A_p, \rho_p, C_D$ 는 입자의 질량, 입자의 투영단면적, 공기의 밀도, 저항 係數 등을 각각 나타낸다. 식 (2)를  $\bar{x}, \bar{r}$  방향의 속도성분,  $\bar{u}, \bar{v}$  속도항으로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha(u_g - u_p) \quad (3)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha(v_g - v_p) \quad (4)$$

윗식에서  $\alpha$ 는 기체와 입자의 상대속도를 포함하는 항으로 아래의 식으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} C_D \frac{Re}{24} \quad (5)$$

식 (5)의  $\mu$ 와  $d_p$ 는 각각 역확점성계수와 입자의 직경을 나타내며 Re는 입자의 상대속도로 表示되는 Reynolds 수이다. 식 (3)과 (4)를 난류에서 시간평균을 취하면 난

류변동의 상관항이 아래와 같이 나타난다.

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = \bar{\alpha}(\bar{u}_g - \bar{u}_p) + \bar{\alpha}'(\bar{u}_g' - \bar{u}_p') \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{v}_p}{dt} = \bar{\alpha}(\bar{v}_g - \bar{v}_p) + \bar{\alpha}'(\bar{v}_g' - \bar{v}_p') \quad (7)$$

식(6), (7)에 나타난 난류변동상관항 즉,  $\overline{\alpha'(u_g' - u_p')}$  모델은 난류에서의 비선형에 의해 생기는 난류모델의 대표적인 문제 중 하나로써 정확한 입자 궤적 계산을 위해서는 신뢰성 있는 모델 개발이 중요하다. 이와 類似的한 난류 모델의 예는 비선형유동항에 시간평균의 결과로 나타나는 Reynolds 전단력이나 난류에서의 Arrhenius 表現式으로 주어지는 반응항 등이 쉬운 예이다. 입자궤적 계산에서 나타나는 난류 상관항의 모델에 대한 검토는 다른 문헌에 잘 나타나 있어 여기서는 언급하지 않는다<sup>5,24)</sup>.

입자궤적 계산에는 위에서 언급한 대로 기상난류유동에 따른 영향을 고려하지 않았으며 공기저항력, 중력, 원심력, 전항력項을 고려하여 Lagrangian 방법에 의해 입자속도 및 궤적을 추적하였다. 원통좌표系에서 계산식은 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha u_g + g - \alpha u_p \quad (8)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha v_g + \frac{w_p^2}{r} - \alpha v_p \quad (9)$$

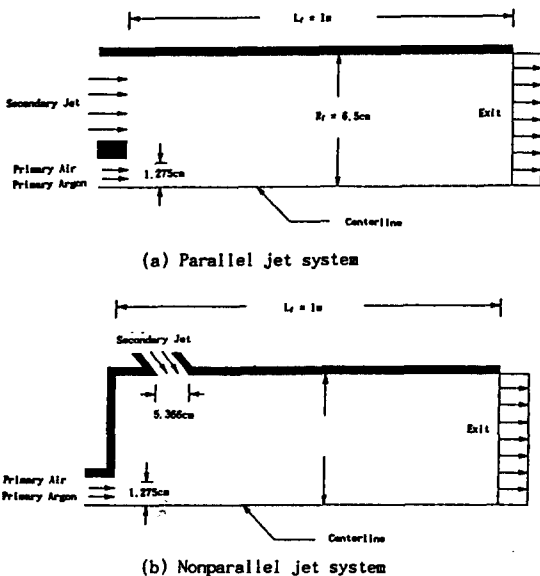


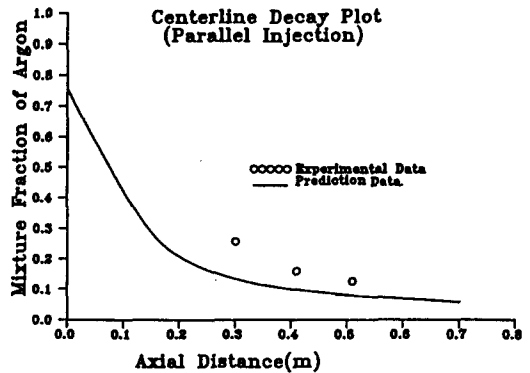
Fig. 1. Schematic diagram of two injection systems.

$$\frac{dw_p}{dt} = \alpha w_g - \left( \alpha + \frac{v_p}{r} \right) w_p \quad (10)$$

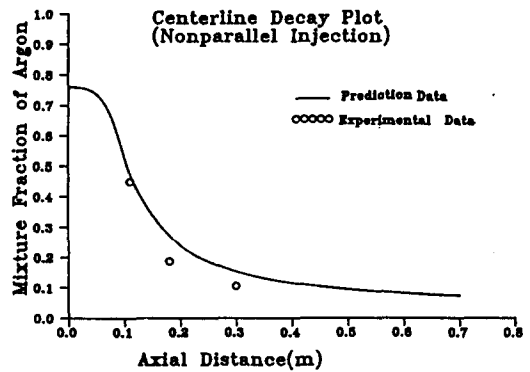
위의 식에서  $\rho_p$ ,  $D_p$ ,  $C_D$ 는 각각 입자의 밀도, 투영단면적, 공기저항계수를 나타낸다.

### 3. 결과 및 토론

Fig. 1은 본 논문의 比較 대상으로 선정한 BYU Memmott의 실험 장치 도식도이다<sup>22)</sup>. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 평행 주입 방법은 일차 공기와 평행하게 이차 공기를 주입하였으며 비평행 주입 방법은 가스화기 상부에서 수평 방향의 30도 각도를 가지고 이차 공기를 주입하였다. 이때에 일차/이차 공기의 속도는 각각 30, 38 m/s이었으며 주입구에서 난류 강도는 10%를 기준으로 선정하였다. Fig. 2는 평행과 비평행 주입 방법에 따라 축중심에 따른 Ar의 질량 분율에 대한 계산치와 실험



(a) Parallel injection



(b) Nonparallel injection

Fig. 2. Comparison of centerline mixture fraction profiles between experiment and prediction for two injection cases.

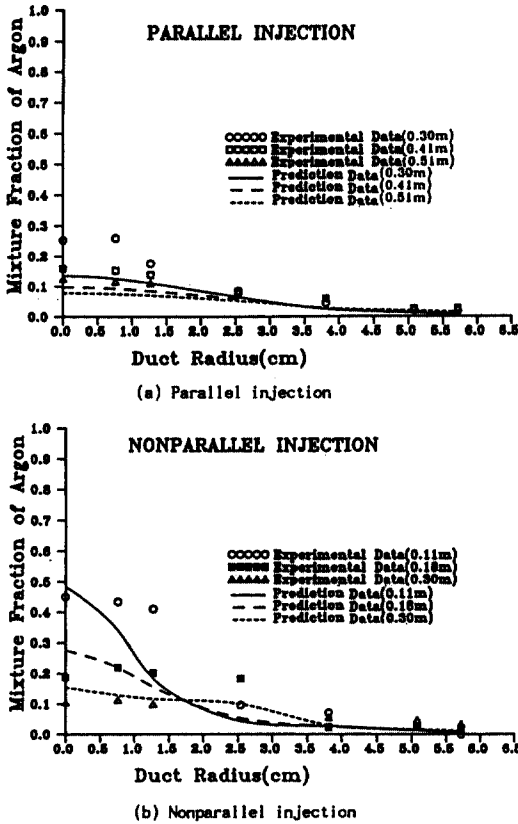


Fig. 3. Comparison of radial profiles of mixture fraction at a few axial locations.

치를 비교한 것이다. 실험치와 계산치는 잘 부합되어 만족할 만한 결과를 보여주고 있으며 이러한 경향은 Fig. 3의 몇개의 축방향거리 0.11, 0.18, 0.30 m에서의 직경 방향의 분포에 대한 비교에서도 잘 나타나고 있다. 본 논문에는 提示하지 않았지만 실험치와 계산치의 속도 자료 비교도 잘 일치하는 傾向을 나타냈다<sup>25)</sup>. Fig. 4는 假想的인 가스화기의 도식도이다. 그러나 크기나 종횡비 등은 많이 사용되는 파일롯트 규모급의 가스화기나 싸이클론 연소기의 축적을 기준으로 했다<sup>26)</sup>. Fig. 5는 가스화기 종횡비에 따른 속도장을 나타낸 것으로서  $v = -5$  m/s,  $w = 50$  m/s인 경우에 대해 (a)는 종횡비가 10인 경우로 가스화기 축대칭 부위에 선회의 영향에 의한 커다란 재순환 영역이 생긴 반면 (b)와 같이 종횡비가 작은 경우는 커다란 재순환 영역은 생기지 않고 入口에서 出口쪽으로 질량보존에 의해 流動방향만이 변한 단순한 양상을 나타내고 있다. 종횡비가 큰 경우 즉, 직경이 작은 경우 강한 선회에 의한 원심력 영향으로 상부벽쪽에 유동이 발생했으나 종횡비가 작은 경우 즉,

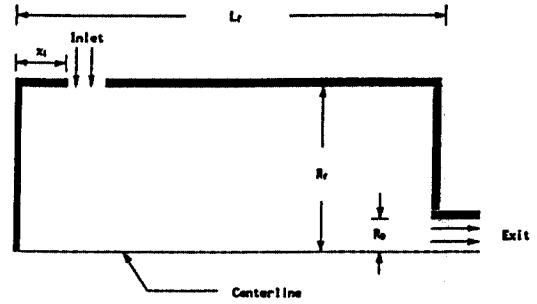
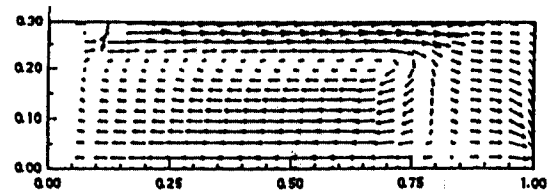
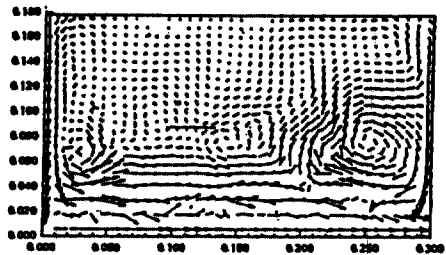


Fig. 4. Schematic diagram of a hypothetical gasifier unit.

- (a)  $x_1 = 0.1$  m,  $L_r = 1$  m,  $R_0 = 0.02$  m,  $R_r = 0.1$  m
- (b)  $x_1 = 0.0$  m,  $L_r = 0.3$  m,  $R_0 = 0.089$  m,  $R_r = 0.178$  m.



(a) A=10



(b) A=1.7

Fig. 5. Comparison of velocity vector plots according to aspect ratio, A.

직경이 큰 경우 선회의 영향 전영역이 선회의 영향 전영역에 미치지 못하고 일정 높이까지만 나타남을 보인다. 여기서 가스화기를 설계할때 종횡비 또한 고려해야 할 주요한 인자라는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 선회강도에 따른 속도분포를 나타낸 것으로서 입구 접선속도가 커질수록 최대속도가 밖으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 최대속도가 나타나는 지점에서 와류가 형성되므로 선회강도에 따라 와류의 크기가 달라진다는 것 또한 주목할 사항이다. Fig. 7은 접선방향속도가 각각 1, 0.5, 0.1 m/s일때의 입자계적을 나타낸 것으로서 선회가 강할수록 입자가 벽쪽에 부딪히는 것을 볼 수 있다. 그러나 (b)와 (c)에 나타난 것처럼 와류 형성 위치와 입자의

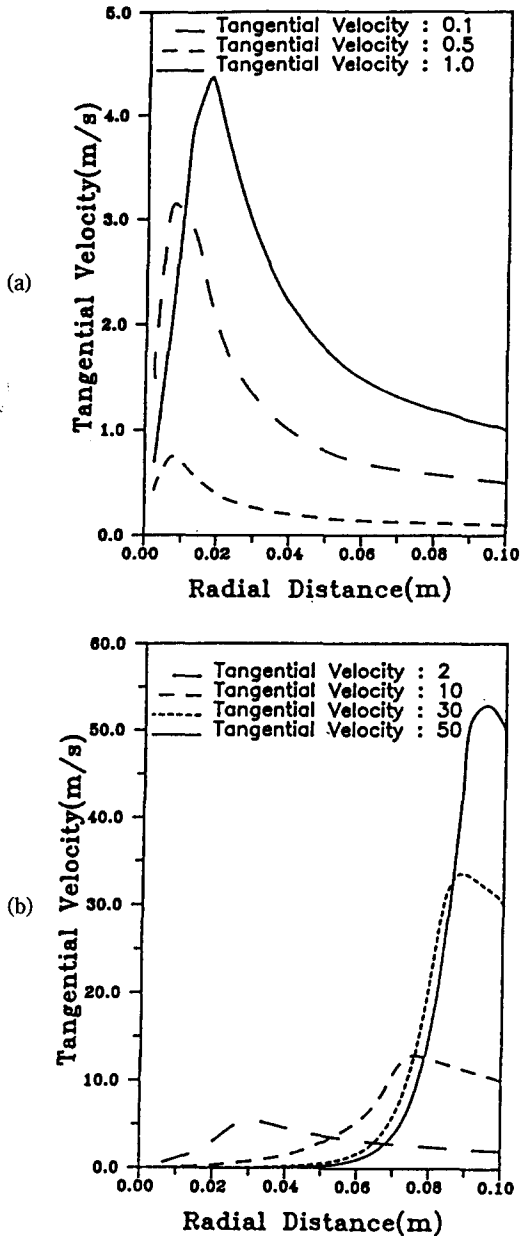


Fig. 6. Radial location of peak tangential velocity for various swirl intensity.

깨적은 큰 차이를 보인다. 본 연구에서는 입자의 계산시 단지 공기역학적인 면만을 고려하였기 때문에 반응이 결부된 가스화기에 있어서 휘발성 물질의 휘발속도 및 체류시간 등과 연관시켜 검토되어야 할 중요사항이다. 기타 제반 변수에 따른 유동장 변화 및 입자 깨적 계산 결과는 다른 문헌에 제시될 예정이다<sup>25)</sup>.

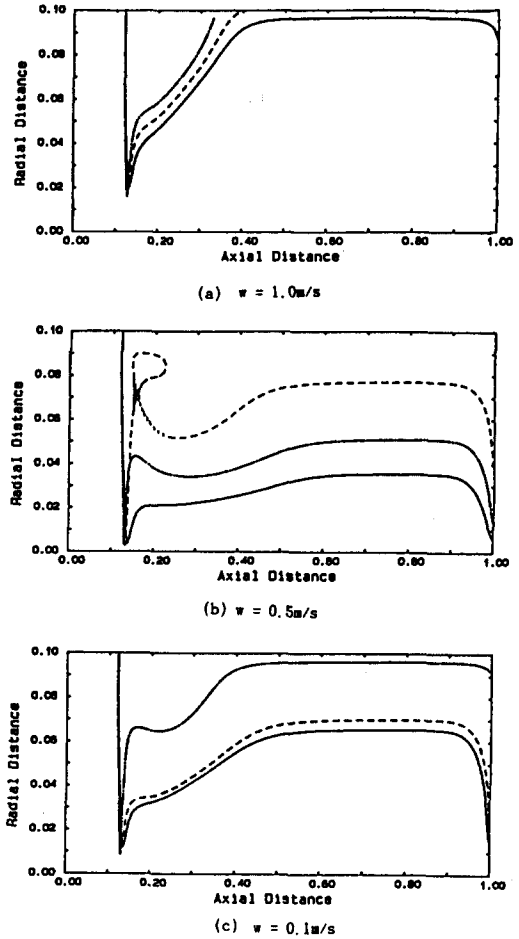


Fig. 7. Particle trajectory plots as a function of tangential velocity (w).

#### 4. 결론 및 향후 연구

가스화기 설계를 위한 예비 연구로서 분류층 가스화기 비반응 난류 유동장 프로그램을 개발하여 계산한 결과 실험치와 비교하여 만족스러운 결과를 나타내었으며 아래와 같은 유용한 결론을 내릴 수 있다.

1. 가스화기 종횡비는 내부 유동에 큰 영향을 미치며 특히 종횡비에 따른 재순환영역은 큰 차이를 나타내었다.
2. 선회강도 즉 접선방향의 속도는 가스유동과 와류 형성위치에 일관성 있게 큰 영향을 나타내었다.
3. 석탄입자의 깨적 계산결과와 석탄입자의 깨적은 와류 생성위치와 일치하지 않음을 보였다. 이러한 경우에 석탄입자의 물성 및 온도에 따른 휘발속도의 정확한 파악은 가스화기 성능분석에 매우 중요하리라 판단된다.

그러나 석탄 입자 궤적 계산에서 공기 저항력에서 나타나는 공기와 입자간의 상대 속도와 저항 계수에 의해서 나타나는 비선형적인 난류 변동 상관항에 대한 영향은 신뢰성 있는 모델에 의해 고려되어야 할 사항이며 앞으로의 硏究과제이다. 이는 가스화기내의 석탄 입자 궤적의 정확한 추적이 가스화기 성능 평가의 중요한 사항으로 판단되기 때문이다. 입자 궤적 계산에서 Basset 힘, 회전력, 부력 등이 제외되어 있는데 이러한 힘을 고려하지 않는 이유가 대기압에서 석탄 입자와 공기 밀도간의 차이가 1000배 정도로 크게 나타나 이러한 힘들이 무시될 수 있기 때문이다. 이는 보통 부력이나 Basset 힘의 관성력에 대한 비가 gas와 입자의 밀도비로 나타나기 때문이다. 그러나 가압형 가스화기의 경우 높은 압력에 따른 밀도 상승과 높은 난류 강도의 유동에서는 입자 궤적 계산에서 이러한 힘이 미치는 영향 검토 및 정량화가 선행되어야 할 것이다.

### 사용기호

- u, v, w : Axial, radial, and tangential velocity (m/s)
- x, r : Axial, radial coordinate
- k : Turbulent kinetic energy per unit mass (J/kg)
- $\epsilon$  : Dissipation rate of turbulent kinetic energy (J/kg s)
- $G_{k1}$  : Turbulent kinetic energy generation per unit volume (J/m<sup>3</sup>s)
- g : gas
- p : particle
- $\alpha$  : coefficient in particle motion equation

### 참고문헌

1. 이승종, 마수만, 윤용승, 김형택 : "Aspen 코드를 이용한 석탄가스화기내 주요변수들의 가스화 성능에 대한 영향", 한국에너지공학회 93년도 추계학술 발표회 초록집. p.37 (1993).
2. 지평삼, 김종진, 정진도, 김남호 : "석탄가스화 복합발전 기술동향", 대한기계학회지, 제 32권, 12호, p. 1076 (1992).
3. 손용권, 현주수외 : "Slagging combustor 개발에 관한 연구(III)", 한국에너지기술연구보고서 KE-92020 s (1992).
4. Sowa, W.A. : "The effect of injector on the performance of the Brigham Young University gasifier", Ph.D, Dissertation Dept. of chemical Engineering , Brigham Young University (1987).

5. Smoot, L.D., Hedman, P.O. and Smith, P.J. : "Pulverized coal combustion research at Brigham Young University", *Prog. Energy, Combust. Sci.* Vol. 10, pp. 359-441 (1984).
6. McIntosh, M.C. and Coates, R.L. : "Experimental and process design study of high rate entrained coal gasification process", Final report on DOE contract NO. EX-76-C-01-1548, Eyring Research Institute, Provo, Ut (1978).
7. Gibson, M.M. and B.B. Margan : "Mathematical model of combustion of solid particles in a turbulent stream with recirculation", *Journal of the Institute Fuel* Vol. 43, pp. 517-553 (1970).
8. Lockwood, F.C., Salooja, A.P and S.A. Syed : "A prediction method for coal-fired furnaces", *Combustion and Flame* Vol. 38, pp. 1-15 (1980).
9. Lockwood, F.C. and A.P. Salooja : "The prediction of some pulverized bituminous coal flames in a furnace", *Combustion and Flame* Vol. 54, pp. 23-32 (1983).
10. Lockwood, F.C., S.M.A. Rizvi, G.K. Lee and H. Whaley : "Coal combustion model validation using cylindrical furnace data", Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 513-522 (1984).
11. Smith, P.J., T.J. Fletcher and L.D. Smoot : "Model for pulverized coal-fired reactor", 18th Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA p. 1285 (1981).
12. Hill S.C. : "Modeling of nitrogen pollutants in turbulent pulverized coal flames", Ph.D, Dissertation Chemical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah (1983).
13. Boyd, R.K. and J.H. Kent : "Three-dimensional furnace computer modeling", presented at the 21st Symposium (Int'l) on Combustion, Munich, Germany (1986).
14. Benesch, W and H.Kremer : "Mathematical modeling of fluid flow and mixing in tangentially-fired furnaces, Twentieth Symposium (Int'l) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 549-557 (1984).
15. Truelove, J.S. : "The modeling of flow and combustion in swirled pulverized-coal burners", Twentieth Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pp.523-530 (1984).
16. Truelove, J.S., "Prediction of the burner flow and combustion in swirling pulverized-coal flames" presented at 21st symposium (Int'l) on Combustion

- tion, Munich Germany (1986).
17. Boysan, F., R. Weber, J. Swithenbank and C.J. Lawn : "Modeling coal-fired cyclone combustors", *Combustion and Flame* 63, 73 (1986).
  18. Gorner, K and Zinser, W. : "Prediction of three-dimensional flows in utility boiler furnaces and comparison with experiments", *Combustion Science and Technology*, 58, pp. 43-57 (1988).
  19. Jang, D.S. and S. Acharya : "Improved modeling of pulverized coal combustin in a furnace", the Transactions of the ASME, J. of Energy Resources Tech. , Vol. 110, pp. 124-132 (1988).
  20. Jang, D.S. and S. Acharya : "Moment closure model for nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion", Accepted for publicatin in ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 113, p. 117 (1991).
  21. 이경옥, 서경원, 최병선 : "미분탄 연소로의 난류유동장 및 반응장 해석을 위한 3차원 모델", 에너지공학, Vol. 1, p. 76 (1992).
  22. Memmott, V. : "Rates of mixing of particles and gases in confined jets", Master Thesis, Dept. of Chemical Engineering, Brigham Young University (1977).
  23. Van Doormaal, J.P. and G.D. Raithby : "Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows", Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp. 147-163 (1984).
  24. 양선규 : "氣體에 粒子가 浮上된 二相氣流 流動의 해석과 實驗", 고려대학교 기계공학과 박사학위논문 (1987).
  25. 이선경 : "에너지/환경 관련 열/유체 시스템 고도수치해석연구: 독성 물질 short-term 대기 확산, 湖沼의 전도 현상, 분류층 가스화기 난류장 해석" 충남대학교 환경공학과 석사학위논문 (1995).
  26. 이선경, 나혜령, 장동순, 현주수, 손웅권 : "싸이클론 연소기내 석탄입자 거동 및 유동특성 연구", '94 한국화학공학회 추계학술발표회', 전북대학교 (1994).