

분류층 석탄가스화기 비반응 난류 유동장 수치해석

이 선경*, 정 진도**, 김 종진**, 지 평삼**, 장 동순*

* 충남대학교 환경공학과

** 한전기술연구원

要約

분류층 가스화기 설계를 위한 일차연구로서 가스화기 이차공기 주입方法에 따른 비반응 난류장에 대한 수치해석을 검사체적에 기초한 유한차분방법을 이용하여 수행하였다. 압력과 속도의 연계문제는 SIMPLEC 알고리즘을, 레이놀즈 전단력은 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 입자궤적 계산은 공기역학적 항력만을 고려하였으며 비선형적인 공기저항력에 의한 난류변동상관모델은 고려치 않았다. 이차공기 주입방법(parallel injection과 nonparallel 30° injection)에 따른 수치해석을 수행하여 Ar tracer의 질량분율에 대한 실험자료와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었으며 이차공기의 주입 각 및 기타 제반변수에 따른 유동장 변화를 분석하였다.

서론

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 예가 thermal NO_x 의 효과적인 제어를 위한 석탄의 유동층연소, 석탄가스화 복합발전, 그리고 저공해 直接연소 方法으로서 강한 선회를 동반한 'slagging combustion' 기술등이다(이동,1993; 지동,1992; 손동,1993). 이 중에서 IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle), 즉 석탄가스화 복합발전은 열효율면에서나 황화합물 및 분진등의 公害배출 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 方法으로 설계된 가스화기가 없으면 가스화기 설계의 어려움을 반영하는 사실로 잘 알려져 있다.(Sowa,1987). 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(Smoot et al,1984). 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 찾아볼 수 있다. 즉, "가스화기 주입구 노즐부분의 작은 변화가 석탄의 전환율에 미치는 영향은 연소기 자체의 큰 변화보다도 훨씬 크다"(McIntosh and Coates,1978).

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 pilot plant 급이나 상업용 규모의 운전 및 실험결과에 대한 상호 보완적인 분석역할을 한다. 국제적으로 알려진 대표적인 미분탄 연소 컴퓨터 프로그램은 미국 Brigham Young University(BYU)의 Smoot 그룹의 PCCG-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.

Table 1. Review of Pulverized Coal-Fired Comprehensive Computer Program & Applications

Authors	Year	Description / Applications
Gibson & Morgan	1970	2-D 원통 대칭형, stream function-vorticity 방법
Lockwood et al.	1980, 1983, 1984	증진된 종합 컴퓨터 프로그램 시작, 2-D 원통 대칭형, 산업용 보일러 규모
Smith et al.	1981	2-D 원통 대칭형, 실험실적 규모(PCGC-2)
Hill	1983	NOx 모델 개발, 2-D 원통 대칭형(PCGC-2)
Boysan et al.	1986	2-D 원통 대칭형, Cyclone 연소로
Benesch & Kremer	1984	3-D 접선 방향 분사 연소로 (tangentially fired furnace) 단면적 20m×20m utility boiler.
Truelove	1984, 1986	2-D 원통 대칭형 와류 연소로 버너 근처에서의 유동장 조직적 연구
Boyd & Kent	1986	3-D 발전용 500MW 용량의 접선방향 분사 연소로 10.69×8.86×3.16m utility boiler
Sowa	1987	BYU 가스화기 성능에 대한 Injector 영향 연구 (PCGC-2)
Gorner & Zinser	1988	3-D utility boiler brown coal, 300 MW
Jang & Acharya	1988	2-D 원통 대칭형 연소로 석탄 입자 운동 모델 조직적 연구
Jang & Acharya	1991	Fuel NOx 모델 개발, 2-D 원통 대칭형
이경욱, 서경원, 최병선	1992	서천화력발전소 실보일러 크기의 3차원 모델

그러나 이와같은 일련의 많은 연구에도 불구하고 범용 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 연구에

서 선택한 가스화기 모형은 BYU에서 석탄연소 및 가스화기 실험을 위해 사용된 것으로 (Memmott, 1977) 이차공기 주입형태에 따른 유동장 및 입자궤적 변화 추이가 그 주된 관찰의 대상이다.

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-Stokes equation)으로 나타내어진다.

축방향 운동방정식(Axial momentum) :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v u) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_t r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad \text{----- (1)} \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

직경방향 운동방정식(Radial momentum) :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v v) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_t r \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad \text{----- (2)} \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_t \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\rho v^2}{r} - \frac{2 \mu_t v}{r^2} \end{aligned}$$

접선방향 운동방정식(Tangential momentum) :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v w) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_t r \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad \text{----- (3)} \\ & \quad - \frac{\mu_t w}{r^2} - \frac{w}{r} \frac{\partial \mu_t}{\partial r} - \frac{\rho v w}{r} \end{aligned}$$

이러한 운동방정식을 $k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하여 일반화 했을때 아래와 같은 지배 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} [\rho \bar{u} \bar{\phi}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho \bar{v} \bar{\phi}] \quad \text{----- (4)} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\Gamma_\phi r \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r} \right] + S_\phi \end{aligned}$$

윗식에서 $\bar{\phi}$ 는 일반종속변수로서 축방향(axial), 직경방향(radial), 접선방향(tangential)의 평균속도성분과 단위질량당의 난류에너지 k 및 그의 소산율 ε 을 각각 나타내고 Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 각 종속변수 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산 계수와 생성항을 나타내며 이를 Table 2에 제시하였다. 여기서 G_k 는 난류에너지생성을 나타내며, σ 는 난류

Prandtl/Schmidt수를 지시한다. μ_{eff} 는 유효점성계수(effective turbulent viscosity)로서 역학적점성계수 μ 와 난류점성계수 μ_t 의 합으로 표현된다.

식(4)와 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 검사체에 기초한 유한차분법(control-volume based finite difference method)을 이용하여 선형적인 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(Van Doormaal and Raithby, 1984). 한편 격자점 사이의 임의의 함수값 보정은 Power-Law Scheme에 의해 실행되었다.

Table 2. Expressions for Γ_ϕ and S_ϕ for $k-\epsilon$ turbulence model.

	ϕ	Γ_ϕ	생성항(S_ϕ)
Axial Momentum	u	μ_{eff}	$-\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial Momentum	v	μ_{eff}	$-\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r}) - 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}$
Angular Momentum	w	μ_{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	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$

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

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

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

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = C_D A_p \frac{1}{2} |\vec{v}_g - \vec{v}_p| (\vec{v}_g - \vec{v}_p) \quad \text{----- (5)}$$

윗식에서 \vec{v}_p 와 \vec{v}_g 는 각각 입자 및 기체의 속도벡터이며 m_p, A_p, ρ_g, C_D 는 입

자의 질량, 입자의 투영단면적, 공기의 밀도, 저항 係數등을 각각 나타낸다. 식(5)를 x-, r- 방향의 속도성분, u-, v- 속도항으로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha(u_g - u_p) \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha(v_g - v_p) \quad \text{-----} \quad (7)$$

윗식에서 α 는 기체와 입자의 상대속도를 포함하는 항으로 아래의 식으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} C_D \frac{Re}{24} \quad \text{-----} \quad (8)$$

식(8)의 μ 와 d_p 는 각각 역학점성계수와 입자의 직경을 나타내며 Re 는 입자의 상대속도로 表示되는 Reynolds 수이다. 식(6)과 (7)을 난류에서 시간평균을 취하면 난류변동의 상관항이 아래와 같이 나타난다.

$$\overline{\frac{du_p}{dt}} = \bar{\alpha}(\bar{u}_g - \bar{u}_p) + \bar{\alpha}'(\bar{u}_g' - \bar{u}_p') \quad \text{-----}(9)$$

$$\overline{\frac{dv_p}{dt}} = \bar{\alpha}(\bar{v}_g - \bar{v}_p) + \bar{\alpha}'(\bar{v}_g' - \bar{v}_p') \quad \text{-----}(10)$$

식(5),(6)에 나타난 난류변동상관항 즉, $\overline{\alpha'(u_g' - u_p')}$, 모델은 난류에서의 비선형에 의해 생기는 난류모델의 대표적인 문제 중 하나로서 정확한 입자 궤적 계산을 위해서는 신뢰성 있는 모델 개발이 중요하다. 이와 類似한 난류 모델의 예는 Reynolds 전단력이나 난류에서의 반응항등을 들 수 있다. 입자궤적 계산에서 나타나는 난류 상관항의 모델에 대한 검토는 다른 문헌에 잘 나타나 있어 여기서는 언급하지 않는다 (Smoot et al, 1984; 양, 1987).

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

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha u_g + g - \alpha u_p \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha v_g + \frac{w_p^2}{r} - \alpha v_p \quad \text{-----} \quad (12)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = \alpha w_g - \left(\alpha + \frac{v_p}{r} \right) w_p \quad \text{-----} \quad (13)$$

위의 식에서 ρ_p , D_p , C_D 는 각각 입자의 밀도, 투영단면적, 공기저항계수를 나타낸다.

결과 및 토론

Fig.1은 본 논문의 대상으로 선정한 Memmott(1977)의 실험 장치 도식도이다. Parallel 주입 방법은 일차 공기와 평행하게 이차 공기를 주입하였으며 nonparallel 방법은 가스화기 상부에서 수평 방향의 30도 각도를 가지고 이차 공기를 주입하였다. 이 때에 일차, 이차 공기의 속도는 각각 30, 38m/s 이었으며 주입구에서 난류 강도는 10%를 기준으로 선정하였다. Fig. 2는 parallel과 nonparallel 주입 방법에 따라 축중심에 따른 Ar 의 질량 분율에 대한 계산치와 실험치를 비교한 것이다. 실험치와 계산치는 잘 부합되어 만족할 만한 결과를 보여주고 있으며 이러한 경향은 Fig. 3의 몇개의 축방향거리 0.11, 0.18, 0.30m에서의 radial profile에 대한 비교에서도 잘 나타나고 있다. Fig. 4의 유동장은 nonparallel 주입에 대한 vector plot를 나타낸 것으로서 이차 공기 주입부 근처의 강한 유속에 기인하는 'entrainment'현상과 재순환 영역을 뚜렷이 보여주고 있다. 기타 이차공기의 주입각, 주입부의 난류 강도, 일/이차 공기의 momentum ratio, 격자 크기 영향, gasifier aspect ratio, 이차 공기의 온도등 제반 변수에 따른 유동장 변화 및 입자 궤적 계산 결과는 다른 문헌에 자세히 제시될 예정이다 (이, 1995).

결론 및 향후 연구

가스화기 설계를 위한 예비 연구로서 분류층 가스화기 비반응 난류 유동장 프로그램 개발하여 이차 공기의 parallel과 nonparallel 주입 시스템에 적용하였다. 계산 결과는 실험치와 비교하여 만족스러운 결과를 나타내었으며 주입각등 제반 변수에 따른 변수 연구는 물리적으로 일관성 있는 경향을 보였다. 그러나 석탄 입자 궤적 계산에서 공기 저항력에서 나타나는 공기와 입자간의 상대 속도와 저항 계수에 의해서 나타나는 비선형적인 난류 변동 상관향에 대한 영향은 신뢰성 있는 모델에 의해 고려되어야 할 사항이며 앞으로의 연구과제이다. 이는 가스화기 내의 석탄 입자 궤적의 정확한 추적이 가스화기 성능 평가의 중요한 사항으로 판단되기 때문이다. 입자 궤적 계산에서 Basset 힘, 회전력, 부력등이 제외되어 있는데 이러한 힘을 고려하지 않는 이유가 대기압에서 석탄 입자와 공기 밀도간의 차이가 1000배 정도로 크게 나타나 이러한 힘들이 무시될 수 있기 때문이다. 그러나 가압형 가스화기의 경우 높은 압력에 따른 밀도 상승과 높은 난류 강도의 유동에서는 입자 궤적 계산에서 이러한 힘이 미치는 영향 검토가 선행되어야 할 것이다.

사용 기호

- u, v, w : Axial, radial, and tangential velocity (m/s)
- x, r : Axial, radial coordinate
- k : Turbulent kinetic energy per unit mass (J/kg)
- ϵ : Dissipation rate of turbulent kinetic energy (J/kg·s)
- G_{k1} : Turbulent kinetic energy generation per unit volume (J/m³·s)
- g : gas
- p : particle
- a : coefficient in particle motion equation

참고 문헌

- 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)
- Boyd, R.K. and J.H.Kent, "Three-dimensional furnace computer modeling", presented at the 21st Symposium (Int'l) on Combustion, Munich, Germany (Aug. 1986)
- Boysan, F., R. Weber, J.Swithenbank and C.J.Lawn, "Modeling coal-fired cyclone combustors", Combustion and Flame 63, 73 (1986)
- 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).
- Gorner, K and Zinser, W. "Prediction of three-dimensional flows in utility boiler furnaces and comparison with experiments", Combustion Science and Technology, Vol.58, pp.43-57 (1988).
- Hill S.C., "Modeling of nitrogen pollutants in turbulent pulverized coal flames", Ph.D. Dissertation Chemical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah (1983).
- Jang, D.S. and S. Acharya, "Improved modeling of pulverized coal combustion in a furnace", the Transactions of the ASME, J. of Energy Resources Tech. , Vol.110, pp.124-132 (1988).
- Jang, D.S. and S. Acharya, "Moment closure model for nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion", Accepted for publication in ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol.113 p.117(1991).
- 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).
- Lockwood, F.C. and A.P. Salloja, "The prediction of some pulverized bituminous coal flames in a furnace", Combustion and Flame Vol.54, pp.23-32 (1983).
- 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).
- 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).
- Memmott, V., "Rates of mixing of particles and gases in confined jets", Master Thesis, Dept. of Chemical Engineering, Brigham Young University(1977).
- 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)
- 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).
- 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).
- 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).

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)

손용진, 현주수의, "Slagging combustor 개발에 관한 연구(III)", 한국에너지기술연구 보고서 KE-92020s(1992).

양선규, "氣體에 粒子가 浮上된 二相氣流 유동의 해석과 實驗", 고려대학교 기계공학과 박사학위논문(1987).

이선경, "에너지/환경 관련 열/유체 시스템 고도 수치 해석 연구 : 독성 물질 short-term 대기 확산, 湖沼의 전도 현상, 분류층 가스화기 난류장 해석" 충남대학교 환경공학과 석사 학위 논문(1995년 2월 예정).

이승중, 마수만, 윤용승, 김형택, "Aspen 코드를 이용한 석탄가스화기내 주요 변수들의 가스화 성능에 대한 영향", 한국에너지공학회 93년도 추계학술발표회 초록집. p.37(1993)

지평삼, 김종진, 정진도, 김남호, "석탄가스화 복합발전 기술동향", 대한기계학회지, 제 32권, 12호, p.1076(1992).

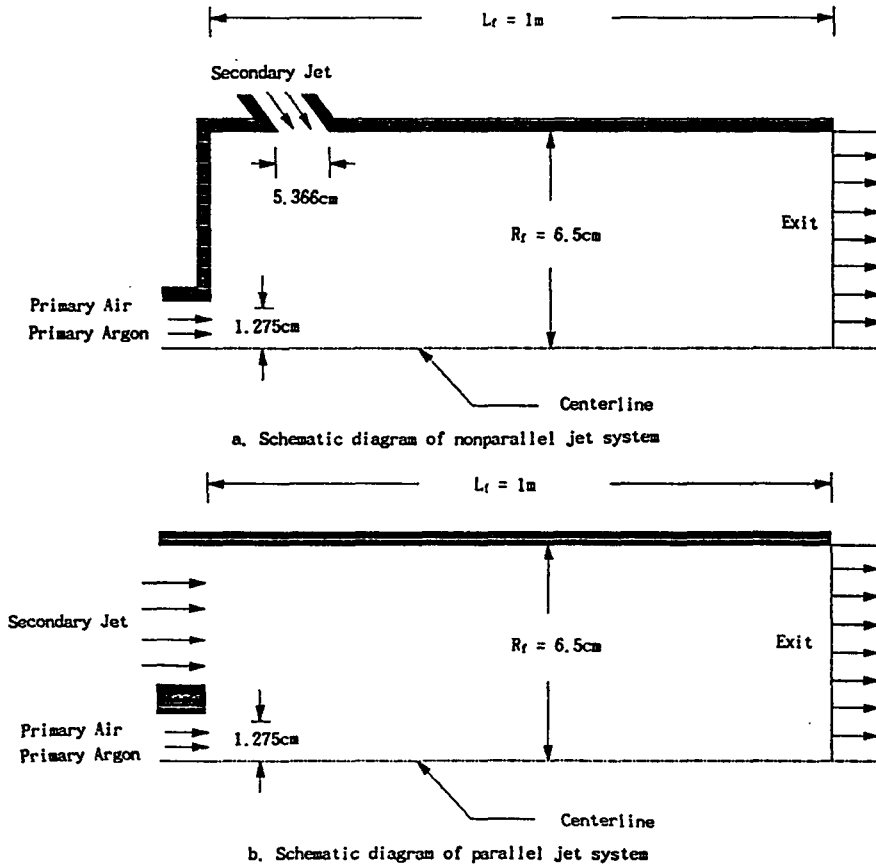


Fig.1 Schematic of two injection systems

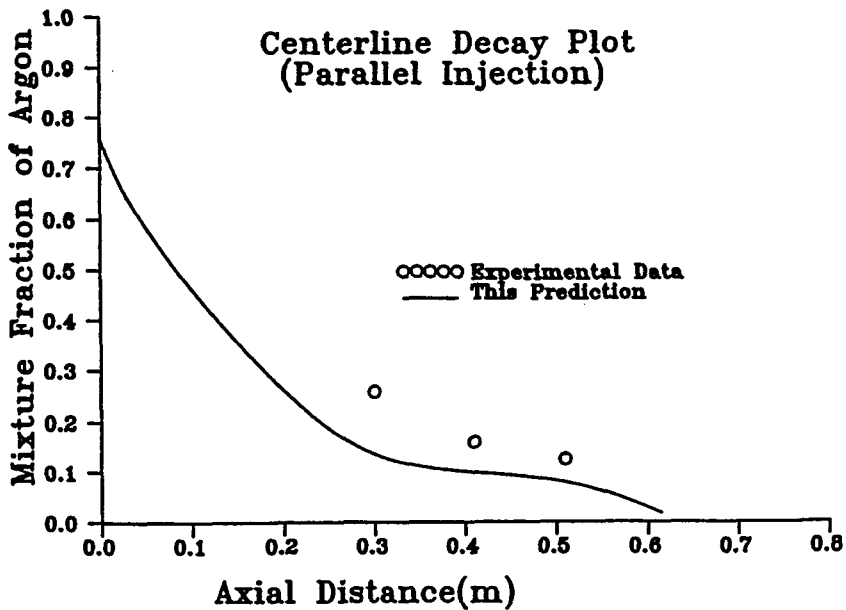
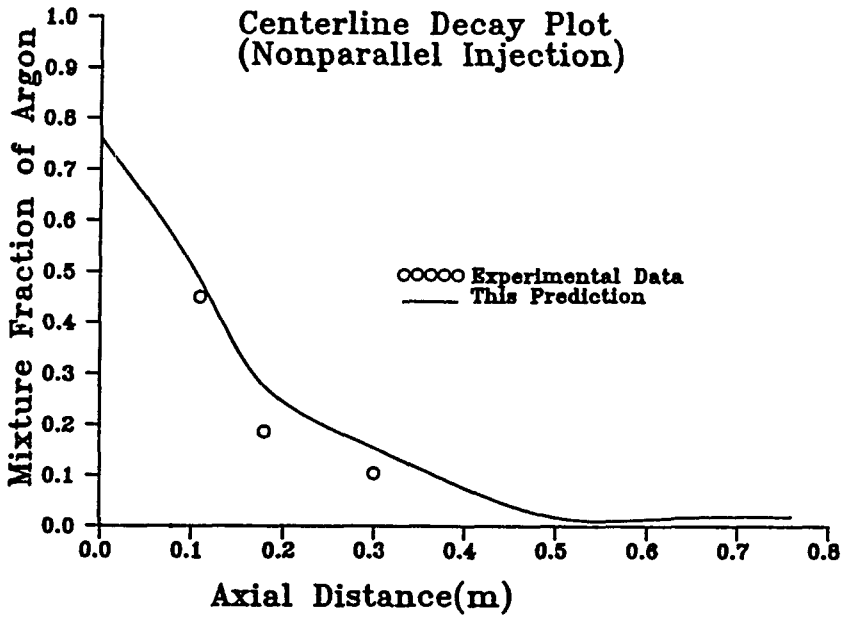


Fig. 2 Comparison of centerline mixture fraction profiles of experiment and prediction for two injection cases

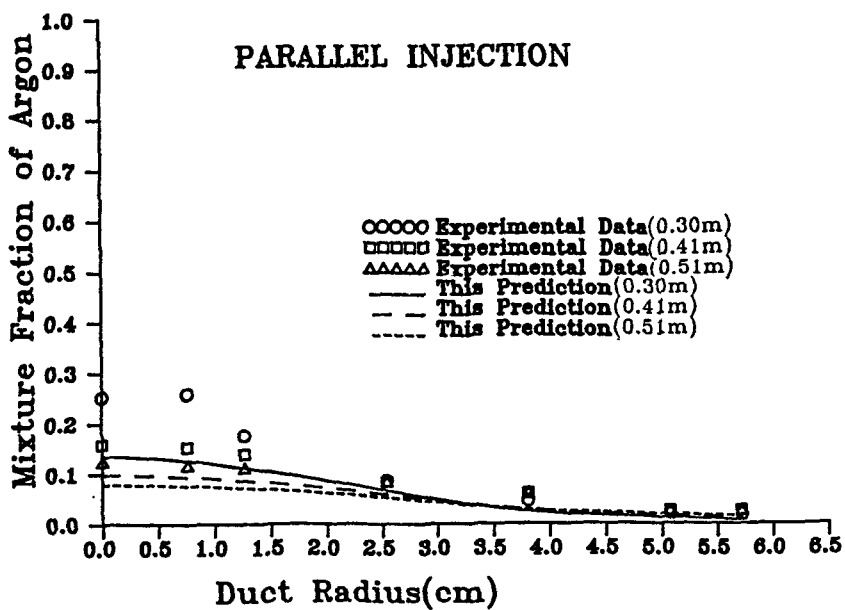
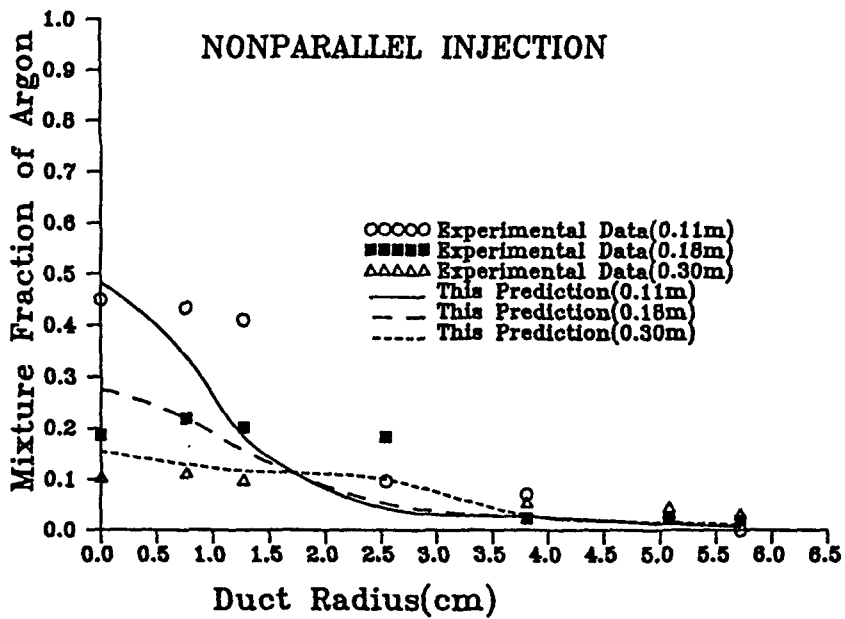


Fig. 3 Comparison of radial profiles of mixture fraction at a few axial locations

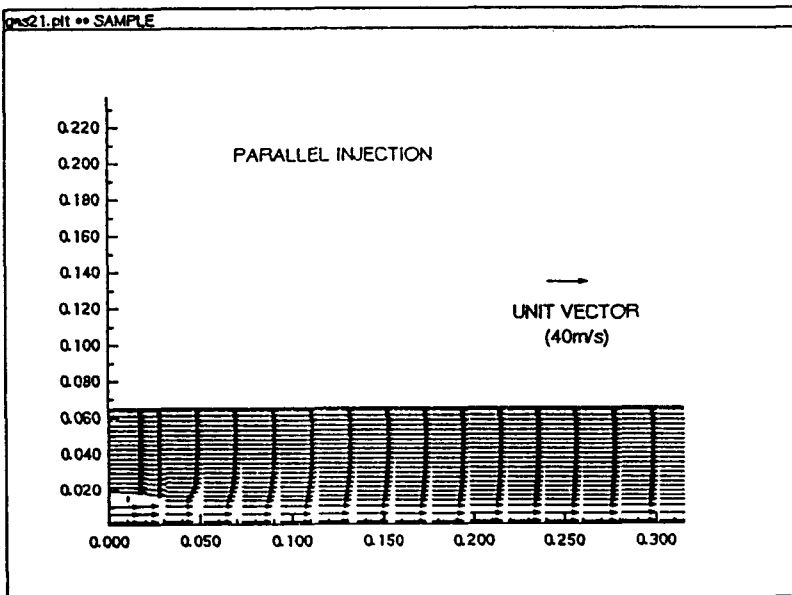
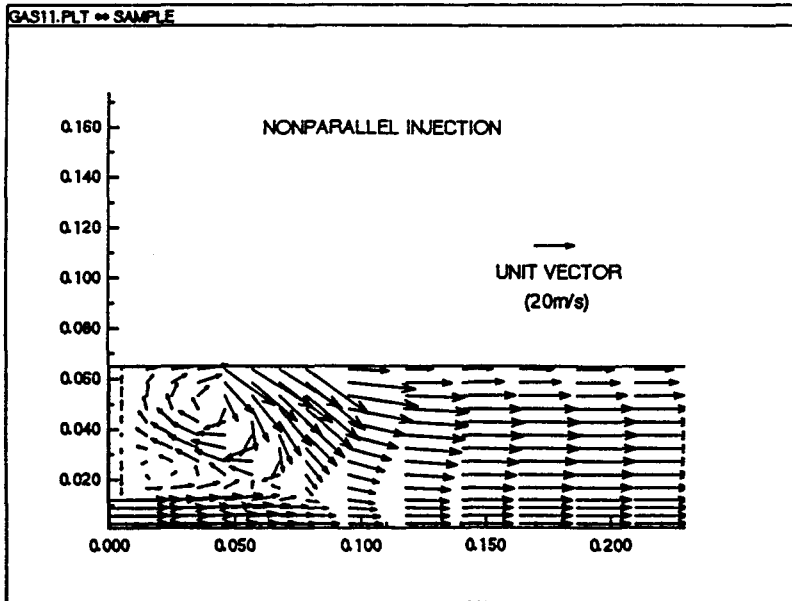


Fig. 4 Typical velocity plot of parallel and nonparallel injection systems