

오일러리언 접근법을 이용한 기류제트에 의한 가스-입자 2상 난류 유동특성 모델링 연구

김태국*† · 민동호** · 윤경범*** · 장희철****

A Study on Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows in a rectangular chamber Using Eulerian-Eulerian Method

Tea-Kuk Kim*†, Dong-Ho Min**, Kyung-Beom Yoon*** and Hee-Chul Chang****

ABSTRACT

The purpose of this research is to model numerically the turbulent gas-particle flows in a rectangular chamber using Eulerian-Eulerian Method. A computer code using the $k-\varepsilon-A_p$ two-phase turbulence model is developed for the numerical study. This code and the Eulerian multiphase model in FLUENT were used for the numerical simulations of the two-phase flow in a rectangular chamber. The numerical results calculated by the two different turbulent gas-particle codes have shown that the $k-\varepsilon-A_p$ model results in a stronger diffusion of the flow momentum in the gas-particle turbulence interaction than the Eulerian multiphase model in FLUENT.

Key Words : Two-phase flow, Eulerian-Eulerian method, Gas-particle flow, FLUENT

α_k	입자 k그룹의 체적분율	m_b	입자 p그룹의 질량
ρ	가스상의 겉보기 밀도	기 호 설 명	입자 p그룹의 질량변화율
ρ_p	입자 p그룹의 겉보기 밀도	k	가스상의 난류운동에너지
S	입자에 의한 가스 생성항	k_p	입자 p그룹의 난류운동에너지
v	가스상의 속도	G_b	입자상에 의한 saffman force 항
v_p	입자 p그룹의 속도	F_M	입자의 magnus force
n_b	입자 p그룹의 수밀도	μ_T	가스상의 난류점성계수
g_i	body force	ε_p	입자상의 난류운동에너지소멸율
μ_e	가스상의 유효 점성계수	τ_r	particle Stokesian relaxation time
ν_p	입자 p그룹의 동점성계수	τ_T	gas fluctuation time

*† 중앙대학교 기계공학부, kimtk@cau.ac.kr

** 중앙대학교 기계공학과 대학원

*** 중앙대학교 기계공학과 대학원

**** 중앙대학교 기계공학과 대학원

1. 서론

이상 유동에 대한 물리적인 현상들은 에너지, 환경, 제철, 반도체, 조선, 중공업 등의 다양한 산업군에서 쉽게 접하게 된다. 예를 들면, 에너지 산업에서 석탄을 분말로 만들어 연소하는 미분탄 연소로나 미분탄 이송장치 내부의 유동, 오일버너의 노즐에서 분사되는 액적 유동, 보일러 튜브 내부의 보일링 현상 등이 여기에 속한다. 환경산업에서는 폐기물을 연소로에서 부양시켜 연소하는 유동상(fluidized bed) 소각로, 배연가스에 포함된 불순물을 필터를 이용하여 제거하는 백필터 장치, 전기장을 이용하여 입자를 제거하는 전기 집진기, 입자의 회전력과 중력을 이용한 싸이클론 집진기, 반건조 흡수탑에서 소석회수 입자의 거동 등을 들 수 있으며, 선박이나 잠수함 등에서 자유수면 해석, 고체연료를 사용하는 로켓의 노즐유동, 디젤엔진 내부 유동 등이 모두 이상 유동에 해당된다. 또한, 이상 유동의 대표적인 형태로 분산유동(dispersed flow)이 있으며, 여기에는 기포류, 액적류, 분체유동이 있다. 이상 유동에서 액상이 연속적인 상을 유지하면서 기체가 분산상인 경우를 기포류라고 하며, 기체가 연속상을 유지하고 액체가 분산상이면 액적류라 하며, 기체가 연속상을 유지하고 고체 입자가 분산상이면 분체유동이라 한다.

이러한 이상 유동을 해석하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 첫 번째 방법이 입자의 운동을 기체유동과 같이 연속체로 가정하고 오일러(Eulerian)적인 방법으로 해석하는 오일러-오일러 방법(Eulerian-Eulerian method)이고, 두 번째 방법이 입자들을 개별적으로 추적하는 라그랑지(Lagrangian)적인 방법인 오일러-라그랑지 방법(Eulerian-Lagrangian method)이다. 1982년에 Crowe는 오일러-오일러 방법을 2유체 모델(two fluid model)이라 하고, 오일러-라그랑지 방법을 궤적모델(trjectory model)이라 하였다[1]. 2유체 모델에서 불연속적인 입자유동을 연속체로 가정하고 기체상의 연속방정식, 운동량방정식과 유사한 지배방정식을 해석한다. L. X. Zhou 등은 다유체 모델(Multi-Fluid model)에서 불연속적인 입자유동에 대하여 난류특성을 고려하기 위하여 $k-\epsilon-A_p$ 모델, $k-\epsilon-k_p$ 모델[3-7]로 접근하였다. 다유체 모델은 수치적으로 불안정한 측면이 있으며, 입자의 크기가 다양한 경우에는 적용하기에 어려움이 있으나 입자의 수밀도가 높은 고밀도 유동(dense flow)에 적용하기 유리하다. 입자궤적모델은 기체와 같은 연속상은 오일러적인 관점에서, 그리고 입자와 같은 불연속적인 분산상은 라그랑지적인 관점에서 유동을 해석한다. 입자궤적모델에서 분산상인 입자를 해석하는 대표적인

방법으로 PSIC(particle source in cell) 방법[1,2]이 있으며, 입자의 유동은 운동방정식을 풀어서 얻고, 입자에 의한 영향을 연속체인 유체유동의 질량, 운동량, 에너지 방정식의 생성항으로 처리하여 해석하는 방법이다. 이 모델은 불연속적인 입자를 개별적으로 추적하여 해석하기 때문에 입자와 입자간의 충돌, 입자와 벽면간의 충돌, 입자와 유체의 상호작용 등의 물리적인 현상을 쉽게 고려할 수 있는 반면에 입자의 수밀도가 상대적으로 낮은 유동에 적용하기 유리하다. 일반적으로, 체적비율(volume fraction)이 10%를 초과하는 기포류, 액적류, 분체유동의 경우에는 오일러-오일러 방법이 유리하며, 체적비가 10% 이하인 기포류, 액적류, 분체유동의 경우에는 오일러-라그랑지 방법을 적용하기에 유리하다. 이와는 별도로, Yuu et al[8]은 이상 유동을 저레이놀즈 영역에서 DNS기법을 이용하여 해석을 하기도 하였다.

본 연구에서는 L. X. Zhou 등이 제안한 다유체 모델을 이용하여 가스-입자의 난류 이상 유동의 유동 특성에 대하여 분석하기로 한다. 불연속적인 입자는 고체이고 질량변화가 없으며, 해석 시스템은 온도변화가 없는 등온장으로 가정하여 열전달 현상도 배제하였으며, 기체와 입자간의 운동량 전달현상만을 고려하였다. 여기서, 입자의 운동량에 영향을 주는 힘의 성분은 중력, 항력, 양력, 부력, 열영동력 등이 있으며, 직경이 작은 비산재나 모래, 유리알갱이 등의 고체입자는 관성력으로 항력, 양력의 영향이 크며, 기체-고체의 이상 유동에서 입자의 부력은 무시할 수 있으며, 온도차가 적은 경우에는 열영동력도 무시할 수 있다. 양력의 경우에 속도구배에 의한 양력(Saffman force)은 고려하였으며 입자회전에 기인한 양력(Magnus force)의 영향은 무시하였다. 그리고 동일한 조건에 대하여 상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 다유체 모델(Multi-Fluid Model)

다유체 모델에서는 입자를 하나의 가상적인 유체로 가정하고 있으며 Eulerian 좌표계로 표현되고 있다. 또한 gas와 입자 사이의 large slip 및 입자의 확산을 각각 별개의 방법으로 고려할 수 있는 장점이 있다. 다유체 모델의 기본적인 가정들은 다음과 같다.

1) 유동장내의 임의 위치에서 입자와 gas는 공존할 수 있으며, 각각 다른 속도, 온도 및 체적분율로 표시된다.

2) 각각의 입자는 공간내에서 연속적인 속도분포, 온도분포 및 체적분율 분포를 갖는다.

3) 각각의 입자는 각기 다른 난류 변동성분을 갖는다.

4) 각각의 입자그룹은 초기의 입자크기분포로부터 규명될 수 있다.

5) 밀집된 입자들의 유동에 있어서는 입자와 입자 사이의 충돌에 따른 추가적인 입자의 점성, 확산 및 열전도를 초래한다.

이러한 기본가정을 고려하여 다유체 모델에서 고려하여야 하는 보존방정식들을 나타내면 다음과 같다.

2.2 k-ε-k_p 모델의 지배방정식

1) 체적분율

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \tag{1}$$

2) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = S \tag{2}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p v_{pj}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(m_p \frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) + n_p \dot{m}_p \tag{4}$$

3) 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j v_i) = & - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \right] \\ & + \rho g_i + v_i S + F_{M\dot{K}} + \sum \rho_p (v_{pi} - v_i) / \tau_{rp} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(n_p v_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj} v_{pi}) = & n_p g_i \\ & + n_k (v_i - v_{pi}) \left(\frac{1}{\tau_{rp}} + \frac{\dot{m}_p}{m_p} \right) n_p \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[n_p \nu_p \left(\frac{\partial v_{pj}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_p}{\sigma_p} \left(v_{pj} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} + v_{pi} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned} \tag{6}$$

4) 난류모델

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k k) = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) \\ & + G_k + G_b + G_p + G_R - \rho \epsilon \end{aligned} \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_e} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right) \tag{8}$$

$$+ \frac{\epsilon}{k} [c_{\epsilon 1}(G_k + G_b + G_p + G_R) - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_p k_p) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_p v_{pk} k_p) = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_p}{\sigma_p} \frac{\partial k_p}{\partial x_k} \right) \\ & + G_{kp} - \rho_p \epsilon_p \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, $\mu_e = \mu + \mu_T$, $\mu_T = c_\mu \rho k^2 / \epsilon$

$$\mu_p = \rho_p \nu_p = c_{\mu p} \rho_p k_p^2 / \epsilon_p$$

$$G_k = \mu_T \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_k}$$

$$G_b = -\beta g_k \frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_k}$$

$$G_p = \sum_p \sum_i \frac{\rho_p}{\tau_{rp}} \left[\left(c_p^k \sqrt{k k_p} - 2k \right) \left(\frac{v_{pi} - v_i}{n_p} \right) \frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right]$$

$$G_R = 2kS$$

$$G_{kp} = \mu_p \left(\frac{\partial v_{pk}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_k} \right) \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_k}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_p = & -2 \left(\frac{m_p + \dot{m}_p \tau_{rp}}{m_p \tau_{rp}} \right) \times \\ & \left[\left(c_p^k \sqrt{k k_p} - k_p \right) + \frac{(v_i - v_\pi)}{n_p} \frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right] \end{aligned}$$

2.3 k-ε-A_p 모델

k-ε-A_p 모델은 입자 난류 점성계수 ν_p 를 다음과 같이 표현되는 Hinze-Tchen의 모델을 이용하여 간단하게 표현할 수 있으며, 이 경우에 식(7)과 식(8)에 포함된 G_p 항은 생략되며, 입자의 난류운동에너지도 식(10)에 의해서 간단하게 구할 수 있다.

$$\frac{\nu_p}{\nu_T} = \left(\frac{k_p}{k} \right)^{1/2} = \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_T} \right)^{-1} \tag{10}$$

여기서, $\tau_r = \rho_s d_p^2 / 18\mu$, $\tau_T = c_T k / \epsilon$

2.4 FLUENT의 난류모델

상용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT는 기체상에 대하여 k-ε모델, 입자상에 대하여 k-ε multiphase 모델을 제공한다[9]. k-ε multiphase 모델에는 혼합난류모델(mixture turbulence model), 분산난류모델(dispersed turbulence model), 각상의 난류모델(turbulence model for each phase)의 3종류가 있으며 다음과 같은 특징이 있다. 혼합난류모델은 기체상의 난류모델에

각상의 평균 혼합된 밀도를 적용하여 해석하는 방법으로 각상들의 밀도비율이 1에 가까울 때 적용되며, 분산 난류모델은 입자와 입자 사이의 충돌은 무시할 수 있고, 입자와 기체상간의 상호작용만 고려될 수 있는 입자상의 농도가 희박(dilute flow)할 때 적용된다. 이 경우에 입자상의 운동량은 기체상의 평균특성, particle relaxation time과 eddy-particle interaction time의 비율의 조건으로 주어진다. 각상의 난류모델은 각각의 입자상들에 대하여 난류방정식을 해석한다.

3. 수치해석결과의 비교 검토

3.1 해석시스템의 형상 및 경계조건

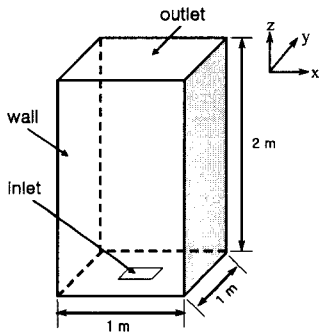


Fig. 1 schematic diagram of the system

해석시스템은 가로(1m)×세로(1m)×높이(2m)인 직육면체의 연소로를 고려하였으며, 가스와 입자가 완전히 혼합된 상태에서 바닥면의 가운데(0.2m×0.2m)에서 1m/s로 유입되는 것으로 가정하였으며, 이때 입자의 체적분율은 0.001로 가정하였다. 출구부는 직육면체의 천정부로 대기조건으로 가정하였다. 해석시스템은 등온장으로 열전달효과를 무시하였다. 해석에 사용된 가스와 입자의 물성값은 Table 1과 같이 상온상태의 물성값을 사용하였으며, 입자는 완전 구형의 유리알갱이를 사용하였다.

수치해석에 사용된 계산격자의 형상은 Fig. 2와 같이 직육면체격자를 사용하였으며, 해석격자의 수는 가로(38)×세로(38)×높이(42)로 약 6만개의 격자를 사용하였다.

본 연구에서는 미분탄 연소로와 같이 가스와 입자가 혼합되어 유입되는 경우에, 앞에서 언급한 k-ε-A_p 모델과 FLUENT에서 제공되는 혼합 난류모델, 분산난류모델, 각상의 난류모델에 대하여 난류영향이 유동특성에 미치는 영향에 대하여 비교하였다.

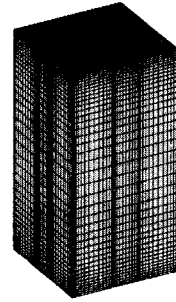


Fig. 2 Computational grid of the system

Table 1 Material Properties

기체밀도[kg/m ³]	1.225
점도[kg/m·s]	1.7894e-05
입자직경[μm]	132
입자밀도[kg/m ³]	2590

3.2 해석결과의 비교 및 분석

1) 해석결과의 예

입자와 기체의 이상 유동에 대하여 입자의 유동특성의 수치적 모델링 방법에 따른 유동 특성을 4종류의 입자상 난류모델에 대하여 해석을 수행하였다. 결과적으로 FLUENT에서 제공하는 3종류의 모델은 본 연구에서 고려하고 있는 운전 조건에서는 유사한 유동패턴을 나타내고 있으므로, 대표적으로 각상의 난류모델과 k-ε-A_p 모델에 대하여 해석결과를 나타내었다.

Fig. 3은 입자의 속도 벡터에 대한 3차원적인 해석결과를 높이가 z=0.5, 1.0, 2.0m인 단면에서 나타내고 있다. 가스상과 입자상의 체적분율이 1000:1이므로 시스템의 하부에서 유입된 체트기류에 의해서 입자상의 전체적인 유동패턴이 결정되며, 특히 사항은 각상의 난류모델에 비하여 k-ε-A_p 모델의 확산영향이 시스템의 상부영역으로 이동할수록 상대적으로 강하게 나타난다는 점이다. 시스템의 출구부분에서 각상의 난류모델에서의 입자 유속 벡터는 코어를 형성하는 반면에 k-ε-A_p 모델에서는 이런 영향이 감소되는 것을 살펴볼 수 있다.

Fig. 4는 입자상의 체적분율을 높이가 z=0.5, 1.0, 2.0m인 단면에서 나타내고 있다. 해석 결과에서 나타나고 있는 두 모델의 주요 특징은 체적분율의 크기와 분포로 구분된다. 각상의 난류모델인 경우에 입구부에서 유입된 체적분율인 0.001이 출구부분까지 유입구의 형상인 사각형 형상을 유지하는 유동특성을 나타내고 있으며,

k-ε-A_p 모델에서는 입자의 확산 영향으로 원형으로 확산되면서 체적분율도 증가되는 유동패턴을 보여주고 있다.

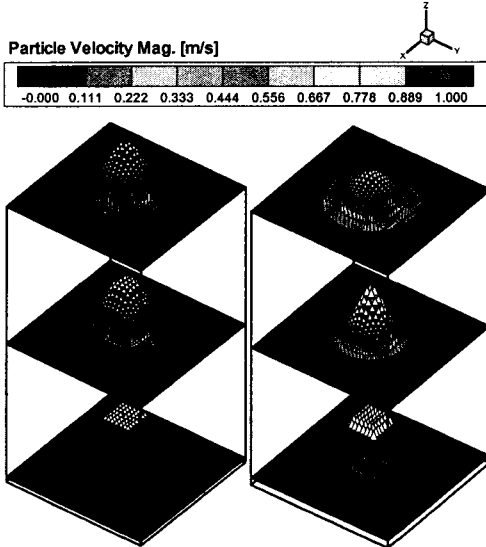


Fig. 3 Vector plots of particle (Left: Per phase model, Right: k-ε-A_p model(current), z=0.5, 1.0, 2.0m)

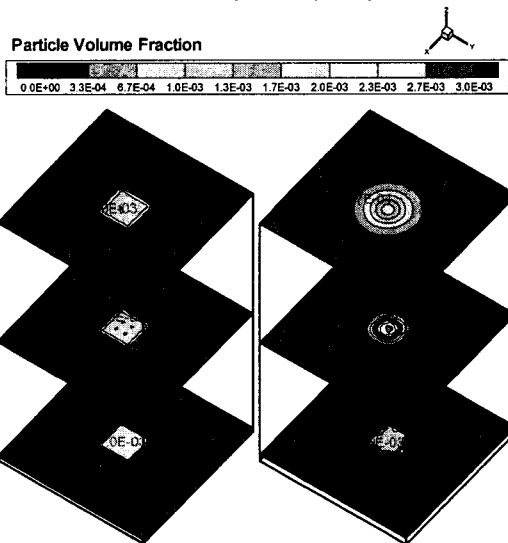
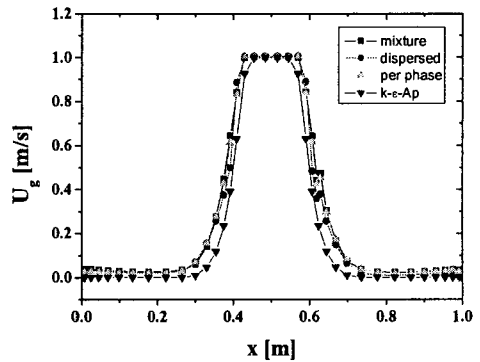


Fig. 4 Volume fraction contours of particle (Left: Per phase model, Right: k-ε-A_p model(current), z=0.5, 1.0, 2.0m)

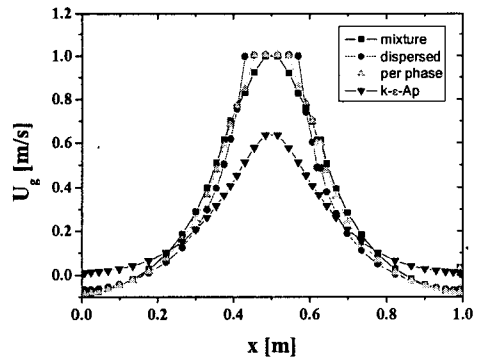
2) 이상 유동의 난류모델 비교

다음은 앞에서 언급한 4종류의 입자상 난류모델에 대하여 가스상의 유속분포, 입자상의 유속분포 그리고 입자상의 체적분율 분포에 대하여 높이 z=0.5, 1.5m에서 해석결과를 비교하였다.

Fig. 5는 가스상의 속도분포를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 가스의 속도는 각 모델에서 유사하게 약 1m/s로 유입구의 유속과 유사한 분포를 나타내고 있다. 이는 유입구의 제트기류의 영향이 지배적인 구간으로 파악될 수 있다. Fig. 5(b)에서 가스상의 속도분포는 각 모델별로 약간의 특성이 나타나고 있다. 분산난류모델의 경우에 제트기류의 코어가 상대적으로 강하게 나타나는 반면에 k-ε-A_p 모델은 확산의 영향이 상대적으로 높게 나타나는 특징이 있다.



(a) At y=0.5m, z=0.5m

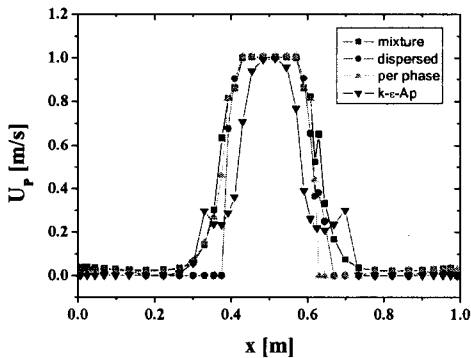


(b) at y=0.5m, z=1.5m

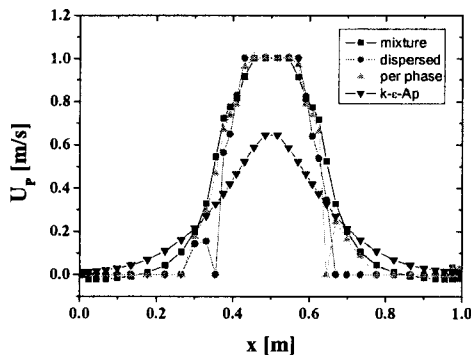
Fig. 5 Velocity profiles of gas

Fig. 6과 Fig. 7은 입자상의 속도 분포와 입자상의 체적분율을 각각 나타내고 있으며, 두 개의 그래프를 같이 보면서 유동특성을 파악할 필요성이 있다. Fig 6(a)에서 입자상의 속도 분포의 비대칭성이 약간 나타나는데, 이는 잘 알려진 바와 같이 수치적 안정성 측면에서 야기되는 결과이며, 향후 지속적인 개선이 필요한 부분이다. 입자의 속도분포를 살펴보면, k-ε-A_p 모델은 다른 모델들에 비하여 최대 속도크기는 유사하지만 속도분포가 상대적으로 낮게 나타나고 있으며, 이

는 Fig. 7(a)의 입자상 체적분율의 분포특성과 연관시켜 볼 경우에 입자상의 체적분율을 증가시키는 요인과 상관관계를 갖는데, 이는 입자상에 대하여 연속방정식을 만족시켜야 하기 때문이다. 혼합난류모델의 경우에 입자상의 속도는 Fig. 6(a)의 가스상의 속도 분포와 유사하며, 이는 난류 점성 계수를 계산하는데 있어서 평균 혼합된 밀도를 사용하기 때문이다. 또한, Fig. 7(a)에서 입자상의 체적분율이 $x=0.5$ 위치의 0.001보다 약간 높게 나타나는 특징이 있으며, 이는 앞서 설명한 연속방정식을 만족시키기 위해서 나타나는 특징으로 판단된다. Fig. 6(a)와 (b)를 살펴보면, 혼합난류모델, 분산난류모델, 각상의 난류모델은 확산의 영향이 $k-\epsilon-A_p$ 모델에 비하여 작게 나타나는 특징이 있어서, $z=0.5m$ 에서 형성된 입자상 속도분포가 $z=1.5m$ 에서도 유사한 패턴을 유지하며, 따라서 입자상의 체적분율도 유사한 패턴을 나타낸다. 반면에 $k-\epsilon-A_p$ 모델은 확산의 영향이 상대적으로 강하게 나타나서, 최대 입자의 속도 크기가 약 40%정도 줄어드는 경향이 있으며, 이런 특징이 입자의 체적분율의 분포에 영향을 나타내고 있다.

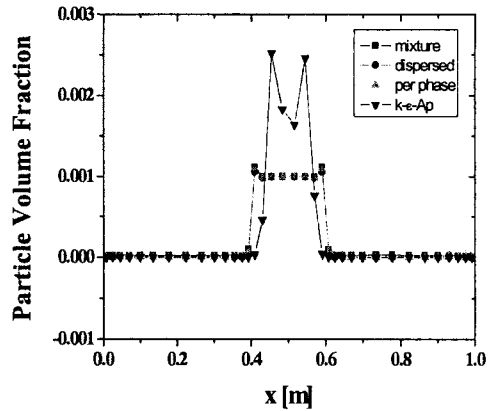


(a) at $y=0.5m, z=0.5m$

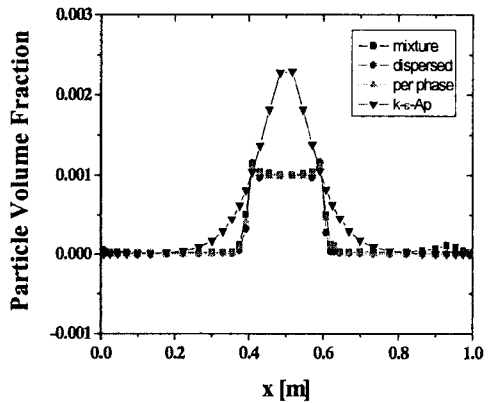


(b) at $y=0.5m, z=1.5m$

Fig. 5 Velocity profiles of particle



(a) at $y=0.5m, z=0.5m$



(b) at $y=0.5m, z=1.5m$

Fig. 7 Volume fraction profiles of particle

4. 결론

본 연구에서는 L. X. Zhou 등이 제안한 다유체 모델과 상용 열유체 해석 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 가스-입자의 난류 이상 유동 특성에 대하여 분석을 하였다. 해석결과에 의하면 입자상의 난류특성 모델링에 따라서 입자상의 유속분포 및 체적분율 분포에 미치는 영향이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 판단되었다. 따라서 향후의 연구에서는 이 부분에 대한 영향을 보다 정확하게 고려하여 연구할 필요성을 발견하였으며, 이를 위하여 $k-\epsilon-k_p$ 모델을 이용한 난류점성계수의 예측이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 향후에는 2상 유동 상태에서의 연소 특성을 파악하기 위하여 이러한 이상 유동 모델링과 함께 연소 및 열전달에 대한 모델링도 추가로 고려되어야 한다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Crowe, C. T., "Review-numerical models for dilute gas-particle flows," ASME. J. Fluids Eng, vol.104, pp. 297-303, 1982
- [2] Crowe, C. T., and Sharma, M. P. and Stock, D. E., "The particle-source in cell model for gas-droplet flows", Trans. ASME J. Fluids Eng., vol 99, pp. 325-332, 1977
- [3] L. X. Zhou, "Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flow and Combustion", Science Press, Beijing, and CRC Press, 1993
- [4] C. M. Liao, et al, "Simulation of particle - fluid turbulence interaction in sudden - expansion flows", Powder Technology 90, pp. 29-38, 1997
- [5] L. X. Zhou, et al, "A Unified Second-Order-Moment Two-Phase Turbulence Modeling for Simulation Gas-Particle Flows", ASME. Numerical Methodes in Multiphase Flows, FED-Vol. 185, pp. 307-313, 1994
- [6] Xiaoqing Huang, et al, "Simulation of Three-Dimensional Turbulent Recirculation Gas-Particle Flows by an Energy Equation Model of Particle Turbulence", ASME, Gas-Solid Flows, FED-Vol. 121, pp. 261-265, 1991
- [7] M. C. Roco, "Particle Two-Phase Flow", Butterworth-Heinemann, 1993
- [8] Shinichi Yuu, et al, "Flow-field Prediction and Experimental Verification of Low Reynolds Number Gas-Particle Turbulent Jets", Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 109, pp. 13-27, 1996
- [9] Fluent 6.2 user's guide, 2005