

LES를 이용한 발전하는 혼합층에서의 입자 운동에 관한 수치 해석 연구

김 태진*·서 태원**

Numerical study of Particle Motion in a Developing Mixing Layer using Large-eddy Simulation

Taejin Kim, Taewon Seo

Key Words: Particle Dispersion(입자분산), Large-eddy Simulation(대규모 와 모사법), Mixing Layer(혼합층), Large-scale Vortical Structure(대규모와류구조)

Abstract

The numerical simulation of the particle dispersion in the vortical flows provides insight into the mechanism of particle-fluid interaction. The simulation results show that the mixing layers are characterized by the large-scale vortical structures undergoing pairing process. The particle dispersion is strongly influenced by the large-scale structures and the particle sizes. The analysis shows that the mixing layers grows like a step-function.

1. 서 론

난류 혼합층에서 입자의 분산은 연료분사 및 미분탄연소등 여러 산업분야에서 매우 중요하다. 연료분사장치로부터 액체연료방울(droplet)의 분사의 정도는 화염의 형태를 안정시키고 액체연료 연소실의 안정성에 주요한 역할을 한다. 노(Furnace)안에서 석탄입자의 혼합은 연소효율을 제어하는 인자이다. 대규모와류구조의 분산은 대기오염의 유포에서 또한 중요하다. 이와 같이 난류 혼합층에서 입자의 분산에 대한 연구는 여러 환경공정과 산업적 응용을 이해하는 데 필수적이다.

혼합층, 제트와 후류(wake)같은 난류전단유동은

Brown과 Roshko⁽¹⁾와 Winant와 Browand⁽²⁾에 의하여 입증된 바와 같이 대규모와류구조에 의해 특성지어진다. 대규모와류구조의 상호작용에 대한 기본 메카니즘은 두 개의 인접한 와류구조는 서로 반대 방향으로 회전하여 합쳐지고 하나의 커다란 와류구조를 형성한다. 와류병합현상에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

분리판 하류에서 혼합층의 발전은 초기에는 선형 불안정성 메카니즘에 의하여 지배된다고 Ho와 Huerre⁽³⁾는 발표하였으며 Ashurst⁽⁴⁾와 Inoue⁽⁵⁾는 이산와류법(Discrete Vortex Method)을 이용하여 혼합층에서 대규모와류구조의 병합과정을 계산하였다.

유동장내로 입자가 유입되면 유동의 특성이 입자에 의해 영향을 받으며, 그 첫 번째 증거는 Hetsroni 와 Sokolov⁽⁶⁾가 Hot-wire를 사용하여 droplet-laden gas jet의 유동 물성치들의 변화에 관해 측정하고, Single-phase jet에 비해 난류강도가 감소되어짐을 발표하였다. Yule⁽⁷⁾은 액체방울 분산에 관한 실험에서 대규모와류구조는 분산, 혼합, 연소와 분무의 증발에 중요한 역할을 한다고 발표하였다. 대규모와류구조에 의한 입자의 분산

* 안동대학교 대학원

** 안동대학교 기계공학부

에 대한 연구는 Crow et al⁽⁸⁾에 의하여 제안 되었고 이들의 모형에서 입자는 대규모와류구조에 의해 동반되고 입자가 대규모와류구조와 함께 회전하는 원심효과를 받는다고 제안했다.

이산와류법은 대규모와류구조에서 입자의 분산에 대한 많은 수치모델에 사용되었으며, Chein과 Chung⁽⁹⁾과 Tang⁽¹⁰⁾은 이 모델을 사용하여 혼합층에서 입자의 분산에 대하여 발표하였다. Chein과 Chung⁽¹¹⁾과 Wen et al⁽¹²⁾는 공간적으로 발전하는 혼합층에서 입자의 분산에 대하여 이산와류법을 적용하여 수치계산하였다. 최근에 Ory와 Perkins⁽¹³⁾는 대규모와류구조에 의한 입자 운동의 영향에 대하여 발표하였다. Squires와 Eaton⁽¹⁴⁾은 DNS코드를 이용하여 움직임이 없는 등방성 난류에서 입자의 영향에 대하여 조사하였고, 입자에 의해서 유동의 난류강도가 감소한다는 것을 발표하였다.

본 연구에서는 혼합층의 대규모와류구조를 모사하기 위하여 LES를 적용하였으며 대규모와류구조에 의해 지배되는 혼합층에서 입자 크기 변화에 따른 입자의 분산에 대하여 조사하고자 한다.

2. 수치계산

2.1 유동모델

Fig.1 은 분리판(Splitter Plate) 상단과 하단에서 서로 다른 두 자유유동이 분리판 끝단에서 만나 평균유속의 구배로 인해 혼합층이 형성되고, 입자가 투입되는 위치를 개략적으로 나타낸 것이다. 속도구배로 인해 형성된 자유전단층은 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의해 Roll-up이 일어나게 되고 이와 같이 형성된 와류구조는 인접한 와류구조와 병합과정을 거쳐 더 큰 하나의 새로운 와류구조를 형성하면서 혼합층의 두께가 성장하게 된다. 혼합층의 상류에서는 와류구조가 지속적으로 형성되며, 형성된 와류구조는 Pairing Interaction을 통해 혼합층을 성장시키고, 두 자유유동의 평균유속으로 하류 방향으로 진행해 간다. 이러한 혼합층내로 입자가 투입이 되면 입자의 크기에 따라 Stokes Number가 변하게 되며 입자가 유동에 따라 거동하는 모습이 달라지게 된다.

Fig. 1의 혼합층에서 유동장의 속도분포는 식 (1)과 같이 표시 할수 있다

$$\frac{u}{U} = 1 - R \tanh \eta \quad (1)$$

여기서 η 는 y/δ 로 표시되며 δ 는 와류두께 (Vorticity Thickness)로 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$\delta = \Delta U / (du/d\eta)_{\max} \quad (2)$$

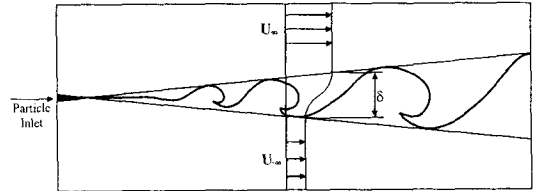


Fig.1 Schematic diagram of a mixing layer

2.2 지배방정식

본 연구에 사용되어진 지배 방정식은 Filtering에 의해 얻어진 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \overline{u_i})}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) \quad (4)$$

$$= - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

여기서, τ_{ij} 는 Subgrid-scale Stresses를 나타내며 Filtering operation에 의해 생성된 미지의 변수로써 다음과 같은 Eddy Viscosity Model에 의해 결정된다.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \mu_t \overline{S_{ij}} \quad (5)$$

여기서, μ_t 는 Subgrid-scale turbulence viscosity를, $\overline{S_{ij}}$ 는 Rate-of-Strain tensor를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{S_{ij}} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Subgrid-scale turbulent viscosity μ_t 에 대해서 다음과 같은 RNG-based subgrid scale model이 적용된다.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

$$\mu_{eff} = \mu \left[1 + H\left(\frac{\mu_s^2 \mu_{eff}}{\mu^3} - C\right) \right]^{1/3} \quad (8)$$

여기서, $\mu_s = (C_{mg} V^{1/3})^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ 이고,

$H(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ 이며, V 는 Computation

Cell Volume이다. $C_{mg} = 0.157$, $C = 100$ 으로 주어진다.

혼합층에서 입자의 운동을 예측하기 위하여 Lagrangian Method을 적용하였다. 본 연구에서 모든 입자는 구형으로 가정하였고 입자의 밀도는 유체의 밀도에 비해 상대적으로 크며, 입자와 입자간의 상호작용은 무시한다고 가정하였다. 또한 유체의 밀도 ρ 와 Flyash의 밀도 ρ_p 의 비, ρ/ρ_p 는 4.92×10^{-4} 이기 때문에 본 연구에서는 Beset 힘, 가상질량 힘, 그리고 압력구배에 의한 힘들이 점성력에 비하여 상대적으로 작기 때문에 무시되었다. 따라서 입자의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d u_p}{dt} = \mathcal{E}_D (u - u_p) \quad (9)$$

여기서, u 는 유체의 속도를, u_p 는 입자의 속도를 나타낸다. 식 (9)에서 오른쪽 항은 입자의 질량당 점성력을 나타내며 \mathcal{E}_D 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\mathcal{E}_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (10)$$

D_p 는 입자의 직경, $Re = \rho D_p |u - u_p| / \mu$,

저항계수(Drag coefficient) $C_D = \frac{24}{Re} f(Re)$ 를 나타내며 입자의 Reynolds수가 1000보다 작은 경우 $f = 1 + 0.15Re^{0.687}$ 이다.

2.3 수치계산 방법

본 연구의 수치계산은 비정상 Navier-Stocks 방정식을 Filtering Process에 의해 소규모 와류구조에 의한 영향을 효과적으로 제거하여 대규모 와류구조의 특성을 지배할 수 있는 LES 방법으로 수치계산을 수행하였다. 속도비 $R = (U_\infty - U_{-\infty}) / (U_\infty + U_{-\infty})$ 로 정의하였고 $U_\infty = 13m/s$, $U_{-\infty} = 4.33m/s$ 를 사용하여 $R = 0.5$ 인 경우에 대하여 계산하였다. 사용되어

진 입자는 Flyash ($\rho_p = 2500kg/m^3$)이고 입자의 크기가 각각 10, 50, 100, 150, 200 μm 인 경우에 대하여 와류구조에 따른 입자 분산을 조사하였다.

Fig. 2에서 나타낸 것처럼 약 25,000개의 비정렬격자를 사용하였고 유동방향으로의 치수는 3000mm, y방향의 치수는 1200mm, 초기 난류강도는 0.5%, 시간 간격은 0.001초, 유동의 입구영역에서는 속도조건을 유동의 출구영역에서는 압력조건을 경계조건으로 사용하였다. 입자는 분리판 끝단에서 정지한 상태로 유체에 의해 유동장에 유입되고, 입자 궤적에 대한 계산은 Runge-Kutta법을 이용하였다.

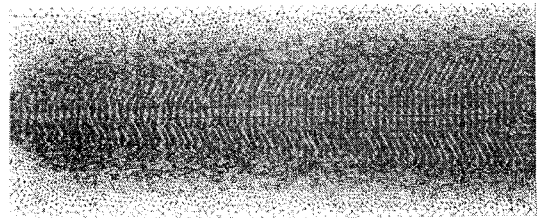


Fig. 2 Computational unstructured grid system

3. 결과 및 고찰

3.1 혼합층의 성장과정

Fig. 3은 시간경과에 따른 등 와도 선도를 나타내며, 혼합층의 발달과정을 보여준다. 비정상계산의 초기값으로 동일한 조건에서 층류해를 사용하였으며 $\tau = 0$ (Fig. 3 (a))일 때 정상층류 유동해를 나타내고 있으며, 유동의 전단층은 매우 얇고 안정된 상태를 나타내고 있다. 비정상 LES계산을 함에 따라 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의해 Roll-up이 일어나고 Roll-up에 의해 형성된 와류구조가 주위 유체의 유입(Entrainment)으로 성장해 나가고 있다. 이와 같이 형성된 와류구조는 인접한 또 다른 와류구조와 상호작용을 시작하게 되고 하나의 더 큰 새로운 와류구조로 합쳐지는 Pairing Interaction을 하게 된다.

Fig. 4는 입자의 크기에 따라 발전하는 혼합층의 성장을 나타낸 결과이다. 혼합층성장의 초기영역은 $x/L \approx 0.1$ 에서 첫 번째 고원(plateau)가 나타나는데 이는 와류의 Roll-up에 해당한다. 이러한

초기 Roll-up이 지나면 상호작용은 주위 유체의 동반을 수반하게 되고 그림에서 보는 바와 같이 와류병합과정을 겪으며 특히 입자의 크기가 50,

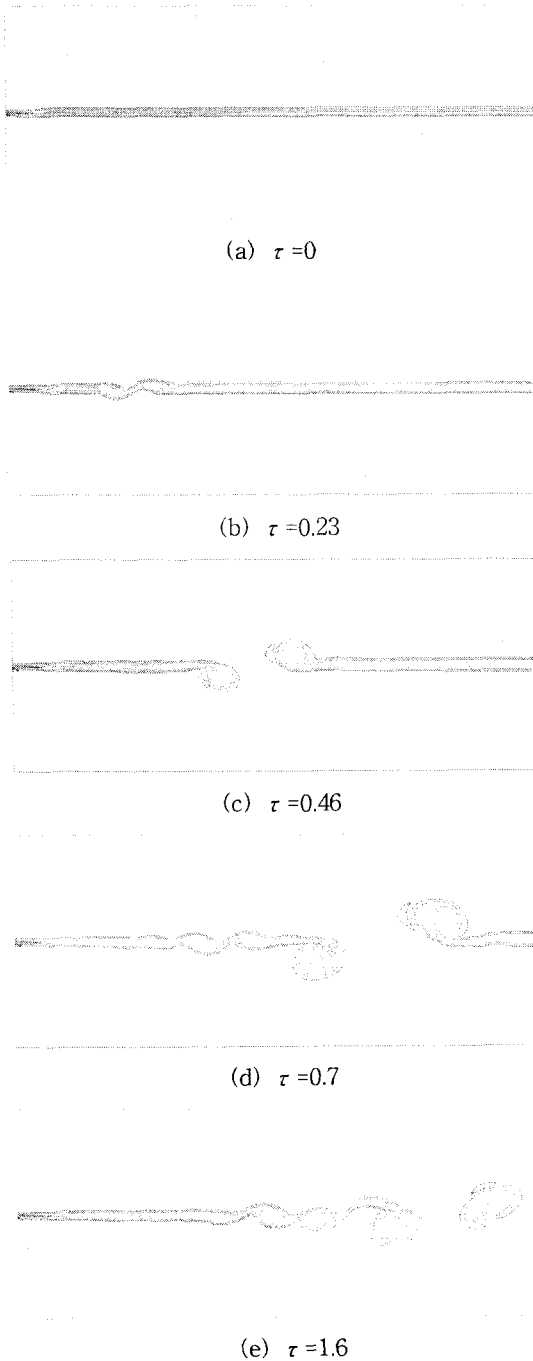


Fig. 3 Time evolution of vortices at consecutive instants

100, 150 μm 인 경우 혼합층의 두께가 급격하게 증가하게 된다. $x/L \approx 0.9$ 의 고원은 하나의 대규모 와류구조가 형성되는 것을 알 수 있으며, 입자의 크기가 200 μm 인 경우 관성력에 의해 입자 분산이 크게 증가함을 볼 수 있다.

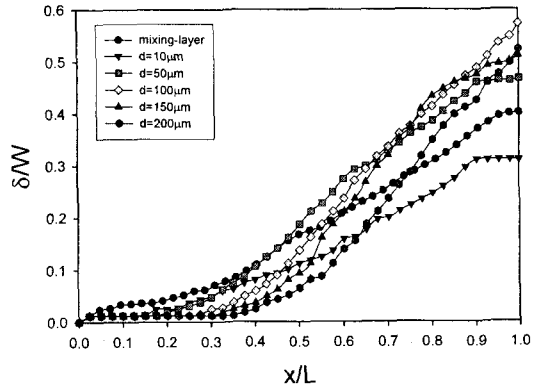


Fig. 4 The change of vorticity thickness for various streamwise position

3.2 입자크기 변화에 대한 확산형태

Crow, Gore 와 Trout⁽⁶⁾은 입자의 공기역학적 반응시간 (τ_A)과 대규모 와류구조의 운동과 관련한 특성시간 (τ_F)의 비로 Stokes Number를 정의하였다. 공기역학적 반응 시간과 특성시간은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_A = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (11)$$

$$\tau_F = \frac{L}{\Delta U} \quad (12)$$

여기서, ρ_p 는 입자의 밀도, d_p 는 입자의 직경, L 은 유동의 특성길이를 나타낸다.

따라서, 식 (11)과 (12)에 따라 Stokes Number를 나타낼 수 있다.

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 \Delta U}{18\mu L} \quad (13)$$

Fig. 5는 입자가 유동장에 투입된 후 $\tau=3$ 일 때 입자크기에 대한 와류구조와 입자의 분산을 나타낸 결과이다.

입자의 직경이 10 μm 인 경우 Stokes Number가 1보다 상대적으로 매우 작은 수($St \ll 1$)로 입자의 반응시간이 유동 특성시간에 비해 상대적으로 작

기 때문에 Fig. 5(a)에 보여주는 것처럼 입자들은 Vortex core내부에 밀집되어 와류구조의 형태와 매우 흡사한 분포를 보여주고 있다. 입자의 크기가 증가함에 따라 입자의 반응속도는 증가하게

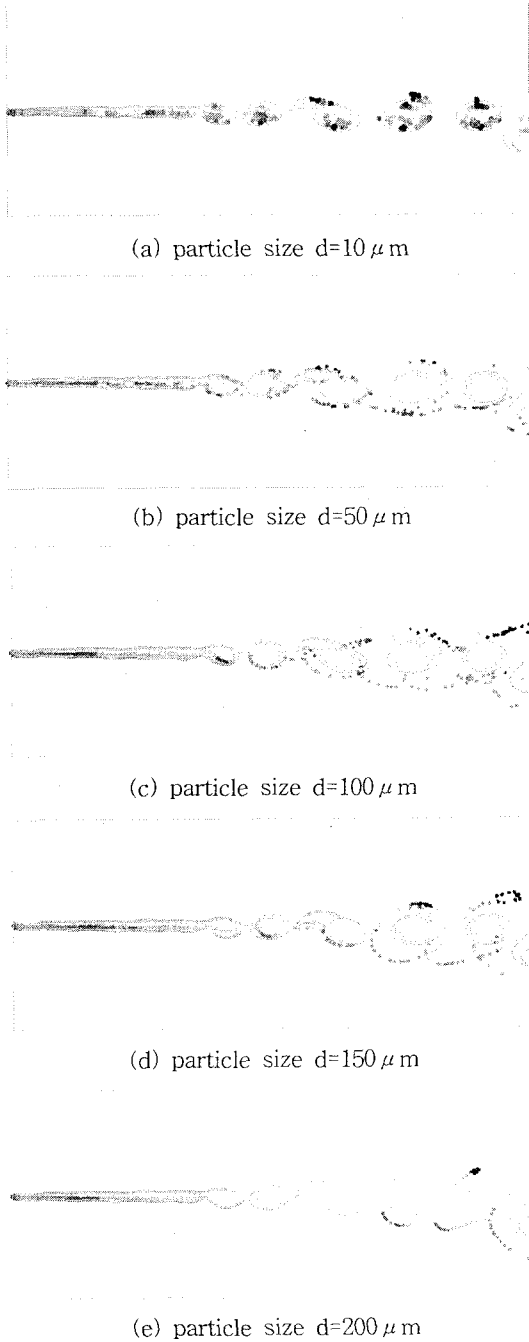


Fig. 5 The vortical structures and particle dispersion

되어 입자는 유동장에서 원심력에 의해 와류구조의 경계에 밀집을 하게 되고, 원심력이 점점 커짐에 따라 입자는 와류구조의 외부로 튕겨져 나가 입자의 분산이 크게 일어나는 것을 알 수 있다. 입자의 크기가 $50\mu\text{m}$ 인 경우 Fig. 5 (b)에서 보여주는 바와 같이 입자는 와류구조의 경계영역에 밀집되어 분포하는 모습을 볼 수 있다. 입자 크기가 $100, 150, 200\mu\text{m}$ 인 경우 $x/L=0.5, 0.7, 0.85$ 에서 확산이 되어져 나가고 있으며 원심력의 증가로 인해 와류구조의 외부로 많이 튕겨져 나감을 볼 수 있다.

Fig. 6 은 입자가 정지한 상태로 분리판 끝단에 투입되었을 때 입자 크기에 따른 무차원 시간에 대한 입자의 평균자유유속의 분포를 나타내었다. 입자의 직경이 $10\mu\text{m}$ 인 경우 입자가 가지고 있는 관성력이 매우 작아서 분리판 끝단에 투입된 직후 평균자유유속의 속도를 따라감을 보여주고 있다. 그러나 입자의 직경이 커짐에 따라 입자주위의 점성력이 증가하게 되고, 공기역학적 반응시간이 지연되게 되며 대규모와류구조는 입자의 운동에 영향을 주기에 충분한 시간을 가지지 못하게 된다.

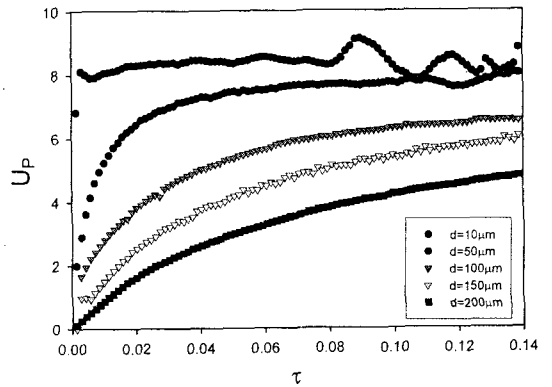


Fig. 6 The particle velocities in the streamwise direction with time

4. 결론

본 연구에서는 속도가 서로 다른 두 자유유동이 분리판 끝단에서 만나 속도 구배로 인해 혼합층이 성장해 나가는 mechanism과 입자가 혼합층

내부로 투입되었을 때 확산경향에 대하여 LES기법을 이용하여 수치계산을 수행하였다.

본 연구 결과에 따르면, 혼합층 성장의 주된 Mechanism은 와류구조의 Pairing Interaction이며 혼합층 두께는 무차원 거리 x/L 이 증가함에 따라 계단함수(step-like function)형태로 커짐을 알 수 있었고, Stokes Number가 매우 작은 입자는 와류구조의 core영역에 밀집하여 와류구조와 거의 흡사한 유동 형태를 나타내고 있다. 입자의 직경이 커짐에 따라 입자의 반응속도가 증가하게 되고 원심력에 의해 와류구조 외부로 튕겨져 나가 입자의 분산이 커짐을 알 수 있으며, 와류구조의 Pairing Interaction이 일어나는 영역에서 입자의 확산이 시작됨을 볼 수 있었다. 본 연구에 사용되어진 입자 중 입자의 직경이 $100\mu\text{m}$ 인 경우 입자의 확산이 가장 잘 일어남을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 두뇌한국21사업에 의해 지원되었기에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Brown, G.L and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Structures in Turbulent Mixing Layer", J. Fluid Mech., vol. 64, pp. 775-861
- (2) Winat, C.D. and Browand, F.K., 1974, "Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynold number", J. Fluid Mech., vol. 63, pp. 237-255
- (3) Ho, C.M. and Huerre, P., 1984, "Perturbed Free Shear Layer", Annual Review Fluid Mech., vol. 16, pp. 365-424
- (4) Ashurst, W.T., 1979, "Numerical Simulation of Turbulent Mixing Layers via Vortex Dynamics", Turbulent Shear Flows, vol. 1, edited by Durst et al., Springer verlag, New York, pp. 402-443
- (5) Inoue, O., 1985, "Vortex Simulation of a Turbulent Mixing Layers", AIAA J., vol. 23, pp. 367-373
- (6) Hetsroni, G. and M. Sokolov., 1971, "Disrtibution of Mass, Velocity and Intensity of Turbulence in a Two-Phase Turbulent Jet", Jnl. Appl. Mech., vol. 93, pp. 315-327
- (7) Yule, A.J., 1980, "Investigation of Eddy Coherence in Jet Flows", Lecture Notes in Physics, vol. 136, pp. 188-207
- (8) Crowe, C.T., Gore, R., and Troutt, T.R., 1985, "Particle Dispersion by Coherent Structures in Free Shear Flows", Particulate Science and Tech., vol. 3, pp. 149-158
- (9) Chein, R. and Chung, J.N., 1987, "Effects of Vortex Pairing on Particle Dispersion in Turbulent Shear Flow", Int. J. of Multiphase Flows, vol. 13, pp. 785-802
- (10) Tang, L., 1990, "Simulation of Multiphase Free Shear Layers", Ph.D. Dissertation, Washington State University
- (11) Chein, R. and Chung, J.N., 1988a, "Simulation of Particle Dispersion in a Two-Dimensional Mixing Layer", AIChE Jnl., vol. 34, pp. 946-954
- (12) Wen, F., Kamalu, N., Chung, J.N., Crowe, C.T. and Troutt, T.R., 1992, "Particle Dispersion by Vortex Structures in Plane Mixing Layers", J. of Fluid Engr., vol. 114, pp. 657-666
- (13) Ory, E. and Perkins, R.J., 1997, "Numerical Study of Particle Motion in a Turbulent Mixing Layer Using the Discrete Vortex Method", 11th Symposium on Turbulent Shear Flows in France
- (14) Squires, K.D. and J.K. Eaton, "Effect of Selective Modification of Turbulence on Two-Equation Models for Particle-Laden Turbulent Flows", Sixth Workshop on Two-Phase Flows, Erlangen, Germany