

중립 대기 상태에서 이상 난류유동에 관한 수치적 연구

강승규* · 윤준용[†] · 이도형**
(2001년 3월 5일 접수, 2002년 2월 4일 심사완료)

A Numerical Analysis for Two-phase Turbulent Flow in the Neutral Atmosphere

Seung-kyu Kang, Joon-yong Yoon and Dohyung Lee

Key Words : Two-phase Turbulent Flow(이상난류유동), $k-\omega$ Turbulence Model($k-\omega$ 난류모델), Convection-Diffusion Equation(대류-확산방정식), Settling Velocity(침강속도), Turbulent Diffusion Coefficient(난류확산계수)

Abstract

A numerical analysis of turbulent gas-particle two-phase flow is performed in conjunction with the experiments of Fackrell & Robins and Raupach & Legg that considered ground-level source and/or elevated source flat plate flow. $K-\omega$ turbulence model is used in order to analyze fully turbulent flow field and the concentration equation with settling velocity is adopted for the concentration field. The model of Einstein and Chien is applied that couples the velocity field and the concentration field. Turbulent eddy viscosity is re-evaluated in this model. The present numerical results have good agreement between the simulation and the experimental data for the mean flow velocities and particle concentrations. While the previous study shows about 27% error in the vicinity of the source of particle concentration, the present study allows about 14% error. A new turbulent gas-particle flow model developed by this study is able to cut down error by 13% at a near source.

1. 서론

최근 환경오염 문제가 사회적으로 주목받기 시작하면서, 그 동안 성장위주의 급속한 산업화의 부산물인 대기 중 오염물질의 확산에 대한 환경영향 평가분야는 그 중요성의 인식과 더불어 시급한 연구과제로 부상하게 되었다. 인류가 생존해 나가기 위해서는 산업활동에 따른 환경오염을 최소화하여야 한다. 이를 위하여 대규모 공단의 최적위치 선정, 발전소 및 공장에서 배출된 오염

물질에 의한 대기오염 방지대책의 수립, 도시환경과 관련된 제반 대기오염문제의 해결 등으로 막대한 시간과 자금이 소요될 전망이다. 공장지대 등 오염물질의 배출이 불가피한 경우, 대기유동에 의해 확산되는 주변지역의 오염물질 농도는 환경기준치 이하로 유지되어야 하지만 현재의 환경법에서는 배출물의 최대 농도만을 규제하기 때문에 대기 중 오염물질 확산에 의한 주변지역의 환경피해는 전혀 고려되지 못하고 있다. 따라서 이와 관련된 환경법규의 제정이 시급한 현실이며, 이를 위해서 대기 중 오염물질 확산에 의한 환경영향의 신뢰성 있는 평가방법이 필수적으로 요구된다. 이러한 요구에 부응하여 최근까지 많은 연구자들이 오염물질의 확산 및 분포를 예측하기 위한 실험 및 수치모델에 관하여 연구하였다. 대표적으로 Fackrell and Robins⁽¹⁾는 난류계층 영역에서 오염물질의 확산 및 분포에 관한

* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 한양대학교 기계공학과
† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5282 FAX : (031)406-5550

실험적 연구를 수행한 바 있다. 이 실험을 통하여 속도장, 농도장 및 난류특성 값들을 측정하였다. 이 실험 자료는 이후로 많은 연구자들에 의해서 비교 자료로 사용되고 있다. Raupach and Legg⁽²⁾는 열확산 실험을 통해서 수동 스칼라양 (passive scalar)의 수직 분포를 측정하였다. 수치적인 연구로는 Bringfelt는 Phoenix 코드⁽³⁾를 사용하여 굴퓍이 있는 공장건물 주위의 유동장과 농도장을 해석하였는데, 연기가시화 실험과 Gaussian Dispersion 공식에 의한 결과와의 정성적 비교를 하였다. Serag-Eldin⁽⁴⁾은 준 3차원 정상유동모델과 3차원 농도모델을 사용하여 오염물질 배출 원을 갖는 긴 직육면체 근처에서의 유동장과 농도장을 계산하였다. 직교좌표계를 이용한 유한차분법(FDM)을 이용하였으며, 표준 k-ε 난류모델을 사용하여 유동장을 해석하였지만 실험결과에 대한 비교는 이루어지지 않았다. 국내에서는 H.G. Kim^(5,6)이 평판 및 복잡지형에서 오염물질 확산을 수치적으로 계산하였다. 오염물질이 유동장에 어떤 영향을 미치지 않는다는 가정을 사용하였으며, 난류유동장을 해석하기 위해서 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 구배확산이론을 도입하여 난류확산을 모델링 하였으며, 이때 난류 슈미트(Schmidt) 수는 0.8의 경험적인 값을 사용하였다. 박근⁽⁷⁾ 등은 복잡지형에서 Chien의 저 레이놀즈수 k-ε 모델을 적용하여 대기오염물질의 확산을 연구하였다. 방정식을 이산화하는데 유한차분법을 사용하였으며, 난류 슈미트 수는 0.7의 값을 사용하였다. 그러나 이상의 복잡지형에 대한 연구에서는 난류량에 대한 실험값과의 비교가 이루어지지 않았다.

본 연구는 대기 중에 가스와 입자가 혼합된 이상유동에 대해 k-ω 난류모델을 적용하여 유동장을 해석하고, 일반적인 대류-확산 방정식에 입자의 침강속도를 고려하여 오염물질의 확산을 수치적으로 계산하고자 한다. 기존에는 입자 수송모델을 해석하는데 있어서 입자와 유동의 상호작용을 무시한 채 계산을 수행하였으나 공기와 입자의 밀도 차가 크거나, 입자의 농도가 클 경우 입자에 의해 유동장이 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 Einstein and Chien⁽⁸⁾의 모델을 도입하여 입자와 유동의 상호작용을 모델링하고자 한다.

2. 이 론

2.1 운동방정식

본 연구는 주기적으로 완전히 발달된 유동 및 입자 수송에 대해 정상, 비압축성, 난류유동장에 대하여 계산을 수행하였다. 지배방정식들은 직교좌표계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

질량보존 법칙;

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

운동량 보존법칙;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \tag{2}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

식 (2)과 같이 시간 평균한 운동량방정식을 레이놀즈 방정식이라 하며 소위 레이놀즈 응력이라고 불리는 $-\overline{u_i u_j}$ 항이 새롭게 포함되어있다. 이항은 Boussinesq의 가정에 의해 등방성 와점성계수 ν_t 와 평균변형률 사이의 관계로 나타낼 수 있다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{4}$$

k 는 난류운동에너지이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

2.2 k-ω 난류모델

농도장을 해석하기 위해서는 우선 속도장을 정확하게 해석해야 되는데, 기존의 연구에서는 속도장을 해석하기 위해 k-ε 계열의 난류모델을 주로 사용하였다. 그러나 k-ε 계열의 난류모델은 평판 유동에서는 좋은 결과를 보이지만, 지형이 복잡한 유동에서는 많은 오차를 보이고 있다. 이것은 벽함수를 사용하기 때문으로 k-ε 계열의 가장 큰 단점이라 하겠다. 따라서 본 연구에서는 벽함수를 사용하지 않고, 복잡지형에서도 예측능력이 뛰어나다고 알려진 Wilcox⁽⁹⁾의 k-ω 난류모델을 사용하고자 한다. k-ω 모델은 벽면에서 거칠기 효과를 고려할 수 있다는 점에서 실지형의 입자 유동을 해석하기에 적합하다 할 수 있다. k-ω 모델은 난류운동에너지(k)와 진동수차원을 갖는 비소산율(ω)의 항으로 다음과 같이 표현된다.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (5a)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] \quad (5b)$$

이때 사용된 모델링 상수는 $\beta = 3/40$, $\beta^* = 0.09$, $\alpha = 5.9$, $\sigma = \sigma^* = 0.5$ 이다. 와점성계수(eddy viscosity, ν_t)는 난류운동에너지와 비소산율과 관련되며, 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \quad (\gamma^* = 1.0) \quad (6)$$

표면 거칠기 효과는 벽면에서 비소산율을 다음과 같이 정의해준다.

$$\omega = u_\tau^2 S_R / \nu \quad (7)$$

$$S_R = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2, & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^+}, & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 k_s^+ 는 표면 조도길이에 대한 경계층 높이의 비(k_s/H)로 정의하였다.

2.3 농도방정식

부유입자는 난류확산에 의하여 부유하는 상태가 유지될 수 있다. 다시 말해서 연직 상방향으로 향하는 입자의 난류확산 속도는 연직 하방향의 자중에 의한 침강속도와 균형을 이룸으로써 부유 상태를 유지하게 된다. 이와 같은 가정 하에서 유한검사 체적 안에서 부유하는 입자의 보존법칙을 적용하면, 일반화된 입자수송방정식이 세워진다.

$$\gamma \int_V \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}_p) - \nabla \cdot (K \nabla C) \right) dV = 0 \quad (9)$$

여기서 γ 는 비중량(specific weight)이고, C 는 입자의 평균 농도(mean concentration)로서 단위 체적당 입자의 무게로 정의되며, K 는 입자의 와확산계수(eddy diffusivity), \vec{u}_p 는 부유하는 입자의 속도벡터이다. 이 식을 미소검사체적에 적용하여 미분방정식 형태로 나타내면,

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}_p) = \nabla \cdot (K \nabla C) \quad (10)$$

와 같이 되고, $\vec{u}_p = \vec{u}_f + \vec{w}$ (\vec{u}_f 는 유체속도, \vec{w} 는 입자의 침강속도)로 나타낼 수 있다. 여기서 유체가 비압축성 유체이고 입자의 크기와 모양이 균일하여 침강속도가 일정하며, 소스(source)의 분출이 존재하는 일반적인 비정상상태(transient)의 입자 수송방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + Q(x, y) \quad (11)$$

이때 $u_j = (u, v - w_s)$ 이며, w_s 는 입자의 침강속도이고, Q 는 소스의 분출량(emission rate)으로 Dirac delta 함수로 표현된다. 유동장 내에서 입자의 침강속도에 대한 van Rijn⁽¹⁰⁾의 연구에 의하면 입자의 크기가 $100 \mu m$ 이하인 경우 w_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gd_p^2}{\nu} \quad (12)$$

여기서 s 는 유체의 밀도에 대한 입자의 밀도비($=\rho_p/\rho$)로서 값이 1보다 크면 입자는 침강[하강]하게 되고 반대로 1보다 작으면 입자는 상승하게 된다. d_p 는 입자의 지름 그리고 ν 는 유체의 동점성계수이다. 또한, 입자의 와확산계수 K 는 통상 다음과 같이 정의된다.

$$K = \beta \nu_t \quad (13)$$

β 는 난류 슈미트 수(turbulent schmidt number, Sc_t)의 역수이며 일반적으로 Sc_t 는 0.5-1.0 사이의 값으로 정의되는데 본 연구에서는 Fackrell and Robins가 제시한 0.8의 값을 사용하였다. 유동 내에서 입자의 영향을 나타내기 위하여 표준 $k-\omega$ 난류모델의 와점성계수를 수정할 필요가 있는데, 이에 대해서 Einstein and Chien이 제안한 모델을 이용하였다.

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{s}\right) C \right] \quad (14)$$

이로써 입자수송모델과 유동모델이 연관되게 된다.

3. 계산 및 결과

3.1 실험데이터

Table 1 Flow conditions

	Fackrell and Robins(1982)		Raupach and Legg(1983)
Boundary-layer height(H)	1.2m		540mm
Source emission height(H_s)	GLS	0H	-
	ES	0.19H	60mm
Roughness(z_0/H)	2.4×10^{-4}		2.2×10^{-4}
Friction velocity(u_* / U_c)	0.047		0.044
Mean velocity(U_c)	4m/s		7.8m/s
Reynolds number($U_c H / \nu$)	3.287×10^5		4.0×10^5

본 연구에서는 계산결과를 Fackrell and Robins의 실험과 Raupach and Legg의 실험결과와 비교하였다. Fackrell and Robins는 평판 상에서 프로판과 헬륨의 혼합가스를 지표면에서 방출할 때 (Ground-level source, GLS)와 지표상에서 방출할 때(Elevated source, ES) 오염물질의 분포를 실험하였다. 그리고 Raupach and Legg는 평판 상에 위치한 선 분출원(Line source)에서 배출되는 수동 스칼라양(passive scalar)의 확산에 대해 실험하고 이의 수직분포를 구하였다. 위의 두 가지 실험에 대한 유동조건은 Table 1과 같다.

3.2 계산방법

수치계산 방법은 Yoon and Patel⁽¹¹⁾이 사용한 방법을 적용하여 계산하였다. 이 방법은 시간평균된 나비아-스토크스(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 일반 곡선 좌표계에서 수학적으로 완전변환하여 해석한다. 또한 운동방정식, 난류물성치들의 수송방정식 그리고 입자수송방정식을 유한해석법(FAM)으로 이산화하고, 압력 및 속도 보정을 위해서는 Patanker의 수정된 SIMPLER 알고리즘을 사용한다. 계산을 위한 조건으로서 초기 입구조건으로는 평판에서 완전발달된 난류유동의 속도 및 난류량 분포를 사용하였다. 바닥면에서는 속도에 대해서 점착조건을 주었고, 비소산율(ω)은 식 (7)을 적용하였다. 바닥면에서의 농도경계조건은 바닥표면과 물질전달이 이루어지지 않는다고 가정하여 $\partial C / \partial z = 0$ 을 사용하였다. 상층부 표면에서는 대기가 안정되어 있다고 가정하여 Neumann조건을 적용하였다.

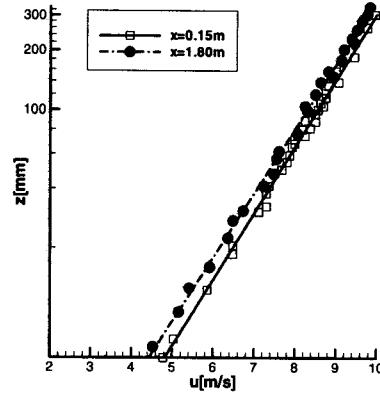


Fig. 1 Vertical profiles of mean velocity on the flat floor the elevated source [symbols, experiments of Raupach and Legg(1983) ; lines, this study]

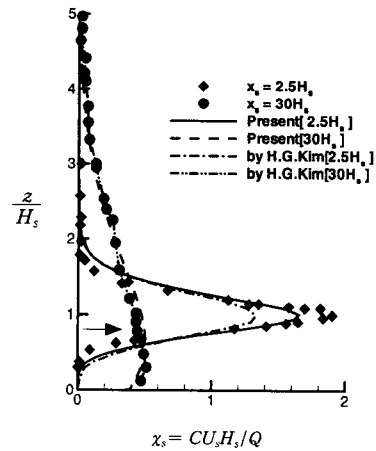


Fig. 2 Vertical profiles of mean concentration on the flat floor the elevated source [symbols, experiments of Raupach and Legg(1983)]

3.3 계산결과

Fig. 1은 지표상에서 소스가 분출될 때 평판 위에서의 평균유속 분포를 나타낸다. 소스분출지점으로 부터 0.15m, 1.80m 지점에서의 속도분포로서 계산결과는 Raupach and Legg의 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 2는 평판 상에서 평균농도의 수직분포를 나타낸 것이다. 각 기호들(symbols)은 Raupach

and Legg의 실험데이터로서 소스가 분출되는 지점으로부터 분출원 높이(H_s)의 2.5배, 30배 되는 위치에서의 수직분포를 나타내고 있다. 직선(solid line)과 점선(dash line)은 본 연구에 의한 결과이고, 알점쇄선(dash-dot line)과 이점쇄선(dash-dot-dot line)은 H.G.Kim^(5,6)의 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 소스 분출지점으로부터 멀리 떨어진 곳($30H_s$)에서는 수치계산 결과가 모두 실험값과 잘 일치하는 반면, 소스 분출원 근방에서는 실험값과 계산값이 오차를 보이고 있다. 기존의 연구자들은 이것을 구배확산이론(K-theory)의 한계라고 지적하였다. 또한 유한체적법을 사용하는 경우 배출원을 모델링하는데 있어서 격자간격의 선정에 따른 오차도 보고되고 있다.⁽¹²⁾ 구배확산이론은 농도플럭스($\overline{w'c}$)가 전 영역에서 유사한 분포를 가진다는 가정을 사용하기 때문에, ES의 경우와 같이 농도변화가 급격하게 변하는 곳에서는 유사성을 잃게 되어 실제 현상을 제대로 묘사할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 Einstein and Chien의 모델을 도입하여 농도의 변화에 따라 난류점성 계수를 변화시킴으로서, 결국 난류확산 계수를 수정하는 방법으로 구배확산이론을 보완하는 방법을 사용하였다. 이를 통해서 소스 분출원 근방에서 기존에 약 27% 정도의 오차를 보이던 것을 14%정도로 줄일 수 있었다. 그러나 입자의 농도 변화가 매우 작은 영역에서는 이러한 영향을 무시하고 계산해도 큰 문제가 되지 않는다. 이것은 소스 분출원으로부터 멀리 떨어진 곳($30H_s$)에서는 입자의 영향을 고려한 계산과 그렇지 않은 계산이 모두 실험값과 잘 일치하는 것으로 입증되고 있다. 그러나 소스 분출원 근방에서는 상대적으로 입자의 농도가 매우 높기 때문에 입자들이 유동장에 미치는 영향을 무시할 수 없게 된다. Einstein and Chien의 모델에 의하면 유동장의 와점성계수가 입자의 농도와 밀도에 영향을 받게 된다. 결국 소스의 분출유량이 매우 많거나 공기보다 밀도가 매우 큰 소스가 분출되는 경우에는 입자와 유동의 상호 작용을 무시할 수 없게 되는 것이다.

Fig. 3은 평판의 지표면에서 소스가 분출되는 경우(GLS) 농도의 수직분포를 나타낸다. 소스가 분출되는 위치로부터 경계층 높이(H)의 1.67배, 3.33배, 5.0배 되는 지점에서의 수직분포를 Fackrell and Robins의 실험결과와 비교하였다. 이 경우

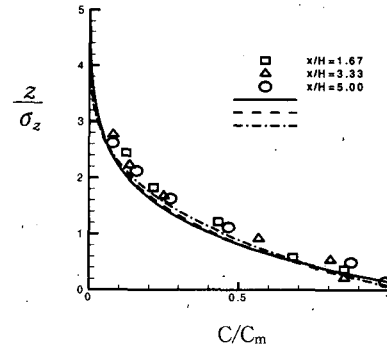


Fig. 3 Vertical profiles of mean concentration from the ground-level point source on the flat floor [symbols, experiments of Fackrell and Robins(1982) ; lines, this study]

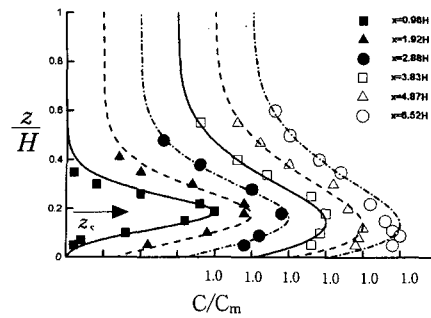


Fig. 4 Vertical profiles of mean concentration from the elevated point source on the flat floor [symbols, experiments of Fackrell and Robins(1982) ; lines, this study]

각각의 무차원화된 농도의 수직 분포가 소스 분출원으로부터의 거리에 무관하게 유사한 분포를 보이고 있다. 그러므로 GLS의 경우에는 구배확산이론의 적용에 큰 문제가 없다.

Fig. 4는 소스가 바닥으로부터 0.19H 떨어진 지점에서 분출되는 경우(ES)의 농도분포를 보여주고 있다. 소스 분출지점으로부터 0.96H, 1.92H, 2.88H, 3.83H, 4.79H, 6.52H에서의 수직분포를 각각 나타내고 있다. 실험값과 계산 결과가 대체로 잘 일치하고 있으나, 바닥 근처에서는 약간의 오차를 보이고 있다. 기존의 연구에서도 바닥 근처에서 이러한 오차를 내포하고 있는데, 이것은 소스가 바닥 면에서 굴러가는(bed-load) 형태로 이동되고 있기 때문으로 판단된다. 윤준용⁽¹³⁾ 등의 연구에 의하면 부유입자 유동에서 바닥으로부터 어

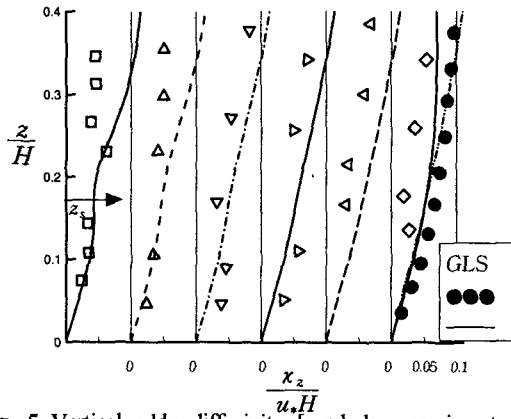


Fig. 5 Vertical eddy diffusivity [symbols, experiments of Fackrell and Robins(1982); □, 0.96H; △, 1.92H; ▽, 2.88H; ▷, 3.83H; ◁, 4.87H; ◇, 6.52H; lines, this study]

는 높이까지는 입자가 굴러가는 형태로 이동되는 것이 보고되고 있다. 대기 중의 실제 자연지형에서는 이런 현상을 배제할 수 있겠으나 Fackrell and Robins의 실험실 조건에서는 바닥근처에서 굴러가는 입자가 존재할 것으로 사료된다. 결국 이러한 영향 때문에 바닥근처에서의 실험값이 계산 값보다 높게 예측하고 있는 것이다.

Fig. 5는 수직방향 와확산계수(eddy diffusivity, χ_2)의 분포를 나타낸다. 결과로부터 소스분출 지점에서 국부적으로 확산계수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 결국 수직방향 확산계수의 감소는 오염물질이 수직방향으로 확산되는 것을 지연시키고, 유동방향으로의 이송을 돕는 역할을 하게된다. 이러한 현상은 소스분출이 일어나는 곳에서 강하게 일어나다가 점점 소멸되어 가고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 Einstein and Chien의 모델이 이와 같은 입자 유동을 해석하는데 효과적이라고 할 수 있다. 또한 Fig. 5는 바닥에서의 와확산계수가 영(zero)임을 보여주고 있는데, 이것은 바닥 면을 통해 물질전달(mass transfer)이 이루어지고 있지 않음을 의미한다. 이 결과는 바닥면에서 농도구배가 존재하지 않는다는 경계조건에 의한 것이다.

4. 결 론

본 연구는 중립상태의 대기에서 오염물질이 확

산 및 이송되는 현상을 수치적으로 계산하였다. 유한해석법으로 방정식들을 이산화하였으며, 난류 유동장을 해석하기 위해 k- ω 난류모델을 사용하였다. 그리고 입자와 유동의 상호작용을 계산하기 위해 Einstein and Chien의 모델을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 기존의 연구에서는 입자들이 유동장에 미치는 영향을 고려하지 않고 계산을 수행하였다. 이러한 모델링 방법은 소스가 지표면에서 분출되거나, 소스 분출지점으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 좋은 결과를 보여 주었다. 그러나 농도변화가 급격하게 변하는 구간에서는 입자의 농도를 약 27%정도 과소 예측하는 경향이 있었다. 이것은 구배확산이론의 한계라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 구배확산이론의 한계를 보완하기 위해 입자의 농도 변화에 따라 와점성계수를 수정함으로써 소스의 분출원 근방에서 13% 정도 오차를 감소시킬 수 있었다.

(2) Fackrell and Robins의 실험결과와 본 연구의 수치계산 결과를 통해서 지표상 분출원 부근에서 국부적으로 수직방향의 난류확산계수가 감소함을 볼 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 모델은 이러한 난류현상을 예측하는데 적합한 것으로 사료된다.

(3) 향후 건물이 많은 도심지형이나 산이 많은 우리 나라지형에 적합한 모델링이 필요하며, 국부 유속의 변화등 다양한 대기의 상태를 고려한 해석이 요구된다.

후 기

이 논문은 2000년 한양대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) Fackrell, J.E. and Robins, A.G., 1982, "Concentration Fluctuations and Fluxes in Plumes from Point Sources in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 117, pp. 1~26.
- (2) Raupach, M.R. and Legg, B.J., 1983, "Turbulent Dispersion from an Elevated Line Source: Measurements of Wind-Concentration Moments and Budgets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 111~137.
- (3) Bringfelt, B., 1984, "Phoenix - Simulations of

- Plume Spread in the Lee of a Building and Comparisons with Smoke Experiments and Gaussian Dispersion Formulae," *Meteorologiska Avdelningen for skningssektionen*.
- (4) Serag-Eldin, M.A., 1985, "The Spread of Pollutants Emitted from Long and Large Obstacles in Atmosphere," CAIRO SCIENTIFIC CENTER Technical Report 009.
- (5) Kim, H.G., 1997, "Numerical Investigation of the Pollutant Dispersion over Complex Terrain," Pohang University of Science and Technology, Ph.D. Thesis.
- (6) Kim, Hyun Goo and Lee, Choung Mook, 1998, "Pollutant Dispersion Over Two-Dimensional Hilly Terrain," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 96~111.
- (7) 박 근, 박원규, 1998, "2차원 종형 언덕 주위의 유동 및 확산현상에 관한 수치해석적 연구," 한국전산유체공학회지, 제3권, 제1호, pp. 63~72.
- (8) Einstein, H.A. and Chien, N., 1955, "Effects of Heavy Sediment Concentration Near the Beds on Velocity and Sediment Distribution," U.S. Army Engineering Division, MRD series No. 8.
- (9) Wilcox, D.C., 1988, "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA J.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299~1310.
- (10) van Rijn, L.C., 1984, "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport," *J. Hydr. Eng., ASCE*, Vol. 110, No. 11, pp.1613~1641.
- (11) Yoon, J.Y. and Patel, V.C., 1996, "Numerical Model of Turbulent Flow over Sand Dune," *J. Hydraulic Eng., ASCE*, Vol. 122, No. 1, pp. 10~18.
- (12) 김현구, 이정목, 1998, "난류확산계수의 수정에 의한 Eulerian 확산 모델의 개선," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제10호, pp. 1483~1489.
- (13) 윤준용, 강승규, 강시환, 2000, "개수로에서 소유사의 영향을 고려한 부유입자 유동에 관한 수치적 연구," 한국수자원학회지, 제33권, 제4호, pp. 461~469.