

2차원 중형 언덕 주위의 유동 및 확산현상에 관한 수치해석 연구

박 근^{*1}, 박 원 규^{*2}

Numerical Simulations of the Flowfield and Pollutant Dispersion over 2-D Bell-Shaped Hills

K. Park, W. G. Park

The numerical simulations of flowfield and pollutant dispersion over two-dimensional hills of various shapes are described. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and concentration diffusion equation based on the gradient diffusion theory have been applied to the atmospheric shear flow over the bell-shaped hills which are basic components of the complex terrain. The flow characteristics such as velocity profiles of the geophysical boundary layer, speed-up phenomena, mean pollutant concentration profiles are compared with experimental data to validate the present numerical procedure and it has been found that the present numerical results agree well with experiments and other numerical data. It has been also found that the distributions of ground level concentration are strongly influenced by the source location and height.

Key Words : 대기확산(Atmospheric Dispersion), 난류유동(Turbulent Flow), 구배확산이론(Gradient Diffusion Theory), 중형언덕(Bell-shaped Hill), 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델(Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Model).

1. 서론

대기오염 물질을 배출하는 각종 공장, 쓰레기 소각시설, 발전소 등의 시설은 주변 주민들과의 각종 민원을 발생시키는 등 여러 가지 사회문제를 일으키고 있다. 따라서 이와 같은 환경침해 시설이 세워지기 위해서는 이러한 시설이 주변환경에 미치는 영향을 미리 예측해보고 대응방안을 강구하는 일이 필수적일 것이다. 과거에는 이러한 대기오염 확산예측을 위해 모형용 이용한 풍동실험이 주를 이루어 왔는데

Gong[1,2]은 중립대기 상태에 놓인 2차원 및 3차원의 완만한 경사의 언덕을 대상으로 한 유동특성과 확산현상 해석을 풍동실험으로 연구하였으며, Arya 등[3]은 2차원 Russian Hill 주위의 유동 및 점원(point source)으로부터의 확산을 실험연구하였다. 그러나 최근에는 고성능 컴퓨터의 개발과 여러 가지 수치해석 방법의 발전 등에 힘입어 수치해석방법을 많이 사용하게 되었는데, Castro 등[4]은 Russian Hill주위의 유동과 확산에 대하여 자신들이 개발한 수정된 저 레이놀즈수 난류모델을 적용한 수치해석을 행하였고, 김현구 등 [5,6]은 코사

*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

*2 정회원, 부산대학교 기계공학부

인(cosine)형 언덕 주위의 유동에 대하여 풍동 실험과 수치연구를 병행하였으며, 선원(line source)으로부터의 확산현상을 수치해석으로 연구하였다.

현재 환경영향평가에서 주로 사용하고 있는 Gaussian모델은 조도높이 0.5m 이하의 평탄한 지형에 대해서만 사용될 수 있으므로[7] 국토의 대부분이 산지로 이루어진 우리 나라의 여건에서는 그 적용이 상당히 제한되고 정확성도 많이 떨어진다. 이는 빌딩이 산재한 도시나 산악지형과 같은 복잡한 지형 하류부에서 발생하는 유동박리나 와류의 영향을 전혀 고려할 수 없기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 복잡지형 내에서 발생하는 오염물질 확산현상을 정확히 수치해석할 수 있는 프로그램의 개발을 목표로 하고 있으며 그 첫번째 단계로 복잡지형 중에서 간단한 모델에 해당하는 중형 언덕에 대한 대기오염물질 확산예측을 수행하여 보고자한다. 오염물질 확산을 예측하기 위해서는 우선 대상지형에 대한 정확한 유동해석 정보가 필요하게 되는데, 이를 위해 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 지배방정식으로 하여 유동해석을 수행하고, 이렇게 얻어진 유동장 정보를 이용하여 구배확산이론에 기초한 확산방정식을 풀어서 대상지형 주위의 대기오염 물질 확산현상 해석을 행하였다. 현재 본 연구에서는 실험데이터나 타 연구자의 수치해석 결과들과 비교 분석하기 위해 2차원 해석 결과만을 보여주고 있으나, 이론적으로나 수치해석적으로 그대로 3차원에서의 확장이 가능하다.

2. 지배방정식과 수치해석방법

2.1 반복시간행진법

2차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 Navier-Stokes 방정식을 무차원화한 후, 복잡한 기하학적 경계조건을 만족시키기 위해 물리

적 좌표계(t,x,y)를 일반화된 곡선좌표계(τ, ξ, η)로 변환하면 다음과 같이 표현된다[8].

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{E} - \hat{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{F} - \hat{F}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서, $\hat{q} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \end{pmatrix}$ 을 의미하며, 유동벡터 \hat{E} 와

\hat{F} 는 곡선좌표계의 대류항이고, \hat{E}_v 와 \hat{F}_v 는 점성항을 의미한다. 먼저 식(1)에서 운동량 방정식을 시간행진법으로 유한차분화 시킨 후, 'n+1'의 시간과 'k'반복횟수에 대해 부분적으로 선형화시키면 다음식을 얻는다.

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (2)$$

여기서, ω 는 완화계수이며, \bar{A}, \bar{B} 는 대류항 및 점성항을 포함하는 flux항의 Jacobian 행렬이고, $\bar{R}^{n+1,k}$ 은 다음으로 정의되는 운동량 방정식에 대한 잔류벡터이다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = & -\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) \\ & - (\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k}) \\ & + (\delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

만약 $\Delta \bar{q}$ 가 영(zero)으로 간다면 잔류벡터 $\bar{R}^{n+1,k}$, 즉 비정상 상태 운동량 방정식이 정확하게 만족됨을 알 수 있다. 다음으로 비압축성 연속방정식은 매 시간 변화하는 속도장과 이에 대한 압력변화에 대한 연결이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 Marker-and-Cell(MAC)개념[9]을 이용하여 아래와 같이 이들을 연결시켰다.

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} = -\beta (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (4)$$

여기서, β 는 완화계수이다. 만약, Δp 가 영으로 접근한다면, 연속방정식이 비정상 상태에서도 정확히 만족됨을 알 수 있다. 식(1)과 (4)의 수치적 이산화를 위해 대류항은 SMARTER(Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport Efficiently Revised)기법[10]을 이용하였으며, 점성항 및 연속방정식은 중앙차분하였고, 알고리즘의 안정화를 위해

4차의 인공감쇠항(artificial damping)을 연속방정식에만 첨가하였다.

난류모델은 여러 가지 유동에 폭넓게 적용되어 그 정확성과 타당성이 입증된 Chien[11]의 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델이며, 물리적 좌표계에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P - \epsilon - \frac{2\nu k}{y^2} \quad (5)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P - \frac{\epsilon}{k} \left[C_2 f \epsilon + \frac{2\nu k \epsilon^{-C_{1u,y/\nu}}}{y^2} \right] \quad (6)$$

여기서, P 는 난류에너지의 생성항이고, 감쇠항수 f 는 다음의 식으로 주어진다.

$$f = 1 - \frac{0.4}{1.8} e^{-(k^2/6\epsilon)^2} \quad (7)$$

위 $k-\epsilon$ 방정식을 풀어 구한 k 와 ϵ 을 이용하여 난류점성계수 ν_T 는 다음의 식으로 부터 구한다.

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} [1 - e^{-(C_{1u,y/\nu})}] \quad (8)$$

그리고 위 방정식에서 사용한 상수값들은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.35, \quad C_2 = 1.8, \quad C_3 = 0.0115, \\ C_4 = 0.5, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$k-\epsilon$ 방정식도 SMARTER기법을 이용하여 대류항을 차분화하였으며, 시간행진법을 이용하여 해를 구하였다.

2.2 대기확산의 지배방정식

본 연구에서 대기확산을 계산하기 위해서 다음의 가정을 설정하였다.

- ① 오염물질은 유동과 와동에 따라 피동적으로 흩어지는 보전성(保全性)의 passive scalar이고, 열부력에 의한 효과는 없다.
- ② 오염물질의 이동속도는 바람의 속도와 같고, 오염물질의 비중은 공기와 같다.

③ 수평방향(즉, 유동방향)으로는 이류(advection)의 영향이 확산에 의한 영향보다 훨씬 크므로, 이 방향의 확산은 무시하였다.

④ 배출원은 무한 선원(infinite line source)이다.

이상의 가정을 이용하여 난류유동장 내에서 오염물질의 이송 및 확산을 지배하는 방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial(-\overline{vc})}{\partial y} + Q(x, y) \quad (9)$$

여기서 U, V 는 평균유속이고, v 는 y 방향의 변동속도성분이다. C 는 평균농도(mean concentration), c 는 변동농도성분(fluctuating concentration)을 의미한다. Q 는 [질량/체적 · 시간] 차원을 갖는 국부 오염원의 강도함수를 나타내는데 본 연구에서는 2차원 dirac delta function을 이용하였다.

위 지배방정식에 구배확산이론을 적용하여 난류확산을 모델링하게 되면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q(x, y) \quad (10)$$

여기서, K_y 은 연직방향으로의 난류확산물(turbulent eddy diffusivity)인데, 레이놀즈 유사(Reynolds analogy)를 적용하면 난류확산물은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$K_y = \frac{\nu}{Sc_t} \quad (11)$$

여기서, Sc_t 은 난류Schmidt수로 물리적으로는 난류확산의 특성길이(characteristic length scale)와 운동량 이송의 특성길이의 비(ratio)로서 통상 0.5에서 1사이의 값을 가지는데, 본 연구에서는 중립대기 조건이라는 점과 수치실험을 바탕으로 0.7을 사용하였다.

2.3 계산 격자 및 경계조건

유동의 수렴증진과 오차발생을 줄이기 위해서는 경계에서 수직인 격자계가 바람직하나 그

럴 경우에는 여러 가지 물성치의 수직분포를 나타내기 위해서 수치보간법을 사용하여야 하며 이는 여러 물성치의 정확한 정량적 비교를 어렵게 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대수적인 방법으로 격자계를 구성하였으며, 저 레이놀즈수 난류모델의 요구사항에 맞도록 난류저층(viscous sublayer)에 많은 격자를 배치하도록 경계면으로 충분히 격자를 밀집시켰다.

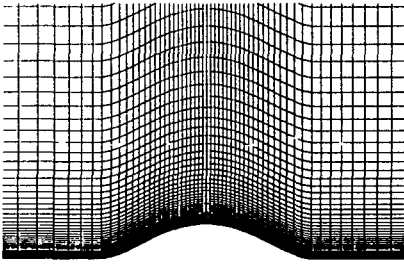


Fig.1 Grid system for the Russian hill.

Fig.1은 격자계의 한 예로 뒷장에서 설명하게 될 Russian Hill중에서 HILL-3의 격자계를 보여주고 있는데 유동방향으로 120개, 수직방향으로 80개의 격자를 분포시켰다.

유동계산을 위한 경계조건으로 상류 유입경계에서는 아래와 같은 조건을 부가하였다.

$$U = \begin{cases} \frac{u_*}{x} \ln(y/y_0) & y \leq H \\ U_\infty & y > H \end{cases}$$

$$V = 0$$

$$k = \begin{cases} C_\mu^{-1/2} u_*^2 (1 - y/H)^2 & y < 0.9H \\ k_\infty & y > 0.9H \end{cases}$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{xy}$$

여기서, κ 은 von-Karman상수이고, u_* 은 표면에서의 마찰속도, y_0 은 표면 조도길이를 의미한다. 지표면에서는 점착조건(no-slip condition) 및 $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$, 그 이외의 경계에서는 Neumann조건을 부가하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 평판상의 유동 및 확산계산

먼저 확산계산용 코드의 정확성을 검증하기 위하여 Raupach 과 Legg[12]가 행한 평판상에 위치한 선원에서 배출되는 passive scalar의 확산 실험과 동일한 조건하에서 계산을 수행하였다. Fig.2은 평균속도분포로서 계산결과가 실험값과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

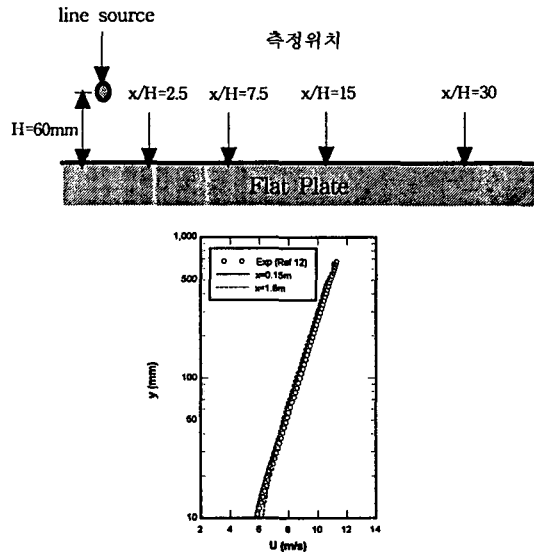
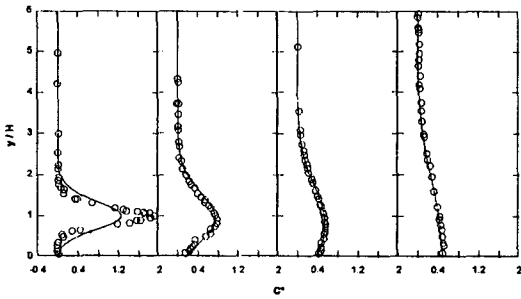


Fig.2 Mean velocity profile over the flat plate.

Fig.3의 (a), (b), (c), (d)는 배출원에서 각각 $x/H=2.5, 7.5, 15, 30$ 에서 측정된 오염물질의 연직방향 농도분포로서 H 는 평판에서 연원까지의 높이를 의미한다. 연원에서 아주 가까운 지점($x/H=2.5$)을 제외하고는 계산결과가 실험값과 잘 일치하고 있는데, 이와 같이 연원근방에서 예측성능이 떨어지는 것은 Raupach 과 Legg가 지적하였듯이 구배확산이론의 결점중의 하나이다. 이 점을 제외하고는 저차(low order)의 구배확산이론을 이용한 모델이 수직, 유동방향으로의 scalar flux를 만족할 만하게

잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig.4은 표면에서 측정된 농도를 실험과 비교한 것으로 역시 잘 일치하는 경향을 볼 수 있다.



(a) $x/H=2.5$ (b) $x/H=7.5$ (c) $x/H=15$ (d) $x/H=30$

Fig.3 Mean pollutant concentration profiles computed at several streamwise locations.

(\circ : Experiment [Ref.12], — : Present)

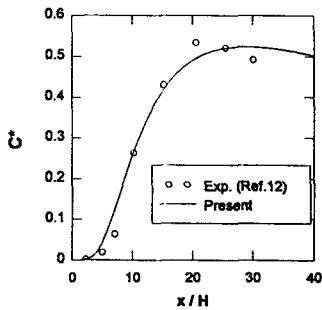
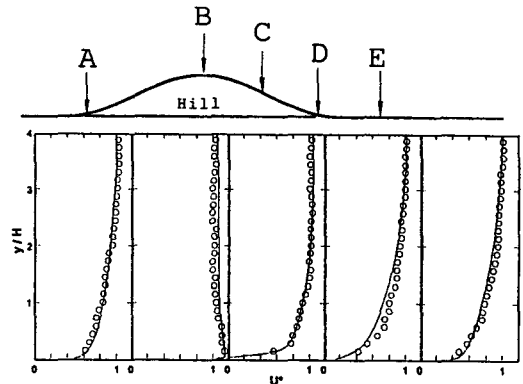


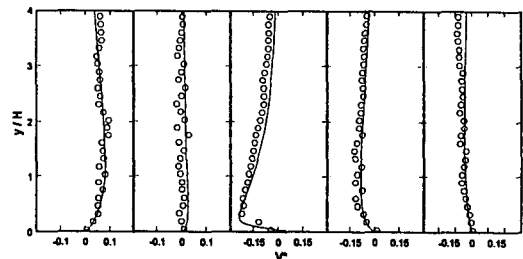
Fig.4 Variation of the mean ground concentration along x-axis.

3.2 코사인 형태의 언덕에 대한 유동 및 확산계산

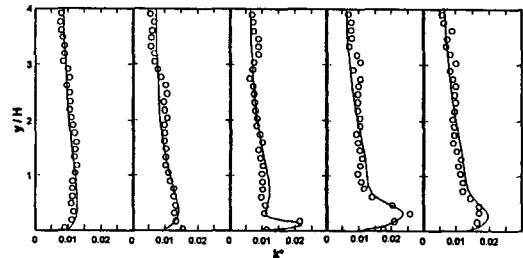
더욱 현실성 있는 오염물질 확산의 예측을 위한 코드 검증을 위해 김현구 등[5,6]이 실험하고 수치해석한 코사인(cosine) 형태의 언덕에 대하여 계산을 수행하였다.



(1) A (2) B (3) C (4) D (5) E
(a) Mean horizontal velocity



(1) A (2) B (3) C (4) D (5) E
(b) Mean vertical velocity



(1) A (2) B (3) C (4) D (5) E
(c) Turbulent kinetic energy

Fig.5. Comparison of measured and predicted mean velocity and turbulent kinetic energy profiles over the cosine-shaped hill(S3H7).

(\circ : Experiment [Ref.5], — : Present)

Fig.5는 언덕의 각 위치에서 측정된 x방향과 y방향의 속도 분포 및 난류운동에너지 분포를

실험과 비교한 것으로 현재의 난류 유동해석 프로그램이 실험치에 근접하게 아주 잘 예측하고 있음을 알 수가 있다. Fig.6은 아래식과 같이 정의되는 유속증가율을 나타낸 것으로

$$\Delta S = \frac{U(y) - U_0(y)}{U_0(y)} \quad (12)$$

여기서, $U(y)$ 은 언덕 위에서 측정된 속도분포이며, $U_0(y)$ 는 언덕이 없는 상류의 접근 유속 분포를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 유동계산 모델은 언덕 정상부에서의 최대 유속 증가율을 실험값과 일치하는 정확한 값으로 예측하고 있으며, 그 값은 1.1~1.2정도가 됨을 알 수 있다.

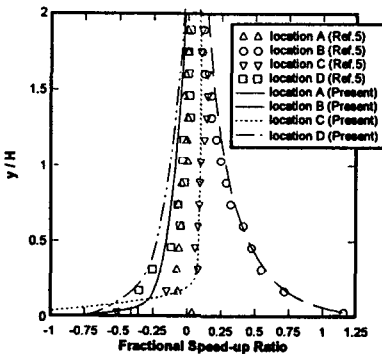


Fig.6 Comparison of measured and predicted fractional speed-up ratio(S3H7).

Fig.7은 언덕주위의 정압력계수 분포를 실험과 비교한 것으로 비교적 역시 잘 일치하고 있다. 확산현상 부분은 김현구 등[6]의 연구에서 실험이 수행되지 않았기 때문에 실험결과와의 비교는 수행되지 못하였고, 그들이 계산한 지표면 농도의 수치결과와 비교하여 Fig.8에 나타내었다. 김현구 등의 계산결과와 현재의 경우가 약간의 차이를 보이고 있으나, 그 정성적인 특징은 두 수치결과가 동일함을 알 수 있다.

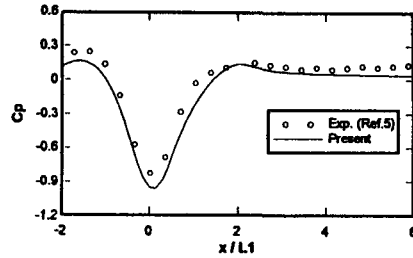


Fig.7 Distribution of C_p over the cosine-shaped hill(S3H7).

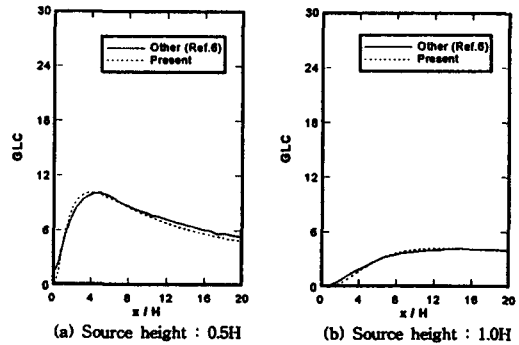


Fig.8. Ground level concentration of the two different source height(S3H4).

3.3 Russian Hill주위의 확산계산

다음 수치계산 단계로 구 소련과학자들이 개발한 Fig.9와 같은 'Russian Hill'이라고 불리는 축대형 언덕을 대상으로 계산을 수행하여 보았다.

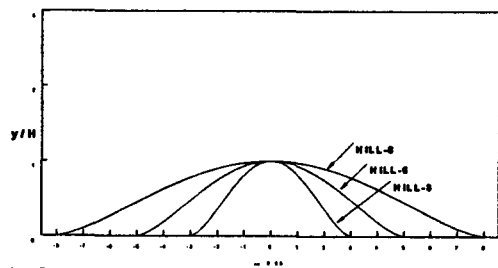


Fig.9 Topographic profiles of the Russian hills.

이러한 언덕은 형상비(언덕 높이에 대한 언덕 총길이의 절반의 비)에 따라 구분되게 되는데, 본 연구는 그 형상비가 3, 5, 8인 경우를 택하여 그 이름을 HILL-3, HILL-5, HILL-8로 나타내기로 하였다. 언덕의 형상식은 아래와 같다.

$$x = \frac{1}{2} \xi \left[1 + \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right] \quad (13)$$

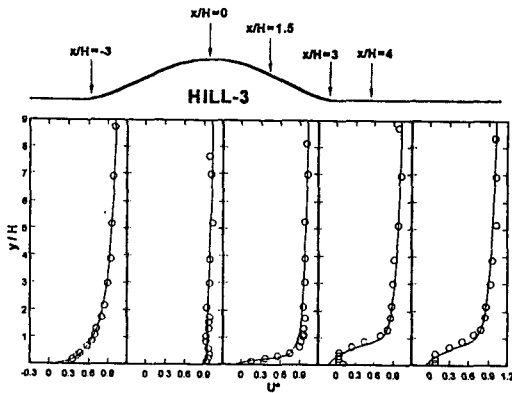
$$y = \frac{1}{2} m \sqrt{a^2 - \xi^2} \left[1 - \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right]$$

여기서 $|\xi| \leq a$ (14)

$$m = n + \sqrt{n^2 + 1} \quad (15)$$

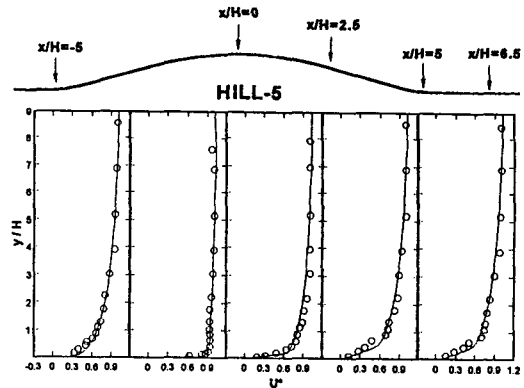
$$n = \frac{H}{a} \quad (16)$$

을 의미하며 H는 언덕의 높이이고, a는 언덕의 절반 길이이며, n은 언덕의 평균기울기로서 위에서 정의한 형상비이기도 하다. 참고로 언덕의 최대기울기는 각각 26°, 16°, 10°에 해당한다.

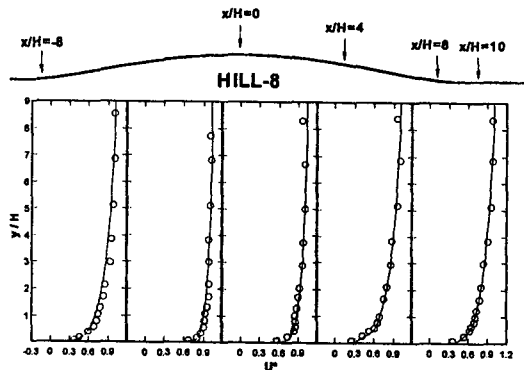


(a)x/H=-3 (b)x/H=0 (c)x/H=1.5 (d)x/H=3 (e)x/H=4
Fig.10 Comparison of measured and predicted mean velocity profile over the HILL-3. (○ ○:Experiment[Ref.3], —:Present)

Fig.10, 11, 12는 계산한 HILL-3, HILL-5, HILL-8의 언덕 각 위치에서의 속도분포로서



(a)x/H=-5 (b)x/H=0 (c)x/H=2.5 (d)x/H=5 (e)x/H=6.5
Fig.11 Comparison of measured and predicted mean velocity profile over the HILL-5. (○ ○:Experiment[Ref.3], —:Present)



(a)x/H=-8 (b)x/H=0 (c)x/H=4 (d)x/H=8 (e)x/H=10
Fig.12 Comparison of measured and predicted mean velocity profile over the HILL-8. (○ ○:Experiment[Ref.3], —:Present)

Arya의 실험[3]과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이 속도분포를 보면 언덕정상으로부터 유동이 접근함에 따라 유속은 증가하며, 언덕의 후류에서는 점차 감속함을 볼 수가 있다. HILL-3의 경우는 언덕의 경사가 급하기 때문에 아주 큰 유동박리가 발생하였다. 박리영역의 크기는 5.35H정도로 실험에서 관찰되는

5.5H를 거의 유사한 크기로 예측하고 있다. HILL-5, HILL-8의 경우는 박리가 발생하지 않았다.

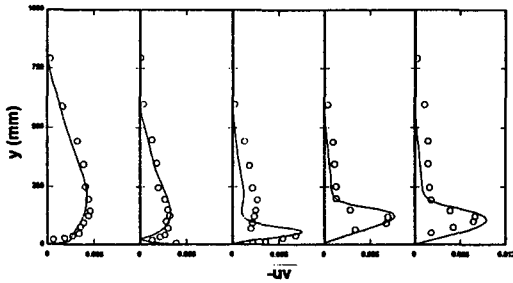


Fig.13 Comparison of measured and predicted normalized Reynolds stress profile over the HILL-3.

(\circ : Experiment[Ref.3], — : Present)

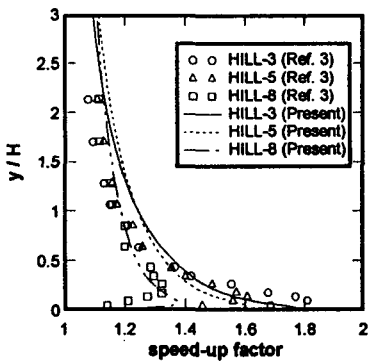


Fig.14 Speed-up factor compared with experiments.

Fig.13은 HILL-3 주위의 레이놀즈 전단응력을 실험값과 비교한 것으로 언덕 상방향에서는 비교적 잘 일치하고 있으나, 유동박리가 발생한 언덕 후미에서는 다소간의 불일치를 보여주고 있는데 이는 $k-\epsilon$ 모델의 통상적인 한계로 여겨진다. 그러나 전체적으로 납득할 만한 결과를 얻을 수 있었다. Fig.14는 언덕 정상부에

서의 높이에 따른 유속과 언덕이 없을 때의 동일 높이에서의 유속의 비로 정의되는 speed up factor를 나타낸 것으로 실험과 비교하였는데, 역시 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 언덕 정상부에서의 유속 증가현상은 언덕의 기울기에 따라 비례하며 형상비에는 반비례함을 알 수가 있다.

다음으로 오염물질의 확산에 대해서는 오염원의 위치 선정에 영향을 미치는 가장 중요한 요소인 지표면 농도(Ground Level Concentration, GLC)가 가장 크게 나타나는 지점, 즉 언덕의 끝지점에 연원을 위치시켜 확산계산을 수행하였다. Fig.15은 HILL-3에서 연원의 높이에 따른 무차원 등농도 선도를 표현한 것이다. Fig.15 (a)와 (b)는 연원이 각각 지표면에서 0.25H와 0.5H의 높이에 위치한 경우로서 이들은 연원이 유동박리영역 내에 위치하게 되어 유동의 상류방향으로도 오염물질이 확산되고 있음을 알 수 있다. 이는 재순환영역 내부의 아주 활발한 난류혼합과 확산에 기인한 것으로 이러한 재순환영역 내부에 오염원이 위치할 경우 확산이 크게 증진될 수 있음을 보여주고 있다. HILL-5와 HILL-8의 경우는 언덕의 후류에서 유동박리가 발생하지 않아 오염원이 유동의 후류방향으로만 퍼져나갔다.

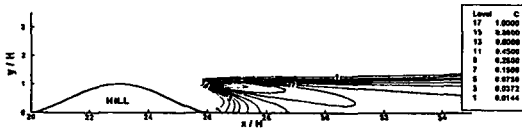


(a) Source height : 0.25H



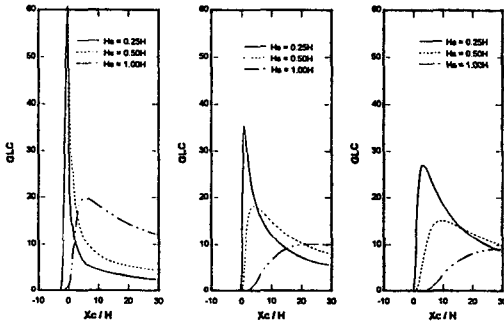
(b) Source height : 0.50H

Fig. 15 (continued)



(c) Source height :1.00H

Fig.15 Mean pollutant concentration over the base of HILL-3.



(a) HILL-3 (b) HILL-5 (c) HILL-8

Fig.16 Ground level concentration.

Fig.16은 개개의 연원높이에 따른 HILL-3, HILL-5, HILL-8의 지표면 농도를 나타낸 것이다. x축은 연원으로부터의 거리로서 HILL-3의 연원높이가 0.25H, 0.50H인 경우는 지표면 농도의 최대치가 연원의 위치보다 상류지점에서 발생하고 있음을 알 수가 있다. 언덕 뒷부분에서 지표면 농도가 크게 나타나고 거리가 멀어질수록 점차 감소하는 경향을 가진다. 이는 언덕 뒷부분에서 발생한 난류가 확산을 증진시켜 큰 농도값을 가지지만, 언덕으로부터 거리가 멀어질수록 난류가 감쇄하게 되고 그에 따라 농도도 감소하게 되기 때문이다. 이러한 최대 지표면 농도는 언덕의 형상비에 아주 민감하여 형상비가 클수록 높은 값을 나타내며, 연원의 높이가 증가할수록 최대값이 감소함을 확인할 수가 있다. 언덕의 존재에 의한 확산의 증대를 수치적으로 나타나기 위해 통상

TAF(Terrain Amplification Factor)라는 것을 정의하여 사용한다. 이는 동일한 연원강도(source strength)와 연원높이에 대하여 언덕이 없는 평탄지형에서의 최대 지표면 농도값과 언덕이 있는 경우의 최대 지표면 농도값의 비로 정의되는데, 현재의 계산에 의하면 표1과 같은 값을 나타낸다. 언덕이 존재하면 언덕이 없는 경우보다 지표면 농도가 최소 2배에서 최대 8배까지 증가함을 알 수가 있다.

참고로 현재의 경우에 유동계산시 정상상태로 수렴하기까지의 계산시간은 SGI Indigo2기종을 이용하였을 때 총 5시간이 소요되었다.

Table1. Terrain Amplification Factor (TAF) of the Russian hill.

| Hill aspect ratio | Source height | TAF |
|-------------------|---------------|------|
| 3 | 0.25H | 5.50 |
| | 0.50H | 7.51 |
| | 1.00H | 3.45 |
| 5 | 0.25H | 3.26 |
| | 0.50H | 2.23 |
| | 1.00H | 1.76 |
| 8 | 0.25H | 2.49 |
| | 0.50H | 1.86 |
| | 1.00H | 1.64 |

3. 결론

본 연구에서는 대기오염 물질의 확산현상을 수치해석하기 위한 프로그램의 개발에 중점을 두고 연구를 수행하였다. 확산현상 해석의 기본이 되는 유동해석은 나비에-스톡스 방정식을 반복 시간행진방법 (Iterative time marching scheme)을 사용하여 풀었으며, 난류모델은 Chien의 저 레이놀즈수 k-ε 모델을 사용하였다. 오염물질의 확산해석은 구배확산이론에 기초한 오염물질의 이송 및 확산 방정식을 유한차분법을 이용하여 유동해석 프로그램과 동

일하게 구성하였다. 이렇게 구성한 코드의 타당성을 검증하기 위하여 평판, 코사인형 언덕 및 Russian Hill 주위의 유동과 확산예측에 적용한 결과, 타 연구자의 실험 및 계산결과와 잘 일치하는 계산결과를 얻을 수가 있었으며 여러 가지 언덕 주위의 유동 및 확산 해석 결과, 언덕 정상부에서의 유속증가 현상은 언덕의 형상비가 작을수록 더 크게 발생하며 배출원이 유동박리영역 내부에 위치한 경우 최대 지표면 농도가 급격히 증가하고 지표면 농도값은 연원의 높이와 언덕의 형상비에 아주 민감하게 영향을 받음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구과제(총괄과제명: "복잡한 지형에서의 대기확산에 관한 연구")의 제3세부과제(세부과제명: "복잡한 지형 주위의 유동해석 및 대기확산 평가를 위한 수치모델 개발")로 수행되었으며 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Gong, W., Ibbetson, A., "A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow over Model Hills", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.49, pp.113-148, 1989

[2] Gong, W., "A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion over Two- and Three-Dimensional Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.54, pp.211-230, 1991

[3] Arya, S. P. S., Capuano, M. E., Fagen, L. C., "Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion over Two-Dimensional Low Hills", *Atmos. Env.*, Vol.21, No.4, pp.753-764, 1987

[4] Castro, I. P., Apsley, D. D., "Flow and Dispersion over Topography : A Comparison Between Numerical and Laboratory Data for

Two-Dimensional Flows", *Atmos. Env.*, Vol.31, No.6, pp.839-850, 1997

[5] 김현구, 이정목, 경남호, "언덕지형을 지나는 유동의 수치해석적 연구", *한국대기보전학회지*, 제13권, 제1호, pp.65-77, 1997

[6] 김현구, 이정목, "산지 내 오염 물질 확산의 2차원 수치해석", *한국대기보전학회지*, 제13권, 제5호, pp.383-396, 1997

[7] Robert, P. T. and Fryer-Taylor, R. E. J., "Wind Tunnel Studies of Roughness Effects in Gas Dispersion", *Atmos. Env.*, Vol.28, No.11, pp.1861-1870, 1994

[8] Sankar, L. N., and Park, W. G., "An Iterative Time Marching Procedure for Unsteady Viscous Flow", *ASME-FED Vol.20*, pp.281-284, 1991

[9] Vieceili, J. A., "A Method for Including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Techniques", *J. Compt. Phys.*, Vol.4, pp.543-551, 1969

[10] 신종근, 최영돈, "수치해의 정확성과 안정성이 보장되는 대류항 미분법 개선에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, 제16권, 제6호, pp.1179-1194, 1992

[11] Chien, K. Y., "Prediction of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulent Model", *AIAA J.*, Vol.20, No.1, January, 1982

[12] Raupach, M. R. and Legg, B. J., "Turbulent Dispersion from an Elevated Line Source: Measurement of Wind-Concentration Moments and Budgets", *JFM*, Vol.136, pp.111-137, 1983