

E- ϵ 모델을 이용한 삼각 봉우리 주변의 유동과 확산 수치해석(I)

Application of the E- ϵ turbulence numerical model to a flow and dispersion around triangular ridge(I)

정 상 진

경기대학교 환경공학과
(원고접수; 1994. 3. 8)

Sang-Jin Jeong

Dept. of Env. Eng., Kyonggi Univ.
(Received 8 March 1994)

Abstract

The E- ϵ turbulence numerical model was applied to a flow around triangular ridge in neutral boundary layer. Scale of cavity region, mean velocity, Reynolds stress and eddy diffusivity were investigated. The height of cavity region was in satisfactory agreement with the wind tunnel data while the length of cavity region was underestimated. The mean wind velocities outside the cavity region were well predicted by the model, however in cavity region the mean wind velocities of wind tunnel data were larger than the model results. Reynolds stress of cavity region was overestimated by the model. The eddy diffusivity of wake region was strongly modified under the influence of triangular ridge. The local minimum of the eddy diffusivity was occurred in the lee of the ridge top.

1. 서 론

공학에서 표준화되어 사용되는 E- ϵ 난류 모형은 와동 확산계수(K)가 난류 운동에너지(E)와 에너지 소산율(ϵ)에 의하여 정해진다. E- ϵ 모델이 중규모 대기 상황에 적용된 예로는 Detering and Etling (1985), Duynkerke(1988) 등이 있다. 이들은 여러 가지 대기의 안정 상황에서 평균 풍속 프로파일, 난류 운동에너지 그리고 경계층의 고도를 이 수치모형을 사용하여 예측하였다. 최근에는 순환영역을 포함하는 불규칙지형 주변의 소규모 유동과 확산 예측을 위하여 E- ϵ 난류 모형이 사용되고 있다(Dawson et al, 1991, Mouzakis and Bergeles, 1991).

단순한 지형 상황을 모의하는 2차원 구조물 주변에서의 난류 유동에 관한 정보는 실제 대기 경계층

에서 유동과 오염물의 확산을 이해 하는데 필수적이다. 소규모 고립 구릉(hill) 주변에서의 유동장과 확산에 관한 연구는 분리 유선 고도 개념(dividing streamline-height concept)을 사용하여 안정 성층 내에서 구릉지 주변에서의 유동과 확산 해석에 사용되고 있다(Ludwig et al, 1991). 한편 순환 영역을 포함하는 불규칙지형 주변의 유동과 확산에 관한 관측은 많이 있으나, 체계적인 현장 관측과 잘 정의된 구조물에 관한 연구가 부족한 관계로 단순한 구조물 주변에서의 유동과 확산에 관한 우리들의 이해도 부족한 실정이다(Mouzakis and Bergeles, 1991).

일반적으로 불규칙 지형은 평탄지에서 보다 그 지형 주변에 위치한 배출원에 의한 오염물의 지표 농도를 증가시키게 된다. 배출원이 산지의 상류에

위치할 때 배출원에서 나온 오염 물질이 산지 주변을 지나갈 때 주변 유체의 수렴으로 산지 가까이로 이동하게 되고, 산지에 의하여 변화된 난류가 산지 하류에서 지표농도를 증가시키게 된다. 또한 산지 하류에 공동영역이 발생할 경우 오염물이 공동영역 내로 순환하면서 지표근처로 이동하여 지표 부근의 농도를 증가시키게 된다.

순환영역을 포함하는 불규칙 지형 주변에서 불규칙 지형이 오염물의 거동에 미치는 영향을 경험적인 인자로 표시한 최근의 연구로는 Lawson(1989)과 정(1993)의 연구가 있다. 이들의 연구에서는 불규칙지형 설치로 인한 구조물 주변에서 오염물의 농도 변화를 오염물의 증폭인자로 표시된 경험적인 지표를 제시하고 있다. 그러나 이들의 연구에도 불규칙 지형 주변에서의 유동장의 변화와 난류구조, 순환영역 그리고 와 영역(wake region)에 관한 체계적인 연구는 수행되어 있지 않다.

순환영역이 발생하는 2차원 구조물 주변에서의 유동장과 난류 구조에 관한 실험실에서 풍동을 이용한 연구가 많이 수행되어 있으나(Counihan et al, 1974, Castro, 1979), 이들은 주로 순환영역 하류인 와 영역에서의 평균 유동과 난류구조에 관한 연구이다. 순환영역을 포함하는 체계적인 풍동 실험으로는 Arya and Shipman(1981)의 연구가 있다.

본 연구에서는 순환영역을 포함하는 산지 주변의 확산 해석을 위한 전초적인 작업으로 E-ε 난류모형을 이용한 유동장 해석을 실시하였다. E-ε 난류 모형으로 예측된 평균 풍속 프로파일, 난류구조, 그리고 공동영역의 크기 등은 풍동 실험의 그것과 비교되었다. 또한, 구조물 설치로 인한 구조물 하류에서의 와동확산 계수를 구하고, 풍동 실험에서 관측된 자료를 이용하여 재처리한 결과와 비교하였다.

2. 모형의 서술

2.1 기본방정식

본 연구는 순환영역을 포함하는 구조물 주변에서의 유동장을 해석하는 초보단계로 2차원 유동장을 발생 시키는 E-ε 난류 모형을 사용하였다. 유동은 순수한 난류 유동으로 가정하였으며, 중립 성층내에서 2차원 비압축, 비점성, 평균 유동에 관한 연속 방정식과 운동량 방정식은 식(1)과 같다(Claussen, 1987).

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(1a)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial \overline{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \dots\dots\dots(1b)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + W \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{ww}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \dots\dots\dots(1c)$$

여기서 x와 z는 수평 및 연직방향 좌표계이고 U와 W는 수평 및 연직방향 속도의 앙상블 평균이다. u와 w는 실제 속도와 평균 속도의 차이로 표시되는 속도의 변동 성분이고 \overline{uw} , \overline{uu} , \overline{ww} 는 그들의 공분산(covariance)과 자기공분산(autocovariance)이다. P는 압력의 앙상블 평균이고, ρ는 유체의 밀도이다.

시간 평균과정에서 발생한 Reynolds 응력 구배형의 Boussinesq 근사를 사용하면 식(2)와 같이 표시된다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = K \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} E \delta_{ij} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 δ_{ij}는 Kronecker delta 이고, E(=1/2 $\overline{u_i u_i}$)는 난류 운동 에너지이다. E-ε 모델에서 와동 점성계수 K는 식(3)으로 계산되어 진다.

$$K = \frac{\rho C_\mu E^2}{\epsilon} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 C_μ는 상수이고, E와 ε은 각기 난류 운동 에너지 방정식과 에너지 소산을 방정식에서 결정되어 진다. 정상 2 차원 상황에서 난류 운동에너지 방정식 과 에너지 소산율에 관한 방정식은 식 (4), (5)와 같이 표시된다.

$$U \frac{\partial E}{\partial x} + W \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial z} \right] = \text{Prod} - \epsilon \dots\dots\dots(4)$$

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] = (C_1 \text{Prod} - C_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{E} \dots\dots\dots(5)$$

여기서 Prod는 생성항으로 식(6)과 같다.

$$\text{Prod} = K \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 C₁, C₂, σ_E, σ_ε는 경험적으로 정해지는 상수이다.

이상의 식 (1)에서 (5)를 연립하여 풀면 5가지 미지수인 U, W, P, E, ε에 대한 해를 구할 수 있다.

2.2 수치해석

식(1)에서 (5)까지의 연립 편미분 방정식을 풀기

위하여 Patankar(1980)가 제시한 제어체적(control volume) 방법을 이용하여 계산구간을 이산화하였다. 좌표계는 직교 좌표계를 사용하고, 계산영역은 1024 (32×32)개의 셀(cell)로 나누었다. 방정식을 풀기위한 알고리즘은 Patankar and Spalding (1972)이 개발한 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)를 사용하였고, 각 방정식은 삼각 대각행렬 알고리즘(TDMA, Tri-Diagonal Matrix Algorithm)을 사용한 선순법(Line-by-line)으로 풀이하였다. 사용한 차분은 Hybrid Scheme으로 이류항과 확산항을 동시에 취급하였다.

식에서 나타나는 5가지 상수 $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_E, \sigma_\epsilon$ 는 수치계산에서 정해 주어야 할 상수이다. 공학에서 사용되는 표준 E- ϵ 모델에서 사용되는 상수를 사용하여 대기상황에 적용하면 K가 과대 평가되는 비현실적인 결과가 나오므로(Detering and Etling, 1985), 본 연구에서는 Duynkerke(1988)가 E- ϵ 모델을 사용하여 대기상황을 모의할 때 사용하여 좋은 결과를 얻은 식(7)의 값을 사용하였다.

$$(C_\mu, C_1, C_2, \sigma_E, \sigma_\epsilon) = (0.033, 1.46, 1.83, 1.0, 2.38) \dots\dots(7)$$

2.3 경계조건

본 연구에서 사용한 고체 벽면 경계조건은 Rodi (1980)에 따라 식(8)로 표시되는 벽면의 대수법칙을 통한 점성 저층(viscos sublayer)에서의 유속과 마찰계수(u_τ)를 관련시킨 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{u_{res}}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(y^+ E) \dots\dots(8)$$

여기서 u_{res} 는 벽면에 평행한 결과 유속, $y^+ (=y u_\tau/\nu)$, ν 는 동점성계수)무차원 벽면거리, $k(=0.4)$ 는 칼만상수, $E(\sim 9.0)$ 는 조도 파라미터이다.

상부 자유 경계조건은 대기와의 열교환이 없고, 대칭을 이루므로 대칭평면으로 가정하였다. 구조물 지점에서 평균 유속은 0으로 두었으며, E와 ϵ 은 고체 벽면 조건을 사용하였다.

3. 결과와 논의

3.1 구조물이 설치되지 않았을 때 유동장의 비교

본 연구의 수치해석의 결과는 비교적 관측자료가 양호한 Arya and Shipman(1981)의 풍동 실험 결과와 비교하였다. Arya and Shipman은 먼저 풍동이 중립 경계층 모의할 수 있는지를 검토하기 위하

여 길이 18m, 높이 2.1m, 폭 3.7m인 대형 풍동에서 실험구간의 평균유속과 난류성분들을 관측하였다. 이렇게 중립경계층의 모의를 확인한 후 높이와 폭이 각각 10cm인 2차원 삼각 봉우리를 실험구간 중앙에 설치하고 구조물 주변의 유동장을 관측하였다. 본 연구에서도 E- ϵ 모델을 먼저 구조물이 없는 경우에 적용하여 중립 성층의 모의 가능성을 확인한 후, 구조물을 설치하여 유동장의 변화를 조사하였다.

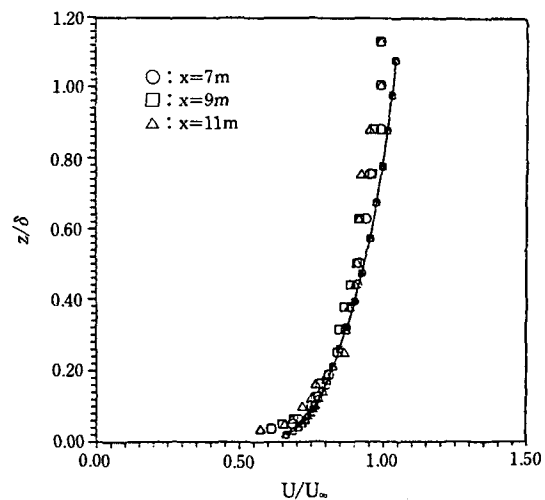


Fig. 1. Dimensionless mean velocity profiles in the undisturbed turbulence boundary layer. Connected lines are numerical results.

그림 1에서 3은 구조물이 설치되지 않은 경우 E- ϵ 모델이 풍동 실험의 유동장을 모의할 수 있는지를 살펴 보기 위하여 그린 것이다. 평균 풍속을 모의하는 그림 1의 결과는 식(9)로 표시되며, 이 식은 전형적인 중립 경계층내의 평균 풍속 프로파일을 잘 모의하고 있으며, 풍동 실험의 결과와도 잘 일치하고 있다.

$$\frac{U}{U_\infty} = \left[\frac{z}{\delta} \right]^{0.139} \dots\dots(9)$$

여기서 U는 경계층 고도에서 유속이고, δ 는 경계층 고도이다.

그림 2에서는 Reynolds 응력을 비교해 보기 위해 그린 것이다. 마찰속도(u_τ)자승으로 무차원화한 수치해석의 결과는 무차원 고도(z/δ) 0.0에서 0.25 사이에서 약간 큰 값을 나타내고 있으나, 전체적으로 풍동실험의 그것과 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 3에서는 풍동 실험에서 관측된 평균 풍속

프로파일과 Reynolds 응력을 이용하여 식(10)에서 구한 와동확산계수를 수치해석의 결과와 비교해 보기 위하여 그린 것이다.

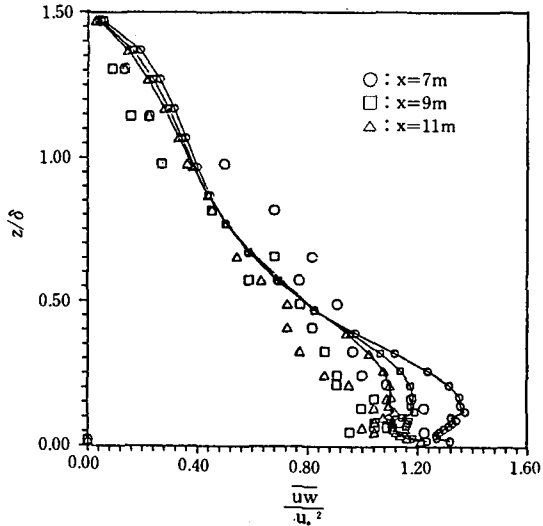


Fig. 2. Dimensionless Reynolds stress profiles in the undisturbed boundary layer. Connected lines are numerical results.

$$-\overline{uw} = K \frac{\partial U}{\partial z} \dots\dots\dots(10)$$

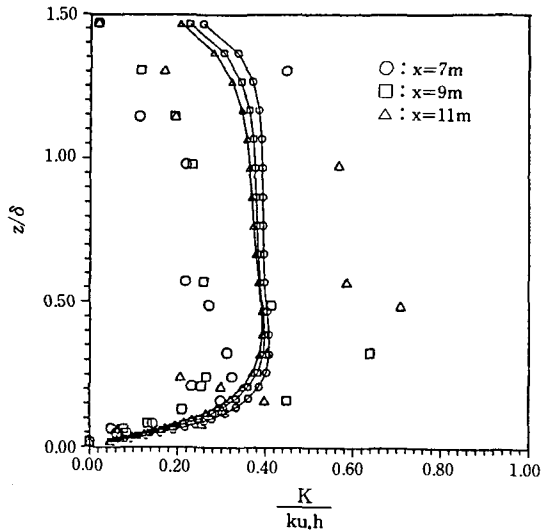


Fig. 3. Dimensionless eddy diffusivity in the undisturbed boundary layer. Connected lines are numerical results.

비교에 사용한 와동 확산계수는 마찰속도, 경계층

고도 그리고 칼만상수로 무차원화하였다. 풍동 관측 자료의 분산이 커지만 수치해석의 결과는 크기와 고도에 따른 변화 패턴을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

3.2 구조물이 설치된 경우 유동장의 비교

수치해석에서 구조물이 있는 경우의 유동장을 발생시키기 위하여 계산구간에서 구조물을 구조물 높이로 무차원화한 거리(x/h, h: 구조물의 높이) 12.0 지점에 위치시켰다. 그림 4에서는 구조물 설치로 인한 공동영역의 형상과 크기를 보기 위하여 유선 함수로 표시된 유동장을 나타낸 것이다. 수치해석의 결과는 공동영역의 길이가 12h이고, 그 높이는 1.5h이다. 이는 풍동실험에서 구해진 길이 13h와 높이 2.5h와 비교하면 길이는 유사하지만 높이는 다소 적게 나타났다.

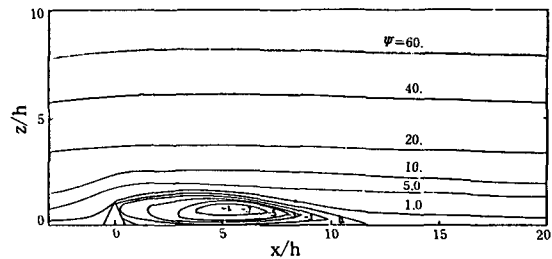


Fig. 4. Streamline contour around ridge (in m/s).

이와 같은 결과는 곡선 좌표계를 사용하여 동일 상황을 모의한 Mouzakis and Bergeles(1991)의 결과인 길이 10h, 높이 1.5h인 것과 유사한 결과이다. 그러나 Hosker(1984)가 여러 가지 풍동실험 결과를 정리하여 구한 경험식(12)에 의하면 공동영역의 높이가 1.44h인 점을 감안하면 Arya and Shipman (1981)의 결과가 다소 과대하게 나온 것임을 알 수 있다.

$$z_r/h = 1.0 + 1.6 \exp(-1.3(L/h)) \dots\dots\dots(11)$$

여기서 z_r은 공동영역의 높이이고, L은 구조물의 길이이다.

그림 5에서는 구조물 설치로 인한 구조물 하류에서의 평균 풍속 프로파일의 하류 거리에 따른 변화를 보기 위하여 나타낸 것이다. 공동영역 외부인 x/h가 19, 29인 경우에 수치해석의 결과는 평균풍속의 회복상황을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 그러나 공동영역 내부인 무차원 거리(x/h)가 8의 경우에는 수치해석의 결과가 음의 값을 나타낸 반면 풍동 실험의 결과는 양의 값을 나타내고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 공동영역의 하부에서는 유선함

수가 음의 값을 나타내고 있기 때문에 유속도 음의 값을 가지는 것이 타당하므로 양의 값을 나타내는 풍동 관측치에 문제가 있는 것 같다. 이와 같은 결과는 풍동 관측치의 평균화 시간이 1분이어서 (Arya and Shipman, 1981) 수치해석에서와 같은 정상상태를 이루지 못한 것이 그 원인인 것 같다.

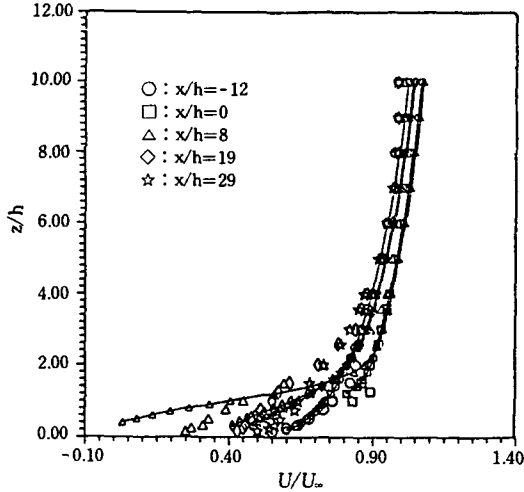


Fig. 5. Velocity profiles at various locations relative to the ridge. Connected lines are numerical results.

구조물 설치로 인한 Reynolds 응력의 변화는 그림 6에 나타내었다. 구조물 고도에서의 평균 풍속으로 무차원화된 Reynolds 응력은 공동영역 내부에 있는 무차원 거리(x/h=8)에서의 프로파일을 제외 하면 풍동 실험의 관측치를 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 무차원 하류 거리 8에서 수치해석의 결과가 2배 정도 큰 값을 나타내는 것은 수치해석에서 Reynolds 응력이 식(10)으로 계산되므로 평균 풍속 프로파일의 불일치가 그 원인인 것 같다.

그림 7은 구조물 설치로 인한 평균 풍속의 증감을 보기 위하여 그린 것이다. 여기서 ΔU 는 구조물이 있는 경우의 평균 유속을 구조물이 없는 경우의 평균 유속으로 뺀 값이다. 수치실험의 결과는 풍하 거리로 갈수록 그 값이 작아지는 것을 잘 모의하고 있으나, 무차원 고도에 따른 ΔU 최대치의 발생고도는 잘 모의 하지 못하고 있다.

그림 8에서는 Reynolds 응력 성분이 구조물 설치로 인해 증가될때 그 증가치의 최대치가 발생하는 무차원고도의 무차원 거리에 따른 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 수치해석의 결과는 풍동실험의 결과인 기울기 0.5를 잘 모의하고 있다.

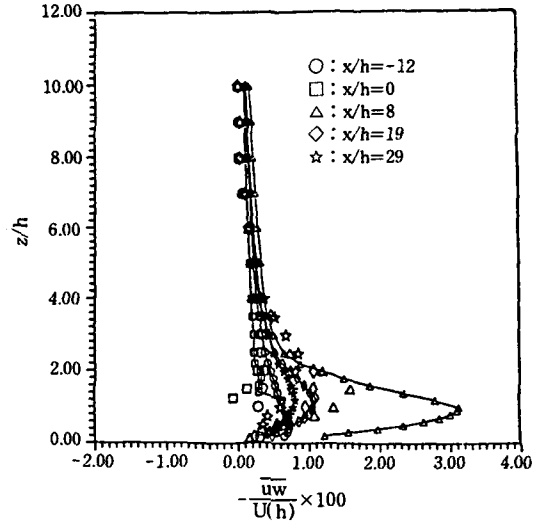


Fig. 6. Reynolds stress profiles at various locations relative to the ridge. Connected lines are numerical results.

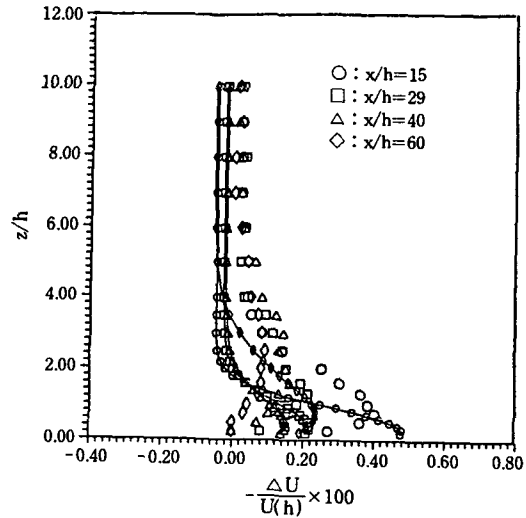


Fig. 7. Mean velocity deficit profiles at various locations relative to the ridge. Connected lines are numerical results.

그림 9에서는 구조물 설치로 인한 무차원 평균 풍속의 최대치 ΔU_{max} 가 풍하 거리에 따라 변화되는 것을 보기 위하여 그린 것이다. 수치해석의 결과는 대체적으로 풍동실험의 결과인 -1.0의 기울기를 잘 모의하는 것으로 나타났다.

그림 10에서는 Arya and Shipman이 풍동 실험에서 구한 Reynolds 응력과 평균 풍속 프로파일을 재처리하여 식(10)을 이용하여 구한 와동확산계수

와 본 수치실험에서 구한 와동확산 계수를 비교해 보기 위하여 그린 것이다. 선으로 연결된 풍동 실험의 결과는 자료의 분산이 많으나 수치해석의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 두 가지 결과 모두 구조물 하류에서 와동확산 계수가 줄어들었다가 하류로 갈수록 점차 본래의 프로파일을 회복하고 있음을 알 수 있다.

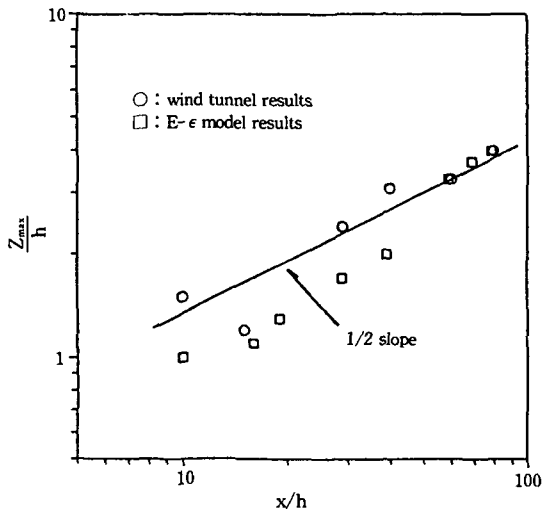


Fig. 8. The variation of the heights of maxima $\overline{A(-uw)}$ at various locations relative to the ridge.

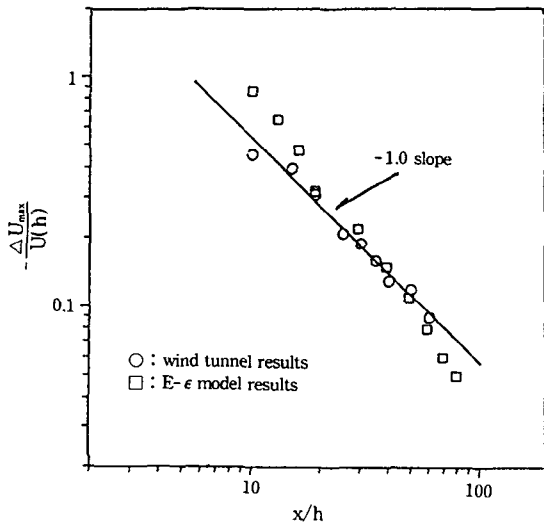


Fig. 9. The variation of the maximum deficit in mean velocity at various locations relative to the ridge.

그림 11에서는 이와 같은 경향을 좀더 명확히 살

펴 보기 위하여 5가지 하류 거리에서의 와동확산 계수에 대한 수치해석의 결과를 나타내었다. 구조물 하류에서의 와동확산 계수는 구조물 고도(1.0h) 근처까지 감소하다가 1.5h고도에서 급격한 증대를 보이다가 약 3.5h고도에서는 증가가 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 2차원의 얇은

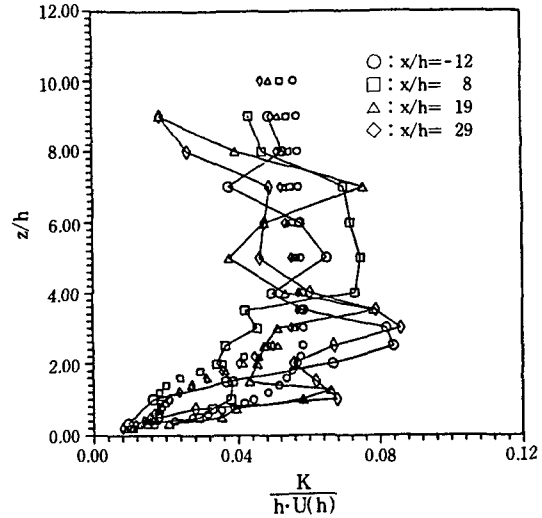


Fig. 10. Dimensionless eddy diffusivity at various locations relative to the ridge. Connected lines are wind tunnel results.

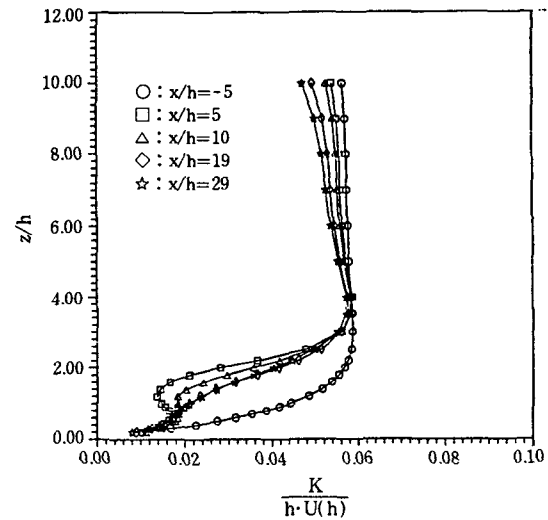


Fig. 11. The variation of dimensionless eddy diffusivity in the lee of triangular ridge.

벽면 주변의 유동을 모의하기 위하여 E-ε 난류모델을 적용하여 와동확산 계수를 구한 Liston 등

(1993)의 연구 결과와 유사한 결과이다. 그러나 Liston 등의 연구에서는 공동영역 내부에서 와동 확산계수가 초기값보다 다소 증대한 반면, 본 연구에서는 초기값 보다 줄어든 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 모의한 풍동 실험의 확산계수를 식(10)에서 구할 때, 지표 부근에서의 평균 풍속이 급격히 증대하는데 그 이유가 있는 것 같다. 즉, 식(10)에서는 와동확산 계수가 Reynolds 응력과 평균 풍속의 기울기와의 비로 표시된다. 그런데 공동 영역내에서 Liston의 평균 풍속 기울기가 무차원고도(z/h) 0.5 부근까지 거의 0에 가까운 값으로 고정된 반면, 본 연구의 경우는 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 평균 풍속 기울기가 계속 변화하는 경향을 나타낸 때문으로 생각된다.

4. 결 론

순환영역을 포함하는 구조물 주변에서의 유동장에 관한 정확한 정보는 산지 주변에서의 오염물의 이동상황을 예측하는데 중요한 기초자료가 된다. 본 연구에서는 실제 대기 상황을 모의하기 위하여 수정된 계수를 사용한 $E-\epsilon$ 모델을 사용하여 중립성층내에서 구조물 설치로 인한 유동장을 조사하였다.

$E-\epsilon$ 모형은 풍동 실험에서 발생시킨 구조물이 없는 경우의 중립 성층내에서 관측된 평균 풍속 프로파일과 Reynolds 응력을 잘 모의하였다. 구조물 설치로 인해 발생한 공동영역의 길이와 높이는 풍동 실험의 결과와 수치실험의 결과가 유사하게 나타났다.

구조물이 발생시킨 공동영역 내에서 평균 풍속의 연직방향 프로파일은 수치실험에서의 결과가 풍동 실험의 그것과 달리 나타났다. 공동영역 외부에서 평균 풍속 프로파일은 수치해석과 풍동실험의 결과는 잘 일치하였다. 구조물 설치로 인한 평균 풍속의 증감의 모의도 양호한 결과를 나타내었다. 구조물 설치로 인한 Reynolds 응력은 공동영역 외부에서는 두 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 공동영역 내부에서는 수치 실험의 결과가 풍동실험의 결과보다 과대하게 나타났다.

Arya and Shipman의 풍동 실험 결과 자료를 재처리하여 구한 와동확산 계수와 본 수치해석에서의 그것은 공동영역과 그 하류에서 구조물 설치전 보다 감소하였다가 하류로 갈수록 점차 원래의 경향을 회복하였다. 구조물 하류 공동영역내에서 와동 확산계수는 구조물 고도에서 국소적 최소치를 나타내었다.

참 고 문 헌

- Detering, H.W. and D.Etling, (1985), Application of $E-\epsilon$ turbulence model to the atmospheric boundary layer, *Boundary Layer Meteorology*, 33, 113-133.
- Duynkerke, P. G.(1988), Application of the $E-\epsilon$ turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer, *J. of the Atmospheric Science*, 45(5), 865-880.
- Dawson, P., D. E. Stock, B. Lamb,(1991), The numerical simulation of airflow and dispersion in three-dimensional atmospheric recirculation zones, *J. of Appl. Meteorol.*, 30, 1005-1024.
- Mouzakis, F. N. and G. Bergeles,(1991), Pollutant dispersion over a triangular ridge: A numerical study, *Atm. Env.*, 25A(2), 371-379.
- Ludwig, F. L., J. M. Livingston, R. M. Endlich, (1991), Use of mass conservation and critical dividing stream concepts for efficient objective analysis of winds in complex terrain, *J. of Appl. Meteorol.*, 30,1490-1499.
- Lawson, R. E. Jr, Snyder, W. H., R. S. Thompson (1989), Estimation of maximum surface concentrations from sources near complex terrain in neutral flow, *Atm. Env.*, 23(2), 321-331.
- 정상진(1993), 수로 장치내에서 공동영역 주변의 확산에 관한 실험적 연구, *한국대기보전학회지*, 9권 4호, 295-302.
- Couniham, J., J. C. R. Hunt, P. S. Jackson(1974), Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, 64(3) 529-563.
- Castro, I. P.(1979), Relaxing wakes behind surface-mounted obstacles in rough wall boundarys, *J. Fluid Mech.*, 93(4), 631-659.
- Arya, S. P. S., M. S. Shipman(1981), An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-I. Mean flow and turbulence structure, *Atm. Env.*, 15(7), 1173-1184.
- Claussen, M.(1987), The flow in a turbulent boundary layer upstream of a change in surface roughness, *Boundary Layer Meteorology*, 40, 31-86.

- Patankar, S. V.(1980), Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, 197.
- Patankar, S. V. and D. B. Spalding(1972), A calculation procedure for Heat, Mass and Momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, Int. J. Heat and Mass transfer, 15, 1787-1806.
- Rodi, W.(1980), Turbulence models and their application in hydraulics-a state of the art review, IAHR, 104.
- Hosker, R. P.(1984), Flow and Diffusion near obstacles, in Atmospheric Science and Power Production(Randersion, D. Ed.), 241-326.
- Liston, G. E., R. L. Brown, J. Dent(1993), Application of the E- ϵ turbulence closure model to separated atmospheric surface-layer flows, Boundary Layer Meteorology, 66, 281-301.