

## 실지형을 지나는 대기유동에 대한 수치모델의 검증

### Validation of Numerical Model for the Wind Flow over Real Terrain

김 현 구 · 이 정 목 · 노 유 정<sup>1)</sup>

포항공과대학교 첨단유체공학연구소

<sup>1)</sup>포항공과대학교 환경공학부

(1997년 12월 26일 접수, 1998년 6월 15일 채택)

Hyun-Goo Kim, Choung-Mook Lee, Yoo-Jeong Noh<sup>1)</sup>

*Advanced Fluids Engineering Research Center,*

<sup>1)</sup>*School of Environmental Engineering, Pohang University of Science and Technology*

(Received 26 December 1997; accepted 15 June 1998)

#### Abstract

In the present investigation, a numerical model developed for the prediction of the wind flow over complex terrain is validated by comparing with the field experiments. For the solution of the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations which are the governing equations of the microscale atmospheric flow, the model is constructed based on the finite-volume formulation and the SIMPLEC pressure-correction algorithm for the hydrodynamic computation. The boundary-fitted coordinate system is employed for the detailed depiction of topography. The boundary conditions and the modified turbulence constants suitable for an atmospheric boundary-layer are applied together with the  $k-\epsilon$  turbulence model.

The full-scale experiments of Cooper's Ridge, Kettles Hill and Askervein Hill are chosen as the validation cases. Comparisons of the mean flow field between the field measurements and the predicted results show good agreement. In the simulation of the wind flow over Askervein Hill, the numerical model predicts the three-dimensional flow separation in the downslope of the hill including the blockage effect due to neighboring hills. Such a flow behavior has not been simulated by the theoretical predictions. Therefore, the present model may offer the most accurate prediction of flow behavior in the leeward side of the hill among the existing theoretical and numerical predictions.

**Key words :** atmospheric boundary layer, boundary-fitted coordinate system, hydrodynamic model, field experiment, flow separation, fractional speed-up ratio

#### 1. 서 론

대기오염 저감과 오염현상의 원인규명을 통한 규

제대책 수립 등 대기환경 관리를 위해서는 대기 중 오염물질 확산에 대한 신뢰성 있는 예측자료가 필요하다. 올바른 확산예측을 위해서는 무엇보다도 오염물질의 운송매체(carrier flow field)인 국지유동장

의 정확한 예측이 선행되어야 한다(Kim과 Lee, 1998). 배출된 오염물질의 확산이 주민보건 및 주변 환경에 직접적인 영향을 미치는 영역은 지표면 부근으로, 이곳에서는 지형지물에 의해 유동박리(flow separation), 와류 등을 포함한 복잡한 유동장의 변형이 수반되므로 이러한 유동장을 해석할 수 있는 예측기법이 필요하다. 그런데 현재까지 대기유동장 수치예측에 주로 사용되어온 기상모델은 기본적으로 정수(hydrostatic) 가정과  $\sigma$ -좌표계를 사용하여 왔다(Pielke, 1984). 정수가정은 수평규모 수십 km 이상의 대기유동에서 성립되는데, 연직방향 운동량 방정식에서 중력항과 기압경도력을 제외한 항들은 차수(order)가 매우 작으므로 무시되고 이들 두 항이 평형을 이룬다는 가정이다. 그러나 정수가정은 중규모(mesoscale; 수평규모 수십 km 이상) 이상에서는 유효한 반면 본 연구의 관심영역인 미시규모(microscale; 수평규모 수 km 이하)에서는 성립하지 않는다(Atkinson, 1995). 또한 연직방향 고도변화만을 일차원적으로 변환하는  $\sigma$ -좌표계로는 복잡한 지형변화 및 경사가 급한 산지지형을 상세하게 묘사할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 미시규모 대기유동장의 수치예측은 Navier-Stokes 방정식의 동수역학(hydrodynamic) 해석을 통하여 이루어져야 하며, 특히 국지지형을 정확히 고려하여야 한다. 미시규모 대기유동장에 대한 동수역학 수치해석 연구는 최근 들어 활발해지는 추세인데 그 예로 Raithby *et al.*(1987), Glekas와 Bergeles(1994), 윤준용 등(1997)의 연구를 들 수 있다.

김현구 등(1997)은 선행연구를 통하여 미시규모 대기유동장의 예측을 위한 수치모델(numerical model)을 개발하였으며, 유동박리를 수반하는 산지모델 풍동실험(임희창 등, 1996)과의 비교를 통하여 예측결과와의 신뢰성 및 정확성을 검증하였다. 그러나 풍동실험도 물리모델(physical model)이기 때문에 실제 대기유동과 정확히 상사할 수는 없으며 도입된 가정에 따라 다소의 차이가 유발된다. 따라서 실제 대기유동장 해석을 위해 개발된 수치모델은 궁극적으로는 실험결과와의 비교분석을 통하여 검증되어야 할 것이다. 본 연구에서는 개발된 수치모델의 최종 검증단계로 기존의 실험연구와 수치예측 결과를 비교하였다.

## 2. 수치해석법

본 연구에서는 복잡지형을 지나는 대기유동장의 수치예측을 위하여 개발된 비압축성 난류유동의 유한체적 수치모델을 사용하였으며, 복잡한 국지지형의 상세한 묘사를 위해 비직교(non-orthogonal) 경계면 일치좌표계(boundary-fitted coordinate system)를, 동수역학(hydrodynamic) 유동장의 해석을 위해 SIMPLEC 압력보정법(Van Doormal과 Raithby, 1984)을 도입하였다. 중립 대기유동을 등은, 비압축성(incompressible)이라고 가정하면 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량방정식 및 난류운동에너지  $k$ 와 그 소산율  $\varepsilon$ 의 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial(U_i U_i)}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_k U_i$$

$$\frac{\partial(U_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial(U_i \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \varepsilon) \quad (1)$$

위 식에서  $x_i = (x, y, z)$ 는 각각 주풍향, 수평방향, 연직방향 좌표이며  $U_i = (U, V, W)$ 는 평균유속,  $p$ 는 동압,  $G$ 는 난류 생성항,  $\Omega$ 는 지구의 자전 각속도,  $v_i = C_\mu k^2/\varepsilon$ 는 난류 와점도(turbulent eddy viscosity)이다. 지배방정식의 좌표변환, 이산화(discretization)에 대한 자세한 사항은 김현구 등(1997)에 기술되어 있다.

난류모델로는  $k-\varepsilon$  모델을 채택하였으며 거친(rough) 지표면의 묘사를 위하여 다음과 같은 벽법칙(wall function)을 적용하였다. 아래식에서  $z_0$ 는 지표면 거칠기 높이(surface roughness height)이다.

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (2)$$

표준  $k-\varepsilon$  모델의 난류상수는 대기유동 해석 시 난류 운동에너지를 과대평가하는 문제점이 있으므로(Ilyushin *et al.*, 1995) 본 연구에서는 표 1에 제시된 바와 같이 수정 난류상수를 사용하였다. 주목할 사항은 표준 및 수정 난류상수는 모두 평지 대기경계층 가정으로부터 유도되는 compatibility 경계조건

Table 1. Turbulence constants of the  $k-\epsilon$  model.

난류상수	$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\alpha_k$	$\alpha_\epsilon$	$\kappa$
표준상수	0.090	1.44	1.92	1.0	1.17	0.41
수정상수	0.033	1.46	1.83	1.0	2.38	0.40

인  $\kappa^2 = \alpha_\epsilon (C_2 - C_1) \sqrt{C_\mu}$ 을 만족해야 한다는 것이다. 여기서  $\kappa$ 는 von Kármán 상수이다.

표 1에서 난류상수  $C_\mu$ 는 실험실 규모 매끈한 평판에서의 난류구조 ( $ku_{\text{rms}}^2 = 3.33$ )와 대기경계층 하단부 거친 지면층 (surface layer)에서의 난류구조 ( $ku_{\text{rms}}^2 = 5.30$ )가 상이하기 때문에 그 값에 차이가 나며 (Townsend, 1980), 나머지 수정상수는 주로 대기경계층 중상층부를 모사하기 위한 것으로 본 연구의 관심영역인 지면층에서는 수정효과가 그리 크지 못함을 수치해석을 통하여 확인하였다.

수치계산의 경계조건으로 지면에서는 거친 지표면에 대한 수정 벽법칙을, 상류 (upstream) 경계면에서는 실측치 또는 평지경계층 수치모사로부터 획득된 유속 및 난류분포를 추가하였다. 그 외의 경계면에서는 모든 유동변수에 homogeneous Neumann 조건을 적용하였다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1 수치모델 검증을 위한 실측연구의 선정

중립대기 (neutral atmosphere) 하에서 언덕지형 (hilly terrain)을 지나는 대기유동장의 대표적인 실측연구로는 Black Mountain (Bradley, 1980), Kettles Hill (Salmon *et al.*, 1988), Blashaval Hill (Mason과 King, 1985), Askervein Hill (Taylor와 Teunissen, 1987), Nyland Hill (Mason, 1986), Cooper's Ridge (Coppin *et al.*, 1994) 등을 들 수 있다. 현장실측은 막대한 소요경비 및 이상적인 대상지역의 선정, 측정기술 상의 난점 등으로 극히 제한적으로 수행되었으며, 이들 중 수치모델의 검증에 이용가능한 수준의 측정자료를 제공하는 연구는 더욱 찾아보기 어렵다.

대부분의 현장실측은 측정값의 불확실성이 클 뿐 아니라 측정지점이 매우 국한되어 있어 전체적인 유동장 특성을 파악하기가 힘들다. 또한 지적할만한 사항은 기존 실측연구의 대부분이 이론모델과의 비교를 위하여 유동박리가 발생하지 않는 낮고 완만

한 ( $H/L \ll 1$ ) 언덕을 대상으로 수행되었다는 점이다 (Taylor *et al.*, 1987). 이론모델은 Jackson과 Hunt (1975)의 선형모델 (linear model)을 기본으로 하여 발전해 왔는데 풍동실험이나 수치해석에 비하여 비교적 빠른 시간 내에 예측이 가능하다는 장점이 있지만 전술한 바와 같이 적용대상이 완만하고 낮은 언덕의 풍상부 (windside)에 국한된다는 제약이 있다. 이론모델은 선형화한 운동량방정식을 섭동 (perturbation)해석하여 해를 얻는 방법으로 이에 대한 자세한 사항은 Beljaars *et al.* (1987)과 Walmsley *et al.* (1990)을 참고하기 바란다.

본 연구에서는 기존의 실측연구를 종합분석하여, 전체적인 유동특성을 파악하기 위해 다수의 측정지점에서 신뢰성 있는 수준의 측정이 이루어진 것으로 판단되는 현장실측인 Cooper's Ridge, Kettles Hill 및 Askervein Hill을 수치모델의 검증을 위한 대상지형으로 선정하였다. 본 연구에서 선정한 언덕 지형의 규모, 지형적 특징 및 주유동의 풍향을 표 2에 총괄하였다.

Table 2. Configurations of the object hills.

Hill	Height $H$ (m)	Base length $4L$ (km)	Slope $s$	Wind direction $\phi$	Shape
Cooper's Ridge	115	1.6	0.143	270°	quasi-2D
Kettles Hill	105	2.4	0.1	245°, 260°	bell-shaped 3D
Askervein Hill	116	2.0, 1.0	0.2	180°, 210°	elliptic 2D

위에서 언덕의 기울기는  $s = H/(2L)$ 로 정의된다. 선행연구 (Kyong과 Kim, 1994)에 의하면 기울기 0.3 이상일 때 언덕 풍하부 (leeside)에서 유동박리가 발생하였으므로, 표 2에 제시된 기울기 0.2 이하의 완만한 언덕을 지나는 유동은 부착유동 (attached flow)임을 예상할 수 있다. 언덕지형에 의한 유속증가 (speed-up)를 나타내는 지표로 유속증가율 (fractional speed-up ratio:  $\Delta S - 1$ )과 무차원유속 (normalized wind speed;  $\Delta S = U/U_0$ )이 사용되는데, 여기서  $U_0$ 는 원방 풍상측에서의 접근유속이다.

#### 3.2 Cooper's Ridge

Cooper's Ridge는 호주의 New South Wales지방

에 위치하고 있으며 북서방향으로 뺏어 있는 완만한 능선으로 언덕후면에서의 유동박리는 기대되지 않지만 연속된 지형으로 인한 영향이 클 것으로 예상된다. 지형특징 및 주풍향(서풍)을 고려하여 볼 때 Cooper's Ridge는 준 2차원 형상으로 간주할 수 있으므로 본 연구에서는 2차원 수치계산을 수행하여 실측(Coppin *et al.*, 1994)과 비교하였다. 현장실험에서는 중립상태 이외의 대기조건에서도 측정이 이루어졌으나 실측자료가 대기안정도 계수인 Monin-Obukhov length만으로 분류되어 있고 일반적인 경향에 상반되는 측면을 보이는 등 측정의 신뢰성에 문제가 있는 관계로 본 연구에서는 대기안정도를 배제한 계산을 수행하였다. 참고로 지면 경계조건으로는 실측결과로부터 유도된 지면거칠기  $z_0 = 3\text{cm}$ 를 사용하였다.

그림 1은 지면고도 2m와 3m에서 수평방향의 유속증가율을 나타낸 것이다. 수치해석 결과는 실측과 전반적으로 잘 일치하고 있으며 특히 함께 도시한 이론모델(Hunt *et al.*, 1988) 결과와 비교해 볼 때 언덕정상에서 훨씬 실측값에 근접함을 볼 수 있다. 언덕후면에서 수치해석 결과는 예상한 바대로 후방지형의 영향으로 인하여 급격한 유속감소가 발생하는 것으로 예측되었지만 이곳에서는 실측이 이루어지지 않았으므로 수치결과와 비교를 할 수가 없었다. 그런데 언덕후면에서 유속증가율이 이론해석 결과와 크게 차이가 나는 이유는 이론모델에서는 후방언덕을 해석에 고려하지 않았기 때문이며, 또한 이론모델에 의한 예측결과는 모델의 특성상 풍하부에

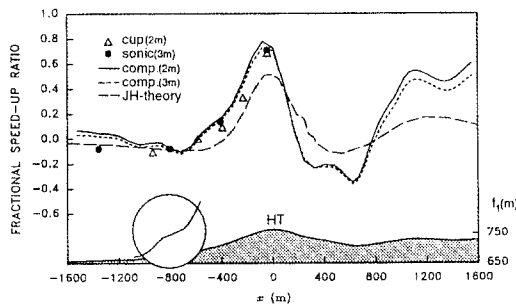


Fig. 1. Fractional speed-up ratios for the wind flow over Cooper's Ridge at the heights of 2m and 3m above the ground level. (symbols, full-scale measurements; lines, computations)

서는 예측결과의 신뢰성을 보장받기 힘들다. 그림 1을 자세히 관찰하여 보면  $-1200\text{m} < x < -400\text{m}$  부분에서 수치해석 결과가 지형의 국지굴곡(원형 확대부분 참고)에 따른 유속변화를 민감하게 예측한 반면, 이론해석 결과는 이러한 유속변동이 예측되지 않았는데, 그 이유는 이론해석 시 국지굴곡을 무시한 매끈한 지형을 사용하였기 때문이다.

### 3.3 Kettles Hill

Kettles Hill는 Canada, Alberta에 위치한 ( $40^\circ 30'N$ ,  $113^\circ 50'W$ ) 평균기울기 0.1의 매우 완만한 언덕으로 풍상류 20km 전방까지 평탄한 주변지형을 가진 독립언덕(isolated hill)이다. Kettle Hill에 대한 실측(Salmon *et al.*, 1988)은 1981년과 1984년 중립대기 조건 하에서 이루어졌다. 풍속계 등 기상 관측기기가 부착된 10m 탑과 3m 막대를 이용하여 동서(x-축) 및 남북(y-축) 방향으로 측정이 수행되었다. 1984년의 실측(Mickle *et al.*, 1984)은 1981년의 수평방향 측정에 수직 유속분포를 추가하기 위한 것이었으며, 두 번의 실측결과를 종합하여 볼 때 지면 거칠기는  $0.3 \sim 1\text{cm}$ 였다.

본 연구에서는 Salmon *et al.* (1988)의 등고선 지도(contour map)로부터 raster to vector 처리를 통해 계산을 위한 수치지도(digital map)를 작성하였다. 그림 2는 수치지도로부터 재작성된 등고선 지도이며 이로부터 3차원 보간(Renka, 1988)을 통하여 생성된 격자계(grid system)는 그림 3에 도시하였다.

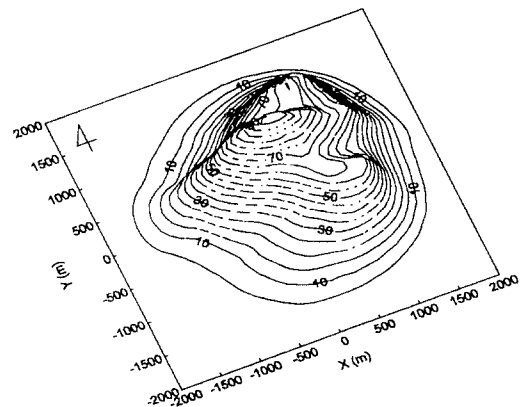


Fig. 2. Three-dimensional contour map of Kettles hill generated by a raster to vector procedure.

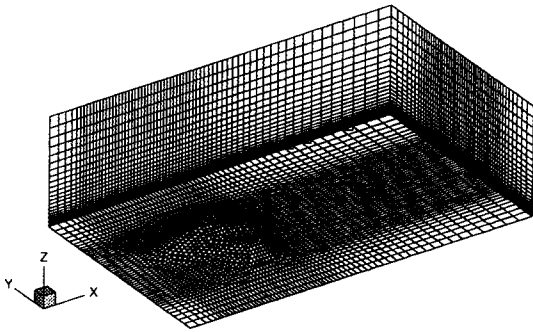


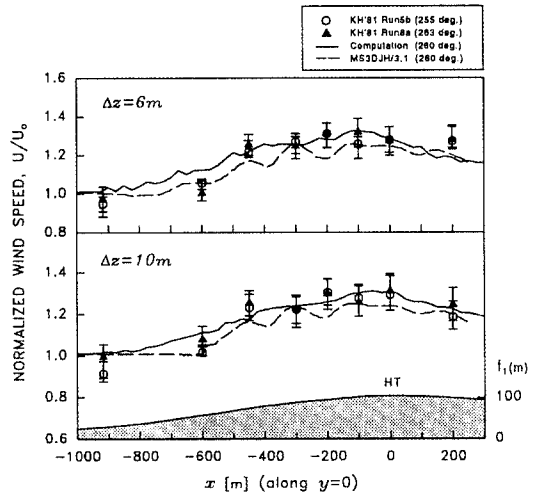
Fig. 3. Computational grid system around Kettles Hill (70x50x30).

상류 경계조건으로는 원방상류에 위치한 기준점 (reference site)에서의 실측치를 사용하였다. 이후에 언급될 "Run"은 모든 관측지점으로부터 자료가 입력되어 하나의 dataset이 얻어지는 시간간격(평균 1.5시간)을 말하는 것으로, 본 연구에서는 실측 Run5b(풍향 255°)와 Run8a(풍향 263°), 풍동실험(풍향 245°)의 결과를 수치예측과 비교하였다.

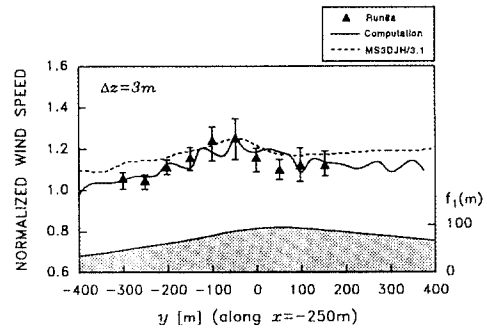
그림 4는 주풍향 260° (정북방향에 대하여 시계 방향)일 때 무차원유속 분포도로 실측치, 이론모델인 MS3DJH/3.1 (Taylor *et al.*, 1983) 및 수치모델 예측결과 간의 비교를 나타낸 것이다. 지형의 경사가 매우 완만한 관계로 급격한 유속증가 양상은 보이지 않으며 전반적으로 모든 결과가 잘 일치하고 있지만 남북방향으로의 비교(그림 4b)에서는 특히 이론모델에 비하여 수치예측이 실측에 보다 근접하고 있음을 확인할 수 있다. 언덕정상에서의 연직방향 유속분포를 그림 5에 도시하였는데 1984년의 실측 결과는 약한 풍속과 측정조건의 심한 변화에 따라 신뢰도가 떨어지는 관계로 풍동실험 (Teunissen, 1983)과 수치예측을 비교하였다. 도시된 풍동실험 유속분포는 풍향 245°에 대해 수행된 것이며 이는 동일 풍향에 대한 수치결과와 잘 일치하고 있다. 또한 풍향에 따른 수치예측 결과를 비교하여 보면 지형특성상 풍향이 260°로부터 245°로 바뀔 때 따라 언덕의 경사가 급해지게 되므로 유속증가도 245°일 때가 더 큰 것으로 해석할 수 있다.

### 3. 4 Askervein Hill

Askervein Hill은 Scotland에 위치한 (57° 11'N, 7°



(a) Along the east-west line.



(b) Along the north-south line.

Fig. 4. Normalized wind speeds for the wind flow over Kettles Hill for the incident wind direction of 260°. (symbols, full-scale measurements; lines, computations)

(a) Along the east-west line.

(b) Along the north-south line.

22'N) 언덕으로, 이에 대한 실측연구는 기존의 현장 실험 중 광범위한 측정점에서 여러 종류의 계측기를 사용하여 수회 반복 측정을 함으로써 가장 신뢰도가 높은 결과를 획득한 성공적인 연구로 평가되고 있다 (Walmsley와 Taylor, 1996).

Askervein Hill은 평균기울기 0.2의 타원형 언덕으로 주유동 210°인 경우 등고선 지도(그림 6)에 표시된 측정선 A-A 및 AA-AA와 접근유동이 이루는 각도는 13°가 된다. 본 연구에서는 언덕형상

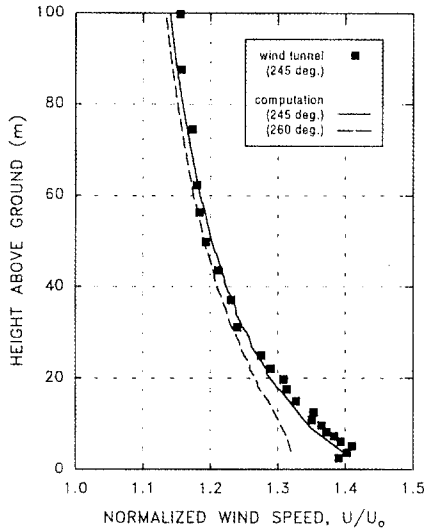


Fig. 5. Vertical profiles of the normalized wind speed at the hill top of Kettles Hill. (symbols, wind-tunnel experiments; lines, computations)

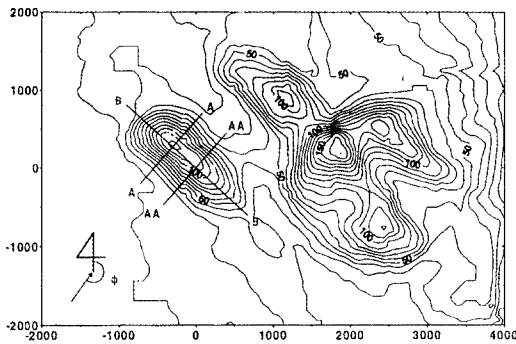


Fig. 6. Topographical contour map of Askervein Hill and surrounding area (unit : m).

및 접근유동의 특성을 고려하여 3차원 계산과 함께 2차원 계산을 병행하였다. 그림 7은 기준점(언덕정상)으로부터 2.7 km 상류)에서 측정된 대기경계층 수직분포로 1차원 수치해석 결과와 같이 나타내었다. Askervein Hill의 경우 풍상부가 넓은 평지로 이루어져 있으므로 충분히 발달한 경계층이 형성되었

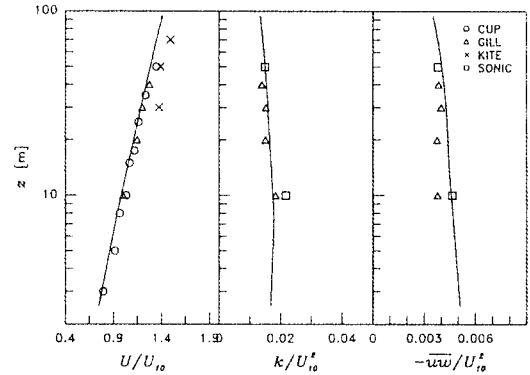


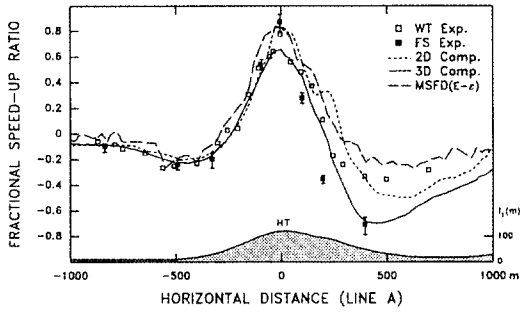
Fig. 7. Vertical profiles of the atmospheric boundary layer at the reference site. (symbols, full-scale measurements; lines, one-dimensional computations)

음을 가정할 수 있으며, 따라서 1차원 수치해석과 실측값이 잘 일치하는 결과를 보인다.

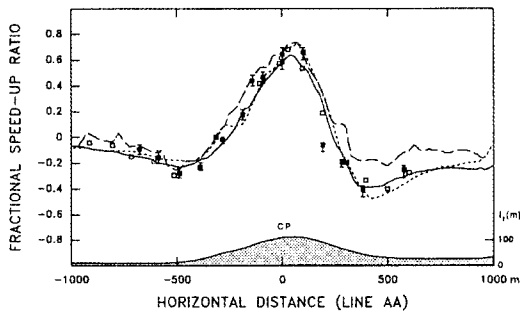
그림 8은 측정결과(WT는 풍동실험, FS는 현장실측)와 2차원(2D), 3차원(3D) 수치해석 및 이론모델(MSFD)<sup>1</sup>에 의해 예측된 유속증가율을 비교한 것이다. 2차원 수치해석 및 이론모델 결과는 언덕전반부 풍상면에서는 실측(Mickle *et al.*, 1988)과 잘 일치하였으나 언덕후면에서는 큰 차이를 보였으며, 특히 A-A 측정선을 따라서는 -0.7까지 감소하는 실측치를 따라가지 못하였다.

Askervein Hill 실측연구의 특징은 바로 A-A 측정선 언덕후면에서의 급격한 유속증가율의 감소인데(Walmsley와 Taylor, 1996), 이는 지형도에 나타난 바와 같이 유사규모 주변언덕들의 영향으로 인하여 A-A 측정선 풍하부에서 3차원적이며 간헐적(intermittent)인 유동박리가 발생하였기 때문으로 설명되고 있다(Teunissen *et al.*, 1987). 수치예측에 의한 지면 1 m 높이에서의 유선도(streamline plot; 그림 9)를 보면 Askervein Hill의 하단부를 지난 유동은 우측하단부 언덕의 차폐효과(blockage effect)로 인하여 상부로 타고 도는 유동이 발생함으로써 3차원적 유동박리가 발생하게 됨을 잘 보여 주고 있다. 참고로 그림 8에 같이 도시된 풍동실험(Teunissen *et al.*,

<sup>1</sup> MSFD(Mixed Spectral Finite Deference)모델은 선형이론에 근거한 해설모델로 Beljaars *et al.*(1987)에 의해 개발되었으며 인용된 해석결과는 k-ε(E-ε) 난류모델을 사용한 예측결과이다.



(a) Along the line A-A.



(b) Along the line AA-AA.

Fig. 8. Fractional speed-up ratios for the wind flow over Askervein Hill at the height of 10 m above the ground level. (symbols, full-scale measurements; lines, computations)  
 (a) Along the line A-A.  
 (b) Along the line AA-AA.

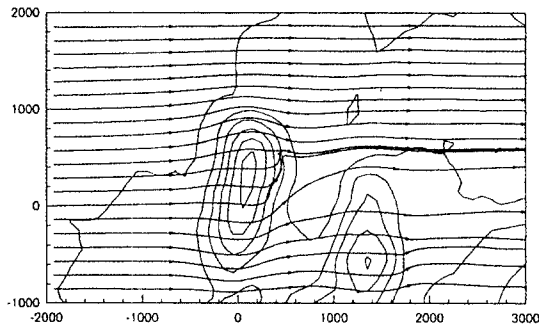


Fig. 9. Surface streamlines over Askervein Hill at the height of 1 m above the ground level from the numerical computation.

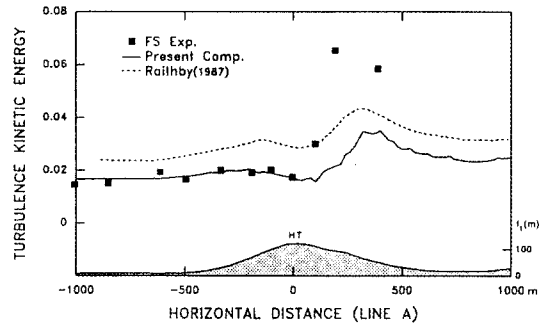


Fig. 10. Distribution of turbulence kinetic energy at the height of 10 m above the ground level. (symbols, full-scale measurements; lines, computations)

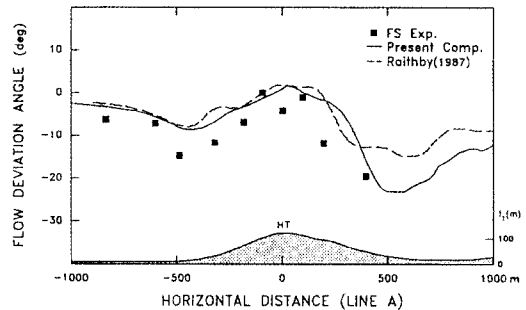


Fig. 11. Distribution of the deviation in flow angle at the height of 10 m above the ground level. (symbols, full-scale measurements; lines, computations)

1987)은 지표면 거칠기를 상사시키지 못하여 언덕 후면 유속감소를 예측하지 못하고 있는데, 이와 같은 결과는 풍동실험이라고 하더라도 정확한 상사를 맞추지 못하면 무시할 수 없는 예측오차가 발생할 수 있음을 보여 주고 있다. 기존의 이론모델 예측 및 풍동실험 등이 풍하면에서의 급격한 유속감소를 과대예측한 반면 3차원 수치모델은 비교적 정확히 3차원적 유동박리를 포함하여 언덕후면에서의 유동 특성을 모사하였음을 그림 8a의 비교를 통하여 확인할 수 있다.

그림 10은 난류운동에너지의 분포도로, 실측치를 보면 유동박리 영역에서 높은 값을 보이고 있으나

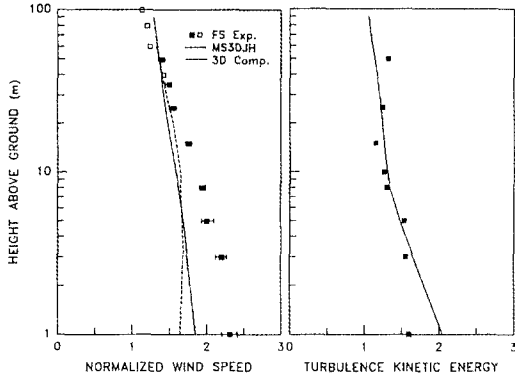


Fig. 12. Vertical profiles of (a) normalized wind speed, and (b) normalized turbulence kinetic energy at the hill top of Askervein Hill for the incident wind direction of  $180^\circ$ . (symbols, full-scale measurements; lines, computations)

수치해석 결과는 상당히 과소예측되었다. 이는 실제에서는 간헐적 유동박리가 발생한 반면 수치모델로는 정상상태(steady state) 해석을 하였기 때문에 발생된 오차라고 생각된다.

그림에 같이 도시한 Raithby *et al.* (1987)의 수치해석(점선)은 2장에서 설명한 바와 같은 거친 지표면의 경계조건 및 대기경계층에 적합한 난류상수등을 도입하지 않았기 때문에 난류분포를 전반적으로 크게 예측하는 것으로 판단된다. 또한 그림 11에서 비교한 풍향편차 역시 본 수치해석에 비하여 실측과 차이가 많이 발생함을 볼 수 있다. 그림 12는 주유동 방향  $180^\circ$  일 때 언덕정상(hill top)에서의 평균유속 및 난류운동에너지의 수직분포로, 유속분포의 경우 지표면에서 수치해석 결과가 실측치에 비하여 30% 정도 과소예측 되었음을 확인할 수 있다. 그림 8 및 12에서 수치예측된 언덕정상 유속증가율이 실측보다 작은 값을 보이는 원인으로는 불균일한 지표면 거칠기를 수치해석에서 고려하지 않았기 때문으로 유추되는데, Zeman과 Jensen (1987)은 언덕정상 부근에서는 지면거칠기가 1cm로 주변지역에 비해 감소하였음을 지적하였다. 따라서 지표면 부근에서의 유동장 모사에서는 아직 수치모델을 개선하여야 할 여지가 남아 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 미시규모의 오염물질 확산 및 대기유동장 예측을 위해 개발된 수치모델의 검증을 위하여 실지형에서의 대기유동에 대한 현장실험과 수치결과를 비교하였다. 수치예측은 전반적으로 실측치와 잘 일치하는 결과를 보였으며, 특히 Askervein Hill의 경우 주변언덕을 수치해석 영역에 포함 시킴으로써 언덕후면에서의 3차원적 유동박리로 인한 유속증가율의 감소를 기존의 예측에 비하여 비교적 정확히 예측하였다. 비록 완만한 지형의 풍상부에서는 이론모델을 사용하여 신뢰성 있는 예측을 할 수 있지만 풍상부 예측에서는 치명적 한계가 존재한다는 점과 지형변화가 심하거나 유동박리를 수반하는 경우에는 적용이 불가능한 점을 고려할 때, 복잡지형을 지나는 대기유동장의 예측은 본 연구를 통해 검증된 수치모델과 같은 수준의 동수역학 수치모델을 사용하여 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 수치모델과의 종합적인 비교검증을 통하여 기존의 현장실측 연구를 재평가하는 의의를 가질 뿐 아니라, 실측연구와의 비교분석을 통하여 파악된 수치모델의 정확도 및 예측특성은 차후 실제 응용시 예측결과를 해석하고 판단하는 근거자료로 활용될 것이다. 한가지 아쉬운 점은 서론에서 언급하였듯이 대부분의 실측연구가 이론모델과의 비교를 위하여 낮고 완만한 언덕지형을 대상으로 하였기 때문에 개발된 수치모델이 유동박리를 포함하는 복잡한 난류유동을 해석할 수 있다는 장점이 있음에도 불구하고 비교를 위한 실측자료의 미비로 이에 대한 검증이 이루어지지 못하였다. 본 연구에서 개발된 수치모델에 의한 언덕정상 지표면 부근에서의 유속증가율 예측은 아직 만족할 만한 수준이 아님을 확인하였으므로, 앞으로 지표면 부근 유속분포의 정확한 예측을 위하여 불균일한 지면거칠기를 고려한 수치모델로 개선하여야 할 필요성이 있다고 생각된다.

차후 연구에서는 우리나라의 실제지형에 본 수치모델을 적용하여 대기유동을 해석하고 아울러 오염물질의 확산거동을 예측하여 환경영향 평가를 위한 자료를 제공하고자 한다. 이를 위해서는 대기유동 및 오염물질 확산에 큰 영향을 미치는 대기 안정도 효과를 수치모델에 포함시키는 연구가 진행되어야



할 것이다. 또한 실지형의 수치해석 과정에서 수치 격자의 생성에 상당한 노력이 소요된 점을 고려할 때, 지형지도로부터 극지지형을 상세히 모사할 수 있는 격자계를 효과적으로 생성하는 방법의 개발도 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 포항공과대학교 부설 첨단유체공학연구센터와 국책대학원 환경공학부의 지원으로 수행되었기에 감사를 표합니다. 또한 실측자료 및 연구보고서를 제공해 준 Drs. Walmsley와 Mickle에게도 감사를 드립니다.

“본 연구의 수치계산은 슈퍼컴퓨터센터(SERI)의 CRAY C90을 사용하여 수행되었습니다.”

## 참고 문헌

- 김현구, 이정목, 경남호(1997) 언덕지형을 지나는 유동의 수치해석적 연구, 한국대기보전학회지, 13, 65-77.
- 윤준용, 이성철, 홍민선(1997) 복잡한지형에서의 대기순환모델에 관한 연구, 한국전산유체공학회지, 2, 109-116.
- 임희창, 김현구, 이정목, 경남호(1996) 언덕지형을 지나는 유동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12, 459-472.
- Atkinson, B.W.(1995) Introduction to the fluid mechanics of meso-scale flow fields, in Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields, Edited by A. Gyr and F.S. Rys, Kluwer Academic Publishers, 1-20.
- Beljaars, A.C.M., J.L. Walmsley and P.A. Taylor (1987) A mixed spectral finite-difference model for neutrally stratified boundary-layer flow over roughness changes and topography, Boundary-Layer Meteorol., 38, 273-303.
- Bradley, E.F.(1980) An experimental study of the profiles of wind speed, shearing stress and turbulence at the crest of a large hill, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 106, 101-124.
- Coppin, P.A., E.F. Bradley and J.J. Finnigan (1994) Measurements of flow over an elongated ridge and its thermal stability dependence: The mean field, Boundary-Layer Meteorol., 69, 173-199.
- Glekas, J.P. and G.C. Bergeles (1994) Dispersion under neutral atmospheric conditions, Int. J. Num. Methods in Fluids, 19, 237-257.
- Hunt, J.C.R., S. Leibovich and K.J. Richards (1988) Turbulent shear flows over low hills, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 114, 1435-1470.
- Ilyushin, B.B. and A.F. Kurbatsky (1995) Validity of  $E-l$  and  $E-\epsilon$  turbulence models for neutrally stable horizontally inhomogeneous atmospheric boundary layer, Atmospheric & Oceanic Physics, English Translation, 30, 583-589.
- Jackson, P.S. and J.C.R. Hunt (1975) Turbulent wind flow over a low hill, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 101, 929-955.
- Kim, H.G. and C.M. Lee (1998) Pollutant dispersion over two-dimensional hilly terrain, KSME Int'l J., 12, 96-111.
- Kyong, N.H. and H.G. Kim (1994) Numerical analysis of the flow over a hill, Research Report AFR-93-G02, Advanced Fluids Engineering Research Center, Pohang University of Science and Technology, 69-110.
- Mason, P.J. (1986) Flow over the summit of an isolated hill, Boundary-Layer Meteorol., 37, 385-405.
- Mason, P.J. and J.C. King (1985) Measurements and predictions of flow and turbulence over an isolated hill of moderate slope, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 111, 617-640.
- Mickle, R.E., J.R. Salmon and P.A. Taylor (1984) Kettles Hill '84: Velocity profile measurements over a low hill, Research Report AQRB-84-012-L, Atmospheric Environment Service, Toronto, Canada.
- Mickle, R.E., N.J. Cook, A.M. Hoff, N.O. Jensen, J.R. Salmon, P.A. Taylor, G. Tetzlaff, and H.W. Teunissen (1988) The Askervein Hill Project: Vertical profiles of wind and turbulence, Boundary-Layer Meteorol., 43, 143-169.
- Pielke, R.A. (1984) *Mesoscale Meteorological Modelling*, Academic Press, Orlando.
- Raithby, G.D., G.D. Stubbley, and P.A. Taylor (1987) The Askervein Hill Project: A finite control volume prediction of three-dimensional flows over the hill, Boundary-Layer Meteorol., 39, 247-267.
- Renka, R.J. (1988) ALGORITHM 661. QSHEP3D: Quadratic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data, ACM Trans, Math. Software, 14, 151-152.

- Salmon, J.R., H.W. Teunissen, R.E. Mickle, and P.A. Taylor (1988) The Kettles Hill Project: Field observations, wind-tunnel simulations and numerical model predictions for flow over a low hill, *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 309-343.
- Taylor, P.A. and H.W. Teunissen (1987) The Askervein Hill Project: Overview and background data, *Boundary-Layer Meteorol.*, 39, 15-39.
- Taylor, P.A., J.L. Walmsley, and J.R. Salmon (1983) A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over real terrain incorporating wavenumber-dependent scaling, *Boundary-Layer Meteorol.*, 26, 169-189.
- Taylor, P.A., P.J. Mason, and E.F. Bradley (1987) Boundary-layer flow over low hills, *Boundary-Layer Meteorol.*, 39, 107-132.
- Teunissen, H.W. (1983) Wind-tunnel and full-scale comparisons for mean flow over an isolated low hill, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, 15, 271-286.
- Teunissen, H.W., M.E. Shokr, A.J. Bowen, C.J. Wood, and D. W.R. Green (1987) Askervein Hill Project: Wind-tunnel simulations at three length scales, *Boundary-Layer Meteorol.*, 40, 1-29.
- Townsend, A. A. (1980) *The Structure of Turbulent Shear Flow*, Cambridge University Press, Cambridge, 158pp.
- Van Doormal, J.P. and G.D. Raithby (1984) Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows, *Numer. Heat Transfer*, 7, 147-163.
- Walmsley, J.L., I. Troen, D.P. Lalas, and P.J. Mason (1990) Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations, *Boundary-Layer Meteorol.*, 52, 259-281.
- Walmsley, J.L. and P.A. Taylor (1996) Boundary-layer flow over topography: Impacts of the Askervein study, *Boundary-Layer Meteorol.*, 78, 291-320.
- Zeman, O. and N.O. Jensen (1987) Modification of turbulence characteristics in flow over hills, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 113, 55-80.