

언덕지형을 지나는 유동에 관한 연구 Wind Flow over Hilly Terrain

임희창 · 김현구 · 이정묵 · 경남호¹⁾

포항공과대학교 기계공학과

¹⁾한국 에너지기술연구소

(1996년 2월 22일 접수, 1996년 8월 6일 채택)

Hee Chang Lim, Hyun Goo Kim, Choung Mook Lee, Nam Ho Kyong¹⁾

Department of Mech. Eng.,

Pohang University of Science & Technology

¹⁾*Korea Institute of Energy & Resources*

(Received 22 February 1996; accepted 6 August 1996)

Abstract

An experimental investigation on the wind flow over smooth bell-shaped two-dimensional hills with hill slopes (the ratio of height to half width) of 0.3 and 0.5 is performed in an atmospheric boundary-layer wind tunnel. Two categories of the models are used in the present investigation; six two-dimensional single-hills, and four continuous double-hills. The measurements of the flow field and surface static-pressure distribution are carried out over the Reynolds number (based on the hill height) of 1.9×10^4 , 3.3×10^4 , and 5.6×10^4 . The velocity profiles and turbulence characteristics are measured by the pitot-tube and X-type hot-wire anemometer, respectively. The undisturbed boundary-layer profile on the bottom surface of the wind tunnel is reasonably consistent with the power-law profile with $\alpha = 7.0$ ($1/\alpha$ is the power-law exponent) and shows good spanwise uniformities. The profiles of turbulent intensity are found to be consistent along the centerline of the wind tunnel. The measured non-dimensional speed-up profiles at the hill crest show good agreements with the predictions of Jackson and Hunt's linear theory. The flow separation occurs in the hill slope of 0.5, and the oil-ink dot method is used to find the reattachment points in the leeside of the hill. The measured reattachment points are compared with the numerical predictions.

Comparisons of the mean velocity profiles and surface pressure distributions between the numerical predictions and the experimental results show good agreements.

Key words : atmospheric boundary layer, flow separation, hilly terrain, speed-up

1. 서 론

오염물질이 산지 내에서 확산되는 경우에는 평지와는 달리 정체 (stagnant), 다운워시 (downwash), 충돌

(impact) 등의 특이한 현상이 나타난다는 것은 주지의 사실이며, 그러한 현상들은 산지에 의한 유동장의 변화와 불가분의 관계를 가지고 있다. 대기경계층이 산지를 통과할 때에는 지표면 부위의 유동장이 심하게 변형되어 유동바리, 유선방향의 변경 및 절단 등이 발생하며, 이

들은 각각 상기 현상의 직접적인 원인이 된다. 산지로 인한 이러한 유동의 변형특성 때문에 유동장을 고려하지 않는 일반적인 Gaussian model에 의한 확산예측 결과에는 수용하기 어려운 오차가 발생할 수 있으며 (김영성과 경남호, 1995), 기상대 위치선정이나 산지지형 내의 건물, 공업단지의 풍환경 예측 시에 심각한 오류가 생길 수 있다.

따라서 이러한 유동장 변형특성에 대한 이해는 산지지형에서의 대기오염 및 풍환경 문제 등의 해결에 대단히 중요한 역할을 하므로, 이를 해석하기 위하여 근래에 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 산지지형에서 유동장 변형에 대한 수학적 모델이나 예측기법 개발을 위해 아직까지는 가장 간단한 형태의 산지인 종형산지 (bell-shaped hill)에 대한 연구가 주종을 이루고 있으나, 점차 복잡한 실제지형에 가까운 형태, 즉 원추형, 급경사면, 산지간의 상호작용 등에 대한 연구로 발전해 가고 있다. 이론해석 분야의 연구는 Jackson과 Hunt (1975)가 선구자적 역할을 하였으며, 수치해석적 연구에는 Glekas *et al.* (1987), Bergeles (1985) 등이 2차원 또는 3차원 언덕에 대해서 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하여 수치모사를 한 것이 대표적이다.

현장에서의 실측은 모사실험과 수치해석 결과의 검증에 위해 반드시 필요하지만, 실측연구는 측정상의 난점과 막대한 소요경비 등의 제약으로 인해 수행된 연구가 적어서 문헌에서 찾아보기 힘들다. 제한된 조건에서 수행된 실측연구는 Bowen (1983), Sacre와 Bradley (1980), Mason과 Sykes (1979) 등의 논문이 발표된 바 있으나, 결과의 정확도나 다양성에 있어 아직 충분하다고 볼 수 없다. 이를 보완하기 위해 풍동 (wind tunnel)이나 수조 (water channel)에서의 모사실험이 여러 형태의 2차원 혹은 3차원 지형모델에 대해서 수행되어 왔으며, 이러한 모사실험은 현장에서의 실측보다 더 정밀한 측정이 가능하고 유동조건을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 기존연구로는 Pearse (1982), Bowen과 Lindley (1977), Siegel (1976) 등이 있으며, 최근에는 Almeida *et al.* (1993), 그리고 Ferreira *et al.* (1991), 이 2차원 언덕에 대해 평균유동과 난류특성을 연구하였다.

그러나 기존연구들은 대부분 단독언덕 주위의 유동에 관한 연구로서 기류속도가 낮은 2차원 언덕에 대해서는 그 특성이 많이 밝혀져 있지만, 이들만으로는 실제적인 적용 가능성이 희박하다. 복잡지형에서의 보다 실질적인 유동변화 예측을 위해서는 언덕과 언덕 사이의 상호작용에 대한 연구가 반드시 필요하며, 2차원 혹은 3차원 언

덕이 연속적으로 위치한 경우에 대한 실험적 연구가 그 기초가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 풍동 내에 대기경계층을 모사하여 측정부에는 기류속도 비가 각각 0.3, 0.5이고, 높이가 각각 4 cm, 7 cm, 그리고 12 cm의 코사인 (cosine) 형태의 2차원의 단독언덕인 경우, 그리고 두 개의 언덕을 연속하여 배치한 경우에 대하여, 언덕 주위에서의 평균유속과 난류강도를 측정하여 언덕 형태와 유동특성 간의 상관관계를 검토하고 기존의 이론모델, 그리고 수치해석 결과와의 비교를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 대기경계층 풍동

여러 형태의 2차원 언덕을 지나는 유동을 측정하기 위하여 측정부의 길이가 6m이고 단면은 1.2m×1.2m인 한국에너지기술연구소 (KIER)의 대기경계층 풍동을 사용하였다 (경남호 등, 1992).

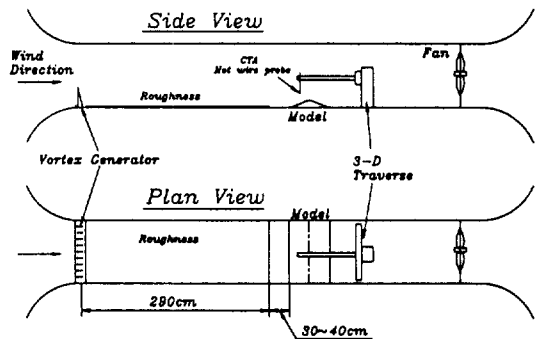


Fig. 1. Wind tunnel setup for the atmospheric boundary layer simulation.

본 실험에 사용된 풍동은 짧은 측정부 풍동형이며, 그림 1과 같이 짧은 측정부 길이로 두꺼운 경계층을 생성시키기 위하여 풍동의 입구에 와류생성기와 트리핑펜스 (tripping fence)가 조합된 장치를 설치하였다. 그리고 풍동바닥 위에는 인조 잔디를 깔아서 거칠기 요소로 사용하였다. 와류생성기 (vortex generator)는 높이가 25 cm이고, 단순한 직삼각형 탑형태 (spire)를 사용하였고, 이를 풍동의 입구에 등간격으로 배치하였다.

2.2 산지모델

실험에 사용된 2차원 언덕은 강화섬유 플라스틱 (FRP; fiber reinforced plastic)으로 제작하였다.

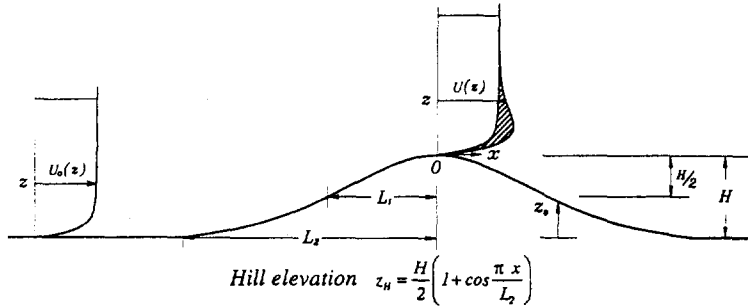


Fig. 2. Mathematical description of a hill shape (Note that z is the terrain following vertical coordinate which follows hill surface).

Table 1. Geometric parameters for the hill, where H is the height, and δ is the depth of the boundary layer.

(a) Two-dimensional single hill models

Case	Slope	H [cm]	Re_H	δ/H
S3H4*	0.3	4	1.87×10^4	6.25
S3H7		7	3.27×10^4	3.57
S3H12		12	5.60×10^4	2.10
S5H4	0.5	4	1.87×10^4	6.25
S5H7		7	3.27×10^4	3.57
S5H12		12	5.60×10^4	2.10

* $S(x)H(y)$ means that the slope is $[x]$ and height is (y) .

(b) Two-dimensional double hill models

Case	Slope	Front H [cm]	Rear H [cm]
S3H4-S3H7	0.3	4	7
S3H7-S3H4		7	4
S5H4-S5H7	0.5	4	7
S5H7-S5H4		7	4

언덕의 형상은 몇 가지 수학적인 모델 중에서 대칭형상이며 비교적 단순한 형상의 모델 (cosine-shaped model)을 채택하였다.

언덕의 형태를 나타내는 기하학적 변수로는 언덕높이 H 와 언덕 상반부의 높이가 $H/2$ 인 지점으로부터 언덕 정상까지의 수평거리 L_1 이며, 언덕의 기울기는 $s=H/(2L_1)$ 으로 정의된다. 모델형상의 수학적인 표현은 그림 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용하는 좌표계는 다음과 같다: (x, y) 는 2차원 수평면에서 각각 유동방향과 그 직각방향의 좌표를 나타내며, z 는 지표면으로부터 시작하는 수직좌표이다. 본 연구에서는 기준점을 언덕정상으로 택하였으므로 이곳에서는 $(x, y, z)=(0, 0, 0)$ 이다.

여러 가지 2차원 언덕모델의 제작치수는 표 1에 열거하였다. 본 실험에 사용된 언덕의 기울기는 0.3과 0.5인데, 김현규와 경남호 (1994)의 수치해석 결과에 의하면 언덕 후반부의 유동박리는 언덕의 기울기가 0.3인 경우에는 발생하지 않았고, 0.5인 경우에 발생하는 것으로 예측하였다.

따라서 본 실험에서는 수치해석을 통해 얻은 유동박리의 발생 및 재현상과의 비교를 위해 이를 기준으로 언덕의 기울기를 선정하였다.

2.3 유속 측정장치

측정장치의 개략도는 그림 3과 같다. 본 실험에서는 평균유속과 난류강도의 측정을 위해 표준 피토포와 X형 열선유속계를 사용하였고, IBM/PC와 RS232C 인터페이스를 통하여 풍속계를 작동하였다. 본 실험에서 사용된 열선유속계는 정온방식 (CTA)의 DANTEC STREAMLINE 모델로서 12bit 해상도 (resolution)와 채널당 100 KHz의 추출율 (sampling rate)을 가지는 A/D 보드 (KEITHLEY, METABYTE 모델 DAS-1600)와 연결되어 있다.

2.4 표면 압력분포

모델언덕 주위의 표면 압력분포를 측정하기 위해 내경이 약 1mm인 황동파이프 압력공 (pressure tap)을 유동방향으로 4 cm 간격으로 모델표면에 설치하였다. 압력측정은 그림 3에 도시한 바와 같이 피토포를 사용할 때와 동일한 방식을 사용하였으며, 20여개의 압력을 한꺼번에 측정할 수 있도록 Scanivalve (SCANCO model J)를 압력공과 압력변환기 사이에 설치하였다.

국부정압 (local static pressure)의 무차원화된 표현인 압력계수 (C_p)는 다음과 같이 정의된다.

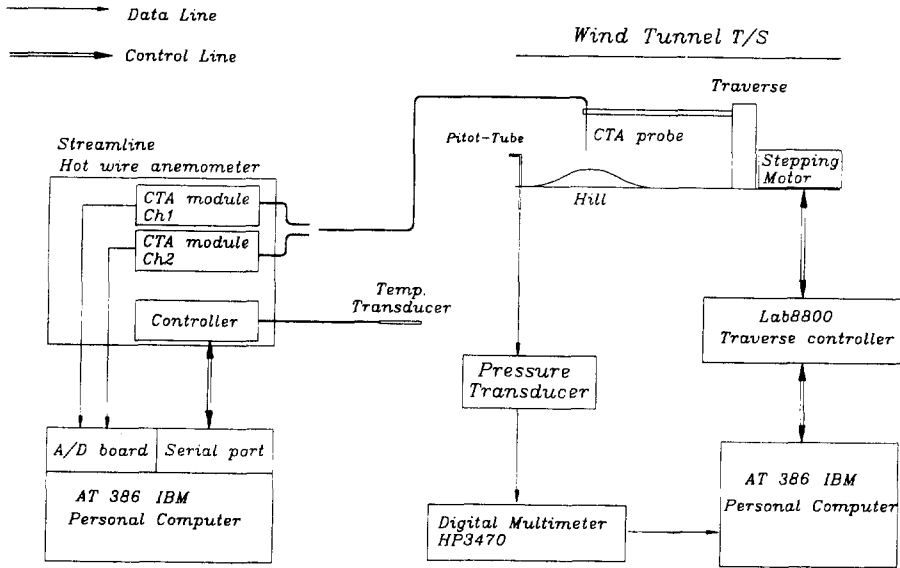


Fig. 3. Schematic diagram of the velocity measurement system.

$$C_p = \frac{2(P - P_\infty)}{\rho U_\infty^2}$$

여기서 U_∞ , P_∞ , P , ρ 는 각각 풍동 내 경계층 상부의 균일유속, 자유흐름에 설치된 피토관의 정압, 모델표면에 서 얻어진 정압, 그리고 공기의 밀도를 나타낸다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 불확실성 분석

본 연구에서는 Coleman과 Steele (1989)의 방법을 응용하여 피토관과 X형 열선유속계로 측정된 유속값의 불확실성 분석을 수행하였다. 오차분석은 언덕의 상류부분과 언덕 정상위치의 경계층 유속분포에 대해서 수행하였고, 각 위치에서 지면으로부터 1 cm, 5 cm, 250 cm 높이에서의 측정치에 대하여 분석하였으며, 각 점에서 10회의 표본추출을 하였다. 측정결과 상류부분 및 언덕 정상 표면부근의 유속측정값의 변동이 타 지점에 비해 상대적으로 크게 나타나는 했으나, 피토관으로 측정된 유속의 상대오차는 6% 이하로써 비교적 정밀한 측정이 이루어졌음을 확인하였다.

피토관과 마찬가지로 X형 열선유속계로 측정된 난류강도에 대해 불확실성 분석을 실시하였다. 열선유속계 측정시 발생하는 오차의 주요인은 온도변화로써 이를 줄

이기 위하여 각 실험 전후, 매시간 마다 열선유속계를 보정하였다. 불확실성 분석결과, X형 열선유속계로 측정한 평균유속과 난류강도의 정밀오차는 약 $\pm 10\%$ 로서 그리 크지 않음을 확인하였다.

3.2 교란되지 않은 대기경계층의 유동특성

그림 4는 모델이 설치되지 않은 평탄한 지형에서 높이에 따른 평균유속 분포의 변화를 보여주고 있다. 그림에는 와류생성기로부터 유동방향으로 각각 3.5 m, 3.9 m, 그리고 4.2 m인 위치에서 측정된 유속분포를 도시하였다. 각 측정위치에서의 유속분포는 다음과 같이 로그(logarithmic) 함수로 곡선회귀(curve fitting)할 수 있다.

$$U_0(z) = \frac{u^*}{\kappa} \log \frac{z}{z_0}$$

여기서, κ 는 von Kármán 상수로 0.41이고, 곡선회귀를 통하여 얻은 마찰속도 u^* 와 거칠기요소의 높이 z_0 는 각각 0.33 m/s, 그리고 0.05 mm이다.

그림 5는 동일한 측정위치에서 X형 열선유속계의 각도를 90°씩 돌려 가면서 측정된 x, y, z 방향의 난류강도 $u_0(=\sqrt{u'^2})$, v_0' , w_0' 과 $u'w'$ 의 수직분포를 보여주고 있다. 그림에서 수평축은 경계층 상부의 균일유속 정도

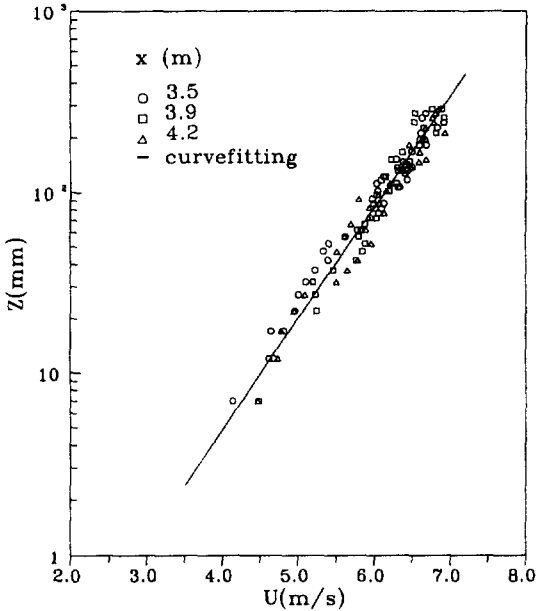


Fig. 4. Mean velocity profiles over the base plate at three distances downstream from the vortex generators ($Re_x=1.17 \times 10^5$).

풍 (gradient wind)으로 무차원시켰고, 수직축은 측정 높이이다. 와류생성기로부터 3.5m~4.2m 사이에서의 난류강도 변화는 유동의 진행방향으로 일정하게 평형상태를 유지하고 있음을 보여준다.

그림 5에서 $\overline{u'w'}$ 의 분포는 압력구배가 없는 경우, 완전 발달한 거친 벽면의 난류경계층 유동에 대한 Raupach

(1981)의 실험결과와 매우 유사하다. 표면으로 접근함에 따라 $|\overline{u'w'}|$ 이 감소경향을 보이는 것은 거친 벽면의 난류경계층에서 측정되는 일반적인 특성 (Mulhearn과 Finnigan, 1978)이지만 높은 난류강도를 가지는 벽면 근처의 속도측정시 X형 열선유속계의 제약성으로도 알려진 바 있다 (Raupach, 1980).

3.3 2차원 단독언덕

3.3.1 평균유동장

그림 6과 7은 유동박리가 발생하지 않는 모델인 S3H7에 대해서 풍동 중심선을 따라 유동방향 다섯 지점 ($x/L_1 = -2.52, 0.0, 1.0, 2.0, 3.0$)에서 평균유동장을 측정된 결과이다. 평균유동장은 피토판과 X형 열선유속계로 측정하였고, 각각의 그림은 수평 속도성분과 수직 속도성분을 보여주고 있다. 그림 6에서 언덕의 기울기가 완만하여 유동박리가 일어나지 않는 경우는 피토판 및 X형 열선유속계로 측정된 수평방향 유속값이 측정기 간의 차이가 없이 잘 일치함을 볼 수 있다. 여기서 주의하여 보아야 할 부분은 언덕정상 ($x/L_1 = 0.0$) 표면 근처로 이 곳에서는 교란되지 않은 경계층에 비해 유속 증가 (speed-up)가 크게 일어난다. 이러한 유속증가에 대한 해석은 이후 무차원수를 이용하여 언급하겠다. 언덕의 1/2 하류 ($x/L_1 = 1.0$)에서는 언덕표면에서 급격한 속도구배를 보이고 있으며, 이는 유동박리가 일어나기 직전의 상태와 유사하다. 언덕을 지나서는 ($x/L_1 = 3.0$) 다시 교란되지 않는 유속분포로 회복되고 있다.

그림 7은 그림 6과 동일한 측정단면에서 X형 열선유속계로 측정된 수직 속도성분의 분포도이다. 언덕정상

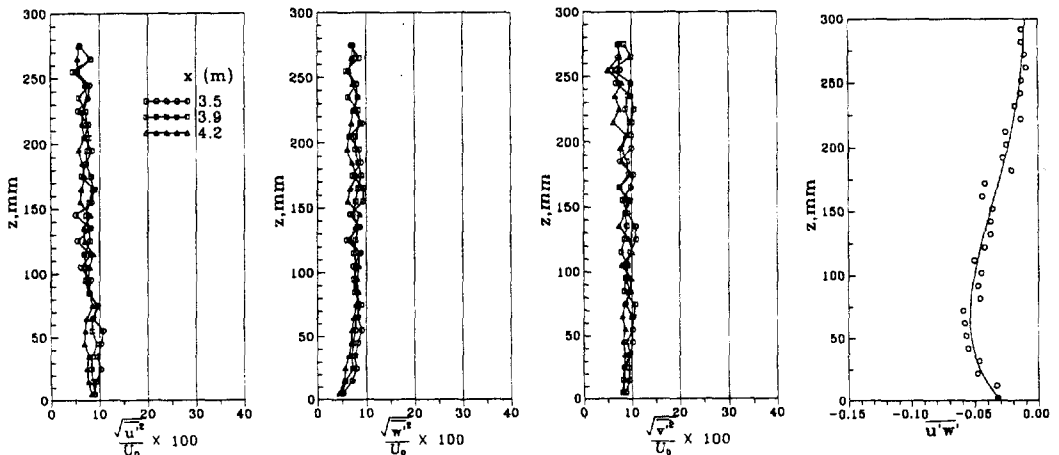


Fig. 5. Vertical profiles of the turbulence intensity and Reynolds shear stress over flat terrain.

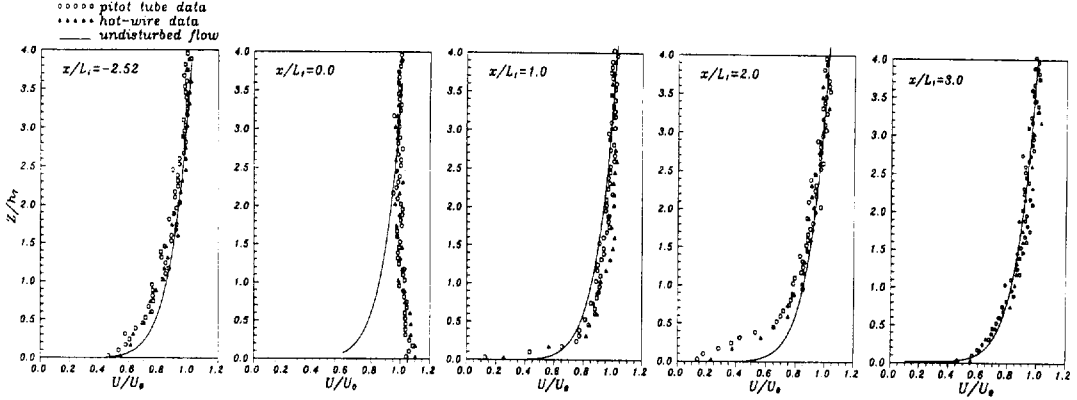


Fig. 6. Comparison of the mean horizontal-velocity profiles (S3H7).

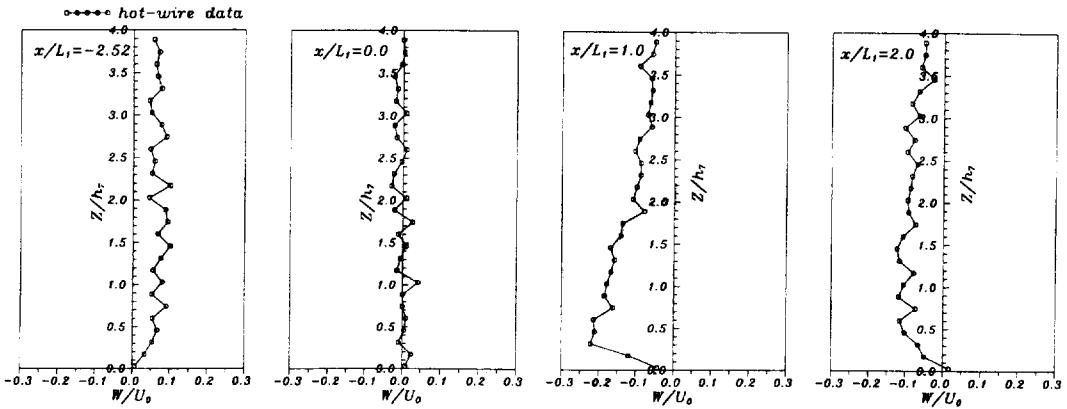


Fig. 7. Comparison of the mean vertical-velocity profiles (S3H7).

($x/L_1=0.0$)을 중심으로 언덕의 상류부분 ($x/L_1 < 0$)과 하류부분 ($x/L_1 > 0$)에서의 속도성분이 서로 반대방향임을 알 수 있다. 즉 상류부분에서는 언덕을 타고 오르는 양 (+)의 유동을, 하류부분에서는 언덕을 지나서 아래로 내려오는 음 (-)의 유동이 존재함을 보여주는데, 이에 반해 언덕정상에서는 수직 속도성분이 없이 수평속도 성분만이 존재한다.

그림 8에는 유동박리가 발생하지 않는 S3H7과 S3H4 언덕정상상의 유속분포로 유속증가의 양적인 비교를 위해 무차원 유속증가수 (σ)를 사용하여 기존의 이론해석과 비교하였다. 그림을 통해 알 수 있듯이, 유동박리가 일어나지 않는 완만한 기울기의 언덕에 대해서는 무차원 유속증가가 Jackson과 Hunt (1975)의 선형이론과 잘 일치한다. 따라서, 유동박리를 수반하지 않는 완만한 언덕에 대해서는 Jackson과 Hunt의 선형이론을 언덕정상

유속증가의 예측에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 박리가 수반되는 경우의 유속증가는 이러한 선형이론을 따르지 않았다.

그림 9와 10은 높이가 4 cm이고 기울기가 각각 0.3, 0.5인 언덕에 대한 유동방향으로의 수평방향 평균유속의 피도관 측정결과로서 동일조건외의 수치해석(김현구와 경남호, 1994) 결과와 비교하였다. 수치해석에는 κ - ϵ 난류모델과 비직교 경계면일치 좌표계를 사용한 유한체적법을 사용하였는데, 유동박리 영역에서 다소 차이가 있기는 하지만 전체적으로 수치예측과 실험결과가 잘 일치하고 있다.

언덕하류 ($x/L_1 > 0$)의 박리영역 내에서는 접근유동 (approaching flow) 만을 측정할 수 있는 유속 측정계기인 피도관과 X형 열선유속계로는 역류유동 (back flow)을 측정할 수 없으므로, 본 연구에서는 차선책으

로 유동가시화로 박리영역의 크기를 예측하여 수치해석 결과와 비교하였다.

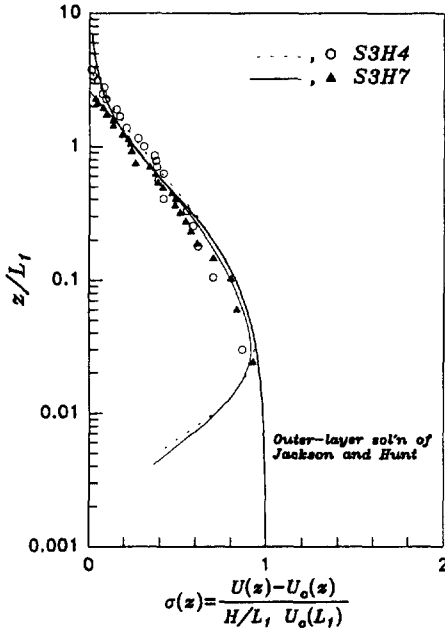


Fig. 8. Comparison of the non-dimensional speed-up velocity profiles at the hill top between the theoretical prediction and the present results.

3.3.2 표면 압력분포

그림 11과 12는 표면 압력계수의 수치해석 및 실험결과를 상호 비교한 것으로 전체적으로 잘 일치하고 있다. 그림에서 보면, 언덕정상 표면근처에서 유속은 최대값에 이르고, 이로 인해 낮은 압력영역이 형성되어 표면 압력계수 (C_p)는 최저값을 가진다. 그림 11은 유동박리가 없는 경우로 언덕정상에서 표면 압력계수가 각각 약 -0.8 (S3H7), -0.6 (S3H4)의 최저값을 갖는다. 유동이 언덕을 지나 하류로 진행함에 따라 에너지 손실이 거의 없이 표면압력이 곧 회복되는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 박리가 일어나는 S5H4, S5H7 경우로써 언덕정상에서 수치해석의 압력계수값이 풍동실험보다 약간 낮게 예측하고 있지만 전체적으로는 두 결과가 잘 일치한다. 언덕정상에서 C_p 의 계산값이 실측값보다 작게 예측되는 것은 수치계산의 유속증가 값이 실측값보다 크다는 것(그림 10 참조)과 일치되는 결과이다. 언덕하류에서는 유동박리 때문에 표면압력값의 언덕상류 값으로의 회복이 늦어지는데, 이는 실린더 주위의 압력분포와 같은 양상으로 언덕 바로 뒤 ($0.5 < x/L_1 < 2.0$)에서 압력분포가 일정하게 유지되다가 서서히 회복되고 있다.

3.3.3 난류유동장

그림 13은 유동박리가 없는 S3H7의 경우, 유동방향으로의 난류 운동에너지의 변화를 도시한 것이다. Bradshaw (1973)에 의하면 언덕 하류부분에서는 속도

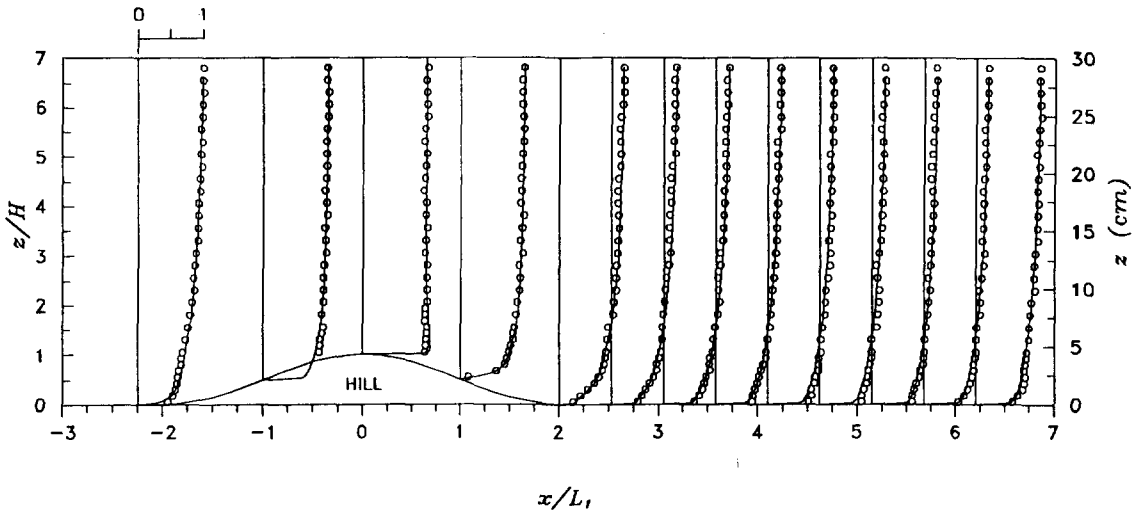


Fig. 9. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_0 over the single hill, S3H4 (O, experimental data; -, numerical prediction).

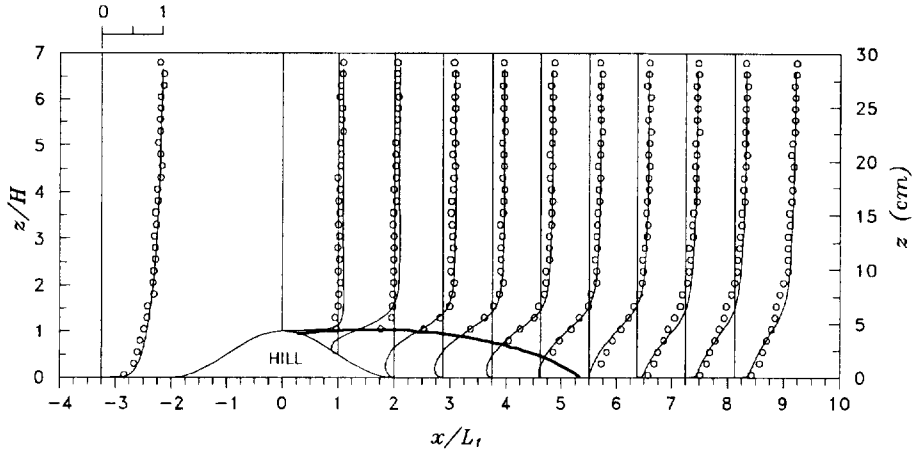


Fig. 10. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_∞ over the single hill, S5H4 (\circ , experimental data; —, numerical prediction).

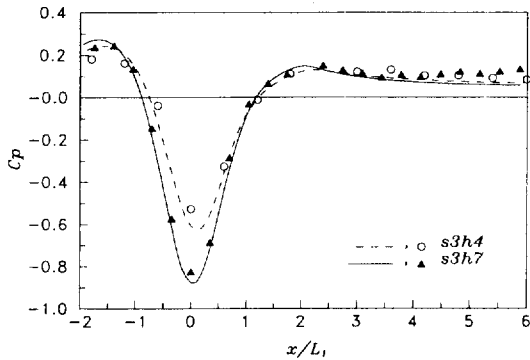


Fig. 11. Pressure distributions on the single hills, S3H4 and S3H7 (\circ , \blacktriangle : experimental data; --, —: numerical predictions).

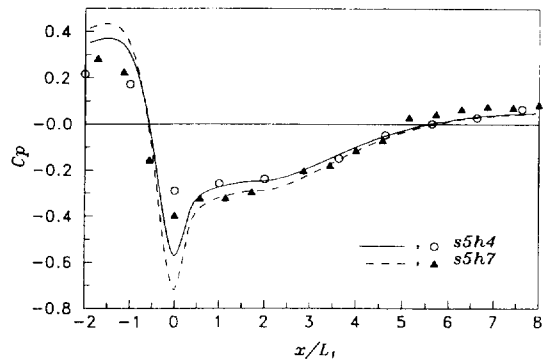


Fig. 12. Pressure distributions on the single hills, S5H4 and S5H7 (\circ , \blacktriangle : experimental data; --, —: numerical predictions).

분포에 굴곡점이 생기는 영향에 의해 유선이 불안정화되어 난류강도가 증가하는 반면, 언덕 상류부분에서는 속도구배가 완만하기 때문에 (그림 10 참조) 유동이 안정화되어 난류를 압축시키므로 난류강도가 감소한다고 하였다. 그림에서 난류에너지는 언덕정상에서 후류에 이르는 동안 점차로 증가하다가 이후 점성소산 (viscous dissipation)에 의해서 감소하여 원래의 난류에너지 분포로 회복되는 경향을 보여준다.

3.3.4 언덕하류 경계층의 회복거리

언덕의 하류에서 유동박리가 생기지않는 지형 (S3H4, S3H7)의 경우, 평지에서의 교란되지 않은 경계층은 언

덕을 만나서 유동분포가 변형되고 언덕을 지난 후에는 다시 원래의 상류유동 속도분포로 회복된다. 이 회복거리 X_0 는 모사실험을 할 경우, 모델에 의한 교란이 언덕 하류로 얼마까지 영향을 미치는지를 예측하여 실험장치를 설치함에 있어 중요한 기준으로 활용할 수 있다. 박리가 생기지 않는 두 경우에 대해 본 실험에서 구한 회복거리는 언덕높이의 약 6배였으며, 따라서 언덕끝단 ($x/L_1=2.0$)으로부터 최소한 $6H$ 의 거리를 지나야 다시 교란되지 않은 속도분포로 회복된다.

3.3.5 재부착 지점

본 실험에서는 재부착 지점을 찾기 위하여 oil-ink

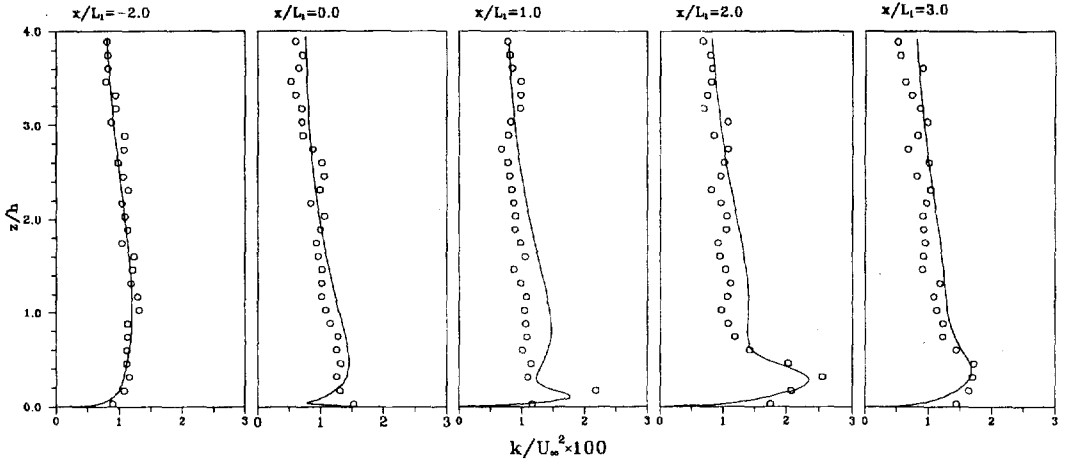


Fig. 13. Comparison of the predicted and measured turbulence kinetic energy profiles over the single hill, S3H7 (○, experimental data; —, numerical prediction).

dot법 (Langston과 Boyle, 1982)을 사용하였다. 그림 14는 재부착 지점에서 유동의 방향이 양쪽으로 나누어지는 형태를 보여주고 있고, 그림 15는 동일한 조건에서 경계면일치 격자계를 이용한 수치예측 결과이다. 수치해석 및 실험에서 예측한 재부착 지점은 표 2에 나타내었다.

다양한 형상의 돌출물 뒤의 재부착 유동에 대한 연구는 Bradshaw와 Wong (1972)에 의해 정리되어 있다. 본 실험의 결과는 유동방향에 수직으로 세워진 펜스 (fence) 실험에서 구해진 박리영역의 길이에 비해 상대적으로 아주 짧다. 예를 들어, 기존연구에서 2차원 펜스에 의한 박리유동의 재부착 지점은 언덕정상으로부터 $X_R/H=17$ 이다.

모델 S5H4의 경우, 수치해석 및 실험에서 구해진 박리영역의 길이는 거의 동일한 반면 S5H7인 경우는 실험이 15%정도 작게 측정되었다. 이러한 차이는 실험에서 언덕하류 측정부 길이가 충분히 확보되지 못하였기 때문으로 추측된다. 또한 모델과 이송기에 의한 차폐효과 (blockage effect)도 무시할 수 없는 오차요인인데, 여기서 차폐율 (blockage ratio)은 풍동 단면적과 모델 단면적의 비율로 S5H7 모델의 경우 약 6%이다. 모델 S3H4의 경우는 S5H7에 비해 상대적으로 작은 모델이므로 상기 요인에 의한 영향은 상대적으로 작다. Arya et al. (1987)이 S5H4과 유사한 모델과 비슷한 유동조건 하에서 수행한 실험에서는 재부착 지점은 $X_R/H=5.5$ 이었다.

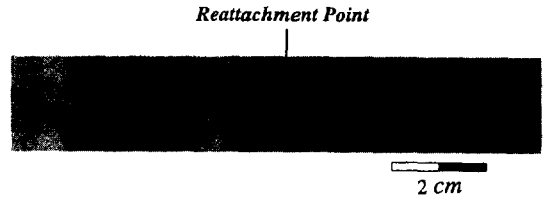


Fig. 14. Visualization of the reattachment point by the oil-ink dot method.

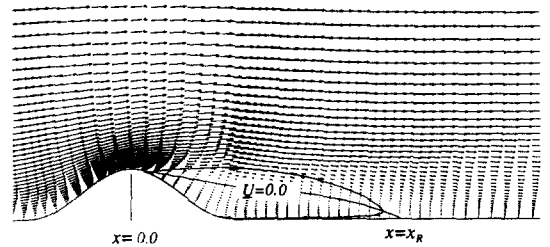


Fig. 15. The flow separation over the single hill, S5H4.

Table 2. Measured and predicted reattachment points.

Case	δ/H	Reattachment Point (Experiment)	Reattachment Point (Numerical)
S5H12	2.1	$3.67H \pm 0.17H$	—
S5H7	4.3	$4.30H \pm 0.29H$	$5.20H$
S5H4	7.5	$5.25H \pm 0.25H$	$5.37H$

3.4 2차원 연속된 언덕

3.4.1 평균유동장

그림 16은 두 가지 경우의 연속된 2차원 언덕 중 S3H4-S3H7의 언덕을 지나는 유동에 대하여 동일조건에서 수치해석과 실험결과를 비교한 것으로 하류쪽 두번째 언덕 위의 유속분포가 수치해석 결과와 다소 차이를 보이는 것을 제외하고는 비교적 잘 일치하고 있다. 그림 17은 S3H7-S3H4의 유속 측정결과로서 첫번째 언덕의 경우는 실험과 수치해석 결과가 잘 일치하며, 언덕사이에서는 언덕간의 상호작용에 의하여 작은 박리영역이 존

재함을 볼 수 있다.

그림 18과 19는 언덕의 하반부에서 박리가 수반되는 기울기 0.5의 언덕이 연속적으로 놓여있는 경우에 대하여 유동의 수치해석과 실험결과를 상호 비교한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이, 언덕의 상호작용에 의해 박리 특성이 단독언덕에 비하여 상당히 달라진다. 그림 19에서 S5H7-S5H4 언덕의 경우, 상류언덕 정상으로부터 유동박리가 시작하며 두번째 언덕 하류의 박리영역은 2차원 단독언덕의 경우인 그림 10과 비교할 때 그 크기가 감소했음을 알 수 있다. 이것은 언덕 사이의 박리영역에

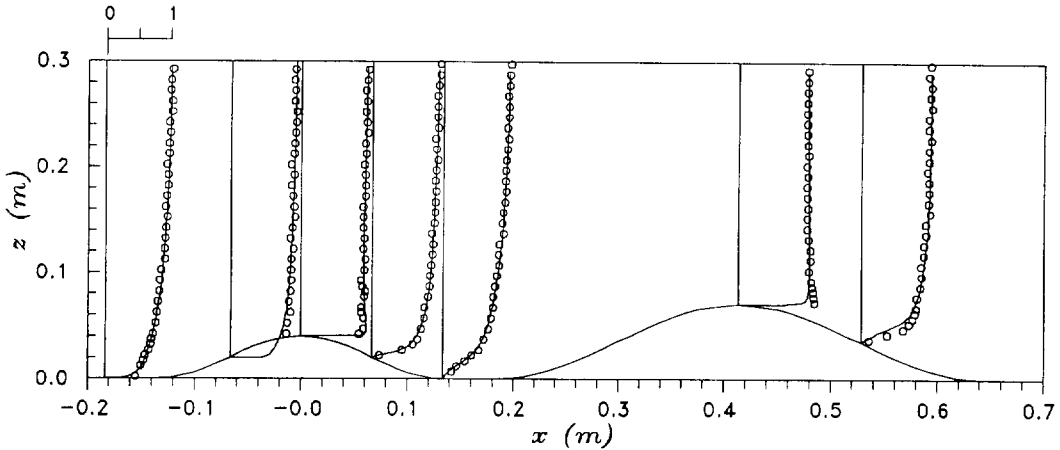


Fig. 16. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_∞ over the double hill, S3H4-S3H7 (\circ , experimental data; —, numerical prediction).

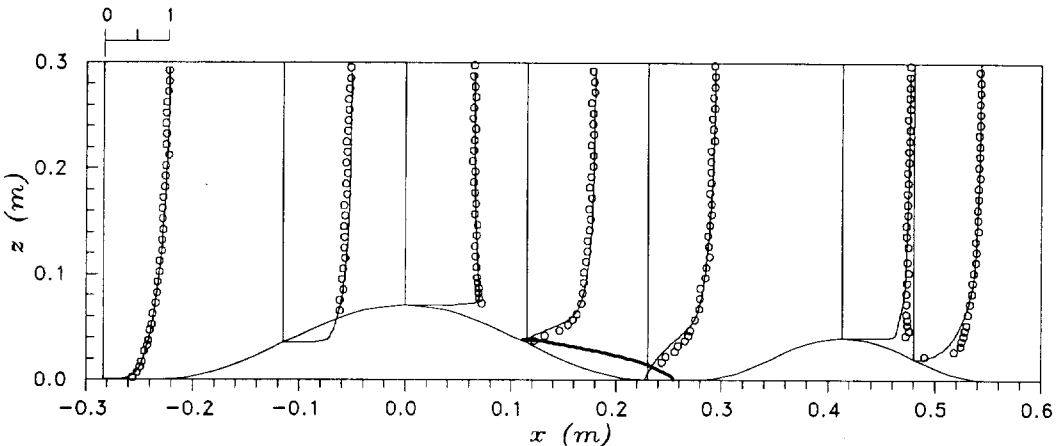


Fig. 17. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_∞ over the double hill, S3H7-S3H4 (\circ , experimental data; —, numerical prediction).

서 역압력구배 (adverse pressure gradient)와 점성 소산에 의한 운동량 손실 때문에 언덕이 단독으로 있는 경우보다 박리영역이 작게 형성된다고 판단된다 (Ferreira *et al.*, 1991).

그림 20은 연속된 두 언덕의 상호작용에 의한 언덕정상에서의 평균유속 분포의 변화를 단독언덕의 경우와 비교한 것이다. 그림에서 (a)와 (b)는 박리가 생기지 않는 연속된 언덕의 경우로서 S3H4 언덕정상에서의 평균유속 분포는 주위 언덕의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 즉, 언덕이 단독으로 존재하는 경우에 비하여 주위에 높은 언덕이 존재하게 되면 언덕정상에서의 유속은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 S3H7 언덕정상에서의 속도분포 (그림 20(a) 참조)는 S3H4 경우와는 달리 상류 또는 하

류 쪽의 낮은 언덕에 의한 영향이 거의 나타나고 있지 않다. 그림 20(c)와 (d)는 하류에서 박리가 발생하는 언덕정상에서의 속도분포로서 S5H7의 정상에서는 (그림 20(c) 참조) 단독언덕의 경우와 연속된 두개의 언덕이 있는 경우 모두가 주위언덕의 상호영향에 의한 속도차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 S5H4의 경우(그림 20(d) 참조)는 하류에 높은 언덕이 있는 경우와 상류에 높은 언덕이 있는 경우, 모두 언덕이 단독으로 존재하는 경우와는 완전히 다른 유동장을 나타낸다. 즉 하류에 높은 언덕이 있는 경우가 단독언덕의 경우보다 유속이 더 작다. 그리고 상류에 높은 언덕이 있는 경우에는 하류에서 큰 유동박리가 발생하여 두번째 언덕의 정상에까지 그 영향이 미치므로 유속분포가 크게

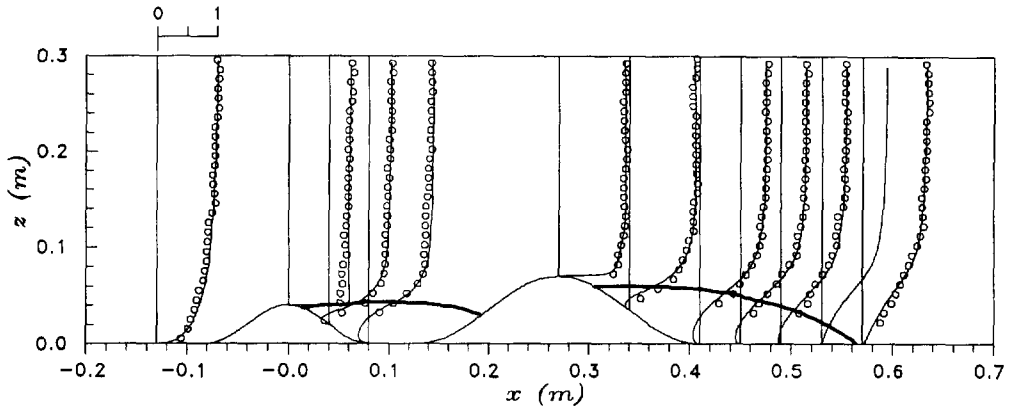


Fig. 18. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_∞ over the double hill, S5H4-S5H7 (○, experimental data; —, numerical prediction).

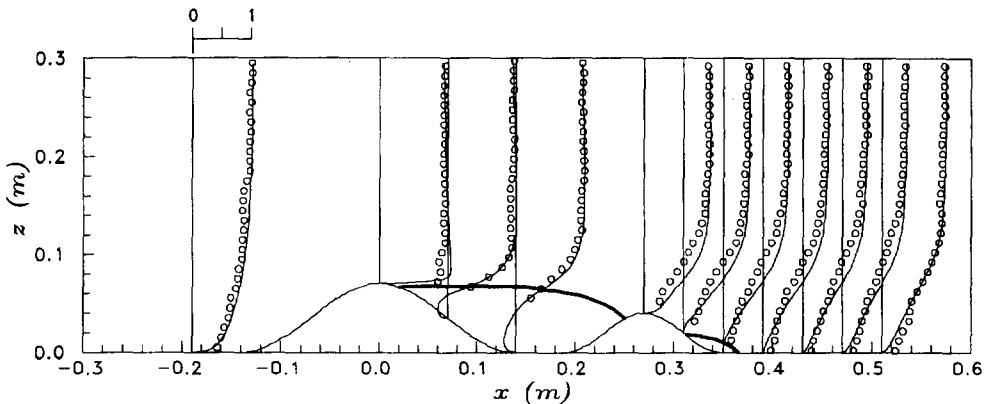
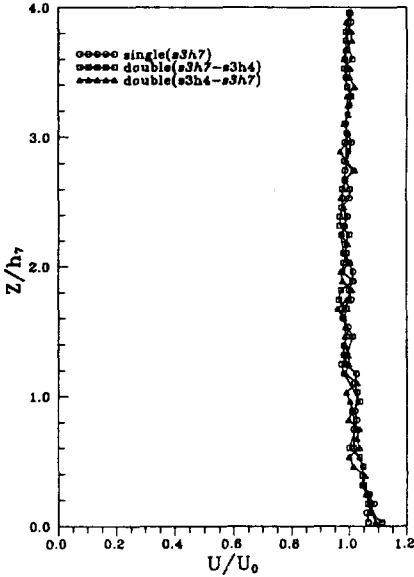
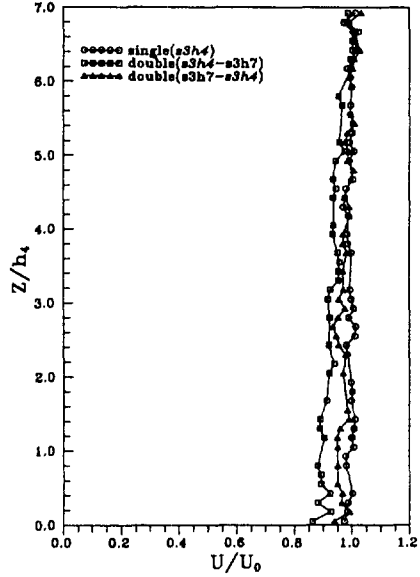


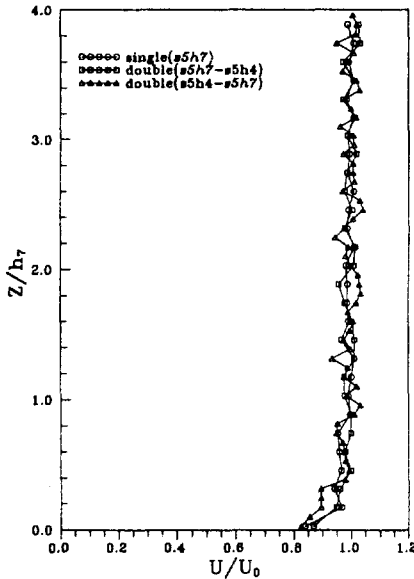
Fig. 19. Vertical profiles of mean horizontal velocity U/U_∞ over the double hill, S5H7-S5H4 (○, experimental data; —, numerical prediction).



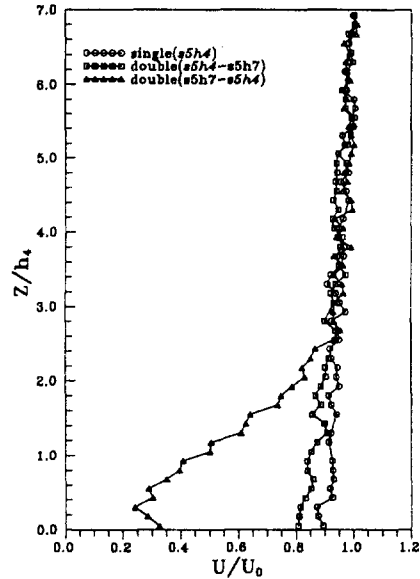
(a) S3H7



(b) S3H4



(c) S5H7



(d) S5H4

Fig. 20. Comparisons of the mean vertical-velocity profiles at the hill top.

변형되었음을 보여준다.

3. 4. 2 표면압력장

그림 21은 박리가 생기지 않는 2차원의 연속된 언덕

인 경우 언덕의 표면 압력분포로 실험과 수치해석 결과를 서로 비교하였다. 단독언덕의 표면 압력분포(그림 11)와 비교해 볼 때, 연속된 언덕 사이의 영역을 제외하고는 큰 차이가 없다. S3H4-S3H7, S3H7-S3H4 두

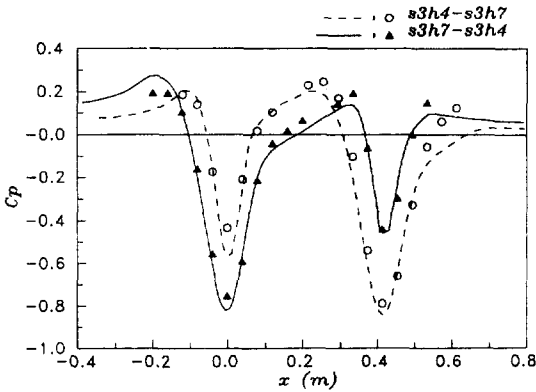


Fig. 21. Pressure distributions on the double hills, S3H4-S3H7 and S3H7-S3H4 (○, ▲ : experimental data; ---, - : numerical prediction).

경우 모두 표면 압력계수가 언덕정상에서 동일한 음의 절대값을 가지며 그 분포도 비슷하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 단독언덕 및 연속된 두개의 언덕 지형을 지나는 유동특성을 대기경계층 풍동에서 실험적으로 연구하였다. 본 연구는 언덕의 특성높이 H 를 기준 한 레이놀즈 수 (Re_H)가 2×10^4 에서 5.6×10^4 의 영역에서 수행되었으며, 사용된 2차원 언덕형상은 6가지의 단독언덕과 4가지의 두개의 연속된 언덕으로, 피토판과 X형 열선유속계를 사용하여 유동장을 측정하였고, 언덕의 표면 압력분포를 파악하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 2차원의 단독 및 두 개의 연속된 언덕을 지나는 유동에 대한 풍동실험 모사기법을 확립하였다.
2. 완만한 단독언덕을 지나 하류에서 평지유동의 교란되지 않은 경계층으로 다시 회복하기까지의 거리를 측정 한 결과 언덕끝단으로부터 언덕높이의 약 6배임을 확인하였다.
3. 2차원 연속된 언덕에서 하류에 낮은 언덕이 있는 경우 앞쪽 언덕정상에서의 속도분포에는 큰 영향을 주지 못했고, 뒤쪽에 높은 언덕이 있을 경우에는 앞쪽의 낮은 언덕 정상상의 유동에 영향을 크게 미쳤다.
4. 본 연구는 김현구와 경남호(1994)가 개발한 수치 계산법이 유동박리가 발생하지 않는 경우에는 상

당한 신뢰성이 있음을 확인하였다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터의 하나인 포항공과대학교 부설 첨단유체공학연구센터 (AFERC) 와 한국에너지기술연구소 (KIER)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

경남호, 김영성, 손재익 (1992) 복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 풍동실험: I. 산지에서의 확산, 한국대기보전학회지, 8, 169-178.

김영성, 경남호 (1995) 복잡한 지형내 오염물질의 대기 확산 풍동실험: II. 산지지형 실험의 Gaussian 모델링, 한국대기보전학회지, 11, 145-152.

김현구, 경남호 (1994) Numerical analysis of the flow over a hill, AFERC Report AFR-93-G02.

Almeida, G.P., D.F.G. Durão, and M.V. Heitor (1993) Wake flows behind two-dimensional model hills, Experimental Thermal and Fluid Science, 7, 87-101.

Arya, S.P.S., M.E. Capuano, and L.C. Fagen (1987) Some fluid modeling studies of flow and dispersion over two-dimensional low hills, Atmos. Environ., 21(4), 753-764.

Bergeles, G.(1985) Numerical calculation of turbulent flow around two-dimensional hills, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 21, 307-321.

Bowen, A.J. and D. Lindley (1977) A wind tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes, Boundary-Layer Meteorol., 12, 259-271.

Bowen, A.J.(1983) The prediction of mean wind speed above simple 2D hill shapes, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 15, 259-270.

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, 121-124.

- Bradshaw, P. (1973) *Effects of Streamline Curvature on Turbulent Flow*, Agardograph, 169pp.
- Bradshaw, P. and F.Y.F. Wong (1972) The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer, *J. Fluid Mech.*, 52, 113-135.
- Coleman, H.W. and G.W. Steele (1989) *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, John Wiley & Sons.
- Ferreira, A.D., M.C.G. Silva, D.X. Viegas, and A.G. Lopes (1991) Wind tunnel simulation of the flow around two-dimensional hills, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 38, 109-122.
- Glekas, J., G. Bergeles and N. Athanassiadis (1987) Numerical solution of the transport equation for passive contaminants in three-dimensional complex terrain, *Int. J. Numerical methods in fluids*, 7, 319-335.
- Jackson, P.S. and J.C.R. Hunt (1975) Turbulent flow over a low hill, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 101, 929-955.
- Langston, L.S. and M.T. Boyle (1982) A new surface-streamline flow-visualization technique, *J. Fluid Mech.*, 125, 53-57.
- Mason, P.J. and R.I. Sykes (1979) Flow over an isolated hill of moderate slope, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 105, 383-395.
- Mulhearn, P.J. and J.J. Finnigan (1978) Turbulent flow over a very rough, random surface, *Boundary-Layer Meteorol.*, 15, 109-132.
- Pearse, J.R. (1982) Wind flow over conical hills in a simulated atmospheric boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 10, 303-313.
- Raupach, M.R. (1980) A wind tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces, *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, 373-397.
- Raupach, M.R. (1981) Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, 108, 363-382.
- Siegel, R. (1976) Three-dimensional potential flow over hills and oval mounds, NASA Tech. Note TN D-8375.
- Wark, K., and C.F. Warner (1976) *Air Pollution: Its Origin and Control*, Harper & Row Publishers, 69-149pp.