

지형과 지표효과를 고려한 나로 우주센터의 국지규모 바람장 수치모의

윤지원 · 민경덕*

경북대학교 천문대기과학과, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지

Numerical Simulations of Local Wind Field at the Naro Space Center by MUKLIMO with Terrain and Surface Effects*

Ji-Won Yoon and Kyung-Duck Min*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University,
Daegu 702-701, Korea

Abstract: Microscale wind fields were simulated by MUKLIMO at the Naro Space Center, where complicated mountainous terrain and trees exist. In order to test the model's sensitivity with the effects of terrain and trees, experimental simulations were conducted under the various initial conditions. The experiments showed that the effects of trees were more significant on flat surfaces than on mountain cliffs. Based on the results, an actual 10 m level microscale wind field was simulated at the Naro Space Center, which has complicated mountainous terrain. Simulations of wind fields before and after the construction of the launching site were also conducted. It was found that MUKLIMO was successful in representing the microscale wind field at complicated mountainous terrain and finding characteristic features of the mesoscale wind fields at the Naro Space Center.

Keywords: Microscale Urban Climate Model, microscale wind field, numerical simulation, Naro Space Center

요약: 복잡한 산악지형과 숲이 있는 나로 우주센터의 미규모 바람장을 MUKLIMO를 사용하여 모의하였다. 지형과 나무가 있을 때 모델의 민감도를 실험하기 위하여 각종 초기조건하에 수치모의를 수행하였다. 실험결과 나무는 평지 위에서는 큰 영향을 미치나 언덕지형에서는 큰 영향을 미치지 못함을 알았다. 이러한 실험결과를 이용하여 나로 우주센터의 10 m 상공에서의 미규모 바람장과 또, 발사장의 건설전후의 바람장도 모의하였다. 본 연구결과 MUKLIMO는 복잡한 지형에서도 바람장의 수치모의가 가능하며 매우 유용함을 알았고 우주센터에서의 바람의 특성이 규명되었다.

주요어: 무클리모(미규모 도시기후 모델), 미규모 바람장, 수치모의, 나로 우주센터

서론

기상현상의 수치 모의 연구는 그간 대규모 현상, 즉 대기대순환의 모의, 기후 변화의 모의와 중규모 기상현상의 모의는 많이 이루어져 왔으나, 미규모 현상의 모의 연구는 상대적으로 부족한 형편이다. 그러나 최근 중규모 현상의 중요성과 더불어 미규모 현상의 모의 연구도 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

대기 대순환 모델과 중규모 모델은 그 격자간격이 수~수십 km 이상으로 미규모에 비해 그 규모가 매우 크므로 지형이나 도시 건물 등의 미세한 영향을 분석하기 어렵다. 따라서 이러한 대순환 모델과 중규모 모델을 이용한 국지기상 모의 연구는 매우 제한되어 있으므로 미규모 모델에 의한 연구의 필요성이 대두되었다(민경덕 외, 2002).

복잡한 지형에서 진단적 비발산 3차원 바람장의 모의 연구는 Sherman(1978)에 의해 시도되었으나 격자간격이 5km로 매우 크므로 지형과 지물에 의한 영향이 올바르게 모의되지 못했으며, Hjelmfelt(1982)는 지형이 비교적 낮고 완만한 언덕인 St. Louis 지역의

*Corresponding author: minkd@knu.ac.kr
Tel: +82-53-950-6361
Fax: +82-53-950-6359

바람장을 모의하여 도시의 바람장을 모의한 바 있다. Sievers and Zdunkowski(1986)는 도시 캐노피층을 정밀하게 분해하고 난류교환계수를 결정함에 있어 혼합 길이를 이용하여 2차원 바람장을 계산하였으며, 난류 모수화를 시도함으로써 계산시간도 크게 감소하는 개가를 올렸다. 또한, Ross et al.(1988)은 복잡한 지형을 위한 진단적 바람장 모델의 확장과 실험을 하였고, Segal et al.(1988)은 지형에 의해 유도되는 국지규모의 순환은 식생 분포를 고려했을 때 더 약화됨을 보이므로써 지형과 지표효과가 바람장에 미치는 영향을 평가하였다. 그 후 Sievers(1995)가 2차원 바람장을 3차원으로 확장하여 미세규모 바람장과 오염 확산을 모의하였다. 한편 우리나라에서는 박영연과 이태영(1990), 김병곤(1993)이 수도권과 한반도 지역의 지형효과를 고려한 바람장 산출에 대한 연구를 시작하였고, 이승우와 이동규(1998)는 3차원 중규모 모델을 이용하여 지형과 지표 특성을 고려한 국지규모 순환의 특성을 살펴본 바 있으나 이러한 기존의 많은 연구는 모델의 분해능이 수 km였으므로 지형과 지물의 효과가 잘 모의되지 못하였다.

한편, Baik and Kim(1999)과 Baik et al.(2000)은 도시 협곡에서의 바람장과 오염물질의 전파특성을 수치모의하고 실험모델을 개발하였다. 최근 분해능은 더욱 커지고 있으며, 임영권 외(2000)는 지형효과와 토지 이용도를 이용한 3차원 바람장을 수백 m의 해상도로 모의 한 바 있으나 수백 m 해상도의 국지규모 순환에서는 복잡한 지형의 미세규모 순환의 특성을 상세히 밝히는 데는 부족함이 있었다. 그 후 부경은 외(2000)가 수십 m의 고해상도 모델을 이용하여 여의도 지역의 바람장을 수목공원 조성효과를 고려하여 실험하였으며, 이에 의한 미규모의 3차원 바람장 변화와 오염확산을 연구한 바 있다. 근년에는 지형과 지표특성에 의한 국지순환 연구가 이루어져 국지순환에 미치는 지형 효과의 연구가 많은 진전을 이루었다(김상윤과 민경덕, 2001). 안광득(2002)과 안광득 외(2003)는 이를 확장하여 대구, 서울, 부산 월드컵 경기장 주변 및 하계유니버시아드 종목별 경기장들의 국지순환 모의를 10 m의 고해상도로 시도한 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 주로 건물을 고려한 바람장을 미세규모로 모의 연구하는데 그쳤으며 산악지형과 같은 복잡한 지형에서의 고해상도의 바람장을 밝히는 데에는 부족함이 있었다.

본 연구의 목적은 미규모 기후모델인 MUKLIMO

를 복잡한 산악지형에 적용하여, 복잡한 지형구조에서의 미규모 바람장을 고해상도로 모의하는데 있다. 그 대상지역으로는 복잡한 산악지형을 가지는 나로 우주센터를 선정하여 모의 실험을 하였으며, 또 지형의 변화에 따른 미규모 바람장의 변화를 모의하였다. 그리고 산악지역인 나로 우주센터에는 수목이 많이 존재하므로 이러한 모의를 위하여 본 모의 전에 MUKLIMO의 수목효과와 민감도를 실험하였다. 이로써 미규모 바람의 관측이 어려운 산악지역에서도 미규모 기후모델인 MUKLIMO를 이용하여 미규모 바람장을 모의하고 예측할 수 있게 되었다. 본 연구 결과는 앞으로 복잡한 지형과 지표에서 미규모 바람장을 이해하는데 기여하고 또, 도시기후 연구 등에 활용될 수 있을 것으로 사려된다.

바람장 수치실험

MUKLIMO 모델 및 계산 방법

본 연구에서 사용된 모델은 미규모 바람장 수치모델인 MUKLIMO(Micro scale Urban Climate Model)이다. 이 모델은 초기에 2차원 모델로 Sievers and Zunkowski(1986)에 의해서 제안되었다가 후에 Sievers(1995)가 유선향수 방법을 이용하여 3차원 바람장 모델로 개선한 것이다. 이 모델은 1~2 km내의 영역에서 지형효과, 건물효과, 거칠기 효과, 수목효과를 고려하여 수~수십 m 규모의 미세바람장을 계산할 수 있도록 설계된 진단 모델이다. 모델은 비발산, 비압축인 이상적인 중립대기를 가정하고, 대기 상태가 균질한 수평면 y 축 위에서 수평좌표 x 와 연직좌표 z 에 의존하는 변수들을 계산한다. 그리고 지표온도는 모델 영역의 모든 지역에서 동일하게 가정되고 건조단열감율을 이용한다. 이 모델에서는 바람장 계산을 위해 Bussinesq 근사에 의한 운동방정식을 사용하며, 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nabla \cdot \vec{J} = -\nabla p - (\rho_0 + \rho') + \nabla \Phi - 2\rho_0 \vec{\omega} \times \vec{V} \quad (1)$$

여기서 ρ_0 는 공기밀도의 평균성분, ρ' 는 편차, \vec{J} 는 레이놀즈 텐서(Reynolds tensor), p 는 기압, Φ 는 지오폠펜셜, $\vec{\omega}$ 는 지구의 자전 각속도이다.

위 방정식을 이용하여 비발산 조건을 만족하는 바람장을 계산할 때, 방정식을 풀기 위해서 좌표계를

변형시켜 기압성분 p 를 제거하고 방정식을 시간 적분하는 유선함수 방법을 사용한다.

유선함수 값 Ψ_1, Ψ_2 로부터 구한 u, v, w 는 아래와 같다(Sievers, 1995).

$$u = \frac{\partial \Psi_2}{\partial z}, v = -\frac{\partial \Psi_1}{\partial z}, w = \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서 유선함수는

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= -\int_0^z v(x, y, z') dz' \\ \Psi_2 &= -\int_0^z u(x, y, z') dz' \end{aligned} \quad (3)$$

이다.

한편, 식 (1)에서 해를 구하기 위한 레이놀즈 텐서 \vec{J} 의 발산은

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\rho_0 \nabla \times (K_M \nabla \times \vec{V}) = -\rho_0 \nabla \times K_M \zeta \quad (4)$$

으로 모수화된다. 여기서 K_M 은 난류 교환계수이며, 중립대기조건에서 혼합길이 이론에 의해 혼합길이와 연직 바람시어에 비례하는 양으로 정리된다. 이때 혼합길이 l 은 다음식으로 계산된다(Blackadar, 1962).

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_0} + \frac{1}{l_\infty} \quad (5)$$

여기서 l_0 은 모델 각층의 고도이고, l_∞ 는 모델 상부 한계에서의 혼합길이 값으로, Wu(1965)에 의해 중립대기에서 30 m의 값을 가진다. 하부 경계조건으로는 지면에서 $\Psi_1 = 0, \Psi_2 = 0$ 경계조건을 적용하며, 상부 경계는 상부 경계에서 초기치와의 차이를 최소로 하는 혼합 상부 경계조건을 적용한다.

→ 수목이 있는 경우에는 (1)식의 우변에 감속항($-c_b \rho V|V|$)이 더해져 풍속이 감속되도록 구성되어 있다. 여기서 c_b 는 항력계수로서 0.2로 주어지며 b 는 잎면적 밀도($m^2 m^{-3}$), ρ 는 공기 밀도이다(Sievers and Zdankowski, 1986). 수목 있는 경우에는 혼합길이도 달라지므로 교환계수에 영향을 주어 바람장이 감속된다.

수목효과의 민감도 수치 실험

미규모의 바람장은 건물과 식생에 의해 영향을 받아 변화된다. 건물에 의한 바람장 변화와 건물 주변의 바람장 모의에 대한 실험은 기상연구소(1994, 1995)에 의해 수행된 바 있다. 그리고 안광득(2002)

과 안광득 외(2003)는 임은하 외(1996)가 기상연구소의 k-ε 모델로 실험했던 것과 유사한 실험을 MUKLIMO를 이용하여 수행하여 MUKLIMO의 단일 건물 효과에 의한 바람장이 잘 모의되고 있음을 검증하였다.

식생에 의한 바람장 변화의 연구는 부경은 외(2000)가 여의도 지역의 수목공원 조성 전과 후의 바람장 변화를 수치 실험한 바 있다. 본 연구에서는 복잡한 산악지형의 수목이 존재하는 실험대상지역의 실제 모델 수행에 앞서 수목만을 고려한 바람장의 변화와 지형과 수목을 동시에 고려한 바람장의 변화에 대한 본 모델의 민감도 실험을 하였다. 따라서 모델의 민감도 실험은 크게 두 가지로 나누어 실험하였으며 하나는 수목만의 영향을 보았고, 다른 하나는 작은 산의 형태를 가지는 지형과 그 위의 수목을 동시에 고려한 경우의 바람장 변화를 실험하였다.

평지 위의 수목효과: 평지 위에 수목만이 있을 때 바람의 변화를 고찰하기 위하여 모델의 격자 구성은 거칠기가 0.0 m일 때 수목에 의한 바람장 변화 거리를 고려하여 4m 간격으로 280×30격자(1120m×120m)로 구성하였고, 연직 방향으로는 2m 간격, 25층(50m)으로 구성하였다. 모델 전체 영역의 x방향 1120m에서 수목들의 길이는 12m로 1.1%를 차지하고, y방향 120m에서 수목들의 폭은 16m로 13.3%를 차지하며 z방향으로 수목들의 높이는 15m로 30%를 차지한다. 모의 실험은 일면적 밀도의 변화, 초기바람의 변화, 지표 거칠기 길이, 그리고 수목의 유무에 따라 Table 1과 같이 구성하여 실시하였다. 그리고 모의 실험을 위한 모델의 초기 조건으로 바람은 10m 기준고도에서 각 모의 실험 풍속에 270° 풍향을 초기 입력값으로 선택하였으며, 초기 입력자료를 가지고 바람장을 계산할 때 적분 간격은 1초에 60분간 적분하였으며 Table 2에 나타내었다.

수목을 비롯한 식생은 자라는 환경과 계절에 따라 생장에 많은 차이가 있으며 같은 종류의 식생이라 하더라도 주변환경에 따라 생장의 차이가 많이 난다. 따라서 잎의 갯수 및 그 크기도 달라지게 되어 잎면적 밀도(leaf area density)도 또한 달라지게 되므로 바람의 변화에도 영향을 끼치게 된다. 여기서 잎면적 밀도는 식생의 단위 캐노피 부피당 평균 잎면적(Eagleson, 1978)으로 단위는 $m^2 m^{-3}$ 이다. 즉, 식생층의 부피를 구하고 그 안의 잎면적을 추정하여 단위

Table 1. Conditions for Experiments which have trees on the plane. Experiment A and B are conducted under various conditions

| Experiment | Leaf area density, Unit: $m^2 m^{-3}$ | Initial wind, Unit: ms^{-1} | Surface roughness-length Unit: m | Trees | |
|------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------|-----|
| A | 1 | - | 5 | NO | |
| | 2 | 0.1 | 5 | YES | |
| | 3 | 0.3 | 5 | YES | |
| B | 1 | 0.3 | 5 | 0.02 | YES |

Table 2. Initial conditions for Experiment A and B

| Remarks | Experiment conditions |
|------------------------|---|
| Domain | 1120 m × 120 m (280 × 30 grid), resolution 4 m 25 Layer (Total height: 50 m), resolution 2 m |
| Initial wind condition | Height: 10 m Wind direction: 270° Wind speed: $5ms^{-1}$ |
| Integration condition | Time interval: 1.0 sec Total integration time: 60 min Iteration max: 500 Stationary define: 0.01 |

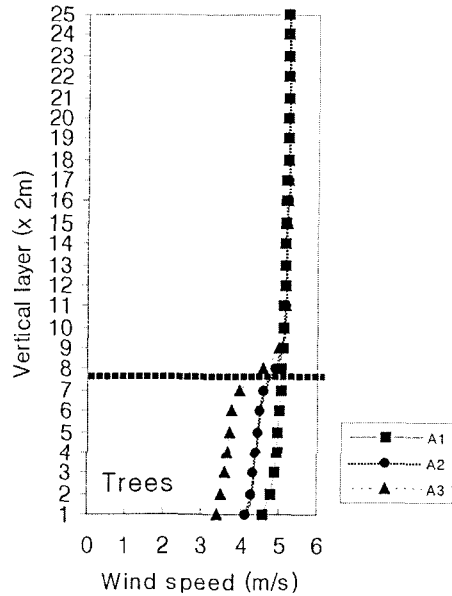
부피당 잎면적을 계산하면 된다.

Exp.A에서는 수목의 잎면적 밀도만을 고려한 바람장 변화를 보기 위해 거칠기를 0.0m로 주었을 때 잎면적 밀도에 따른 바람장의 민감도 실험을 하였다. 수목이 없을 때를 Exp.A1, 그리고 잎면적 밀도가 $0.1 m^2 m^{-3}$, $0.3 m^2 m^{-3}$ 일 때를 각각 A2, A3로 하여 수목이 존재하는 경우에는 잎면적 밀도가 3배가 되도록 실험하였다. 그리고 수목의 잎면적 밀도만에 의한 풍속의 연직 분포변화를 살펴보기 위해서 수목이 존재하는 격자점들의 풍속값 ($u^2 + v^2$)^{1/2}를 평균하여 계산하였고 이를 연직층별로 Fig. 1에 제시하였다.

수목이 존재하는 모델의 하층부에서 풍속의 감속 현상이 나타났으며 수목의 최상부의 윗부분에서는 풍속이 급격히 증가하였으며, 최상부에서 두 번째 층 이상에서는 초기풍속에 비해 변화가 거의 없었다.

수목에 의한 풍속의 감속정도를 좀더 확실히 보기 위해 수목이 존재하지 않을 때의 풍속값에서 수목이 존재할 때의 풍속값의 차이를 조사하였다. Exp.'A2-A1'은 잎면적 밀도값이 $0.1 m^2 m^{-3}$ 일 때 풍속의 감속량을 나타내었고, Exp.'A3-A1'은 $0.3 m^2 m^{-3}$ 일 때의 풍속의 감속량을 나타내었다.

수목이 존재하는 고도의 층까지 Exp.'A2-A1'에서는 평균 $0.53 ms^{-1}$ 정도 감속하였고, Exp.'A3-A1'의 경우에는 평균 $1.26 ms^{-1}$ 이 풍속이 감소하였다. 이는 수목이 고려되는 경우에는 MUKLIMO에서는 모델 방정

**Fig. 1.** Vertical distributions of wind speed (ms^{-1}) for Exp.A.

식 (1)의 우변에 감속항이 첨가되어 바람장을 감속시키고 또한 잎면적 밀도에 의해서 감소된 혼합길이 난류교환계수를 감소시키게 되어 주어진 바람장을 감속시키게 된다. 즉, 수목은 잎면적 밀도의 크기에 따라 바람장의 감속량은 달라지며 잎면적 밀도가 클수록 그 값은 커진다.

Exp.A와 Exp.B의 결과를 잎면적 밀도에 따른 풍속의 연직단면도를 $0.5 ms^{-1}$ 의 간격으로 등풍속선으로 나타내면 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 Exp.A1으로 수목이 존재하지 않을 때, (b), (c)는 각각 A2, A3로 잎면적 밀도가 $0.1 m^2 m^{-3}$, $0.3 m^2 m^{-3}$ 일 때의 그림이다. Fig. 2(a)와 비교하였을 때 (b), (c)에서는 수목에 의한 영향이 잘 나타나고 있으며 영향을 받는 바람장 변화의 범위는 풍하측으로 각각 1000 m, 928 m로 나타났다. 따라서 수목에 의해 바람장 변화의 영향을 받는 거리는 잎면적 밀도가 클수록 그 거리는 짧아

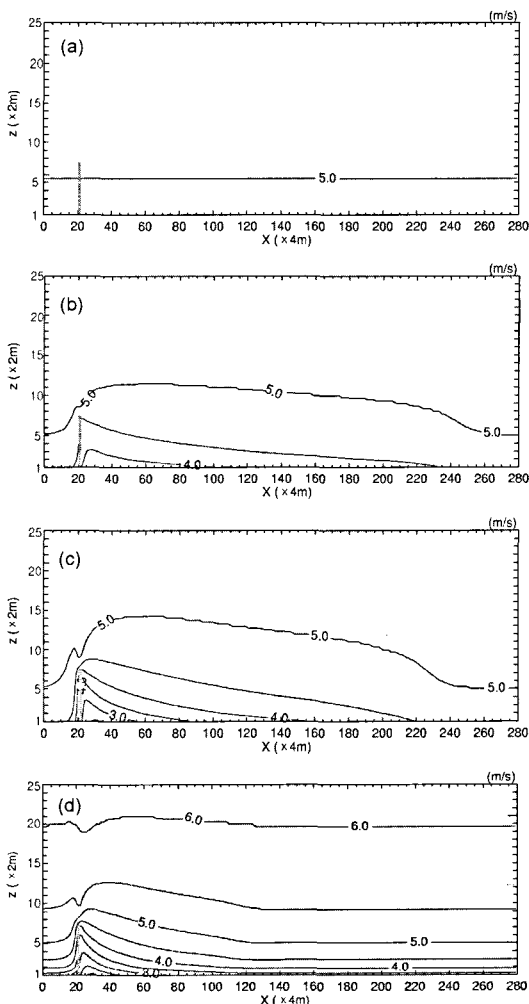


Fig. 2. Simulated vertical wind speed (ms^{-1}). (a) Exp.A1, (b) Exp.A2, (c) Exp.A3 and (d) Exp.B1, respectively.

진다. 실제 바람막이숲의 경우 그 효과는 바람막이숲의 종류에 따라 다르나 일반적으로 풍상측에서는 나무높이의 5~6배, 풍하측에서는 20~30배 거리까지 영향을 미친다.

따라서 실제 바람막이숲과 비슷한 조건을 만들어주기 위해 거칠기를 깎지 않은 잔디에 해당하는 0.02 m 를 주고 실험한 결과를 (d)에 나타내었다. 그 결과 수목의 풍상측에서는 바람장 변화의 범위가 나무높이 15 m 의 약 28배, 풍하측에서는 약 5배로 나타나 수목에 의한 바람장 변화가 잘 모의됨을 알 수 있다.

Exp.A1, A2의 결과로서 앞면적 밀도를 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 로 하고 초기 풍속을 달리하여 그에 따른 풍속값을 수목이 존재하는 격자점에서 $(u^2 + v^2)^{1/2}$ 를 평균하여 그

값을 연직층별로 조사하여 그림은 생략하고 그 결과만 제시하였다. 그 결과 초기 풍속이 강할수록 수목층 내에서 풍속의 분포가 강하게 나타났다. 또한, 수목에 의한 풍속 감속정도를 살펴보기 위해 동일한 초기 풍속에서 각각 수목이 존재하는 경우에서 존재하지 않는 경우의 값을 빼 값의 크기를 조사하였다. 그 결과 전체 수목이 존재하는 층 내에서의 평균 풍속의 감속량은 풍속이 2.5 ms^{-1} 일 경우 약 0.26 ms^{-1} , 5 ms^{-1} 일 경우는 약 0.52 ms^{-1} , 10 ms^{-1} 일 경우는 약 1.04 ms^{-1} 로 나타났으며 이는 초기 풍속에 크기에 비례함을 알 수 있다. 그리고 수목이 존재하는 층에서 최대 풍속의 감속을 보인 층은 실험 모두 네 번째 층, 즉 수목 높이의 중간부분에서 나타났으며, 그 풍속의 감속량은 수목의 최하층과 최상층의 풍속 감속량의 약 8~9% 더 크게 나타났다.

지형 위의 수목효과: 작은 산과 같은 형태를 가지는 지형 위에 수목이 있는 경우 모델에서 바람장의 수목에 의한 민감도를 실험하였다. 본 실험에서 수평 방향 격자의 크기는 실험 (가)와 동일하게 하였고, 4 m 간격으로 70×30 격자($280 \text{ m} \times 120 \text{ m}$)로 구성하였고, 연직 방향도 평지 위의 수목 효과 실험과 같이 2 m 간격으로 구성하였다. 모델 전체 영역 x방향 280 m 에서 지형의 지면에서의 길이는 40 m 로 14%를 차지하고, y방향 120 m 에서 지형의 폭은 32 m 로 37%를 차지하며, z방향으로 지형의 최고 높이는 20 m 로 50 m 에서 20%를 차지한다. 모의 실험은 지표 거칠기를 모두 초지에 해당하는 0.1 m 를 초기 입력하고, Table 3과 같이 구성하여 실시하였는데 지형의 높이에 따라 수목이 존재하지 않는 경우와 앞면적 밀도를 각각 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$, $0.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 로 하여 실험하였다. 그리고 모의 실험을 위한 모델의 초기 조건으로 바람은 10 m 기준고도에서 5 ms^{-1} 풍속에 270° 풍향을 초기 입력값으로 선택하였고 수목의 높이는 10 m 이며, 초기 입력자료를 가지고 바람장을 계산할 때 적분 간격은 1초에 60분간 적분하였으며 Table 4에 나타내었다.

Exp.C1의 결과는 Fig. 3(a), Exp.C2는 (b), Exp.C3는 (c)에 그 결과를 나타내었으며, 각각 수목이 없는 경우, $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$, $0.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 의 앞면적 밀도를 가지는 경우의 연직 바람장을 나타내는 그림이다. 그 결과 지형 위에서는 수목의 유무에 상관없이 연직 바람장은 매우 유사하게 나타났다. 이러한 지형과 수목에

Table 3. Summary of various condition for Experiment which have trees on the terrain. Experiment C, D and E are conducted under various conditions

| Experiment | Leaf area density, Unit: $m^2 m^{-3}$ | Initial wind, Unit: ms^{-1} | Terrain | Height of Terrain, Unit: m | Trees | |
|------------|--|-------------------------------|---------|-------------------------------|-------|-----|
| C | 1 | - | 5 | YES | 10 | NO |
| | 2 | 0.1 | 5 | YES | 10 | YES |
| | 3 | 0.6 | 5 | YES | 10 | YES |
| D | 1 | - | 5 | YES | 20 | NO |
| | 2 | 0.1 | 5 | YES | 20 | YES |
| | 3 | 0.6 | 5 | YES | 20 | YES |
| E | 1 | - | 5 | NO | - | NO |
| | 2 | 0.1 | 5 | NO | - | YES |
| | 3 | 0.6 | 5 | NO | - | YES |

Table 4. Summary of initial conditions for Experiment C, D and E

| Remarks | Exeriment condition |
|------------------------|---|
| Domain | 280 m×120 m (70×30 grid) 25 Layer (Total height: 50 m) |
| Roughness length | 0.1 m |
| Trees | Height: 10 m |
| Initial wind condition | Height: 10 m Wind direction: 270° Wind speed: 5 ms^{-1} |

의해 영향을 받는 연직 바람장을 정량적으로 살펴보기 위해 Exp.C에 대한 연직 바람장을 0.5 ms^{-1} 간격의 등풍속선으로 값을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 (b)는 매우 유사하며, 앞면적 밀도값이 0.6 $m^2 m^{-3}$ 으로 상당히 높은 (c)의 경우에는 (a)와 (b)와 비교하였을 때 풍하측에서 바람장의 변화가 나타났다. 즉, 바람이 풍하측에서는 지형에 의한 효과가 수목 효과보다 더 크게 나타났고 산꼭대기에서는 평지이므로 수목 효과가 풍하측에서 보다는 그 영향이 조금 더 크게 나타났다. 이러한 수목의 영향을 자세히 살펴보기 위해서 수평 바람장을 나타내었다.

Exp.C1, C2, C3의 결과로써 고도 4 m 높이에서의 수평 바람장을 조사하고, 고도 12 m 높이에서의 수평 바람장을 Fig. 5에 나타내었다. 4 m 고도에서의 수평 바람장은 수목의 유무와는 상관없이 모두 매우 유사하게 나타났다. 이는 수목이 존재하지 않는 경우와 비교하였을 때 지형에 의한 영향이 더 크게 나타났기 때문이다. 산꼭대기의 바로 윗층인 12 m 고도에서의 수평 바람장은 지형의 꼭대기 부분에서 약간의 차이가 나타났는데 3.5 ms^{-1} 이하의 풍속이 나타나는 부분이 Fig. 5(b)의 경우 Fig. 5(a)에 비해 약간 넓어

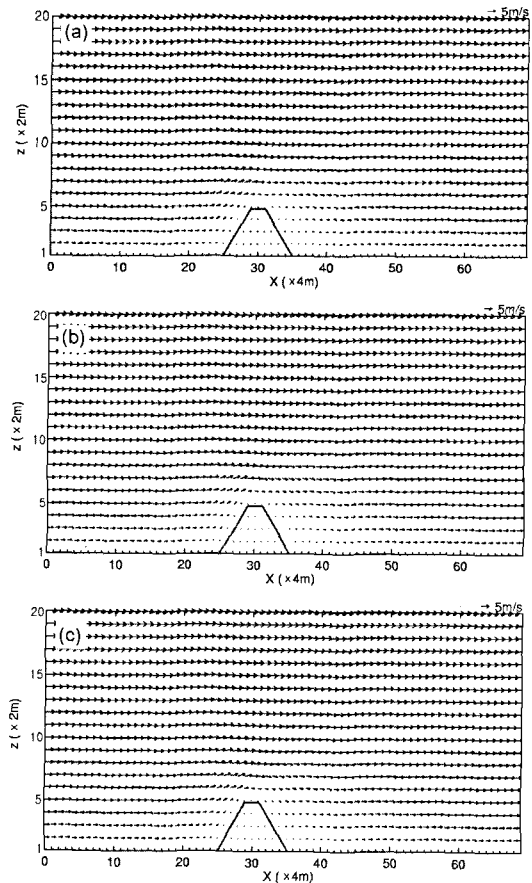


Fig. 3. Simulated vertical wind vector. (a) Exp.C1, (b) Exp.C2 and (c) Exp.C3, respectively.

졌음을 알 수 있고 앞면적 밀도가 높을수록 그 범위가 더 넓어졌다. 정량적으로 나타내면 산꼭대기에서의 수평 바람장의 평균은 Fig. 5(a)의 경우에는 약 3.7 ms^{-1} , (b)의 경우에는 약 3.6 ms^{-1} , (c)의 경우에는

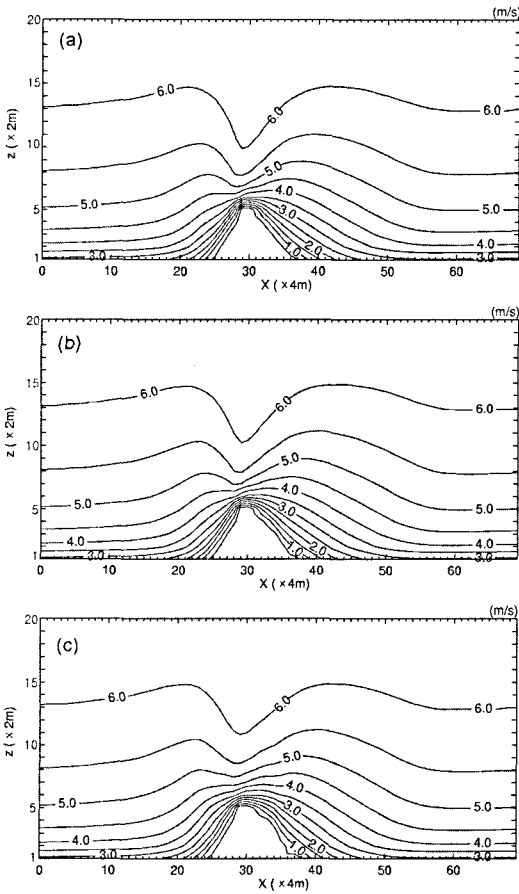


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for contour of wind speed.

약 3.3 ms^{-1} 로 나타났다. 지형이 존재하지 않을 때 같은 고도에서의 평균 풍속은 약 5.2 ms^{-1} 로 나타났으므로 지형에 의한 풍속의 감속량은 (a)의 경우 1.5 ms^{-1} 이다. 따라서 수목만의 영향으로 인한 풍속의 감속량은 (b)의 경우에는 0.1 ms^{-1} , (c)의 경우에는 0.4 ms^{-1} 로 나타났다. 따라서 산과 같이 기울기가 있는 형태의 지형일 경우에 지형에 의한 풍속의 감속량이 수목에 의한 풍속 감속량보다 훨씬 큼을 알 수 있다.

Exp.D는 Exp.C와 모든 조건은 동일하고 산의 높이만 2배 높였을 때의 실험이다. 산꼭대기의 2m 위에서부터 2m 간격으로 5개의 연직층별로 풍속을 구하여 수목이 있을 때와 없을 때의 풍속의 비율을 조사하였다. 산의 높이가 10m이고 앞면적 밀도가 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 일 때 수목에 의해 풍속이 감속되는 비율은 Exp.'C2/C1', 산의 높이가 10m이고 앞면적 밀도가 $0.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 일 때 Exp.'C3/C1', 산의 높이가 20m이고 앞면적 밀도가 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 일 때 Exp.'D2/D1', 산의 높

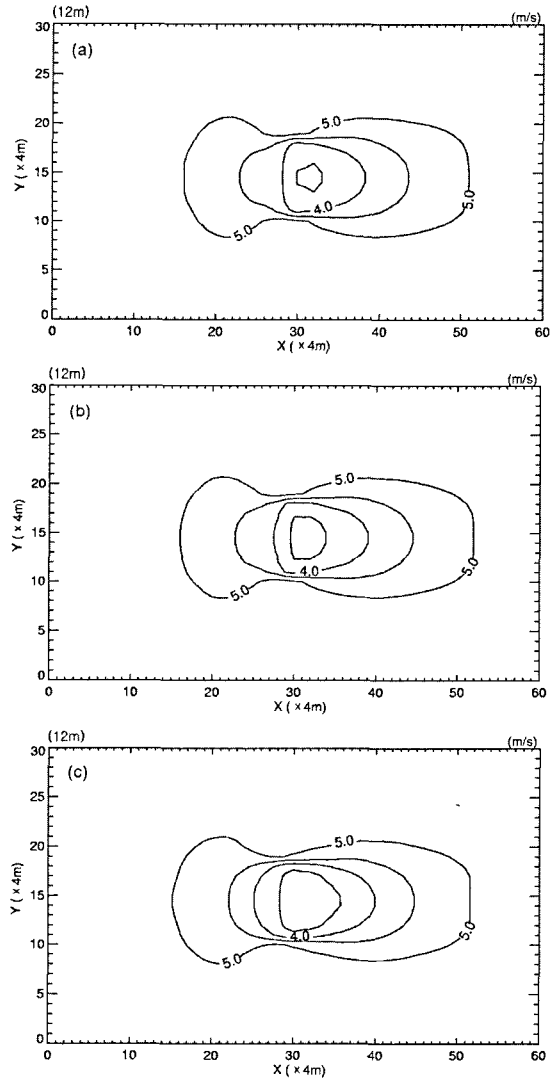


Fig. 5. Horizontal wind field at 12m level (a) Exp.C1, (b) Exp.C2 and (c) Exp.C3 respectively.

이가 20m이고 앞면적 밀도가 $0.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 일 때 Exp.'D3/D1'이라고 한다.

산의 높이가 10m의 경우인 Exp.'C2/C1'에서는 그 비율이 산꼭대기에서 2m씩 증가할 때마다 0.97, 0.98, 0.99, 0.99, 1.00으로 그 차이는 매우 작았으나 Exp.'C3/C1'에서는 0.85, 0.91, 0.94, 0.96, 0.98로 앞면적 밀도가 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ 일 때 비해서는 그 감속량이 크게 나타났다. 산의 높이가 20m 경우인 'D2/D1'과 'D3/D1'은 앞면적 밀도에 상관없이 산꼭대기에서는 풍속의 감속비율이 거의 1에 가깝게 나타났다. 따라서 지형의 정상 부분이 높아질수록 수목에 의한 풍

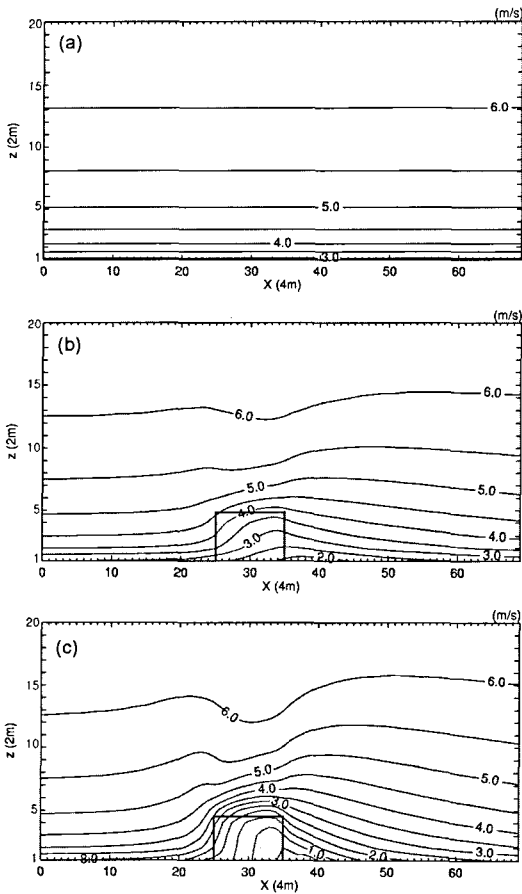


Fig. 6. Contour of vertical wind speed. (a) Exp.E1, (b) Exp.E2 and (c) Exp.E3, respectively.

속의 감속현상은 잘 나타나지 않으므로 본 모델에서는 바람장이 수목에 의한 영향보다 지형에 의한 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

Exp.E의 결과로써 Exp.C와 같은 면적에 같은 조건의 수목만이 존재할 때 평지에서 실험한 연직 바람장의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Exp.C에 비해 평지에서는 수목에 의한 풍속의 감속현상이 잘 나타나고 있는데 이것은 부경은 외(2002)는 여의도 지역의 바람장 수치 실험에서의 결과에서도 잘 나타났다. Fig. 6에서 수목이 존재하는 부분의 연직 바람장의 평균은 (a)의 경우 4.2 ms^{-1} 로 나타났는데 이것과 비교하였을 때 (b)의 경우에는 풍속의 감속량은 평균 0.9 ms^{-1} , (c)의 경우 평균 2.5 ms^{-1} 로 나타났다. Exp.E에서는 수목에 의한 풍속의 감속은 평지일 경우에 더 잘 나타나고 있으며 수목의 앞면적 밀도가 클수록 바람장의 변화도 더 크게 나타났다.

이상과 같이 MUKLIMO의 수목에 대한 초기 민감도 실험을 수행하였다. 나로 우주센터는 지형이 매우 복잡하고 섬의 대부분이 수목이 존재하는 지역으로 이러한 지역에서는 중규모 모델로는 상세히 분석하기는 어렵다. 따라서 이런 영향을 분석하기 위해 미규모 모델을 사용하였는데 실제 나로 우주센터로 확장하여 수치모의하기 전에 산과 같은 기울기와 고도가 있는 지형에서 수목은 어떠한 영향이 있는지에 대한 모델의 민감도 실험을 하였다. 그 결과 MUKLIMO에서는 평지일 경우에는 수목에 의한 바람장의 변화가 잘 나타나나, 산과 같은 형태의 지형 위에 수목이 존재하는 경우에는 평지의 경우보다 수목에 의한 바람장 변화가 작게 나타나는데, 이는 지형에 의한 풍속의 감속량이 수목에 의한 풍속 감속량 보다 훨씬 크기 때문이다.

본 실험에서 사용된 바람에 대한 Froud 수는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 값으로 약한 와도나 발산에 해당되는 값이며, 나로 우주센터 바람에서 바람의 분포를 중심으로 연구하고 지형에 따른 바람의 변화는 고찰하지 못하였다.

나로 우주센터의 바람장 수치 모의

실험 대상지역: MUKLIMO의 초기 자료 입력을 위해서는 고해상도의 지형자료와 지면 거칠기 자료, 수목 자료 등이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 산악지형으로 이러한 자료를 구하기가 용이한 우주센터 사업부지로 결정된 외나로도 지역을 선정하여 고해상도로 수치실험을 수행하였다. 나로 우주센터의 바람장 수치모의는 민경덕 외(2003)에 의해 수행된 바 있으나 본 연구에서는 지형과 지표효과를 더욱 정밀히 실험한 후 모의하였다.

외나로도에는 우리나라 전라남도 고흥군에 속한 남해안의 섬지역으로 해발고도는 약 380m이며 C자형의 분지형태를 지니고 있다. 모델의 영역 내에서 외나로도의 지형구조는 Fig. 7에 제시하였고 오른쪽 바는 m 단위의 해발고도를 나타낸다.

실험대상지역에서 □ 지역은 우주센터 발사장으로 107 m 고도로 지형을 절개한 부분이며 섬의 해안부근에 우주센터 건물들이 다소 들어서나 섬의 식생은 대부분 보존된다. 따라서 초기민감도 실험에서는 수목보다 지형에 의한 영향이 대부분 크게 나타났으나 보다 정확한 수치계산을 위해 섬의 식생분포도와 토지이용도를 참고하여 수목 및 거칠기를 초기 입력하였다. 섬의 식생은 소나무가 60.16%로 대부분을

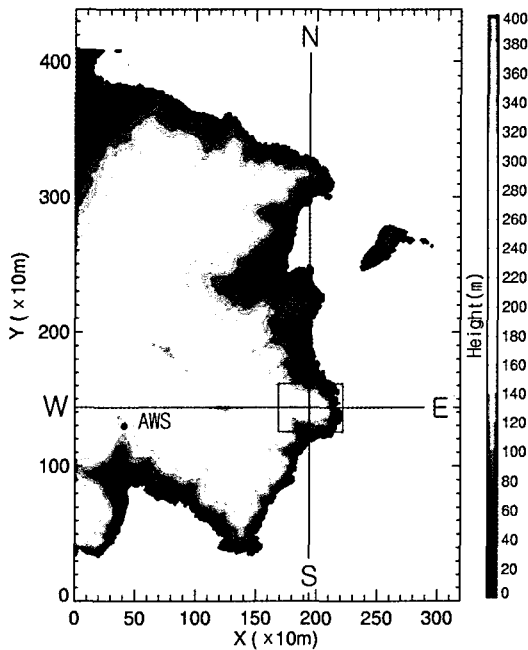


Fig. 7. Topography of the Naro Space Center. The area (□) represents the launching site and the lines W-E and S-N are used the vertical wind fields.

차지하고 있으며 구실잣밤나무, 상수리 나무 군락이 각각 약 12.05%, 10.05%로 이루어져 있고 곰솔나무 군락은 4.66%를 차지하고 있으며, 이들의 수목의 높이는 대부분 15~20 m이다.

바람장 모의 초기 조건: 모델의 영역은 3.2 km × 4.4 km의 영역으로 구성하였으며, 각 격자 간격은 10 m의 수평격자로 320 × 440 격자이다. 모델의 연직 층은 600 m의 32층으로 해면에서 420 m까지는 15 m 간격의 층으로, 420 m에서 500 m까지는 40 m 간격으로, 500 m에서 600 m까지는 50 m 간격으로 하여 산악지형에 의한 바람장의 변화를 자세히 볼 수 있도록 하였다.

본 모델은 고해상도 모델로 해상도에 비해 섬의 규모가 크고 건물들의 규모와 수가 매우 작으므로 건물들은 거칠기로 초기 입력하였다. Stull(1988)에 의해 uncut grass 지역은 0.02 m, 시가지는 0.2 m의 거칠기를 주고, 도로지역은 0.05 m 값을 주었으며 바다는 0.0005 m를 주었는데, 부경은 외(2000)의 실험에서 1 cm와 5 cm의 거칠기는 계산 결과 차이가 매우 근소하게 나타났다.

수목은 앞면적 밀도로 초기 입력되는데 모델에 초기 입력될 앞면적 밀도는 2002년 8월 실제 현장답사를 통한 관측값과 임종환 외(2003)의 연구에서 2001년 7월 광릉수목원의 활엽수의 최대 앞면적 지수가 $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 인 것을 참고하여 본 연구에서는 활엽수림은 앞면적 지수를 $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 로, 침엽수림은 $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 로 두었으며 수목의 높이는 15 m로 입력하였다. 따라서 모델에 초기 입력될 앞면적 밀도는 활엽수림은 $2.27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, 침엽수림은 $3.33 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 을 입력하였다.

부경은 외(2000)는 실험대상지역내에 자동기상관측장비(AWS)를 설치하여 지역 대표풍의 값을 구하여 모델에 초기바람을 입력하였고, 안광득(2002)은 대기기상대의 바람자료를 이용하여 초기바람을 구하였다. 본 연구에서는 섬의 남단에 위치한 AWS의 바람자료를 이용하여 계절별 대표풍향과 풍속값을 구하여 그 값을 참조하여 모델에 초기 입력될 바람값을 선정하였다.

해발고도 128 m에 위치한 외나로도외의 자동 기상 관측장비의 2년(2001~2002년)간의 관측자료를 분석하여 계절별 대표 풍향과 풍속의 값을 구하였다. 외나로도외의 풍향 빈도수는 봄철, 가을철, 겨울철에는 주로 22.5° 의 풍향이 나타났으며, 여름철은 90° 의 풍향이 우세하게 나타났다. 이러한 대표 풍향시의 평균 풍속은 봄철은 22.5° 풍향에 5.2 ms^{-1} , 여름철은 90° 풍향에 4.5 ms^{-1} , 가을철에는 22.5° 풍향에 3.6 ms^{-1} , 겨울철은 22.5° 풍향에 3.9 ms^{-1} 이며 이들 풍속의 차는 $0.3 \sim 1.6 \text{ ms}^{-1}$ 로 나타났다. 외나로도외는 섬이 비교적 작으므로 관측값에서 바람의 일변화, 즉 해륙풍의 영향을 식별할 수 없어 해륙풍의 영향은 무시하였다. 본 실험에서는 외나로도외와 같이 규모가 큰 산악지형에서의 고해상도의 바람을 실험하여 이 지역에서 모델이 반응하는 바람장 특성과 경향성 변화를 보고자 하므로 관측값을 근거로 0° , 90° , 180° , 270° 로 4방위로 5 ms^{-1} 의 바람을 모델의 초기자료로 입력하였다.

바람장 수치 모의: 모델에 의한 모의 결과는 지형을 고려한 Terrain following으로 나타내기 위하여 u, v, w를 1 m 간격으로 연직 내삽하여 지형 위에서 10 m 상공의 수평바람장과 등풍속선을 각각 방위별로 Fig. 8에 나타내었으며, 50 m 상공의 수평바람장과 등풍속선의 그림은 생략하고 설명만 하였다.

각 방위별로 전체적으로 봤을 때 거칠기는 지표 풍속을 약화시키는 작용을 하므로 바다에서는 장애물

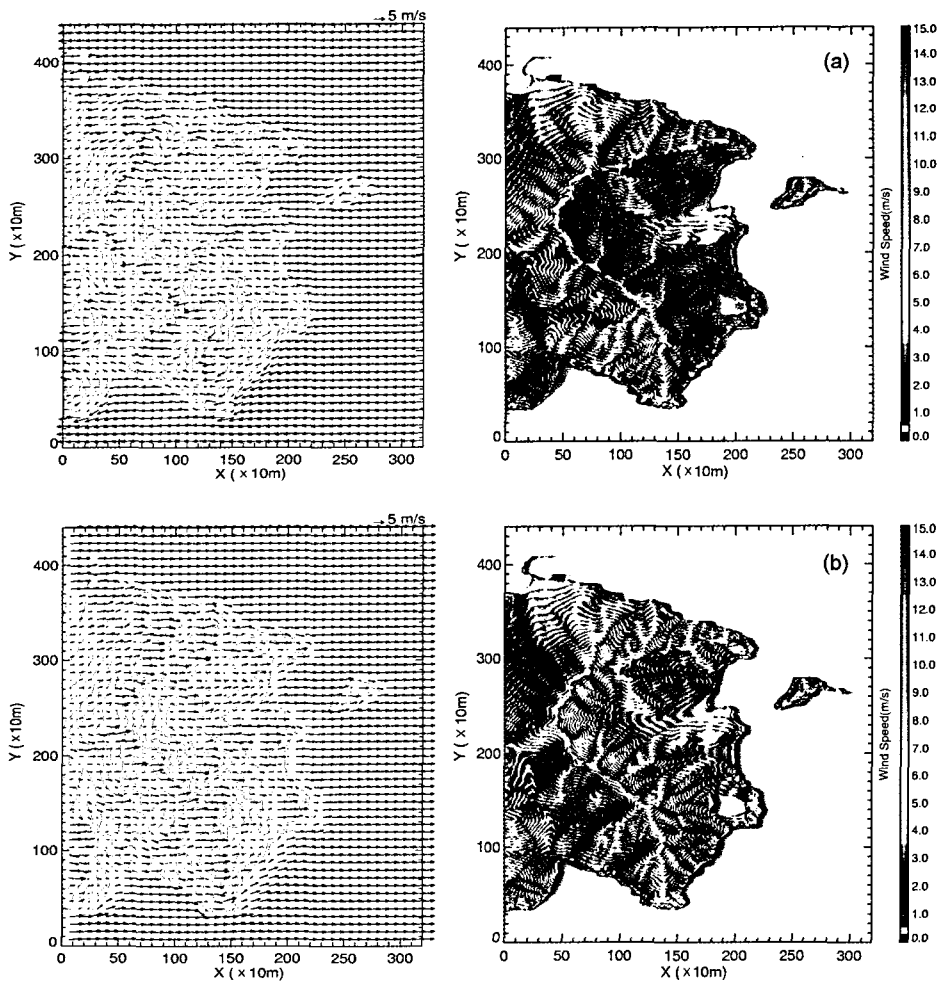


Fig. 8. Simulated wind fields over 10m at the Naro space center by terrain following method. Left panels represent the wind vector and right panels the wind speed contour. for (a) Easterly, (b) Westerly, (c) Northerly, (d) Southerly winds, respectively.

이 없고 거칠기가 매우 작으므로 지형에서 먼 지점일수록 지형의 영향을 적게 받아서 상대적으로 풍속이 강하게 나타났다. 또한 바람이 지형에 의해 돌아 들어가는 부분, 즉, 와동이 생기는 부분에서는 풍속이 강하게 나타났다. 그리고 산악지형은 바람을 변화시키는 가장 중요한 요소로서 산을 타고 상승한 바람은 산정상을 따라서 풍속이 강화된 것을 볼 수 있으며, 풍하측에서는 산등성이를 따라서 풍속의 강하게 나타났으나 대부분은 풍하측에서는 풍속이 매우 약화된다. 이것은 임영권 외(2000)의 서울지역의 지형 및 토지 이용도에 따른 3차원 바람장 산출에 관한 연구 결과와 동일하나 본 연구에서는 산악지형이 더 미세하게 모의되어 골과 능을 따라 흐르는 미세

바람의 형태도 나타났다. 지표층 가까이에서는 지표 응력(surface stress)이 일정하기 때문에 풍향은 이 지표응력에 평행하여 연직적으로 풍향의 변화는 없고 지표에 가까워질수록 풍속만 감소된다. 고도가 높아질수록 풍향은 모든 격자점에서 초기입력 풍향에 가까워지고 풍속은 강하게 나타났다.

동풍일 때 10 m 고도에서의 수평바람장과 등풍속선은 각각 Fig. 8(a)에 나타내었다. 바람벡터를 보면 산의 분지 부분에서는 산의 경사가 낮아 동풍이 그대로 수렴하다가 일부는 분지 남쪽의 골을 따라 올라가기도 하고 북쪽의 능을 돌아들기도 하며 일부는 그대로 산정상으로 부는 바람이 잘 나타나고 있다. 특히, 동풍일 경우에는 C자형 분지내부로 수렴되는

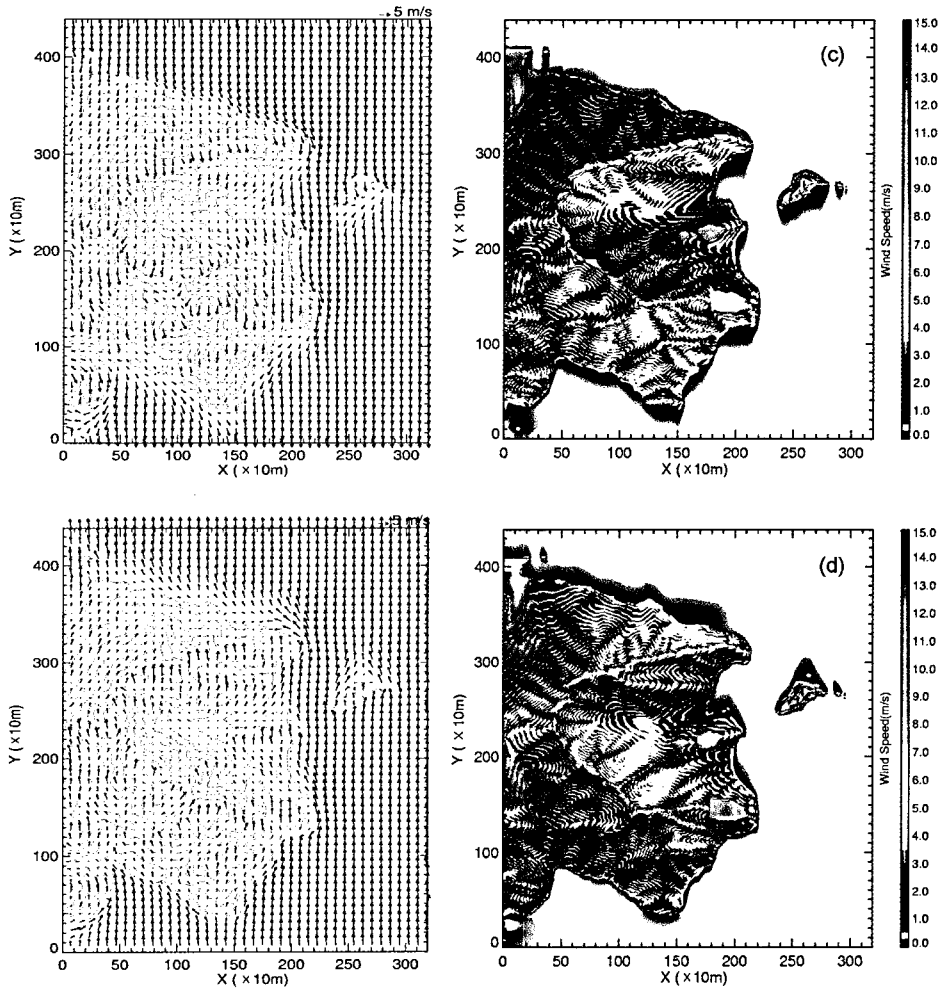


Fig. 8. Continued.

수평적인 바람이 나타나기 때문에 실제 이것은 바다로부터 온난 습윤한 공기가 분지 내로 수렴되어 지형에 의한 상승이 초래될 경우 악기상을 유발할 수도 있다. 발사장은 고도 107 m로 절개된 부분이므로 바다에서 발사장으로 올라오는 바람의 경우 발사장보다 낮은 고도 주위에서는 지형에 의해 북동풍, 남동풍으로 풍향이 바뀌다가 골을 따라 발사장 위로 불어오는 바람도 나타나며 발사장 위에서는 지형에 의한 풍향의 변화 없이 그대로 동풍이 나타나고 있다. 등풍속선의 그림을 보면 섬의 지형이 C자형 산맥구조로 C자형에 좌우로 작은 산등성이들이 연결되어 있어 풍향측에서는 산등성이를 따라 풍속이 강하게 나타났으며 그 외 부분에서는 풍속이 대부분 약하게 나타났다. 전체 산악지형에서 풍속이 가장 약한

부분에 비해 산정상엔 최대 약 20배, 평지인 발사장과 분지지역에서는 최대 약 10배 정도 강하게 나타났다. 고도 50 m에서는 산정상에 가까울수록 산의 경사가 높아 수평격자 10 m 간격 내에 산의 고도에 변화가 큰 부분이 존재하므로 이에 의한 풍향의 변화가 나타났으며, 산정상, 발사장과 분지에서는 10 m 고도에서보다 약 3~4 ms⁻¹ 강하게 나타났다.

서풍일 경우 10 m 고도에서의 수평바람장과 등풍속선은 Fig. 8(b)에 나타내었다 바람벡터를 보면 섬의 남단에서는 골을 따라 바다쪽으로 불어오는 바람과 섬의 남단에서 가장 서쪽 끝에 있는 지형에서 돌아드는 바람과의 수렴이 잘 나타나고 있고, 섬 남단의 섬을 돌아드는 바람은 발사장까지 그 영향을 미치고 있다. 등풍속선을 보면 절개된 발사장의 서쪽부

분에 해발고도가 가장 높은 산이 존재하여 산을 넘어오는 바람이 발사장의 동쪽 끝 부분에 많은 영향을 미치고 있고 상대적으로 발사장의 서쪽에서 약하게 나타나고 있다. 이것은 장애물을 넘은 바람의 영향이 미치는 거리와 장애물 후면에 생기는 공동구역과 관계가 있는 것으로 발사장의 서쪽 끝 부분의 풍속이 발사장 위에서 최대 풍속과 약 6.25 ms^{-1} 차이가 났다. 이 공동구역에서는 평균 풍속이 약하고, 난류가 강하며, 오염 물질들이 오래 머물고, 상대적으로 낮은 압력이 거의 일정하게 유지되는 지역으로 서풍의 경우에 발사장에서 이러한 공동영역이 나타났다. 50 m 고도의 수평 바람장의 경우 섬 남단에서 지형을 돌아드는 흐름에서 약 $230^{\circ}\sim 250^{\circ}$ 로 풍향의 변화가 나타났으나 대부분이 초기 입력풍속과 비슷하게 나타났으며, 풍속이 10 m 고도에 비해 강하게 나타났다.

북풍일 경우 10 m 고도에서의 수평바람장과 등풍속선을 각각 Fig. 8(c)에 나타내었다. 바람벡터를 보면 발사장의 지형은 돌출된 부분으로서 외동이 잘 형성되어 이 흐름과 섬 남단의 골에서 발산한 바람과의 수렴이 나타났다. 또한 북풍일 때 제일 처음 바람과 만나는 돌출된 지형부분에서는 역순환이 나타났다. 등풍속선도 C자형 산맥구조에서 풍상측을 넘어온 바람이 산정상에서 강해지고 곧이어 분지가 나타나므로 분지의 지표면 가까이에서는 풍속의 감속이 동풍이나 서풍에 비해 크게 나타났고 다시 산맥을 넘으면서 풍속이 강화되는 결과가 나타났다. 분지에서의 풍속은 최소 $0.25\sim 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 까지 나타났으며 분지를 지나 다시 산 능을 돌아드는 흐름에 의해 풍속은 최대 $3.5\sim 3.75 \text{ ms}^{-1}$ 로 다시 강화되어 나타났다. 발사장에서는 최소 풍속 $3.25\sim 3.5 \text{ ms}^{-1}$, 최대 풍속 $3.5\sim 3.75 \text{ ms}^{-1}$ 로 발사장에서는 미세바람의 풍속이 크게 차이가 나지 않았으며, 50 m 고도에서의 풍향을 보면 분지에서의 바람과 발사장을 돌아드는 바람, 섬 남단의 골에서 불어나오는 바람의 경우에는 10 m 고도에서의 수평 바람장의 경향과 비슷하게 나타났다. 50 m 고도에서는 분지에서는 최소 $1.5\sim 1.75 \text{ ms}^{-1}$ 로 나타나 10 m 고도에 비해 분지는 약 1.25 ms^{-1} 정도 풍속이 강해졌으나, 발사장에서 50 m 고도에서의 최소 풍속은 $8.75\sim 9.0 \text{ ms}^{-1}$ 로 나타났으며, 최대 풍속은 $9.25\sim 9.5 \text{ ms}^{-1}$ 로 나타났다.

남풍의 경우 10 m 고도에서의 수평바람장과 등풍속선은 각각 Fig. 8(d)에 나타내었다. 바람벡터를 보

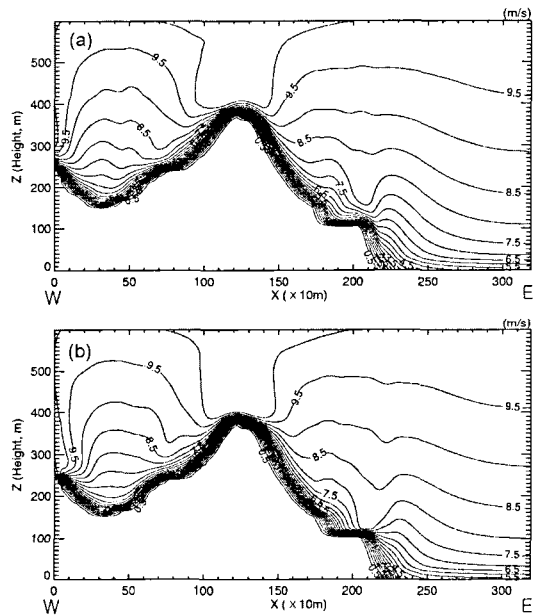


Fig. 9. Contour of wind speed along E-W cross section. (a) Easterly and (b) westerly wind, respectively.

면 섬의 북단의 돌출된 지형부분에서 풍향이 약 90° 로 나타나고 있다. 북풍과 마찬가지로 남풍에서도 발사장 부근에 지형의 영향으로 외동이 형성되었으며 골과 능을 따라 풍향의 변화가 잘 나타나고 있다. 분지에서의 풍속은 $0.25\sim 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 로 매우 약하게 나타났으며 산정상에서의 풍속은 강하게 나타나고 있다. 50 m 고도에서의 수평 바람장과 등풍속선은 북풍과 비슷한 양상으로 나타났다.

발사장을 중심으로 동풍과 서풍에 대한 E-W 연직단면의 풍속은 Fig. 9(a)와 (b)에 나타내었으며, 북풍과 남풍에 대한 S-N 연직단면의 풍속은 Fig. 10(a)와 (b)에 나타내었다. E-W 연직단면의 풍속에서는 발사장의 서쪽부분에 해발고도가 380m로 가장 높은 산이 존재하므로 발사장에 직접적인 영향을 미친다. 동풍의 경우에는 발사장 동쪽 끝 부분의 지상 10 m 부근에서 풍속이 약 2.54 ms^{-1} 로 나타났고 서풍의 경우에는 발사장의 동쪽 끝 부분에 지상 10 m 부근에서는 약 5.28 ms^{-1} 로 나타나 서풍의 경우 서쪽의 높은 산의 영향으로 발사장 동쪽 끝 부분의 풍속이 바다에서 불어올라오는 바람보다 약 2배 이상인 2.74 ms^{-1} 강하게 나타났다. 지상 50 m 부근에서는 서풍은 약 8.29 ms^{-1} , 동풍은 7.78 ms^{-1} 로 그 차이는 0.51 ms^{-1} 로 상공으로 갈수록 풍속의 차이는 작게 나타났다. 발사

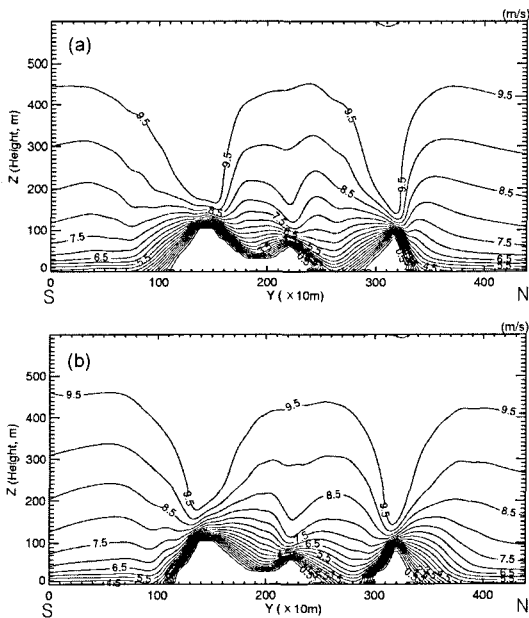


Fig. 10. Contour of wind speed along S-N cross section. (a) Northerly and (b) southerly wind, respectively.

장 중심에서 동풍일 경우 10 m 상공에서는 약 3.57 ms^{-1} , 서풍일 경우에는 약 4.14 ms^{-1} , 50 m 상공에서는 동풍일 경우에는 약 6.93 ms^{-1} , 서풍일 경우에는 약 7.03 ms^{-1} 로 나타났고, S-N 단면에서는 북풍일 경우 10 m 상공에서는 3.20 ms^{-1} , 남풍일 경우에는 2.55 ms^{-1} , 50 m 상공에서는 북풍일 경우에는 8.77 ms^{-1} 남풍일 경우에는 7.95 ms^{-1} 로 나타나 지상에서는 바다에서 바로 불어 들어오는 바람보다 산을 타고 오는 바람이 더 강하게 나타났으며 특히 서풍의 경우 가장 높은 산으로부터 불어 들어오기 때문에 발사장의 평균 풍속은 가장 크게 나타났다.

발사장 부분은 150 m 고도를 약 107 m 고도로 절개하여 만든 부분이므로 절개 전과 후의 지형의 변화에 따른 바람장은 변화한다. 따라서 Terrain following으로 10 m 고도 위의 바람장을 지형을 절개하기 전과 후를 모의하였으며, 그림은 생략하고 설명만 하였다.

동풍일 경우 발사장 부분을 절개한 전과 후에 모의한 결과는 절개전과 후가 전반적으로 풍향에는 큰 변화가 없고 풍속의 경우에는 산정상과 발사장에서의 풍속은 절개전과 후 모두 최대 풍속이 약 $4\sim 4.25 \text{ ms}^{-1}$ 로 비슷하게 나타났다. 절개한 후에는 같은 발사장 평지 위에서도 미세규모로 바람장을 모의하였을

때는 풍속이 다르게 나타났으며 최소 풍속은 약 $1.5\sim 1.75 \text{ ms}^{-1}$ 로 약하게 나타났다.

서풍일 경우도 절개 전에는 발사장 부지의 남쪽에는 골이 형성되어 있어 이 골에서 산을 넘어오던 서풍이 북서풍으로 바뀌면서 그대로 바다로 빠져나가고 이 바람은 지형에 의해 남서풍계열로 부는 바람과 수렴한다. 절개 전 발사장 부지의 산정상에서는 서풍이 그대로 나타났다. 절개후의 발사장 부지에서 가장 서쪽, 즉 서쪽의 경사면과 맞닿은 부분의 북쪽 부분과 남쪽부분에서는 각각 북풍과 남풍이 불고 중앙에서는 동풍으로 역풍이 나타났다. 이것은 장애물의 양쪽 모퉁이에서 와동이 형성되어 장애물 후면에서는 회전하면서 말려드는 상향와동(elevated vortex)의 일종으로 이 상향와동은 장애물 뒤편 꼭대기에 생긴 낮은 정체압에 의한 상승류와 장애물의 양 옆으로 돌아온 흐름이 건물 후방으로 말려들면서 갖게 되는 회전성분의 상호작용이다.

절개전후의 풍속을 비교해 보면 최대 풍속이 약 $6.25\sim 6.75 \text{ ms}^{-1}$ 인 부분이 절개 전에는 x격자 40, y격자 50 근처에 위치하였으나 절개한 후에는 x격자 45, y격자 50 근처에 나타나 절개한 후에 풍속의 강한 부분이 더 멀리까지 나타났다. 또한 절개 전에는 나타나지 않았지만 절개 후 발사장의 가장 서쪽부분에서 약 $0.25\sim 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 의 풍속이 매우 약한 부분이 나타났다. 이것은 절개면 부근으로 바람이 차단되기 때문이다.

북풍의 경우 발사장의 풍상측에서의 풍향 변화 경향은 절개 전 발사장의 풍하측에서 산의 서쪽부분의 골을 따라 내려오는 흐름이 나타나고 있고 이 흐름과 산정상 주위를 돌아드는 흐름이 풍하측에서 만나고 있다. 발사장 지형에 의한 와동으로 풍향이 남풍으로 변한 바람은 절개 전에는 80 m 고도까지 나타나고 있으나 절개 후에는 60 m 고도까지 나타나고 있다. 그리고 발사장 주위의 와동에 의한 풍속은 지형을 절개하기전의 최대 풍속은 약 $6.75\sim 7 \text{ ms}^{-1}$ 로 나타났고 절개 후의 같은 부분의 최대풍속도 약 $6.75\sim 7 \text{ ms}^{-1}$ 로 같게 나타났으나 최대풍속에 해당하는 부분이 절개한 후가 약 5배정도 넓게 나타났다. 이것은 장애물의 높이가 높을수록 장애물을 넘으려는 바람보다 장애물을 돌아갈려는 흐름이 강하기 때문이다. 그리고 절개한 후보다 절개 전이 풍하측에서의 풍속이 $0.25\sim 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 로 매우 약한 부분이 많이 존재하는데 이것도 지형의 특성 때문에 나타나는 것이다.

남풍의 경우 바람 변화의 경향을 절개 전과 후가 비슷하게 나타났다. 풍하측에서는 절개 전의 경우 약 하지만 능을 따라 돌아드는 흐름과 골을 따라 올라가는 흐름이 동풍에서 북동풍까지 존재하는데 이것은 산정상상의 강한 남풍과 약 120 m 고도에서 만난다. 절개 후에는 그러한 흐름이 약하게 나타나 대부분이 능선을 따라 남동풍으로 풍향이 바뀌어 나타난다. 풍속의 경우 절개 전의 경우 발사장 부지정상에서는 최대풍속 약 $5.0\sim 5.25\text{ ms}^{-1}$, 최소풍속 $3.75\sim 4\text{ ms}^{-1}$ 가 나타났고, 절개 후에는 절개된 풍상측 턱에서 최고 $4.25\sim 4.5\text{ ms}^{-1}$ 가 나타났으며 발사장 중심으로 갈수록 풍속이 약해져 중심에서는 $2.75\sim 3.0\text{ ms}^{-1}$ 로 풍속의 최소가 나타났다. 마찬가지로 와동에 의한 풍속은 절개 전이 절개 후보다 최대 풍속이 약 0.25 ms^{-1} 더 강하게 나타났다.

전반적으로 각 방위별로 절개 전과 후를 비교했을 때 풍상측보다 풍하측의 바람의 변화가 더 크게 나타났으며 와동에 의한 풍속도 변화하였다. 그리고 절개 전의 부지정상에서의 최대 풍속이 절개 후의 발사장에서의 최대 풍속보다 강하지만 절개 후의 발사장에서는 산정상보다 넓은 범위에 걸쳐 다소 강한 풍속이 나타났다.

본 연구는 우주센터가 위치할 외나로도 발사장에서의 임의 바람을 입력하여 모의한 결과이므로 실제 바람 값과의 비교는 할 수 없었다. 그러나 앞에서 지형과 지표 효과에 대한 실험 결과와 안광득(2002) 및 안광득 외(2003)에서 충분한 검증실험을 수행하였고 그 결과에 따라 모의 연구를 수행한 것이므로 풍향과 풍속의 변화에 대한 경향을 이해할 수 있었다.

앞으로 우주센터가 설립되고 바람의 관측이 수행되면 다시 한번 비교 검증의 연구가 필요할 것이며, 그 결과는 다른 지역에서의 바람장 모의 연구에 유용하게 사용될 수 있으리라 사려된다.

요약 및 결론

본 연구는 미규모 기후 모델인 MUKLIMO(Microscale Urban Climate Model)를 이용하여 복잡한 산악지형에서의 10 m 상공의 미세규모 바람장의 수치 모의를 시도하고 이를 검증한 것이다. 모의를 위한 대상 지역은 나로 우주센터 사업부지를 선정하였다. 바람장은 수목과 지형의 영향을 많이 받으므로 실제 실험 대상 영역에서의 모델의 수목 효과의 초기 민감도 실

험을 하였다. 민감도 실험의 결과 앞면적 밀도가 높을수록 바람의 영향을 미치는 거리는 짧게 나타났으며, 실제 바람막이 숲과 비슷한 조건을 주었을 때 바람장은 잘 모의되었다. 그리고 기울기가 있는 지형, 즉 작은 언덕이나 산과 비슷한 지형 위에 수목이 존재하는 경우에는 지형에 의한 바람의 변화가 더 커 수목에 의한 영향은 상대적으로 작게 나타났다. 그리고 앞면적 밀도가 높을수록 바람장의 변화는 커지나 지형에 의한 영향에 비해 매우 작게 나타났다. 즉 본 모델은 산악지형에서는 수목에 의한 영향보다 지형에 의한 영향이 매우 큼을 알았다. 따라서 이러한 민감도 실험을 기초로 실제 복잡한 산악지형인 실험대상 지역에서 바람장을 모의하였다.

지형과 수목, 거칠기를 고려하여 나로 우주센터의 건설 후를 고려하여 발사장의 지형을 절개하고 다시 수치 모의를 하였다. 그 결과 지상 근처에서의 나로 우주센터 발사장에서의 바람은 서풍의 경우 가장 강하게 나타났다. 이것은 발사장의 서쪽부분에 해발고도 380 m의 외나로도에서 최고높이의 산정상이 존재하기 때문으로 해석된다. 따라서 발사장 동쪽 끝부분은 5 ms^{-1} 로 입력하였을 때 풍속이 약 $6.5\sim 6.75\text{ ms}^{-1}$ 로 강하게 나타나므로 이 구역에서는 발사장의 제반 시설을 피하는 것이 좋을 것으로 사려된다. 그리고 바다에서 불어오는 바람보다 지형에 의해 부는 바람, 즉, 서풍과 북풍이 동풍과 남풍에 비해 풍속이 더 강하게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 지형에 변화를 주었을 때, 즉 발사장 부지를 절개하기 전과 발사장 부지 건설을 위해 절개한 후의 바람장을 확대하여 모의한 결과 절개전의 경우 지형을 따라 바람장이 잘 모의되었으며 절개후의 발사장은 평지일지라도 미세규모로 바람장을 모의하였을 때는 발사장의 구역마다 풍속이 다르게 나타남을 볼 수 있었다.

본 연구는 MUKLIMO를 이용하여 나로 우주센터 지역의 10 m 상공의 미세규모 바람장을 모의한 것으로 복잡한 산악지형에서도 미세규모 바람장의 모의도 가능함을 보여주고 있다. 그리고 이러한 나로 우주센터와 같이 바람의 영향이 매우 중요하고 관측이 어려운 지역일지라도 모의를 통하여 더욱더 정확한 미세규모 바람장 산출이 가능하게 되었다. 앞으로 실제 MM5와의 연동하면(안광득 외, 2003) 로켓 발사전후의 실시간 기상을 예보할 수 있는 즉, Rocketcasting(Kingwell et al., 1991)이 가능할 것으로 사려된다.

사 사

본 연구는 2002년도 항공우주연구원의 「우주센터 사업부지내 기상장 수치모의」의 연구일환으로 이루어졌으며 연구를 위해 많은 협조를 한 안광득님, 국방재업 그리고 경북대학교 대기과학 연구실의 대학원생들에게 감사드립니다.

참고 문헌

- 기상연구소, 1994, 바람 측정시 장애물의 영향에 관한 연구 (I), 기상연구소, MR94I-007. 116 p.
- 기상연구소, 1995, 바람 측정시 장애물의 영향에 관한 연구 (II), 기상연구소, MR 95H0-07. 65 p.
- 김병곤, 1993, 지상 관측자료를 이용한 3차원 바람장의 추정, 서울대학교 대학원 석사학위논문. 64 p.
- 김상윤, 민경덕, 2001, 지형과 지표특성이 여름철 대구지역의 국지순환과 기온변화에 미치는 영향. 한국기상학회지, 37 (5), 487-512.
- 민경덕, 김정우, 박순용, 이동규, 조희구, 2002, 대기과학의 연구동향과 전망. 한국학술단체연합회, 316-448.
- 민경덕, 김상윤, 윤지원, 장상금, 2003, 우주센터 사업부지내 기상장 수치모의. 과학기술부 보고서, 136 p.
- 박영연, 이태영, 1990, 서울에서의 겨울철 바람장에 관한 수치적 연구. 한국기상학회지, 26 (4), 247-262.
- 부경은, 전영신, 오성남, 2000, 여의도 지역의 바람장 수치실험. 한국기상학회지, 36 (3), 327-336.
- 안광득, 2002, 미세규모 기후모델을 이용한 대구 종합운동장 주변의 국지순환 모의. 경북대학교 대학원 석사학위논문, 63 p.
- 안광득, 이용희, 조천호, 민경덕, 2003, 미세규모 기후모델을 이용한 2002 월드컵 경기장 주변의 국지순환 모의. 한국기상학회지, 39 (5), 587-605.
- 이승우, 이동규, 1998, 수도권 지역에서 지표 및 지형 효과에 따른 국지규모 대기 순환의 수치실험. 한국기상학회지, 34 (1), 1-19.
- 임영권, 오성남, 윤원태, 전영신, 2000, 서울지역의 지형 및 토지 이용도에 따른 3차원 바람장 산출에 관한 연구. 한국기상학회지, 36 (2), 229-244.
- 임은하, 한종일, 엄원근, 1996, 유입류의 시어와 외관비가 빌딩 주위 바람장에 미치는 영향에 관한 3차원 수치실험. 한국기상학회지, 32 (2), 303-313.
- 임종환, 신준환, 김광백, 전정화, 오경수, 2003, 광릉활엽수 천연림의 산림식생구조, 입자환경 및 탄소저장량. 한국농림기상학회지, 5 (2), 101-109.
- Baik, J.-J. and J.-J., Kim, 1999, A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons. Journal of Applied Meteorology, 38 (11), 1576-1589.
- Baik, J.-J., Park, R.-S., Chun, H.-Y., and Kim, J.-J., 2000, A Laboratory Model of Urban Street-Canyon Flows. Journal of Applied Meteorology, 39 (9), 1592-1600.
- Blackadar, A. K., 1962, The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. Journal of Geophysical Research., 67, 3095-3102.
- Eagleson, P. S., 1978, Climate, soil and vegetation: introduction to water balance dynamics. Water Resources Research, 14, 705-712.
- Hjelmfelt R., 1982, Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-Layer airflow and vertical air motion: Simulations of urban vs non-urban effects. Journal of Applied Meteorology, 21 (9), 1239-1257.
- Kingwell, J., J. Shimitzu, K. Narita, H. Kawabata, and I. Shimidzu, 1991, Weather Factors Affecting Rocket Operations: A review and Case History. Bulletin of the American Meteorological Society, 72 (6), 778-793.
- Ross, D. G., I. N. Smith, P. C. Manins and D. G. Fox, 1988, Diagnostic wind field modeling for complex terrain: model development and testing. Journal of Applied Meteorology, 27, 785-796.
- Segal, M., R. Avissar, M. C. McCumber, R. A. Pielke, 1988, Evaluation of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulations. Journal of the Atmospheric Sciences, 45, 2268-2292.
- Sherman, C. A., 1978, A mass-consistent model for wind fields over complex terrain. Journal of Applied Meteorology, 17, 312-319.
- Sievers, U., and W. G. Zdunkowski, 1986, A microscale urban climate model. Beitr ge zur Physik der Atmosphere, 69 (1), 13-40.
- Sievers, U., 1995, Verallgemeinerung der Stromfunktion-smethode. Meteorologische Zeitschrift NF 4, 3-15.
- Stull, R. B., 1988, An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, 666 p.
- Wu, S. S., 1965, A study of heat transfer coefficient in the lowest 400 meters of the atmosphere. Journal of Geophysical Research, 70, 1801-1807.