

광릉 KoFlux 관측지 계곡에서의 국지 대기순환 수치모의

이승재^{1*} · 김 준^{1,2} · 강민석¹ · 빈드 말러 타쿠리³

¹국가농림기상센터, ²서울대학교 생태조경지역시스템공학부/협동과정 농림기상학전공

³연세대학교 대기과학과

(2014년 8월 28일 접수; 2014년 9월 25일 수정; 2014년 9월 29일 수락)

Numerical Simulation of Local Atmospheric Circulations in the Valley of Gwangneung KoFlux Sites

Seung-Jae Lee^{1*}, Joon Kim^{1,2}, Minseok Kang¹ and Bindu Malla-Thakuri³

¹National Center for AgroMeteorology,

²Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering,
Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University

³Department of Atmospheric Science, Yonsei University

(Received August 28, 2014; Revised September 25, 2014; Accepted September 29, 2014)

ABSTRACT

A 90-meter horizontal-resolution numerical model was configured to study the micrometeorological features of local winds in the valley of Gwangneung KoFlux (Korea Flux network) Sites during summer days (GDK: Gwangneung Deciduous forest site in Korea, GCK: Gwangneung Coniferous forest site in Korea). U. S. Geological Survey (USGS) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data were employed to generate high-resolution model terrain height. Model performance was evaluated by comparing observed and simulated near-surface temperature and wind. A detailed qualitative analysis of the model-simulated wind field was carried out for two selected cases which are a clear day (Case I) and a cloudy day (Case II). Observed winds exhibited that GDK and GCK, as well as Case I and Case II, hold differences in timing, duration and strength of daytime and nighttime wind direction and speeds. The model simulation results strongly support the existence of the drainage flow in the valley of the KoFlux tower sites. Overall, the simulated model fields realistically presented the diurnal cycle of local winds in and around the valley, including the morning drainage-upslope transition and the evening reversal of upslope wind. Also, they indicated the complexity of local wind interactions by presenting that daytime westerly winds in the valley were not always pure mountain wind. Rather, these were often coupled with larger-scale wind systems, such as synoptic-scale winds or mesoscale sea breezes blowing from the west coast of the peninsula.

Key words: Local circulation, Drainage flow, Mountain wind, Valley wind, Upslope wind, Downslope wind, Complex terrain, WRF model simulation, SRTM

I. 서 론

산림 생태계의 에너지와 물질의 순환을 올바로 이해

하기 위해서는 넓은 면적을 대표하는 타워 기반의 직접적인 플럭스 및 미기상학적 관측과 더불어 주변 환경의 국지 대기 순환에 대한 정확한 이해가 필요하다.



* Corresponding Author : Seung-Jae Lee
(sjlee@ncam.kr)

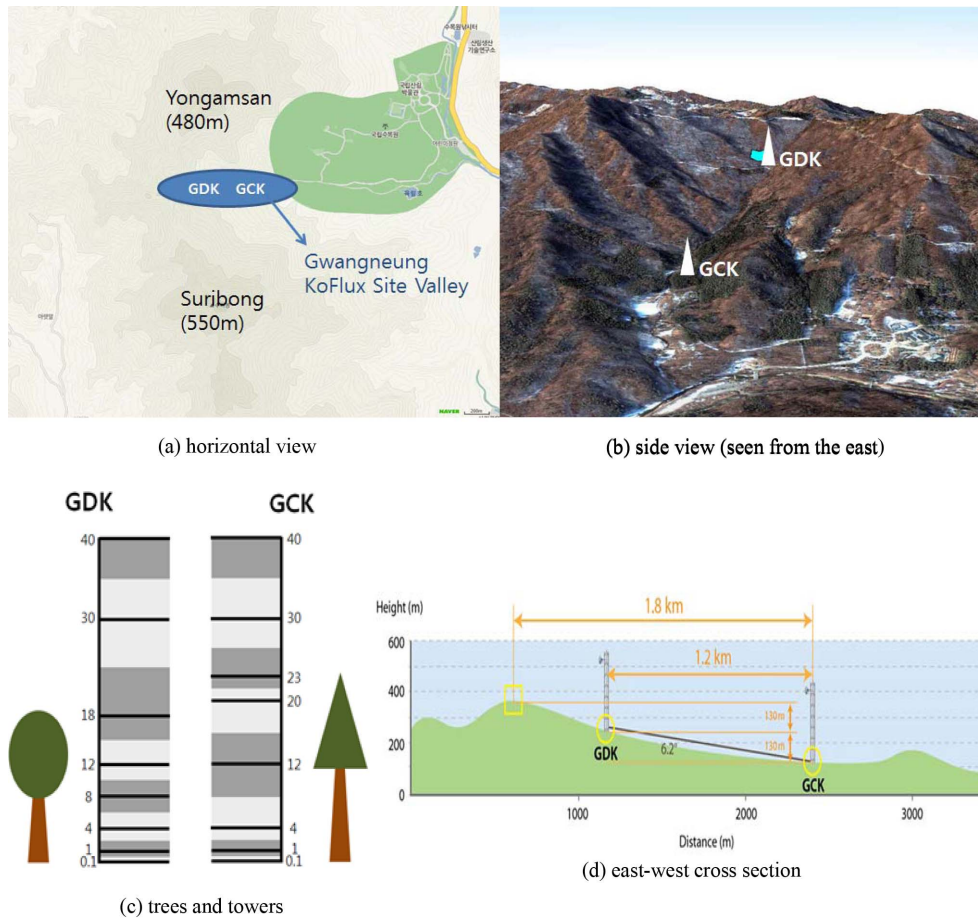


Fig. 1. (a) The horizontal and (b) 3-dimensional view (IKONOS image) of the study area where (c) the towers with 8-level profile measurements are located along the valley. (d) The vertical cross-section view of the valley (Adapted from Moon *et al.*, 2005). The numbers in (c) indicate the heights (in m) of the profile measurements of CO₂ and water vapor concentrations. Three-dimensional sonic anemometers on the towers were installed at 40 m above the ground.

광릉 KoFlux 관측지의 원두부에 위치한 활엽수림 플럭스 타워(GDK)와 하단부에 위치한 침엽수림 플럭스 타워(GCK)는 경사진 계곡에 놓여 있다(Fig. 1). 이 계곡은 용암산(480m)의 남동쪽 경사면과 수리봉(550m)의 북동쪽 경사면 사이에 형성된 지형으로서, 야간에 배수류(drainage flow)가 존재할 것으로 예상된다. 배수류는 지형 표면과 접촉한 공기가 냉각이 되어 경사면 아래 또는 계곡 아래로 흘러갈 때 만들어지는 차가운 바람으로 정의된다(Glickman, 2000). GDK와 GCK 타워의 지상 40m 고도에서 관측된 바람 자료에 따르면, 주간에는 동풍이 불다가 야간으로 갈수록 서풍이 불어 서로 상반된 흐름이 주기적으로 일어남을 종종 보인다. 이러한 바람

은 주간의 곡풍(valley wind)과 야간의 산풍(mountain wind)을 대변하는 것으로, 특히 서풍의 경우에 배수류의 역할을 하여, 지표 가까이에서는 난류 혼합이 약한 야간에 생태계 호흡으로 배출된 이산화탄소가 산림 상부에서 하부로 이동하는 것으로 추측되어 왔다.

가령, Park *et al.*(2007)은 GDK 타워에서 관측된 이산화탄소 농도의 여름 계절평균 일변화 자료에서, 야간에 토양 및 식생의 호흡으로 인해 대기로부터 배출되는 이산화탄소 양이 타워 관측시스템에서 과소 측정되는 면을 언급하였으며, 이는 배출된 이산화탄소가 배수류에 의해 관측지의 복잡한 경사를 따라 산림 하부로 흘러 나갔기 때문으로 추측한 바 있다. 최근에 Malla

Thakuri *et al.*(2014)은 GDK와 GCK의 군락 상하부의 여덟 높이에서 각각 관측된 CO₂ 농도의 프로파일 관측 자료를 분석하여, 야간 배수류의 영향으로 GDK의 지표면 가까이의 CO₂ 농도가 일몰 후 시간에 따라 감소하거나 증가가 미미할 때, 풍하측에 위치한 GCK의 지표면 가까이의 CO₂ 농도는 시간에 따라 뚜렷이 증가함을 보고하였다(Fig. 2).

GDK와 GCK에서 관측된 바람 자료는 실측이지만 단일지점(single-point) 자료이기 때문에, 이러한 배수류 또는 그와 유사한 국지 순환이 광릉 산림생태계에 실제로 존재하는지, 또한 그러한 순환의 수평적인 범위와 연직적인 깊이가 어느 정도 규모인지, 그리고 다른 규모의 바람계와 어떻게 연결되어 상호작용하는지를 파악하는 데에는 기본적으로 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 타워 관측으로부터 그 존재 가능성이 제기된 배수류의 존재 유무를 고해상도의 국지 수치모의를 통해 확인하고자 한다. 또한 배수류 뿐만 아니라, 광릉 산림생태계 지역에 존재할만한 국지 순환계들의 시공간적 규모, 강도 및 변동을 사례 분석을 통해 살펴보고자 한다.

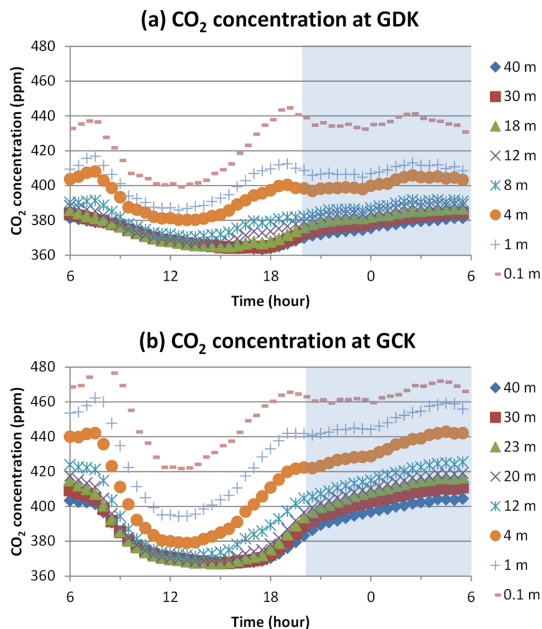


Fig. 2. Mean diurnal variation of CO₂ concentrations for (a) the GDK (the upper site) and (b) GCK (the lower site) during growing season (June, July, August, and September). Shaded area represents the nighttime, while unshaded area represents the daytime. (Adapted from Malla-Thakuri *et al.*, 2014).

II. 재료 및 방법

2.1. 수치모형

중규모 바람장을 입체적으로 모의하기 위한 도구로는 Yocke *et al.*(1977)이 개발한 정상상태 진단모형에서부터 Pielke(1974)와 같은 정교한 중규모 모형, 그리고 그 중간 형태인 Morre *et al.*(1987)과 같은 단순 역학모형 등이 있다. 본 연구에서는 최신의 역학 코어와 물리 과정들을 탑재하고 있는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모형을 이용하여 수치모의를 수행하였다. WRF 모형은 완전 압축 가능한 오일러리안 비정역학계 모형으로서 Arakawa-C 수평격자 및 지형추적-정역학기압 연직좌표를 채택하고 있다 (Skamarock *et al.*, 2008).

모형의 도메인은 연구 대상지인 광릉에 초점을 맞춘 6중 등지격자 체계로 구성하였다(Fig. 3). 수평 격자 간격은 어미격자에서부터 제일 내부 등지격자까지 각각 21870m, 7290m, 2430m, 810m, 270m, 90m 이고, 연직 층수는 38층으로서 지표면에서부터 10hPa 고도까지에 이른다. 모형의 에타 레벨은 1.000, 0.9987, 0.9975, 0.9963, 0.995, 0.993, 0.990, 0.988, 0.986, 0.984, 0.982, 0.980, 0.978, 0.971, 0.964, 0.946, 0.922, 0.894, 0.860, 0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576, 0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273, 0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093, 0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000 이다. 수치적분 간격은 어미격자에 대해서 60초이고, 측

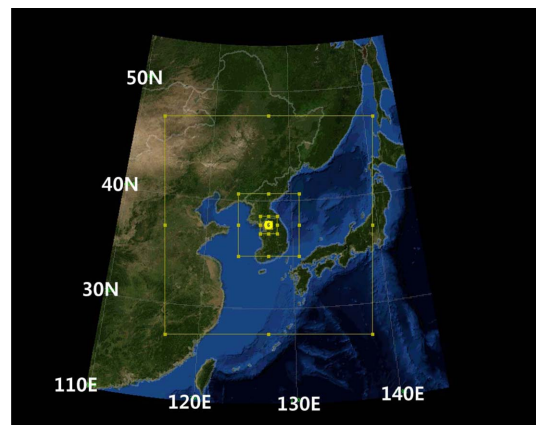


Fig. 3. Domain configuration of the WRF model used in this study. Mother and five nested domains have horizontal resolutions of 21870 m, 7290 m, 2430 m, 810 m, 270 m, and 90 m, respectively.

면 및 상단 경계의 처리를 위하여 유입유출의존 완화법 및 복사법을 각각 채택하였다. 모형의 물리과정으로는 Dudhia 단파복사 방안(Dudhia, 1989), RRTM 장파복사 방안(Mlawer *et al.*, 1997), WRF 단일모멘트 6-class 미세물리 방안(Hong and Lim, 2006), New Kain-Fritsch 적운모수화 방안(Kain and Kain, 2004), YSU 경계층 방안(Hong *et al.*, 2006), Monin-Obukhov-Janjić 접지층 방안(Monin and Obukhov 1954, Janjić, 1996, Janjić, 2002), Noah 지면모형(Chen and Dudhia, 2001)을 사용하였다. 어미격자를 제외한 모든 동지격자 영역에서는 적운 모수화 과정을 사용하지 않고 구름 과정을 명시적으로 분해하도록 하였다.

2.2. 지형자료

대기의 수치모의 및 예측에 있어서 바닥 조건인 지형자료의 정확도는 매우 중요하다. 지형에 대한 표현이 세밀하고 정확할수록 운동학적 또는 열역학적 지형의 강제력이 대기에 잘 반영되어 실제 관측에 가까운 계산 결과를 생산한다. 수치모형에서 표현되는 지형의

해상도는 모형의 수평 격자 간격과 밀접하게 결부되어 있으며, 일반적으로 모의 영역의 격자 해상도와 사용하는 지형 자료의 해상도가 서로 일치할수록 대기가 잘 표현되고, 지표와의 상호작용 또한 잘 분해되는 것으로 알려져 있다(Skamarock *et al.*, 2008).

광릉 KoFlux 타워들이 위치한 계곡은 현업 기상수치모형에서 사용하는 지형 해상도 및 격자 해상도로는 분해되기 어려운 아주 소규모의 지형이다. 국내에서 다루어진 국지순환에 대한 수치연구도 상대적으로 큰 중규모에서 다루어져 왔다. 따라서 계곡 주변에서 발생하는 소규모의 국지 순환을 모의하기 위해서는 고해상도의 지형 자료가 그 어느 요건보다도 우선적으로 모형에 이행되어야 한다. 계산 자원 및 연산 속도가 나날이 향상되면서 대기 수치모형에서 사용되는 지형 자료의 해상도도 고해상도 및 초고해상도로 발전해 왔으며, 국내에서는 연안 및 산악지역에서의 상세 대기 모의를 위해 여러 용도로 사용된 바 있다.

가령, Lee *et al.*(2010)과 Kim *et al.*(2012)은 27-93-1km 격자 구성에서 90m 지형자료를 사용하여 각

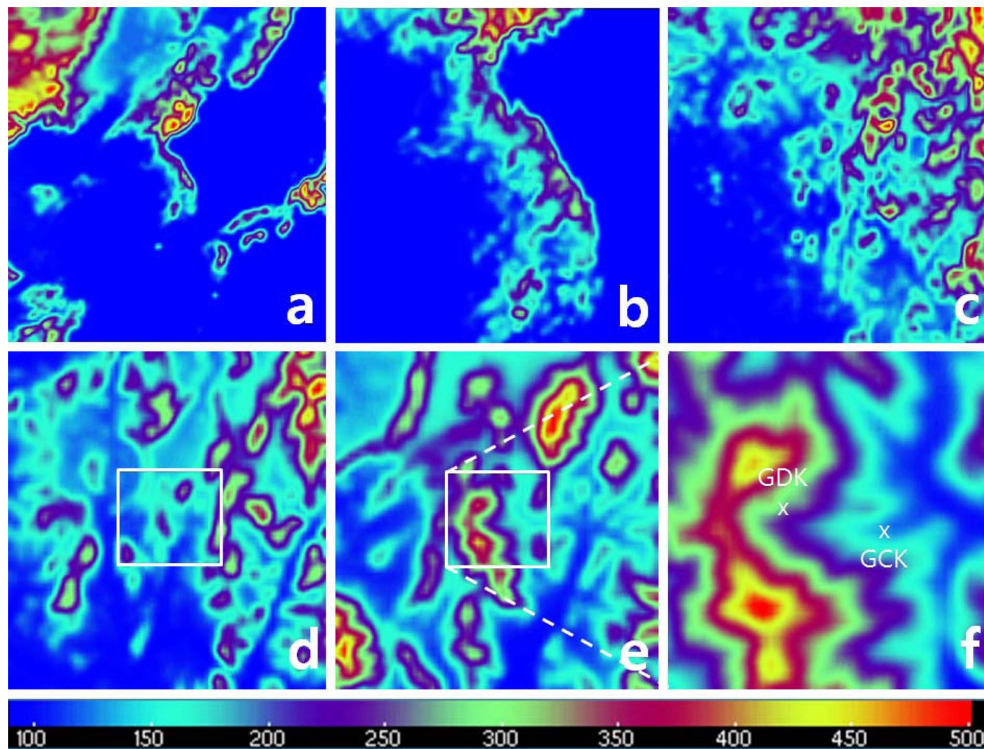


Fig. 4. Model domain and topography. The contour intervals for topography (km) in the most inner domain (f) are indicated at the bottom.

각 국지대기진단모형 자료입력과 연안광역도시 내부 바람길 분석을 수행하였다. 또한, Jeong *et al.*(2012)은 30-10-3.3-1.1km 영역 구성에서 900m 해상도와 90m 해상도의 지형자료 및 육지피복자료를 사용하여, 서로 다른 특징을 갖는 연안지역에서의 기상모의 결과의 차이를 살펴보고, Seong *et al.*(2013)은 8.1-2.7-0.9-0.3km의 영역 구성에서 900m, 90m, 10m의 지형자료와 육지피복자료를 사용하여 산불확산 모의를 수행한 바 있다.

이상의 연구들에서 사용한 모형의 격자 해상도 가운데 최소 해상도는 0.3km 였다. 본 연구에서는 USGS의 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 고해상도 지형(dx=3초=90m)을 WRF 모형의 지면경계 조건으로 도입하였으며, 제일 내부 등지격자의 해상도를 90m로 설정하여 이전 연구보다 고해상도를 채용함과 동시에, 사용하는 지형의 해상도와 일관성을 갖도록 하였다. 아울러 이러한 90m의 격자 체계로 모형을 구동할 경우에 발생할 수 있는 문제점들도 파악하고자 하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 채택한 수치모형의 다중 도메인과 각각에 대한 지형 고도의 모습이며, 각 도메인의 중심은 GDK와 GCK 두 타워의 가운데 지점에 해당

된다. 첫 번째부터 네 번째 도메인까지는 WRF 모형이 기본적으로 장착하고 있는 10km 해상도 지형을 사용하였고, 고해상도 SRTM 지형은 다섯 번째 및 여섯 번째 도메인에만 적용되었다. 기본적으로 제공하는 지형 해상도로는 연구대상 지역인 광릉 관측 타워가 위치한 계곡 및 그 주변 일대가 잘 묘사되지 못하고 있음을 볼 수 있다(Figs. 4(a)-4(d)). 반면, SRTM 고해상도 지형 자료가 반영된 다섯 번째 및 여섯 번째 도메인에서는 광릉 KoFlux 타워 GDK와 GCK가 설치되어 있는 계곡 및 그 주변 지세가 잘 표현되고 있음을 알 수 있다(Figs. 4(e)-4(f)). 특히 제일 내부 도메인인 Fig. 4(f)에서는 실제 높이와 근접한 용암산과 수리봉, 그리고 그 사이에 동쪽을 향하여 형성되어 있는 계곡의 모습이 잘 표현되어 있다. SRTM 고해상도 지형 자료의 모형 장착에 대한 자세한 내용은 부록을 참고하기 바란다.

2.3. 모형 평가

사용할 수치모형의 성능을 진단하기 위하여, 비교적 종관바람이 약하고 강수가 없는 2008년 8월 24일 00시에서 8월 30일 00시까지 6일 기간에 대하여 수치모의 적분을 수행하고, 그 결과를 기본적인 기상 인자

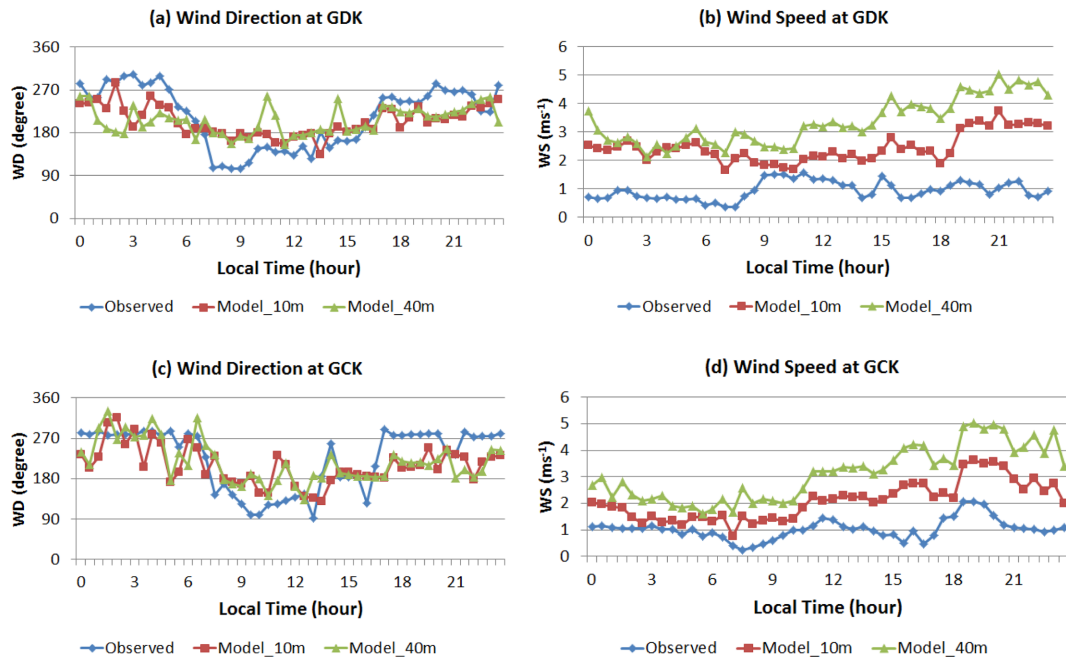


Fig. 5. Half-hourly time series of observed versus model-simulated wind direction (WD) and speed (WS) which were averaged over the period 24-30 August 2008 at GDK and GCK.

인 바람과 기온을 대상으로 평가를 실시하였다. 바람 변수의 경우에, 모형 바람과 관측 바람의 고도의 일치는 중요한 문제이다. WRF 모형에는 식생 군락의 높이를 포함한 군락의 구조에 대한 정보가 상세하게 처방되어 있지 않다. 관측 바람의 고도는 지표로부터 40m이나, GDK와 GCK 모두 약 18~26m의 높이를 갖는 활엽수림 및 침엽수림 군락으로 덮여 있으므로, 군락 상단으로부터는 약 20m의 높이인 셈이다(Fig. 1(c)). 실제로 풍속이 0이 되는 영면변위(zero-plane displacement)를 고려하면 지표로부터 40m 높이는 군락의 영면변위로부터 대략 20~27m 높이에 해당된다. 본 연구에서는 모형의 10m와 40m 고도의 바람 자료와 40m의 기온 자료를 평가에 사용하였다.

Fig. 5는 GDK와 GCK 두 지점에서 타워 관측 바람과 모형 모의 바람의 평균 일변화를 비교한 것이다. 평균 풍향의 경우, 그 6일 동안의 기간에 대해 GDK와 GCK에서는 동풍(90도)과 서풍(270도)의 상반된 두 방향이 주풍임을 알 수 있다. 이는 이 기간 동안 하루 주기를 갖는 국지 순환이 두 지점 모두에서 비교적 잘 나타났음을 말한다. GDK와 비교해 볼 때 GCK는 서풍이 동풍에 비해 더 두드러진 빈도를 보였다. 이는 GCK가 GDK에 비해 계곡 지형의 끝자락에 위치하여, 배수류가 풍상측에서부터 동서 방향으로 놓인 계곡을 따라 아래로 계속 흘러가면서 서풍의 모습을 잘 간직할 수 있는 위치에 놓여 있기 때문이다. 이에 반해 GDK는 계곡 아래로 계곡 방향과 평행하게 흘러가는 바람 외에도 상층의 더 큰 규모의 바람의 영향을 상대적으로 더 잘 받을 수 있는 높은 고도에 위치해 있어서 서풍의 성분이 다소 분산되어 나타난다고 분석된다. 6일간 모형이 모의한 바람의 풍향은 GDK와 GCK에서 관측된 바람의 두 주 풍향을 전반적으로 잘 표현하고 있음을 보여 준다.

평균 풍속의 경우, 모형 바람은 관측 바람에 비해 과대 모의하고 있음을 알 수 있다. 10m 고도 모형 바람은 최대 약 1.5 m s^{-1} , 40m 고도 모형 바람은 최대 약 3 m s^{-1} 의 과대 모의를 보였다. 이러한 차이는 지형의 경사와 군락 상단의 경사의 차이에도 어느 정도 기인한다. 계곡과 능선을 비교해 볼 때, 땅 속 수분 공급은 계곡이 더 유리하고, 산 위로 갈수록 바람이 상대적으로 강하게 불면서 식생의 성장을 방해하므로, 군락의 높이인 수고는 대개 계곡에서 높고 산마루에서는 낮은 특징을 보인다. 이는 지형의 굴곡과 수

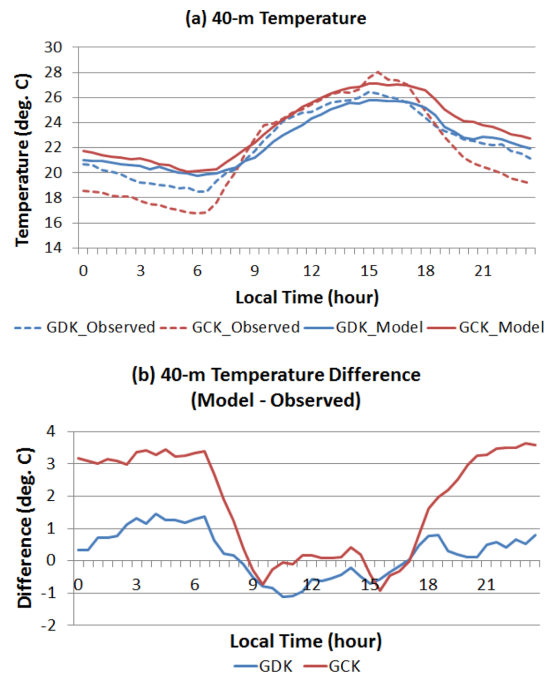


Fig. 6. As in Fig. 5, except for (a) 40-m temperature and (b) its difference (model minus observed).

고의 굴곡을 다르게 만들며, 실제로 광릉 KoFlux 타워 위에서 수고의 기복을 살펴보면 지표면의 기복보다 더 완만하고 부드러운 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 6은 GDK와 GCK 두 지점에서 타워 40m 관측 온도와 40m 모형 모의 온도의 평균 일변화를 비교한 것이다. 모형은 새벽 최저 기온과 낮 최고 기온 시점을 포함한 관측된 기온의 전반적인 패턴을 매우 잘 묘사하는 것으로 분석된다(Fig. 6(a)). 관측 기온과 모형 기온 간 상관계수는 GDK의 경우에 0.95, GCK의 경우에 0.90을 보여, 관측된 변동의 90% 이상을 모형이 설명하였다. 모형의 편차는 전반적으로 주간에는 음의 편차를 보이고 야간에는 양의 편차를 보였다(Fig. 6(b)). GDK에서는 모형 기온과 관측 기온의 차이가 약 1도 범위 내에 존재하여 관측과 상대적으로 높은 일치성을 보였다. 반면, GCK에서는 모형의 기온 모의 성능이 주간의 경우에는 GDK보다도 좋았지만, 야간에는 약 3도의 온난 편차를 보였다.

지표 부근의 바람은 기본적으로 혼돈스런(chaotic) 경향을 가지며(Moore *et al.* 1987) 지형과 식물 군락의 복잡한 구조와 비균질한 분포로 인해 수치예보 모

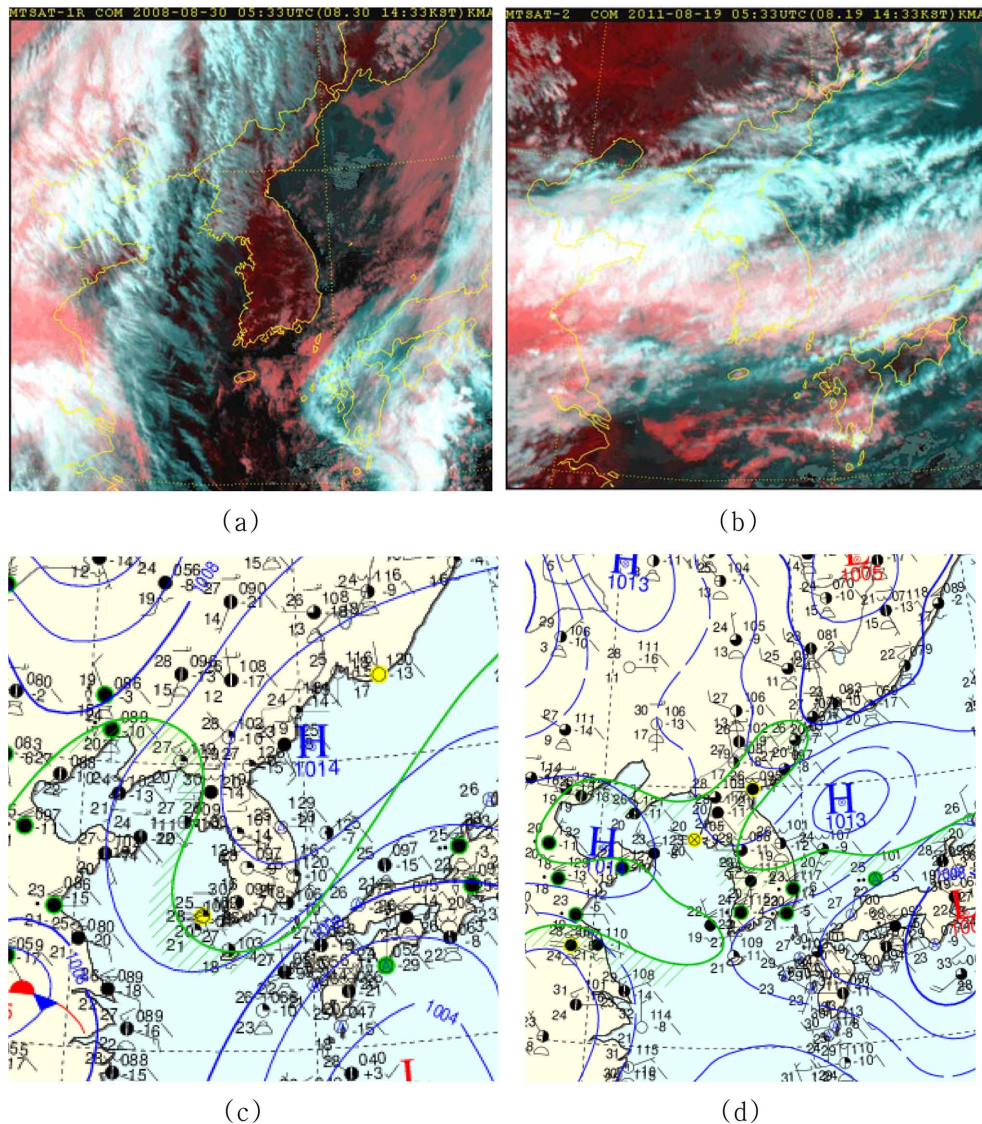


Fig. 7. The composite satellite images for (a) Case I (1433 LST 30 August 2008) and (b) Case II (1433 LST 19 August 2011). Surface weather charts valid at 1500 LST for (c) Case I and (d) Case II.

형이 가장 동화(assimilate) 또는 예측(predict)하기 힘든 변수 중 하나라는 점과(Lee *et al.* 2011), 이 연구의 경우 오직 지형 조건만을 교체하여 모의한 결과 임을 감안할 때, 이상에서 언급된 광릉 플렉스 타워가 위치한 계곡에서의 모형의 바람과 온도의 수치모의 성능은 용인할 만한 수준으로 평가된다.

2.4. 수치모의 사례 선정

광릉 지역에서의 국지순환 사례를 선정하기 위하여

MTSAT-1R 위성자료와 GDK 및 GCK 타워의 40m 고도 바람자료를 사용하였다. 타워의 바람 자료는 초음파 풍향풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc. U.S.A.)로 측정된 값이다.

사례 I은 2008년 8월 30일로서 고기압의 영향을 받아 전국이 매우 맑은 날씨를 보인 날이다(Fig. 7(a)). GDK 타워에서는 자정부터 새벽까지 서풍 계열의 바람이 불다가 새벽 05시 경에 풍향이 동풍 성분으로 바뀌기 시작하여, 아침 07시부터는 본격적으로 동풍

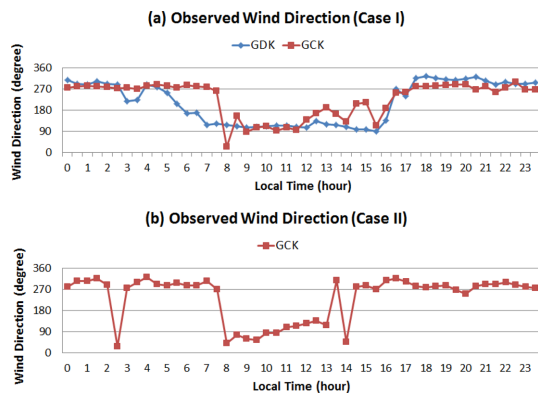


Fig. 8. Half-hourly time-series of wind direction at GDK and GCK for (a) Case I (1433 LST 30 August 2008) and (b) Case II (1433 LST 19 August 2011). For Case II, wind data were not available at GDK.

또는 동남동풍의 바람으로 반전된 후 16시까지 지속적으로 불었다(Fig. 8(a)). 16시 이후에 바람은 다시 원래의 서풍 성분을 되찾기 시작하여, 18시 30분부터 서풍 또는 서북서풍으로 풍향이 바뀌었다. 한편, GCK 타워에서는 GDK 타워에서와 유사한 패턴이 나타났으나, 서풍 계열에서 동풍 계열로 풍향이 바뀌는 아침의 시점이 2시간 정도 지연되어 09시에 동풍 계열로 반전된 후 16시까지 지속되었다. 이러한 동풍 시작의 지연은 GDK가 놓여 있는 경사면의 경사가 GCK에 비해 더 크기 때문에 일사의 흡수에 의한 지표 가열율이 더 커지므로 동풍을 유발하는 상승기류의 발달이 더 용이하고, GCK는 계곡의 끝자락과 이어지는 평지에 위치하여 계곡 방향(동서 방향) 이외의 풍향의 영향을 상대적으로 더 잘 받기 때문에 발생하는 것으로 해석할 수 있다(Fig. 1).

한편, 사례 II는 2011년 8월 19일로서 장마전선의 영향으로 비가 내리기 전에 구름이 상층에 유입되어 있는 흐린 날이다(Fig. 7(b)). 이 날의 경우, GDK 바람 자료는 결측으로 인하여 존재하지 않는다. GCK 타워의 관측 바람은 사례 I과 전반적으로 유사하지만, 주간의 동풍이 사례 I에 비해 한 시간 정도 일찍 종료되고, 야간의 서풍이 세 시간 빠른 16시에 시작됨을 보여 준다(Fig. 8(b)). 이는 구름의 존재로 인하여 주간에 지표에 도달하는 일사량이 줄어들어 지형의 열적 강제력이 약화된 것과 관련이 있는 것으로 분석된다. 사례 I와 사례 II에 있어서, 시간별 풍향들이 어떤 종류의 국지 흐름에 의한 것인지는 수치모의로부터 파악

이 되어야 한다.

III. 결과 및 고찰

사례 I은 종관규모 바람이 약하고 맑은 하늘상태에서, 광릉 관측지 및 주변에서 전형적인 국지 순환이 공간적으로 어떻게 일어나고 있는지를 잘 볼 수 있는 경우이다(Fig. 7(a)). Fig. 9는 이 날에 대한 국지 바람의 수치모의 결과를 대표적인 세 시각에 대해 보인 것이다. 자정 00시에는 관측지 계곡의 양 옆으로 놓여 있는 북측와 남측의 경사면 상에서 산 정상부에서 계곡 방향에 수직으로 하강하는 사면활강풍(downslope winds)의 모습이 뚜렷한 대칭성을 띠며 잘 나타나 있다. 양쪽 경사면에서의 사면활강풍은 관측지 계곡으로 모여 들고 있으며, 이는 계곡하부로 흘러 내려가는 산풍의 발달로 이어짐을 볼 수 있다. 정오 12시에는 이러한 풍계가 뒤바뀌어, 양쪽 경사면을 타고 올라가는 사면활승풍(upslope winds)과 계곡을 따라 상승하는 동풍계열의 곡풍(valley winds)의 모습이 잘 나타나 있다. 아래에서 올라온 사면활승풍과 곡풍의 기류들은 산의 능선 부근에서 수렴되는 모습을 보이며, 특히 용암산 정상 부근에서는 수평적인 바람의 시어(shear)가 커지면서 소규모 소용돌이의 형성을 암시하고 있다. 저녁 20시에는 관측지 계곡에 배수류가 존재하고, 수리봉 등 다른 곳에서도 지형을 따라 하강하는 흐름이 발달되어 있는 모습이다. 도메인의 동남쪽 지역에는 다른 지형에서 만들어진 배수류들 간에 서로 충돌하는 상호작용의 모습이 나타나 있다.

사례 II는 대기 상층에 구름이 유입되어 존재할 때 광릉 KoFlux 관측지 계곡 및 주변의 복잡한 국지 흐름을 보인 경우이다(Fig. 7(b)). Fig. 10은 이 날에 대한 수치모의 바람장을 05시부터 12시까지에 초점을 맞추어 1시간 간격으로 나타낸 그림이다. 새벽 05시에 관측지 계곡에서는 배수류가 형성되어 있으며 07시에 그 풍속이 최대가 되었다. 07시에 도메인의 일사분면에서는 다른 지형들에서 발생한 배수류들이 서로 합류하여 북쪽으로 빠져 나가면서 시계방향의 국지성 소용돌이가 만들어 지고 있고, 사사분면에서는 남쪽으로 빠져 나가는 흐름을 볼 수 있다. 일출 후 해가 지평선에서 어느 정도 떠 오른 08시에는, 남북방향으로 뻗어 있는 산맥의 서쪽 경사에서 크고 작은 활승풍과 곡풍이 먼저 발생하고 있다. 09시에는 이제 산맥의 동

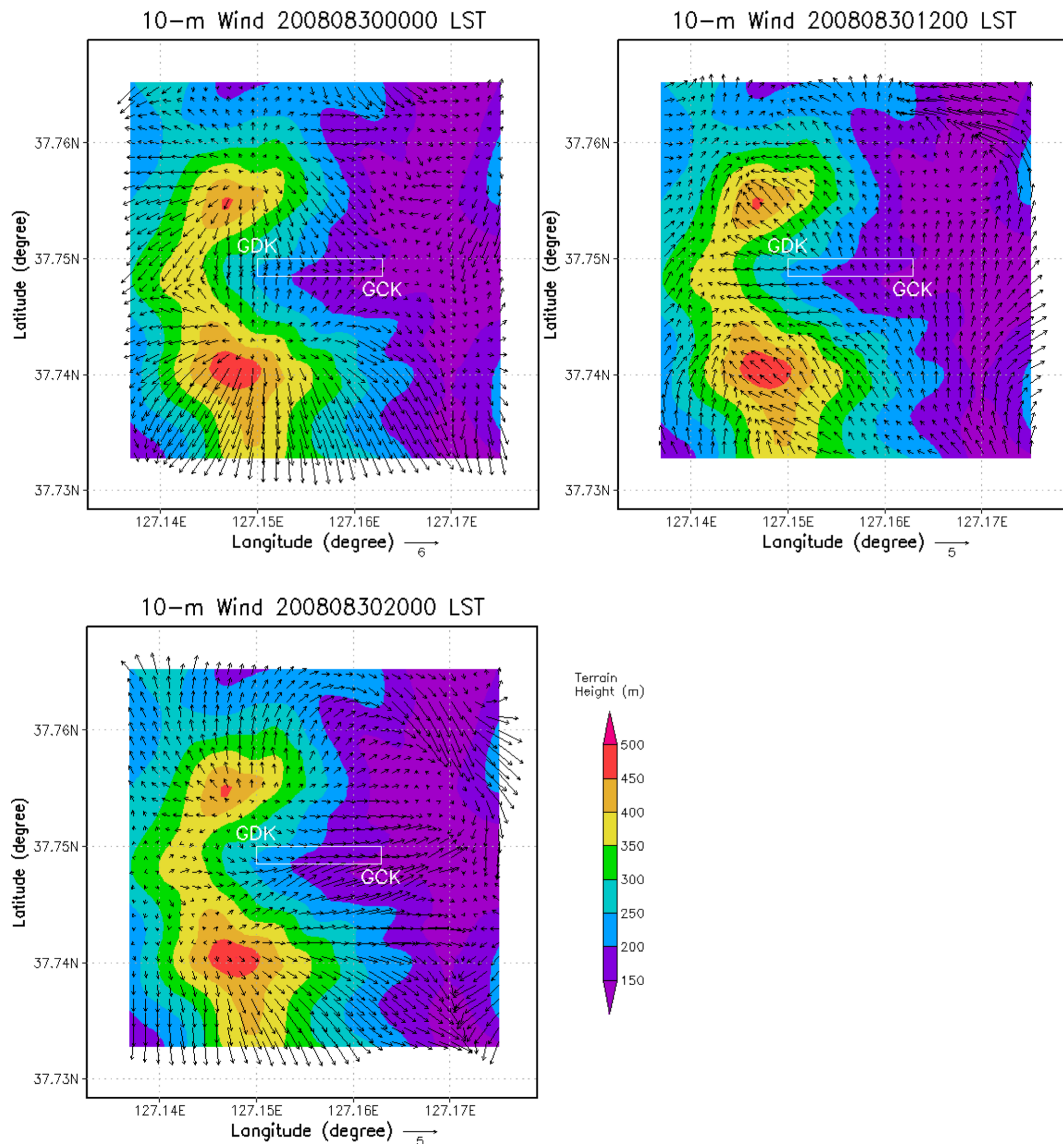


Fig. 9. Numerical simulation of local winds (m s^{-1}) in the valley of Gwangneung KoFlux site (GDK, GCK) for Case I (30 August 2008) at 10-m height above the ground.

쪽 경사면 및 관측지 계곡에서도 활승풍과 곡풍이 발생하고 있는 모습이다. 용암산 정상부에는 사례 I에서 암시된 소용돌이가 좀 더 잘 묘사되어 있다. 오전 09시~10시에는 산맥의 양쪽 경사면 모두에서 활승풍과 곡풍의 활동이 최대가 되었다. 이 때 산 정상부 및 능선에서 수렴현상은 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 9시에 비해 10시에는 산 능선 주변의 수렴대가 전체적으로 오른쪽으로 약간 변위(shift)된 모습으로서, 동쪽 경사면에서 올라온 기류와 서쪽 경사면에서 올라온 기류

간의 세력 싸움의 양상을 보여준다. 11시가 되면서 관측지 계곡에서는 곡풍이 완전히 소멸되었지만, 서쪽 경사에서는 여전히 서풍이 불고 있으며, 12시에는 관측지 계곡 및 주변 모두에서 더욱 뚜렷하고 일관된 서풍의 풍계가 나타난다. 이는 한반도의 서쪽 바다에서 도메인으로 유입된 해풍의 영향으로 해석된다.

사례 II의 경우, 활승풍과 곡풍에 의한 상승류 시기는 08시~11시 사이였고, 11시 이후부터는 관측지 계곡에서 주간의 곡풍(동풍)이 해풍(서풍)에 의해 서풍의

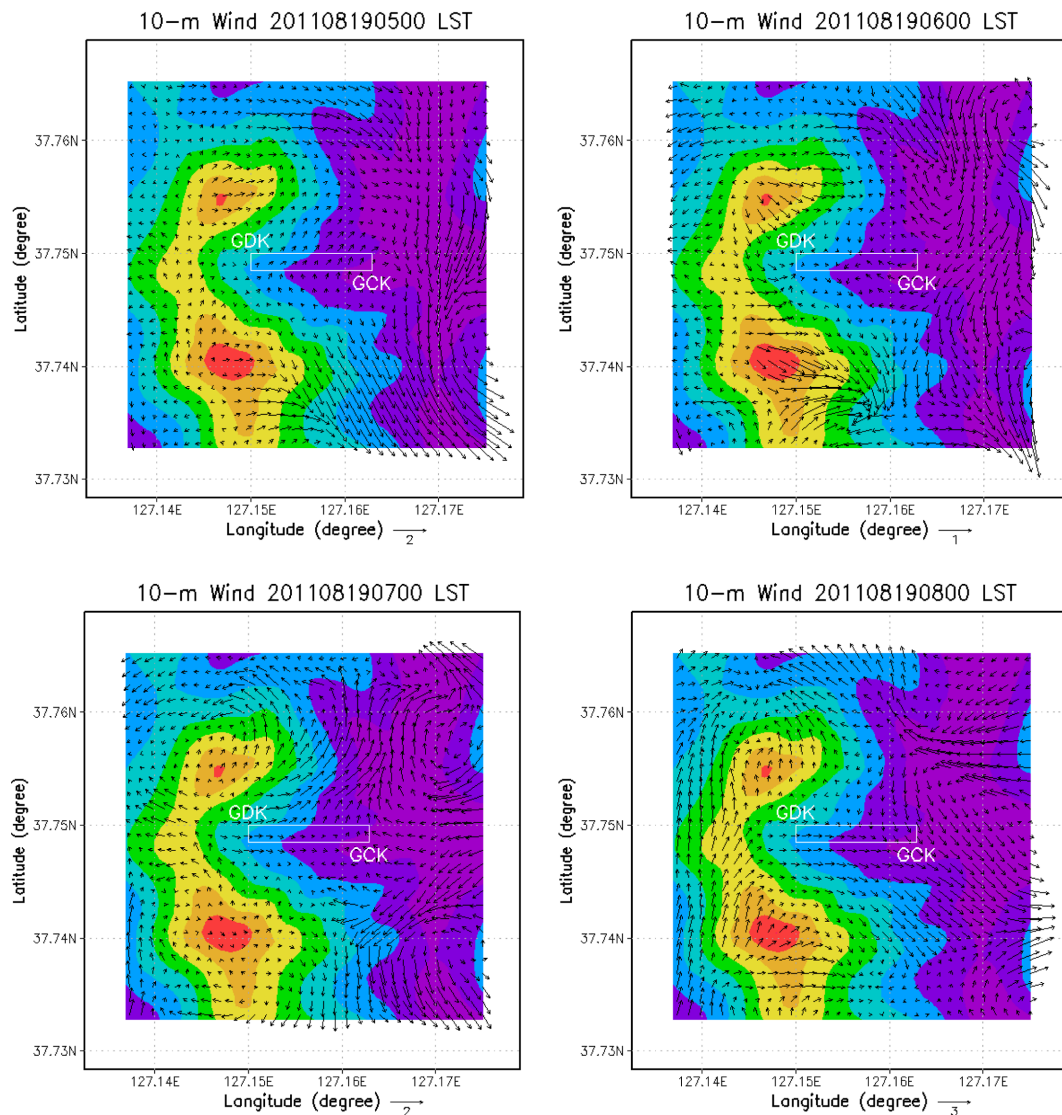


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for Case II (19 August 2011).

로 빨리 바뀌는 특징이 있었던 것으로 분석된다. 비록 모형은 주간 동풍의 지속 시간을 관측에 비해 다소 짧게 모의했지만, Fig. 8에서 흐린 날이 맑은 날에 비해 짧은 동풍 시간을 가진 특징을 잘 포착한 것으로 분석된다.

이상의 사례 I, II의 수치모의 결과들은 광릉 KoFlux 타워 관측으로부터 그 가능성이 제기된 관측 지 계곡의 배수류가 실제로 존재함을 뒷받침하고 있다. 또한 존재하는 배수류는 계곡을 따라 내려오는 산풍으로만 보기보다, 종종 사면활강풍과 중규모- α 또는 중

관규모의 약한 바람이 합세되어 부는 것으로 분석이 된다. 산풍은 배수류의 한 종류일 뿐이기 때문에, 광릉 KoFlux 타워들이 위치한 계곡에서 주간에 부는 서풍을 산풍으로만 생각할 수는 없다. 마찬가지로 사면활강풍도 배수류의 한 종류로서, 강도는 약할지라도 광릉지역에 얼마든지 존재하고 있음을 수치모의 결과는 제시한다. 특히 GDK와 GCK 타워의 관측 풍향이 계곡 방향과 나란하지 않을 경우에 그러할 가능성은 더욱 커진다. 이는 타워의 단일 관측 바람만을 가지고 동풍이면 곡풍, 서풍이면 산풍으로 단정 지어 해석하

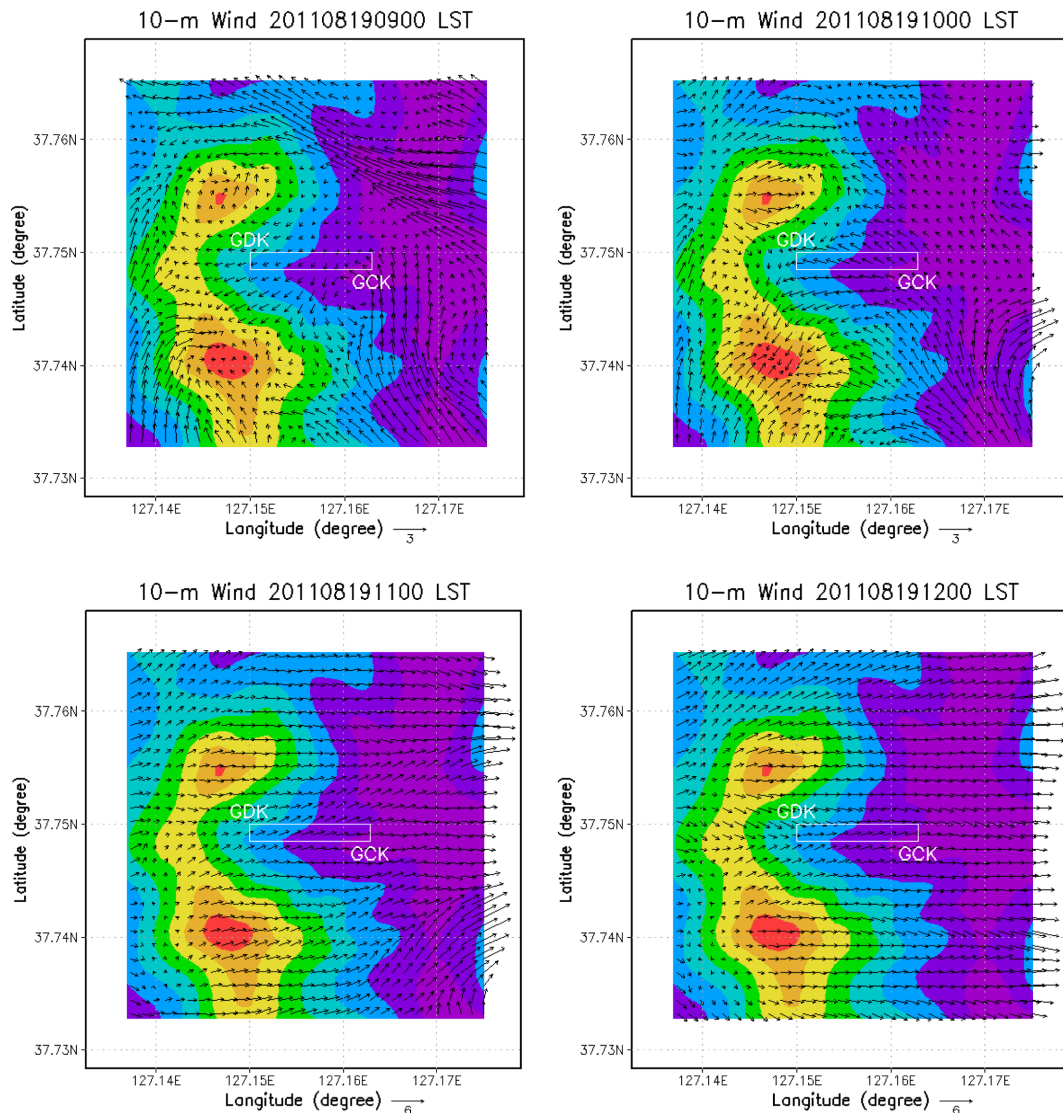


Fig. 10. Continued.

면 오류를 범할 수 있음을 의미한다. 따라서 향후 광릉 관측지 계곡은 물론 중소규모 농림생태계 관측지에서 물질의 순환 및 농도의 시공간적 변동을 올바르게 이해하기 위해서는 이러한 3차원 수치모의 결과를 동반 활용하여 분석해야 할 필요가 있다.

IV. 적 요

90m 고해상도 SRTM 지형자료를 장착한 WRF 수치모형을 이용하여 광릉 활엽수림 KoFlux 타워

(GDK)와 침엽수림 KoFlux 타워(GCK)가 위치한 계곡 및 주변에서의 국지 대기순환을 식생-대기 이산화탄소 순환 및 미기상학적 관점에서 연구하였다. 지표 부근 온도와 바람에 대하여 모형과 관측 결과를 비교함으로써 모형의 전반적인 성능을 평가하였고, 연구 지역에 국지순환이 발생한 맑은 날(Case I)과 흐린 날(Case II) 사례를 선정하여 수치모의를 수행하고 그 결과를 정성적으로 분석하였다.

관측된 바람장은 GDK와 GCK 간에, 또 Case I과 Case II 간에 주간 및 야간 국지풍의 시작, 종료, 지

속시간, 강도 등에 차이를 보였다. 모형의 수치모의 결과들은 광릉 KoFlux 타워 관측으로부터 그 가능성이 제기된 관측지 계곡의 배수류가 실제로 존재함을 입증하였다. 전반적으로 모형이 모의한 바람장은 아침의 배수류-사면활승풍 전이와 저녁의 사면활승풍 역전 등을 포함하여 계곡 및 주변에서 관측된 국지풍의 일변화를 현실적으로 모사하였다. 또한 국지풍 간 상호작용의 복잡성도 보여주었는데, 가령 주간에 광릉 관측지 계곡 내부의 서풍은 반드시 산풍인 것은 아니었으며, 종종 약한 종관규모 바람 또는 서쪽에서 불어온 해풍과 같은 보다 큰 규모의 중규모 바람 등 다른 풍계와 결합이 되어 있었다.

광릉 생태계의 에너지, 물질, 정보 흐름의 시공간적 변동을 입체적으로 이해하는데 있어서 이러한 고해상도 국지순환 수치모의 결과는 상당히 유용한 것으로 판단되며, 구축된 국지모의 시스템을 지속적으로 개선하는 노력이 향후 뒤따라야 할 것이다. 아울러, 다른 농림생태계 관측지도 모의 영역에 포함시켜 모형 결과의 활용도를 넓힐 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(153-3100-3133-302-350). 또한 산림청 온대북부산림의 시계열특성분석 및 기후변화적응 관리기법 연구(S111214L020100)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chen, F. and J. Dudhia, 2001: Coupling and advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system-part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review* **129**, 569-585.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**, 3077-3107.
- Glickman, T. S., 2000: *Glossary of Meteorology*, Second Edition, Boston, Massachusetts, American Meteorological Society.
- Hong, S.-Y. and J.-O. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society* **42**, 129-151.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* **134**, 2318-2341.
- Janjić, Z. I. 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note* 437.
- Janjić, Z. I., 1994: The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review* **122**, 927-945.
- Janjić, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP eta model. *The 11th Conference on Numerical Weather Prediction*, Norfolk, Va, USA, August 1996.
- Jeong, J.-H., S. K. Song, H.-W. Lee, and Y.-K. Kim, 2012: Effects of high-resolution land cover and topography on local circulations in two different regions of Korea: a numerical modeling study. *Meteorology and Atmospheric Physics* **118**, 1-20.
- Kain, J. S. and J. Kain, 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology* **43**, 170-181.
- Kim, M. K., W. G. Do, and J. G. Cho, 2012: The analysis of atmospheric environment features using the urban atmospheric environment map in Busan. *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment* **22**, 177-200. (in Korean with English Abstract)
- Lee, H. W., D. H. Kim, S. H. Lee, M. J. Kim, S. Y. Park, and H. G. Kim, 2010: Skillful wind field simulation over complex terrain using coupling system of atmospheric prognostic and diagnostic models. *Journal of the Environmental Sciences* **19**, 27-37. (in Korean with English Abstract)
- Lee, S.-J., D. F. Parrish, S.-Y. Park, W.-S. Wu, S. J. Greybush, W.-J. Lee, and S. J. Lord, 2011: Effects of 2-m air temperature assimilation and a new near-surface observation operator on the NCEP Gridpoint Statistical-Interpolation System. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science* **47**, 353-376.
- Malla-Thakuri, B., M. Kang, J.-H. Chun, and J. Kim, 2014: Vertical profiles of CO₂ concentrations and storage in temperate forest in Korea. *Tellus*, To be submitted.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research* **102**, 16663-16682.
- Monin, A. S. and A. M. Obukhov, 1954: Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Trudy Geofizicheskogo Instituta, Akademiiy Nauk SSSR* **24**, 163-187.
- Moon, S. K., S. H. Park, J. Hong, and J. Kim, 2005: Spatial characteristics of Gwangneung forest site based on high resolution satellite images and DEM. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 115-123. (in Korean with English Abstract)

- Moore, G. E., C. Daly, M.-K. Liu, and S.-J. Huang, 1987: Modeling of mountain-valley wind fields in the southern San Joaquin valley, California. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **26**, 1230-1242.
- Park, S. B., R. Yuan, M. Kang, J. Kim, D. H. Lee, J. Hong, and Y. J. Choi, 2007: Comparison of net ecosystem exchange of CO₂ at Gwangneung forest and Haenam farmland. *Proceeding of the 2007 Spring Meeting of Korean Meteorological Society* 378-379. (in Korean)
- Pielke, R. A., 1974: A three-dimensional numerical model of sea breezes. *Monthly Weather Review* **102**, 115-139.
- Seong, J. H., S. O. Han, J. H. Jeong, and K. H. Kim, 2013: Study on sensitivities and fire area errors in WRF-Fire simulation to different resolution data set of fuel and terrain, and surface wind. *Atmosphere* **23**, 485-500. (in Korean with English Abstract)
- Yocke, M. A., M. K. Liu, and J. L. McElroy, 1977: The development of a three-dimensional wind model for complex terrain. *Joint Conference on Application on Air Pollution Meteorology*. American Meteorological Society and Air Pollution Control Association, 209-214.

부록 A

지형 자료들은 그 출처에 따라 서로 다른 접근 및 다운로드 방식과 자료 형식(format)을 가지고 있기 때문에, 사용자(가령, 수치모형 초보자)가 지형자료를 입수하고 각자의 모형에 맞게 장착하는 데에는 적지 않은 시간과 노력이 소모된다. 따라서 이 부록에서는 대표적인 대기모형과 전 세계 범용 지형자료를 예제로 삼아 사용자에게 고해상도 지형자료를 수치모형에 용이하게 장착할 수 있도록 가이드를 제공하고자 하였다. 이를 위해 커뮤니티 대기모형 Weather Research and Forecast(WRF) 모형을 예로 들어, USGS의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 고해상도 지형(약 90m) 자료를 모형에 장착하는 과정을 단계별로 설명하였다.

1) 자료 획득

고해상도 SRTM 지형자료는(<http://earthexplorer.usgs.gov>)사이트에서 얻을 수 있다. 자료를 이용하기 위해서는 먼저 사용자 등록을 해야 하며, 등록 후에 원하는 지역에 대한 지형 자료를 다운로드할 수 있다.

원하는 지역은 도(degree)/분(minute)/초(second) 단위 또는 소수점 자리로 표현된 위도와 경도 좌표

를 입력함으로써 임의의 다각형으로 선택할 수 있다. 원하는 지역 좌표를 입력하면 그 지역을 포함하는 지형자료 타일들(tiles)이 검색이 되어 나오고, 몇 가지 서로 다른 포맷으로 자료를 다운로드할 수 있다. 이 중에서 WRF 모형의 전처리 과정에 사용하기 위해서는 BIL 포맷으로 다운로드하기를 권한다(Fig. A1).

한편, 원래의 SRTM 데이터베이스는 몇몇 지역에서의 손실 자료(missing data) 또는 비어있는 공간들(voids)을 가지고 있다(Fig. A2). 이러한 빈 공간들은 애벌 가공(initial processing)을 거쳤음에도 품질 규격(quality specifications)을 만족시키지 못한 곳에서 발생한다. SRTM 자료는 가장 널리 쓰이는 지형고도 자료 출처들 중 하나이므로, 다른 출처의 지형 자료를 참고하여 내삽함으로써 그러한 공백들을 메울 수 있다. 이러한 추가 공정의 결과로 빈 공백이 하나도 없는 SRTM void-filled 버전이 사이트를 통해 제공되고 있다. 자료 공백이 있는 원래의 자료는 v1으로, 공백이 메워진 자료는 v2로 파일명을 구분하여 제공하고 있으며, 사용자들은 가급적이면 v2 자료를 사용하기를 권한다.

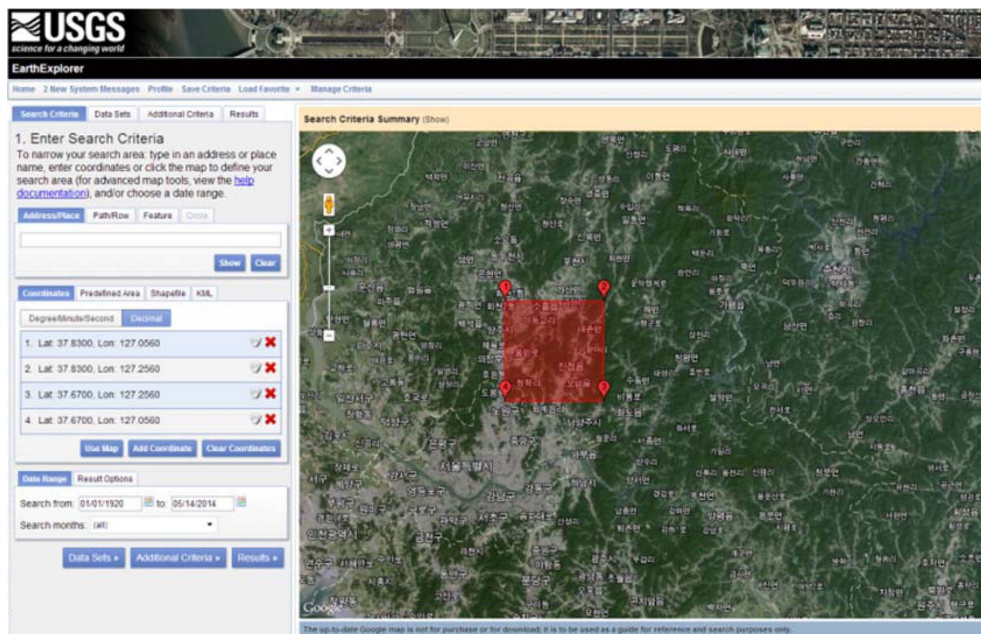


Fig. A1. The selection of terrain data area on the map (<http://earthexplorer.usgs.gov>).

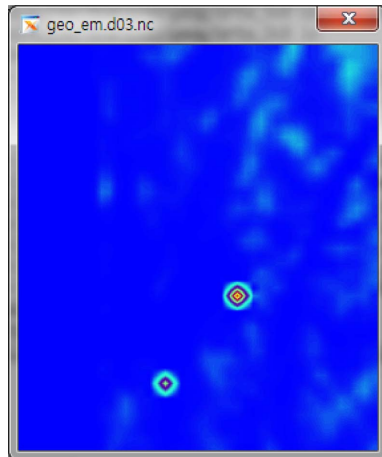


Fig. A2. An example of void areas in the SRTM v1 data.

2) 자료 풀기(unpacking)

다운로드 된 자료를 풀면, 확장자가 hdr, prj, blw, bil인 4개의 파일이 풀려 나오는데, .bil 파일은 바이너리 자료이고, 나머지는 ASCII 자료이다. .hdr 파일은 자료의 행의 개수(nr)와 열의 개수(nc) 정보 등을 담고 있고, .blw 파일은 자료의 좌측상단 위경도 좌표를 담고 있다(Fig. A3).

BYTEORDER	I	
LAYOUT	BIL	
NROWS	1201	
NCOLS	1201	
NBANDS	1	0.0008333333
NBITS	16	0.0000000000
BANDROWBYTES	2402	0.0000000000
TOTALROWBYTES	2402	-0.0008333333
PIXELTYPE	SIGNEDINT	
ULXMAP	127	127.0000000000
ULYMAP	38	38.0000000000
XDIM	0.0008333333333333333	
YDIM	0.0008333333333333333	
NODATA	-32767	

(a)

(b)

Fig. A3. (a) .hdr file and (b) .blw file.

3) 파일 이름 변경

.bil 지형자료 파일명을 WRF 모형 전처리 과정(WPS)에서 그대로 사용할 수는 없기 때문에 파일명을 변경해 주어야 한다. 이를 위해서, .hdr 파일을 열어서 nr, nc 값을 파악한 후, .bil 파일을 확장자가 없는 00001-nc.00001-nr 파일로 이름을 변경하여 복사해야 한다. 참고로 파일명에도 위경도 정보가 정수 형태로 들어 있는데, blw 파일(Fig. A3b)과 달리 이 위경도 값은 자료의 좌측하단 좌표임에 유의해야 한다(Fig. A4).



Fig. A4. Longitude and latitude values in the SRTM file name (n37_e127_3arc_v1.bil) and their actual location in the SRTM data.

4) WPS index 파일 작성

index 파일은 WPS의 geog 디렉토리 아래에 있는 해상도별 지형자료 서브디렉토리 안에 각각 하나씩 존재한다. SRTM 고해상도 지형자료를 사용하기 위해서는 그에 맞는 index 파일이 존재해야 한다. 간편한 방법은 다른 index 파일 하나를 복사해 와서, SRTM에 맞게 수정하는 것이다. 특히 dx와 dy 값을 수정해 주어야 한다. 본 연구에서 사용하는 3초(약 90m) 해상도 자료의 경우 dx=dy=0.0008331이며, 이 때 단위는 소수점으로 표현된 도(degree) 단위이다.

1)부터 4)까지의 작업이 완료되면, 모형의 영역을 격자 해상도를 고려하여 설정할 수 있으며, 다중 등지격자로 구성할 경우 Domain Wizard 유틸리티가 유용하게 사용된다(<http://esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>).