

## 2014년 특별관측 기간 동안 청미천 농경지에서의 WRF/Noah-MP 고해상도 수치모의

송지애<sup>1</sup> · 이승재<sup>1\*</sup> · 강민석<sup>1</sup> · 문민규<sup>1</sup> · 이정훈<sup>2</sup> · 김 준<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>국가농림기상센터, <sup>2</sup>유량조사사업단,

<sup>3</sup>서울대학교 협동과정농림기상학전공/생태조경지역시스템공학부/그린바이오과학기술연구원

(2015년 9월 1일 접수; 2015년 11월 9일 수정; 2015년 12월 20일 수락)

## High-Resolution Numerical Simulations with WRF/Noah-MP in Cheongmicheon Farmland in Korea During the 2014 Special Observation Period

Jiae Song<sup>1</sup>, Seung-Jae Lee<sup>1\*</sup>, Minseok Kang<sup>1</sup>, Minkyu Moon<sup>1</sup>, Jung-Hoon Lee<sup>2</sup> and Joon Kim<sup>1,3</sup>

*National Center for Agro-Meteorology, Seoul 151-742, Korea*

*<sup>2</sup>Hydrological Survey Center, Goyang 411-766, Gyeonggi, Korea*

*<sup>3</sup>Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology/Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering & Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Korea*

(Received September 1, 2015; Revised November 9, 2015; Accepted December 20, 2015)

### ABSTRACT

In this paper, the high-resolution Weather Research and Forecasting/Noah-MultiParameterization (WRF/Noah-MP) modeling system is configured for the Cheongmicheon Farmland site in Korea (CFK), and its performance in land and atmospheric simulation is evaluated using the observed data at CFK during the 2014 special observation period (21 August-10 September). In order to explore the usefulness of turning on Noah-MP dynamic vegetation in midterm simulations of surface and atmospheric variables, two numerical experiments are conducted without dynamic vegetation and with dynamic vegetation (referred to as CTL and DVG experiments, respectively). The main results are as following. 1) CTL showed a tendency of overestimating daytime net shortwave radiation, thereby surface heat fluxes and Bowen ratio. The CTL experiment showed reasonable magnitudes and timing of air temperature at 2 m and 10 m; especially the small error in simulating minimum air temperature showed high potential for predicting frost and leaf wetness duration. The CTL experiment overestimated 10-m wind and precipitation, but the beginning and ending time of precipitation were well captured. 2) When the dynamic vegetation was turned on, the WRF/Noah-MP system showed more realistic values of leaf area index (LAI), net shortwave radiation, surface heat fluxes, Bowen ratio, air temperature, wind and precipitation. The DVG experiment, where LAI is a prognostic variable, produced larger LAI than CTL, and the larger LAI showed better agreement with the observed. The simulated Bowen ratio got closer to the observed ratio, indicating reasonable surface energy partition. The DVG experiment showed patterns similar to CTL, with differences for maximum air temperature. Both experiments showed faster rising of 10-m air temperature during the morning growth hours, presumably due to the rapid growth of daytime mixed layers in the Yonsei University (YSU) boundary layer scheme. The DVG experiment decreased errors in simulating 10-m wind and precipitation. 3) As horizontal resolution increases, the models did not show practical



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

**improvement in simulation performance for surface fluxes, air temperature, wind and precipitation, and required three-dimensional observation for more agricultural land spots as well as consistency in model topography and land cover data.**

**Key words:** High-resolution, Atmospheric simulation, Farmland, Land surface model, WRF, Noah-MP

## I. 서 론

우리나라의 농경지 면적은 약 1,691천 ha로 국토의 약 17%를 차지하고 있다(통계청, 2014). 2015년 6월 3일자 기상청 보도 자료에 따르면 2015년 한반도 전국 누적 강수량은 평년대비 84%였으며, 중부 지역(서울·경기와 강원도)은 평년대비 57%의 극심한 가뭄이 발생하여 많은 농가들이 작물 피해를 입었다. 기후 변화로 인해 한반도 기온이 상승하고, 국지적 기상 이변 발생 빈도가 높아지는 요즘의 상황에서, 정부와 지자체들은 농작물 재배적지 변화에 효율적으로 대응하고, 가뭄, 폭설, 우박 등 기상 이변으로 인한 농작물 피해를 최소화하기 위하여 다방면으로 노력을 기울이고 있다.

오늘날은 개별 농가들에게 실제적인 도움을 줄 수 있도록, 집수역 규모나 필지 단위 규모 등 시공간적으로 매우 상세한 농업기상 정보의 제공을 요구한다. 이러한 상세농업기상 서비스를 가능케 하기 위해서는 고해상도의 지상 관측망 및 원격탐사 정보와 더불어 농경지에 특화된 고해상도 수치모델 시스템의 운용이 필수적이다. 국내에서는 2012년부터 시작된 차세대 도시·농림융합 스마트기상서비스 개발 사업(Choi *et al.*, 2012)을 통해 농림지 맞춤형 고해상도 수치모델링 연구가 1단계 3차년도인 2014년부터 수행 중에 있다. Lee *et al.*(2014)은 이 사업을 통해 경기도 포천 산림지에 고해상도 지형 자료를 장착한 WRF (Weather Research and Forecasting) 기상모델/Noah 지면모델 시스템을 구축하고, 산림지에서의 이산화탄소 순환을 이해하기 위하여 배수류를 비롯한 국지대기 순환을 상세히 모의하였다. Song *et al.*(2015)은 동일 지역에 대해 1/3초 고해상도 토지피복 자료와 Noah-MP 지면모델(Niu *et al.*, 2011)을 도입하여 추가적인 단기 모의 분석을 수행하였다. 그들은 1/3초 고해상도 지형고도 및 토지피복 자료의 도입으로 포천 산림지 부근의 기온이 관측과 더 높은 상관계수를 가지게 되고, 산림지 부근의 바람도 오차가 뚜렷이 개선됨을 보였다.

차세대 도시·농림 연구사업 외에도 가령 Lee *et al.*(2015)은 경상북도 봉화 산림지에 WRF 모델과

MUKLIMO 모델을 수행하여 이 지역의 산림 재해 예방 및 대응을 위한 산림 미기상 예측시스템을 구축하였고, Kim *et al.*(2014)는 WRF 모델과 2차원 지면모델 HRLDAS를 활용하여 강원도 양구 산림지의 기온을 모사하는 등 수치모델링 연구가 이루어졌다. 그러나 농경지에 대해서는 관측장비 운영 및 품질 관리된 실측자료가 부족하고(Choi *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2015) 농경지의 비균질성 등으로 인해 고해상도 수치모델링 연구가 매우 부족한 실정이다. 특히, 새로운 지면모델인 Noah-MP에 탑재되어 있는 동적 식생(dynamic vegetation)의 유용성에 대해서 Kim *et al.*(2013)이 해남 농경지에 대하여 1차원 오프라인 모드로 연구한 적이 있으나, 수치기상모델과 연동하여 대기과 지표간의 상호작용을 농경지에서 모의한 연구는 국내에서 아직 걸음마 단계에 있고, 충분한 테스트와 평가가 이루어져 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 2014년 8월 21일부터 9월 10일까지 약 20일 동안 특별관측(기존의 에디 공분산 플럭스타워에 추가로 이산화탄소/수증기/기온 프로파일 관측을 위한 프로파일 시스템을 설치하여 운용; Moon *et al.*, 2015)이 실시된 경기도 청미천 농경지에 대하여 고해상도 WRF/Noah-MP 시스템을 국내에서 처음으로 구축하고, Noah-MP 지면모델의 동적 식생을 가동하는 것이 단·중기 국지규모 수치모의 성능에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 관측 자료 및 분석 방법

특별관측은 2014년 8월 21일부터 9월 10일까지 경기도 청미천 유역 내의 논(37.16°N, 127.65°E, 141m above m.s.l.)에 위치한 청미천 관측지(Cheongmicheon Farmland site in Korea, CFK)에서 이루어졌다. 삼차원 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 개회로 가스분석기(EC150, Campbell Scientific Inc.)는 지면으로부터 9m 높이에 설치하였고 이 두 장비로부터 현열 및 잠열 플럭스가 계산된다. 벼 군락

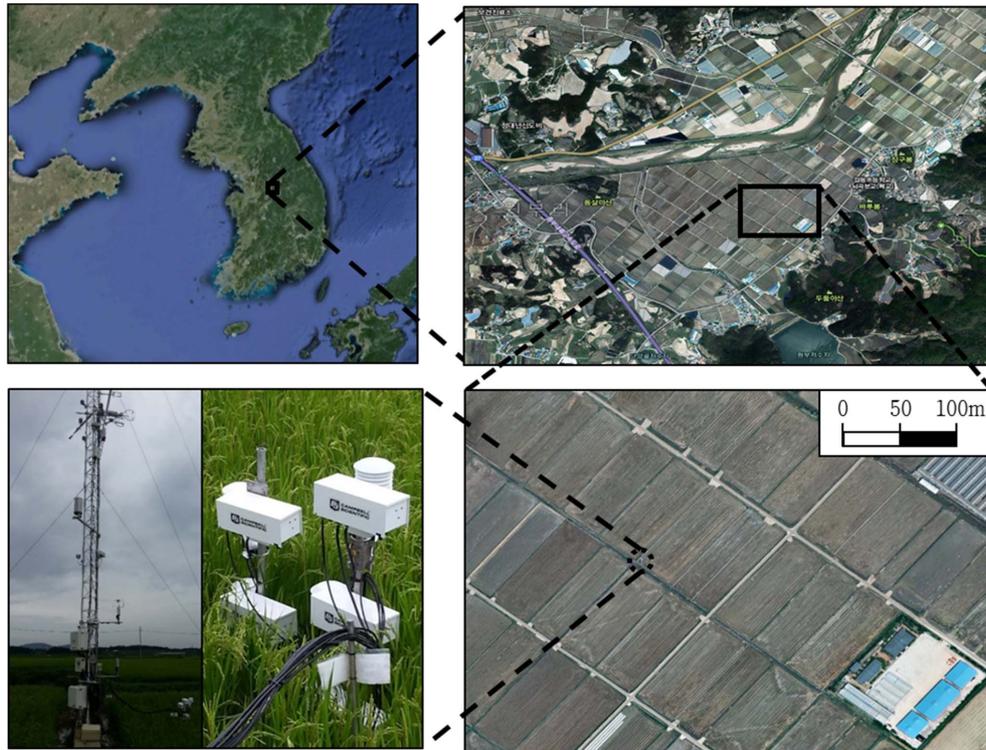


Fig. 1. Cheongmicheon Farmland site in Korea (CFK) on 20 August 2014.

(관측 기간의 벼 높이는 약 0.7m)과 지면 상태를 고려했을 때의 영면변위는 약 0.5m이다(Fig. 1). 프로파일 시스템(AP200, Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 기온을 높이 별로 측정하였는데, 해당 설치 높이는 지면으로부터 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3, 5, 9m이다. 논바닥은 물이 조금 차 있는 상태로 평균적으로 수심이 0.03m 이하였다. 벼는 거의 수고 성장을 멈춘 상태로 이삭이 여무는 시기였으며, 관측이 끝나고 20일 경과 후인 10월 1일경에 추수하였다. 관측지의 엽면적지수(leaf area index, LAI)와 복사(순단파복사, 순장파복사, 순복사) 측정은 각각 식생군락분석기(LAI-2200, LI-COR Biosciences Inc., USA)와 순복사계(CNR2, Kipp & Zonen Inc., Netherland)를 이용하여 이루어졌다.

모의 특징 및 성능 분석을 위하여, CFK 지점에서 모형의 10m 기온 및 바람을 9m 관측기온 및 관측바람과 비교하였으며, 모형의 2m 기온은 1m 관측기온과 3m 관측기온의 평균과 비교하였다. 모형의 지표면 잠열 및 현열 플럭스는 프로파일 시스템 관측자료를 사용하여 계산한 저류항(storage term)이 고려된 9m

관측 플럭스 값과 비교하였다. 2014년 특별 관측기간에는 CFK 지점에서 자체적으로 강수량을 관측하지 않았기 때문에 모형 강수는 CFK 주변에 있는 장호원(JHW: Janghowon), 점동(JD: Jeomdong), 여주(YJ: Yeju), 부론(BR: Buron) 지점의 시간당 관측 강수량 값과 비교하였다(Fig. 2). 모형과 관측 간의 검증을 위해 Bias, RMSE (root mean square error), RMSVE (root mean square vector error), r (correlation coefficient)을 모든 모형 도메인에 대해 산출하였다.

## 2.2. 기상 및 지면 모형과 수치실험 설계

본 연구에서 사용한 수치모형은 WRF V3.6.1로서, 모형의 초기 및 경계 자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공되는  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  수평 해상도의 FNL (Final) 분석장이다. 모형 도메인의 중심은 청미천 부근의 경기도 여주시 점동면 뇌곡리에 위치한 CFK 관측지이다(Fig. 1). 도메인 구성과 모형 역학 및 물리과정은 Lee *et al.* (2014)의 연구를 따르며, 모형 도메인은 수평격자 간격이 각각 21,870m(D01), 7,290m(D02), 2,430m(D03), 810m(D04),

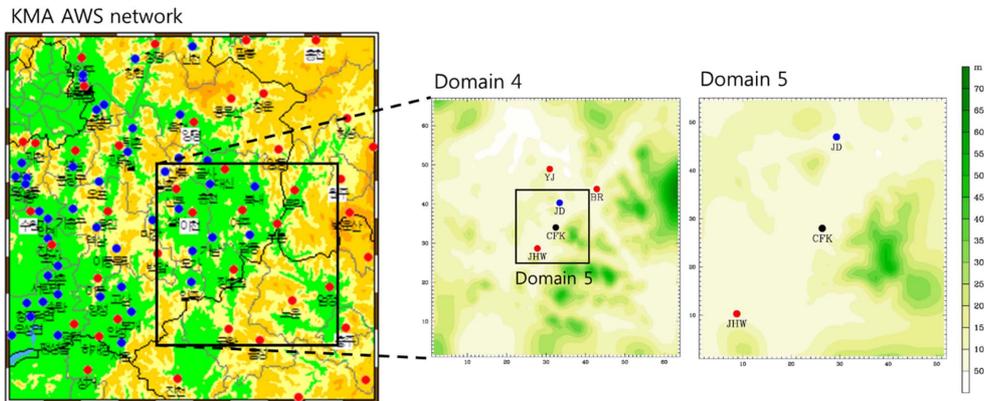


Fig. 2. The national observation sites around the CFK site. Model precipitation is compared with the observed precipitation at Janghowon (JHW), Jeomdong (JD), Yeosu (YJ), and Buron (BR). Model topography is shaded in green.

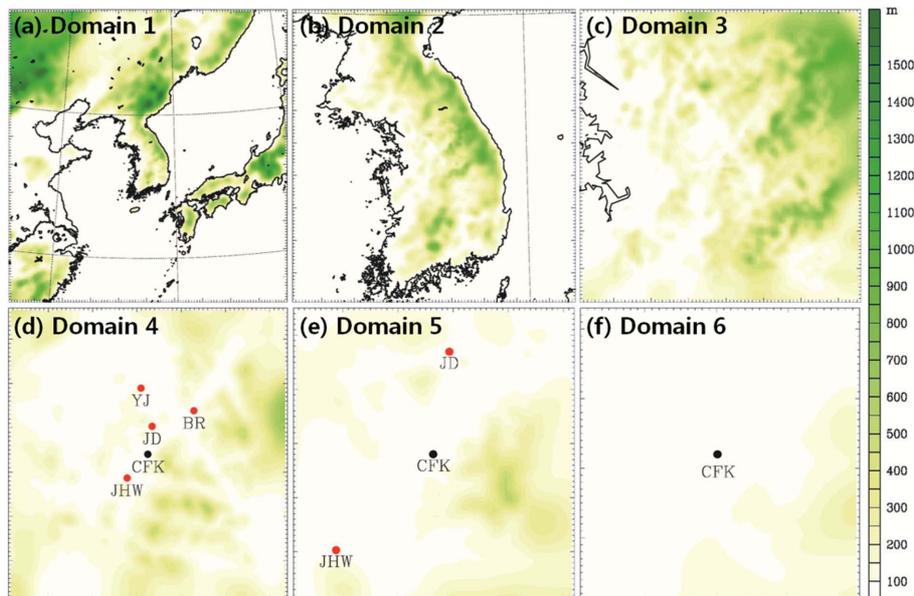


Fig. 3. Model domains and topography (unit: meters).

270m(D05), 90m(D06)인 6중 양방향 등지격자로 구성하였다(Figs. 2 and 3). 연직 층수는 38층으로서 지표면에서부터 50hPa까지에 이른다. 도메인 5(270m)의 수평 해상도는 국내에서 그와 비슷한 해상도로 다른 연구들에서 구축된 적이 있지만(예로, Seong *et al.*, 2013; 국립기상연구소, 2013), 본 연구에서는 도메인 6(90m)에서 더 높은 수평 해상도를 시도하였고 연직 층수도 더욱 증가되었다. 채택한 WRF 모형의 물리과정은 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-MP 지면 모형(Niu *et al.*, 2011)이다. 어미격자를 제외한 모든 등지격자 영역에서는 적운 모수화 과정을 사용하지 않고 구름 과정을 명시적으로 분해하도록 하였다.

Noah-MP 지면모형은 토양과 식생을 결합하여 하나로 취급하는 기존의 Noah 모형과는 달리 그 둘을 분리하여 처리한다. 이 모형은 (1) 양엽(sunlit leaves)과 음엽(shaded leaves)의 비율과 각 부분이 흡수하는 일

사를 계산하기 위해 군락 틈새(canopy gaps)를 고려하는 수정된 two-stream 복사전달 방안, (2) 기공저항과 양엽 및 음엽의 광합성을 서로 연관 짓는 수정된 Ball-Berry 기공저항 방안, (3) LAI와 녹색식생비율(green vegetation fraction, GVF)을 시간에 따라 예측하는 단기 동적 식생을 기존 Noah 모형에 도입하여 업그레이드 시킨 버전이다. 동적 식생에서 LAI와 GVF는 예측된 잎 탄소질량(leaf carbon mass,  $g\ m^{-2}$ )으로부터 전환되는데, 여기서 잎 탄소질량은 양엽과 음엽의 탄소동화에 따른 광합성, 잎의 유지와 성장에 따른 호흡, 추위 및 가뭄으로 인한 잎의 전환(leaf turnover)과 죽음 등에 의해 통제된다. 이 외에도 각각의 지면물리 과정에 대해 여러 방안들을 선택할 수 있도록 다중 모수화 옵션들을 제공하는데, 기공저항에 대한 토양수분 인자( $\beta$ )는 토양 수분, 뿌리를 포함한 토양층의 개수, 뿌리 영역에 해당하는 총 깊이를 이용하여 계산되고, 땅 위를 흐르는 빗물과 지하수의 방출은 TOP 모형에 기반을 둔 유출 모형(Niu *et al.*, 2007)을 통해 계산되며, 열에 대한 지표 교환계수는 상사이론에 근거한 Monin-Obukhov 방안으로 계산된다.

수치모의 실험은 Noah-MP의 옵션 중에서 동적 식생(dynamic vegetation)을 포함하지 않은(off) ‘CTL

실험’과 동적 식생을 포함한(on) ‘DVG 실험’으로 설계하였다. 가용 전산자원의 운용을 간단히 하고 자료처리를 단순화하기 위하여, 사례기간에 대해 약 8일 동안의 모형 적분 결과들을 상호 연결시켜 전체 기간에 대한 모의 결과를 구성하였다(예로, Lee *et al.*, 2013c). 특별관측 시작일 8월 21일 전후로 강수가 발생했으므로 강수 현상이 없는 시점을 모형 초기시각으로 택하기 위하여 8월 14일 21시부터 모형 적분을 시작하였다. 총 네 번의 8일 7시간 적분이 수행되었고 (①8월 14일 21시~8월 23일 03시; ②8월 21일 21시~8월 30일 03시; ③8월 28일 21시~9월 6일 03시; ④9월 4일 21시~9월 13일 03시), 각 8일 7시간 적분의 첫 27시간 자료는 모형의 스피ن-업(spin-up) 현상으로 분석에 이용하지 않았으며, 끝 4시간 자료는 모형 자료를 7일 분량의 단위로 만들기 위하여 편의상 사용하지 않았다.

### 2.3. 지형 및 토지피복 자료

모형에서의 지형과 토지피복 자료는 바다경계 조건으로서 모의 결과에 중요한 영향을 미친다. Park and Kim(2011)에 따르면 간척 사업으로 인한 토지이용의 변화가 계절에 따라 온도, 바람, 알베도에 영향을 주

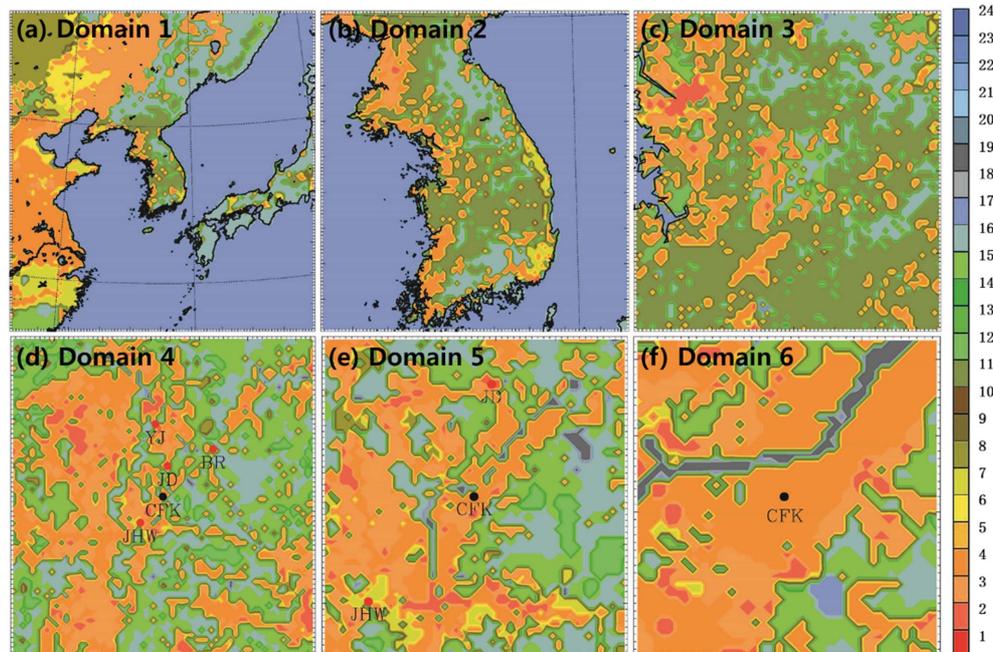


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for model land-cover type. Also see Table 1 for land-cover category information.

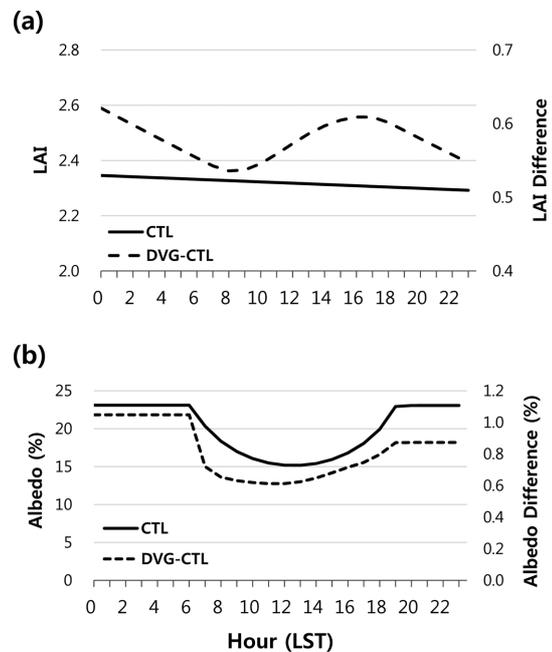
는 것을 보였으며, Seong *et al.*(2013)은 산불 모의에 있어 가장 중요한 요소인 연료(토지피복)와 지형 자료의 해상도에 따른 민감도 및 오차를 분석한 바 있다. 시공간적으로 큰 규모의 지역기후 연구에서도 토지피복 자료의 효과는 중요한 것으로 보고되고 있다(예로, Lee and Berbery, 2012; Lee *et al.*, 2013a and b). 본 연구에서는 Song *et al.*(2015)에서 사용한 지형 및 토지피복 자료를 관심 대상지에 적용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 청미천 지점을 중심으로 한 다중 도메인 격자의 지형도와 토지피복도의 모습이며, 해당 토지피복 분류는 Table 1과 같다. 도메인 1부터 도메인 3까지는 WRF 모형에 기본적으로 장착되어있는 30초 해상도 United States Geological Survey (USGS) 지형고도 및 토지피복 자료를 사용하였으며, 도메인 4부터 도메인 6까지는 국토지리정보원과 환경부에서 남한 지역에 대해 각기 개발한 1/3초 고해상도 수치지

형고도 자료와 토지이용 자료를 적용하였다. 첫 번째부터 세 번째까지의 도메인(Figs. 3(a)-(c)와 Figs. 4(a)-(c))에서보다 네 번째에서 여섯 번째까지의 도메인(Figs. 3(d)-(f)와 Figs. 4(d)-(f))에서 지형지세와 토지피복이 더 조밀하고 상세하게 표현되고 있음을 볼 수 있다. 또한 WRF에 기본적으로 장착되어있는 30초 해상도 USGS 토지피복 자료를 사용하면 우리나라 대부분이 초원(Savanna)으로 잘못 인식되지만, 새로운 지형 및 토지피복 자료를 사용하면 실제에 보다 더 가까운 토지피복을 갖게 된다(Song *et al.*, 2015). 관측 타워가 위치한 지점은 대부분 논인 농경지대에 위치해 있어 편평한 들판과 같으며(Fig. 1), 모형에서 토지피복은 USGS 카테고리의 3번에 해당하는 관개 농경지 혹은 목초지(irrigated cropland or pasture) 형태로 분류되므로, 타워 근처의 지세와 토지이용도가 새 자료에서 현실적으로 표현되었다(Fig. 4(f)). 관측 자료의 발자국(footprint) 크기가 대략 500-1,000m 이기 때문에 본 연구에서는 여섯 개의 도메인 중 810m 해상도를 갖는 네 번째 도메인(D04)에서 주된 분석을 실시하였으며, 아울러 총 여섯 개의 수평 해상도에 따른 모형 기상변수들의 거동과 모의 성능의 변이도 간략히 분석하고자 하였다.

**Table 1.** United States Geological Survey (USGS) land use category and description

Land Use Category	Land Use Description
1	Urban and Built-up Land
2	Dryland Cropland and Pasture
3	Irrigated Cropland and Pasture
4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
5	Cropland/Grassland Mosaic
6	Cropland/Woodland Mosaic
7	Grassland
8	Shrubland
9	Mixed Shrubland/Grassland
10	Savanna
11	Deciduous Broadleaf Forest
12	Deciduous Needleleaf Forest
13	Evergreen Broadleaf
14	Evergreen Needleleaf
15	Mixed Forest
16	Water Bodies
17	Herbaceous Wetland
18	Wooden Wetland
19	Barren or Sparsely Vegetated
20	Herbaceous Tundra
21	Wooded Tundra
22	Mixed Tundra
23	Bare Ground Tundra
24	Snow or Ice

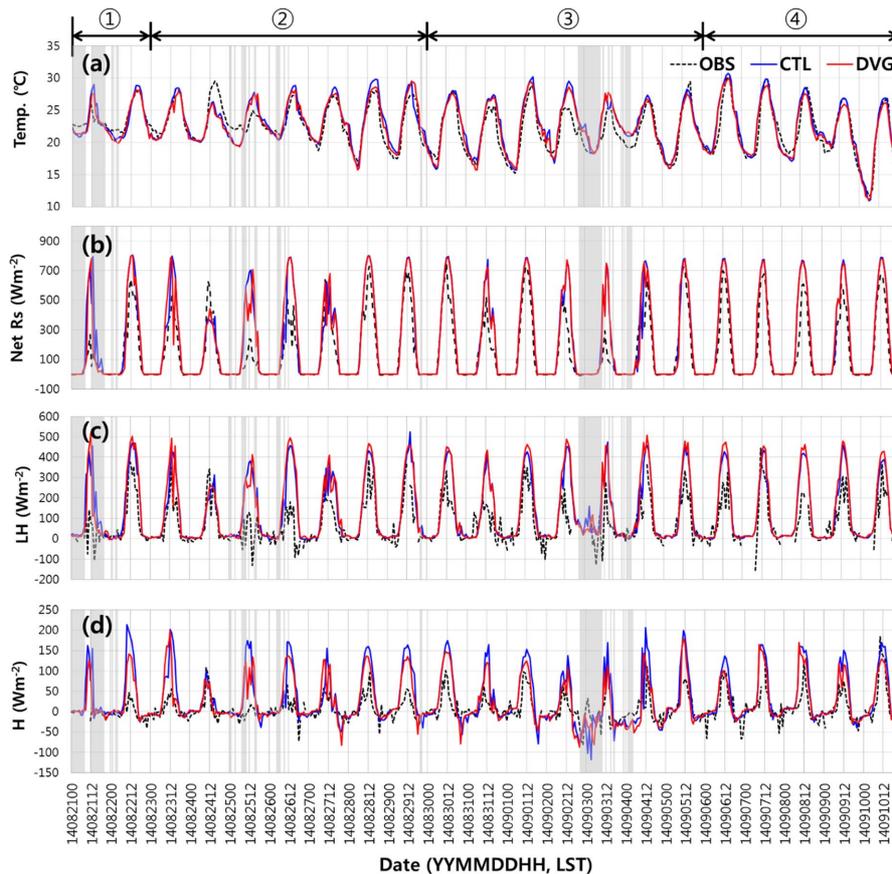


**Fig. 5.** Hourly mean diurnal cycle of simulated (a) leaf area index (LAI) and (b) albedo at CFK in domain 4.

### III. 결과 및 분석

Noah-MP에서 LAI는  $LAI = \max(m_{\text{leaf}} \times LAMP, LAI_{\text{min}})$ 로 계산되며, 여기서  $m_{\text{leaf}}$ 는 엽중 ( $\text{g m}^{-2}$ ), LAMP는 단위질량 당 엽면적, 아래첨자 min은 최소 값을 의미하고,  $LAI_{\text{min}}$ 의 기본값은  $0.05 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 이다. Noah-MP의 동적 식생에서 엽중을 계산하는 과정은 Dickinson *et al.*(1998)의 탄소수지 식을 보완한 것으로서, 광합성을 통한 탄소의 동화 및 식물체 저장소로의 할당과, 각 저장소로부터의 호흡 등을 다루고 있다. Fig. 5는 도메인 4의 CFK 지점에서 모의된 LAI와 지표면 알베도의 특별관측기간 평균 일변화(diurnal variation)이다. 동적 식생을 켜지 않은 CTL 실험은 과거 관측자료에 기반하여 미리 처방된 LAI 값을 사용하며 모의기간 동안의 평균 값은 약 2.3이었다(Fig.

5(a)). 그러나, 동적 식생을 작동시킨 DVG 실험은 그러한 과정들 및 기상학적 과정들에 따라 매 시간 스텝마다 엽중을 계산하고 LAMP를 곱하여 LAI를 구하므로 LAI 값의 시공간적인 변동이 있다. 그 결과, DVG 실험에서의 엽면적지수는 평균 2.9로서 CTL 실험에 비하여 약 0.6정도 커졌고, 비록 큰 차이는 아니지만 LAI가 주간에는 증가하고 야간에는 감소하는 변동도 보였다. CFK 사이트에서 2015년 9월 4일에 식생군락분석기로 현장에서 LAI 값을 측정할 결과 평균 3.1의 값을 얻었고, 청미천 농경지의 기후 및 경작활동이 특별관측이 실시된 2014년과 크게 다르지 않음을 고려할 때, DVG 실험이 CTL 실험보다 LAI 값을 실제와 더 가깝게 모의한 것으로 판단된다. 따라서, 과거 관측자료에 기반하여 미리 처방된 LAI를 사용하는 CTL 실험보다는, 강수, 온도, 복사, 가용 영양

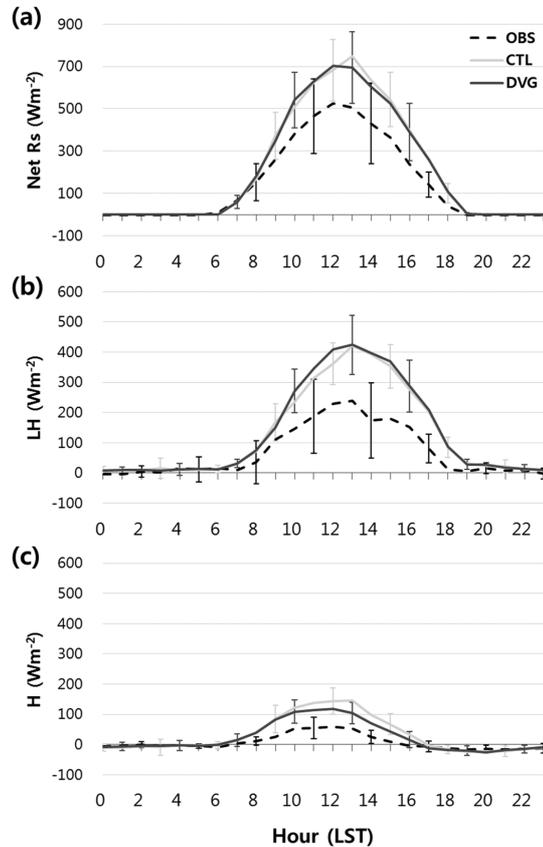


**Fig. 6.** Time series of the simulated (10 m) and observed (9 m) air temperatures (Temp.), net shortwave radiation (Net Rs), latent heat flux (LH) and sensible heat flux (H) at CFK in domain 4. CTL = WRF + Noah-MP with dynamic vegetation turned off; DVG = WRF + Noah-MP with dynamic vegetation turned on. ①~④ denote about 8-days long simulations described in Section 2.2. Rainy hours in JHW, a rain gauge station near CFK site, are shaded in grey.

소 등의 변동에 상응해서 시간에 따라 변화하는 동적 LAI를 채택하는 것이 이 지역에서의 수치모의와 예측에 유리할 것으로 여겨진다. 한편, 알베도는 CTL 실험에서 15~23%의 값을 보였으나, DVG 실험에서는 그 보다 약 1% 정도 증가된 값을 모의하였다(Fig. 5(b)). 이는 LAI가 증가함에 따라 하향 단파복사 에너지를 반사시키는 면적이 커지므로 지표면의 알베도가 증가한 것으로 분석된다.

Fig. 6은 청미천 특별관측 기간 동안 관측 및 모형의 기온(Temp.), 순단파 복사(Net Rs), 잠열(LH) 및 현열 플럭스(H)의 한 시간 간격 시계열이다. 여기서 순단파 복사는 하향 단파복사에서 상향 단파복사를 뺀 값이며, 기온은 9m 관측 기온과 10m 모형 기온을 비교한 것이다. 모형의 기온 모의는 관측 기온을 대체적으로 잘 따라가고 있으며, 9월 10일 00 LST에 하루 만에 최저 온도가 약 8°C 급격하게 떨어지는 현상도 잘 포착해 내고 있다. 동적 식생을 포함하지 않은 CTL 실험은 낮 최고기온을 과대 모의하는 경향을 보이며, 동적 식생을 포함한 DVG 실험은 이러한 과대 모의를 줄여주어 CTL보다 관측에 더 가깝게 다가가는 결과를 보였다. 순단파 복사의 시계열을 살펴보면 모형이 관측에 비해 주간에 과대 모의하는 경향이 있음을 보여 준다. 잠열과 현열 플럭스 역시 전반적으로 과대 모의하는 경향을 보이며, 이는 순단파 복사의 과대 모의에 주로 기인한다. 기온, 순단파 복사, 잠열과 현열 플럭스 시계열 모두에서 일부 구간(8월 21일, 8월 25일, 9월 3일 전후)에서는 모형과 관측의 차이가 다른 구간에 비해 크게 나타났는데, 이는 주로 강수 발생(Fig. 6의 회색 음영 부분) 및 그 전후 시간대에 해당하였다. 맑은 날에는 모형이 크기, 방향, 위상 면에서 관측을 비교적 잘 따라가지만, 강수가 나타난 시간 대에는 모형의 모의 능력이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 특별관측 기간 동안 CFK 지점에서 관측과 모형의 순단파 복사, 잠열 및 현열 플럭스의 평균 일변화와 오차 막대(±표준편차)를 보여 준다. Fig. 7(a)는 모형의 순단파 복사가 Fig. 6에서와 마찬가지로 관측에 비해 과대 모의하는 경향이 있으며, 이는 잠열과 현열 플럭스의 과대 모의로 이어지는 모습을 보이고 있다. 최대 순단파복사는 관측이 낮 12시에 525W m<sup>-2</sup>인데 비하여 CTL 실험은 그 보다 약 225W m<sup>-2</sup>가 많은 749W m<sup>-2</sup>를 보이고, 동적 식생을 가동한



**Fig. 7.** Hourly mean diurnal cycle of the observed and simulated (a) net shortwave radiation (Net Rs), (b) latent (LH) and (c) sensible heat fluxes (H) at CFK in domain 4.

DVG 실험은 그보다 다소 낮은 703W m<sup>-2</sup>의 최대값을 보인다. 최대 순단파 복사의 시점은 CTL이 관측에 비해 한 시간 지연되어 13시에 나타난 반면, DVG 실험은 관측과 동일한 시점을 모의하였다. 표준편차는 관측과 CTL, DVG 실험 모두에서 최대 값이 나타나는 정오 전후로 표준편차가 증가하며, 최대 약 200W m<sup>-2</sup> 정도의 값을 보인다. CTL 실험에 비해 DVG 실험의 순단파 복사가 대체로 감소하는 것은 DVG 실험에서 반사도가 증가하였기 때문으로 설명될 수 있다(Fig. 5(b)).

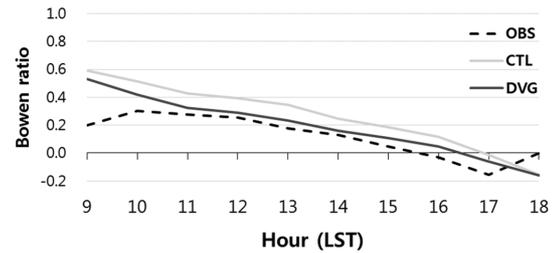
Fig. 7(b)는 모형이 잠열 플럭스를 관측보다 과대 모의하고, 과대 모의되는 양은 13시에 최대 약 200W m<sup>-2</sup>에 이르는 모습을 보여준다. 관측된 잠열 플럭스는 13시에 1차 피크를 보이고 15시에 2차 피크를 보였지만, 모형은 15시의 2차 피크를 전혀 모의하지 못하였다. 표준편차가 가장 크게 나타나는 시기는 관측, CTL 실험,

**Table 2.** Correlation coefficient (r) for simulated and observed latent and sensible heat fluxes ( $W m^{-2}$ ) at CFK

	Exp.	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
LH	CTL	<b>0.79</b>	0.76	0.77	0.77	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>
	DVG	<b>0.79</b>	<b>0.77</b>	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>	0.77
H	CTL	0.62	0.69	<b>0.70</b>	<b>0.70</b>	0.61	<b>0.61</b>
	DVG	<b>0.64</b>	<b>0.70</b>	0.69	0.68	<b>0.62</b>	<b>0.61</b>

DVG 실험 모두에서 잠열 플럭스의 피크가 나타나는 시점이 아닌 14시로서, 각각 약  $90W m^{-2}$ ,  $110W m^{-2}$ ,  $120W m^{-2}$ 의 값을 갖는다. 이 시각은 관측에서 2차 피크가 나타나기 직전에 잠열 플럭스가 감소하는 시각과 일치한다. DVG 실험은 CTL 실험에 비해 잠열 플럭스가 다소 증가했으며, 이는 Fig. 5(a)에서 열면적지수가 증가함에 따라 증발산이 증가되었기 때문으로 볼 수 있다. 한편, 모형은 현열 플럭스에 대해서도 관측보다 과대 모의하는 경향을 보였다(Fig. 7(c)). 관측된 현열 플럭스는 낮 12시에 피크를 보였고, DVG 실험은 이 피크를 잘 포착하였지만 CTL 실험은 한 시간 늦게 이 피크를 모의하였다. 동적 식생을 포함한 DVG 실험은 동적 식생을 포함하지 않은 CTL 실험에 비해 최대 약  $50W m^{-2}$ 의 현열 플럭스가 감소하는 모습을 보였으며, 이는 모의 기온의 온난 편차를 감소시키는 역할을 한 것으로 분석된다. 표준 편차는 관측, CTL 실험, DVG 실험 모두에서 최대 약  $50W m^{-2}$  정도의 값을 보였다. 관측-모형 간 잠열 플럭스의 상관계수는 동적 식생을 포함시켰을 때 대체로 증가하였으나 현열 플럭스의 경우에는 효과가 없었으며, 해상도 증가에 따른 모의 개선 효과는 잠열 및 현열 플럭스 모두에서 나타나지 않았다(Table 2).

순단과 복사, 잠열 및 현열 플럭스 모두에서 모형은 과대 모의하는 것을 볼 수 있다. 들어오는 순단과 에너지를 관측과 다르게 모의하는 상태에서, 현열과 잠

**Fig. 8.** Same as Fig. 7, but for Bowen ratio.

열 플럭스를 잘 모의하였는가를 판단하기에는 다소 어려움이 있으므로, 잠열 플럭스에 대한 현열 플럭스의 비인 보웬비(Bowen ratio)를 살펴보았다. Fig. 8은 특별관측 기간 동안 CFK 지점에서 관측과 모형의 보웬비의 평균 일변화이다. 여기서 주간의 효과만을 보기 위해 순단과 복사가  $100W m^{-2}$  이상일 때의 값만을 뽑아내었다. 그 결과 7시부터 18시까지의 값이 추출되었으며, 그 중 7시와 8시는 자료의 공백이 크기 때문에 그림에서 제외하였다. CTL 실험과 DVG 실험은 관개된 농경지에서 낮 동안 시간에 따라 감소하는 관측 보웬비의 경향을 10시부터 17시까지 잘 따라가고 있으며, DVG 실험은 실측에 더 가까운 값을 모의하였다. 비록 순단과 복사와 잠열 및 현열 플럭스가 관측에 비해 과대 모의되었지만, 난류 플럭스들 간의 비는 관측과 유사함을 보여 주는 것이어서 긍정적인 요소로 판단된다.

**Table 3.** Bias, root mean square error (RMSE), and correlation coefficient (r) for 10 m simulated and 9 m observed temperatures ( $^{\circ}C$ ) at CFK in all model domains

	Exp.	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
Bias	CTL	0.26	0.51	0.62	0.59	0.56	0.56
	DVG	<b>-0.02</b>	<b>0.22</b>	<b>0.33</b>	<b>0.30</b>	<b>0.27</b>	<b>0.26</b>
RMSE	CTL	1.50	1.58	1.62	1.61	1.64	1.65
	DVG	<b>1.43</b>	<b>1.47</b>	<b>1.48</b>	<b>1.47</b>	<b>1.49</b>	<b>1.49</b>
r	CTL	0.91	<b>0.91</b>	0.91	<b>0.92</b>	0.91	0.91
	DVG	<b>0.92</b>	<b>0.91</b>	<b>0.92</b>	<b>0.92</b>	<b>0.92</b>	<b>0.92</b>

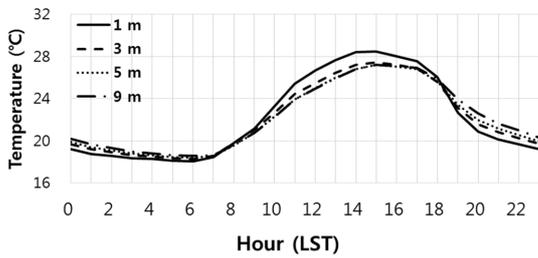


Fig. 9. Same as Fig. 7, but for observed air temperatures (°C) at 1 m, 3 m, 5 m, and 9 m.

Table 3는 9m 관측 기온과 10m 모형 기온의 통계 결과 요약표이다. CTL 실험은 모형이 평균적으로 약 0.3~0.6°C의 온난 편차를 가지고 있음을 보여 준다. DVG 실험은 모든 도메인에서 CTL 실험보다 Bias, RMSE 값을 향상시켰고, r 값도 CTL 실험과 대등한 관측-모형 상관관계를 보여 기온 모의에 있어서 개선된 성능을 보였다. 이는 엽면적이 증가함에 따라 증발산이 증가하고 현열로의 에너지 배분이 줄어들면서 균락의 온도가 감소했기 때문에 기온의 과대 모의가 완화된 것으로 분석된다. 한편, 해상도 향상에 따른 모의 성능의 개선은 실험 별로 상이함을 알 수 있었는데, CTL 실험의 상관계수는 도메인 4에서 제일 나은 결과를 보였으나 나머지 실험들은 고해상도에 따른 성능 개선이 없었다.

Fig. 9은 청미천 특별관측 기간 동안 높이 1, 3, 5,

9m에서 관측된 기온의 평균 일변화이다. 1m에서는 최저기온이 6시에, 최고기온이 15시에 나타났으며, 10°C 가 넘는 일교차를 보였다. 그 위 3, 5, 9m에서의 기온은 1m에서와 동일한 시점에 최저/최고기온 보이나, 지표면에서 멀어질수록 일교차는 조금씩 줄어드는 모습이다. 5m와 9m 고도 간의 기온 차이는 1m와 3m 고도 간의 기온 차에 비해 매우 작으며, 특히 연직 난류 혼합이 왕성한 낮 시간 동안에 그러하다. 이는 9m 기온과 10m 기온 간에는 주간 차이가 더더욱 작을 것임을 암시하므로, Fig. 6에서의 10m 모형기온과 9m 관측기온 간 비교가 타당함을 말해 준다.

Fig. 10은 2m 모형기온과 2m 관측기온(Fig. 10(a)), 그리고 10m 모형기온과 9m 관측기온(Fig. 10(b))의 평균 일변화이다. 먼저 CTL 실험과 DVG 실험은 최저기온과 최고기온의 크기와 시점을 관측기온에 전반적으로 가깝게 잘 표현하고 있는 것으로 보여진다. 특히, 이슬과 서리 등 엽면수분과 관련이 있는 최저기온을 2m와 10m 높이에서 0.3°C 오차 이내로 모의하고 있는 것은 고무적이다(Figs. 10(c) and (d)). 최고기온에 대한 모의는 최저기온에 비해 다소 그 정확도가 떨어졌고 0.9°C 오차 이내로 모의하였다. 반면, CTL 실험과 DVG 실험은 관측에서 벗어난 모습도 보여준다. 2m에서의 일변화와 비교해 볼 때, 10m에서 두 실험의 기온은 6시에서 15시까지에 이르는 구간 동안 관측기온에 비해 뚜렷하게 높음을 보여 준다(Figs.

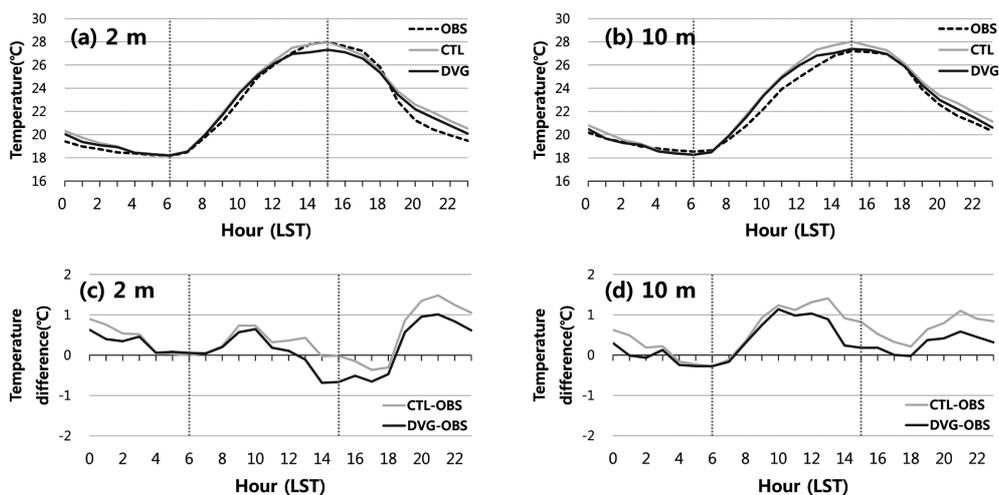


Fig. 10. Hourly mean diurnal cycle of (a) simulated 2 m and observed 2 m air temperatures (°C) and (c) difference between observed 2 m and simulated 2 m temperatures at CFK in domain 4. (b) and (d) same as (a) and (c), but for simulated 10 m and observed 9 m air temperature (i.e., averages of the observed 1 m and 3 m air temperatures).

**Table 4.** Root mean square vector error (RMSVE) for simulated 10 m and observed 9 m wind ( $m s^{-1}$ ) at CFK

RMSVE	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
CTL	2.01	2.12	2.34	2.63	<b>2.81</b>	2.88
DVG	<b>1.97</b>	<b>2.10</b>	<b>2.32</b>	<b>2.62</b>	<b>2.81</b>	<b>2.86</b>

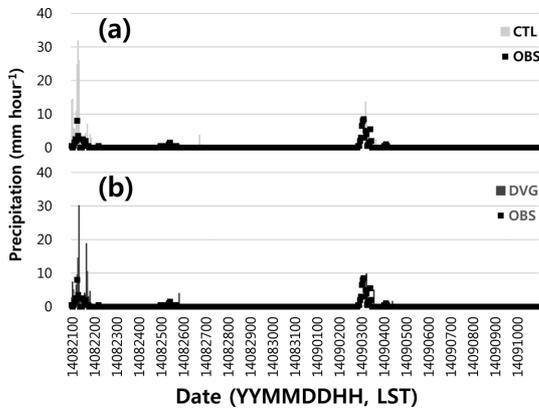
10(b) and 10(d)). 이는 YSU 방안을 채용한 두 수치 실험의 10m 기온 값이 관측 값에 비해 온난하게 표현되고 있는 것이다. 이처럼 10m 기온모의가 2m 기온모의에 비해 뚜렷한 온난화 현상을 보이는 것은 YSU 경계층 방안이 갖는 주간 혼합층의 초기 성장 특성과 어느 정도 관련이 있을 수 있다(Lee and Kawai, 2011).

바람벡터 U(동서) 성분과 V(남북) 성분에 대한 9m 관측과 10m 모형의 통계 값을 비교해 보면(Table 4), U 성분과 V 성분 모두 대체로 모형이 풍속을 과대 모의하는 경향을 보였으며, 패턴도 기온에 비해 관측과 상이한 결과를 보였다(그림 생략). 바람벡터 오차인 RMSVE는 0에 가까울수록 관측 값에 가깝게 다가감을 의미하는데, 각 도메인에 대해 약 2.0~3.7m  $s^{-1}$ 의 오차를 보여 현장에서 실측된 바람장을 모형이 제대로 모의하지 못함을 보여 준다. 또한 기온에 비해 바람은 시공간적으로 더 민감하게 변하는 변수로서 두 실험 모두 해상도 증가에 따라 오차가 증가하는 면을 보였다. 이는 바람 변수가 온도에 비해 모형 예측성이 떨어지는 변수임을 다시 확인시켜 주는 결과이며, 이러한 단점은 WRF 수치모형을 비롯한 모든 격자모형들이 공통적으로 가지고 있는 문제점이기도 하다. 한편, 동적 식생을 포함한 DVG 실험은 동적 식생을 포함하지 않은 CTL 실험에 비해 모든 도메인에서 미미하지만 일관되게 바람의 RMSVE가 줄어드는 모습을 보여주었다. 동적 식생 옵션의 효과를 살펴보기에는 실험 기간이 짧았기 때문에 생장기 전체 기간에 걸친 수치실험을 통해 그 효과를 더욱 면밀히 분석할 필요가 있다.

본 연구의 청미천 농경지에서의 CTL와 DVG의 바람 모의 결과는 산림지에 대한 Song *et al.*(2015)의 연구 결과와 비교해 볼 수 있다. Song *et al.*(2015)의 도메인 중심 지점은 경기도 포천의 소규모 복잡 산림지로서 청미천의 편평한 농경지에 비해 정확한 수치모의를 하기 어려운 지형적 조건을 가지고 있다. 하지만, 모든 도메인(D01~D06) 및 실험 평균 RMSVE 값은 광릉 산림지의 경우 약 2.1m  $s^{-1}$ 로서 청미천 농경지의 약 2.5m  $s^{-1}$  보다 다소 작았다. 이는 광릉에서의 수치모의는 2일에

해당하는 짧은 기간 동안 강수가 없는 맑은 날에 대해 수행되었지만, 청미천 수치모의는 약 20일에 해당하는 다소 긴 기간 동안에 크게 세 차례의 강수가 포함되어 있기 때문으로도 일부 설명할 수 있다. 특히 강수가 발생한 9월 2일~9월 4일의 기간 동안의 청미천 바람 모의는 나머지 기간의 다른 날들에 비해 바람을 약 5m  $s^{-1}$  정도 강하게 모의하였고(그림 생략), 이것이 오차의 증가에 기여한 것으로 분석되었다. 좀 더 자세히 살펴보기 위해 강수 시각과 무강수 시각으로 분류하여 9m의 바람 관측 값과 10m의 바람 모형 값을 RMSVE를 통해 비교하였다. 강수량이 4지점(JHW, JD, YJ, BR)에서 모형 또는 관측 중 하나 이상의 값에서 0보다 큰 값이 나타나는 경우를 강수시로 구분하였으며, 모형과 관측 값이 모두 강수량이 0인 경우를 무강수시로 구분하였다. CTL 실험에서 강수시 바람 성분(U, V)의 RMSVE는 3.0m  $s^{-1}$ 이고, 무강수시에는 2.3m  $s^{-1}$ 이며, DVG 실험에서 강수시 RMSVE는 2.8m  $s^{-1}$ 이며, 무강수시에는 2.4m  $s^{-1}$ 이다. CTL 실험과 DVG 실험에서 모두 무강수시의 RMSVE가 더 작은 오차를 보여 바람을 모의하는데 있어 강수는 중요한 요소로 작용된다는 것을 알 수 있다. 특히, CTL 실험에서 0.7m  $s^{-1}$ 의 오차가 줄어드는 것을 보여 강수의 유무에 따른 바람의 예측 정확도가 민감하게 작용하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11는 모형이 모의한 시간당 강수량을 CFK 관측지 주변 장호원(JHW) 지점의 강수량과 비교한 시계열 그림이다. 특별관측 기간 동안 장호원에서는 8월 21일, 8월 25일, 9월 3일 전후로 크게 총 세 차례의 강수가 발생한 것을 볼 수 있다. 1차 및 3차 강수는 시간당 최대 9mm 정도로 약 하루 동안 발생했고, 2차 강수는 시간당 2mm 정도로 약 12시간에 걸쳐 발생했다. 이 기간에 대해서 모형들은 관측과 동일하게 세 차례의 주요 강수 시그널을 포착하고 있다. 1차 강수량을 전반적으로 과대 모의하는 특징을 보이지만, 3차 강수는 강수량과 강수의 시작 및 종료 시점을 관측에 가깝게 따라갔으며, 특히 동적 식생을 포함한 DVG 실험이 그러했다. 일반적으로 모형의 여름철 강수모의 성능이 낮음을 감안할 때, 특별관측 기간에 보



**Fig. 11.** Time series of simulated and observed precipitation ( $\text{mm hour}^{-1}$ ) at JHW site in domain 4.

인 본 연구의 강수 모의 결과는 고무적인 것으로 생각된다. Table 5는 청미천 관측 타워에서 제일 가까운 주변 네 곳의 AWS 관측 지점인 장호원(JHW), 점동(JD), 여주(YJ), 부론(BR) 지점에 대해 강수량 검증 통계량 결과이다. 동적 식생을 포함시킨 DVG 실험은 도메인 5에서의 장호원 지점을 제외한 모든 도메인과 지점에서 CTL 실험보다 강수모의 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 해상도가 높아짐에 따라 예측 정확도의 향상은 다소 상이하게 나타나는데, 일부 지점에서 다소 개선이 있었었지만 대부분의 지점에서 개선이 없었다.

#### IV. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 고해상도 지형 및 토지피복 자료 기

반의 WRF 기상모형/Noah-MP 지면모형 결합시스템을 청미천 농경지대를 중심으로 구축하고, 2014년 8월 21일부터 9월 10일까지 실시된 청미천 하계 특별관측을 통해 얻어진 자료를 활용하여 이 지역에서의 수치모의 성능을 평가하였다.

해당 기간에 대한 수치모의 실험 결과, Noah-MP의 동적 식생을 포함시키는 것은 포함시키지 않은 경우에 비해 엽면적지수, 단파 복사, 지표면 플럭스, 기온, 바람, 강수의 모의가 청미천 실측 자료에 더 다가가는 것으로 나타났다. 낮 동안의 순단파 복사 에너지가 과대 모의의 됨에 따라 현열 및 잠열 플럭스의 모의에 있어서도 관측에 비해 과대 모의하는 경향을 보였으나, 동적 식생 구동 시의 보웬비는 모형과 관측이 유사하여 난류 플럭스의 분배가 적절히 모의되었음을 확인하였다. 일 최저기온의 모의가 관측과  $0.3^{\circ}\text{C}$  오차 이내의 성능을 보여 준 것은 동해 및 병해충과 연관된 엽면수분 지속시간 예측과 관련하여 고무적인 결과이다. 동적 식생의 포함 유무에 관계 없이 모형은 주간 혼합층의 빠른 발달 모의로 인해 일출 후 기온의 증가 속도가 관측에 비해 빠른 모습을 보였지만, 최저 기온 및 최고 기온의 시점을 잘 모의하였다. 이는 YSU 경계층 방안이 갖는 혼합층의 초기 성장 특성과 연관이 있는 것으로 분석된다. 이와 관련하여, 향후 비국지 경계층 방안의 테스트를 비롯하여 최근 고해상도에서의 아격자규모 난류 모의의 새로운 대안(Shin and Hong, 2015)을 시도해 볼 계획이다. 모형은 강수를 과대 모의하는 경향을 보였으나 강수의 시작·종료 시점은 대체로 잘 포착하였으며, 동적 식생을 포함하게

**Table 5.** Bias and root mean square error (RMSE) for surface precipitation ( $\text{mm hour}^{-1}$ ) at Janghown (JHW), Jeomdong (JD), Yeosu (YJ), and Buron (BR) rain gauge sites in all model domains

(a) JHW							(b) YJ					
	Exp.	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4	Domain5	Exp.	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4	
Bias	CTL	0.22	0.26	0.26	0.26	<b>0.26</b>	Bias	CTL	0.10	0.11	0.12	0.14
	DVG	<b>0.14</b>	<b>0.13</b>	<b>0.17</b>	<b>0.18</b>	0.35	DVG	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>	<b>0.13</b>	
RMSE	CTL	1.84	2.15	2.23	2.28	2.29	RMSE	CTL	1.75	1.83	1.88	2.00
	DVG	<b>1.35</b>	<b>1.44</b>	<b>1.73</b>	<b>1.90</b>	<b>2.04</b>	DVG	<b>1.54</b>	<b>1.66</b>	<b>1.82</b>	<b>1.97</b>	
(c) JD							(d) BR					
	Exp.	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4	Domain5	Exp.	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4	
Bias	CTL	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21	Bias	CTL	0.17	0.18	0.17	0.17
	DVG	<b>0.13</b>	<b>0.14</b>	<b>0.13</b>	<b>0.13</b>	<b>0.13</b>	DVG	<b>0.13</b>	<b>0.15</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	
RMSE	CTL	1.68	1.87	1.93	1.94	1.93	RMSE	CTL	1.59	1.81	1.81	1.83
	DVG	<b>1.30</b>	<b>1.40</b>	<b>1.36</b>	<b>1.38</b>	<b>1.39</b>	DVG	<b>1.28</b>	<b>1.52</b>	<b>1.63</b>	<b>1.67</b>	

되면 강수의 과대 모의가 어느 정도 완화되는 개선점을 보였다.

수평 해상도의 증가에 따른 청미천 농경지의 수치모의 성능 향상은 지표면 플럭스, 기온, 바람 강수 모두에서 미비하거나 거의 없는 것으로 나타났다. 모형 도메인 1~3과 도메인 4~6에 각각 서로 다른 지형고도 및 토지피복 자료가 사용되었기 때문에, 도메인 1에서부터 도메인 6까지 해상도의 증가에 따른 모형의 수치모의 효과 분석은 한계가 있을 수 밖에 없다. 하지만, 고해상도로 감에 따른 이러한 모형의 모의성능 경향을 대략적으로 가늠하고 모의성능을 높이기 위한 전략을 세우는데 1차적으로 유용한 정보라 판단된다. 이와 관련하여, 향후 남한 지역은 물론 동아시아 지역 전체를 커버하는 고해상도 지형 및 토지피복 자료(예로, Kang *et al.*, 2010)나 지형 효과의 개선(예로, Jimenez and Dudhia, 2012)을 적용하는 연구를 추진할 필요가 있다. 또한 CFK 한 지점의 관측 자료를 이용하여 모형의 모의를 평가한 것이어서, 모형 해상도에 따른 모의 개선 효과를 보다 정확히 평가하기 위해서는 농경지 상의 여러 지점에서 입체적인 관측이 동시에 이뤄져야 할 것이다. 이를 위해 모바일 관측 시스템은 현실적으로 유용한 방안으로서 지금 청미천 농경지에 추가 설치 되어 시험 운영 중에 있으며 품질 관리를 거쳐 모형 검증에 활용할 예정이다.

본 연구 결과를 바탕으로 해서, 추후 식물 생장기 전체에 걸친 장기 수치모의와 다른 식물생태계 및 농림기상 변수들에 대해서도 고해상도 모의 평가를 실시할 예정이다. 본 연구에서 구축된 1/3초 고해상도 지형고도 및 토지이용도에 기반한 최신 WRF/Noah-MP 모델링 시스템은 국가농림기상센터의 기본 지면-대기 모델링 플랫폼을 구성한다. 모델링 플랫폼을 통해 생산되는 모형 결과물은 차세대 도시·농림융합 스마트 기상서비스 개발 사업의 '맞춤형 농림기상서비스 핵심 기술 기반 구축'에서 개발 중인 농림생태계 물수지 모형(Hong *et al.*, 2015a and b)과 작물 모형 등에 고도화 기상자료로서 제공될 계획이다.

## 적 요

본 연구에서는 청미천 농경지를 중심으로 고해상도 지형 및 토지피복 자료 기반의 WRF/Noah-MP 결합시스템을 구축하고 수치모의의 한 결과를 2014년 8월 21일부터

9월 10일까지의 청미천 하계 특별관측 자료와 비교하여, 농경지에서의 지면 및 대기모의 성능을 평가하였다. 지면 및 대기 변수의 단기 및 중기모의에 있어서 Noah-MP의 동적 식생 가동이 얼마나 유용한지를 살펴보기 위하여, 동적 식생을 포함하지 않은 실험(CTL)과 포함한 실험(DVG)을 관측기간에 대해 양방향 6중 동지격자 시스템으로 수행하였다. 본 연구의 결과는 크게 세 가지로서 다음과 같다. 1) CTL 실험은 낮 동안의 순단파 복사 에너지를 과대 모의 함에 따라 현열 및 잠열 플럭스와 보웬비도 관측에 비해 과대 모의하는 경향을 보였다. CTL 실험의 기온은 관측을 대체로 잘 따라갔으나 일출 후 기온의 상승 속도가 관측에 비해 빠른 모습을 보였다. 최저 기온 및 최고 기온의 시점은 잘 모의하였는데, 특히 일 최저기온의 모의는 관측과 0.3°C 오차 이내의 성능을 보여, 동해 및 병해충과 연관된 엽면수분 지속시간 예측에 고무적인 결과로 평가되었다. CTL 실험의 10m 바람은 동서 및 남북 풍속 모두 대체로 과대 모의하는 경향을 보였고, 강수 또한 과대 모의하는 경향을 보였으나 강수의 시작종료시점은 대체로 잘 포착하였다. 2) Noah-MP의 동적 식생을 구동시킨 DVG 실험은 CTL 실험에 비해 엽면적지수, 단파 복사, 지표면 플럭스, 보웬비, 기온, 바람, 강수의 모의를 전반적으로 관측에 더 가깝게 생산하는 것으로 나타났다. 강수, 온도, 복사, 가용 영양소 등의 변동에 대응하여 엽면적지수를 예단하는 DVG 실험은 CTL 실험보다 더 큰 엽면적지수를 생산했으며, 이는 실측에 더 가까운 결과였다. DVG 실험에서도 일출 후 기온 상승률은 관측에 비해 높았는데, 이는 CTL과 DVG 실험 모두에서 공통으로 사용한 YSU 경계층 방안이 갖는 혼합층의 조기 성장 특성과 관련이 있는 것으로 분석되었다. CTL 실험이 보인 바람과 강수의 과대모의 경향도 DVG 실험에서는 어느 정도 완화되는 개선점을 보였다. 3) 수평 해상도의 증가에 따른 청미천 농경지의 수치모의 성능 향상은 지표면 플럭스, 기온, 바람 강수 모두에서 미비하거나 거의 없는 것으로 나타났으며, 보다 정확한 평가를 위해서는 농경지 상의 여러 지점에서 입체적인 관측이 이뤄져야 하고, 모형에 사용되는 지형 및 토지피복 자료의 도메인 간 일관성이 확보되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서

비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다 (KMIPA-2012-0001-2). 청미천 관측지에서 관측이 이뤄질 수 있도록 협조해주신 유량조사사업단과 한강홍수통제소에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Choi, S. W., S.-J. Lee, J. Kim, B.-L. Lee, K. Kim, and B. C. Choi, 2015: Agrometeorological observation environment and periodic report of Korea Meteorological Administration: current status and suggestions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(2), 144-155.
- Choi, Y. J., and Coauthors, 2012: The WISE Project. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 20-21.
- Dickinson, R. E., M. Shaikh, R. Bryant, and L. Graulich, 1998: Interactive canopies for a climate model. *Journal of Climate* **11**, 2823-2836.
- 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.
- 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.
- Hong, M.-K., J.-Y., Choi, S.-J. Lee, S.-H. Lee, and S. Lee, 2015a: Estimation of soil moisture and irrigation water requirement using WRF meteorological data. The 2015 Korean Society of Agricultural Engineers (KSAE) Annual Conference.
- Hong, M.-K., S.-H. Lee, J.-Y. Choi, S.-H. Lee, and S.-J. Lee, 2015b: Estimation of soil moisture and irrigation requirement of upland using soil moisture model applied WRF meteorological data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **57**(6), 173-183. (in Korean with English Abstract)
- Janjić, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP eta model. The 11th Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, USA, August 1996.
- Janjić, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note 437.
- Jimenez, P. A., and J. Dudhia, 2012: Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **51**, 300-316.
- Kain, J. S., and J. Kain, 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology* **43**, 170-181.
- Kang, J.-H., M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2010: Land cover classification over East Asian region using recent MODIS NDVI data (2006-2008). *Atmosphere* **20**(4), 415-426.
- Kim, J.-C., C. B. Lee, K. K. Shin, and S. I. Kwan, 2014: Analysis of temperature in complex mountainous region using HRLDAS. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, 89-92.
- Kim, K. S., M.-S. Kang, H.-N. Jeong, and J. Kim, 2013: Comparison of crop growth and evapotranspiration simulations between Noah Multi Physics model and CERES-Rice model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4), 282-290.
- Lee, S.-J., and H. Kawai, 2011: Mixing depth estimation from operational JMA and KMA wind-profiler data and its preliminary applications: examples from four selected sites. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **89**, 15-28.
- Lee, S.-J., and E. H. Berbery, 2012: Land cover change effects on the climate of the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology* **13**, 84-102.
- Lee, S.-J., and E. H. Berbery, and D. Alcaraz-Segura, 2013a: Effect of implementing ecosystem functional type data in a mesoscale climate model. *Advances in Atmospheric Sciences* **30**(5), 1373-1386.
- Lee, S.-J., E. H. Berbery, and D. Alcaraz-Segura, 2013b: The impact of ecosystem functional type changes on the La Plata Basin climate. *Advances in Atmospheric Sciences* **30**(5), 1387-1405.
- Lee, S.-J., J. Lee, S. J. Greybush, M. Kang, and J. Kim, 2013c: Spatial and temporal variation in PBL height over the Korean Peninsula in the KMA operational regional model. *Advances in Meteorology*, Volume 2013 (2013), Article ID 381630, 16pp.
- Lee, S.-J., J. Kim, M. S. Kang, and B. Malla-Thakuri, 2014: Numerical simulation of local atmospheric circulations in the valley of Gwangneung KoFlux sites. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**, 244-258. (In Korean with English abstract)
- Lee, S., Y. Choi, J. Jung, M. Won, and G.-H. Lim, 2015: Development of optimal modeling system for analyzing mountain meteorology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**, 165-172. (In Korean with English abstract)
- 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, Akademiya Nauk SSSR* **24**, 163-187.
- Moon, M. K., M. S. Kang, B. Malla-Thakuri, and J.-H. Lee, 2015: Errors in net ecosystem exchanges of CO<sub>2</sub>, water vapor, and heat caused by storage fluxes calculated by

- single-level scalar measurements over a rice paddy. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(3), 1-15.
- Niu, G.-Y., Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari, and Y. Xia, 2011: The community Noah land surface model with multi-parameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, **116**(D12).
- Niu, G.-Y., Z.-L. Yang, R. E. Dickinson, L. E. Gulden, and H. Su, 2007: Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data. *Journal of Geophysical Research*, **112**(D12109).
- Oh, G. L., S.-J. Lee, B. C. Choi, J. Kim, K. Kim, S. W. Choi, and B.-L. Lee, 2015: Quality control of agrometeorological data measured at Suwon weather station of Korea Meteorological Administration. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(1), 25-34.
- Park, S. K., and J. H. Kim, 2011: A study on changes in local meteorological fields due to a change in land use in the lake Shihwa region using synthetic land cover data and high-resolution mesoscale model. *Atmosphere* **21**(4) 405-414. (In Korean with English abstract)
- 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)
- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Monthly Weather Review* **143**, 250-271.
- Song, J., S.-J. Lee, and J. Kim, 2015: Effects of high-resolution topography/land-cover data and the Noah-MP land surface model on WRF atmospheric simulation in the valley of Gwangneung KoFlux sites. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 109-110.
- 통계청, 2014: 농업면적통계. 발간등록번호 11-1240000-000540-10, 110pp.
- 국립기상연구소, 2013: 농업기상 예측시스템 구축 기술, 발간등록번호 11-1360395-000387-01, 30pp.