

## 국가농림기상센터 지면대기모델링패키지(NCAM-LAMP) 버전 1: 구축 및 평가

이승재\* · 송지애 · 김유정

국가농림기상센터

(2016년 9월 26일 접수; 2016년 12월 11일 수정; 2016년 12월 20일 수락)

## The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) Version 1: Implementation and Evaluation

Seung-Jae Lee\*, Jiae Song and Yu-Jung Kim

National Center for AgroMeteorology, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

(Received September 26, 2016; Revised December 11, 2016; Accepted December 20, 2016)

### ABSTRACT

A Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) for supporting agricultural and forest management was developed at the National Center for AgroMeteorology (NCAM). The package is comprised of two components; one is the Weather Research and Forecasting modeling system (WRF) coupled with Noah-Multiparameterization options (Noah-MP) Land Surface Model (LSM) and the other is an offline one-dimensional LSM. The objective of this paper is to briefly describe the two components of the NCAM-LAMP and to evaluate their initial performance. The coupled WRF/Noah-MP system is configured with a parent domain over East Asia and three nested domains with a finest horizontal grid size of 810 m. The innermost domain covers two Gwangneung deciduous and coniferous KoFlux sites (GDK and GCK). The model is integrated for about 8 days with the initial and boundary conditions taken from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Final Analysis (FNL) data. The verification variables are 2-m air temperature, 10-m wind, 2-m humidity, and surface precipitation for the WRF/Noah-MP coupled system. Skill scores are calculated for each domain and two dynamic vegetation options using the difference between the observed data from the Korea Meteorological Administration (KMA) and the simulated data from the WRF/Noah-MP coupled system. The accuracy of precipitation simulation is examined using a contingency table that is made up of the Probability of Detection (POD) and the Equitable Threat Score (ETS). The standalone LSM simulation is conducted for one year with the original settings and is compared with the KoFlux site observation for net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and soil moisture variables. According to results, the innermost domain (810 m resolution) among all domains showed the minimum root mean square error for 2-m air temperature, 10-m wind, and 2-m humidity. Turning on the dynamic vegetation had a tendency of reducing 10-m wind simulation errors in all domains. The first nested domain (7,290 m resolution) showed the highest precipitation score, but showed little advantage compared with using the dynamic vegetation. On the other hand, the offline one-dimensional Noah-MP LSM simulation captured the site observed pattern and magnitude of radiative fluxes and soil moisture, and it left room for further improvement through supplementing the model input of leaf area index and finding a proper combination of model physics.

**Key words:** NCAM-LAMP, WRF, Noah-MP, KoFlux



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

### I. 서 론

농림 분야의 기상 수치모델은 중·장기적인 날씨 예측 정보뿐만 아니라, 다양한 농림기상 응용모델과 효과적으로 연계되어 가뭄, 병해충, 식물생장 등 영농 영림에 필요한 고해상도 의사결정 정보를 지자체와 개별 농가들에게 제공해 줄 수 있어야 한다. 그러나 현재의 현업 기상 수치모델의 출력자료는 농림기상 분야의 관점에서 볼 때 집수역 혹은 필지 규모 단위의 중·장기적인 결과를 제공하는데 있어서 시공간적인 틈새가 존재하고 있는 실정이다.

일반적으로 고해상도 수치모델링을 위해서는 다중중지(multi-nesting), 큰에디모사(Large Eddy Simulation, LES), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 등의 접근법이 사용되어 오고 있다(Table 1). 이 중 다중중지격자 접근법은 이행이 용이하고 도메인 간의 초기/경계조건 처리가 안정적이며 모델의 버전 업데이트에 따른 최신의 역학 및 물리 과정들을 추가적인 노력없이 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 고해상도 상황에 맞는 물리과정 모수화 방안들도 이 접근법 안에서 점차 개발되고 있는 추세이다(가령, Shin and Hong, 2015). 나머지 두 방법인 LES와 CFD 접근법은 최근 까지 계속 연구가 진행 중이나, 특정 변수에만 집중하거나 대개 사례연구 수준에 머무르고 있다. 가령, WRF (Weather Research and Forecasting) 모델과 같은 중규모 기상 모델에 LES 또는 CFD 도메인을 결합하는 연구들이 존재하지만, 3차원 인터페이스 설계가 안정적이지 못하거나 제한적이고, 연산비용이나 계산자원은 물론

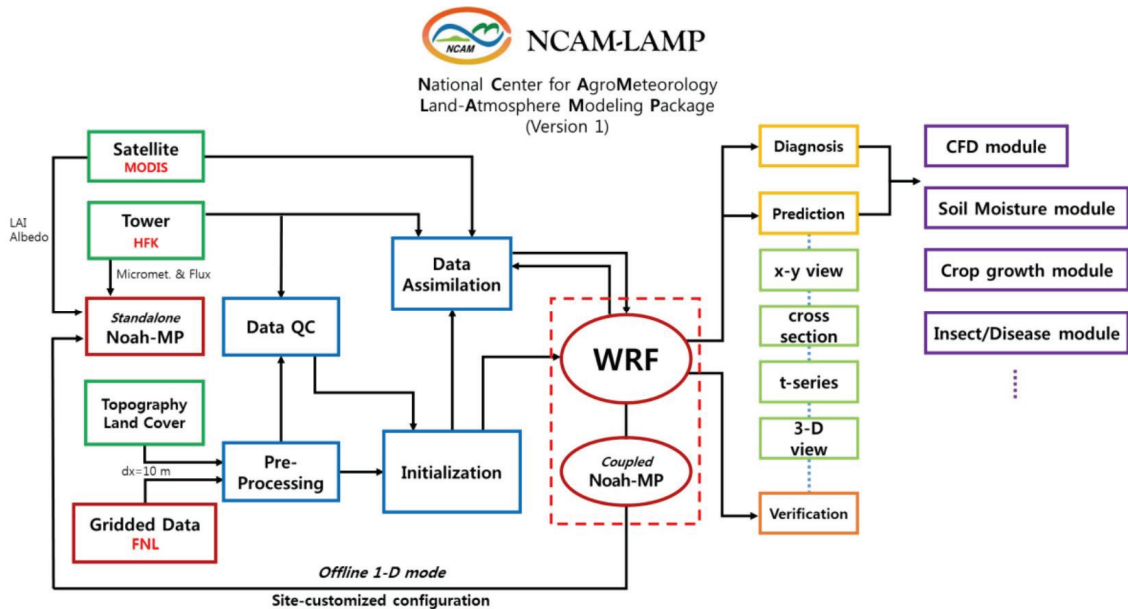
다양한 기상상황에서 현업적으로 운영하기에는 아직 더 많은 연구가 필요하다.

Lee *et al.*(2014)과 Song *et al.*(2015)은 초고해상도 지형 및 토지피복 자료를 탑재시킨 WRF 다중중지격자 계를 이용하여 국내 농림지에서의 국지순환 모의실험을 단기 및 중기 규모로 수행하였다. 그 결과, 광릉 산림지 계곡의 배수류(drainage flow)와 주변의 국지 흐름계를 입체적으로 밝히고, 청미천 농경지에서의 복사, 기온, 바람, 강수와 난류 플릭스의 분포를 수치적으로 파악할 수 있었다. 이러한 일련의 선행 연구들을 바탕으로 국가농림기상센터에서는 WRF/Noah-MP와 오프라인 1차원 Noah-MP를 기반으로 시간에 따른 고해상도 다차원 모델링을 수행할 수 있는 지면대기모델링패키지(Land-Atmosphere Modeling Package, LAMP)를 구축하였다(Fig. 1). LAMP 패키지는 WRF/Noah-MP 결합시스템과 오프라인 1차원 Noah-MP 지면모델로 구성되어 있으며, 전자는 7일 이상의 중기예측 자료를 1km 내외의 고해상도로 생산하는 일을 담당하고, 후자는 대표적인 농림생태계에 대하여 1년 모의 자료를 15분 간격으로 생산하는 일을 담당한다. LAMP에서는 국내 농림지의 소규모 복잡성과 비균질성을 반영하기 위해 고해상도의 국토지리원 지형고도 자료와 환경부 지표피복 자료가 사용되며, 농림분야 응용모델들과 다양한 수준에서 연계되도록 전·후처리 과정과 인터페이스도 함께 개발되고 있다(Hong *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2016).

LAMP의 최종 목표인 농림기상지원 전용 고해상도 수치모델링시스템의 현업 운영을 위해서는 적절한 도메인 해상도와 중기예측을 위한 식생의 생물계절을 고려

**Table 1.** Comparison of high-resolution numerical modeling approaches using multi-nesting domains, large eddy simulation (LES), and computational fluid dynamics (CFD)

Approach	Issues	Highest resolution	References
WRF multi-nesting	Feasibility,	1,000 m	Lee <i>et al.</i> (2010), Kim <i>et al.</i> (2012)
	Stability,	1,100 m	Jeong <i>et al.</i> (2012)
	Initial/boundary conditions,	300 m	Seong <i>et al.</i> (2013)
	Coordinate system,	111 m	NIMR(2013)
	Computational speed, and Newest physics	90 m	Lee <i>et al.</i> (2014) Song <i>et al.</i> (2015)
WRF LES	Cloudy days,	123 m	Liu <i>et al.</i> (2011)
	Moisture/precipitation, and Computational speed/cost	111 m	Gaudet <i>et al.</i> (2013)
WRF CFD	Urban / rural area,	<100 m	Meissner and Weir(2011)
	Moisture/precipitation, Stationary solution, and	<70 m	Farella <i>et al.</i> (2013)
	Computational speed/cost	10 m	Zheng <i>et al.</i> (2015)



**Fig. 1.** Flow chart of the National Center for AgroMeteorology-Land-Atmosphere Modeling Package (NCAM-LAMP).

하는 것이 중요하다. 이를 위해 Song *et al.*(2015)은 20여 일의 특별관측 자료를 사용하여 경기도 여주 청미천 농경지 일대에서 고해상도 WRF/Noah-MP 수치모의를 수행하였다. 이들은 모델의 수평 해상도가 증가함에 따라 지표면 플럭스, 기온, 바람, 강수 모의 개선은 미미하거나 거의 없는 것으로 보고하였다. 또한 Noah-MP 동적 식생을 포함시키면 포함시키지 않은 경우에 비하여 엽면적지수, 단파 복사, 지표면 플럭스, 기온, 바람, 강수의 모의가 실측 자료에 더 근접함을 보였다. 그러나 이들의 연구는 LAMP 시스템의 원형을 짧은 기간의 시범 사례에 대해 주로 지점 관측자료와 비교하여 얻은 결과이므로, 후속적인 연구로서 전국 영역에 대한 최적의 중·장기 농림기상 분석 및 예측자료를 산출하기 위한 적정 해상도 도출의 과정이 필요하다. 또한, 본 연구에서 중점을 두고 있는 7일 예측자료의 경우, 식생의 성장 및 쇠퇴 과정이 활발히 진행되는 시기의 경우 이를 고려한 기상예측자료 산출이 바람직할 것으로 판단된다.

한편, LAMP 패키지 내에 있는 고해상도 WRF/Noah-MP 결합시스템은 특정 지역 공간에서 중기기상 예측 및 모의를 수행할 수 있지만, 단일지점에서 1년 이상의 장기간의 기상 및 지면 분석을 관측지 규모(site-level)로 수행하기에는 적합하지 못하다. Noah-MP 지면모델은 오프라인 1차원 버전을 별도로 제공하며, 이러한 독립구동형 모델은 수평 이류를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있

으나, 관측지에서 생산된 실측자료의 공백을 메우는데 유용하게 사용될 수 있으며, 여러 시간규모에서 다양한 변수의 적산 값을 계산 가능케 하여, 관측지로 대표되는 지역의 에너지와 물질의 순환을 이해하는데 도움을 준다. 또한 대기 강제력이나 지표면의 변화에 인위적인 변화를 줌으로써, 새로운 환경이나 극한 상황에서의 지면-대기 상호작용을 모의할 수 있다. 그러나 Noah-MP의 1차원 버전을 국내 농림생태계에 적용한 연구는 매우 드문 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 식물의 생장기를 아우르는 장기간(약 8개월)에 대해 고해상도 수치모의를 수행하여 WRF/Noah-MP 결합시스템의 대기모의 성능을 해상도 및 Noah-MP의 동적 식생 포함 여부에 따라서 평가하고자 한다. 또한 LAMP를 구성하는 또 하나의 축인 오프라인 1차원 지면모델을 기본 옵션으로 해남 농경지에 대해 시범 수행하고, 해남 KoFlux 관측지 관측 값과 비교하여 그 결과를 살펴보고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. WRF/Noah-MP 결합모델의 구성 및 실험

연구에 사용된 모델은 WRF v3.6.1이며, 지면모델은 Noah의 향상된 버전인 Noah-MP (Niu *et al.*, 2011), 초기 및 경계자료는 NCEP에서 제공하는 최종분석장인

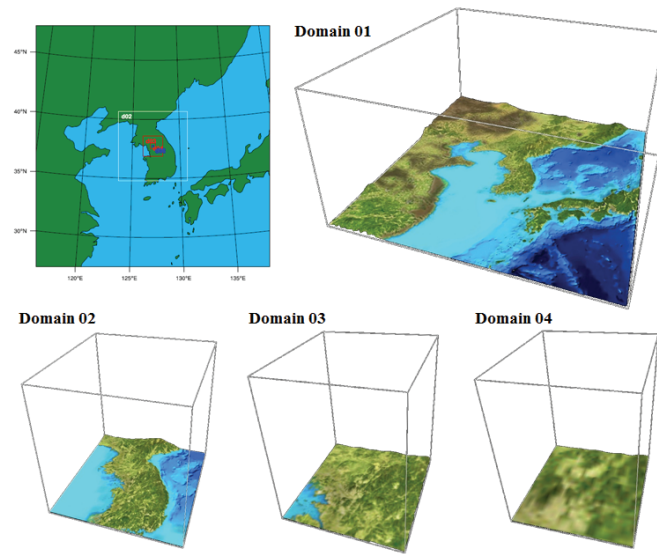


Fig. 2. Domain configuration of the WRF/Noah-MP model.

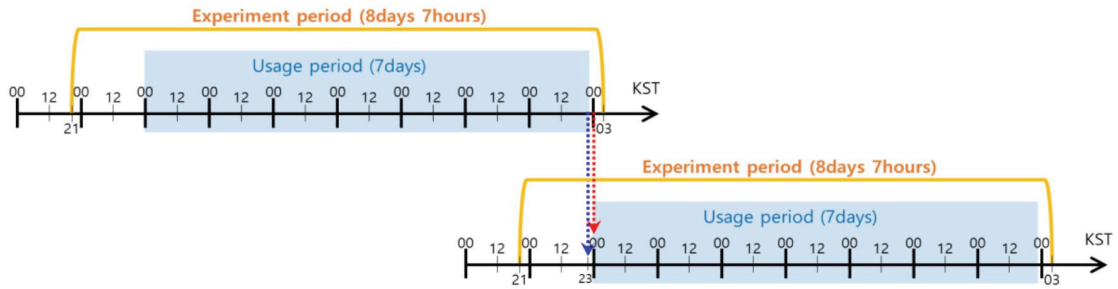
FNL자료가 사용되었다. 모델 도메인의 중심은 경기도 포천의 KoFlux 관측지(37.75°N, 127.16°E)이며, 모델 도메인은 수평격자 간격이 각각 21,870m (d01), 7,290m (d02), 2,430m (d03), 810m (d04)인 4중 양방향 등지격자로 구성하였다(Fig. 2). 모델 역학 및 물리과정은 Lee *et al.*(2014)과 Song *et al.*(2015)을 따른다 (Table 2). 지형고도와 지표피복 자료는 30초 해상도의 USGS (United States Geological Survey) 자료를 사용하였다.

수치모의 실험은 Noah-MP의 동적 식생을 포함하지 않은 경우(CTL 실험)와 포함한 경우(DVG 실험)로 설

계하였다. 동적 식생은 당일의 기온, 바람, 강수 등에 대응하여 식생의 생물계절 등을 예측하므로, 지배적인 기상 시스템이 무엇인지에 따라서 고정된 월별 값 또는 선형 내삽 값을 처방하는 CTL 실험과 큰 차이를 보일 수 있다. 총 모의 기간은 2014년 3월 1일 00시부터 10월 31일 23시까지 약 8개월의 기간으로서, 해당 기간 내에서 모델은 각각 8일 7시간 동안 적분되고, 첫 27시간과 끝 4시간은 모델의 스핀업과 자료처리의 편리성을 고려하여 제거한 뒤, 7일 단위로 된 모의결과들을 연속적으로 이어서 약 8개월치의 수치모의 자료를 마련하였다(Fig. 3). 7일 단위를 선택한 이유는 예측가능성 측면에서 모

Table 2. Model specification

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Integration period	2014.03.01. 00LST ~ 2014.10.31. 23LST			
Experiments	CTL: Noah-MP without dynamic vegetation DVG: Noah-MP with dynamic vegetation			
Resolution (m)	21,870	7,290	2,430	810
Topography and Land Use data	30''	30''	30''	30''
Initial condition	NCEP/NCAR GDAS (FNL) analysis (6-hourly)			
Shortwave radiation scheme	Goddard shortwave			
Longwave radiation scheme	RRTM			
Microphysics	WSM 6			
Cumulus parameterization	New Kain-Fritsch	New Kain-Fritsch	off	off
Planetary boundary layer	YSU PBL			



**Fig. 3.** Long-term data production method using WRF/Noah-MP model output.

델의 적분 결과가 여전히 결정론적 영역에 있다고 간주될 수 있고, 현실 대기와 가까운 상태로 남아 있을 것으로 여겨지기 때문이다(Lee et al., 2012). 더욱 짧은 기간에 대해 적분하고 그 결과를 더하는 것이 더 정확한 모의에 기여할 수 있으나, 그것은 더욱 더 빈번한 모델 수행과 결과 처리를 의미하는 것이기도 하다. 또한 짧은 스펜업 시간이 반드시 향상된 모의 결과를 보장해 주는 것은 아니며, 해당 시스템이 목표로 하는 서비스와 여러 특성들을 감안하여 결정되어야 할 사항이다. Kleczek et al.(2014)은 12, 18, 24시간의 스펜업 시간을 테스트하여 긴 스펜업 시간이 바람의 모의 편차에는 긍정적인 영향을, 기온의 모의 편차에는 부정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 국가농림기상센터에 현재 가용한 계산자원과 담당인력 등을 고려하여 모든 과정들이 효율적으로 관리 가능한 범위에 놓이는 7일 단위로 설정되었다.

**2.2. 오프라인 1차원 Noah-MP 모델의 구성**

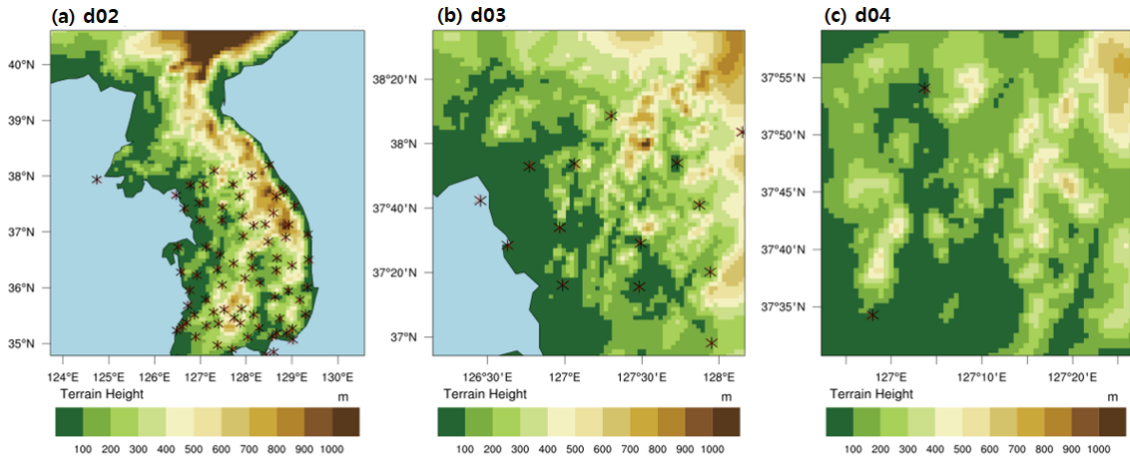
실험에 사용된 Noah-MP는 향상된 물리과정들과 다중모수화 옵션들을 통해서 원래의 Noah LSM을 개선한 지면 모델이다(Niu et al., 2011; Yang et al., 2011). 개선된 물리과정으로는 동적 지하수, 식생군락 상호작용, 다층 눈쌓임 등을 포함한다. 다중 모수화 옵션들은 사용자가 잎 역학, 군락 기공저항, 기공저항에 대한 토양수분 인자, 유출, 지하수 등의 모수화에 관한 여러 방법들을 선택할 수 있도록 해 준다. 식생 모델은 식생 종류에 따른 생물리변수의 월별 처방 값을 사용하였고, 각 물리과정별로 기본(default) 옵션을 따라 모델을 구동하였다. 해당 물리과정은 구체적으로 Ball-Berry 군락 기공저항 방안, Noah형 기공저항 토양수분 인자, TOPMODEL 기반의 유출방안 및 단순 지하수 모델 방안(Niu et al., 2007), Noah 접지층 항력계수, Niu and Yang(2006)의 동토과

냉각수 및 투수성 방안, Yang and Friedl(2003)과 Niu and Yang(2004)의 수정된 두 흐름 복사 방안, CLASS (Verseghy, 1991)의 눈 표면 알베도 방안, Jordan(1991)의 강우/강설 방안, Noah 토양 온도 하한 및 반암시적/토양온도 시간 방안 등이다.

모델 구축 대상지는 국내에서 제일 장기간의 플럭스 자료를 보유하고 있는 전라남도 해남의 KoFlux 관측지 (34.55°N, 126.57°E)인 HFK (Haenam Farmland site in Korea)이다(http://asiaflux.net 참조). 모의 기간은 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년이고, 15분 간격으로 계산되며, 반복 루프 회수는 4회로 설정하였다. 모델의 구동에 필요한 입력 기상자료는 HFK에서 실측된 풍속 ( $m s^{-1}$ ), 풍향(degree), 기온(K), 습도(%), 기압(hPa), 하향 단파복사( $W m^{-2}$ ), 하향장파복사( $W m^{-2}$ ), 강수량( $kg m^{-2} s^{-1}$ ) 총 8가지로서, 대기 강제력 자료로 사용된다. 이 때, 실측 강수는 30분 누적 강수량으로 공식 제공되고, 모델은 초당 강수량을 대기 강제를 위한 입력자료로 받아들이기 때문에, 실측 강수량을 1800초로 나누어 모델에 입력해 주어야 한다. 토지피복은 ‘관개 농경지 및 목초지 (Irrigated Cropland and Pasture)’, 토양 종류는 ‘미사질 양토(Silt Loam)’로 설정되었다. 이상과 같이 관측지 매개변수를 설정하고, 모델의 옵션들을 선택한 후, 기상장만 강제력으로 주게 되면, 모델은 15분 간격으로 플럭스 자료들을 계산한다.

**2.3. 검증 변수 및 방법**

WRF/Noah-MP 결합시스템의 결과 검증을 위하여 기상청 국가기후데이터센터의 관측 자료 중 총관기상관측장비(ASOS, Automated Synoptic Observing System)에서 관측된 지상기상관측 자료를 사용하였다. 모델 도메인 내에 존재하는 관측지점 자료와 그 관측지점에 가장 가까운 모델 격자점 자료를 비교하였다. Fig. 4는 각



**Fig. 4.** Spatial map of observation sites (x in black) and the nearest model grid points to the observation (x in red) used for model verification in (a) Domian2 (d02), (b) Domain3 (d03), (c) Domain4 (d04). Terrain height is represented with shading level based on color scale.

도메인에서 검증에 사용된 관측지점(검은색\*)과 그 관측지점에 가장 가까운 모델 격자점(빨간색\*)의 공간 분포로서, 각 도메인에서의 ASOS 관측지점 개수는 도메인 2, 3, 4에서 각각 76, 14, 2지점이다.

2m 기온(T2, °C)과 10m 풍속(WS, ms<sup>-1</sup>), 2m 습도(H2, %) 변수는 1시간 간격의 모델 결과와 해당 자료와 동일한 시각의 관측 자료를 비교하여 상관계수(r), 편차(Bias), 평균 제곱근 오차(RMSE)를 계산하였고, 각각의 계산식은 아래와 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

강수(P) 변수는 시간 강수량을 24시간 누적하여 검증 을 실시하였고, 모델과 관측에서의 강수 발생 유무에 따라 분할표(contingency table)를 Table 3과 같이 만들었다. 여기서, H(Hit)는 사건이 발행한 것으로 예측하고 실제로 발행했을 경우를, M(Miss)은 사건이 발행하지 않을 것으로 예측하였으나 실제로는 발행한 경우를, F(False alarm)는 사건이 발행할 것으로 예측하였으나 실제로는 발행하지 않은 경우를, C(Correct negatives)는

**Table 3.** Contingency table for rainfall verification

Observation	Model		
	Yes		No
	Yes	H (Hits)	M (Misses)
No	F (False alarms)	C (Correct negatives)	

사건이 발생하지 않을 것으로 예측하고 실제로도 발생하지 않은 경우를 각각 나타낸다. 이 분할표는 문턱 값(threshold)에 따라 강수의 유무를 판단하는데 사용되며, 문턱값은 0.5mm 이상, 5mm 이상, 10mm 이상, 15mm 이상, 20mm 이상으로 구분하였다. 모델 또는 관측에 강수가 존재하는 경우에 대해서만 평가하였으며, 24시간 간격의 검증구간 내에 0.1mm 이상의 강수가 기록되었을 때 ‘강수 있음’으로 판정하였다. 분할표에 기초하여 계산할 수 있는 모델 성능 중에서 POD (Probability of detection)와 ETS (Equitable treat score)를 다음의 식으로 계산하였다. 여기서, He는 우연에 의한 맞힘을 나타낸다.

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (4)$$

$$ETS = \frac{H - He}{H + M + F - He} \quad (5)$$

$$He = \frac{(H + M)(H + F)}{H + M + F + C} \quad (6)$$

오프라인 1차원 Noah-MP 모델의 검증은 해남 KoFlux 관측지의 자료를 사용하였다. 1년 모의에 대한 성능을 순복사(RNET,  $Wm^{-2}$ ), 현열(FSH,  $Wm^{-2}$ ), 잠열 (FLH,  $Wm^{-2}$ ), 토양수분(SMC,  $m^3m^{-3}$ ) 변수에 대하여 30 분 간격의 모델 결과와 해당 자료의 동일한 시각의 관측 자료를 비교하였다. 각각의 변수에 대한 통계량은 WRF/Noah-MP 결합시스템의 검증과 동일하다.

### III. 결과 및 토의

#### 3.1. 지상 기온, 바람, 습도 모의

Table 4는 각 도메인에서 DVG 실험과 CTL 실험에 대하여 2m 기온과 10m 풍속, 2m 습도, 세 변수에 대해 8개월 동안 관측 자료와 비교하여 얻은 통계적 결과이다. 밀줄은 각 도메인별 오차가 작은 실험을, 음영은 각 실험 별 오차가 가장 작은 도메인을 표시한다.

**Table 4.** Statistical scores (r, Bias, RMSE) between mid-term model simulation result and observation during about 8 months by variable, domain, and dynamic vegetation option

		Exp.	Domain		
			d02 7,290m	d03 2,430m	d04 810m
T2 (°C)	r	CTL	0.95	0.96	0.96
		DVG	0.95	0.96	0.96
	Bias	CTL	<b>-0.64</b>	<b>-0.35</b>	0.47
		DVG	-0.93	-0.70	<b>0.16</b>
	RMSE	CTL	<b>2.42</b>	<b>2.26</b>	2.06
		DVG	2.51	2.36	<b>2.01</b>
WS (ms <sup>-1</sup> )	r	CTL	0.53	0.54	0.62
		DVG	0.53	0.54	<b>0.63</b>
	Bias	CTL	1.83	1.14	0.23
		DVG	<b>1.80</b>	<b>1.11</b>	<b>0.17</b>
	RMSE	CTL	2.71	2.03	1.33
		DVG	<b>2.69</b>	<b>2.01</b>	<b>1.31</b>
H2 (%)	r	CTL	<b>0.76</b>	<b>0.74</b>	0.76
		DVG	0.75	0.72	0.76
	Bias	CTL	<b>8.31</b>	<b>3.49</b>	-3.58
		DVG	10.44	6.09	<b>-1.39</b>
	RMSE	CTL	<b>16.88</b>	<b>15.93</b>	14.67
		DVG	18.14	16.97	<b>14.18</b>

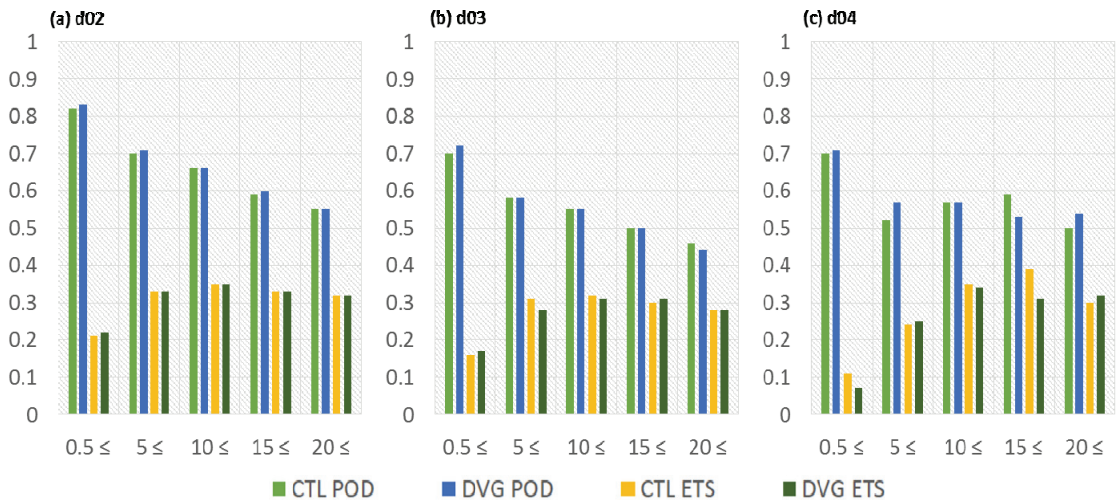
Table 4의 결과에 따르면, 2m 기온은 풍속이나 습도 변수에 비해 모든 도메인에서 관측과의 상관도가 약 0.96으로서 뚜렷이 높았다. 도메인 2, 3에서는 한랭 편차를, 도메인 4에서는 온난편차를 보였다. 특히 도메인 4에서의 DVG 실험은 가장 작은 기온의 Bias(0.16)와 RMSE(2.01)를 보였다. 10m 풍속은 모든 도메인에서 세 변수 중 가장 낮은 상관도를 보였다( $r \leq 0.63$ ). 또한 모든 도메인에서 풍속의 과대모의 특성을 보였다. DVG 실험은 모든 도메인에서 CTL 실험에 비해 관측 풍속에 더 가까이 다가가는 결과를 보였으며, 해상도 증가에 따른 풍속 모의의 향상이 모든 통계량에서 일관되게 나타났다. 2m 습도는 도메인에 따른 상관도의 특별한 증감 추세를 보이지 않았다. DVG 실험의 습도 모의는 도메인 2와 3에서 CTL 실험에 비해 안 좋은 상관도, Bias, RMSE 결과를 보였으나, 도메인 4에서는 CTL 실험과 같거나 더 좋은 결과를 보였다.

이상을 종합해 볼 때, 국가농림기상센터의 농림지원 전용 고해상도 WRF/Noah-MP 결합시스템의 수평 해상도에 있어서, 도메인 4에 해당하는 810m 해상도를 최고 해상도로 결정해서 우선 시도해 볼직하다. 이는 Table 4에서 도메인 4의 음영 면적이 제일 많음으로부터 쉽게 알 수 있다. 이때 동적 식생을 포함시키는 것이 그렇지 않은 경우에 비해 더 유리할 것으로 본 연구는 제안한다. 동적 식생은 2m 기온과 습도의 경우에 도메인 2, 3에서는 유익이 없으나 도메인 4에서는 어느 정도 유익이 있었고, 10m 풍속의 경우에는 모든 도메인에서 유익이 있는 것으로 분석되었다.

Table 5는 세 도메인 중에서 제일 작은 오차를 보인 도메인 4에 대하여 그 통계적 결과를 월별로 상세히 살펴본 것이다. 표에서 빨간색(파란색) 음영은 각 실험별 오차가 가장 큰(작은) 월을 표시하고, 밀줄은 각 월별로 오차가 작은 실험을 표시한다. 8개월 중 오차가 주로 발생하는 때는 8월이었고, 7~10월의 4개월이 기온, 바람, 습도 세 변수에 대해 동적 식생을 사용함에 따른 유익이 있었던 주된 달들로 파악이 되었다. 7~9월은 여름철 정체전선의 영향으로 비가 많이 온 뒤 북태평양 고기압의 영향을 받아 무더워지는 시기로서 식생 활동이 가장 왕성하며, 10월은 가을철 이동성 고기압의 영향을 받으면서 식생이 급격히 감소하는 시기이다. DVG 실험은 이 기간 동안의 역동적인 기상에 대응하는 생물계절 변화와 지면-대기 상호작용을 실제와 비슷하게 재현하여, 기상 변수를 모의하는데 유익을 준 것으로 생각된다.

**Table 5.** Same as in Table 4, except for monthly statistical scores (r, Bias, RMSE) in Domain 4

		Domain 4								
		Exp.	Month							
			3	4	5	6	7	8	9	10
T2	r	CTL	<b>0.97</b>	0.95	0.93	<b>0.86</b>	0.84	0.81	0.91	0.93
		DVG	0.96	0.95	0.93	0.85	0.84	0.81	0.91	0.93
	Bias	CTL	<b>-0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>-0.25</b>	<b>-0.40</b>	0.24	1.42	1.16	1.50
		DVG	-0.37	-0.30	-0.64	-0.64	<b>0.10</b>	<b>1.21</b>	<b>0.77</b>	<b>1.14</b>
	RMSE	CTL	<b>1.65</b>	<b>1.69</b>	<b>2.09</b>	<b>1.98</b>	1.97	2.57	1.97	2.36
		DVG	1.71	1.73	2.14	2.10	<b>1.96</b>	<b>2.44</b>	<b>1.77</b>	<b>2.13</b>
WS	r	CTL	0.62	0.63	0.64	<b>0.55</b>	<b>0.66</b>	0.54	0.57	0.64
		DVG	0.62	<b>0.64</b>	<b>0.67</b>	0.54	0.65	<b>0.56</b>	<b>0.60</b>	0.64
	Bias	CTL	0.04	0.10	0.17	0.21	0.09	0.48	0.32	0.41
		DVG	-0.04	<b>-0.01</b>	<b>0.12</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>0.46</b>	<b>0.29</b>	<b>0.35</b>
	RMSE	CTL	<b>1.40</b>	1.39	1.50	<b>1.25</b>	<b>1.15</b>	1.49	1.09	1.30
		DVG	1.41	<b>1.36</b>	<b>1.43</b>	1.27	1.17	<b>1.44</b>	<b>1.02</b>	<b>1.28</b>
H2	r	CTL	0.75	0.74	0.79	<b>0.79</b>	0.78	0.64	0.77	0.80
		DVG	<b>0.76</b>	0.74	<b>0.80</b>	0.77	0.78	<b>0.66</b>	0.77	<b>0.81</b>
	Bias	CTL	<b>2.60</b>	<b>-0.71</b>	-1.87	-1.77	-1.39	-8.63	-12.04	-4.94
		DVG	4.48	3.03	<b>1.25</b>	<b>-0.22</b>	<b>-0.58</b>	<b>-7.33</b>	<b>-9.51</b>	<b>-2.35</b>
	RMSE	CTL	<b>16.30</b>	<b>16.16</b>	13.59	<b>11.32</b>	<b>10.72</b>	15.65	18.24	13.85
		DVG	16.62	16.27	<b>13.03</b>	11.45	10.78	<b>14.74</b>	<b>16.58</b>	<b>12.70</b>



**Fig. 5.** POD and ETS of 24-hour accumulated precipitation in (a) d02, (b) d03, and (c) d04 during 8 months by threshold value and dynamic vegetation option.



### 3.2. 강수 모의

강수 검증은 각 도메인에서 DVG 실험과 CTL 실험에 대하여 24시간 누적 강수량을 8개월 동안 관측 자료와 비교하여 POD와 ETS로 결과를 표출하였다. Fig. 5는 8개월 전체기간에 대해 도메인별, 동적 식생 포함 여부와 문턱 값별 POD와 ETS를 나타낸 것이며, X축은 24시간 누적 강수량의 문턱 값을, Y축은 해당 구간에서 POD와 ETS를 나타낸다. Table 6과 Table 7은 각 도메인에서 DVG 실험의 24시간 누적 강수량의 문턱 값에 따른 월별 POD와 ETS를 각각 나타낸다.

8개월 평균으로 보았을 때, 도메인 2는 다른 도메인에 비해 전반적으로 높은 POD와 ETS를 보였다. 도메인 2, 3에서 POD는 문턱 값이 커질수록 점차 감소하는 경향을 보였고, ETS는 문턱 값 10mm day<sup>-1</sup> 이상까지 그 값이 증가하다가 그 후 비교적 일정해지는 경향을 보였다. Noah-MP의 동적 식생의 사용 유무에 따른 POD 및 ETS의 차이는 거의 없었다. 도메인 4는 도메인 3보다 10mm day<sup>-1</sup> 이상의 강수에 대해서 더 나은 결과를 보여 모델의 해상도가 향상됨에 따라 하루에 10mm 이상인 강한 강수를 잘 포착해내는 것을 확인하였다.

DVG 실험의 결과를 월별로 살펴보면 5월과 9월은 많은 강수에 대해 상대적으로 좋은 성능을 보였다. 여름철(6, 7, 8월)에는 장마전선 및 대기불안정에 의한 국지성 호우가 빈번하게 발생하기 때문에 문턱 값이 커짐에 따른 POD의 하락률이 크고, ETS 또한 가장 작게 나타

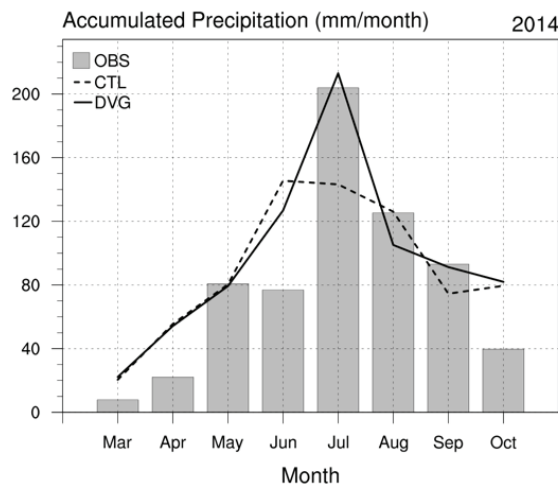
났다.

Fig. 6은 도메인 4 내의 관측지점과 그 관측지점에 가장 가까운 모델 격자점에서 동적 식생 포함 여부별 실험 자료의 월 누적 강수량의 시계열 그림이다. 월 누적 강수량이 60mm 이하로 강수량이 비교적 적은 3, 4, 10월의 경우 도메인 4에서 모델은 과대 모의하는 경향을 보였다. 그리고 평년대비 73.6%의 강수량(98.1mm)을 보인 6월달에 대해서도 모델은 과대 모의하였다. 동두천 지점에서 DVG 실험은 7월에 월 누적 강수량이 최대값을 보였는데 이는 6월에 최대값을 보인 CTL 실험에 비해 시기와 강수량 면에서 관측에 가깝게 모의된 것으로 분석되었다. 서울 지점에서도 7월에 월 누적 강수량이 최대값을 보였는데 두 모델의 실험 모두 그 시기를 잘 포착하지 못했으나, DVG 실험이 관측 최대 강수량에 좀더 다가가는 모습을 보였다.

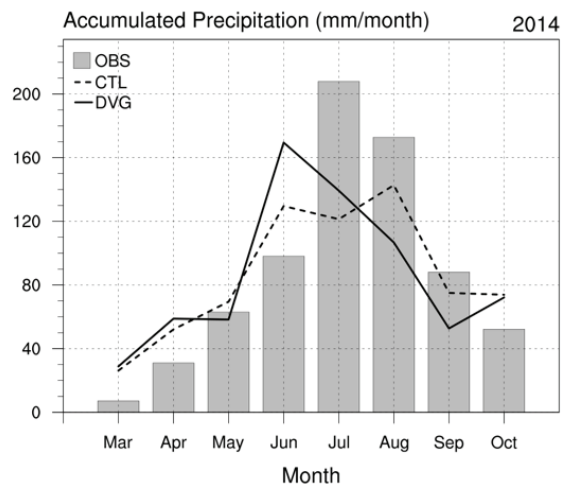
### 3.3. 오프라인 1차원 지면모델의 복사, 현열, 잠열, 토양수분 모의

Table 8은 2015년에 해당하는 해남 지역의 오프라인 1차원 Noah-MP 지면모델의 모의 결과로서, 순복사(RNET), 현열(FSH), 잠열(FLH), 토양수분(SMC)의 통계량을 나타낸 표이다. 순복사의 경우에 관측의 선형 변동성을 완벽에 가깝게 재현하고, 현열과 잠열에 비해 편차와 RMSE가 작은 모습 보였다. 순복사, 현열, 잠열 모두 양의 모의 편차를 보였으며, 잠열의 편차는 현열의 약

(a) Observation station: 98, Dongducheon



(b) Observation station: 108, Seoul



**Fig. 6.** Time series comparison of cumulative monthly rainfall between observations and model simulations in two sites in Domain 4. (a) Dongducheon (Observation station number: 98) and (b) Seoul (Observation station number: 108).

**Table 6.** Monthly Probability of Detection (POD) according to threshold of 24-hour accumulated precipitation of each domain in DVG experiment

Domain	Threshold (mm day <sup>-1</sup> )	Month							
		3	4	5	6	7	8	9	10
d02	0.5 ≤	0.91	0.84	0.82	0.81	0.79	0.82	0.76	0.94
	5 ≤	0.80	0.80	0.64	0.59	0.60	0.73	0.72	0.88
	10 ≤	0.78	0.72	0.60	0.49	0.47	0.67	0.78	0.88
	15 ≤	0.69	0.65	0.61	0.36	0.39	0.60	0.83	0.79
	20 ≤	0.51	0.63	0.63	0.27	0.33	0.54	0.81	0.78
d03	0.5 ≤	0.85	0.80	0.80	0.75	0.72	0.59	0.57	0.86
	5 ≤	0.43	0.74	0.73	0.43	0.67	0.44	0.55	0.71
	10 ≤	1.00	0.71	0.54	0.38	0.52	0.47	0.80	0.63
	15 ≤	0.00	0.60	0.68	0.18	0.47	0.37	0.95	0.59
	20 ≤		0.60	0.75	0.21	0.37	0.30	0.76	0.45
d04	0.5 ≤	0.88	0.80	0.64	0.88	0.80	0.58	0.38	0.90
	5 ≤		0.80	0.57	0.60	0.69	0.44	0.38	0.67
	10 ≤		1.00	0.57	0.40	0.58	0.50	0.67	0.75
	15 ≤			0.80	0.20	0.58	0.33	0.67	0.67
	20 ≤			0.75	0.25	0.62	0.20	1.00	1.00

**Table 7.** Same as in Table 6, except for monthly Equitable Threat Score (ETS)

Domain	Threshold (mm day <sup>-1</sup> )	Month							
		3	4	5	6	7	8	9	10
d02	0.5 ≤	0.27	0.36	0.34	0.12	0.13	0.20	0.21	0.30
	5 ≤	0.39	0.53	0.32	0.18	0.20	0.31	0.42	0.50
	10 ≤	0.50	0.50	0.41	0.15	0.18	0.31	0.47	0.55
	15 ≤	0.43	0.46	0.49	0.11	0.16	0.28	0.49	0.49
	20 ≤	0.30	0.45	0.52	0.08	0.15	0.28	0.55	0.48
d03	0.5 ≤	0.15	0.37	0.33	0.18	0.14	0.08	0.08	0.30
	5 ≤	0.05	0.48	0.43	0.09	0.41	0.19	0.38	0.45
	10 ≤	0.25	0.29	0.37	0.08	0.32	0.28	0.60	0.52
	15 ≤	0.00	0.18	0.53	0.03	0.32	0.19	0.63	0.52
	20 ≤		0.28	0.64	0.06	0.24	0.15	0.59	0.36
d04	0.5 ≤	0.12	0.23	0.04	0.15	0.16	-0.07	-0.11	0.46
	5 ≤	0.00	0.43	0.29	0.14	0.37	0.19	0.13	0.32
	10 ≤		0.20	0.47	0.07	0.43	0.32	0.34	0.70
	15 ≤		0.00	0.75	0.02	0.43	0.16	0.34	0.62
	20 ≤		0.00	0.71	0.12	0.42	0.10	0.46	0.47

**Table 8.** Statistical scores (*r*, Bias, RMSE) for simulated net radiation (RNET), sensible heat flux (FSH), latent heat flux (FLH), soil moisture content (SMC) at HFK site

Variable	<i>r</i>	Bias	RMSE
RNET (Wm <sup>-2</sup> )	1.00	3.56	15.18
FSH (Wm <sup>-2</sup> )	0.87	5.99	31.27
FLH (Wm <sup>-2</sup> )	0.91	23.64	54.36
SMC (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.73	0.01	0.03

4배 가까이 되는 특징을 보였다. 토양 수분의 경우 편차나 RMSE가 작았지만, 상관도는 관측에 비해 다소 떨어지는 모습을 보였는데, 이는 관측 토양 수분이 증가하는 시기를 전반적으로 잘 포착하지만 강수로 인해 토양 수분이 증가한 후 다시 감소할 때 모델의 토양수분 감소 속도가 느린 특징과 관련이 있다.

이상의 오차들은 엽면적지수와 같은 모델 입력자료의 개선과 물리과정들의 최적조합 탐색을 통해 어느 정도 줄어나갈 수 있으리라 생각된다. 이를 위해서는 궁극적으로 각 관측지에 맞춤형된 1차원 지면모델을 구축하는 일이 필요하다. 이러한 1차원 지면모델의 구축 및 정기 운영은 해당 농림지에서의 계절 및 경년 모의를 가능케 하여, 관측자료의 공백 메우기는 물론, 극단 기상/기후 실험과 지면-대기 에너지 및 물질 교환에 대한 다양한 분석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 요약 및 결론

도시기상서비스에 비해 상대적으로 중·장기적 기상/기후 정보를 많이 필요로 하는 농림기상서비스를 위하여, 국가농림기상센터에서는 고해상도 지형 및 토지 피복자료를 장착한 WRF/Noah-MP 결합시스템과 1차원 지면모델을 기반으로, 시간에 따른 다차원 모델링을 수행할 수 있는 농림지원 전용 고해상도 수치모델링 패키지(Land-Atmosphere Modeling Package, LAMP)를 구축하였다.

WRF/Noah-MP 결합시스템은 7일 이상의 중기 예측에 초점을 두고 가능한 고해상도의 자료를 생산하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 특정 월에 대해 수치모의 혹은 예측 연구를 할 경우에 동적 식생의 포함 여부에 대한 기준을 변수 및 해상도별로 제시하였다. 결과를 볼 때, 지상 기온, 바람, 습도의 측면에서 도메인 4는 다운스케

일링으로 유익을 얻을 수 있는 하나의 적정 해상도로 여겨진다. 도메인 4에서는 8개월 전체 평균으로 볼 때 동적 식생을 포함시킴에 따른 효과가 다소 있었다. 강수의 측면에서는 도메인 2가 다른 도메인에 비해 전반적으로 높은 POD와 ETS를 보였으나 Noah-MP의 동적 식생의 사용에 따른 유익은 적었다. 이러한 결과는 Song *et al.*(2015)에서 보인 20여일 정도되는 특별관측 기간 동안에 얻어진 동적 식생의 긍정적 효과를 약 8개월 장기적인 관점에서 다시 확인시켜 주는 것이다. 따라서 세 개의 등지격자와 810m의 해상도를 사용하는 구성은 NCAM-LAMP의 첫 번째 공식 버전으로 선택 가능해 보인다. 본 연구 결과를 바탕으로, 향후에 플렉스 변수들과 다른 초기/경계장 사용에 대한 민감도 실험을 실시하고, 동적 식생을 포함시켰을 때 어떤 기작을 통하여 다른 변수에 영향이 전달되는지에 대한 심도 있는 분석을 수행할 계획이다. 또한 도메인의 재구성 및 고해상도에서 구동될 수 있는 최신 물리방안 등도 시험하여 지속적으로 개선해나갈 필요가 있다.

한편, Noah-MP 지면모델의 오프라인 1차원 버전은 시범 농지와 산지 관측지에 맞춤형되어, 최적의 모의 결과를 1년 단위로 정기 생산하여 대학교, 연구기관 등의 수요기관에게 제공하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 생물리 매개변수가 월별로 처방된 정적 식생 모델과 물리과정의 기본(default) 옵션들을 이용하여 구동한 예비 결과를 보였다. 전반적으로 볼 때 모의 결과는 지표면 플럭스와 토양수분의 패턴 및 크기를 포착해 냈으며, 잠열 플럭스 등 관측과의 비교에서 나타난 차이점들은 모델의 엽면적 지수 입력 부분을 위성 자료를 활용하여 보완함으로써 완화될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 Noah-MP에 존재하는 수많은 물리과정 옵션들을 테스트하여, 각 관측지에 맞춤형된 최적의 조합을 다양한 기간과 사례로부터 찾아 나갈 계획이다.

#### 적 요

국가농림기상센터(NCAM)에서는 수요자 맞춤형 영농 영림을 지원하기 위하여 전용 수치모델링시스템인 지면대기모델링패키지(LAMP) 버전 1을 구축하였다. 이 패키지는 두 가지의 큰 축으로 구성되어 있다. 하나는 WRF 기상모델과 Noah-MP 지면모델의 결합시스템인 WRF/Noah-MP 시스템이고, 다른 하나는 Noah-MP 지면모델의 오프라인 독립구동형 1차원 버전이다. 전자는 7일 이상의 중기 기상예측 자료를 1km 내외의 고해상도

로 생산하는 일을 담당하고, 후자는 대표적인 농림생태계에 대하여 1년 지면모의 자료를 15분 간격으로 생산하는 일을 담당한다. 본 연구의 목적은 NCAM-LAMP의 두 구성 요소를 간단히 설명하고, 초기의 수치모의 성능을 평가하는데 있다. WRF/Noah-MP 결합시스템은 동아시아를 포함하는 아메리카도메인에 최고 810m의 수평 해상도를 갖는 3개의 등지격자로 구축되었으며, 가장 안쪽 도메인은 광릉 활엽수림 관측지와 침엽수림 관측지(GDK 및 GCK)를 포함한다. 이 결합시스템은 현재 미국 환경예측센터의 FNL 자료를 초기 및 경계자료로 이용하여 구동되며, 여러 개의 약 8일 모의 결과를 연결시켜 장기간에 대한 모의 자료를 생산하였다. 정량적 검증 변수는 WRF/Noah-MP 결합시스템의 2m 기온, 10m 바람, 2m 습도, 강수이며, 기상청 ASOS 관측 자료와 WRF/Noah-MP 결합시스템 모의 자료 사이의 차이를 이용하여 각 도메인에서 동적 식생 포함 유무에 따른 모의 오차를 계산하였다. 강수 모의의 정확도는 탐지확률(POD)과 공평위협점수(ETS)로 구성된 표를 이용하여 조사하였다. 오프라인 독립구동형 지면모델은 1년 기간에 대해 모의 결과를 생산하였으며, KoFlux 관측자료와 비교하여, 순복사 플럭스, 현열 플럭스, 잠열 플럭스 및 토양 수분 함량을 평가하였다. WRF/Noah-MP 결합시스템의 모의 결과에 따르면, 모든 도메인 중에서 도메인 4(810m 해상도)에서 2m 기온, 10m 바람 및 2m 습도에 대하여 가장 작은 RMSE를 보였다. 동적 식생을 포함시키면 모든 도메인에서 10m 바람의 모의 오차가 감소하게 되는 경향을 보였다. 도메인 2(7,290m 해상도)에서는 강수 모의 점수가 가장 높았으나, 동적 식생을 포함시킴에 따른 효과는 별로 없었다. 독립구동형 1차원 Noah-MP의 지면모의 결과는 복사 플럭스와 토양 수분의 패턴 및 크기를 포착하였으며, 엽면적지수의 모델 입력 부분을 보충하고, 모델 물리과정의 적절한 조합을 찾아내는 노력을 통해 개선될 수 있는 여지를 남겼다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(KMIPA-2012-0001-2).

## REFERENCES

Farella, F., M. Ehlen, A. Fischer, and G. Lizcano, 2013:

- Coupling micro-scale CFD simulations to meso-scale models. *The 1<sup>st</sup> Symposium on OpenFOAM in Wind Energy (SOWE)*, 20-21 March, 2013, Germany.
- Gaudet, B. J., A. Deng, D. R. Stauffer, N. L. Seaman, and A. Suarez, 2013: Nested realistic daily WRF-LES simulations using eddy-seeded lateral boundary conditions. *The 14<sup>th</sup> Annual WRF User's Workshop*, 24-28 June, 2013, CO, U. S. A.
- Hong, M.-K., S.-H. Lee, J.-Y. Choi, S.-H. Lee, and S.-J. Lee, 2015: 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)
- Jordan, R., 1991: A one-dimensional temperature model for a snow cover: technical documentation for SNTherm.89. *Special Report* 91-16. Cold Reg. Res. and Eng. Lab., U.S. Army Corps of Eng., Hanover, N. H.
- Kleczek, M. A., G.-J. Steeneveld, and A. A. M. Holtslag, 2014: Evaluation of the weather research and forecasting mesoscale model for GABLS3: Impact of boundary-layer Schemes, boundary conditions and spin-up. *Boundary-Layer Meteorology* **152**, 213-243. doi: 10.1007/s10546-014-9925-3
- 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.-J., J.-S. Kang, and H.-L. Yoo, 2012: *Atmospheric Modeling, and Data Assimilation and Predictability* (Korean version), SigmaPress, 392pp. (ISBN: 9788958329145)
- Liu, Y., T. Warner, Y. Liu, C. Vincent, W. Wu, B. Mahoney, S. Swerdlin, K. Parks, and J. Boehnert, 2011: Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **99**(4), 308-319.
- Meissner, C., and D. Weir, 2011: Utilizing WRF data in CFD models for wind energy assessment. *Proceedings of the European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Brussels, Belgium.
- Niu, G.-Y., Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, L. Longuevergne, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari, and Y. Xia, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*

- Atmospheres* **116**(D12). doi:10.1029/2010JD015139.
- 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**(D7). doi:10.1029/2006JD007522.
- Niu, G.-Y., and Z.-L. Yang, 2006: Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. *Journal of Hydrometeorology* **7**, 937-952, doi:10.1175/JHM538.1.
- Niu, G.-Y., and Z.-L. Yang, 2004: The effects of canopy processes on snow surface energy and mass balances. *Journal of Geophysical Research* **109**, D23111, doi:10.1029/2004JD004884.
- Park, J., S.-J. Lee, J. Song, and H. Kim, 2016: Estimation of forest water use with land surface model over Gwangneung watershed. *The International Workshop on Agromet and GIS Applications for Agricultural Decision Making* **76**, 5-9 December, Jeju.
- 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**, doi: 10.1175/MWR-D-14-00116.1.
- Song, J., S.-J. Lee, M. Kang, M. Moon, J.-H. Lee, and J. Kim, 2015: High-resolution numerical simulations with WRF/Noah-MP in Cheongmicheon farmland in Korea during the 2014 special observation period. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(4), 384-398.
- Verseghy, D. L., 1991: CLASS-A Canadian land surface scheme for GCMs: I. Soil model. *International Journal of Climatology* **11**(2), 111-133, doi:10.1002/joc.3370110202.
- Yang, Z.-L., G.-Y. Niu, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, K. Manning, D. Niyogi, M. Tewari, and Y.-L. Xia, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research* **116**(D12). doi:10.1029/2010JD015140.
- Yang, R., and M. A. Friedl, 2003: Modeling the effects of three-dimensional vegetation structure on surface radiation and energy balance in boreal forests. *Journal of Geophysical Research* **108**(D16). doi:10.1029/2002JD003109.
- Zheng Y., Y. Miao, S. Liu, B. Chen, H. Zheng, and S. Wang, 2015: Simulating flow and dispersion by using WRF-CFD coupled model in a built-up area of Shenyang. *Advances in Meteorology* **2015** 1-15, .
- 국립기상연구소(NIMR), 2013: 농업기상 예측시스템 구축 기술. 기술노트(NIMR-TN-2013-019), National Institute of Meteorological Sciences, 34pp.