

국립기상과학원 플렉스 관측 자료 기반의 JULES 지면 모델 모의 성능 분석

김혜리¹⁾ · 홍제우^{2)*} · 임윤진¹⁾ · 홍진규²⁾ · 신승숙¹⁾ · 김윤재¹⁾

¹⁾국립기상과학원, ²⁾연세대학교 대기과학과/미기상연구실

(접수일: 2019년 6월 19일, 수정일: 2019년 8월 20일, 게재확정일: 2019년 8월 26일)

Evaluation of JULES Land Surface Model Based on In-Situ Data of NIMS Flux Sites

Hyeri Kim¹⁾, Je-Woo Hong^{2)*}, Yoon-Jin Lim¹⁾, Jinkyu Hong²⁾, Seung-Sook Shin¹⁾, and Yun-Jae Kim¹⁾

¹⁾National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Ecosystem-Atmosphere Process Lab, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 19 June 2019; revised 20 August 2019; accepted 26 August 2019)

Abstract Based on in-situ monitoring data produced by National Institute of Meteorological Sciences, we evaluated the performance of Joint UK Land Environment Simulator (JULES) on the surface energy balance for rice-paddy and cropland in Korea with the operational ancillary data used for Unified Model (UM) Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) (CTL) and the high-resolution ancillary data from external sources (EXP). For these experiments, we employed the one-year (March 2015–February 2016) observations of eddy-covariance fluxes and soil moisture contents from a double-cropping rice-paddy in BoSeong and a cropland in AnDong. On the rice-paddy site the model performed better in the CTL experiment except for the sensible heat flux, and the latent heat flux was underestimated in both of experiments which can be inferred that the model represents flood-irrigated surface poorly. On the cropland site the model performance of the EXP experiment was worse than that of CTL experiment related to unrealistic surface type fractions. The pattern of the modeled soil moisture was similar to the observation but more variable in time. Our results shed a light on that 1) the improvement of land scheme for the flood-irrigated rice-paddy and 2) the construction of appropriate high-resolution ancillary data should be considered in the future research.

Key words: JULES land surface model, evaluation, flux data, soil moisture

1. 서 론

지면-대기 간 상호작용의 이해는 정확한 기상/기후 예측을 위한 선결과제이다. 이를 위해 직접관측, 원격탐사 등을 활용한 모니터링 연구들이 활발히 수행 중이며(e.g., Blyth et al., 2010; Jung et al., 2011), 현업

이나 연구용 기상/기후예측모델 대부분에서도 다양한 지면모델을 탑재하여 현실적인 지면물리과정을 고려하고 있다. 지면모델은 전통적으로 기상/기후 예측모델의 하층경계조건을 담당하여, 지면과 대기 간의 운동량, 에너지, 수증기 교환량을 통계-물리적으로 구현해왔다. 지난 십 년 동안, 기상/기후 예측모델의 발전(대기 역학 및 구름 물리과정의 이해도 증가 및 상세화된 표현 가능) 및 모델의 해상도 향상에 따라서 비균질 지면과정의 중요성에 대한 연구(고해상도 지면 모델 개발, 지면 상태에 따른 불확실성 저감 연구)들이 활발히 진행되어왔으며(Essery et al., 2003; Giorgi

*Corresponding Author: Je-Woo Hong, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Yonsei-ro 50, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-5693, Fax: +82-2-2123-5163
E-mail: jeewoo@yonsei.ac.kr

et al., 2003), 최근에는 탄소 순환 및 생지화학적 과정까지도 지면모델을 통해 표현하기 위한 노력을 시도하고 있다(Tang et al., 2013; Harper et al., 2018).

기상청은 2010년부터 영국기상청의 Unified Model (UM)을 현업모델로 운영 중이며, 해양-해빙 모델을 결합한 Global Seasonal Forecast System (GloSea5)와 에어로졸 등 대기화학모델까지 결합한 The UK Earth System Modelling Project (UKESM)을 통해 초단기/단기/중기/장기 예보 자료를 생산하고, 기후변화 전망까지 모의하는 시스템을 구축하고 있다. 이들 시스템의 지면물리과정을 담당하는 모델은 Joint UK Land Environment Simulator (JULES)로, Met Office Surface Exchange Scheme (MOSES, Cox et al., 1999; Essery et al., 2003)을 토대로 지면에서의 에너지 수지 방정식에 식생역학모델(dynamic vegetation model), 토양에서의 탄소순환, 도시군락모델(urban canopy model) 등을 탑재하여 장기적인 에너지/물순환 연구에도 적용이 가능하다.

JULES 지면모델은 영국 기상청(MetOffice)에서 개발하여 주로 영국 또는 유럽에서의 경계층 내 기상현상과 관련하여 많은 연구에 활용되어왔으며 다양한 관측 지점과의 검증 결과 대부분의 출력변수에 있어 우수한 성능을 보이는 것으로 확인되었다(e.g., Bohnenstengel et al., 2011, 2014; Gudmundsson et al., 2012; van den Hoof et al., 2013; Weedon et al., 2015). 국내에서도 총일차생산량 등에 대한 검증 연구들(e.g., Jang et al., 2010; Park et al., 2018)이 있었으나, 이러한 연구들은 특정 관측지를 중심으로 관심 대상의 일부 출력변수에 대해 개략적인 검증만을 수행했으며, 현업모델에서 일반적으로 사용하는 변수들이 JULES 모의 성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 진단 연구는 상대적으로 이루어지지 않았다. 특히, JULES 지면모델이 초단기부터 장기 예측을 위한 현업모델에 탑재되어 널리 활용되고 있는 상황에서, 모델 자체에 대한 성능 진단과 모델 구동을 위해 사용되는 보조자료에 대한 검증 및 개선 방안 등에 대한 진단은 필수적인 선행과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 국립기상과학원에서 운영 중인 안동, 보성 관측지점에 대한 JULES 지면모델의 모의 성능을 분석하고 국내 식생-토양 환경에 대한 모의 시 주의해야 할 점들을 점검해 보고자 하였다. 관측자료와의 비교 검증뿐만 아니라 지면모델이 사용하고 있는 초기설정자료에 대한 현업용 데이터베이스 진단을 통해 수치예보모델에서 쓰이는 JULES 지면모델의 모의 특성을 알아보았다. 2장에서는 사용한 관측자료 및 모델과의 비교 검증 방법을 설명하였고, 3장에서는 관측자료의 발자국 범위 및 모델 검증 결과를 분석하였으며, 요약 및 결론을 4장에 제시하였다.

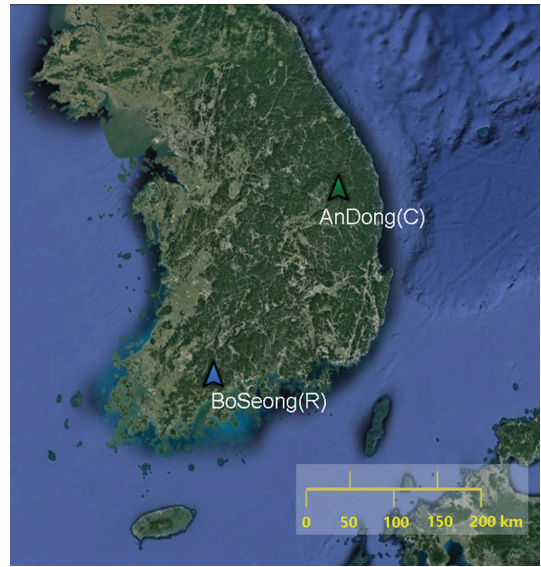


Fig. 1. Location of rice-paddy (blue) and cropland (green) site.

2. 자료 및 방법

2.1 관측지점 및 자료처리

본 연구에서는 국립기상과학원에서 운영 중인 보성 종합기상탑과 안동 수문기상관측사이트(Fig. 1, Table 1)에서 관측한 지표특성정보, AWS 관측자료, 에디공분산 방법으로 측정된 플렉스를 활용하여 현업 수치모델의 JULES 모의 성능을 비교 검증하였다. 2015년 3월 1일부터 2016년 2월 29일까지 총 1년의 기간에 대해서 연구를 수행하였다.

2.1.1 보성종합기상탑

전라남도 보성군 득량면에 위치한 보성 표준기상관측소는 약 307 m 높이(연직 11개 층)의 종합기상탑(34.7607°N, 127.2140°E)과 지상기반 원격관측장비 등 대기경계층 연구를 위한 관측 인프라이다(NIMS, 2017). 국립기상과학원은 대기경계층에서의 지속적인 미기상 및 연직기상관측을 수행하고, 관측 자료의 품질관리 및 개선을 통하여 관측자료를 활용한 연구기반을 구축, 확대하고자 2014년부터 이 시스템을 설치하여 운영하고 있다. 일반적으로 남동쪽으로는 득량만이 자리잡고 있어, 국지순환은 강한 해륙풍 특성을 보인다. 식생의 경우는 관측지 주변의 약 1.5 km 반경에서 대부분 논(rice-paddy)으로 온난-다습한 기후조건을 바탕으로 이모작을 통해 6~11월 중 벼(*Oryza sativa*)를 재배한 뒤 겨울에는 보리(*Hordeum vulgare*)를 재배하고 있다. 모내기를 준비하는 6월초부터 재배기간에는 관

Table 1. Instrumentation details of BoSeong rice-paddy and AnDong cropland site.

| | | BoSeong (R) | AnDong (C) |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Location | Latitude (°N) | 34.7607 | 36.7324 |
| | Longitude (°E) | 127.2140 | 128.8747 |
| Classification | Rice-paddy | | Cropland |
| Description | Double cropping | | - May-Nov: <i>Capsicum annuum</i> |
| | - Dec-May: <i>Hordeum vulgare</i> | | - May-Aug: <i>Cucurbita moschata</i> , <i>Sesamum indicum</i> |
| | - Jun-Nov: <i>Oryza sativa</i> | | - Sep-Nov: <i>Raphanus sativus</i> |
| Measurement height (m) | 2.5 | 10 | |
| Obstacle height (m) | < 1 | < 1 | |
| Altitude (m) | 2 | 180 | |
| Sonic anemometer | CSAT3, Campbell Sci., US | CSAT3, Campbell Sci., US | |
| Infrared gas analyser | EC-150, Campbell Sci., US | EC-150, Campbell Sci., US | |
| Radiometer | CNR-4, Kipp&Zonen, Netherlands | CNR-4, Kipp&Zonen, Netherlands | |
| Data logger | CR-3000, Campbell Sci., US | CR-3000, Campbell Sci., US | |
| Establishment | 30 Sep 2014 | Nov 2012 | |

개(flood-irrigation)로 인하여 논은 토양수분이 포화상태가 유지되며, 한 여름에 벼의 성장을 돕기 위해서 일주일 정도 한시적인 물떼기(mid-summer drainage)를 수행한다.

2.1.2 안동댐 수문기상관측망

안동댐 수문기상관측망은 국립기상과학원에서 2011년부터 유역단위의 물수지 이해 증진 및 수문기상모델의 자료동화 활용을 목적으로 안동댐 상류 지역에 설치한 7개 지점 관측 네트워크이다. 관측지점의 AWS, 플럭스 자료 관측 및 유역 하구에 위치한 안동댐에서의 수위 관측을 통해 유역단위의 물수지 분석이 가능하며, 2013년부터 2018년까지 약 5년간의 데이터베이스가 구축되어 있다.

본 연구에서는 내륙 농경지에 위치한 관측지(경상북도 안동시 도산면; 36.7324°N, 128.8747°E)의 관측 자료를 사용하였다. 해당 지역의 농사는 5월초부터 11월초까지의 성장기간에 집중되는데, 연구 기간동안 재배기간이 비교적 긴 고추(*Capsicum annuum*)를 재배하거나, 봄-여름에 호박(*Cucurbita moschata*)과 참깨(*Sesamum indicum*) 등을 먼저 재배하고, 수확 후 가을까지는 무(*Raphanus sativus*)를 재배하였다. 겨울에는 밭갈이(tillage) 후 나지(bare soil) 상태를 유지했다.

2.1.3 관측자료 처리

상·하향(upward- and downward-) 장·단파(longwave and shortwave) 복사 성분 각각을 복사계(CNR-4, Kipp&Zonen, Netherlands)로 측정하여 순복사(net-radiation)를 계산하였다. 난류 에너지 플럭스 관측을 위해 3차원 초음파 풍향풍속계(CSAT-3, Campbell Scientific, US)와 개회로 적외선 기체분석장비(EC-150,

Campbell Scientific, US)를 사용하였다. 자세한 관측지 정보와 운영한 관측 기기의 정보는 Table 1에 나타내었다. 10-Hz의 원본 관측자료를 이용하여 30분 간격의 현열(sensible heat)과 잠열(latent heat) 플럭스를 계산하였다(Hong and Hong, 2016).

또한, 관측 자료의 공간대표성 여부 확인을 위해 복사계와 난류 에너지 플럭스를 측정하는 에디공분산 시스템의 발자국(footprint) 영역을 분석하였다. 복사계의 발자국 영역은 Lambert 코사인 법칙(식 1, Schmid, 1997)으로, 난류 에너지 플럭스의 발자국 영역은 Lagrangian 확률 모델 방법(식 2, Hsieh et al., 2000)으로 분석하였으며, 두 식은 다음과 같다.

$$F = \frac{r^2}{r^2 + z_m^2} \tag{1}$$

$$F(x) = \frac{1}{k^2 x^2} D z_u^P |L|^{1-P} e^{-\frac{1}{k^2 x} D z_u^P |L|^{1-P}} \tag{2}$$

위의 식(1)과 (2)에서 F 는 관측 자료에 대한 기여도(%), r 과 x 는 관측 기기로부터의 반경(m)과 거리(m), z_m 은 관측 고도(m), k 는 von Kármán 상수(=0.4), L 은 Obukhov 길이(m), z_u 는 z_m 과 영면변위(zero-plane displacement)와 거칠기 길이(roughness length)이며, D 와 P 는 대기안정도(stability)로 결정되는 상수이다. 더 자세한 내용은 Hong and Hong (2016)과 Schmid (1997), Hsieh et al. (2000)에서 확인할 수 있다.

2.2 JULES 지면모델 및 실험 설계

본 연구는 자립판(stand-alone) JULES 4.3 버전(2015년 6월 배포, <https://jules.jchmr.org>)을 사용하였다.

Table 2. Soil property parameters in JULES.

| Name | Description | Unit |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| albsoil | Soil albedo. A single (averaged) waveband is used. | - |
| b | Exponent in soil hydraulic characteristics. | - |
| hcap | Dry heat capacity of soil. | $J m^{-3} K^{-1}$ |
| hcon | Thermal conductivity of soil. | $W m^{-1} K^{-1}$ |
| satcon | Saturated hydrological soil conductivity. | $kg m^{-2} s^{-1}$ |
| sathh | Reciprocal of 100α , where α is a parameter of the van Genuchten model (van Genuchten et al., 1991). | m |
| sm_wilt | Volumetric soil moisture content at the wilting point. The wilting point is that at which soil moisture stress completely prevents transpiration. | $m^3 m^{-3}$ |
| sm_crit | Volumetric soil moisture content at critical point. The critical point is that at which soil moisture stress starts to restrict transpiration. | $m^3 m^{-3}$ |
| sm_sat | Volumetric soil moisture content at saturation. | $m^3 m^{-3}$ |

Table 3. Parameters and initial conditions of JULES simulation with LDAPS setting (CTL) and local ancillary data (EXP).

| | | Rice-paddy (BoSeong) | | Cropland (AnDong) | |
|-------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | CTL | EXP | CTL | EXP |
| Tile fraction (%) | broad leaf | 14.4 | - | 6.7 | 50.0 |
| | needle leaf | 3.8 | - | 7.1 | 50.0 |
| | C3 | 72.0 | 90.0 | 15.0 | - |
| | C4 | 6.5 | 10.0 | 31.5 | - |
| | shrub | - | - | - | - |
| | urban | - | - | - | - |
| | lake | - | - | 21.1 | - |
| | bare soil | 3.4 | - | 18.6 | - |
| | land ice | - | - | - | - |
| Soil properties | albsoil | 0.087 | 0.211 | 0.102 | 0.227 |
| | b | 7.844 | 6.296 | 6.105 | 7.713 |
| | hcap | 1.221×10^6 | 1.110×10^6 | 1.249×10^6 | 1.247×10^6 |
| | hcon | 0.235 | 0.199 | 0.259 | 0.247 |
| | satcon | 2.944×10^{-3} | 1.495×10^{-3} | 5.563×10^{-3} | 3.840×10^{-3} |
| | sathh | 0.284 | 0.937 | 0.182 | 0.208 |
| | sm_crit | 0.326 | 0.401 | 0.265 | 0.303 |
| | sm_sat | 0.447 | 0.491 | 0.427 | 0.434 |
| | sm_wilt | 0.200 | 0.219 | 0.142 | 0.185 |

JULES 지면 모델은 모자이크 기법을 통해 격자 내 토지 피복의 비균질성을 표현한다. 각 격자에 대해서 5가지의 식생(활엽수, 침엽수, 온대 초지, 열대 초지, 관목)과 4가지의 비식생(도시, 육수, 나지, 육빙) 피복으로 총 9가지의 토지 피복 종류의 면적 비율을 각각 설정할 수 있다. 지면 아래에 있는 토양층의 경우 모자이크 기법을 적용하지 않고 한 격자 내에서는 하나의 토양 특성만을 가지도록 설정한다. 이를 구동하기 위해 필요한 토양 특성 매개변수는 albsoil, b, hcap, hcon, satcon, sathh, sm_wilt, sm_crit, sm_sat으로 총 9가지이며, 각 변수의 정의와 단위를 Table 2에 제시

하였다.

본 연구에서는 현재 기상청에서 운영 중인 수치예보모델의 설정을 진단하고, 보조 자료의 변경에 따른 지면 에너지 수지와 토양 수분의 모의 성능 변화를 파악하고자 하였다. 이를 위해 현업 1.5 km 해상도 국지예보모델인 UM Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS)에서 사용 중인 보조 자료를 그대로 사용하여 모의한 경우(CTL)와, 다른 방법으로 개발한 국지 보조 자료를 사용하여 모의한 경우(EXP)의 결과를 비교 검증하였다. 여러 가지 보조 자료들 중에서 토지 피복도와 토양 특성 모수를 변경

Table 4. Definitions of the statistical parameters used in this study. P_i = predicted values; O_i = observed values; and N = number of data points.

| Statistical parameter | Definition |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| bias | $bias = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$ |
| Root Mean Square Error (RMSE) | $RMSE = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2]^{0.5}$ |
| Mean absolute error (MAE) | $MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $ |

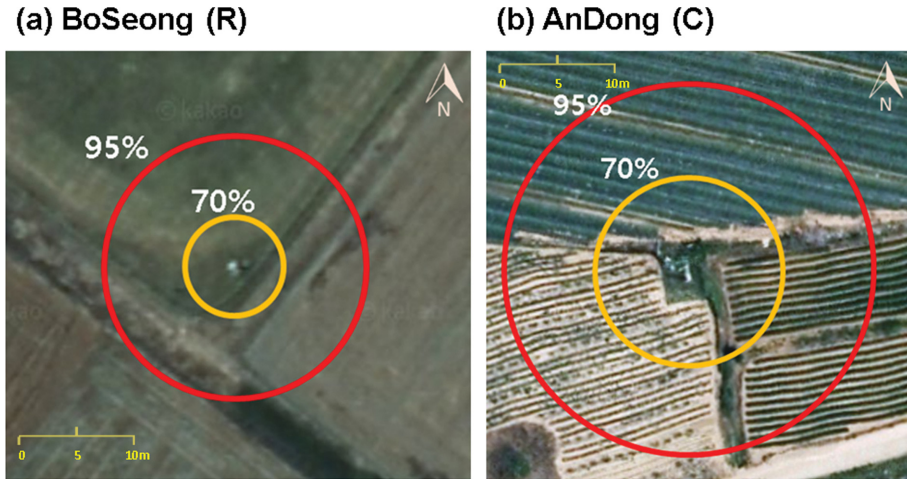


Fig. 2. Footprint of radiative flux over (a) BoSeong rice-paddy and (b) AnDong cropland site.

대상으로 하였고, EXP 실험에서 토지 피복도는 환경부에서 제작한 대분류 토지피복도(<http://egis.me.go.kr>)를 사용하였으며, 토양 특성 모수는 농촌진흥청에서 제작한 개략 토양도에서 추출한 값을 사용하였다. 지면모델링 분야의 연구 쟁점 중의 하나인 토양 수분 초기조건(Koster et al., 2011; van den Hurk et al., 2012; Prodhomme et al., 2016)의 경우, 현업 기후예측시스템인 GloSea5의 토양 수분 초기 자료에서 각 사이트별로 가장 가까운 격자점의 값을 추출하여 사용하였다. 다만 CTL 실험에서는 스핀업을 수행하지 않았으나 EXP 실험에서는 토양 수분에 대해서 1% 공차(tolerance) 설정으로 스핀업을 수행하였다. 각 실험에 사용한 보조 자료의 관측지별 입력값은 Table 3에 나타내었다.

2.3 검증 방법

모델의 지면 에너지 수지 모의 성능 검증 시 순복사, 현열 플럭스, 잠열 플럭스가 모두 존재하는 시간대의 관측 자료만을 검증에 사용하였다. 연구기간인 1년에 대해서 각 에너지 수지 성분별로 관측값과 모의값의 편차(bias), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균절대오차(Mean Absolute Error,

MAE)를 계산하여 모의 성능을 정량화하였다. 각 통계값들의 정의는 Table 4에 기술하였다. 관측값과 모의값의 산점도(scatter plot)에서 낮시간을 구별하여 표시하였으며 이 때 일조시간의 기준이 되는 하향단파복사가 120 W m^{-2} 을 초과할 경우를 낮시간으로 정의하였다(WMO, 2008). 토양 수분 검증 시에는 토양 수분 함량의 일 평균값을 1년간의 시계열을 이용하여 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 관측 지점의 플럭스 발자국 분석

Figure 2는 각 관측지의 복사계 발자국 영역을 관측자료의 70%(주황색)와 95%(빨강색) 기여도를 갖는 반경으로 표시한 그림이다. 측정된 복사속의 70%는 각 관측 고도의 약 1.5배에 해당하는 영역으로부터 측정되며, 95%는 관측 고도의 약 4.5배에 해당하는 영역에서 측정되는 것으로 나타났다. 보성 지점의 발자국 영역은 대부분 주변 논으로 이루어졌으며(Fig. 2a), 안동은 관측지 주변의 밭을 포함하여(Fig. 2b), 두 곳의 복사속 관측은 각 관측지의 지면 특성을 적절하게 반영하고 있었다.

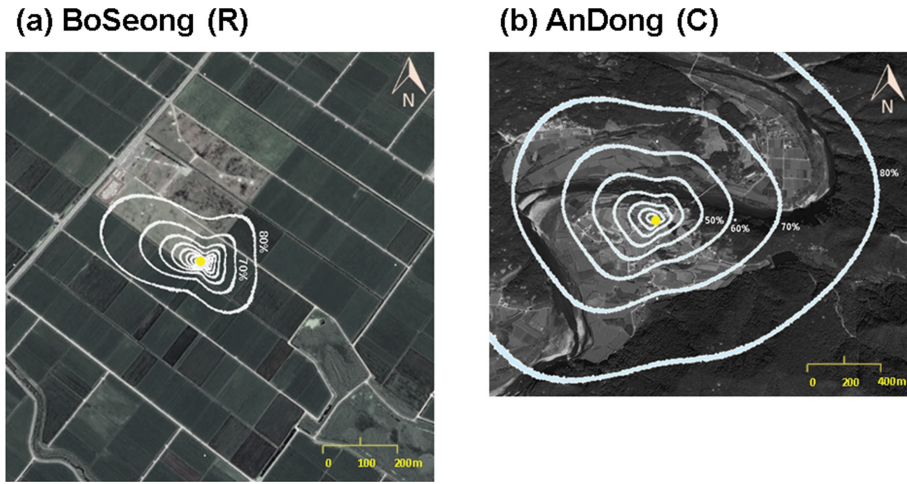


Fig. 3. Footprint climatology of turbulent fluxes over (a) BoSeong rice-paddy and (b) AnDong cropland site.

지면 플럭스 관측자료의 발자국 영역은 관측 고도 (z_m)와 영면변위 및 거칠기 길이 등의 주변 지표의 거칠기 환경, 마찰강도와 평균 풍속 방향에 수직한 방향의 풍속 성분의 표준편차로 정의되는 난류강도, 풍향 및 풍속, 대기안정도에 의해서 결정되기 때문에 그 양상이 복잡하고 해석이 어렵다. Figure 3은 각 관측지의 연구기간 동안 누적한 난류 플럭스의 발자국 기 후값을 나타낸다. 보성은 관측 고도(2.5 m)가 낮아서 비교적 발자국 영역이 관측 지점으로부터 좁은 영역에 나타났는데, 북서풍과 남동풍의 해륙풍 국지순환의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다(Fig. 3a). 보성에서 측정된 난류 에너지 플럭스는 대부분 논에 영향을 받았기 때문에, 논에서의 지면 에너지 수지 연구에 중요한 정보를 제공할 것으로 보인다. 안동 지점은 보성과 비교했을 때 관측 고도(10m)가 높고, 주변 장애물(농작물, 나무 등)의 높이도 낮아서 거칠기 요소가 적기 때문에 상대적으로 넓은 발자국 영역을 나타내었다(Fig. 3b). 관측지 주변의 농경지로부터 약 70%의 발자국 비중이 확인되었지만, 발자국 영역내에 하천과 주변에 위치한 숲(동쪽: 왕모산, 서쪽: 건지산-영지산)을 일부 포함하기 때문에 관측자료의 해석과 활용에 있어서 보다 주의가 필요할 것으로 보인다.

3.2 에너지 플럭스 모의 성능 평가

Figure 4는 보성에서 직접 관측한 순복사, 현열, 잠열 플럭스를 JULES 모의 결과와 비교한 그림이다. 순복사의 경우 CTL 실험은 양의 편차(+4.9 W m⁻²)를 나타내었지만(Fig. 4a), EXP 실험은 음의 편차(-6.0 W m⁻²)를 보이고 있었으며, EXP 실험에서 RMSE와 MAE가 각각 12.2에서 20.6 W m⁻²로, 8.1에서 12.2 W m⁻²

로 증가하여 모의 성능이 감소한 것으로 나타났다(Fig. 4d). 이런 모의 성능의 변화는 순복사량이 높은 값을 보이는 낮 시간에 두드러졌다. 낮 동안의 순복사는 일반적으로 하향 단파복사량과 지면 알베도에 큰 영향을 받기 때문에, 모의 성능의 변화는 실제 관측지와 모델에 처방한 지면 알베도(albedo) 간의 차이에 의한 것으로 추정된다. 생장기의 논은 관개에 의해서 항상 토양 수분이 물로 덮여 있고, 드러난 토양도 습윤한 환경이 유지된다. 기존에 보고된 지면 알베도의 결과에 의하면 지면(> 0.10)보다는 수면(0.03~0.10)에서 건조한 토양(0.20~0.40)보다 습윤한 토양(0.10~0.20)에서 알베도 값이 더 낮은 것으로 알려져 있으므로(Table 3.1 in Arya, 2001), 따라서 논에 대한 알베도는 식생이 분포한 일반적인 지면에 비해서 상대적으로 낮은 알베도를 기대 할 수 있다. CTL 실험의 낮은 토양 알베도(0.087)를 농촌진흥청의 토양 자료의 상대적으로 높은 토양 알베도(0.211) 값으로 처방한 EXP 실험에서, 알베도를 과대평가하여 순복사를 과소 모의하는데 기여한 것으로 보인다(Table 3).

두 실험 모두 현열 플럭스는 과대 모의하고, 잠열 플럭스는 과소 모의하였으나, EXP 실험에서 현열 플럭스의 bias, RMSE, MAE가 모두 감소하여 모의 성능이 다소 개선되었음을 확인할 수 있었다. CTL의 활엽수(14.4%)와 침엽수(3.8%)가 EXP에서 초지로 바뀌어 처방되었기 때문에, 현열 플럭스의 성능 개선은 1) 지면과 토양 알베도 증가에 의한 순복사 과소 모의와 2) 지표식생 변수 개선의 효과로 보여진다(Table 3). 그럼에도 불구하고 두 실험 모두 잠열 플럭스를 과소 모의하고 있었는데, 이는 실제 논에 대한 관개를 CTL, EXP 모두 제대로 표현하고 있지 못하기 때문이다. 지면 모

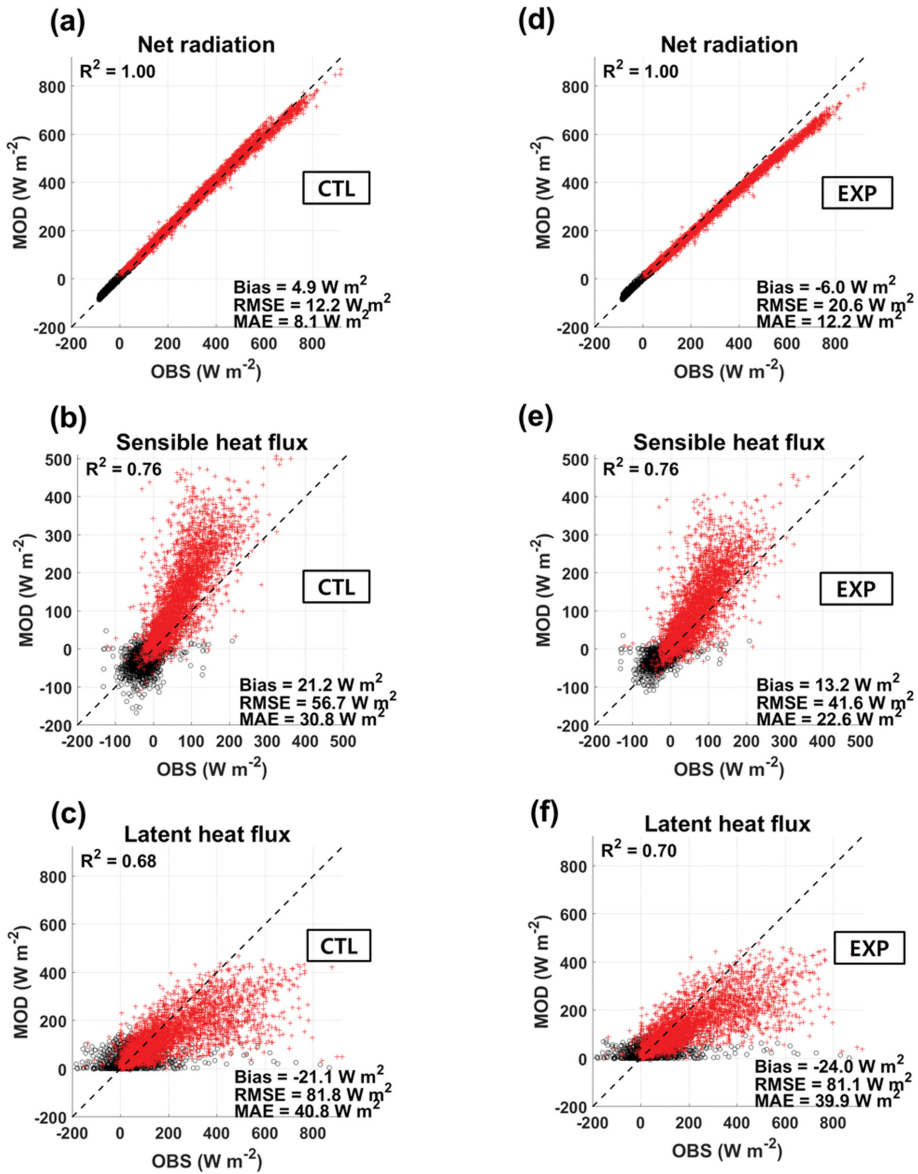


Fig. 4. Scatter plots of modeled versus observed surface energy fluxes with LDAPS setting (CTL; a: net radiation, b: sensible heat flux, c: latent heat flux) and local ancillary data (EXP; d: net radiation, e: sensible heat flux, f: latent heat flux) for BoSeong rice-paddy site. The red crosses and black circles in the plots represent the daytime (downward shortwave radiation $> 120 W m^{-2}$) and non-daytime (downward shortwave radiation $\leq 120 W m^{-2}$) data, respectively.

텔 내에 논과 같은 관계가 이루어지는 지표 피복을 현실적으로 모의하지 못하는 문제는 JULES 모델뿐만 아니라 다른 지면 모델에서도 발생하는 문제이며 (Ozdogan et al., 2010; Yang et al., 2017), 향후 연구 및 개선되어야 할 사항이다.

안동에서의 JULES 모델의 순복사 모의 결과는 EXP 실험에서 편차가 증가하는 것으로 나타났다(Figs. 5a,

d). 이는 CTL 실험에서 초지였던 지표 피복이 EXP 실험에서는 모두 활엽수와 침엽수로 변화하면서 열용량이 실제 지표 피복보다 높게 모의되어 지면의 온도가 실제보다 덜 증가했을 것으로 추정되며 이로 인해 과소모의 된 상향장파복사량으로 순복사가 과대모의된 것으로 보인다. 앞서 살펴본 발자국 분석에서도 나타났듯이 안동 지역의 복사와 난류 플럭스 자료는 키

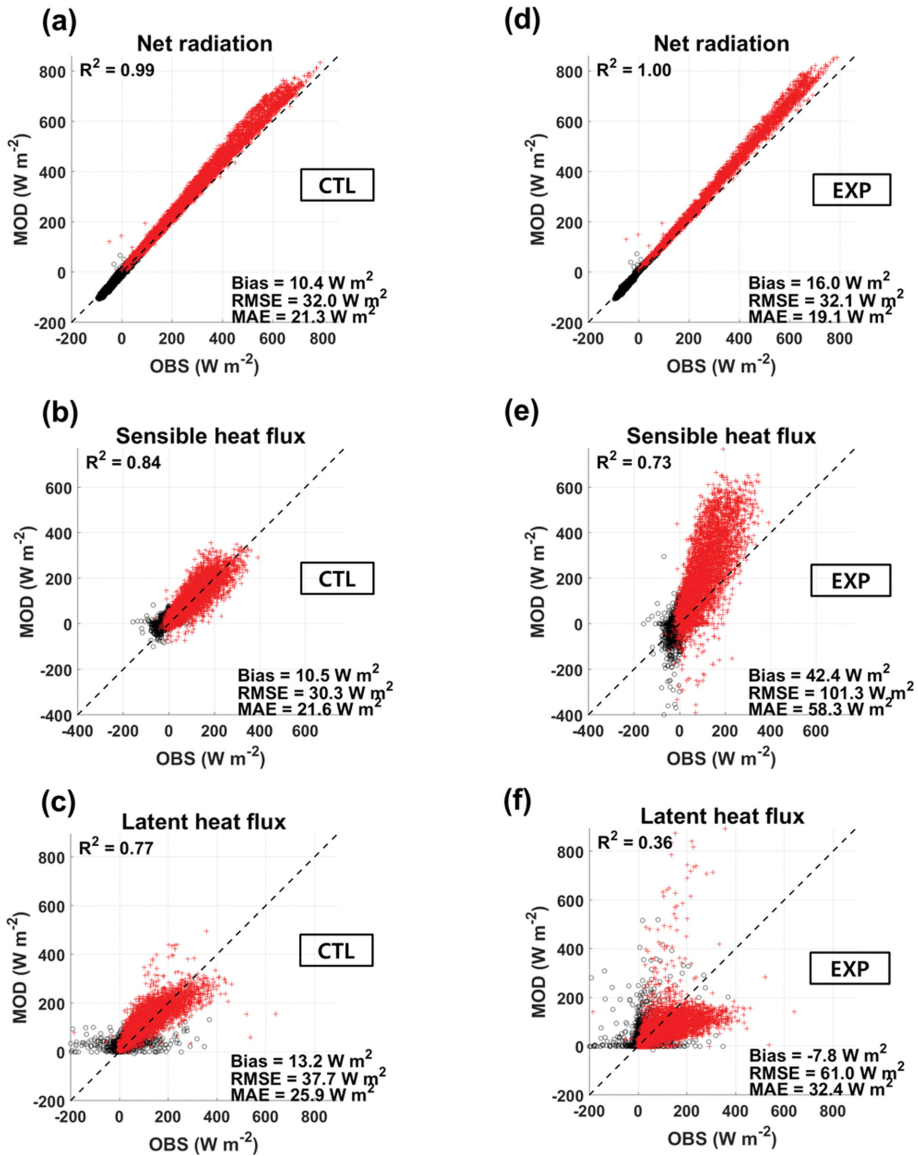


Fig. 5. Scatter plots of modeled versus observed surface energy fluxes with LDAPS setting (CTL; a: net radiation, b: sensible heat flux, c: latent heat flux) and local ancillary data (EXP; d: net radiation, e: sensible heat flux, f: latent heat flux) for AnDong cropland site. The red crosses and black circles in the plots represent the daytime (downward shortwave radiation $> 120 \text{ W m}^{-2}$) and non-daytime (downward shortwave radiation $\leq 120 \text{ W m}^{-2}$) data, respectively.

가 낮은 작물을 재배하는 농경지(초지로 분류 가능)를 많이 포함하고 있다. 이로부터 환경부의 대분류 토지피복도에서 사용한 관측지역의 지표 피복은 현업 LDAPS 모델에서 사용하고 있는 지표 피복보다 오히려 현실성이 떨어진다고 할 수 있다. 이는 직접 개발한 보조자료나 고해상도의 보조자료를 사용했을 때 모델의 모의 성능이 향상할 것이라는 기대와는 다른

결과인데, 보조자료를 사용하기 전에 반드시 그 자료를 검증하고 비교 분석하려는 연구를 수행해야 함을 시사하고 있다.

같은 맥락에서 CTL 실험의 현열과 잠열 플럭스 모의 성능은 우수 했지만(Figs. 5b, c), 국지규모 고해상도 보조자료를 적용한 EXP 실험의 결과는 모의 성능이 감소하는 것으로 나타났다(Figs. 5e, f). CTL에서

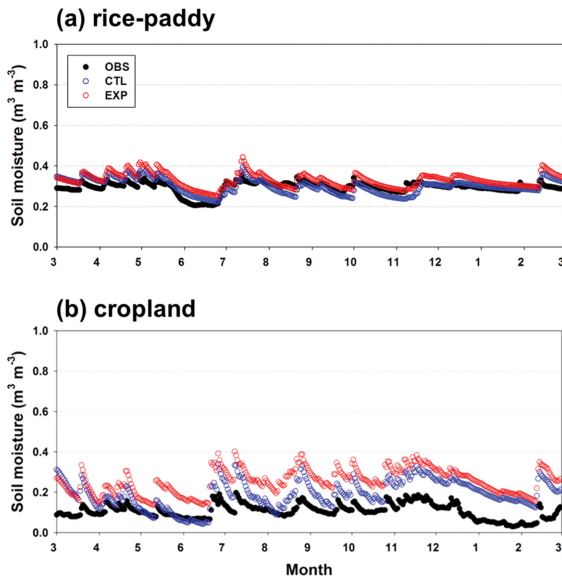


Fig. 6. Daily mean soil water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) of observed (black) and modeled with LDAPS setting (CTL; blue) and local ancillary data (EXP; red) for (a) BoSeong rice-paddy and (b) AnDong cropland site.

약 21%를 차지했던 호수가 EXP에서는 모두 숲으로 바뀌었는데, 이에 따라서 잠열 플럭스 모의 결과가 크게 감소하고 현열 플럭스는 증가하면서 실제보다 지면에서의 증발산을 더 과소 모의하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 토양수분 모의 성능 평가

Figure 6은 두 관측지의 토양수분함량 관측 자료와 CTL 및 EXP 실험에서 모의한 토양수분함량을 비교한 그림이다. 보성의 경우 0.20 m 깊이에서 관측한 자료와 0.25 m 깊이(두 번째 토양층)의 모의결과를 비교했으며, 안동 농경지의 경우 관측자료와 모의결과 모두 0.10 m 깊이의 값을 비교하였다. 두 실험 모두 관측의 변화 경향을 잘 따르고 있지만, 포화토양수분함량의 기준(sm_sat, volumetric soil moisture content at saturation) 처방에 따라 EXP ($0.491 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)가 CTL ($0.447 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)보다 전반적으로 토양을 습윤하게 모의하였다. 안동 지점에 대한 모의에서도 동일하게 EXP ($0.434 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)가 CTL ($0.427 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)보다 다소 습윤하게 토양을 모의하였다. 국내에 특화된 고해상도 농촌진흥청의 토양 보조자료를 사용하였음에도 불구하고 토양수분 모의 성능이 관측과의 차이가 더 커지는 경향이 나타났다. 또, JULES 모델의 토양수분 모의결과는 관측보다 토양수분함량의 변동폭이 더 크게 나타났다는데, 시간 변화에 따른 토양수분함량의 변화는

토양의 수리전도도(hydraulic conductivity) 및 그와 관련된 매개변수의 처방에 의해 결정되기 때문에, 향후 이와 관련한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

토양수분의 차이를 앞서 분석한 플럭스 분석 결과와 연관 지어 분석하였다. EXP의 토양수분함량이 CTL보다 높았기 때문에, 더 큰 잠열 플럭스의 모의를 예상할 수 있다. 하지만 안동 농경지에서는 오히려 잠열 플럭스가 EXP에서 CTL보다 더 낮게 나타났는데 (Figs. 5c, f), 이는 식생의 증산 과정에 수분 부족 스트레스를 반영하는 토양수분 임계점(sm_crit, critical point)과 증산을 전혀 하지 않는 위조점(sm_wilt, wilting point)을 CTL과 비교했을 때, 각각 0.265에서 0.303 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ 으로, 0.142에서 0.185 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ 로 증가하여 식생의 증산량의 제한이 더 강하게 이루어진 점이 영향을 미친 것으로 보인다. 또한 C3의 광합성량이 다른 식생 유형보다 더 많이 모의되는 JULES 모델의 특성을 고려했을 때, 토양피복의 대부분이 EXP 실험에서 키가 큰 숲(broad leaf, needle leaf)으로 변화한 것도 영향을 미쳤을 것이다(Table 3). 식생유형별 토양수분의 임계점이나 위조점에 대한 연구도 부족한데, 향후 토양의 물리적 특성과 관련한 연구가 관측과 모델 모두의 영역에서 더 이루어져야 할 것으로 보인다.

4. 요약 및 제언

본 연구는 국립기상과학원에서 운영 중인 보성과 안동에서 직접 관측한 지면 에너지 플럭스 및 토양수분 자료를 활용하여, JULES 모델의 농경지에 대한 모의성능을 살펴보았다. 보성 관측지는 이모작 논이며, 안동 관측지는 생장 기간 동안 다양한 과일과 채소를 경작하는 밭이다. 논(11.2%)과 밭(7.6%)은 국토의 상당 부분을 차지하는(MOLIT, 2018) 중요한 지표 피복으로, 이 곳에서의 직접 관측 자료를 활용하여 기상청에서 현업 운영 중인 기상/기후 모델의 지면-대기 상호작용을 진단하고 평가하는 것은 복잡하고 비균질한 지면으로부터의 물/에너지 전달을 정량화하기 위해서 꼭 필요한 일이라 할 수 있다.

두 관측 지점에서 에디 공분산 시스템을 이용하여 복사 및 난류 에너지 플럭스를 1년간 연속 관측한 자료를 연구에 활용하였다. 관측자료와 모델의 모의결과를 비교함에 있어서 관측자료의 공간대표성을 이해하는 과정은 중요한데, 본 연구에서는 발자국 분석 방법을 이용하여 관측한 복사 및 난류 에너지 플럭스가 각 관측지에서 적절하게 대상 피복을 관측하고 있음을 평가하였다.

JULES 모델의 성능 검증은 현업 LDAPS에서 사용하고 있는 매개변수 처방 및 초기조건을 사용한 CTL

실험과 환경부와 농촌진흥청 등에서 구축한 고해상도 보조자료(지표피복비율 및 토양 매개변수 처방값)를 사용한 EXP 실험으로 구성하였다. 모의 결과 논(보성 관측지)에서는 잠열의 과소 모의가 두드러졌는데, 이는 지면 모델이 논을 관측을 현실적으로 고려하지 못하는 문제로 인해 발생한 것으로 추정되며, 보성 관측지의 현열 플렉스를 제외하면 보성과 안동 두 관측지 모두 고해상도 보조자료의 사용 후(EXP) 토양수분 및 지면 에너지 수지의 모의 성능이 오히려 나빠지는 것을 확인하였다. 모의된 토양수분의 경우에는 관측과 유사한 시계열을 보이고 있었으나, 관측에 비해 큰 변동성을 가지는 것으로 확인되었다. 또한, 발자국 영역의 크기가 넓어져 복잡한 지형/지표 특성을 많이 포함하는 지역일수록 모델과 관측 사이의 차이가 더 크게 나타나고 있었으며, 정밀한 지표 보조자료 사용의 효과가 크지 않은 것을 확인하였다. 향후 모델 분야에서는 논을 관측을 고려할 수 있는 과정을 모델에 포함하거나, 보다 정밀한 보조자료 구축을 위한 검증 연구 등을 수행하고, 관측에서는 논에서의 토양수분 측정, 관측지 주변의 열면적지수 측정, 토양의 물리적 특성 자료의 구축 등을 수행해야 할 것으로 보인다.

단기-장기 예보에 이르는 활용뿐만 아니라 농업/수문/산림 등의 영역에서도 JULES 지면모델의 활용 사례가 늘어나고 있기 때문에 오랫동안 관측된 자료에 대하여 국내 대표 식생/토양 환경에 대한 검증 결과는 JULES를 활용하는 연구진들에게 기초자료로써 활용 가치가 높을 것이라 판단한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「장기예측시스템 개발」(1365003054)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arya, P. S., 2001: *Introduction to micrometeorology, Volume. 79 second edition*. Academic Press, 420 pp.
- Blyth, E., J. Gash, A. Lloyd, M. Pryor, G. P. Weedon, and J. Shuttleworth, 2010: Evaluating the JULES land surface model energy fluxes using FLUXNET data. *J. Hydrometeorol.*, **11**, 509-519, doi:10.1175/2009JHM1183.1.
- Bohnenstengel, S. I., S. Evans, P. A. Clark, and S. E. Belcher, 2011: Simulations of the London urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1625-1640, doi:10.1002/qj.855.
- _____, I. Hamilton, M. Davies, and S. E. Belcher, 2014: Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**, 687-698.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. B. Bunton, R. L. H. Essery, P. R. Rowntree, and J. Smith, 1999: The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dyn.*, **15**, 183-203.
- Essery, R. L. H., M. J. Best, R. A. Betts, P. M. Cox, and C. M. Taylor, 2003: Explicit representation of sub-grid heterogeneity in a GCM land surface scheme. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 530-543.
- Giorgi, F., R. Francisco, and J. Pal. 2003: Effects of a sub-grid-scale topography and land use scheme on the simulation of surface climate and hydrology. Part I: Effects of temperature and water vapor disaggregation. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 317-333.
- Gudmundsson, L., and Coauthors, 2012: Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe. *J. Hydrometeorol.*, **13**, 604-620.
- Harper, A. B., A. J. Wiltshire, P. M. Cox, P. Friedlingstein, C. D. Jones, L. M. Mercado, S. Sitch, K. Williams, and C. Duran-Rojas, 2018: Vegetation distribution and terrestrial carbon cycle in a carbon cycle configuration of JULES4.6 with new plant functional types. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2857-2873, doi:10.5194/gmd-11-2857-2018.
- Hong, J. W., and J. Hong, 2016: Changes in the Seoul metropolitan area urban heat environment with residential redevelopment. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **55**, 1091-1106, doi:10.1175/JAMC-D-15-0321.1.
- Hsieh, C.-I., G. Katul, and T.-W. Chi, 2000: An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Adv. Water Resour.*, **23**, 765-772.
- Jang, J. H., J. K. Hong, Y. H. Byun, H. J. Kwon, N. Y. Chae, J. H. Lim, and J. Kim, 2010: A sensitivity analysis of JULES land surface model for two major ecosystems in Korea: Influence of biophysical parameters on the simulation of gross primary productivity and ecosystem respiration. *Korean J. Agric. For. Meteorol.*, **12**, 107-121 (in Korean with English abstract).
- Jung, M., and Coauthors, 2011: Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **116**, G00J07, doi:10.1029/2010JG001566.
- Koster, R. D., and Coauthors, 2011: The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill, *J.*

- Hydrometeor.*, **12**, 805-822, doi:10.1175/2011JHM1365.1.
- MOLIT, 2018: *2018 Cadastral statistical annual report*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 929 pp.
- NIMS, 2017: Application of Boseong Standard Weather Observatory. National Institute of Meteorological Sciences, TRKO201800035591, 44 pp (in Korean with English abstract).
- Ozdogan, M., M. Rodell, H. K. Beaudoin, and D. L. Toll, 2010: Simulating the effects of irrigation over the United States in a land surface model based on satellite-derived agricultural data. *J. Hydrometeorol.*, **11**, 171-184, doi:10.1175/2009JHM1116.1.
- Park, J., H.-S. Kim, S.-J. Lee, and T. Ha, 2018: Numerical evaluation of JULES surface tiling scheme with high-resolution atmospheric forcing and land cover data. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **14**, 19-24, doi:10.2151/sola.2018-004.
- Prodhomme, C., F. Doblas-Reyes, O. Bellprat, and E. Dutra, 2016: Impact of land-surface initialization on sub-seasonal to seasonal forecasts over Europe. *Climate Dyn.*, **47**, 919-935, doi: 10.1007/s00382-015-2879-4.
- Schmid, H. P., 1997: Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agric. Forest Meteor.*, **87**, 179-200.
- Tang, J. Y., W. J. Riley, C. D. Koven, and Z. M. Subin, 2013: CLM4-BeTR, a generic biogeochemical transport and reaction module for CLM4: model development, evaluation, and application, *Geosci. Model Dev.*, **6**, 127-140, doi:10.5194/gmd-6-127-2013.
- van den Hoof, C., P. L. Vidale, A. Verhoef, and C. Vincke, 2013: Improved evaporative flux partitioning and carbon flux in the land surface model JULES: Impact on the simulation of land surface processes in temperate Europe. *Agric. Forest Meteor.*, **181**, 108-124, doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.011.
- van den Hurk, B., F. Doblas-Reyes, G. Balsamo, R. D. Koster, S. I. Seneviratne, and H. Camargo, 2012: Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe. *Clim. Dyn.*, **38**, 349-362, doi:10.1007/s00382-010-0956-2.
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates, 1991: The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Environmental Protection Agency, Tech. Rep. EPA/600/2-91/065, 93 pp.
- Weedon, G. P., C. Prudhomme, S. Crooks, R. J. Ellis, S. S. Folwell, and M. J. Best, 2015: Evaluating the performance of hydrological models via cross-spectral analysis: case study of the Thames Basin, United Kingdom. *J. Hydrometeor.*, **16**, 214-231, doi: 10.1175/JHM-D-14-0021.1.
- WMO, 2008: *Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8)*. World Meteorological Organisation, 681 pp.
- Yang, Z., F. Dominguez, X. Zeng, H. Hu, H. Gupta, and B. Yang, 2017: Impact of irrigation over the California central valley on regional climate. *J. Hydrometeor.*, **18**, 1341-1357, doi:10.1175/JHM-D-16-0158.1.