

Noah Multi Physics 모델과 CERES-Rice 모델의 작물 생육 및 증발산 모의 비교

김광수^{1*} · 강민석² · 정하늘¹ · 김 준¹

¹서울대학교 농업생명과학대학, ²(재)국가농림기상센터

(2013년 12월 13일 접수; 2013년 12월 28일 수정; 2013년 12월 28일 수락)

Comparison of Crop Growth and Evapotranspiration Simulations between Noah Multi Physics Model and CERES-Rice Model

Kwangsoo Kim^{1*}, Minseok kang², Haneul Jeong¹ and Joon Kim¹

¹College of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received December 13, 2013; Revised December 28, 2013; Accepted December 28, 2013)

ABSTRACT

Biophysical and biochemical processes through which crops interact with the atmosphere have been simulated using land surface models and crop growth models. The Noah Multi Physics (MP) model and the CERES-Rice model, which are a land surface model, and a crop growth model, respectively, were used to simulate and compare rice growth and evapotranspiration (ET) in the areas near Haenam flux tower in Korea. Simulations using these models were performed from 2003 to 2012 during which flux measurements were obtained at the Haenam site. The Noah MP model failed to simulate the pattern of temporal change in leaf area index (LAI) after heading. The simulated aboveground biomass with the Noah MP model was underestimated by about 10% of the actual biomass. The ET simulated with the Noah MP model was as low as 21% of those with the CERES-Rice model. In comparison with actual ET measured at Haenam flux site, the root mean square error (RMSE) of the Noah MP model was 1.8 times larger than that of the CERES-Rice model. The Noah MP model seems to show less reliable simulation of crop growth and ET due to simplified phenology processes and assimilates partitioning compared with the CERES-Rice model. When ET was adjusted by the ratio between leaf biomass simulated using CERES-Rice model and Noah MP model, however, the RMSE of ET was reduced by 30%. This suggests that an improvement of the Noah MP model in representing rice growth in paddy fields would allow more reliable simulation of matter and energy fluxes.

Key words: Crop growth, Evapotranspiration, Simulation, Land surface model, Crop growth model

I. 서 론

지표면을 구성하고 있는 토양과 식생은 대기와 생물리학적 과정과 생지화학적 과정을 통해 서로 상호작용

을 한다. 대기와 지표 사이의 물질순환 및 에너지 교환 과정을 포함하는 다양한 상호작용에 의해 지표면의 특성이 기상과 기후에 영향을 주게 된다. 예를 들어, 나지, 산림, 또는 농경지 등의 토지 사용에 따라 지표



* Corresponding Author : Kwangsoo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

면에서의 현열 및 잠열 교환 특성이 영향을 받으며 이에 따라 대기 경계층의 구조도 변화한다(Pielke, 2001).

지표면 특성에 따른 대기와 지표 사이의 상호작용을 이해하기 위해 개발되어온 지표모델은 지표의 복잡성을 묘사하는 정도와 개별적인 요소를 모의하는 모듈들과의 연계성에 따라 다양한 수준으로 구분된다(e.g., Pitman, 2003; Niu *et al.*, 2011). 대개의 경우, 지표면의 복잡한 특성을 모두 반영할 수 없기 때문에 특정 대표 식생을 바탕으로 대기와 지표 사이의 수분과 이산화탄소의 교환을 모의하는 지표모델들이 사용되어 왔다. 예를 들어, 최근에 널리 사용되고 있는 지표모델 중의 하나인 Noah 모델은 U.S. Geological Survey (USGS)에서 제작한 전구 지표 피복 자료에서 사용된 24개의 식생종류를 대상으로 지표면과 대기의 물질순환 및 에너지 교환을 모의한다(Loveland *et al.*, 2000).

지표모델은 지면의 식생을 단순화 하기 때문에 농경지에서 재배되고 있는 농작물의 생육양상을 모의하기에는 한계가 있다. 지표모델은 재배되고 있는 작물을 C3와 C4 작물로 단순화하거나 농경지라는 일반적인 식생 분류체계를 활용하여 지표면의 에너지 및 물질 플럭스를 모의한다. 또한, 극히 일부의 지표모델들만이 간단한 형태의 생물계절 모의과정을 통해 작물의 생육양상을 예측하도록 되어 있다(Lokupitiya *et al.*, 2009). 그러나, 하계작물의 경우, 파종기 이후에 시간에 따라 생육 양상이 변화하여 생육 초기에는 잎과 줄기 중심의 영양기관의 생장이 주를 이루고 여름철을 거치면서 개화기를 시작으로 생식생장으로 진입한다. 특히, 온도와 일장의 시간적 변화에 감응하여 작물의 생육단계가 결정이 된다. 이러한 작물의 생물계절 변화 양상이 지표모델에서 고려되고 있지 않기 때문에 농경지로부터의 플럭스를 정확하게 모의하는 것을 어렵게 한다.

한편, 지표면의 농작물 생육양상을 모의하기 위해 작물 생육 모델이 사용되어 왔다. 이러한 작물모델은 기상정보, 토양정보, 작물의 품종, 재배관리 정보들을 종합하여 주어진 조건에서 작물 생육과 관련된 과정을 모의한다(Jones *et al.*, 2003). 작물모델은 지표모델과 유사하게 증발산 모델을 포함하고 있을 뿐만 아니라 보다 정교한 생물모델을 통해 출엽시기나 개화기와 같은 생육상의 변화를 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 그러나, 작물모델에서 사용되고 있는 생물학적 과정들

은 주로 경험식에 의존하는 경우가 많아 기후변화 조건에서 작물모델의 예측력에 한계가 있으며 이에 대한 개선이 필요하다. 또한, 작물모델은 한 지점을 대상으로 사용할 수 있도록 설계되어 왔기 때문에, 일정 지역에서 각기 다른 조건에서 작물 모델을 활용하기에는 어려운 단점이 있다. 또한, 지표의 물질순환 및 에너지 교환 과정에 대한 모의과정이 단순화 되어 있어 지표와 대기간의 상호작용을 모의하기 어렵다.

작물의 생육 특성을 고려하여 농경지에서의 지표와 대기간의 상호작용을 모의하기 위해 작물모델과 지표모델을 통합하려는 노력이 시도되어 왔다(Lokupitiya *et al.*, 2009; Van den Hoof *et al.*, 2011). 그러나, 국내에서는 지표모델과 작물모델을 통합하기 위한 시도뿐만 아니라 작물모델과 지표모델 사이의 차이점 분석을 위한 연구조차 미흡하다. 본 연구에서는 논 중심의 농경지를 대상으로 지표모델과 작물모델의 작물 생육 및 증발산 모의결과들을 비교하고 이들 간의 차이점 분석을 통해 지표모델과 작물모델의 장점을 활용하여 지표와 대기 사이의 물질과 에너지 교환 과정을 개선하기 위한 요소들을 탐색하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델

논에서의 벼 생육 및 증발산 모의를 위해 Noah 모델을 기반으로 여러 물리 과정들이 개선된 Noah Multi-Physics (MP) 모델을 사용하였다(Niu *et al.*, 2011). Noah 모델은 복수의 토양층, 군락 전도도, 나지에서의 토양 증발산 및 식생의 생물계절 모의 등 여러 분야에서 개선이 되어 왔다(Ek *et al.*, 2003). Noah 모델은 특정 지점을 대상으로 기상자료를 강제(forcing) 자료로 활용하여 지표면을 모의하는 오프라인 모드나 수치기상모델과 연동하여 대기와 지표간의 상호작용을 모의할 수 있는 온라인 모드에서 모두 활용될 수 있다. Noah MP 모델에서는 식생 군락의 에너지 수지, 식생의 생물계절 관련 모듈들이 Noah 모델에 비해 개선되었다. 특히, 엽면적지수(Leaf area index; LAI)를 외부 입력자료에 의존하는 기존의 지표모델과 달리, Noah MP 모델은 모의된 광합성량을 바탕으로 LAI를 자체적으로 계산하여 지표면에서의 에너지 및 물질 플럭스 모의가 가능하다.

벼의 생육을 예측하기 위한 작물모델로는 Decision

Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) 시스템에 포함되어 있는 CERES-Rice 모델을 활용하였다. DSSAT 시스템은 CERES-Rice 모델을 포함하여 여러 작물 모델을 하나의 시스템으로 모아 하나의 농경지에서 다양한 형태의 농작물 재배방식에 따른 생산성을 예측할 수 있다(Jones *et al.*, 2003). CERES-Rice 모델은 기상, 재배관리, 작물의 유전정보, 토양수분 및 질소의 효과까지 고려하여 작물 생육뿐만 아니라 생산량까지도 모의할 수 있다(Timsina and Humphreys, 2006). CERES-Rice 모델의 주요 출력 변수 중의 하나인 증발산 모의 값을 Noah MP 모델의 잠열 플럭스 모의 값과 비교하여 논에서의 물질 교환 양상을 분석하였다.

2.2. 지표모델과 작물모델의 작물 생육 및 증발산 모의

국내 플럭스 관측망인 KoFlux의 장기간 플럭스 관측 사이트들 중 하나인 해남 농경지를 대상으로 관측자료가 본격적으로 생산된 2003년부터 2012년까지(Kang *et al.*, 2009; Kwon *et al.* 2010; <http://ncam.kr/page/koflux/database/siteInfo/HFK/siteDescription.html>) 지표모델과 작물모델을 이용하여 지표와 대기간의 물질 및 에너지 플럭스 모의를 수행하였다. Noah MP 모델을 위해 해남 플럭스 타워와 타워 인근의 해남 기상 관측소로부터 얻어진 30분 간격의 기상자료를 입력 기상 자료로 사용하였으며 CERES-Rice 모델은 30분 시간간격자료가 일별자료로 전환되어 입력 자료로 사용되었다. 이들 모델로부터 출력되는 자료는 Noah MP 모델의 경우 15분 자료, CERES-Rice 모델의 경우 일별자료였다.

해남의 플럭스 관측 사이트 인근지역은 논, 밭, 숲, 축산 시설 등 다양한 지표 특성을 가지고 있으나 논이 반 이상을 차지하고 있다. 따라서, 벼를 중심으로 하는 지표모델과 작물모델 모의 결과를 비교하기 위해 모의기간을 이앙일인 6월 15일부터 수확기인 9월 15일로 설정하였다. 벼 생육 및 수량 자료를 얻기 위해 해남 플럭스 관측소에서 약 2km 떨어진 해남 농업기술센터에서 수행된 벼의 지역장려품종 선발시험 결과 자료를 활용하였다. 플럭스 관측자료가 수집되는 기간 동안에 다른 품종들에 비해 장기간 재배된 오대벼를 모의 품종으로 선정하였다.

Noah MP 모델을 해남에 적용하기 전에 모델과 함

께 제공되고 있는 미국 일리노이주 Bondville에서 사용된 샘플자료와 모수값들을 활용하여 Noah MP 모델을 테스트 하였다. Noah MP 모델은 연도별로 당해연도의 기상자료를 활용하여 제어적분을 100년 동안 수행한 후 모의 결과값을 얻었다. Noah MP 모델의 생체중 초기값을 계산하기 위하여 Dingkuhn *et al.*(1990)이 보고한 LAI 값과 Evans and Poorter(2001)가 보고한 엽면적비(Specific leaf area; SLA) 값을 고려하여 설정하였다. Dingkuhn *et al.*(1990)이 보고한 이앙후 7일부터 49일까지의 LAI 값을 sigmoid 함수로 회귀분석한 결과, 이앙일의 LAI 값은 0.02 였다. Evans and Poorter(2001)에 따르면, 일반적으로 광조건이 충분한 경우에 SLA 값은 $22.4\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 인 것으로 보고하였다. 이들 값들을 고려하여 잎의 생체중 초기값은 0.89g m^{-2} 로 설정되었다. 줄기와 뿌리의 초기값의 경우 잎의 생체중의 1/2과 지상부 생체중의 1/10인 것으로 가정하여 설정되었다. 제어적분 없이 사용되는 CERES-Rice 모델은 매년 동일한 초기값을 이용하여 작물 생육 모의를 수행하였다.

Noah MP 모델의 경우 개별 품종에 대한 고려가 되어 있지 않아 C3 식물을 대상으로 설정된 모수들을 활용하였다. 또한, Noah MP 모델의 동적 식생 옵션을 선택하여 외부의 LAI 입력자료 없이 논과 대기의 물질 및 에너지 플럭스를 모의하였다. CERES-Rice 모델의 경우 품종 모수들을 결정하기 위해 오대벼의 관측 자료가 사용 가능한 2003년부터 2008년까지의 생육자료를 활용하여 모수를 설정하였다.

2.3. 모의 결과의 비교

Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델의 출력변수 중 엽면적지수, 생체중, 그리고 증발산에 관련된 변수들을 중심으로 두 모델의 모의 결과 값들을 비교 분석 하였다(Table 1). LAI는 지표의 물질순환 및 에너지 교환 특성을 결정하는 식생의 주요 변수이기 때문

Table 1. Variables that represent leaf area index (LAI), biomass, and evapotranspiration (ET) of CERES-Rice model and Noah Multi Physics (MP) model

Classification	Noah MP (unit)	CERES-Rice (unit)
LAI	LAI	LAI
Leaf Biomass	LFMASS (g m^{-2})	LWAD (kg ha^{-1})
Stem Biomass	STMAS (g m ⁻²)	SWAD (kg ha^{-1})
ET	QFX (W m^{-2})	ETAD (mm d^{-1})

에 지표모델과 작물모델의 LAI 모의 결과를 중점적으로 비교하였다. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델은 잎과 줄기의 건물중으로부터 엽면적지수를 계산하여 출력하기 때문에 SLA와 함께 LAI를 비교하였다. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델의 생체중 모의 결과값을 활용하여 광합성 모의 정도를 추정하여 비교하였다. Noah MP 모델은 15분별, CERES-Rice 모델은 일별 LAI와 생체중을 계산하기 때문에 Noah MP 모델의 일별 최대 LAI와 생체중을 CERES-Rice 모델의 결과값과 비교하였다. 실험기간 동안 작물 생육과 관련된 변수들은 측정자료가 없었으나 해남 농업기술센터의 수량자료가 활용 가능하였다. 수량으로부터 지상부 생체중을 추정할 수 있는 수확지수 값을 활용하여 모델 예측값과 실제 작물 생체중과 비교분석을 수행하였다.

증발산의 경우, 토양에서의 증발량과 벼 군락에서의 증산량이 Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델에서 계산이 되며, Noah MP 모델에서는 벼 군락에서의 증발량도 계산되기 때문에 개별적인 변수들을 비교하기 보다 군락에서의 총증발산량을 비교하였다. Noah MP 모델에서 모의된 15분 간격의 증발산을 일별단위로 합산하여 CERES-Rice 모델의 증발산 모의값과 비교 하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델을 이용한 엽면적 지수 모의

해남지역에서 Noah MP 모델을 이용하여 모의된 LAI는 이앙 시점인 6월 15일 이후 지속적으로 증가하다가 8월 중순 무렵 정체를 보이는 전형적인 sigmoid 곡선 형태를 보였다(Fig. 1A). 모의기간 중 연도별 최고 LAI는 대략 3.2에서 3.5이었다. 이와 대조적으로, CERES-Rice 모델을 이용하여 모의된 LAI는 개화기 이전까지는 증가하다가 개화기 이후로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 1B). CERES-Rice 모델이 예측한 연도별 최대 LAI 값은 1.9에서 3.7이었다.

벼의 전형적인 생육 양상은 개화기 이전까지 영양생장이 주로 이루어지다가 생식생장기 이후로 잎과 줄기의 생체중과 엽면적이 감소하는 경향을 보이기 때문에, CERES-Rice 모델의 모의결과가 실제적인 벼의 생육 양상과 일치하였다. 그러나, CERES-Rice 모델의 연도

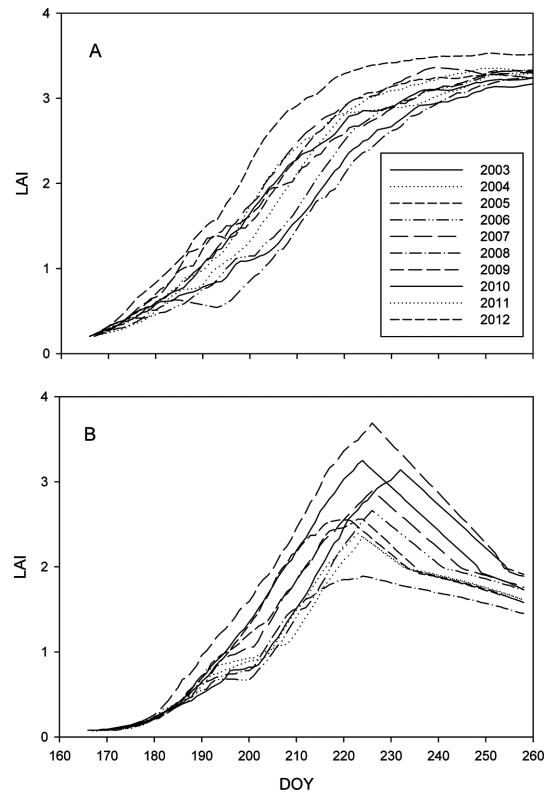


Fig. 1. Leaf area index (LAI) simulated from 2003 to 2012 using Noah Multi Physics (MP) model (A) and CERES-Rice model (B). Each line represents LAI estimates in each year. Simulated transplanting date was 15th of June in each year.

별 최대 엽면적 지수 모의 값은 Noah MP 모델의 엽면적 지수 값보다 평균적으로 0.6 정도 낮았다.

LAI에 대한 모의 결과의 차이는 지표모델과 작물모델의 특성에 기인한 것으로 보인다. Noah MP 모델은 물질 및 에너지 교환에 대한 모의를 중심으로 하기 때문에 생물계절에 대한 계산과정이 단순화되어 있다. 따라서, 출수기 이후에 노화된 잎이나 줄기가 분해되어 영양분이 종자로 전류되면서 엽면적이 감소하는 벼의 생리적 특성을 반영하지 못하고 있었다. 작물 모델에서는 이러한 현상들에 대한 고려가 되어 있어 개화기 이후의 엽면적감소 양상이 모의되었다.

한편, 비료가 사용되지 않는 경우에도 벼 군락에서 2 이상의 LAI가 보고되는 것을 고려하면(Shibayama and Akiyama, 1989), CERES-Rice 모델의 LAI 모의 값은 과소추정된 것으로 보였다. 특히, CERES-Rice 모델을 이용하여 벼 생육을 모의할 때 표준 시

비량이 적용되었기 때문에 모의된 엽면적 지수는 상당히 낮은 것으로 판단되었다. Palosuo *et al.*(2011)도 겨울밀의 생육모의에서 DSSAT 계열의 모델이 상대적으로 낮은 LAI를 모의한 것으로 보고한 점을 고려할 때, DSSAT 계열의 모델들이 LAI를 과소추정하는 경향이 있을 것으로 사료되었다.

3.2. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델을 이용한 생체중 모의

Noah MP 모델의 생체중 모의 값은 CERES-Rice 모델 값보다 상당히 작은 경향을 보였다(Fig. 2). Noah MP 모델의 경우 2003년부터 2012년 기간동안 최고 엽중이 443kg ha^{-1} 이었던 반면, CERES-Rice 모델은 같은 기간동안 최고 엽중이 $2,257\text{kg ha}^{-1}$ 였다. 같은 기간동안 연도별 최고 엽중의 최소값은 Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델의 모의 값은 각각 1524 와 393kg ha^{-1} 였다. 두 모델의 LAI 모의

값이 서로 비슷했다는 점을 고려한다면, Noah MP 모델은 CERES-Rice 모델보다 5배 정도의 얇은 잎을 모의하였다.

Noah MP 모델이 적은 엽중을 가지면서도 상대적으로 CERES-Rice 모델의 LAI와 유사한 값을 가질 수 있었던 것은 SLA 모수 값이 상당히 높게 설정되어 있었기 때문으로 판단되었다. Evans and Poorter (2001)는 10여개 C3 식물의 SLA를 조사한 결과, 광이 충분한 조건에서 대개 $22.4\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 였고, 광이 부족한 조건에서도 SLA는 대략 $44.7\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 였음을 보고하였다. 그러나, Noah MP 모델의 SLA 값은 $80\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 으로 강한 광조건에서 보고된 값보다 약 4 배 정도 큰 값으로 설정이 되어 있었다.

줄기의 건물중 역시, Noah MP 모델이 CERES-Rice 모델보다 더 낮은 건물중 값을 모의하였다(Fig. 3). Noah MP 모델의 경우, 줄기의 건물중이 생육 초반에는 일정 건물중을 유지하다가 지속적으로 증가하

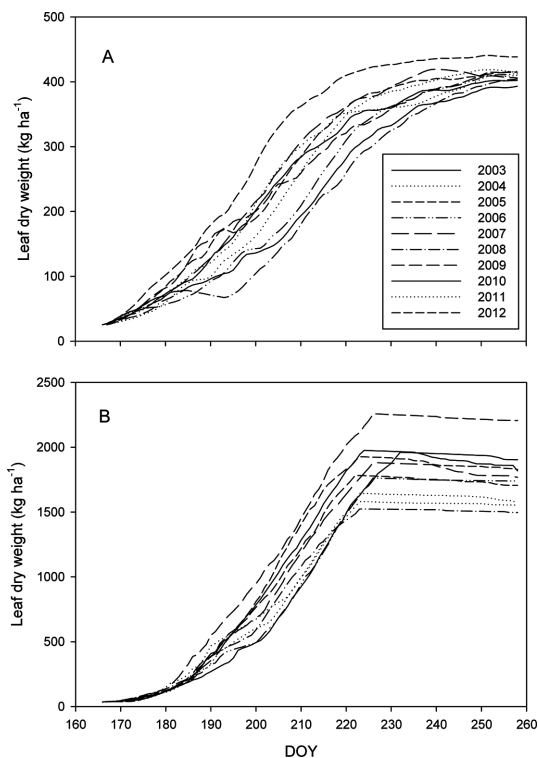


Fig. 2. Leaf biomass simulated from 2003 to 2012 using Noah Multi Physics (MP) model (A) and CERES-Rice model (B). Each line represents the estimates of leaf biomass in each year. The first date of simulation was the 15th of June.

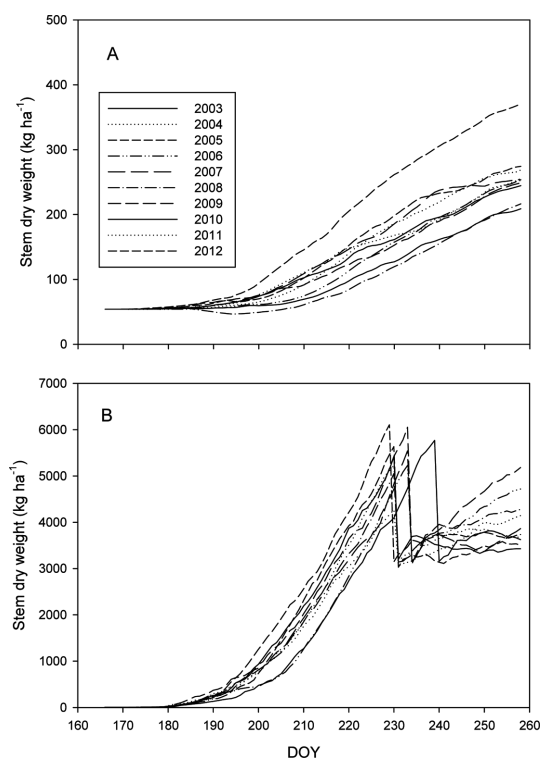


Fig. 3. Stem biomass simulated from 2003 to 2012 using Noah Multi Physics (MP) model (A) and CERES-Rice model (B). Each line represents the estimates of stem biomass in each year. The first date of simulation was the 15th of June.

는 경향을 보였다. 반면, CERES-Rice 모델이 모의한 줄기의 건물중은 개화기 까지 증가하다가 개화기 이후에 급격히 줄어들고, 그 이후 느리게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 급격한 줄기 건물중의 감소는 개화기 이후 종자를 생산하는 과정에서 줄기의 영양분이 분해되어 종자로 전류 되었다는 가정 때문인 것으로 사료되었다.

해남지역의 평균적인 벼의 단위면적당 수량이 $5,000\text{kg ha}^{-1}$ 이상이고 지상부 건물중 대비 곡물 생산량의 비율인 수확지수가 0.17에서 0.56인 것을 고려한다면(Yang and Zhang, 2010), 지상부 건물중은 최소 $4,000\text{kg ha}^{-1}$ 이어야 한다. 그러나, 2003년부터 2012년 동안 Noah MP 모델을 사용하여 모의된 지상부 건물중이 602에서 811kg ha^{-1} 에 불과해 건물중이 상당히 과소추정 되었다. 반면, CERES-Rice 모델에서 모의된 최대 지상부 건물중은 대략 5,851에서 $8,310\text{kg ha}^{-1}$ 로 해남에서의 평균적인 수확지수가 0.38에서 0.45였다면 실제 건물중과 유사할 것으로 추정되었다.

Noah MP 모델에서 모의된 광합성량을 탄수화물로 환산하여 모의기간 동안 합산한 값을 2003년부터 2012년까지 평균한 값은 $27,634\text{kg ha}^{-1}$ 이었다. 반면, 벼의 광사용효율이 2.2g MJ^{-1} 인 점을 고려할 때(Kiniry *et al.*, 1989), 해남에서의 평균적인 광합성량은 $31,742\text{kg ha}^{-1}$ 이었다. 따라서, Noah MP 모델에서 모의된 낮은 지상부 건물중은 광합성 산물의 분배 과정에서 상당히 적은 광합성 산물을 지상부 건물중으로 할당하고 있다는 것을 암시한다. Ackerly(1999)는 열대 수종인 *Hampea nutricia* 가 1g의 잎을 만들기 위해 4.4g의 광합성 산물이 필요하다고 보고하였다. 만약, 이러한 관계를 Noah MP 모델 모의 값에 적용한다면, 약 20%의 광합성 산물이 잎으로 전환되었을 것으로 가정한 경우, $6,280\text{kg ha}^{-1}$ 의 엽중이 모의될 수 있다.

3.3. Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델을 이용한 증발산 모의

2005년과 2007년의 경우, 벼의 생육기간동안 증발산(잠열플럭스)을 포함한 대부분의 자료가 결측되었다. 따라서, 이후부터 2005년과 2007년은 분석에서 제외하였다. Noah MP 모델을 사용하였을 때, 2005년과 2007년을 제외하고, -0.1에서 5.3mm의 일별 증발산

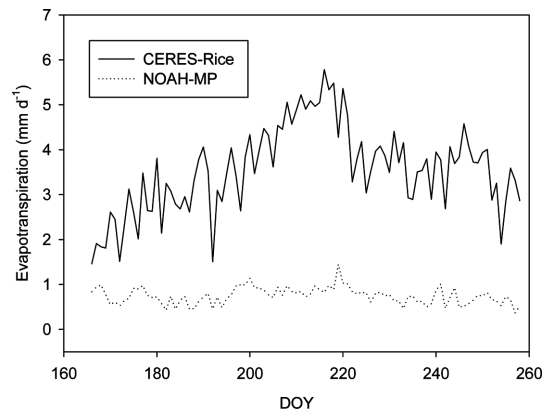


Fig. 4. Daily average evapotranspiration (ET) simulated using the Noah Multi Physics (MP) model and the CERES-Rice model from 15th of June to 15th of September for ten years (2003-2012).

량이 모의되었다. Noah MP 모델로 모의된 증발산값은 CERES-Rice 모델로 모의된 값보다 낮은 경향을 보였다(Fig. 4). 예를 들어, 이앙기인 6월 15일부터 수확기 무렵인 9월 15일 까지 Noah MP 모델의 경우 0.75mm d^{-1} 의 증발산량이 모의되었으나 CERES-Rice 모델은 평균적으로 3.57mm d^{-1} 의 증발산량이 모의되었다. 해남 플러스 타워 주변(타워를 중심으로 한 $2\text{km}\times 2\text{km}$ 격자)의 토지피복을 살펴보면(환경부 환경공간정보서비스, <http://egis.me.go.kr/>), 논이 63%, 밭이 14%, 그 밖의 식생(예, 활엽수림, 침엽수림)이 15%, 식생이 아닌 지역(예, 주거지)이 8%를 차지하였다. 이는 타워에서 관측된 증발산이 논 뿐만 아니라 다른 토지 피복에서의 기여도 포함하고 있음을 말해준다. 이러한 한계에도 불구하고 잠열 플럭스 관측값의 반자료가 없었던 일별 관측 자료와 모델의 모의자료와 비교하였을 때, Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델의 Root Mean Square Error (RMSE) 값은 2.67과 1.49mm d^{-1} 로 Noah-MP 모델이 더 큰 오차를 가졌다. 반면에, 이들 모델의 결정계수는 각각 0.41과 0.36 이어서 Noah MP 모델 모의 값이 잠열 플럭스 관측자료의 변이를 좀 더 많이 설명할 수 있었다(Fig. 5).

무엇보다도 두 모델 결과의 큰 차이는 CERES-Rice 모델이 증발산을 평균적으로 약간 과대평가하는데 반해, Noah MP 모델은 증발산을 크게 과소평가한다는 점이다. CERES-Rice 모델의 증발산이 과대평가되는 것은 1) 벼의 경우 담수조건에서 상당기간 재

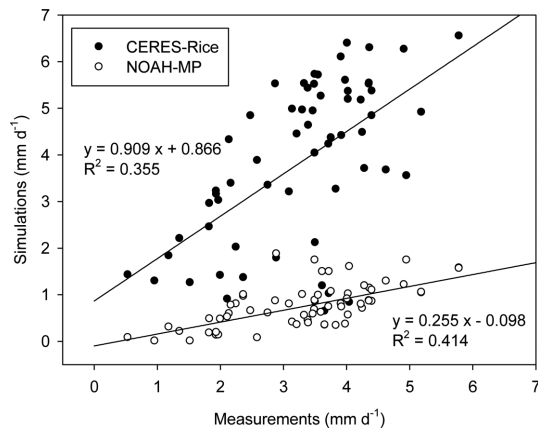


Fig. 5. Comparison of evapotranspiration (ET) simulated using models and measured at Haenam flux site. ET was simulated using CERES-Rice model and Noah Multi Physics (MP) model. Measurements of ET were obtained only on dates where no missing occurred in a 24-period.

배되기 때문에 다른 토지 피복에 비해 높은 증발산량을 보인다는 점과 2) CERES-Rice 모델은 논을 대상으로 증발산을 계산했다는 점에서 충분히 예상되었던 결과이다.

Noah MP 모델이 증발산을 과소모의 하는 것은 모델내의 증발산 계산 알고리즘에 기인한 것이다. Noah MP 모델은 녹색잎이 차지하고 있는 단위면적비를 잠열플럭스에 곱하여 단위면적당 증발산을 계산한다. 녹색잎의 비중을 계산하기 위해 잎과 줄기를 포함하는 지상부 면적 지수가 사용되며 모델 내에서는 이러한 지상부 면적지수가 생체중으로부터 계산된다. 따라서, Noah MP 모델이 생체중을 과소모의하는 경우에는 증발산량 역시 과소모의 된다. 또한, Noah MP 모델에서는 논에서의 담수조건을 가진 지표면을 모의하지 못하기 때문에 지표에서의 증발량이 과소 모의 되었다. 따라서, Noah MP 모델은 담수조건을 논에서 증발량을 계산하는 모듈과 생체중 개선을 위한 모듈이 추가된다면 증발산 모의의 정확도가 높아질 것으로 기대되었다.

증발산량으로 물사용효율을 계산하였을 때, Noah MP 모델은 CERES-Rice 모델보다 벼의 물사용효율이 낮은 것으로 모의하였다. Karaba *et al.*(2007)은 일본 벼품종인 Nipponbare의 경우 토양수분이 충분한 조건과 건조조건에서 벼의 물사용효율은 대략 1.5 과 2g kg⁻¹인 것으로 보고했다. Noah MP 모델과 CERES-

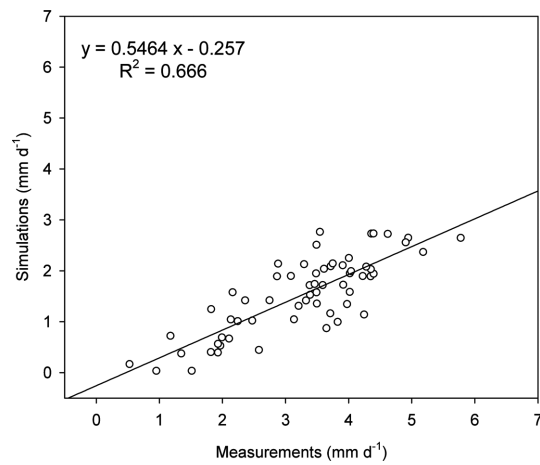


Fig. 6. Comparison of evapotranspiration measurements and corrected evapotranspiration under the assumption that Noah Multi Physics model simulated four big leaves rather than one big leaf.

Rice 모델의 경우 증발산량 대비 잎과 줄기의 건물중 증가비율을 계산한 결과 각각 1.2과 2.0g kg⁻¹ 이었다. Noah MP 모델은 관계조건이 설정되어 있지 않았기 때문에 벼의 물사용효율이 과소평가 된 것으로 추정할 수 있다. 이는 Noah MP 모델의 증발산을 개선하기 위해서는 생체중의 보정 뿐만 아니라 증발산량에 대한 보정이 필요하다는 것을 암시한다. 반면, CERES-Rice 모델은 자동관개가 설정되어 벼 생육이 모의되었기 때문에, 물사용효율이 과대평가 되어 있는 것을 파악할 수 있었으며, 이는 광합성계산이 복사사용효율에 의존하기 때문으로 추정되었다.

Noah MP 모델과 CERES-Rice 모델의 엽중 값을 비교 해보았을 때 Noah MP 모델은 한 지점에 있는 3.87개의 잎 중 하나를 모의하고 있다고 가정할 수 있다. 실제로, Noah MP 모델이 모의한 증산량에 3.87배를 증가시켜 증발량과 합산하여 증발산량을 보정하였을 경우, 증발산 관측자료 변이의 약 66%를 설명할 수 있었다(Fig. 6). RMSE 값도 1.86mm d⁻¹로 30% 가량 감소하였다. 그러나, 관측자료와 비교하였을 때 여전히 보정하여 모의된 증발산 값을 과소추정하였다. 이러한 결과는 논에서의 담수 조건이 Noah MP모델에서 고려되지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서, Noah MP 모델을 개선하여 벼의 재배환경 뿐만 아니라 벼의 생육을 정확히 반영하고 모의할 수 있도록 수정된다면, 논에서의 물질순환과 에너지 교환을

좀더 정확하게 모의할 수 있을 것으로 사료되었다.

단기적으로는, Noah MP 모델의 증발산 모의를 개선하기 위해 CERES-Rice 모델의 생체중 모의 값과 Noah MP 모델의 생체중 모의값을 활용하여 보정할 수 있는 방법이 있을 것이다. 그러나, 궁극적으로는 Noah MP 모델의 생체중 계산 과정을 개선하여 농경지에서의 플럭스 모의 능력을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해, 국내 농경지의 상당부분을 차지하고 있는 논에서의 잠열 및 현열 플럭스 예측 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

적 요

대기와 지표면을 구성하고 있는 토양 및 식생은 생물리학적/생지화학적인 과정을 통해 서로 상호작용을 한다. 이러한 과정을 모의하기 위해 지표모델과 작물 생육모델이 사용되고 있다. 지표모델인 Noah MP 모델과 작물생육모델인 CERES-Rice 모델을 비교하기 위해 해남 플럭스 관측소 인근 지역에서 작물의 생육과 증발산량을 모의하였다. 플럭스 관측자료가 수집된 2003년부터 2012년까지 해남 플럭스 관측소의 주요 식생인 벼를 대상으로 생육과 증발산량을 모의되었다. Noah MP 모델은 단순한 식생 모의 과정으로 인해 개화기를 전후로 하는 벼의 LAI 변화양상을 정확하게 반영하지 못하였다. 벼의 생체중 예측에 있어서도 실제 관측될 수 있는 생체중보다 대략 10분의 1 수준에 해당하는 생체중이 모의되었다. 증발산량 모의의 경우에도, CERES-Rice 모델의 모의값보다 약 21%에 해당하는 증발산량을 모의하였다. 반면, CERES-Rice 모델의 경우 LAI의 변화와 생체중 모의 값은 실제의 벼 생육 양상과 유사할 것으로 추정되었다. 또한, 증발산량의 경우에도 해남 플럭스 관측소에서 측정된 값과 비교하였을 때 Noah-MP모델의 모의값이 CERES-Rice 모델의 모의값에 비해 RMSE 값이 1.8배 높았다. Noah MP 모델이 보이는 높은 오차값들은 Noah MP모델이 논 지포상태를 적절히 반영하지 못하였기 때문으로 사료되었고, 특히 과소추정된 생체중을 보정하여 증발산량을 예측할 경우 오차를 30%까지 줄일 수 있을 것으로 보인다. 따라서, Noah MP 모델에 논에서의 지포 특성을 반영할 수 있다면 보다 정확한 물질순환과 에너지 교환을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(153-3100-3133-302-350).

REFERENCES

- Ackerly, D., 1999: Self-Shading, carbon gain and leaf dynamics: a test of alternative optimality models. *Oecologia* **119**, 300-310.
- Dingkuhn, A., H. F. Schnier, S. K. D. Datta, E. Wijangco, and K. Dorffling, 1990: Diurnal and developmental changes in canopy gas exchange in relation to growth in transplanted and direct-seeded flooded rice. *Australian Journal of Plant Physiology* **17**(2), 119-134. doi:10.1071/PP9900119
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research* **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Evans, J. R., H. Poorter, 2001: Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. *Plant, Cell and Environment* **24**(8), 755-767. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2001.00724.x
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**, 235-265.
- Kiniry, J. R., C. A. Jones, J. C. O'toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne, and D. A. Spanel, 1989: Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Research* **20**(1), 51-64.
- Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y. J. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon climate. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 175-191.
- Karaba, A., S. Dixit, R. Greco, A. Aharoni, K. R. Trijatmiko, N. Marsch-Martinez, A. Krishnan, K. N. Nataraja, M. Udayakumar, and A. Pereira, 2007: Improvement of water use efficiency in rice by expression of HARDY, an Arabidopsis drought and salt tolerance gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 15270-15275.
- Kwon, H., J. Kim, and J. Hong, 2010: Influence of the asian monsoon on net ecosystem carbon exchange in two major plant functional types in Korea. *Biogeosciences* **7**, 1493-1504.

- Lokupitiya, E., S. Denning, K. Paustian, I. Baker, K. Schaefer, S. Verma, T. Meyers, C. Bernacchi, A. Suyker, and M. Fischer, 2009: Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands. *Biogeosciences* **6**, 969-986.
- Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, Z. Zhu, L. Yang, and J. W. Merchant, 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* **21**, 1303-1330.
- 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 multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research* **116**.
- Pielke, R. A., 2001: Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus Convective rainfall. *Reviews of Geophysics* **39**, 151-177.
- Pitman, A. J., 2003: The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology* **23**, 479-510.
- Shibayama, M., and T. Akiyama, 1989: Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass. *Remote Sensing of Environment* **27**(2), 119-127.
- Timsina, J., and E. Humphreys, 2006: Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review. *Agricultural Systems* **90**, 5-31.
- Van den Hoof, C., E. Hanert, and P. L. Vidale, 2011: Simulating dynamic crop growth with an adapted land surface model-JULES-SUCROS: Model development and validation. *Agricultural and Forest Meteorology* **151**(2), 137-153.
- Yang, J., and J. Zhang, 2010: Crop management techniques to enhance harvest index in rice. *Journal of Experimental Botany* **61**, 3177-3189.