

Noah LSM을 이용한 지표 플럭스 산정 및 한반도에서의 적용성 검토

장애선* · 문희원* · 황석환** · 최민하**

* 한양대학교 건설환경공학과

** 한국건설기술연구원 수자원연구실

Estimation of Surface Fluxes Using Noah LSM and Assessment of the Applicability in Korean Peninsula

Ehsun Jang* · Heewon Moon* · Seok Hwan Hwang** · Minha Choi**

* Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

** Water Resources Research Division, Korea Institute Of Construction Technology

요 약

지표와 대기간의 에너지 및 수문기상인자들의 교환에 대한 이해는 수자원분야의 연구에 있어서 기초라 할 수 있으며 이를 위하여 Land Surface Mode(LSM)을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Noah Land Surface Model (Noah LSM)은 에너지 방정식과 물수지 방정식을 기반으로 한 지면모형으로 수문기상인자들에 대한 모의가 가능하다. 국외에는 Noah LSM을 이용한 다양한 연구사례들이 있으나, 국내에서는 적용사례가 매우 부족하며, 특히 단독으로 Noah LSM을 적용한 사례는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 Noah LSM의 국내 적용성을 평가하기 위해 해남(HFK)과 광릉(GDK) Korea Flux Network (KoFlux)에서 제공하는 자료를 입력자료로 활용하여 모형 결과를 산출하고, 순 복사량, 잠열, 현열의 결과를 관측 자료와 비교·검증하였다. 모형 결과와 관측치를 비교한 결과 회귀분석에서의 상관계수 값이 각 인자 별로 해남은 0.83~0.99, 광릉은 0.64~0.99로 신뢰할 만한 수준인 것으로 나타났다.

핵심용어 : Noah LSM, KoFlux, 순 복사량, 잠열, 현열

Abstract

Understanding of the exchange between the water and energy which is happening between the surface and atmosphere is the basic of studying water resources. To study these, lots of researches using Noah Land Surface Model(LSM) are in progress. Noah LSM is based on energy and water balance equation and simulates various hydrological factors. There are diverse researches with Noah LSM are ongoing in overseas, on the other hand not enough study has been done. Especially there is almost no study using uncoupled Noah LSM in Korea. In this study we used data from Korea Flux Tower in Haenam(HFK) and Gwangneung(GDK) as forcing data to simulate the model and compared its result of net radiation, sensible heat flux and latent heat flux with the observation data to assess the applicability of Noah LSM in Korea. Regression coefficients of the comparison results of Noah LSM and observation show good agreement with the value of 0.83~0.99 at Haenam and 0.64~0.99 at Gwangneung which means Noah LSM can be trusted.

Keywords : Noah LSM, KoFlux, Net Radiation, Sensible Heat Flux, Latent Heat Flux

1. 서론

기후변화는 현재 세계적으로 인류가 직면하고 있는 가장 중요한 문제들 중 하나이다(Adger et al., 2005). International Panel on Climate Change (IPCC)의 제 4차 보고서(2007)에 따르면 현재 전 세계는 이미 심각한 기후변화를 겪고 있고, 그 변화의 속도가 점점 가속화되고 있는 추세라고 한다. 또한 지구 대기 온도가 현재의

상승 추세를 이어간다면 2100년까지 1.1°C ~ 6.4°C가 증가될 것이라고 예측하였다. 이러한 기후변화는 지역 별 토양수분, 증발산량, 강수량 증감 등의 수문기상인자들의 시간적 변동성뿐만 아니라 공간적 변동성에도 직접적인 영향을 미치게 되고, 이는 다양한 인자들에 대한 연구의 필요성을 야기한다. 수문학적 기상인자에 대한 연구를 위해서는 대기와 지표간의 에너지, 물, 그리고 운동량 흐름에 대해 파악해야 하며(Dai et al., 2005),

+ Corresponding author : mchoi@hanyang.ac.kr

물과 에너지 순환에 대한 정확한 평가 및 예측을 위해 물리적 관측 자료에 기반한 수문모형의 신뢰할 만한 모의가 필요하다(Kustas and Norman 1996; Moulin et al., 1998). 또 정확한 수문모형의 모의를 통한 수문기상인자, 즉, 에너지, 운동량 흐름 등의 예측에 관한 연구가 수행되어야 한다.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP)이 주도하는 연구기관들의 협력 하에 1993년 초 개발된 Noah LSM은 독립적인 모의가 가능할 뿐만 아니라 기상 모델인 Weather Research and Forecasting model(WRF)와 같은 다른 모델들과 결합된 방식으로도 구동될 수 있다(Kato et al., 2007). Noah LSM의 전신인 Oregon State University Land Surface Model(OSU LSM)은 1980년대에 개발된 지표모델로 두 개의 토양층(0~5cm, 5~100cm)에 대해 모의할 수 있다(Chang et al., 1999). 여기서 발전된 모형인 Noah LSM은 네 개의 토양층(0~10cm, 10~30cm, 30~60cm, 60~100cm)에 대한 자료를 초기조건으로 설정할 수 있다는 장점을 가지고 있고, 모형은 에너지방정식과 물수지방정식을 기반으로 하고 있다(Sridhar et al., 2003). 또한, 토양층 중 뿌리층의 깊이를 상수로 처리하는 OSU LSM과 달리 Noah LSM은 이를 변수로 처리하여 보다 정확한 지역적 특성을 반영할 수 있다는 장점을 가진다(De Haan et al., 2007). Noah LSM이 모의할 수 있는 인자들은 토양수분, 토양온도, 지표면온도, 적설깊이, 눈 물 등가물, Energy Flux와 Water Flux 등의 수문기상인자들로 이에 관한 연구가 현재에도 활발히 진행되고 있다.

DeHaan et al. (2007)은 중앙아프리카 지역에서 기상인자들을 OSU LSM과 Noah LSM 각각을 이용해 모의한 결과, 전반적으로 Noah LSM이 더 합리적인 결과를 도출한다고 판단하였으며, 특히 강수의 변동성과 Temperature climatology, Precipitation climatology를 훨씬 현실적으로 모의함을 확인했다. Sridhar et al. (2002)은 NOAA-Oregon State University (NOAH-OSU)를 이용해 Oklahoma지역의 다양한 지형조건에 대해 에너지플럭스를 산출하고, 이를 관측치와 비교하여 Noah LSM의 모의 결과가 RMSE값 1.6~2.5 MJ/m²d로 잘 부합하는 것을 확인했다. Hogue et al. (2005)은 미국 Arizona주의 semiarid 지역에 Noah LSM을 적용하여 현열, 토양열, 지온, 잠열에 대한 모형 결과값과 관측치의 비교를 통해 현열, 토양열, 지온에 대해 높은 정확도를 보임을 증명하였다. Radell and Rowe (2008)은 Nebraska Sand Hills 지역의 사구, 건조한 지역 그리고 습한 지역을 대상으로 Noah LSM을 이용해 지표 플럭스를 모의하여 Noah LSM이 사구지역과 건조한 지역에 대해 RMSE값이 20~25%정도로 믿을만한 결과를 도출함을 확인했다. Wei et al. (2012)은 Noah LSM에 변수를 추가하여, 지표상의 온도, 잠재열의 흐름, 그리고 연평균 유출량의 모의값을 관측 값과 비교하여 변

수를 추가하기 전보다 향상된 결과가 산출됨을 확인했다. 선행연구의 결과들로부터 알 수 있듯이 Noah LSM은 국지적 모의에서 상당히 신뢰할 만한 결과의 모의가 가능하다.

이와 같이 국외에서는 Noah LSM을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면, 국내에서는 Noah LSM이 WRF와 결합하여 토양수분을 분석하거나 지표층 바람장의 대기경계층 모수화와 지면 모델 민감도 평가 등 다른 모델과 함께 진행한 연구들은 있지만, Noah LSM을 단독으로 적용하여 수문기상인자들의 변화를 모의한 연구 사례가 미흡하다. 이에 본 연구에서는 Noah LSM에 초점을 맞춰 모형의 국내 적용성을 평가하고자 모형의 강제입력자료와 검증자료로 플럭스 타워의 관측자료를 이용하여 모델을 구동하고 그 결과를 해남과 광릉 지점의 에너지 플럭스 데이터를 비교하였다.

2. 연구 방법 및 기본이론

2.1 연구 대상 지역

플럭스타워가 위치한 해남은 벼농사가 이루어지는 지역이고 광릉은 산지에 위치해 있다. 연구지역인 해남과 광릉에서의 플럭스 데이터는 에디 공분산법에 의해 수집되었다. 에디 공분산법은 지표와 대기 사이에서 교환되는 에너지나 이산화탄소 등의 연직 플럭스 등에 있어 에너지 보존 방식을 바탕으로 에디 확산성에 대한 가정 없이 플럭스를 구하는 방법이며, 물과 에너지 순환에 있어서 관측자료의 품질검증과 보정을 통한 자료생산이 관측 시스템의 최적화에 있어서 필수적이다. 현재 국내외 다양한 장단기 관측에 에디 공분산법이 사용되고 있으며, 우리나라 모든 KoFlux에서 에디 공분산법을 사용하고 있다(Kim et al., 2003; Hong et al., 2003; Byun et al., 2013).

2.1.1 해남

우리나라에서는 광릉, 해남, 설마천, 청미천 등 네 곳의 KoFlux가 Asia Flux에 속해있는데, 해남은 그 중 가장 남쪽에 위치한 곳이다. 해남 KoFlux 타워는 전라남도 해남군 해남 기상관측소 근처 농경지 (34° 33'18"N, 126° 34'17"E, 해발 13.74 m)에 위치하고 있으며(Fig. 1), 2002년 7월부터 관측이 시작되었다. 해남에 대한 지역적 특성은 Table 1에 나타내었다. 해남에서는 2002년 7월부터 관측이 시작되었다. KoFlux가 위치한 곳은 분지형 농경지로 주 농작물은 벼, 보리 등 주로 혼합적인 농경지의 형태를 띈다(Choi et al., 2010; Kwon, 2009). 강우는 여름철에 집중되어 있으며, 연 평균 강우량은 1,306 mm이다. 이 지역을 대표하는 토양통은 가곡(Fine Silty, Aeric

Endoaquepts)으로 투수성은 약간 느리거나 양호하며, 배수는 다소 불량하다(NIAST, 2000). 해남은 주로 미사질 양토로 구성되어있으며 38.5%의 모래, 31.5%의 미사와 30%의 점토로 구성되어 있다(Choi et al., 2010).

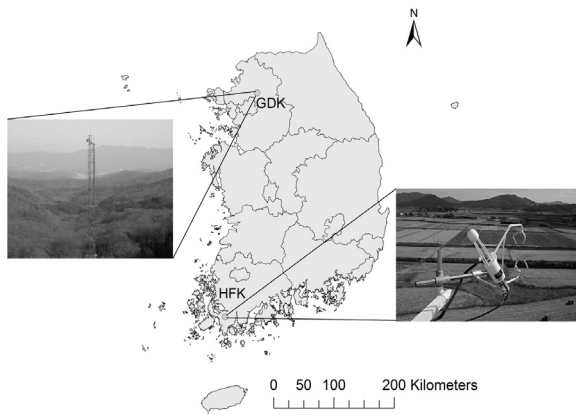


Fig. 1. Study Area (Location of Haenam and Gwangneung Flux Tower) (www.asiaflux.net; www.sanlim.kr)

Table 1. Geographic data and characteristics of Haenam

Study Area	Haenam
Latitude	34° 33'18"N
Longitude	126° 34'17"E
Terrain Type	Farmland
Elevation	13.74 m
Annual Precipitation	1,306 mm
Soil Type	Silt loam to loam
Measurement Period	2002 ~ present

해남 지역의 에디 공분산 측정은 20.8 m에서 이루어지며, 30분 간격으로 데이터가 측정된다. Table 2는 플럭스타워에 설치된 관측 장비와 각각이 측정하는 수문기상인자를 나타내고 있다. 고속 반응 기기인 초음파 풍향-풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc, 이하 C.S.I)를 이용하여 풍속과 풍향이 측정되고, 이산화탄소와 수증기의 농도를 적외선 기체 분석기(LI-7500 H₂O, CO₂ Gas Analyzer, Li-Cor)로 측정한다(Choi et al., 2010). 복사, 온도, 습도, 토양온도, 토양수분과 같은 기본적인 변수들은 토양열 플럭스 측정기(HFP01SC, C.S.I)와 저속 반응 기기인 순복사계(CNR1, Kipp & Zonen Co.), 토양 수분 측정기(CS615, C.S.I), 토양 온도 측정기(TCAV, C.S.I)를 통해 측정된다(Hur and Choi, 2011; <http://www.asiaflux.net>).

Table 2. Instruments and Measured Hydrometeorological Factors

Instruments	Hydrometeorological Factors
Sonic Anemometer	Wind Direction and Velocity
Infrared Gas Analyzer	Latent Heat Flux, CO ₂ , Vapor Concentration
Net Radiometer	Radiation, Temperature, Humidity
Soil Temperature Measuring Instrument	Soil Temperature
Soil Moisture Measuring Instrument	Soil Moisture

2.1.2 광릉

광릉 KoFlux 타워는 경기도 포천시 (37° 45'N, 127° 9'E, 해발 260 m)에 위치하고 있다(Fig. 1). 광릉에 대한 지역적 특성은 Table 3에 나타내었다. 광릉은 2002년부터 관측이 시작되어 현재까지 플럭스타워가 운영 중에 있다. 광릉의 KoFlux는 혼합림에 위치하고 있으며 낙엽성의 침엽수가 주를 이룬다. 강우는 여름철에 집중되어 있으며, 연 평균 강우량은 1,332mm이며(Hwang et al., 2013), 미사질 양토의 토양 특성을 갖는다.

Table 3. Geographic data and characteristics of Gwangneung

Study Area	Gwangneung
Latitude	37° 45'N
Longitude	127° 9'E
Terrain Type	Mountainous area
Elevation	260 m
Annual Precipitation	1,332 mm
Soil Type	Silty loam
Measurement Period	2002 ~ present

광릉지역의 에디 공분산 데이터는 40.7m에서 30분 간격으로 측정된다. Table 2는 플럭스타워에 설치된 관측 장비와 각각이 측정하는 수문기상인자를 나타내고 있다. 광릉에서도 해남지역의 KoFlux Tower와 마찬가지로 고속 반응 기기인 초음파 풍향-풍속계 (CSAT3, C.S.I)를 이용하여 풍속과 풍향을 측정하고, 이산화탄소와 수증기의 농도를 적외선 기체 분석기 (LI6262 & Thermocouple temperature sensor)로 측정한다. 복사, 온도, 습도, 토양온도, 토양수분과 같은 기본적인 변수들은 토양열 플럭스 측정기 (HFP-3, C.S.I)와 저속 반응

기기인 순복사계 (CNR1, Kipp & Zonen Co.), 토양 수분 측정기 (CS615, C.S.I), 토양 온도 측정기 (TCAV, C.S.I)를 통해 측정된다(http://www.asiaflux.net).

2.2 연구방법

2.2.1 Noah LSM

Noah LSM은 다음과 같은 물수지 방정식(1)과 에너지 보존 방정식(2)을 기본으로 하고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = - \int_S U_k dS + \sum_k \int_{\Delta V} M_{kk} (1 - \delta_{kk}) dV + \int_{\Delta V} S_k dV \quad (1)$$

$$R_{net} = LE + H + G \quad (2)$$

- V : Control volume (m³)
- ρ_k : Intrinsic density of constituent k (kg/m³)
- θ_k : Partial volume of constituent k (m³/m³)
- h_k : Specific enthalpy (J/kg)
- U_k : Mass flux (kg/m²s)
- M_{kk} : Phase change from phase to phase (kg/m³s)
- δ_{kk} : Kronecker delta
- S_k : Source of sink term
- R_{net} : Net radiation (W/m²)
- LE : Latent heat flux (W/m²)
- H : Sensible heat flux (W/m²)
- G : Ground heat flux (W/m²)

물수지방정식(1)은 이슬의 응축, 증발로 인한 손실과 강수량의 차단 등으로부터 결정된 질량 균형으로부터 식물에 저장된 수분의 양을 계산한다. 에너지방정식(2)은 현열과 잠열 그리고 토양열의 합이 순복사량을 나타낸다.

본 연구에서는 2006년 5월 1일부터 2006년 5월 29일 까지 29일간의 해남지점과 광릉지점의 플릭스타워 관측 자료를 강제입력자료로 이용하여 Noah LSM을 모의하였다. Noah LSM 모의를 위한 강제 입력 자료는 기온, 상대습도, 기압, 일사량, 강우량, 평균풍속 그리고 하향 장파복사가 사용되며 30분 단위로 플릭스타워에서 수집된 자료가 사용되었다. 모형의 구동 결과로 얻어지는 여러 인자에 대한 결과 중 잠열과 현열, 순복사량의 에너지플럭스 대한 결과들을 플릭스타워를 통해 실제 관측된 값들과 비교해 검증을 수행하였다.

2.2.2 오차 추정 방법

Noah LSM에 의해 얻어진 결과 값과 관측값들은 Bias와 Root Mean Square Error(RMSE)를 사용하여 분석하였다. Bias와 RMSE는 비교적 간단한 방법으로 두 데이터의 일치 정도를 파악할 수 있는 방법으로 각각의 계산 식은 다음 (3), (4)와 같다.

$$Bias = \sum_{i=1}^n (x_{measured,i} - x_{calculated,i}) \quad (3)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{measured,i} - x_{calculated,i})^2}{n}} \quad (4)$$

식 (3)와 (4)에서 n은 자료의 개수, x_{measured,i}는 플릭스타워에서 관측된 결과를 나타내며, x_{calculated,i}는 Noah LSM의 구동 결과로 얻어진 값을 의미한다.

3. 결과

Fig. 2~4는 해남의 에너지플럭스의 모형 값과 관측 값을 시계열 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 해남지역의 모형 값과 관측 값의 순복사에너지는 그 값뿐만 아니라 경향까지 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 모형 내에서 순복사에너지는 에너지방정식에 의해 현열, 잠열과 지열의 합으로 계산되어지기 때문이다. 또한 24시간 주기의 변화를 보였는데, 이는 하향 단파 복사 에너지의 영향으로 인하여 발생한다(Kwon et al., 2009). 현열과 잠열의 경우에는 모형 값이 관측 값에 비해 낮게 산정되었는데, 이러한 경향은 낮 시간에 좀 더 두드러졌다(Fig. 3, Fig. 4). 그러나 일최솟값의 경우 모형 값이 관측 값 보다 높게 산정되었으며, 이러한 모형의 양극 값에 대한 과소 및 과대 산정의 경향성이 비교적 낮은 bias의 원인으로 작용했을 것으로 판단된다(Table 4). 또한 강우가 발생한 시점에서의 낮 시간에 해당하는 잠열에 대한 모형의 결과와 관측 데이터가 더욱 잘 일치하는 것으로 나타났는데 Choi et al. (2010)이 확인하였듯이 잠열 에너지 산정의 경우 강우 발생 시 강우의 증발이 대기중으로 곧바로 일어나며 그 값이 모형 내에서 높게 계산되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 해남의 에너지플럭스의 관측 값과 모형 값을 1:1로 대응시킨 그래프이다. 순복사량(Fig. 5(a))의 결과에서는 특히 다른 에너지플럭스에 비하여 관측 값과 모형 값이 거의 일치하는 것으로 나타났으며, R²과 선형회귀식에서의 a값은 각각 0.99로 모형 값과 관측 값 간의 높은 상관성을 반영하였다. 이에 반

하여 현열과 잠열의 결과는 순복사량의 결과에 비해 관측 값과 모형 값이 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5(b), Fig. 5(c)). 현열과 잠열의 a값은 각각 0.96과 0.91이며, R²는 각각 0.84와 0.83로 산정되었다(Table 4).

현열과 잠열 모두 간헐적으로 관측 값이 존재하지 않는 결측 구간이 존재하지만, 관측 값이 존재하는 구간에서는 모형의 결과와 관측 데이터 값이 대부분 일치하는 것으로 나타났으며, 또한 그 경향성도 일치하는 것으로 보아 결측 구간의 모형 값을 신뢰할 수 있을 것이라고 생각된다.

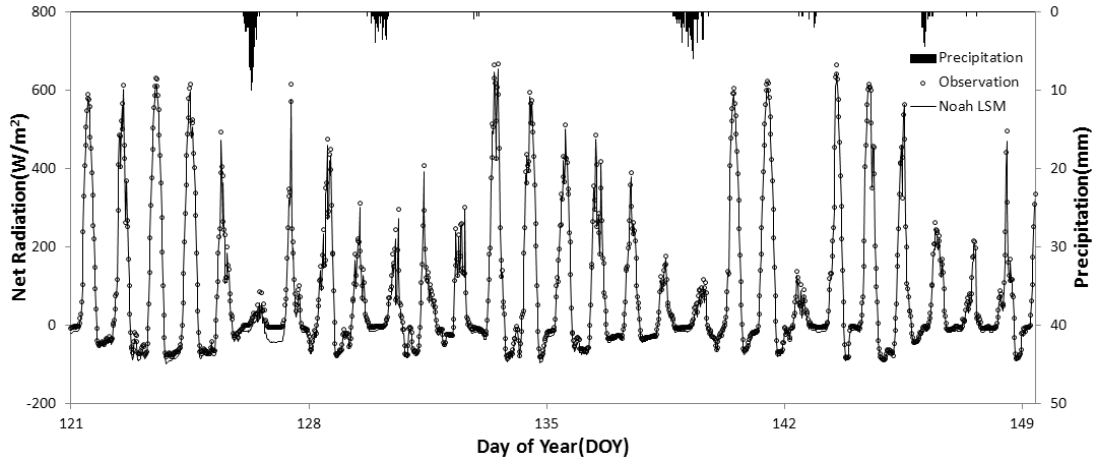


Fig. 2. Net Radiation (W/m^2) at Haenam

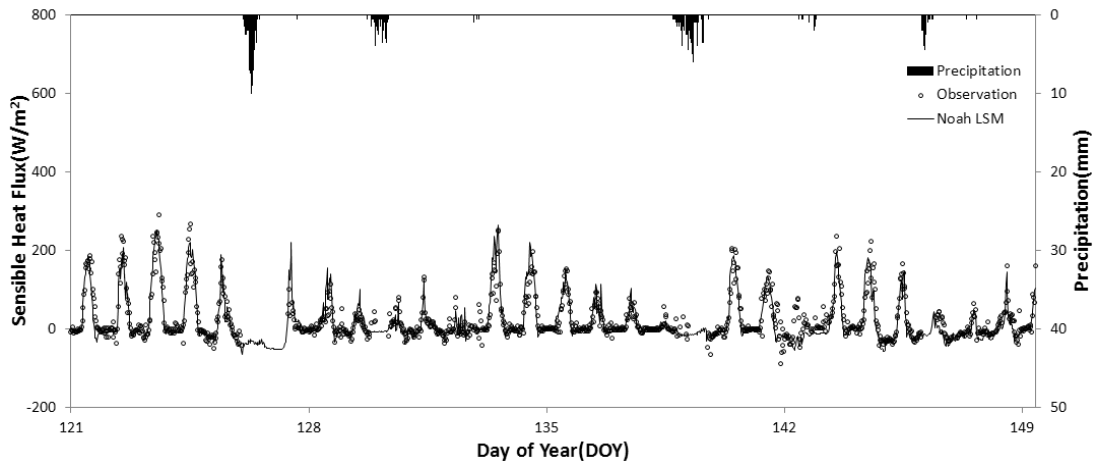


Fig. 3. Sensible Heat Flux (W/m^2) at Haenam

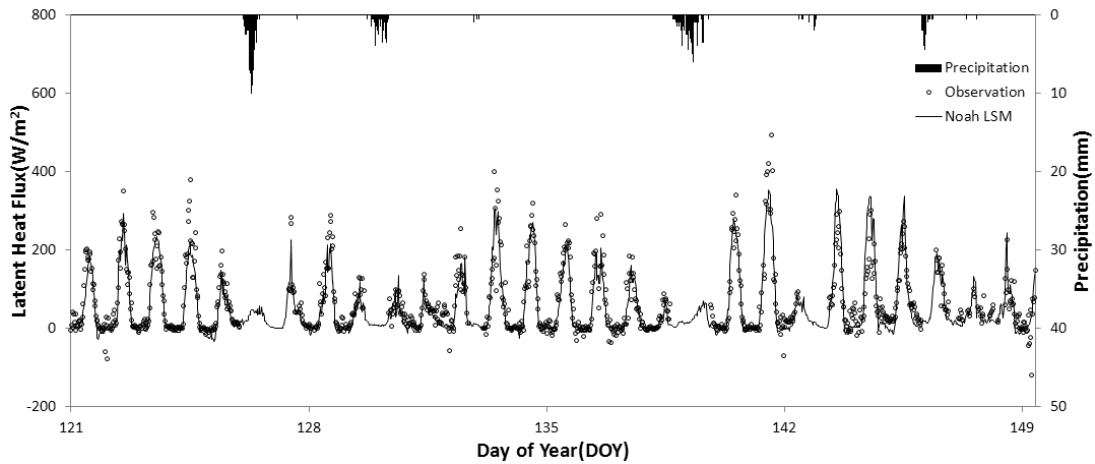


Fig. 4. Latent Heat Flux (W/m^2) at Haenam

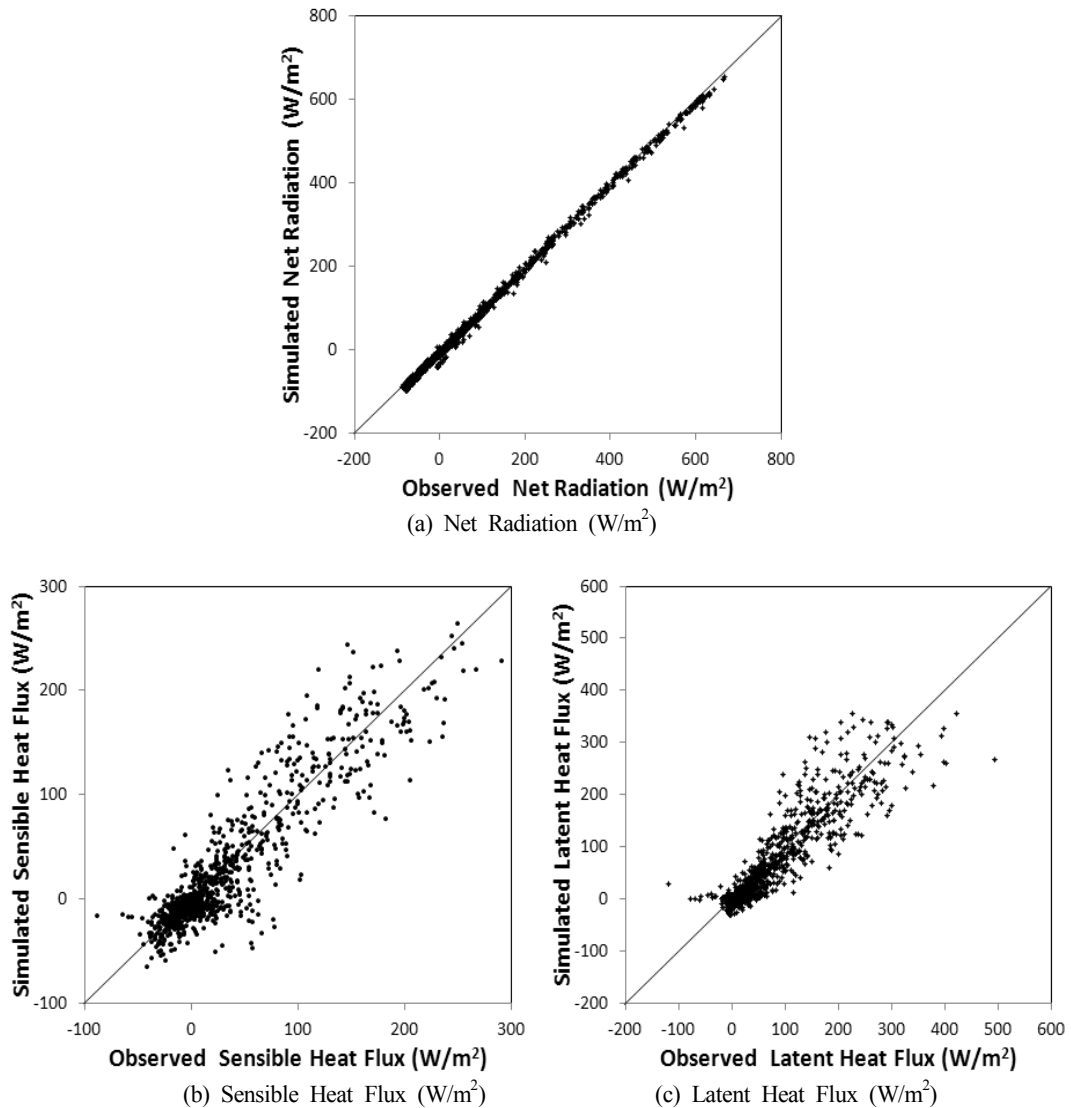


Fig. 5. Scatter plots of Observation and Model Results at Haenam

Fig. 6~8은 각각 광릉지역에 대한 순 복사량과 현열, 잠열의 모형 결과 및 플럭스 관측 데이터를 시계열로 나타낸 것이며, Fig. 9는 광릉지역 순 복사량과 현열, 잠열의 관측 값과 모형 값의 1:1 대응 그래프이다. 광릉지역의 현열(Fig. 7)은 모형 값이 관측치에 비해 조금 과소산정 되는 경향이 있는 것으로 나타났으나, R^2 가 0.99로(Table 4) 전체적인 경향성은 매우 잘 일치하는 것으로 보인다. 반면 잠열(Fig. 8)에서는 모형 값이 관측 값에 비하여 과대 산정되는 경향을 보였으며,

현열은 이와 반대로 과소 산정되는 것으로 나타났다. 잠열이 과대산정될 때 현열이 과소산정 되는 것은 모형 내에서 에너지 방정식을 만족시키기 위한 결과로 보인다. 1:1 그래프에서 나타난 순 복사량의 오차는 현열과 잠열의 경향성과 관계가 되어 있기 때문에 현열과 잠열의 오차가 줄어들면, 순 복사량의 오차 또한 작

아질 것으로 예상된다(Liang et al., 1998). Fig. 9(c)에 보여진 잠열의 모형 값과 관측 값의 1:1 대응 그래프는 현열(Fig. 9(b))과 순 복사량(Fig. 9(a))에 비하여 직선의 경향이 상대적으로 불분명한 형태를 나타내고 있는데, 이는 잠열의 시계열 그래프(Fig. 8)에서 볼 수 있듯이 낮 시간 동안의 일 최댓값에 대한 모형 결과와 관측 값 간의 차이가 많이 났기 때문인 것으로 보인다. 이로 인해 관측 값과 모형 값 사이의 정확도와 정밀도를 나타내는 RMSE와 bias값이 각각 $54W/m^2$ 와 $-25W/m^2$ 로 순 복사량과 현열에 비해 크게 나타났다. 전반적으로 해당지역에서와 같이 광릉지역에서 또한 관측 값과 모형의 결과가 비교적 잘 일치하며, 일정한 경향성을 나타내고 있는 것으로 보아 결국 구간에서의 Noah LSM 결과 역시 정확도 높은 값을 가질 것으로 판단된다.

Table 4. Statistical Analysis of energy fluxes between Observations and Model Results
 (Note: $y = ax + b$: x = measurement and y = calculation)

		RMSE (W/m^2)	Bias (W/m^2)	a	b	R^2
Net Radiation (W/m^2)	HFK	12	9	0.99	-9.11	0.99
	GDK	40	20	0.86	-2.97	0.99
Sensible Heat Flux (W/m^2)	HFK	24	4	0.93	-2.52	0.84
	GDK	36	2	0.80	5.03	0.84
Latent Heat Flux (W/m^2)	HFK	36	8	0.91	-2.32	0.83
	GDK	54	-25	1.13	19.36	0.64

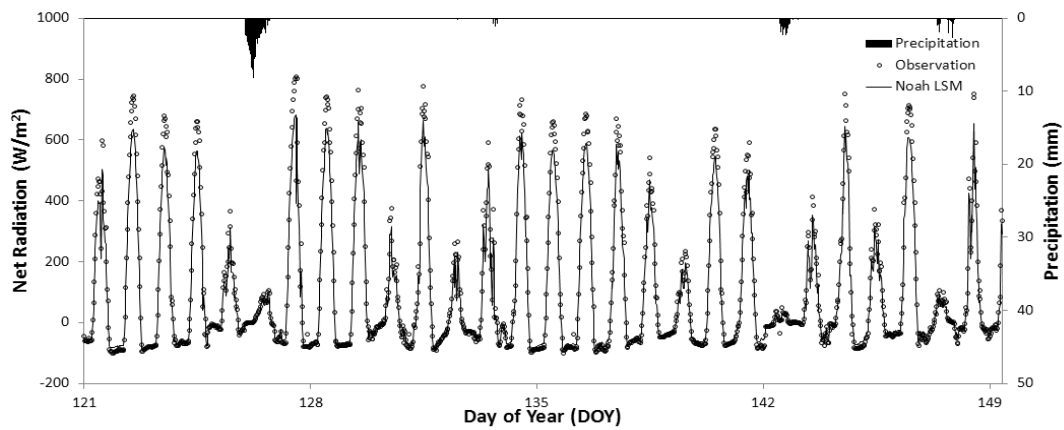


Fig. 6. Net Radiation (W/m^2) at Gwangneung

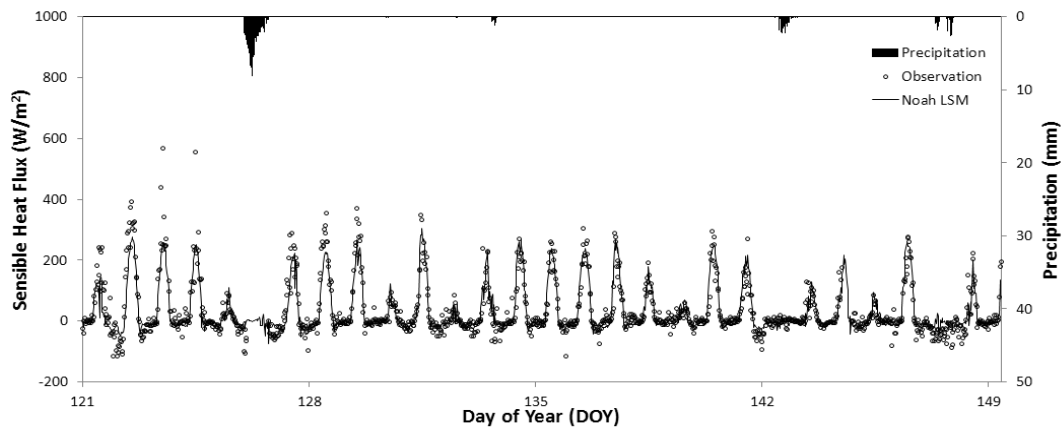


Fig. 7. Sensible Heat Flux (W/m^2) at Gwangneung

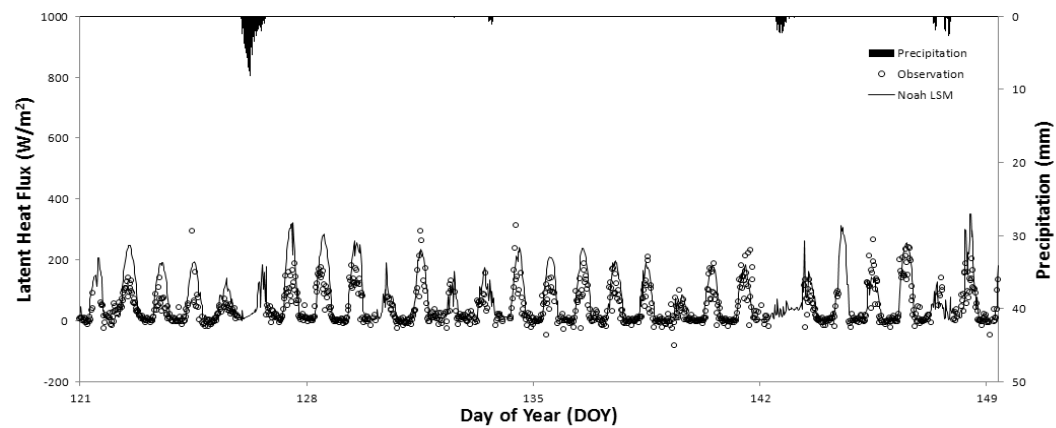


Fig. 8. Latent Heat Flux (W/m^2) at Gwangneung

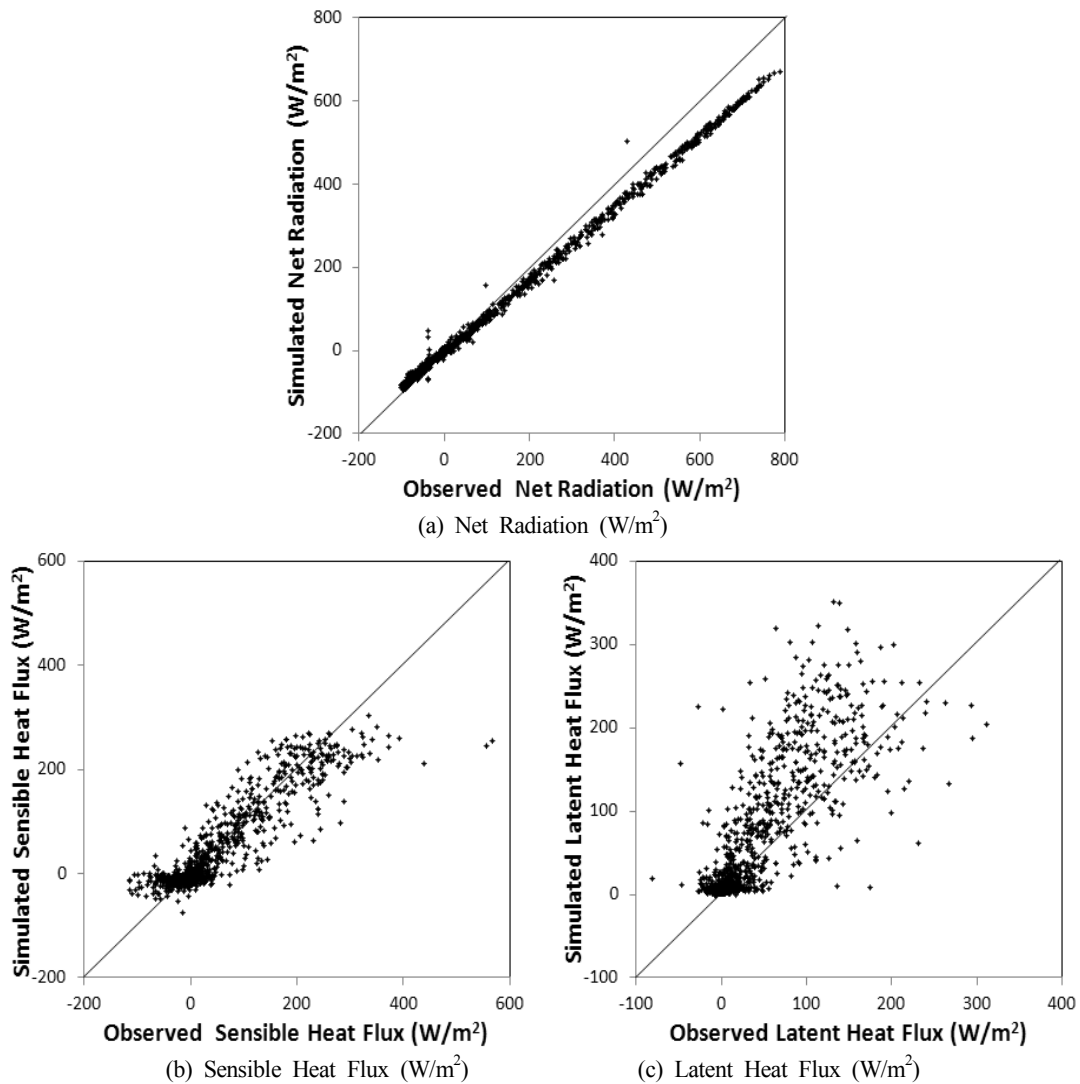


Fig. 9. Scatter plots of Observation and Model Results at Gwangneung

본 연구 결과에서는 대체적으로 해남과 광릉 모두 낮 시간 동안의 현열과 잠열의 크기가 비슷했지만 현열이 잠열에 비해 과대 산정 되는 경향을 보였다. 또한 현열과 잠열에 대한 Noah LSM의 결과, 순복사량에 대한 결과에 비하여 잠열 및 현열의 결과는 관측 데이터와 모델 값 사이의 차가 더 큰 것으로 나타났으나, 경향성은 잘 일치하였으며, 전체적으로 통계 분석을 통하여 살펴본 모형의 결과 값 또한 적절하다고 판단 된다.

4. 결론

본 연구에서는 해남지역과 광릉지역 플럭스타워의 30분 단위 관측자료를 모형의 강제입력자료로 사용하여 Noah LSM을 구동하였으며, 산출 결과 중 잠열, 현열, 그리고 순복사량의 에너지인자들을 플럭스타워의

관측 값과 비교하였다. 또한, 각각의 에너지 플럭스에 대하여 통계분석을 실시하였으며, 해남의 경우 R^2 값이 각각 잠열 0.84, 현열 0.83, 광릉의 경우 잠열 0.84, 현열 0.64로 관측 값과 모형에 의해 산정된 값이 좋은 상관성을 가지는 것으로 나타났고, 특히 순복사량의 R^2 값은 두 지역 모두 0.99로 모형 값과 관측 값이 거의 일치하는 매우 좋은 결과를 보였다. 두 지역의 모형 값과 관측 값이 매우 잘 일치함은 한국에서의 Noah LSM이 단독으로 적용 가능함을 보여줄 뿐만 아니라 다른 국내에서 다른 연구에 이용될 가능성을 보여주는 것이라고 생각된다. 본 연구를 통해 국내에의 적용 가능성이 확인된 Noah LSM은 보다 다양한 지역의 수문기상인자들의 모의, 수치예보모델 등에 활용될 수 있으며, 추후 연구에서 현재보다 정확한 초기 입력자료 획득과 적절한 변수화 등을 통해 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(원격탐사기반 선진형 홍수관리 및 가뭄대응 기반기술 구축, NDMI-주요-2013-09)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 관측자료는 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER 2013-3030)의 지원을 받아 구축된 KoFlux의 데이터베이스를 사용하였다(광릉). 관측자료는 국립기상연구소 차세대 도시·농림 융합스마트 기상서비스 개발사업(과제명: 도시농림모델 고도화 (II): 장기 플릭스 자료를 활용한 영농지원지표 모델 설계)의 지원을 받아 구축된 KoFlux의 데이터베이스를 사용하였다(해남).

References

- AsiaFlux website(<http://www.asiaflux.net>).
- Adger, WN, Arnell, NW and Tompkins EL (2005). Successful adaptation to climate change across scales, *Global Environmental Change*, 15, pp. 77-86.
- Byun, K, Shin, J, Lee, YK and Choi, M (2013). Validation of net radiation measured for flux tower based on eddy covariance method: case study in Seolmacheon and Cheongmicheon watersheds, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(2), pp. 111-122. [Korean literature]
- Chang, S, Hahn D, Yang CH, Norquist D and Ek, M (1999). Validation study of the CAPS model land surface scheme using the 1987 Cabauw/PILPS dataset. *Journal of Applied Meteorology*, 38, pp. 405-422.
- Choi, M, Lee, OL and Kwon, H (2010). Understanding of the common land model performance for water and energy fluxes in a farmland during the growing season in Korea. *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.7567.
- Dai, A, Qian, T and Trenberth, KE (2005). Has the recent global warming caused increased drying over land?, *AMS 16th Symposium on Global Change and Climate Variations/Symposium on Living with a Limited Water Supply*, 9-13 January 2005, San Diego, CA
- De Haan, LL, Kanamitsu, M, Lu, CH and Roads, JO (2007). A comparison of the Noah and OSU land surface models in the ECPC seasonal forecast model, *Journal of Hydrometeorology*, 8, pp. 1031-1048.
- Hogue, TS, Bastidas, L, Gupta, H, Sorooshian, S, Mitchell, K and Emmerich, W (2005). Evaluation and transferability of the Noah land surface model in semiarid environments, *Journal of Hydrometeorology*, 6, pp. 68-84.
- Hong, J, Lee, HC, Kim, J, Kim, B, Cho, C and Lee, S (2003). Inferring regional scale surface heat flux around FK KoFlux site: from one point tower measurement to MM5 mesoscale model, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 5(2), pp. 138-149. [Korean literature]
- Hur, Y and Choi, M (2011). Advanced microwave scanning radiometer E soil moisture evaluation for Haenam flux monitoring network site, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(2), pp. 131-140. [Korean literature]
- Hwang, K, Choi, M, Lee, SO and Seo, JW (2013). Estimation of instantaneous and daily net radiation from MODIS data under clear sky conditions: a case study in East Asia, *Irrigation Science*, 31, pp. 1173-1184.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kato, H, Rodell, M, Beyrich, F, Cleugh, H, Gorsel, EV, Liu, H and Meyers, TP (2007). Sensitivity of land surface simulations to model physics, land characteristics, and forcing at four CEOP sites, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(A), pp. 187-204.
- Kim, HT, Kim, YH and Um, HH (2003). Surface flux observation in Haenam using eddy-covariance method, *Proceeding of the 35th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, pp 415-416. [Korean literature]
- Kustas, WP and Norman, JM (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces, *Hydrological Sciences*, 41, pp. 495-516.
- Kwon, BH, Kim, GH, Kim, KH and Kang, DH (2009). Role of atmospheric turbulences and energy balances in the atmospheric surface layer, *Journal of Wetlands Research*, 11(1), pp. 105-113. [Korean literature]
- Kwon, H (2009). Estimation of net radiation in three different plant functional types in Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11(2), pp. 79-85. [Korean literature]
- Liang, XZ, Wood, EF, Lettenmaier, DF, Lohmann, D, Boone, A, Chang, S, Chen, F, Dai, Y, Desborough, C, Dickinson, RE, Duan, Q, Ek, M, Gusev, YM, Habets, F, Irannejad, P, Koster, R, Mitchell, KE,

- Nasonova, ON, Noilhan, J, Schaake, J, Schlosser, A, Shao, Y, Shmakin, AB, Verseghy, D, Warrach, K, Wetzell, P, Xue, Y, Yang, Z and Zeng, Q (1998). The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase-2c Red-Arkansas river basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes, *Global and Planetary Change*, 19(1-4), pp. 137-159.
- Moulin, S, Bondeau, A and Delecolle, R (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales, *International Journal of Remote Sensing*, 19(6), pp. 1021-1036.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). (2000). *Taxonomical Classification of Korean Soils*, No. 11-1390093-00049-01, Rural Development Administration.
- Radell, DB and Rowe, CM (2008). An observational analysis and evaluation of land surface model accuracy in the Nebraska sand hills, *Journal of Hydrology*, 9, pp. 601-621.
- Sridhar, V, Elliott, RL and Chen, F (2003). Scaling effects on modeled surface energy-balance components using the NOAA-OSU land surface model, *Journal of Hydrology*, 208, pp. 105-123.
- Sridhar, V, Elliott, RL, Chen, F and Brotzge, JA (2002). Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, doi:10.1029/2001JD001306.
- Wei, H, Xia, Y, Mitchell, KE and Ek, MB (2012). Improvement of the Noah land surface model for warm season process: evaluation of water and energy flux simulation, *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.9214.
- 논문접수일 : 2013년 08월 13일
 - 심사의뢰일 : 2013년 08월 21일
 - 심사완료일 : 2013년 10월 14일