

Flux Tower 관측자료와 KLDAS를 이용한 Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer 모형의 적용: 해남 KoFlux 지점의 수문순환 환경분석에 대하여

Validation of Energy and Water Fluxes Using Korea Land Data Assimilation and Flux Tower Measurement: Haenam KoFlux Site's Hydro-Environment Analysis

김다은* · 임윤진** · 이승오*** · 최민하****

Kim, Daeun · Lim, Yoon Jin · Lee, Seung Oh · Choi, Minha

Abstract

Accurate assessment of the water and energy cycles is essential to understand hydrologic, climatologic, and ecological processes. Common Land Model (CLM) is one of the well-developed Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT) models based on the water and energy balance equation for accurate prediction of hydro-environmental cycles. The CLM can estimate realistic and reliable results using relatively simple parameters. It has been widely used in the world, however in Korea practical applications of the CLM are rare due to lack of information and input data. In this study, the CLM with Korea Flux network (KoFlux) and Korea Land Data Assimilation System (KLDAS) data were individually validated for domestic applications. This study showed that all comparisons between observations and model results from KoFlux and KLDAS had reasonable correlation with determination coefficient of 0.73~1.00 via regression. The results confirmed the applicability of the CLM and the possibility of the KLDAS usage for the region where input data are not existed.

Keywords : hydrologic cycle, SVAT, CLM, KLDAS, KoFlux

요 지

물과 에너지의 순환에 대한 정확한 해석은 수문학, 기후학, 생태학적인 과정을 이해하는데 있어 매우 중요하다. 수문 순환 환경변화의 정확한 예측을 위해 사용되고 있는 모형들 중 Common Land Model(CLM)은 물과 에너지수지 방정식을 기반으로 한 최신 Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer(SVAT) 모형 중 하나로써, 비교적 간단한 매개변수를 이용하여 현실적이고 신뢰할 만한 결과를 산출해낼 수 있다. CLM 모형은 전 세계적으로 널리 이용되고 있으나, 국내에서는 정보의 부재와 입력자료의 미흡으로 인하여 실제적인 적용사례가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 CLM의 국내 적용성 검증에 위하여 해남 Korea Flux Network(KoFlux)의 자료와 Korea Land Data Assimilation System(KLDAS)의 자료를 이용하여 수문순환 환경인자들의 모형 결과를 산출하였다. 모형의 결과와 관측자료의 비교에서 KoFlux와 KLDAS의 두 입력 자료를 사용한 결과 모두 회귀분석에서의 결정계수 값이 0.73~1.00의 신뢰할 만한 수준으로 나타났다. 본 연구에서 CLM의 국내 적용 가능성을 확인하였고 지점자료가 존재하지 않는 지역에 대한 KLDAS의 이용가능성을 또한 확인하였다.

핵심용어 : 수문순환, SVAT, CLM, KLDAS, KoFlux

1. 서 론

물과 에너지 순환의 정확한 평가와 예측은 지표면과 대기 사이의 복잡한 관계를 이해하기 위해서는 필수적이며 정확한 물리적 관측 자료를 기반으로 한 수문 모형의 신뢰할 만한 예측이 필요하다(Kustas 등, 1996; Moulin 등, 1998).

General Circulation Models(GCMs)을 포함한 지표면과 대기의 상호관계를 해석하는 Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer(SVAT) 모형들에 관한 연구는 활발하게 이루어져 왔다. SVAT 모형들은 식물의 증산, 배수, 표면 유출, 토양 수분 변화 등과 같은 수문기상학적인 현상들을 모의하기 위하여 고안되었으며(Calvet 등, 1998) 모형들의 발전과 함께

*정회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : daeun@hanyang.ac.kr)

**연세대학교 이과대학 대기과학과/국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 (E-mail : yoonjin.lim@gmail.com)

***정회원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr)

모형의 매개변수 또한 증가하였다(Franks 등, 1997).

SVAT 모형 중 대표적 모델인 Common Land Model (CLM)은 다른 모형들에 비하여 상대적으로 적은 사용자 정의 변수로 현실적인 모의 결과를 산출해낼 수 있다는 장점을 가진다. CLM은 National Center for Atmospheric Research (NCAR)의 Community Land Model(CLM)에서 발전되었는데(Bonan 등, 2002), Land Surface Model(LSM), Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme(BATS), Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics LSM 이렇게 세 모델이 결합되었다(Dai 등, 2003). CLM 모형의 주요 특성으로는 토양수분 및 온도예측을 위한 10개 토양층, 방설 및 용설 예측을 위한 5개층, 토양수분의 결빙영향 고려, TOPography based hydrological MODEL(TOPMODEL, Beven과 Kirkby, 1979)에 기초한 지면포화도 계산, 식생과의 CO₂ 및 수증기 교환모의를 위한 광합성모의, 고해상도의 지표피복특성, 식생특성, 그리고 토양특성 자료의 구축(Liang 등, 2005) 등이 있다(최현일, 2008). CLM은 물리적 과정의 모사와 대표성을 가지는 지표 경계 자료 사용을 통하여 지표를 좀 더 현실적으로 모의하고 있다(Lawrence 등, 2007).

CLM의 구동에 필요한 매개변수는 위·경도, 토양성분(모래/점토/양토의 백분율), 토양 색, 강제 자료 측정 높이, 토지피복 백분율 등이 있다. 이 중에서 토지피복 백분율은 International Geosphere Biosphere Programme(IGBP) 토지 피복 분류에 기초한다. CLM의 입력강제자료로는 Incoming Solar Radiation, Incoming Infrared Radiation, Precipitation, Air Temperature, Wind speed(U-direction, V-direction), Atmospheric Pressure, Specific humidity 등이 있다.

Whitfield(2006) 등은 미국 남동부의 Prairie wetland의 필드 규모의 플럭스 관측자료와 CLM의 결과가 정확히 일치함을 확인하였다. 또한, 러시아와 남서부 아마존 숲에서 CLM 모형을 모의하여 합리적인 결과를 도출하였다(Dai 등, 2003). 특히, Stockli(2008) 등은 온대와 지중해, 열대, 북쪽 아한대, 아고산대(亞高山帶) 기후 지역의 15개 지역의 Flux Network 자료를 사용하여 CLM의 모의 결과와 비교하였으며 만족할만한 결과를 도출하였다. 오스트레일리아 농경 지역 및 도시화 진행 지역을 모두 포함한 전체 지역을 대상으로 한 Matthew 등(2009)의 CLM 모형 결과는 NOAA, SEBS, courtesy of Bureau of Meteorology의 강우 자료 등과 비교되어 비교적 비슷한 결과가 나타났으며, 현재 양적 및 질적 평가가 진행되고 있다. 선행연구들에서는 CLM 모형의 다양한 지역에 대한 적용 가능성을 확인하였으나 국내에서의 응용은 부족한 실정이다. 이는 모형을 구동하기 위해 필요한 입력 자료를 제공하는 플럭스 지점자료가 극히 제한적으로 제공되고 있는 점에 주로 기인한다고 생각된다.

CLM에 사용된 입력 자료는 한반도 및 동아시아 지역에 대한 현실적이고 일관성 있는 지표변수들을 산출하기 위해 개발된 한반도지표동화자료체계(Korea Land Data Assimilation System; KLDAS, 임윤진 등, 2010a, Lim 등, 2011)의 격자화 된 지표입력변수들이다. 관측기반의 입력자료 산출과 높은 수행력의 지표 모델링, 그리고 첨단 자료동화기법이 통합된 지표자료동화체계(Land Data Assimilation System;

LDAS) 방법은 북미 지표자료동화체계 North American Land Data Assimilation System(NLDAS)나 전 지구 지표자료동화체계 Global Land Data Assimilation System(GLDAS)의 성공적인 개발을 통해 수치예보모델의 초기조건 개선, 넓은 지역을 대상으로 한 물수지 연구 등에 활용도를 높여가고 있다. KLDAS는 기존의 LDAS 방법론을 기초로 하여 동아시아(특히, 한반도)에 초점을 맞추어 개발된 Noah off-line 모델링 시스템으로, 임윤진 등(2010b)은 KLDAS를 통해 관측, 위성자료, 그리고 분석장 기반의 현실적인 입력 자료를 생산하고, Noah LSM에 강제시켜 KoFlux 관측사이트와 유사한 토양장과 현열 및 잠열 속을 도출한 바 있다.

우리나라에서의 플럭스에 관한 연구는 일정 기간이나 지역을 대상으로 이루어지고 있어, 한반도 전체의 플럭스에 대한 공간적, 시간적 분포 혹은 추세 변화 연구가 적절하지 못한 실정이다. 이러한 문제점의 대안으로 지면모형을 활용하게 되는데 아직까지 우리나라에서의 지면모형을 활용한 연구는 시·공간적으로 일관성 있는 입력 자료 산출의 어려움, 지면 모형에 대한 이해의 부족 등으로 인하여 현실적인 결과를 얻었다고 하기에는 부족하다. 이러한 문제점의 개선을 위하여 한반도지표동화자료체계는 위성자료를 이용하여 지면모형의 불확실성을 개선하고, 여러 위성과 관측 자료들로부터 일관성 있는 입력 자료들을 산출한다.

본 연구에서는 KoFlux 지점의 플럭스 측정 자료 이외에 한반도지표자료동화체계(KLDAS)의 여러 관측, 위성, 그리고 분석장 기반의 현실적인 입력자료를 CLM의 초기 입력 자료로 사용하여 모형을 모의하였고 물과 에너지 순환에 관한 결과를 산출하였으며 지점관측자료와 비교함으로써 CLM의 국내 적용 가능성을 확인하고자하며 지점자료가 존재하지 않는 지역에 대한 KLDAS의 이용가능성을 알아보고자 한다.

2. 연구배경 및 방법

2.1 연구 지역

전구타워 플럭스 관측망인 'FLUXNET'에서는 지표와 대기 사이에 교환되는 에너지 및 수문기상학적 변수들(수증기, 이산화탄소, 메탄, 에어로졸 등)을 정량화하는 에디 공분산 방법을 기반으로 하고 있는데 여러 분야의 연구자들에게 유용한 정보를 제공해오고 있다(Hong 등, 2009). 에디 공분산(Eddy Covariance) 방법은 지표와 대기 사이에서 교환되는 에너지 및 이산화탄소 등의 연직 플럭스들의 교환을 측정, 정량화하고, 그 과정에서의 난류 변수들을 산정하기 위해 사용되는 방법이다(Hong 등, 2003). 물/에너지 순환에서는 수문 예측 모형의 초기경계 자료로 에디 공분산 방법으로 획득한 플럭스를 사용하고 모형의 검증에서도 이 자료가 필요하므로 정확한 자료를 획득하는 것은 수자원 분야에 있어서 매우 중요하다. 현재, 이러한 에디 공분산 기술을 기반으로 대륙별로 다양한 육상생태계를 대표하는 플럭스 네트워크(i.e., AmeriFlux, CabonEurope, AsiaFlux)가 활성화되어 있다(권효정 등, 2007). 우리나라도 AsiaFlux에 참여하고 있는데 광릉, 해남, 설마천, 청미천의 네 지점이 이에 속해 있다. AsiaFlux 중 한 곳인 해남의 KoFlux 지점에서는 에디 공분

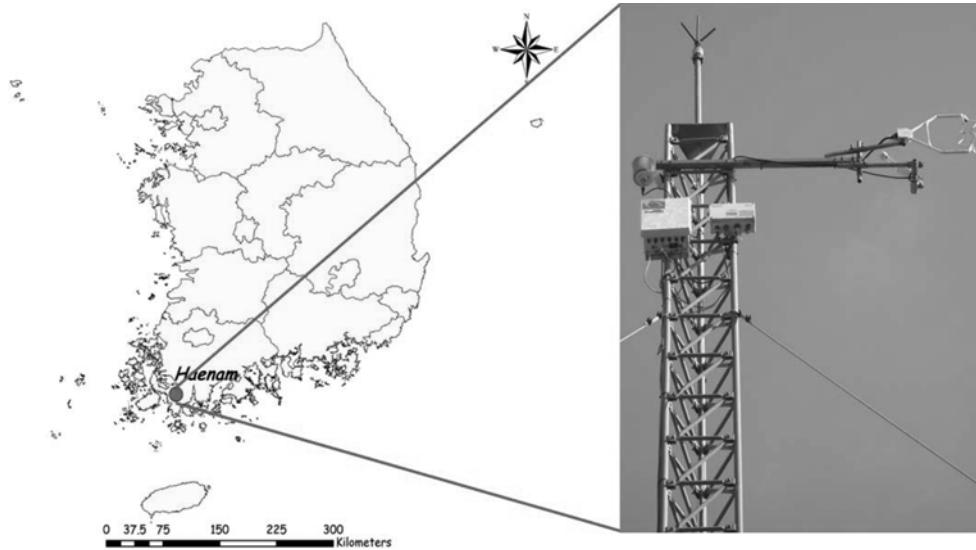


Fig. 1 Study Area and Haenam Flux Tower

Table 1. Geographic data and characteristics of Haenam

대상지역	위도	경도	고도 (m.s.l)	Soil Type	Land Cover
해남	34.55°	126.56°	14.74 m	Loam (sand 38.5%, Clay 30.0%)	Rice paddies and various cropland

산 기술을 이용하여 2004년부터 관측을 수행 중이다. 플럭스 타워는 20.8 m의 높이에서 복사, 풍속, 기온, 습도, CO₂ 등을 측정한다. 토양수분은 토양수분 측정기인 Water Content Reflectometer(Model CS616, Campbell Scientific Inc.)를 이용하여 관측하며, 관측기는 30 cm의 막대를 이용하여 지표면 아래의 평균 토양 절연성 및 유전성을 측정하고 교정 방법에 따라 수분체적을 제공한다. 본 연구는 AsiaFlux의 한 지점에 속한 전라남도 해남 KoFlux 지점(34°33'18"N, 126°34'17"E)을 대상으로 실시되었다.

2.2 연구 방법 및 순서

2.2.1 연구 방법

CLM 모형에서 가장 기초가 되는 방정식은 물수지 방정식(Eq. (1a))과 에너지 보존 방정식(Eq. (1b))을 포함한 물리적 지배방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k dV = - \int_S U_k \cdot dS + \sum_{k'} \int_{\Delta V} M_{k'k} (1 - \delta_{k'k}) dV + \int_{\Delta V} S_k dV \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=i,l,v,d} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = - \sum_{k=i,l,v,d} \int_S U_k h_k \cdot dS + \int_S \lambda \nabla T \cdot dS + \int_{\Delta V} R dV \quad (1b)$$

where,

- V : Control volume (m⁻³)
- T : Temperature (K)
- ρ_k : Intrinsic density of constituent k (kg m⁻³)
- θ_k : Partial volume of constituent k (m³ m⁻³)
- h_k : Specific enthalpy (J kg⁻¹)
- U_k : Mass flux (kg m⁻² s⁻¹)
- $M_{k'k}$: Phase change from phase to phase (kg m⁻³ s⁻¹)
- $\delta_{k'k}$: Kronecker delta
- S_k : Source of sink term

λ : Thermal conductivity of the medium (W m⁻¹ K⁻¹)

R : Radiation flux (W m⁻²)

식 (1a)는 질량변화의 시간 비율은 질량 흐름과 상변화, 그리고 공급 또는 감소량에 의하여 결정되는 과정을 나타낸다. 이 식을 기반으로 식물에 의한 물의 저장은 강수량의 차단, 이슬의 응축과 증발 손실 등에서 결정된 질량 균형으로부터 계산된다. 식 (1b)에서는 저장된 열의 변화에 대한 시간 비율이 대류, 전도, 복사에 의하여 계산되는 과정을 나타내고 있다. 그 중 전도에 관한 플럭스는 푸리에의 법칙에 의하여 계산되고, 대류 열전달은 식물, 토양과 물의 층에서, 증발과 순열전달은 강설과 토양층에서 무시할 수 있다고 가정한다(Dai 등, 2003; Choi 등, 2010).

2.2.2 연구 순서

본 연구에서는 KoFlux 자료와 KLDAS의 자료를 강제입력자료로하여 CLM 모형의 결과와 해당 지점의 관측치를 비교, 분석하였다. KLDAS의 자료의 원본은 10 km 해상도를 가지는 영역에 대한 격자 자료이므로, 격자가 아닌 한 지점의 자료로의 변환이 필요하다. 이를 위하여 원하는 지점이 속한 격자의 자료에 거리 별 가중치를 두어 지점자료로 변환하는 방법을 사용하였다.

CLM 모형에서는 앞에서 언급한 위·경도, 토양성분(모래/점토/양토의 백분율), 토양 색, 강제 자료 측정 높이, 토지피복 백분율 등을 연구 지역인 해남의 지리정보 및 특성에 맞추어 입력하고, 강제입력자료와 함께 모형을 구동 하였다. Table 2는 KoFlux의 플럭스 측정 기기와 KLDAS 입력 자료 산출에 사용되는 위성과 모델들의 명칭들이다. KLDAS 입력자료에 대한 자세한 설명은 Lim *et al.*(2011)을 참고하기 바란다.

Table 2. Instruments and Land Surface Models used in KoFlux and KLDAS

	KoFlux	KLDAS
Averaging time	30 min.	60 min.
Incoming Solar (Shortwave) Radiation	CNR1 (Kipp&Zonen, Netherlands)	GOES (1.1 μm, 3.9 μm), MTSAT (10.8 μm, 3.75 μm)
Incoming Infrared (Longwave) Radiation	CNR1 (Kipp&Zonen, Netherlands)	GDAPS
Precipitation		GTS, AWS
Air Temperature	CSAT3 sonic anemometer (Campbell Sci., USA)	GDAPS
Wind speed U-V direction	CSAT3 3D Sonic Anemometer (Cabell Sci., USA)	GDAPS
Atmospheric Pressure	LI-7500 Electronic box (Li-Cor, USA)	GDAPS
Specific Humidity	LI-7500 (Li-Cor, USA)	GDAPS

2.2.3 오차 추정 방법

플럭스와 KLDAS의 데이터를 초기입력 자료로 한 CLM 모형의 산출 결과는 각각에 해당하는 측정 결과와의 Root Mean Square Error(RMSE)와 Bias를 이용하여 비교하였다. RMSE와 Bias의 계산 방법은 다음과 같다.

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

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

Eqs. (2a) and (2b)에서 n 은 자료의 개수, $x_{measurement,i}$ 는 측정치, $x_{calculated,i}$ 는 CLM 모형에 의한 결과 값을 나타낸다.

모형의 결과에 대하여 선형 회귀 분석을 실시한 후, 잔차 분석을 실시하였다. 잔차 분석이란 회귀분석에서 선형성을 판별하기 위하여 시행하는 분석이다. 선택한 선형 회귀 함수의 적절성 여부는 설명 변수에 대한 잔차그림 또는 적합값에 대한 잔차도를 통하여 판단할 수 있다.

3. 결 과

토양온도(Soil Temperature)는 토양층의 두께, 층별 온도의 평균 등을 서로 연산하여 결과를 얻는다. 토양온도는 10 cm 깊이의 관측자료와 4개 층의 계산 결과를 비교하였다. 토양온도는 KLDAS의 CLM 적용결과에 비하여 KoFlux의 자료 적용 결과(Fig. 2)가 높게 나타났다.

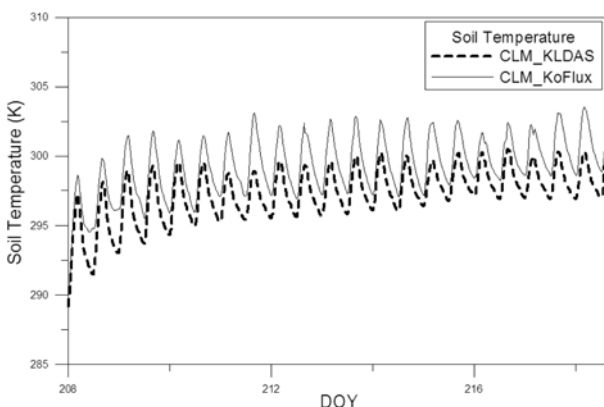


Fig. 2 Soil Temperature (K)

지열량(Ground Heat Flux)결과 그래프(Fig. 3)의 경향성도 토양온도와 비슷하게 나타났다. 두 그래프의 최대, 최소 지점에서 나타나는 약간의 불일치를 제외한 부분에서 거의 일치하는 경향으로 진행되는 것으로 보아 신뢰할만한 값으로 추정된다.

토양수분(Soil Moisture)은 토양온도와 같은 방법으로 모형 결과를 연산하여 얻어진 측정 결과(Fig. 4)와 비교하였다. 강우가 있는 시점에서는 토양수분량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 토양수분과 마찬가지로 결과 값의 진행 양상의 오차가 크지 않게 나타났다. 강우량 그래프에서 KLDAS의 강우량과 KoFlux의 강우량이 다르게 나타나는데 KLDAS의 경우 10 km 내의 자료를 한 지점의 값으로 변환을 시키기 때문인 것으로 보인다. 이러한 점을 감안한다면 KoFlux 자료의 CLM 적용 결과를 통해 토양수분의 시간적 변동성이 강우 사상과 일치하는 것으로 판단할

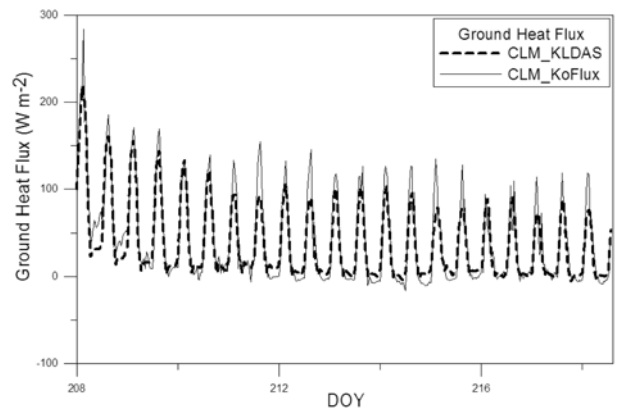


Fig. 3 Ground Heat Flux (W m⁻²)

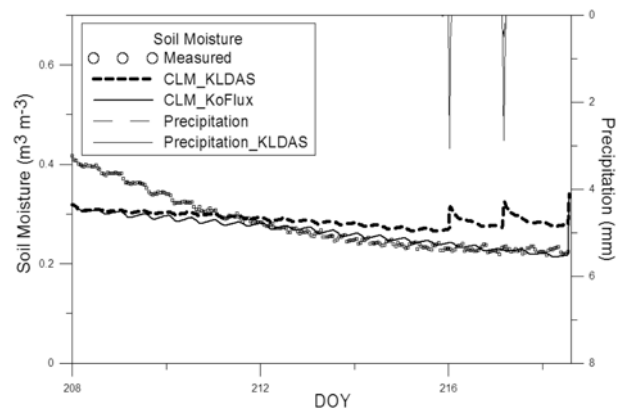


Fig. 4 Soil Moisture (m³ m⁻³)

Table 3. Statistical Analysis between Observations and Model Results

	RMSE		Bias		Regression			
	CLM KoFlux	CLM KLDAS	CLM KoFlux	CLM KLDAS	CLM_KoFlux		CLM_KLDAS	
					$Y = ax^2 + bx + c$	R^2	$Y = ax^2 + bx + c$	R^2
Soil Moisture ($m^3 m^{-3}$)	0.039	0.07	-0.03	-0.05	$Y = -2.37x^2 + 1.92x - 0.08$	0.85	$Y = 0.30x^2 + 0.02x + 0.26$	0.64
Latent Heat Flux ($W m^{-2}$)	70.99	95.32	32.62	46.98	$Y = 0.63x + 7.96$	0.84	$Y = 0.46x + 11.78$	0.73
Sensible Heat Flux ($W m^{-2}$)	90.71	103.44	-17.02	-61.33	$Y = 2.24x - 23.00$	0.83	$Y = 1.94x + 31.41$	0.73
Net Radiation ($W m^{-2}$)	22.24	73.49	-3.24	-30.29	$Y = 1.07x - 8.89$	1.00	$Y = 0.89x + 48.42$	0.92

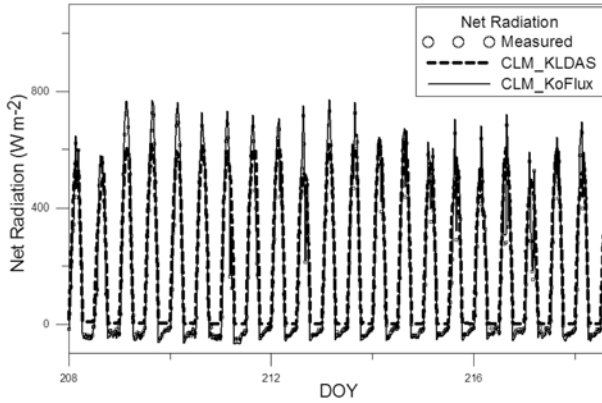


Fig. 5 Net Radiation ($W m^{-2}$)

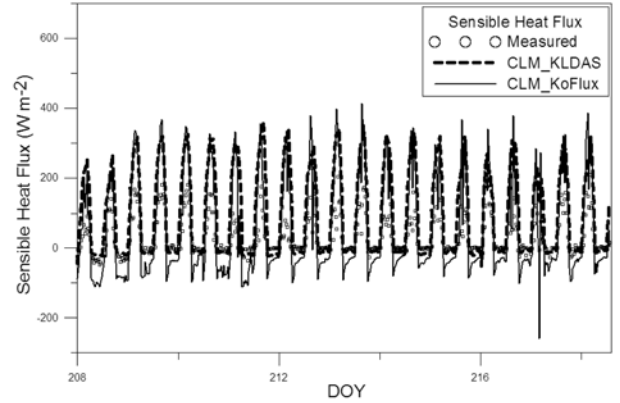


Fig. 7 Sensible Heat Flux ($W m^{-2}$)

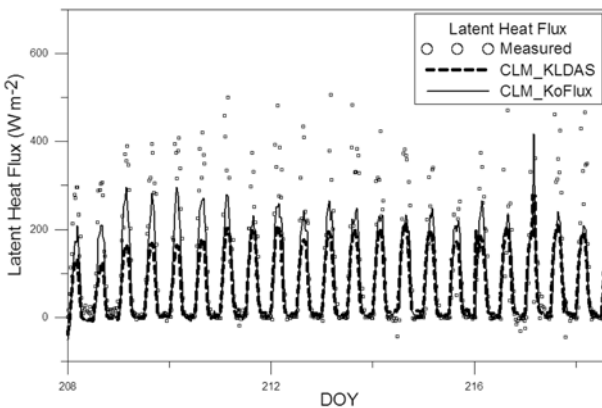


Fig. 6 Latent Heat Flux ($W m^{-2}$)

수 있다. 특히, KLDAS의 강우 사상과 KLDAS 자료를 사용한 CLM 결과는 강우 사상과 토양 수분의 증가가 정확히 일치하고 있다. KLDAS에 비하여 KoFlux의 토양수분 값이 낮게 예측된 이유는 토양수분에 가장 큰 영향을 미치는 토양온도의 기초자료에 있다고 추정된다. 이 자료에서 KoFlux의 토양온도는 KLDAS가 추정했던 것보다 높게 측정된 데에 있기 때문일 것이다. RMSE와 Bias의 값 또한 $0.039 m^3 m^{-3}$ (KoFlux_CLM), $0.07 m^3 m^{-3}$ (KLDAS_CLM), -0.03 (KoFlux_CLM), -0.05 (KLDAS_CLM)로 매우 낮게 나와 토양수분의 값은 신뢰할 만한 수준으로 평가된다.

순복사량(Net Radiation)은 KoFlux의 결과와 측정치가 거의 일치하였다(Fig. 5). 이 결과에서도 세 자료의 그래프 경향성은 비슷하게 나타났다. 그 중 KLDAS의 복사량은 다른 그래프에 비해 약간 낮게 나타나는데, 음수 값은 나타내지 않는 특징도 보인다. RMSE는 $22.238 W m^{-2}$ (KoFlux_CLM), $73.485 W m^{-2}$ (KLDAS_CLM), Bias는 -3.241 (KoFlux_CLM), -30.290 (KLDAS_CLM)으로 순복사량 역시 KLDAS 자료의 모형 결과보다 KoFlux의 결과가 측정치와 더 잘 맞는 것으

로 나타났다. 회귀식에서의 a값은 1.07(KoFlux_CLM), 0.89(KLDAS_CLM), R^2 값은 1에 가깝게 나타나 모형 결과와 관측치가 거의 일치하는 것으로 보여진다.

잠열량(Latent Heat Flux; LH)의 모형결과와 관측치의 비교그래프(Fig. 6)를 살펴보면 KLDAS 자료를 기초로 한 결과 그래프보다 KoFlux의 결과가 측정치 그래프와 좀 더 가까운 것을 확인할 수 있다. 그러나 KoFlux, KLDAS를 기초로 한 두 그래프 모두 측정치보다 과소 산정되었다. 표에서 잠열의 RMSE는 $70.99 W m^{-2}$ (KoFlux_CLM), $95.32 W m^{-2}$ (KLDAS_CLM), R^2 값은 0.84(KoFlux_CLM), 0.73(KLDAS_CLM)으로 상당히 좋은 결과로 나타났다.

현열량(Sensible Heat Flux; H)의 결과는 잠열량과 다르게 KoFlux, KLDAS의 모형 결과값이 측정치보다 모두 높게 나타났다(Fig. 7). 두 그래프(Fig. 7, 8)에서 그래프의 시작점이 음수 값에 있는데 이는 자료의 모형 적용기간 때문으로 보인다. 그리고 Dickinson과 Henderson Seller(1998)에 따르면 CLM에 병합된 General Circulation Model(GCM)은 열대우림지역에서 잠열이 순복사량에 의해 초과 산정되면 현열 계산 시 오차가 증가되는 현상으로 나타난다고 한다. 이 영향은 본 연구의 현열량에서 발생한 오차의 근거가 될 것으로 보인다. 또한 현열과 잠열의 공간 패턴이 순복사량의 오차에 관련되어 있으므로 그것들의 모형 결과 값과 측정값의 불일치가 나타나게 된다(Liang 등, 1998). 그러므로 상대적으로 순복사량의 오차가 줄어들수록 현열과 잠열의 오차는 작아질 것으로 추정된다.

연구결과 중 에너지 플럭스들은 KoFlux 자료를 사용한 CLM의 결과가 KLDAS 자료를 사용한 결과 값보다 과다 산정되는 경향이 나타난다. 그러나 상대적으로 높게 나타난 KoFlux 자료 사용 결과 값이 측정 결과와 비교했을 때 상대적으로 더욱 적절한 값을 나타내었다. KLDAS 자료의 경

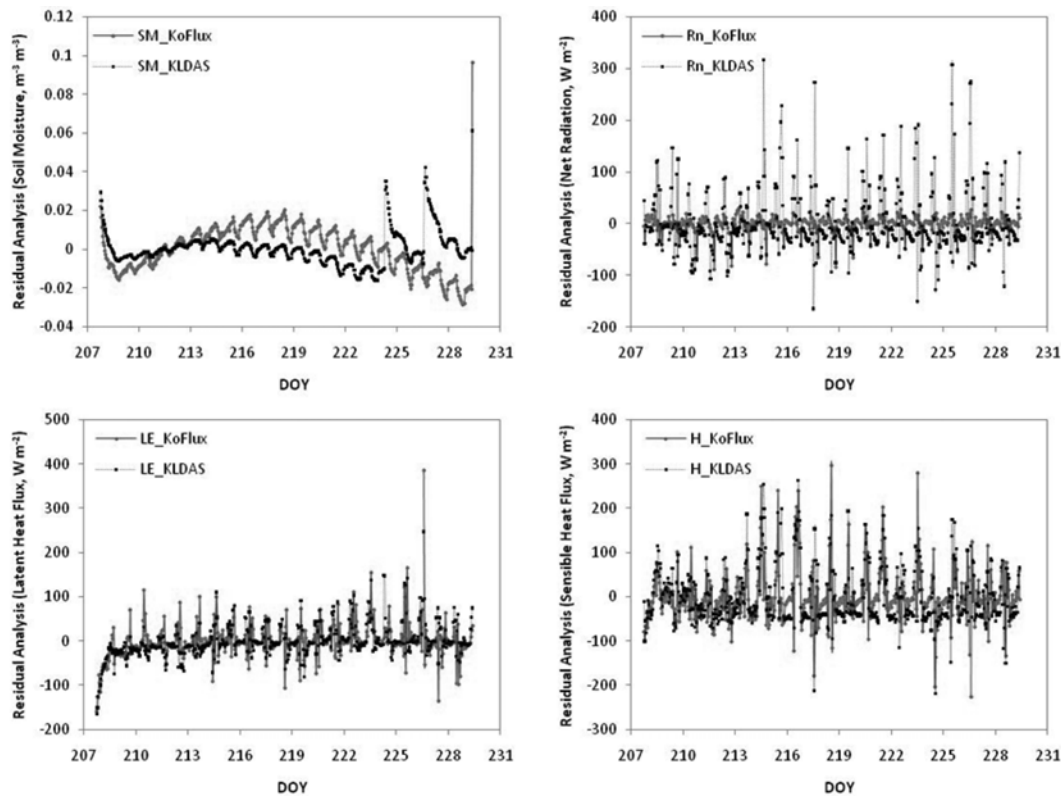


Fig. 8 Residual Analysis (Soil Moisture, Net Radiation, Latent Heat Flux, Sensible Heat Flux)

우에는 오차가 10 km 격자 자료를 해남 지점 자료로 변환하는 데에서 발생했을 것으로 보인다. 이에 반해 KoFlux 자료는 한 지점의 결과자료를 사용하였기 때문에 좀 더 일치하는 결과를 보인 것으로 생각된다. 전체적으로 살펴보면 두 결과의 그래프는 측정치와 약간씩의 차이를 나타내고 있지만, 경향성은 모두 일치하는 것으로 나타났다.

모형의 결과를 토대로 측정 자료가 존재하는 토양수분, 순복사량, 잠열량, 현열량의 네 자료에 대하여 잔차 분석(Residual Analysis)을 실시하였다.

본 연구의 잔차 분석의 그래프를 살펴보면 순복사량, 현열량, 잠열량의 자료에서는 이렇다 할 경향이 나타나지 않고, 잔차가 분산되어 수평대(Horizontal Band)에 놓여있다. 이러한 양상은 선형 회귀 모형이 적절할 때에 나타나는 전형적인 형태이므로 이 세 그래프는 적절한 결과를 나타냈다고 볼 수 있다. 토양 수분의 그래프를 보면 특정 구간에서 일정한 곡선의 형태를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. Choi 등(2007)은 토양수분의 공간적 변화 패턴은 지수 함수로 표현된다고 언급하였다. 이는 토양수분의 분석에 사용된 방법을 직선회귀함수가 아닌 곡선회귀함수가 필요하다는 것을 나타내는 것으로 사료된다. 그러므로 토양수분에 대하여 곡선회귀분석을 실시한 결과, 결정계수는 0.897(CLM_KoFlux), 0.640(CLM_KLDAS)로 직선회귀분석에서보다 상승하여 결과 값이 수정되었지만 큰 차이는 보이지 않았다. 그러므로 토양수분의 잔차분석 또한 적절한 결과로 추정할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해남지역의 KoFlux와 KLDAS 자료를 초기입력자료로 하여 계산된 CLM 수문모형 결과를 관측자료

와 비교하였다. 또한, 이 결과 값과 측정치 자료를 회귀식의 인자들을 통하여 분석하였다. 토양수분, 토양열, 토양온도, 현열, 잠열, 순복사열 등 물과 에너지 변환에 관련한 인자들의 경향은 모두 비슷하게 나타났다. 그 중에서도 KoFlux 지점의 자료를 강제입력자료로 한 CLM 모형의 결과 값이 측정치와 좀 더 일치하는 결과를 보였다. 그리고 두 결과 모두에서 에너지 수지에 관련된 결과는 관측 자료와 모형 결과와의 경향성 일치도가 물수지의 결과에 비하여 높게 나타났다. 이러한 결과는 한국의 전형적인 농경지로 이루어진 지역에 대한 CLM 모형의 적용 가능성을 보여주었다.

본 연구에서 적용 가능성을 확인한 KLDAS의 지점자료 연구를 확장하여 한반도에서의 물수지 연구나 수지에보모델의 적용등과 같은 연구에도 활용을 기대할 수 있다. 이를 위해서는, KLDAS를 통해 산출된 격자화된 입력자료를 이용해 CLM을 강제시켜 넓은 지역에 대한 일관성 있는 모형 결과를 산출하고 더 많은 관측지점의 자료들과 비교, 검증하는 연구들이 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [과제번호(NEMA-자연-2010-35)] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 임윤진 저자의 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-8-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

권효정, 박성빈, 강민석, 유재일, 렌민 유안, 김준(2007) KoFlux

- 관측지에서 에디 공분산 자료의 품질관리 및 보증, **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제9권, 제4호, pp. 260-267.
- 임윤진, 변건영, 이태영, 김준(2010a) 한반도지표자료동화체계를 이용한 증발산 추정, **수자원의 지속적 확보기술개발 사업단**, TR 2010-11, pp. 76.
- 임윤진, 변건영, 이태영, 김준(2010b) 실측 기반의 한반도지표자료동화체계를 이용하여 추정된 증발산 평가, **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제12권, 제4호, pp. 298-306.
- 최현일(2008) 대규모 육지수문모형에서 사용 가능한 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형의 개발 : I. 모형설명, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제8권, 제2호, pp. 59-63.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Bonan, G.B., Oleson, K.W., Vertenstein, M., and Levis, S. (2002) The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model, *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 3123-3149.
- Choi, M., Jacobs J.M., and Bosch D.D. (2008) Remote sensing observatory validation of surface soil moisture using advanced microwave scanning radiometer E, common land model, and ground based data: case study in SMEX03 Little River Region, Georgia, U.S. *Water Resources Research*, Vol. 44, W08421.
- Choi, M., Jacobs, J.M., and Cosh, M.H. (2007) Scaled spatial variability of soil moisture fields, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L01401.
- Calvet, J.C., Joel, N., Roujean, J.L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Oliosoc, A., and Wigneroc, J.P. (1998) An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, pp. 73-95.
- Choi, M., Lee, S.O., 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, *Hydrol. Process*, Vol. 24, pp. 1063-1071.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S., Dirmeyer, P.A., Houser, P.R., Niu, G., Oleson, K.W., Schlosser, C.A., and Yang, Z.L. (2003) The common land model, *American Meteorological Society*, Vol. 84, No. 8, pp. 1013-1023.
- Franks, S.W., Beven, K.J., Quinn, P.F., and Wright, I.R. (1997) On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 86, pp. 63-75.
- Hong, J., Kwon, H., Lim, J.H., Byun, Y.H., Lee, J., and Kim, J. (2009) Standardization of KoFlux Eddy-covariance data processing, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 2, pp. 19-26.
- Hong, J., Lee, H.C., 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*, Vol. 5, No. 2, pp. 138-149.
- Kustas, W.P., Humes, K.S., Norman, J.M., and Moran, M.S. (1996) Single-and dual-source modeling of surface energy fluxes with radiometric surface temperature, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 35, No. 1, pp. 110-121.
- Kwon, H. (2009) Estimation of net radiation in three different plant functional types in Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 2, pp. 79-85.
- Lawrence, P.J. and Chase, T.N. (2007) Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0), *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, G01023.
- Liang, X.-Z., Wood, E.F., Lettenmaier, D.F., Lohmann, D., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Desborough, C., Dickinson, R.E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y.M., Habets, F., Irannejad, P., Koster, R., Mitchell, K.E., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Schaake, J., Schlosser, A., Shao, Y., Shmakin, A.B., Verseghy, D., Warrach, K., Wetzel, 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*, Vol. 19, No. 1-4, pp. 137-159.
- Liang, X.-Z., Choi, H.I., Kunkel, K.E., Dai, Y., Joseph, E., Wang, J.X.L., and Kumar, P. (2005) Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models, *Earth Interactions*, Vol. 9, No. 18, pp. 1-28.
- Lim, Y.-J., Byun, K.-Y., Lee, T.-Y., Kwon, H.-J., Hong, J., and Kim, J. (2011) A land data assimilation system using the MODIS-derived land data and its application to numerical weather prediction in East Asia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Submitted.
- McCabe, F.M., Liu, Yi.Y., Vinukollu, R., Su, H., Evans, J.P., and Wood, E.F. (2009) Comparison of latent heat flux estimates over Australia, *Proc. of 18th World IMACS / MODSIM Congress*, The Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc. and the International Association for Mathematics and Computers in Simulation, Cairns, Australia, pp. 2805-2811.
- Moulin, S., Bondeau, A., and Delecote, R. (1998) Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 6, pp. 1021-1036.
- Stockli, R., Lawrence, D.M., Hui, G.-Y., Oleson, K.W., Thornton, P.E., Yang, Z.-L., Bonan, G.B., Denning, A.S., and Running S.W. (2008) Use of FLUXNET in the Community Land Model development, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, G01025.
- Whitfield, B., Jacobs, J.M., and Judge, J. (2006) Intercomparison study of the land surface process model and the common land model for a prairie wetland in Florida, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, No. 6, pp. 1247-1258.
- Calvet, J.C., Joel, N., Roujean, J.L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Oliosoc, A., and Wigneroc, J.P. (1998) An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, pp. 73-95.

(접수일: 2011.1.21/심사일: 2011.3.7/심사완료일: 2011.3.7)