실측 기반의 한반도지표자료동화체계를 이용하여 추정된 증발산 평가

임윤진^{1, 2*} · 변건영¹ · 이태영¹ · 김 준¹

¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, ²한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨터 센터

(2010년 9월 9일 접수; 2010년 10월 5일 수정; 2010년 10월 25일 수락)

Evaluation of Evapotranspiration Estimation using Korea Land Data Assimilation System

Yoon-Jin Lim^{1, 2*}, Kun-Young Byun¹, Tae-Young Lee¹ and Joon Kim¹

¹Department of Atmospheric Sciences/Global Environment Laboratory,

Yonsei University, Shinchon-dong 134, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

²Supercomputing Center, Korea Institute of Science and Technology Information,

335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-806, Korea

(Received September 9, 2010, Revised October 5, 2010; Accepted October 25, 2010)

ABSTRACT

In this study, we evaluated the performance of Korea Land Data Assimilation System (KLDAS) for the estimation of evapotranspiration (ET) by comparing the modeled against the observed ET at Gwangneung deciduous forest of KoFlux site (GDK) from 2006 to 2008. Although the magnitudes of ET by KLDAS overestimated the observed ET, the seasonal patterns of KLDAS ET were comparable with the correlation coefficient of 0.78. The difference between the KLDAS ET and the observed ET was larger in spring and summer due to rapid plant growth and frequent rainfalls with high cloud cover, respectively. Compared to the ET estimated by NASA Global Land Data Assimilation System (GLDAS) with 0.25° and 1° resolution, the ET by KLDAS with 10 km resolution showed better agreement with the observation at the GDK site. Albeit further improvement is necessary, our results suggest that KLDAS can be used as a practical tool to map ET and to examine its spatiotemporal variability over the Korean Peninsula.

Key words : Evapotranspiration, Korea Land Data Assimilation System, Trend of evapotranspiration

I. 서 론

증발산은 강수와 더불어 지구상의 에너지와 물 순환 과정에서 매우 중요하다. 정확한 증발산 정보는 일기 예보와 기후전망의 신뢰도를 개선하는데 기여할 뿐만 아니라, 농업업을 비롯한 육상생태계 관리의 주요한 의사지원수단으로 활용될 수 있다. 따라서, 선진국에서는 오래 전부터 장기적이고 종합적인 연구를 통해 증

발산량 산정기술을 축적해오고 있으며, 현재 상태의 올바른 증발산 진단 이외에도 기후 및 환경의 변화에 따른 증발산량의 추세변화에도 주의를 기울이고 있다 (Maurer *et al.* 2002, Fernades *et al.* 2007). 이와 관련하여 Huntington(2006)은 20세기 지구 온난화의 결과로 중/고 위도 지역의 물수지 순환이 급격한 변화를 보이고 있다고 보고한 바 있다.

우리나라의 경우에는 최근에서야 에다공분산 방법을

* Corresponding Author : Yoon-Jin Lim
(yoonjin.lim@kisti.re.kr)

이용한 현장 실측을 통해 고품질의 자료가 축적되고 있으며(Choi *et al.* 1999, Kang *et al.* 2009), 위성 자료를 이용해 얻어진 기상-식생변수들로부터 증발산을 간접적으로 추정하는 연구들이 수행되고 있다(e.g., Kim and Kim 2005, Kang *et al.* 2010). 그러나, 이들 연구 역시 주로 일정 기간이나 제한된 지역을 대상으로 하여 연구되고 있어, 한반도 전체에 대한 증발산의 공간분포나 시간에 따른 추세 변화와 같은 연구를 위해서는 적절한 시공간 스케일링 기술의 개발과 적용을 필요로 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 대안으로 사용되는 방법은 지면모형을 활용하는 것이다. 초기의 한 지점이나 일정영역에 적용하기 위해 개발된 지면모형을 격자점 단위로 준비된 입력자료에 의해 구동시키면 공간변이를 파악할 수 있게 된다. 이들 모형은 검증된 생지구물리 및 생지구화학과정으로 구성되며, 입력 강제자료가 신뢰할 수 있다면, 계산된 증발산의 신뢰도는 매우 높다고 알려져 있다(Lu *et al.* 2005). 따라서, 장기간 동안의 일관성 있는 입력자료들이 준비된다면 신뢰성 있는 시-공간적인 변화 추세를 얻을 수 있다.

우리나라에서도 지면모형을 활용한 증발산 추정 연구가 활발히 진행중에 있으나, 시·공간적으로 일관성 있는 입력자료의 산출에 대한 어려움과 지면모형에 대한 이해의 부족으로 인해 현실적인 증발산 도출에 어려움이 있었다. 그러나, 최근 들어 소개된 지표자료동화체계(Land Data Assimilation System, LDAS) 방법은 위성자료를 이용한 지면모형의 불확실한 부분을 개선하고, 여러 가지 위성 및 관측자료들로부터 일관성 있는 시·공간적인 격자 입력값들을 산출하여 지면모형을 강제시켜 적분하기 때문에 관측이 반영된 최적의 플럭스와 지표변수들의 시공간 분포를 산출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 산출된 일관성 있는 시·공간 정보들은, 수치예보모형의 초기조건 개선 뿐만 아니라, 증발산의 시공간 분포가 필요한 농업, 수문학, 토목공학등에 있어서도 활용가치가 높다. 특히 강한 비균질성으로 인해 실측이나 위성으로 인한 추정에 제약이 많은 지표변수들과 플럭스의 추정에 있어 이들을 대신할 좋은 대안으로 인정받고 있다. 또한, 기후변화와 관련된 지표변수 및 증발산 변화 등의 연구에 활용되고 있다.

Lim *et al.*(2010)은 한반도 및 동아시아 지역에서 확보가능한 관측과 위성자료를 기반으로 한반도지표자

료동화체계(Korea Land Data Assimilation System, KLDAS)를 구축하여 지역규모 수치예보모형의 지표초기조건 개선이나 2006년도의 동아시아 지역의 증발산 지도 작성에 적용해 관측과 부합하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 아직 한반도내에서는 증발산을 체계적으로 관측하고 있는 관측소들이 부족하기 때문에 KLDAS를 통해 얻어진 증발산 지도에 대한 제대로 된 검증이 어렵다. 또한, 몇 개의 증발산 관측지점의 경우도 예산 및 인력 부족의 문제로 인하여 연속적인 자료를 보유하지 못하고 있기 때문에 KLDAS를 통한 증발산의 추세변화에 대한 신뢰도를 알아보기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 연속적인 기간에 대한 증발산 관측자료를 보유한 관측지를 대상으로 KLDAS를 통해 산출된 증발산의 추세 감지 능력을 평가하고 검증하고자 한다. 이를 위하여 상대적으로 장기간의 증발산 관측을 수행하고 있는 관측지를 선정하여 기존의 증발산 추정자료와 비교 검증을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 한반도지표자료동화체계(KLDAS)

지표자료동화체계란 상대적으로 다양성이 크고 불확실한 지표 토양 조건들을 직접 관측이나 불확실한 방법으로 추정하는 대신에 지표 토양 장의 변화를 주도하는 강제자료들을 관측, 위성, 그리고 분석장을 근거로 하여 이미 성능이 검증된 지면모형에 강제시켜 현실적인 지표 토양 초기조건을 얻어내는 방법이다(Lu *et al.* 2005). KLDAS는 동아시아 지역에서 얻을 수 있는 관측(Global Telecommunication Station, GTS 누적강수량, Automatic Weather System, AWS 시간강수량), 위성(Geostationary Operational Environmental Satellite, MTSAT-1R), 그리고 분석장(기상청 Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS 자료) 기반의 현실적인 격자 입력자료를 생산하여 Noah Land Surface Model(LSM)을 강제시켜 동아시아 지역에 대한 10km 격자 매시간 간격의 현실적인 토양/지표장(토양수분, 토양온도), 플럭스를 산출하는 시스템을 말한다. 기존의 KLDAS는 Fig. 1과 같이 Numerical Weather Prediction(NWP) 모형의 지표초기조건을 산출하기 위하여 개발된 것이지만, 이를 통해 산출된 토양 조건들과 플럭스는 관측이 반영된 일관성 있는 자료이기 때문에 관측과 비교해 좋은 결과를 보여주었다.

Fig. 1. Schematic of the KLDAS framework.

본 연구에서 사용될 KLDAS내의 증발산 추정에 관여하는 Noah LSM은 토양증발, 식생호흡, 식생에 의한 차단증발, 그리고 눈의 승화과정을 각각 계산하여 최종적으로 증발산량을 산출하고 있으며, 토양과 식생의 종류에 따라 계산에 필요한 모수들을 미리 설정하여 계산에 이용한다. KLDAS의 Noah LSM에서는 Terra와 Aqua 위성의 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 센서정보로부터 추정된 Green Vegetation Fraction(GVF) 변수를 통해 식생의 성장과정을 표현하고 있으며, 매달 변하는 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI) 역시 증발산을 계산하는 과정에 포함되어 있어 현실적인 증발산의 계절적인 변동을 모사하고 있다. KLDAS와 Noah LSM에서의 증발산 계산 과정에 대한 자세한 기술 및 특성, 검증에 관한 내용은 Lim *et al.*(2010)에 제시되어 있다. 본 연구에서는 KLDAS를 통해 2006년부터 2008년까지의 증발산의 시계열을 산출하여 관측 자료와 다른 출처로부터의 추정자료와 비교 검증하였다.

2.2. 관측 자료

광릉의 플렉스 타워 관측지는 경기도 포천시 소흘읍 국립수목원 내의 활엽수림(37° 45' 25.37"N, 127° 9' 11.62"S; 290m a.s.l.)에 위치하며, 서쪽에서 동쪽 방향으로 평균 약 10°의 경사가 존재한다. 식생의 높이는 18-20m이고, 졸참나무(*Quercus serrata*), 서어나무(*Carpinus laxiflora*) 등의 낙엽활엽수림이 주종을 이룬다(Choi *et al.* 2005). 관측지에 대한 식생, 토양 정보는 Lim *et al.*(2003)에 자세히 나와 있다. 광릉

수목원의 낙엽활엽수림은 국내외 주요생태계의 플렉스 타워 관측을 연결한 KoFlux지역 관측망 중 하나이며, KoFlux GDK 관측지로 지정되어 있다(Kim *et al.* 2002). 본 연구에 검증 자료로 사용된 자료는 에디 공분산 방법을 사용하여 관측, 처리, 품질관리된 KoFlux 증발산자료이다. 에디 공분산 방법은 균질하고 편평한 지역에서 난류 플렉스 항만을 측정하여 증발량을 추정하는 미기상학적 방법으로(Baldocchi *et al.* 1988), 육상생태계에서의 에너지 배분과 물, 탄소 등의 주요 물질의 생지화학적 순환을 정량화하고, 장기적으로 감시하고 진단하는데 사용되는 핵심기술이다(<http://www.fluxnet.ornl.gov>). Kim *et al.*(2006), Hong *et al.*(2008), Park(2009)과 Kang *et al.*(2009)는 에디 공분산 방법을 이용하여 한반도 주요 식생 타입에서 지속적인 관측을 통해 신뢰성 있는 증발산 자료 생산 기법을 개발하였다. 타워에서 관측된 자료의 경우 증발산 자료의 발자국(footprint)이 1km 이하로서 비교대상인 지표자료동화체계들로부터 산출된 결과들과 스케일이 서로 다르기 때문에 자료 해석에 있어서 주의가 필요하다.

2.3. Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 증발산 자료

Global Land Data Assimilation System(GLDAS; Rodell *et al.* 2004)은 여러개의 오프라인 지표모형들을 관측자료와 분석자료 기반의 입력자료로 강제시켜 현실적인 지표변수와 플렉스를 산출해내는 시스템이다. 현재, GLDAS 공식 웹사이트(<http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>)에서는 The Common Land Model(CLM), The

Table 1. List of Global Land Data Assimilation System output

Product ID	Full Name	Unit	Time
001	Surface pressure	Pa	Instantaneous
011	Near surface air temperature	K	Instantaneous
032	Near surface wind magnitude	m s^{-1}	Instantaneous
051	Near surface specific humidity	kg kg^{-1}	Instantaneous
065	Total evapotranspiration	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Past 3-hr average
071	Snow water equivalent	kg m^{-2}	Instantaneous
085	Total canopy water storage	kg m^{-2}	Instantaneous
086	Average layer soil temperature	K	Instantaneous
089	Average layer soil moisture	kg m^{-2}	Instantaneous
099	Snowmelt	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1\dagger}$	Past 3-hr average
111	Net Shortwave radiation	W m^{-2}	Past 3-hr average
112	Net longwave radiation	W m^{-2}	Past 3-hr average
121	Latent heat flux	W m^{-2}	Past 3-hr average
122	Sensible heat flux	W m^{-2}	Past 3-hr average
131	Snowfall rate	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Past 3-hr average
132	Rainfall rate	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Past 3-hr average
138	Average surface temperature	K	Instantaneous
155	Ground heat flux	W m^{-2}	Past 3-hr average
204	Surface incident shortwave radiation	W m^{-2}	Instantaneous
205	Surface incident longwave radiation	W m^{-2}	Instantaneous
234	Subsurface runoff	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Past 3-hr average
235	Surface runoff	$\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Past 3-hr average

[†]Unit is $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in CLM, Mosaic, and VIC and kg m^{-2} in Noah.

Mosaic LSM, The Noah LSM, The Variable Infiltration Capacity(VIC) model과 같이 기상학분야에서 널리 사용되며 성능이 검증된 모형들을 1979년부터 현재까지 여러 출처에 기반을 둔 강제자료를 이용해 강제시키 0.25°, 1° 간격의 3시간 또는 월평균 결과물을 제공한다. 이때, 각 모형의 결과뿐만 아니라 산출된 강제자료도 함께 제공한다. GLDAS 웹사이트를 통해 제공되는 관측자료와 결과물들은 Table 1에 제시하였다.

주의해야 할 점은, 장기간 동일한 출처의 관측값을 확보하기 어렵기 때문에 기간별로 지표모형들을 강제시키는 자료들의 출처가 다르다는 점이다. 2000년 이전 기간에 대해서는 주로 관측자료로 보정된 모형 분석장을, 2000년 이후는 실제 관측자료를 이용한 강제변수를 이용하였다. 1979년부터 1993년까지는 편차보정이 된 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)자료, 1994-1999년은 편차보정이 된 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)/National Center for Atmospheric Research(NCAR) 재분석자료, 2000년은 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) GDAS 대기분

석자료를 사용하였으며, 2001년부터는 NOAA GDAS 분석장과 위성이나 현장관측 기반의 관측자료들이 이용되었다. GLDAS 오프라인 모델들에서 사용하는 지표성질변수들(지표피복, 식생모수, LAI, 고도, 토양 타입 등)의 경우는 다른 위성관련 연구그룹을 통해 일정 기간 동안 평균적으로 얻어진 값들이 설정되었다. 이 값들은 27년간 적분하면서 계절적인 변동을 거치기는 하지만, 매년 같은 값이 사용되고 있다. 본 연구에서는 KLDAS, 관측과의 비교 분석을 위해 GLDAS Noah LSM을 사용한 결과중에서 2006년부터 2008년까지의 0.25°와 1° 증발산값을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. KLDAS 증발산과 관측과의 비교 검증

KLDAS를 통해 산출된 2006년부터 2008년까지의 광릉 활엽수림의 증발산의 시계열은 Fig. 2와 같다. KLDAS의 Noah LSM은 관측과 비교해 볼때 식생의 성장과정에 따른 증발산의 증가와 감소를 잘 표현하고 있다.

Fig. 2. The time series of KLDAS evapotranspiration and the observation from 2006 to 2008.

Table 2. Statistic results of the comparison between KLDAS evapotranspiration and the observation at GDK site

	2006~2008 (3 years)	Spring	Summer	Fall	Winter
RMSE (mm)	1.2	1.2	1.8	0.8	0.5
Bias (mm)	0.8	1.1	1.4	0.6	0.3
r	0.78	0.79	0.23	0.84	0.25

계절별로 관측값과의 통계를 살펴보면 가을이 0.84의 가장 좋은 상관관계를 보이고, 봄이 0.79, 겨울이 0.25, 그리고 여름이 0.23 순으로 상관관계가 감소하는 경향을 볼 수 있다(Table 2). Root Mean Square Error(RMSE)와 Bias에 대한 결과에서도 역시 가을(9월~11월)이 0.8mm와 0.6mm로 관측값의 오차가 가장 적었으며, 여름이 각각 1.8mm와 1.4mm로 오차가 크게 나타났다. 겨울철의 경우, 상관관계는 낮았으나 증발산량 자체가 작기 때문에 RMSE나 Bias결과가 상대적으로 크지 않은 것으로 추정된다.

위의 결과를 토대로 KLDAS를 통한 추정 증발산량은 광릉 지역의 관측과 비교하여 비교적 높은 상관관계(0.78)를 보이며 증발산의 계절적인 변화를 잘 나타내고 있었다. 그러나 여름의 집중호우, 겨울에 눈 구름이 발생하였을 경우, 봄에 식생의 성장 초기 기간에 KLDAS 추정 증발산이 관측에 비해 과대 모의하는 경향을 나타내었다.

구름이 많이 끼고 강우가 있는 날 KLDAS 추정

증발산의 과대 모의 원인을 자세히 살펴보기 위해 강수가 관측된 날에 대해 관측된 증발산량과 추정 증발산과의 산포도를 Fig. 3에 나타내었다. 강수가 관측된 날은 구름으로 인해 매우 작은 양의 일사량이 관측되었으며 이로 인해 관측된 현열이나 증발산이 매우 작았으나 KLDAS로 추정된 현열과 증발산은 관측에 비해 크게 나타났다. 이러한 원인으로는 구름이 많이 끼어있을 때 KLDAS의 입력자료인 MTSAT-1R 위성 기반의 지면도달 일사량이 측정된 일사량보다 과대모의하기 때문으로 사려된다(Fig. 4). Fig. 4의 구름 분율은 격자를 중심으로 5×5의 영역에서 구름의 유무를 이용해, 구름이 얼마나 많이 끼어 있는가를 나타내는 정보이다. 구름 분율이 5를 넘으면 비가 올 확률이 커지는 경향이 있어(Lim *et al.* 2010) 5를 기준으로 자료를 분류하였다. 구름 분율 > 5인 경우, 측정된 일사량보다 과대추정된 일사량이 입력자료로 사용되어 KLDAS 증발산을 과대모의 하였다. 따라서 강우를 동반한 흐린 날의 경우 지면모형의 입력자료들을 정확하

(a) Sensible Heat flux at GDK

Cloud fraction greater than 5

(b) Evapotranspiration at GDK

Cloud fraction less than 5

Fig. 3. Comparison of KLDAS estimation and the observation for rainy and cloudy days: (a) sensible heat flux and (b) evapotranspiration.

Fig. 4. Comparison of the estimated incoming solar radiation by KLDAS and the observation: (a) cloud fraction >5 and (b) cloud fraction <5.

게 추출하는데 어려움이 있기 때문에 이를 적절히 보정해주는 것이 필요할 것으로 판단된다.

봄철의 경우 모형내 식생변수들이 관측과 차이를 보이기 때문에 증발산 오차가 발생한 것으로 사려된다. 예를 들면, 모형에서 사용되는 방정식에 포함된 어림이나 모수의 불확실성, 모형내에서 필요한 지표성질 변수들의 값 차이 등이 복합적으로 어우러져 증발산 추정에 오차를 발생시키는 것으로 판단된다.

2006~2008년 3년간의 추정된 증발산의 추세 변화는 2006년에 680mm yr^{-1} , 2007년에 605mm yr^{-1} , 그리고 2008년에 751mm yr^{-1} 로 나타났다(Table 3). 실제 관측된 값과 비교해 과대모의된 값을 보여주고 있으나,

Table 3. Comparison of annual evapotranspiration between KLDAS and the observation. Numbers in parenthesis are precipitation

	Observation (mm)	KLDAS (10 km) (mm)
2006	356 (1625)	680 (1655)
2007	335 (1356)	605 (1164)
2008	375 (1421)	751 (1348)

2007년 강수량이 감소했을 때 증발산량이 감소하고, 2008년 강수량이 증가했을 때 증발산량이 증가하는 추

세변화를 잘 모의하고 있었다. 그러나 연구 대상 연도가 3년간으로 추세를 논하기는 어렵고, 2008년의 경우 강수량이 2006년보다 비교적 적었음에도 불구하고 증발산의 양은 2006년보다 큰 결과를 나타내기 때문에 강수량의 감소(증가)가 증발산의 감소(증가)를 나타낸다고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 2008년 천청일 수가 253일로 2006년의 236일보다 많았기 때문에 증발산량이 관측과 KLDAS에서 모두 크게 나타나는 것으로 추정된다. 2007년은 천청일 수가 244일을 기록하였지만, 연강수량이 상대적으로 작아 관측과 KLDAS에서 모두 작은 증발산량을 나타내었다. Kang *et al.*(2010)의 최근 분석에 따르면, 강수 발생시 결측된 자료 메우기에서 차단 강수의 재증발이 실측 자료에 현실적으로 반영될 경우, 본 연구에서 제시한 실측과 모형 결과간의 증발산의 차이는 다소 줄어들 것으로 보인다.

3.2. GLDAS결과와의 비교

KLDAS를 이용해 추정된 증발산의 신뢰도를 검증하기 위해 본 연구에서 수행했던 것과 비슷한 방법을 이용하여 미국 NASA Hydrological Branch에서 제공하고 있는 GLDAS결과와 관측을 비교하였다. 웹사이트 (<http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>)에서 제공되는 GLDAS 결과 중 Noah LSM을 사용한 0.25°와 1° 해상도의 증발산 자료를 이용하여 2006년부터 2008년까지 증발산 추세를 Fig. 5에 나타내었다. 두 해상도 모두 관측과 KLDAS 결과와는 다르게 2007년에 가장 큰

Table 4. Comparison of annual precipitation between the observation and the input forcing from KLDAS and GLDAS

(mm)	Observation	KLDAS (10 km)	GLDAS (0.25°)
2006	1625	1655	1652
2007	1356	1164	1900
2008	1421	1348	1109

증발산 값(0.25° 해상도일때 743mm yr⁻¹와 1° 해상도일때 800mm yr⁻¹)을 보였다. 이는 2007년에 GLDAS에 사용된 입력강수량이 관측강수량에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 추정된다(Table 4). GLDAS의 경우 입력강수량은 극궤도 위성과 정지궤도 위성의 혼합된 위성을 기반으로 한 추정 강수량을 사용하고 있으므로(Huffman *et al.* 2007), 위성으로 추정된 강수량 오차와 관련이 있을 수 있다. 또한 0.25°와 1°와 같이 해상도가 낮은 경우, 해양의 높은 강수량이 내삽과정시 육상의 강수량에 영향을 미쳐 입력강수량을 과대모의했을 수도 있다. 이렇게 과대모의된 입력강수량은 GLDAS 증발산의 과대모의를 초래하고 관측과 다른 증발산 추세를 산출하는데 영향을 미친 것으로 판단된다. KLDAS의 경우, 입력강수량은 10km 해상도의 실측기반자료를 이용하여 만들어졌기 때문에 내삽시 GLDAS와는 달리 해양 강수량이 육상 강수량에 영향을 미치지 않는다. 따라서 KLDAS 추정 증발산값이 관측과 유사한 흐름을 보여주었다.

VI. 토 의

본 연구에서는 KLDAS를 통해 산출된 증발산을 한반도에서의 증발산 추세변화 연구에 활용하기 위한 기초작업으로서, 검증된 플럭스 모니터링 네트워크인 KoFlux 광릉 활엽수림 관측지에서 2006년부터 2008년까지 관측된 증발산과의 비교 검증을 통하여 그 성능을 알아보았다. KLDAS로부터 추정된 증발산량은 관측에 비해 전체적으로 과대모의하는 경향이 있었으며, 특히 식생이 빠르게 성장하는 봄철과 집중호우시기인 여름철에 오차가 크게 나타났다. 겨울철 저기압이 통과하는 시기에도 오차가 있었지만 절대값 자체가 작아서 전체적인 오차에는 크게 기여하지 않았다. 또한 산출된 연변동의 경우 관측의 추세를 잘 모사하고 있었으며, 미국 NASA에서 제공되는 저해상도 증발산 자료(GLDAS)의 검증 결과와 비교해 볼 때 더 좋은

Fig. 5. Comparison of annual evapotranspiration among the observation, KLDAS, and GLDAS.

결과를 보였다. 이를 토대로 향후 기후변화와 관련된 한반도에서의 증발산의 추세변화에 대한 연구에 있어 KLDAS의 활용도가 클 것으로 기대된다. 그러나 KLDAS와 관측자료를 비교할 경우, 두 자료의 사공간 규모가 다르기 때문에 결과 해석에 주의가 요구된다. 또한, 앞서 언급한 것처럼 입력자료(지면도달일사량, 강수량)에 대한 세심한 주의가 필요하며, 이들을 개선하기 위한 노력이 필수적이다. 부정확한 입력자료들은 증발산의 추세변동을 다른 방향으로 이끌 수도 있기 때문에, 현실적이고 일관성 있는 입력자료의 확보는 모형을 활용한 증발산 추정연구에서 반드시 선행되어야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 한반도지표자료동화체계를 이용한 증발산 추정 능력 평가를 위하여 2006년부터 2008년까지 KoFlux 관측 중의 하나인 광릉 활엽수림에서 관측된 증발산과의 비교 검증을 실시하였다. 한반도지표자료동화체계를 통해 산출된 증발산은 관측과 0.78의 상관계수를 보이며, 관측된 증발산의 시계열을 잘 모의하였다. 그러나 연중내내 관측에 비해 과대모의하는 경향을 나타내었으며 이는 구름이 많고 강수가 흔히 발생하는 여름과 식생이 빠르게 자라기 시작하는 봄철에 더 크게 나타났다. 10km×10km 해상도의 한반도지표자료동화체계를 기반으로 한 추정 증발산은 물수지의 추세변화 연구에 주로 사용되는 0.25°와 1° 해상도의 전지구지표자료동화체계(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)의 결과와 비교했을 때, 관측된 증발산의 크기와 강수량 추세와 더 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 이러한 결과를 토대로 한반도에서의 증발산 추세 연구에 있어 한반도지표자료동화의 활용 가능성이 클 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-8-3)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Baldocchi, D., B. Hicks, and T. Meyers. 1988: Measuring

biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* **69**, 1331-1340.

Choi, T., J. Kim, and J. I. Yun, 1999: On Using the Eddy Covariance Method to Study the Interaction between Agro-Forest Ecosystems and the Atmosphere. *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology* **1**, 60-71.

Choi, T., J. H. Lim, J. H. Chun, D. Lee, and J. Kim, 2005: Microclimatological Characteristics Observed from the Flux Tower in Gwangneung Forest Watershed. *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology* **7**, 35-44.

Fernandes, R., V. Korolevych, and S. Wang, 2007: Trends in land evapotranspiration over Canada for the period 1960-2000 based on *in situ* climated observations and a land surface model. *Journal of Hydrometeorology* **8**, 1016-1030.

Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J. H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H₂O and CO₂ exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426, doi:10.1029/2007WR006408.

Huffman, G. J., T. B. David, J. N. Eric, B. W. David, F. A. Robert, G. Guojun, H. Yang, P. B. Kenneth, and F. S. Erich, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyaer, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *Journal of Hydrometeorology* **8**, 38-55.

Huntington, T. G. 2006: Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* **319**, 83-95.

Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. Y. 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.

Kang, M., H. Kwon, J. H. Cheon, and J. Kim, 2010: On estimating wet canopy evaporation from deciduous and coniferous forests in Asian monsoon climate. *Journal of Hydrometeorology* (in review)

Kim, J.-H., and K. T. Kim, 2005: Estimation of potential evapotranspiration using LAI. *The Journal of Geographic Information System Association of Korea* **8**(4), 1-13.

Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Kim, K. Kim, M. Kim, B. Lee, D. Lee, G. Lee, J. Lee, J. Lim, J. Oh, E. Park, J. Shin, J. Yun, and C. Rho, 2002, Koflux: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia. In: D. Lee (Eds.) *Ecology of Korea*, 215-229.

Kim, J. D. Lee, J. Hong, S. Kang, S. J. Kim, S. K. Moon, J. H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B. L. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**, 881-889.

Lim, J. H., J. H. Shin, G. Z. Jin, J. H. Chun, and J. S. Oh,

- 2003: Forest Stand Structure, Site Characteristics and Carbon Budget of the Kwangneung Natural Forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology* **5**, 101-109.
- Lim, Y.-J., K.-Y. Byun, T.-Y. Lee, and J. Kim, 2010: Estimation of Evapotranspiration Using Korea Land Data Assimilation System. SWRRC, Technical Report, TR 2010-11, 76pp. (in Korean with English abstract)
- Lu, C.-H., M. Kanamitsu, J. O. Rodas, W. Ebisuzaki, K. E. Mitchell, and D. Lohmann, 2005: Evaluation of soil moisture in the NCEP-NCAR and NCEP-DOE global reanalyses. *Journal of Hydrology* **6**, 391-408.
- Maurer, E. P., A. W. Wood, J. C. Adam, D. P. Lettenmaier, and B. Nijssen, 2002: A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States. *Journal of Climate* **15**, 3237-3251.
- Park, S. B., 2009: Interpreting evapotranspiration of forest and cropland in Korea based on the radiatively coupled Penman-Monteith combination equation. M. S. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea. (in Korean with English abstract)
- Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll, 2004: The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society* **85**, 381-394.
- <http://www.fluxnet.ornl.gov/> (2010. 8. 8)
- <http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/> (2010. 8.8)