

동아시아 지역의 플럭스 타워 관측지에 대한 MODIS 위성영상 기반의 증발산 평가

정승택¹ · 장근창¹ · 강신규^{1*} · 김 준² · Hiroaki Kondo³ · Minoru Gamo³ · Jun Asanuma⁴
· Nobuko Saigusa⁵ · Shaoqiang Wang⁶ · Shijie Han⁷

¹강원대학교 환경과학과, 연세대학교 대기과학과/지구환경 연구소, ³일본 국가 산업과학기술 연구소,

⁴일본 지구환경 연구소, ⁵일본 지구환경센터/국가환경 연구소,

⁶중국 과학원/지리과학 자연자원 연구소, ⁷중국 과학원/응용생태 연구소

(2009년 9월 2일 접수; 2009년 12월 3일 수정; 2009년 12월 3일 수락)

Evaluation of MODIS-derived Evapotranspiration at the Flux Tower Sites in East Asia

Seungtaek Jeong¹, Keunchang Jang¹, Sinkyu Kang^{1*}, Joon Kim², Hiroaki Kondo³, Minoru Gamo³,
Jun Asanuma⁴, Nobuko Saigusa⁵, Shaoqiang Wang⁶ and Shijie Han⁷

¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

²Department of Atmospheric Sciences/Global Environment Lab, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 16-1,
Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan

⁴Terrestrial Environment Research Center University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

⁵Center for Global Environmental Research (CGER), National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba Ibaraki 305-8506, Japan

⁶Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China

⁷Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, 72 Wenhua road, Shenyang City,
Liaoning Province 110016, China

(Received September 2, 2009; Revised December 3, 2009; Accepted December 3, 2009)

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is one of the major hydrologic processes in terrestrial ecosystems. A reliable estimation of spatially representative ET is necessary for deriving regional water budget, primary productivity of vegetation, and feedbacks of land surface to regional climate. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) provides an opportunity to monitor ET for wide area at daily time scale. In this study, we applied a MODIS-based ET algorithm and tested its reliability for nine flux tower sites in East Asia. This is a stand-alone MODIS algorithm based on the Penman-Monteith equation and uses input data derived from MODIS. Instantaneous ET was estimated and scaled up to daily ET. For six flux sites, the MODIS-derived instantaneous ET showed a good agreement with the measured data ($r^2=0.38$ to 0.73 , $ME = -44$ to $+31W m^{-2}$, $RMSE = 48$ to $111W m^{-2}$). However, for the other three sites, a poor agreement was observed. The predictability of MODIS ET was improved when the up-scaled daily ET was used ($r^2 = 0.48$ to 0.89 , $ME = -0.7$ to $-0.6 mm day^{-1}$, $RMSE = 0.5-1.1 mm day^{-1}$). Errors in the canopy conductance were identified as a primary factor of uncertainty in MODIS-derived ET and hence, a more reliable estimation of canopy conductance is necessary to increase the accuracy of MODIS ET.

Key words : Evapotranspiration, Remote sensing, MODIS, latent heat flux, Forest ecosystem

* Corresponding Author : Sinkyu Kang (kangsk@kangwon.ac.kr)

I. 서 론

증발산(evapotranspiration, ET)은 물이 식생의 기공을 통해서 기체로 방출되는 증산(transpiration)과 지면이나 식생 표면의 물이 수증기로 변화하는 증발(evaporation)의 합을 의미한다. 증발산은 순복사 에너지를 사용하여 잠열의 형태로 수증기를 대기로 수송하고, 응결과정을 통해 다시 잠열을 방출함으로써 지구상의 에너지 순환을 담당하는 중요한 요소의 하나이며 (Hong *et al.*, 1997), 또한 기후 변화, 생태계 생산성, 홍수, 가뭄 등과 밀접한 관계가 있다(Nishina *et al.*, 2003). 증발산 이론은 Penman(1948)을 시작으로, 현재는 개별 잎으로부터 경관 및 지역수준에 이르는 다양한 공간 규모에 대한 증발산 관측과 추정에 관한 연구들이 진행되고 있다. 경관규모 이상의 증발산 추정기법으로 에디공분산법(eddy covariance)을 활용한 플럭스 타워(flux tower) 관측과 인공위성 다중분광자료를 활용한 원격탐사기법이 대표적이다. 플럭스 타워를 이용한 증발산 관측은 세계 각지의 다양한 생태계와 토지피복에 대해 지속적으로 이루어지고 있으며, 이와 함께 원격탐사에 기반을 둔 관측은 광역규모의 증발산 추정자료를 제공한다.

원격탐사기법으로서 36개 분광 밴드와 250, 500, 1000m의 공간해상도를 가진 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 다중분광센서는 지표 증발산 관측의 새로운 가능성을 제공하고 있다. MODIS는 1999년과 2002년에 발사된 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 지구관측시스템위성(Earth Observation System, EOS)인 Terra와 Aqua에 탑재되었으며, 중위도의 경우 하루에 동일 지점을 4회 이상 지나가면서 지구 표면과 대기 하층에서 발생하는 전지구적인 생태계 변화 과정에 대한 정보를 연속적으로 획득할 수 있다는 장점이 있다. 이는 위성원격탐사 기반의 지표 생물리 변수뿐만 아니라 증발산을 연속적으로 모니터링할 수 있는 가능성을 제공하게 되었다. 최근 MODIS 위성 자료만을 사용하여 광역 지역에 대한 연속적인 증발산을 산출하려는 연구 결과들이 보고되고 있다(Nishida *et al.* 2003b; Cleugh *et al.*, 2007; Mu *et al.*, 2007; Jang *et al.*, 2009).

Nishida *et al.*(2003b)은 MODIS 자료와 지상에서 관측한 기상 자료를 이용하여 증발산을 추정하는 알고

리즘을 제안하였다. Cleugh *et al.*(2007)은 MODIS 자료를 기반으로 Resistance-Surface Energy Balance and Penman-Monteith(RS-PM) 증발산 추정 알고리즘을 개발하여 두 지역의 플럭스 타워 지역에 적용하여 평가한 바 있다. Mu *et al.*(2007)은 RS-PM 알고리즘을 개선하여 전구규모의 증발산 산출에 대해 적용하였다. Jang *et al.*(2009)은 MODIS 자료만을 이용한 개선된 RS-PM 알고리즘의 구동기반을 구축하고, 증발산 모형의 입력자료를 보완하고 개선하였으며, 대상 지점별 토지 피복 형태에 따른 최대 기공 전도도 등의 모수를 개선하여 국내의 광릉 낙엽활엽수림과 해남 밭경작지의 플럭스 연구지역에 대해 신뢰도 있는 증발산 추정 결과를 제시한 바 있다. 그러나 MODIS에 기반을 둔 증발산 추정알고리즘의 엄격한 평가와 개선을 위해서는 보다 다양한 토지피복유형과 기후대에 대해 MODIS에 의한 증발산 추정의 신뢰도 평가를 수행하고, 주요 오차 요인들을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 Jang *et al.*(2009)에 의해 제안된 MODIS 기반의 증발산 추정 알고리즘을 서로 다른 기후 조건과 토지피복을 갖는 동아시아의 9곳의 타워플럭스 관측 지역에 적용하여 증발산 추정에 대한 신뢰도를 평가하고, 주요 오차 원인을 규명하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역

MODIS로부터 추정된 입력자료 및 증발산의 신뢰도를 평가하기 위하여 에디 공분산법을 이용해 증발산과 미기상학적 요소를 관측하는 한국(GDK, HFK), 일본(TKY, TMK), 중국(CBS, HBG, QYZ), 몽골(SKT) 및 태국(MKL)의 총 9곳의 플럭스 타워 연구지역을 선정하였고, 각 연구지역에서 관측한 기상 및 증발산 자료를 수집하였다. 연구지역의 위치와 정보(URL: <http://asiaflux.yonsei.kr/>, <http://www.chinaflux.org/>)는 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

2.2. 증발산 알고리즘

MODIS 기반의 증발산을 추정하기 위한 몇 가지 방법 중, 본 연구에서 사용한 증발산 알고리즘은 Jang *et al.*(2009)이 제안한 방법으로, 대한민국의 광릉, 해남에 위치한 플럭스 타워 지역에 적용하여 신뢰성 있는 결과를 보인바 있다. 증발산 산출을 위해 아래의

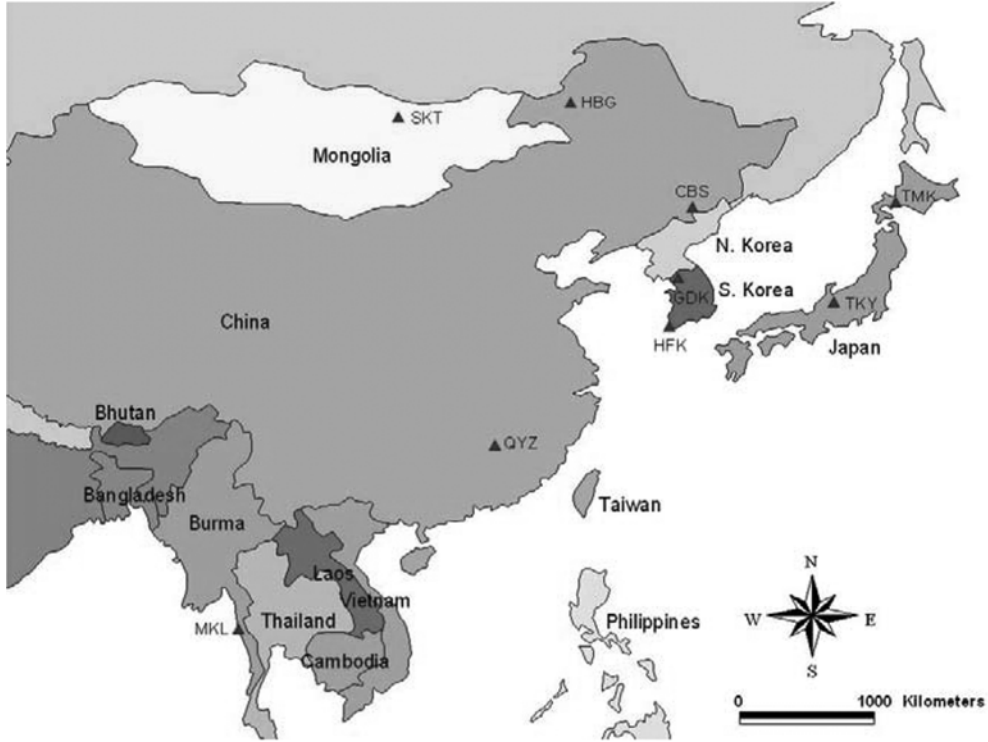


Fig. 1. Locations of flux tower sites used in this study.

Table 1. Characteristics of nine flux tower sites used in this study

Site name	Location	Vegetaion Type	Elevation	Mean Temp.	Precipitation	Canopy Height
GDK(KoFlux Gwangneung)	37.75°N, 127.15°E	Mixed deciduous/coniferous forest	340m	11.5 °C	1332mm	18m
HFK(KoFlux Haenam)	34.55°N, 126.57°E	Rice/Farm land	13.74m	13.3 °C	1306mm	1 m
TKY(Takayama)	36.15°N, 137.42°E	Cool temperate deciduous forest	1420m	6.5 °C	2275mm	15-20 m
TMK(Tomakomai)	42.74°N, 141.52°E	Japanese larch forest	140m	6.2 °C	1043mm	15m
CBS(Changbaishan)	42.40°N, 128.10°E	Temperate mixed forest	736m	-7.3 ~ 4.9 °C	600 ~ 900 mm	26m
QYZ(Qianyanzhou)	26.74°N, 115.07°E	Subtropical planted coniferous forest	100m	18.6 °C	1488.8 mm	10.1 m
HBG(Hulunbeier)	49.33°N, 119.94°E	Temperate meadow-steppe	-	-2~-1 °C	380 ~ 400 mm	1m
SKT(Southern Khentei Taiga)	48.35°N, 108.65°E	larch forest	1630m	-2.9 °C	282mm	20m
MKL(Mae Klong)	14.58°N, 98.84°E	Tropical seasonal deciduous forest	231m	25°C	1500mm	30m

식을 이용하였다.

$$\lambda E = \lambda E_p + \lambda E_s \tag{1}$$

$$\lambda E_p = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho \cdot c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)} \tag{2}$$

$$\lambda E_s = \frac{\Delta \cdot R_{n,soil} + \rho \cdot c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (r_{toi} / r_a)} \cdot \left(\frac{RH}{100}\right)^{(e_s - e_a) / 100} \tag{3}$$

여기서, Δ 는 기온과 포화수증기압(saturated water vapor pressure, e_s)간의 기울기(Pa K⁻¹), ρ 는 공기밀도(air density in kg m⁻³), r_a 는 공기 비열 용량

(specific heat capacity of air in J kg⁻¹ K⁻¹), r_a 는 공기 역학 저항(aerodynamic resistance in s m⁻¹), r_s 는 지표 저항(surface resistance in s m⁻¹), e_a 는 현재수증기압(actual water vapor pressure in Pa), γ 는 건습계 상수(psychrometric constant in Pa K⁻¹), R_n 은 순복사(net radiation in W m⁻²), (net radiation at the soil surface)은 토양 표면에서의 순복사(W m⁻²), $R_{n,soil}$ 는 수분 이동에 대한 총 공기 역학 저항(total aerodynamic resistance in s m⁻¹), r_{toi} 는 상대 습도(relative humidity in %)를 각각 타낸다.

지표 저항(surface resistance, r_s)은 증발산에 영향을 미치는 주요 인자로 임관 전도도(canopy conductance, C_c)의 역수로 표현되며, C_c 는 잎 단위의 기공 전도도(stomatal conductance, C_s)에 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 적용하여 임관수준으로 확장된다. C_s 는 Federer *et al.*(1996)에 의해 제안된 잎의 최대 전도도(maximum leaf conductance, C_L)에 환경 제한 인자를 고려하여 산출하였다. C_c 는 식 (4)-(6)을 이용해 산출하였다.

$$C_s = C_L \cdot m(T_{\min}) \cdot m(VPD) \quad (4)$$

$$C_c = C_s \cdot LAI \cdot f_s \quad (5)$$

$$r_s = 1/C_c \quad (6)$$

C_L 는 단위면적당 잎의 최대 전도도($m s^{-1}$), $m(T_{\min})$ 과 $m(VPD)$ 는 최저기온과 포차에 의한 환경 제한 인자로 0.1에서 1의 값을 갖는다(Heinsch *et al.*, 2003; Mu *et al.*, 2007). 여기서, f_s 는 일명 shelter factor 혹은 clumping index의 개념이며, 증산에 대한 제한 인자로서 임관 내의 개별 나뭇잎은 주변의 나뭇잎에 의해 햇빛과 바람이 차단되므로 상대적으로 낮은 증산을 한다는 가정에 따른 조절 인자이다(Dingman, 1994). f_s 는 LAI 의 증가와 감소에 따라 값이 변하는데, 잎이 없는 상태인 $LAI=0$ 일 때는 1, 임관이 닫히는 임계치로 알려진 $LAI>3$ 인 경우에는 0.5의 값을 갖는다(Allen *et al.*, 1989; Carlson, 1991).

LAI 는 Fisher *et al.*(2008)에 의해 제안된 Normalized Difference Vegetation Index($NDVI$)로 부터의 추정법을 이용했는데, 이는 일반적으로 MODIS에서 제공되는 LAI 가 실측 값에 비해 과대평가되는 경향이 있기 때문이다(Heinsch *et al.*, 2006).

2.3. 복사 요소 산출

증발산의 열원으로 사용되는 복사에너지의 총량을 순복사(R_n)라 하며, 지표로 입사하는 복사에너지와 방출되는 복사에너지의 차이로부터 산출할 수 있다(식 7). R_n 은 대부분의 증발산 관련 모델의 입력자료로 사용되며(Boegh *et al.*, 2002; Nishida *et al.*, 2003b; Jang *et al.*, 2009), 기후 감시, 날씨 예측 등 다양한 분야에 적용된다. 이 연구에서는 Ryu *et al.* (2008)에 의해 개발된 MODIS 위성영상 기반의 순복사량 추정 기법을 사용하였다.

$$R_n = (1-\alpha)R_s \downarrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow \quad (7)$$

여기서, α 는 알베도, $R_s \downarrow$ 는 하향 단파복사($W m^{-2}$), $R_l \downarrow$ 는 하향 장파복사($W m^{-2}$), $R_l \uparrow$ 는 상향 장파복사($W m^{-2}$)이다.

$R_s \downarrow$ 를 산출하기 위해 직달 일사량과 산란 일사량을 고려한 Bird and Hurlstrom(1981)의 방법을 따랐으며, 이 방법은 몇몇 선행된 연구들에서 좋은 결과를 보였다(Annear and Wells, 2007; Chen *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2008; Jang *et al.*, 2009). 상향 단파복사($R_s \uparrow$)는 $R_s \downarrow$ 에 알베도를 적용시켜 산출하였으며, $R_l \downarrow$ 는 Stefan-Boltzmann 법칙 기반의 Prata(1996)가 제안한 방법을 따랐다. $R_l \uparrow$ 는 지표 온도(land surface temperature, LST)를 이용한 Bisht *et al.*(2005)의 방법을 적용하여 산출했다. 이들 복사요소 산출에 대한 자세한 내용은 Ryu *et al.*(2008)에 제시되어 있다.

2.4. MODIS 자료

본 연구에서는 사용한 MODIS 자료는 Aqua 위성의 Collection5 자료를 사용하였으며, MYD04(AOT : aerosol optical depth, $SOLZA$: solar zenith angle), MYD07(T_a : air temperature, T_d : dew-point temperature, O_3 : ozone, $PTOT$: air pressure), MYD11(LST), ϵ_{31} ϵ_{32} : 31, 32 band emissivity, MYD13($NDVI$, EVI : enhanced vegetation index), MYD43(α : albedo) 자료를 이용하여 증발산 알고리즘을 구동하였다. 연구기간은 2002년부터 2006년까지이며, 관측된 증발산 자료의 제공기간은 각 연구지역에 따라 다르다.

2.5. 일 단위로의 확장

MODIS로부터 산출된 증발산은 위성이 대상지역을 통과하는 시간대의 순간 값을 제공한다. 그러나 증발산 추정 모형이나 증발산 결과를 적용할 때에는 일 단위의 증발산 추정이 보다 유용하다. 따라서 순간 증발산을 하루 단위로 확장하려는 연구들(Zhang *et al.*, 1995; Nishida *et al.*, 2003a; Bisht *et al.*, 2005)이 진행 되어 왔다. Nishida *et al.*(2003b)은 몇몇 시간에 대한 순간 증발산(instantaneous ET, IET)을 일 단위 증발산(daily ET, DET)으로 직접 전환하는 것은 태양각의 변화나 구름 등의 영향 때문에 오차가 클 수 있다고 했다. 그러나 순간 순복사(instantaneous net radiation, INR)에 대한 IET 의 비율은 상당히 일

정하다고 보고되어 있다(Shuttleworth *et al.*, 1989; Sugita and Brutsaert, 1991; Crago, 1996). 따라서 이 연구에서는 Bisht *et al.*(2005)에 의해 제안된 Sinusoidal 모델을 기반으로 일 평균 순복사량(*DANR*)을 산출한 후, 낮 동안의 *IET*과 *INR*의 비율이 일정하다는 가정하에 식 (8)을 이용해 일 단위 *DET*를 산출하였다.

$$DET = \frac{DANR \cdot IET \cdot daylength \cdot 0.0036}{INR \cdot 2.5} \quad (8)$$

여기서, *DET*는 일 단위 증발산(mm day⁻¹), *DANR*는 일 평균 순복사(W m⁻²), *IET*는 순간 증발산(W m⁻²), *daylength*는 낮의 길이, *INR*는 순간 순복사(W m⁻²), 0.0036과 2.5는 기본적으로 순간 잠열의 에너지 단위 W m⁻²를 하루 증발산량인 mm day⁻¹ 단위로 환산하기 위한 변환계수이다. *daylength*를 구하기 위한 방법은 Dingman(1994)에 의해 제안된 방법을 사용했다.

III. 결과 및 고찰

3.1. MODIS 기반 증발산 알고리즘의 평가

MODIS로부터 산출된 *T_a*를 플럭스 관측 값과 비교한 결과, HBG와 MKL 지역을 제외한 일곱 곳의 연구지역에서 결정계수(coefficient of determination, *r*²)는 0.84~0.94(Table 2), 평균 오차(mean error, ME)와 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)는 각각 -5.6~+1.1°C, 2.4~6.2°C의 결과를 보였다(Table 3). 하지만 HBG와 MKL지역은 *r*²은 각각 0.77과 0.36, ME는 +1.1°C와 -5.5°C, RMSE는 9.8°C와 5.9°C로 다른 지역에 비해 산개하거나 과소평가하는 결과를 나

타냈다. *T_a*에 의해 영향을 받는 *VPD*의 결과에서도 HBG와 MKL 지역은 각각 *r*²은 0.20, 0.34, ME는 0.39kPa, -1.02kPa, RMSE는 0.81kPa, 1.18kPa로 관측 값과의 일치도가 낮게 나타났다. 그러나 그 외 지역들은 전체적으로 양호한 일치도를 보였으며(Table 2와 3), 이들 오차는 다른 연구에서 제시한 오차의 크기와 유사하였다(Bisht *et al.*, 2005; Ryu *et al.*, 2008).

MODIS로부터 산출된 *R_s*과 관측 값을 비교한 결과, HBG와 MKL 지역이 *r*²이 각각 0.13, 0.57이고, ME는 -93W m⁻², -39W m⁻²이며, RMSE는 237W m⁻², 66 W m⁻²로 역시 다른 지역에 비해 관측값과의 일치도가 낮았다. 특히 HBG 지역은 *R_s*를 산출 하는데 있어 가장 중요한 요소인 하향 *R_{s↓}*가 *r*²은 0.05, ME와 RMSE가 각각 -12W m⁻², 293W m⁻²로 관측 값과 거의 무관한 결과를 보였다. 그 외에 일곱 곳의 지역에서는 MODIS로부터 산출된 순복사의 *r*²이 0.60~0.95, ME와 RMSE는 각각 -90~+36W m⁻², 46~117W m⁻²의 범위로 신뢰할 만한 수준의 결과를 나타냈으며, *R_{s↓}*에 대한 결과에서도 좋은 일치도를 보였다.

MODIS 증발산과 플럭스 타워로부터 관측한 증발산을 비교 평가한 결과, 여섯 곳의 연구지역(GDK, HFK, TKY, TMK, CBS, SKT)에서 *r*²은 0.38에서 0.73, ME는 -44~+31 W m⁻², RMSE는 48~111 W m⁻²의 범위를 보여 관측자료와의 양호한 일치도를 보였다(Table 4). 그러나 다른 세 곳의 연구지역은 선형성 및 오차에 있어서 매우 낮은 신뢰도를 보였다(Fig. 2).

HBG 연구지역에서 MODIS 증발산과 관측 값을 비교한 결과, *r*²이 0.42, ME와 RMSE가 각각 -53W

Table 2. Coefficient of determination (*r*²) of MODIS derived meteorological variables with respect to the observed variables from each flux tower site

Site	<i>r</i> ²						
	<i>T_a</i>	<i>VPD</i>	<i>Rs↓</i>	<i>Rs↑</i>	<i>RI↓</i>	<i>RI↑</i>	<i>Rn</i>
GDK	0.94	0.90	0.88	-	-	-	0.94
HFK	0.93	0.71	0.94	-	-	-	0.95
TKY	0.91	0.53	0.90	0.85	0.67	0.89	0.90
TMK	0.91	0.45	0.85	0.81	0.92	0.93	0.84
CBS	0.88	0.49	0.83	0.79	0.47	0.44	0.60
HBG	0.77	0.20	0.05	0.05	0.54	0.54	0.13
QYZ	0.84	0.62	0.84	0.20	0.77	0.96	0.86
SKT	0.89	0.81	0.83	0.25	0.92	0.95	0.82
MKL	0.36	0.34	0.62	0.47	0.40	0.80	0.57

Table 3. Error statistics (mean error and root mean square error) for Aqua MODIS-derived radiation components and net radiation at 9 flux tower sites

ME							
Site	Ta(°C)	VPD(kPa)	Rs↓(Wm ⁻²)	Rs↑(Wm ⁻²)	RI↓(Wm ⁻²)	RI↑(Wm ⁻²)	Rn(Wm ⁻²)
GDK	-0.3	-0.19	-33	-	-	-	-44
HFK	-0.4	-0.23	-38	-	-	-	+36
TKY	-0.7	+0.10	-38	-29	-36	-26	-25
TMK	-2.5	-0.13	-14	-8	-25	-8	-19
CBS	-5.6	-0.53	-44	+2	-5	+12	-51
HBG	+1.1	+0.39	-12	+74	+13	+20	-93
QYZ	+1.1	-0.01	-4	+33	+17	+5	-26
SKT	-1.2	-0.05	-40	+47	+33	+45	-90
MKL	-5.5	-1.02	-13	-4	-49	-19	-39
RMSE							
GDK	3.5	0.34	69	-	-	-	67
HFK	2.5	0.41	54	-	-	-	46
TKY	2.4	0.34	94	35	44	31	57
TMK	3.2	0.28	84	16	27	14	75
CBS	6.2	0.67	82	13	56	57	103
HBG	9.8	0.81	292	119	47	92	237
QYZ	3.5	0.47	52	37	45	34	54
SKT	4.2	0.27	97	62	37	53	117
MKL	5.9	1.18	58	10	51	21	66

Table 4. Error statistics for MODIS instantaneous ET and daily ET at flux sites

Site	instantaneous ET			Daily ET		
	r ²	ME(Wm ⁻²)	RMSE(Wm ⁻²)	r ²	ME(mm day ⁻¹)	RMSE(mm day ⁻¹)
GDK	0.67	+31	62	0.70	+0.6	0.9
HFK	0.38	-5	82	0.44	+0.2	1.0
TKY	0.49	-44	111	0.64	-0.2	0.7
TMK	0.66	-43	84	0.67	-0.7	1.1
CBS	0.65	-27	70	0.89	-0.3	0.5
HBG	0.42	-53	95	0.48	-0.7	1.2
QYZ	0.17	-75	145	0.27	-0.5	1.1
SKT	0.73	-28	48	0.75	-0.2	0.6
MKL	0.07	-4	78	0.06	+0.3	0.8

m⁻², 95W m⁻²로 MODIS와 관측 값의 1:1 대응선을 중심으로 과소평가하며 산개하는 경향이 나타났다. 앞서 MODIS 기상자료 및 복사요소와 관측 값과의 오차가 매우 컸으므로 이것이 증발산 오차에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다(Table 3).

MKL 연구지역은 MODIS 증발산이 관측 값과 비교해 1:1 대응선을 중심으로 매우 산개하는 경향을 나타냈다. 그 원인 중 하나로 MODIS로부터 산출된 T_a에 의한 오차를 들 수 있다. 입력자료 평가에 있어 MODIS의 T_a가 관측 값에 비해 과소평가되며, 선형성이 낮은 결과를 보였으며, T_a에 직접적으로 영향을 받

는 VPD와 R_s↓도 ME가 각각 -1.02kPa, -49Wm⁻²로 관측 값에 비해 매우 과소 평가하는 결과를 나타냈다.

QYZ 연구지역은 오차를 분석한 결과, ME와 RMSE가 각각 -75Wm⁻², 145Wm⁻²으로 아홉 곳의 연구지역 중 가장 컸으며, 관측 값과 비교해서 연중 증발산의 변화를 충분히 나타내지 못했다. 특히 봄, 여름철에 매우 과소 평가하는 경향을 나타냈다. 그러나 기상자료 및 복사요소가 지상관측 자료와의 비교에서 신뢰성 있는 결과를 나타냈기 때문에 MODIS 증발산이 과소평가되는 원인은 농림지역인 QYZ의 복잡

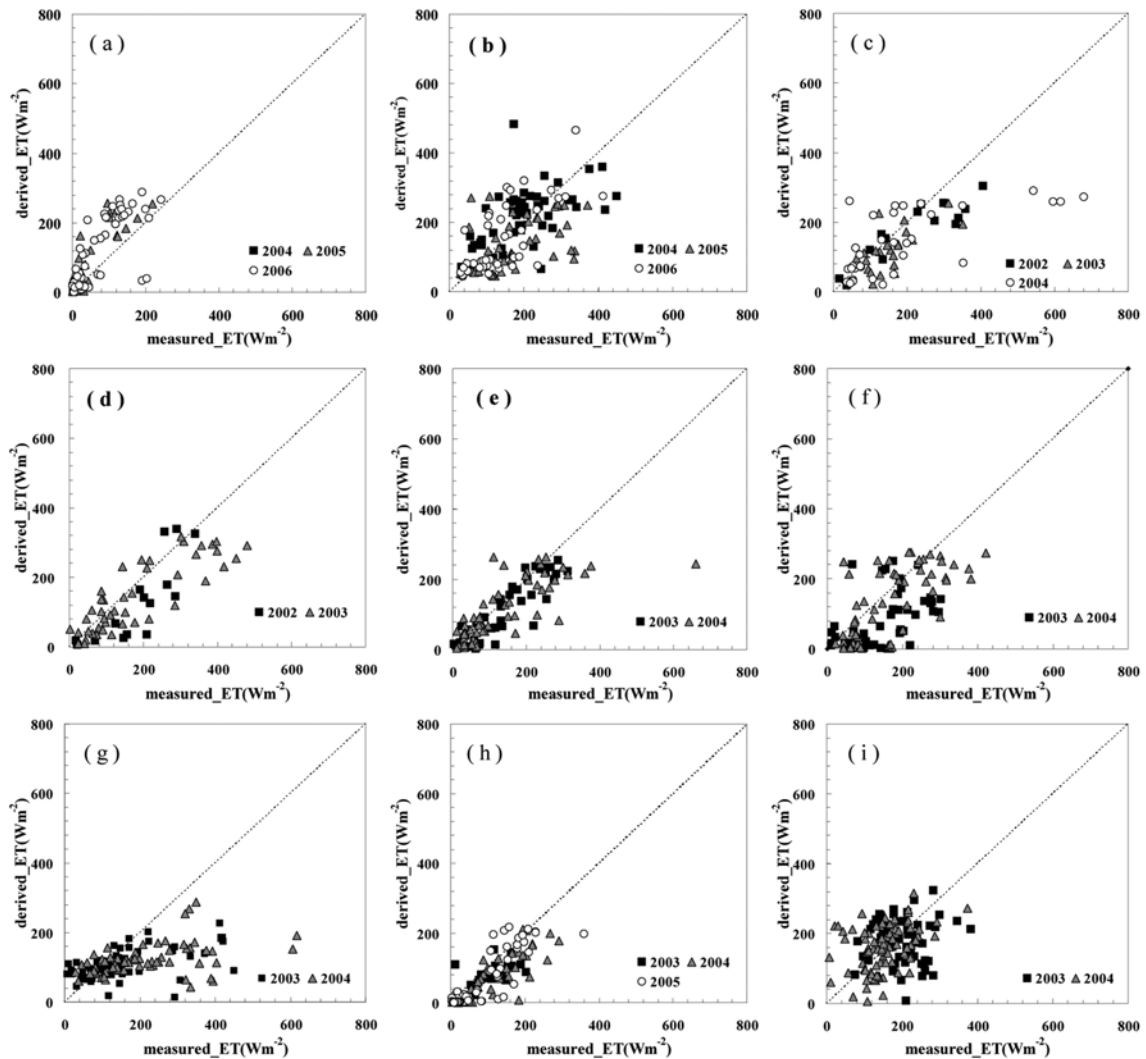


Fig. 2. Scatter plots between the MODIS-derived instantaneous ET and measured ET at the flux tower (a: GDK, b: HFK, c: T, d: KY, e: TMK, f: CBS, g: HBG, h: QYZ, i: SKT, j: MKL).

한 토지피복의 영향이거나, 증발산 알고리즘에 사용된 계수에 관련된 오차에 의한 것으로 사료된다.

증발산 모형의 입력자료와 함께 모형의 계수들 역시 오차의 원인이 될 수 있다. 특히 본 연구에 사용된 Penman-Monteith 식에서 오차를 야기할 수 있는 계수들로 C_s 와 r_a 등이 있다. 특히 C_s 는 증발산 추정에서 매우 민감한 요소이기 때문에(Kelliher *et al.*, 1995) 이를 모수화 하려는 연구들이 많이 수행되어 왔다(e.g., Komatsu, 2003; Matsumoto *et al.*, 2005). 본 연구에서는 C_s 로부터 산출된 C_e 가 증발산 추정의 오차에 미치는 영향을 알아보기 위해 증

발산 오차와 C_e 오차 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과, HBG 지역을 제외한 8곳의 지역에서 상관계수(r)가 0.59~0.82 범위를 보였고 특히 MKL 지역의 경우 r 값이 0.82를 보임으로써 C_e 에 의한 오차가 증발산의 오차에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 MODIS 증발산의 일치도가 낮았던 QYZ 지역 역시 r 값이 0.60으로 C_e 에 의한 오차가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 HBG 지역은 r 값이 0.37로 C_e 의 오차가 증발산 오차에 미치는 영향이 다른 지역에 비해 작았고, MODIS 기상 및 복사요소의 오차가 증발산의 주요한 오차요인으로 사료된다.

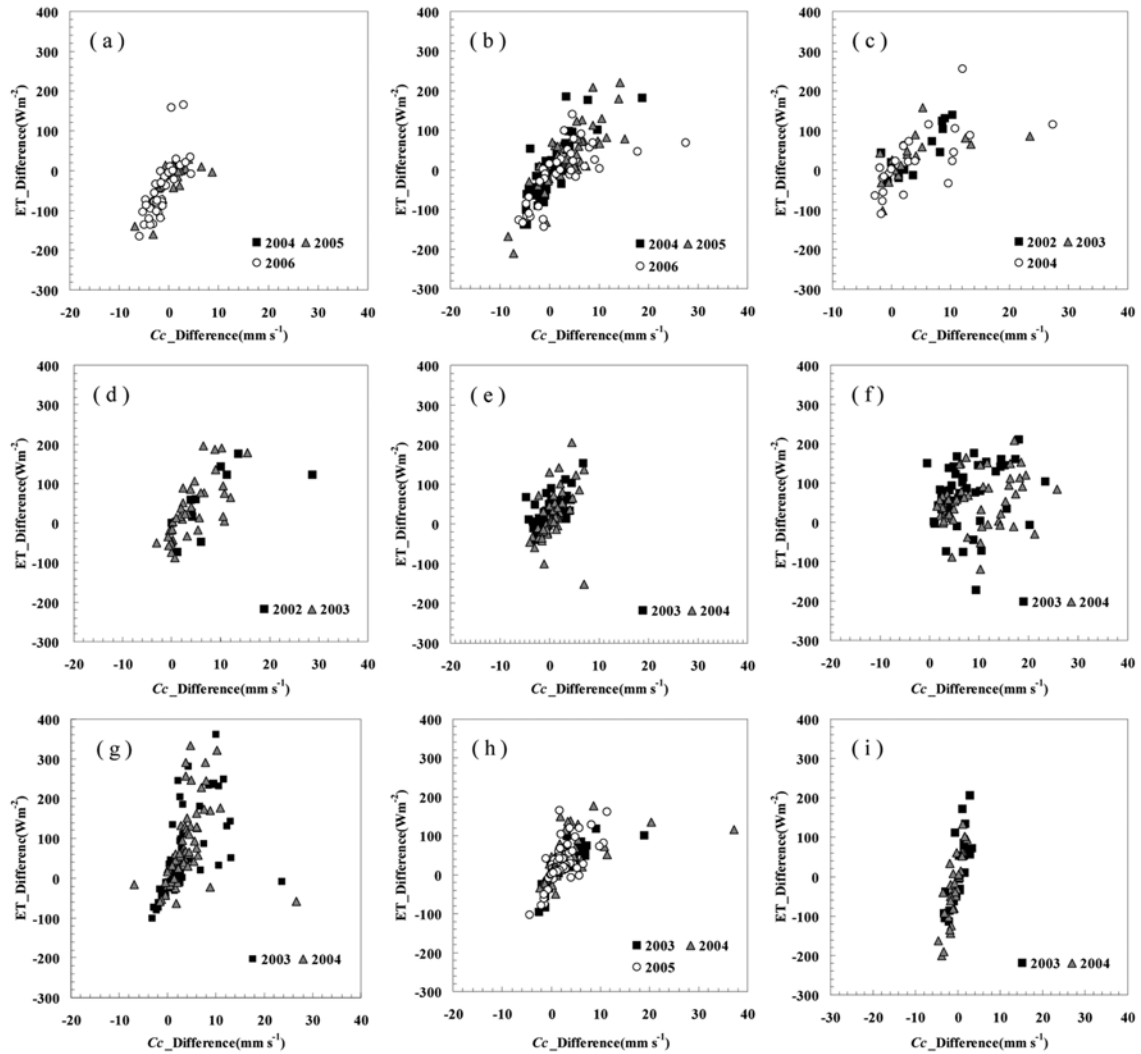


Fig. 3. Scatter plots between mean errors in the MODIS ET and in the canopy conductance (a: GDK, b: HFK, c: TKY, d: TMK, e: CBS, f: HBG, g: QYZ, h: SKT, i: MKL).

3.2. 일 단위 증발산

MODIS로부터 산출된 *IET*를 식 (8)을 이용해 *DET*로 확장한 결과, *IET*의 신뢰도가 낮았던 세 곳의 연구지역을 제외한 여섯 곳의 연구지역에서 r^2 0.44~0.89, ME는 $-0.2 \sim +0.6 \text{ mm day}^{-1}$, RMSE는 0.5~1.1 mm day^{-1} 로 *IET*에 비해 양호한 결과를 보였다. 하지만 *IET*에서 나타나던 과소 또는 과대 평가하거나, 산개하는 경향은 여전히 남아 있었다.

*IET*에 비해 *DET*의 예측력이 향상되는 결과에 대해선 분명한 원인을 파악하기 어려우나, 한 가지 가능

한 해석은 *IET* 평가시 MODIS 증발산 추정시각과 30분 단위 평균값으로 제공되는 타워플렉스 증발산 관측값과의 미세한 시각 불일치로 인한 오차이다. 비록 MODIS 촬영시각과 가장 근접한 시간대의 타워 기상 및 증발산 자료를 비교하였지만 정확한 시각의 동기화는 불가능하였다. 반면 *INR*에 대한 순간 *IET*의 비율은 일출과 일몰 때를 제외한 낮 동안에 상대적으로 일정한 값을 보였으며, 이를 이용해 추정된 *DET*와 타워 플렉스의 일간 누적 증발산의 비교 시 시간의 불일치는 크게 문제되지 않을 수 있다.

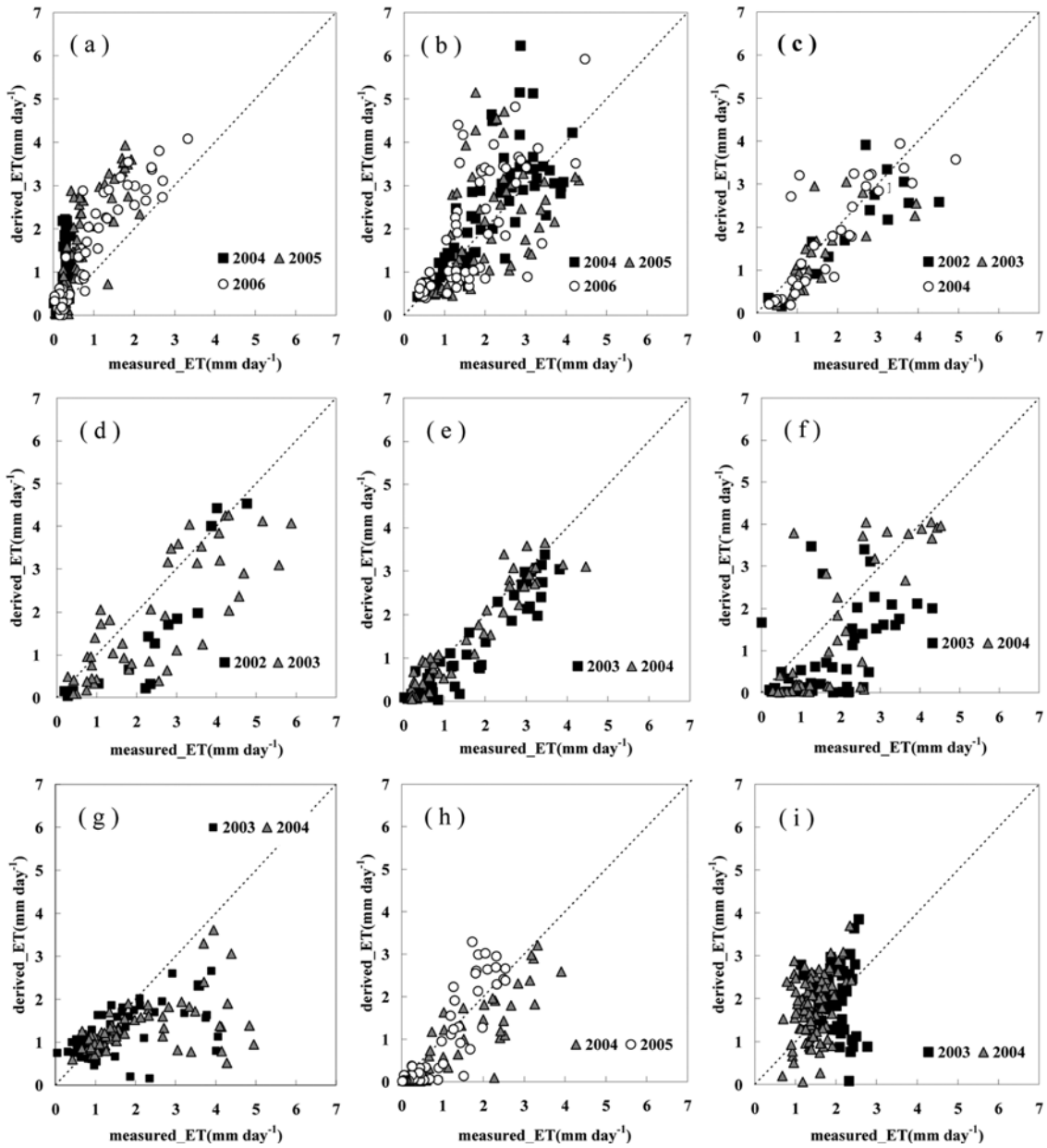


Fig. 4. Comparison of the MODIS-derived daily ET with observed daily ET at the flux tower. (a: GDK, b: HFK, c: TKY d: TMK, e: CBS, f: HBG, g: QYZ, h: SKT, i: MKL).

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 MODIS로부터 산출된 입력자료들을 Jang *et al.*(2009)이 제안한 순간 증발산 추정 알고리즘에 적용시켜 동아시아 지역에 대한 평가를 실시하였고, 이를 일 단위로 확장한 일 증발산을 함께 평

가하였다. 관측 값과 MODIS로부터 산출된 순간 증발산을 비교한 결과, 여섯 곳의 연구지역에서는 신뢰할 만한 수준의 결과를 얻었으나, 나머지 세 지역에서는 관측 값과 차이를 보였다. 그 원인으로 HBG, MKL 지역에서는 기상자료 및 복사요소에서의 오차가 컸기 때문으로 판단된다. 또한 모든 검증 지역에 대해서 증

발산 오차와 C_e 오차의 상관관계를 분석한 결과, HBG를 제외한 여덟 지역에서 상관성이 높게 나타나, C_e 의 오차가 증발산 오차에 지배적인 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

MODIS로부터 산출된 IET 를 일 단위로 확장시킨 결과, IET 의 일치도가 낮은 세 지역을 제외한 나머지 연구지역에서, 순간 증발산 평가시보다 양호하게 관측 자료와 일치하였다. 본 연구에서 사용한 순간 증발산의 일 단위 확장 추정기법은 위성자료와 지상관측 자료와의 시각 불일치 문제를 일부 해결함으로써, 보다 신뢰도 높은 일 단위 증발산을 제공할 것으로 기대된다. 그러나 여전히 큰 오차를 보이는 연구지역에 대한 보다 면밀한 원인규명을 통해 알고리즘의 개선과 향상된 모수화 등의 지속적인 연구가 필요하다.

적 요

지표 증발산은 육상 생태계의 수문순환의 주요 성분으로서, 지표-대기간의 에너지 교환, 미기후, 지역의 수자원 함량, 식생의 일차생산성 등에 중요한 영향을 미친다. 증발산을 추정하기 위한 방법들 중에서 MODIS를 이용한 방법은 위성 자료만을 사용하여 넓은 지역에 대한 지속적인 증발산 모니터링이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 MODIS 기반의 증발산 추정 알고리즘을 동아시아 지역에 적용하고, 그 신뢰도를 평가하였으며, 주요 오차요인을 분석하였다. 증발산 평가 결과 여섯 연구지역(GDK, HFK, TKY, TMK, CBS, SKT)에서는 r^2 가 0.38~0.73, ME와 RMSE가 각각 $-44 \sim +31 W m^{-2}$, $48 \sim 111 W m^{-2}$ 로 신뢰할 만한 결과를 나타냈다. 하지만 다른 세 연구지역(HBG, QYZ, MKL)에서는 관측 값과 비교해서 차이를 나타내었고, 과소평가하는 경향을 보였다. HBG, MKL 지역은 MODIS 기상 자료 및 복사요소의 오차가 주요 원인으로 나타났다. 그러나 QYZ지역은 기상 자료와 복사요소가 모두 좋은 일치도를 보였기 때문에, 모형의 모수와 관련된 오차가 주요 원인의 하나로 판단된다. 임관 전도도의 오차가 증발산 오차에 미치는 영향을 분석한 결과, HBG지역을 제외한 다른 연구지역에서 r 값이 0.59~0.82로 관측값과의 상관성이 높은 것을 확인하였다. 또한 MODIS로부터 산출된 순간 증발산을 일 단위로 확장시킨 결과, 순간 증발산의 일치도가 떨어졌던 3개 연구지역을 제외하고 6개 지역에서

r^2 가 0.44~0.89, ME와 RMSE는 각각 $-0.7 \sim +0.6 mm day^{-1}$, $0.5 \sim 1.1 mm day^{-1}$ 의 범위로 신뢰도 있는 결과를 나타냈다.

감사의 글

산림청의 “신방재사업단” 연구과제(과제 번호 : S210809L010140)와 과학재단의 A3 Foresight “CarboEastAsia” 과제의 연구비 지원에 감사드린다.

REFERENCES

- Allen, R.G., M. E. Jensen, J. L. Wright, and R.D. Burman, 1989: Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal* **81**, 650-662.
- Annear, R. L., and S. A. Wells, 2007: A comparison of five models for estimating clear-sky solar radiation. *Water Researches Research* **43**, W10415.
- Bird, R. E. and R. L. Hulstrom, 1981: A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. SERI Report TR642-761: Golden, USA.
- Bisht, G., V. Venturini, S. Islam, and L. Jiang, 2005: Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment* **97**, 52-67.
- Boegh, E., H. Soegaard, and A. Thomsen, 2002: Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment* **79**, 329-343.
- Carlson, T. (1991) Modeling stomatal resistance: an overview of the 1989 workshop at the Pennsylvania State University. *Agricultural and Forest Meteorology* **54**, 103-106.
- Chen, R., E. Kang, X. Ji, J. Yang, and J. Wang, 2007: An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin. *Energy* **32**, 1148-1157.
- Cleugh, H. A., R. Leuning, Q. Mu, and S. W. Running, 2007: Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment* **106**, 285-304.
- Crago, R. D., 1996: Comparison of the evaporative fraction and the Priestley-Taylor α for parameterizing daytime evaporation. *Water Resource Research* **32**, 1403-1409.
- Dingman, S. L., 1994: *Physical hydrology* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall., 272-324.
- Federer, C. A., C. Vorosmarty, and B. Fekete, 1996: Intercomparison of methods for calculating potential evaporation in regional and global water balance models. *Water Resource Research* **32**, 2315-2321.
- Fisher, J. B., Tu, K. P., and Baldocchi, D. D. 2008: Global

- estimation of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment* **112**, 901-919.
- Heinsch, F. A., M. Reeves, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, 2003: *User's guide*. GPP and NPP (MOD17A2/A3) products, NASA MODIS Land Algorithm 1-57.
- Heinsch, F. A., M. Zhao, S. W. Running, J. Kimball, R. Nemain, and K. Davis, 2006: Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **44**, 1908-1925.
- Hong, J. K., T. J. Choi, and J. Kim, 1997: Evapotranspiration from Plants into the Atmosphere: Micrometeorological Perspectives. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **33**, 569-579.
- Jang, K. C., S. K. Kang, H. W. Kim, and H. J. Kwon, 2009: Evaluation of Shortwave Irradiance and Evapotranspiration Derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**, 233-246.
- Jiang, L., S. Islam, 2001: Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research* **37**, 329-340.
- Kelliher, F.M., R. Leuning, M.R. Raupach, E.-D. Schulze, 1995: Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology* **73**, 1-16.
- Matsumoto, K., T. Ohta, and T. Tanaka, 2005: Dependence of stomatal conductance on leaf chlorophyll concentration and meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 44-57.
- Mu, Q., F. A. Heinsch, M. Zhao, and S. W. Running, 2007: Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* **111**, 519-536.
- Nishida, K., R. R. Nemani, S. W. Running, and J. M. Glassy, 2003a: An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research* **108**, D9, 4270.
- Nishida, K., R. R. Nemani, J. M. Glassy, and S. W. Running, 2003b: Development of an evapotranspiration Index Aqua/MODIS for Monitoring Surface Moisture Status. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* **41**, 493-501.
- Penman, H.L. 1948: Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *proceedings of the Royal Society series A* **193**, 108-120.
- Prata, A. J., 1996: A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **122**, 1127-1151.
- Ryu, Y., S. Kang, S. Moon, and J. Kim, 2008: Evaluation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) derived land surface radiation balance over complex terrain and heterogeneous landscape for clear sky days. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1538-1552.
- Shin, S. C., and T. Y. An, 2007: Development of Estimating Method for Areal Evapotranspiration using Satellite Data. *Korean Journal of Geography Information* **10**, 70-80. (in Korean with English abstract)
- Shuttleworth, W. J., R. J. Gurney, A. Y. Hsu, and J. P. Ormsby, 1989: FIFE: The variation in energy partition at surface flux sites. *Proceedings International Association of Hydrological Sciences, Assembly, Baltimore*, 67-74.
- Sugita, M., and W. Brutsaert, 1991: Daily evaporation over a region from lower boundary-layer profiles measured with radiosondes. *Water Resources Research* **27**, 747-752.
- Venturini, V., S. Islam, and L. Rodriguez, 2008: Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment* **112**, 132-141.
- Zhang, L., and R. Lemeur, 1995: Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **74**, 139-154.