



Assessment of actual evapotranspiration using modified satellite-based priestley-taylor algorithm using MODIS products

Baik, Jongjin^a · Park, Jongmin^b · Choi, Minha^{c*}

^aSchool of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University

^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland

^cDepartment of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

Paper number: 16-065

Received: 19 July 2016; Revised: 17 September 2016 / 20 September 2016; Accepted: 20 September 2016

Abstract

Accurate understanding and estimating Evapotranspiration (ET) is essential for understanding the mechanism of water cycle and water budget. ET has been analyzed by many researchers in worldwide while Ground-based ET has limitation in analyzing the spatio-temporal patterns of ET. Thus, many researches have been conducted to represent the spatio-temporal variation of ET by using hydrometeorological variables estimated from remote sensing datasets. Previous remote sensing based ET algorithms, however, have disadvantage in that various hydrometeorological input datasets were required. In this study, actual ET was estimated by MODIS-based R_N and MS-PT algorithm requiring relatively less input data than previous method. The result confirmed that the observed R_N and latent heat flux from the eddy-covariance based fluxtowers located at CFK and SMK showed high correlation with the estimated R_N and ET. The average determination coefficients (R²) of ET estimated from satellite dataset over study periods were 0.77 (0.72-0.81) in Cheongmi (CFK) and 0.70 (0.67-0.78) in Sulma (SMK), respectively. Comparing with the actual ET of two flux tower sites, however, SMK showed more overestimated patterns than CFK due to the vegetation and radiation related errors.

Keywords: MOderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Actual Evapotranspiration, Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT) algorithm, Satellite, Flux tower

MODIS 위성자료를 이용한 Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT)의 적용 및 실제 증발산 평가

백종진^a · 박종민^b · 최민하^{c*}

^a성균관대학교 건설환경시스템공학과, ^b메릴랜드주립대학교 건설환경공학과, ^c성균관대학교 수자원 전문대학원

요 지

증발산은 물수지 및 수문순환의 체계를 파악하기 위한 중요한 인자로서 이에 대한 정확한 이해 및 산정이 필요하다. 국내외에서 증발산에 대한 많은 연구들이 수행되었으나, 지점자료만을 이용하여 산정한 증발산은 시·공간적인 변동성을 파악하는데 제약이 발생한다. 이에 따라, 물리식을 기반으로 하여 인공위성에서 산정된 수문기상인자를 활용하여 증발산량의 시·공간적인 표현에 대한 연구가 발전하게 되었다. 그러나 기존에 활용되고 있는 방법들은 상대적으로 많은 입력 자료가 요구된다. 본 연구에서는 MOderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 산출물을 이용하여 순복사에너지를 산정하였으며, 기존에 활용된 인공위성 기반 증발산 알고리즘에 비해 상대적으로 적은 입력 자료를 이용하는 Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT) 알고리즘을 적용하여 실제증발산을 산정하였다. 또한, MODIS 산출물로부터 계산된 순복사에너지와 실제증발산의 정확성을 확인하기 위하여, 청미천과 설마천의 플렉스 타워에서 관측된 자료와 비교·검증을 실시하였다. 전반적으로 MODIS 자료를 이용하여 산정된 순복사에너지와 실제증발산 값이 두 플렉스 타워에서 관측된 순복사에너지와 실제증발산이 높은 상관성을 나타

*Corresponding Author.

E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

내는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 전체 모의기간 동안 인공위성 자료를 이용하여 산정된 실제증발산의 평균 결정계수는 청미천에서 0.77 (0.72-0.81), 설마천에서 0.70(0.67-0.78)로 나타났다. 그러나, 청미천에 비해 설마천에서의 실제증발산 값이 과대산정되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 식생에 대한 영향 및 MODIS로부터 산정된 복사에너지에서의 오차로 인해 발생한 것으로 판단된다.

핵심용어: MODIS, 실제증발산, MS-PT algorithm, 인공위성, 플렉스타워

1. 서론

증발산은 수문순환의 현상을 이해하는데 핵심적인 인자 중 하나로서 물수지 분석, 농업용수계획, 지하수함양량의 산정 등에 있어서 중요성이 매우 높다(Rim et al., 2011). 지금까지 증발산을 측정하기 위해 지상 증발접시를 이용하여 증발산량에 대한 측정을 실시하였으나, 증발접시는 개활된 위치에서의 증발산을 관측하기 때문에 외부적인 영향(눈, 비, 바람 등) 및 관리 부족(기기결합, 관측기술 미숙 등)으로 인한 부정확한 측정에 관한 문제들을 가지고 있다(Park and Choi, 2015). 이러한 관측 지점의 문제를 해결하기 위해서, 여러 가지 물리식 또는 경험식 기반 증발산 산정식에 대한 연구가 진행되었다. 증발산에 영향을 미치는 인자들을 이용하여 물리적인 식으로 산정하기 위한 대표적인 방법론으로는 Penman (1948), Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Penman-Monteith (Monteith, 1965) 방법 등이 있다. 이러한 증발산 산정식들은 대부분 태양복사열, 풍속, 온도, 습도와 같은 수문기상인자들의 신뢰할만한 장기간의 기상자료 및 많은 입력자료를 필요로 하였다(Lee and Park, 2008). 그렇지만, 어느 한 국가에 국한된 것이 아닌 대부분의 국가들에서도 관측지점에서 다양한 인자들을 측정하기에는 어려울 뿐만 아니라, 신뢰할 만한 정도의 자료의 양을 수득하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 필요한 기상자료가 미비한 경우에도 증발산을 산정하는 연구가 진행되었다.

적용지역의 기후조건이 습하여, 공기 동역학적 인자에 대한 영향을 무시할 수 있다는 가정을 기반으로 Penman 방법을 단순화한 형태로 변환한 Priestley-Taylor (PT) 방법이 제시되었다. PT 방법은 바람 및 상대 습도 자료가 없이도 증발산에 대해서 산출할 수 있는 장점이 있어 국내·외에서 지점 자료를 기반으로 한 많은 연구에서 적용된바 있다(Rim, 2008; Oh and Lee, 2004). 그러나, 지점을 기준으로 증발산을 산정할 경우에는 복잡한 지형 특성, 토지이용 및 다양한 식생들을 모두 고려하여 증발산의 시·공간적인 값의 대표성을 나타내는데 한계를 가지고 있었다. 이러한 한계는 1970년대 이후 전 지구적인 지표면 정보를 관측할 수 있는 원격탐사 기법의 발전을 통해서 해결할 수 있었다. 전 세계적으로 원격탐사 기법인 인공

위성의 산출물들을 이용한 PT 방법을 적용하는 연구들이 진행되었다(Jacobs et al., 2002; Kim and Hogue, 2008; Lee et al., 2011). 그렇지만, 기본적으로 PT 방법을 통해 산정된 증발산은 특정 작물에 대한 기준이 되는 기준 증발산 및 수표면에서의 증발산을 나타내는 잠재증발산이기 때문에, 실제 증발산이라 간주하기에는 무리가 있었다(Sur et al., 2012). 이에 따라, Fisher et al. (2008)은 기존의 PT 방법을 개선하여 실제 증발산을 산정할 수 있도록 대기 수분 상태를 통해 계산되는 생태생리학적 제약 함수(ecophysiological constraint function)와 식생 지수(vegetation indices)를 추가적으로 고려하여, the Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory (PT-JPL)를 개발하였다. Yao et al. (2013)은 PT-JPL에서 보다 많은 항을 고려하고 개선한 Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT) 알고리즘을 제시하였다. 이 방법들은 PT 방법을 기반으로 실제 증발산을 산정하기 때문에 기존의 방법론에 비해 적은 수문기상인자들이 요구되어, 적은 인공위성 자료들만으로도 실제 증발산을 산정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 목적은 Yao et al. (2013)에 의해 제안된 적은 수문기상인자들이 요구되는 MS-PT 알고리즘을 적용하고 이에 대한 사용가능성에 대해서 검토하고자 하는 것이다. 본 연구는 먼저 에너지 기반의 증발산을 산정하는데 가장 필요한 2011년부터 2013년까지 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 자료들을 이용하여 에너지 수지에서의 순복사에너지(net radiation, R_N)를 산정하고, MS-PT 알고리즘을 토대로 산정된 실제증발산의 정확성을 판별하기 위하여, 청미천과 설마천의 플렉스 타워에서 관측되는 R_N 과 실제증발산 자료와 비교 및 검증을 통해 적합성과 적용가능성을 평가하였다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구 지역

기후변화에 대한 생태계의 변화양상을 파악하기 위한 전구 플렉스 관측망인 Fluxnet에서는 북미, 유럽, 오세아니아, 아시아 지역의 연계하여 생태계의 지속적인 변화를 관측하고

있다. 이러한 추세에 맞추어 우리나라내에서는 KoFlux 네트워크를 구축하여 생태수문학적 인자들의 변동성 및 메커니즘을 이해하는데 도움을 주고 있다(Hong et al., 2009).

본 연구에서 2011~2013년까지 산정된 인공위성 기반의 증발산을 비교 및 검증하기 위해서, 우리나라 영역내에서의 비교 및 검증을 실시 할 수 있는 지점자료들을 파악하였다. Asiaflux website (<http://www.asiaflux.net/>)에서 확인 할 수 있듯이, 우리나라 내에서 지점 관측 자료가 제공가능한 지역은 8지점이며, 그중 본 연구 기간 및 자료의 QC가 잘 이뤄지고 있는 유량조사사업단(<http://www.hsc.re.kr>)에서 관리하는 청미천(Cheongmicheon Farmland Site, CFK), 설마천(KoFlux Seolmacheon site, SMK)을 검증 지점으로 선정하였다(Fig. 1). 유량조사사업단에서는 에디 공분산 기반의 플럭스 타워에서 관측된 자료를 검증 자료로 활용하기 위해서 주파수 차이에 의한 오차 보정, 밀도 보정, 좌표 변환, Spike 제거 등의 품질 관리 과정들을 수행하여 자료의 신뢰성을 향상시켰다(Byun et al., 2012, 2013; Hong et al., 2009; Park et al., 2015). 우리나라는 일반적으로 혼합림과 논지에 대한 영역이 많은 비중을 차지하고 있다. 그렇기 때문에 대부분의 플럭스 타워가 그러한 위치에 설치되어 있다. CFK는 경기도 여주군 점동면 농업기술원 중자관리소 논경지에 위치해 있으며, 토양 특

성은 사양토(sandy loam)과 양토(loam)로 구성되어있다. SMK는 경기도 파주시 적성면 두지리 지점에 위치한 활엽수림과 혼효림이 대부분을 차지하고 있는 혼합림으로 이루어져 있으며, 토양은 대표적으로 사양토(sandy loam)로 구성되어 있다(Baek et al., 2013a, 2013b; Byun et al., 2013). 자세한 연구지역의 지리적 위치는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

2.2 MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

전 세계적으로 수문·기상의 변동성에 대한 관심이 높아지면서, 지구 내에서의 에너지 순환 및 변화에 대한 광범위한 관측 자료를 필요로 하였다. 이에 따라 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서는 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS) 프로젝트의 일환으로 대기, 해양, 육상에 대해서 관측할 수 있는 MODIS 센서를 탑재한 Terra (EOS AM-1, 1999년)/Aqua (EOS PM-1, 2002년) 위성을 발사하였다. MODIS는 초분광센서(hyperspectral sensor)로 0.4~14.4 μm 파장에서 대상체로부터 반사되는 연속적인 수십개의 분광 파장을 관측할 수 있는 36개 밴드를 탑재하고 있으며, 관측되는 공간해상도(spatial resolution)는 250 m (band 1-2), 500 m (band 3-7) 및 1 km (band 8-36)를 가지고 있다.

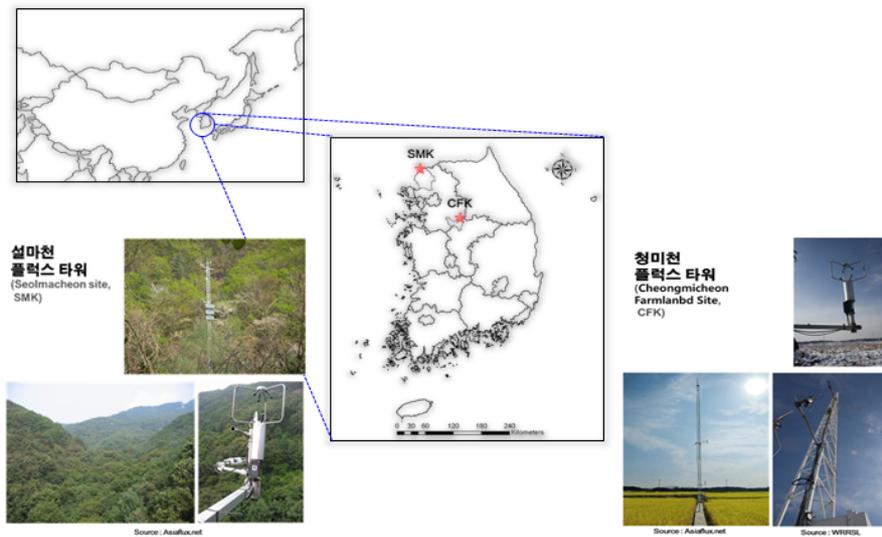


Fig. 1. Geographic location of study sites in the Korean peninsula

Table 1. Characteristics of flux tower site in this study (www.hsc.re.kr)

Site information						
Site	Lat.	Long.	Elev. (m)	Type of Vegetation	Terrain	Period
CFK	37 ° 9' 35" N	127 ° 39' 10" E	141 m	Rice paddy	Plain	2008. 10. - Present
SMK	37 ° 56' 19.99" N	126 ° 57' 16.94" E	293 m	Mixed forest	Mountain area	2007. 10. - Present

고해상도 극궤도 관측 위성인 Terra와 Aqua는 각각 오전 10시 30분과 오후 1시 30분에 지구 표면의 수문기상학적인 변동성을 관측할 수 있다(Baik and Choi, 2015a, 2015b). 이렇게 관측되는 자료들은 NASA에서 다양한 알고리즘을 통하여 여러 가지 산출물들을 제공하고 있다(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

본 연구에서 R_N 및 MS-PT 알고리즘을 이용한 실제증발산을 산정하기 위해서 2011~2013년의 MODIS 자료를 활용하였다. 증발산 산정에 필요한 MODIS product는 크게 대기/기상 인자(MOD07)와 지표인자(MOD11, 13, 15, 43)로 나눌 수 있다. 사용되는 MODIS 산출물에 대한 자세한 설명은 Table 2에 나타내었다.

3. 연구방법

3.1 MODIS product를 활용한 순복사에너지(Net radiation, R_N)의 산정

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 에너지 순환에서 R_N 는 태양으로부터 지구권으로 유입되는 에너지로 설명되며, 장파복사와 단파 복사간의 유입과 유출되는 차이에 의해서 결정된다

(Allen et al., 2007). 이러한 R_N 의 이해는 수문·수자원분야 뿐만 아니라, 기상, 해양, 농업 등에서도 매우 중요한 역할을 하고 있다(Bisht et al., 2005).

$$R_N = (1 - \alpha) R_{sd} + R_{ld} - R_{lu} \tag{1}$$

Eq. (1)에서 R_N 은 순복사에너지(W/m^2), α 는 알베도(unitless), R_{sd} 는 유입 단파 복사 에너지(W/m^2), R_{ld} 는 유입 장파 복사 에너지(W/m^2), R_{lu} 는 유출 장파 복사 에너지(W/m^2)이다. Eq. (1)에서 설명된 R_N 은 MODIS 산출물에서 수문기상인자들을 추출하여 알베도, 유출 단파 복사 에너지, 유출 장파 복사 에너지, 유입 장파 복사 에너지를 계산하여 산정할 수 있다. 본 연구에서 R_N 산정을 위한 R_{ld} , R_{sd} , R_{lu} 인자를 산출하는 방법은 Baik and Choi (2015a, 2015b)와 Hwang et al. (2013)에서와 동일하게 진행하였으며, 자세한 설명은 참고문헌들을 통해 확인할 수 있다.

일반적으로 MODIS 위성 자료는 특정지역을 순간적으로 몇 회밖에 관측할 수밖에 없는 실정이다. 그러나, 농업, 수자원 등의 다양한 분야에서는 연속적인 변동성 또는 일·년단위의

Table 2. Characteristic of MODIS products used for estimating actual evapotranspiration in this study (Baik and Choi, 2015b)

Primary Use	Product ID	Data Properties	Spatial resolution (km)	Temporal resolution
Atmosphere	MOD07	Atmospheric Profiles	5	3-7 dataset for a day
Land	MOD11	Land Surface Temperature and Emissivity	1	Daily
	MOD13	Vegetation Indices (VI)		16 day
	MOD15	Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)		8 day
	MCD43	Surface Reflectance Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Albedo Parameter		

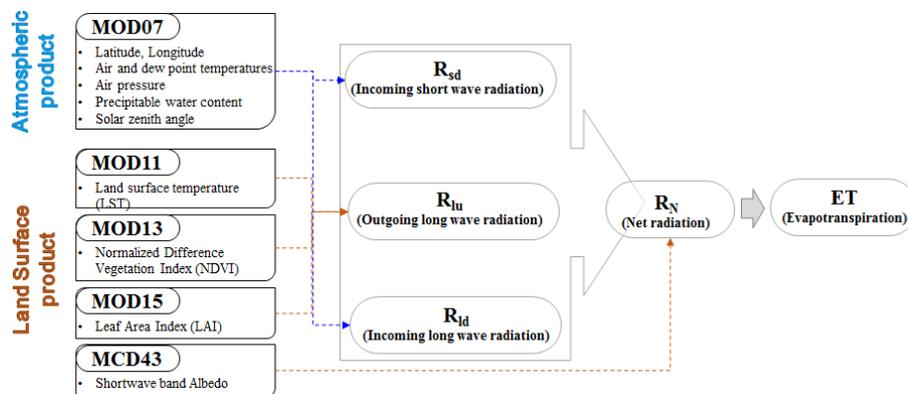


Fig. 2. Conceptual diagram for estimating evapotranspiration using MODIS product

변동성을 가지는 자료를 필요로 한다(Bisht et al., 2005; Bisht and Bras, 2010). 이러한 문제를 해결하기 위해 Bisht et al. (2005)는 순간적인 값을 이용하여 일단위의 변화량으로 추정하기 위해서 sinusoidal model 제안하였다. 본 연구에서는 일단위의 R_N 및 실제증발산을 산정하기 위해 Bisht et al. (2005)가 제안한 sinusoidal model을 사용하였다(Eq. (2)).

$$R_{N^{avg}} = \frac{2R_{INR}}{\pi \sin \left[\left(\frac{t - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}} \right) \pi \right]} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 $R_{N^{avg}}$ 는 sinusoidal model을 이용한 일평균 R_N 이고, R_{INR} 는 정오에 관측된 최대 R_N 이며, t_{rise} 와 t_{set} 은 각 지역에 대한 일출과 일몰시간을 나타낸다. 자세한 내용은 Bisht et al. (2005)와 Bisht and Bras (2010)을 통해서 확인할 수 있다.

3.2 Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT) algorithm

본 연구에서는 MODIS 산출물을 Yao et al. (2013, 2014)에서 제안된 MS-PT 알고리즘에 적용하여 실제증발산 산정에 대한 연구를 실시하였다. Fig. 3는 MS-PT 알고리즘의 실제증발산을 산정하는 방법에 대한 개념도를 보여주며, 총 4개의 항인 Soil Surface Evaporation (LE_s), Vegetation Transpiration (LE_c), Vegetation interception Evaporation (LE_{ws}), Wet Soil Surface Evaporation (LE_{ic})의 합을 통해 산정할 수 있다.

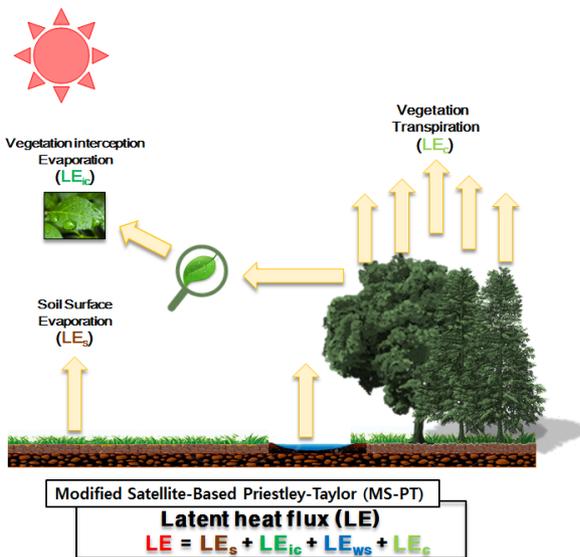


Fig. 3. Conceptual diagram of the MS-PT algorithm (Yao et al., 2014)

$$LE = LE_s + LE_c + LE_{ic} + LE_{ws} \quad (3)$$

LE_s 는 index of soil water deficit(f_{sm})에 의해 계산된다. f_{sm} 는 Apparent Thermal inertia (ATI)의 경험적인 알고리즘으로 산정할 수 있다(Fisher et al., 2008; Yao et al., 2013). 이에 관한 식은 아래와 같다.

$$LE_s = \alpha(1 - f_{wet})f_{sm} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_{NS} - G) \quad (4)$$

$$f_{sm} = \left(\frac{1}{DT} \right) \frac{DT}{DT_{max}} \quad (5)$$

$$f_{wet} = f_{sm}^4 \quad (6)$$

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (7)$$

여기서, R_{NS} 는 R_N 와 vegetation cover fraction (f_c)를 이용해서 산정되며($R_{ns} = R_N(1 - f_c)$), G 는 토양열 플럭스(Ground Heat Flux)로 R_N 과 f_c 를 통해서 산정할 수 있다($a_g(1 - f_c)R_N$, $a_g = 0.18$). DT_{max} 는 maximum diurnal air temperature range ($DT_{max} = 40^\circ\text{C}$)이고, Eq. (7)에서 $NDVI_{max}$ 와 $NDVI_{min}$ 는 0.95와 0.05로 지정되었다.

LE_c 는 modified Linear Two-Source Model (N95)을 사용하여 산정할 수 있다(Norman et al., 1995; Anderson et al., 1997; Fisher et al., 2008).

$$LE_c = \alpha(1 - f_{wet})f_T f_c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{NC} \quad (8)$$

$$f_T = \exp\left(-\left(\frac{T_a - T_{opt}}{T_{opt}}\right)^2\right) \quad (9)$$

여기서, f_T 는 plant temperature constraint이며 대기온도(air temperature, T_a)와 optimum temperature for plant growth (T_{opt})에 의해서 계산된다($T_{opt} = 25^\circ\text{C}$). R_{NC} 는 지표면 식생에서의 R_N 로 R_N 와 f_c 를 이용하여 산정할 수 있다($R_{NC} = R_N f_c$).

LE_{ws} 와 LE_{ic} 는 아래의 Eq. (10)과 Eq. (11)을 통해서 산정할 수 있다.

$$LE_{ws} = \alpha f_{wet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_{NS} - G) \quad (10)$$

$$LE_{ic} = \alpha f_{wet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{NC} \quad (11)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 인공위성을 이용한 일단위 순복사에너지의 평가

MODIS 산출물을 기반으로 장·단파복사량을 산정하여 Eq. (1)에 적용하면, MODIS 기반의 R_N 값을 산정할 수 있다. 이렇게 산정된 R_N 은 인공위성의 관측시간에 의해서 산정되는 순간적(instantaneous) R_N 으로 산정되기 때문에, sinusoidal model에 적용하여 일평균의 R_N 값으로 변환하였다(Bisht *et*

al., 2005). 이렇게 산정된 일평균 R_N 에 대한 검증하기 위하여, CFK와 SMK의 일평균 R_N 자료와 비교 및 검토를 실시하였다. Fig. 4는 두 플럭스 타워 지점에서의 결과를 시계열과 산포도를 나타내었다. Fig. 4에서 산포도를 통해 확인할 수 있듯이, 두 지점(CFK, SMK)에서 인공위성으로 산정된 R_N 의 값이 전반적으로 약간 과대산정되는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으나, 산포도에서 밀집되는 패턴을 나타내었다. 두 지점에서의 연구기간(2011~2013년)동안 R_N 의 시계열을 확인하였을 때, 위에서 언급된 것과 같이 과대산정되는 패턴이 보이는 하나, 두 자료의 경향성은 유사한 패턴으로 모의되는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 CFK와 SMK의 통계학적 결과를 보여준다. CFK의 결과를 확인하면, 3년간의 평균 R^2 값이 0.68 (0.61~0.76)의 높은 상관성을 나타내었으며, Bias는 46.90 W/m²

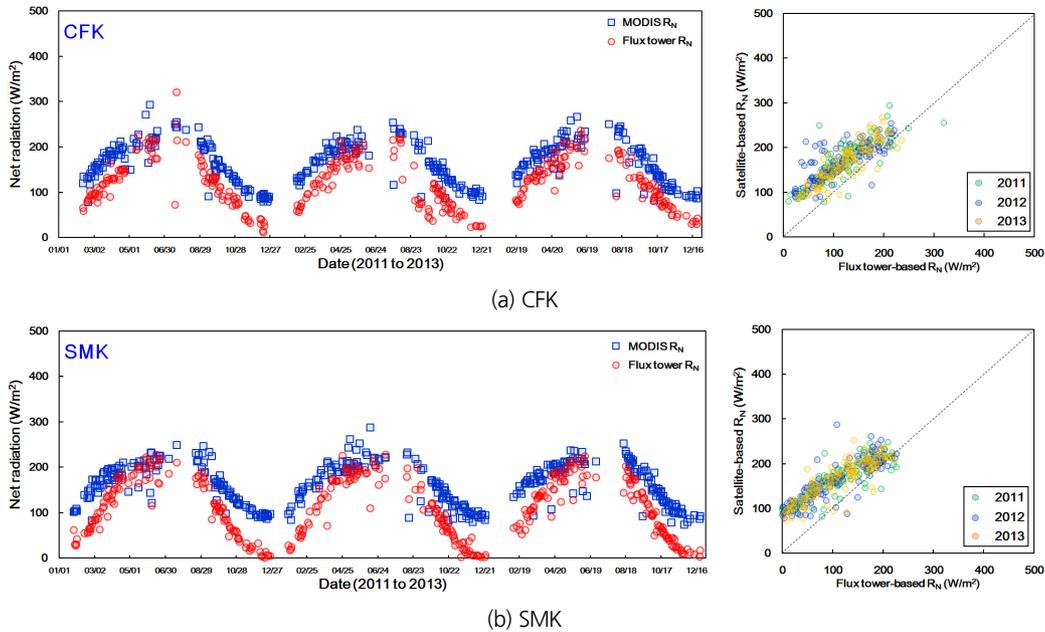


Fig. 4. Time series and scatter plots of Daily R_N at the a) CFK and b) SMK during 2011 to 2013

Table 3. Statistical results of measured R_N and R_N estimated from MODIS products for the two flux towers

Site	Year	Bias (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	Regression slope	Intercept	R ²
CFK	2011	46.27	55.18	0.70	85.52	0.71
	2012	52.49	63.14	0.58	100.39	0.61
	2013	42.17	48.63	0.79	68.27	0.76
	Mean	46.90	55.88	0.68	85.40	0.68
SMK	2011	52.69	62.60	0.59	97.44	0.78
	2012	55.01	65.13	0.63	92.90	0.76
	2013	51.06	60.44	0.61	95.39	0.75
	Mean	52.90	62.72	0.61	95.16	0.76

(42.17~52.49 W/m²), RMSE는 55.88 W/m² (48.63~63.14 W/m²)의 결과를 나타내었다. SMK를 확인하면, 평균 R값이 0.76 (0.75~0.78)의 높은 상관성을 나타내었으며, Bias는 52.90 W/m² (51.06~55.01 W/m²), RMSE는 62.72 W/m² (60.44~65.13 W/m²)의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 선행연구들을 통해서도 확인할 수 있다. Kim and Hogue (2008)에서 MODIS 자료를 이용하여 2001년도부터 2004년간의 잠재증발산을 산정하기 위해서 일평균의 R_N 값을 산정하였으며, Ameriflux에 속한 4개의 지점과 비교·검증하였다. 이 논문의 통계학적 결과를 확인하면, 평균 Bias는 27.2 W/m² (-39.3 ~ 93.8 W/m²), 평균 RMSE는 83.0 W/m² (61.7~104 W/m²), R²는 0.78 (0.74~0.93)의 결과를 나타내었다. Hou et al. (2014)에서도 동일한 방법을 통해서 일평균 R_N에 대해서 두 관측 지점인 TYC와 TYG에서 비교한 결과, Bias는 각각 31 W/m²와 33 W/m²로 나타났으며, RMSE는 37 W/m²과 40 W/m²로 확인되었다. 전반적으로 MODIS를 이용한 일평균의 R_N 값을 산정한 선행연구들과 비교하면, 양적인 측면에서의 오차는 본 연구결과와 비슷하게 나타났으며, 이는 본 연구에서의 결과가 유의하다는 것을 확인할 수 있었다※ 기존 결과와 비스

하게 나타났다는 것은 본 연구 방법의 기존의 방법을 향상시키지는 않는 것이라는 의미로 판단됨. 기존 연구 방법과 본 연구의 유사점과 차이점을 제시하고 본 연구의 우수성을 설명할 필요가 있음).

4.2 인공위성기반 실제증발산의 검증을 위한 지점 자료와의 비교

위에서 산정된 R_N를 MS-PT 알고리즘에 적용하여 2011년부터 2013년까지의 실제증발산을 산정하였다. 플럭스 타워와 MS-PT의 실제증발산에 대한 시계열과 산포도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, 일평균 R_N에서의 결과와 비슷하게 시계열 및 산포도의 결과도 비슷한 경향을 보이며, 또한, 실제증발산이 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)의 경향을 따르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 선행연구에서도 언급되어있는 것처럼 식생과 실제 증발산의 연관성이 높다는 것을 단편적으로 보여준다(Shin, 1996; Shin et al., 2010).

Table 4에 나타난 통계학적 결과를 확인하면, CFK에서 2012년을 제외하면, 약간 과대산정되는 결과를 확인할 수 있

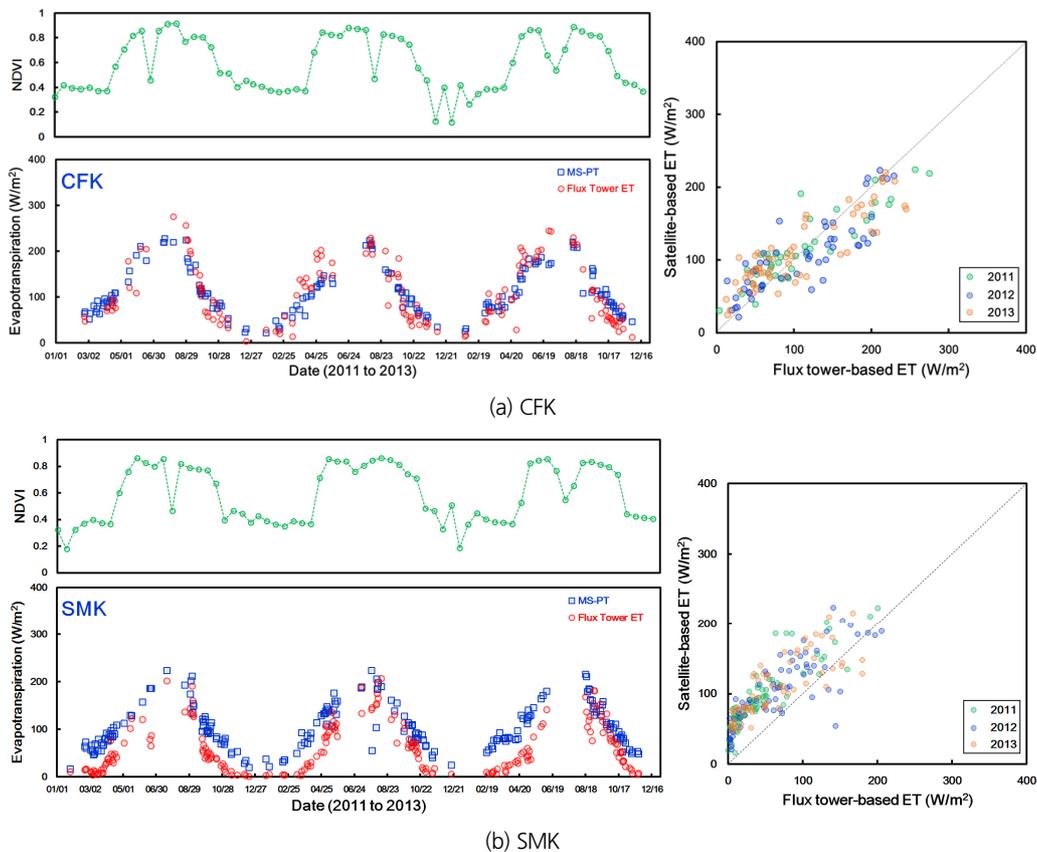


Fig. 5. Time series and scatter plots of Daily Actual Evapotranspiration at the a) CFK and b) SMK during 2011 to 2013

Table 4. Comparison between flux tower and satellite based Actual Evapotranspiration on daily time scale

Site	Year	Bias (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	Regression slope	Intercept	R ²
CFK	2011	4.83	31.13	0.66	43.30	0.81
	2012	-3.46	34.94	0.67	33.22	0.72
	2013	6.53	34.94	0.63	45.91	0.77
	All period	2.61	33.97	0.65	41.04	0.77
SMK	2011	47.74	52.90	0.86	54.38	0.78
	2012	36.13	47.98	0.74	54.87	0.67
	2013	44.75	53.67	0.69	64.80	0.65
	All period	42.93	51.58	0.75	58.10	0.70

으며, SMK의 경우에도 전반적으로 과대산정되는 결과를 보였다. CFK의 경우에는 평균 RMSE가 33.97 W/m² (31.13~34.94 W/m²), 평균 Bias는 2.61 W/m² (-3.46~6.53 W/m²)의 오차를 나타내었고, SMK에서는 평균 RMSE가 51.58 W/m² (47.98~53.67 W/m²), 평균 Bias는 42.93 W/m² (36.13~47.74 W/m²)의 결과를 나타내었다. 두 자료간의 상관성을 나타내는 R²은 CFK와 SMK에서 각각 0.77 (0.72~0.81)와 0.70 (0.65~0.78)의 결과를 나타냈다. MS-PT 알고리즘을 적용한 선행연구들과 본 연구에서의 결과를 비교하여 보면, 전반적으로 유의한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Yao et al. (2013)에서 MS-PT 알고리즘을 통해 산정된 증발산과 17개의 플럭스 타워 기반 증발산과 비교하였을 때, 통계학적인 결과는 Bias가 -29.5 W/m²에서 12.3 W/m²의 범주를 나타내었으며, RMSE는 5.9 W/m²에서 33.4 W/m²의 범주를 나타내었다. 또한, Yao et al. (2014)에서는 16개의 플럭스 타워 관측지점과의 비교를 실시하였다. 이 논문에서의 통계학적인 결과는 Bias가 -14.8 W/m²에서 46.3 W/m²의 범주로 나타났으며, RMSE는 26.8 W/m²에서 60.2 W/m²의 오차범주를 나타내었다. Sur et al. (2012)에서 MODIS 자료를 사용하여 revised remote sensing based penman-monteith (RS-PM) 방법에 적용하여 2010년 기간동안 청미천과 설마천에 대하여 비교를 하였다. 관측 지점과 비교한 통계 결과는 다음과 같이 산정되었다. R 값은 CFK에서 0.65, SMK에서 0.49로 나타났으며, RMSE (Bias)는 CFK에서 155.10 W/m² (-125.36 W/m²), SMK에서는 148.25 W/m² (70.67 W/m²)으로 산정되었다. Lee et al. (2016)에서 2012~2013년까지의 MODIS 자료로 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 모델을 이용하여 설마천과 청미천에 대해서 비교하였다. 이 논문의 결과를 확인하면, 두지점에서의 평균 R²은 0.79 (CFK), 0.54 (SMK)로 산정되었으며, 평균 RMSE은 18.49 W/m² (CFK), 18.21 W/m² (SMK)로 나타났다. 이러한 결과들을 확

인하였을 때, 기존에 많은 입력자료를 요구하는 다양한 방법에 비해 적은 양의 자료를 사용하면서, 다양한 항(Multiple terms)을 고려하는 MS-PT 방법이 보다 정확한 실제증발산을 산정할 수 있음을 확인할 수 있다. 전반적으로, 두 관측지점에서의 결과를 비교해 보면, SMK의 결과보다 CFK에서의 결과가 보다 좋은 것을 파악할 수 있다. 이러한 이유는 선행연구들을 통해서 확인할 수 있다. Baik and Choi (2015a, 2015b)에 의하면 SMK에서의 과대 산정되는 이유가 인공위성으로 산정된 식생인자의 과대산정에 의한 영향으로 인해 이러한 오차가 발생하는 것으로 보인다고 시사하였다. Sur et al. (2012)에서 SMK 관측지점이 지형학적인 요소 등에 의해 실제 관측값의 관측오차가 나타날 수도 있음을 시사하였다. 지점 자료와 인공위성 자료와의 오차 발생의 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. 실제적으로 인공위성 자료는 한 지점의 정량적인 값을 대표하기보다는 그 지점을 포함한 pixel에서의 공간적인 값을 대표하게 된다. 즉, 공간 불일치(spatial mismatch)에 의해서 오차가 발생하게 된다(Baik and Choi, 2015a). Jeong et al. (2009)에 의하면 MODIS 기상자료 및 복사에너지의 오차로 인한 실제증발산 값의 오차가 발생한 것이라고 언급하였다. 종합적인 결과들을 종합하면, MODIS 산출물을 기반으로 MS-PT 알고리즘을 적용한 증발산 값이 우리나라 내에서의 증발산의 시·공간적 변동성을 모의하는데 유용한 것으로 확인된다.

5. 요약 및 결론

증발산은 수문순환을 구성하는 주요한 인자로 식생의 일차 생산량, 수자원 관리계획, 지표와 대기간의 에너지 교환 등에 많은 영향을 미친다. 증발산이 많은 분야에서 큰 영향력을 가짐으로서 증발산의 시·공간적인 변동성에 대한 중요성이 높아졌으며, 인공위성을 이용한 증발산 산정에 대한 관심이

높아지게 되었다. 특히, 다양한 지표, 대기의 변동성을 파악할 수 있는 MODIS 자료를 이용하여 증발산의 공간적인 변동성을 파악 및 모니터링이 가능하다는 연구가 전 세계적으로 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 인공위성 MODIS 자료만을 이용하여 우리나라 내에서의 2011년부터 2013년까지의 R_N 와 실제증발산을 산정하여 이를 CFK과 SMK에서 관측된 자료들과 비교·검증을 실시하였다. 먼저, R_N 에 대한 결과를 확인하면, CFK와 SMK에서의 시계열의 경향성이 플러스 타워에서 관측된 R_N 과 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 통계학적 결과 또한 유의한 것으로 나타났다. 산정된 R_N 을 MS-PT 알고리즘에 적용하여 일평균 실제증발산을 산정한 결과, 두 플러스 타워에서 비교한 결과 앞서 산정한 R_N 의 경향성과 같이 실제 증발산의 시계열 경향 또한 관측지점과 유사한 경향을 나타났음을 확인할 수 있었다. CFK와 SMK 지점에서의 결과를 비교하였을 때, 전반적으로 CFK에서 비해 SMK에서 실제 증발산량이 과대산정 되었다. 이러한 결과는 기존의 연구들에서 확인된 바와 같이 SMK에서의 식생인자의 영향으로 인해 발생한 것으로 확인된다. 본 연구를 통해 국내외에서 많이 사용되어온 MODIS 위성자료는 수문기상학적인 변동성을 파악하는데 주요한 역할을 하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 적용한 MS-PT 알고리즘의 우리나라에서의 적용성을 파악할 수 있었다. 기존에 많은 입력자료를 필요로 하는 인공위성 증발산 방법에 비해 MS-PT 알고리즘은 적은 입력자료로도 높은 정확성을 나타내었으며, 증발산을 여러 부분으로 구분하여 산정할 수 있어 식생/지표면에서의 영향을 고려할 수 있을 것이다. 후속연구에는 다양한 식생 피복에서의 검증과 더불어 MS-PT 알고리즘의 개선 및 수정이 필요한 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(16AWMP-B079625-03)에 의해 수행되었습니다. 청미천과 설마천의 flux tower 자료를 제공해주신 유량조사사업단 및 국토교통부 관계자분들께 감사를 전합니다.

References

- Allen, R. G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007). "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model." *J Irrig Drain Eng ASCE*, Vol. 133, No. 4, pp. 380-394.
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., and Mecikalski, J. R. (1997). "A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing." *Remote Sensing Environmental*, Vol. 60, pp. 195-216.
- Baek, J. J., Byun, K., Kim, D., and Choi, M. (2013a). "Assessment of solar insolation from COMS: Sulma and Cheongmi watersheds." *Korean J. Remote Sens.* Vol. 29, pp. 137-149.
- Baek, J., Sur, C., and Choi, M. (2013b). "Assessment of outgoing longwave radiation using COMS : Cheongmi and sulma catchments." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 465-476.
- Baik, J., and Choi, M. (2015a). "Evaluation of geostationary satellite (COMS) based Priestley-Taylor evapotranspiration." *Agricultural Water Management*, Vol. 159, pp. 77-91.
- Baik, J., and Choi, M. (2015b). "Evaluation of remotely sensed actual evapotranspiration products from COMS and MODIS at two different flux tower sites in Korea." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 1, pp. 375-402.
- Bisht, G., and Bras, R. L. (2010). "Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern great plains case study." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 7, pp. 1522-1534.
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., and Jiang, L. E. (2005). "Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 1, pp. 52-67.
- Byun, K., Shin, J., Lee, Y. K., and Choi, M. (2012). "Validation of net radiation measured from fluxtower based on eddy covariance method: Case study in seolmacheon and cheongmicheon watersheds." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 111-122.
- Byun, K., Liaqat, U. W., and Choi, M. (2013). "Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo- and heterogeneous land surface conditions." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 197, pp. 169-187.
- Fisher, J. B., Tu, K. P., and Baldocchi, D. D. (2008). "Global estimates of the land atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites." *Remote Sensing Environmental*, Vol. 112, pp. 901-919.
- Hargreaves, G., Hargreaves, G., and Riley, J. (1985). "Agricultural benefits for senegal river basin." *J. Irrig. Drain. Eng.* Vol. 111, pp. 113-124.
- 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. 11, No. 1, pp. 19-26.
- Hou, J., Jia, G., Zhao, T., Wang, H., and Tang, B. (2014). "Satellite-based estimation of daily average net radiation under clear-sky conditions." *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 31, pp. 705-720.
- Hwang, K., Choi, M., Lee, S. O. and Seo, J.-W. (2013). "Estimation of instantaneous and daily net radiation from MODIS data

- under clear sky conditions: A case study in east Asia.” *Irrigation Science*, Vol. 31, No. 5, pp. 1173-1184.
- Jacobs, J. M., Myers, D. A., Anderson, M. C., and Diak, G. R. (2002). “GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration.” *J. Hydrol*, Vol. 266, pp. 53-65.
- Jeong, S. T., Jang, K. C., Kang, S. K., Kim, J., Kondo, H., Gamo, M., Asanuma, J., Saigusa, N., Wang, S., and Han, S. (2009). “Valuation of MODIS-derived evapotranspiration at the flux tower sites in east Asia.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 174-184.
- Kim, J., and Hogue, T. S. (2008). “Evaluation of a MODIS-based potential evapotranspiration product at the point scale.” *J. Hydrometeorol*, Vol. 9, pp. 444-460.
- Lee, K. H., and Park, J. H. (2008). “Calibration of the hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 6, pp. 675-681.
- Lee, M. J., Han, K. S., and Kim, I. H. (2011). “Estimation of actual evapotranspiration using multi-satellite data over Korea Peninsula.” *The Korean Society For Geospatial Information System*, Vol. 19, No. 4, pp. 145-151.
- Lee, Y. G., Jung, C. G., Ahn, S. R., and Kim, S. J. (2016). “Estimation of spatial evapotranspiration using Terra MODIS satellite image and SEBAL model in mixed forest and rice paddy area.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 227-239.
- Monteith, J. L. (1965). “Evaporation and the environment.” *Symp. Soc. Explor. Biol.* Vol. 19, pp. 205-234.
- Norman, J. M., Kustas, W. P., and Humes, K. S. (1995). “A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature.” *Agric. For. Meteorol*, Vol. 77, pp. 263-293.
- Oh, N. S., and Lee, K. H. (2004). “Calculation of evapotranspiration based on daily temperature.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 6, pp. 479-485.
- Park, J., Byun, K., Choi, M., Jang, E., Lee, J., Lee, Y., and Jung S. (2015). “Evaluation of statistical gap fillings for continuous energy flux (evapotranspiration) measurements for two different land cover types.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 29, No. 8, pp. 2021-2035.
- Park, J., and Choi, M. (2015). “Estimation of evapotranspiration from ground-based meteorological data and global land data assimilation system (GLDAS).” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 29, No. 8, pp. 1963-1992.
- Penman, H. L. (1948). “Natural evaporation from open water, bare soil and grass.” *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Sci.* Vol. 193, pp. 120-145.
- Rim, C. S. (2008). “Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 212-228.
- Rim, C. S., Lim, G. H., and Yoon, S. E. (2011). “A study on the hydroclimatic effects on the estimation of annual actual evapotranspiration using watershed water balance.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 915-928.
- Shin, H. J., Ha, R., Park, M. J., and Kim, S. J. (2010). “Estimation of spatial evapotranspiration using the relationship between MODIS NDVI and Morton ET - For Chungjudam Watershed -.” *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 19-24.
- Shin, S. C. (1996). “Estimation method of evapotranspiration through vegetation monitoring over wide area.” *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 14, No. 1, pp. 81-88.
- Sur, C. Y., Lee, J. J., Park, J. Y., and Choi, M. (2012). “Spatial estimation of priestley-taylor based potential evapotranspiration using MODIS imageries: The nak-dong river basin.” *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 5, pp. 521-529.
- Yao, Y., Liang, S., Cheng, J., Liu, S., Fisher, J. B., Zhang, X., Jia, K., Zhao, X., Qin, Q., Zhao, B., Han, S., Zhou, G., Zhou, G., Li, T., and Zhao, S. (2013). “MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 171-172, pp. 187-202, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.016>.
- Yao, Y., Liang, S., Zhao, S., Zhang, Y., Qin, Q., Cheng, J., Jia, K., Xie, X., Zhang, N., and Liu, M. (2014). “Validation and application of the modified satellite-based priestley-taylor algorithm for mapping terrestrial evapotranspiration.” *Remote Sensing*. Vol. 6, pp. 880-904.