



Merging technique for evapotranspiration based on in-situ, satellite, and reanalysis data using modified KGE fusion method

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

^aPh.D, Center for Built Environment, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^cPh.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, USA

^dProfessor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 18-090

Received: 8 October 2018; Revised: 26 November 2018 / 4 December 2018; Accepted: 4 December 2018

Abstract

The modified Kling-Gupta efficiency fusion method to merge actual evapotranspiration was proposed and compared with the simple Taylor skill's score method using Global Land Data Assimilation System (GLDAS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16), and the flux tower on three different land cover types over the Korean peninsula and China. In the results of the weights estimated from two actual evapotranspiration merging techniques (i.e., STS and KGF), the weights of reanalysis data (i.e., GLDAS and GLEAM) in cropland and grassland showed similar performance, while the results of weights are different according to the merging techniques in forest. Both two merging techniques showed better results than original dataset in grassland and forest. However, there were no improvement in cropland compared to the other land cover types. The results of the KGF method slightly improved compared to those of the STS in grassland and forest.

Keywords: Evapotranspiration, Satellite, Flux tower, Merging technique, Reanalysis dataset

수정된 KGE 방법을 활용한 지점, 인공위성, 재분석 자료 기반 증발산 융합 기술

백종진^a · 정재환^b · 박종민^c · 최민하^{d*}

^a성균관대학교 건설환경연구소 박사후연구원, ^b성균관대학교 수자원전문대학원 박사과정, ^c메릴랜드대학교 건설환경공학과 박사과정,

^d건성균관대학교 수자원전문대학원 교수

요 지

실제증발산 자료를 융합하기 위한 Modified Kling-Gupta efficiency Fusion (KGF) 방법을 제시하였고, 인공위성 및 재분석 증발산 자료인 Global Land Data Assimilation System (GLDAS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)를 활용하여 Simple Taylor skill's Score (STS)와 비교하였다. 한반도와 중국의 세가지 land cover type(i.e., cropland, grassland, forest)을 가진 flux tower에서 비교 검증을 실시하였다. 실제증발산의 융합 방법인 STS와 KGF로 계산된 가중치의 결과를 확인하면, cropland와 grassland에서 재분석 자료(GLDAS, GLEAM)가 높은 가중치 영향을 나타내지만, forest에서 융합 방법에 따라 가중치 영향이 다르게 나타났다. 전반적으로 실제증발산 융합 방법 적용 결과의 비교에서는 cropland에서는 융합에 사용된 자료에 비하여 높은 개선이 이뤄지지 않았지만, grassland와 forest에서는 개선이 이뤄졌다. 두 방법 중 KGF의 결과가 STS의 결과에 비하여 약간 개선되는 결과를 나타내었다.

핵심용어: 증발산, 인공위성, 플럭스타워, 융합방법, 재분석자료

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7539

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

1. 서론

증발산은 체감하기는 어려우나, 물 순환의 측면에서 보았을 때 강우량의 약 60~70%를 차지하고 있는 매우 중요한 인자이다. 따라서 정확하지 않은 증발산량 추정 은 물 순환을 파악하는 데 있어서 큰 불확실성을 가져오게 되므로, 정확한 증발산량을 산정하는 것이 중요하다(Seo *et al.*, 2017).

증발산량을 측정하기 위한 대표적인 방법으로는 지점에서 물의 증발량을 직접 측정하는 Pan증발량, 단순 가정 및 경험식, 물리식 등이 있으며, 증발량을 측정 및 추정함으로써 특정 지점에서의 증발량을 규명하고자 하였다(Lee *et al.*, 2011). 기후변화에 대한 문제가 잦아짐에 따라, 이에 대응하기 위해 시간적, 공간적으로 광범위한 정보가 요구 되었으나, 지점 기반의 자료들을 활용한 방법은 너무 많은 지점을 요구하거나, 공간적 대표성을 띄기가 어려워 실질적으로 활용되기에는 많은 한계가 있었다(Shin and An 2007). 이러한 문제는 인공위성과 같은 원격탐사 기법을 통한 자료를 활용함으로써 지점 관측의 한계인 공간적 자료의 질적 불균형에 대한 대안이 될 수는 있으나, 원격탐사 자료의 자료는 간접적인 방법(전자기 에너지, 반사에너지)로 인하여 측정된 것이기 때문에 정확성에 대한 한계를 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제점을 극복하고자, 인공위성, 지점, 모델 자료들을 다각적으로 활용하여 통합함으로써 보다 양질의 수문기상인자들을 산출하고자 하는 노력이 이루어지고 있다 (Jeong *et al.*, 2018; Baik *et al.*, 2018a; Khan *et al.*, 2018).

일반적으로 수문기상인자들은 나라, 지역, 식생 등에 따른 특성에 의한 영향을 크게 받으므로 인공위성, 지점, 모델 등 관측기반이 다른 생산물(Product)들의 정확도가 다르게 나타나게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 다양한 방법을 통해 수문기상인자를 최적화하는 연구가 진행되고 있다. 예를 들어, 강우(conditional merging, Ehret, 2003; Baik *et al.*, 2016, geographical differential and ratio analysis, Cheema and Bastiaanssen, 2012; Duan and Bastiaanssen, 2013; Baik *et al.*, 2016), 토양수분(least squares merging, Yilmaz *et al.*, 2012, Maximize R, Kim *et al.*, 2015; 2018; Baik *et al.*, 2018a), 증발산(Taylor skill score, Yao *et al.*, 2017, Kalman filter algorithm, Liu *et al.*, 2013, Bayesian averaging model, Vinukollu *et al.*, 2011; Mueller *et al.*, 2011)에서 다양한 방법론을 활용하여 최적화 연구가 진행되어왔다.

본 연구에서는 증발산 자료의 융합 방법을 다루었으며, 최근 Yao *et al.* (2017)에서 제안된 Simple Taylor skill's Score (STS)를 이용하여 융합한 증발산 자료와 비교하여 modified

Kling-Gupta efficiency (KGE)를 기반으로 융합하는 방법인 KGE Fusion (KGF) 방법을 제안하고자 하였다. 두 가지 방법을 통해 융합된 증발산을 비교함으로써 기존 STS방법과 KGF 방법 간의 차이를 확인해보고, 융합 방법의 적절성에 대해서 평가해보고자 하였다. 인공위성 자료인 MOD16, 재분석 자료인 GLDAS, GLEAM 자료들을 한반도와 중국의 7개 flux tower 지점에서 세 가지의 land cover type에 따라 비교 및 검증 을 실시하였다. 다음으로 융합 방법을 적용하기 전에 각각의 방법에서 계산되는 융합 가중치에 대한 결과를 나타내었으며, 최종적으로 KGF와 STS 방법의 산정된 결과에 대한 비교 및 분석을 실시하였다.

2. 연구지역 및 데이터

2.1 연구지역

본 연구에서 각 토지피복의 차이에 따른 융합방법을 적용한 실제증발산의 결과의 차이를 확인하기 위하여, 중국과 한국에서 이용 가능한 플럭스타워(flux tower) 지점을 파악하였다. 동북아시아 영역에서 주요 토지피복에 해당하는 농경지(cropland), 초지(grassland), 산림지(forest)를 기준으로 구분하였으며, 최소 3년 이상이 실제증발산이 연속적으로 관측되는 지점만을 선별하였다(Fig.1 and Table 1). 한반도에서는 한국수자원조사기술원(Korea Institute of Hydrological Survey, KIHS)에서 기기 관리 및 품질관리를 하고 있는 논경지 지역의 청미천(cheongmicheon farmland site, CFK)과 산림지역의 설마천(koflux seolmacheon site, SMK) 플럭스 타워 증발산 자료를 사용하였으며, 중국에서는 Asiaflux(<http://asiaflux.net/>)와 Chinaflux(<http://chinaflux.org/>)에서 관리하고 있는 5개 (cropland: YCS, grassland: Du2, Cng, forest: CBS, Cha) 플

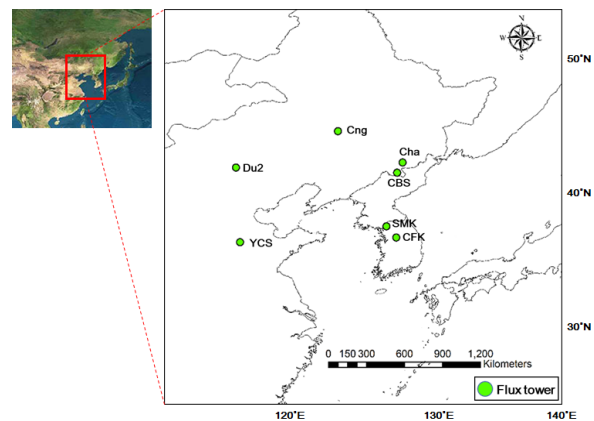


Fig. 1. Location map of the study sites

Table 1. Information of flux tower sites used in this study

Land cover type	Site	Lat	Lon	Period	Reference
Cropland	CFK	37°9'35"N	127°39'10"E	2009-2014	Asiaflux
	YCS	36°50'N	116°34'E	2003-2005	Chinaflux
Grassland	Du2	42°02'44"N	116°16'47"E	2006-2008	Chinaflux
	Cng	44°35'36.24"N	123°30'33.12"E	2007-2010	Chen <i>et al.</i> , 2009
Forest	SMK	37°56'19.99"N	126°57'16.94"E	2008-2014	Asiaflux
	CBS	41°41'4"N	127°42'55"E	2003-2005	Yu <i>et al.</i> , 2006
	Cha	42°24'9"N	128°5'44.88"E	2003-2005	Chinaflux

릭스 타워 증발산 자료를 활용하였다(Table 1). 에디공분산법(eddy covariance method) 기반으로 관측하는 flux tower 자료는 고유한 가정사항으로 인한 오차와 결측 문제가 있기 때문에, 각 flux tower에서 품질 보정이 된 자료를 활용하였다. 각 플릭스 타워에 대한 자세한 설명은 Wang *et al.* (2008), Chen *et al.* (2009), Baik and Choi (2015), Kim *et al.* (2016)와 Asiaflux, Chinaflux의 웹사이트에서 확인할 수 있다.

2.2 인공위성 및 재분석 증발산 자료

기존의 융합 기술과 본 연구에서 제안한 융합기술에 대한 평가를 위하여 다양한 재분석/인공위성 기반의 증발산 자료들을 활용하였다. 본 연구에서 활용한 실제증발산 자료는 기존선행 연구들(Baik *et al.*, 2018a; 2018b)에서 검증 및 비교가 많이 이루어진 재분석 자료(GLDAS, GLEAM)와 인공위성 기반 자료(MOD16)를 사용하였다(Table 2). 각 자료들은 본 연구 지역의 연구기간에 맞도록 자료를 수집하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 자료들은 제공되는 시간해상도가 각각 다르기 때문에, MOD16의 자료의 시간해상도에 맞도록 GLDAS, GLEAM, flux tower의 시간해상도를 8일단위로 변환하여 사용하였다. 각 자료에 대한 자세한 설명은 참고문헌들(Baik *et al.*, 2018a; Khan *et al.*, 2018)을 통해서 확인할 수 있다.

Table 2. Information of reanalysis- and satellite based datasets in this study

	Product	Temporal resolution	Spatial resolution
Global Land Data Assimilation System (GLDAS)	GLDAS Noah V2.1	3 hr	25 km
Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)	GLEAM v3.2b	Daily	25 km
MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)	MOD16	8 days	1 km

3. 방법론 및 통계학적 분석

3.1 Simple Taylor Skill (STS) Fusion Method

본 연구에서 Yao *et al.* (2017)가 제안한 Taylor skill score (TS) 방법을 기반으로 한 Simple TS (STS)방법을 적용하여 융합 실제증발산을 산정하고자 하였다.

$$S_i = \frac{4(1 + R_i)^4}{(\delta_i + 1/\delta_i)^2(1 + R_{\max})^4} \quad (1)$$

$$W_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

여기서, S_i 는 각각 인공위성 및 재분석 실제증발산 자료로부터 산정된 TS 값을 나타내며, δ_i 는 재분석(인공위성) 자료와 지점(reference)자료의 표준편차(standard deviation)의 비(ratio)로 계산된다. R_i 와 R_{\max} 는 지점자료(reference data)와의 상관관계수(correlation coefficient, R)의 값과 최대 상관관계수(=1.0)를 나타낸다. W_i 는 각 모델자료의 가중치를 나타낸다.

3.2 Modified Kling-Gupta efficiency Fusion (KGF) method

본 연구에서는 인공위성(재분석)자료와 지점자료와의 선형 상관관계(r), 편향비(bias ratio, β), 변동성(variability, α)를 고려하는 modified Kling-Gupta efficiency (KGE', Kling *et al.*, 2012)를 활용하여 융합 방법인 Modified Kling-Gupta efficiency Fusion (KGF)을 제안하였다(Eq.(3)). 이 융합방법의 가장 큰 장점은 KGE'의 기본가정이 데이터간의 유사도를 판단하는 기준인 유클리드 거리(Euclidean distance)를 파레토 프론트(Pareto front)의 이상적인 지점으로부터 측정하기 때문에, 자료의 변동성 및 상관관계를 동시에 적용할 수 있기 때문이다.

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_m / \mu_m}{\sigma_o / \mu_o} \quad (4)$$

$$\beta = \mu_m / \mu_o \quad (5)$$

$$KGE'_i = KGE' / \sum_{i=1}^n KGE'_i \quad (6)$$

여기서, σ 는 표준편차를 나타내며, μ 는 자료의 평균을 나타낸다. m 과 o 은 각각 재분석(인공위성)과 지점자료를 나타낸다.

3.3 통계학적 분석

본 연구에서는 각 실제증발산 자료와 융합방법의 결과를 비교 및 검증하기 위하여 Table 3에 나타난 통계 기법을 이용하여 비교 검증을 실시하였다.

Table 3에서 M 은 인공위성(재분석)의 값, O 은 관측값(지상관측지점), \bar{M} , \bar{O} 은 각 인공위성(재분석)자료와 관측자료의 평균값, N , n 은 자료의 개수이다. 모델값과 관측값 사이의 상관관계를 나타내기 위한 상관계수(Correlation coefficient)는 -1에서 1의 값의 범위를 가지며, 상관계수가 “0”의 값을 가지면 두 자료간의 아무런 관계가 없음을 의미한다. Bias, RMSE, MAE는 “0”의 값에 가까울수록 인공위성(재분석)자

료와 관측값(지점자료)이 서로 유사하다고 할 수 있다. 마지막으로 IOA와 TS는 “1”에 가까울수록 두 자료간의 유사성을 나타낸다.

4. 결과

4.1 Flux tower와 재분석/인공위성 자료의 비교

Fig. 2는 연구기간동안 다른 land cover type에서 각각 flux tower와 재분석/인공위성(GLDAS, GLEAM, MOD16)의 월별 평균 시계열 분포의 경향을 나타내었다. Flux tower로 관측되는 실제증발산 값을 참값으로 가정하였을 때, flux tower의 월별 평균 실제증발산에 비하여 GLDAS 월별 평균 실제증발산의 결과는 YCS를 제외한 나머지 flux tower 과대추정되는 경향을 나타냈으며, GLEAM 월별 평균 실제증발산의 결과는 forest의 flux tower를 제외하고 나머지 land cover type에서는 과소/과대추정되는 경향을 나타내었으며, MOD16의 월별 평균 실제증발산의 결과에서는 grassland에서 flux tower와 비교하여 과소 추정되는 경향을 보이고, 다른 두 land cover type에서는 각각 flux tower에서 과대/과소 추정되는 경향을 보이고 있다. MOD16의 결과를 확인하면 다른 두자료(GLDAS, GLEAM)에 비하여 12~2월 사이에 과대추정되는 경향을 나타내고 있다. 이는 MOD16 자료의 실제증발산을 산정하기 위한 활용되는 revised RS-PM방법에서 식생인자의 영향으로 인하여 발생한다. 실제 식생상태보다 MODIS 식생인자(LAI, NDVI)가 겨울철뿐만 아니라 여름철에도 높게 관측되는 경향이 있어 결과적으로 실제증발산의 결과가 과대추정하게 된다(Sun *et al.*, 2007; Baik *et al.*, 2015).

각각 다른 land cover type에서 flux tower와 인공위성/재분석 자료간에 각 계절별(겨울, 봄, 여름, 가을) 정량적 비교를 위해 통계 분석 방법(Bias, MAE, RMSE, R, IOA, TS)을 이용하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 상관성 및 적합성을 나타내는 통계결과(IOA, R, TS)에서 봄과 가을에는 겨울과 여름에 비하여 인공위성/재분석 자료의 상관성 및 적합성이 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 계절별 RMSE와 MAE의 경향을 보면, 겨울에서 여름을 갈수록 실제증발산이 증가함에 따라서 오차도 커지다가 가을에 들어서면서 다시 감소하는 추세를 나타내었다. 계절별 Bias 측면에서 보면, forest에서는 대체적으로 재분석/인공위성 자료가 과대 산정되는 경향을 보이는 반면에 다른 두 land cover type에서는 자료의 특성에 따라서 과대 및 과소 산정되는 경향을 나타내었다. Cropland와 grassland에서는 GLDAS와 GLEAM의 결과

Table 3. Statistical methods for error evaluation

Item	Equation
Bias (mean error)	$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)$
MAE (Mean Absolute Error)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)$
RMSE (Root Mean Square Error)	$SE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}$
R (Correlation coefficient)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)}}$
TS (Taylor skill score)	$S_i = \frac{4(1 + R_i)^4}{(\delta_i + 1/\delta_i)^2 (1 + R_{max})^4}$
IOA (Index Of Agreement)	$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{O} + M_i - \bar{O})^2}$

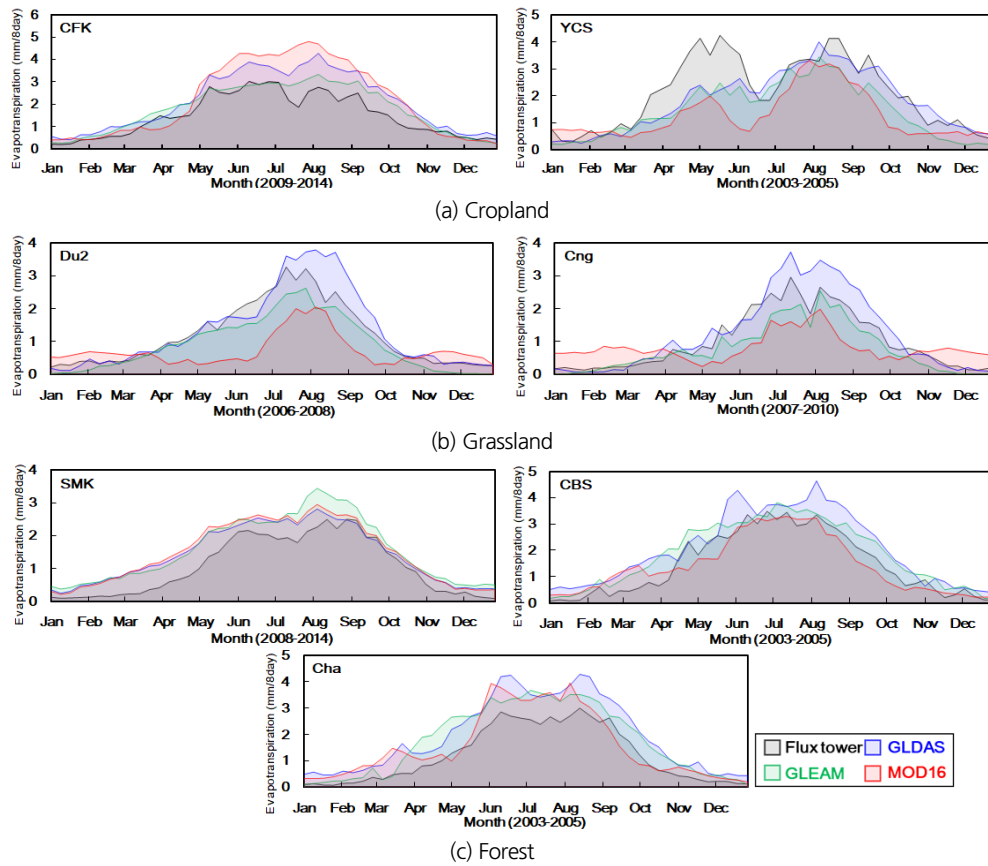


Fig. 2. Time series of satellite- and reanalysis-datasets with flux tower at three different land cover types: a) cropland, b) grassland, and c) forest areas

가MOD16에 비하여 보다 높은 결과를 나타내고 있다. Forest에서는MOD16와GLEAM의 결과가GLDAS의 결과에 비하여 오차가 적고 적합도가 높은 것을 확인할 수 있다. 특히, MOD16의 계절별 오차분석(Bias, MAE, RMSE)가 flux tower 자료와의 비교에서 다른 재분석자료에 비하여 적은 오차를 나타내었다(Fig. 3).

4.2 Blinding technique의 weighting factor 계산

본 연구에서 융합실제증발산을 산정하기 위하여 각각의 land cover type (cropland, grassland, forest)에 대해서 두가지 융합방법(STS와KGF)을 이용하여 가중치(Eqs. (2) and (6))를 계산하여 나타내었다(Fig. 4). Cropland에서 두 flux tower (CFK, YCS)의 평균 STS(KGF) 가중치는 GLEAM(0.386)>GLDAS(0.350)>MOD16(0.264) (GLEAM(0.401)>GLDAS(0.314)>MOD16(0.286))의 결과를 나타내었으며, 두 flux tower에서 GLEAM은 약 38~40% 가중치, GLDAS는 약 31~35%, MOD16은 약 26~29%의 영향을 보였다. Grassland에서 두 flux tower(Du2, Cng)의 평균 KGF(STS)의 가중치

결과는 GLDAS(0.400)>GLEAM(0.379)>MOD16(0.220) (GLEAM(0.445)>GLDAS(0.404)>MOD16(0.151))의 결과를 나타내었으며, 두 flux tower에서 GLEAM은 약 38~44% 가중치, GLDAS는 약 40%, MOD16은 약 15~22%의 영향을 보였다. 마지막으로, forest에서 세 flux tower(SMK, CBS, Cha)의 평균 KGF(STS) 가중치는 MOD16(0.375)>GLEAM(0.356)>GLDAS(0.269) (GLEAM(0.344)>GLDAS(0.342)>MOD16(0.328))로 GLEAM은 약 34~38% 가중치, GLDAS는 약 34~36%, MOD16은 약 32~38%의 영향 나타내었다 (Fig. 4). 전반적으로 두 land cover type(cropland와 grassland)에서 두 융합방법(STS, KGF) 모두 GLEAM와 GLDAS 자료가 높은 가중치가 고려되는 반면에 forest에서는 융합방법에 따라서 KGF에서는 MOD16의 영향이 높았으며, STS에서는 세 자료 모두 비슷한 가중치 영향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 선행연구들을 통해서 찾을 수 있다. MOD16의 경우 다른 재분석 자료에 비하여 공간해상도가 높아 산림과 같은 밀집된 구간에 대해서 보다 정확성과 적은 오차를 보인다(Khan *et al.*, 2018). 더불어 기존의 STS 방법에

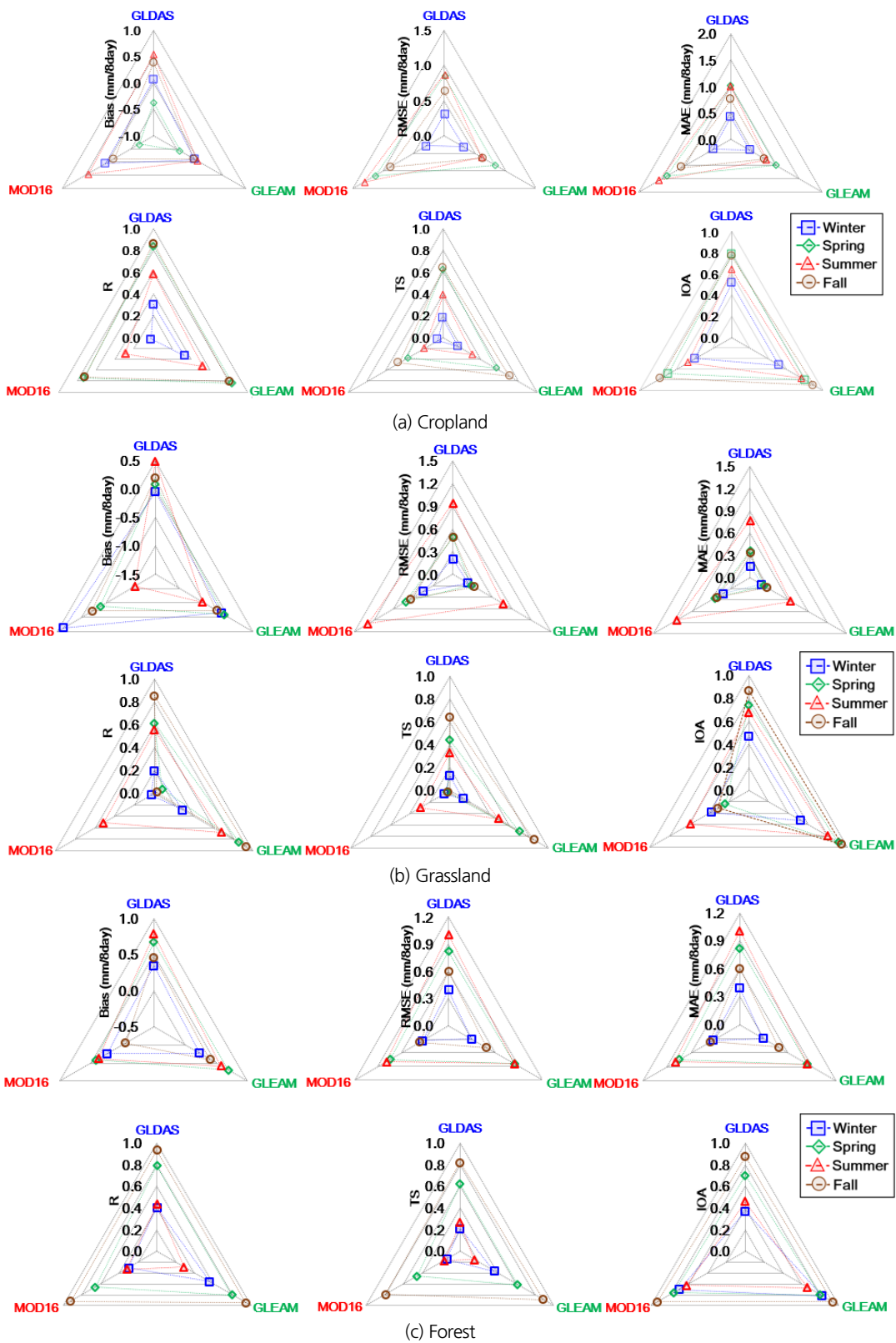


Fig. 3. Statistical analysis of seasonal ET of satellite- and reanalysis datasets with flux tower at three different land cover types; a) cropland, b) grassland, and c) forest areas

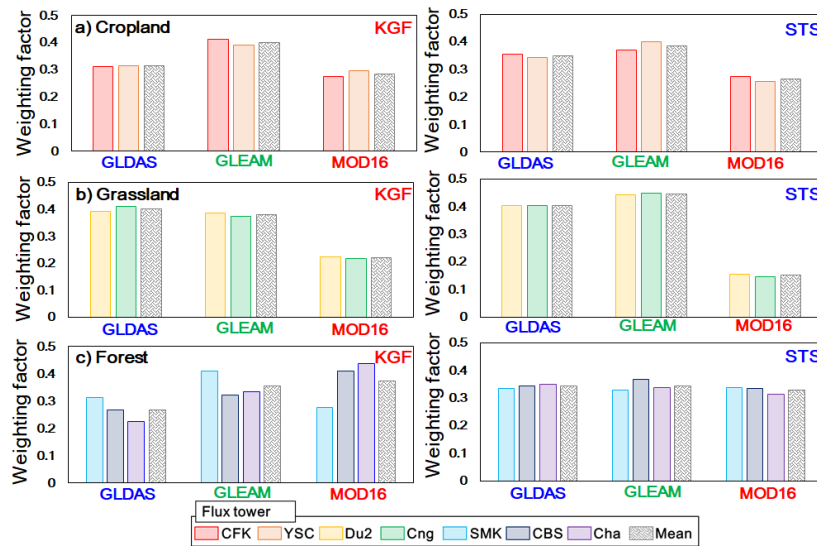


Fig. 4. Bar chart of weighting factor results from the STS and KGF methods at three different land cover types; a) cropland, b) grassland, and c) forest areas

비하여 KGF방법은 오차정도에 대한 영향(편향비, 변동성)도 고려되어, 가중치 계산에서 MOD16이 다른 자료와 비교하여 높은 가중치를 반영된 것으로 사료된다.

4.3 실제증발산 자료 융합 방법의 적용 및 비교/분석

Fig. 5는 각 세 가지의 다른 land cover type에서 총 연구기간 동안의 재분석/인공위성 실제증발산 자료와 STS와 KGF 융합방법을 적용한 개선된 융합 실제증발산자료의 통계분석 결과를 나타내었다. Fig. 5에 나타난 결과의 종합적인 결과를 분석하면, cropland에서 가장 적절성이 있는 자료의 순위는 GLEAM>KGF>STS>GLDAS>MOD16 순으로 나타났으며, 재분석 자료인 GLEAM (CFK), GLDAS (YCS)와 비교하였을 때, 융합 방법을 적용한 두 융합실제증발산(STS, KGF)의 결과는 각 지점에서 개선되는 정도가 미미한 것으로 나타났다. Grassland에서 가장 적절성이 있는 자료의 순위는 STS >KGF>GLEAM>GLDAS>MOD16 순의 결과를 나타내었다. Grassland에서 두 융합방법(KGF, STS)의 통계결과를 확인하면, KGF가 약간 개선되었으며, 두 융합방법의 결과는 거의 근소한 차이 근소한 차이를 나타냈지만, 기존 재분석/인공위성 자료와 비교하여 오차 및 적절성/적합도가 개선된 것으로 확인되었다. 마지막으로 forest에서 통계결과를 확인하면 융합실제증발산 자료와 기존자료들과 비교하였을 때, 통계적으로 계산된 것을 확인할 수 있고, 가장 적절성이 있는 자료의 순위로는 KGF>STS>MOD16>GLEAM>GLDAS 순과 같은 결과를 나타내었다. 특히, IOA와 RMSE의 결과를 확인하면, KGF의 결과(0.961, 0.569 mm/8day)가 STS(0.936,

0.590 mm/8day)에 비하여 오차 및 적합도가 높은 것을 확인할 수 있으며, R와 TS의 결과에서는 STS의 결과(0.938, 0.872)가 KGF의 결과(0.935, 0.868)에 비하여 근소하게 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 융합실제증발산의 산정을 위하여 제안한 KGF와 기존의 STS의 종합적인 결과를 정리하자면, cropland를 제외하고 두 grassland와 forest에서는 실제증발산의 결과가 개선되는 것으로 나타났다. Cropland에서 개선이 적은 이유는 시계열을 보면 파악할 수 있다. 시계열의 경향에서 재분석/인공위성 자료가 flux tower를 기준으로 한쪽으로 편향(과대 산정 또는 과소 산정)될 경우에 STS와 KGF와 같은 융합 방법은 사용되는 자료보다 개선되기 어렵다. 융합 방법 중 KGF의 방법이 STS 방법의 결과보다 보다 개선되는 이유는 다음과 같다. 상관계수와 단순 표준편차의 비율만을 고려하는 STS 방법의 경우, 자료간의 상관계수가 높음에 따라 가중치에 대한 기여도가 결정된다. KGF방법의 경우, 상관계수, 편차 및 변동성 측정의 세 가지 구성요소의 유클리드 거리를 고려함에 따라서 계산된다. 따라서, 일반적으로 상관계수의 영향이 큰 방법은 이상적인 단일성 값에 도달하기 어렵지만, KGE를 고려한 KGF 방법은 세 구성요소를 사용함으로써 실제로 이상적인 값에 근접할 수 있다(Gupta et al., 2009). 그러므로, 자료의 보정 또는 최적화를 위해서는 적은 요소만을 고려하는 것이 아니라, KGF 방법을 이용함으로써 편차 및 변동성을 상당히 향상시킬 수 있다. 그렇지만, KGE를 사용하는 KGF 방법은 상관성 요소가 핵심으로 사용되는 방법에 비하여 약간 상관관계성이 적게 나타날 수 있다(Fig. 5).

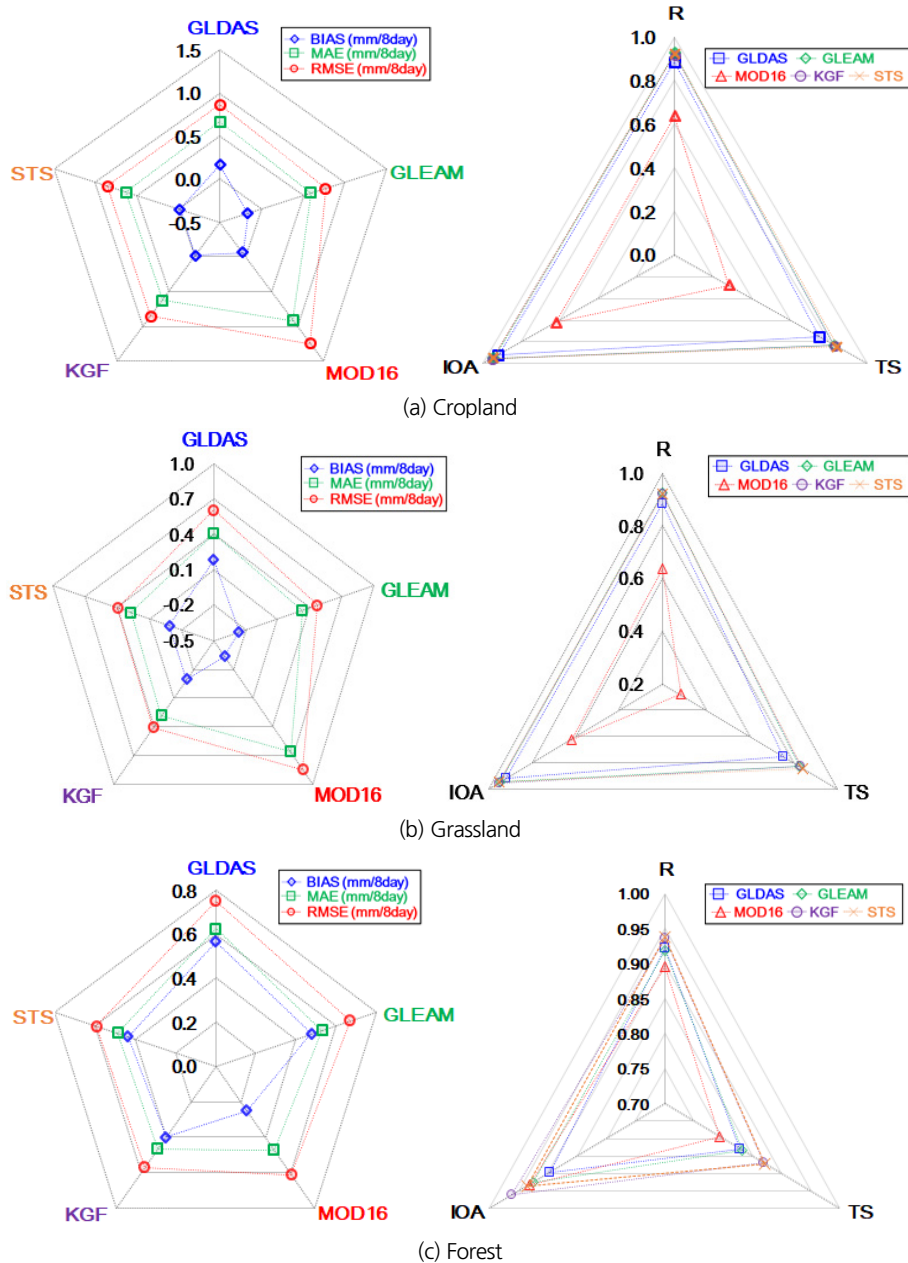


Fig. 5. Radar chart of statistical analysis of satellite- and reanalysis ET product with merged ET dataset at three different land cover types; a) cropland, b) grassland, and c) forest areas

5. 결론

본 연구는 새롭게 제안하는 실제증발산 융합 방법인 KGF와 기존의 융합 방법인 STS와의 비교 및 검증 을 위해 한반도와 중국에서 활용가능한 flux tower자료와 재분석/인공위성 자료인 GLDAS, GLEAM, MOD16을 활용하여, 각 land cover type에 대한 비교 및 분석을 실시하였다. 먼저, 각 flux tower와 재분석/인공위성 실제증발산 자료의 연구기간동안 시계열적

거동을 파악하였다. 각 재분석/인공위성 자료들은 land cover type에 따라서 다른 거동을 나타내는 것으로 확인되었다. 자료간의 계절별 통계를 실시한 결과, cropland와 grassland에서는 재분석 자료의 결과가 flux tower와 근접한 것으로 나타내었으며, forest의 경우에는 MOD16의 결과가 flux tower의 결과와 근접한 결과를 나타내었으며, 전반적으로, 겨울과 여름에서는 재분석/인공위성의 결과는 flux tower와 상관성 및 일치도가 낮은 반면 봄과 가을에는 높은 결과를 나타내었

다. 마지막으로, 본 연구에서 세 land cover type으로 구분하여 융합방법인 STS와 KGF의 가중치 계산 결과와 이로 인한 융합된 실제증발산에 대한 결과를 flux tower와 비교 검증 실시하였다. 세 land cover type에 대한 STS와 KGF가중치 결과를 확인하면, cropland와 grassland에서는 각각 GLEAM과 GLDAS는 약 38%~44% 정도의 가중치가 고려되었으며, forest에서는 융합방법에 따라서 MOD16의 가중치가 다르게 고려되었다. 두 융합방법(STS, KGF)으로 계산된 가중치를 적용하여 산정된 융합실제증발산 결과와 재분석/인공위성 자료를 flux tower와 비교/분석을 실시하였다. Cropland에서는 RMSE, MAE, IOA, R, TS의 결과는 KGF(0.854 mm/8day, 0.626 mm/8day, 0.895, 0.867, 0.706), STS(0.858 mm/8day, 0.630 mm/8day, 0.877, 0.870, 0.709), GLDAS(0.864 mm/8day, 0.666 mm/8day, 0.872, 0.851, 0.701), GLEAM(0.764 mm/8day, 0.588 mm/8day, 0.894, 0.875, 0.745), MOD16 (1.243 mm/8day, 0.916 mm/8day, 0.763, 0.760, 0.492)로 GLEAM>KGF>STS>GLDAS>MOD16 순의 결과를 나타내었다. Grassland에서는 RMSE, MAE, IOA, R, TS의 결과는 KGF(0.406 mm/8day, 0.284 mm/8day, 0.952, 0.919, 0.831), STS(0.393 mm/8day, 0.271 mm/8day, 0.950, 0.923, 0.845), GLDAS(0.606 mm/8day, 0.409 mm/8day, 0.921, 0.884, 0.753), GLEAM(0.465 mm/8day, 0.327 mm/8day, 0.947, 0.925, 0.830), MOD16(0.852 mm/8day, 0.662 mm/8day, 0.621, 0.636, 0.281)로 STS>KGF>GLEAM>GLDAS>MOD16 순의 결과를 나타냈고, forest에서는 KGF(0.569 mm/8day, 0.462 mm/8day, 0.961, 0.935, 0.868), STS(0.590 mm/8day, 0.486 mm/8day, 0.936, 0.938, 0.872), GLDAS(0.751 mm/8day, 0.624 mm/8day, 0.896, 0.828, 0.922), GLEAM(0.667 mm/8day, 0.527 mm/8day, 0.926, 0.918, 0.833), MOD16(0.608 mm/8day, 0.470 mm/8day, 0.932, 0.935, 0.868)로 KGF>STS>MOD16 >GLEAM>GLDAS 순의 결과가 나타났다. Cropland와는 다르게 융합방법의 결과가 융합에 사용된 자료보다 일치도와 상관성, 오차 정도가 개선된 것을 확인하였으며, 융합방법간의 비교에서는 본 연구에서 제안한 KGF방법이 STS방법에 비해 약간 더 좋은 결과를 나타내었다. 본 연구에서 제안한 융합방법인 KGF방법은 STS방법과 같이 물리학적 의미를 가진 융합방법이 아닌 통계학적 기법을 이용하기 때문에 실질적으로 재분석/인공위성 자료를 보정 및 수정할 수 없을뿐더러, 두 방법 모두 기준이 되는 실측 지점자료와의 관계를 필요하게 된다. 따라서, 추후연구에서는 실측 지점 자료와의 관계를 필요치 않는 융합기술을 개발함으로써, 한정된 지역이 아닌 광범위한 지역에서 활용할 수 있는 기술 개발을 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B07049029)에 의해 수행되었습니다.

References

- Baik, J., and Choi, M. (2015). "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.
- Baik, J., Liaqat, U. W., and Choi, M. (2018a). "Assessment of satellite- and reanalysis-based evapotranspiration products with two blending approaches over the complex landscapes and climates of Australia." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 263, pp. 388-398.
- Baik, J., Jeong, J., and Choi, M. (2018b). "Estimation of the optimal evapotranspiration by using satellite- and reanalysis model-based evapotranspiration estimations" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 3, pp. 273-280.
- Baik, J., Park, J., Ryu, D., and Choi, M. (2016). "Geospatial blending to improve spatial mapping of precipitation with high spatial resolution by merging satellite-based and ground-based data". *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 16, pp. 2789-2803.
- Cheema, M. J. M., and Bastiaanssen, W. G. M. (2012). "Local calibration of remotely sensed rainfall from the TRMM satellite for different periods and spatial scales in the Indus Basin." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 8, pp. 2603-2627.
- Chen, S., Chen, J., Lin, G., Zhang, W., Miao, H., Wei, L., Huang, J., and Han, X. (2009). "Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types," *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 149, No. 11, pp. 1800-1809.
- Duan, Z., and Bastiaanssen, W. G. M. (2013). "First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 131, pp. 1-13.
- Ehret, U., (2003). *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments Using Weather Radar*. Ph. D Thesis. University of Stuttgart, Germany, Germany.
- Jeong, J., Baik, J., and Choi, M. (2018) "Estimation of dryness index based on COMS to monitoring the soil moisture status at the Korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 2, pp. 89-98.
- Khan, M. S., Liaqat, U. W., Baik, J., and Choi, M. (2018). "Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 252, pp. 256-268.

- Kim, H., Parinussa, R., Konings, A. G., Wagner, W., Cosh, M. H., Lakshmi, V., Zohaib, M., and Choi, M. (2018). "Global-scale assessment and combination of SMAP with ASCAT (active) and AMSR2 (passive) soil moisture products." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 204, pp. 260-275.
- Kim, K., Baik, J., Lee, J., Lee, Y., Jung, S., and Choi, M. (2016). "An Assessment and Analysis of the Gap-Filling Techniques for Revising Missing Data of Flux Tower based Evapotranspiration-FAO-PM, MDV, and Kalman Filter." *The Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 6, pp. 95-107.
- Kim, S., Parinussa, R. M., Liu, Y. Y., Johnson, F. M., and Sharma, A. (2015). "A framework for combining multiple soil moisture retrievals based on maximizing temporal correlation." *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 16, pp. 6662-6670.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). "Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios." *Journal of Hydrology*, Vol. 424, pp. 264-277.
- Lee, M. J., Han, K. S., and Kim, I. H. (2011). "Estimation of Actual Evapotranspiration using Multi-Satellite Data over Korea Peninsula." *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 19, No. 4, pp. 145-151.
- Liu, C., Shu, S., and Gao, W. (2013). "Improved sensible and latent heat flux estimation of community land model by using ensemble Kalman filter assimilation." In *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability X* (Vol. 8869, p. 886917). *International Society for Optics and Photonics*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2021713>.
- Mueller, B., Seneviratne, S. I., Jimenez, C., Corti, T., Hirschi, M., Balsamo, G., Ciais, P., Dirmeyer, P., Fisher, J. B., Guo, Z., Jung, M., Maignan, F., McCabe, M. F., Reichle, R., Reichstein, M., Rodell, M., Sheffield, J., Teuling, A.J., Wang, K., Wood, E. F., Zhang, Y. (2011). "Evaluation of global observations-based evapotranspiration datasets and IPCC AR4 simulations." *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 6, L06402.
- Seo, H., Kim, J., Park, H., and Kim, Y. (2017). "Estimating Evapotranspiration with the Complementary Relationship at Fluxnet Sites Over Asia." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 303-310.
- Shin, S. C., and An, T. Y. (2007). "Development of Estimating Method for Areal Evapotranspiration using Satellite Data." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 10, No. 2, pp. 71-81.
- Sun, Z., Wang, Q., Ouyang, Z., Watanabe, M., Matsushita, B., and Fukushima, T. (2007). "Evaluation of MOD16 algorithm using MODIS and ground observational data in winter wheat field in North China Plain." *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 21, No. 9, pp. 1196-1206.
- Vinukollu, R. K., Wood, E. F., Ferguson, C. R., and Fisher, J. B., (2011). "Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: evaluation of three process-based approaches." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 3, pp. 801-823.
- Wang, H. M., Saigusa, N., Zu, Y. G., Wang, W. J., Yamamoto, S., and Kondo, H. (2008). "Carbon fluxes and their response to environmental variables in a Dahurian larch forest ecosystem in northeast China." *Journal of Forestry Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10.
- Yao, Y., Liang, S., Li, X., Zhang, Y., Chen, J., Jia, K., Zhang, X., Fisher, J., Wang, X., Zhang, L., Xu, J., Shao, C., Posee, G., Li, Y., Magliulo, V., Varlagin, A., Moors, E. J., Boike, J., Macfarlane, C., Kato, T., Buchmann, N., Billesbach, D. P., Berlinger, J., Wolf, S., Papuga, S. A., Wohlfahrt, G., Montagnani, L., Ardö, J., Paul-Limoges, E., Emmel, C., Hörtnagl, L., Sachs, T., Gruening, C., Gioli, B., López-Ballesteros, A., Steinbrecher, R., and Gielen, B. (2017). "Estimation of high-resolution terrestrial evapotranspiration from Landsat data using a simple Taylor skill fusion method." *Journal of Hydrology*, Vol. 553, pp. 508-526.
- Yilmaz, M. T., Crow, W. T., Anderson, M. C., and Hain, C. (2012). "An objective methodology for merging satellite-and model-based soil moisture products." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 11, W11502.
- Yu, G., Fu, Y., Sun, X., Wen, X., and Zhang, L. (2006). "Recent progress and future directions of ChinaFLUX." *Science in China Series D: Earth Sciences*, Vol. 49, No. 2, pp. 1-23.