



Estimation of the optimal evapotranspiration by using satellite- and reanalysis model-based evapotranspiration estimations

Baik, Jongjin^a · Jeong, Jaehwan^b · Choi, Minha^{b*}

^aCenter for Built Environment, Sungkyunkwan University

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

Paper number: 17-093

Received: 30 October 2017; Revised: 6 December 2017 / 21 December 2017; Accepted: 21 December 2017

Abstract

Accurate estimation of evapotranspiration is mightily important for understanding and analyzing the hydrological cycle. There are various methods for estimating evapotranspiration and each method has its own advantages and limitations. Therefore, it is necessary to develop an optimal evapotranspiration product by combing different evapotranspiration products. In this study, we developed an optimal evapotranspiration by fusing two satellite- and model-based evapotranspiration estimates, including revised remote sensing-based Penman-Monteith (RS-PM) and Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT) methods, Global Land Data Assimilation System (GLDAS), and Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM). The statistical analysis (i.e., correlation coefficients, index of agreement, MAE, and RMSE) of combined evapotranspiration product showed to be improved compared to the individual model results. After confirming the overall results, in future studies, advanced data fusion techniques will be used to obtain improved results.

Keywords: Revised RS-PM, MS-PT, GLDAS, GLEAM, Evapotranspiration

인공위성과 재분석모델 자료의 다중 증발산 자료를 활용하여 최적 증발산 산정 연구

백종진^a · 정재환^b · 최민하^{b*}

^a성균관대학교 건설환경연구소, ^b성균관대학교 수자원전문대학원

요 지

수문순환에서 증발산의 정확한 산정은 수문분석 및 이해에 있어서 매우 중요하다. 특히, 증발산을 산정하는 방법은 다양하며, 각각 방법 마다 장단점을 가지고 있다. 그렇기 때문에, 각 다른 방법으로 산정된 결과를 융합하여 최적의 증발산을 산출해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 대표적으로 인공위성 기반의 증발산 모델인 revised RS-PM과 MS-PT 방법에서 산출된 증발산과 모델 자료인 Global Land Data Assimilation System (GLDAS)와 Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) 자료들을 융합함으로써 최적의 증발산을 산출하고자 하였다. 연구 지역인 청미천과 설마천에서의 플럭스 타워에서 융합된 증발산에 대해서 검증을 실시하였다. 통계학적인 결과(상관계수, 일치도, MAE, RMSE)를 확인하였을 때, 기존의 인공위성과 모델에서 산출되는 증발산 결과에 비해 향상되는 결과로 나타났다. 전반적으로 결과를 확인하였을 때, 융합된 자료가 보다 향상된 결과를 보일 수 있을 것이라는 것을 나타내었으며, 추후에는 더 많은 모델을 사용하여 융합함으로써 보다 정확한 결과를 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: Revised RS-PM, MS-PT, GLDAS, GLEAM, Evapotranspiration

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7539
E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

1. 서론

수문순환에서 관련된 핵심인자 중 증발산(Evapotranspiration, ET)은 지표면 강우의 약 70% 정도를 차지하고 있는 중요한 인자이다. 이는 세부적으로 식생의 기공에서 방출되는 증산(transpiration)과 지표면과 식생의 표면에서 증발(evaporation)의 합으로 정의되어 있다. 증발산의 양은 토양의 수분함량, 식생의 종류 및 성장상태, 습도, 기온, 복사에너지, 일조시간 등의 지상과 기상인자들에 의해서 달라지기 때문에 정확히 산정하는데 어려움이 많다.

일반적으로, 증발산은 간략하게 3가지로 구분되어 진다. 먼저, 기준이 되는 작물에 대한 기준증발산(reference evapotranspiration)은 농업에서 주로 활용되며, 주로 국내에서는 잔디에 대한 증발산량을 측정함으로써 관개에 이용되고 있다. 지표의 토양 수분함량이 완전히 포화된 상태를 가정한 잠재증발산(potential evapotranspiration)은 수자원 분야에서 수자원 부족량 및 관리계획을 파악할 때 사용된다. 마지막으로 실제증발산(actual evapotranspiration)은 토양 종류 및 수분함량, 식생 종류 및 성장상태, 에너지들을 이용하여 지표면에서 발생하는 실제 상태에서의 증발산을 나타낸다. 이러한 증발산을 지상에서 정량적으로 관측하기 위해, 주로 사용하고 있는 방법으로는 국내 기상관측소에 설치되어있는 대형 및 소형 증발접시, 원통형 증발산계(lysimeter), 에디 공분산(eddy covariance) 기반 플럭스 타워(flux tower) 등 있다(Kim *et al.*, 2016).

최근, 주요 지점기반 자료를 이용한 수문기상인자들의 공간적인 표현의 한계점들이 부각되면서, 원격탐사 기법의 대표적인 인공위성 자료를 활용한 연구들이 점차 증가되었다(Lee *et al.*, 2015). 인공위성 자료의 초기에는 증발산을 산정하기 위하여, Landsat을 활용한 증발산 산정에 관련된 연구가 주로 진행되어왔다. 특히, Landsat을 이용한 energy 기반의 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL, Bastiaanssen *et al.*, 1998; Bastiaanssen, 2000), METRIC model 등을 이용하여 고해상도의 증발산을 산정하는 연구들이 진행되어왔다. Landsat으로 산정된 결과는 공간해상도의 장점에 비해 시간해상도의 한계를 가지고 있었다. 1999년과 2002년에 들어서 Terra와 Aqua위성에 탑재된 초분광센서인 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)에서 관측된 자료가 제공됨으로써 인공위성 자료를 활용한 증발산 산정 연구가 활발히 진행되었다. 인공위성 기반의 증발산 산정 모델은 기존의 물리식들을 기반으로 발전되었으며, Penman-Monteith (Monteith, 1965)식을 기반으로 한 Shuttleworth-

Wallace dual-source model (S-W model, Shuttleworth and Wallace, 1985), Resistance-Surface Energy Balance and Penman-Monteith (Cleugh *et al.*, 2007) the revised remote sensing-based Penman-Monteith (RS-PM, Mu *et al.*, 2007, 2011)과 Priestley-Taylor 방법을 기반으로 한 Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory (PT-JPL, Fisher *et al.*, 2008), Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT, Yao *et al.*, 2013) 등이 개발 및 발전되어왔다. 하지만, 각 증발산 모델의 방법론과 증발산의 세부적인 구분, 활용되는 parameter 등의 상이하고, 지형 및 지역, 식생 종류에 의한 차이가 발생하여 정확도가 다르게 나타난다(Yao *et al.*, 2017).

본 연구에서는 각기 다른 증발산 모델의 결과들을 이용하여 최적의 증발산 산정 결과를 산출하기 위해서 Taylor skill score를 이용한 증발산 자료의 융합(fusion)을 실시함으로써 인공위성 기반의 최적의 증발산 산정 결과 산출에 대한 연구를 실시하였다. 본 연구에서는 먼저, 연구지역으로 우리나라에서의 실제증발산이 관측이 가능한 청미천과 설마천에 대해서 2011년부터 2013년까지에 대하여 연구를 실시하였으며, Yao *et al.* (2017)에서 제안된 Taylor skill score를 이용한 Simple Taylor Skill (STS) fusion 방법을 적용함으로써 최종적으로 산정되는 융합된 자료의 결과에 대해서 평가하고자 하였다.

2. 연구 지역

본 연구에서는 탄소순환과 물순환의 측정이 가능한 플럭스 타워 자료를 활용하기 위해, 유량조사사업단에서 관리하고 있는 청미천(Cheongmicheon Farmland Site, CFC)과 설마천(Seolmacheon site, SMC)을 연구지역으로 선정하였다. 청미천(37° 9' 35"N, 127° 39' 10"E)과 설마천(37° 56' 20"N, 126° 57' 17"E)은 각각 2008년 8월과 2007년 7월에 설치되어 현재까지 연속적으로 관측하고 있으며, 우리나라에서 대표적인 토지피복 유형인 벼농사지(rice paddy)와 혼합림(mixed forest)에 각각 설치되어 있다(Fig. 1). 에디 공분산 기술(eddy covariance) 기반의 플럭스타워는 미기상학적 이론을 토대로 하고 있어 많은 이상적인 가정사항들을 포함하고 있고, 실제 환경에서 발생하는 외부적인 요인들로 인한 결측자료가 발생한다. 따라서, 본 연구에서 사용된 자료는 결측자료 및 과대산정을 최소화하기 위하여 품질관리된 자료를 사용하였다(Kim *et al.*, 2016). 자세한 플럭스 타워에 관한 설명은 Baek *et al.* (2013) 과 Kim *et al.* (2016)에서 확인 할 수 있다.

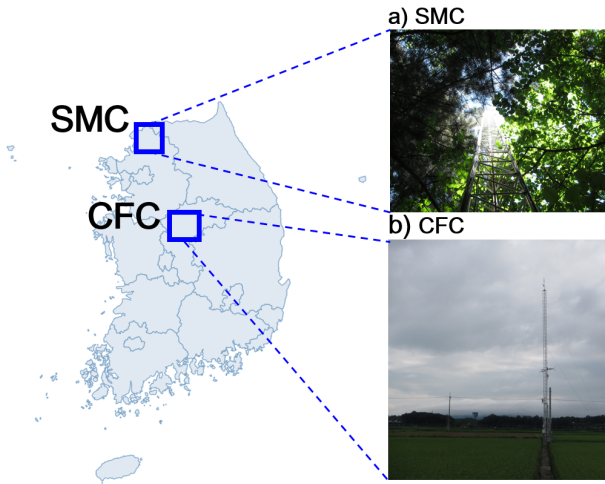


Fig. 1. Location of study sites: (a) SMC and (b) CFC

3. 증발산 산정 모델

본 연구에서 인공위성자료를 활용하여 RS-PM 방법과 MS-PT 방법을 통한 실제증발산을 산정하기 위하여, 많은 선행연구에서 주로 사용되어온 MODIS 자료를 활용하였다. 두 모델을 통하여 증발산을 산정하기에 MODIS product로는 MOD07, MOD11, MOD13, MOD15, MCD43의 자료를 이용하여 net radiation을 산정 하였고(Baik *et al.*, 2015, 2016), 동일한 조건하에 MS-PT 방법과 RS-PM 방법을 이용하여 실제증발산을 산정하였다.

3.1 RS-PM

본 연구에서 MODIS 위성자료를 활용한 실제증발산의 산정을 위해서, 먼저 Mu *et al.* (2007, 2011)에서 제안된 revised RS-PM를 이용하였다. 이 방법은 수문기상분야에서 증발산을 산정 할 때 주로 사용되는 물리식 기반의 Penman-Monteith (PM) 방법(Eq. (1))을 기반으로 인공위성 자료를 활용하여 산정 할 수 있도록 한 것이다. 본 방법은 Jeong *et al.* (2009)과 Sur *et al.* (2012) 등과 같이 우리나라에 대해서 검증이 이뤄진 바가 있으며, 전반적으로 적절한 상관성을 가지고 있다는 것을 나타내었다.

$$\lambda E = \frac{\Delta A_c + \rho C_p (e_{sat} - e) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

여기서, λ 는 잠재 기화열($J kg^{-1}$), λE 는 잠열 플럭스($W m^{-2}$), e_{sat} 는 포화증기압(Pa), e 는 실제증기압(Pa), r 은 공기의 밀도($kg m^{-3}$), C_p 는 공기의 비열($J kg^{-1} K^{-1}$), r_a 는 공기동역학적 저항

항($s m^{-1}$), γ 는 습도계상수($Pa K^{-1}$), s 는 온도에 따른 포화증기압 곡선의 기울기($Pa K^{-1}$)이다.

3.2 MS-PT

Priestley-Taylor (1972) 방법은 기존 Penman (1948)을 단순화한 형태로 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정화한 식으로 다른 증발산 식에 비해 적은 양의 입력자료를 요구한다. MS-PT algorithm은 Yao *et al.* (2013, 2014)에서 제안된 방법이다. 이 방법은 실제증발산이 크게 식생과 지표에서 구분되어 발생하며, 세부적으로 총 4가지의 구분되어진다는 개념이다. 따라서 이 방법의 실제증발산은 Soil Surface Evaporation (LE_s), Vegetation Transpiration (LE_c), Vegetation interception Evaporation (LE_{ws}), Wet Soil Surface Evaporation (LE_{ic})의 합을 통해서 산정하게 된다(Eqs. (2)~(6)).

$$LE = LE_s + LE_c + LE_{ws} + LE_{ic} \quad (2)$$

$$LE_s = \alpha (1 - f_{wet}) f_{sm} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_{NS} - G) \quad (3)$$

$$LE_c = \alpha (1 - f_{wet}) f_{Tf_c} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{NC} \quad (4)$$

$$LE_{ws} = \alpha f_{wet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_{NS} - G) \quad (5)$$

$$LE_{ic} = \alpha f_{wet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{NC} \quad (6)$$

여기서, α 는 Priestley-Taylor 상수로 1.26이고, f_{sm} 은 apparent thermal inertia (ATI)의 경험적인 알고리즘으로 산정 ($= (1/DT) \frac{DT}{DT_{max}}$)되며, DT_{max} 는 maximum diurnal air temperature range ($DT_{max} = 40^\circ C$)이다. f_T 는 plant temperature constraint이며 대기온도(air temperature, T_a)와 optimum temperature for plant growth ($T_{op} = 25^\circ C$)에 의해서 계산 ($= f_{sm}^4$)되며, f_c (vegetation cover fraction)는 $(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$ 으로 산정되고, $NDVI_{max}$ 와 $NDVI_{min}$ 는 0.95와 0.05로 지정되었다. R_{NC} 는 지표면 식생에서의 R_N 와 f_c 를 이용하여 산정 할 수 있다 ($R_{NC} = R_N f_c$). R_{NS} 는 R_N 와 f_c 를 이용해서 산정되며 ($R_{ns} = R_N (1 - f_c)$), G 는 토양열 플럭스(ground heat flux, G)로 R_N 과 f_c 를 통해서 산정 할 수 있다 ($a_y (1 - f_c) R_N, a_y = 0.18$). 자세한 알고리즘에 대한

설명은 Yao *et al.* (2013)과 Baik *et al.* (2016)에서 확인할 수 있다.

3.3 Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

전 지구 지표동계화시스템(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)은 다수의 지표면 모델(Land surface model)인 Mosaic, Variable Infiltration Capacity (VIC), Noah, Community Land Model (CLM)을 기반으로 한 방대한 관측 자료들(인공위성 자료 및 지점 자료)을 통한 자료동화 데이터 시스템을 말한다(Park and Choi, 2015). 이 GLDAS 자료는 다양한 공간해상도와 시간해상도로, 지표면에서의 다양한 수문기상인자들을 제공하고 있다. 이 자료는 모델의 정확도가 높기 때문에, 전 세계적으로 미관측 지역이나 공간적인 분석을 실시하거나 기후변화, 기상예측 등에 주로 활용된다. 본 연구에서 사용된 3시간 단위 공간해상도 0.25°의 GLDAS/Noah (version 2.1)자료에서 산정되는 증발산 데이터를 사용하였으며, 연구에 활용할 수 있게 8일 단위의 증발산으로 변환하여 사용하였다.

3.4 Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)

본 연구에서 사용된 다른 증발산 자료는 Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)로 위성 기반 관측자료를 기반으로 일일 증발산을 전지구 규모로 공간 해상도 0.25°로 자료를 제공하고 있다(Miralles *et al.*, 2011). Priestley-Taylor 방법을 기반으로 한 GLEAM은 증산, 나지(bare soil)와 open-water에서의 증발, 차단 손실, 승화 등으로 구분되어 증발산을 계산하게 되며, 알고리즘 상에서 4가지의 토지 표면 조건(bare soil, 낮은 초목(low vegetation), 높은 초목(tall vegetation), open water)을 고려하게 된다(Miralles *et al.*, 2011a). 이 자료는 강제입력자료와 시공간적 범위에 차이에 따라서 총 3가지의 자료로 구분되어 제공된다. 본 연구에서는 증발산 자료의 융합을 위하여 GLEAM_v3.1a 자료를 활용하였다.

4. 방법론 및 통계학적 분석

4.1 Simple Taylor Skill (STS) Fusion Method

일반적으로 Taylor skill score (S)는 Taylor (2001)에 의해 제안된 식으로 모델의 모의 성능을 판단할 수 있다(Eq. (3)). 본 연구에서 최적의 증발산 자료를 산정하기 위하여, Yao *et al.* (2017)에서 개발한 Taylor skill score 방법을 기반으로 한

Simple Taylor Skill fusion (STS) 방법을 적용하여 각기 다른 자료들을 fusion을 실시하였다(Eq. (4)).

$$S_i = \frac{4(1 + R_i)^4}{(\delta_i + 1/\delta_i)^2(1 + R_{\max})^4} \quad (3)$$

$$W_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

여기서, S_i 는 각 모델로부터 산정되는 Taylor skill score를 나타내며, δ_i 는 모델 자료와 기준이 되는 자료와의 분산의 비율로 구해진다. R_i 와 R_{\max} 는 기준이 되는 자료와의 상관계수의 값과 최대 상관계수(=1.0)를 나타낸다. i 는 각 모델을 나타내며, S 의 값의 범위는 0부터 1로 나타내고, 1의 값에 가까울수록 관측자료의 변동성을 잘 표현한다는 것을 의미한다. W_i 는 각 모델로부터 산출된 S_i 를 이용한 각 모델자료에 대한 가중 가중치를 나타낸다.

4.2 통계학적 분석을 통한 검증 방법

본 연구에서 지점 기반의 자료와 각기 다른 증발산 모델 결과와의 검증을 위하여, 평균절대값오차(mean absolute error, MAE), 평방근오차(root mean square error, RMSE)를 사용하였다. 또한, 관측치와 모델 자료간의 상관성 및 일치성을 파악하기 위하여, 일치도(index of agreement, IOA)와 상관계수(correlation coefficient, R)를 이용하였다.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|M_i - O_i|)}{N} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)}}} \quad (7)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

여기서, M 은 모델의 값, O 은 관측값, \bar{M} , \bar{O} 은 자료의 평균, N , n 은 자료의 개수이다. 범위 -1에서 1의 값을 가지는 상관계수는 모델값과 관측값 사이의 상관성을 나타내며, 상관계수 0은 두 자료간의 아무런 관계가 없음을 의미한다. IOA는 1에 가까울수록 모델값과 관측치 간에 일치하다고 할 수 있고, 반면 값이 0에 근접할수록 모델과 관측치가 불일치함을 나타낸다.

5. 결 과

5.1 산정된 증발산 검증

인공위성과 모델자료로 산정된 증발산에 대한 검증을 실시하기 위해, 연구지역인 두 지점에 대해서 8일 단위의 증발산에 대해서 검증 및 비교를 실시하였다(Fig. 2). 논경지인 청미천 flux tower와 인공위성과 모델 자료의 8일 단위의 증발산 결과를 비교하였을 때, 연구 기간에 대한 평균 통계 결과로 MAE가 32.594 W m^{-2} ($22.367\text{-}38.842 \text{ W m}^{-2}$), RMSE는 42.740 W m^{-2} ($29.165\text{-}54.346 \text{ W m}^{-2}$), IOA와 R은 0.868 (0.837-0.896)와 0.824 (0.687-0.901)로 나타났으며, 설마천 flux tower에서는 MAE가 36.857 W m^{-2} ($18.998\text{-}57.121 \text{ W m}^{-2}$), RMSE는 45.713 W m^{-2} ($22.758\text{-}75.471 \text{ W m}^{-2}$), IOA와 R은 0.761 (0.628-0.885)와 0.816 (0.791-0.840)의 결과를 나타내었다. 본 연구의 결과는 기존의 선행연구들에서의 결과와 비슷한 양적인 오차와 적합도를 나타내고 있다. Sur *et al.* (2012)은 MODIS 자료 기반의 the revised RS-PM에 대해서 2010년에 대한 증발산 산정 결과를 지점자료(CFC, SMC)와 비교를 실시하였다.

이 연구에서의 2010년에 대한 비교결과는 SMC에서 bias와 RMSE는 70.67 W m^{-2} 와 148.25 W m^{-2} , CFC에서는 -125.36 W m^{-2} 와 155.10 W m^{-2} 으로 나타났고, 또한, Baik and Choi (2015)에서는 the revised RS-PM 모델을 이용하여 천리안 위성에 적용함으로써 사용가능성을 파악하기 위하여 MODIS 증발산 결과와 비교를 실시하였다. 이 연구에서도 2011년에 대한 MODIS와 지점자료와의 IOA 결과는 청미천 0.85, 설마천 0.75를 나타내었으며, 양적인 오차 또한 비슷한 거동을 확인 할 수 있었다. Baik *et al.* (2016)에서는 MODIS 인공위성 자료를 이용하여 MS-PT에 대한 일단위 검증을 실시하였는데, 이 논문에서의 결과는 본 연구에서의 8일 단위의 증발산의 결과와 비슷한 상관성과 양적인 오차를 보였다. 비교 결과를 종합하면, 두 지점에서 revised RS-PM으로 산정된 결과에 비해 MS-PT로 계산된 증발산의 적합도 및 상관성이 높은 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 Wang and Liang (2008)과 Yao *et al.* (2013, 2017)에서 확인할 수 있듯이, 기존의 RS-PM보다 MS-PT 방법이 증발산을 산정하기 위해 들어가는 입력 자료가 적어짐에 따라서, 입력 자료가 가지는 불확실성이 줄어들기 때문에 다른 모델에 비해 보다 상대적으로 적은 오차를 나타낸다고 판단된다. 또한, 기존의 RS-PM의 경우에 Penman-Monteith 방법을 기반으로 되어있어 지표면 저항(surface resistance)에 대한 부분을 계산하는 것으로 구성되어있다. 자연상태에서 지표면에서의 저항을 정확하게 산정 및 추정하는 것은 매우 복잡하고 어려울 뿐만 아니라, 다양한 지역 및 식생 종류에서의 정규화 및 정량화가 부족하기 때문에 이를 이용하여 산정되는 증발산의 정확도에 영향을 미칠 수 있다(Zhu *et*

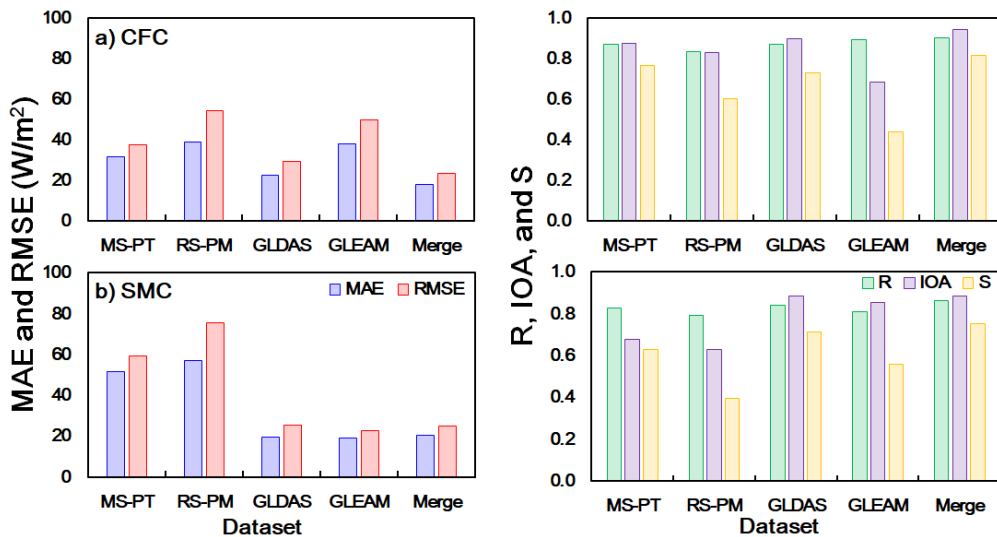


Fig. 2. Bar graphs of the statistical analysis (MAE, RMSE, R, IOA, and S) of the comparison between ground-, satellite-, model-, and merging-based measurement at study sites (CFC and SMC)

al., 2016). 또한, 다른 이유로는 지점 관측자료는 검증자료로 활용되기 때문에 관측값이 참값으로 가정하여 사용하게 된다. 그러나, Twine *et al.* (2000), Byun *et al.* (2014)에서 언급되었듯이, 자연상태에서 관측되는 플럭스 타워의 에너지 플럭스는 정확하게 에너지 균형 ($R_N - G = LE + H$)가 균형을 이루지 않으며, 일반적으로 좌변 항의 값이 과대 산정되는 경향을 나타내기 때문에 이뤄지지 않는다. 특히, 산악지역에 설치되고 혼합림으로 구성된 SMC는 에디 공분산 방법의 기본 가정에 부합되지 않기 때문에(Byun *et al.*, 2014), CFC에 비해 관측값에 대한 관측 및 시스템오차가 높은 것으로 확인된다(Byun *et al.*, 2013). 확실히 선행연구들에서도 언급되었듯이, 산림 지역에서의 오차가 논경지에 비해서 높은 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2).

5.2 융합된 증발산 검증

융합(merging)된 증발산(ET_{merge})에 대한 결과와 융합을 위해서 활용된 자료들의 통계학적인 결과를 나타내었다(Fig. 2). 그림에서 ET_{merge} 의 통계학적인 결과를 확인하면, 청미천(설마천)에서는 IOA와 R은 각각 0.945 (0.887)와 0.901 (0.863), MAE와 RMSE는 18.012 W m^{-2} (20.540 W m^{-2})와 23.194 W m^{-2} (25.081 W m^{-2})의 결과를 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 Taylor skill score의 값을 확인하여 보면, 청미천의 경우에 ET_{merge} (0.816) > MS-PT (0.767) > GLDAS (0.728) > RS-PM (0.602) > GLEAM (0.440)의 순의 결과를 설마천의 경우에는

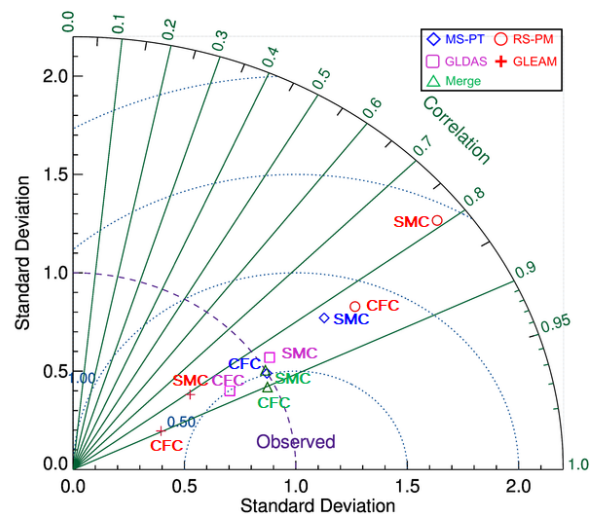


Fig. 3. Taylor diagram of various model based AET for the study sites

ET_{merge} (0.754) > GLDAS (0.715) > MS-PT (0.631) > GLEAM (0.559) > RS-PM (0.395)의 결과를 나타내었다. 전반적으로 모델 자료의 경우에는 GLDAS가 인공위성 기반의 자료는 MS-PT로 산출된 결과가 가장 높은 기능 평점을 보였다. 이러한 결과는 단일 모델을 통해서 산정되는 결과에 비하여 융합을 함으로써 오차의 감소 및 일치도가 상승하는 것으로 사료된다. Fig. 3에는 각 모델에 대한 성능 차이를 도식적으로 확인하기 위해 Taylor diagram (Taylor, 2001)을 나타내었다. 이 방법은 표준편차, 상관계수, 표준화된 RMSE의 상관성을 이

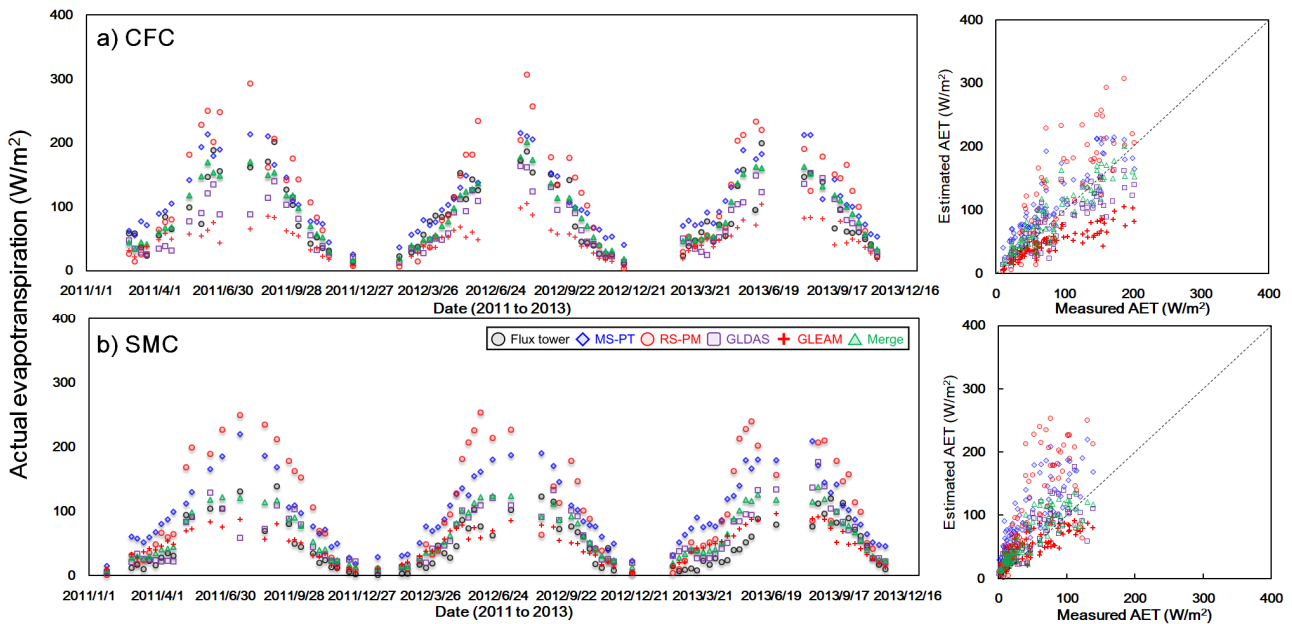


Fig. 4. Time series and scatter plots of ground, satellite, and merging based actual evapotranspiration at study sites: (a) CFC and (b) SMC

용한다. 연구지역인 두 지점에서 ET_{merge} 의 결과가 다른 결과에 비하여 확실히 개선된 것을 확인할 수 있다. 특히, 앞선 통계 결과와 같이 revised RS-PM가 다른 결과에 비해 낮은 상관계수와 정확도를 가질뿐만 아니라, 과대 산정되는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 2011년부터 2013년에 해당하는 연구기간동안의 청미천과 설마천에서의 8일 단위의 증발산의 시계열과 산포도(satter plot)을 나타내었다. Fig. 4에서 산포도를 통해 확인할 수 있듯이, 두 지점(CFC, SMC)에서 ET_{merge} 이 지점자료와의 1:1선이 가장 근접하게 모의되었으며, 기존 자료에 비해 slope가 개선되어는 것을 보였다. 그림에서의 시계열을 확인하면, 앞서 나타낸 taylor diagram에서의 결과와 같이 RS-PM의 경우에는 식생의 성장기에 플렉스타워에 비해 과대 산정되는 경향을 보이고 있고, MS-PT의 경우에는 봄철에 약간 과대 산정되는 경향을 보이지만 전반적인 기간에 대해서 RS-PM에 비해 플렉스타워와 근접한 결과를 보였다. GLEAM의 경우에는 전반적으로 과소산정되는 경향을 나타내고, GLDAS의 결과는 전반적으로 플렉스 자료의 변동성을 잘 따라가는 것이 보였다. ET_{merge} 는 각각 자료가 가진 불확실성이 개선된 패턴을 보이며, 다른 자료에 비해 보다 유사한 경향을 보였다. 이는 본 융합 방법이 활용하고자 하는 대상자료의 개수가 증가함에 따라서, 각 자료간의 경향성과 weighting factor가 고려되기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 수문순환을 구성하고 있는 증발산 인자의 정확성을 높이고자 모델자료들(GLDAS, GLEAM)과 인공위성 기반의 증발산 모델들(MS-PT, RS-PM)을 이용하여 8일 단위 융합된 증발산 결과에 대해서 2011년부터 2013년까지에 대해서 청미천과 설마천에 설치되어 있는 플렉스 타워와의 비교 및 검증을 실시함으로써 정확성과 사용가능성을 확인하고자 하였다. 먼저, 인공위성 기반의 모델인 MS-PT와 RS-PM의 증발산 산정 결과는 두 연구지역 모두에서 MS-PT의 결과가 RS-PM으로 산정된 결과에 비해 높은 상관성과 적은 오차를 나타내는 것을 확인하였다. 시계열 패턴을 확인하였을 때, 인공위성으로부터 산정된 결과들이 청미천 플렉스 타워의 결과를 잘 따라가는 것을 확인할 수 있었으나, 설마천에서는 과대산정되는 경향을 나타내었다. 이는 혼합림과 지형조건에 영향으로 에너지 수지의 불균형 때문에 발생하는 플렉스타워 관측값의 불확실성(Sur et al., 2012)과 인공위성 자료에서의

공간 해상도 차이와 관측오차로 인한 불확실성에 기인하여 발생하는 것(Baik and Choi, 2015; Baik et al., 2016)으로 보여진다. 모델 기반의 결과에서는 확실히 GLDAS의 결과가 GLEAM에 비해서 높은 적합성을 가진 것으로 나타났다. 융합방법을 통해서 산정된 ET_{merge} 의 결과는 두 지점에서 모두 기존의 자료들에 비해 상관계수 및 오차 등이 개선되었으며, 특히 산포도와 시계열의 결과를 확인하여도 기존의 자료들과 비교하였을 때, 산포되는 경향 줄어든 것을 확인하였다.

전반적으로 본 연구를 통해서 다른 방법으로 산정된 결과들을 융합함으로써 개선된 결과를 산출할 수 있다는 데에 큰 의미가 있으며, 추후, 본 방법을 이용한 개선된 증발산 자료를 다른 분야의 연구에서 불확실성을 줄일 수 있는 입력 자료를 활용한다면, 보다 개선된 결과 및 정확성 있는 분석에 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Baek, J., Sur, C., and Choi, M. (2013). "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., Park, J., and Choi, M. (2016). "Assessment of actual evapotranspiration using modified satellite-based priestley-taylor algorithm using MODIS products." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 11, pp. 903-912.
- 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.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin, Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 229, No. 1-2, pp. 87-100.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M. A., Feddes, R. A., and Hollslag, A. A. M. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 212, No. 13, pp. 198-212.
- Byun, K., Liaqat, U. W., and Choi, M. (2014). "Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo-and heterogeneous land surface conditions." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 197, pp. 169-187.

- Byun, K., Shin, J., Lee, Y., and Choi, M. (2013). "Validation of net radiation measured from fluxtower based on eddy covariance method: case study in Seolmacheon and Cheongmicheon Watersheds." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 111-122.
- Cleugh, H. A., Leuning, R., Mu, Q., and Running, S. W. (2007). "Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106, No. 3, pp. 285-304.
- 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 of Environment*, Vol. 112, No. 3, pp. 901-919.
- Jeong, S., Jang, K., Kang, S., Kim, J., Kondo, H., Camo, M., Asanuma, J., Saigusa, N., Wang, S., and Han, S. (2009). "Evaluation 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, 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-." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 6, pp. 95-107.
- Lee, Y., Lee, J., Choi, M., and Jung, S. (2015). "Evaluation of MODIS-derived evapotranspiration according to the water budget analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 831-843.
- Miralles, D. G., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H. C., Holmes, T. R. H., and Dolman, A. J. (2011). "Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 967-981.
- Monteith, J. L. (1965). "Evaporation and the environment." *Symposia of the Society for Experimental Biology*, Vol. 19, pp. 205-234.
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., and Running, S. W. (2007). "Development of a global evapo-transpiration algorithm based on MODIS and global meteorology data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, No. 4, pp. 519-536.
- Mu, Q., Zhao, M., and Running, S. W. (2011). "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 8, pp. 1781-1800.
- 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." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Priestley, C. H. B., and Taylor, R. J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, No. 2, pp. 81-92.
- Shuttleworth, W. J., and Wallace, J. S. (1985). "Evaporation from sparse crops-an energy combination theory." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 111, No. 469, pp. 839-855.
- Sur, C., Han, S., Lee, J., and Choi, M. (2012). "Estimation of satellite-based spatial evapotranspiration and validation of fluxtower measurements by eddy covariance method." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 435-448.
- Taylor, K. E. (2001). "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 106, No. D7, pp. 7183-7192.
- Wang, K., and Liang, S. (2008). "An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 9, No. 4, pp. 712-727.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zhu, G., Li, X., Zhang, K., Ding, Z., Han, T., Ma, J., Huang, C., He, J., and Ma, T. (2016). "Multi model ensemble prediction of terrestrial evapotranspiration across north China using Bayesian model averaging." *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 16, pp. 2861-2879.