J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 10 (2021), pp. 835-848
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.10.835
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Evaluation of satellite-based evapotranspiration and soil moisture data applicability in Jeju Island

Jeon, Hyunho[a] · Cho, Sungkeun[b] · Chung, Il-Moon[c] · Choi, Minha[d,e]*

[a]Graduate Student, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[b]Graduate Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[c]Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea
[d]Professor, School of Civil, Architecture Engineering & Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[e]Professor, Department of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 21-040
Received: 28 May 2021; Revised: 20 August 2021; Accepted: 20 August 2021

Abstract

In Jeju Island which has peculiarity for its geological features and hydrology system, hydrological factor analysis for the effective water management is necessary. Because in-situ hydro-meteorological data is affected by surrounding environment, the in-situ dataset could not be the spatially representative for the study area. For this reason, remote sensing data may be used to overcome the limit of the in-situ data. In this study, applicability assessment of MOD16 evapotranspiration data, Globas Land Data Assimilation System (GLDAS) based evapotranspiration/soil moisture data, and Advanced SCATterometer (ASCAT) soil moisture product which were evaluated their applicability on other study areas was conducted. In the case of evapotranspiration, comparison with total precipitation and flux-tower based evapotranspiration were conducted. And for soil moisture, 6 in-situ data and ASCAT soil moisture product were compared on each site. As a result, 57% of annual precipitation was calculated as evapotranspiration, and the correlation coefficient between MOD16 evapotranspiration and GLDAS evapotranspiration was 0.759, which was a robust value. The correlation coefficient was 0.434, indicating a relatively low fit. In the case of soil moisture, in the case of the GLDAS data, the RMSE value was less than 0.05 at all sites compared to the in-situ data, and a statistically significant result was obtained as a result of the significance test of the correlation coefficient. However, for satellite data, RMSE over than 0.05 were found at Wolgak and there was no correlation at Sehwa and Handong points. It is judged that the above results are due to insufficient quality control and spatial representation of the evapotranspiration and soil moisture sensors installed in Jeju Island. It is estimated as the error that appears when adjacent to the coast. Through this study, the necessity of improving the existing ground observation data of hydrometeorological factors is emphasized.

Keywords: Remot sensing, Evapotranspiration, Soil moisture, Jeju Island

제주도에서의 위성기반 증발산량 및 토양수분 적용성 평가

전현호[a] · 조성근[b] · 정일문[c] · 최민하[d,e]*

[a]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 석박통합과정, [b]성균관대학교 수자원학과 석박통합과정,
[c]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구원, [d]성균관대학교 건설환경공학부 교수, [e]성균관대학교 수자원학과 교수

요 지

제주도는 지질 및 수문계의 특이성으로 인해 수문기상인자 분석을 통한 수문 분석 및 효율적인 물관리가 필수적이다. 하지만 수문기상인자의 지상관측자료는 주변 환경에 의한 영향이 크게 작용하여 공간적인 대표성을 띄기 힘들며, 이를 극복하기 위해 원격탐사 방법이 사용된다. 본 연구에서는 제주도에서 기존에 다른 지역들에서 적용성이 검증된 바 있는 MOD16 증발산량, Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 증발산량, GLDAS 토양수분, Advanced SCATerometer (ASCAT) 토양수분 산출물들의 적용성을 평가하였다. 증발산의 경우 강수량과의 총량 비교 및 플럭스타워 증발산량 관측자료와의 비교를 시행하였고, 토양수분의 경우 6개 토양수분 관측소의 관측자료와 비교하였다. 그 결과 증발산량의 경우 연 강수량의 57%가 증발산량으로 산출되었고, MOD16 증발산량과 GLDAS 증발산량의 상관계수는 0.759로 양호한 값이 산출되었으나, 플럭스타워 증발산량 데이터와 MOD16 증발산량의 상관계수는 0.289, GLDAS 증발산량과의 상관계수는 0.434로 상대적으로 적합성이 낮게 나타났다. 토양수분의 경우 GLDAS 자료의 경우 모든 지점에서 지점자료와 비교하였을 때 RMSE 값은 0.05 미만의 값을 나타냈고, 상관계수의 유의성 검정 결과 통계적으로 유의미한 결과를 얻었다. 하지만 위성자료의 경우 월각지점에서 0.05 이상의 RMSE 값이 나타났고, 세화, 한동 지점에서 상관성이 없다는 상관계수의 유의성 검정 결과를 확인하였다. 이는 제주도에 설치된 증발산량 및 토양수분 센서의 품질관리 및 공간대표성을 띄는 면단위 센서가 충분히 제공되지 않아 위와 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된며 더불어 지점 자료의 관리 및 위성, 재분석 자료의 경우 관측 픽셀이 해안과 인접할 시 나타나는 오차로 추정된다. 본 연구를 통해 기존 수문기상인자 지상관측 자료의 개선 필요성을 역설하고, 이를 통해 제주도에서의 효율적인 물관리 를 위한 기반을 구축하고자 한다.

핵심용어: 원격탐사, 증발산, 토양수분, 제주도

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

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화와 도시화, 이상기후 등으로 인한 강우량의 불확실성 및 수질오염으로 효율적인 물관리가 요구되고 있으며, 특히 강수량의 절반이상이 장마철에 집중되고 1인당 사용 가능 수자원이 적은 우리나라에서는 물관리 평가 및 새로운 수자원 관리 패러다임 마련을 위해 전반적인 수문기상인자의 순환에 대한 연구가 필수적이다(Choi *et al*., 2017). 제주도는 우리나라에서 대수층의 투수율이 제일 높은 지역 중 하나이며, 농업 및 기타 생활용수가 지하수에 대부분 의존하는 특이성으로 인해 강수량, 지하수위 등의 수문기상인자의 과거 거동 분석 및 미래 수문변동의 예측을 통한 합리적인 수문 분석이 필수적이다(Song and Choi, 2012). 증발산(evapotranspiration, ET)은 표면에서의 물이 기화하는 증발과 식생에서의 증산을 아우르는 수문기상인자로, 강우와 함께 물 평형에 가장 큰 영향을 끼치는 인자이다(Allen *et al*., 2021). 물의 상태 변화로 인한 물과 에너지의 이동은 소규모 유역에서의 물 관리부터 대륙 단위의 기후변화와 도시에서의 열 분포 변화 등 다양한 환경변화에 핵심적인 요인으로, 구체적인 분석을 위해 증발산의 정확한 파악이 필수적으로 요구된다(Fisher *et al*., 2017).

토양 수분은 강우를 통해 지상에 도달한 후 지표면에 저류하는 물로, 토양의 공극 내에 존재하는 수분을 의미하며 물 순환, 에너지순환 과정에서 지표면과 대기 간의 상호작용을 분석하기 위한 중요한 수문인자이다(Brocca *et al*., 2011; Zohaib *et al*., 2017; Kim *et al*., 2018; Nguyen *et al*., 2019). 따라서 토양수분은 식생의 생장을 주도하여 농업적 가뭄과 같은 재해를 관측할 때 유용하게 활용되며 지하수가 활발히 이용되는 지역에서는 지하수 공급량 추정을 위해 간접적으로 증발산의 공급 역할을 하여 가용 수자원의 산정에 도움을 주며, 기후변화의 경향을 파악하는 데에도 활용된다(Choi and Jacobs, 2007; D'Odorico *et al*., 2007). 또한, 토양수분은 지표면과 대기 사이의 물/에너지 순환을 조절하며 이를 통해 강우, 유출, 증발산 및 침투와 같은 전반적인 물 순환 과정에 직접적으로 관여한다(Walker *et al*., 2001). 따라서 토양수분의 변동성을 이해하고 시공간적인 거동을 파악하는 것이 거시/미시적인 물 순환에 대한 이해를 가능케 한다. 자료의 실용적인 적용에 있어서는 농업 및 임업 분야에서 가뭄 및 산불에 대응할 수 있게 해주는 모니터링 자료로써 활용이 가능하며, 이외에도 기후변화 연구의 연구 자료로 활용할 수 있다.

이와 같은 수문기상 인자들은 오랜 기간동안 측정 장비 및 기술이 발전해왔다. 증발산의 경우 원통형 증발접시에 물을 채워 하루 동안의 물 높이 차이를 이용하여 증발산량을 추정하는 비교적 간단한 증발접시법과 공기 중의 난류 플럭스에서 풍속 및 기체 농도를 이용하여 증발산량을 산정하는 에디공분산 방법 등 정확도 및 측정 난이도가 다른 방법들이 발전되었다(Jeong and Kang, 2009; Kang *et al*., 2018). 토양 수분의 경우 각 지점에서 관측한 토양수분량으로 대표적으로 실험을 통한 건토중량 측정방법과(Dorigo *et al*., 2011) Time Domain Reflectometry (TDR) 또는 Frequency Domain Reflectometry (FDR)와 같은 유전율식 토양수분 측정 방법(Mittelbach *et al*., 2012; Skierucha and Wilczek, 2010; Herkelrath *et al*., 1991)이 있으며 이 외에도 토양내의 부압을 이용한 장력계를 활용하는 방법, 전기전도도를 이용하는 방법 등이 있다. 하지만 이러한 지상관측 방법은 날씨, 고도, 경사도, 식생 분포 등 주변 환경에 민감하여 공간적인 대표성을 띄기 힘들며, 이에 대한 대안으로 인공위성 자료 등을 활용한 원격탐사 기술이 제시되었다.

원격탐사 기술 기반 증발산량 산정 방법들은 기존의 물리식(Monteith, 1965; Shuttleworth and Wallace, 1985)들에 기반하여 개발 및 발전되어왔다(Mu *et al*., 2007, 2011; Fisher *et al*., 2008; Yao *et al*., 2013). 각 증발산량 산정 모델들은 세부적인 방법론과 사용되는 인자들이 차이가 있어, 적용 지역의 특성에 따라 검증 및 보정작업을 통한 최적화가 필요하다. 또한 위의 모델들을 연구자 개인이 직접 시험지역에서 구동하여 증발산량을 산정하는 방법 외에도, 해당 모델들을 활용한 여러 전 지구 단위 증발산량 산출물들이 현재 제공되고 있으며 이미 산출물들의 적용성이 여러 지역에서 평가된 바 있다(Wang *et al*., 2013; Park and Choi, 2015; Alemayehu *et al*., 2017; Moshir *et al*., 2021). 또한 원격탐사 기반 면 단위 토양수분량 산정 방법으로는 위성, 항공 영상 및 Cosmic-ray 센서 등의 원격탐사 기법을 활용한 토양수분 관측 방법들이 있다(Kim *et al*., 2016; Jeong *et al*., 2018). 대표적인 면 단위 자료인 위성 기반 관측 방법으로는 Active, Passive Microwave 센서를 이용한 방식이 있으며, 각 센서 종류 별 위성 관측 자료의 특징이 상이하고 사용되는 알고리즘에도 차이가 있다. Passive Microwave 센서의 경우 지표면에서 방출되는 신호를 포착하여 토양수분에 의한 신호를 분별하는 방식으로 관측하며, 제공되는 자료들의 시간해상도가 우수하지만 공간해상도가 10 km 이상으로 복잡한 지형에서는 활용하기에 제약이 있으며, 바다 인근의 지형에서는 정확한 자료가 측정되지 않는다(Hong and Shin, 2011). 반면 Active Microwave 센서의 경우 위성에서 신호를 발사한 후 지표면에 충돌한 신호를 감지하여 토양수분을 관측하며, Passive Microwave 센서 대비 공간해상도는 뛰어나지만, 3 km 내의 고해상도 자료는 6일 ~ 12 일 단위로 제공되어 토양수분의 변동을 포착하기 어렵다(Lievens *et al*.,

2017). 하지만 Active Microwave 센서의 경우 해안지형에 의한 영향을 비교적 덜 받아 해안지형에서도 연구를 위해 자료의 활용이 가능하다(Högström *et al.*, 2018). 토양수분 산출에 활용되는 위성 중 한반도를 관측하는 위성으로는 GCOM W1(Global Change Observation Mission 1st-Water) 위성의 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 자료, Metop A/B ASCAT (The Advanced Scatterometer), Sentinel-1 등의 위성이 있으며 해당 센서의 특성에 따라 그 정확도가 상이하게 나타나고 있다. 각 위성의 공간해상도는 AMSR2 의 경우 10 km, Metop A/B ASCAT 의 경우 12.5 km, Sentinel-1 의 경우 10 m 이며 AMSR2는 일 간 자료를 제공하고, ASCAT 의 경우 하루 두 번 한반도를 촬영하며, Sentinel-1 위성은 2019년부터 6일 단위로 관측 자료를 제공하고 있다. 또한 지표면 모델을 활용한 공간 분포 토양수분 자료로 재분석 자료가 전 세계적으로 제공되고 있으며, 해당 자료의 경우 강우, 고도, 토지피복 등과 같은 여러 보조자료를 활용하여 토양수분을 산출한다(Berg *et al.*, 2003; Zeng *et al.*, 2015).

본 연구에서는 수문 특성이 한반도와 차이가 큼과 동시에 농업, 관광, 식수 등의 필요성으로 실질적으로 수문 분석이 요구되는 제주도에서 위성 영상 기반 증발산량 및 토양수분 산출물의 적용성을 평가하고자 하였다. 위성영상 기반 제주도 수문기상인자 분석을 위해 1) 2019년부터 2020년까지 제주도 전역 MOD16 및 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 기반 연 증발산량 산출물과 연 강수량의 분석, 2) 2020년 플럭스타워 기반 일 증발산량과 MOD16 및 GLDAS 기반 일 증발량 산출물의 분석, 3) 지점 토양수분을 기준으로 한 ASCAT 토양수분 자료 및 GLDAS 토양수분 자료 검증 및 평가 작업을 시행하였으며, 제주도에서 보다 신뢰도 있는 지점 및 원격탐사 기반 수문기상자료를 생산하기 위한 방안을 모색하고자 한다.

2. 연구 지역 및 방법론

2.1 연구지역

본 연구에서는 제주도의 증발산량 분석을 위해 4개의 기상청 ASOS 관측소와 1개의 플럭스타워가 사용되었다. 사용된 기상청 기상관측소는 제주(33.51°N, 126.53°E), 고산(33.29°N, 126.16°E), 서귀포(33.25°N, 126.56°E), 성산(33.39°N, 126.88°E)으로 각각 제주도 해안가의 끝단에 설치되어 있으며, 사용된 플럭스타워는 서귀포 인근 난대림(33.32°N, 126.57°E)에 설치되어 있다(Fig. 1). 기상청 기상관측소에서는 강수량 데이터가 사용되었으며, 제주 난대림 플럭스타워에서는 증발산량 데이터가 사용되었다.

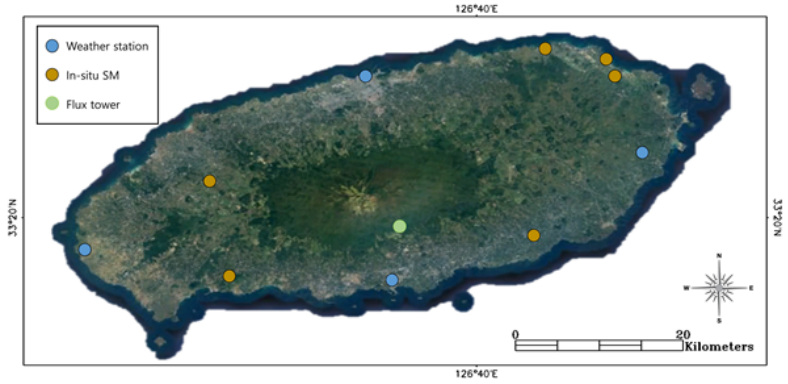

Fig. 1. Major geographical regions of study area and spatial distribution of in situ stations

Table 1. Information of soil moisture measurement sites

Location	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Start date	Soil Property
Gamsan	33.26	126.36	125.4	2014-04-25	Silty Clay Loam
Sinheung	33.31	126.75	45.0	2016-03-02	Silty Clay Loam
Jungmun	33.35	126.25	163.8	2014-04-25	Silty Clay Loam
Sehwa	33.51	126.84	36.0	2017-06-30	Silty Clay Loam
Wolgak	33.38	126.33	308.0	2007-01-01	Silty Clay Loam
Handong	33.53	126.83	9.0	2007-01-01	Silty Clay Loam

또한 제주도의 토양수분 분석을 위해 6개의 토양수분 관측소가 본 연구에서 활용되었으며 관측소 정보는 Table 1과 같다. 해당 관측소들은 서귀포 지역 2개 지점, 제주시 4개 지점에 해당하며, 1개 지점을 제외하고 모두 해안가에 위치해 있다. 토양수분 관측소 선정 시 고려한 사항은 위성 및 재분석 자료와의 시간적 일치성 및 위성 관측 자료의 유무이며 해당 관측소들을 활용하여 위성 및 재분석 토양수분 자료와의 비교분석을 수행하였다.

2.2 Mod16 실제 증발산량 산출물

MOD16은 지표면에서의 증발과 식생에서의 증산을 모두 포함하는 전 세계 대륙 단위의 실제 증발산량을 제공하는 산출물이다. 증발산량을 산정하는 방법은 Penman-Monteith 알고리즘에 기반하여 수정된 방법이 사용되었으며 자세한 알고리즘은 Mu *et al*. (2007)에서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 제주도 증발산량 분석을 위해 MOD16A2 자료를 사용하였으며, 이는 8일간의 증발산량 자료($kg/m^2/8d$)가 $0.5 \times 0.5\ km^2$의 공간해상도로 제공되고 있다. 제주도 전역은 약 7,000여 개의 픽셀들로 이루어져 있으며, 효과적인 증발산량 분석을 위해 mm/day로 단위 변환을 시행하였다(Tang *et al*., 2015).

2.3 Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

GLDAS는 인공위성 자료와 지점 관측 자료 등 다양한 관측자료들에 다수의 지표면 모델들을 활용한 자료동화 데이터 시스템을 말한다(Park and Choi, 2015). 산출된 수문 기상 인자들은 0.25° × 0.25° 에서 1° × 1° 의 공간 해상도와 3 시간에서 한 달의 시간 해상도로 제공되며, GLDAS와 이에 사용된 자료들에 대한 자세한 설명은 NASA의 Hydrology Data and Information Services Center 에서 확인할 수 있다(http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/hydrology). 본 연구에서는 증발산량 분석을 위해 3시간 단위 시간 해상도와 0.25° 공간해상도의 GLDAS Noah (version 2.1) 자료에서 제공되는 잠열 플럭스 데이터를 사용하였으며, 효과적인 분석을 위해 일 단위 증발산량(mm/day)로 변환하였다. 또한 GLDAS 재분석 자료에서 제공되는 토양수분 값을 잠열 플럭스 데이터와 같은 시공간 해상도로 추출하여 활용하였으며, 강우 입력자료의 특성을 반영하는 재분석 자료와 위성 기반 토양수분 자료 간 차이점을 분석하기 위해 재분석 자료 기반 10 cm 깊이의 토양수분 값을 활용하였다.

2.4 ASCAT

본 연구에서는 한반도에서 가장 높은 정확도를 나타내는 것으로 알려져 있는 Metop A/B ASCAT 위성 자료를 활용하여 제주도 6개 지점을 포함하는 픽셀의 토양수분량을 본 연구에서 활용하였다. ASCAT 자료는 대표적인 Active Microwave 방식을 활용하는 토양수분 자료로, C-band 영역의 신호를 지표면으로 발사하여 토양수분에 의한 신호를 감지하고 있으며, Water Cloud Model 및 신호의 입사각을 활용하여 지표면 식생, 수체 등의 영향을 고려한 토양수분 자료이다(Bartalis *et al*., 2007). ASCAT 자료의 경우 토양수분 함량이 백분위로 표현되며, 이를 m^3/m^3 로 변환하기 위해 토양 공극값을 곱해 주어야 한다(Naeimi *et al*., 2009). 따라서 본 연구에서는 농촌진흥청 흙토람에서 제공하는 토양도 자료를 기반으로 제주 토양수분 관측 지점의 토양 공극값을 구하여 위성 기반 토양수분 자료를 m^3/m^3 단위로 산출하였다.

2.5 통계학적 분석

본 연구에서는 여러 위성 기반 자료들의 제주도에서의 적용가능성을 평가하기 위해 지상관측자료와 통계분석을 시행하였다. 먼저 자료간의 일치성을 평가하기 위해 상관 계수와 Index of Agreement (IOA)를 사용하였으며, 자료의 편향성 및 절대적인 값의 차이를 분석하기 위해 bias와 Root Mean Squared Error (RMSE)를 사용하였으며 통계식은 Khan *et al*. (2018)에서 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 위성 기반 증발산량과 강수량 분석

제주도 전역의 연 강수량 계산을 위해, 제주도 끝단에 위치한 각 기상관측소 강수량의 평균값이 제주도 전역의 강수량을 대표한다고 가정하고 2019년과 2020년의 제주도 전 지역 강수량을 산정하여 MOD16 및 GLDAS 증발산량 산출물과 분석하였다.

MOD16 증발산량의 시간해상도는 8일이지만, 결측값이 발생하는 시점이 있어 실질적으로 데이터가 제공되는 날들의 간격이 일정하지 않다. 관측되는 데이터가 8일에서 16일 등 제공되지 않는 나머지 기간 동안의 값을 대표하기에, 단순히 관측된 데이터 만으로 연 증발산량을 계산할 시 결측값이 발생한 기간은 반영이 되지 못해 연 증발산량이 편향될 가능성이 크다. 이를 보정하기 위해, 증발산량은 여름철에 증가하고 겨울철에 감소하는 계절성을 띤다는 특성을 고려하여 변환된 일 단위 증발산량 데이터를 내삽(interpolation)을 통해 관측되지 않은 나머지 증발산량을 추정하여 연 증발산량을 계산하였다. Fig. 2에서 2019년과 2020년의 시계열 분포가 계절성을 따라 비슷하게 거동하는 것을 확인할 수 있다.

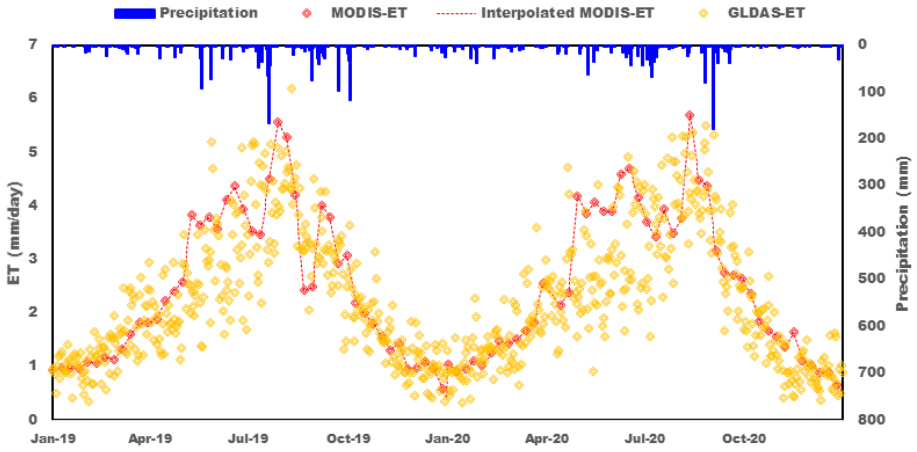

Fig. 2. Time series graph of satellite based evapotranspiration

본 연구에서 연 누적 강수량은 2019년과 2020년 각각 1617.7 mm, 1420.5 mm, MOD16연 누적 증발산량은 각각 887.9 mm/yr, 927.3 mm/yr, GLDAS 연 누적 증발산량은 각각 821.3 mm/yr, 829.8 mm/yr로 나타났다. 증발산량과 강수량의 비율은 MOD16의 경우 2019년과 2020년 각각 54.89%, 65.28%로 나타났으며 총 연구 기간의 비율은 59.74%로 나타났고, GLDAS의 경우 2019년과 2020년 각각 50.77%, 58.41%로 나타났으며 총 연구 기간의 비율은 54.34%로 나타났다. 이는 한반도 중부지역에서 강수량의 약 6 ~ 70%가 대기 중으로 증발하는 것에 비해 적은 비율이다. 하지만, 제주도에서의 강우 분포는 고도 및 경사의 영향을 받아 해안지역보다 한라산 근처 내부 지역에서 더 강수량이 높게 나타나는 경향이 있다(Um *et al.*, 2011). 이에 본 연구에서 강수량 계산을 위해 사용된 기상관측소가 해안지역에 위치하여 강수량이 실제 제주도 전역의 강수량에 비해 과소산정되었을 것으로 판단된다. 또한 한반도 중부지역의 농지와 산지에서 MOD16 기반 증발산량이 과대산정되는 경향이 있는 것과 마찬가지로(Khan *et al.*, 2018) 제주도에서도 MOD16 기반 증발산량이 과대 산정되었을 것으로 판단된다. 위의 증발산량과 강수량의 비율에 영향을 끼칠수 있는 두 근거를 고려하면 본 연구에서 산정된 비율이 실제 비율보다 높게 산정된 것으로 사료된다. 이는 대수층이 다공질의 현무암질 용암류로 이루어져 투수성이 높아, 한반도 지역보다 유출 및 지하수 함양량이 높은 제주도의 특성상, 증발산량과 강수량의 비율이 한반도 지역보다 낮게 산정되어야 하는 것에 적합하게 산정된 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2011).

3.2 위성 기반 증발산량과 플럭스타워 증발산량 분석

2020년 제주 난대림 플럭스타워의 잠열 플럭스(Latent heat flux, LE) 데이터를 이용하여 해당 픽셀에서의 MOD16 증발산량 데이터와 분석하였다. 제주 난대림 플럭스타워는 2019년 2월 26일부터 현재까지 데이터가 제공되고 있으나, 2019년 12월 11일 전까지의 데이터는 제공되지 않는 데이터가 많으며, 결측값 또한 많이 발생하여 2020년의 데이터만을 사용하여 분석하였다. 또한, 2020년의 데이터에서도 결측값과 이상치(spike)가 다수 발생하여, 플럭스타워 데이터가 품질 관리(Quality Control, QC) 프로세스가 적절히 수행되지 않은 것으로 사료 된다.

제주 난대림 플럭스타워 데이터는 30분간격으로 측정되어 제공하고 있으며, 효과적인 분석을 위하여 일 단위 증발산량 데이터로 변환하여 분석하였다. 2020년의 366개 일 단위 증발산량 데이터 중 19개의 -1 mm/day 미만의 이상치와 3개의 9 mm/day를 초과하는 이상치가 있으며 그 값은 -56.96 mm/day부터 18.20 mm/day로 매우 넓게 분포하고 있다. Fig. 3에서는 분포 확인의 편의성을 위해 위의 비이상적인 값들을 제외하고 증발산량의 범주를 -1 mm/day부터 9 mm/day로 축소하였으며, 통계 분석은 해당 값들을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우 두 가지 모두 시행하였다. 한반도 중부지방에서의 증발산량이 보통 6 mm/day 미만으로 나타나고 있으나(Lee and Kim, 2016; Khan *et al.*, 2018), 제주 난대림 플럭스타워의 증발산량 자료의 품질 및 공간적인 특성이 한반도 중부지방에서의 조건과 달라 증발산량 범주를 -1 mm/day부터 9 mm/day로 지정하였다.

먼저 위성 기반 증발산량의 경우, Khan *et al.* (2018)의 MOD16 증발산량 산출물이 한반도 중부지역에서 0.05 ~ 0.5 mm/day 정도 높게 산정되는 경향이 있고 GLDAS의 증발산량 데이터가 한반도에서 0.5 mm/day 정도 낮게 산정되는 경향이 있으나 전체적으로 일치성이 높게 나타난다는 선행연구와 마찬가

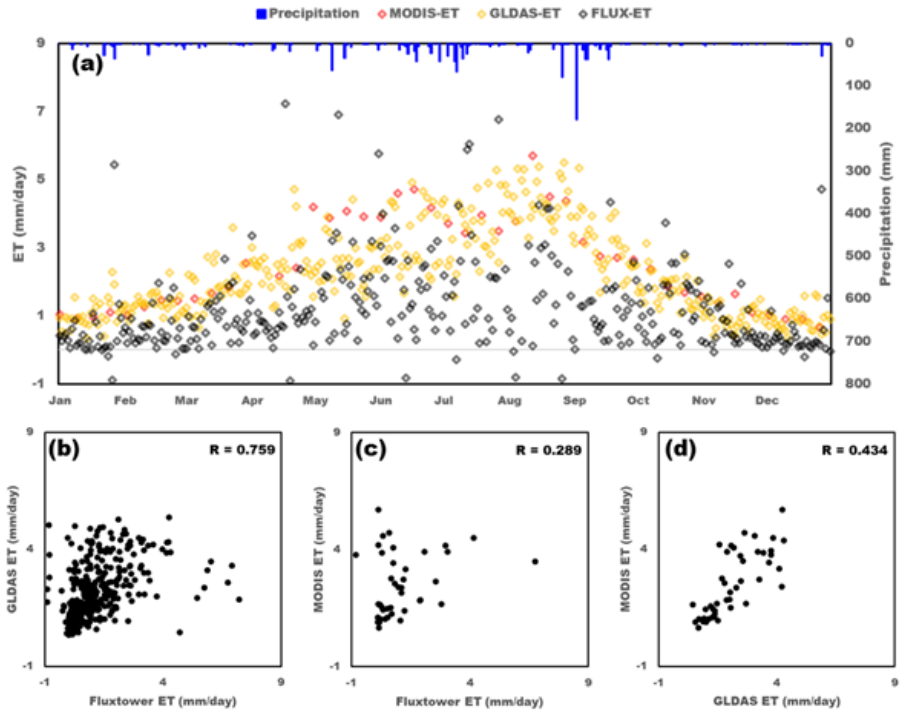

Fig. 3. Displays time series (a) and scatter plot (b), (c), (d) analysis of actual evapotranspiration form two satellite based evapotranspiration products (MOD16 and GLDAS) and their comparison with flux tower measurements

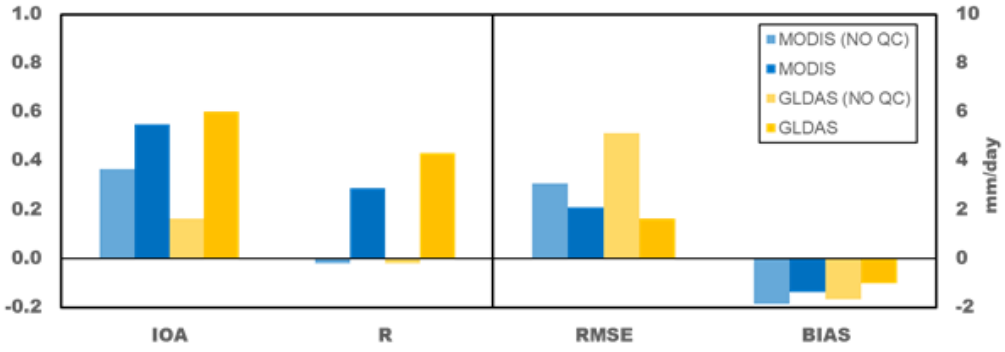

Fig. 4. Physical accuracy comparisons of original data and quality controlled data

지로, 제주도에서의 GLDAS 증발산량과 MOD16 증발산량의 일치성이 높게 나타나고 GLDAS가 과소 산정되는 것으로 나타났다. 하지만, 플럭스타워 증발산량과 분석하였을 경우, Fig. 3(a)에서 플럭스타워에서 관측된 증발산량보다 MOD 16 및 GLDAS 기반 증발산량이 과대산정되는 경향을 보이며, Figs. 3(b) and 3(c)와 같이 자료간의 일치성이 부족한 것으로 나타났다. 이는, 위성 기반 증발산량이 적절하게 산정되었다고 판단되는 것에 비해 플럭스타워에서 결측값과 이상치가 다수 발생하였기에 제주 난대림 플럭스타워의 데이터의 품질관리가 적절하게 수행되지 않아 추가적인 품질 관리가 필요한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 제주 난대림 플럭스타워 증발산량 데이터 중 -1 mm/day부터 9 mm/day 범위 외의 값들을 제거하는 임시 품질관리 작업이 시행된 데이터와 품질 관리 작업이 시행되지 않은 데이터의 위성 기반 증발산량 데이터와 통계 분석을 시행한 결과이다. 비정상적인 이상치들만 임시적으로 제거하였음에도, 데이터의 일치성 및 편향 정도가 큰 폭으로 양질의 결과가 나오는 것을 확인할 수 있다. 여전히 일치성에 있어 한반도 및 전 세계에서 이루어진 검증작업에 비해 부족하게 나오는 것은 사실이나, 체계적인 전처리 및 품질 관리 작업이 진행된다면 실질적으로 제주도 증발산량 검증을 위한 기준 데이터가 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 위성 및 재분석 자료 기반 토양수분 분석

본 연구에서는 감산, 신흥, 중문, 세화, 월각, 한동 지점의 관측 토양수분 자료와 해당 지점을 포함하는 픽셀의 위성(Metop-A/B ASCAT) 및 재분석(The Global Land Data Assimilation, GLDAS) 토양수분 자료가 2018년 6월부터 2020년 12월에 걸쳐 활용되었다.

Fig. 5에는 각 지점 별 위성 토양수분 및 지점 관측 토양수분 간 시계열 그래프가 나타나 있다. ASCAT 자료의 경우 신흥 지점을 제외하고 다른 지점들에서 모두 토양수분을 지점 대비 매우 낮게 산정하고 있는 것으로 볼 수 있다. 이는 0.3 m^3/m^3을 초과하는 토양수분 조건에서 C-band Microwave 센서의 신호가 포화되기 때문이며, 습윤한 토양수분 조건에서는 지표면이 충돌한 신호의 정반사를 일으켜 돌아오는 신호를 매우 적게 하여 낮은 토양수분량이 산출되는 것으로 판단된다. 또한 3시간 단위로 제공되는 재분석자료와 달리 일 간 2개 자료만이 산출되는 ASCAT 위성 자료의 경우 극심한 토양수분 변동성을 아래 Fig. 5의 재분석 자료 수준으로는 반영하지 못하는 것을 볼 수 있다. 기간 별로 시계열 그래프를 살펴 보면, 토양수분의 변동성이 빈번한 시기에 ASCAT 자료의 경향이 지점 자료와 더 큰 차이를 나타내고 있는데, 이는 위성 자료 대비

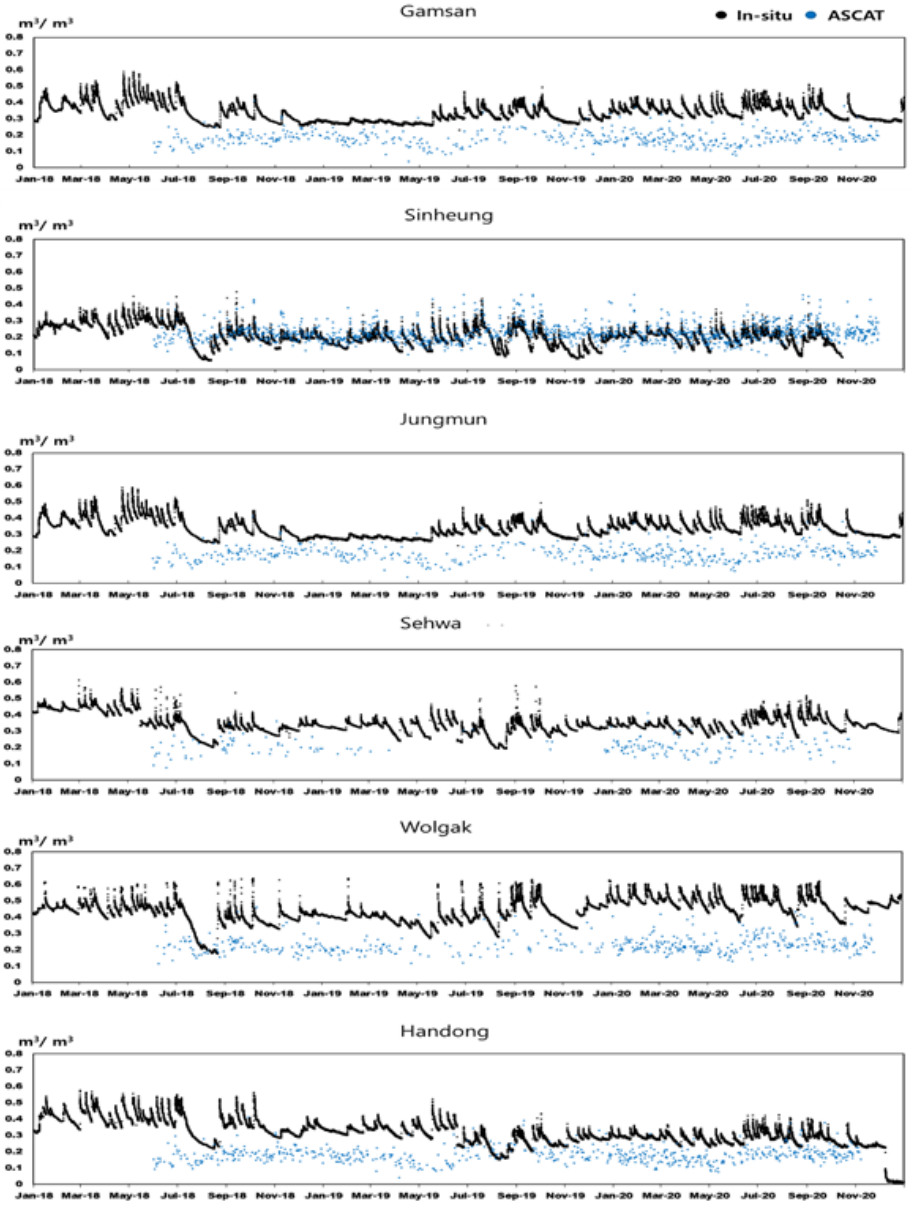

Fig. 5. Time series graph for comparison of in-situ and ASCAT soil moisture data

시간해상도가 월등한 지점 토양수분 관측 결과를 위성 자료가 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. 특히 세화 지점의 경우 ASCAT 자료 수득률이 타 지점 대비 매우 떨어져 해당 지점에서는 위성 자료 활용을 위해 타 위성 자료 및 지점 관측 자료와의 융합을 통해 수득률을 개선이 필요하다. 하지만 시계열 그래프 상으로 전 지점에서 지점 토양수분의 상승 및 하강 패턴을 ASCAT 자료 또한 나타내고 있으며, 향후 통계 기법 및 지점 관측소 정보 반영을 통해 위성 자료의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 각 지점 별 재분석 자료와 지점 자료간의 비교를 위한 시계열 그래프가 나타나 있다. 해당 자료 중 세화와 한동 지점을 제외하고는 모두 토양수분을 지점에 비해 낮게 관측하고 있었고, 이는 강우가 적은 제주 해안 토양수분 지점의 낮은 강우 입력 자료에 의한 영향으로 판단된다. GLDAS 자료의 경우 공간 해상도가 25 km 로 픽셀 사이즈가 ASCAT 자료(12.5 km)대비 4배 이며 이로 인해 해당 지점의 지점 토양수분 관측 결과가 픽셀 내의 대표 값과 차이를 나타내는 것 또한 오차의 원인으로 판단된다. 이로 인해 한동 지점에서는 2019년 7월부

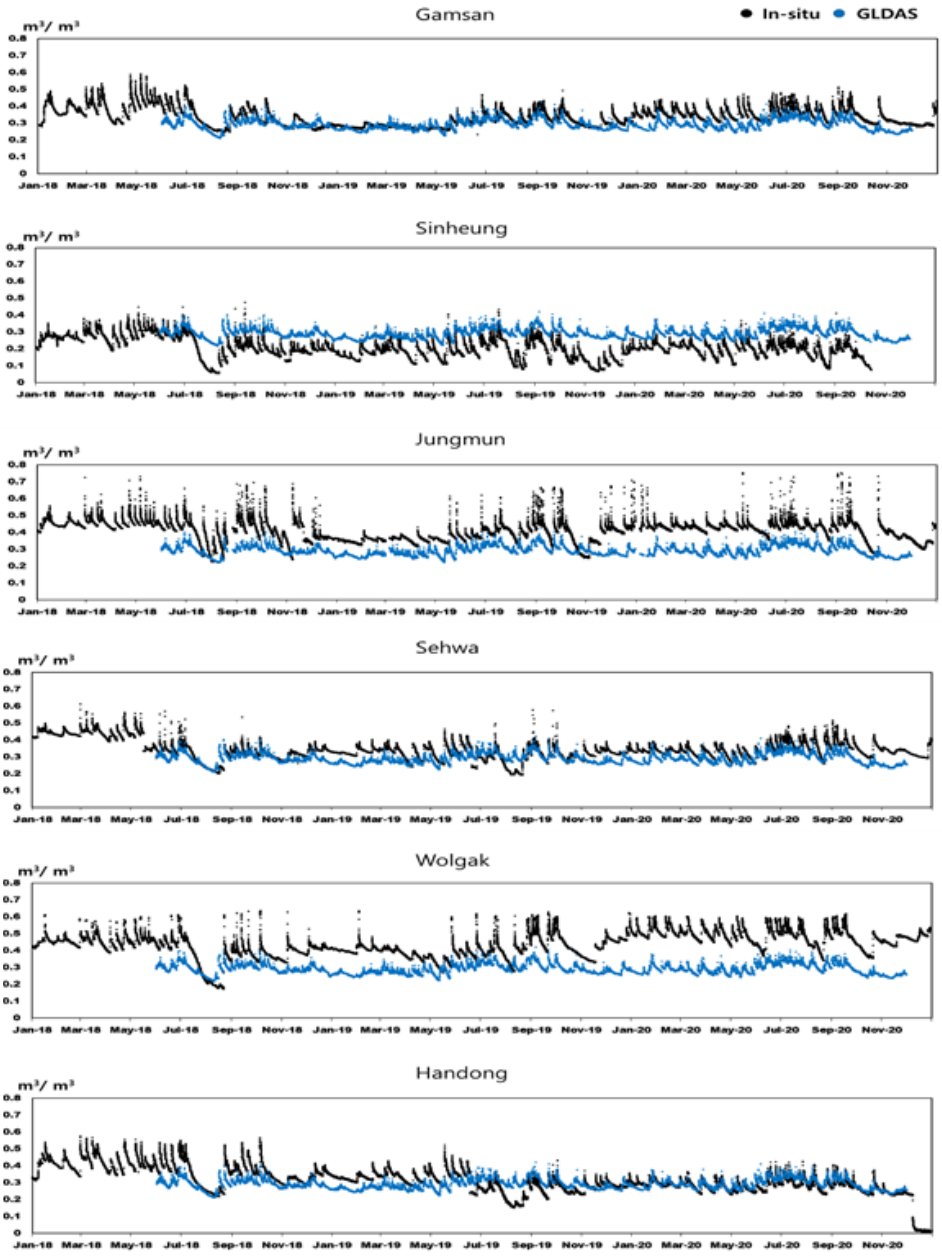

Fig. 6. Time series graph for comparison of in-situ and GLDAS soil moisture data

터 9월 사이 토양수분이 감소하는 시기를 재분석자료가 반영하지 못하는 것을 확인할 수 있는데 이는 재분석자료의 적은 변동성이 제주 해안 지역의 높은 변동성을 띄는 토양수분량을 완전히 반영하지 못한 결과로 추정된다. 하지만 전 지점에서 재분석자료가 지점 관측 토양수분량의 증가 및 감소 경향을 바르게 반영하고 있으며, 특히 감산 지점의 경우 재분석 자료가 높은 정확성을 보이고 있다. 따라서 향후 제주도 지역의 정밀한 토양수분 관측소를 선별하여 관측 네트워크를 구축하고 Cosmic-ray 와 같은 면단위 토양수분 관측 시스템을 설치하여 원격탐사 자료를 보정할 시 물 관리 및 농업, 방재 분야에서 활용 가능한 토양수분 자료의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

제주도 토양수분 특성을 반영하지 못한 ASCAT 자료의 경우 Fig. 7과 같이 신흥 및 중문 지점을 제외하고 모두 열악한 토양수분 관측 정확도를 보였으며, 이는 제주 토양수분 특성을 반영한 위성 자료 산출을 위해서는 지점 및 기타 수문기상 자료를 함께 활용한 보정이 필요하다는 것을 의미한다. 지점별로 살펴보면, 신흥 지점의 경우 시계열 그래프에서 분석한 것과 같이 지점 토양수분의 관측 범위가 ASCAT C-band 로 관측 가능한 범위 내에 분포하고 있어 해당 지점에서 ASCAT 토양수분 산출 알고리즘이 타 지점 대비 우수한 결과를 보이고 있다. 이후 중문 지점에서 상관계수 0.39로 높은 토양수분 조건에서도 0.4에 가까운 결과가 나타나고 있으며, 신흥과 중문 외 4개 지점에서는 0.3 미만의 매우 열악한 상관계수 값이 계산되었다. 특히 위성 관측 자료가 적은 세화 지점은 상관계

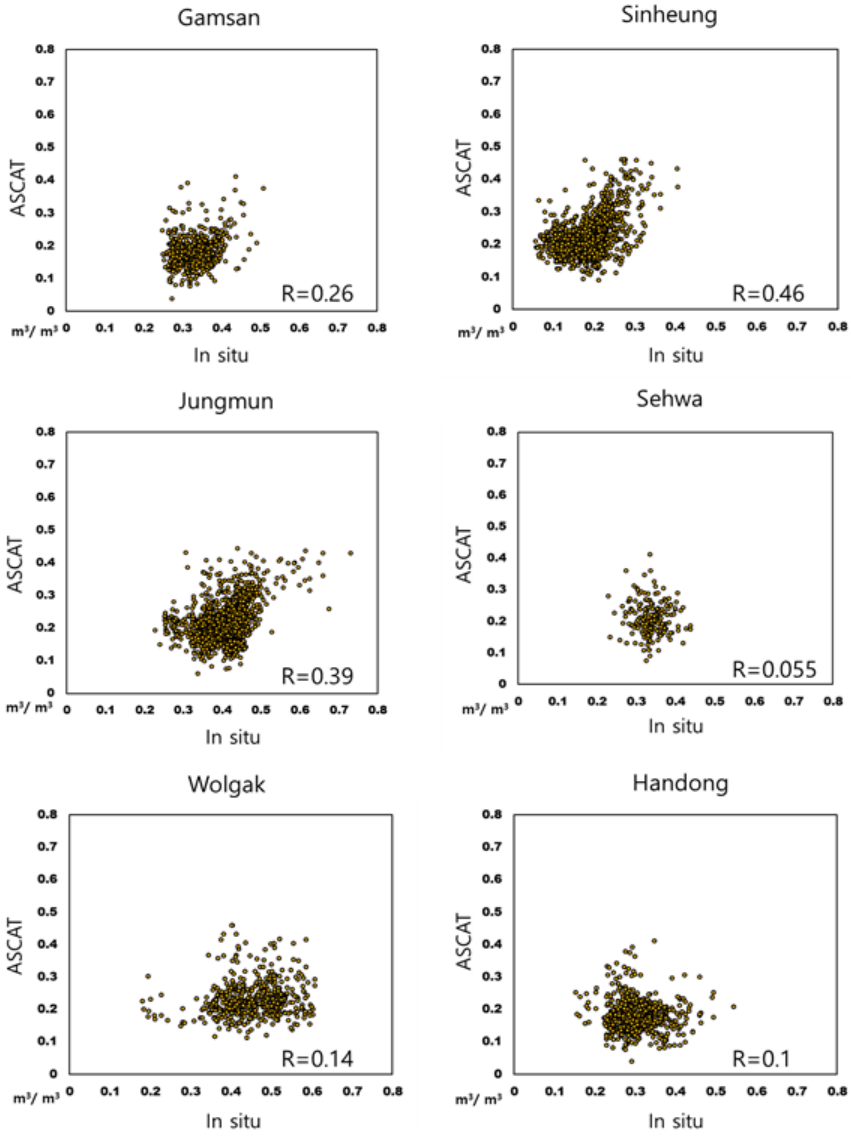

Fig. 7. Scatter plot and correlation R value for comparison of in-situ and ASCAT soil moisture

수 0.055로 ASCAT 자료의 정확도가 가장 낮게 나타났는데, 이는 해당 지점의 지형 및 기상 조건이 위성 기반 자료의 토양수분 복원 결과에 큰 영향을 미치기 때문으로 추정된다. 따라서 제주 지역에서 위성 기반 토양수분 자료의 활용을 위해서는 향후 위성 자료 별 토양수분 복원 알고리즘에 영향을 미치는 제주 내 환경 조건 분석이 선행되어야 하며, 분석 결과를 토대로 위성 자료의 보정이 이루어져야 한다.

Fig. 8에서는 각 지점의 지점 대비 재분석 토양수분 자료의 정확도를 나타내고 있다. 비교적 제주도 내부에 가까운 해안에 위치한 감산, 신흥, 중문의 경우 R 값이 0.5 ~ 0.6으로 나타나고 있으나, 숲에 위치한 월각, 또한 해안에 매우 근접한 세화와 한동 지점의 경우 0.4 이하의 정확도를 나타내고 있어 활용을 위해서는 보정이 필요할 것으로 보인다. GLDAS 자료의 경우 ASCAT 대비 높은 상관계수가 산정되어 우수한 정확도를 나타내고 있으며, 이는 강우가 입력자료로 활용되는 재분석 자료가 지점 토양수분을 보다 정확히 나타내고 있기 때문으로 판단된다. 또한 위성 탑재 센서를 활용하여 관측이 이루어지는 ASCAT 자료 대비 GLDAS 자료의 경우 지표면 모형에 강우, 고도, 습도, 지표면 온도와 같은 입력자료를 활용하여 토양수분 복원이 이루어져 원격탐사 기반 토양수분 복원이 어려운 해안지형에서 높은 정확도를 나타내고 있다. 다만 GLDAS 자료의 경우 25 km 의 공간해상도로 인해 지점 값과의 차이가

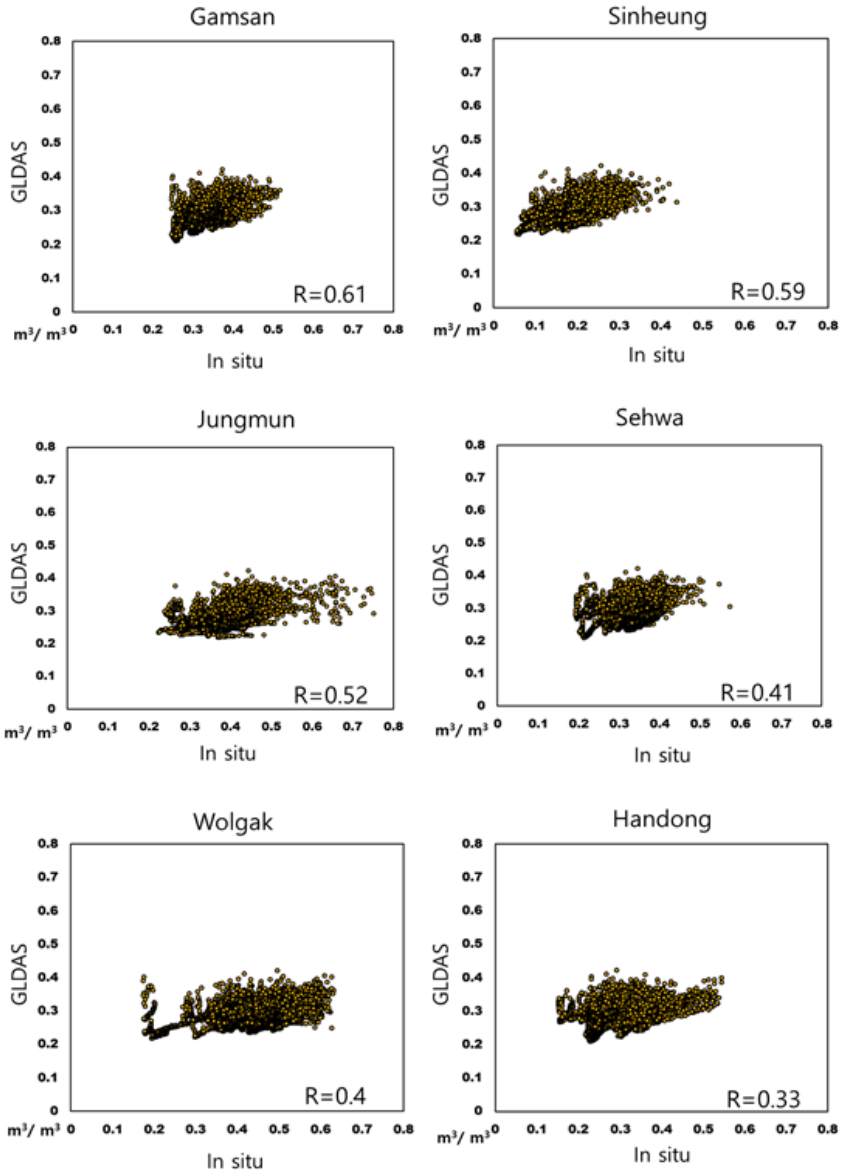

Fig. 8. Scatter plot and correlation R value for comparison of in-situ and GLDAS soil moisture

Table 2. Statistic results of ASCAT and GLDAS soil moisture products on Jeju

Data	Site	R	RMSE (m^3/m^3)	p-value
ASCAT	Gamsan	0.26	0.0283	< 0.05
	Shinheung	0.46	0.015	< 0.05
	Jungmun	0.39	0.015	< 0.05
	Sehwa	0.055	0.0003	> 0.05
	Wolgak	0.14	0.024	< 0.05
	Handong	0.1	0.003	> 0.05
GLDAS	Gamsan	0.61	0.0243	< 0.05
	Shinheung	0.59	0.0063	< 0.05
	Jungmun	0.52	0.04	< 0.05
	Sehwa	0.41	0.0207	< 0.05
	Wolgak	0.4	0.055	< 0.05
	Handong	0.33	0.021	< 0.05

발생하기 때문에 향후 각 토양수분 관측 지점의 GLDAS 입력 자료와 산출 토양수분 간의 관계성을 분석하여 위성 자료와 함께 보다 고해상도의 공간분포 토양수분 자료를 산출하는 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 또한 재분석 및 위성 기반 토양수분 자료의 상관계수, RMSE, 및 상관계수의 검정 결과가 Table 2에 명시되어 있다.

RMSE 값은 재분석 자료의 경우 모두 0.05 이하로 지점자료와 크게 차이가 나지 않는 결과가 나타났으나, 위성자료의 경우 월각 지점에서 지점자료와 0.05 이상의 차이를 나타내어 해당 지점의 지점자료 혹은 위성자료의 정확도를 추후 연구를 통해 확인하여야 할 것으로 보인다. 또한 상관계수의 유의성 검정 결과 재분석 자료는 모두 P 값이 0.05 미만으로 나타나 95% 유의수준에서 지점자료와 상관성이 있는 것으로 나타났고, 위성자료는 세화와 한동 지점에서 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이는 두 지점의 위성 기반 토양수분의 경우 신뢰하기 어렵다는 것으로 해당 지점에서는 ACSAT C-band 센서 기반 토양수분 산출 정확도가 떨어지는 것을 추정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 제주도에서의 위성 기반 증발산량 및 토양수분 산출물들의 적용성에 대해 연구하였다. 이에 검증 대상으로 기상청의 강수량 데이터와 플럭스타워에서 관측된 증발산량 데이터, 토양수분 관측소에서 관측된 토양수분 데이터를 사용하였고, 그 결론은 다음과 같다.

1) 2019년부터 2020년까지의 MOD16과 GLDAS의 누적 증발산량은 각각 907.6 mm/yr, 825.6 mm/yr로 산정되었으며, 연 누적 강수량의 59.74%, 54.34%로 나타났다. 한반도 중부지역에서 강수량의 약 60 ~ 70%가 대기중으로 증발하는 것에 비해 낮게 나타났으며 이는 대수층의 투수율이 높아 유출량 및 지하수량이 높은 제주도 특성이 잘 반영된 것으로 판단된다.
2) 2020년의 제주 난대림 플럭스타워의 증발산량과 MOD16 증발산량, GLDAS 증발산량 산출물을 분석한 결과, 위성기반 증발산량 산출물들 간의 상관계수는 0.759로 상대적으로 양호한 값이 산출되었으나 플럭스타워 증발산량 데이터와 위성기반 증발산량 산출물 간의 적합성은 매우 낮게 나타났다. 이는 플럭스타워 데이터의 품질 관리가 미흡하게 시행되어 낮은것으로 판단되며, 이상치들을 제거하는 임시적인 품질 관리 만으로도 유의미한 통계 분석 결과가 산출되었다.
3) 토양수분의 경우 GLDAS 자료는 지점과 비교하였을 때 시계열 패턴을 반영하는 결과를 나타냈으나 ASCAT 자료의 경우 극심한 변동성 및 매우 습윤한 토양수분을 반영하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 통계값의 경우 GLDAS 자료는 감산 및 신흥 지점에서 상관계수 0.6 이상의 값을 나타냈고, 한동 지점의 경우 0.3 수준의 작은 값을 보였으며, ASCAT 자료는 신흥 지점(상관계수 0.45)을 제외한 전 지점에서 0.4 미만의 열악한 상관계수가 나타났다. 이는 제주 지역에서 위성 및 재분석 자료와 같은 원격탐사 기반의 공간대표성을 지닌 토양수분 자료 활용을 위해서는 지점 관측 자료와 Cosmic-ray 와 같은 면 단위 토양수분 자료가 기준 자료로써 충분히 제공되어야 함을 의미한다. 또한 RMSE 값의 결과와 상관성의 유의검정 결과의 경우에도 위성자료가 월각 지점에서 0.05 이상의 타 지점 대비 상대적으로 큰 RMSE 값이 나타났고, 세화와 한동 지점에서 P 값이 0.05를 초과하여 95% 유의수준에서 상관성이 없다는 결과를 확인할 수 있었다.

본 연구는 이전에 검증되지 않았던 제주도 지역의 증발산, 토양수분 자료의 정확성을 지점 자료를 통해 확인하고자 하였다. 제주 지역 토양수분 지점 자료와 재분석 및 위성 자료 간 비교 검토 결과 제주 지역의 변동성 높은 토양수분 특성과 습윤한 토양 조건을 반영하기 위해서는 기존 자료에 개선이 필요하다는 결론이 도출되었다. 따라서 향후 제주 내 높은 밀도의 정확한 토양수분 관측 시스템 및 네트워크가 구축될 시 위성 자료의 활용성이 보다 개선될 것으로 판단되며, 동시에 현

재 활발히 진행되고 있는 고해상도 토양수분 산정 연구 적용을 통해 기존의 자료를 개선하는 연구 또한 함께 수행되어야 할 것이다. 또한 제주도 지역에서의 MOD16 기반 증발산량 분석 결과, 전반적으로 과대산정이 되는 경향이 있으나 활용하기에 양호한 수준의 데이터인 것으로 판단된다. 그러나 정확한 분석 및 보정을 위해서는 현재 제주도에서 운용되고 있는 제주 난대림 플럭스타워의 데이터 품질 관리 프로세스가 적절하게 진행되고 있는지 추가적인 분석이 필요한 것으로 보인다. 추후 플럭스타워 품질 관리 프로세스 검증 및 추가적인 플럭스타워 설치가 되어 양질의 증발산량 지상 관측 자료가 생산된다면, 보다 신뢰도 높은 위성기반 증발산량 자료의 검증 및 보정이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 K-Water의 위탁연구사업 "제주도 수자원 부존 현황 조사 및 분석"의 성과입니다.

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2019R1A2B5B01070196).

본 저작물은 기상청에서 2018년부터 2020년까지 작성하여 공공누리 제 1유형으로 개방한 지상관측 토양수분 데이터와 2019년부터 2020년까지 작성하여 공공누리 제 1유형으로 개방한 지상관측 일강수량 데이터를 이용하였으며, 해당 저작물은 기상청, 기상자료개방포털(https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do)에서 무료로 다운받으실 수 있습니다.

본 저작물은 국립산림과학원에서 2020년에 작성하여 공공누리 제 1유형으로 개방한 잠열 플럭스 데이터를 이용하였으며, 해당 저작물은 국립산림과학원, 산림과학지식서비스(https://know.nifos.go.kr/know/info/main/knowMain.do)에서 무료로 다운받으실 수 있습니다.

References

Alemayehu, T., Griensven, A.V., Senay, G.B., and Bauwens, W. (2017). "Evapotranspiration mapping in a heterogeneous landscape using remote sensing and global weather datasets: Application to the Mara Basin, East Africa." *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 4, p. 390.

Allen, R.G., Dhungel, R., Dhungana, B., Huntington, J., Kilic, A., and Morton, C. (2021). "Conditioning point and gridded weather data under aridity conditions for calculation of reference evapotranspiration." *Agricultural Water Management*, Vol. 245, 106531.

Bartalis, Z., Wagner, W., Naeimi, V., Hasenauer, S., Scipal, K., Bonekamp, H., Figa, J., and Anderson, C. (2007). "Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT)." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 20.

Berg, A.A., Famiglietti, J.S., Walker, J.P., and Houser, P.R. (2003). "Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, No. D16.

Brocca, L., Hasenauer, S., Lacava, T., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., Dorigo, W., Matgen, P., Martínez-Fernández, J., Llorens, P., Latron, J., Martin, C., and Bittelli, M. (2011). "Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 12, pp. 3390-3408.

Choi, I.C., Shin, H.J., Nguyen, T.T., and Tenhunen, J. (2017). "Water policy reforms in South Korea: A historical review and ongoing challenges for sustainable water governance and management." *Water*, Vol. 9, No. 9, p. 717.

Choi, M., and Jacobs, J.M. (2007). "Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints." *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 4, pp. 883-896.

D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G.S., and Scanlon, T.M. (2007). "On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Vol. 112, No. G4.

Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., and Jackson, T. (2011). "The international soil moisture network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 5, pp. 1675-1698.

Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J.S., Stephens, G., and Wood, E.F. (2017). "The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources." *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 4, pp. 2618-2626.

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.

Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P., and Murphy, F. (1991). "Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 857-864.

Högström, E., Heim, B., Bartsch, A., Bergstedt, H., and Pointner, G.

(2018). "Evaluation of a MetOp ASCAT-Derived surface soil moisture product in tundra environments." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 123, No. 12, pp. 3190-3205.

Hong, S., and Shin, I. (2011). "A physically-based inversion algorithm for retrieving soil moisture in passive microwave remote sensing." *Journal of Hydrology*, Vol. 405, No. 1-2, pp. 24-30.

Jeong, D., and Kang, J. (2009). "An analysis of changes in pan evaporation and climate values related to actual evaporation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 117-129.

Jeong, J., Cho, S., Baik, J., and Choi, M. (2018). "A study on the establishment of a Korean soil moisture network (2): Measurement of intermediate-scale soil moisture using a cosmic-ray sensor." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 83-91.

Kang, M., Kwon, H., Kim, J., Kim, H.S., Ryu, Y., Lee, S.J., and Choi, T. (2018). "Korean flux monitoring network's past, present, and future." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-4.

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, B.S., Hamm, S.Y., Lee, C.M., Ok, S.I., Cha, E.J., and Ko, Y.S. (2011). "Features of regional hydrogeology and groundwater distribution of volcanic rocks in Jeju Island." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 47, No. 3, pp. 263-276.

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.

Kim, S., Jeong, J., Zohaib, M., and Choi, M. (2018). "Spatial disaggregation of ASCAT soil moisture under all sky condition using support vector machine." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 32, No. 12, pp. 3455-3473.

Lee, Y., and Kim, S. (2016). "The modified SEBAL for mapping daily spatial evapotranspiration of South Korea using three flux towers and terra MODIS data." *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 12, 983.

Lievens, H., Reichle, R.H., Liu, Q., De Lannoy, G.J., Dunbar, R.S., Kim, S.B., Das, N.N., Cosh, M., Walker, J.P., and Wagner, W. (2017). "Joint Sentinel-1 and SMAP data assimilation to improve soil moisture estimates." *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 12, pp. 6145-6153.

Mittelbach, H., Lehner, I., and Seneviratne, S.I. (2012). "Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland." *Journal of Hydrology*, Vol. 430, pp. 39-49.

Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and the environment." *Symposia of the Society for Experimental Biology*, Vol. 19, pp. 205-234.

Moshir, P.D., Sadeghi Tabas, S., Kalantari, Z., Ferreira, C.S.S., and Zahabiyoun, B. (2021). "Spatio-temporal assessment of global gridded evapotranspiration datasets across Iran." *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 9, 1816.

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.

Naeimi, V., Bartalis, Z., and Wagner, W. (2009). "ASCAT soil moisture: An assessment of the data quality and consistency with the ERS scatterometer heritage." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 2, pp. 555-563.

Nguyen, H.H., Jeong, J., and Choi, M. (2019). "Extension of cosmic-ray neutron probe measurement depth for improving field scale root-zone soil moisture estimation by coupling with representative in-situ sensors." *Journal of Hydrology*, Vol. 571, pp. 679-696.

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.

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.

Skierucha, W., and Wilczek, A. (2010). "A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz frequency range." *Sensors*, Vol. 10, No. 4, pp. 3314-3329.

Song, S.H., and Choi, K.J. (2012). "An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change (I)." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 17, No. 2, pp. 62-70.

Tang, R., Shao, K., Li, Z.L., Wu, H., Tang, B.H., Zhou, G., and Zhang, L. (2015). "Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, pp. 1478-1486.

Um, M.J., Yun, H., Jeong, C.S., and Heo, J.H. (2011). "Factor analysis and multiple regression between topography and precipitation on Jeju Island, Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 410, No. 3-4, pp. 189-203.

Walker, J.P., Willgoose, G.R., and Kalma, J.D. (2001). "One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations: A comparison of retrieval algorithms." *Advances in Water Resources*, Vol. 24, No. 6, pp. 631-650.

Wang, Y.J., Wang, S.D., Song, W.L., and Yang, S. (2013). "Application of GLDAS data to the potential evapotranspiration monitoring in Weihe River Basin." *Journal of Arid Land Resources and Environment*, Vol. 27, pp. 54-58.

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, Y. 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, pp. 187-202.

Zeng, J., Li, Z., Chen, Q., Bi, H., Qiu, J., and Zou, P. (2015). "Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 163, pp. 91-110.

Zohaib, M., Kim, H., and Choi, M. (2017). "Evaluating the patterns of spatiotemporal trends of root zone soil moisture in major climate regions in East Asia." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 122, No. 15, pp. 7705-7722.