

# 물 수지 분석에 의한 MODIS 위성 기반의 증발산량 평가

## Evaluation of MODIS-derived Evapotranspiration According to the Water Budget Analysis

이 연 길\* / 이 정 훈\*\* / 최 민 하\*\*\* / 정 성 원\*\*\*\*  
Lee, Yeongil / Lee, Junghun / Choi, Minha / Jung, Sungwon

### Abstract

This study estimates MODIS-derived evapotranspiration data quality by revised RS-PM algorithm in Seolmacheon test basin. We used latent flux with eddy covariance method to evaluate MODIS-derived spatial evapotranspiration and gap-filled these data by three methods (FAO-PM, MDV and Kalman Filter) and to quantify daily evapotranspiration. Gap-filled daily evapotranspiration data was used to evaluate evapotranspiration computed by revised RS-PM algorithm derived MODIS satellite images. For the water budget analysis, we used soil moisture content that is quantified to average individual soil moisture rate observed by TDR (Time Domain Reflectometry) sensor at soil depth. The soil moisture variation is calculated in consideration from initial to final soil moisture content. According to the result of this study, evapotranspiration computed by revised RS-PM algorithm is very larger than eddy covariance data gap-filled by three methods. Also, water budget characteristics is not closed. We could analysis that MODIS-derived spatial evapotranspiration does not represent actual evapotranspiration in Seolmacheon.

**Keywords** : revised RS-PM, MODIS-derived, eddy covariance, water budget

### 요 지

본 연구에서는 MODIS 위성 기반 증발산량의 적정성을 평가하기 위해 Revised RS-PM 알고리즘으로 일증발산량 지도를 작성하여 에디 공분산 기반의 증발산량과 비교·분석하였다. 또한, 작성된 MODIS 기반의 일증발산량 지도의 공간적인 특성을 평가하기 위해 전적비교 지점을 기준으로 물 수지 성분을 산정하여 이의 특성을 분석하였다. 에디 공분산 기반의 증발산량은 플럭스 타워에서 관측된 잠열 플럭스를 KoFlux 프로그램으로 좌표변환, 밀도보정을 수행하여 이상치를 제거한 후 정량화하였다. 이상치 특성으로 발생된 빈 구간(no value)의 자료는 FAO-PM, MDV, Kalman Filter의 3가지 방법으로 보충(Gap-filling)하였다. 면적당우량과 유출량은 KICT(2013)로부터 자료를 제공받아 정량화하였으며, 유역 평균증발산량은 Revised RS-PM 알고리즘으로 작성된 일증발산량 지도로부터 산정하였다. 유역의 지류변화량은 토양수분 변화량이 유역을 대표한다는 가정 하에 관측된 토심별 자료에 유효토심을 고려하여 산정하였다. MODIS 위성과 에디 공분산 기반의 증발산량을 비교·분석한 결과, MODIS 위성 기반에서 330.6 mm 정도 증발산량이 크게 산정되었으며, Bias와 RMSE는 평균 -0.91, 2.90의 특성을 나타내었다. 전적비교 지점을 기준으로 물 수지를 분석한 결과, 177.43 mm 정도의 편차로 인해 물 수지가 폐합되지 못하였다. 에디 공분산 기반의 증발산량과 물 수지 분석 결과를 토대로 적정성을 평가해 볼 때, MODIS 위성 기반의 증발산량은 설마친 유역의 실제 증발산량을 대표하지 못하였다.

**핵심용어** : MODIS 위성, 물 수지, 에디 공분산, Revised RS-PM

\* 유량조사사업단 유사량조사실 실장 (e-mail: sugawon@hsc.re.kr)

Principal Manager, Hydrological Survey Center, Sediment Division, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-766, Korea

\*\* 유량조사사업단 유사량조사실 증발산량팀 팀장 (e-mail: ljh0817@hsc.re.kr)

Team Manager, Hydrological Survey Center, Evapotranspiration Team, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-766, Korea

\*\*\* 성균관대학교 수자원대학원 수자원학과 부교수 (e-mail: mhchoi@skku.edu)

Professor, Sungkyunkwan University, Suwon-si, Gyeonggi-do 440-746, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 유량조사사업단 단장 (e-mail: swjung@hsc.re.kr)

Corresponding Author, Project Manager, Hydrological Survey Center, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-766, Korea

## 1. 서론

한 유역을 대상으로 물 수지 특성을 정량화한다는 것은 국가의 수자원 계획 및 개발에 아주 중요하다. 그러나 물 수지 성분을 정량화하고 분석하는 데에 강우량, 유출량, 증발산량, 유역의 저류변화량과 같은 많은 수문자료가 요구되기 때문에 이는 상당히 어려운 일이다. 최근 들어 위성 영상 자료를 활용해 증발산량을 시·공간적으로 정량화하기 위한 연구가 진행되어 오고 있다. Nishida et al. (2003b)은 MODIS 자료와 지상에서 관측된 기상자료를 이용하여 증발산량을 추정하는 알고리즘을 개발하였다. Cleugh et al. (2007)은 MODIS 위성자료를 기반으로 호주의 상록수림과 열대 초원지역을 대상으로 Penman-Monteith 방법으로 증발산량을 산정하여 두 지역의 특성을 평가하였다. Mu et al. (2009)은 Cleugh et al. (2007)의 RS-PM 방법을 개선하여 공간 해상도 1 km<sup>2</sup>의 전 지구규모의 증발산량을 산정하였다. Jang et al. (2009)은 Mu et al. (2009)에 의해 제안된 Revised RS-PM 알고리즘에 대한 구동기반을 구축하고, 국내의 광릉 낙엽활엽수림과 해남 밭 경작지의 플럭스 연구지역에서 증발산량을 산정하였다. 본 연구에서는 Mu et al. (2009)에 의해 제안된 MODIS 위성 기반의 Revised RS-PM 알고리즘으로 공간 증발산량을 산정한 후, 물 수지 분석과 에디 공분산 기반의 증발산량과 비교·분석을 통해 적정성을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법 및 범위

본 연구에서는 MODIS 위성 기반 증발산량의 적정성을 평가하기 위해 Revised RS-PM 알고리즘으로 일증발산량 지도를 작성하여 에디 공분산 기반의 증발산량과 이의 특성을 비교·분석하였다. 또한, 작성된 일증발산량 지도의 공간적인 특성을 평가하기 위해 전적비교 지점을 기

준으로 유역 평균 증발산량을 산정하여 물 수지 특성을 분석하였다. 에디 공분산 기반의 증발산량 정량화를 위해 플럭스 타워에서 관측된 잠열 플럭스를 KoFlux 프로그램으로 좌표변환, 밀도보정을 수행한 후 이상치를 제거하였다. 이상치 특성으로 제거된 빈 구간의 자료(no value)는 FAO-PM, MDV, Kalman Filter의 3가지 방법으로 보충(Gap-filling)하였다. 물 수지 특성으로 MODIS 기반 공간 증발산량을 평가하기 위해 본 연구에서는 물 수지 성분을 정량화하였다. 면적강우량과 유출량은 KICT (2013)로부터 자료를 제공받아 정량화하였으며, 유역 평균증발산량은 Revised RS-PM 알고리즘으로 작성된 일증발산량 지도로부터 산정하였다. 유역의 저류변화량은 토양수분 변화량이 유역을 대표한다는 가정 하에 유효토심을 고려하여 산정하였다. 본 연구에서 산정한 저류변화량은 지하수 저류량 변화량이 반영되지 않는 유효토심 깊이에서의 토양수분 변화량이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 산정된 물 수지 성분으로 물 수지 특성을 분석하여 MODIS 위성 기반의 공간 증발산량을 평가하였다.

## 3. 대상유역 및 물수지 방정식

### 3.1 대상유역

설마천 유역은 임진강 하구에서 약 46 km 떨어진 임진강의 제 1 저류로서 동경 126° 52' 44" ~ 126° 58' 40", 북위 37° 55' 00" ~ 37° 58' 05"에 위치하며, 유역면적 18.56 km<sup>2</sup> (전적비교 지점, 8.48 km<sup>2</sup>), 유로연장 10.77 km이다. 설마천 유역의 90% 이상은 주로 20~40년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있으며 침엽수는 조림수이다.

### 3.2 물수지 방정식

설마천 유역의 물 수지의 특성을 정량화하기 위해 적용한 물 수지 방정식은 Eq. (1)과 같다.

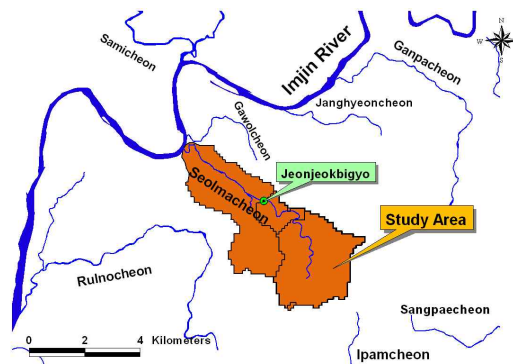
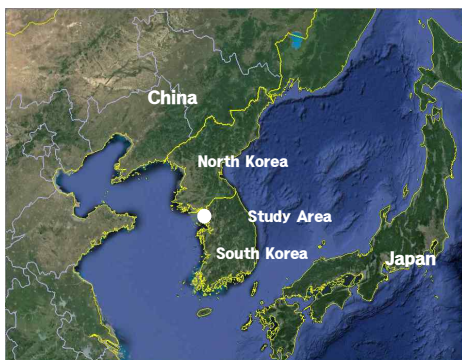


Fig. 1. Location of Study Area (Seolmacheon Basin)

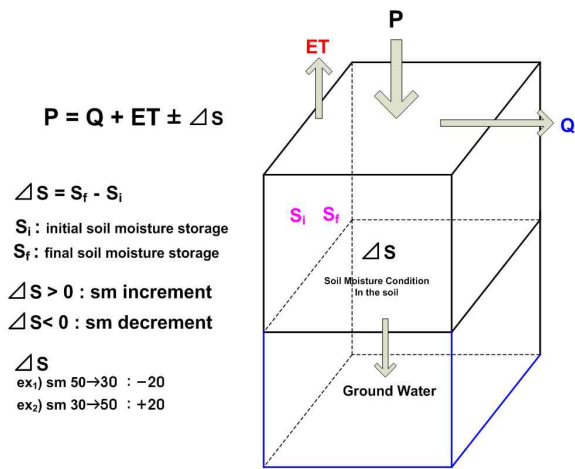


Fig. 2. Basic Concept of Water Budget

$$P = Q + ET \pm \Delta S \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 강수량(mm),  $Q$ 는 유출량(mm),  $ET$ 는 증발산량(mm),  $\Delta S$ 는 토양 내 저류변화량(mm)이다.

#### 4. 수문관측소 현황 및 관측자료 분석

##### 4.1 수문관측소 현황

설마천 유역에는 강수량관측소 6개소(전적비교, 비룡포대, 빈배이, 설마리, 범륜사, 감악산), 수위관측소 1개소(전적비교), 증발산량관측소 1개소, 토양수분량관측소 1개소가 운영되고 있다. 한국건설기술연구원에서는 전적비교 지점에서 매년 유량측정을 수행하여 수위자료와 함께 유량자료를 생산하고 있다. 증발산량 및 토양수분량 관측소는 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 범륜사 인근 산지 사면에 위치하고 있다.

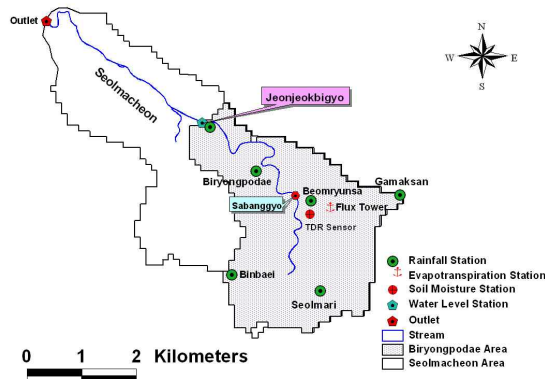


Fig. 3. Hydrological Survey Stations in the Seolmacheon Basin

#### 4.2 수문자료 처리 및 특성 분석

##### 4.2.1 강우량(Rainfall, R)

본 연구에서는 6개 강우관측소의 위치정보로 Thiessen network를 작성하였으며(Fig. 4), Thiessen factor는 Table 1과 같다. Thiessen factor를 토대로 한 2013년 전 기간에 대한 면적강우량은 1,477.1 mm로 산정되었다.

##### 4.2.2 유출량(Runoff, Q)

전적비교 지점에서 산정된 일유출량은 Fig. 5와 같다. Table 2는 2013년의 연유출용적(yearly runoff volume)과 연유출고(yearly runoff depth)를 나타낸다.

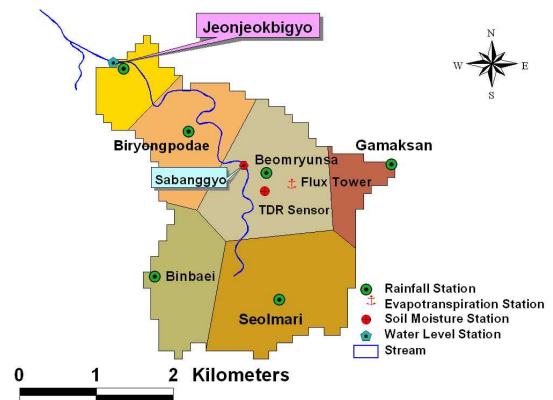


Fig. 4. Thiessen Network of Seolmacheon Basin

Table 1. Thiessen Factor

Rainfall station	Thiessen factor
Gamaksan	0.063
Binbaei	0.155
Beomryunsa	0.247
Seolmari	0.273
Biryongpodae	0.178
Jeonjeokbigyo	0.084

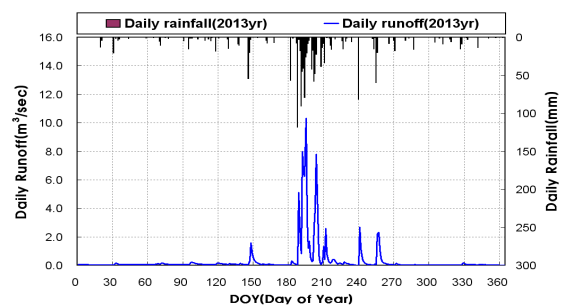


Fig. 5. Daily Runoff (2013)

Table 2. Yearly Runoff Volume (2013)

Year	Runoff volume (m <sup>3</sup> )	Runoff depth (mm)
2013	9,358,070	1,103

### 4.2.3 증발산량(Evapotranspiration, ET)

#### (1) 에디공분산 방법

에디공분산 방법은 보존 방정식에 근거를 두고 있으며, 그 표현은 Fig. 6 및 Eq. (2)와 같다. Eq. (2)는 I항~IV항으로 구성되는데, I항은 저류항으로 관측 높이 아래에 저장된 수증기양, II항은 에디공분산항으로 연직 풍속과 수증기 농도의 공분산으로 계산되는 난류 수증기 플럭스를 의미한다. III~IV항은 각각 연직 이류항과 수평 이류항으로 연직 혹은 수평적으로 발생하는 수증기 농도 차가 연직 혹은 수평적으로 이류되는 수증기 양을 나타낸다.

$$NEE_{H_2O} = \int_0^h \left[ \frac{\partial c}{\partial t} \right] dz + \underbrace{\left( \overline{w'c'} \right)}_{II} + \underbrace{\int_0^h \overline{w(z)} \frac{\partial c}{\partial z} dz}_{III} + \underbrace{\int_0^h \overline{u(z)} \frac{\partial c}{\partial x} dz}_{IV} \quad (2)$$

여기서,  $NEE_{H_2O}$ 는 증발산량(또는 수증기 플럭스, 즉 단위 시간당 단위 면적당 관측 높이 하부의 식생 군락이 대기와 교환한 순 수증기량),  $c$ 는 수증기 농도,  $u$ 와  $w$ 는 유선 속도와 연직 속도,  $h$ 는 관측 높이를 나타낸다.

에디공분산 방법으로 관측된 잠열 플럭스로부터 일증발산량을 산정하기 위해서는 좌표변환(Planar Fit Rotation, PFR), 밀도보정(WPL), 이상치 제거 등이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 과정을 수행하기 위해 KoFlux 프로그램을 활용하였다. PFR은 복잡한 지형에서 경사의 변화에 따른 공기 흐름의 변화를 고려하기 위해 다중회귀선형 방정식(Eq. (3))으로부터 유출되는 계수( $b_0, b_1, b_2$ )를 사용하여 경사각(동서방향,  $\alpha$ 와 남북방향,  $\beta$ ; Eqs. (4) and (5))을 구한다.

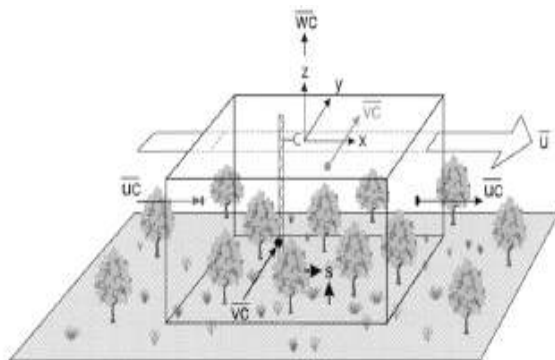


Fig. 6. Conservation Equation

$$\overline{w_m} = b_0 + b_1 \overline{u_m} + b_2 \overline{v_m} \quad (3)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{-b_1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \right) \overline{w_m} = b_0 + b_1 \overline{u_m} + b_2 \overline{v_m} \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1}(b_2) \quad (5)$$

KoFlux 프로그램은 복잡지형으로 인해 풍향에 따라 달라지는 경사도의 차이를 고려하기 위하여 Wilczak et al. (2001)이 제시한 PFR을 풍향에 따라 총 8개의 독립적인 평면(각 평면은 45도의 크기를 가짐)을 적용하여 좌표변환 계수를 계산한다(Yuan et al., 2007).

밀도보정(WPL)은 측정된 수증기나 이산화탄소 농도의 편차에 영향을 주는 온도와 수증기 변동 효과를 보정하기 위해서 사용된다. 이러한 효과는 수증기나 이산화탄소의 농도를 밀도로 표시할 때 발생하며, 혼합비로 측정되었을 때는 그 특성상 나타나지 않는다. WPL 보정을 위한 식은 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$\rho'_d = -\overline{\rho}_d (1 + \overline{\chi}_v) \left( \frac{T'}{T} - \frac{p'}{p} \right) - \mu_v \rho'_v \quad (6)$$

$$\overline{w' \rho'_{t,S}} = \overline{w' \rho'_t} - \overline{\omega_i w' \rho'_d} \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ 는 질량 부피, 첨자  $d, v, t$ 는 각각 건조공기, 수증기, 측정 기체를 뜻한다. 그리고  $\mu_v$ 는 수증기 분자량에 대한 건조공기 분자량의 비,  $\overline{\chi}_v$ 는 건조 공기에 대한 수증기의 평균 몰분율,  $\overline{\omega_i}$ 는 건조 공기에 대한 측정 기체의 평균 질량비이며,  $\overline{w' \rho'_{t,S}}$ 와  $\overline{w' \rho'_t}$ 는 WPL 보정 후와 보정 전의 증발산량이다.

자료 처리에서 불확실성을 증가시키는 중요한 이유 중의 다른 하나는 여러 가지 원인으로 인해서 발생하는 튀는 자료이다. 이러한 자료들을 제거하기 위해서 KoFlux 프로그램이 사용되고 있는데 본 프로그램은 Eq. (8)과 같이 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한다.

$$d_i = (ET_i - ET_{i-1}) - (ET_{i+1} - ET_i) \quad (8)$$

계산된  $d$  지수가 절대값의 중앙값으로부터 벗어난 정도를 가지고 튀는 자료를 판단하게 된다.

#### (2) 자료보충(Gap-filling)

##### ① FAO-PM(FAO-56 Penman-Monteith)

Allen et al. (1998)은 증발산량을 추정하는 데에 많이 쓰이는 Penman-Monteith 공식을 기준작물에 대한 몇몇의 변수를 가정하여 Eq. (9)와 같은 형태로 제시하였다.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (9)$$

여기서,  $ET_o$ 는 기준 증발산량(mm/day),  $\Delta$ 는 포화증기압 함수의 경사(kPa/°C),  $R_n$ 은 순 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup> day),  $G$ 는 토양열 플럭스(MJ/m<sup>2</sup>day),  $\gamma$ 는 Psychrometric 상수(kPa/°C),  $T$ 는 평균온도(°C),  $u_2$ 는 2m 높이에서 평균 풍속(m/sec),  $e_s$ 는 포화수증기압(kPa) 그리고  $e_a$ 는 실제 수증기압(kPa)이다.

Eq. (9)으로 산정된 기준 증발산량은 수분의 공급에 제한이 없는 상황에서 산정된 증발산량을 의미하므로, 본 연구에서는 Eq. (10)을 활용하여 기준 증발산량을 실제 증발산량으로 변환하였다.

$$ET = K_C K_S ET_o \quad (10)$$

여기서,  $ET$ 는 실제 증발산량(mm/day),  $K_C$ 는 작물계수,  $K_S$ 는 토양수분계수를 나타낸다.

본 연구에서는 FAO-PM 공식에 사용되는 미기상인자들은 플럭스 타워에서 관측된 자료를 이용하였으며, 실제 증발산량과 기준 증발산량의 비인  $K_C K_S (=K)$ 는 플럭스 타워에서 관측된 실제 증발산량을 FAO-PM 공식으로 구한 기준 증발산량으로 나누어 산정하였다.

### ② 평균 일변동(Mean Diurnal Variation, MDV) 방법

MDV 방법은 결측된 시점의 주변 값을 이용하여 결측된 시점의 값을 산정하는 방법으로 어떠한 시점은 그 전 후 시점의 경향과 비슷하다는 가정을 전제로 한다(Falge

et al., 2001). 본 연구에서는 플럭스 타워에서 관측된 실제 증발산량 자료를 대상으로 MDV 방법(window size=6)을 적용하여 결측된 구간의 자료를 보충하였다.

### ③ Kalman Filter 방법

Kalman Filter 방법은 전시간의 값을 바탕으로 하여 다음 시간의 값을 예측하고 그 값을 다시 통계적 기법에 의해 보정하여 최적의 값을 추정하는 방법이다. Kalman Filter의 기본 식은 여러 가지 형태로 표현할 수 있지만 일반적으로는 시스템에 대한 방정식과 관측방정식으로 표현할 수 있다. Kalman Filter 방법은 통계적 기법으로 새로운 값을 만들어 내는 것이 아니라 입력된 자료를 보정해 주는 역할을 하기 때문에 입력자료의 설정이 중요하다. 이에 따라 본 연구에서는 FAO-PM과 MDV 방법으로 구한 2개의 증발산량 계열을 평균하여 입력자료로 활용하였다.

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (11)$$

$$z_k = H_k x_k + u_k \quad (12)$$

여기서,  $x$ 는 상태 변수 벡터,  $z$ 는 측정값 벡터이며,  $F$ ,  $G$ ,  $H$ 는 각각 시스템 행렬, 입력 행렬 및 측정 행렬로서 해당 차원을 갖게 되는 dimension matrix의 특성을 갖는다.

### (3) 증발산량 계열 생성 및 분석

본 연구에서는 플럭스 타워에서 관측된 잠열 플럭스 자료(raw data, 30분 간격)를 KoFlux 프로그램으로 좌표변환, 밀도보정, 이상치 제거 과정 등을 수행하여 새로운 잠열 플럭스 계열을 생성하였다. Table 3은 KoFlux 프로그램의 자료처리 결과이다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 전체

Table 3. Output of Data Processing by KoFlux Program

Month	Data number	2013yr	
		Spike number	Rate (%)
1	1,488	270	18.1
2	1,344	335	24.9
3	1,488	705	47.4
4	1,440	476	33.1
5	1,488	479	32.2
6	1,440	398	27.6
7	1,488	780	52.4
8	1,488	328	22.0
9	1,440	201	14.0
10	1,488	180	12.1
11	1,440	221	15.3
12	1,488	177	11.9
Total	17,520	4,550	25.9

자료 중 25.9%가 결측과 이상치 특성으로 제거되었다.

본 연구에서는 FAO-PM, MDV, Kalman Filter의 방법으로 증발산량(30분 간격)을 산정하여 결측구간(25.9%)에 대해서만 자료를 보충하였다. Table 4는 방법별로 산정된 연증발산량의 특성을 나타내며, 보충된 증발산량은 방법별로 유사한 값을 나타내었다. 방법별로 보충된 양의 평균은 102.7 mm로서, 이는 에디 공분산 방법의 증발산량(194.9 mm)에 52.7%에 해당되는 양이다. 이와 같이 결측구간 26%에 해당되는 양이 50%를 상회하는 이유는 증발산 현상이 왕성한 시기인 3~7월에 평균 이상의 결측과 이상치 특성을 가진 데에 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 KoFlux 프로그램으로 자료처리를 수행하여 산정된 에디공분산 자료와 3가지 방법으로 자료를 보충하여 산정된 일증발산량의 특성을 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 결측치를 포함하는 증발산량은 3가지 방법으로 산정된 증발산량에 비해 상대적으로 적은 특성을 나타내었다. 또한, 3가지 방법으로 산정된 증발산량의 특성은 FAO-PM 방법이 큰 특성을 나타내었다. Fig. 8은 결측구간(25.9%)을 방법별로 보충한 증발산량의 특성을 나타내고 있다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 3가지 방법으로 보충된 증발산량의 규모와 기울기는 서로 유사한 특성을 나타내었다.

#### 4.2.4 저류변화량(Storage Variation)

토양 내 저류변화량은 토양수분 변화량이 유역을 대표한다는 가정 하에 유효토심을 고려하여 산정하였다. TDR (Time Domain Reflectometry) 센서는 토양 내 수분량이 차지하는 비율을 측정하기 때문에 양으로 환산하기 위해서는 유효토심이 필요하다. 그러나 설마천 유역의 유효토심이 정량화되어 있지 않아 본 연구에서는 TDR 센서가 매설된 위치의 토심 특성을 반영하여 0.8m로 추정하였다. 설마천 토양수분량 관측소에는 총 48개 TDR 센서(관측위치 18개소, 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm)가 토심별로 매설되어 있다. 본 연구에서는 동일 토심별 자료를 산술평균하여 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm에 대한 평균값을 구한 후, 여기에 유효토심을 곱하여 평균토양수분고를 산정하였다(Figs. 9 and 10). 여기에 유역면적을 곱하여 연평균토양수분량을 산정하였다(Table 5). 토양수분 변화량은 토심별 평균토양수분 계열을 토대로 종기 값에서 초기 값을 빼서 저류변화량을 산정한 후 여기에 유효토심을 고려하여 산정하였다(Table 6). 본 연구에서 산정한 저류변화량은 지하수저류량 변화량이 반영되지 않는 유효토심 깊이에서의 토양수분 변화량이라는 한계를 갖는다.

Table 5에 수록되어 있는 바와 같이 평균토양수분 비율은 14.75%의 특성을 나타내었다. 유효토심 0.8m을 적

Table 4. Yearly Evapotranspiration by Gap-filling Method

Seolmacheon Site		Eddy covariance ET(mm)	Gap-filled ET(mm)	Yearly ET(mm)
Gap-filling method	FAO-PM	194.9	102.5	297.4
	MDV		107.3	302.2
	Kalman Filter		98.3	293.3
Average			102.7	297.6

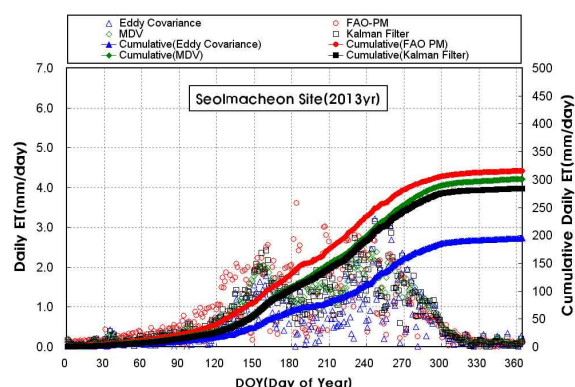


Fig. 7. Daily ET before Gap-filling (2013)

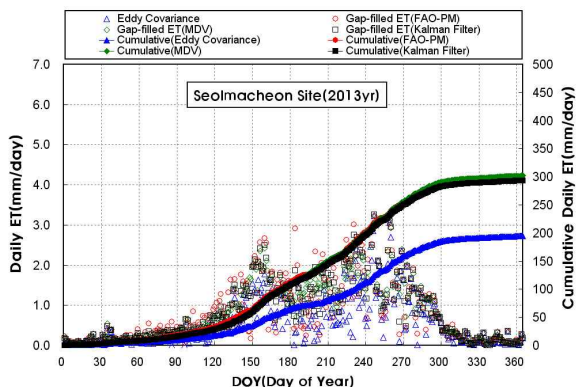


Fig. 8. Daily ET after Gap-filling (2013)

용하여 토양수분고를 산정한 결과, 0.121 m의 특성을 나타내었다. 평균토양수분 변동 비율은 Table 6에 수록되어 있는 바와 같이 -2.32%의 특성을 나타내었다. 본 연구에서는

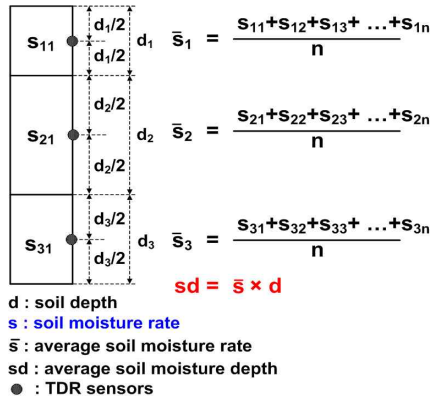


Fig. 9. Computation of Average Soil Moisture Depth

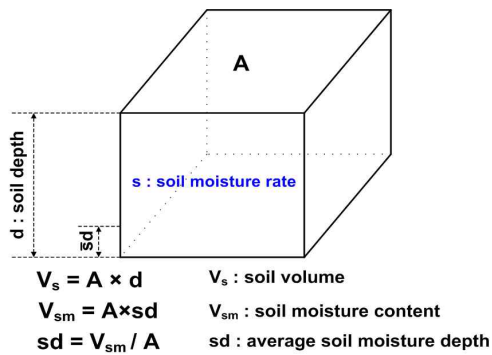


Fig. 10. Computation of Average Soil Moisture Content

Fig. 11에 토심별 평균 토양수분율의 변동 특성을, Fig. 12에 토심 10 cm 깊이에서의 평균 토양수분율의 시간적 변동성과 토양수분율의 변화량을 나타내었다.

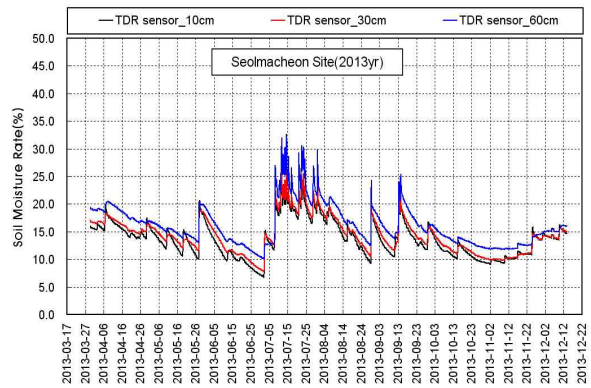


Fig. 11. Soil Moisture Rate at Soil Depth (2013)

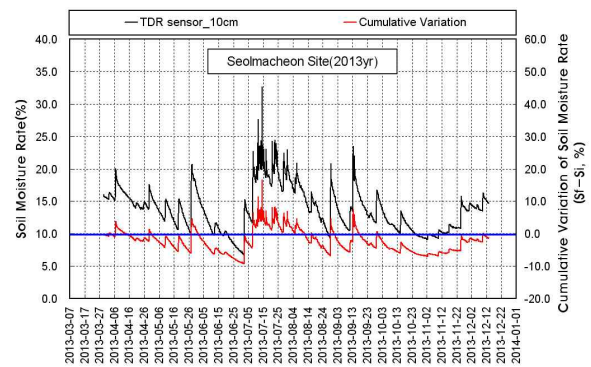


Fig. 12. Cumulative Variation of Soil Moisture Rate (Soil Depth\_10 cm, 2013)

Table 5. Characteristics of Yearly Average Soil Moisture Content (2013)

Location of TDR sensors	Average soil moisture rate (s, %)	Soil depth (d, m)	Average soil moisture depth (sd, m)	Yearly soil moisture content (sm, m <sup>3</sup> )
TDR sensor (10 cm)	13.72	0.2	0.027	232,614.79
TDR sensor (30 cm)	14.35	0.2	0.029	243,297.16
TDR sensor (60 cm)	16.19	0.4	0.065	549,301.80
Total (average)	(14.75)	0.8	0.121	1,025,21 m

Table 6. Yearly Variation Characteristics of Soil Moisture Content

Location of TDR sensors	$\Delta S(S_f - S_i)$ (%)	Soil depth (d, m)	Variation depth of soil moisture content (m)	Variation content of soil moisture content (m <sup>3</sup> )
TDR sensor (10 cm)	-1.38	0.2	-0.003	-23,461.33
TDR sensor (30 cm)	-2.22	0.2	-0.004	-37,594.67
TDR sensor (60 cm)	-3.36	0.4	-0.013	-113,914.67
Total (average)	(-2.32)	0.8	-0.020	-174,970.67

## 5. 공간 증발산량 산정

### 5.1 증발산량 알고리즘

#### 5.1.1 Revised RS-PM Algorithm

Revised RS-PM은 Mu et al. (2007)이 Cleugh et al. (2007)에 의해 제안된 RS-PM을 향상시킨 알고리즘으로서, 식생으로부터의 증산량과 토양으로부터의 증발량의 합으로 구성된다.

$$\lambda E = \lambda E_{veg} + \lambda E_{soil} \quad (13)$$

$$\lambda E_{veg} = \frac{\Delta A_c + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (14)$$

$$\lambda E_{soil} = \frac{\Delta A_{soil} + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \times (r_{tot} / r_a)} \times \left( \frac{RH}{100} \right)^{(e_s - e_a) / 100} \quad (15)$$

여기서,  $\Delta$ 는 기온( $T_a$ )과 포화수증기압( $e_s$ )간의 기울기(Pa/K),  $\rho$ 는 공기밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$ 는 공기 비열 용량(J/kg/K),  $r_a$ 는 공기 역학 저항(s/m),  $r_s$ 는 지표 저항(s/m),  $e_a$ 는 현재의 수증기압(Pa),  $\gamma$ 는 건습계 상수(Pa/K),  $RH$ 는 상대습도(%),  $A_c$ 와  $A_{soil}$ 은 유입되는 순복사량으로  $A_c = F_c \times A$ ,  $A_{soil} = (1 - F_c) \times A$ 로 표현된다. 여기서  $A$ 는 총순복사량,  $F_c$ 는 임관 마찰을 의미한다.

#### 5.1.2 Canopy Conductance

다양한 종류의 식생에 대해 기공 전도도( $C_s$ )는 포화 미흡량(VPD)이 증가함에 따라 감소하며, 낮은 온도와 높은 온도의 환경에서는 제약을 받는다(Dang et al., 1997; Jarvis, 1976). 본 연구에서는 잎 단위의 기공 전도도를 임관 전도도로의 확장과 지표면 저항을 산정하기 위해 Landsberg et al. (1997)에 의해 제안된 식을 이용하였다.

$$C_s = c_L \times m(T_{min}) \times m(VPD) \quad (16)$$

$$C_c = C_s \times LAI \quad (17)$$

$$r_s = 1 / C_c \quad (18)$$

여기서  $C_s$ 는 잎 단위의 기공 전도도,  $c_L$ 는 단위 엽면적당 평균 잠재 기공 전도도,  $m(T_{min})$ 은 최저 온도에 따른 잠재 기공 전도도를 제한하기 위한 계수이고,  $m(VPD)$ 는 잠재 기공 전도도를 줄이기 위해 이용되는 계수이다(Dang et al., 1997; Jarvis, 1976).  $C_c$ 는 임관 전도도,  $LAI$ 는 엽면적 지수,  $r_s$ 는 지표면 저항이다.

$$1.0 \quad T_{min} \geq T_{min.open}$$

$$m(T_{min}) = \frac{T_{min} - T_{min.close}}{T_{min.open} - T_{min.close}} \quad T_{min.close} < T_{min} < T_{min.open} \quad (19)$$

$$0.1 \quad T_{min} < T_{min.close}$$

$$1.0 \quad VPD \leq VPD_{open}$$

$$m(VPD) = \frac{VPD_{close} - VPD}{VPD_{close} - VPD_{open}} \quad VPD_{open} < VPD < VPD_{close} \quad (20)$$

$$0.1 \quad VPD \geq VPD_{close}$$

#### 5.1.3 Vegetation Cover Fraction

임관 마찰( $F_c$ )은 최대 범위의 임관으로 이루어져 있는 조건으로 정의되며, 0과 1 사이의 값을 가진다. Revised RS-PM 알고리즘은 정규식생지수(NDVI)를 이용한 기존 알고리즘인 Cleugh et al. (2007)에 대해 개량식생지수(EVI)를 이용하여 개선되었다. 개선된 식은 Eqs. (22) and (23)과 같다.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (21)$$

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L} \quad (22)$$

$$F_c = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \quad (23)$$

여기서  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{red}$ ,  $\rho_{blue}$ 는 각각 근적외선 영역(841~876 nm), 적색 영역(620~670 nm), 청색 영역(459~479 nm) 파장대에서의 반사율을 나타내며,  $G$ 는 gain factor로서 2.5의 값을 가지는 계수이다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 청색밴드를 이용하여 적색 밴드 내부의 에어로졸 영향을 고려하기 위한 보정 계수이다(Huete et al., 2002, 2006).  $EVI_{min}$ 과  $EVI_{max}$ 는 각각 LAI가 0과 매우 큰 값을 가질 때의 EVI (0.05, 0.95) 값이다.

순복사량은 임관과 토양 표면에 도달하는 양이 각각 다르다. 이의 양은 임관 마찰( $F_c$ )을 이용하여 구분할 수 있다.

$$A_c = F_c \times A \quad (24)$$

$$A_{soil} = (1 - F_c) \times A \quad (25)$$

여기서,  $A$ 는 유입된 순복사량,  $A_c$ 와  $A_{soil}$ 은 각각 임관과 토양 표면에 유입된 순복사량이다.



### 5.1.4 Soil Evaporation

Revised RS-PM 알고리즘에는 관목이 차지하는 면적에 따른 토양 증발량 성분이 포함되어 있다. 토양 증발량은 Eq. (14)와 같은 Penman-Monteith 방법으로 산정되는데, 본 식에는 증기 운송에 필요한 총 동역학적 저항( $r_{tot}$ ) 성분이 포함되어 있다. 총 동역학적 저항( $r_{tot}$ ) 성분은 지표면 저항( $r_s$ )과 동역학적 저항( $r_v$ )의 합으로 구할 수 있다(Van de Griend, 1994)

$$r_{tot} = r_v + r_s \quad (26)$$

여기서,  $r_{tot}$ 는 아프리카 니제르(Niger)의 남서부 지역에 위치해 있는 tiger-bush에서 관측된 값( $r_{totc}$ )을 기준으로 기온과 기압을 이용하여 보정한다(Wallace and Holwill, 1997; Jones, 1992).  $r_{totc}$ 는 107 s/m의 값을 가지는 상수이다.

$$r_{tot} = r_{totc} \times r_{corr} \quad (27)$$

$$r_{corr} = \frac{1.0}{\left(\frac{273.15 + T}{293.15}\right)^{1.75} \times \frac{101300}{P}} \quad (28)$$

여기서,  $r_v$ 는 Eq. (30)의  $r_a$ 와 유사한 값을 보이기 때문에  $r_a$ 와 같다고 가정하여 적용하고(Van de Griend, 1994),  $r_a$ 는 전도열과 복사열에 의한 저항(각각  $r_c$ ,  $r_r$ )과 병행하여 나타나기 때문에 다음 식을 이용하여 산정한다. 또한 계산된  $r_a$  값을 이용하여 Penman-Monteith 식(Eq. (14))에 적용하면 토양에서 일어난 증발량을 산정할 수 있다(Mu et al., 2007).

$$r_r = \frac{\rho \times C_p}{4.0 \times \sigma \times T^3} \quad (29)$$

$$r_a = \frac{r_c \times r_r}{r_c + r_r} \quad (30)$$

### 5.2 복사 요소 산출

증발산의 열원인 순복사량은 대부분의 관련 모델에 입력자료로 사용된다(Boegh et al., 2002). 본 연구에서는 Eq. (31)에 의하여 순복사량을 산정하였다.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{sd} + R_{ld} - R_{lu} \quad (31)$$

여기서,  $R_n$ 은 순복사 에너지(W/m<sup>2</sup>),  $\alpha$ 는 알베도,  $R_{sd}$ 는 유입 단파 복사에너지(W/m<sup>2</sup>),  $R_{ld}$ 는 유입 장파 복사에너지(W/m<sup>2</sup>),  $R_{lu}$ 는 유출 장파 복사에너지(W/m<sup>2</sup>)이다. 이중  $\alpha$ 는 미국 지질조사국(United States Geological Survey,

USGS)에서 제공하는 MODIS 육상자료 중 하나인 MCD 43 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) / Albedo 자료로부터 추출하여 이용할 수 있다. 본 연구에서는 MCD43B3 알베도 자료로부터 Black sky albedo 10번 밴드를 추출하여 반사된 태양 복사 에너지를 계산하였다.

### 5.3 MODIS-derived Instantaneous and Daily Evapotranspiration

MODIS 위성영상 자료로부터 산정된 증발산량은 위성이 대상지역을 통과하는 시간대의 순간값(instantaneous evapotranspiration)을 제공한다. 이의 특성을 일단위 증발산량으로 확장하려는 연구가 진행되고 있다. Bisht et al. (2005)은 이러한 개념을 기반으로 맑은 날에 대한 순복사량의 일중 변화를 추정하기 위한 Sinusoidal model을 제안하였고(Fig. 13), 그 수식은 Eq. (32)와 같이 표현된다. 본 연구에서는 Bisht et al. (2005)에 의해 제안된 Sinusoidal model을 사용하여 MODIS의 순간 증발산량을 하루 단위의 증발산량으로 확장하였다.

$$R_n(t) = R_{n,max} \times \sin\left[\left(\frac{t - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}}\right)\pi\right] \quad (32)$$

여기서,  $R_{n,max}$ 는 하루 중 관측된 순복사량의 최대값이고,  $t_{rise}$ 와  $t_{set}$ 은 각각의 지역에 대한 일출과 일몰 시간이다.

## 6. MODIS 위성 기반 공간 증발산량 평가

### 6.1 에디 공분산 자료에 의한 평가

본 연구에서는 Revised RS-PM 알고리즘으로 공간 증발산량을 산정하기 위해 우선 순복사량, 공기동력학적 저항, 지표면 저항 등을 산정하여 순간 증발산량을 산정하

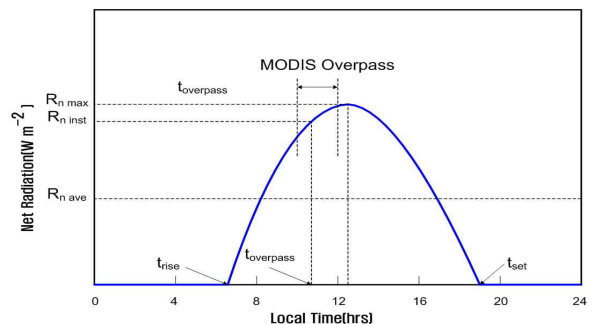


Fig. 13. Proposed Sinusoidal Model with Overpass Time (Bisht et al. (2005))

었고, 순간 증발산량을 Sinusoidal 모형에 의해 일증발산량(1 km × 1 km)으로 변환하였다. MODIS 위성 자료 기반 증발산량의 적정성을 파악하기 위해 3가지 방법별로 보충된 에디 공분산 기반의 증발산량과 그 특성을 비교·분석하였다. MODIS 위성 기반의 적정성은 먼저 MODIS 위성 기반의 일증발산량과 방법별로 보충된 일증발산량을 각각 누가하여 연증발산량의 규모적인 측면에서 평가한 후, Eqs. (33) and (34)로 Bias와 RMSE의 통계량을 산정하여 평가하였다.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)}{N} \quad (33)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{N}} \quad (34)$$

여기서,  $O$ 는 방법별로 보충된 일증발산량,  $M$ 은 Revised RS-PM에 의한 플럭스 타워가 위치하는 셀(1 km × 1 km)의 일증발산량,  $N$ 은 총 자료의 개수(365)이다.

Table 7은 플럭스 타워가 위치하는 지점에서 산정된 MODIS 기반의 증발산량(1 km × 1 km)과 3가지 방법별로 보충된 에디 공분산 기반의 증발산량의 특성을 나타낸다. Table 7에서 알 수 있는 바와 같이 MODIS 기반의 증발산량은 628.2 mm로 산정되었다. 이는 방법별로 보충된 에디 공분산 기반의 연증발산량의 평균값보다 330.6 mm 많은 양이다. 이의 특성은 에디 공분산 기반의 일증발산량과 MODIS 기반의 일증발산량을 누가하여 나타낸 Fig. 14에 나타나 있다. 규모적인 측면에서 MODIS 기반 증발산량의 적정성을 평가하여 볼 때, MODIS 기반의 증발산량은 에디 공분산 방법으로 산정된 증발산량보다 매우 크게 산정되었다. 또한 Bias와 RMSE는 각각 -0.91, 2.90의 값으로 산정되었다. Bias와 RMSE가 이와 같이 큰 값을 가지는 것으로 보아 MODIS 기반과 에디 공분산 기반의 일증발산량의 특성은 상이한 것으로 판단된다. Fig. 15는 설마천 유역에 대한 MODIS 기반의 연증발산량 지

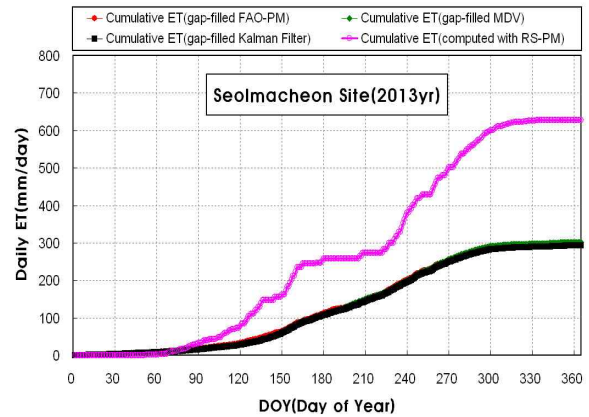


Fig. 14. Comparison of Cumulative Daily ET by Eddy Covariance and MODIS-derived

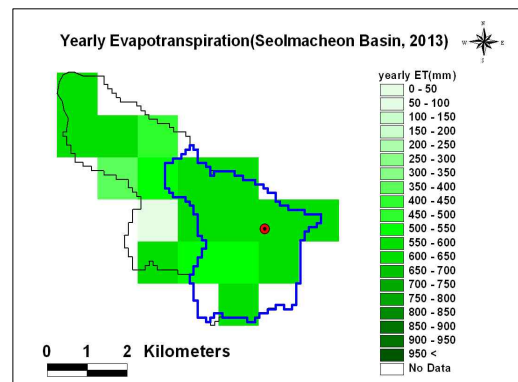


Fig. 15. Yearly Evapotranspiration Map (2013)

도를 나타낸다.

## 6.2 물 수지 분석에 의한 평가

MODIS 위성 기반 공간 증발산량의 적정성을 평가하기 위해 Eq. (1)의 물 수지 방정식으로 물 수지의 특성을 분석하였다. 물 수지 성분 중 강수량, 유출량, 유역의 지류 변화량은 위의 과정에서 산정된 값을 활용하였다. 그러나 증발산량은 전적비교 지점을 기준으로 산정된 유역 평균 증발산량을 이용하였다. 본 연구에서는 Table 8에 2013년 설마천 유역(전적비교 지점)의 물 수지 분석 결과를 나타

Table 7. Evapotranspiration Characteristics by Revised RS-PM Algorithm

Seolmacheon Site		yearly ET (mm)	Bias (mm)	RMSE (mm)
Revised RS-PM	Flux Tower (1 km × 1 km)	628.2		
Gap-filling method	FAO-PM	297.4	-0.91	2.85
	MDV	302.2	-0.89	2.93
	Kalman Filter	293.3	-0.92	2.90
	Average by methods	297.6	-0.91	2.90

**Table 8. Analysis Output of Water Budget Characteristics in Seolmacheon Area (2013)**

Rainfall P ( $10^6 \times m^3$ )	Runoff		Areal evapotranspiration		Storage variation		Error	
	Q ( $10^6 \times m^3$ ) (mm)	rate (%)	ET( $10^6 \times m^3$ ) (mm)	rate (%)	$\Delta S$ ( $10^6 \times m^3$ ) (mm)	rate (%)	( $10^6 \times m^3$ ) (mm)	Rate (%)
12.526 (1,477.1)	9.358 (1,103)	74.67	4.852 (572.13)	38.73	-0.175 (-20.6)	-1.39	-1.504 (-177.43)	-12.01

내었다. Table 8에서 알 수 있는 바와 같이 177.43mm의 편차로 인해 물 수지는 폐합되지 못하였다. 이와 같이 물 수지가 닫히지 않은 원인은 물 수지 성분의 산정 오차에 있겠지만, 가장 근원적인 원인은 MODIS 위성 기반의 공간 증발산량이 크게 산정되었다는 점과 유역의 저류변화량 산정에 있어 토양수분 변화량만 고려하고 지하수 저류 변화량을 고려하지 못한 데에 있는 것으로 판단된다. 또한, 물 수지 분석에 활용된 토양수분량도 지점 토양수분량으로서 유역을 대표하지 못했을 것으로 판단된다. 물 수지 분석 결과를 토대로 MODIS 기반 공간 증발산량을 종합적으로 평가하여 볼 때, Revised RS-PM 알고리즘으로 생산된 공간 증발산량은 설마천 유역의 실제 증발산량을 대표하지 못하였다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 MODIS 위성 기반 공간 증발산량의 적정성을 평가하기 위해 플렉스 타워가 위치하는 지점에서 산정된 MODIS 기반의 증발산량(1 km × 1 km)과 3가지 방법으로 보충된 에디 공분산 기반의 증발산량을 서로 비교·분석하였다. 또한, 전적비교 지점을 출구로 하는 유역 평균 증발산량을 MODIS 위성 기반의 증발산량 지도에서 산정한 후 물 수지 특성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

- 1) MODIS 위성 기반 증발산량은 에디 공분산 방법으로 산정된 증발산량보다 330.6mm크게 산정되었다. 또한, MODIS와 에디 공분산 기반의 증발산량에 대한 Bias와 RMSE는 평균 -0.91, 2.90의 값으로 산정되었다. 증발산량의 규모와 Bias, RMSE가 이와 같이 큰 값을 가지는 것으로 보아 MODIS와 에디 공분산 기반의 증발산량의 특성은 서로 상이한 것으로 판단된다.
- 2) 물 수지 분석 결과, 물 수지는 177.43 mm 정도 편차로 인해 닫히지 못하였다. 물 수지가 닫히지 않은 근원적인 원인은 MODIS 위성 기반의 공간 증발산량이 크게 산정된 데에 있는 것으로 판단된다.

3) 물 수지 분석 결과를 토대로 MODIS 기반 공간 증발산량을 평가하여 볼 때, Revised RS-PM 알고리즘으로 산정된 공간 증발산량은 설마천 유역의 실제 증발산량을 대표하기에 한계가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Revised RS-PM 알고리즘으로 산정된 공간 증발산량에 대해 자료보충을 수행하지 못하였다. 자료보충을 수행하지 못한 상태에서도 큰 특성을 나타내었다는 점을 고려하여 볼 때, MODIS 기반의 증발산량은 현재 산정된 값보다도 더 클 것으로 판단된다. MODIS 위성 기반 증발산량의 품질을 향상시키기 위해서는 플렉스 타워에서 관측된 자료를 활용하여 MODIS 기반의 증발산량을 보정해 주어야 할 것으로 판단된다. 또한, MODIS 기반의 증발산량 지도에 내포하는 빈 셀(no value)에 대한 자료보충이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부의 수문조사사업(토양수분량 및 증발산량 조사, 유량조사사업단)과 한국건설기술연구원의 연구사업(산지하천 유역의 홍수예측을 위한 수문조사)의 결과로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D., Jensen, M.E., and Snyder, R.L. (2005). "The ASCE standardized reference evapotranspiration equation." *American Society of Civil Engineers*, Reston, V.A.
- Allen, R.G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007a). "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 133, No. 4, pp. 380-394.
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., and Jiang, L. (2005).

- “Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, pp. 52–67.
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., and Jiang, L. (2005). “Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, pp. 52–67.
- Boegh, E., Soegaard, H., and Thomsen, A. (2002). “Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 79, pp. 329–343.
- Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., and Running, S.W. (2007). “Regional evaporation estimators from flux tower and MODIS satellite data.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106, pp. 285–304.
- Dang, Q.L., Margolis, H.A., Coyea, M.R., Sy, M., and Collatz, G.J. (1997). “Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees: Roles of shoot water potential and vapor pressure difference.” *Tree Physiology*, Vol. 17, pp. 521–535.
- Falge E., Baldocchi, D., Olson, R.J., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.-O., Katul, G., Keronen, P., owalski, A., Ta Lai, K.C., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, J. Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S. (2001). “Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 107, pp. 43–69.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., and Ferreira, L.G. (2002). “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp. 195–213.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, S.R., Hutyra, L.R., Yang, W., Nemani, R.R., and Myneni, R. (2006). “Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season.” *Geophysical Research Letters*, 33.
- Jang, K.C., Kang, S.K., Kim, H.W., and Kwon, H.J. (2009). “Evaluation of Shortwave Irradiance and Evapotranspiration Derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).” *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 45, pp. 233–246.
- Jarvis, P.G. (1976). “The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field.” *Philos. Trans. R. soc. London*, Vol. 273, pp. 593–610.
- Jones, H.G. (1992). “Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant.” *Physiology*.
- KICT. (2003). “Hydrological Survey for Flood Forecasting of the Mountainous River Basin.” pp. 7–12.
- Kwon, H., Heinsch, F.A., Zaho, M., and Running, S.W. (2007). “Development of a global evapotranspiration algorithm based MODIS and global meteorology data.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, pp. 519–536.
- Landsberg, J.J., and Gower, S.T. (1997). “Applications of physiological Ecology to Forest Management.” San Diego, CA: Academic Press.
- Mu, Q., Lee, J.H., Lee, Y.K., Lee, J.W., Jung, S.W., and Kim, J. (2009). “Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 39–47.
- Nishida, K., Nemani, R.R., Glassy, J.M., and Running, S.W. (2003b). “Development of an evapotranspiration Index Aqua/MODIS for Monitoring Surface Moisture Status.” *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, pp. 493–501.
- Song, T.B, Kim, S.H., Lee, Y.K., Lee, S.W., and Kim, J. (2013). “Spatio-temporal Regression Analysis between Soil Moisture Measurement and Terrain Attributes at Hillslope Scale.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 15, No. 3, pp. 161–170.
- Van De Griend, A.A., and Owe, M. (1994). “Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions.” *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 181–188.
- Wallace, J.S., and Holwill, C.J. (1997). “Soil evaporation from tiger-bush in south-west Niger.” *Journal of*

*Hydrology*, Vol. 188–189, pp. 426–442.

Wilczak, J.M., Oncley, S.P., and Stage, S. (2001). “Sonic anemometer tilt correction algorithms.” *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 99, pp. 127–150.

Yuan, R., Kang, M., Park, S., Hong, J., and Kim, J. (2007). “The effect of coordinate rotation on the eddy covariance flux estimation in a hilly KoFlux forest catchment.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 9, No. 2, pp. 100–108.

*logy*, Vol. 9, No. 2, pp. 100–108.

paper number : 15-058

Received : 30 July 2015

Revised : 20 August 2015 / 31 August 2015

Accepted : 31 August 2015