

## 아시아 Fluxnet 자료를 활용한 보완관계 기반 증발산량 추정

서호철\* · 김정빈\*\* · 박혜선\*\*\* · 김연주\*\*\*\*

Seo, Hocheol\* · Kim, Jeongbin\*\* · Park, Hyesun\*\*\* · Kim, Yeonjoo\*\*\*\*

### Estimating Evapotranspiration with the Complementary Relationship at Fluxnet Sites Over Asia

#### ABSTRACT

Evapotranspiration is a significant hydrologic quantity for understanding the amount of available water resource evaluation, water balance analysis, water circulation and energy circulation. Various methods have been developed for estimating the evapotranspiration using data observed at meteorological observatories. Especially, the focus of methods has been on the complementary relationship that the actual evapotranspiration is equal to the difference between the twice of evapotranspiration in the wet condition and the potential evapotranspiration. The Granger and Gary (GG) method is an empirical formula that can be used to estimate the evapotranspiration using only empirical parameters based on the complementary relationship and using only the net radiation and temperature of the region. In this study, we compared the evapotranspiration data observed at 10 sites in Asia within the dataset of FLUXNET2015, with the evapotranspiration calculated by GG method. The evapotranspiration in inland area was estimated more accurately than that of coastal area. Simulated Annealing (SA) was used for the coastal area to modify the parameters. Using the modified GG method, we could improve the statistics such as root mean square error, the coefficient of determination ( $R^2$ ), and the mean absolute |BIAS| of the evapotranspiration estimation in coastal area.

**Key words** : Evapotranspiration, GG Method, Complementary relationship, FLUXNET2015

#### 초 록

증발산량은 수자원 부족량 평가, 물수지 분석, 지구의 물 순환 및 에너지 순환을 이해하기 위해서 알아야 할 중요한 수문량이다. 실제 증발산량이 습윤조건의 증발산량의 2배에서 잠재 증발산량을 제한 것과 같다는 보완관계(Complimentary relationship)를 기반으로 기상관측망 지점에서 일반적으로 관측되는 기상 자료를 이용해 증발산량을 산정하는 방법이 다양하게 개발되어 왔다. 이 중 Granger and Gary (GG)방법은 보완관계를 기반으로 경험적인 매개변수를 도입하여, 지역의 기온 등의 자료만 활용하여 증발산량을 산정할 수 있도록 하는 경험식이다. 본 연구에서는 FLUXNET2015 자료 중 아시아 지역 내의 10개 지점에서 에디공분산법을 활용해서 관측된 증발산량 자료를 GG방법을 활용하여 산정한 증발산량과 비교하였다. 내륙지역의 경우 해안지역에 비해 상대적으로 정확하게 증발산량이 추정되었고, 이에 해안지역의 경우에만 담금질 기법(Simulated Annealing, SA)을 활용하여 GG방법의 매개변수를 수정하였다. 수정된 GG방법을 활용하여 증발산량 추정 결과의 Root mean square error, Coefficient of determination( $R^2$ ), Mean absolute BIAS를 개선할 수 있었다.

**검색어** : 증발산량, GG방법, 보완관계법, FLUXNET2015

\* 연세대학교 토목환경공학과 통합과정 (Yonsei University · tjghcjfl@yonsei.ac.kr)

\*\* 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Yonsei University · zzang\_bin@yonsei.ac.kr)

\*\*\* 연세대학교 토목환경공학과 연구원 (Yonsei University · hs.park@yonsei.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · Yonsei University · yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr)

Received December 21, 2016/ revised February 7, 2017/ accepted March 8, 2017

## 1. 서론

증발산량은 수자원 부존량 평가, 물수지 분석, 지구의 물 순환 및 에너지 순환을 이해하기 위해서 알아야 할 필수적인 수문량이다. 최근에는 기후변화로 인해 물 순환에 대한 정확한 이해가 요구되고 있다(Badawy, 2009). 부정확한 증발산량의 측정은 물 순환에 대해 부정확한 예측으로 이어지기 때문에, 정확한 물 순환을 이해하기 위해서는 증발산량 측정의 정확성이 요구된다(Kondoh and Nishiyama, 2000). 그러나, 증발산량을 직접적으로 측정하기는 어렵기 때문에 일반적으로 단순한 가정 및 경험식을 사용해 증발산량을 추정하는 방법들이 많이 연구되어져 왔다.

증발산량을 추정하기 위한 대표적인 방법으로 에너지와 공기동력학의 조합으로 이루어진 Penman식, Penman-Monteith식 등이 있다(Penman, 1948; Allen et al., 1998). Penman-Monteith 식은 물리적인 이론에 바탕을 두고 있어 일반적으로 가장 신뢰할 수 있으나 태양복사열, 풍속, 온도, 습도 등 다양한 기상 자료를 필요로 하는 한계를 가지고 있다. 이에 제한된 수의 기상 자료를 활용하여 증발산량을 산정할 수 있는 경험식이 제안되어 왔으며, Hargreaves 공식, 증발산량의 보완관계(Complementary relationship)를 기반으로 하는 여러 모형 등이 있다(Priestley and Taylor, 1973; Hargreaves and Samani, 1982; Morton, 1983; Granger, 1991).

Hargreaves 공식은 온도만을 활용하여 증발산량을 추정하는 방법이다(Hargreaves and Samani, 1982). 온도와 복사열은 증발산량을 결정하는 주요인자로, 특히 온대지역에서 정확도가 높다고 알려져 있다. 하지만 증발산량은 지형 및 지리적 조건, 다양한 기상 및 기후에 많은 영향을 받기 때문에 증발산량을 단순한 가정 및 경험식을 이용해 추정할 때에는 신뢰성의 문제가 발생하고, 이에 모수들을 각 지역에 맞게 새로 추정하는 연구들이 이루어져 왔다. Lee and Park (2008)은 우리나라 전역에 걸쳐 증발산량을 산정하기 위해 Hargreaves 공식의 매개변수를 기상 관측 지점별로 추정하였다.

또한, Bouchet (1963)이 제안한 잠재 증발산과 실제 증발산량간의 보완관계를 이용하는 방법들도 다수 제안되었다. 보완관계에 따르면 실제 증발산량은 습윤조건의 증발산량의 2배에서 잠재 증발산량을 제한 값과 같다. Advection-Aridity (AA)방법(Priestley and Taylor, 1973), Complementary Relationship Areal Evapotranspiration (CRAE)방법(Morton, 1983), Granger and Gary (GG)방법(Granger and Gray, 1989)등을 포함한다. Liu et al. (2006)은 중국 황하 유역에서 물수지모형 결과와 AA방법, CRAE 방법, GG방법을 활용해서 산정한 증발산량을 비교하고, 각 모형의 경험적인 매개변수를 지역에 맞게 추정해야 한다고 제시하였다. 비슷한 방법으로 Kim and Lee (2014)는 우리나라의 복합된 증발류

지역에서 AA방법과 CRAE방법의 적용성을 평가하기도 하였다. Fluxnet을 통하여 에디공분산법(Eddy covariance method)을 활용하는 Flux타워에서 측정된 자료의 공유가 전세계적으로 활발히 이루어짐에 따라 증발산량을 포함한 물과 에너지수지 자료, 기상 자료들의 활용이 용이해졌다. 이에 Anayah and Kaluarachchi (2014)는 전 지구적으로 분포해있는 34개의 Fluxnet 자료를 이용한 실제 증발산량을 활용하여 CRAE방법, AA방법, GG방법을 비교 평가하였다. 이 중 GG방법의 신뢰성이 가장 높다고 판단하고 GG방법을 활용하는 구체적인 방안을 제시하기도 하였다.

이에 본 연구에서는 수정된 보완관계를 기반으로 하는 방법 중에서 GG방법에 초점을 맞추고, 이 방법론의 아시아 적용성을 판단하고자 한다. Fluxnet에서 제공하는 아시아 10개 Flux타워에서 관측된 증발산량 및 기상 자료를 활용하여 GG방법 기반 증발산량을 비교하였다. Fluxnet 지점은 내륙지역과 해안지역으로 나누었으며, 상대적으로 내륙지역에서 정확도가 높음을 확인하였다. 또한, 해안지역에서는 GG방법의 매개변수를 담금질 기법(Simulated Annealing, SA)을 통하여 재추정하여 모형의 정확도를 향상시키고자 하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 대상 지역

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 아시아 지역 내 위치하고 있는 10개 지점의 Fluxnet 자료를 활용하였다. Fluxnet은 전 세계에 위치하고 있는 flux타워에서 에디공분산법 등을 활용하여 측정된 미기상 자료를 공유하는 네트워크이다. 본 연구에서는 Fluxnet에서 제공하는 gap-filling 자료 중에서 FLUXNET2015 자료를 활용한다(fluxnet.fluxdata.org). Table 1과 같이 중국의 7개 지점

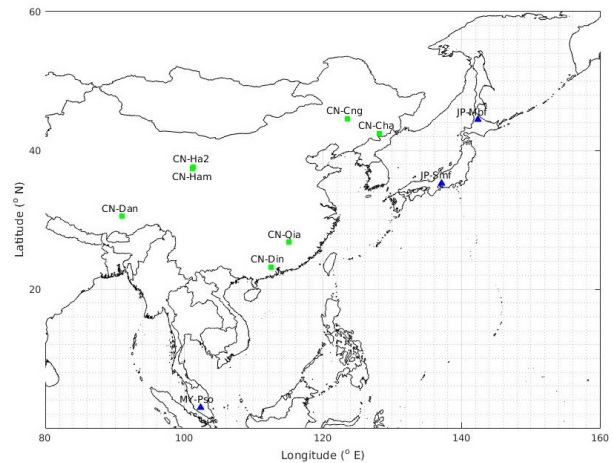


Fig. 1. Study Area : ■ and ▲ Represent the Fluxnet Sites Over Asia in the Land and Coastal Areas, Respectively

Table 1. Description of Study Area

Type	Site ID	Site_name	Year	Land cover	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Distance from sea (km)
Land	CN-Cha	Changbaishan	2003.1 ~ 2005.12	Mixed Forests	42.4	128.0	165
	CN-Cng	Changling	2007.1 ~ 2010.12	Grasslands	44.5	123.5	440
	CN-Dan	Dangxiang	2004.1 ~ 2005.12	Grasslands	30.4	91.0	1000
	CN-Din	Dinghushan	2003.1 ~ 2005.12	Evergreen Broadleaf Forests	23.1	112.5	160
	CN-Ha2	Haivei Shrubland	2003.1 ~ 2005.12	Grasslands	37.6	101.3	1400
	CN-Ham	Habei Alpine Tibet	2002.1 ~ 2004.12	Grasslands	37.3	101.1	1460
	CN-Qia	Qianyanzhou	2003.1 ~ 2005.12	Woody Savannas	26.7	115.0	400
Coast	JP-Mbf	Moshiri Birch Forest	2004.6 ~ 2005.12	Deciduous Broadleaf Forests	44.3	142.3	47
	JP-Smf	Seto mixed Forest	2003.1 ~ 2006.12	Croplands	35.2	137.0	20
	MY-Pso	Pasoh Forest Reserve	2003.1 ~ 2009.12	Evergreen Broadleaf Forests	2.5	102.1	18

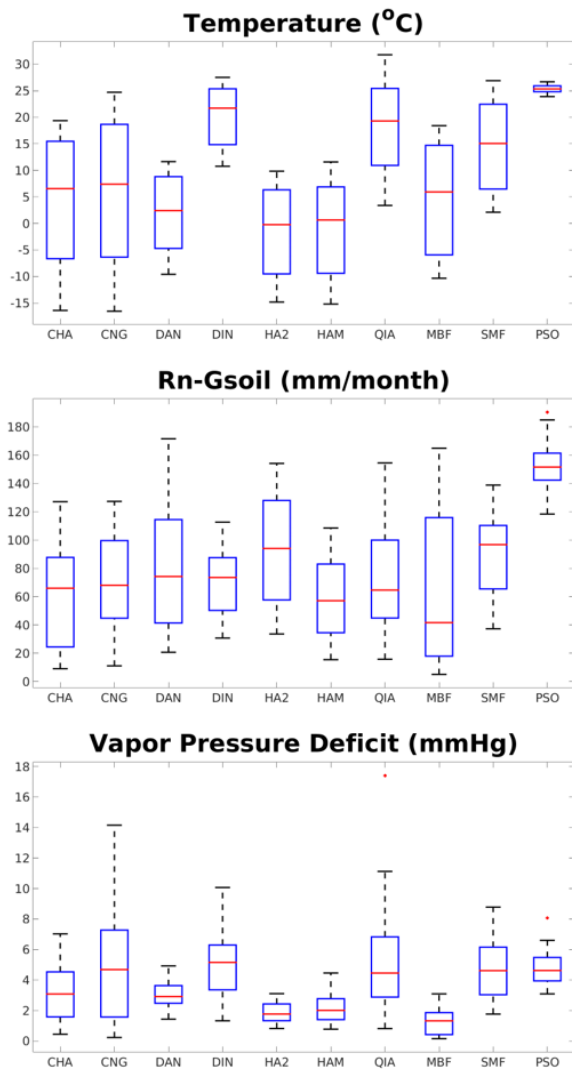


Fig. 2. Box Plot of Monthly Temperature, Radiation and Vapor Pressure Deficit in Study Area

(CN-Cha, CN-Cng, CN-Dan, CN-Din, CN-Ha2, CN-Ham, CN-Qia), 일본의 2개 지점(JP-Mbf, JP-Smf), 말레이시아의 1개 지점(MY-Pso)을 포함한다. 본 연구에서는 최소 1년 이상의 연속 자료를 제공하는 지점의 자료를 활용하였으며, 지역별로 짧게는 1년 6개월, 길게는 7년의 월 자료를 수집하였다. 각 지점에 대하여 해안으로부터 100 km 이내에 위치하고 있는 경우는 해안지역, 100 km 이상 떨어진 경우에는 내륙지역으로 나누어 분석을 진행하였다. 연구지역 중 내륙지역은 중국의 7개 지점이며, 해안지역은 일본과 말레이시아의 3개 지점이다. 또한 각 지점의 토지피복 특성은 초지, 사바나, 산림 등으로 다양하였다. 에다공분산법을 활용하여 측정된 증발산량 및 GG방법에 필요한 온도, 복사량 포차 등 미기상 자료를 Fig. 2에 도시하였다. 열대기후에 속하는 지점인 MY-Pso에서 월 평균 온도 및 가용 에너지(순복사량-지중열전도량)는 다른 지점과 달리 높은 평균값과 작은 변동폭을 가진다.

## 2.2 증발산량 산정 방법

### 2.2.1 실제 증발산량 측정

Flux타워에서는 에다공분산법을 이용하여 물, 에너지, 탄소 Flux를 관측한다(Baldocchi et al., 1988; Aubinet et al., 2012). 에다공분산법은 기본적으로 지표면이 수평적으로 균일하고 편평하며 어떤 흡원과 발원이 존재하지 않는 이상적인 조건을 갖는 것으로 가정한다. 난류에 의한 연직 Flux는  $F = \overline{\rho_a' w'}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $\rho_a'$ 는 평균공기밀도로부터의 편차,  $w'$ 는 평균공기풍속으로부터의 편차를 나타낸다. 아래와 같이 잠열 Flux는 수증기와 연직풍속의 공분산으로 정의하고 증발산량을 산정할 수 있다.

$$LE = L \overline{\rho_a' w'} \quad (1)$$

$$ET = \frac{LE}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (2)$$

여기서  $LE$ 는 잠열 Flux,  $L$ 은 잠재증기화열을 의미한다.  $ET$ 는 증발산량으로 잠열 Flux에서 열전단계수( $\lambda$ )와 물의 밀도( $\rho_w$ )를 이용하여 산정한다.

### 2.2.2 GG방법에 의한 증발산량 산정 방법

Bouchet (1963)는 대상지역이 건조해지면 가용수분량이 줄어들기 때문에 실제 증발산량( $ET_a$ )이 줄어들고, 실제 증발산량이 감소한 만큼 잠재 증발산량( $ET_p$ )은 증가한다는 보완관계법을 제안하였다. 또한 건조하여 증발산을 위한 가용수분이 없을 경우에 실제 증발산의 양은 0이 되고 잠재 증발산량은 최대가 된다. 반면 공기가 완전 포화되어 습한 경우에는 실제 증발산량은 최대, 잠재 증발산량은 최소가 되며 이때 실제 증발산량과 잠재 증발산량은 습윤조건의 증발산량( $ET_w$ )이 된다. 이를 기반으로 보완관계법은 실제 증발산량이 습윤조건의 증발산량의 2배에서 잠재 증발산량을 제한 값과 같다고 제시하였으며, 다음의 Eq. (3)으로 표현된다(Fig. 3).

$$ET_a = 2ET_w - ET_p \quad (3)$$

위의 보완관계식을 사용하여 증발산량을 산정하기 위해서는 습윤조건 증발산량과 잠재 증발산량을 산정해야한다. 대표적으로 CRAE방법, AA방법이 있으며, 각각 다른 경험식을 활용한다. Granger and Gray (1989)은 기존의 보완관계법의 Eq. (3)을 변형하여 아래 Eq. (4)와 같은 새로운 수정된 보완관계법을 제시하였으며 이를 바탕으로 증발산량을 구하는 GG방법을 제시하였다.

$$ET_a = \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta}\right)ET_w - \frac{\gamma}{\Delta}ET_p \quad (4)$$

또한 Relative drying power (D; Eq. (5)), Relative evaporation (G; Eq. (7))의 개념을 도입하여 증발산량을 구하는 방법을 제시하였다.

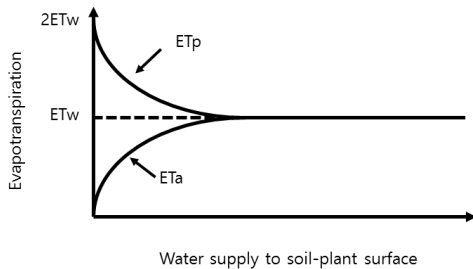


Fig. 3. Complementary Relationship (Morton, 1983)

$$D = \frac{E_a}{E_a + (R_n - G_{soil})} \quad (5)$$

$$E_a = 10.6 \times (\beta + 0.54U)(e_s - e_a) \quad (6)$$

$$G = \frac{ET_a}{ET_p} \quad (7)$$

여기서  $E_a$ 는 Drying power of air ( $\text{mm month}^{-1}$ ),  $R_n$ 는 순복사 (Net radiation) ( $\text{mm month}^{-1}$ ),  $G_{soil}$ 는 지중 열전도량(Soil heat flux) ( $\text{mm month}^{-1}$ ),  $\beta$ 는 1,  $U$ 는 지상에서 2 m 상공의 풍속 ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $e_s$ 는 포화수증기압( $\text{mmHg}$ ),  $e_a$ 는 실제 수증기압( $\text{mmHg}$ )을 나타낸다.

Granger and Gray (1989)는 캐나다 서부 semi-arid 지역의 자료를 이용하여 다음 Eq. (8)과 같이 G와 D의 관계를 나타내었다.

$$G = \frac{1}{(C_1 + C_2 e^{C_3 D})} \quad (8)$$

여기서  $C_1 = 1$ ,  $C_2 = 0.028$ ,  $C_3 = 8.045$ 이다.

아래 Eq. (9)은 습윤조건 증발산량을 나타내는 Penman식(1948)이며 이와 Eq. (7)을 수정된 보완관계법(Eq. (4))에 대입하면 Eq. (10)와 같이 증발산량을 산정할 수 있다.

$$ET_w = \frac{\Delta}{\gamma + \Delta}(R_n - G_{soil}) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta}E_a \quad (9)$$

$$ET_a = \frac{\Delta G}{\gamma + \Delta G}(R_n - G_{soil}) + \frac{\gamma G}{\gamma + \Delta G}E_a \quad (10)$$

여기서  $\Delta$ 는 Rate of change of saturation vapor pressure이며,  $\gamma$ 는 건습상수(Psychrometric constant)이다. GG방법은 기존의 보완관계법과 같이  $ET_p$ ,  $ET_w$ 를 동시에 구하지 않고서  $ET_a$ 를 구할수 있는 방법이며 Eq. (4)을 통하여  $ET_w$ 를 구할 수 있다.

### 2.3 담금질 기법(Simulated Annealing, SA)

SA는 금속 결정의 원활한 형성을 위해 가열과 냉각을 조절해야 하는 금속의 담금질(annealing) 기술에서 유래된 Optimization의 한 방법으로 Kirkpatrick et al. (1983)에 의해 처음으로 제안되었다 (Fig. 4). 금속의 담금질에서 서서히 냉각시키면 최초의 상태보다 더 낮은 내부 에너지를 가지는 환경을 찾을 수 있는 기회를 더 많이 가지게 되지만 많은 시간이 소요되게 되고, 이러한 원리를 최적화에 적용할 수 있다. SA 알고리즘은 Fig. 4와 같은 과정을 거친다. 임의의 초기해(initial solution)를 작성하여 그 해로부터

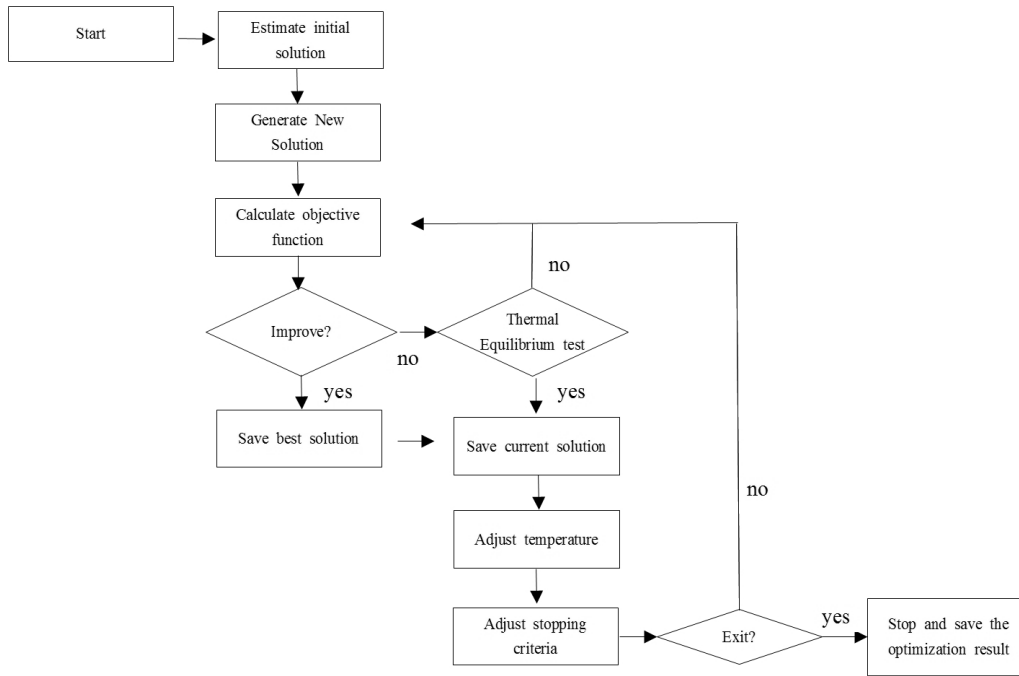


Fig. 4. Flowchart of Simulated Annealing (SA) Algorithm

임의의 해를 선택하고 이는 목적함수 값과 글로벌 파라미터, 즉 annealing temperature의 영향을 받으며 기존의 해와 새로운 해의 목적함수(objective function)값을 비교하게 된다. 새로운 해의 목적함수가 더 좋은 값을 가지게 되면 그 해를 선택하고 그렇지 않을 경우에는 열균형 테스트(thermal equilibrium test)를 거쳐 수락 혹은 누락 여부가 결정된다. 이와 같은 과정이 반복적으로 시행되어 최대 반복횟수에 도달하거나 열균형 온도가 최저온도에 도달하게 되는 경우 SA 알고리즘은 종료된다. SA 알고리즘은 유전자 알고리즘(Generic algorithm, GA)과 같이 복잡한 제약식을 가지는 조합 최적화문제에서 확률적 탐색을 기반으로 하여 임의의 경우의 수가 많은 경우 정해진 조건에서 최적값에 근접한 해를 구하기 위한 방법이라고 할 수 있다(Jeon and Lee, 2005; Jeon et al., 2013).

위에서 언급되었던 바와 같이 본 연구에서 기존의 GG방법을 이용하여 산정한 증발산량을 관측된 증발산량과 비교하였고, 산정된 값을 보정하고자 위 Eq. (8)의 매개변수( $C_1, C_2, C_3$ )들을 SA를 사용하여 재추정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 GG방법 기반 증발산량 산정 및 분석

본 연구에서는 아시아의 Fluxnet 지점에서 측정된 증발산량과 GG방법으로 산정한 증발산량을 비교하였다. GG방법의 매개변수

는 서부 캐나다의 semi-arid 지역에서 도출된 경험적 매개변수이고 이에 이의 활용성을 아시아 지점에서 확인할 필요가 있다. 이에 관측값과 GG방법으로 구한 평균 증발산량, 산정값 사이의 RMSE,  $R^2$ , |BIAS|를 평가하였다. 지점은 내륙지역과 해안지역으로 임의로 나누어 진행하였다.

Fig. 5에 내륙지역인 7개 지점의 월별 증발산량을 도식화하였다. 관측된 증발산량의 계절적 변화는 GG방법을 활용하여 모의할 수 있었다. 다만 계절적 변화의 진폭이 GG방법을 사용하였을 경우 관측값에 비해 상대적으로 작았다. 모든 지점에서 여름철 증발산량의 과소 산정을 확인할 수 있었으며, 겨울철 증발산량의 과대 산정 또한 CN-Dan, CN-Ham, CN-Ha2 지점 등에서 확인할 수 있었다. 전체 기간 동안 평균값을 살펴보면(Table 2) 평균적으로는 CN-Ha2, CN-Ham, MY-Pso에서 GG방법으로 과대 산정되었고 나머지 지점에서는 과소 산정되었다. Table 3과 같이 내륙지역의 평균 RMSE는 5.994 (mm/month), 평균  $R^2$ 는 0.930, 평균 |BIAS| 는 4.066 (mm/month)으로 나타났다.

Fig. 6은 해안지역인 3개 지점의 월별 증발산량으로, MY-Pso 지역의 경우에는 GG방법으로 추정된 증발산량이 전체적으로 Flux 관측 증발산량에 비해 과대 산정되었을 뿐 아니라 계절적 변화도 많이 다르게 나타난다. 대조적으로 JP-Smf 지역에서는 전반적으로 GG방법으로 추정된 증발산량이 관측된 증발산량에 비해 과소 산정되었다. 관측된 증발산량과 GG방법을 이용하여 추정된 증발산량의 관계를 확인한 결과, 평균 RMSE는 8.427 (mm/month),

아시아 Fluxnet 자료를 활용한 보완관계 기반 증발산량 추정

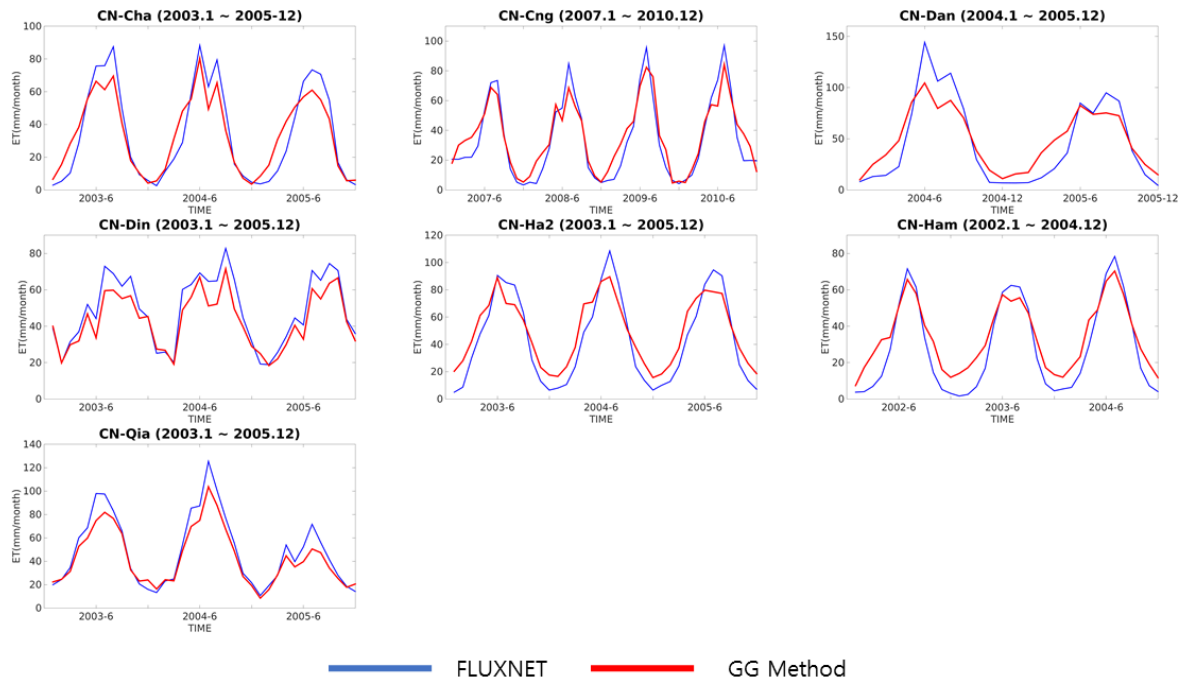


Fig. 5. Observed and GG-based Evapotranspiration in the Land Area

Table 2. Result of Observed and GG-based Mean Evapotranspiration (mm/month)

Type	Site ID	Fluxnet	GG Method	GG Method with revised parameters
Land	CN-Cha	34.340	33.769	-
	CN-Cng	33.876	36.072	-
	CN-Dan	45.948	48.893	-
	CN-Din	48.63	43.048	-
	CN-Ha2	43.917	49.274	-
	CN-Ham	28.151	34.202	-
	CN-Qia	48.701	42.939	-
Coast	JP-Mbf	40.045	36.268	35.763
	JP-Smf	62.666	55.330	69.060
	MY-Pso	97.776	104.384	98.024

Table 3. Statistical Comparison of Observed and GG-based Evapotranspiration in the Land Area

Type	Site ID	RMSE (mm/month)	R <sup>2</sup>	BIAS  (mm/month)
Land	CN-Cha	7.604	0.895	0.571
	CN-Cng	6.674	0.914	2.196
	CN-Dan	9.643	0.894	2.945
	CN-Din	3.380	0.952	5.582
	CN-Ha2	6.926	0.922	5.357
	CN-Ham	3.971	0.955	6.051
	CN-Qia	3.760	0.976	5.762
	Average	5.994	0.930	4.066

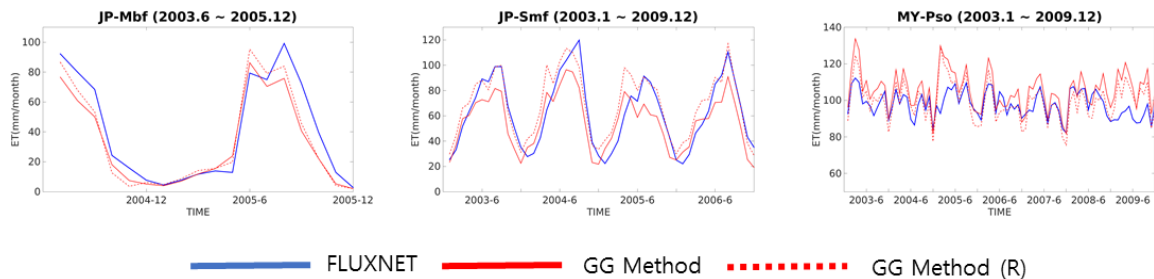


Fig. 6. The Same as Fig. 5, But for the Asiaflux Sites in the Coastal Area

Table 4. The Same as Table 2, But for the Coastal Area

Type	Site ID	RMSE (mm/month)	R <sup>2</sup>	BIAS  (mm/month)
Coast	JP-Mbf	8.404	0.912	3.777
	JP-Smf	10.253	0.784	7.336
	MY-Pso	6.624	0.621	6.608
	Average	8.427	0.772	5.907
Coast (SA)	JP-Mbf	8.012	0.912	4.282
	JP-Smf	6.462	0.836	6.394
	MY-Pso	5.624	0.663	0.248
	Average	6.699	0.804	3.641

평균 R<sup>2</sup>는 0.772, 평균 |BIAS|는 5.907 (mm/month)로 나타났다 (Table 4). 내륙지역 결과에 비해 RMSE와 |BIAS|는 상대적으로 크고 R<sup>2</sup>는 작았으며, 이는 해안지역에서 GG방법을 이용한 증발산량 추정에 한계가 있음을 제시한다.

### 3.2 해안지역에서의 GG방법 매개변수 추정 및 분석

JP-Mbf, JP-Smf, MY-Pso 지점을 포함한 해안지역에서의 GG 방법 기반 증발산량 추정 결과가 내륙지역에 비하여 상대적으로 개선이 필요함을 앞서 확인하였다. 이에 본 절에서는 해안지역 지점에서 GG방법의 매개변수를 SA 알고리즘을 활용해 추정하여 보았다. Eq. (11)과 같은 목적방정식을 활용하여 Eq. (8)의 매개변수(C1, C2, C3)를 새롭게 추정하였다. Table 5와 같이 SA 알고리즘으로 추정된 새로운 GG방법 매개변수 C1은 1.0576, C2는 0.0013, C3는 11.5887이다.

$$J = (ET_{obs} - ET_{GG})^2 \quad (11)$$

해안지역에서 기존의 GG방법 증발산량과 새로운 매개변수를 활용한 증발산량을 관측된 값과 비교하였다(Fig. 6 and Table 2). 새롭게 모의된 증발산량은 기존의 GG방법 기반의 증발산량에 비해 과소 혹은 과대 모의되었던 편이가 축소되었음을 확인할 수 있었다. Table 4와 같이 RMSE는 6.699 (mm/month), R<sup>2</sup>는 0.804, |BIAS|는 3.641 (mm/month)로 모든 지표가 개선되었음을 확인할 수 있었다. 그러나, MY-Pso에서 특정해(2005년, 2009년 등) 동안의 과대모의 개선에는 한계가 있었다. 해안지역에서는

Table 5. Parameters for GG Method

Type	C1	C2	C3
GG method	1	0.028	8.045
GG method with revised parameters	1.0576	0.0013	11.5887

제한된 기상인자만 활용한 경험식에는 반영되지 않은 요소가 증발산량에 영향을 미칠 가능성이 내륙지역에 비하여 높기 때문인 걸로 추정할 수 있다. 즉, 해안지역에서는 GG방법과 같은 경험식을 활용하는 데는 한계가 있다. 이러한 경우에는 에너지와 공기동력항의 조합으로 이루어진 Penman-Monteith식 등 물리기반 식이 활용되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 Flux타워에서 에디공분산을 이용하여 측정된 증발산량과 GG방법으로 추정되어진 증발산과의 상관관계를 비교하여 GG방법의 아시지역에서의 활용성을 확인하고자 하였다.

첫째, 동아시아 지역의 실제 증발산과 다양한 기상 자료를 이용하여 증발산량을 추정하는 GG방법을 이용한 증발산량에 대하여 비교 및 분석을 실시하였다. 대상지역을 해안지역과 내륙지역으로 나누어 분석을 실시하였다.

둘째, 동아시아 지역의 Fluxnet에서 관측된 증발산량 자료와 온도, 습도, 순복사량 등의 기상 자료를 활용하였다. 중국, 일본, 말레이시아에 분포해 있는 총 10개의 지점에 대하여 자료를 수집하였다. 또한, 관측된 증발산량과 GG방법으로 추정한 증발산량을 비교하기 위하여 월별 자료를 이용하였다.

마지막으로, 관측된 증발산량과 GG방법으로 추정한 증발산량과의 상관관계를 비교하여 동아시아 지역에서의 활용성을 검토하였다. 내륙지역의 경우 GG방법으로 추정한 증발산량과 관측된 증발산량을 비교했을 때 평균 R<sup>2</sup>가 0.930이었다. 여름철의 증발산량이 과소 산정되는 경향을 확인할 수 있었지만 대체적으로 높은 상관관계를 보였다. 해안지역의 경우 평균 R<sup>2</sup>는 0.722로 나타났으며 내륙지방에 비해 관측값과의 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 GG방법의 매개변수를 SA 알고리즘을 활용하여 재산정하였고, 이를 통해 R<sup>2</sup>가 0.804로 개선되었다. 본 연구를 통하여 해안지역보다는 내륙지역에서 GG방법을 사용함이 적합함을 알 수 있었다. 이는 GG방법이 서부 캐나다의 semi-arid 지방의 자료를 통해 제안된 방법이라는데 기인한다. 해안지역에 GG방법을 적용하기 위해서는 새로운 모수를 추정하여 적용해야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 아시아의 내륙지역에서는 기존의 GG방법이 유용하게 활용될 수 있지만 해안 지역에서는 GG방법과 같은 경험식을 활용하는 데는 한계가 있다는 결론을 제시한다. 향후 보편관계를 활용하는 다른 증발산량 추정 방법(즉, AA방법, CRAE방법)과의 상호 비교를 통해 위 결론을 보충할 수 있을 것이다. 해안지역에서는 경험식보다는 에너지와 공기동력항의 조합으로 이루어진 Penman-Monteith식 등의 물리기반 식을 활용해야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시예측 및 국가정책지원강화(KMIPA 2015-6180) 및 2016학년도 연세대학교 미래선도연구사업(2016-22-0061)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements." FAO irrigation and drainage paper 56.
- Anayah, F. M. and Kaluarachchi, J. J. (2014). "Improving the complementary methods to estimate evapotranspiration under diverse climatic and physical conditions." *Hydrology and earth system sciences*, Vol. 18, pp.2049-2064.
- Aubinet, M., Vesala, T. and Papale, D. (2012). "Eddy covariance : A practical guide to measurement and data analysis." *Springer Atmospheric Sciences, Springer Verlag*.
- Badawy, H. A. (2009). "Effect of expected climate changes on evaporation losses from Aswan High Dam Reservoir (AHDR)." *Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC, Hurghada, Egypt*.
- Baldocchi, D., Hicks, B. and Meyers, T. (1988). "Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods." *Ecology*, Vol. 69, pp. 1331-1340.
- Bouchet, R. J. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 62, pp. 134-142.
- Granger, R. J. (1991). "Evaporation from natural nonsaturated surfaces." Ph.D. Thesis, *Department of Agricultural Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon*.
- Granger, R. J. and Gray, D. M. (1989). "Evaporation from natural nonsaturated surfaces." *Journal of Hydrology*, Vol. 111, pp. 21-29.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1982). "Estimating potential evapotranspiration." *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. Vol. 108, No. 3, pp. 225-230.
- Jeon, E. J., Kim, Y. H., Park, J. H. and Kim, M. P. (2013). "Development of forest carbon optimization program using simulated annealing heuristic algorithm." *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol. 18, No. 12, pp. 197-205 (in Korean).
- Jeon, J. W. and Lee, Y. H. (2005). "Iterative simulated annealing for graph coloring problem." *Korean Institute of Industrial Engineering*, pp. 226-229 (in Korean).
- Kim, N. W. and Lee, J. W. (2014). "Assessment of complementary relationship evapotranspiration models for the bokahcheon upper-middle watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 547-559 (in Korean).
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, Vol. 220, pp. 671-680.
- Kondoh, A. and Nishiyama, J. (2000). "Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan area, Japan" *Advances in Space Research*, Vol. 26, No.7, pp. 1173-1176.
- Lee, G. H. and Park, J. H. (2008). "Calibration of the hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nationwide scale." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 28, No. 6B, pp. 675-681 (in Korean).
- Liu, S., Sun, R., Sun, Z., Li, X. and Liu, C. (2006). "Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River basin." *Hydrological processes*, Vol. 20, pp. 2347-2361.
- Morton, F. (1983). "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 66, pp. 1-76.
- Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, 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.