



기상자료의 결측과 산정에 따른 기준작물 증발산량 공식의 비교 평가

Assessment of Reference Evapotranspiration Equations for Missing and Estimated Weather Data

윤푸른* · 최진용**,†

Yoon, Pu Reun · Choi, Jin-Yong

Abstract

Estimating the reference evapotranspiration is an important factor to consider in irrigation system design and agricultural water use. However, there is a limitation in using the FAO Penman-Monteith (FAO P-M) equation, which requires various meteorological data. The purpose of this study is to compare three reference evapotranspiration (ET_o) equations in the case of meteorological data missing for 11 study weather stations. Firstly, the FAO P-M equation is used for reference potential evapotranspiration estimation with the actual solar radiation data R_n and the actual vapor pressure e_a . Then, in the case of R_n and e_a are missed, the reference evapotranspirations applying FAO P-M, Priestley-Taylor (P-T), Hargreaves (HG) equation were calculated using other meteorological factors. Secondly, MAE, RMSE, R^2 were calculated to compare ET_o relationship from the ET_o equations. From the results, ET_o with Hargreaves equation in coastal areas and the Priestley-Taylor equation in the inland areas showed relatively high correlation with FAO P-M when e_a data is missed. In the case of R_n data is missed or two weather data, e_a and R_n data are all missed, R^2 value in Priestley-Taylor equation was highest in coastal areas, and R^2 values in Hargreaves equation were the high values for 7 inland areas. The results of sensitivity analysis showed that net radiation was the most sensitive for P-T and HG equation, and for FAO P-M, the most sensitive factor was net radiation and relative humidity, air temperature and wind speed were follows. Therefore, in considering of the accessibility to the coast, the types of the missing wether data, and the correlation and the magnitude of error, the reference evapotranspiration equations would be selected in sense of different conditions.

Keywords: Reference evapotranspiration; FAO Penman-Monteith; Priestley-Taylor; Hargreaves

1. 서 론

작물의 증발산량을 산정하는 것은 효율적인 물 관리와 수문기상학적 현상을 파악하는 데 있어서 매우 중요하다. 기준작물 증발산량은 충분한 물의 공급이 있을 경우에 알파파와 잔디와 같은 기준작물에 의하여 손실되는 증발산량을 의미하며, 일반적으로 잠재 증발산량을 대신하여 사용된다. 작물의 물 사용에 있어서 기준작물 증발산량을 산정하는 것은 가장 기본적인 과정이며, 관개 시스템 설계, 수자원 및 농업수리 계획에 있어서 고려해야 할 중요한 인자라고 할 수 있다. 따라서 과거 많은 연구들에 의해 수많은 기준작물 증발산량 산정공식들이 제안되고 발전해왔다. 현재까지 제안된 기준작물 증발산량 산정공식은 물수지방법, 공기동력학적 방법, 에너지와 공기동력학의 조합 방법, 복사에 기초한 방법, 기온에

기초한 방법 등 인자에 따라 구분할 수 있다. 이러한 다양한 기준작물 증발산량 산정 방식 중에서 존재하는 기상자료를 이용하여 지형적 및 지리적 조건에 적당한 기준작물 증발산량 산정 공식을 선정해야 한다.

현재까지 기준작물 증발산량 산정식 중에서 Allen et al. (1998)에 의해서 제안된 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 기준작물 증발산량 식은 전 세계적으로 다양한 기후조건에서 검증되어 널리 사용되고 있으며, FAO에서는 다른 기준작물 증발산량 식을 평가하는 기준으로 제시하였다.

FAO P-M 식은 물리적 근거에 기초하여 유도되었기 때문에 추가적인 매개변수 보정 없이 전 세계에서 사용할 수 있다는 장점이 있다 (Rim, 2008). 하지만 FAO P-M 식의 경우, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 구체적이고 많은 기상요소자료를 필요로 하며, 식을 적용하는 과정에서 복잡한 계산 및 단위 환산이 필요하다는 단점을 가진다.

많은 연구자들은 특정지역에 기상자료가 충분하지 않거나, 혹은 기상자료 관측의 효율성을 위하여 일부 기상자료를 생략하여 기준작물 증발산량을 산정하고자 하는 경우에 보다 적은 기상요소 자료를 필요로 하는 기준작물 증발산량 식들이 FAO P-M 식을 어느 정도 모사하는지 비교 연구할 필요성이 있다고 한 바 있다 (Amatya et al., 1995; Howell et al., 1998).

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Professor, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4583 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

Received: January 9, 2018

Revised: February 2, 2018

Accepted: February 6, 2018

Droogers and Allen (2002)은 FAO P-M 식과 Hargreaves 식을 이용하여 IWMI (International Water Management Institute)에서 제공되는 세계 기후자료를 이용한 월별 증발산 산정 결과를 비교 검토한 바 있으며, 비교 검토 결과 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 매우 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 기후자료가 부족하거나 기상자료 관측의 효율성을 위하여 FAO P-M 식을 대체하여 기준작물 증발산량을 산정하는 데에 유용하게 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

Alkaced et al. (2006)은 일본 Itoshima반도 지역에서 7년간의 기후자료를 이용하여 FAO P-M 식과 Thornthwaite, Hargreaves, Harmon, 일사량에 기초한 Irmak 식, 그리고 순방사에 기초한 식 등 기준작물 증발산량 식을 비교 검토한 바 있으며, 본 지역에서는 FAO P-M 식을 적용할 수 없는 경우 Hargreaves 식이나 일사량에 기초한 식이 가장 유사한 값을 보인다고 보고하였다.

하지만 이러한 기준작물 증발산량 산정 방법들의 비교 평가 연구는 연구기간 및 연구지역에 있어서 다양성을 충분히 반영하지 못하며, 기존 연구는 연구기간 및 지역이 한정적이다. 전 세계 대부분의 국가가 기상대를 제외한 관측소 및 자동관측소 등에서는 태양복사열, 실제 증기압 등의 관측 자료가 미흡한 실정이다. 즉, 많은 기상요소자료를 요구하는 FAO P-M 식을 사용하는 데에는 현실적으로 한계가 따른다. 따라서 이와 같이 기상자료가 다소 부족한 지역의 수자원 개발 및 관개 사업 등에 필요한 기준작물 증발산량을 산정하는 데에 있어 보다 간단하고 기본적인 기상자료를 이용하도록 개발된 여러 기준작물 증발산량 산정식이 필요하며, 이 방법들이 FAO P-M 식

을 어느 정도 모사하는지 비교 및 검토가 필요하다.

우리나라의 경우, 기상자료 결측으로 인한 해당 지역의 기준작물 증발산량 산정 연구가 미흡한 실정이며, 결측된 기상자료를 보완하고 기존에 존재하는 기상자료만으로 기준작물 증발산량을 산정하는 여러 식이 적용성이 있는지 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 지리 및 지형적 조건을 고려하여, 국내 11개 기상관측지점에서 기존에 널리 사용되고 있는 여러 기준작물 증발산량 산정식을 비교 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 흐름도

본 연구의 흐름도는 Fig. 1과 같으며, e_a , R_n 값을 제공하고 있는 연구 지역을 선정하고 각 연구 지역의 기상자료를 수집한다. 다음으로 기준작물 증발산량 산정 식인 FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식에 대하여 대체 식을 이용해 e_a , R_n 가 결측일 경우에 대하여 각각 기준작물 증발산량을 산정한다. FAO P-M 식에 실제 기상자료 e_a , R_n 을 대입하여 산정한 기준작물 증발산량 값을 기준으로 하여 R^2 , MAE, RMSE 값을 산정해 각각 9가지 경우와 비교 분석한다.

2. 연구 지역 선정

대상 연구 지역은 해안과의 근접성을 기준으로 선정하였다. 해안과의 인접성은 지표와 대기의 상호작용과정을 통해

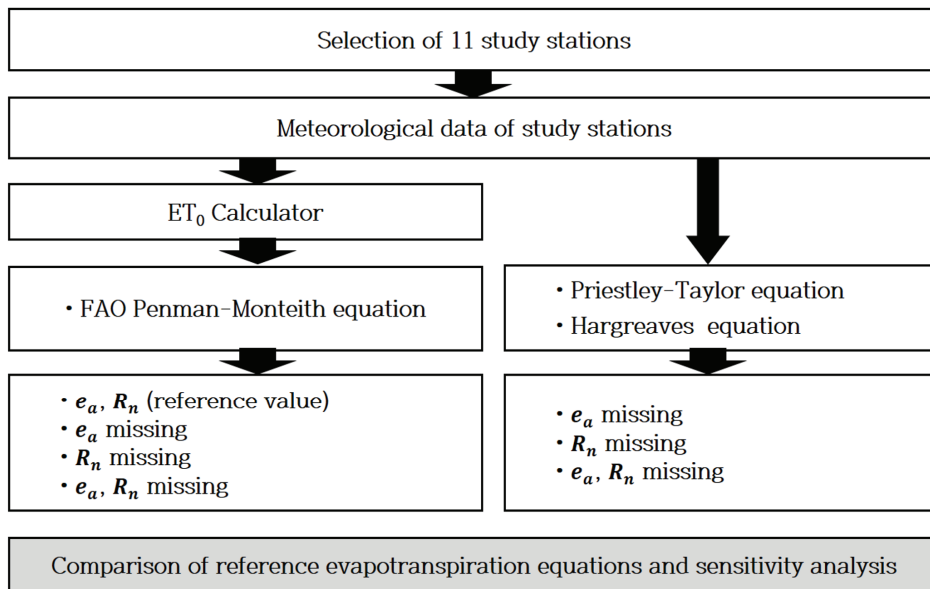


Fig. 1 Flow chart of this study

여 증발산량에 영향을 미치는데 우리나라의 pan 증발산량 관측에서도 이러한 해안의 효과가 두드러지게 나타나며, 향후 우리나라의 증발산량 추정 연구에서는 내륙과 해안을 분리하여 연구하는 것이 보다 적절한 방법으로 판단된다 (Lee et al., 2008).

따라서 기준작물 증발산량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연구지역의 해안 근접성을 기준으로 11개 지역을 선정하였으며, 11개의 지역은 본 연구의 분석 변수인 일별 태양 복사량 R_n 과 실제 증기압 e_a 의 자료를 제공하는 기상대 중 연구기간 내의 자료가 모두 존재하는 지역으로 하였다. 본 연구는 두 변수 e_a , R_n 에 대하여 각 기상자료가 결측일 경우에 계산식으로 대체하여 계산한 결과와 실제 값과의 비교를 하는 연구이므로 실제 값이 존재하는 지역을 대상으로 하여, 해안과의 근접성을 고려해 해안과 내륙지역으로 아래 Table 1과 같이 서울, 인천, 청주, 추풍령, 포항, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 진주 11개 지역을 선정하였다. 각 연구 지역 측후소의 일별 최저기온, 최고기온, 풍속, 상대습도, 일조시간 등의 기상자료를 사용하였다. 또한 기준작물 증발산량을 산정하기 위해서는 장기간 축적된 신뢰할 만한 기상자료를 필요로 하여 본 연구에서는 1981년부터 2010년까지의 30년을 연구기간으로 하였다.

3. 기준작물 증발산량 산정 방법

가. FAO Penman-Monteith 방법

FAO P-M 방법은 기준작물 증발산량을 산정하는 대표적인 방법 중 하나로, FAO에서 기준작물 증발산량을 산정하기 위한 방식으로 추천된 바 있으며, 식은 다음과 같다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

여기서 ET_0 =기준작물 증발산량 (mm/day), T_a =2m 높이에 서의 일 평균기온 ($^{\circ}C$), u_2 =지상 2m 높이에서 풍속 (m/sec), Q_n =순방사 ($MJ/m^2/day$), Q_g =토양열 유동밀도 ($MJ/m^2/day$), e_s =포화증기압 (kPa), e_a =실제증기압 (kPa), $(e_s - e_a)$ =대기의 포화증기압 부족량 (kPa), Δ =포화 증기압과 온도곡선의 기울기 ($kPa/^{\circ}C$), γ =건습계상수 ($kPa/^{\circ}C$)이다.

FAO P-M 공식은 1965년에 처음으로 제안된 방법으로 Penman 공식의 공기동역학 조건에 작물형에 따른 기공저항을 포함하여 수정한 방법이다. 기공저항은 엽온과 밀접한 관련이 있는 것으로 공기동역학항에 온도에 의한 식이 추가되어 있다. 이 공식을 사용하기 위해서는 대기온도, 습도, 복사량 및 풍속에 관한 일별, 일주일 단위 혹은 1개월 단위의 기상자료가 필요하다 (Allen et al., 1998). 이와 같이 구체적이고 많은 기상요소자료를 필요로 하며 적용하는 과정이 비교적 복잡하다는 단점을 가진다.

나. Priestley-Taylor 방법

복사자료를 이용하는 방법은 공기동역항이 상대적으로 작은 습윤한 기후지역의 경우 적절한 기준작물 증발산량을 산정하는 반면, 건조한 기후지역에서는 기준작물 증발산량을 비교적 적게 산정하는 것으로 알려져 있다.

복사를 이용한 방법 중의 하나인 Priestley-Taylor 방법은 Priestley and Taylor (1972)에 의해서 제안된 Penman (1948) 식을 단순화한 형태의 식으로 이 식은 적용 지역의 기후조건

Table 1 Geographical Characteristic of 11 study stations

Study station	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	Accessibility to the coast	
				coast	inland
Seoul	37.31	126.52	85.80		○
Incheon	37.28	126.37	71.40	○	
Cheongju	36.38	127.26	57.20		○
Chupungnyeng	36.13	127.59	244.70		○
Pohang	36.01	129.22	2.30	○	
Daegu	35.53	128.37	64.10		○
Jeonju	35.49	127.09	53.40		○
Gwangju	35.10	126.53	72.40		○
Busan	35.06	129.01	69.60	○	
Mokpo	34.49	126.22	38.00	○	
Jinju	35.09	128.02	30.20		○

이 습하여 기준작물 증발산량 산정 과정에서 Penman에 의해서 제안된 조합법의 공기동력항 영향이 미미하다는 가정 하에 Penman 식의 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화한 식이다. 따라서 보다 적은 관측자료를 필요로 하고, 잔디조건에서의 기준작물 증발산량 산정에 적용할 수 있으며, 다습한 지역에 적용하도록 제안되어져왔다. 식은 다음과 같다.

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

여기서 ET_0 =기준작물 증발산량 (mm/day), α =empirical coefficient (=1.26), R_n =순방사 (mm/day), $\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma}$ 은 Penman 기준작물 증발산량 식의 에너지항과 동일하고, 이류가 없는 습윤한 지표면에서 기준증발산량을 나타낸다.

다. Hargreaves 방법

Hargreaves 방법은 기온을 이용한 방법 중 하나로, Hargreaves and Samani (1985)는 잔디조건에서 기준작물 증발산량을 계산하는 다음과 같은 식을 제안한 바 있다. FAO에 의해서 대기온도 자료만이 가용한 경우에 적용하도록 채택된 바 있으며 (Allen et al., 1998), 상대습도와 같은 지역적 특성을 고려하지 못한다는 단점이 있으나, 계산이 간단하고 최소한의 기후자료를 필요로 하는 장점을 가진다.

$$ET_0 = \alpha R_a TD^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (3)$$

여기서 ET_0 =기준작물 증발산량 (mm/day), $\alpha=0.0023$, TD =일 최고기온과 최저기온의 차 ($^{\circ}C$), R_a =일별 태양복사량 (mm/day), T_a = 2m 높이에서의 일 평균기온 ($^{\circ}C$)이다.

기상 자료의 품질에 신뢰가 부족하거나 지속적인 관측이 미흡한 지역에서 기준작물 증발산량을 계산할 때 단지 하나의 기상자료로 계산함에도 불구하고 적정 수준의 정확도를 제공해주는 Hargreaves 공식이 널리 사용되어져 왔다 (Hargreaves and Allen, 2003). 우리나라와 같은 온대지역에서는 온도와 복사열이 증발산량의 80% 정도를 설명해줄 수 있으므로 Hargreaves 공식이 적합할 것으로 판단되기도 한다. 하지만 Hargreaves 공식을 이용하여 계산한 기준작물 증발산량은 지역의 기상인자의 영향이 반영된 일기온의 차이나 변화에 의해서 영향을 받기 때문에 대상지역에 따라서 정확도가 다를 수 있다. 따라서 Hargreaves 공식을 이용하여 기준작물 증발산량을 계산할 때에는 지역적 기후 특성을 고려하여 매개변수를 지역특성에 맞게 조정할 필요가 있다.

4. 연구 방법

특정지역에 기상자료가 충분하지 않거나, 혹은 기상자료 관측의 효율성을 위하여 제한된 기상자료를 이용해 기준작물 증발산량을 산정하고자 하는 경우에 다른 두 기준작물 증발산량 산정 식이 FAO P-M 식을 어느 정도 모사하는지 비교하기 위하여 다음과 같이 연구를 진행하였다. 이 때 기준작물 증발산량 산정 결과를 FAO P-M 식의 결과를 기준으로 하여 비교하는 것은, P-M 공식이 완전한 물리이론을 바탕으로 유도된 공식이기 때문에 지구상의 다른 기후 조건에 적용할 수 있고 정확도가 우수한 것으로 알려져 있기 때문이다 (Maidment, 1993; Allen et al., 1994; Allen et al., 1998). 이러한 이유로 FAO P-M 식으로부터 얻은 증발산량을 정해로 가정하는 것이 일반적인 방법이며 (Gavilan et al., 1998), 국내에서도 FAO P-M 식을 이용하여 추정된 기준작물 증발산량이 실제 강수량과 유출량 사이의 물수지로부터 얻어진 증발산량과 근사한 결과를 보인다는 연구 결과도 있다 (Kim et al., 2004). 따라서 본 연구에서도 FAO P-M 식을 정해로 가정하여 두 개의 기준작물 증발산량 산정식과의 비교를 진행하였다.

먼저, FAO P-M 식에 실제 기상자료 일별 태양 복사량 R_n 과 실제 증기압 e_a 값을 사용하여 산정한 결과를 기준 값으로 정하며, 기준작물 증발산량 산정 식인 FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식에 대하여 R_n , e_a 가 결측될 경우, 다른 기상 인자를 사용하는 대체 계산식을 적용하여 기준작물 증발산량을 산정한다. 이 때 사용되는 각각 R_n , e_a 의 식은 아래 식 (4), (5), (6), (7)과 같다. 각 식에 대하여 e_a 자료가 결측일 경우, R_n 자료가 결측일 경우, e_a , R_n 자료 모두 결측일 경우를 산정하여 한 지역 당 9개의 결과를 도출하였고, 연구 방법에 대한 경우의 수는 다음 Table 2와 같다.

또한 e_a , R_n 이 결측되었을 때, 각각을 대체하기 위해 사용한 계산식은 FAO에서 제공하는 아래와 같은 식을 사용하였으며, 이는 각 기상인자가 결측 시 일반적으로 사용하는 실제 증기압과 일별 태양 복사량 식으로 선정하여 기상자료를 산정하였다.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

$$R_{ns} = 0.77SR \quad (5)$$

$$R_{nl} = \left[\alpha \left(\frac{Tmax_k^{\downarrow} + Tmin_k^{\downarrow}}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \frac{SR}{SR_0} - 0.35) \right] \quad (6)$$

$$e_a = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 Tmin_c}{Tmin_c = 237.3} \right) \quad (7)$$

Table 2 Case of this study

Evapotranspiration equation	R_n data	e_a data	
FAO Penman–Monteith	○	○	reference value
	○	X	e_a calculation equation
	X	○	R_n calculation equation
	X	X	e_a, R_n calculation equation
Priestley–Taylor	○	X	e_a calculation equation
	X	○	R_n calculation equation
	X	X	e_a, R_n calculation equation
Hargreaves	○	X	e_a calculation equation
	X	○	R_n calculation equation
	X	X	e_a, R_n calculation equation

다음으로, 기준작물 증발산량 산정 식 간의 비교를 위하여, 수치적 방법으로 R^2 , 평균 절대오차 (MAE), 제곱 평균오차 (RMSE) 등을 산정한다. R^2 값은 기준이 되는 값과 비교하는 값과의 상관성을 의미하며 이 값이 클수록 상관성이 높아 비슷한 경향을 보인다. 또한 Fox (1981)에 의하면 MAE는 극한 값에서 RMSE보다 덜 민감하며, 직관적으로 인위적인 제곱근을 적용하지 않았다는 면에서 더 선호될 수 있으나, RMSE가 일반적으로 수리 및 통계학적 분석에서 심층적으로 적용될 수 있다. 여기서 RMSE나 MAE가 0에 가까울수록 기준이 되는 값과 유사한 결과를 의미한다.

따라서 FAO P-M 식에 실제 기상자료 일별 태양 복사량 R_n 과 실제 증기압 e_a 값을 사용하여 산정한 결과를 기준 값으로 하여, 각 FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식에 대하여 각각 e_a 자료가 결측일 경우, R_n 자료가 결측일 경우,

e_a, R_n 자료 모두 결측일 경우 9가지의 조건에 대하여 기준작물 증발산량을 산정하고 R^2 , MAE, RMSE 값을 산정하여 비교 및 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기준작물 증발산량 산정

본 연구에서는 우리나라 11개 기상관측지점에서 측정된 일별 기상자료를 이용하여 FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식을 이용하여 e_a 자료가 결측일 경우, R_n 자료가 결측일 경우, e_a, R_n 자료 모두 결측일 경우의 기준작물 증발산량을 산정하였으며, 그 유사성을 판단하기 위하여 각 조건에 대하여 R^2 , MAE, RMSE 값을 산정하였다. 결과는 다음 Table 3과 같다.

Table 3 Result of R^2 , MAE, RMSE by FAO P-M, Priestley–Taylor, Hargreaves evapotranspiration equations

Study station	Evapotranspiration equation	e_a data missing			R_n data missing			e_a, R_n data missing		
		R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE
Gwangju	FAO P-M	0.99	0.25	0.20	0.93	0.90	1.08	0.91	1.01	1.28
	Priestley–Taylor	0.99	0.71	0.61	0.88	1.11	1.47	0.88	1.11	1.47
	Hargreaves	0.98	1.72	2.27	0.92	1.44	1.97	0.92	1.44	1.97
Daegu	FAO P-M	0.99	0.47	0.46	0.96	0.80	0.96	0.93	1.06	1.39
	Priestley–Taylor	0.99	0.47	0.34	0.89	1.30	1.75	0.89	1.30	1.75
	Hargreaves	0.98	1.87	2.51	0.92	1.57	2.19	0.92	1.57	2.19
Mokpo	FAO P-M	0.98	0.41	0.34	0.95	0.92	1.06	0.92	1.12	1.37
	Priestley–Taylor	0.97	0.75	0.72	0.87	1.25	1.57	0.87	1.25	1.57
	Hargreaves	0.97	1.86	2.47	0.91	1.64	2.22	0.91	1.64	2.22

Study station	Evapotranspiration equation	e_a data missing			R_n data missing			e_a, R_n data missing		
		R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE
Busan	FAO P-M	0.80	0.77	0.69	0.86	0.85	0.99	0.79	1.17	1.51
	Priestley-Taylor	0.96	0.67	0.58	0.74	1.33	1.73	0.74	1.33	1.73
	Hargreaves	0.97	1.98	2.71	0.78	1.77	2.46	0.78	1.77	2.46
Seoul	FAO P-M	0.99	0.40	0.36	0.92	0.72	0.77	0.87	0.90	1.09
	Priestley-Taylor	0.99	0.52	0.37	0.85	0.79	0.93	0.85	0.79	0.93
	Hargreaves	0.99	1.70	2.20	0.87	1.39	1.86	0.87	1.39	1.86
Incheon	FAO P-M	0.99	0.43	0.34	0.90	0.73	0.87	0.88	0.93	1.18
	Priestley-Taylor	0.99	0.63	0.57	0.85	1.03	1.33	0.85	1.03	1.33
	Hargreaves	0.98	1.76	2.29	0.88	1.49	1.99	0.88	1.49	1.99
Jeonju	FAO P-M	1.00	0.21	0.14	0.91	0.78	0.83	0.92	0.95	1.10
	Priestley-Taylor	1.00	0.67	0.57	0.89	1.03	1.27	0.89	1.03	1.27
	Hargreaves	0.99	1.62	2.06	0.92	1.32	1.69	0.92	1.32	1.69
Jinju	FAO P-M	0.99	0.21	0.12	0.95	1.05	1.18	0.95	1.09	1.31
	Priestley-Taylor	0.99	0.81	0.72	0.92	1.22	1.52	0.92	1.22	1.52
	Hargreaves	0.97	1.67	2.14	0.96	1.49	1.91	0.96	1.49	1.91
Cheongju	FAO P-M	0.99	0.22	0.19	0.91	0.83	0.97	0.89	0.90	1.14
	Priestley-Taylor	0.99	0.64	0.53	0.56	1.41	1.73	0.56	1.41	1.73
	Hargreaves	0.98	1.59	2.11	0.87	1.24	1.74	0.87	1.24	1.74
Chupungnyeng	FAO P-M	0.98	0.33	0.23	0.85	0.80	0.83	0.85	0.93	1.06
	Priestley-Taylor	0.98	0.59	0.46	0.79	1.11	1.34	0.79	1.11	1.34
	Hargreaves	0.98	1.64	2.08	0.84	1.37	1.72	0.84	1.37	1.72
Pohang	FAO P-M	0.98	0.49	0.46	0.89	0.84	1.03	0.84	1.07	1.43
	Priestley-Taylor	0.98	0.58	0.50	0.80	1.25	1.70	0.80	1.25	1.70
	Hargreaves	0.98	1.85	2.56	0.83	1.61	2.30	0.83	1.61	2.30

가. e_a 결측

R^2 값은 기준 값 (실측 기상자료인 e_a, R_n 값을 사용한 FAO P-M 식의 기준작물 증발산량)과 비교하여 다른 기준작물 증발산량 산정식과 기상자료의 유무 조건에 따른 상관성을 보여준다. R^2 값을 기준으로 하였을 때, 해안 지역 중 부산과 포항의 경우, Hargreaves 식에서 R^2 값이 가장 높게 나타났으며, 목포와 인천의 경우에도 Hargreaves 식이 R^2 값이 가장 높은 식의 결과와 거의 차이를 보이지 않아 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 내륙 지역 7개 중 6개의 지역 광주, 대구, 서울, 전주, 진주, 청주에서 Priestley-Taylor 식의 R^2 값이 가장 높거나 가장 높은 상관성을 보이는 FAO P-M 식과 비슷한 값을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 실제 증기압 e_a 가 결측일 경우, 해안 지역은 Hargreaves 식과, 내륙 지역은 Priestley-Taylor 식과 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

반면에, MAE와 RMSE 값을 기준으로 하였을 때에는 모든 지역에서 기상자료의 결측 시에도 계산 값을 사용하여 산정한 FAO P-M 식이 가장 오차가 적게 산정되었다. FAO P-M 식을 제외하면, Priestley-Taylor 식보다 Hargreaves 식에서 오차가 더 크게 산정되는데, 이는 오차의 값은 전반적으로 Hargreaves 식에서 크게 산정되는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 e_a 가 결측되었을 때, 해안 지역 중 부산의 결과이다. 앞의 결과와 마찬가지로, Hargreaves 식에서 $R^2=0.9716$ 으로 가장 높은 상관성을 보이고 있다.

Fig. 3은 e_a 가 결측되었을 때, 내륙 지역 중 대구의 결과이다. 앞의 결과와 마찬가지로, Priestley-Taylor 식에서 $R^2=0.987$ 로 가장 높은 상관성을 보이고 있다.

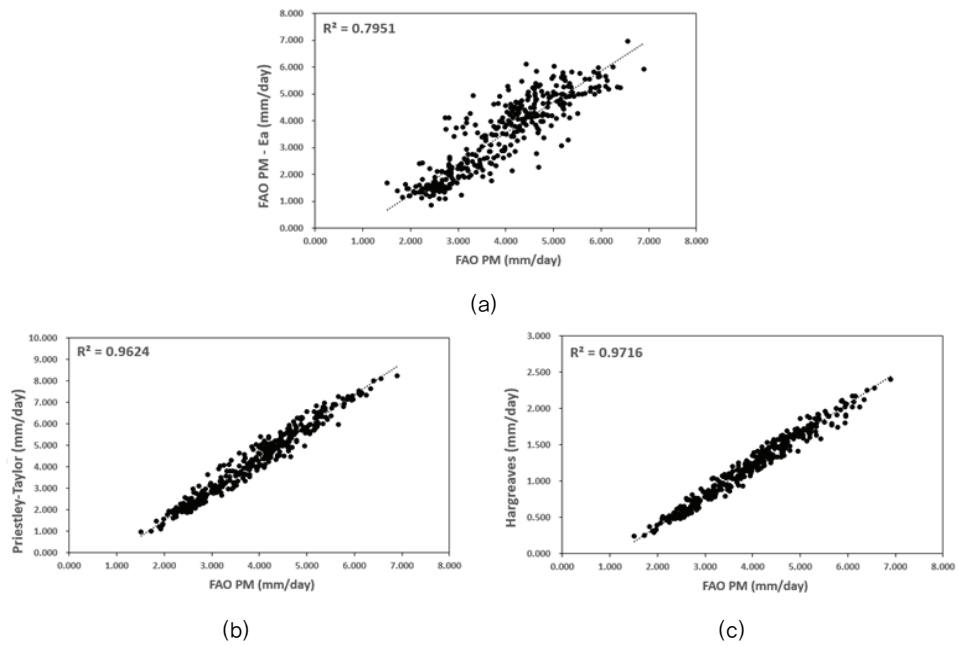


Fig. 2 Result of Busan when e_a data is missed

- (a) R^2 result between FAO P-M when e_a data is missed and FAO P-M equation
- (b) R^2 result between Priestley-Taylor equation and FAO P-M equation
- (c) R^2 result between Hargreaves equation and FAO P-M equation

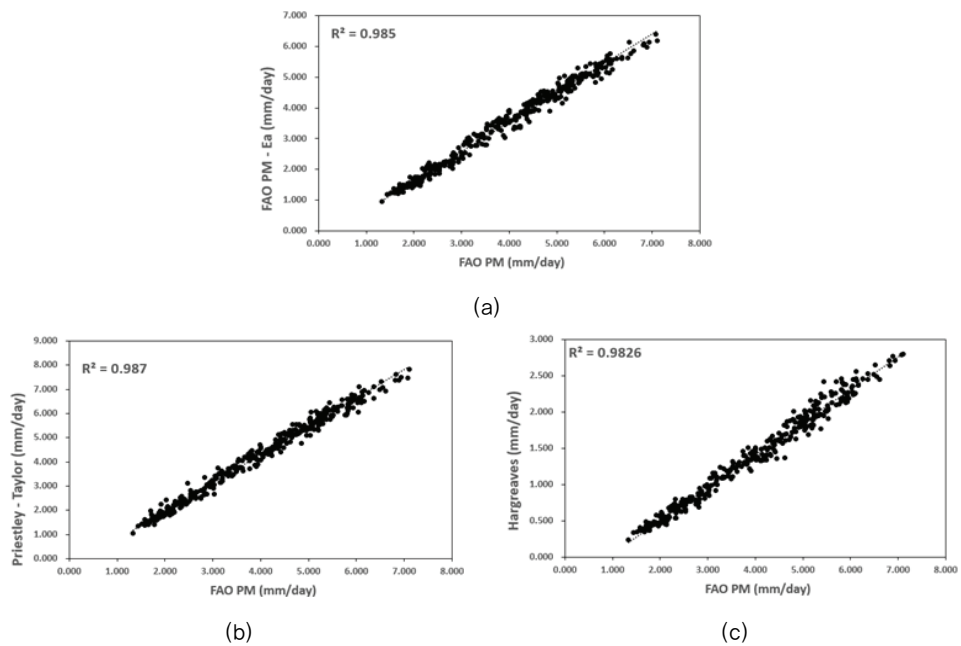


Fig. 3 Result of Daegu when e_a data is missed

- (a) R^2 result between FAO P-M when e_a data is missed and FAO P-M equation
- (b) R^2 result between Priestley-Taylor equation and FAO P-M equation
- (c) R^2 result between Hargreaves equation and FAO P-M equation

나. R_n 결측 혹은 e_a , R_n 모두 결측

Priestley-Taylor 식과 Hargreaves 식 모두 식에 e_a 값이 사용되지 않으므로, 두 조건의 경향이 비슷하게 나타났다. R^2 값을 기준으로 하였을 때에는 e_a 결측 시와 다르게, 해안 지역 중 목포, 인천, 포항은 Priestley-Taylor 식에서 R^2 값이 가장 크게 나타났으며, 또한 7개의 내륙 지역에 대해서 Hargreaves 식에서의 R^2 값이 가장 크게 산정되었다. 앞서 e_a 결측 시와 각 식에 대해 가장 상관성이 높은 지역은 반대의 결과를 나타내었지만 마찬가지로 MAE와 RMSE 값을 기준으로 하였을 때에는, 전반적으로 결측 기상자료에 계산식을 적용한 FAO P-M 식의 오차가 가장 적게 산정되었다. 이를 제외하고는 대부분의 지역에서 Priestley-Taylor 식이 Hargreaves 식보다 MAE, RMSE 값이 작게 산정되었다.

Fig. 4는 e_a , R_n 이 결측 시, 내륙 지역 중 서울의 결과이며, e_a 결측 시와 반대로 Hargreaves 식에서 가장 높은 상관성을 보인다. 또한 서울뿐만 아니라 다른 지역에서도 e_a , R_n 이 결측 시, 대체적으로 R^2 값이 작고, 오차의 범위가 비교적 큰데 이는 R_n 의 특성 상, 계속 오차가 커 실제 값과 계산 값의 차이가 크기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다.

2. 민감도 분석

FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식에 포함된 기상 인자 중 평균 기온, 평균 풍속, 실제 증기압, 일별 태양 복사량을 변수로 설정하고, 각각의 변수에 대하여 변화 범위를 -20%~20%로 하여 기준작물 증발산량을 산정하였다. 변수의 가중치는 -20%, -10%, 10%, 20%로 하여 가중치를 두기 이전의 값인 0%까지 총 5가지의 값을 산정하여 비교하였다. 그 후 가중치를 두기 이전의 값과의 오차의 평균을 산정하여 이를 민감도 계수로 설정하였다. 즉, 가중치의 변화에 따른 오차의 평균값이 클수록 해당 인자는 기준작물 증발산량 산정 공식에서 민감도가 크다고 할 수 있으며, 민감도 분석을 통하여 각 식에 따라 증발산량을 산정하는 데에 미치는 인자들의 영향을 분석하고자 하였다. 일부 지역 (추풍령, 부산, 인천, 대구)에 대하여 오차의 평균을 산정하였으며, 20% 가중치를 적용하였을 때의 오차 평균 결과를 Table 4에 나타내었다.

가. Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법

Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법의 경우, 민감도 분석 결과 가장 큰 영향을 미치는 변수는 두 가지 방법 모두 R_n 으

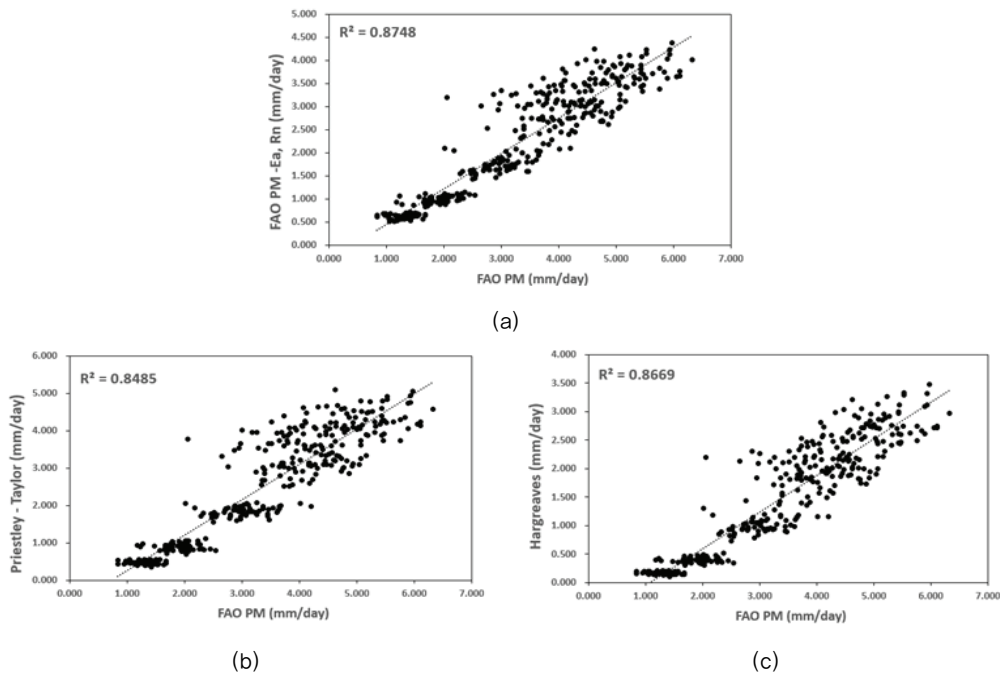


Fig. 4 Result of Seoul when e_a , R_n data is missed

- (a) R^2 result between FAO P-M when e_a data is missed and FAO P-M equation
- (b) R^2 result between Priestley-Taylor equation and FAO P-M equation
- (c) R^2 result between Hargreaves equation and FAO P-M equation

Table 4 Sensitivity analysis results with $\pm 20\%$ range of variation in the variables from reference evapotranspiration equations

Study station	FAO Penman-Monteith				Priestley-Taylor		Hargreaves	
	T	u_2	e_a	R_n	T	R_n	T	R_n
Chupungnyeng	0.11	0.05	0.35	0.49	0.20	0.75	0.11	0.25
Busan	0.12	0.08	0.53	1.05	0.24	0.86	0.11	0.24
Incheon	0.12	0.05	0.43	0.49	0.21	0.78	0.10	0.11
Daegu	0.09	0.09	0.40	0.53	0.23	0.83	0.13	0.27

로 나타났다. 비교 결과, Priestley-Taylor 방법의 경우, R_n 의 변화로 인한 오차 평균값이 T 의 변화로 인한 값보다 약 3배 정도 크게 나타났으며 Hargreaves 방법의 경우 R_n 의 변화로 인한 오차 평균값이 T 의 변화로 인한 값보다 약 2배 정도 크게 나타났다.

각각의 식에 대해 살펴보면, 먼저 Priestley-Taylor 식의 경우에는 증기압곡선의 기온기와 건습계 상수로 이루어지는 부분에서 증기압곡선의 기온기는 분자, 분모에 모두 포함되어 있기 때문에 T 의 변화로 인해 증기압곡선의 기온기가 변하더라도 산정 값이 크게 바뀌지 않게 된다. 이에 반해 R_n 은 분자에만 포함되어 있기 때문에 값의 변화에 더 민감하게 된다. 따라서 Priestley-Taylor 방법은 T 의 변화보다 R_n 의 변화에 더 높은 민감도를 보인다.

Hargreaves 식의 경우, 순방사량과 평균온도로 이루어진 항만 살펴보면 평균온도 부분은 상수와 함께 이루어져 있고 이 항에 순방사량이 곱해지는 형식이기 때문에, T 의 값이 변하면 R_n 이 포함된 하나의 항만 변하는 반면 R_n 의 값이 변하게 되면 T 뿐만 아니라 상수가 포함된 두 개의 항이 같이 변하게 된다. 따라서 Priestley-Taylor 식과 마찬가지로 T 의 변화보다 R_n 의 변화에 더 높은 민감도를 보이게 된다.

나. FAO Penman-Monteith 방법

민감도 분석 결과, 가장 큰 영향을 미치는 변수는 R_n , e_a , T , u_2 순으로 나타났다. 일반적으로 증발산에 영향을 크게 미친다고 간주되는 요인인 T , u_2 의 영향이 R_n , e_a 에 비해 적은 것으로, T , u_2 의 변화보다 R_n , e_a 의 변화에 더 높은 민감도를 보인다.

각각의 구성요소에 대해 살펴보면, 풍속의 경우 분모에만 포함된 항과 분자, 분모에 모두 포함된 항으로 구성되어 있기 때문에 풍속의 변화가 크지 않게 되거나 상쇄되므로 이에 따라 풍속은 가장 민감도가 낮게 나타나게 된다. 온도의 경우 또한 풍속과 마찬가지로, 온도의 영향을 받는 증기압곡선의 기온기가 분모에만 포함된 항과 분자, 분모에 모두 포함된 항으로 구성되어 있기 때문에 상대적으로 민감도가 낮게 나타

나게 된다. 이에 반해 순방사량과 실제증기압의 경우 모두 분자에 포함되어 있기 때문에 풍속과 온도 보다 변수 값의 변화에 더 민감하게 증발산량이 산정된다. 따라서 FAO P-M 방법에서 R_n , e_a 가 높은 민감도를 보이며, 이에 따라 R_n 과 e_a 가 증발산량 산정 값에 크게 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 이때, 일반적으로 순방사량의 측정 오차는 10% 이내로 발생하며 이러한 오차로 인해 증발산량 값의 오차가 더 커질 위험이 있다 (Chae et al., 2000). 따라서 증발산량 산정 값에 크게 영향을 미치는 R_n , e_a 값을 정확하게 계산할 수 있는 식에 대한 연구가 추후 필요하며, 한편으로는 R_n 의 관측오차를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 우리나라 11개 기상관측지점에서 측정된 일별 기상자료를 이용하여 FAO P-M 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식을 이용하여 e_a 자료가 결측일 경우, R_n 자료가 결측일 경우, e_a , R_n 자료 모두 결측일 경우의 기준작물 증발산량을 산정하였다. 또한 그 유사성을 판단하기 위하여 각 조건에 대하여 R^2 , MAE, RMSE 값을 산정하고 각 인자에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

e_a 가 결측 시, 해안 지역(목포, 부산, 인천, 포항)은 Hargreaves 식과, 내륙 지역(광주, 대구, 서울, 전주, 진주, 청주)은 Priestley-Taylor 식과 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 MAE와 RMSE 값을 기준으로 하였을 때에는 모든 지역에서 Priestley-Taylor 식보다 Hargreaves 식에서 오차가 더 크게 산정되는데, 이는 상관성은 해안 지역과 내륙 지역을 기준으로 나뉘지만 오차의 값은 전반적으로 Hargreaves 식에서 크게 산정되는 것을 알 수 있다.

e_a , R_n 모두 결측 시, e_a 결측 시와 다르게, 해안 지역 중 목포, 인천, 포항은 Priestley-Taylor 식에서 R^2 값이 가장 크게 나타났으며, 또한 7개의 내륙 지역에 대해서 Hargreaves 식에서의 R^2 값이 가장 크게 산정되었다. 앞서 e_a 결측 시의 경우와 각 식에 대해 가장 상관성이 높은 지역은 반대의 결과를

나타내었으며, 대체적으로 R^2 값이 작고, 오차의 범위가 비교적 큰데 이는 R_n 의 특성 상, 계측 오차가 커 실제 값과 계산 값의 차이가 크기 때문에 이와 같은 결과가 나왔음을 알 수 있다.

상관성을 나타내는 R^2 값과 오차 값이 각기 다른 결과를 보여주고 있으며, 각 기상자료 e_a , R_n 중 어떠한 기상자료가 결측되었는가에 따라서도 선정되는 기준작물 증발산량 식은 다르다. 즉, 해안과의 근접성, 결측된 기상자료의 요소, 상관성과 오차의 크기에 따라 각기 선정할 수 있는 기준작물 증발산량이 달라 각 지역의 특성 및 결측된 기상자료, 중점을 두고 판단할 기준에 따라 기준작물 증발산량 산정 공식을 신중히 선택하여 계산하여야 한다. e_a 가 결측 시가 e_a , R_n 모두 결측 시에 비하여 단일 인자에 대한 결과이므로 보다 정확한 경향성을 나타내고 있어, 상관계수 값이 크고, 오차의 값이 비교적 작은 것을 알 수 있다. 따라서 각 어떤 인자가 결측되었느냐에 따라 보다 정확한 식을 도출할 수 있으며, 지역의 해안과의 접근성뿐만 아니라 토지이용이나 지형적, 기상학적 요소 등 기준증발산량에 영향을 끼칠 수 있는 요소들을 기준으로 하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한 전반적으로 Hargreaves 식에서 경향성은 높지만 오차의 크기가 비교적 크기 때문에 사용하는 지역이나 조건에 맞게 보정 및 검정을 할 필요가 있다. Hargreaves 식의 인자 중 α 는 지역화 매개변수로, 본 연구에서는 0.023의 값을 사용하였지만, 이 변수를 조정하여 지역에 적합하게 오차를 줄일 수 있다고 판단된다. 따라서 국내의 기상대에 따라 알맞은 지역화 매개변수를 산정하여 증발산량 산정에서의 정확도를 높일 수 있는 연구가 필요하다.

또한 민감도 분석 결과, Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법 모두 R_n , T 순으로 민감도가 높게 나타났으며, FAO P-M 방법의 경우 R_n , e_a , T , u_2 순으로 민감도가 높게 나타났다. 이는 R_n , e_a 값이 증발산량 산정 값에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 증발산량 산정 값의 오차를 줄이기 위해서는 R_n , e_a 값을 정확히 계산할 수 있는 식에 대한 연구와 R_n , e_a 값에 대한 관측오차를 줄일 수 있는 방안에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구는 대상지역이 11개 지역으로 표본의 개수가 비교적 적어 경향성을 결정하기에는 한계가 있어 일반성이 다소 부족하다고 판단된다. 또한 e_a , R_n 이외의 기상인자의 추가적인 고려가 필요할 것으로 보인다.

그러나 본 연구를 통하여 FAO P-M식보다 적은 기상인자를 필요로 하는 두 식은 아직까지는 현실적이고 경제적이라고 할 수 있으며, 따라서 앞서 언급한 Hargreaves 공식에서의

지역특성을 고려한 적절한 계수 보정이 이루어진다면 기준 증발산량 산정에 있어서 기상자료에 구애받지 않고 전반적인 기준 증발산량을 적절한 수준으로 산정할 수 있다. 따라서 기상자료가 완전하지 못한 우리나라의 실정에서 농업용수 연구의 기반이 되는 증발산량 산정에 어느 정도 기여도가 있을 것으로 보인다. 향후 Hargreaves 식의 지역별 매개변수를 추정하여 전국적인 분포를 파악하면 최소한의 기상인자인 기온만으로 우리나라 모든 지역의 기준 증발산량 추정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Alkaeed, O., C. Flores, K. Jinno, and A. Tsutsumi, 2006. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering* 66(1): 1-14.
2. Allen, R. G., A. J. Clemmens, C. M. Burt, K. Solomon, and T. O'Halloran, 2005. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of irrigation and drainage engineering* 131(1): 24-36. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(24).
3. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. No.56. *Irrigation and Drainage*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
4. Allen, R. G., W. O. Pruitt, J. L. Wright, T. A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itemfisu, P. Steduto, J. Berengena, J. Beselga, M. Smith, L. S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter, and R. Elliott, 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural water management* 81: 1-22. doi:10.1016/j.agwat.2005.03.007.
5. Amatya, D. M., R. W. Skaggs, and J. D. Gregory, 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(6): 427-435.
6. Chae, H. S., Y. S. Song, J. Y. Park, 2000. An assessment of areal evapotranspiration using Landsat TM data. *Journal of Korea water resources association* 33(4): 471-482 (in Korean).
7. Cordova, M., G. Carrillo-Rojas, P. Crespo, B. Wilcox, and R. Celleri, 2015. Evaluation of the Penman-Monteith

- method for calculation reference evapotranspiration using limited data. *Mountain research and development* 35(3): 230-239. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1.
8. Garcia, M., D. Raes, R. Allen, and C. Herbas, 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agriculture and forest meteorology* 125: 67-82. doi:10.1016/j.agrformet.2004.03.005.
 9. Howell, T. A., S. R. Evette, A. D. Schneider, R. W. Todd, and J. A. Tolk, 1998. Evapotranspiration of irrigated fescue grass in a semi-arid environment. In *ASAE meeting Presentation* 982117: 1-23.
 10. Jabloun, M., and A. Sahli, 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. *Agricultural water management* 95: 707-715. doi:10.1016/j.agwat.2008.01.009.
 11. Lee, K. H., and J. H. Park, 2008. Calibration of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale. *Journal of the Korean society of civil engineering* 28(68): 675-681 (in Korean).
 12. Paulo C. S., J. G. Terry, A. S. Eduardo, 2010, Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural water management* 97: 635-644. doi:10.1016/j.agwat.2009.12.001.
 13. Rim, C. S., 2007. Urbanization effects on reference evapotranspiration. *Journal of Korea water resources association* 40(7): 571-583 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2007.40.7.571.
 14. Rim, C. S., 2008. Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop. *Journal of Korea water resources association* 41(2): 212-228 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2008.41.2.212.
 15. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006. Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman method. *Journal of the Korean society of agricultural engineers* 49(1): 13-23 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2006.48.1.013.
 16. Xing, Z., L. Chow, F. R. Meng, H. W. Rees, L. Steve, and J. Monteith, 2008. Validating evapotranspiration equations using Bowen ratio in New Brunswick, Maritime, Canada. *Sensors* 8(1): 412-428. doi:10.3390/s8010412.