

우리나라 기준증발산량 추정을 위한 Hargreaves 공식의 계수 보정

황선아^{1*} · 한경화¹ · 장용선¹ · 조희래¹ · 옥정훈¹ · 김동진¹ · 김기선¹ · 정강호²
¹농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과, ²농촌진흥청 국립농업과학원 기획조정과
(2019년 10월 1일 접수; 2019년 10월 25일 수정; 2019년 11월 13일 수락)

Calibration of Hargreaves Equation Coefficient for Estimating Reference Evapotranspiration in Korea

Seon-ah Hwang^{1*}, Kyung-hwa Han¹, Yong-seon Zhang¹, Hee-rae Cho¹, Jung-hun Ok¹,
Dong-Jin Kim¹, Gi-sun Kim¹ and Kang-ho Jung²

¹Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration,
Wanju, Jeonbuk 55365, Republic of Korea

²Division of Planning & Coordination, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development
Administration, Wanju, Jeonbuk 55365, Republic of Korea

(Received October 1, 2019; Revised October 25, 2019; Accepted November 13, 2019)

ABSTRACT

The evapotranspiration is estimated based on weather factors such as temperature, wind speed and humidity, and the Hargreaves equation is a simple equation for calculating evapotranspiration using temperature data. However, the Hargreaves equation tends to be underestimated in areas with wind speeds above 3 m s⁻¹ and overestimated in areas with high relative humidity. The study was conducted to determine Hargreaves equation coefficient in 82 regions in Korea by comparing evapotranspiration determined by modified Hargreaves equation and the Penman-Monteith equation for the time period of 2008~2018. The modified Hargreaves coefficients for 50 inland areas were estimated to be 0.00173~0.00232(average 0.00196), which is similar to or lower than the default value 0.0023. On the other hand, there are 32 coastal areas, and the modified coefficients ranged from 0.00185 to 0.00303(average 0.00234). The east coastal area was estimated to be similar to or higher than the default value, while the west and south coastal areas showed large deviations by area. As results of estimating the evapotranspiration by the modified Hargreaves coefficient, root mean square error(RMSE) is reduced from 0.634~1.394(average 0.857) to 0.466~1.328(average 0.701), and Nash-Sutcliffe Coefficient(NSC) increased from -0.159~0.837(average 0.647) to -0.053~0.910(average 0.755) compared with original Hargreaves equation. Therefore, we confirmed that the Hargreaves equation can be overestimated or underestimated compared to the Penman-Monteith equation, and expected that it will be able to calculate the high accuracy evapotranspiration using the modified Hargreaves equation. This study will contribute to water resources planning, irrigation schedule, and environmental management.

Key words: Evapotranspiration, Hargreaves equation, Penman-Monteith equation,
Reference evapotranspiration, Modified coefficient



* Corresponding Author : Seon-ah Hwang
(hsa9697h@korea.kr)

I. 서 론

증발산량은 효율적인 물 관리와 수문기상학적 특성을 파악하는 과정에서 중요한 인자이며, 이상적인 조건에서 추정된 잠재증발산량과 기준증발산량으로 구분할 수 있다(Lee and Park, 2008; Yoon and Choi, 2018). 잠재증발산량은 주어진 기상 및 지형조건에서 발생할 수 있는 증발산량의 최대값을 의미하며, 기준증발산량은 충분한 물의 공급이 있을 경우에 기준작물(알파파 또는 잔디)에 의한 증발산량이다(Moon *et al.*, 2013). 기준증발산량은 일반적으로 잠재증발산량을 대신하여 사용되며, 최근에는 표준 증발산량으로 이용하는 추세이다(Lee and Park, 2008; Yoon and Choi, 2018). 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(Yoon and Choi, 2018).

현재까지 이론적인 공식에 의해 기준증발산량을 산정할 수 있는 방법은 약 50 여 가지 이상이 제시되었으며, 이러한 공식 중 FAO Penman-Monteith(PM) 공식이 가장 널리 이용되고 있다(Droogers and Allen, 2002; Grismer *et al.*, 2002; Moon *et al.*, 2013). 그런데 PM 공식으로 기준증발산량을 추정하려면 기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등 많은 기상자료가 필요하나, 이러한 기상자료를 모두 관측하는 기상관측소는 매우 제한적이다(Moon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2019). 따라서 기상자료가 부족하거나 결측된 지역에서 사용할 수 있도록 온도나 복사열 자료 등 기본적인 기상정보만으로도 기준증발산량을 산정할 수 있는 공식들이 개발되어 사용되고 있다(Seo *et al.*, 2019). Samani(2000)는 기준증발산량의 약 80%는 기온과 태양복사열로 설명할 수 있음을 제시하였으며, 국내외 연구자들에 의해 Hargreaves (HG) 공식(Hargreaves and Samani, 1985)이 온도 자료만으로 기준증발산량을 추정할 수 있는 단순하고 계산이 간단하면서도 비교적 정확한 방법임이 확인되었다(Jensen *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1998; Temesgen *et al.*, 1999; Oh *et al.*, 2002; Hargreaves and Allen, 2003; Oh and Lee, 2004; Rim, 2008; Lee *et al.*, 2008; Lee and Park, 2008; Moon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2019).

HG 공식으로 기준증발산량을 산정하게 되면, 풍속이 3 m s^{-1} 이상인 지역에서는 과소평가하고 상대습도가 높은 지역에서는 과대평가하는 경향이 있으며, 최

고기온과 최저기온의 차이에 영향을 줄 수 있는 요인이 내륙지역과 해안지역이 서로 다를 수 있다(Allen *et al.*, 1998; Cordova *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2019). 따라서 HG 공식을 이용하여 기준증발산량을 계산할 때에는 지역적 기후 특성을 고려하여 매개변수를 지역특성에 맞게 조정할 필요가 있으며, 이러한 연구는 국내외에서 다양한 기후조건 또는 지역에서 진행되어 왔다(Irmak *et al.*, 2003; Galvilian *et al.*, 2006; Lee and Park, 2008; Lee *et al.*, 2008; Moon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2019).

선행 연구(Lee and Park, 2008; Moon *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2019)를 살펴보면, PM 공식으로 계산한 기준증발산량을 정해로 가정하여 HG 공식의 보정계수를 추정하였다. 기준증발산량을 산정하는 연구에서 가장 어려운 부분은 정해를 얻기 어렵다는 것인데, PM 공식이 완전한 물리이론을 바탕으로 유도된 공식이기 때문에 PM 공식으로부터 얻은 증발산량을 정해로 가정하는 일반적인 방법(Allen *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1998; Lee and Park, 2008)을 사용하여 Hargreaves 계수를 보정하였다. Moon *et al.*(2013)은 최고온도와 최저온도 차이에 대한 지수를 0.50 에서 일사량과 기온의 관계를 분석하여 수정된 0.58 로 바뀌서 계수를 보정하였는데, Allen *et al.*(1998)과 Todorovic *et al.*(2013) 등 여러 연구자들은 온도 차이의 지수를 0.50 으로 그대로 두고 지역별로 계수만 바꾸는 것을 제안하였다(Seo *et al.*, 2019). Moon *et al.*(2013)은 20년(1992-2011) 동안의 기상자료로 71 개 지점에 대한 HG 공식의 계수를 산정하여 우리나라 지역 중 가장 많은 지역에 대하여 계수를 보정하였으나, HG 공식의 온도차이의 지수를 보정하여 일반 HG 공식에 적용하기에는 무리가 있다. 또한 Seo *et al.*(2019)는 11년(2008~2018) 동안의 기상자료로 온도 차이의 지수를 그대로 두고 HG 공식의 계수를 보정하였으나, 우리나라 지역 중 강원도 11 지점에 대해서만 계수를 산정하여 전 지역에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구는 우리나라 모든 종관기상관측지점(ASOS, Automated Synoptic Observing System) 중 11년(2008~2018)동안의 기상자료를 이용할 수 있는 82 개 지점에 대하여 HG 공식의 계수를 보정하는 연구를 수행하였다. HG 공식은 온도의 영향을 많이 받는 추정식으로 기후변화에 따른 온도 상승 등을 고려하여 최근 10년 이상의 자료를 활용하였다. 또한 선행연구의 결과에 따라 PM 공식으로 계산한 기준증발산량을 정해로

가정하였으며, HG 공식의 온도 차이의 지수는 바꾸지 않고 HG 공식의 계수만 보정하여 지역별 기준증발산량의 추정의 정확도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

II. 재료 및 방법

2.1. FAO Penman-Monteith 공식을 이용한

기준증발산량 추정

우리나라 종관기상관측지점(ASOS)에서 최고기온, 최저기온, 평균기온, 상대습도, 평균풍속, 일사량 또는 일조시간을 모두 측정하고 있는 82 개 지점을 대상으로 하여, 2008년부터 2018년까지 최근 11년 동안의 기상자료를 활용하여 PM 공식(Eq. 1a)으로 기준증발산량을 추정하였다. 대상 지점 중 북창원과 양산시는 2009년 1월 7일부터, 서귀포는 2008년부터 2017년까지 기상자료가 측정되어 해당자료를 활용하였으며, 본 연구의 연구 대상지점 현황은 Table 1과 같다.

$$ET_{0\ PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Eq. 1a})$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 Z - 5.42)} \quad (\text{Eq. 1b})$$

여기서 $ET_{0\ PM}$ = PM 공식으로 산정된 기준증발산량(mm day⁻¹), Δ = 증기압 곡선의 기울기(kPa°C⁻¹), γ = 건습계 상수(kPa°C⁻¹), u_2 = 지상 2 m 높이에서의 풍속(m s⁻¹), R_n = 순복사에너지(MJm⁻² day⁻¹), G = 토양열 유동밀도(MJm⁻² day⁻¹), T = 일 평균기온(°C), e_s = 포화증기압(kPa), e_a = 실제증기압(kPa), u_z = 지상 Z m 높이에서의 풍속(m s⁻¹), Z = 풍속계 지표고도(m)이다. 일 평균 기준증발산량을 산정하기 위하여 PM 공식을 적용할 때 낮에 지표면에서 흡수한 태양에너지와 밤에 방출한 에너지가 서로 상쇄된다고 보고, 일반적으로 토양열 유동밀도는 “0”으로 가정하고 무시한다(Pereira, 2004; Allen *et al.*, 1998; Lee and Park, 2008). 풍속은 Eq. 1b에 의하여 높이를 보정한 후 PM 공식에 적용하였다.

2.2. Hargreaves 공식을 이용한 기준증발산량

추정 및 계수 보정

PM 공식으로 기준증발산량을 추정할 같은 지점에서 같은 기간의 기상자료를 이용하여 HG 공식(Eq. 2a and Eq. 2b)으로 기준증발산량을 산정하였다.

$$ET_{0\ HG} = K_{ET} R_a (T + 17.8)TD^{0.5} \quad (\text{Eq. 2a})$$

$$TD = T_{max} - T_{min} \quad (\text{Eq. 2b})$$

여기서 $ET_{0\ HG}$ = HG 공식으로 산정된 기준증발산량(mm day⁻¹), K_{ET} = HG 공식의 계수는 0.0023으로 미국에서 8년간의 기상자료를 이용하여 산정한 기본값(Hargreaves and Samani, 1985) R_a = 일별태양복사량(mm day⁻¹), T = 일 평균온도(°C), T_{max} = 일 최고온도(°C), T_{min} = 일 최저온도(°C)이다.

Hargreaves 공식의 계수 최적화는 PM 공식으로 추정된 기준증발산량을 기준으로 하여 Eq. 3과 마이크로소프트 엑셀의 해 찾기 기능을 이용하여 수행하였다.

$$\text{minimize } (\sqrt{ET_{0\ PM}} - \sqrt{ET_{0\ HG}})^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 $ET_{0\ PM}$ = PM 공식으로 산정된 기준증발산량(mm day⁻¹), $ET_{0\ HG}$ = HG 공식으로 산정된 기준증발산량(mm day⁻¹)이다.

HG 공식을 이용한 기준증발산량 추정결과의 정확도를 파악하기 위하여, Root Mean Square Error (RMSE)와 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSC, Nash and Sutcliffe, 1970)를 각각 Eq. 4와 Eq. 5로 계산하였다. RMSE는 오차의 크기를 나타내므로 0에 가까울수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미하며, NSC는 최대값은 1로, 1에 가까울수록 추정 정확도가 높음을 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0\ i\ HG} - ET_{0\ i\ PM})^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{0\ i\ PM} - ET_{0\ i\ HG})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{ET_{0\ i\ PM}} - ET_{0\ i\ PM})^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 $ET_{0\ i\ HG}$ = HG 공식으로 산정된 i번째 기준증발산량(mm day⁻¹), $ET_{0\ i\ PM}$ = PM 공식으로 산정된 i번째 기준증발산량(mm day⁻¹), n = 자료의 개수, $\overline{ET_{0\ i\ PM}}$ = PM 공식으로 산정된 기준증발산량의 평균이다.

2.3. 농업기후시대별 기준증발산량 변화 비교

농업기후시대는 주요 작물의 생육시기에 따라 생육과 수량이 크게 영향을 미치는 기후요소의 분포를 중심으로 비슷한 특성을 가진 지역들을 묶어서 구분하는

Table 1. Geographical characteristics of the Automated Synoptic Observing System(ASOS) used in this study

Area	Code	Region	Latitude	Elevation (m)	Code	Region	Latitude	Elevation (m)
Inland	95	Cherwon	38° 08'	154.8	216	Taebaek	37° 10'	712.8
	98	Dongducheon	37° 54'	112.5	221	Jecheon	37° 09'	259.8
	99	Paju	37° 53'	29.4	226	Boeun	36° 29'	175.0
	100	Daegwallyeong	37° 40'	772.6	232	Cheonan	36° 45'	81.5
	101	Chuncheon	37° 54'	75.6	236	Buyeo	36° 16'	11.3
	108	Seoul	37° 34'	85.8	238	Geumsan	36° 06'	170.4
	114	Wonju	37° 20'	148.6	244	Imsil	35° 36'	247.9
	119	Suwon	37° 16'	34.1	245	Jeongeup	35° 33'	69.8
	121	Yeongwol	37° 10'	240.6	247	Namwon	35° 24'	90.3
	127	Chungju	36° 58'	116.3	248	Jangsu	35° 39'	406.5
	129	Seosan	36° 46'	28.9	253	Gimhaesi	35° 13'	53.3
	131	Cheongju	36° 38'	58.7	254	Sunchanggun	35° 22'	127.0
	133	Daejeon	36° 22'	68.9	255	North Changwon	35° 13'	48.8
	135	Chupungnyeong	36° 13'	243.7	257	Yangsansi	35° 18'	14.9
	136	Andong	36° 34'	140.1	260	Jangheung	34° 41'	45.0
	137	Sangju	36° 24'	96.1	271	Bonghwa	36° 56'	324.3
	143	Daegu	35° 49'	53.4	272	Yeongju	36° 52'	210.8
	146	Jeonju	35° 50'	61.4	273	Mungyeong	36° 37'	170.6
	155	Changwon	35° 10'	37.6	278	Uiseong	36° 21'	81.8
	156	Gwangju	35° 10'	72.4	279	Gumi	36° 07'	48.8
192	Jinju	35° 09'	30.2	281	Yeongcheon	35° 58'	93.8	
202	Yangpyeong	37° 29'	47.9	284	Geochang	35° 40'	226.0	
203	Icheon	37° 15'	78.0	285	Hapcheon	35° 33'	32.0	
211	Inje	38° 03'	200.2	288	Miryang	35° 29'	11.2	
212	Hongcheon	37° 41'	140.9	289	Sancheong	35° 24'	138.1	
Coastal	90	Sokcho	38° 15'	18.1	170	Wando	34° 23'	35.2
	102	Baengnyeongdo	37° 57'	145.5	175	Jindo	34° 28'	476.5
	104	North Gangneung	37° 48'	78.9	184	Jeju	33° 30'	20.5
	105	Gangneung	37° 45'	26.0	185	Gosan	33° 17'	71.5
	106	Donghae	37° 30'	39.9	188	Seongsan	33° 23'	17.8
	112	Incheon	37° 28'	68.2	189	Seogwipo	33° 14'	47.0
	115	Ulleungdo	37° 28'	222.4	201	Ganghwa	37° 42'	47.0
	130	Uljin	36° 59'	50.0	235	Boryeong	36° 19'	15.5
	138	Pohang	36° 01'	2.3	243	Buan	35° 43'	12.0
	140	Gunsan	36° 00'	23.2	251	Gochanggun	35° 25'	54.0
	152	Ulsan	35° 34'	83.2	252	Yeonngwanggun	35° 17'	37.2
	159	Busan	35° 06'	69.6	261	Haenam	34° 33'	13.0
	162	Tongyeong	34° 50'	32.3	262	Goheung	34° 37'	53.1
	165	Mokpo	34° 49'	38.0	277	Yeongdeok	36° 13'	42.1
	168	Yoesu	34° 44'	64.6	294	Geoje	34° 53'	45.4
169	Heuksando	34° 41'	76.5	295	Namhae	34° 49'	43.7	

데, 대부분의 연구들은 지점별 기후 자료를 사용하여 해발고도의 차이에 의한 다양한 기후형태가 나타나는 것을 반영하지 못하고 있다(Choi and Yun, 1989; Shim *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2016). 우리나라 기상관측지점의 약 87%가 300 m 이하에 분포하고 있고, 지리적 편중도 심하며 산악지대가 많기 때문에 발생하는 공간적 변위에 대한 다양한 기후특성을 파악하기가 어렵다(Hong *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2016). Kim *et al.*(2016)은 우리나라의 복잡한 지형에 의해 나타나는 다양한 기후특성을 파악하기 위해 지형적 특성을 반영하여 농업기후지대를 구분하였으며, 이는 강수량의 영향보다 기온의 영향에 의해 나누어지는 경향으로 6 개의 기후지대로 나누었다.

Kim *et al.*(2016)이 연구한 6 개의 농업기후지대의 특징을 살펴보면, zone 1 은 우리나라 평균기온보다 온화한 기후를 나타내며, 서해안 남부지역, 동해안 남부지역, 남해안 인근 내륙지역을 포함하고 서울, 광주와 부산의 대부분 지역이 포함된다. zone 2 는 기온과 강수량이 우리나라 평균적인 기후를 나타내며, 경기도 일부 동부지역 제외한 지역, 충청남도 대부분 지역, 경상북도 서부지역과 전라도 일부지역이 포함된다. zone 3 는 1 월 평균기온이 0 °C 이상으로 우리나라에서 가장 높은 기온을 나타내며, 봄철에 다른 지대에 비해 강수량이 풍부한 편에 속한다. 한라산을 제외한 제주도 대부분 지역, 남해안의 해안 및 도서지역과 울릉도 등이 포함된다. zone 4 는 1 월 평균기온이 0 °C 이하로 대부분 지역이 1 월 최저기온이 -10 °C 이하이며, 우리나라 중부내륙 대부분 지역이 포함된다. zone 5 는 zone 4 와 기후특성이 유사하며, 특히 많은 지역이 10~3 월의 평균기온이 0 °C 이하로 6 개 기후지대 중 연중 기온이 가장 낮게 나타난다. 강원도 태백산맥을 포함한 고랭지, 지리산과 한라산 고랭지지역이 포함된다. zone 6 은 동해의 영향으로 기온이 온화하며, 가을철에 다른 기후지대보다 상대적으로 강수량이 많다. 동해안 북부의 해안지역과 제주도 한라산의 준고랭지지역이 포함된다.

본 연구에서는 농업기후지대 분류에 따라 zone 1 은 전주, zone 2 는 수원, zone 3 은 여수, zone 4 는 춘천, zone 5 는 대관령, 그리고 zone 6 은 강릉을 대표지점으로 선정하였으며, 일 평균 기준증발산량을 계산한 후 다시 월 평균 기준증발산량을 계산하여 PM 공식과 보정전, 보정후 HG 공식으로 산정된 값을 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. Hargreaves 공식의 계수 보정 및 통계분석

HG 공식에 따른 전국 82 개 지점의 기준증발산량 추정값이 PM 공식의 기준증발산량과 차이가 최소화 되도록 HG 공식의 계수를 보정한 결과와 기본적인 통계분석 결과를 Table 2 와 3 에 나타내었다. 철원 등 내륙지역은 50 개 지점이며 0.00173~0.00232(평균 0.00196)로 서울만 0.00232 로 기본값인 0.0023 보다 높게 산정되었고, 다른 지역은 비슷하거나 낮게 산정되었다. 반면, 속초 등 해안지역은 32 개 지점이며 0.00185~0.00303(평균 0.00232)으로 지역별로 편차가 크기는 하나 내륙지역에 비해 상대적으로 큰 값이 산정되었음을 확인할 수 있었다. 우리나라는 바다로 둘러싸인 지형으로 해안지역을 동해안, 서해안, 남해안으로 나눠서 HG 공식의 보정계수를 살펴보았다. 동해안은 속초, 북강릉, 강릉, 동해, 울릉도, 울진, 포항, 울산, 그리고 영덕으로 총 9 개 지점이며, 0.00226~0.00285(평균 0.00244)로 기본값과 비슷하거나 높게 산정되었다. 서해안은 백령도, 인천, 군산, 목포, 흑산도, 강화, 보령, 부안, 고창군, 그리고 영광군으로 총 10 개 지점이며, 0.00185~0.00268(평균 0.00215)로 백령도와 인천을 제외하고는 모두 기본값보다 낮게 산정되었다. 남해안은 부산, 통영, 여수, 완도, 진도, 제주도, 고산, 성산, 서귀포, 해남, 고흥, 거제, 그리고 남해로 총 13 개 지점이며, 부산과 해남의 경우 기상관측소의 위치를 고려하여 남해안으로 포함하였다. HG 공식의 보정계수는 0.00197~0.00303(평균 0.00242)으로 기본값보다 높은 지역은 부산, 통영, 여수, 제주, 고산, 성산, 서귀포이었으며, 지역별로 편차가 크게 나타났다.

이러한 결과는 과거 관련 연구들(Vanderlinden *et al.*, 2004; Gavilan *et al.*, 2006; Lee and Park, 2008; Moon *et al.*, 2013)에서도 동일하게 나타난 결과이며, Hargreaves *et al.*(1985)은 풍속으로 인한 영향이 상대적으로 크게 나타나는 해안지역에서 매개변수가 크게 산정된다는 연구결과를 제시한 바 있다(Moon *et al.*, 2013).

Table 2. Modified Hargreaves coefficient and accuracy assessment results for 50 inland areas in Korea

Area	Code	Region	Original		K_{ET}	Modified	
			RMSE	NSC		RMSE	NSC
Inland	95	Cherwon	0.915	0.619	0.00182	0.604	0.834
	98	Dongducheon	0.714	0.789	0.00200	0.556	0.873
	99	Paju	0.771	0.736	0.00191	0.519	0.881
	100	Daegwallyeong	0.809	0.692	0.00207	0.760	0.728
	101	Chuncheon	0.817	0.725	0.00187	0.530	0.884
	108	Seoul	0.751	0.781	0.00232	0.750	0.781
	114	Wonju	0.785	0.757	0.00195	0.588	0.864
	119	Suwon	0.874	0.658	0.00192	0.683	0.791
	121	Yeongwol	0.878	0.661	0.00184	0.521	0.881
	127	Chungju	0.742	0.794	0.00203	0.618	0.857
	129	Seosan	0.923	0.544	0.00184	0.679	0.754
	131	Cheongju	0.730	0.800	0.00206	0.645	0.844
	133	Daejeon	0.680	0.837	0.00214	0.637	0.857
	135	Chupungnyeong	0.858	0.698	0.00208	0.797	0.739
	136	Andong	0.813	0.754	0.00199	0.664	0.836
	137	Sangju	0.857	0.690	0.00201	0.738	0.770
	143	Daegu	0.858	0.745	0.00225	0.855	0.748
	146	Jeonju	0.789	0.750	0.00200	0.652	0.830
	155	Changwon	0.692	0.760	0.00230	0.692	0.760
	156	Gwangju	0.737	0.782	0.00209	0.670	0.820
	192	Jinju	0.994	0.486	0.00179	0.633	0.792
	202	Yangpyeong	0.809	0.710	0.00189	0.536	0.873
	203	Icheon	0.805	0.727	0.00190	0.541	0.877
	211	Inje	0.696	0.784	0.00196	0.502	0.888
	212	Hongcheon	0.819	0.740	0.00187	0.481	0.910
	216	Taebaek	0.761	0.706	0.00195	0.604	0.815
	221	Jecheon	0.851	0.666	0.00184	0.506	0.882
	226	Boeun	0.877	0.633	0.00182	0.494	0.884
	232	Cheonan	0.717	0.785	0.00200	0.563	0.867
	236	Buyeo	0.848	0.660	0.00185	0.513	0.876
	238	Geumsan	0.907	0.617	0.00180	0.480	0.893
	244	Imsil	0.916	0.579	0.00178	0.466	0.891
	245	Jeongeup	0.737	0.774	0.00197	0.554	0.872
	247	Namwon	0.802	0.722	0.00193	0.574	0.857
	248	Jangsu	0.867	0.601	0.00182	0.498	0.868
	253	Gimhaesi	0.919	0.588	0.00214	0.891	0.613
	254	Sunchanggun	0.835	0.732	0.00196	0.662	0.831
	255	North Changwon	0.885	0.580	0.00197	0.746	0.702
	257	Yangsansi	0.923	0.615	0.00215	0.897	0.636
	260	Jangheung	0.823	0.604	0.00194	0.637	0.763
	271	Bonghwa	0.984	0.476	0.00173	0.490	0.870
	272	Yeongju	0.916	0.649	0.00204	0.827	0.715
	273	Mungyeong	0.810	0.709	0.00202	0.698	0.784
	278	Uiseong	1.065	0.508	0.00173	0.521	0.882
	279	Gumi	0.799	0.738	0.00199	0.648	0.828
	281	Yeongcheon	0.870	0.673	0.00198	0.713	0.780
	284	Geochang	0.910	0.595	0.00184	0.583	0.834
	285	Hapcheon	0.870	0.675	0.00187	0.525	0.881
	288	Miryang	0.878	0.651	0.00189	0.591	0.842
	289	Sancheong	0.906	0.592	0.00197	0.763	0.711

Table 3. Modified Hargreaves coefficient and accuracy assessment results for 32 coastal areas in Korea

Area	Code	Region	Original		K_{ET}	Modified	
			RMSE	NSC		RMSE	NSC
Coastal	90	Sokcho	0.840	0.683	0.00240	0.831	0.690
	102	Baengnyeongdo	1.081	0.418	0.00268	1.007	0.495
	104	North Gangneung	0.884	0.688	0.00230	0.884	0.688
	105	Gangneung	1.200	0.558	0.00263	1.123	0.613
	106	Donghae	0.890	0.632	0.00248	0.861	0.655
	112	Incheon	0.823	0.656	0.00235	0.821	0.658
	115	Ulleungdo	1.101	0.496	0.00285	0.942	0.631
	130	Uljin	0.796	0.674	0.00236	0.792	0.677
	138	Pohang	0.877	0.680	0.00242	0.862	0.690
	140	Gunsan	0.684	0.771	0.00205	0.594	0.827
	152	Ulsan	0.777	0.716	0.00226	0.774	0.717
	159	Busan	1.099	0.424	0.00277	0.937	0.581
	162	Tongyeong	0.713	0.680	0.00236	0.709	0.683
	165	Mokpo	0.782	0.662	0.00209	0.737	0.700
	168	Yoesu	1.302	0.138	0.00303	1.018	0.473
	169	Heuksando	1.103	0.152	0.00230	1.103	0.152
	170	Wando	0.774	0.695	0.00225	0.771	0.698
	175	Jindo	0.863	0.675	0.00230	0.863	0.675
	184	Jeju	1.126	0.422	0.00275	0.991	0.552
	185	Gosan	1.394	-0.159	0.00268	1.328	-0.053
	188	Seongsan	0.825	0.598	0.00244	0.807	0.615
	189	Seogwipo	0.842	0.596	0.00262	0.750	0.680
	201	Ganghwa	0.680	0.774	0.00208	0.617	0.814
	235	Boryeong	0.744	0.688	0.00201	0.637	0.771
	243	Buan	0.663	0.804	0.00206	0.569	0.855
	251	Gochanggun	0.934	0.580	0.00185	0.649	0.797
	252	Yeonnwanggun	0.791	0.731	0.00206	0.718	0.778
	261	Haenam	0.783	0.680	0.00197	0.617	0.801
	262	Goheung	0.785	0.646	0.00197	0.630	0.772
	277	Yeongdeok	0.971	0.629	0.00230	0.971	0.629
	294	Geoje	0.700	0.744	0.00222	0.692	0.749
	295	Namhae	0.634	0.800	0.00213	0.585	0.830

82 개 지점에 대해 최적화된 HG 공식의 보정 계수를 고려하여 기준증발산량을 산정한 후, PM 공식으로 산정된 기준증발산량과 비교하여 RMSE 와 NSC 를 제시하였으며, 기존 HG 공식으로 산정된 기준증발산량에 대하여 동일한 통계분석을 실시하였다. 또한 통

계분석을 통한 정확도 평가 결과를 보다 쉽게 파악할 수 있도록 x 축에 RMSE 를, y 축에 NSC 를 나타낸 그림(Fig. 1)을 작성하여 제시하였으며, RMSE 는 0, NSC 는 1 의 값에 근접할수록 정확도가 높아지는 것을 의미한다(Moon *et al.*, 2013).

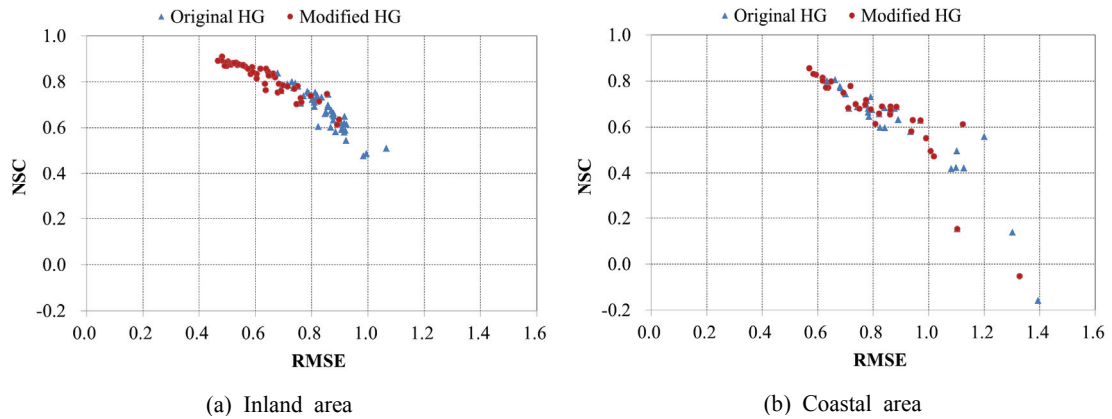


Fig. 1. Accuracy assessment for inland and coastal areas in Korea.

이러한 기준을 고려하여 지점별 결과를 살펴보면, 본 연구에서 제시한 보정된 계수를 적용하여 산정된 결과가 기존 HG 공식에 의한 결과보다 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 내륙지역의 경우에는 기존 HG 공식에 의한 결과가 RMSE 0.680~1.065, NSC 0.476~0.837의 범위로 나타나고 있었으나, 본 연구에서 보정된 계수를 적용한 HG 공식에서는 RMSE 0.476~0.897, NSC 0.613~0.910의 범위를 나타내고 있어 정확도가 크게 개선되었음을 명확하게 판단할 수 있다. 해안지역의 경우에도 기존 HG 공식에 의한 결과가 RMSE 0.634~1.394, NSC -0.159~0.804의 범위로 나타나고 있었으나, 보정된 계수를 적용한 HG 공식에서는 RMSE 0.569~1.328, NSC -0.053~0.855로 나타나 일부 정확도가 향상된 효과를 확인할 수 있었다. 본 연구결과 해안지역은 내륙지역에서와 같은 개선 효과는 아니지만 PM 공식에 의해 산정된 기준증발산량에 보다 근접된 결과를 보여 주고 있었으며, 이는 Moon *et al.*(2013)의 연구결과와 같다.

Lee and Park(2008)이 1997년부터 2006년까지 관측된 기상자료를 바탕으로 23개 지점에 대한 HG 공식의 보정계수를 이용하여 기준증발산량을 추정된 결과, 내륙지역 15개 지점(대관령, 춘천, 서울, 원주, 수원, 서산, 청주, 대전, 추풍령, 안동, 대구, 전주, 광주, 진주, 천안)은 RMSE 0.619~0.948(평균 0.761), NSC 0.633~0.843(평균 0.760)이었으며, 해안지역 8개 지점(강릉, 인천, 포항, 부산, 목포, 흑산도, 제주, 고산)은 RMSE 0.766~1.344(평균 1.049), NSC -0.082~0.676(평균 0.434)이었다. 본 연구에서 보정한 HG 공식의 계수로 위 23개 지점을 추정하였을 때, 내륙지역

15개 지점은 RMSE 0.530~0.855(평균 0.674), NSC 0.728~0.884(평균 0.809)이었으며, 해안지역 8개 지점은 RMSE 0.737~1.328(평균 0.988), NSC -0.053~0.700(평균 0.487)이었다. 최근 기상자료(2008-2018)를 활용하여 내륙지역 15개 지점과 해안지역 8개 지점에서 기준증발산량을 추정된 결과는 Lee and Park(2008)의 결과보다 본 연구결과가 PM 공식의 기준증발산량과 오차가 적고 정확도가 높은 것으로 판단된다.

Moon *et al.*(2013)이 1992년부터 2011년까지 관측된 기상자료를 바탕으로 69개 지점에 대한 HG 공식의 보정계수를 이용하여 기준증발산량을 추정된 결과, 내륙지역 44개 지점은 RMSE 0.479~1.061(평균 0.641), NSC 0.442~0.888(평균 0.812)이었으며, 해안지역 25개 지점은 RMSE 0.577~1.150(평균 0.822), NSC 0.431~0.842(평균 0.667)이었다. 본 연구에서 보정한 HG 공식의 계수로 위 69개 지점을 추정하였을 때, 내륙지역 44개 지점은 RMSE 0.466~0.855(평균 0.610), NSC 0.711~0.910(평균 0.832)이었으며, 해안지역 25개 지점은 RMSE 0.569~1.123(평균 0.801), NSC 0.473~0.855(평균 0.682)이었다. 최근 기상자료(2008-2018)를 활용하여 내륙지역 44개 지점과 해안지역 25개 지점에서 기준증발산량을 추정된 결과는 Moon *et al.*(2013)의 결과보다 본 연구결과가 오차가 적은 것으로 판단된다.

Seo *et al.*(2019)이 2007년부터 2017년까지 관측된 기상자료를 바탕으로 강원도 11개 지점에 대한 HG 공식의 보정계수를 이용하여 기준증발산량을 추정된 결과, 내륙지역 8개 지점(철원, 대관령, 춘천, 원

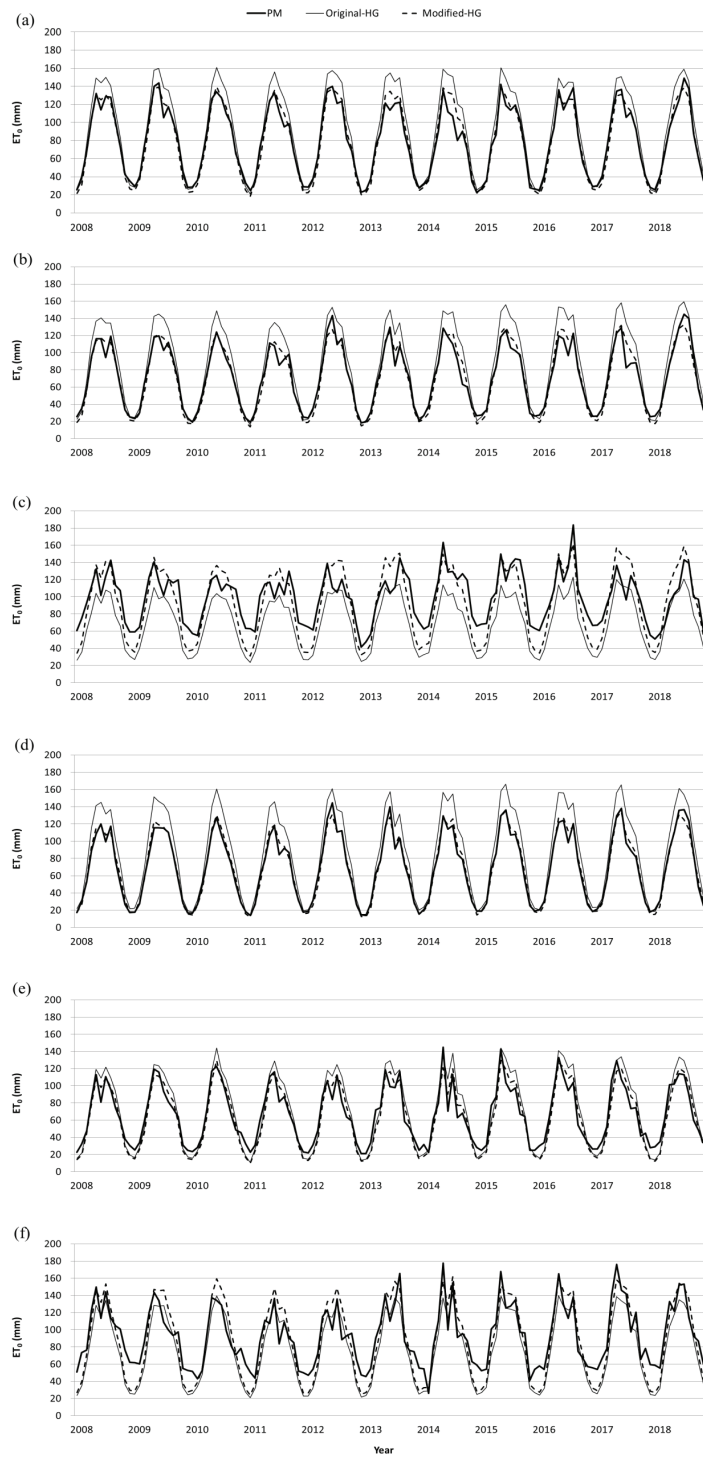


Fig. 2. Estimation of annual evapotranspiration by Penman-Monteith and Hargreaves: (a) Jeonju, (b) Suwon, (c) Yoesu, (d) Chuncheon, (e) Daegwallyeong, and (f) Gangneung.

주, 영월, 인제, 홍천, 태백)은 RMSE 0.493~0.785(평균 0.596), NSC 0.711~0.906(평균 0.837)이었으며, 해안지역 3 개 지점(속초, 강릉, 동해)은 RMSE 0.933~1.239(평균 1.046), NSC 0.531~0.609(평균 0.569)이었다. 본 연구에서 보정한 HG 공식의 계수로 위 11 개 지점을 추정하였을 때, 내륙지역 8 개 지점은 RMSE 0.481~0.760(평균 0.574), NSC 0.728~0.910(평균 0.850)이었으며, 해안지역 3 개 지점은 RMSE 0.831~1.123(평균 0.939), NSC 0.613~0.690(평균 0.653)이었다. 최근 기상자료(2008-2018)를 활용하여 강원도 11 개 지점에서 기준증발산량을 추정한 결과는 Seo *et al.*(2019)의 결과보다 본 연구결과가 정확도가 높은 것으로 확인되었다.

3.2. 농업기후시대별 대표지점 기준증발산량 변화 비교

PM 공식으로 산정된 기준증발산량과 계수를 보정하기 전과 후에 HG 공식으로 산정된 기준증발산량은 월 평균값으로 비교하여 Fig. 2 에 나타내었다. zone 1, 2, 4, 그리고 5 에 해당하는 전주, 수원, 춘천 그리고 대관령의 경우 주로 내륙지역으로, 보정계수로 산정된 HG 공식의 기준증발산량이 PM 공식을 이용하여 산정된 기준증발산량과 아주 가깝게 근접하고 있음을 알 수 있으며, 이는 Lee *et al.*(2008)의 연구와 같다. zone 3 과 6 에 해당하는 여수와 강릉의 경우 주로 해안지역으로, 기본값의 HG 공식으로 산정된 기준증발산량은 PM 공식으로 산정된 기준증발산량보다 과소 산정되고 있음을 확인할 수 있었다. 내륙지역에 비해 편차가 크긴 하지만, 보정계수를 이용한 HG 공식으로 산정된 기준증발산량이 기본값의 HG 공식보다 PM 공식에 근접하고 있음을 알 수 있다.

이 결과로 미루어 보아 HG 공식은 지역특성을 고려하여 계수를 보정하여 이용할 경우 정확도가 높은 기준증발산량을 추정할 수 있을 것으로 판단되며, 우리나라의 수자원 관리, 농업용수 운용과 기후변화 영향 평가 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

적 요

기준증발산량은 기온, 풍속, 습도 등 기상요소를 바탕으로 추정하는 방법을 이용하고 있으며, Hargreaves 공식은 기온자료를 이용하여 기준증발산량을 산정할 수 있는 간단한 경험식이라 할 수 있다. 그러나

Hargreaves 공식은 풍속이 3 m s^{-1} 이상인 지역에서는 과소평가 되고, 상대습도가 높은 지역은 과대평가 되는 경향이 있다. 본 연구에서는 Hargreaves 공식을 우리나라에 적용하기 위해 보다 정확한 기준증발산량 추정이 가능하도록 계수 산정 연구를 수행하였다. 우리나라 종관기상관측지점(ASOS, Automated Synoptic Observing System)의 최근 11 년(2008-2018) 동안의 기상자료를 이용하여 Panman-Monteith 공식으로 기준증발산량을 추정하였고, 이 값을 기준으로 하여 각 지점별로 Hargreaves 공식의 계수를 보정하였다. 우리나라 82 개 지점에 대하여 지역별로 보정된 계수는 내륙지역이 50 개 지점이며, 0.00173~0.00232(평균 0.00196)로 기본값인 0.0023 과 비슷하거나 낮게 산정되었다. 반면, 해안지역은 32 개 지점이며 지역별로 보정된 계수의 범위는 0.00185~0.00303(평균 0.00234)으로 동해안지역은 기본값과 비슷하거나 높게 산정된 반면, 서해안과 남해안지역은 지역별로 편차가 크게 나타났다. Hargreaves 공식의 계수를 보정하여 기준증발산량을 추정한 결과 RMSE(Root Mean Square Error)는 계수 보정 전 0.634~1.394(평균 0.857)에서 계수 보정 후 0.466~1.328(평균 0.701)로 낮아지고, NSC(Nash-Sutcliffe Coefficient)는 계수 보정 전 -0.159~0.837(평균 0.647)에서 계수 보정 후 -0.053~0.910(평균 0.755)로 높아짐에 따라 기준증발산량의 추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 연구 결과, Hargreaves 공식을 그대로 이용할 경우 Penman-Monteith 공식에 비해 과대 또는 과소 산정될 수 있음을 확인하였으며, 계수를 보정하여 이용할 경우 정확도가 높은 기준증발산량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01256901)의 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Allen, R. G., M. Smith, A. Perrier, and L. S. Pereira, 1994: An update for the definition of the reference evapotranspiration. *ICID Bulletin, New Delhi* **43**(2), 1-34.

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirement. Irrigation and Drainage Paper 56. *United Nations- Food and Agriculture Organization(FAO), Rome* **300**(9), D05109.
- Choi, D. H., and S. H. Yun, 1989: Agroclimatic zone and characters of the area subject to climatic disaster in Korea. *Journal of Korean Society of Crop Science* **34**(2), 12-33.
- Cordova, M., G. Carrillo-Rojas, P. Crespo, B. Wilcox, and R. Celleri, 2015: Evaluation of the Penman-Monteith(FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. *Mountain Research and Development* **35**(3), 230-239.
- Doogers, P., and R. G. Allen, 2002: Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* **16**, 33-45.
- Gavilan, P., I. J. Lorite, S. Tornero, and J. Berengena, 2006: Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management* **81**(3), 257-281.
- Grismer, M. E., M. Orang, R. Snyder, and R. Matyac, 2002: Pan Evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **128**(3), 180-184.
- Hargreaves, G. H., and R. G. Allen, 2003: History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **129**(1), 53-63.
- Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani, 1985: Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* **1**(2), 96-99.
- Hargreaves, G. L., G. H. Hargreaves, and J. P. Riley, 1985: Irrigation water requirements for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **111**(3), 265-275.
- Hong, K. O., M. S. Suh, D. K. Rha, D. H. Chang, C. S. Kim, and M. K. Kim, 2007: Estimation of high resolution gridded temperature using GIS and PRISM. *Journal of Korean Meteorological Society* **17**(3), 255-268.
- Irmak, S., R. G. Allen, and E. B. Whitty, 2003: Daily grass and alfalfa-reference-evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **129**(5), 360-370.
- Jensen, M. E., R. D. Burman, and R. G. Allen, 1990: Evapotranspiration and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice* **70**, 360pp.
- Kim, S. J., M. I. Kim, C. H. Lim, W. K. Lee, and B. J. Kim, 2017: Applicability analysis of FAO 56 Penman-Monteith methodology for estimating potential evapotranspiration in Andong dam watershed using limited meteorological data. *Journal of Climate Chang Research* **8**(2), 125-143.
- Kim, Y., K. M. Shim, M. P. Jung, I. T. Choi, and K. K. Kang, 2016: Classification of agroclimatic zones considering the topography characteristics in South Korea. *Journal of Climate Change Research* **7**(4), 507-512.
- 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 Engineers* **28**(6B), 675-681.
- Lee, K. H., H. Y. Cho, and N. S. Oh, 2008: Calibration and validation of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation in Gyeonggi bay watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* **41**(4), 413-422.
- Moon, J. W., C. G. Jung, and D. R. Lee, 2013: Parameter regionalization of Hargreaves equation based on climatological characteristics in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* **46**(9), 933-946.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282-287.
- Oh, N. S., and K. H. Lee, 2004: Calculation of evapotranspiration based on daily temperature. *Journal of Korea Water Resources Association* **37**(6), 479-485.
- Oh, N. S., K. H. Lee, and Y. C. Ko, 2002: Capability of evapotranspiration estimation with short field data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* **22**(6B), 795-801.
- Pereira, A. R., 2004: The Priestly-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* **125**, 305-313.
- Rim, C. S., 2008: Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop. *Journal of Korea Water Resources Association* **41**(2), 212-228.

- Samani, Z., 2000: Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **126**(4), 265-267.
- Seo, Y., S. Lim, S. Heo, B. Yoon, S. Hong, Y. Park, and D. Hong, 2019: Modification of Hargreaves equation coefficient to estimate reference evapotranspiration in Gangwondo. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **52**(1), 1-10.
- Shim, K. M., J. T. Lee, Y. S. Lee, and G. Y. Kim, 2004: Reclassification of winter barley cultivation zones in Korea based on recent evidences in climate change. *Journal of Korean Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 218-234.
- Temesgen, B., R. G. Allen, and D. T. Jensen, 1999: Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **125**(1), 26-33.
- Todorovic, M., B. Karic, and L. S. Pereira, 2013: Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology* **481**, 166-176.
- Vanderlinden, K., J. V. Giraldez, and M. V. Meirvenne, 2004: Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **130**(3), 184-191.
- Yoon, P. R., and J. Y. Choi, 2018: Assessment of reference evapotranspiration equations for missing and estimated weather data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **60**(3), 15-25.