第46卷 第9號·2013年 9月 pp. 933~946

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 46, No. 9:933-946, September 2013
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.9.933
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

우리나라 기후특성을 고려한 Hargreaves 공식의 매개변수 지역화

Parameter Regionalization of Hargreaves Equation Based on Climatological Characteristics in Korea

문 장 원* / 정 충 길** / 이 동 **률*****

Moon, Jang Won / Jung, Chung Gil / Lee, Dong Ryul

Abstract

The quantitative analysis of evapotranspiration (ET) is a key component in hydrological studies and the establishment of water resources planning. Generally, the quantitative analysis of ET is performed by the estimation method of potential or reference ET based on meteorological factors such as air temperature, wind speed, etc. Hargreaves equation is one of empirical methods for reference ET using air temperature data. In this study, in order to estimate more exact reference ET considering climatological characteristics in Korea, parameter regionalization of Hargreaves equation is carried out. Firstly, modified Hargreaves equation is presented after the analysis of the relationship between solar radiation and temperature. Secondly, parameter (K_{ET}) optimization of Hargreaves equation is performed using Penman–Monteith method and modified equation at 71 weather stations. Lastly, the equation for calculating K_{ET} using temperature data is proposed and verified. As a result, reference ET from original Hargreaves equation is overestimated or underestimated compared with Penman–Monteith method. But modified equation in this study is more accurate in the climatic conditions of Korea. In addition, the applicability of the equation between K_{ET} and temperature is confirmed.

Keywords: evapotranspiration, Hargreaves equation, reference ET, parameter regionalization

요 지

유역의 수문기상학적 특성을 분석하거나 수자원계획을 수립하는 과정에서 필수적인 사항은 증발산에 대한 정량적인 특성을 파악하는 것이다. 일반적으로 증발산량에 대한 정량적인 분석은 기온, 풍속 등 기상학적 인자를 바탕으로 잠재증발산량 또는 기준증발산량을 추정하는 방법을 이용하고 있으며, Hargreaves 공식은 기온자료를 이용하여 기준증발산량을 산정할 수 있는 간단한 경험식이라 할 수 있다. 본 연구에서는 Hargreaves 공식을 우리나라에 적용함에 있어 보다 정확한 기준증발산량 추정이 가능하도록 공식의 매개변수를 지역화하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 일사량 관측자료와 기온과의 관계를 검토하여 수정 관계식을 도출하였으며, 수정 관계식과 Penman-Monteith 방법에 의한 기준증발산량 산정결과를 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수 지역화를 수행하였다. 또한 매개변수와 기온과의 관계분석을 통해 기온자료로부터 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정할 수 있는 관계식을 제안하였으며, 이에 대한 검증을 수행하였다. 연구결과, 우리나라에서 기존 Hargreaves 공식을 그대로 이용할 경우 Penman-Monteith 방법에 비해 과대 또는 과소 산정될 수 있음을 확인하였으며, 지역화된 매개변수를 이용할 경우 정확도가 크게 개선되고 있음을 확인하였다. 또한 기온자료로부

^{*} 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: jwmoon@kict.re.kr, Tel: 031-910-0591) Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea

^{**} 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 연구원 (e-mail: wjd0823@kict.re.kr) Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology

^{***} 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 연구위원 (e-mail: dryi@kict.re.kr) Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology

터 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정할 수 있는 관계식에 대한 검증을 통해 본 연구에서 제안한 관계식의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 증발산, Hargreaves 공식, 기준증발산, 매개변수 지역화

.....

1. 서 론

효율적인 물관리를 위한 수자원계획이나 관개계획을 수립하고 유역의 수문기상학적 특성을 분석하여 수문순 환 특성을 파악하는 과정에서 중요한 인자 중 하나는 증 발산량에 대한 정량적 평가라 할 수 있다. 증발산량은 지 하수와 지표수에 대한 물수지 분석에 있어 매우 중요한 인자이며, 국지적 혹은 대륙적 규모의 기후변화나 환경변 화를 예측하기 위해서도 정확한 측정과 정량적 분석이 필 수적이다(Chae et al., 1999). 또한 증발산량의 정확한 예측 은 수자원의 효과적이고 지속적인 관리에 반드시 필요한 요소로 침투, 유출 과정의 계산과 함께 수문학적 물 순환 과정에서 아주 중요한 역할을 한다(Oh et al., 2002).

그러나 다른 수문기상학적 인자들과 달리 증발산에 대 한 관측은 쉽게 이루어지기 어려우며, 증발산 특성 분석 에 이용할 수 있는 관측자료 또한 제한적으로 존재하고 있 어 관측자료를 기반으로 유역의 증발산 특성 분석을 수행 하기는 매우 어려운 상황이다. 그러므로 계기에 의해 현장 에서 실측된 증발산량 자료는 매우 제한적으로 존재하기 때문에 일반적으로 증발산량에 대한 분석은 기상자료를 이용하여 이론적인 방법에 의해 산정되어 이용되고 있다 (Grismer et al., 2002). 이론적인 방법에 의해 산정되는 증 발산량은 이상적인 조건에서 추정된 잠재증발산량과 기 준증발산량으로 구분할 수 있다. 잠재증발산량(potential evapotranspiration)은 주어진 기상 및 지형의 조건 하에 서 발생할 수 있는 증발산량의 최대 값을 의미하며, 기준 증발산량(reference evapotranspiration, 이하 ET_0)은 충 분한 물의 공급이 있을 경우에 기준작물(알파파나 잔디) 에 의한 증발산량이다. 이처럼 잠재증발산량은 기준작물 을 설정하지 않고 매우 모호한 개념의 키 작은 녹색작물 로부터의 증발산을 의미하였으나 이후 기준증발산은 대 상 작물을 구체적으로 0.12 m 높이의 잔디로 정의함으로 써 증발 대상이 되는 식생조건을 보다 명확하게 명시하였 다(Rim, 2008). 이에 따라 증발산 분석을 위한 표준 값으 로 기준증발산량을 이용하는 것이 최근 연구자들의 추세 이다.

이론적인 방법에 의해 기준증발산량을 산정할 수 있는 방법은 현재까지 약 50여 가지 이상의 방법이 제시되었으며 (Grismer et al., 2002), 이러한 방법 중 FAO-56 Penman-Monteith 방법(이하 PM 방법)이 가장 널리 이용되고 있다 (Droogers and Allen, 2002). 국제관개배수위원회(International Commission on Irrigation and Drainage, ICID) 와 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)에서는 기상자료로부터 기준증발산량 (ET_0) 을 산정하거나 다른 방법들을 평가하 기 위한 기준 방법으로 PM 방법을 이용하도록 하고 있다 (Hargreaves, 1994). 그러나 PM 방법을 적용함에 있어 가 장 큰 단점은 기온, 풍속, 상대습도(또는 이슬점온도), 태 양복사열 등 상대적으로 많은 기상자료를 필요로 한다는 점이다. 이러한 기상자료가 동시에 관측되고 있는 기상관 측소의 숫자는 전 세계적으로 매우 제한적이며(Droogers and Allen, 2002), 다양한 조건에서 기준증발산량(ET_0)을 산정하기 위한 최적의 방법을 찾기 위한 연구가 많은 연구 자들에 의해 이루어져 왔다(Hargreaves and Samani, 1985; Smith et al., 1991; Allen et al., 1994; New et al., 2002). 이러한 연구 중 Hargreaves and Samani (1985)는 최고 및 최저기온과 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation) 자료만을 이용하여 기준증발산량(ET_0)을 산정 할 수 있는 방법을 개발하였다. Samani (2000)의 연구에 의하면, 기준증발산량 (ET_0) 의 약 80%는 기온과 태양복사 열로 설명할 수 있음을 제시한 바 있으며, 지금까지 많은 국내외 연구자들에 의해 제한된 기상자료 조건 하에서 Hargreaves 공식의 적용성이 충분히 있음이 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).

그러나 Hargreaves 공식을 통해 산정되는 기준증발산 량(ET_0)의 신뢰성을 확보하기 위해서는 공식이 우리나라의 기후 특성을 적절히 반영하고 있는가에 대한 평가가 선행되어야 한다. Hargreaves et al. (1985)에 의하면 Hargreaves 공식은 별도의 검정과정 없이 전 세계적으로 이용될 수

있다고 언급하고 있으나 일부 연구자들에 의해 적용 대상 지역의 기후 조건을 고려하여 매개변수 지역화를 수행함으로써 보다 정확한 기준증발산량(ET_0) 산정이 가능하다고 제시하였으며(Vanderlinden et al., 2004; Gavilan et al., 2006), 국내에서도 일부 연구자들에 의해 Hargreaves 공식의 매개변수 보정에 대한 연구가 이루어진 바 있다 (Lee et al., 2008; Lee and Park, 2008).

본 연구에서는 우리나라의 기후 특성을 고려하여 Hargreaves 공식의 매개변수 지역화를 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 Hargreaves 공식의 기본적인 전제라 할 수 있는 일사량과 기온과의 관계에 대해 우리나라의 자료(기상청 20개 지점)를 이용한 분석을 수행하였으며, 도출된 일사량-기온 관계를 바탕으로 수정 공식을 제안하였다. 제안된 공식을 기상청 71개 지점에 적용하여지점별로 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였으며, 매개변수와 기온과의 관계식을 도출하여 제시하였다. 도출된 매개변수-기온 관계식은 문산 등 3개 지점에 적용하였으며, 그 결과를 평가하여 제시된 관계식의 활용 가능성을 검토하였다.

2. Hargreaves 공식에 의한 기준증발산량 산정 방법

McVicker (1982)는 기준증발산량을 산정하기 위한 12 개 공식의 적용성을 평가한 후 Eq. (1)과 같이 표현되는 공식이 가장 좋은 결과를 나타내고 있음을 제시하였다.

$$ET_0 = 0.0075 \times RS \times TF \tag{1}$$

여기서, RS는 지표면에 도달하는 태양복사열에 상응하는 물의 양, TF는 화씨(Fahrenheit)의 단위를 갖는 평균기온 으로 최고기온과 최저기온의 평균을 통해 산정되는 값이 다. 평균기온의 단위를 섭씨(Celsius)로 환산할 경우 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ET_0 = 0.0135 \times RS(TC + 17.8)$$
 (2)

Eq. (2)는 Hargreaves and Samani (1982)에 의해서도 기준증발산량 (ET_0) 을 산정하기 위한 공식으로 제시된 바 있다. 하지만 Eq. (2)에서 RS는 관측자료를 획득하기 어려운 인자라는 한계가 있으며, 일조시간 등의 자료를 이용하여 간접적으로 추정할 수 있는 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. Hargreaves and Samani (1982)는 상대적으로 쉽게 구할 수 있는 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation, 이하 RA)과 기온과의 관계를 분석하

여 RS를 산정할 수 있는 관계식을 Eq. (3)과 같이 제시하였다.

$$RS = K_{RS} \times RA \times TD^{0.50} \tag{3}$$

여기서, K_{RS} 는 보정계수(calibration coefficient)이며, TD는 최고기온과 최저기온의 차이를 의미한다. Hargreaves and Samani (1985)는 Eqs. (2) and (3)을 조합하여 Eq. (4)와 같은 관계식을 제시하였으며, Eq. (4)는 일반적으로 알려져 있는 Hargreaves 공식이다.

$$ET_0 = K_{ET} \times RA \times (TC + 17.8) \times TD^{0.50}$$
 (4)

여기서, K_{ET} 는 Hargreaves 공식의 매개변수로 알려져 있으며, Hargreaves and Samani (1985)는 미국 California Davis에서 실제 계기를 통해 관측된 8년간의 자료를 이용하여 K_{ET} 를 산정한 후 0.0023의 값을 제시하였다.

3. 대상지점 및 분석방법

3.1 연구 대상지점 및 이용자료

우리나라 기후 특성을 고려한 Hargreaves 공식의 매개 변수 지역화를 위해 먼저 일사량과 기온과의 관계 분석을 수행하였다. 이를 위해 기상청에서 이용 가능한 일사량 관 측자료가 존재하는 지점을 검토하였으며, 그 결과 총 20개 지점의 관측자료(1992~2011년)가 가용한 것으로 확인되 었다. 결과적으로 일사량과 기온과의 관계 분석에는 기상 청 20개 지점의 일사량 관측자료(1992~2011년)를 수집하 여 이용하였으며, 일사량 관측자료를 지표면에 도달하는 태 양복사열(RS)로 고려하여 분석을 수행하였다. 이와 함께 대 기권 상층부 태양복사열(RA) 자료는 Hargreaves (1994)에 서 제시된 결과를 이용하였다. 본 연구를 통해 도출된 일 사량-기온 관계식을 반영하여 Hargreaves 공식을 수정한 후 매개변수 (K_{FT}) 를 추정하기 위해 기상청 71개 지점의 기 상 관측자료를 수집하여 이용하였으며, 대상지점의 선정은 10년 이상 기상자료가 축적되어 있는 지점을 고려하였다. 수집된 기상자료는 총 5가지 항목(일 최고기온, 일 최저기 온, 이슬점온도, 풍속, 일조시간)이며, 71개 지점에 대해 PM 방법에 의한 기준증발산량 (ET_0) 산정을 고려하여 기 상자료를 수집하였다. 마지막으로 71개 지점에 대해 도출 된 매개변수 (K_{ET}) 와 기온과의 관계식을 추정하고 이를 검증하기 위한 지점으로 이용 가능한 기상자료가 10년 미 만으로 Hargreaves 공식의 지역화 과정에 고려되지 않은 문산, 상주, 진도 등 3개 지점을 선정하였으며, 3개 지점의 기상자료도 함께 수집하여 분석에 활용하였다. Table 1은

935

Table 1. Descriptions for Weather Stations Used in This Study

rable	i. Descriptions	ioi vveaiii	ei Sialions	USEU III	11115 31	uuy			
Code	Name	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Code	Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)
090	Sokcho	38° 15′	128° 33′	22.9	188	Seongsan	33° 23′	126° 52′	18.4
095	Cheorwon	38° 08′	127° 18′	154.9	189	Seogwipo	33° 14′	126° 33′	50.4
098	Dongducheon	37° 54′	127° 03′	112.5	192	Jinju	35° 09′	128° 02′	27.1
099	Munsan	37° 53′	126° 45′	30.0	201	Ganghwa	37° 42′	126° 26′	46.2
100	Daegwallyeong	37° 40′	128° 43′	772.4	202	Yangpyeong	37° 29′	127° 29′	47.4
101	Chuncheon	37° 54′	127° 44′	76.8	203	Icheon	37° 15′	127° 29′	90.0
102	Baengnyeongdo	37° 57′	124° 37′	145.5	211	Inje	38° 03′	128° 10′	198.7
105	Gangneung	37° 45′	128° 53′	26.1	212	Hongcheon	37° 41′	127° 52′	146.2
106	Donghae	37° 30′	129° 07′	39.5	216	Taebaek	37° 10′	128° 59′	714.2
108	Seoul	37° 34′	126° 57′	85.5	221	Jecheon	37° 09′	128° 11′	263.1
112	Incheon	37° 28′	126° 37′	69.0	226	Boeun	36° 29′	127° 44′	173.0
114	Wonju	37° 20′	127° 56′	150.7	232	Cheonan	36° 46′	127° 07′	21.3
115	Ulleungdo	37° 30′	130° 55′	220.0	235	Boryeong	36° 19′	126° 33′	17.9
119	Suwon	37° 16′	126° 59′	34.5	236	Buyeo	36° 16′	126° 55′	11.0
121	Yeongwol	37° 10′	128° 27′	239.7	238	Geumsan	36° 06′	127° 28′	170.6
127	Chungju	36° 58′	127° 57′	113.7	243	Buan	35° 43′	126° 42′	3.6
129	Seosan	36° 46′	126° 29′	25.2	244	Imsil	35° 36′	127° 17′	248.0
130	Uljin	36° 59′	129° 24′	47.0	245	Jeongeup	35° 33′	126° 51′	39.5
131	Cheongju	36° 38′	127° 26′	56.4	247	Namwon	35° 24′	127° 19′	93.5
133	Daejeon	36° 22′	127° 22′	62.6	248	Jangsu	35° 39′	127° 31′	407.0
135	Chupungnyeong	36° 13′	127° 59′	240.9	256	Suncheon	35° 04′	127° 14′	74.4
136	Andong	36° 34′	128° 42′	140.7	260	Jangheung	34° 41′	126° 55′	44.5
137	Sangju	36° 24′	128° 09′	98.0	261	Haenam	34° 33′	126° 34′	4.6
138	Pohang	36° 01′	129° 22′	1.3	262	Goheung	34° 37′	127° 16′	53.3
140	Gunsan	36° 00′	126° 45′	26.9	271	Bongwhoa	36° 56′	128° 54′	320.9
143	Daegu	35° 53′	128° 37′	57.3	272	Yeongju	36° 52′	128° 31′	210.5
146	Jeonju	35° 49′	127° 09′	61.0	273	Mungyeong	36° 37′	128° 08′	170.8
152	Ulsan	35° 33′	129° 19′	34.6	277	Yeongdeok	36° 31′	129° 24′	41.2
155	Changwon	35° 10′	128° 34′	36.8	278	Uiseong	36° 21′	128° 41′	82.6
156	Gwangju	35° 10′	126° 53′	74.5	279	Gumi	36° 07′	128° 19′	47.4
159	Busan	35° 06′	129° 01′	69.2	281	Yeongcheon	35° 58′	128° 57′	93.3
162	Tongyeong	34° 50′	128° 26′	30.8	284	Geochang	35° 40′	127° 54′	221.4
165	Mokpo	34° 49′	126° 22′	37.4	285	Hapcheon	35° 33′	128° 10′	33.0
168	Yoesu	34° 44′	127° 44′	73.3	288	Miryang	35° 29′	128° 44′	10.7
170	Wando	34° 23′	126° 42′	27.7	289	Sancheong	35° 24′	127° 52′	138.7
175	Jindo	34° 28′	126° 18′	476.4	294	Geoje	34° 53′	128° 36′	44.5
184	Jeju	33° 30′	126° 31′	19.9	295	Namhae	34° 48′	127° 55′	43.2

본 연구의 연구 대상지점에 해당하는 74개 지점(매개변수지역화 연구 대상지점 71개소, 검증 지점 3개소) 현황을 정리하여 나타낸 것이다. Table 1에서 굵은 글씨로 표시된 지점은 일사량-기온 관계를 분석하기 위한 대상 지점을 의미하며, 셀이 음영 처리된 지점은 매개변수(K_{ET})와 기온과의 관계식을 검증하기 위한 3개 지점을 뜻한다.

3.2 분석방법

본 연구의 분석방법은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저 Eq. (3)과 같이 제시된 태양복사량과 기온과의 관계를 분석하고 그 결과를 바탕으로 우리나라의 기후 특성이 반영된 관계식을 도출하고자 하였다. 이를 위해 앞서 언급한 바와 같이 기상청 20개 지점의 일사량 및 기온(최고 및 최저기온) 관측자료를 수집한 후 내륙지역에 위치한지점과 해안지역에 위치한 지점을 구분하여 관계 분석을수행하였다. Allen et al. (1998)과 Temesgen et al. (1999)은 연구를 통해 최고기온과 최저기온의 차이에 영향을 줄수 있는 인자가 내륙과 해안이 서로 다르게 나타나므로이들 지역에서 Hargreaves 공식의 적용성이 다르게 나타난고 제시한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 고려하여 내륙과 해안지역을 구분하여 일사량-기온관계식을 도출하였다.

두 번째로 내륙과 해안지역에 대해 도출된 일사량—기온 관계를 반영하여 Eq. (4)의 형태로 표현되는 공식을 수정 제시하였으며, 수집된 기상자료를 71개 지점에 적용하여 PM 방법에 의한 기준증발산량을 산정하였다. PM 방법으로 산정된 기준증발산량을 기준으로 71개 지점에 대해수정 Hargreaves 공식의 매개변수(K_{ET})를 최적화하였으며, 매개변수 최적화는 Eq. (5)와 같은 관계식과 Microsoft Excel의 해 찾기 기능을 이용하여 수행하였다.

$$Minimize \left(\sqrt{ET_0^{PM}} - \sqrt{ET_0^{MH}}\right)^2 \tag{5}$$

여기서, ET_0^{PM} 은 PM 방법에 의해 산정된 기준증발산량을 의미하며, ET_0^{MH} 는 수정된 Hargreaves 공식에 의해 산정된 기준증발산량을 의미한다. 최적화에 대한 검증을 위해 71개 지점별로 $2009\sim2011$ 년의 자료는 최적화를 위한 고려 대상에서 제외하였으며, 3년간의 자료를 적용하여수정 공식 및 매개변수 최적화 결과의 적용성을 평가하였다. 이때 적용성 평가를 위해 Nash-Sutcliffe Efficiency (이하 NSE) 계수와 RMSE(Root Mean Square Error)를 이용하였다.

마지막으로 71개 지점에 대해 도출된 매개변수(K_{ET})와 기온과의 관계식을 도출하여 제시하였다. 관계식은 71개

지점의 매개변수(K_{ET})와 분석 대상 기간의 평균기온, 일 교차 평균을 이용하여 제시하였으며, 제시된 관계식의 검증을 위해 문산 등 3개 지점에 대해 적용하고 PM 방법에 의해 산정된 기준증발산량과 기존 Hargreaves 공식에 의한 결과, 관계식을 통해 추정된 매개변수(K_{ET})가 반영된 수정 Hargreaves 공식에 의한 결과를 이용하여 NSE 및 RMSE를 통한 적용성 평가를 수행하였다.

4. 분석 및 결과 검토

4.1 일사량과 기온과의 관계분석

Hargreaves 공식은 Eq. (3)과 같이 표현되는 RS 및 RA, TD 관계를 이용하여 도출되었음을 살펴본 바 있다. 그러나 우리나라에서도 이와 같은 관계가 동일하게 나타나는 가에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 기상청 20개 지점에 대해 수집된 일사량 등 기상자료를 이용하여 일사량-기온 관계분석을 수행하였다. 20개 지점중 내륙에 위치하고 있는 지점과 해안에 위치하고 있는 지점을 구분한 후 분석을 수행하였으며, Fig. 1은 각각 내륙과 해안에 대한 태양복사량 및 기온과의 관계를 도시하여 나타낸 것이다.

우리나라의 자료를 이용하여 태양복사열과 기온과의 관계를 분석한 후 Eq. (3)과 같은 형태의 관계식을 도출하였다. 그 결과, 내륙지역과 해안지역 모두 TD의 계수에 해당하는 값이 기존 관계식 값인 0.50보다 약간 큰 값(0.58)으로 나타나고 있음을 확인하였다. 따라서 우리나라의 기후 특성을 고려하여 Hargreaves 공식을 이용한 기준증발산량을 산정하기 위해서는 기존 공식의 TD 계수에 해당하는 0.50보다 큰 값을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 이에 따라 수정된 Hargreaves 공식은 Eq. (6)과 같다.

$$ET_0 = K_{ET} \times RA \times (TC + 17.8) \times TD^{0.58}$$
(6)

4.2 Hargreaves 공식의 매개변수 (K_{ET}) 최적화

기상청 71개 지점의 기상자료를 수집하여 PM 방법에 의한 기준증발산량을 산정하였다. PM 방법에 의해 산정된 결과를 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수(K_{ET}) 최적 화를 수행하였으며, Table 2는 71개 지점을 내륙지역과 해안지역으로 구분하고 지점별 K_{ET} 최적화 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 결과에 대한 비교를 통해 해안지역에 위치한 지점의 K_{ET} 는 내륙지역에 위치한 지점에 비해 상대적으로 큰 값이 산정되었음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Hargreaves et al. (1985), Vanderlinden et al. (2004),

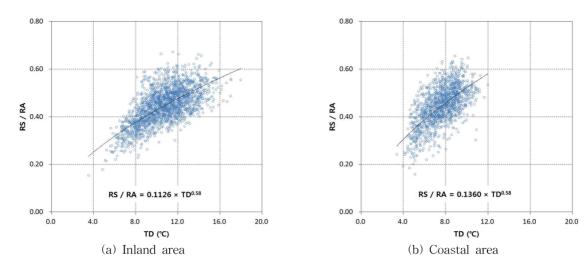


Fig. 1. Relationship with Radiation and Temperature

Table 2. Result of K_{ET} optimization in Each Weather Station

Area	Code	Name	K_{ET}	Code	Name	K_{ET}	Code	Name	K_{ET}
	95	Cheorwon	0.00154	146	Jeonju	0.00155	247	Namwon	0.00142
	98	Dongducheon	0.00145	156	Gwangju	0.00169	248	Jangsu	0.00150
	100	Daegwallyeong	0.00188	192	Jinju	0.00155	256	Suncheon	0.00140
	101	Chuncheon	0.00150	202	Yangpyeong	0.00147	260	Jangheung	0.00154
	108	Seoul	0.00185	203	Icheon	0.00152	261	Haenam	0.00170
	114	Wonju	0.00149	211	Inje	0.00158	271	Bongwhoa	0.00138
	119	Suwon	0.00161	212	Hongcheon	0.00138	272	Yeongju	0.00166
Inland	121	Yeongwol	0.00148	216	Taebaek	0.00162	273	Mungyeong	0.00162
	127	Chungju	0.00151	221	Jecheon	0.00148	278	Uiseong	0.00137
	129	Seosan	0.00165	226	Boeun	0.00150	279	Gumi	0.00157
	131	Cheongju	0.00161	232	Cheonan	0.00157	281	Yeongcheon	0.00156
	133	Daejeon	0.00161	236	Buyeo	0.00154	284	Geochang	0.00148
	135	Chupungnyeong	0.00169	238	Geumsan	0.00147	285	Hapcheon	0.00150
	136	Andong	0.00154	244	Imsil	0.00147	288	Miryang	0.00151
	143	Daegu	0.00184	245	Jeongeup	0.00149	289	Sancheong	0.00151
	90	Sokcho	0.00210	152	Ulsan	0.00177	189	Seogwipo	0.00221
	102	Baengnyeongdo	0.00236	155	Changwon	0.00192	201	Ganghwa	0.00169
	105	Gangneung	0.00202	159	Busan	0.00226	235	Boryeong	0.00170
	106	Donghae	0.00199	162	Tongyeong	0.00196	243	Buan	0.00164
Coastal	112	Incheon	0.00204	165	Mokpo	0.00202	262	Goheung	0.00161
	115	Ulleungdo	0.00221	168	Yoesu	0.00237	277	Yeongdeok	0.00185
	130	Uljin	0.00208	170	Wando	0.00201	294	Geoje	0.00183
	138	Pohang	0.00201	184	Jeju	0.00223	295	Namhae	0.00178
	140	Gunsan	0.00193	188	Seongsan	0.00197			

Gavilan et al. (2006), Lee and Park (2008) 등 과거 관련 연구에서도 동일하게 나타난 결과이며, Hargreaves et al. (1985)은 풍속으로 인한 영향이 상대적으로 크게 나타나는 해안지역에서 매개변수가 크게 산정된다는 연구결과를 제 시한 바 있다.

71개 지점에 대해 최적화된 매개변수(K_{ET})를 고려하고 수정 공식(Eq. (6))을 이용하여 기준증발산량을 산정한 후기존 Hargreaves 공식 및 PM 방법에 의한 결과와 비교하였다. 결과의 비교는 내륙(철원 등 45개 지점)과 해안지역 (속초 등 26개 지점)으로 구분하여 수행하였으며, 관측개시 이후 2008년까지 매개변수 최적화 과정에 고려된 기간을 Calibration 기간으로, $2009\sim2011년까지의$ 기간을 Verification 기간으로 구분하여 수행하였다. Fig. 2는 내륙지역에 위치하고 있는 철원 지점에 대한 Calibration 기간과 Verification 기간의 월별 평균 기준증발산량 산정결과를 비교하여 도시한 것이며, Fig. 3은 해안지역의 거제 지점에 대한 Calibration 및 Verification 기간의 연도별 기준증발산량을 도시하여 나타낸 것이다. 철원 및 거

제 지점의 결과를 도시한 이유는 두 지점에서 나타나는 정확도 개선 효과가 내륙 및 해안지역의 평균과 유사한 범위로 나타나는 것으로 검토되었기 때문이다. 이와 같이 내륙 및 해안지역에 위치한 대부분의 지점에서 K_{ET} 최적화 및 수정 공식을 적용하여 산정된 기준증발산량이 PM 방법에 의한 결과와 유사한 값을 나타내고 있었으며, 특히 철원과 같이 내륙지역에 위치한 지점에서 정확도 개선효과를 명확하게 확인할 수 있었다.

지점별 정확도 평가 결과를 보다 정량적으로 판단하기 위해 NSE 계수와 RMSE를 지점별로 산정하여 비교하였으며, Table 3과 4는 내륙 및 해안지역에 위치한 지점에 대한 정확도 평가 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 또한 정확도 평가 결과를 보다 쉽게 파악할 수 있도록 x축에 RMSE를, y축에 NSE를 나타낸 그림(Figs. 4 and 5)을 작성하여 제시하였다. Figs. 4 and 5에서 가장 좋은 결과는 RMSE가 0의 값을 갖고 NSE가 1의 값을 갖는 지점이 되며, 이에 근접할수록 좋은 결과를 주는 것으로 판단할 수 있다.

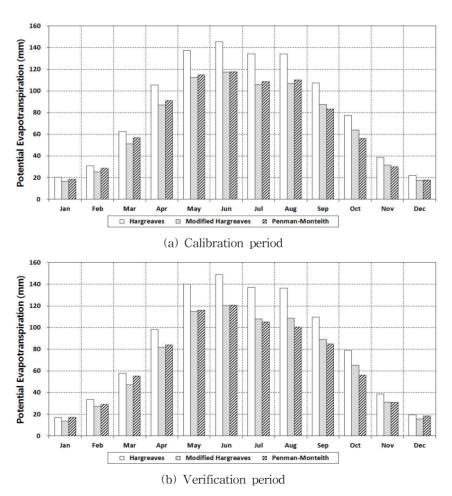


Fig. 2. Monthly Reference Evapotranspiration at Cheorwon

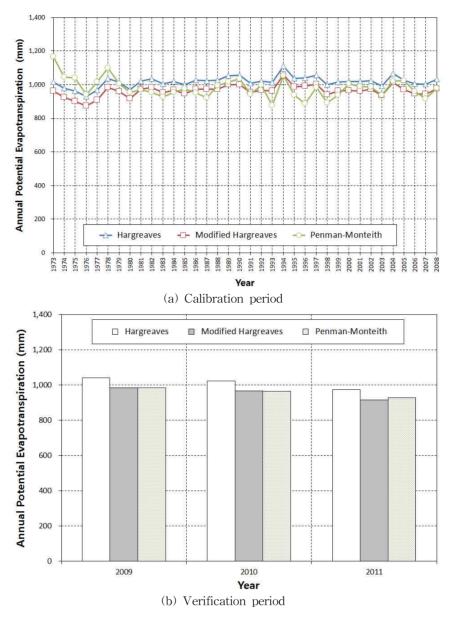


Fig. 3. Annual Reference Evapotranspiration at Geoje

이러한 기준을 고려하여 Calibration 기간에 대한 지점 별 결과를 살펴보면(Fig. 4), 본 연구에서 제시한 수정 공식과 K_{ET} 최적화 결과를 고려하여 산정된 결과가 기존 Hargreaves 공식에 의한 결과보다 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 내륙지역의 경우에는 기존 Hargreaves 공식에 의한 결과가 NSE $0.370\sim0.932$, RMSE $10.441\sim29.556$ 의 범위로 나타나고 있었으나 본 연구에서 수정 제안한 공식에서는 NSE $0.889\sim0.980$, RMSE $5.408\sim11.159$ 의 범위를 나타내고 있어 정확도가 크게 개선되었음을 명확하게 판단할 수 있다. 해안지역의 경우에도 기존 공식에 의한 결과에서는 NSE $0.602\sim0.940$, RMSE $8.284\sim$

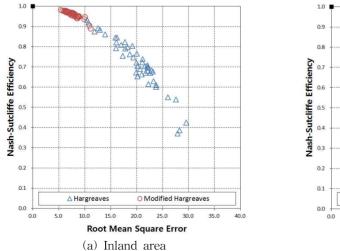
19.819의 범위를 나타내고 있으나 본 연구의 결과에서는 NSE 0.667~0.964, RMSE 6.873~18.202로 나타나 일부 정확도가 향상된 효과를 확인할 수 있었다. 매개변수 최적화 과정에 고려되지 않은 2009~2011년에 대해 기준증 발산량을 산정하고 정확도 평가를 수행한 결과(Fig. 5), Calibration 기간에서 확인한 바와 같이 본 연구의 결과가 기존 공식에 비해 정확한 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다. 기존 공식의 경우 내륙지역에서는 NSE의 범위가 0.168~0.927로 나타나고 있으며, RMSE의 경우에는 9.787~31.845로 나타나고 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 공식의 결과에서는 NSE는 0.877~0.988, RMSE는 4.067~

Table 3. Accuracy Assessment Results in Each Weather Station (inland area)

W	Weather station		Cal	ibration		Verification			
vve			Hargreaves		Modified Hargreaves		Hargreaves		Modified Hargreaves
Code	Name	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
095	Cheorwon	0.762	18.713	0.973	6.337	0.691	20.666	0.980	5.256
098	Dongducheon	0.609	23.743	0.972	6.352	0.650	21.980	0.985	4.491
100	Daegwallyeong	0.874	11.860	0.889	11.159	0.878	11.723	0.904	10.400
101	Chuncheon	0.703	21.587	0.977	6.064	0.633	22.662	0.988	4.067
108	Seoul	0.919	10.718	0.945	8.813	0.927	10.046	0.920	10.483
114	Wonju	0.707	22.077	0.960	8.139	0.622	22.658	0.973	6.009
119	Suwon	0.819	16.104	0.969	6.617	0.826	15.430	0.984	4.735
121	Yeongwol	0.600	23.773	0.970	6.458	0.529	25.618	0.977	5.723
127	Chungju	0.737	21.153	0.967	7.485	0.701	20.641	0.981	5.200
129	Seosan	0.859	13.948	0.976	5.708	0.921	9.787	0.961	6.898
131	Cheongju	0.844	16.213	0.977	6.274	0.800	17.256	0.988	4.236
133	Daejeon	0.844	15.881	0.973	6.644	0.900	12.009	0.972	6.309
135	Chupungnyeong	0.754	17.300	0.902	10.925	0.754	17.146	0.903	10.758
136	Andong	0.688	20.676	0.967	6.681	0.633	22.025	0.963	6.962
143	Daegu	0.932	10.441	0.951	8.852	0.883	13.012	0.927	10.265
146	Jeonju	0.746	19.349	0.980	5.408	0.785	17.701	0.974	6.129
156	Gwangju	0.882	12.962	0.975	6.010	0.851	14.144	0.980	5.126
192	Jinju	0.671	19.911	0.955	7.372	0.587	21.606	0.978	5.023
202	Yangpyeong	0.675	23.121	0.968	7.245	0.560	23.760	0.980	5.076
203	Icheon	0.764	20.038	0.964	7.803	0.590	23.358	0.970	6.283
211	Inje	0.796	18.253	0.968	7.211	0.695	19.627	0.969	6.223
212	Hongcheon	0.537	27.589	0.975	6.445	0.489	27.077	0.987	4.323
216	Taebaek	0.791	16.006	0.940	8.603	0.775	16.334	0.954	7.347
221	Jecheon	0.695	22.128	0.962	7.791	0.598	23.015	0.980	5.168
226	Boeun	0.722	21.071	0.964	7.561	0.575	23.545	0.979	5.218
232	Cheonan	0.822	17.776	0.967	7.691	0.769	18.017	0.974	5.998
236	Buyeo	0.803	19.154	0.946	10.031	0.634	22.109	0.984	4.648
238	Geumsan	0.682	22.816	0.962	7.849	0.496	26.355	0.980	5.271
244	Imsil	0.670	22.636	0.965	7.360	0.522	25.151	0.981	5.074
245	Jeongeup	0.699	22.133	0.971	6.860	0.737	19.465	0.973	6.187
247	Namwon	0.549	26.022	0.966	7.125	0.517	25.081	0.979	5.204
248	Jangsu	0.662	20.941	0.968	6.467	0.610	22.016	0.971	5.993
256	Suncheon	0.370	27.893	0.952	7.710	0.285	28.043	0.968	5.923
260	Jangheung	0.652	20.186	0.939	8.483	0.748	15.494	0.918	8.823
261	Haenam	0.890	12.544	0.947	8.707	0.782	15.551	0.965	6.207
271	Bongwhoa	0.386	28.238	0.962	7.059	0.168	31.099	0.962	6.656
272	Yeongju	0.807	17.032	0.935	9.906	0.694	19.207	0.877	12.198
273	Mungyeong	0.789	17.832	0.950	8.721	0.637	20.668	0.906	10.523
278	Uiseong	0.423	29.556	0.961	7.663	0.242	31.845	0.978	5.481
279	Gumi	0.720	19.999	0.959	7.644	0.719	19.618	0.939	9.118
281	Yeongcheon	0.703	20.179	0.949	8.406	0.662	20.077	0.938	8.581
284	Geochang	0.627	23.227	0.957	7.888	0.417	25.967	0.951	7.507
285	Hapcheon	0.679	22.143	0.948	8.951	0.574	24.423	0.980	5.265
288	Miryang	0.669	21.691	0.952	8.295	0.657	21.261	0.973	5.908
289	Sancheong	0.614	22.237	0.949	8.059	0.513	22.144	0.895	10.278

Table 4. Accuracy Assessment Results in Each Weather Station (coastal area)

Weathe rstation			Cal	ibration		Verification			
		Hargreaves		Modified Hargreaves		Hargreaves		Modified Hargreaves	
Code	Name	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
090	Sokcho	0.791	13.698	0.807	13.158	0.852	11.713	0.833	12.459
102	Baengnyeongdo	0.605	19.819	0.667	18.202	0.670	18.936	0.790	15.098
105	Gangneung	0.783	14.807	0.785	14.758	0.752	15.143	0.760	14.894
106	Donghae	0.773	13.323	0.784	12.998	0.824	12.491	0.843	11.813
112	Incheon	0.920	10.109	0.918	10.233	0.883	11.473	0.913	9.849
115	Ulleungdo	0.850	12.348	0.896	10.300	0.756	16.160	0.877	11.474
130	Uljin	0.785	13.909	0.810	13.071	0.863	10.577	0.827	11.871
138	Pohang	0.902	10.581	0.904	10.472	0.940	8.267	0.949	7.594
140	Gunsan	0.940	8.923	0.943	8.734	0.906	10.929	0.913	10.495
152	Ulsan	0.870	11.773	0.939	8.097	0.881	11.537	0.949	7.542
155	Changwon	0.935	8.284	0.943	7.751	0.909	9.368	0.926	8.456
159	Busan	0.696	16.030	0.842	11.536	0.667	16.608	0.858	10.843
162	Tongyeong	0.922	8.528	0.926	8.327	0.910	8.284	0.925	7.542
165	Mokpo	0.911	10.293	0.921	9.718	0.940	7.794	0.914	9.286
168	Yoesu	0.602	18.937	0.817	12.862	0.186	23.811	0.716	14.075
170	Wando	0.874	11.273	0.862	11.778	0.853	11.947	0.822	13.114
184	Jeju	0.804	14.627	0.878	11.511	0.685	18.481	0.862	12.222
188	Seongsan	0.896	10.034	0.891	10.285	0.830	12.442	0.831	12.422
189	Seogwipo	0.811	12.616	0.918	8.290	0.797	13.310	0.920	8.359
201	Ganghwa	0.895	12.747	0.964	7.412	0.850	13.367	0.969	6.056
235	Boryeong	0.903	12.273	0.954	8.501	0.883	11.364	0.984	4.205
243	Buan	0.883	14.158	0.962	8.059	0.861	13.991	0.988	4.106
262	Goheung	0.813	16.170	0.943	8.916	0.671	17.277	0.950	6.706
277	Yeongdeok	0.895	11.484	0.911	10.564	0.747	15.977	0.775	15.048
294	Geoje	0.932	9.436	0.935	9.248	0.912	9.285	0.959	6.315
295	Namhae	0.924	9.921	0.964	6.873	0.840	12.872	0.953	6.949



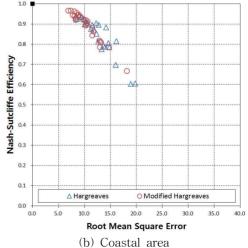


Fig. 4. Accuracy Assessment in Calibration Period

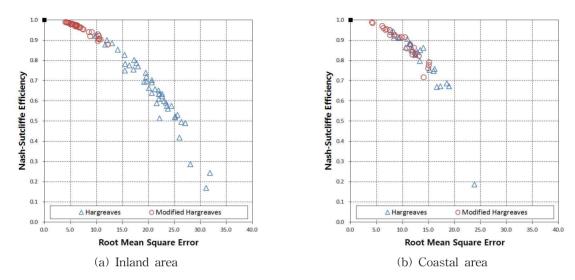


Fig. 5. Accuracy Assessment in Verification Period

12.198의 범위를 나타내어 기존 공식에 비해 크게 개선된 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 해안지역의 경우에 도 기존 공식은 NSE 0.186~0.940, RMSE 7.794~23.811 의 범위를 나타내고 있으나 본 연구의 결과에서는 NSE 0.716~0.988, RMSE 4.106~15.098로 나타나고 있어 내륙 지역에서와 같은 개선 효과는 아니지만 PM 방법에 의해 산정된 기준증발산량에 보다 근접된 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

4.3 매개변수 (K_{ET}) 와 기온과의 관계분석

앞서 71개 지점별로 도출된 최적 매개변수 (K_{FT}) 를 이용 하여 기온에 대한 정보(평균기온, 평균 일교차)와의 관계 분석을 수행하였다. 이와 같은 관계분석은 Vanderlinden et al. (2004)이 수행한 바 있으며, 국내에서도 Lee and Park (2008)에 의해 수행된 바 있다. 71개 지점에 대한 결 과에서도 알 수 있는 바와 같이 Hargreaves 공식의 매개 변수는 지점에 따라 다르게 나타나고 있으며, 일률적인 값으로 제시하기는 어려운 상황이다. 따라서 기온에 대한 정보를 추출하고 이를 바탕으로 Hargreaves 공식의 매개 변수 (K_{ET}) 를 추정할 수 있는 관계식을 제시할 경우 기온 자료만이 제한적으로 존재하는 유역 또는 지역에서도 기 준증발산량을 산정할 수 있으며, 각종 수자원계획이나 관 개계획 수립 시 유용하게 활용될 수 있다. 이에 본 연구에 서는 Vanderlinden et al. (2004) 및 Lee and Park (2008) 의 연구에서 적용된 방법론을 이용하여 K_{ET} 와 기온과의 관계식을 도출하기 위한 분석을 수행하였으며, Fig. 6과 같이 71개 지점에 대한 평균기온과 일교차(TD) 비율의 기간 평균을 산정하고 $K_{\!F\!T}$ 최적화 값과 함께 도시하여

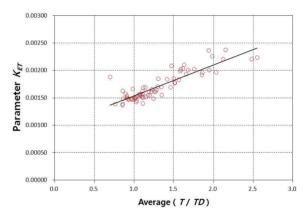


Fig. 6. Relationship between the Optimized Hargreaves Parameter and Temperature

검토하였다. Fig. 6과 같은 관계를 갖는 K_{ET} 와 기온에 대한 관계식은 Eq. (7)과 같이 결정되었다.

$$K_{ET} = 0.0006 \frac{\overline{T}}{\overline{TD}} + 0.001 , \quad R^2 = 0.78$$
 (7)

기온자료를 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수 (K_{ET}) 를 추정하기 위한 관계식의 검증을 위해 문산, 상주, 진도 등 기상청 3개 지점에 적용하고 그 결과를 검토하였다. 3개 지점의 기상자료를 수집한 후 PM 방법, 기존 Hargreaves 공식, Eqs. (6) and (7)을 이용하여 산정된 기준증발산량을 비교하였으며, 3개 지점 중 문산 지점에 대해 $2002\sim2011$ 년까지 산정된 일별 기준증발산량을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 x축에 PM 방법에 의한 산정 결과를 나타내고 y축에 기존 Hargreaves 공식 및 본 연구에서 수정 제안한 방법에 의한 결과를 나타낸 것으로 점

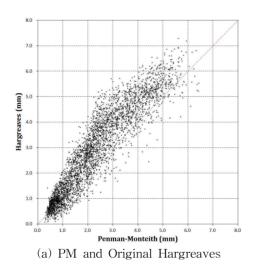
선으로 표시된 1:1 직선에 근접할수록 PM 방법과 유사한 결과를 나타내고 있다고 판단할 수 있다. Fig. 7의 비교 결과를 통해 본 연구에서 제안한 방법이 기존 Hargreaves 공식에 의한 결과보다 PM 방법에 근접한 결과를 나타내고 있으며, 일별 기준증발산량이 많은 경우의 정확도가 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

정확도 평가 결과를 보다 정량적으로 판단할 수 있도록 NSE와 RMSE를 산정하여 비교하였다. Table 5는 3개 지점에 대해 산정된 지표를 나타내고 있으며, 3개 지점 모두 본 연구의 방법을 적용하였을 경우의 결과가 기존 공식에 의한 결과보다 좋은 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다. Table 5의 결과에서 문산과 상주 지점의 경우정확도 개선 효과가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 3개 지점별로 NSE는 각각 54%(문산), 46%(상주), 3%(진도)의 정확도 개선효과를 확인할 수 있고 RMSE는 각각 68%(문산), 35%(상주), 7%(진도) 개선된 것으로 나타나고 있다. 따라서 기상 관측자료의 한계로 인해 PM 방법을 적용하기 어려운 경우 본 연구에서 제시한 Eq. (6)과 (7)을 함께이용함으로써 기준증발산량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이용 가능한 기상 관측자료가 제한적인 상황에서 기준증발산량을 산정할 수 있는 경험식으로 이 용되고 있는 Hargreaves 공식에 대한 매개변수 지역화 관련 연구를 수행하였다. 이를 위해 우리나라의 일사량 관측자료를 이용하여 태양복사열과 기온과의 관계를 분 석하였으며, 이에 대한 수정 공식을 제안하였다. 제안된 공 식을 고려하여 수정 Hargreaves 공식을 제시하였으며, 기 상청 71개 지점에 대해 PM 방법에 의한 기준증발산량 산 정 결과를 이용하여 지점별로 공식의 매개변수 (K_{ET}) 를 최 적화하였다. 지점별로 최적화된 K_{ET} 와 본 연구에서 제시 한 수정 공식을 이용하여 기준증발산량을 산정한 후 PM 방법 및 기존 Hargreaves 공식에 의한 결과와 비교하였으 며, 정확도 평가를 수행하였다. 마지막으로 71개 지점에 대 해 최적화된 K_{FT} 와 지점별 기온 정보(평균기온, 평균 일 교차)에 대한 관계식을 도출하여 제시하였으며, 문산 등 3 개 지점에 적용하여 관계식의 적용성을 평가하였다.

먼저 기상청 20개 지점에 대해 관측 일사량과 기온의 관계를 분석한 결과, 기존 Hargreaves 공식에서 이용하고 있는 TD(최고기온과 최저기온의 차이)의 계수에 해당하



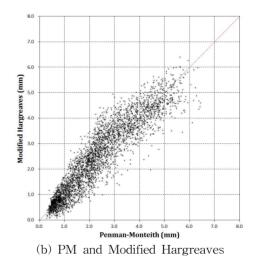


Fig. 7. Comparison of Daily Reference Evapotranspiration in Munsan station

Table 5. Accuracy Assessment Results in 3 Weather Stations

Weather station		Hargr	eaves	Modified Hargreaves		
Code	Name	NSE	RMSE	NSE	RMSE	
099	Munsan	0.626	21.643	0.961	6.985	
137	Sangju	0.553	22.538	0.808	14.762	
175	Jindo	0.811	13.118	0.838	12.148	

는 0.50보다 약간 큰 값이 산정되었다. 본 연구의 분석을 통해 제시된 계수는 0.58에 해당하며, 이러한 결과는 기존 Hargreaves 공식을 그대로 적용할 경우 태양복사열과 기 온과의 관계를 적절히 반영할 수 없음을 의미하는 결과라 할 수 있다. 두 번째로 기상청 71개 지점에 대해 K_{ET} 에 대 한 최적화를 수행한 결과. 기존 Hargreaves 공식의 매개 변수 값인 0.00230과 다른 결과를 보이고 있었다. 내륙지 역에 위치한 지점에서는 $0.00137 \sim 0.00188$ 의 범위로 K_{ET} 값이 나타나고 있었으며, 해안지역의 경우에는 0.00161~ 0.00237의 범위로 나타나고 있었다. 이러한 결과는 풍속이 상대적으로 강하게 나타나는 해안지역에서 K_{ET} 가 크게 나타난다는 과거 연구결과와 동일한 결과를 나타내고 있 으며, 기존 Hargreaves 공식을 그대로 적용할 경우 우리 나라의 내륙지역에서는 정확한 기준증발산량 산정이 어 려울 수 있음을 의미하는 결과라 할 수 있다. 71개 지점에 대한 정확도 평가에서도 내륙지역에 위치한 지점의 정확 도가 상대적으로 크게 개선되는 결과를 확인할 수 있었으 며, 해안지역에서는 내륙지역에 비해 정확도 개선 정도가 작지만 본 연구의 결과가 기존 공식에 비해 PM 방법에 근접한 결과를 주고 있음을 확인할 수 있었다. 마지막으 로 71개 지점에 대해 최적화된 K_{ET} 와 기온자료를 이용하 여 도출된 관계식의 적용성을 검토한 결과, 문산 등 3개 지점 모두 본 연구에서 제시한 수정 공식 및 K_{ET} -기온 관 계식을 이용한 결과가 기존 Hargreaves 공식에 의한 결 과보다 개선된 기준증발산량 산정 결과를 나타나고 있음 을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 제시된 수정 공식 및 K_{ET} -기온 관계식은 기상 관측자료의 제한으로 PM 방 법을 적용하기 어려운 조건에서 기준증발산량 산정을 위 한 방법으로 이용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 우리나라의 기후 특성을 고려할 수 있도록 이용 가능한 기상자료가 존재하는 모든 지점을 분석 대상 지점으로 이용하였다. 그러나 일사량 관측자료의 경우에는 이용할 수 있는 자료가 존재하는 지점이 20개 지점으로 제한적이며, 향후 이에 대한 추가 연구를 통해 보다 명확한 태양복사열-기온 관계를 도출할 수 있도록 노력할 필요가 있다. 이와 함께 Pan 증발량 관측자료의 비교를 통해기준증발산량 산정 결과와 실제 증발량 관측자료의 변동패턴을 검토할 필요가 있으며, 이러한 과정을 통해우리나라의 기후 특성을 반영하고 보다 적은 기상자료로 쉽게이용할 수 있는 기준증발산량 산정 경험식의 제시가 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 각종 수자원계획이나 관개계획 등 한정된 수자원의 효과적인 활용 및 관리를 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지 원 강화사업(CATER 2012-3090)의 지원으로 수행되었습 니다. 또한 일사량 등 기상 관측자료를 제공해주신 기상 청 기후예측과에 감사를 드립니다.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration.* FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L.S. (1994). "An update for the definition of the reference evapotranspiration." *ICID Bulletin, New Delhi*, Vol. 43, No. 2, pp. 1–34.
- Chae, H.S., Kim, S.J., and Jung, K.S. (1999). "GRID-based Daily Evapotranspiration Prediction Model (GRIDET)." Journal of Korean Water Resources Association, KWRA, Vol. 32, No. 6, pp. 721–730.
- Droogers, P., and Allen, R.G. (2002). "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, pp. 33–45.
- Gavilan, P., Lorite, I.J., Tornero, S., and Berengena, J. (2006). "Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment." *Agricultural Water Management*, Vol. 81, pp. 257–281.
- Grismer, M.E., Orang, M., Snyder, R., and Matyac, R. (2002). "Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 180–184.
- Hargreaves, G.H. (1994). "Defining and Using Reference
 Evapotranspiration." Journal of Irrigation and Drainage
 Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 1132–1139.
- Hargreaves, G.H., and Allen, R.G. (2003). "History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 53–63.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1982). "Estimating potential evapotranspiration." *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 108,

- No. IR3, pp. 223-230.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). "Reference Crop Evapotranspiration from Temperature." *Applied Engineering in Agriculture*, ASAE, Vol. 1, No. 2, pp. 96–99.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. (1985).
 "Irrigation Water Requirements for Senegal River Basin." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 265–275.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (1990).
 "Evapotranspiration and irrigation water requirements." ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70, p. 360.
- Lee, K.H., and Park, J.H. (2008). "Calibration of the Hargreaves Equation for the Reference Evapotranspiration Estimation on a Nation-Wide Scale." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 6B, pp. 675–681.
- Lee, K.H., Cho, H.Y., and Oh, N.S. (2008). "Calibration and Validation of the Hargreaves Equation for the Reference Evapotranspiration Estimation in Gyeonggi Bay Watershed." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 4, pp. 413–422.
- McVicker, R. (1982). The Effects of Model Complexity on the Predictive Accuracy of Soil Moisture Accounting Models. in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Utah State University, Utah, USA.
- New, M., Lister, D., Hulme, M., and Makin, I. (2002). "A high-resolution data set of surface climate over global land areas." *Climate Research*, Vol. 21, pp. 1–25.
- Oh, N.S., and Lee, K.H. (2004). "Caluculation of Evapo-

- transpiration Based on Daily Temperature." *Journal* of Korean Water Resources Association, KWRA, Vol. 37, No. 6, pp. 479–485.
- Oh, N.S., Lee, K.H., and Ko, Y.C. (2002). "Capability of Evapotranspiration Estimation with Short Field Data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 22, No. 6-B, pp. 795-801.
- Rim, C.S. (2008). "Comparison of Evapotranspiration Estimation Approaches Considering Grass Reference Crop." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 2, pp. 212–228.
- Samani, Z. (2000). "Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration using Minimum Climatological Data." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 265–267.
- Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L., Pereira, L.S., Perrier, A., and Pruitt, W.O. (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Land and Water Development Division, United Nations Food and Agriculture Service, Rome.
- Temesgen, B., Allen, R.G., and Jensen, D.T. (1999). "Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 26–33.
- Vanderlinden, K., Giraldez, J.V., and Meirvenne, M.V. (2004). "Assessing Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in Southern Spain." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 184–191.

논문번호: 13-056	접수: 2013.07.03
수정일자: 2013.07.24	심사완료: 2013.07.24