

우리나라 기준 증발산량 산정을 위한 Hargreaves 계수 산정

Calibration of the Hargreaves Equation for the Reference Evapotranspiration Estimation on a Nation-Wide Scale

이길하* · 박재현**

Lee, Khil-Ha · Park, Jae-Hyeon

Abstract

In this study, the daily-based reference evapotranspiration was evaluated with Hargreaves equation at the 23 meteorological stations for the time period of 1997-2006. The Hargreaves coefficient was self-calibrated to give the best fit with Penman-Monteith evapotranspiration, being regarded as a reference. On the basis of the estimated parameter set, a generalized regression was conducted to estimate the Hargreaves evapotranspiration by just using temperature data. This study will contribute to water resources planning, irrigation schedule, and environmental management.

Keywords : reference evapotranspiration, hargreaves equation, penman-monteith equation

요 지

기상자료가 부족하거나 결측인 지역의 기준 증발산량 산정을 위해서는 Hargreaves 공식의 매개변수 추정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 우리나라 전역에 걸쳐 1997년-2006년 기상자료를 바탕으로 Hargreaves 공식을 이용하여 기준 증발산량(이하 ETo)을 산정하였다. 각 지점별로 PM공식에 의해 산정한 값을 증발산량의 정해로 가정하여 Hargreaves 매개변수를 지점별로 추정하였다. 최소의 오차가 발생하도록 Hargreaves 계수를 조정된 후 Root Mean Square Error와 Nash Sutcliffe Coefficient of Efficiency 분석을 통하여 추정효율이 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 추정된 매개변수를 바탕으로 기존 자료만의 의한 Hargreaves 증발산량을 추정할 수 있도록 일반화된 하나의 회귀직선을 도출하여 보았다. 온도-Hargreaves 계수의 선형 상관관계를 이용한 Hargreaves 계수의 일반화에서는 개선의 여지가 있지만 만족스러운 결과를 보여 주는 것으로 나타났다. 이 연구결과는 우리나라의 수자원, 관개분야 및 환경 운용에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기준 증발산량, Hargreaves 공식, Penman-Monteith 공식

1. 서 론

증발산량은 이상적인 조건에서 산정한 잠재증발산량과 기준 증발산량이 있다. 잠재증발산량은 주어진 기상조건에서의 단위면적당, 단위시간당 자유 수면에서의 가능한 증발량으로, 유역에서는 토양함수가 포화된 상태에서의 가능한 증발량으로 간주할 수 있다. 반면, 기준 증발산량은 특정조건(작물높이=0.12 m, Albedo=0.23, 표면저항=69 s/m \approx 70 m/s, Grass 식생 표면)에서 충분한 수분이 공급되는 경우의 가능한 증발산량으로(Maidment, 1993; Allen 등, 1994) 최근에는 표준량으로 기준 증발산량을 이용하는 것이 연구자들의 추세이다.

기준 증발산량(reference evapotranspiration, 이하 ETo)을 산정하는 방법으로는 물리적인 이론에 바탕을 두고 산정하는 FAO 56 Penman-Monteith(FAO 56 PM) 공식이 정확성이나 일반성에서 가장 신뢰할 만하나 FAO 56 PM공식은 태양복사열, 풍속, 온도, 습도와 같이 다양하면서도 장기간

축적된 신뢰할 만한 기상자료를 필요로 한다. 그러나 우리나라의 경우 기상대를 제외한 관측소 및 자동관측소 등에서는 태양복사열 관측 자료가 미흡하기 때문에 PM 공식을 사용하기에는 현실적으로 곤란하다. 이는 전 세계 대부분의 국가에서 공통적으로 안고 있는 문제점으로 이를 극복하기 위해서 상대적으로 적은 수의 기상자료를 토대로 신뢰할 만한 정확성을 가지는 간단한 경험식에 관심을 기울여 많은 연구가 이루어져 왔다. 다시 말하면, 보다 간단하고 기본적인 기상정보를 이용하여 개발된 경험식이 기상자료가 다소 부족한 지역의 수자원개발 및 관개 사업 등에 필요한 ETo를 산정하는데 필요하다. 이러한 요구에 부응하여 온도나 복사열 자료를 이용한 다양한 증발산량 산정 공식이 개발되어 왔다(Hargreaves and Samani, 1985; Hargreaves, 1975; Priestly and Taylor, 1972; Jensen 등, 1970; Jensen, 1966; Jensen and Haise, 1963).

특정지역에 적합한 공식 선정은 보통 시간 규모, 지역의

*한국해양연구원 연안개발연구본부 연구원 (E-mail : khil_ha@yahoo.com)

**정회원 · 교신저자 · 인제대학교 토목공학과 건설기술연구소 부교수 (E-mail : jh-park@inje.ac.kr)

건조 상태, 장비의 가격, 운영과 유지관리의 난이도, 기상 자료의 기용정도, 계산의 용이 등에 따라 결정하는데, 기상 자료의 품질에 신뢰가 부족하거나 지속적인 관측이 미흡한 지역에서 ETo를 계산할 때 단지 온도로 계산함에도 불구하고 적정 수준의 정확도를 제공해 주는 Hargreaves 공식(Hargreaves and Samani, 1985)이 추천되어 왔다(Hargreaves & Allen, 2003). 특히 미국 및 유럽의 일부 지역 같이 우리나라와 같은 온대지역에서는 온도와 복사열이 증발산량의 80% 정도를 설명해 줄 수 있으므로 Hargreaves 공식이 적합하리라 사료된다(Vanderlinden 등, 2004; Samani, 2000; Priestly and Taylor, 1972).

Hargreaves 증발산량은 지역의 기상인자의 영향이 반영된 일기온의 차이나 변화에 의해서 영향을 받기 때문에 대상지역의 대기이동에 따라서 정확도가 다를 수 있다. 따라서 Hargreaves 공식을 이용하여 증발산량을 계산할 때에는 지역적 기후 특성을 고려하여 매개변수를 지역특성에 맞게 조정할 필요가 있는데 지역특성에 적합한 매개변수 조정은 다양한 기후조건에서 진행되어 왔다(Irmak 등, 2003; Galvilian 등, 2006).

본 연구에서는 앞선 연구(채효석 등, 1999; 임창수, 2007)에 이어 중앙 기상대에서 우리나라 전역(23개 지점)에 걸쳐 관측한 1997년-2006년 기상자료를 바탕으로 FAO 56 PM 공식으로 계산한 ETo를 정해로 가정하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였다. ETo를 산정하는 연구에서 가장 어려운 부분은 정해를 얻기가 어렵다는 것인데, PM 공식이 완전한 물리이론(Fully-physical Concept)을 바탕으로 유도된 공식이기 때문에 PM 공식으로부터 얻은 증발산량을 정해로 가정하는 일반적인 방법(Allen 등, 1994; Allen 등, 1998; Gavilan, 2007)을 사용하여 Hargreaves 매개변수를 조정하였다. 매개변수를 결정하기 위하여 최적화 기법이 이용되었으며 먼저 23개 연구 대상 지점 중 20개 지점의 자료를 이용하여 Hargreaves 매개변수를 찾은 후 나머지 3개 지점을 이용하여 검증(validation)에 이용하였다. 다음은 23개 전체 연구대상 지점에 대하여 Hargreaves 매개변수의 일반화를 이끌어내기 위해서 온도와 Hargreaves 매개변수의 선형관계를 유도해 보았다.

2. 기준 증발산량(ETo) 산정공식

2.1 Penman-Monteith 공식

ETo의 실제 관측은 기술적으로나 경제적으로 어려움으로 인해 ETo의 정해를 얻기가 곤란하므로 PM 공식을 표준으로 사용하는 방법을 사용한다(Allen 등, 1994; Allen 등, 1998; Galvilian 등, 2006). 본 연구에서는 다음과 같은 FAO 56 PM 공식을 정해로 사용하였다.

$$ET_{0PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

ET_{0PM} = PAO-56PM 공식으로 산정된 기준 증발산량(mm/day), Δ =포화수증기압 산정공식의 기울기($KPa^\circ C^{-1}$), R_n =이용가능복사열($MJm^{-2} day^{-1}$), G =토양열 플럭스($MJm^{-2} day^{-1}$), g =psychometric상수($KPa^\circ C^{-1}$), T =일 평균 온도($^\circ C$), U_2 =지상으로부터 2 m 높이에서의 풍속 (ms^{-1}), 그리고 $(e_s - e_a)$ 이다.

2.2 Hargreaves 공식

Hargreaves 공식(Hargreaves, 1975; Hargreaves and Samani, 1982; Hargreaves and Samani, 1985)은 원래 농업용수 운용 목적으로 만들어진 증발산량 산정 공식이나 온도에 기초한 증발산량 산정 공식 중 비교적 정확도가 우수한 공식이다. 이 공식을 이용하여 주로 일 증발산량을 계산한 후 월 또는 연 평균 증발산량으로 환산하여 사용하는데 다음과 같다.

$$ET_{oHarg} = C_{Harg} R_c (T + 17.8) \sqrt{\delta_T} \quad (2)$$

C_{Harg} =Hargreaves 계수(Hargreaves에 의하여 0.0023으로 주어짐 (Hargreaves, 1994), $ET_{oHarg}(mmday^{-1})$ =Hargreaves 공식으로 산정된 기준 증발산량, $R_c(mmday^{-1})$ =대기권상층부(extraterrestrial) 태양에너지에 상응하는 물의 양, $T(^\circ C)$ =일 평균 온도, 그리고 δ_T =일최고온도-일최저온도 이다.

3. Hargreaves 계수의 추정

본 연구에서는 중앙 기상대에서 우리나라 23개 지점에 걸쳐 관측한 1997년-2006년 기상자료를 바탕으로 ETo를 계산하였다. 일평균 ETo를 산정하기 위하여 FAO 56 PM 공식을 적용할 때에는 낮 시간동안에는 지표면에서 흡수한 태양 에너지와 밤 시간 동안 방출한 에너지가 서로 상쇄된다고 보고, 일반적으로 토양열 플럭스는 “0”으로 가정하고 무시한다(Pereira, 2004; Allen 등, 1998).

Hargreaves 공식을 이용한 ETo 추정결과의 정확도를 파악하기 위하여 식 (3)과 (4)에서 보듯이 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency(NSC)(Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMSE를 이용하여 계산하였다. NSC 값의 최대값은 1로, 1에 접근할 수 록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMSE는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다. Hargreaves 공식의 매개변수는 1997년-2006년 기간의 자료를 이용하여 추정하였다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ET_{oIPM} - ET_{oIH})^2}{\sum_{i=1}^N (ET_{oIPM} - ET_{oIPM})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_{oIH} - ET_{oIPM})^2} \quad (4)$$

여기서, ET_{oIPM} =PM 공식을 이용하여 계산한 ETo, ET_{oIH} =Hargreaves 공식을 이용하여 계산한 ETo, N =자료의 개수, $\overline{ET_{oIPM}}$ =PM 공식을 이용하여 계산한 ETo의 평균(평균 기준증발산량)이다.

SCE(Shuffled Complex Evolution) 기법은 Downhill Simplex Algorithm(Nelder and Mead, 1965) 방법을 바탕으로 하여 단일 기준(하나의 목적함수) 다변수 최적화 기법으로 수문(hydrology) 및 기상분야와 같은 수자원 관련 비선형 모형의 광역(global) 최적화 매개변수를 추정하기 위하여 개발되었다. SCE 기법은 가능한 매개변수 공간에서 여러 변수를 선택하

Table 1. NSC and RMSE of the monthly reference evapotranspiration estimated by the Hargreaves equation before/after adjustment

관측소		보정전			보정후		
		C_{Harg}	RMSE	NSC	C_{Harg}	RMSE	NSC
안동	내륙	0.00230	27.49	0.36	0.00168	6.09	0.97
청주			18.87	0.76	0.00188	5.99	0.98
춘천			29.06	0.39	0.00165	5.22	0.98
추풍령			25.72	0.37	0.00172	9.82	0.91
대구			14.63	0.84	0.00202	8.22	0.95
대전			20.03	0.71	0.00185	6.04	0.97
대관령			16.45	0.69	0.00191	11.07	0.86
광주			18.64	0.72	0.00187	5.25	0.98
전주			24.20	0.54	0.00177	5.16	0.98
진주			27.44	0.32	0.00170	5.61	0.97
서울			16.73	0.77	0.00196	9.00	0.93
원주			31.43	0.22	0.00158	5.63	0.97
수원			17.74	0.77	0.00191	6.18	0.97
천안			23.30	0.68	0.00176	11.37	0.92
부산			해안	0.00230	10.78	0.85	0.00235
강릉	14.33	0.79			0.00219	14.07	0.80
흑산도	18.46	0.42			0.00235	18.48	0.42
제주	11.59	0.88			0.00250	10.15	0.91
제주고산	20.94	0.27			0.00261	18.63	0.43
목포	8.81	0.93			0.00225	8.89	0.93
포항	9.13	0.92			0.00223	8.98	0.92
서산	19.65	0.70			0.00184	5.89	0.97
인천	13.24	0.86			0.00203	8.29	0.94

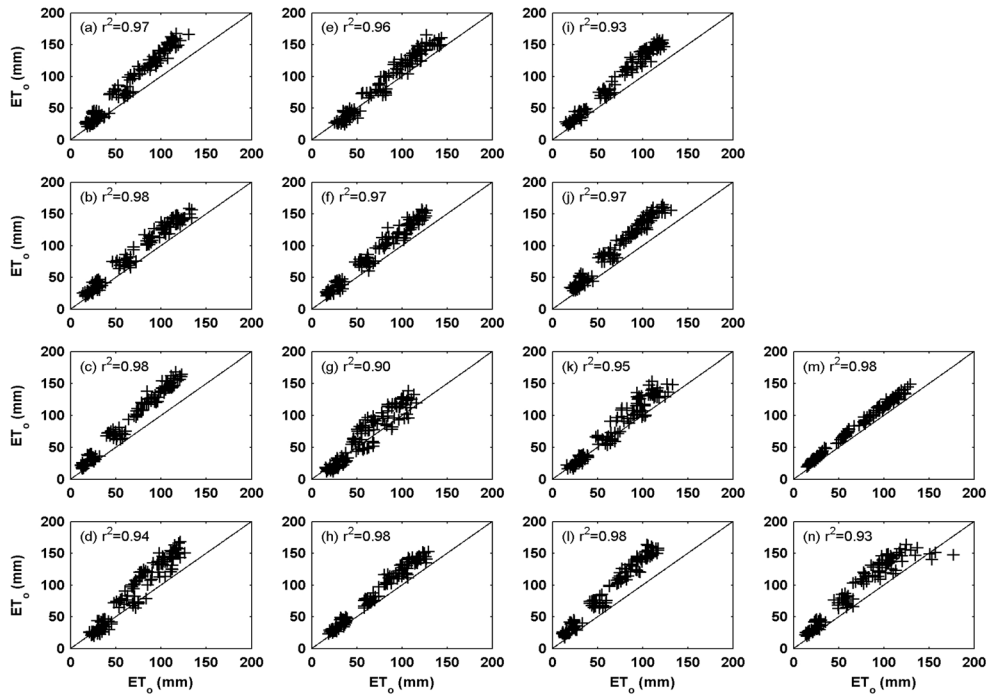


Fig. 1 Scatter diagram of Hargreaves vs. PM ETo (inland areas) before adjustment

여 시도하기 위하여 임의로 표본 선정을 반복한다. 일반적인 최적화 기법의 취약점중의 하나는 국지적 최적화 지점(local minima 또는 secondary minima)에 도달하는 문제인데,

SCE 기법은 다경로(complex)를 통해 반복과정을 수행함으로써 이러한 취약점을 극복하고 광역 최적화 지점(global minima)에 도달하도록 설계되어졌다.

SCE 기법은 n 개의 매개변수에 대해서 가능한 일정 정도의 범위를 미리 선정하여 놓고, 그 범위 내에서 오차가 최소인 매개변수가 결정된다. 또한, 여러 개의 해를 구한 후 오차가 가장 작은 매개변수를 최적해로 선정한다. 본 연구에서는 매개변수를 추정하기 위하여 SCE 기법을 이용하였으며, 목적함수(objective function)는 정해와 추정자료의 일 증발산량의 RMSE를 최소화하는 함수로 선정하여 매개변수를 추정하였다.

처음에 제시된 Hargreaves 공식에서의 계수는 $C_{Harg}=0.0023$ 으로 주어지는데(Hargreaves and Samani, 1985), 표

1은 Hargreaves 공식에서 계수를 조정하기 전의 값($C_{Harg}=0.0023$)과 Hargreaves 공식의 계수 C_{Harg} 를 지점별로 각각 조정한 후 산정된 ET_o 를 분석한 기본적인 통계정보를 보여준다. 매개변수 조정 전 RMSE는 9.13(포항)-31.43(원주) 정도로 파악되었으며, NSC는 0.27(제주고산)-0.93(목포)으로 추정효율이 떨어지는 것으로 나타났다(Table 1 참조).

최소의 오차가 발생하도록 Hargreaves 계수 C_{Harg} 를 조정한 후 RMSE는 5.23(수원)-18.61(제주고산) 정도로 파악되었으며, NSC는 0.43(제주고산)-0.98(안동 등 다수 지역)으로

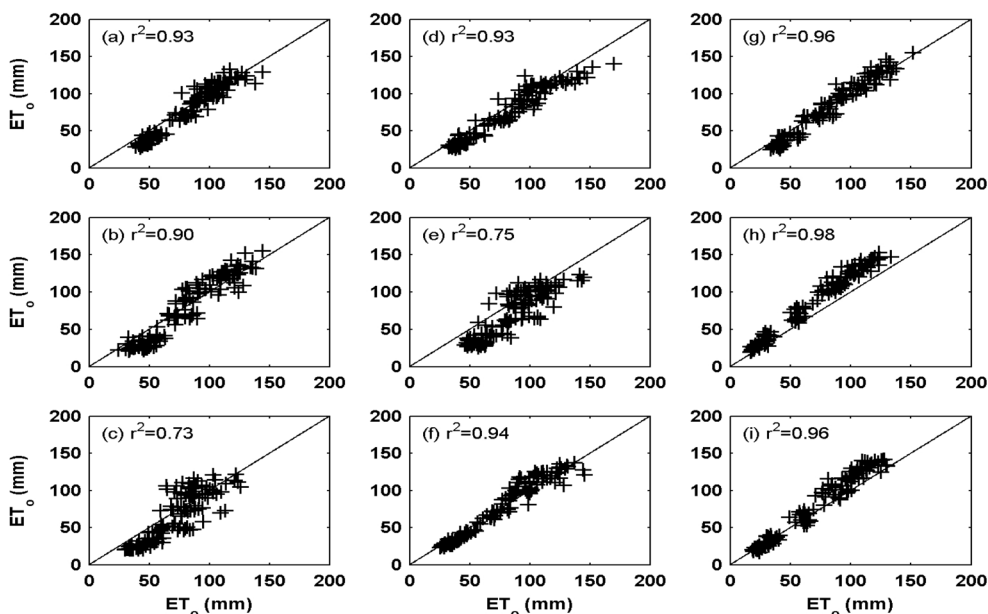


Fig. 2 Scatter diagram of Hargreaves vs. PM ETo (coastal areas) before adjustment

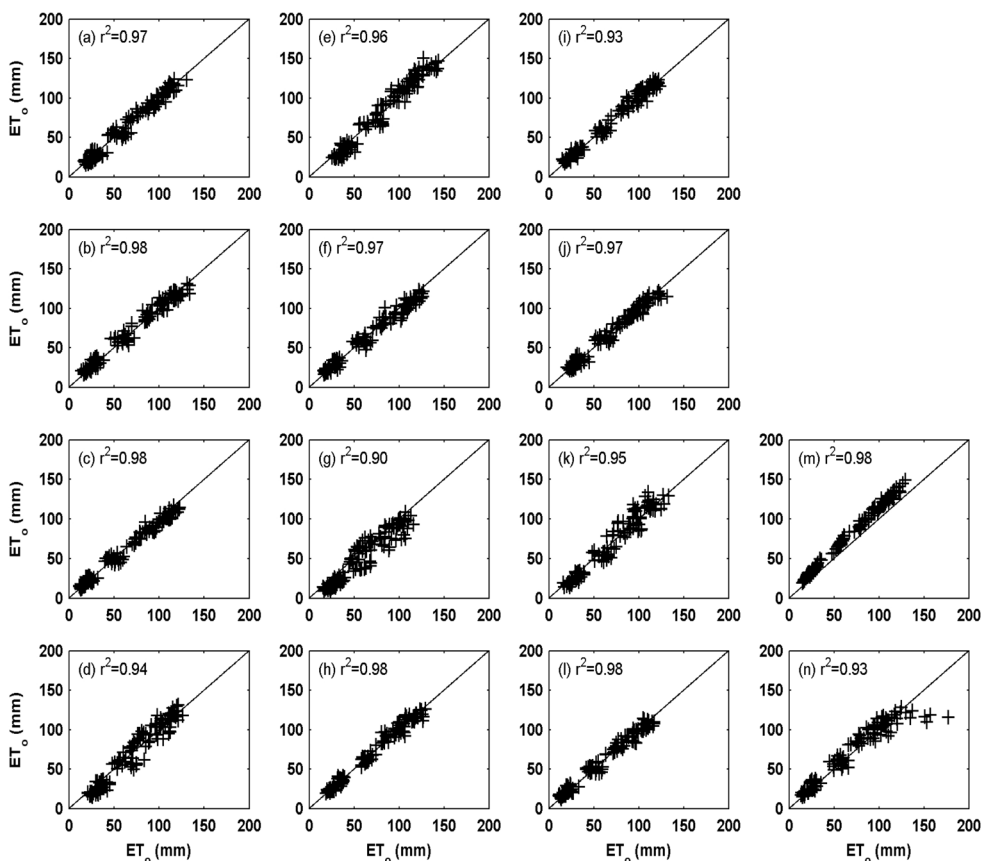


Fig. 3 Scatter diagram of Hargreaves vs. PM ETo (inland areas) after adjustment

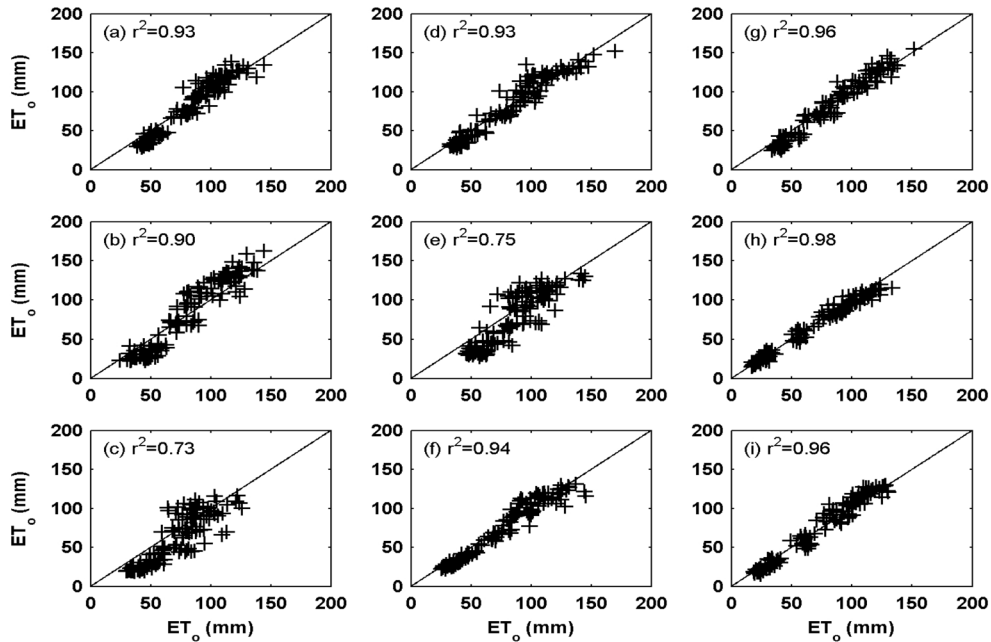


Fig. 4 Scatter diagram of Hargreaves vs. PM ETo (coastal areas) after adjustment

추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다(Table 1 참조).

Hargreaves 공식의 실행결과를 분석하기 위하여 내륙과 해안 지역으로 분리하였다. Fig. 1-2에서는 C_{Harg} 를 조정하기 전 내륙과 해안의 증발산량 계산 결과를 산포도로 보여주며, Fig. 3-4에서는 C_{Harg} 를 조정한 후 내륙과 해안의 증발산량 계산 결과를 산포도로 보여준다.

전반적으로 내륙과 해안 모두 조정 후 계산결과의 효율이 상승했음을 알 수 있다. 그러나 내륙보다는 서산과 인천을 제외한 해안 지역에서 산포정도가 크며, Hargreaves 공식의 효율이 상대적으로 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 제주, 제주 고산, 흑산도를 포함한 도서 지방에서 더 두드러지는 양상을 보이고 있다.

4. Hargreaves 계수의 일반화

본 연구의 최종목표는 Hargreaves 공식의 계수를 전국적으로 일반화시킴으로써 PM공식을 적용하기에 충분한 가용 기상인자의 관측이 이루어 지지 않은 지역에서 농업 분야나 수자원분야 또는 가뭄에 대한 사전예보에 따른 산불 방지 및 수자원 사전 확보 등의 현안을 해결하고자 할 때 증발산량 측면에서 일조를 하고자 함이다. 이를 위해서는 가용 기상자료가 있는 지역에서 FAO 56 PM 공식을 적용하여 Hargreaves 매개변수를 추정된 후, 가용 기상자료가 없는 지역에서는 간단하게는 내삽을 이용한 매개변수 분포도를 만들고, 특히 진보적인 방법으로 기상인자(온도, 습도, 풍속 등)를 이용하여 경험식 또는 일반화된 관계식을 만들어 사용하는 방법을 활용하였다. 물론 최종적으로 만족할만한 일반식을 개발하는 것은 아직 요원하며 어려운 문제이다. 그러나 하나의 중간과정으로서 이 연구에서는 스페인에서 제시한 (Gavilan 등, 2006) 온도와 Hargreaves 계수 간의 선형회귀방향을 통하여 시험해 보았다.

Hargreaves 공식은 단지 온도만을 이용하여 증발산량을 계산하므로 대기이동이 일평균 온도와 일교차에 미치는 영향

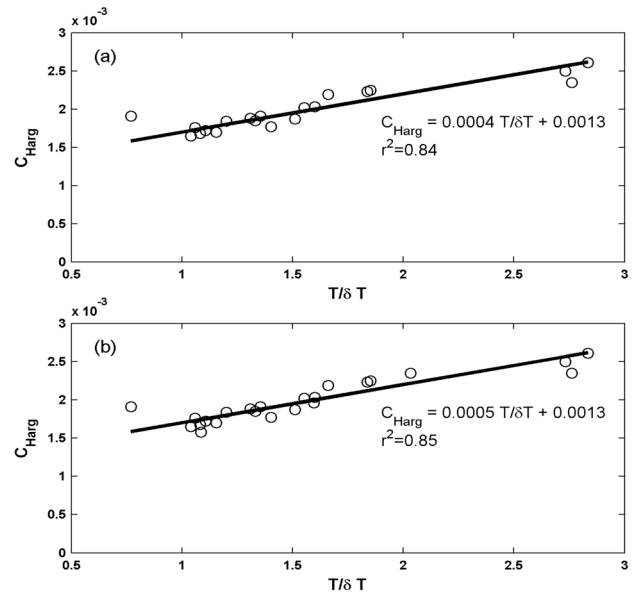


Fig. 5 A linear regression of Hargreaves coefficient

이 계산결과에 크게 반영된다. Table 1에서 주어진 최적화된 보정 후 매개변수를 바탕으로 식(5)는 연구 기간 동안의 일평균온도(\bar{T})와 연구 기간 동안의 일교차 ($\delta\bar{T}$)를 반영하여 23개의 연구 지점 중 우선 20개 지점을 이용하여 유도한 회귀식이며, 동시에 Fig. 5(a)에서 보여 준다. Fig. 5(a)에서는 x-축에는 온도를 y-축에는 Hargreaves 계수를 나타낸 후 선형 회귀식을 유도한 그림이다. 즉 20개 지점은 보정(calibration)을 위하여 사용되고, 나머지 3개 지점(서울, 원주, 부산)은 검증(validation)을 위하여 사용되었다.

$$C_{Harg} = 0.0004 \frac{\bar{T}}{\delta\bar{T}} + 0.0013 \quad (5)$$

\bar{T} 는 연구 기간 동안의 평균 온도 ($^{\circ}\text{C}$); $\delta\bar{T}$ 는 연구 기간 동안의 평균 일교차(최대치-최저치) ($^{\circ}\text{C}$)를 나타낸다. 그림 5(a)에서 보듯이 20개 지점에 대한 Hargreaves 매개변수의 회귀선은 상관관계가 0.84로 나타났으며, 기울기는 0.0004, 절편은 0.0013으로 나타났다.

Table 2. Validation for monthly estimates of the reference evapotranspiration using the generalized regression line (equation(5))

지점	(mm)	(mm)	RMSE(mm)		NSC
서울	67.10	69.55	12.10	1.04	0.91
원주	62.66	68.13	8.89	1.09	0.94
부산	81.02	73.37	12.50	0.91	0.89

Table 3. NSC and RMSE of the monthly reference evapotranspiration estimated by the generalized Hargreaves coefficient which corresponds to the equation (6)

관측소		식(6)에 의하여 추정된 계수				
		C_{Harg}	\bar{T} (°C)	$\delta\bar{T}$ (°C)	RMSE	NSC
안동	내륙	0.00184	12.42	11.47	8.90	0.93
청주		0.00195	13.25	10.13	6.67	0.97
춘천		0.00182	11.96	11.50	9.11	0.94
추풍령		0.00185	12.26	11.07	10.54	0.89
대구		0.00208	14.83	9.55	8.61	0.94
대전		0.00197	13.46	10.11	7.85	0.96
대관령		0.00169	7.34	9.54	13.89	0.78
광주		0.00206	14.53	9.62	9.25	0.93
전주		0.00200	14.24	10.15	11.59	0.90
진주		0.00188	13.99	12.12	9.60	0.92
서울		0.00210	13.27	8.32	10.89	0.90
원주		0.00184	12.25	11.27	11.98	0.89
수원		0.00198	12.83	9.47	6.96	0.96
천안		0.00183	12.12	11.45	11.31	0.92
부산	해안	0.00232	15.41	7.58	10.68	0.85
강릉		0.00213	13.71	8.26	14.45	0.78
흑산도		0.00268	13.70	4.96	21.60	0.21
제주		0.00267	16.37	5.99	12.54	0.86
제주고산		0.00272	15.87	5.60	19.16	0.39
목포		0.00223	14.45	7.80	8.81	0.93
포항		0.00222	14.95	8.14	9.03	0.92
서산		0.00190	12.39	10.32	6.61	0.97
인천		0.00210	13.24	8.27	8.49	0.94

Table 2는 회귀식 (5)를 이용하여 나머지 세 개 지점(서울, 원주, 부산)에 대하여 정확도 검증을 실시한 월 평균 증발산량 분석 결과를 보여준다.

세 지점의 월 평균 RMSE는 8.89-12.50 mm로 나타났으며, 상대오차는 원주와 부산이 약 9% 정도로 크게 나타나나 서울에서는 4%와 나타났다. 원주는 관측 고도가 상대적으로 높고 부산은 해안 지역이라 대기 이동이 심하기 때문에 평균온도나 일교차의 양상이 서울 지역과는 달라 상대적으로 큰 오차를 보이는 듯하다. 그러나 일반화된 회귀식 (5)를 이용해서 추정된 세 지점의 증발산량은 개선의 여지는 보이나 제한된 자료를 고려할 때 만족할 만하다.

최종적으로 하나의 일반화된 식을 유도하기 위하여 다음은 Table 1에서 제시한 최적화된 매개변수를 이용하여 23개 전체 지점에 대하여 선형 회귀식을 유도하였으며, 그 결과가 Fig. 5(b)와 식(6)이다. Table 3은 23개 전체 연구 대상 지역에서 유도한 온도-Hargreaves 관계식 (6) 으로부터 추정된 Hargreaves 계수 및 이로부터 산정된 증발산량의 오차를 보

여준다. 전반적으로는 온도-Hargreaves 계수의 관계가 선형을 이루는 듯 보이나 지역에 따라서는 18.2%까지의 상대오차를 보인다.

$$C_{Harg} = 0.0005 \frac{\bar{T}}{\delta\bar{T}} + 0.0013 \quad (6)$$

전반적으로 온도-Hargreaves 계수의 선형 상관관계에 의한 Hargreaves 계수는 일부 도서 지방 및 고지대에서는 개선의 여지는 남거나 전반적으로 만족할 만한 결과를 보여준다. 도서 지방에서 Hargreaves 공식을 적용하기에 어려움이 보이며 이러한 결과는 외국의 앞선 결과와 비슷하다. 도출된 관계곡선은 기상자료가 수집된 이외의 지점에서 Hargreaves 공식을 이용하여 기준 증발산량을 산정할 때 이용될 수 있다.

5. 결론 및 제언

기상자료가 부족하거나 결측인 지역의 기준 증발산량 산정을 위하여 Penman-Monteith(PM) 공식을 이용한 Hargreaves

공식의 매개변수 추정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 중앙 기상대에서 우리나라 23개 지점에 걸쳐 관측한 1997년-2006년 기상자료를 바탕으로 ETo를 계산하였다. 그리고 PM 공식으로 계산한 ETo를 정해로 가정하여 오차가 최소가 되도록 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였다. 다음은 Hargreaves 매개변수의 일반화를 이끌어내기 위해서 온도-Hargreaves 매개변수의 선형관계를 유도해 보았다.

매개변수 조정 전 RMSE는 9.13(포항)-31.43(원주) 정도로 파악되었으며, NSC는 0.27(제주고산)-0.93(목포)으로 추정효율이 아주 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 최소의 오차가 발생하도록 Hargreaves 계수를 조정한 후 RMSE는 5.23(수원)-18.61(제주고산) 정도로 파악되었으며, NSC는 0.43(제주고산)-0.98(안동 등 다수 지역)으로 추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 온도-Hargreaves 계수의 선형 상관관계를 이용한 Hargreaves 계수의 일반화에서는 개선의 여지가 있지만 만족스러운 결과를 보여주는 것으로 나타났다.

여러 가지 불확실성이 이 연구에서 내재해 있는데 첫 번째가 기상자료의 표준관측 결여이다. 이는 기상관측 자료의 불확실성이 그대로 PM 공식의 계산결과로 전달되어 정해로 가정한 PM 증발산량의 신뢰도가 떨어진다. 두 번째로 태양 복사열 자료에 있어 직접 관측된 복사열이 아니라 일조시간으로부터의 간접 계산값을 사용하였으므로 이로 인한 오차 발생이 있다. 후속 연구는 이러한 문제점을 감안하여 실행해야 할 것이며, 향후 이 연구에서 얻은 기본지식과 정보를 이용하여 우리나라 수자원 개발과 보존에 기여 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 인제대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 김성원, 김형수(2007) 비선형 증발량 및 증발산량 시계열의 모형화를 위한 신경망-유전자 알고리즘 모형 1. 모형의 이론과 적용. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호, pp. 73-88.
- 임창수(2008) 증발산 산정 방법들의 비교-잔디기준작물을 중심으로. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 212-228.
- 임창수(2007) 도시화에 따른 수문기후변화 II (도시화가 기준 증발산량에 미치는 영향). **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 571-583.
- 이길하, 조홍연, 오남선(2008) 경기만 유역의 기준 증발산량 산정을 위한 Hargreaves 공식의 보정 및 검증. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제4호, pp. 413-422.
- 채효석, 김성준, 정관수(1999) 격자기반의 일 증발산량 추정모형 개발. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 721-730.
- 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.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*. United Nations-Food and Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy
- 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, No. 3, pp. 257-281.
- Grismer, M.E., Ormagnoli, 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. (1975) Moisture availability and crop production. *Transaction on ASAE*, Vol. 18, No. 5, pp. 980-984.
- 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. *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. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. 3, pp. 223-230.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- Irmak, S., Allen, R.G., and Whitty, E.B. (2003a) Daily grass and alfalfa-reference-evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 5, pp. 360-370.
- Jensen, M.E. (1966) Empirical methods of estimating or predicting evapotranspiration using radiation. *Proceedings of Evapotranspiration and its Role in Water Resources Management*, Chicago
- Jensen, M.E. and Haise, H.R. (1963) Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 89, pp. 15-41.
- Jensen, M.E., Robb, D.C.N., and Franzoy, C.E. (1970) Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 96, No. 1, pp. 25-38.
- Maidment, D.R. (1993) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Inc.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, I: A Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-287.
- Nelder, J.A. and Mead, R.A., (1965) A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.
- Pereira, A.R. (2004) The Priestly-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 125, pp. 305-313.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G., and Alves, I. (1999) Evapotranspiration : Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 2, pp. 45-51.
- Priestly, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, pp. 81-92.
- Samani, Z. A. (2000) Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267.
- Vanderlinden, K., Giraldez, J.V., and Meirvenne, M.V. (2004) Assessing Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Methods in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 184-191.

(접수일: 2008.4.30/심사일: 2008.6.16/심사완료일: 2008.7.22)