

## 경기만 유역의 기준 증발산량 산정을 위한 Hargreaves 공식의 보정 및 검정

### Calibration and Validation of the Hargreaves Equation for the Reference Evapotranspiration Estimation in Gyeonggi Bay Watershed

이 길 하\* / 조 흥 연\*\* / 오 남 선\*\*\*

Lee, Khil-Ha / Cho, Hong-Yeon / Oh, Nam-Sun

#### Abstract

It is essential to locally adjust the Hargreaves parameter for estimating reference evapotranspiration with short data as a substitute of Penman-Monteith equation. In this study, evaluation of daily-based reference evapotranspiration is computed with Hargreaves equation. in Gyeonggi bay area including Ganghwa, Incheon, Suwon, Seosan, and Cheonan station for the time period of 1997-2004. Hargreaves coefficient is adjusted to give the best fit with Penman-Monteith evapotranspiration, being regarded as a reference. Then, the preferred parameters are validated for the same stations for the time period of 2005-2006. The optimization-based correction in calibration for 1997-2004 shows improved performance of the Hargreaves equation, giving 0.68-0.77 to 0.92-0.98 in Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSC) and 14.63-23.30 to 5.23-11.75 in RMSE. The validation for 2005-2006 shows improved performance of the Hargreaves equation, giving 0.43-0.85 to 0.93-0.97 in NSC and 14.43-26.81 to 6.48-9.09 in RMSE

**keywords** : Reference Evapotranspiration, Hargreaves Equation, Penman-Monteith Equation, Gyeonggi Bay

#### 요 지

기상자료가 부족하거나 결측 지역의 기준 증발산량 산정을 위하여 Penman-Monteith (PM) 공식을 이용한 Hargreaves 공식의 매개변수 추정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 경기만 유역에 위치한 강화, 인천, 수원, 서산, 천안의 1997년~2004년 기상자료를 바탕으로 PM 공식을 이용하여 계산한 기준 증발산량(이하 ETo)을 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였으며, 추정된 매개변수를 이용하여 2005년~2006년의 PM 공식을 이용한 ETo 결과와 비교하여 검정을 수행하였다. 그 결과, 매개변수 조정 전 RMS 오차는 14.63~23.30 정도로 파악되었으며, 모형의 검정에서도 14.43~26.81 정도로 유사한 범위를 보이고 있다. 한편, Nash-Sutcliffe 일치계수는 0.68~0.77이며, 검정과정에서는 0.43~0.85로 대부분의 지역이 추정효율이 아주 떨어지는 것으로 나타났다. 반면, Hargreaves 계수를 조정한 경우, RMS 오차는 5.23~11.75 정도로 파악되었으며, 모형의 검정에서도 6.48~9.09정도로 매개변수

\* 한국해양연구원 연안개발연구본부 연구원  
Researcher, Ansan PO Box 29, Seoul, 425-600, Korea.  
(e-mail: khil\_ha@yahoo.com)

\*\* 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원  
Principal Research Scientist, Ansan PO Box 29, Seoul, 425-600, Korea.  
(e-mail: hycho@kordi.re.kr)

\*\*\* 교신저자, 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수  
Professor, Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea.  
(e-mail: sun@mmu.ac.kr)

조정전에 비하여 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 한편, NSC는 0.92~0.98이며, 검정과정에서는 0.93~0.97로 대부분의 지역에서 추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

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

## 1. 서론

표준이 되는 증발산량은 개념적으로 이상적인 조건에서 잠재증발산량과 기준 증발산량으로 정의된다. 잠재증발산량은 주어진 기상조건에서의 단위면적당, 단위시간당 자유 수면에서의 가능한 증발량으로, 유역에서는 토양함수가 포화된 상태에서의 가능한 증발량으로 간주할 수 있다. 반면, 기준 증발산량은 특정조건(작물 높이=0.12m, Albedo=0.23, 표면저항=69s/m $\approx$ 70m/s, Grass 식생 표면)에서 충분한 수분이 공급되는 경우의 가능한 증발산량이다(Maidment, 1993). 과거에는 잠재증발산량 개념을 이용하여 실제 증발산량을 추정하는 방식의 연구가 수행되어 왔으나, 잠재증발산량 개념이 유역 증발산에 중요한 영향을 미치는 식생인자에 대한 개념이 결여되어 1994년 이후 식생을 포함한 기준 증발산량 개념이 도입(Allen *et al.*, 1994)되고, 기준 증발산량을 이용한 실제 증발산량 추정연구가 활발하게 수행되고 있다(Pereira *et al.*, 1999). Pan 증발량 자료를 이용하여 잠재증발산량 또는 기준 증발산량을 산정하는 방법은 선형회귀분석을 이용하는 경우가 일반적이나, 선형 회귀분석 계수가 일반적으로 기상인자의 함수로 표현(Grismer *et al.*, 2002)되기 때문에, 우리나라에서 지역적으로 구분된 상수를 사용하는 방법은 계수에 기상인자의 영향을 반영하지 못하기 때문에 상대적으로 많은 오차를 포함할 수 있다.

기준 증발산량(reference evapotranspiration, 이하 ETo)을 산정하기 위해서는 장기간 축적된 신뢰할 만한 기상자료를 필요로 한다. 물리적인 이론에 바탕을 두고 증발산량을 산정하는 Penman-Monteith (PM) 공식은 태양복사열, 풍속, 온도, 습도와 같은 다양한 기상자료를 필요로 한다. 그러나 우리나라의 경우 기상대를 제외한 관측소 및 자동관측소 등에서는 태양복사열 관측자료가 미흡하기 때문에 PM 공식을 사용하기에는 현실적으로 곤란하다. 따라서 기상자료가 다소 부족한 지역의 수자원개발 및 관개 사업 등에 필요한 ETo를 산정하기 위해서는 보다 간단하고 기본적인 기상정보(기온 정보)를 이용하는 공식을 개발할 필요가 있다.

온도나 복사열 자료를 이용한 다양한 증발산량 산정 공식이 개발되어 왔으나(Hargreaves and Samani,

1985; Hargreaves, 1975; Priestly and Taylor, 1972; Jensen *et al.*, 1970; Jensen, 1966; Jensen and Haise, 1963), 다양한 경험식 중에서 특정지역에 적합한 공식을 선택한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 공식선정은 보통 시간 규모, 지역의 건조 상태, 장비의 가격, 운영과 유지관리의 난이도, 기상자료의 가용정도, 계산의 용이 등에 따라 결정한다. 기상 자료의 품질에 신뢰가 부족하거나 지속적인 관측이 미흡한 지역에서 ETo를 계산할 때 단지 하나의 기상자료(온도)로 계산함에도 불구하고 적정 수준의 정확도를 제공해 주는, Hargreaves 공식(Hargreaves and Samani, 1985)이 널리 사용되어져 왔다(Hargreaves & Allen, 2003). 우리나라와 같은 온대지역에서는 온도와 복사열이 증발산량의 80% 정도를 설명해 줄 수 있으므로 Hargreaves 공식의 적합할 것으로 판단된다(Vanderlinden *et al.*, 2004; Samani, 2000; Priestly and Taylor, 1972).

Hargreaves 공식을 이용하여 계산한 증발산량은 지역의 기상인자의 영향이 반영된 일기온의 차이나 변화에 의해서 영향을 받기 때문에 대상지역에 따라서 정확도가 다를 수 있다. 따라서 Hargreaves 공식을 이용하여 증발산량을 계산할 때에는 지역적 기후 특성을 고려하여 매개변수를 지역특성에 맞게 조정할 필요가 있다. 지역특성에 적합한 매개변수 조정은 다양한 기후조건에서 진행되어 왔다(Irmak *et al.*, 2003; Galvilian *et al.*, 2006). 우리나라에서도 기준 증발산량 및 잠재증발산량 추정 연구가 다양한 목적으로 수행되어 왔으나(임창수, 2007; 배덕효와 김진훈, 2006; 채효석 등, 1999), Hargreaves 공식이 간편하고 정확도가 우수함에도 불구하고 수자원개발이나 관개분야에서는 아직도 연구가 부족한 실정이다. 기상자료가 부족하거나 결측 지역의 기준 증발산량 산정을 위하여 Penman-Monteith (PM) 공식을 이용한 Hargreaves 공식의 매개변수 추정을 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 경기만 유역에 위치한 강화, 인천, 수원, 서산, 천안의 1997년~2004년 기상자료를 바탕으로 PM 공식을 이용하여 계산한 ETo를 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였으며, 추정된 매개변수를 이용하여 2005년~2006년의 PM 공식을 이용한 ETo 결과와 비교하여 검정을 수행하였다. ETo를

산정하는 연구에서 가장 어려운 부분은 정해를 얻기가 어렵다는 것이다. PM 공식은 완전한 물리이론(Fully-Physical Concept)을 바탕으로 유도된 공식이기 때문에 지구상의 다른 기후조건에 적용할 수 있고 정확도가 우수한 것으로 알려져 있다(Maidment, 1993; Allen *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1998). 이러한 이유로 PM 공식으로부터 얻은 증발산량을 정해로 가정하는 것이 일반적인 방법이며(Gavilan *et al.*, 2006), 국내에서도 Penman-Monteith 방법을 이용하여 추정된 증발산이 실제 강수량과 유출량 사이의 물수지로부터 얻어진 증발산량과 근사한 결과를 보인다는 연구결과도 있다(김남원과 김철겸, 2004). 따라서 본 연구에서도 PM 공식을 정해로 가정하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였다.

## 2. 기준 증발산량(ET<sub>o</sub>) 산정공식

### 2.1 Penman-Monteith 공식

장비운영에 따른 비용의 부담으로 인하여 증발산계(Lysimeter)에 의한 ET<sub>o</sub> 관측의 어려움으로 인해 ET<sub>o</sub>의 정해를 얻기가 곤란하므로 일반적으로 PM 공식을 표준으로 사용한다. 본 연구에서는 FAO-56 PM 공식이 정해로 사용되었으며 그 식은 다음과 같다.

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

여기에서  $ET_{oPM}$ 는 FAO-56 PM 공식으로 산정된 기준 증발산량(mm/day),  $\Delta$ 는 포화 수증기압 산정공식의 기울기 ( $kPa^0C^{-1}$ ),  $R_n$ 는 이용가능 복사열 ( $MJm^{-2}day^{-1}$ ),  $G$ 는 토양열 플럭스 ( $MJm^{-2}day^{-1}$ ),  $\gamma$ 는 psychometric 상수 ( $kPa^0C^{-1}$ ),  $T$ 는 일 평균 온도 ( $^{\circ}C$ ),  $U_2$ 는 지상으로부터 2m 높이에서의 풍속 ( $ms^{-1}$ ), 그리고  $(e_s - e_a)$ 는 증기압차 ( $kPa$ )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 드물게 정확도가 우수한 공식이다. 이 공식을 이용하여 주로 일 증발산량을 계산한 후 월 또는 연 평균 증발산량으로 환산하여 사용하게 된다.

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

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

## 3. 경기만 유역의 기상자료

본 연구에서는 경기만 연안에 위치한 수원, 서산, 천안, 인천, 강화 기상대 자료를 이용하여 수행하였으며, Fig. 1과 Table 1은 연평균 일조시간, 풍속, 평균 기온, 상대습도를 나타낸다. 전반적으로 이 지역의 기후 변화경향은 유사하며, 일조시간도 비슷한 값을 보여주는데 이것은 거리상으로 서로 멀지 않으므로 충분히 가능한 현상으로 판단된다. 그러나 2001년 강화, 천안 지점의 일조시간은 유난히 크게 나타나, 일조시간관측에 다소 문제가 있는 것으로 판단되며 ET<sub>o</sub> 추정과정도 이 자료가 적지 않은 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 한편 강화지점이 타 지역보다 기온이 낮은 이유는 기상대 지점이 해안에 인접하여 해안의 영향을 상대적으로 더 받는 결과로 판단된다. 이러한 영향은 곧바로 지표와 대기의 상호작용과정을 통하여 증발산량에 영향을 미치는데 우리나라의 pan 증발산량 관측에서도 이러한 해안의 효과가 두드러지게 나타난다(이길하 등, 2007). 따라서 향후 우리나라의 증발산량 추정 연구에서는 내륙과 해안을 분리하여 연구하는 것이 보다 적절한 방법으로 판단된다.

## 4. Hargreaves 공식의 매개변수 추정 및 검증

일 평균 ET<sub>o</sub>를 산정하기 위하여 FAO-56 PM 공식을 적용할 때에는 일반적으로 토양열 플럭스는 "0"으로 가정하고 무시한다(Pereira, 2004; Allen *et al.*, 1998). 낮 시간동안에는 지표면에서 태양에너지를 흡수하고 밤 시간 동안은 낮 시간 동안 흡수한 에너지를 대기 중으로 방출하는데 이 때 지표면에서 흡수한 에너지와 방출한 에너지는 서로 상쇄된다고 가정하는 것이다.

Hargreaves 공식을 이용한 ET<sub>o</sub> 추정결과의 정확도를 파악하기 위하여 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSC) (Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMS 오차를 Eqs. (3) and (4)를 이용하여 계산하였다. NSC 값의 최대값은 1로, 1에 접근할 수록 추정 정확도

Table 1. Yearly Mean of Climate Variables for Five Study Stations: Sunshine Hours, Wind Speed, Air Temperature, and Relative Humidity

|         | Year | Sunshine hours (hours) | Wind speed (m/sec) | Air Temperature ( °C) | Relative humidity (%) |
|---------|------|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Suwon   | 1997 | 6.37                   | 1.72               | 12.57                 | 66.15                 |
|         | 1998 | 5.71                   | 1.85               | 13.54                 | 70.30                 |
|         | 1999 | 6.15                   | 1.73               | 12.79                 | 71.81                 |
|         | 2000 | 5.80                   | 1.66               | 12.32                 | 65.35                 |
|         | 2001 | 6.11                   | 1.88               | 12.13                 | 63.42                 |
|         | 2002 | 5.65                   | 2.04               | 11.72                 | 64.33                 |
|         | 2003 | 5.10                   | 1.82               | 12.30                 | 66.18                 |
|         | 2004 | 5.97                   | 2.07               | 12.86                 | 62.42                 |
|         | 2005 | 5.89                   | 2.04               | 12.04                 | 61.30                 |
|         | 2006 | 5.27                   | 2.06               | 13.02                 | 62.08                 |
| Seosan  | 1997 | 6.45                   | 2.00               | 12.24                 | 72.69                 |
|         | 1998 | 5.59                   | 2.55               | 12.91                 | 74.65                 |
|         | 1999 | 5.79                   | 2.53               | 12.33                 | 72.40                 |
|         | 2000 | 5.97                   | 2.60               | 11.32                 | 72.96                 |
|         | 2001 | 6.07                   | 2.47               | 11.83                 | 70.66                 |
|         | 2002 | 5.62                   | 2.79               | 11.87                 | 73.45                 |
|         | 2003 | 5.09                   | 2.79               | 12.01                 | 75.18                 |
|         | 2004 | 6.06                   | 2.58               | 12.59                 | 70.46                 |
|         | 2005 | 5.91                   | 2.84               | 11.57                 | 71.56                 |
|         | 2006 | 5.54                   | 2.80               | 12.23                 | 73.14                 |
| Incheon | 1997 | 7.01                   | 2.40               | 12.17                 | 68.90                 |
|         | 1998 | 6.37                   | 2.33               | 13.20                 | 70.58                 |
|         | 1999 | 6.18                   | 2.19               | 12.63                 | 67.06                 |
|         | 2000 | 5.94                   | 2.46               | 12.69                 | 68.70                 |
|         | 2001 | 6.37                   | 2.58               | 12.91                 | 67.53                 |
|         | 2002 | 6.00                   | 2.79               | 12.12                 | 67.87                 |
|         | 2003 | 5.37                   | 2.34               | 12.56                 | 69.08                 |
|         | 2004 | 6.16                   | 2.49               | 12.87                 | 64.95                 |
|         | 2005 | 6.39                   | 2.63               | 12.06                 | 64.38                 |
|         | 2006 | 5.73                   | 2.46               | 12.74                 | 67.43                 |
| Cheonan | 1997 | 6.46                   | 1.49               | 12.19                 | 69.66                 |
|         | 1998 | 5.46                   | 1.63               | 12.37                 | 67.61                 |
|         | 1999 | 5.29                   | 1.80               | 11.59                 | 69.66                 |
|         | 2000 | 5.47                   | 1.91               | 10.53                 | 69.88                 |
|         | 2001 | 9.68                   | 1.61               | 11.75                 | 67.87                 |
|         | 2002 | 8.23                   | 1.44               | 11.84                 | 68.92                 |
|         | 2003 | 5.29                   | 1.68               | 11.66                 | 74.57                 |
|         | 2004 | 6.00                   | 1.75               | 12.35                 | 68.79                 |
|         | 2005 | 5.81                   | 1.83               | 11.81                 | 68.40                 |
|         | 2006 | 5.50                   | 1.79               | 11.52                 | 67.45                 |
| Ganghwa | 1997 | 6.49                   | 1.64               | 11.35                 | 68.98                 |
|         | 1998 | 5.66                   | 1.73               | 12.08                 | 65.97                 |
|         | 1999 | 6.12                   | 1.90               | 11.23                 | 67.07                 |
|         | 2000 | 6.06                   | 1.84               | 8.02                  | 65.23                 |
|         | 2001 | 9.20                   | 1.47               | 10.82                 | 63.59                 |
|         | 2002 | 7.26                   | 1.84               | 10.89                 | 63.86                 |
|         | 2003 | 6.78                   | 1.66               | 11.15                 | 68.59                 |
|         | 2004 | 7.27                   | 1.85               | 11.43                 | 68.75                 |
|         | 2005 | 7.10                   | 1.87               | 10.80                 | 68.20                 |
|         | 2006 | 6.26                   | 1.80               | 11.51                 | 68.02                 |

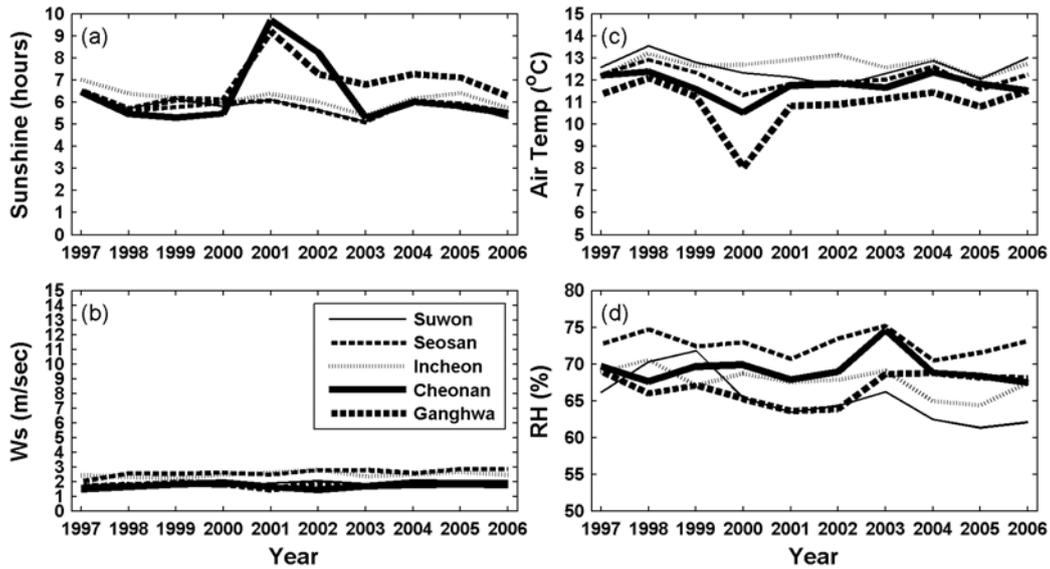


Fig. 1. Yearly Mean of Climate Variables for Five Study Stations: (a) sunshine hours, (b) wind speed, (c) air temperature, (d) relative humidity

가 높음을 의미하며, RMS 오차는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다. Hargreaves 공식의 매개변수는 1997년~2004년 기간의 자료를 이용하여 추정하였으며, 공식의 검정은 2005년~2006년 자료를 이용하여 수행하였다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ETo_{iPM} - ETo_{iH})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{ETo_{iPM}} - ETo_{iPM})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ETo_{iH} - ETo_{iPM})^2} \quad (4)$$

여기서,  $ETo_{iPM}$ 는 PM 공식을 이용하여 계산한  $ETo$ ,  $ETo_{iH}$ 는 Hargreaves 공식을 이용하여 계산한  $ETo$ ,  $N$ 은 자료의 개수(매개변수 추정과정에서는  $12 \times 8(\text{년})=96$

개, Hargreaves 공식의 검정과정에서는  $12 \times 2(\text{년})=24$ 개),  $\overline{ETo_{iPM}}$ 는 PM 공식을 이용하여 계산한  $ETo$ 의 평균(평균 기준증발산량)이다.

Table 2는 Eq. (2)의 Hargreaves 공식에서 계수를 조정하기 전의 값( $C_{Harg}=0.0023$ )을 이용하여  $ETo$ 를 산정한 후 분석한 기본적인 통계정보를 보여준다. Hargreaves 계수 보정 및 검정과정과의 비교를 위하여 구간을 구분하여 제시하였다. 원래 Hargreaves 공식에서의 계수는  $C_{Harg}=0.0023$ 으로 주어지는데(Hargreaves and Samani, 1985) 이는 주로 미국의 중서부 지방을 중심으로 구성된 공식이라 다른 지역에서는 Hargreaves 계수를 조정할 필요가 있다. 매개변수 조정 전 RMS 오차는 14.63~23.30 정도로 파악되었으며, 모형의 검정에서도 14.43~26.81 정도로 유사한 범위를 보이고 있다. 한편, NSC는 0.68~0.77이며, 검정과정에서는 0.43~0.85로 대부분의 지역이 추정효율이 아주 떨어지는 것으로 나타났다(Table 2 참조).

Table 2. NSC and RMSE of the Reference Evapotranspiration Estimated by Both PM and Hargreaves (before adjustment, hargreaves parameter = 0.0023)

| Station | Estimation (1997-2004) |      | Estimation (2005-2006) |      |
|---------|------------------------|------|------------------------|------|
|         | RMSE                   | NSC  | RMSE                   | NSC  |
| Suwon   | 17.74                  | 0.77 | 19.36                  | 0.71 |
| Seosan  | 19.65                  | 0.70 | 19.03                  | 0.70 |
| Incheon | 13.24                  | 0.86 | 13.43                  | 0.84 |
| Cheonan | 23.30                  | 0.68 | 26.81                  | 0.43 |
| Ganghwa | 14.63                  | 0.87 | 14.43                  | 0.85 |

따라서 경기만 유역의 5개 지역에서의 정해(PM 공식을 이용한 ETo)를 기준으로 최소의 오차가 발생하도록 Hargreaves 계수  $C_{Harg}$ 를 조정하였다. Table 3은 이와 같이 Hargreaves 공식의 계수  $C_{Harg}$ 를 지점별로 각각 조정한 후(수원=0.0019, 서산=0.0018, 인천=0.0018, 천안=0.0021, 강화=0.0020), Hargreaves 공식을 이용하여 ETo를 산정한 결과를 이용하여 계산한 기본적인 통계량을 보여준다. Hargreaves 계수를 조정한 경우, RMS 오차는 5.23~11.75 정도로 파악되었으며, 모형의 검증에서도 6.48~9.09정도로 매개변수 조정전에 비해

여 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 한편, NSC는 0.92~0.98이며, 검증과정에서는 0.93~0.97로 대부분의 지역이 추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다 (Table 3 참조).

Fig. 2는 Hargreaves 공식의 계수  $C_{Harg}$ 를 조정하기 전·후 두 공식의 결과를 PM 산정 증발산량과 비교한 산포도이다. 그림에서 보면 모두 계수를 조정한 후의 Hargreaves 공식에 의한 ETo는 PM 산정 ETo를 매우 근접하게 추정하는 것으로 나타났다.

증발산량은 시간 규모에 따라 여러 가지의 다른 평균

Table 3. NSC and RMSE of the Reference Evapotranspiration Estimated by Both PM and Hargreaves (after adjustment)

| Station | $C_{Harg}$ | Calibration |      | Validation |      |
|---------|------------|-------------|------|------------|------|
|         |            | RMSE        | NSC  | RMSE       | NSC  |
| Suwon   | 0.0019     | 5.23        | 0.98 | 7.63       | 0.95 |
| Seosan  | 0.0018     | 5.66        | 0.98 | 6.74       | 0.96 |
| Incheon | 0.0018     | 7.92        | 0.95 | 9.09       | 0.93 |
| Cheonan | 0.0021     | 11.75       | 0.92 | 7.17       | 0.96 |
| Ganghwa | 0.0020     | 9.10        | 0.95 | 6.48       | 0.97 |

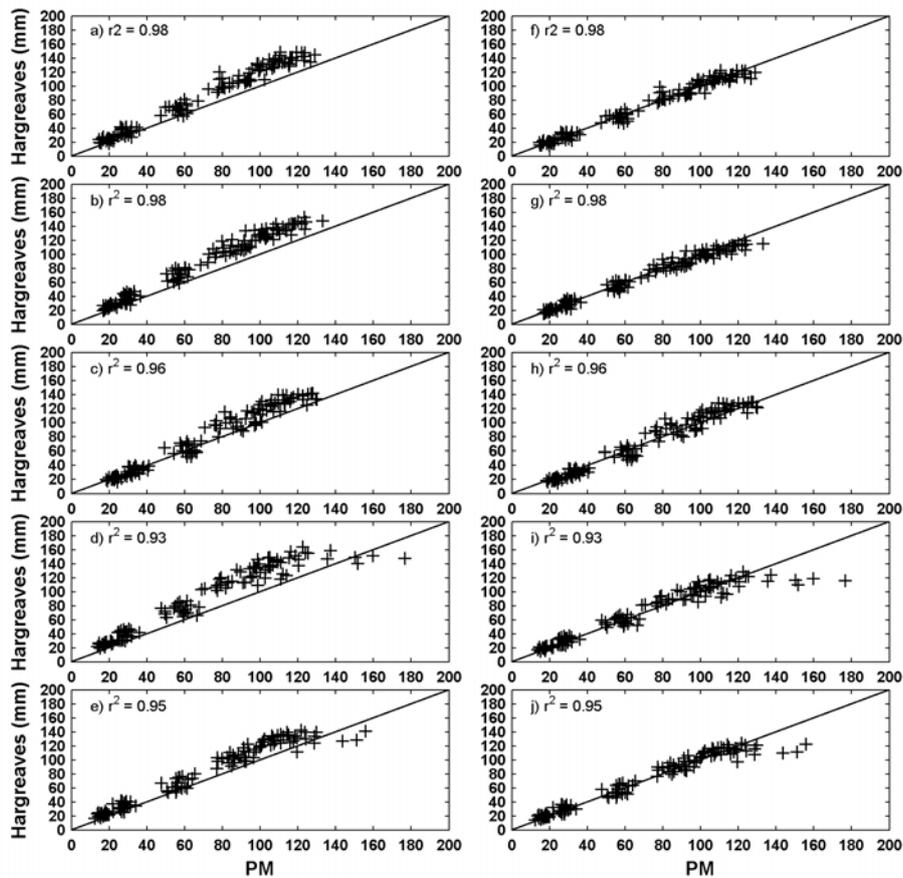


Fig. 2. Scatter Diagram of Hargreaves vs. PM ETo: (a) Suwon, (b) Seosan, (c) Incheon, (d) Cheonan, (e) Ganghwa ( $C_{Harg}$  =0.0023); (f) Suwon( $C_{Harg}$  =0.0019), (g) Seosan( $C_{Harg}$  =0.0018), (h) Incheon( $C_{Harg}$  =0.0018), (i) Cheonan( $C_{Harg}$  =0.0021), (j) Ganghwa( $C_{Harg}$  =0.0020)

값으로 나타낼 수 있는데 증발산량을 산정하는 공식은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 하나는 월 평균 또는 계절 평균 증발산량을 산정하도록 이미 설계되어 있는 형태로 Hamon 공식이 이에 해당한다. 다른 하나는 증발산량 공식이 일평균 증발산량을 계산하도록 설계되어 있으며 월평균 또는 연평균 증발산량은 일평균 증발산량을 일정기간 합하여 구하는데 이 연구에서 사용되어진 PM 공식이나 Hargreaves 공식이 이에 해당한다.

또 증발산량은 사용하고자 하는 용도에 따라 시간 규모가 달라지는데 실시간, 일평균, 주평균, 월평균, 계절 평균, 연평균 증발산량이 이에 해당한다. 예를 들면 농업용수 관계에서는 일평균 또는 주평균 증발산량을 필요로 할 것이고, 연안 환경문제나 생태문제에 있어서는 주평균 또는 월평균 증발산량이 필요할 수 있을 것이다. 일반적으로 수자원 개발이나 발전 용량을 산정하

기 위해서는 월 또는 연평균 수자원량이 필요하므로 앞서 언급한바와 같이 일평균 증발산량을 계산한 후 다시 월 평균 증발산량을 계산하였다.

Fig. 3은 Hargreaves 계수  $C_{Harg}$ 를 조정하기 전·후의 산정된 월별 ETo의 시계열값을 비교하여 나타내었다. 앞에서 언급한 천안, 강화 지점의 2001년의 이상자료(outlier)는 Hargreaves 공식의 매개변수 추정에서도 이상한 양상으로 영향을 미치고 있는 것 같다. 경기만 연안지역에서 모두 Hargreaves 계수를 조정한 후의 값이 PM 공식을 이용하여 계산한 ETo 값에 아주 가깝게 근접하고 있음을 알 수 있다. 이 사실은 관측에서나 실제 사용하는데 있어서 매우 편리하다는 것이 상당히 고무적이다. 사실 ETo, 나아가 더 이상적으로는 실제 증발산량의 측정은 경제적으로도 비싸고 설치도 복잡하며 특히 우리나라와 같이 도시가 발달한 지역이 지배적인 환경에서는 상대적으로 그렇지 못한 지역보다 더 어렵다.

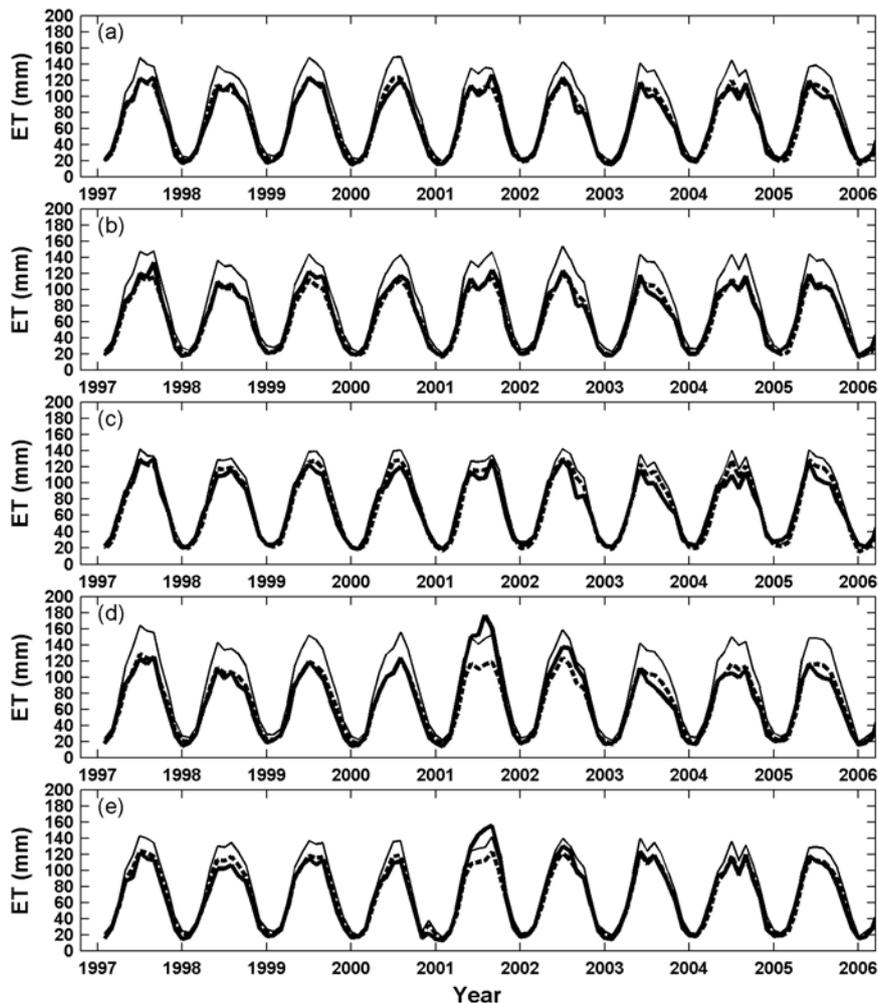


Fig. 3. Estimation of Annual Evapotranspiration by Hargreaves and PM: (a) Suwon, (b) Seosan, (c) Incheon, (d) Cheonan, and (e) Ganghwa Station (Thin line = ETo computed by Hargreaves Eq. before adjustment, Dotted line = ETo computed by Hargreaves Eq. after adjustment; Thick line = ETo computed by PM Eq.)

또 아직까지 국내에서는 증발산량의 관측 기술 수준이 높지 않고 관측경험도 부족하며(광릉수목원에서 실제증발산량을 관측한 바는 있다), 전문기술자도 극히 부족하다. 이러한 상황에서 전국적으로 실제 증발산량을 직접 관측한다는 것은 사실상 불가능하므로(미국의 경우도 몇 개의 심층 연구지역에서만 상시 실제 증발산량 관측이 이루어지고 있다.) ETo를 계산한 후 계수보정을 통하여 실제 증발산량을 구하는 2 단계 방법이 아직까지는 현실적이고 경제적이라고 할 수 있다. 농업 분야나 수자원 분야 즉 가뭄에 대한 사전예보에 따른 산불방지 및 수자원 사전 확보 등 현안이 우리 눈앞에 있는 한 우리는 기존 증발산량의 산정을 필요로 하며, 아울러 어느 정도의 정확도를 가지면서도 사용하기에 편리한 Hargreaves 공식과 같은 ETo 산정 공식은 이에 포함된다. PM 공식은 너무 많은 기상인자의 입력을 필요로 하므로 기상청에서 설치한 관측소 및 자동기상관측소(AWS)망에서 벗어난 지역에서는 산정이 어렵다는 단점이 있어 지방자치단체나 특정지역에서는 사실상 사용이 불가능하다.

이 결과로 미루어보아 Hargreaves 공식은 지역특성을 고려하여 적절한 계수보정만 이루어진다면 ETo 산정에 있어 가장 장애가 되는 기상자료에 구애받지 않고 전반적으로 경기만 연안유역의 ETo를 적절한 수준으로 산정하고 있다. 이것은 기상 자료가 완전하지 못한 우리나라의 실정에서 수자원 개발과 보존의 연구에 있어 상당히 고무적인 결과라고 판단된다. 향후 기상자료가 풍부한 기상대 지점 자료를 이용하여 PM 공식으로 ETo를 계산하여 Hargreaves 매개변수를 추정하고 공간적인 내삽과정을 통하여 전국적인 분포를 파악하면, 간단한 기온변화 관측만을 통하여 우리나라 모든 지역의 ETo 추정에 활용될 수 있다. 또한 추정된 ETo 정보는 수자원 관련 분야 및 환경생태분야에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 제언

기상자료가 부족하거나 결측 지역의 기존 증발산량 산정을 위하여 Penman-Monteith (PM) 공식을 이용한 Hargreaves 공식의 매개변수 추정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 경기만 연안유역의 일 온도자료만을 이용하여 ETo를 산정하고자 Hargreaves 공식을 이용하여 일증발산량을 계산한 후 FAO-56 PM 공식을 정해로 가정하고 월평균 ETo를 서로 비교하였다. 그리고 동시에 Hargreaves 공식을 이용한 ETo과 정해와의 오차를 줄이기 위해서 최적화기법을 이용하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 조절한 후 계산된

ETo를 PM 공식을 이용한 ETo와 비교하였다. 그 결과, 매개변수 조정 전 RMS오차는 14.63~23.30 정도로 파악되었으며, 모형의 검정에서도 14.43~26.81 정도로 유사한 범위를 보이고 있다. 한편, NSC는 0.68~0.77이며, 검정과정에서는 0.43~0.85로 대부분의 지역이 추정효율이 아주 떨어지는 것으로 나타났다. 반면, Hargreaves 계수를 조절한 경우, RMS 오차는 5.23~11.75 정도로 파악되었으며, 모형의 검정에서도 6.48~9.09정도로 매개변수 조정전에 비하여 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 한편, NSC는 0.92~0.98이며, 검정과정에서는 0.93~0.97로 대부분의 지역이 추정효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 여러 가지 요소에 기인한 불확실성이 내재되어 있다. 경기만 연안유역에서 5개의 기상대 자료만을 이용하여 산정하였으므로 전국적인 변화 양상 분석을 하기에는 일반성이 다소 부족하다. 그러나 이 연구는 단지 전국으로 확대하기 위한 1단계 연구에 해당되며 그 타당성을 간단하게 확인해 보고자 하였다. 일반적으로 기상자료는 표준이 되는 기준조건에 맞게 관측이 되는데 우리나라의 기상관측 사정상 그렇지 못한 것이 현실이다. 그래서 기상관측 자료의 불확실성이 그대로 PM 공식으로 전달되어 정해로 가정한 PM 증발산량의 신뢰도가 떨어질 수 있다. 또 본 연구에서는 태양복사열 자료에 있어 직접 관측된 복사열이 아니라 일조시간으로부터 간접적으로 계산한 값을 사용하였으므로 이로 인한 오차 전달의 가능성이 있다. 점차 나가는 관측 현실을 고려해 볼 때 후속 연구는 이러한 영향을 감안하여 수행되어야 할 것이며, 보다 우수한 연구 성과로 우리나라의 수자원 개발과 보존에 이바지할 것으로 기대된다. 또한 향후 이 연구에서 얻은 기본 지식과 정보를 이용하여 Hargreaves 공식을 이용한 증발산량 산정에 대한 연구를 전국적으로 확대하여 추진할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업(하구 관리 및 복원기술개발, PE-9811A) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

김남원, 김철겸 (2004). "유역증발산 산정을 위한 Penman-Monteith 방법과 Morton CRAE 방법의 비교." **한국수자원학회 2004 학술대회지**, pp. 1077-1081.

- 배덕효, 김진훈 (2006). "확률론적 증장기 댐 유입량 예측(I) - 장기유출해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 261-274.
- 이길하, 오남선, 정신택 (2007). "우리나라 연안의 pan 증발량 변화 양상 분석." **한국해안·해양공학회지**, 한국해안·해양공학회, 제19권, 제3호, pp. 244-252.
- 임창수 (2007). "도시화에 따른 수문기후변화 II (도시화가 기준 증발산량에 미치는 영향)." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 571-583.
- 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., Ormag, M., Snyder, R., and Matyac, R. (2002). "Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 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*, 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). (Editor in Chief). *Handbook of Hydrology*, Chap 4., 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. 282-290
- 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." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 125, No. 2, ASCE, 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." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, No. 2, 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

(논문번호:07-147/접수:2007.12.11/심사완료:2008.03.05)