



Development of pan coefficient model for estimating evaporation: focused on Seoul station

Rim, Chang-Soo^{a*}

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon, Korea

Paper number: 20-036

Received: 21 April 2020; Revised: 15 June 2020; Accepted: 15 June 2020

Abstract

The six current models for estimating pan coefficient were applied to test the applicability of models in Seoul, South Korea. The models are Cuenca's model, Snyder's model, Pereira *et al.*'s model, Allen *et al.*'s model, Orang's model, and Raghunwanshi and Wallender's model. The estimated pan coefficients were compared with measured one. The measured pan coefficient was obtained by using measured pan evaporation and FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration. Estimated evaporation by using estimated pan coefficients was compared with measured one. Furthermore, model for estimating pan coefficient in Seoul was developed. When applying 6 current models for 10 m, 15 m and 20 m fetch distances, pan coefficient estimates from Snyder's model were most similar to measured pan coefficients for all fetch distances. On the other hand, pan coefficient estimates from Pereira *et al.*'s model were most different from measured one. Therefore, model for estimating pan coefficient in Seoul was developed by modifying Snyder's model. When applying developed model, estimated monthly average evaporation was 92.1 mm for 10 m, 15 m and 20 m fetch distances and measured one was 91.9 mm, indicating that evaporation estimate from developed model is closest to measured one, compared with those of current models.

Keywords: Pan coefficients, Evaporation, Model, Meteorological data

증발량 산정을 위한 증발접시계수 산정모형 개발: 서울지점을 중심으로

임창수^{a*}

^a경기대학교 토목공학과 교수

요 지

서울지역에 대해서 6개의 증발접시계수 산정모형들로부터 산정된 증발접시계수를 측정된 증발접시 증발량과 FAO Penman-Monteith 기준증발산량으로부터 산정된 증발접시계수와 비교함으로써 증발접시계수 산정모형들의 활용 적합성을 평가하였다. 적용된 6개의 모형은 Cuenca 모형, Snyder 모형, Pereira 등의 모형, Allen 등의 모형, Orang 모형, 그리고 Raghunwanshi와 Wallender 모형이다. 또한 산정된 증발접시계수를 이용하여 산정된 증발량을 관측된 증발량과 비교분석하였으며, 비교결과를 바탕으로 서울지역에 대해서 증발접시계수 산정모형을 개발하였다. 연구 결과에 의하면 기존에 연구자들에 의해서 제안된 6개 증발접시계수 산정모형을 10 m, 15 m 그리고 20 m의 풍역대 거리로 설정하여 적용하는 경우 모든 풍역대 거리에서 Snyder에 의해서 제안된 증발접시계수가 가장 양호한 증발접시계수 산정값을 보였다. 반면에 Pereira 등의 모형으로부터 산정된 증발접시계수 값이 관측값과 가장 큰 차이를 보였다. 따라서 서울지역을 대상으로 Snyder모형을 수정한 증발접시계수 산정모형을 유도하였다. 본 연구에서 제시한 모형을 적용하는 경우 모든 풍역대 거리(10 m, 15 m, 20 m) 조건에서 산정된 월평균 증발량은 동일하게 92.1 mm이고 관측된 월평균 증발량은 91.9 mm로서 다른 모형들과 비교하여 가장 근사한 결과를 보였다.

핵심용어: 증발접시계수, 산정모형, 증발량, 기준증발산량, 기상자료

*Corresponding Author. Tel: +82-31-249-9740
E-mail: csrim@kgu.ac.kr (C.-S. Rim)

1. 서론

증발접시와 증발접시계수를 이용한 기준증발산량 산정방법은 적용이 간편해서 일반적으로 널리 사용되고 있다. 이 방법은 수표면으로부터의 증발량과 기준증발산량과의 상관성을 증발접시계수로 표현하고 이 증발접시계수를 이용하여 수표면으로부터의 증발량을 이용해서 기준증발산량을 산정하거나(Fu *et al.*, 2004; Alvarez *et al.*, 2007) 혹은 기준증발산량을 아는 경우 이를 이용하여 수표면으로부터의 증발량을 산정할 수 있다(Irmak *et al.*, 2002). 증발접시증발량 자료는 기상 자료가 불충분한 지역에서 기준증발산량을 산정하는 데 유용하게 적용할 수 있으며, 과거 증발접시증발량 자료를 이용하여 기준증발산량을 산정하는 식들이 제안된 바 있다. Doorenbos and Pruitt (1977)은 기준증발산량을 7~15 cm 높이의 잔디가 식생된 lysimeter로부터의 증발산량으로 정의하였으며, 증발접시계가 적절하게 운용되는 경우 증발접시 증발량과 기준증발산량 사이에는 높은 상관관계가 존재한다고 발표하였다. 또한 증발접시계의 종류(Class A pan 혹은 Colorado pan), 풍역대 거리(fetch distance), 풍속, 그리고 상대습도를 이용하여 증발접시계수를 계산하는 방법인 24PAN (FAO 24 pan evaporation)을 제안하였고, 증발산량과 증발접시 증발량과의 비(증발접시계수)는 약 0.40~0.85 범위라고 발표하였다.

이후 다른 연구자들(Cuenca, 1989; Snyder, 1992; Pereira *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998; Orang, 1998; Raghuvanshi and Wallender, 1998)은 표를 이용하여 증발접시계수를 구하는 Doorenbos and Pruitt (1977)의 방법을 대신하여 증발접시계수를 풍역대 거리, 풍속, 그리고 상대습도로 나타내는 모형을 제안하였다. Pereira *et al.* (1995)에 의하면 증발접시계수를 산정하는 데 있어서 풍속과 상대습도는 쉽게 관측될 수 있다. 하지만 풍역대 거리의 경우 증발접시계가 위치한 주변 토양 및 식생조건이 건조해질수록 풍역대 거리는 감소함으로 현재 대부분의 증발접시계수 산정모형들에서 고정 값을 적용하고 있다.

Cuenca (1989)는 Frevert *et al.* (1983)이 제시한 모형의 계수 값을 반올림하는 방법으로 풍역대 거리, 풍속, 그리고 상대습도를 이용하여 증발접시계수를 산정하는 다항식을 제안한 바 있다. Snyder (1992)는 Cuenca (1989)의 모형이 너무 복잡하고 Doorenbos and Pruitt (1977)가 제시한 계수값들과 비교해서 특정 지역들에서 만족스럽지 못한 결과를 보인다고 발표하였으며, 풍역대 거리, 풍속, 그리고 상대습도 자료를 이용하여 선형회귀방법으로 증발접시계수 산정모형을 제안하였다.

과거 여러 연구자들은 Snyder모형이 적절하게 증발접시계수를 산정하는 것으로 발표하였다(Marco and Fonseca, 2002; Sabziparvar *et al.*, 2010; Tabari *et al.*, 2013; Stan and Neculau, 2015; SreeMaheswari and Jyothy, 2017). Pereira *et al.* (1995)는 증발접시 증발량자료와 Penman-Monteith식(Monteith, 1965)을 이용하여 증발접시 계수값을 최대 0.85로 설정하고 모형을 제안하였다. Allen *et al.* (1998)은 Doorenbos and Pruitt (1977)가 증발접시계수를 산정하기 위해 적용한 lysimeter 기준증발산량 대신에 잔디 높이를 0.12 m, 카노피 저항(canopy resistance)을 50 sec/m로 가정하여 기준증발산량을 산정하였으며, Doorenbos and Pruitt (1977)가 제시한 방법(24PAN)을 이용하여 증발접시계수를 계산하는 모형을 유도한 바 있다. Orang (1998)은 선형회귀방법과 풍역대 거리사이의 보간법을 이용하여 증발접시계수를 산정하는 모형을 유도하였다. Raghuvanshi and Wallender (1998)도 풍역대 거리와 풍속, 상대습도 자료를 구간 설정하여 증발접시계수모형을 유도하였다. 현재까지 제안된 대표적인 증발접시계수 산정모형들을 검토한 바에 의하면 대부분의 모형들이 증발접시계수를 산정하기 위해 풍역대 거리, 풍속, 상대습도를 입력자료로 적용하고 있다.

국내의 경우 증발접시계수는 증발접시 증발량 산정이나 기준증발산량 산정에 유용하게 적용할 수 있음에도 불구하고 기존에 국외에서 제안된 증발접시계수 산정식을 타당성 평가 없이 임의로 선정하여 적용하거나 대표적인 증발접시계수 값을 적용하고 있다. 또한 증발접시 증발량자료의 활용도도 적다. 국내에서 수행된 증발접시 증발량과 관련된 연구들을 조사한 바에 의하면 일부 연구자들에 의해서 수표면으로부터의 증발량을 산정하기 위한 증발접시 증발량 자료를 활용하는 연구가 수행된 바 있다. Cho (1973)는 소형 증발접시 증발량 자료를 이용하여 전국 주요 기상관측지점에서 저수지 증발량 산정식(Kohler *et al.*, 1955)과의 회귀식을 유도한 바 있다. 또한 대형증발량 관측자료와 기상관측자료를 이용하여 증발량 산정식의 매개변수를 추정하려는 연구가 수행된 바 있다 (Han and Lee, 2005). Kim (2010)은 결측 혹은 관측이 중단된 증발접시 증발량을 모의하기 위해 제한된 기상학적 변수와 polynomial networks 방법을 이용하여 일 증발접시 증발량을 모형화하는 연구를 수행한 바 있다. Rim (2017a, 2017b, 2019)은 기상자료를 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 식을 유도한 바 있다. Seo and Kim (2018)은 다변량 적응 회귀스플라인을 이용한 증발접시 증발량 모델의 성능을 평가한 바 있다. 하지만 국외에서 증발접시 계수를 모의하고 이를 이용하여 기준증발산량을 추정하고자 하는 연구가 활발하게 수

행되어온 것과는 다르게 국내에서는 증발접시계수 산정모형들의 적용성을 평가하고, 증발접시계수 산정을 위한 모형을 제시한 연구가 없다. 따라서 본 연구에서는 기존에 국외의 연구자들에 의해서 제시된 증발접시계수 산정모형들을 서울지역에 대해서 적용하여 활용 적합성을 평가하고, 적합한 증발접시계수 산정모형을 제시하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 우리나라 서울기상관측소의 월평균 기상자료(소형증발접시 증발량, 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간)를 이용하였으며, 지형자료는 서울기상관측소의 고도자료가 적용되었다. 서울기상관측소의 고도는 1974년부터 2010년 8월까지 85.5 m, 2010년 8월부터 2016년 6월까지 85.8 m를 적용하였다. 소형증발접시 증발량 자료의 경우 2016년 7월 1일 이후로는 관측이 중단되었다. 따라서 소형증발접시 증발량 자료의 경우 2016년 6월까지의 자료를 사용하였으며, 증발량 관측이 수행되지 않은 기간은 분석에서 제외하였다.

2.1 증발접시계수 산정모형 검토

수표면으로부터의 증발량과 기준증발산량과의 상관성을 증발접시계수로 표현할 수 있다(Eq. 1). 따라서 이 증발접시계수를 이용하여 수표면으로부터의 증발량을 이용해서 기준증발산량을 산정하거나(Fu *et al.*, 2004; Alvarez *et al.*, 2007) 혹은 기준증발산량을 아는 경우 이를 이용하여 수표면으로부터의 증발량을 산정할 수 있다(Irmak *et al.*, 2002). 과거 여러 연구자들(Cuenca, 1989; Snyder, 1992; Pereira *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998; Orang, 1998; Raghuwansi and Wallender, 1998)은 증발접시계수를 풍역대 거리(fetch distance), 풍속, 그리고 상대습도로 나타내는 모형을 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 이 모형들의 적용성을 검토하였다.

$$K_p = \frac{ET_o}{E} \quad (1)$$

$$= f(FET, u_2, RH)$$

여기서, K_p =소형증발접시계수, E =소형증발접시증발량(mm/day), ET_o =기준증발산량(mm/day), FET =풍역대 거리(m), u_2 =높이 2 m 풍속(km/day 혹은 m/sec), 그리고 RH =상대습도(%)이다.

증발접시계수는 증발접시의 형태나 풍역대 거리, 풍속 그

리고 상대습도에 따라서 영향을 받는다(Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998). Doorenbos and Pruitt (1977)는 이들 기상요소와 증발접시가 위치한 지점의 주변 환경에 따라서 증발접시계수의 범위를 0.40~0.85라고 발표한 바 있다. 또한 과거 연구결과에 의하면 증발접시계수는 상대습도에 비례하고, 풍속에 비례하며, 범위는 상대습도와 풍속에 따라서 0.3~1.1 정도를 보이는 것으로 나타났다(Allen *et al.*, 1998; Gundekar *et al.*, 2008; Rahimikhoob, 2009). Smajstria *et al.* (2000)는 습한 미국 플로리다에서 증발접시 계수는 대략 0.8 정도이고, 건조 및 준 건조지역에서는 대략 0.7 정도라고 발표하였다. 상대습도와 풍속은 비교적 쉽게 측정될 수 있다. 하지만 풍역대 거리는 산정되어야 하고, 강수조건에 따른 토양의 습윤정도에 따라서 수시로 변한다. 따라서 실제적으로 식생조건, 경계면과 증발접시계와의 거리를 풍역대 거리로 사용한다.

본 연구에서는 기준증발산량 산정을 위해서 Allen *et al.* (1998)에 의해서 제안된 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 식을 적용하였다(Eq. 2). FAO P-M식은 유도과정과 사용방법이 잘 알려져 있으며, 각종 증발산계(lysimeter)를 이용하여 측정된 증발산량과 비교 검증된 바 있다(Allen *et al.*, 1994; Droogers and Allen, 2002).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta Q_n + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

$$Q_n = Q_{ns} - Q_{nl}$$

$$Q_{ns} = (1 - \alpha) R_S$$

$$Q_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] [0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}]$$

$$\times \left[1.35 \frac{R_S}{R_{SO}} - 0.35 \right]$$

여기서, ET_o =기준증발산량(mm/day), Q_n =순복사(MJ/m²/day), Q_{ns} =단파복사량(MJ/m²/day), Q_{nl} =장파복사량(MJ/m²/day), R_S =입사단파복사량(MJ/m²/day), R_{SO} =지구상에 도달하는 태양복사량(MJ/m²/day), α =잔디피복의 경우 albedo (=0.23), T_a =지상 2 m 높이에서의 대기온도(°C), σ =Stefan-Boltzmann 상수(=4.903 × 10⁻⁹ MJ/m²/day), T_{\max} =최고기온(K), T_{\min} =최저기온(K), u_2 =지상 2 m 높이에서의 풍속(m/sec), e_s =포화 증기압(kPa), e_a =실제증기압(kPa), $(e_s - e_a)$ =포화미흡량(kPa), Δ =대기온도에서의 포화증기압 접선경사(kPa/°C), γ =습도계수(kPa/°C)이다.

Table 1. Models for estimating pan coefficients

Models		Suggested by
1	$K_p = 0.475 - (0.245 \times 10^{-3} u_2) + (0.516 \times 10^{-2} RH) + (0.118 \times 10^{-2} FET) - (0.16 \times 10^{-4} RH^2) - (0.101 \times 10^{-5} FET^2) - (0.8 \times 10^{-8} RH^2 u_2) - (0.1 \times 10^{-7} RH^2 FET)$	Cuenca (1989)
2	$K_p = 0.482 + [0.24 \ln(FET)] - (3.76 \times 10^{-4} u_2) + (0.0045 RH)$	Snyder (1992)
3	$K_p = 0.85 \times \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.33 wind_2)}$	Pereira <i>et al.</i> (1995)
4	$K_p = 0.108 - 0.0286 wind_2 + 0.0422 \ln(FET) + 0.1434 \ln(RH) - 0.000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH)$	Allen <i>et al.</i> (1998)
5	$K_p = 0.51206 - (0.321 \times 10^{-3} u_2) + (0.2889 \times 10^{-2} RH) + 0.03188 \ln(FET) - [0.107 \times 10^{-3} RH \ln(FET)]$	Orang (1998)
6	$K_p = 0.5944 + 0.024 X_1 - 0.0583 X_2 - 0.1333 X_3 - 0.2083 X_4 + 0.0812 X_5 + 0.1344 X_6$ where, $X_1 = \ln(FET)$ $X_2, X_3, X_4 = 0$ if $u_2 < 175$ (km/day) $X_2 = 1$ if $175 \leq u_2 < 425$ (km/day) $X_3 = 1$ if $425 \leq u_2 \leq 700$ (km/day) $X_4 = 1$ if $u_2 > 700$ (km/day) $X_5, X_6 = 0$ if $RH < 40$ (%) $X_5 = 1$ if $40 \leq RH < 70$ (%) $X_6 = 1$ if $RH \geq 70$ (%)	Raghuwanshi and Wallender (1998)
7	$K_p = 0.359 + [0.0248 \ln(FET)] + (0.0079 u_2) + (0.00371 RH)$ for $FET = 10m$ $K_p = 0.447 + [0.017 \ln(FET)] + (0.00069 u_2) + (0.002769 RH)$ for $FET = 15m$ $K_p = 0.4281 + [0.0021 \ln(FET)] + (0.00075 u_2) + (0.00353 RH)$ for $FET = 20m$	Present study

K_p =pan coefficient, FET =upwind buffer zone (fetch), RH =relative humidity(%), u_2 =wind speed at 2 m height (km/day), $wind_2$ =wind speed at 2 m height (m/sec)

Table 1은 본 연구에서 적용된 증발접시계수 산정모형들이다. 증발접시계수산정을 위해서 적용된 모형들은 입력자료로서 풍역대 거리, 풍속 그리고 상대습도를 적용하고 있다. 하지만 모형 3의 경우 풍역대 거리와 상대습도를 적용하고 있지 않다.

2.2 산정방법 비교 검증

6개의 증발접시계수 산정모형들(Table 1)로부터 산정된 증발접시계수(K_p)를 측정된 증발접시 증발량(E)과 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 기준증발산량(ET_o)으로부터 산정된 증발접시계수($K_p = \frac{ET_o}{E}$)와 비교함으로써 증발접시계수 산정모형들의 활용 적합성을 평가하였다. 또한 산정된 증발접시계수를 이용하여 증발량을 산정하고, 관측된 증발량과 비교분석하였다. 비교 평가를 위해서 제곱평균오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균절대편향오차(Mean Absolute Bias Error, MABE), 평균백분위오차(Mean Percentage Error, MPE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) 지수를 적용하였다.

제곱평균오차(RMSE)는 산정된 값과 관측된 값 사이의 차

이를 비교함으로써 짧은 기간 동안에 산정된 값의 신뢰도를 검증하는데 적합하다(Eq. 3). 하지만 산정된 값이 어느 일정 기간에 급격하게 커지는 경우 RMSE값은 급격하게 증가하는 문제점이 있다. RMSE값이 0에 가까울수록 산정식의 오차는 적은 것으로 간주된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,est} - H_{i,obs})^2} \tag{3}$$

평균절대편향오차(MABE)는 장기간에 걸친 산정된 값의 신뢰도 검증에 유용하게 활용된다. MABE값이 0에 가까울수록 산정된 값은 관측 값과 유사함을 의미한다(Eq. 4).

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{i,est} - H_{i,obs}| \tag{4}$$

평균백분위오차(MPE)에서 양의 MPE는 과다하게 산정된 것을 의미하고, 음의 MPE는 과소하게 산정된 것을 의미한다. 따라서 MPE값이 0에 가까울수록 산정식의 오차는 적은 것으로 판단된다(Eq. 5).

$$MPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{i,obs} - H_{i,est}}{H_{i,obs}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) 지수(Nash and Sutcliffe, 1970)의 경우 지수 값 1은 관측 값과 산정 값이 완전하게 일치함을 의미하며, $-\infty$ 부터 1까지의 범위를 갖는다(Eq. 6). 한편 지수 값 0은 산정된 값이 관측 자료의 평균값과 같음을 의미한다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - H_{i,est})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - \overline{H_{i,obs}})^2} \quad (6)$$

여기서 $H_{i,est}$ 는 산정된 i 번째 월의 증발접시계수 혹은 증발량을 나타내고, $H_{i,obs}$ 는 관측된 i 번째 월의 증발접시계수 혹은 증발량을 나타내며, $\overline{H_{i,obs}}$ 는 전 기간 동안 관측 자료의 평균값이고, n 은 자료의 총 수이다.

결정계수는 회귀모형의 설명력을 표현하는 것으로 0에 가까울수록 설명력이 낮고, 1에 가까울수록 높다고 해석할 수 있다(Eq. 7).

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \hat{y})^2} \quad (7)$$

여기서, R^2 는 결정계수, y_i 는 월별 증발량 측정값, \bar{y} 는 전체 기간의 증발량 평균값, \hat{y}_i 는 월별 증발량의 추정값이다.

3. 분석결과

3.1 풍역대 거리에 따른 증발분석

증발접시계수 산정모형에 적용되는 상대습도와 풍속은 비교적 쉽게 측정될 수 있으나, 풍역대 거리는 강수조건에 따른 토양의 습윤정도에 따라서 수시로 변한다(Pereira *et al.*, 1995). 따라서 실제적으로 식생조건의 경계면과 증발접시계수와의 거리를 풍역대 거리로 사용한다. 본 연구에서는 서울 기상관측소 지점에 대해서 풍역대 거리를 이용하여 증발접시계수를 산정하는 5개의 모형을 적용하였다. 풍역대 거리를 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m 그리고 100 m로 설정하고, 풍역대 거리에 따른 증발접시계수 변화와 증발량 변화를 비교 분석하였다.

비교분석결과 모든 지점에서 5개 증발접시계수 산정모형

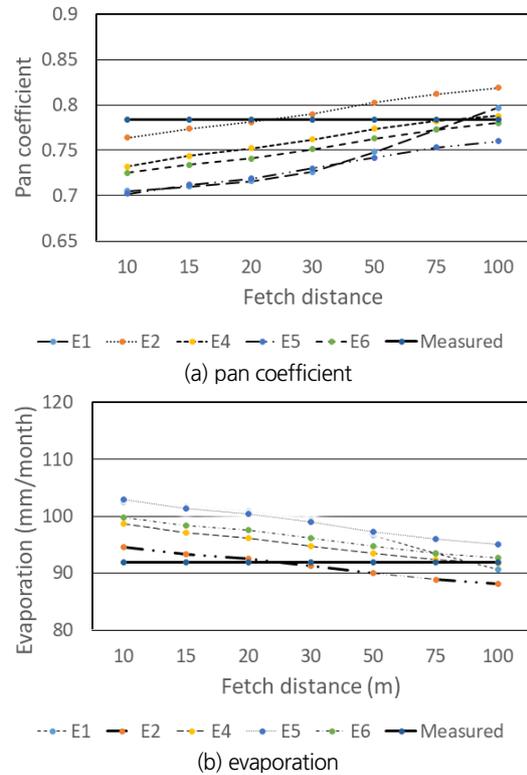


Fig. 1. Variation of pan coefficient and evaporation according to fetch distance (E1=model 1, E2=model 2, E4=model 4, E5=model 5, E6=model 6, Measured=measured pan coefficient)

들의 풍역대 거리가 증가함에 따라서 증발접시계수는 증가하고 증발량은 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 연구기간 동안 관측된 증발접시계수의 평균값은 0.784였다. 관측된 월평균 증발량은 91.9 mm였다. 증발접시계수와 증발량은 풍역대 거리를 10 m, 15 m, 20 m, 30 m로 적용하는 경우 Snyder (1992)에 의해서 제시된 모형 2가 다른 모형들에 비해서 관측값과 가장 유사한 결과를 보였다. 반면에 풍역대 거리를 50 m, 75 m, 100 m로 적용하는 경우 Allen *et al.* (1998)에 의해서 제시된 모형 4가 관측값과 가장 유사한 결과를 보였다.

3.2 증발접시계수 산정모형 평가

기존에 증발접시계수를 산정하기 위해 제안된 6개의 모형(모형 1~6)을 적용하여 증발접시계수를 산정하고 산정된 증발접시계수를 이용하여 증발량을 산정하였다(Tables 2 and 3). 관측된 증발접시계수와 증발량의 평균값은 각각 0.784, 91.9 mm/month이다. 증발접시계수를 모의 분석한 결과에 의하면 풍역대 거리를 10 m, 15 m 그리고 20 m로 설정하는 경우 기존에 연구자들에 의해서 제시된 모형 중에서는 모형 2가 관측값과 가장 근사한 결과를 보였다. 산정된 평균 증발접시계

Table 2. Comparisons of measured and estimated pan coefficient at Seoul station

Fetch distance		Models for estimating pan coefficient (K_p)							$\frac{ET_o}{E}$
		1	2	3	4	5	6	7	
10 m	Avg.	0.705	0.764	0.674	0.732	0.702	0.725	0.784	0.784
	RMSE	0.132	0.109	0.154	0.118	0.134	0.122	0.101	
	MABE	0.104	0.083	0.125	0.091	0.105	0.095	0.076	
	MPE	8.639	0.961	12.714	5.025	8.943	6.042	-1.645	
	NSE	-0.562	-0.069	-1.137	-0.239	-0.598	-0.342	0.088	
15 m	Avg.	0.710	0.774	0.674	0.744	0.712	0.734	0.785	0.784
	RMSE	0.129	0.108	0.154	0.113	0.128	0.118	0.101	
	MABE	0.101	0.082	0.125	0.086	0.100	0.091	0.076	
	MPE	7.922	-0.304	12.714	3.498	7.634	4.788	-1.687	
	NSE	-0.485	-0.042	-1.137	-0.142	-0.458	-0.250	0.083	
20 m	Avg.	0.716	0.781	0.674	0.752	0.719	0.741	0.785	0.784
	RMSE	0.126	0.107	0.154	0.110	0.124	0.115	0.101	
	MABE	0.098	0.082	0.125	0.084	0.096	0.089	0.076	
	MPE	7.202	-1.200	12.714	2.476	6.693	3.937	-1.672	
	NSE	-0.415	-0.033	-1.137	-0.091	-0.368	-0.193	0.087	

Avg.: estimated average pan coefficient, RMSE: root mean square error, MABE: mean absolute bias error, MPE: mean percentage error, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, $\frac{ET_o}{E}$ = measured pan coefficient

Table 3. Comparisons of measured and estimated evaporation at Seoul station

Fetch distance		Models for estimating pan coefficient (K_p)							Pan
		1	2	3	4	5	6	7	
10 m	Avg.	102.500	94.500	105.200	98.700	102.900	99.800	92.100	91.900
	RMSE	17.824	13.263	19.390	14.966	18.129	16.017	11.386	
	MABE	13.277	9.529	15.447	10.941	13.534	11.721	8.196	
	MPE	-11.434	-2.872	-16.862	-7.190	-11.807	-8.469	0.000	
	NSE	0.802	0.890	0.766	0.861	0.795	0.840	0.919	
15 m	Avg.	101.700	93.338	105.200	97.100	101.400	98.400	92.100	91.900
	RMSE	17.180	12.865	19.390	14.004	16.951	15.119	11.387	
	MABE	12.755	9.203	15.447	10.150	12.568	11.008	8.191	
	MPE	-10.558	-1.572	-16.862	-5.488	-10.209	-7.025	0.034	
	NSE	0.816	0.897	0.766	0.878	0.821	0.858	0.919	
20 m	Avg.	100.900	92.500	105.200	96.100	100.400	97.500	92.100	91.900
	RMSE	16.573	12.662	19.390	13.461	16.180	14.550	11.382	
	MABE	12.260	9.065	15.447	9.703	11.943	10.559	8.190	
	MPE	-9.704	-0.669	-16.862	-4.386	-9.103	-6.023	0.026	
	NSE	0.829	0.900	0.766	0.887	0.837	0.868	0.919	

Avg.: estimated average pan coefficient, MABE: mean absolute bias error(mm/month), NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, Pan: measured pan evaporation(mm/month)

수는 0.764이고, NSE 지수가 각각 -0.069, -0.042, -0.033, RMSE는 각각 0.109, 0.108, 0.107, MABE는 각각 0.083, 0.082, 0.082, MPE는 각각 0.961(%), -0.304(%), -1.200(%)를 보였다.

반면에 풍역대 거리를 입력자료로 사용하지 않는 모형 3의

경우 평균 증발접시계수는 0.674이고, NSE 지수가 -1.137, RMSE는 0.154, MABE는 0.125, MPE는 12.714(%)로서 관측값과 가장 관측값과 큰 차이를 보였다. NSE 지수값이 1에 가까울수록 관측 값과 산정 값이 일치함을 의미하며, RMSE, MABE, MPE값이 0에 가까울수록 산정식의 오차는 적은 것

으로 판단된다. 모형 3은 입력자료로서 풍역대 거리와 상대습도를 사용하지 않고 있다.

풍역대 거리를 입력자료로 사용하는 모형들에서는 풍역대 거리를 10 m로 사용하는 경우 모형 5가 평균 증발접시 계수 0.702, NSE 지수 -0.598을 보여서 가장 관측값과 큰 차이를 보였다. 풍역대 거리를 15 m로 적용하는 경우 모형 1이 평균 증발접시 계수 0.710, NSE 지수 -0.485를 보여서 가장 관측값과 큰 차이를 보였다. 풍역대 거리를 20 m로 적용하는 경우 모형 1이 평균 증발접시 계수 0.716, NSE 지수 -0.415를 보여서 가장 관측값과 큰 차이를 보였다.

증발량을 모의 분석한 결과에 의하면 풍역대 거리를 10 m, 15 m 그리고 20 m로 설정하는 경우 기존에 연구자들에 의해서 제시된 모형 중에서는 모형 2의 산정값이 관측값과 가장 근사한 결과를 보였다. 산정된 평균 증발량은 94.5 mm/month 이고, NSE 지수가 각각 0.890, 0.897, 0.900, RMSE는 각각 13.263, 12.865, 12.662, MABE는 각각 9.529, 9.203, 9.065, MPE는 각각 -2.872(%), -1.572(%), -0.669(%)를 보였다. 반면에 풍역대 거리를 입력자료로 사용하지 않는 모형 3의 경우 평균 증발접시계수는 105.2 mm/month이고, NSE 지수가 0.766, RMSE는 19.390, MABE는 15.447, MPE는 -16.862 (%)로서 관측값과 가장 큰 차이를 보였다.

3.3 수정 Snyder모형

본 연구에서 적용된 6개의 증발접시산정 모형 중에서 가장 양호한 결과를 보이는 모형 2(Snyder, 1992)를 이용하여 서울 지역에 대해서 수정한 증발접시계수 산정모형을 제안하였다. Snyder 모형(모형 2)는 과거 여러 연구자들에 의해서 적용성이 입증된 바 있다(Marco and Fonseca, 2002; Sabziparvar *et al.*, 2010; Tabari *et al.*, 2013; Stan and Neculau, 2015; SreeMaheswari and Jyothy, 2017). 모형 2는 풍역대 거리, 풍속, 그리고 상대습도 자료를 이용하여 증발접시계수를 산정한다. 증발접시계수(K_p)를 산정하기 위해 본 연구에서 제안된 모형은 Eqs. (8 ~ 10)과 같으며 풍역대 거리에 따라서 각기 다른 형태를 보였다. 입력자료로서 풍역대 거리(FET)를 10 m, 15 m 그리고 20 m로 설정하고 풍속(u_2)을 km/day, 상대습도(RH)를 %로 적용하였다. 유도된 식들에 의하면 서울지역에서 증발접시계수는 풍역대 거리와 풍속 그리고 상대습도에 따라서 증가하는 것으로 나타났다.

$$K_p = 0.359 + [0.0248 \ln(FET)] + (0.0079u_2) + (0.00371RH) \quad (8)$$

for $FET = 10\text{ m}$

$$K_p = 0.447 + [0.017 \ln(FET)] + (0.00069u_2) + (0.002769RH) \quad (9)$$

for $FET = 15\text{ m}$

$$K_p = 0.4281 + [0.0021 \ln(FET)] + (0.00075u_2) + (0.00353RH) \quad (10)$$

for $FET = 20\text{ m}$

분석결과 본 연구에서 제시한 모형(Eqs. 8 ~ 10)이 풍역대 거리 10 m, 15 m 그리고 20 m 모두에서 다른 모형들과 비교하여 관측값과 가장 근사한 값을 보였다(Tables 2 and 3). 풍역대 거리를 10 m로 증발접시계수를 모의하는 경우 RMSE는 0.101, MABE는 0.076, MPE는 -1.645mm/month, NSE지수는 0.088이고 평균 증발접시계수는 0.784이다. 풍역대 거리를 15 m로 적용하는 경우 RMSE는 0.101, RMSE는 0.076, MPE는 -1.687%, NSE 지수는 0.083이고 평균 증발접시계수는 0.785이다. 풍역대 거리를 20 m로 적용하는 경우 RMSE는 0.101, RMSE는 0.076, MPE는 -1.672%, NSE 지수는 0.087이고 평균 증발접시계수는 0.785이다. 관측된 증발접시계수는 0.784로서 모든 풍역대 거리에서 거의 근사한 값을 보였다.

과거 국외 연구사례의 경우 Doorenbos and Pruitt (1977)는 기상요소와 증발접시가 위치한 지점의 주변 환경에 따라서 증발접시계수의 범위를 0.40 ~ 0.85라고 발표한 바 있다. 또한 증발접시계수의 범위는 상대습도와 풍속에 따라서 0.3 ~ 1.1 정도를 보이는 것으로 나타났다(Allen *et al.*, 1998; Gundekar *et al.*, 2008; Rahimikhoob, 2009). Smajstria *et al.* (2000)는 습한 미국 플로리다에서 증발접시 계수는 대략 0.8 정도이고, 건조 및 준 건조지역에서는 대략 0.7 정도라고 발표하였다.

본 연구에서 제시된 증발접시계수 산정 모형을 적용한 결과 풍역대 거리를 10 m로 설정하는 경우 산정된 평균 증발접시계수는 0.784이고 월별 증발접시계수의 범위는 0.691 ~ 0.894이다. 풍역대 거리를 15 m로 설정하는 경우 산정된 평균 증발접시계수는 0.785이고 월별 증발접시계수의 범위는 0.706 ~ 0.873이다. 풍역대 거리를 20 m로 설정하는 경우 평균 증발접시계수는 0.785이고, 월별 증발접시계수의 범위는 0.696 ~ 0.888을 보였다. 관측된 증발접시계수의 평균은 0.784이고, 월별 증발접시계수의 범위는 0.498 ~ 1.321을 보였다. 따라서 국외 연구사례와 비교하여 유사한 결과를 보였다.

본 연구에서 관측된 증발접시계수와 산정된 증발접시계수들이 차이를 보이는 이유는 관측된 증발접시계수(K_p)가 측정된 증발접시 증발량(E)과 FAO Penman-Monteith(FAO P-M) 기준증발산량(ET_o)의 비($K_p = \frac{ET_o}{E}$)로서 정의된다

는 점을 감안할 때 각 연구지점들의 증발접시계수는 연구지점의 증발접시 증발량뿐만 아니라 FAOP-M 기준증발량 산정식에 영향을 미치는 기상요소들에 의해서 직접적인 영향을 받는다고 할 수 있다. FAOP-M식의 경우 에너지수지에 영향을 미치는 기상요소인 단파복사량, 장파복사량 그리고 기온뿐만 아니라 공기동력학적 기상요소인 풍속과 증기압의 영향을 동시에 받는다(Eq. 2). 반면에 본 연구에서 증발접시계수 산정을 위해 제시된 증발접시계수 산정모형(Eqs. 8 ~ 10)의 경우 에너지수지에 영향을 미치는 기상요소의 영향은 배제되고 풍역대 거리를 고정시킨 상태에서 단지 공기동력학적 기상요소(풍속, 상대습도)만의 영향을 받는다. 또한 관측된 증발접시계수가 산정된 증발접시계수보다 더 큰 범위를 보이고 있다. 이러한 이유는 월별 증발접시 증발량과 FAOP-M 기준 증발산량의 비에 영향을 미치는 입력 기상요소(단파복사량, 장파복사량, 기온)가 증발접시계수 산정식의 입력 기상요소(풍속, 상대습도)보다 상대적으로 큰 월별 변화를 보이는 것으로 판단된다.

풍역대 거리를 10 m, 15 m 그리고 20 m로 설정하고 증발량을 모의하는 경우 산정된 월평균 증발량은 모든 풍역대 거리 조건에서 92.1 mm이고, 관측된 월 평균증발량은 91.9 mm로

서 모든 풍역대 거리에서 거의 근사한 값을 보였다. NSE 지수는 모든 풍역대 거리에서 동일하게 0.919이고, RMSE는 각각 11.386, 11.387, 11.382, MABE는 각각 8.196, 8.191, 8.190, MPE는 각각 0.000(%), 0.034(%), 0.026(%)를 보였다.

Table 1에서 보여주는 바와 같이 과거 연구자들에 의해서 제안된 6개의 모형(Model 1 ~ 6)과 본 연구에서 제안된 모형(Model 7)을 적용하여 증발량을 산정하고, 산정된 증발량과 측정된 증발량과의 상관분석을 실시하였다(Figs. 2 ~ 4). 풍역대 거리를 10 m로 설정하는 경우 본 연구에서 제안된 모형의 결정계수는 0.93으로서 가장 양호한 값을 보였다. 모형 3의 결정계수는 0.90으로서 가장 양호하지 않은 결과를 보였다. 풍역대 거리를 15 m로 설정하는 경우 역시 본 연구에서 제안된 모형의 결정계수는 0.93으로서 가장 양호한 값을 보였다. 모형 3의 결정계수는 0.90으로서 가장 양호하지 않은 결과를 보였다. 또한 풍역대 거리를 20 m로 설정하는 경우 역시 본 연구에서 제안된 모형의 결정계수는 0.93으로서 가장 양호한 값을 보였다. 모형 3의 결정계수는 0.90으로서 가장 양호하지 않은 결과를 보였다.

따라서 서울지역의 경우 증발접시계수를 이용하여 FAOP-M 기준증발사량으로부터 증발량을 산정하거나 혹은 증발

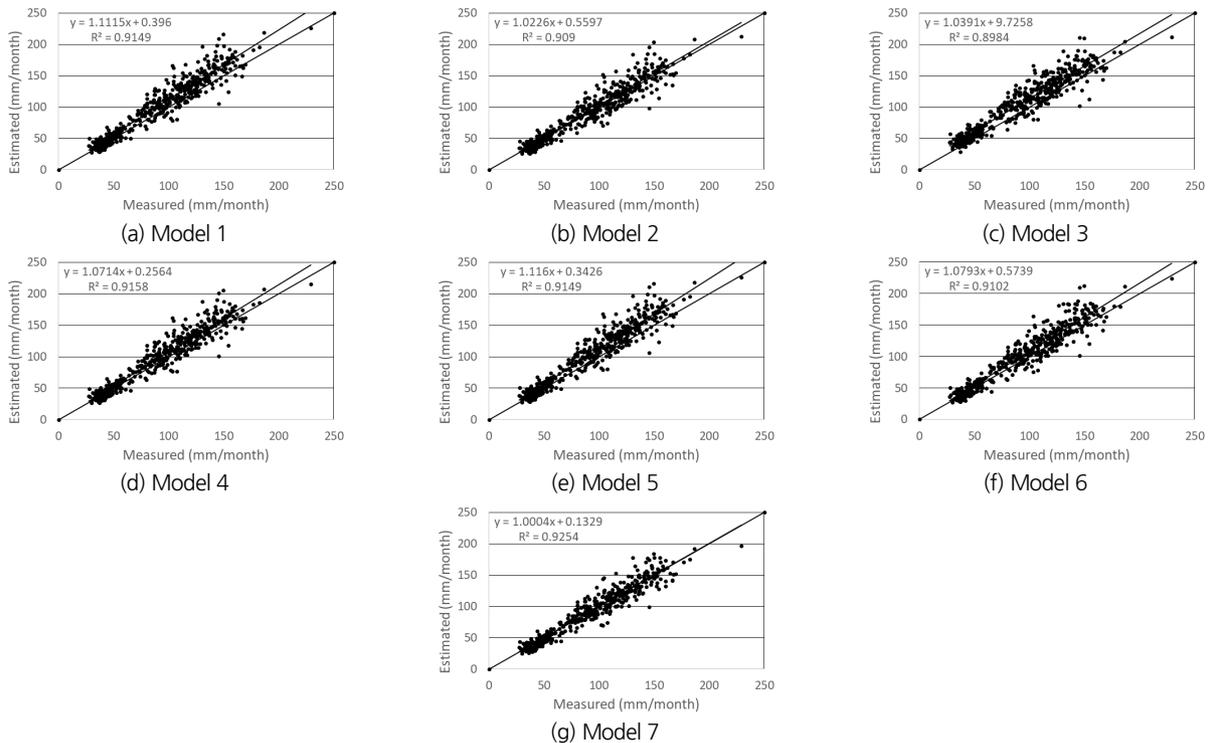


Fig. 2. A one-to-one relationship between measured and estimated evaporation (fetch distance=10 m), Model 1(Cuenca, 1989), Model 2(Snyder, 1992), Model 3(Pereira *et al.*, 1995), Model 4(Allen *et al.*, 1998), Model 5(Orang, 1998), Model 6(Raghuwanshi and Wallender, 1998), Model 7(Present study)

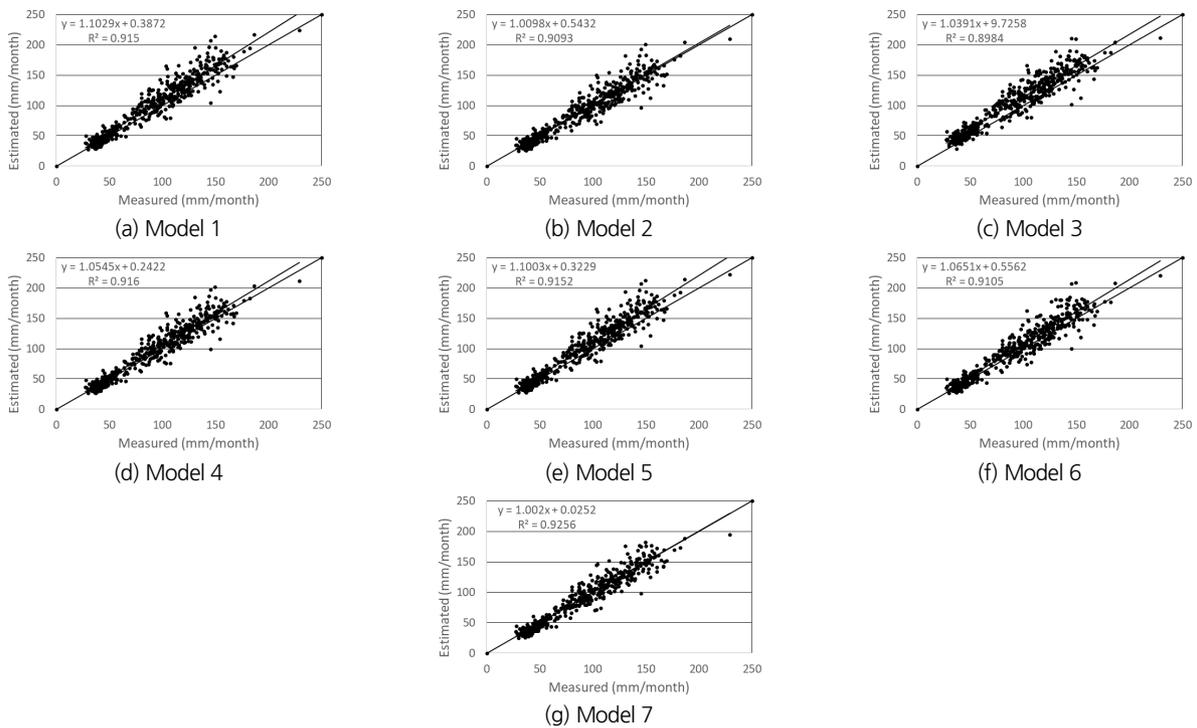


Fig. 3. A one-to-one relationship between measured and estimated evaporation(fetch distance=15 m), Model 1(Cuenca, 1989), Model 2(Snyder, 1992), Model 3(Pereira *et al.*, 1995), Model 4(Allen *et al.*, 1998), Model 5(Orang, 1998), Model 6(Raghuwanshi and Wallender, 1998), Model 7(Present study)

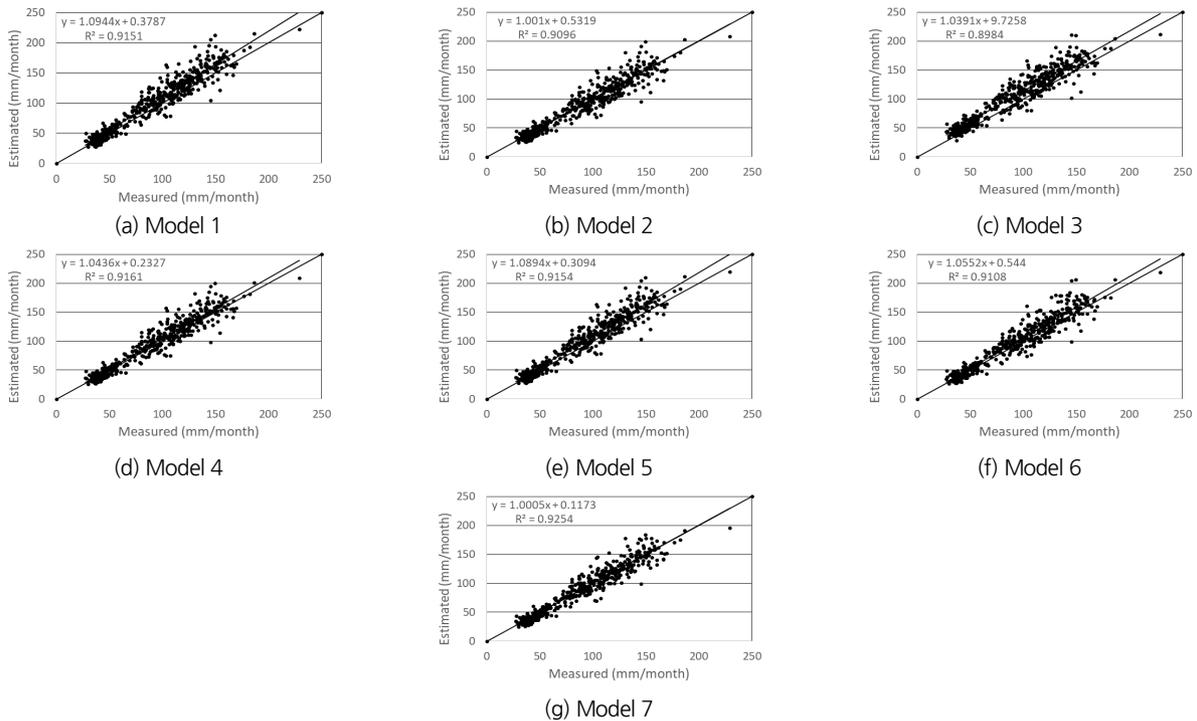


Fig. 4. A one-to-one relationship between measured and estimated evaporation(fetch distance=20m), Model 1(Cuenca, 1989), Model 2(Snyder, 1992), Model 3(Pereira *et al.*, 1995), Model 4(Allen *et al.*, 1998), Model 5(Orang, 1998), Model 6(Raghuwanshi and Wallender, 1998), Model 7(Present study)

량자료로부터 FAO P-M 기준증발산량을 산정하는 경우 본 연구에서 제안된 증발접시계수 산정모형을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 개발된 모형의 경우 서울지역에 국한하여 각기 다른 풍역대 거리에 따라서 증발접시계수를 산정하는 모형이다. 따라서 우리나라 전역에 위치한 기상관측지점을 대상으로 개발된 범용적인 모형과 비교하여 정확도 측면에서 향상된 모의결과를 보일 수 있지만 모형이 개발된 지역에 국한하여 적용할 수 있다는 한계가 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 서울지역에 대해서 6개의 증발접시계수 산정모형들(Cuenca, 1989; Snyder, 1992; Pereira *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998; Orang, 1998; Raghuwanshi and Wallender, 1998)의 활용 적합성을 평가하였다. 평가결과를 바탕으로 서울지역에 대해서 새로운 증발접시계수 산정모형을 제안하였다. 증발접시계수와 증발량을 모의 분석한 결과에 의하면 풍역대 거리를 10 m, 15 m 그리고 20 m로 설정하는 경우 모두에서 기존에 연구자들에 의해서 제시된 모형 중에서는 Snyder (1992)에 의해서 제시된 모형이 관측값과 가장 근사한 결과를 보였다. 반면에 풍역대 거리를 입력자료로 사용하지 않는 Pereira *et al.* (1995)이 제시한 모형이 관측값과 가장 큰 차이를 보였다. 풍역대 거리를 입력자료로 사용하는 모형들에서는 풍역대 거리를 10 m로 사용하는 경우 Orang (1998)이 제시한 모형이 관측값과 가장 큰 차이를 보였다. 풍역대 거리를 15 m로 적용하는 경우 Cuenca (1989)가 제시한 모형이 관측값과 가장 큰 차이를 보였다. 풍역대 거리를 20 m로 적용하는 경우 Cuenca (1989)모형이 관측값과 가장 큰 차이를 보였다.

적용된 6개의 증발접시계수 산정모형 중에서 가장 양호한 결과를 보이는 Snyder모형으로부터 서울지역에 대해서 수정한 모형을 제안하였다. 분석결과 본 연구에서 제시한 모형이 풍역대 거리 10 m, 15 m 그리고 20 m 모두에서 다른 모형들과 비교하여 관측값과 가장 근사한 값을 보였다. 본 연구에서 제시한 모형을 이용하여 풍역대 거리 10 m, 15 m 그리고 20 m에서 증발접시계수를 모의하는 경우 NSE 지수는 각각 0.088, 0.083, 0.087이다. 평균 증발접시계수는 각각 0.784, 0.785, 0.785이며, 관측된 증발접시계수는 0.784로서 모든 풍역대 거리에서 매우 근사한 값을 보였다. 풍역대 거리 10 m, 15 m, 20 m에서 월평균증발량을 모의하는 경우 NSE 지수는 동일하게 0.919이고, 월 평균 증발량은 92.1 mm이며, 관측된 증발량은 91.9 mm로서 모든 풍역대 거리에서 매우 근사한 값을

보였다. 따라서 서울지역에서 증발접시계수를 이용하여 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 기준증발산량으로부터 증발접시 증발량을 산정하거나 혹은 증발접시 증발량자료로부터 FAO P-M 기준증발산량을 산정하는 경우 본 연구에서 제안된 증발접시계수 산정모형을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 개발된 모형의 경우 모형이 개발된 서울지역에 국한하여 적용할 수 있다는 한계가 있다. 따라서 우리나라 전역에 위치한 기상관측지점을 대상으로 하는 범용적인 모형개발이 필요하다.

References

- Allen, R.G., Peretira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 56, FAO, ISBN 92-5-104219-5.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Perriera, L.S. (1994). "An update for the definition of reference evapotranspiration." *International Commission on Irrigation and Drainage Bulletin*, Vol. 43, No. 2, pp. 1-34.
- Alvarez, V.M., Gonzalez-Real, M.M., Baile, A., and Martinez, M. (2007). "A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs: Application to South Spain." *Agricultural Water Management*, Vol. 92, pp. 29-40.
- Cho, H.-K. (1973). "On lake evaporation from climatological data in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 6, pp. 5-12.
- Cuenca, R.H. (1989). *Irrigation system design: An engineering approach*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, N.J., U.S.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977). *Crop water requirements*. Rome, FAO, Irrigation and Drainage paper 24.
- Droogers, P., and Allen, R.G. (2002). "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 33-45.
- Frevert, D.K., Hill, R.W., and Braaten, B.C. (1983). "Estimation of FAO evapotranspiration coefficients." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 109, pp. 265-270.
- Fu, G., Liu, C., Chen, S., and Hong, J. (2004). "Investigating the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans." *Hydrological Processes*, Vol. 18, pp. 2247-2262.
- Gundekar, H.G., Khodke, U.M., Sarkar, S., and Rai, R.K. (2008). "Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region." *Irrigation Science*, Vol. 26, pp. 169-175.
- Han, J.-S., and Lee, B.-Y. (2005). "Measurement and analysis of free water evaporation at HaeNam paddy field." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 7, pp.

- 91-97.
- Irmak, S., Haman, D.Z., and Jones, J.W. (2002). "Evaluation of Class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 128, pp. 153-159.
- Kim, S.-W. (2010). "Modeling of daily pan evaporation using the limited climatic variables and polynomial networks approach." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, pp. 1596-1599.
- Kohler, M.A., Nordenson, T.J., and Fox, W.E. (1955). *Evaporation from pans and lakes*. U.S. Dept. Commerce Research Paper No. 38.
- Marco, A., and Fonseca, C. (2002). "Reference evapotranspiration based on Class A pan evaporation." *Scientia Agricola*, Vol. 59, No. 3, pp. 417-420.
- Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and environment." *Symposia of the Society for Experimental Biology*, Vol. 19, pp. 205-224.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models 1: A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Orang, M. (1998). *Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating Pan coefficients values in the original and FAO-24 tables*. Unpublished California Department of Water Resources Report, Sacramento, C.A., U.S.
- Pereira, A.R., Villanova, N., Pereira, A.S., and Barbieri, V.A. (1995). "A model for the Class A pan coefficients." *Agricultural Water Management*, Vol. 76, pp. 75-82.
- Raghuwanshi, N.S., and Wallender, W.W. (1998). "Converting from pan evaporation to evapotranspiration." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 124, pp. 275-277.
- Rahimikhoob, A. (2009). "An evaluation of common pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in a subtropical climate(north of Iran)." *Irrigation Science*, Vol. 27, pp. 289-296.
- Rim, C.-S. (2017a). "Estimation of small pan evaporation using temperature data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 1, pp. 37-53.
- Rim, C.-S. (2017b). "Applicability evaluation of aerodynamic approaches for evaporation estimation using pan evaporation data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 11, pp. 781-793.
- Rim, C.-S. (2019). "An evaluation of evaporation estimates according to solar radiation models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 12, pp. 1033-1046.
- Sabziparvar, A.A., Tabari, H., Aeini, A., and Ghafouri, M. (2010). "Evaluation of Class A pan coefficient methods for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid warm arid climates." *Water Resources Management*, Vol. 24, pp. 909-920.
- Seo, Y.-M., and Kim, S.-W. (2018). "Pan evaporation modeling using multivariate adaptive regression splines." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, pp. 351-354.
- Smajstria, A.G., Zazueta, F.S., Clark, G.A., and Pitts, D.J. (2000). "Irrigation scheduling with evaporation pans." Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, F.L., U.S., Bulletin, Vol. 254.
- Snyder, R.L. (1992). "Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 977-980.
- SreeMaheswari, C.H., and Jyothy, S.A. (2017). "Evaluation of Class A pan coefficient models for estimation of reference evapotranspiration using Penman-Monteith method." *International Journal of Science Technology and Engineering*, Vol. 3, No. 7, pp. 90-93.
- Stan, F.-L., and Neculau, G. (2015). "Estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation data in Romania." *Romanian Journal of Meteorology*, Vol. 12, No. 1-2, pp. 65-73.
- Tabari, H., Mark, E., and Trajkovic, S. (2013). "Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions." *Irrigation Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 107-117.