



Estimation of small pan evaporation using temperature data

Rim, Chang-Soo^{a,*}

^aDept. of Civil Engineering, Kyonggi University

Paper number: 16-080

Received: 6 September 2016; Revised: 17 November 2016 / 7 December 2016; Accepted: 7 December 2016

Abstract

Pan evaporation has been used as an indirect method for the estimation of reservoir evaporation. Therefore, in this study, pan evaporation estimation equations using only temperature data were suggested in the case that available meteorological data is limited. A formula for estimating the pan evaporation were suggested by comparing estimated pan evaporation with measured pan evaporation in 12 study areas in Korea. The suggested pan evaporation equations were verified in 44 study areas by comparing not only with temperature-based equations but also with equations using other meteorological data (temperature, wind speed, relative humidity, and sunshine duration). The study results indicate that the suggested equations in this study provide much better pan evaporation estimates, compared with other temperature-based equations. Overall, the suggested equations provide appropriate pan evaporation estimates in most of 56 study areas. Therefore, the suggested equations using only temperature data in this study are considered appropriate for the estimation of pan evaporation in Korea especially in the case that available meteorological data is limited. In the future, using the air temperature and pan evaporation data measured at the reservoir, further research is needed to examine the applicability of suggested equations for the estimation of reservoir evaporation.

Keywords: Pan Evaporation Estimation, Temperature, Geographical Characteristics, Reservoir

기온자료를 이용한 소형증발접시 증발량 산정

임창수^{a,*}

^a경기대학교 공과대학 토목공학과

요 지

증발접시 증발량의 경우 저수지 증발량을 산정하는 간접적인 방법으로 유용하게 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이용할 수 있는 기상자료가 제한적인 경우에 기온자료만을 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 식을 제안하였다. 이를 위해서 전국 12개 지역에서 관측된 증발접시 증발량과 비교를 통해 제안식을 유도하였다. 또한 전국 44개 지역에 대해서 본 연구에서 제안된 증발접시 증발량 산정식을 다른 기온자료에 기초한 식들뿐만 아니라, 여러 종류의 기상자료(기온, 풍속, 습도, 일조시간)를 필요로 하는 식들과 비교하여 적용성을 파악하였다. 연구결과에 의하면 본 연구에서 제안된 증발량 산정식들은 다른 기온자료에 기초한 식들과 비교하여 전반적으로 양호한 증발접시 증발량 산정결과를 보였다. 본 연구에서 제안된 증발량 산정식의 경우 우리나라 56개 연구지역 대부분에서 전반적으로 양호한 증발접시 증발량 산정결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 수정 제안된 기온자료만을 이용한 증발접시 증발량 산정식들은 우리나라에서 이용할 수 있는 기상자료가 제한적인 경우에 특히 적용성이 있는 것으로 판단된다. 추후에는 저수지에서 관측된 기온 및 증발접시 증발량 자료를 바탕으로 저수지 증발량 산정을 위한 제안식들의 적용성 검토연구가 필요하다.

핵심용어: 증발접시 증발량 산정, 기온자료, 지리적 조건, 저수지

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

1. 서론

IPCC (2007)에 따르면 지구온난화는 수문순환과정에 큰 영향을 미치고 있으며, 특히 기온증가에 따른 증발량 증가가 예상된다. 저수지증발은 저수지의 수량을 감소시키는 주요 수문학적 요소로서 특히 기온시기에 적절한 방법으로 저수지의 증발량을 파악하는 것은 필요하다. 강수나 저수지흐름 등에 따라서 발생하는 저수지내 열유동변화를 무시하는 경우 저수지로부터의 증발은 주로 저수지 수체에서 발생하는 에너지수지요소(즉, 순방사, 잠열, 현열, 열저류) 변화와 수증기가 대기중으로 방출되는 공기동력학적 현상에 따라서 영향을 받는 것으로 보고되어 왔다(Assouline and Mahrer, 1993; dos Reis and Dias, 1998). 또한 수심이 얇은 경우(0.5 m 이내) 열저류 변화 역시 무시할 수 있으며, 과거 세계 여러 나라에서 많은 연구자들은 열저류 변화 영향을 무시한 에너지수지 변화 영향이나 공기동력학적 변화 영향만을 고려하거나 혹은 두 영향을 동시에 고려하여 증발량을 산정하는 방법을 연구하여 왔다(Rohwer, 1931; Kohler, 1954; Penman, 1948, 1956; Cho, 1973; Lee and Kim, 1985; Valiantzas, 2006; Rotstajn et al., 2006; Lawrimore and Peterson, 2000; Shirsath et al., 2010; Dalkilic et al., 2014). 하지만 이들 증발량 산정방법들을 적용하는 경우 여러 종류의 기상자료(예를 들어, 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 일조시간 등)가 필요하다. 여러 종류의 기상요소 자료를 필요로 하는 대표적인 증발식으로는 Penman (1948)식, KNF (Kohler et al., 1955)식이 있다. 이들 식은 에너지수지방법에 기초한 에너지항과 공기동력학적 방법에 기초한 공기동력항을 조합하여 적용한 방법이다. 이들 식의 적용성은 국내외 여러 연구자들에 의해서 적용성이 입증된 바 있다(Cho, 1973; Jauregui et al., 1978; Pochop et al., 1984; Lee and Kim, 1985; Irmak and Haman, 2003).

하지만 증발량을 산정하고자 하는 지역에 따라서는 증발량을 산정하는데 필요한 기상요소들 중에서 일부 기상요소만이 존재하는 지역이 있으며, 이런 경우에는 일부 가용한 기상자료만을 이용하여 증발량을 산정할 수밖에 없다. 증발량 산정방법으로서 에너지수지방법에 기초한 대표적인 증발량산정식으로는 Priestley and Taylor (1972)식과 DeBruin and Keijman (1979)식이 있다. Priestley-Taylor식은 Penman식을 단순화한 형태의 식으로 이 식은 적용 지역의 기후조건이 습하여 증발량 산정 과정에서 Penman에 의해서 제안된 조합법의 공기동력항 영향이 미미하다는 가정 하에 Penman식의 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화한 식이다. 따라서 보다 적은 기상자료를 필요로 하고, 다습한 지역에서

적용하도록 제안된 바 있다. 하지만 Priestley-Taylor 식과 DeBruin-Keijman식 역시 에너지항을 산정하기 위해 기온뿐만 아니라 일사량과 상대습도 자료가 필요하다.

또한 에너지수지방법 적용에 필요한 기상자료가 미비한 경우에는 단지 공기동력학적 방법만을 적용하여 증발량을 산정하는 방법이 오래전부터 제안된 바 있다(Meyer, 1915; Rohwer, 1931; Thornthwaite and Holzman, 1939; Penman, 1948; Kuzmin, 1957; Konstantinov, 1968; Horton, 1971). 국내에서는 해남농경지에서 관측된 대형증발량과 기상관측자료로부터 산정된 증발량과의 상관성을 통하여 공기동력학적 방법에 기초한 증발식의 매개변수를 추정된 바 있다(Han and Lee, 2006). 하지만 공기동력학적 방법은 기온뿐만 아니라 풍속과 상대습도와 같은 기상요소 자료가 필요하다. 이들 기상요소(풍속, 상대습도) 자료는 지형특성에 따라 매우 민감한 영향을 받고, 또한 증발량 산정을 위한 정확도도 상대적으로 높지 않다.

과거 제안된 증발량 산정방법들을 검토한 바에 의하면 과거 연구자들은 증발량을 산정하기 위해서 에너지수지와 공기동력학적 방법을 조합한 증발량 산정식들이 적절한 증발량 산정결과를 제공하는 것으로 발표하였다(Cho, 1973; Jauregui et al., 1978; Pochop et al., 1984; Lee and Kim, 1985; Irmak and Haman, 2003). 하지만 에너지수지와 공기동력학적 방법을 조합한 증발량 산정방법의 경우 다양한 기상요소 자료(기온, 풍속, 상대습도, 일사량, 일조시간)를 필요로 하며, 증발량을 산정하는데 있어서 정확도는 높으나 일사량과 같은 기상자료의 경우 관측지점이 제한적으로 운영되고 있다. 반면에 다양한 기상요소 자료를 필요로 하지 않는 증발량산정 방법의 경우 증발량 산정의 정확도는 높지 않다. 따라서 가급적 여러 종류의 기상요소 자료를 필요로 하지 않으면서도 정확하게 증발량을 산정하는 식을 적용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 증발점시 증발량자료와의 비교를 통해 전국적으로 많은 지점에서 관측되고 있는 기온자료만으로 증발점시 증발량을 산정하는 방법을 검토하고 제시하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 이용할 수 있는 기상자료가 제한적인 경우에 기온자료만을 이용하여 증발점시 증발량을 산정하는 방법을 제시하였다. 기온자료는 전국적으로 많은 지점에서 관측되고 있어서 다른 기상요소(풍속, 상대습도, 일사량, 일조시간) 자료가 없는 경우에 증발량을 산정하는데 유용하게 활용

될 수 있다. 산정된 일사량자료를 이용하여 증발량을 산정하고, 산정된 증발량을 소형증발접시 증발량과 비교하였다.

2.1 연구지역 및 자료

수문기상 자료의 가용성을 검토한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 기상청에서 관리하는 우리나라 전국에 위치한 56개 기상관측지점의 기상자료를 이용하였다(Fig. 1, Table 1). 본 연구에 사용된 기상자료는 월평균 자료로서, 소형증발접시 증발량, 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 등이다. 또한 56개 기상관측지점의 가용한 수문기상자료 기간을 고려하고, 국가수자원 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공되는 자료를 활용하여 56개 연구지역의 기상관측지점을 중심으로 반경 10 km에 대해서 1975년부터 1990년도까지 4개년도(1975, 1980, 1985, 1990)에 대한 토지피복도를 분석하였다. GIS분석을 이용하여 56개 연구지역의 토지이용조건과 지역평균고도 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다(Table 1). 또한 군집분석을 활용하여 56개 연구지역을 고도, 도시화비 그리고 육지비에 따라서 여러 군집으로 분류하였다(Table 2).

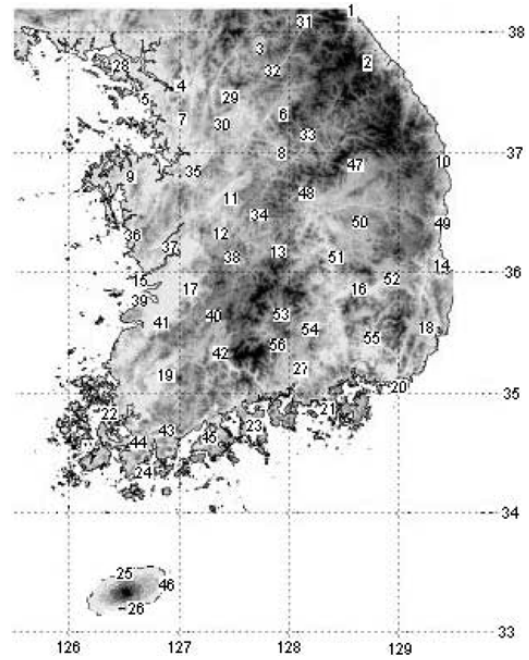


Fig. 1. 56 climatological stations in Table 1. Shadings represent topography on the Korean peninsula

Table 1. Geographical characteristic and data period for 56 study stations

Study stations (No.)	Lat. (N)	Long. (E)	Data period	Elevation (m)	Geographical classification	
					Urbanization rate (%) 4 yr mean	Inland area (km ²) 4 yr mean
Sokcho (1)	38°15'	128°34'	1973-1990	17.8	2.24	164.7
Daegwallyeong (2)	37°41'	128°46'	1972-1997	842.5	0.24	314
Chuncheon (3)	37°54'	127°44'	1967-2006	76.8	4.44	314
Seoul (4)	37°34'	126°58'	1960-2014	86.0	47.29	314
Incheon (5)	37°28'	126°38'	1960-2014	68.9	29.33	193.1
Wonju (6)	37°20'	127°57'	1973-1990	149.8	1.61	314
Suwon (7)	37°16'	126°59'	1965-2014	33.6	8.80	314
Chungju (8)	36°58'	127°57'	1973-1996	114.1	2.75	314
Seosan (9)	36°46'	126°30'	1968-2014	25.9	2.55	314
Ulsan (10)	36°59'	129°25'	1972-1990	49.4	1.21	161.1
Cheongju (11)	36°38'	127°27'	1967-2014	57.4	6.18	314
Daejeon (12)	36°22'	127°22'	1969-2014	68.3	12.97	314
Chupungnyeong (13)	36°13'	128°00'	1960-1990	242.5	0.33	314
Pohang (14)	36°02'	129°23'	1960-2014	1.9	5.73	234.2
Gunsan (15)	36°00'	126°45'	1968-1990	26.9	7.59	249.6
Daegu (16)	35°53'	128°37'	1960-1990	57.6	14.48	314
Jeonju (17)	35°49'	127°09'	1960-2014	53.5	7.59	314
Ulsan (18)	35°33'	129°19'	1960-1990	34.7	2.29	314
Gwangju (19)	35°10'	126°54'	1960-1990	70.5	10.29	314
Busan (20)	35°06'	129°02'	1960-2014	69.2	29.12	197.7

Table 1. Geographical characteristic and data period for 56 study stations (Continue)

Study stations (No.)	Lat. (N)	Long. (E)	Data period	Elevation (m)	Geographical classification	
					Urbanization rate (%) 4 yr mean	Inland area (km ²) 4 yr mean
Tongyeong (21)	34°51'	128°26'	1968-1990	31.7	1.53	182.3
Mokpo (22)	34°49'	126°23'	1960-2014	37.9	5.31	174.5
Yeosu (23)	34°44'	127°45'	1960-2006	66.1	8.24	130.0
Wando (24)	34°24'	126°43'	1973-1990	34.9	2.17	185.6
Jeju (25)	33°31'	126°32'	1960-2014	20.0	7.35	166.8
Seogwipo (26)	33°15'	126°34'	1962-2006	50.5	2.93	162.5
Jinju (27)	35°12'	128°07'	1970-2014	21.3	2.36	314
Gangwha (28)	37°42'	126°27'	1973-1990	45.7	3.80	270.2
Yangpyeong (29)	37°29'	127°30'	1973-1990	47.0	0.63	314
Icheon (30)	37°16'	127°29'	1973-1990	77.8	1.56	314
Inje (31)	38°03'	128°10'	1973-1989	198.6	0.69	314
Hongcheon (32)	37°41'	127°53'	1974-1990	140.6	1.67	314
Jecheon (33)	37°09'	128°12'	1973-1990	263.2	2.59	314
Boeun (34)	36°29'	127°44'	1973-1990	174.1	1.52	314
Cheonan (35)	36°47'	127°07'	1973-1996	24.9	4.26	314
Boryeong (36)	36°19'	126°34'	1973-1990	15.3	5.04	216.0
Buyeo (37)	36°16'	126°55'	1973-1990	11.3	3.09	314
Geumsan (38)	36°06'	127°29'	1973-1990	171.3	2.37	314
Buan (39)	35°44'	126°43'	1975-1990	10.7	4.37	284.2
Imsail (40)	35°37'	127°17'	1973-1990	246.9	0.54	314
Jeongeup (41)	35°34'	126°52'	1973-1990	44.1	3.37	314
Namwon (42)	35°24'	127°20'	1973-1990	89.7	0.91	314
Jangheung (43)	34°41'	126°55'	1973-1990	45.2	1.68	314
Haenam (44)	34°33'	126°34'	1973-1990	13.7	2.28	314
Goheung (45)	34°37'	127°17'	1973-1990	53.3	2.76	240.1
Seongsanpo (46)	33°23'	126°53'	1977-1990	18.6	1.62	169.1
Yeongju (47)	36°52'	128°31'	1973-1990	210.2	0.29	314
Mungyeong (48)	36°37'	128°09'	1973-1990	170.4	0.71	314
Yeongdeok (49)	36°32'	129°25'	1973-1990	41.2	0.33	196.6
Uiseong (50)	36°21'	128°41'	1973-1996	81.1	0.26	314
Gumi (51)	36°08'	128°19'	1973-1990	47.9	1.40	314
Yeongcheon (52)	35°58'	128°57'	1973-1990	94.1	0.39	314
Geochang (53)	35°40'	127°55'	1973-1990	220.9	0.22	314
Hapcheon (54)	35°34'	128°10'	1973-1990	32.7	0.12	314
Miryang (55)	35°29'	128°45'	1973-1996	12.6	0.95	314
Sancheong (56)	35°25'	127°53'	1973-1990	138.6	0.09	314

Table 2. Classification of study stations

	Elevation		Urbanization rate		Inland area
A	1, 7, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 51, 54, 55	A	1, 2, 34, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 18, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56	A	1, 5, 10, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 46, 49
B	2	B	4	B	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56
C	3, 4, 5, 12, 19, 20, 23, 30, 42, 50, 52	C	5, 20	C	14, 15, 36, 45
D	6, 8, 32, 34, 38, 48, 56	D	7, 12, 15, 16, 17, 19, 23, 25		
E	13, 31, 33, 40, 47, 53				

2.2 증발량 산정식

본 연구에서는 전국적으로 많은 지점에서 관측되고 있는 기온자료만을 이용하여 증발량을 산정하는 식들의 적용성을 검토하였다.

2.2.1 기온자료를 이용한 일사량 산정식 적용

본 연구에서는 Penman에 의해서 제안된 조합식(combination approach)에서 공기동력항을 제외한 에너지항만을 적용하여 증발량을 산정하는 방법을 검토하였다. 조합식에서 에너지항을 산정하기 위해 필요한 입력자료인 순방사(net radiation) 대신에 일사량을 입력자료로 적용함으로써 순방사를 적용하는 경우보다 계산과정과 입력자료를 단순화하였고, 일사량의 경우 기온자료만을 이용하여 산정된다. 따라서 적용된 식은 Penman에 의해서 제안된 조합식에서 증발량 산정에 필요한 일사량, 일조시간, 풍속, 상대습도 등의 기상자료를 필요로 하지 않는다. 적용된 식은 Eq. (1) (MT1 식)과 그리고 Makkink (1957)에 의해서 제안된 Eq. (2) (MT2 식)이다.

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_s \quad (1)$$

$$E = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_s + b \quad (2)$$

여기서, E 는 증발량(mm/day) 그리고 Q_s 는 일사량(mm/day), Δ 는 포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/°C), γ 는 건습계 상수(kPa/°C)이다. 건습계 상수를 산정하기 위해 Allen et al. (1998)에 의해서 제안된 Eqs. (3)~(4)를 적용하였다.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (3)$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (4)$$

여기서, P 는 대기압(kPa), λ 는 잠재증기화열(2.45 MJ/kg), c_p 는 비열(1.013×10^{-3} MJ/kg/°C) 그리고 ϵ 는 건조한 공기의 수증기 무게 비(= 0.622)이다.

일사량 산정을 위해 Bristow and Campbell (1984)이 제안한 기온자료를 이용하여 일사량을 산정하는 Eqs. (5)~(7)를 적용하였다.

$$Q_s = A [1 - \exp(-B \Delta T^{2.4})] Q_a \quad (5)$$

$$B = u e^{(v \Delta T)} \quad (6)$$

$$\Delta T(J) = T_{\max}(J) - (T_{\min}(J) + T_{\min}(J+1))/2 \quad (7)$$

여기서, T_{\max} 는 월평균 최고기온(°C)이고, T_{\min} 는 월평균 최저기온(°C)이며, J 는 날짜수(day number)이다. 또한 Q_s 는 일사량(MJ/m²/day)이고, Q_a 는 지구상에 도달하는 태양방사열량(MJ/m²/day), $u=0.036$, $v=-0.154$ 이다. A 는 지역에 따라 다른 값을 갖는 상수로서 미국 여러 지역에서 0.70과 0.77사이의 수치를 보였다. 본 연구에서는 관측된 증발접시 증발량을 이용하여 증발량 산정식들의 매개변수를 산정하기 위해 Nash-Sutcliffe 지수(NSE)를 적용하였다. NSE 지수는 -∞에서 1까지의 범위를 가지며, 1에 가까울수록 관측값과 산정값이 완전히 일치함을 의미한다.

2.2.2 Linacre식

Linacre (1977)는 기온만을 이용하여 증발산량을 산정하는 다음과 같은 Eq. (8)을 제안하였으며, 본 연구에서는 증발접시 증발량 모의정도를 알아보기 위하여 식의 적용성을 검토하였다.

$$E = \frac{500 T_m / (100 - A) + 15(T_a - T_d)}{80 - T_a} \quad (8)$$

여기서, E 는 증발량(mm/day), $T_m = T + 0.006h$, T 는 기온(°C) h 는 표고(m), A 는 위도(degrees) 그리고 T_d 는 이슬점 온도(°C)이다.

2.2.3 Romanenko식

Romanenko (1961)는 기온과 상대습도의 관계로부터 증발산량을 산정하는 다음과 같은 Eq. (9)를 제안하였으며, 본 연구에서는 증발접시 증발량 모의정도를 알아보기 위하여 식의 적용성을 검토하였다.

$$E = 0.0018(25 + T_a)^2(100 - Rh) \quad (9)$$

$$Rh = \frac{e_o(T_d)}{e_o(T_a)} \quad (10)$$

여기서, E 는 증발량(mm/day), $e_o(T_d)$ 는 기온 T_d (°C)에서의 포화증기압 그리고 $e_o(T_a)$ 는 이슬점 온도 T_a (°C)에서의 포화증기압이다.

2.2.4 Hargreaves-Samani식

Hargreaves and Samani (1985)는 잔디에서 증발산량을 계산하는 다음과 같은 식을 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 증발접시 증발량 모의정도를 알아보기 위하여 식의 적용성을 검토하였다. Eq. (11)은 FAO (Food and Agriculture Organization)에 의해서 대기온도 자료만이 가용한 경우에 적용하도록 채택된 바 있으며(Allen et al., 1998), 상대습도나 풍속과 같은 지역적 특성에 영향을 받는 기후요소를 고려하지 못하는 단점이 있으나, 계산이 간단하고 최소한의 기후자료를 필요로 하는 장점이 있다.

$$E = \alpha R_a T D^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (11)$$

여기서, E 는 증발량(mm/day), α 는 0.0023, TD 는 최고기온과 최저기온의 차(°C), R_a 는 태양복사량(mm/day), T_a 는 2 m 높이에서의 기온(°C)이다.

2.2.5 기존의 증발량 산정식 검토

본 연구에서는 기온자료만을 이용하여 증발량을 산정하는 식들의 적용성을 검토하기 위해 기온자료를 포함한 다양한 다른 기상요소 자료를 이용하는 식들 중에서 대표적인 식들을 비교 검토하였다. 비교 검토된 식은 많은 기상자료를 필요로 하지만 정확도가 높은 것으로 알려진 Penman식, Kohler-Nordenson-Fox (KNF)식과 Priestley-Taylor식, Debruin-Keijman식 그리고 Rohwer식 등이다(Table 3). 기존의 잠재 증발산량 산정식들의 소형증발접시 증발량 산정을 위한 적용성을 비교 평가하기 위해서 증발은 수표면(albedo=0.06)에서 발생하는 것으로 가정하였다.

Table 3. Methods for calculation of potential evaporation

Method	Reference	Equation
Penman	Penman, 1948; Linacre, 1993; Valiantzas, 2006; Allen et al., 1998	$E = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$
KNF	Kohler, Nordenson, and Fox 1955; Lamoreux, 1962; Jensen, 1974; Burman and Pochop, 1994	$E = \frac{R_n \Delta + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$
Priestley-Taylor	Priestley and Taylor, 1972; Irmak and Haman, 2003	$E = 1.26 \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma}$
Debruin-Keijman	DeBruin and Keijman, 1979	$E = \frac{\Delta}{0.85\Delta + 0.63\gamma} R_n$
Rohwer	Rohwer, 1931	$E = 0.0587(1 + 0.27u_2)(e_s - e_a)$

E = evaporation (mm/day), R_n = net radiation (mm/day) based on Allen et al. (1998), albedo=0.06, u_2 =wind speed at 2 m height (m/sec), e_s = saturated vapor pressure (kPa), e_a =actual vapor pressure (kPa), Δ =slope of the saturated vapor pressure (kPa/°C) based on Allen et al. (1998), γ =psychrometric constant (kPa/°C) based on Allen et al. (1998), E_a =drying power of the air (mm/day), $R_n \Delta$ =effective net radiation (mm/day) based on Kohler, Nordenson, and Fox (1955)

3. 분석결과

3.1 기온자료를 이용한 증발량 산정식 제시

과거 연구결과에 의하면 에너지수지와 공기동력학적 이론에 근거한 조합식이 증발량 산정에 적절한 것으로 보고되었다 (Cho, 1973; Jauregui et al., 1978; Pochop et al., 1984; Lee and Kim, 1985; Irmak and Haman, 2003). 하지만 조합식의 경우 에너지항 뿐만 아니라 공기동력항을 포함하고 있어서 여러 기상관측자료(일사량, 기온, 일조시간, 풍속, 상대습도)가 없는 경우에는 적용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 기온자료만으로도 증발량을 산정할 수 있도록 공기동력항을 제외한 에너지항만을 반영한 증발식을 제안하였다. 이를 위해서 소형증발접시 증발량과 일사량자료가 양호한 12개 지역(서울, 인천, 수원, 서산, 청주, 대전, 포항, 전주, 부산, 목포, 제주, 진주)에 대해서 Eq. (1) (MT1 식)과 Eq. (2) (MT2 식)를 이용한 증발량 산정식을 적용하였다.

식 적용에 필요한 일사량을 산정하기 위해서 Bristow and Campbell (1984)이 제안한 기온자료를 이용한 일사량 산정식 Eqs. (5)~(7)을 우리나라 지역 특성에 맞도록 수정하고 계수값을 추정하였다. 본 연구에서 제안된 일사량 산정식은 다음 Eqs. (12)~(14)와 같다. Fig. 2는 Eqs. (1) and (2)를 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 흐름도를 보여준다.

$$Q_s = [1 - \exp(-\beta \Delta T^{2.4})] Q_a \tag{12}$$

$$\beta = k_1 (\overline{\Delta T})^{k_2} = 0.3668 (\overline{\Delta T})^{-2.2} \tag{13}$$

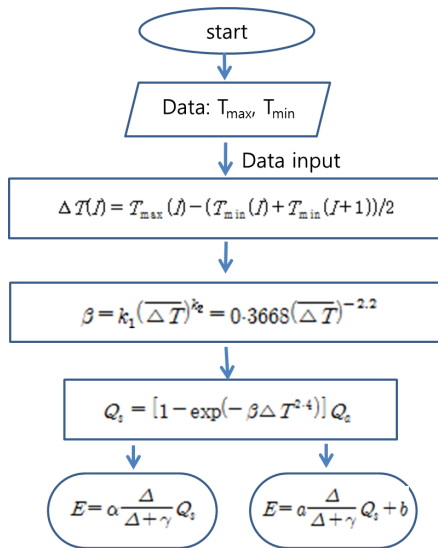


Fig. 2. Flowchart for pan evaporation calculation using Eqs. (1) and (2)

$$\Delta T(t) = T_{\max}(t) - (T_{\min}(t) + T_{\min}(t+1))/2 \tag{14}$$

여기서, T_{\max} 는 월평균 최고기온(°C)이고, T_{\min} 는 월평균 최저기온(°C)이며, t 는 날짜 수(day number)이다. 또한 Q_s 는 일사량(MJ/m²/day)이고, Q_a 는 지구상에 도달하는 태양방사열량(MJ/m²/day)이다.

본 연구에서는 Bristow and Campbell (1984)의 일사량 산정식인 Eq. (6) 대신에 우리나라에 적합하다고 판단되는 Eq. (13)을 적용하여 12개 연구지역에 대해서 각 월별로 매개변수 k_1 과 k_2 를 추정하였다. 분석결과 k_1 은 0.3668, k_2 는 -2.20인 것으로 나타났다. Fig. 3은 월별로 Eq. (13)의 종속변수 β 와 독립변수인 월평균 최고기온과 최저기온의 차(ΔT)의 상관성을 보여준다. 회귀분석결과 결정계수는 0.885를 보였다.

또한 Eq. (12)로부터 산정된 일사량과 관측된 일사량을 월별로 비교 분석하였다. 비교분석한 결과에 의하면 거의 모든 월에서 산정된 일사량과 관측된 일사량 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 월별로 비교하면 7월이 가장 큰 차이(2.437 MJ/m²/day)를 보였고, 반면에 11월이 가장 작은 차이(0.074 MJ/m²/day)를 보였다. 산정된 일사량과 관측된 일사량의 월별 상관분석을 실시한 결과 상관계수는 0.955로서 상당히 높은 상관성을 보였다(Fig. 4). 본 연구에서 적용된 증발산 산정식 Eq. (1) (MT1 식)과 Eq. (2) (MT2 식)의 계수 값을 월별로 최적화한 결과는 Table 4에서 보여주는 바와 같다. Eq. (1) (MT1 식)을 이용하여 증발량을 산정하는 경우 계수 α 는 대기가 건조한 겨울철에 큰 값을 보이는 반면에 대기가 습윤한 여름철에 작은 값을 보였다. ASCE (1990)에 따르면 건조지역이나 준건조지역의 경우 계수 α 는 1.7~1.75정도를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안된 MT1 식과 MT2 식을 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 경우 기온변화가 증발량 산정에 미치는 영향의 민감도를 분석하기 위해 수원, 대전 그리고

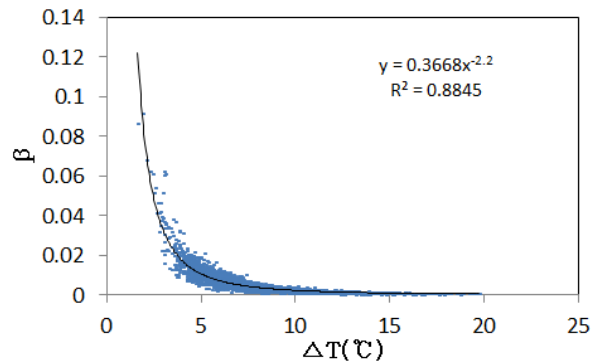
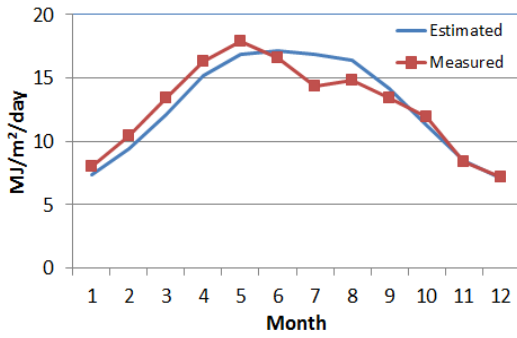
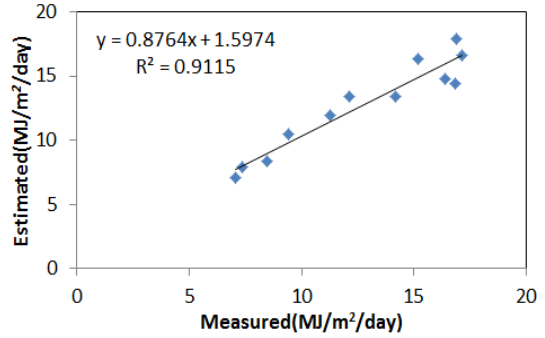


Fig. 3. The β value as a function of monthly mean temperature difference ΔT (°C)



(a) Monthly measured and estimated solar radiation



(b) Correlation between measured and estimated solar radiation

Fig. 4. Comparison of measured and estimated solar radiation

Table 4. Coefficient estimates of suggested equations (1) and (2)

Month	$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_s$ (Eq. 1)	$E = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_s + b$ (Eq. 2)	
	α	a	b
1	1.320	37.668	4.170
2	1.205	24.038	16.041
3	1.177	15.403	49.249
4	1.129	18.433	52.885
5	1.079	39.154	-24.138
6	0.978	35.042	-26.219
7	0.862	62.452	-170.060
8	0.930	83.159	-255.120
9	0.947	16.209	47.091
10	1.101	43.992	-26.464
11	1.154	45.660	-19.266
12	1.286	46.773	-8.051

제주지역을 대상으로 민감도분석을 실시하였다. 분석을 위해 기온을 -50%에서 +50%까지 25% 간격으로 변화시키면서 증발량 산정결과를 비교하였다. 분석결과 MT1식과 MT2식 모두에서 기온이 증가함에 따라 증발량이 증가함을 확인할

수 있었다. 분석결과에 의하면 MT2식이 MT1식보다 더 기온 변화에 민감하게 작용하였다(Fig. 5).

Table 5는 본 연구에서 적용된 기온자료를 이용한 식들을 포함한 10가지 식으로부터 산정된 우리나라 12개 연구지역의 증발량과 증발접시 증발량의 평균값, 표준편차 그리고 왜곡도계수를 보여준다. 분석결과에 의하면 지역별 평균 증발접시 증발량은 가장 적은 증발량을 보인 대전지역(87.6 mm) 으로부터 가장 많은 증발량을 보인 포항지역(113.0 mm)까지 최대 25.4 mm의 편차를 보이는 것으로 나타났다. 표준편차의 경우 가장 작은 증발량 편차를 보인 지역은 부산(27.8 mm)이고, 가장 큰 편차를 보인 지역은 청주(43.9 mm)이다. 왜곡도계수의 경우 모든 지역에서 평균이 중앙값보다 큰 값($Sk > 0$)을 보여서 양의 왜곡 분포(positively skewed distribution)를 보이는 것으로 나타났다.

기온자료를 이용한 증발량 산정식으로부터 산정된 증발량과 증발접시 증발량의 평균값을 비교한 바에 의하면 서울, 수원, 부산, 목포지역의 경우 MT1식이 다른 식들과 비교하여 증발접시 증발량과 가장 유사한 결과를 보였다. 대전과 진주지역의 경우 Hargreaves식이 가장 유사한 결과를 보였다. 포항지역의 경우 Penman식이 증발접시 증발량과 가장 유사한

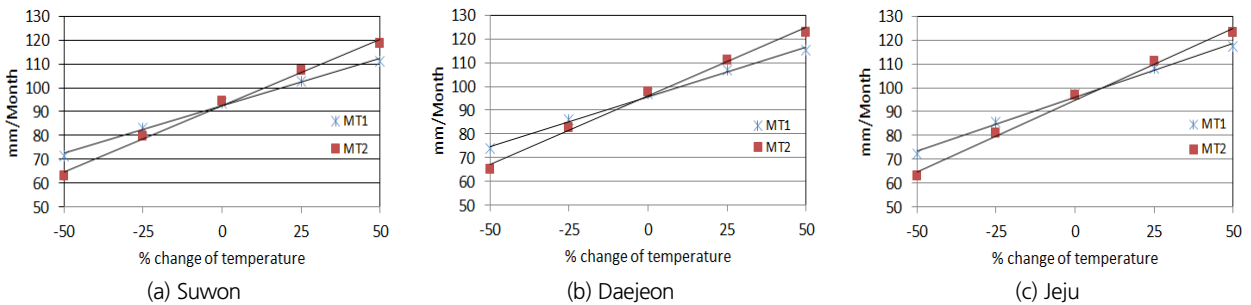


Fig. 5. Sensitivity of estimated pan evaporation according to temperature change using MT1 and MT2 equations

Table 5. Statistics of measured and estimated monthly pan evaporation for the study period

Study station	pan	Temperaure-based equation					M1	M2	M3	M4	M5	
		MT1	MT2	MT3	MT4	MT5						
Seoul (4)	Mn	92.3	92.6	93.3	80.4	84.9	96.0	100.0	96.4	93.3	98.4	82.1
	SD	40.6	39.0	39.2	45.3	35.3	46.6	48.6	55.8	41.8	54.8	39.1
	Sk	0.176	-0.141	-0.133	0.004	0.190	-0.076	-0.018	0.017	0.163	-0.009	0.358
Incheon (5)	Mn	96.9	89.6	89.4	73.8	70.4	86.4	104.4	101.0	94.9	103.3	73.1
	SD	39.0	36.3	35.3	40.1	25.7	41.4	47.5	58.8	37.0	57.9	28.0
	Sk	0.181	-0.156	-0.190	0.005	0.167	0.000	-0.042	0.031	0.073	-0.001	0.213
Suwon (7)	Mn	91.9	93.6	94.4	84.4	70.1	84.3	95.3	99.9	83.4	102.2	62.1
	SD	41.4	38.7	39.2	46.0	30.4	46.1	49.8	58.5	40.9	57.5	31.9
	Sk	0.105	-0.150	-0.129	-0.038	0.307	0.054	-0.006	0.041	0.126	0.011	0.571
Seosan (9)	Mn	88.7	93.5	94.1	83.4	58.4	77.0	96.6	100.5	83.2	102.9	56.6
	SD	40.2	37.1	37.3	44.2	23.3	42.4	48.8	57.7	39.5	56.8	26.3
	Sk	0.144	-0.142	-0.125	-0.034	0.233	0.047	-0.007	0.049	0.106	0.017	0.325
Cheongju (11)	Mn	90.0	96.4	97.6	88.8	78.9	90.6	98.8	101.5	89.5	103.5	72.1
	SD	43.9	39.4	40.7	48.2	37.8	49.3	52.0	58.9	45.9	57.7	39.6
	Sk	0.081	-0.155	-0.091	-0.037	0.274	-0.028	0.003	0.058	0.120	0.028	0.327
Daejeon (12)	Mn	87.6	96.9	97.8	88.3	76.3	90.1	99.8	103.1	89.2	105.1	69.6
	SD	42.8	38.2	39.3	46.6	32.8	45.5	51.6	59.0	44.8	57.8	36.2
	Sk	0.156	-0.152	-0.083	-0.028	0.264	-0.013	0.003	0.059	0.141	0.027	0.392
Pohang (14)	Mn	113.0	96.4	96.5	82.7	89.8	101.1	110.2	102.8	105.4	104.7	91.5
	SD	41.8	34.1	34.4	40.1	23.0	33.1	44.3	55.9	34.8	54.9	29.0
	Sk	0.689	-0.135	-0.053	0.071	0.423	0.175	0.098	0.086	0.408	0.054	0.626
Jeonju (17)	Mn	88.1	98.7	100.1	90.7	77.7	91.5	97.5	102.8	85.7	104.8	68.2
	SD	43.3	37.9	39.6	47.6	33.6	47.5	49.2	56.8	42.9	55.5	36.7
	Sk	0.145	-0.155	-0.063	-0.031	0.178	0.060	-0.023	0.018	0.111	-0.013	0.421
Busan (20)	Mn	99.8	96.4	95.1	77.9	91.0	104.4	120.4	107.6	117.4	109.5	102.9
	SD	27.8	30.1	29.1	32.9	20.8	28.0	41.2	55.8	30.2	54.8	26.6
	Sk	0.478	-0.220	-0.158	-0.107	0.398	0.223	0.082	0.095	0.467	0.063	0.703
Mokpo (22)	Mn	97.4	96.9	96.9	81.5	68.5	87.8	111.9	107.4	102.4	109.4	79.6
	SD	40.3	32.6	32.4	38.2	25.0	39.4	46.0	57.1	38.3	55.9	33.2
	Sk	0.406	-0.194	-0.132	-0.070	0.428	0.093	0.005	0.067	0.229	0.029	0.705
Jeju (25)	Mn	106.8	97.5	97.0	76.8	81.7	96.4	116.1	109.4	107.3	111.1	91.3
	SD	42.3	29.2	28.7	35.2	24.8	35.5	45.1	58.8	37.1	57.6	31.1
	Sk	0.491	-0.184	-0.139	0.053	0.596	0.315	0.218	0.207	0.539	0.167	0.858
Jinju (27)	Mn	92.9	100.5	101.1	93.9	75.3	90.0	99.8	104.4	88.8	106.5	66.5
	SD	33.9	35.4	36.6	43.7	23.9	38.4	45.3	54.8	35.6	53.6	26.1
	Sk	0.133	-0.175	-0.059	-0.062	0.322	0.144	0.017	0.045	0.246	0.009	0.540

pan: pan evaporation; MT1: suggested Eq. 1, MT2: suggested Eq. 2, MT3: Hargreaves, MT4: Romanenko, MT5: Linacre, M1: Penman, M2: Priestley-Taylor, M3: KNF, M4: Debruin-Keijman, M5: Rohwer, Mn: mean (mm/month), SD: standard deviation (mm/month), Sk: skewness

결과를 보였고, 인천과 제주지역의 경우 KNF식이 가장 유사한 결과를 보였다. 증발접시 증발량과 기온자료를 이용한 증발량 산정식의 표준편차를 비교한 바에 의하면 대부분의 연구 지역에서 MT2, MT3, M3식이 $\pm 10\%$ 범위에서 증발접시 증발량의 표준편차와 유사한 값을 보였다. 왜곡도계수를 분석한 결과 산정된 증발량이 평균 증발량보다 작은 값을 보인 경우 왜곡도계수가 음의 왜곡분포(negatively skewed distribution)를 보였고, 평균 증발량보다 큰 값을 보인 경우 양의 왜곡분포(positively skewed distribution)를 보였다.

또한 Fig. 6은 우리나라 4개 연구지역에 대해서 기온자료를 이용한 5가지 식(MT1식~MT5식)으로부터 산정된 증발량과 증발접시 증발량의 월별 평균값을 보여준다. 거의 대부분의 지역에서 Romanenko식과 Linacre식을 제외하고 월별로 유사한 증발량 변화를 보여주고 있다. 특히 Romanenko식의 경우 모든 연구지역에서 겨울철을 제외하고 과소한 증발량을 산정하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안된 MT1식과 MT2식의 경우 거의 대부분 지역에서 증발접시 증발량과 유사한 증발량을 산정하는 것으로 나타났다.

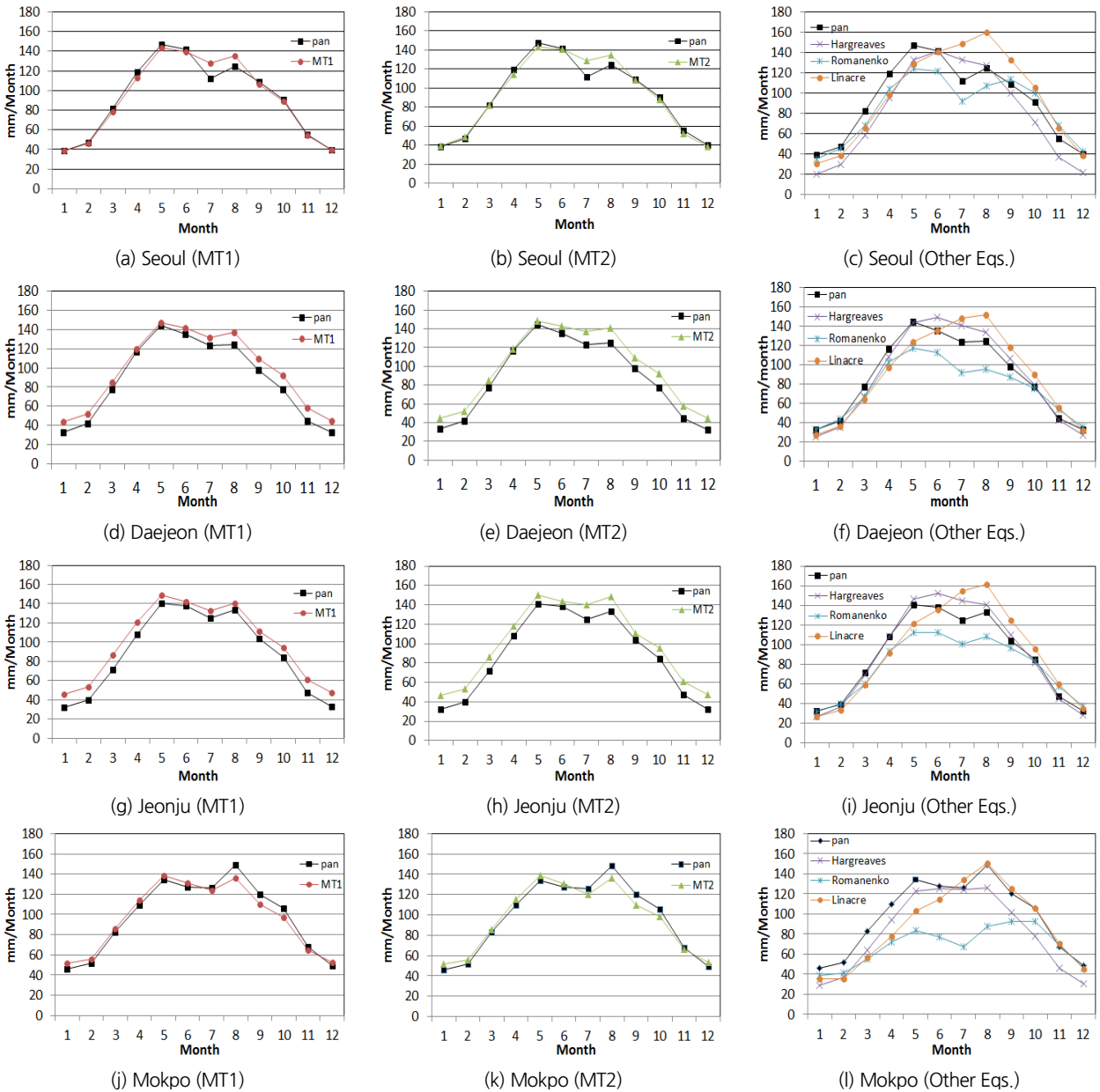


Fig. 6. Comparison of measured and estimated pan evaporation (temperature-based method)

3.2 증발량 산정식 비교

본 연구에서는 기온자료에 기초한 5가지 식들(MT1식~MT5식)을 이용하여 증발량을 산정하고 그 적용성을 평가하기 위해 속초 등 56개 지역에 대해서 관측된 증발접시 증발량과 비교 검토하였다. 또한 기온자료 이외에 추가적으로 다른 기상자료를 필요로 하는 5가지 식들(M1식~M5식)과의 비교를 통해 기온자료만을 이용하여 증발량을 산정하는 식들의 적용성을 파악하였다(Table 6). 본 연구에서 적용된 기온자료에 기초한 5가지 식은 기존의 식들을 수정하여 제안한 2가지 식, 즉 제안식 1(MT1식), 제안식 2(MT2식)와 3가지의 다른

기온자료에 기초한 식들, 즉 Hargreaves-Samani식(MT3식), Romanenko식(MT4식) 그리고 Linacre식(MT5식) 등이다. 본 연구에서 비교 평가된 기온뿐만 아니라 다른 기상자료에 기초한 5가지 식들은 Penman 증발량산정식(M1식), Priestley-Taylor식(M2식), KNF식(M3식), Debruin-Keijman식(M4식), Rohwer식(M5식) 등이다.

분석결과에 의하면 전반적으로 본 연구에서 적용성을 검토하고자 하는 기온자료를 적용한 식들 중에서 본 연구에서 제안된 MT1식이나 MT2식의 경우 다른 기온자료에 기초한 식들과 비교하여 전반적으로 양호한 증발량 산정결과를 보였

Table 6. Evaluation of monthly pan evaporation estimates based on NSE

Study station	Temperature-based equation					M1	M2	M3	M4	M5
	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5					
Sokcho (1)	0.356	0.386	-0.523	-0.218	0.278	0.619	-0.316	0.848	-0.244	-0.065
Daegwallyeong (2)	0.610	0.675	0.262	-0.861	0.199	0.655	0.169	0.802	0.180	-0.602
Chuncheon (3)	0.869	0.864	0.861	0.629	0.722	0.884	0.682	0.937	0.684	0.417
Seoul (4)	0.861	0.870	0.728	0.753	0.664	0.814	0.658	0.924	0.678	0.765
Incheon (5)	0.756	0.773	0.398	0.043	0.487	0.756	0.461	0.885	0.485	0.268
Wonju (6)	0.888	0.888	0.858	0.512	0.698	0.764	0.414	0.868	0.416	0.160
Suwon (7)	0.892	0.899	0.847	0.422	0.646	0.869	0.668	0.889	0.674	0.204
Chungju (8)	0.808	0.788	0.807	0.647	0.691	0.691	0.235	0.892	0.222	0.328
Seosan (9)	0.859	0.869	0.833	0.091	0.584	0.818	0.568	0.912	0.562	0.089
Uljin (10)	0.632	0.635	0.109	-0.456	0.335	0.705	0.026	0.928	0.057	-0.056
Cheongju (11)	0.893	0.889	0.902	0.738	0.768	0.867	0.711	0.959	0.713	0.701
Daejeon (12)	0.841	0.842	0.885	0.653	0.725	0.789	0.597	0.917	0.595	0.602
Chupungnyeong (13)	0.714	0.736	0.492	0.034	0.506	0.879	0.633	0.853	0.684	0.138
Pohang (14)	0.504	0.534	0.145	0.075	0.447	0.727	0.388	0.758	0.441	0.305
Gunsan (15)	0.852	0.862	0.633	-0.195	0.581	0.784	0.610	0.923	0.614	0.351
Daegu (16)	0.761	0.801	0.680	0.566	0.698	0.907	0.770	0.955	0.802	0.790
Jeonju (17)	0.834	0.828	0.893	0.705	0.748	0.859	0.694	0.919	0.684	0.546
Ulsan (18)	0.702	0.750	0.490	-0.315	0.504	0.835	0.498	0.821	0.537	-0.258
Gwangju (19)	0.835	0.858	0.819	0.305	0.713	0.885	0.746	0.897	0.753	0.321
Busan (20)	0.546	0.578	-0.094	-0.120	0.470	-0.105	-0.713	0.416	-0.668	0.329
Tongyeong (21)	0.720	0.755	0.475	-0.080	0.520	0.417	-0.254	0.862	-0.249	0.002
Mokpo (22)	0.751	0.767	0.605	-0.086	0.612	0.663	0.480	0.800	0.485	0.300
Yeosu (23)	0.355	0.334	-0.667	-0.454	0.436	0.771	0.163	0.870	0.230	0.037
Wando (24)	0.589	0.562	-0.012	-0.924	0.316	0.801	0.426	0.660	0.445	-1.010
Jeju (25)	0.685	0.694	0.312	0.011	0.654	0.843	0.652	0.895	0.665	0.364
Seogwipo (26)	0.584	0.605	-0.023	-0.091	0.569	0.599	0.116	0.876	0.152	0.271
Jinju (27)	0.776	0.774	0.727	0.408	0.630	0.714	0.285	0.912	0.301	0.170
Ganghwa (28)	0.820	0.816	0.781	0.370	0.628	0.578	-0.056	0.923	-0.086	0.040
Yangpyeong (29)	0.780	0.742	0.727	0.698	0.648	0.689	0.272	0.908	0.260	0.469
Icheon (30)	0.864	0.863	0.859	0.441	0.682	0.776	0.401	0.896	0.392	0.062

Table 6. Evaluation of monthly pan evaporation estimates based on NSE (Continue)

Study station	Temperature-based equation					M1	M2	M3	M4	M5
	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5					
Inje (31)	0.875	0.872	0.817	0.405	0.632	0.834	0.619	0.910	0.630	0.306
Hongcheon (32)	0.865	0.840	0.832	0.513	0.733	0.839	0.526	0.909	0.519	0.107
Jecheon (33)	0.815	0.798	0.812	0.683	0.718	0.816	0.533	0.948	0.527	0.461
Boeun (34)	0.884	0.890	0.902	0.270	0.676	0.888	0.659	0.903	0.655	-0.057
Cheonan (35)	0.861	0.848	0.879	0.430	0.738	0.679	0.206	0.932	0.180	0.235
Boryeong (36)	0.896	0.906	0.822	-0.238	0.478	0.680	0.176	0.867	0.165	-0.414
Buyeo (37)	0.880	0.864	0.866	0.088	0.634	0.485	-0.354	0.884	-0.384	-0.287
Geumsan (38)	0.784	0.757	0.744	0.255	0.575	0.591	0.037	0.839	0.023	-0.122
Buan (39)	0.881	0.902	0.791	-0.586	0.361	0.812	0.429	0.810	0.433	-0.877
Imsil (40)	0.740	0.701	0.742	0.385	0.729	0.499	-0.294	0.908	-0.347	-0.086
Jeongeup (41)	0.696	0.669	0.750	0.647	0.774	0.484	-0.194	0.863	-0.234	0.343
Namwon (42)	0.798	0.768	0.749	0.326	0.680	0.762	0.283	0.898	0.277	-0.104
Jangheung (43)	0.782	0.779	0.695	-0.090	0.465	0.732	0.273	0.820	0.292	-0.467
Haenam (44)	0.804	0.811	0.839	0.141	0.681	0.479	-0.216	0.870	-0.244	-0.076
Goheung (45)	0.851	0.876	0.788	-0.251	0.577	0.650	-0.023	0.858	-0.020	-0.781
Seongsanpo (46)	0.718	0.759	0.488	-0.969	0.523	0.407	-0.479	0.864	-0.479	-0.768
Yeongju (47)	0.754	0.757	0.603	0.122	0.444	0.700	0.217	0.854	0.248	-0.229
Mungyeong (48)	0.823	0.829	0.762	0.661	0.759	0.823	0.555	0.902	0.574	0.375
Yeongdeok (49)	0.669	0.696	0.378	-0.042	0.424	0.675	0.087	0.887	0.126	-0.272
Uiseong (50)	0.830	0.841	0.776	0.336	0.523	0.815	0.606	0.805	0.628	-0.090
Gumi (51)	0.737	0.722	0.513	0.207	0.298	0.642	0.136	0.808	0.195	-0.040
Yeongcheon (52)	0.748	0.713	0.620	0.727	0.546	0.595	0.068	0.877	0.084	0.520
Geochang (53)	0.825	0.822	0.674	-0.018	0.411	0.738	0.360	0.774	0.385	-0.540
Hapcheon (54)	0.838	0.853	0.783	0.218	0.588	0.843	0.591	0.833	0.609	-0.230
Miryang (55)	0.804	0.806	0.731	0.378	0.632	0.715	0.300	0.887	0.316	0.094
Sancheong (56)	0.751	0.713	0.593	0.572	0.608	0.607	-0.030	0.878	-0.010	0.101

Dark NSE numbers indicate the evaporation equations in the order of providing appropriate results up to second equation. MT1: suggested Eq. 1, MT2: suggested Eq. 2, MT3: Hargreaves, MT4: Romanenko, MT5: Linacre, M1: Penman, M2: Priestley-Taylor, M3: KNF, M4: Debruin-Keijman, M5: Rohwer

다. 기온자료 이외의 다른 기상자료를 이용한 식들과 비교하였을 경우 에너지와 공기동력학적인 물리적 특성을 반영한 증발량산정식(KNF, Penman 식)이 일부지역을 제외하고 전반적으로 양호한 모의 결과를 보였다(Table 6).

본 연구에서 제안된 MT1 식과 MT2 식의 경우 단지 기온자료만을 사용하여 증발량을 산정하였음에도 불구하고 전국 56개 연구지역 대부분에서 다른 기존의 식들과 비교하여 전반적으로 양호한 증발량 산정결과를 보였다. 반면에 다른 기온자료를 이용한 증발량 산정식의 경우 MT1 이나 MT2 식과 비교하여 적절한 증발량 산정결과를 보여주지 않았다. 전반적으로 KNF 식이 가장 양호한 증발접시 증발량 산정값을 보여서

다양한 기상요소(기온, 풍속, 습도, 일사량, 일조시간) 자료가 모두 측정되고 있는 지역에서는 KNF 식을 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서 제안된 MT1 식과 MT2 식의 경우 기온자료 이외의 다른 기상요소 자료를 필요로 하는 기존의 식들과 비교하여 전반적으로 대부분의 연구지역에서 양호한 증발접시 증발량 산정결과를 보였다. 따라서 기온자료 이외의 다른 기상자료가 없는 경우에는 본 연구에서 수정 제안된 기온자료만을 이용하여 증발량을 산정하는 MT2 식이나 MT1 식이 우리나라에서 적용성이 있는 것으로 판단된다. Fig. 7은 56개 연구지역에서 MT1 식과 MT2 식으로부터 산정된 증발접시 증발량의 공간적 분포를 보여준다. 분

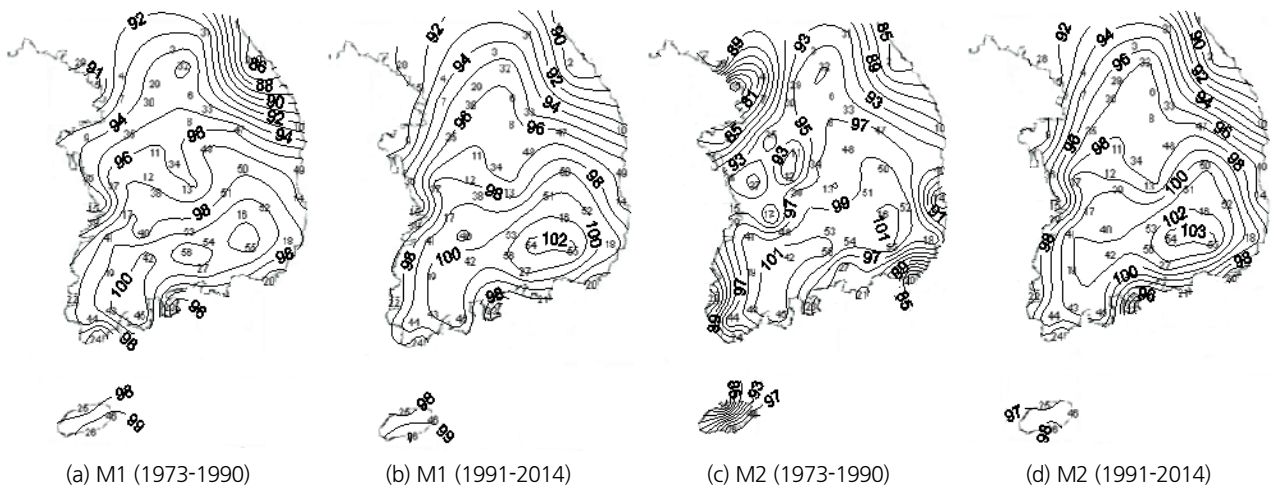


Fig. 7. Spatial distribution of estimated pan evaporation using MT1 and MT2 equations

석을 위해 1973년부터 1990년까지 그리고 1991년부터 2014년까지 두 기간으로 구분하여 56개 연구지역에서 MT1식과 MT2식으로부터 산정된 증발접시 증발량의 공간적 분포를 비교분석하였다. 분석결과 두 다른 기간 모두에서 MT1식과 MT2식이 비슷한 증발량의 공간적 분포를 보여주고 있다.

본 연구에서 증발접시 증발량 산정을 위해서 적용성을 판단하고자 하는 기온자료를 이용한 MT1과 MT2식의 경우 Penman에 의해서 제안된 조합식(combination approach)에서 공기동력항을 제외한 에너지항만을 적용하여 증발량을 산정하는 방법이다. 조합식에서 에너지항을 산정하기 위해 필요한 입력자료인 순방사(net radiation) 대신에 일사량을 입력자료로 적용함으로써 순방사를 적용하는 경우보다 계산과정과 입력자료를 단순화하였고, 일사량의 경우 기온자료만을 이용하여 산정된다. 따라서 적용된 식은 Penman에 의해서 제안된 조합식에서 증발량 산정에 필요한 일사량, 일조시간, 풍속, 상대습도 등의 기상자료를 필요로 하지 않는다. 하지만 공기동력학적인 물리적 특성이 증발량 산정에 반영되지 않아서 이들 식 또한 지리지형적 특성이 증발량산정에 미치는 영향을 반영하지 못하는 단점이 있다. Hargreaves 식은 기온자료만이 주어진 경우에 사용되도록 Food Agriculture Organization (FAO)에 의해서 추천된 바 있다(Allen et al., 1998). 하지만 지리지형적 특성이 증발량 산정에 미치는 공기동력학적 영향을 반영하기 위해서는 증발량산정지점 부근의 지역특성(수역 면적이거나 해안근접성 등)을 반영한 매개변수의 설정이 필요하다. Linacre 식과 Romanenko 식의 경우 물리적 근거에 기초하지 않은 경험적인 식으로서 단지 기온자료만을 이용하여 증발량을 산정함으로써 증발량 산정에 필요한 일사량, 일조시간, 풍속, 상대습도 등의 구체적 기상자료를 필요로 하지

않는다는 장점이 있으나, 앞서 언급된 식들과 마찬가지로 지리지형적 특성에 따른 기상요소변화가 증발량에 미치는 영향을 반영하기에는 한계가 있다.

한편 기온자료 이외의 기상자료를 필요로 하는 비교 검토식 중에서 KNF 식, Penman 식의 경우 일사량과 기온과 관련된 에너지항과 풍속이나 습도와 관련된 공기동력학적항을 동시에 고려하는 조합식에 근거하고 있다. 또한 에너지와 공기동력학적 요소는 증발량을 산정하는 데 있어서 지역의 지리지형적 특성과 밀접한 연관이 있다. 한편 Priestley-Taylor식의 경우 Penman 조합식에서 공기동력항이 에너지항의 26% 정도라고 가정하고 있어서 지리 지형적 특성에 따른 공기동력항의 차이를 충분히 반영하지 못한다. Debruin-Keijman 식의 경우 Priestley-Taylor 식으로부터 수표면에서의 증발량산정을 위해서 개선된 식이다. 하지만 이 식 또한 공기동력항을 포함하고 있지 않아서 증발량 산정을 위해서 지리 지형적 특성에 따른 풍속이나 상대습도의 차이를 반영할 수 없는 제약이 있다. Rohwer 식은 질량이동 이론에 근거한 식으로 기온이나 일사량 등의 기상자료가 관측되지 않고, 간단하게 증발량을 산정하는 경우에 적용할 수 있으나, 지리지형적 특성에 따른 에너지수지가 증발량에 미치는 영향을 반영하는데 제약이 있다.

본 연구에서는 56개 연구지역의 지리지형적 특성에 따른 증발량산정결과를 분석하기 위해 군집분석을 이용하여 각 연구지역을 고도, 도시화비 그리고 육지비에 따라서 여러 군집으로 구분하고 각 군집별로 NSE 지수의 평균값을 분류하였다(Table 7). 기온자료를 이용하여 증발량을 산정하는 식들 중 가장 양호한 결과를 보인 MT1식과 MT2식, 그리고 본 연구에서 비교 검토된 기온자료 이외의 기상자료를 이용하여 증발

Table 7. Comparisons of evaporation equations based on geographical characteristics (Number: average NSE coefficient)

Cluster	Temperature-based equation					M1	M2	M3	M4	M5	
	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5						
Elevation	A	0.775	0.783	0.606	0.061	0.575	0.697	0.236	0.880	0.243	-0.005
	B	0.67	0.719	0.367	-0.86	0.239	0.667	0.205	0.794	0.205	-0.697
	C	0.799	0.799	0.595	0.328	0.641	0.713	0.373	0.867	0.388	0.280
	D	0.824	0.808	0.781	0.493	0.677	0.732	0.312	0.885	0.311	0.123
	E	0.794	0.786	0.692	0.267	0.575	0.743	0.337	0.874	0.348	-0.001
Urbanization rate	A	0.782	0.783	0.646	0.157	0.576	0.698	0.231	0.873	0.238	-0.030
	B	0.865	0.871	0.763	0.749	0.69	0.772	0.591	0.935	0.601	0.781
	C	0.715	0.734	0.198	-0.031	0.611	0.408	-0.034	0.736	-0.001	0.385
	D	0.815	0.824	0.632	0.239	0.683	0.839	0.611	0.918	0.621	0.357
Inland area	A	0.664	0.679	0.181	-0.287	0.506	0.602	0.059	0.843	0.087	-0.029
	B	0.817	0.814	0.758	0.334	0.623	0.739	0.345	0.884	0.348	0.089
	C	0.844	0.865	0.702	-0.061	0.583	0.729	0.322	0.894	0.330	-0.040

MT1: suggested Eq. 1, MT2: suggested Eq. 2, MT3: Hargreaves, MT4: Romanenko, MT5: Linacre, M1: Penman, M2: Priestley-Taylor, M3: KNF, M4: Debruin-Keijman, M5: Rohwer

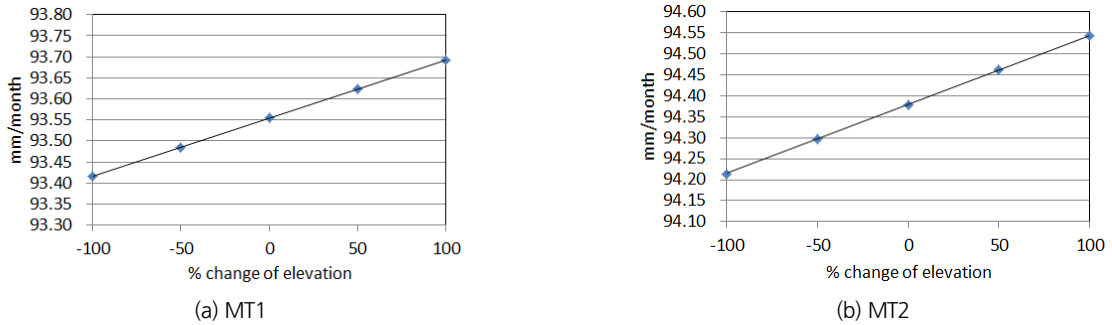


Fig. 8. The change of estimated pan evaporation according to elevation change at Suwon station using MT1 and MT2 equations

량을 산정하는 식들 중에서 양호한 결과를 보인 KNF식, 그리고 Penman식에 대해서 Table 7의 결과를 바탕으로 각 연구지역의 지리지형적 특성과 증발량 산정결과와의 연관성을 분석하였다. 과거 발표된 연구결과에 의하면 증발산 현상에 밀접한 관련이 있는 기온, 습도, 풍속, 그리고 일사량 등과 같은 기상요소는 지리지형적 특성과 밀접한 상관이 있는 것으로 나타났다(Qiu et al., 2002; Droogers and Allen, 2002; Lage et al., 2003; Chen et al., 2005). 하지만 기상요소 변화가 지리지형적 특성과 단순한 상관관계를 보이는 것이 아니어서 이들 관계에 대해 물리적 의미를 부여하는 데는 한계가 있다.

분석결과에 의하면 MT1식과 MT2식의 경우 적용성을 고도에 따라 분류하였을 때 군집 D 지역에서 양호한 결과를 보였다. 군집 D 지역의 경우 원주, 청주, 홍천, 보은, 금산, 문경, 산청 등 비교적 고도가 상대적으로 높은 곳에 위치한 지역에 속한다. Nullet and Juvik (1994)에 의해서 수행된 연구결과에 의하

면 고도에 따른 증발량변화는 단순한 상관관계가 존재하는 것이 아니며, 고도변화나 지역의 기후특성 등에 따라서 영향을 받는다. MT1식과 MT2식의 고도에 따른 기압변화가 증발접시 증발량에 미치는 영향을 분석하기 위해 수원지역의 기상 자료를 적용한 바에 의하면 고도가 증가함에 따라 증발량이 증가함을 확인할 수 있었다. 하지만 고도변화가 증발접시 증발량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다(Fig. 8).

도시화에 따라서 분류하는 경우 군집 B에 속하는 서울지역이 가장 양호한 Nash-Sutcliffe (NSE)지수를 보여서, 증발량 산정결과는 도시화에 따른 토지피복 변화와 관련이 있는 것으로 판단된다. 과거 연구결과에 의하면 지역이 도시화되는 경우 도시지역내 불투수층이 감소하고, 도시지역에 내린 강수는 조기에 유출됨으로 인해서 잠열이 감소하고 반면에 현열이 증가하고, 기온은 상승한다. 따라서 MT1식과 MT2식의 경우 증발량 산정과정에서 기온자료로부터 산정된 일사량을 입력

자료로 사용하고 있어서 도시화에 따른 기온 상승은 증발량을 상승시킨다. 하지만 대도시에 속하는 군집 C에 속하는 인천과 부산이 가장 양호하지 않은 NSE 지수를 보인 것은 이들 지역의 경우 도시화뿐만 아니라 해안근접성 등의 영향이 복합적으로 반영되는 것으로 판단된다. 육지비를 고려하는 경우 군집 C나 B에서 양호한 결과를 보였으며, 군집 C나 B의 경우 군집 A와 비교하여 비교적 내륙에 위치하여 공기동력학적 요인보다는 에너지 요인이 증발량 산정에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 NSE 지수가 각 군집마다 전반적으로 높고, 군집별로 큰 차이가 없어서 물리적인 의미를 부여하는 것은 무리가 있다. NSE 지수 분석결과 연구지역의 지리적 위치에 상관없이 56개 연구지역에서 전반적으로 양호한 증발량 산정결과를 보이고 있어서 지리적 위치에 따른 기압 및 기온 변화가 증발량 산정에 반영되고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용 검토된 KNF 식, Penman 식의 경우 증발에 미치는 에너지와 공기동력학적 영향을 동시에 반영하고 있고, 이러한 미기상학적 현상은 지역의 지리지형적 영향을 받는다. 고도에 따라서 이들 식들의 적용성을 분류하는 경우 이들 식 모두에서 대관령지역을 포함하는 군집 B를 제외하고 모두 비슷한 정도의 NSE 지수를 보였다. 이들 결과를 바탕으로 판단할 때 고도 이외의 다른 지리지형적 요소가 복합적으로 증발량 산정에 반영되고 있다고 판단되나, 특히 고도가 높은 지역에서 증발변화 영향이 이들 식에서 공통적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 도시화에 따라서 분류하는 경우 KNF 식, Penman 식 모두에서 군집 B와 D가 군집 A와 C에 비해서 양호한 NSE 지수를 보였다. 군집 B와 D의 경우 도시화가 많이 이루어진 내륙지역에 위치한 지역으로서 도시화에 따른 에너지수지와 공기동력학적 변화영향이 증발량 산정에 반영된 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기온자료만을 이용한 증발량 산정식의 적용성을 검토하였다. 이를 위해서 Bristow and Campbell (1984)이 제안한 기온자료만을 이용한 일사량 산정식의 매개변수를 추정하고, 추정된 일사량 산정식을 이용하여 증발량 산정식을 제안하였다. 또한 전국 56개 연구지역에 대해서 기온자료에 기초한 식들(Linacre 식, Romanenko 식, Hargreaves-Samani 식) 뿐만 아니라, 다른 기상요소 자료에 기초한 식들(Penman 식, KNF 식, Priestley-Taylor 식, Debruin-Keijman 식, Rohwer 식)을 비교 검토하였다.

본 연구에서 제안된 기온자료만을 이용한 증발량 산정식(MT1 식, MT2 식)의 경우 다른 기온자료에 기초한 식들(Linacre 식, Romanenko 식, Hargreaves-Samani 식)과 비교하여 전국 대부분의 연구지역에서 더 양호한 증발량 산정결과를 보였으며, 기존의 증발량 산정식과 비교하여도 우리나라 56개 연구지역 대부분에서 전반적으로 양호한 증발량 산정결과를 보였다. 에너지와 공기동력학적인 물리적 특성을 반영한 증발량산정식(KNF, Penman 식)은 일부지역을 제외하고 전반적으로 양호한 모의 결과를 보였다.

각 연구지역의 지리적 특성과 본 연구의 제안식인 MT1 식과 MT2 식으로부터 산정된 증발량 산정결과와의 연관성을 분석하였다. MT1 식과 MT2 식의 고도에 따른 기압변화가 증발접시 증발량에 미치는 영향을 분석한 바에 의하면 고도가 증가함에 따라 증발량이 증가함을 확인할 수 있었다. 하지만 고도변화가 증발량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. MT1 및 MT2 식의 증발량산정 결과를 도시화 및 육지비에 따라서 분류하여 분석한 바에 의하면 연구지역의 지리적 위치에 따른 기압 및 기온변화가 MT1 식과 MT2 식의 증발량산정에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

비교 분석결과에 의하면 다양한 기상요소(기온, 풍속, 습도, 일사량, 일조시간) 자료가 모두 측정되고 있는 지역에서는 KNF 식을 적용하는 것이 적절한 것으로 판단되나, 기온자료 이외의 다른 기상자료가 없는 경우에는 본 연구에서 수정 제안된 기온자료만을 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 MT2 식이나 MT1 식이 우리나라에서 적용성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 기온자료 이외에 기상자료가 관측되지 않은 지역에서 기온자료만을 이용하여 증발접시 증발량을 간접적으로 산정하고자 하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 현재의 연구결과에서는 우리나라 기상관측지점에서 관측된 기온 및 증발접시 증발량 자료를 이용하여 증발접시 증발량을 산정하는 식을 유도하였고, 저수지에서의 기온자료와 pan 증발량자료를 사용하고 있지 않아서 실제적으로 저수지 증발량을 산정하는 데 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 추후 연구에서는 저수지에서 관측된 기온 및 증발접시 증발량 자료를 바탕으로 저수지 증발량을 산정하기 위한 제안식들의 적용성을 검토하기 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

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.
- ASCE (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE manuals and reports on engineering practice No. 70. New York, NY. USA.
- Assouline, S., and Mahrer, Y. (1993). "Evaporation from Lake Kinneret: 1 Eddy correlation system measurements and energy budget estimates." *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 901-910.
- Bristow, K. L., and Campbell, G. S. (1984). "On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 31, pp. 159-166.
- Burman and Pochop (1994). "Evaporation, evapotranspiration and climatic data." *Developments in Atmospheric Science*, Vol. 22, Elsevier Science, Amsterdam.
- Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., and Ren, G. (2005). "Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China." *Climate Research*, Vol. 28, pp. 123-132.
- Cho, H. K. (1973). "On lake evaporation from climatological data in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 6, pp. 5-12.
- Chow, S. D. (1992). "The urban climate of Shanghai." *Atmospheric Environment*, Vol. 26B, No. 1, pp. 9-15.
- Dalkilic, Y., Okkan, U., and Baykan, N. (2014). "Comparison of different ANN approaches in daily pan evaporation prediction." *Journal of Water Resources and Protection*, Vol. 6, pp. 319-326.
- DeBruin, H. A. R., and Keijman, J. Q. (1979). "The priestley-taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 18, pp. 898-903.
- Dos Reis, R. J., and Dias, N. L. (1998). "Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations." *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 135-147.
- Droogers, P., and Allen, R. G. (2002). "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, pp. 34-45.
- Han, J. S., and Lee, B. Y. (2006). "Measurement and analysis of free water evaporation at HaeNam paddy field." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 7, No. 1, pp. 92-98.
- Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Applied Engr. Agric.*, Vol. 1, pp. 96-99.
- Henry, J. A., and Dicks, S. E. (1985). "Urban and rural humidity distribution: Relationships to surface materials and land use." *Journal of Climatology*, Vol. 5, pp. 53-62.
- Horton, R. E. (1971). "Rainfall interception." *Month. Weather Rev.*, Vol. 47, No. 9, pp. 603-623.
- Irmak, S., and Haman, D. Z. (2003). "Evaluation of five methods for estimating class A pan evaporation in a humid climate." *Hort. Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 500-508.
- Jauregui, E., Klaus, D., and Lauer, W. (1978). "On the estimation of potential evaporation in Central Mexico." *Colloquium Geographicum*, Band 13, pp. 163-190. Dummlers Verlag, Bonn.
- Jensen, M. E. (ed). (1974). *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. Tech. Rpt. Com. Irr. Water Requirement, Irr. Drainage Div., Amer. Soc. Civil Eng., Davis, Calif.
- Kohler, M. A. (1954). *Lake and pan evaporation. Water loss investigation Vol. 1, Lake Hefner studies*. U.S. Geol. Surv. Paper 269.
- Kohler, M. A., Nordenson, T. J., and Fox, W. E. (1955). *Evaporation from pans and lakes*. U.S. Dept. Commerce Research. Paper. No. 38.
- Konstantinov, A. R. (1968). *Evaporation in nature*. Leningrad.
- Kuzmin, P. O. (1957). "Hydrophysical investigations of land waters." *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, Vol. 3, pp. 468-478.
- Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., and Mourid, M. E. (2003). "Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and pan evaporation methods under Moroccan conditions." *Agronomie*, Vol. 23, pp. 625-631.
- Lamoreux, W. W. (1962). "Modern evaporation formula adapted to computer use." *Monthly Weather Rev.*, Vol. 90, pp. 26-28.
- Lawrimore, J. H., and Peterson, T. C. (2000). "Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States." *Journal Hydrometeor.*, Vol. 1, pp. 543-546.
- Lee, K. H., and Kim, M. I. (1985). "Seasonal variations of the evaporation in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 18, pp. 243-251.
- Linacre, E. T. (1977). "A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone." *Agricultural Meteorology*, Vol. 18, pp. 409-424.
- Linacre, E. T. (1993). "Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation." *Agric. and Forestry Meteor.*, Vol. 64, pp. 237-256.
- Makkink, G. F. (1957). "Testing the Penman formula by means of lysimeters." *Journal of the Institution of Water Engineers*, Vol. 11, pp. 277-288.
- Meyer, A. F. (1915). "Computing runoff from rainfall and other physical data." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 79, pp. 1055-1155.
- 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.
- Nullet, D., and Juvik, J. O. (1994). "Generalised mountain evaporation profiles for tropical and subtropical latitudes." *Singapore Journal of Tropical Geography*, Vol. 15, No. 1, pp. 17-24.
- Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Penman, H. L. (1956). "Evaporation: an introductory survey."

- Netherlands Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 9-29.
- Pochop, L., Borrelli, J., and Hasfurther, V. (1984). *Design characteristics for evaporation ponds in Wyoming*. Wyoming Water Research Center Final Report, Wyoming.
- Priestley, C. H. B., and Taylor, R. J. (1972). "On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- Qiu, G. Y., Miyamoto, K., Sase, S., Gao, Y., Shi, P., and Yano, T. (2002). "Comparison of the three temperature model and conventional models for estimating transpiration." *Japanese Agricultural Research Quarterly*, Vol. 36, No. 2, pp. 78-82.
- Rohwer, C. (1931). *Evaporation from free water surfaces*. USDA Tech. Bul. No. 271.
- Romanenko, V. A. (1961). *Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area*. Proceedings Ukrainian Hydrometeorological Research Institute (Kiev) 3.
- Rotstayn, L. D., Roderick, M. L., and Farquhar, G. D. (2006). "A simple pan-evaporation model for analysis of climate simulations: Evaluation over Australia." *Geographical Research Letters*, Vol. 33, pp. L17715.
- Shirsath, P. B., and Singh, A. K. (2010). "A comparative study of daily pan evaporation estimation using ANN, regression and climate based models." *Water Resour. Manage.*, Vol. 24, pp. 1571-1581.
- Thornthwaite, C. W., and Holzman, B. (1939). "The determination of land and water surfaces." *Month. Weather Rev.*, Vol. 67, pp. 4-11.
- Valiantzas, J. D. (2006). "Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data." *Journal of Hydrology*, Vol. 331, pp. 690-702.
- Yague, C., Zurita, E., and Martinez, A. (1991) "Statistical analysis of the Madrid urban heat island." *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, No. 3, pp. 327-332.