



Applicability evaluation of aerodynamic approaches for evaporation estimation using pan evaporation data

Rim, Chang-Soo^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Kyonggi University

Paper number: 17-067

Received: 21 August 2017; Revised: 9 October 2017; Accepted: 9 October 2017

Abstract

In this study, applicabilities of aerodynamic approaches for the estimation of pan evaporation were evaluated on 56 study stations in South Korea. To accomplish this study purpose, previous researchers' evaporation estimation equations based on aerodynamic approaches were grouped into seven generalized evaporation models. Furthermore, four multiple linear regression (MLR) models were developed and tested. The independent variables of MLR models are meteorological variables such as wind speed, vapor pressure deficit, air temperature, and atmospheric pressure. These meteorological variables are required for the application of aerodynamic approaches. In order to consider the effect of autocorrelation, MLR models were developed after differencing variables. The applicability of MLR models with differenced variables was compared with that of MLR models with undifferenced variables and the comparison results showed no significant difference between the two methods. The study results have indicated that there is strong correlation between estimated pan evaporation (using aerodynamic models and MLR models) and measured pan evaporation. However, pan evaporation are overestimated during August, September, October, November, and December. Most of meteorological variables that are used for MLR models show statistical significance in the estimation of pan evaporation. Vapor pressure deficit was turned out to be the most significant meteorological variable. The second most significant variable was air temperature; wind speed was the third most significant variable, followed by atmospheric pressure.

Keywords: Pan, Evaporation estimation, Aerodynamic approach, Multiple linear regression model

증발접시 증발량자료를 이용한 공기동력학적 증발량 산정 방법의 적용성 평가

임창수^{a*}

^a경기대학교 공과대학 토목공학과

요 지

본 연구에서는 우리나라 56개 연구지역에 대해서 증발량 산정방법 중에 하나인 공기동력학적 방법의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 과거 연구자들에 의해서 제안된 공기동력학적 증발량 산정식들을 7가지 형식으로 구분하고 일반화하여 증발량 산정모형을 유도하였다. 또한, 공기동력학적 방법 적용에 필요한 기상요소자료들(풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압)을 이용하여 4가지의 다변량 선형회귀모형을 유도하고 그 적용성을 검토하였다. 기상자료들의 자기상관의 영향을 고려하기 위해 변수들을 차분시켜 회귀분석을 실시하고 자기상관을 고려하지 않은 경우와 비교한 결과 결정계수 값에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 연구결과에 의하면 공기동력학적 모델이나 다변량 선형회귀모형 모두에서 산정된 월 증발량과 관측된 월 증발량 사이에 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 하지만 대부분의 증발량 산정모형에서 8, 9, 10, 11, 12월에 증발량을 과다 산정하고 있는 것으로 나타났다. 다변량 선형회귀모형들에 사용된 기상요소자료들은 모두 증발량 산정에 유의한 영향력이 있는 것으로 나타났으며, 특히 포화미흡량이 가장 중요한 기상요소이며, 두 번째로는 기온, 세 번째로는 풍속, 그리고 마지막으로 대기압인 것으로 나타났다.

핵심용어: 증발접시, 증발량 산정, 공기동력학적 방법, 다변량 선형회귀모형

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

1. 서론

수문순환과정에서 증발은 가용한 수자원의 최대 손실이며, 특히 최근에 빈번하게 발생하는 가뭄시기에 증발은 수자원관리 차원에서 매우 심각한 문제이다. 따라서 증발과정을 이해하고 증발량을 파악하는 것은 매우 중요하다. 과거 수행되어온 연구결과들에 의하면 증발량을 산정하는 방법에는 다양한 방법들이 있다. 이들 방법에는 물수지 방법(Harbeck et al., 1954; Lapworth, 1965; Gangopaphaya et al., 1966; Guitjens, 1982), 에너지수지 방법(Sene et al., 1991; Stannard and Rosenberry, 1991; Assouline and Mahrer, 1993), 공기동력학적 방법(Meyer, 1915; Horton, 1919; Rohwer, 1931; Penman, 1948; Harbeck et al., 1954; Harbeck, 1958; Romanenko, 1961), 그리고 조합법(Penman, 1948; Priestley and Taylor, 1972; Stewart and Rouse, 1976; Linacre, 1993) 등이 있다.

증발량을 산정하는 방법 중에 하나인 공기동력학적 방법은 수증기가 수표면으로부터 대기 중으로 전이되는 물리적 현상에 기초하여 증발량을 결정하는 방법이다(Harbeck, 1962; Goddard and Pruitt, 1966; Tanner, 1966; Weisman, 1975; Tyrvaianen, 1978; Sill, 1981). 또한, 공기동력학적 방법은 증발량을 산정하는 가장 오래된 방법 중에 하나이지만(Dalton, 1802; Meyer, 1915; Penman, 1948), 증발수체 내의 열저류를 고려하고 있지 않으며, 또한 전반적으로 다른 증발량 산정방법들과 비교해서 식이 단순하고 보다 적은 기상자료를 필요로 하는 반면에 적절하게 증발량을 산정하는 것으로 발표되었다(Thorntwaite and Holzman, 1939; Meyer, 1944; Sverdrup, 1946; Sutton, 1949; Jensen, 1973). 따라서 최근까지도 저수지 수표면으로부터의 증발량을 산정하는 방법으로 사용되어지고 있으며, 다양한 형태의 경험공식들이 제안된 바 있다(Meyer, 1915; Horton, 1919; Rohwer, 1931; Penman, 1948; Harbeck et al., 1954; Harbeck, 1958; Romanenko, 1961). 우리나라에서는 Han and Lee (2005)가 해남농경지에 설치된 대형증발접시 증발량 산정을 위해 공기동력학적 방법을 적용한 바 있다.

공기동력학적 방법을 적용하여 증발량을 산정하는 경우 요구되는 기상요소자료는 풍속, 상대습도, 그리고 기온이다. 따라서 과거 연구자들은 연구 대상지역에 이들 기상요소자료들을 이용하여 증발식들의 매개변수를 경험적으로 추정함으로써 공기동력학적 방법을 이용한 지역별 증발량 산정식들을 제안하였으며, 이런 제안식들은 몇 가지 형식으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 과거 제안된 공기동력학적 증발량 산정식들을 몇 가지 형식으로 구분하고 일반화하여 증발량 산정모

델을 유도하고, 우리나라에 적용이 가능한지를 분석하였다. 또한, 공기동력학적 방법에 기초한 증발량 산정을 위해 증발량과 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압)와의 상관성에 기초한 다변량 선형회귀모델을 유도하고 그 적용성을 검토하였으며, 각 기상요소들의 상대적 중요도를 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 우리나라 56개 연구지역에 대해서 증발량 산정방법 중에 하나인 공기동력학적 방법의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 과거 제안된 공기동력학적 증발량 산정식들을 7가지 형식으로 구분하고 일반화하여 증발량 산정모델들을 유도하였다. 또한, 증발량과 기상요소들과의 상관성을 바탕으로 4가지의 다변량 선형회귀모델들을 유도하였다.

2.1 연구지역 및 자료

본 연구에서는 기상청에서 관리하는 기상자료의 가용성을 검토한 후, 우리나라 전국에 위치한 56개 기상관측지점을 선정하였으며, 56개 기상관측지점은 전국에 고루 분포되어 있어 우리나라 지역별 지리적 특성을 반영하고 있다(Fig. 1, Table 1). 본 연구에 사용된 기상자료는 월 자료로서, 소형증발접시 증발량, 풍속, 상대습도, 기온 등이다. 증발량 산정모

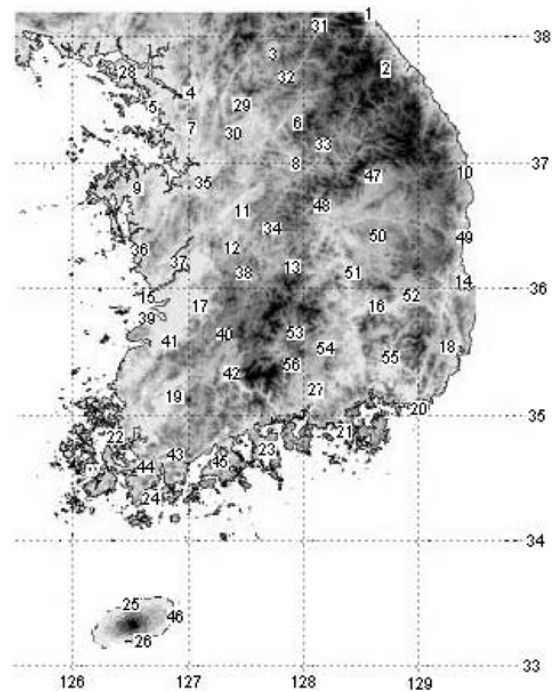


Fig. 1. 56 climatological stations in Table 1

Table 1. 56 climatological stations

Study stations (No.)	Data period	Elevation (m)	First half Latter half	Study stations (No.)	Data period	Elevation (m)	First half Latter half
Sokcho (1)	1973-1990	18.06	1973-1981 1982-1990	Daegwallyeong (2)	1972-1997	842.52	1972-1984 1985-1997
Chuncheon (3)	1967-2006	76.47	1967-1986 1987-2006	Seoul (4)	1960-2010(8)	85.50	1960-1985
					2010(8)-2016	85.80	1986-2016
Incheon (5)	1960-2013(10)	68.15	1960-1987 1988-2016	Wonju (6)	1973-1990	148.60	1973-1981 1982-1990
	2013(10)-2016	68.20					
Suwon (7)	1965-2016	34.06	1965-1990 1991-2016	Chungju (8)	1973-1996	116.30	1973-1984 1985-1996
Seosan (9)	1968-2016	28.91	1968-1986 1987-2016	Ulsan (10)	1972-1990	50.00	1972-1980 1981-1990
Cheongju (11)	1967-2016	58.70	1967-1988 1989-2016	Daejeon (12)	1969-2016	68.94	1969-1992 1993-2016
Chupungnyeong (13)	1960-1990	243.70	1960-1974 1975-1990	Pohang (14)	1960-2016	2.28	1960-1985 1986-2016
Gunsan (15)	1968-1990	25.57	1968-1978 1979-1990	Daegu (16)	1960-1990	53.40	1960-1974 1975-1990
Jeonju (17)	1960-2015(6)	53.40	1960-1983 1984-2016	Ulsan (18)	1960-1990	34.57	1960-1974 1975-1990
	2015(7)-2016	61.40					
Gwangju (19)	1960-1990	72.38	1960-1974 1975-1990	Busan (20)	1960-2016	69.56	1960-1987 1988-2016
Tongyeong (21)	1968-1990	32.30	1968-1978 1979-1990	Mokpo (22)	1960-2016	38.00	1960-1987 1988-2016
Yeosu (23)	1960-2016	64.64	1960-1987 1988-2016	Wando (24)	1973-1990	35.24	1973-1981 1982-1990
Jeju (25)	1960-2016	20.45	1960-1987 1988-2016	Seogwipo (26)	1962-2006	50.40	1962-1983 1984-2006
Jinju (27)	1970-2005(11)	21.32	1970-1991 1992-2014	Gangwha (28)	1973-1990	47.01	1973-1981 1982-1990
	2005(11)-2014	30.21					
Yangpyeong (29)	1973-1990	47.98	1973-1981 1982-1990	Icheon (30)	1973-1990	78.01	1973-1981 1982-1990
Inje (31)	1973-1989	200.16	1973-1980 1981-1989	Hongcheon (32)	1974-1990	139.95	1974-1981 1982-1990
Jecheon (33)	1973-1990	259.80	1973-1981 1982-1990	Boeun (34)	1973-1990	174.99	1973-1981 1982-1990
Cheonan (35)	1973-1996	21.30	1973-1984 1985-1996	Boryeong (36)	1973-1990	15.49	1973-1981 1982-1990
Buyeo (37)	1973-1990	11.33	1973-1981 1982-1990	Geumsan (38)	1973-1990	170.35	1973-1981 1982-1990
Buan (39)	1975-1990	11.96	1975-1982 1983-1990	Imsil (40)	1973-1990	247.87	1973-1981 1982-1990
Jeongeup (41)	1973-1990	44.60	1973-1981 1982-1990	Namwon (42)	1973-1990	90.29	1973-1981 1982-1990
Jangheung (43)	1973-1990	45.02	1973-1981 1982-1990	Haenam (44)	1973-1990	13.01	1973-1981 1982-1990
Goheung (45)	1973-1990	53.12	1973-1981 1982-1990	Seongsanpo (46)	1977-1990	18.62	1977-1983 1984-1990

Table 1. 56 climatological stations (Continue)

Study stations (No.)	Data period	Elevation (m)	First half Latter half	Study stations (No.)	Data period	Elevation (m)	First half Latter half
Yeongju (47)	1973-1990	210.79	1973-1981 1982-1990	Mungyeong (48)	1973-1990	170.61	1973-1981 1982-1990
Yeongdeok (49)	1973-1990	42.12	1973-1981 1982-1990	Uiseong (50)	1973-1996	81.81	1973-1984 1985-1996
Gumi (51)	1973-1990	48.88	1973-1981 1982-1990	Yeongcheon (52)	1973-1990	93.80	1973-1981 1982-1990
Geochang (53)	1973-1990	221.40	1973-1981 1982-1990	Hapcheon (54)	1973-1990	32.00	1973-1981 1982-1990
Miryang (55)	1973-1996	11.21	1973-1984 1985-1996	Sancheong (56)	1973-1990	138.07	1973-1981 1982-1990

First half: data period for model calibration; Latter half: data period for model validation

델들의 보정 및 검정을 위해서 56개 연구지역의 자료기간을 전반부와 후반부로 구분하여 분석에 활용하였다(Table 1). 따라서 전반부 자료를 증발량 산정모델들의 보정에 활용하였고, 후반부자료를 증발량 산정모델들의 검정에 활용하였다.

2.2 기존의 공기동력학적 방법 적용식 검토

공기동력학적 방법(mass-transfer approaches)은 저수지 증발량 산정을 위해서 폭 넓게 적용되어왔으며, 여러 연구자들에 의해서 다양한 형태의 경험공식이 제안된 바 있다. 공기동력학적 방법은 자유수표면에서 발생하는 증발량에 대한 Dalton (1802)의 이론에 기초한다. Dalton의 이론은 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. Dalton (1802)에 의하면 수표면에서의 증발은 수표면 온도에서의 포화증기압(e_o)이 대기온도에서의 실제증기압(e_a)에 도달할 때까지 계속되며, 증발률(E)은 상수 α 에 비례한다. 상수 α 는 물리적으로 공기동력학적 저항의 의미를 가지고 있고, 풍속, 표면의 거칠기 그리고 열적 유도 난류현상에 의해서 영향을 받는다. 이들 세 요소는 기상요소인 풍속과 밀접한 연관이 있다. Dalton (1802)은 증발표면이 작고 수심이 얇은 수체의 경우에 Eq. (2)를 제안하였고, 증발표면이 크고 깊은 수체의 경우에 Eq. (3)을 제안하였다.

$$E = \alpha(e_o - e_a) \quad (1)$$

$$E = 15(e_o - e_a) \quad (2)$$

$$E = 11(e_o - e_a) \quad (3)$$

여기서, E 는 증발량(in/mon), e_o 는 수표면 온도에서의 포화증기압(inches of Hg), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(inches of Hg), $e_o - e_a$ 는 포화미흡량(vapor pressure deficit, VPD)이다.

Harbeck et al. (1954)은 Dalton (1802)의 증발량 산정식을 바탕으로 미국 Mead호에서 수행된 증발량 산정연구에서 다음과 같은 증발량 산정식 (4)와 (5)를 제안하였다. Harbeck et al. (1954)은 Dalton (1802)에 의해 제한된 식과 달리 증발현상에 미치는 공기동력학적 저항의 변동성을 고려하기 위해 풍속을 산정식에 반영하였다.

$$E = 0.0578u_8(e_o - e_a) \quad (4)$$

$$E = 0.0728u_4(e_o - e_a) \quad (5)$$

여기서, E 는 증발량(in/day), u_8 은 수표면으로부터 8 m지점의 풍속(miles/hour), u_4 는 수표면으로부터 4 m지점의 풍속(miles/hour), e_o 는 수표면 온도에서의 포화증기압(inches of Hg), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(inches of Hg), $e_o - e_a$ 는 포화미흡량(inches of Hg)이다.

또 다른 형태의 공기동력학적 증발량 산정식으로 Fitzgerld (1886)는 증발량 산정식 (6)을 제안한 바 있고, Meyer (1915), Kuzmin (1957) 그리고 Penman (1948)은 각각 산정식 (7), (8) 그리고 (9)를 제안한 바 있다.

$$E = (0.4 + 0.199u)(e_o - e_a) \quad (6)$$

$$E = 11(1 + 0.1u)(e_o - e_{a30}) \quad (7)$$

$$E = 6.0(1 + 0.21u_8)(e_o - e_a) \quad (8)$$

$$E = 0.35(1 + 0.24u_2)(e_o - e_a) \quad (9)$$

여기서, E 는 증발량(in/month), u , u_2 , u_8 은 각각 수표면에서의 풍속(miles/hour), 수표면으로부터 2 m 지점의 풍속(miles/hour) 그리고 수표면으로부터 8 m 지점의 풍속, e_o 는 수표면 온도에서의 포화증기압(inches of Hg), e_{a30} 은 수면으로부터 30 ft 지점 대기온도에서의 실제증기압(inches of Hg), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(inches of Hg), $e_o - e_{a30}$ 혹은 $e_o - e_a$ 는 포화미흡량(inches of Hg)이다.

한편 Rohwer (1931)는 기존의 공기동력학적 방법에서 적용되지 않은 기상요소인 대기압을 포함시켜서 다음과 같은 Eq. (10)을 제안한 바 있으며, Horton (1919)은 Eq. (11)을 제안한 바 있고, Harbeck (1958)은 풍속, 포화미흡량 그리고 평균수면온도와 대기온도의 차이를 이용하여 다음과 같은 증발량 산정식 (12)를 제안하였다.

$$E = 0.77(1.465 - 0.0186P_b)(0.44 + 0.118u)(e_o - e_a) \quad (10)$$

$$E = 0.4(2 - e^{-2u})(e_o - e_a) \quad (11)$$

$$E = 0.001813u(e_o - e_a)[1 - 0.03(T_a - T_w)] \quad (12)$$

여기서, E 는 증발량(in/day), e_o 는 수표면 온도에서의 포화증기압(inches of Hg), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(inches of Hg), $e_o - e_a$ 는 포화미흡량(inches of Hg), u 는 수표면에서의 풍속(miles/hour), P_b 는 기압(inches of Hg), T_a 는 평균기온($^{\circ}\text{C} + 1.9^{\circ}\text{C}$), T_w 는 평균 수면온도($^{\circ}\text{C}$)이다.

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

$$E = 0.0018(T_a + 25)^2(100 - RH) \quad (13)$$

여기서, E 는 증발량(cm/month), T_a 는 기온($^{\circ}\text{C}$), RH 는 상대습도(%)이다.

2.3 다변량 증발량식 검토

본 연구에서는 공기동력학적 방법을 이용한 증발량 산정에

필요한 기상요소자료의 상대적 중요도를 파악하기 위해 증발량과 기상요소 간에 다변량회귀(Multiple Linear Regression, MLR)분석을 실시하였다. 다변량회귀분석에 적용된 독립변수는 풍속, 포화미흡량, 기온, 그리고 대기압 등이다(Eqs. (14)~(17)). 또한 적용된 기후요소들은 시계열자료로서 회귀모형을 적용하고자 하는 경우 자기상관(autocorrelation)의 영향이 있는 것으로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 자기상관의 영향을 고려하기 위해 변수들을 차분시켜 회귀분석을 실시하고 자기상관을 고려하지 않은 경우와 비교하였으며, 비교한 결과 결정계수 값에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 독립변수 사이에 공선성(collinearity)을 분석한 결과 독립변수 사이에 공선성의 문제는 없는 것으로 나타났다. Eq. (14)의 경우 풍속과 포화미흡량을 독립변수로 적용하였고, Eq. (15)의 경우 풍속, 포화미흡량, 기온을 독립변수로 적용하였다. Eq. (16)의 경우 풍속, 포화미흡량 그리고 대기압을 독립변수로 적용하였고, Eq. (17)의 경우 풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압을 모두 독립변수로 적용하였다. 여기서 대기압은 다음 Eq. (18)를 이용하여 계산되었다(Allen et al., 1998).

$$E_{MLR} = a + bu_2 + c(e_s - e_a) \quad (14)$$

$$E_{MLR} = a + bu_2 + c(e_s - e_a) + dT_a \quad (15)$$

$$E_{MLR} = a + bu_2 + c(e_s - e_a) + dP_b \quad (16)$$

$$E_{MLR} = a + bu_2 + c(e_s - e_a) + dT_a + eP_b \quad (17)$$

$$P_b = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (18)$$

여기서, E_{MLR} 는 증발량(mm/day), u_2 는 수면으로부터 2 m 지점의 풍속(m/sec), e_s 는 대기 온도에서의 포화증기압(kPa), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(kPa), $e_s - e_a$ 는 포화미흡량(kPa), T_a 는 기온($^{\circ}\text{C}$), P_b 는 대기압(kPa), Z 는 표고(m)이다.

2.4 증발량 산정식 평가

공기동력학적 방법에 기초한 증발량 산정모델들을 유도하기 위해 식의 매개변수를 추정하고 유도된 식의 신뢰도검증을 위해 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)지수를 적용하였다. NSE 지수(Eq. (19))는 $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 가지고, NSE 지수가 1인 경우 관측된 증발량과 증발모델로부터 산정된 증발량이 완전하게 일치하는 것을 의미한다. 0보다 큰 NSE 지수

는 모델로부터 산정된 증발량이 용인되는 수준으로 판단하며, 반면에 0보다 작은 값은 용인될 수 없는 수준이다(Paul et al., 2011; Mkhwanazi, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - H_{i,est})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - \overline{H_{i,obs}})^2} \quad (19)$$

여기서, $H_{i,obs}$ 는 i 번째 월의 관측된 증발접시 증발량, $H_{i,est}$ 는 i 번째 월의 산정된 증발량, $\overline{H_{i,obs}}$ 는 전체기간 동안 관측된 증발접시 증발량의 평균값, 그리고 n 은 총 월 증발량 자료의 수이다.

3. 분석결과

3.1 공기동력학적 증발모형 보정

과거 연구자들에 의해서 제안된 공기동력학적 방법을 이용한 증발량 산정식들을 7가지 형식으로 구분하고 일반화하여 증발량 산정모델들을 유도하고, 우리나라 56개 연구지역의 전반부 기간자료(Table 1)를 모델들에 적용하여 매개변수를 추정하였다(Table 2). 모델 1 형식은 Dalton (1802)에 의해서 제안된 바 있으며, 모델 2 형식은 Harbeck et al. (1954)에

의해서 제안된 바 있다. 모델 3형식은 Fitzgerld (1886), Meyer (1915), Kuzmin (1957) 그리고 Penman (1948)에 의해서 제안된 바 있으며, 모델 4 형식은 Rohwer (1931)에 의해서 제안된 바 있다. 모델 5 형식은 Horton (1919)에 의해서 제안된 바 있으며, 모델 6 형식은 Harbeck (1958)에 의해서 제안되었고, 모델 7 형식은 Romanenko (1961)에 의해서 제안된 바 있다.

위에서 언급된 공기동력학적 방법을 적용한 증발량 산정 모델들의 경우 수표면에서의 포화증기압과 대기온도에서의 실제증기압의 차를 포화미흡량으로 적용하고 있으나 본 연구에서는 수표면에서의 포화증기압자료가 존재하지 않아 대신에 대기온도에서의 포화증기압과 실제증기압의 차를 포화미흡량으로 적용하였으며, 수표면 온도 대신에 이슬점온도를 적용하였다. 또한 증발량과 공기동력학적 방법에 필요한 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압)들 사이에 상관성을 바탕으로 한 다변량 선형회귀모델(모델 8~11)을 이용하여 증발량 산정식을 유도하였다.

Table 2는 증발량 산정을 위해 우리나라 56개 연구지역에서 공기동력학적 방법을 이용해 유도한 7가지 형태의 모델들(모델 1~7)과 다변량 선형회귀모델(모델 8~11)을 보여준다. 모델 2를 제외하고 모든 모델들이 양의 NSE지수 값을 보였다. 공기동력학적 방법을 이용한 모델들의 경우 모델 3 (NSE = 0.652)이 가장 양호한 증발량 산정결과를 보였다. 반면에 모델 2 (NSE = -0.004)의 경우 가장 낮은 NSE 지수를 보이고, NSE지수가 0보다 작은 값을 보여서 모델로부터 산정된 증발

Table 2. Typical equations for the evaporation estimation based on aerodynamic approach

Model	Equations	Estimated parameters	Numerical evaluation (NSE)	
1	$E = aVPD$	$a = 7.059$	0.578	
2	$E = au_2 VPD$	$a = 3.233$	-0.004	
3	$E = (a + bu_2) VPD$	$a = 5.41, b = 0.91$	0.652	
4	$E = P_b(a + bu_2) VPD$	$a = 0.05, b = 0.011$	0.643	
5	$E = a(1 - e^{-u_2}) VPD$	$a = 8.841$	0.573	
6	$E = au_2 VPD[1 - b(T_a - T_d)]$	$a = 4.38, b = 0.047$	0.066	
7	$E = a(T_a + 25)^2(100 - RH)$	$a = 0.00008$	0.584	
MLR	8	$E_{MLR} = a + bu_2 + cVPD$	$a = -2.051, b = 12.313, c = 178.141$	0.686
	9	$E_{MLR} = a + bu_2 + cVPD + dT_a$	$a = 1.211, b = 13.271, c = 130.177, d = 1.315$	0.709
	10	$E_{MLR} = a + bu_2 + cVPD + dP_b$	$a = 157.193, b = 12.411, c = 179.273, d = -1.594$	0.688
	11	$E_{MLR} = a + bu_2 + cVPD + dT_a + eP_b$	$a = 182.441, b = 13.396, c = 130.833, d = 1.332, e = -1.814$	0.712

MLR: Multiple Linear Regression equation; NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; E : evaporation (mm/day); E_{MLR} : evaporation based on MLR equation (mm/moth); e_s : saturation vapor pressure at the air temperature (kPa); e_a : actual vapor pressure at the air temperature (kPa); VPD : vapor pressure deficit ($e_s - e_a$, kPa); u_2 : wind speed at 2 m height (m/sec); RH : relative humidity (%); T_a : air temperature (°C); T_d : dew point temperature (°C); P_b : atmospheric pressure (kPa)

량 값의 신뢰도가 낮은 것으로 판단된다(Paul et al., 2011; Mkhwanazi, 2012). 공기동력학적 모델들과 비교하여 다변량 선형회귀모델의 경우 비교적 양호한 증발량 모의결과를 보였다. 다변량 선형회귀모델 중에서는 모델 11 (NSE = 0.712) 이 가장 높은 NSE지수를 보였다. 모델 11의 경우 독립변수로서 풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압을 적용하여 유도된 모델이다. 다음으로 풍속, 포화미흡량, 기온을 적용하여 유도한 모델 9 (NSE = 0.709)가 높은 NSE지수를 보였다.

다변량 회귀분석과정에서 발생하는 자기상관의 영향을 고려하면서 공기동력학적 방법에 기초한 증발량 산정에 필요한 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온)의 상대적 중요도를 파악하기 위해 증발량과 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온) 자료를 차분하여 다변량 선형회귀(Multiple Linear Regression, MLR)분석을 실시하였다(Tables 3 and 4). Table 3은 56개 지역의 전체 연구기간 중 전반부 자료를 이용하였으며, Table 4는 56개 연구지역의 전체 연구기간 자료를 이용하였다. Tables

Table 3. Relative importance of meteorological variables in MLR equations using data for the first half period (after differencing variables)

Model	MLR equation	F (sig.) R ²	Δu ₂	ΔVPD	ΔT _a	P _b
			δ (sig.)	δ (sig.)	δ (sig.)	δ (sig.)
8	$\Delta E_{MLR} = -0.000175 + 4.594\Delta u_2 + 180.875\Delta VPD$	10731.9 (0.000) 0.697	0.063 (0.000)	0.839 (0.000)		
9	$\Delta E_{MLR} = -0.0000574 + 5.387\Delta u_2 + 171.961\Delta VPD + 0.418\Delta T_a$	7244.4 (0.000) 0.700	0.073 (0.000)	0.797 (0.000)	0.068 (0.000)	
10	$\Delta E_{MLR} = 0.892 + 4.594\Delta u_2 + 180.875\Delta VPD - 0.00889P_b$	7153.9 (0.000) 0.697	0.063 (0.000)	0.839 (0.000)		0.000 (0.948)
11	$\Delta E_{MLR} = 0.975 + 5.387\Delta u_2 + 171.961\Delta VPD + 0.418\Delta T_a - 0.00972P_b$	5432.8 (0.000) 0.700	0.073 (0.000)	0.797 (0.000)	0.068 (0.000)	0.000 (0.943)

F: F-value; sig.: p-value; R²: coefficient of determination; δ: standardized coefficient; ΔE_{MLR}: differenced evaporation (mm/month); Δu₂: differenced wind speed at 2 m height (m/sec); ΔVPD: differenced vapor pressure deficit (kPa); ΔT_a: differenced air temperature (°C); P_b: atmospheric pressure (kPa)

Table 4. Relative importance of meteorological variables in MLR equations using data for the whole period (after differencing variables)

Model	MLR Equation	F (sig.) R ²	Δu ₂	ΔVPD	ΔT _a	P _b
			δ (sig.)	δ (sig.)	δ (sig.)	δ (sig.)
8	$\Delta E_{MLR} = 0.000094 + 4.810\Delta u_2 + 160.039\Delta VPD$	21336.5 (0.000) 0.693	0.063 (0.000)	0.836 (0.000)		
9	$\Delta E_{MLR} = 0.00012 + 5.912\Delta u_2 + 157.439\Delta VPD + 0.533\Delta T_a$	14529.0 (0.000) 0.697	0.077 (0.000)	0.783 (0.000)	0.087 (0.000)	
10	$\Delta E_{MLR} = 0.497 + 4.810\Delta u_2 + 168.039\Delta VPD - 0.00496P_b$	14223.6 (0.000) 0.693	0.063 (0.000)	0.836 (0.000)		0.000 (0.958)
11	$\Delta E_{MLR} = 0.550 + 5.912\Delta u_2 + 157.439\Delta VPD + 0.533\Delta T_a - 0.00548P_b$	10896.2 (0.000) 0.697	0.077 (0.000)	0.783 (0.000)	0.087 (0.000)	0.000 (0.953)

F: F-value; sig.: p-value; R²: coefficient of determination; δ: standardized coefficient; ΔE_{MLR}: differenced evaporation (mm/month); Δu₂: differenced wind speed at 2 m height (m/sec); ΔVPD: differenced vapor pressure deficit (kPa); ΔT_a: differenced air temperature (°C); P_b: atmospheric pressure (kPa)

3 and 4는 증발량과 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온) 자료를 차분하여 유도된 다변량 선형회귀모델(MLR 모델 8~11)로부터 증발량을 산정하는 경우 독립변수인 기상요소들의 상대적 중요도와 다변량 선형회귀모델의 적절성을 보여준다. 전반적으로 모든 형태의 MLR 모델에서 상당히 높은 F-값(F-value)과 결정계수 값을 보였고, p-값(p-value) 역시 0.000을 보여서 다변량 선형회귀모델이 종속변수인 증발량을 산정하는데 유용하다고 할 수 있다. 특히 Table 3의 경우 Table 2에서 적용된 차분(data differencing)하지 않은 자료를 이용한 MLR 모델과 비교하여 R^2 값에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 4에서 보는 바와 같이 모델 8의 경우 R^2 는 0.693이고, 독립변수인 포화미흡량과 풍속 중에서 포화미흡량이 표준화계수 $\delta = 0.836$ 을 보여서 표준화계수 $\delta = 0.063$ 을 보인 풍속보다도 더 증발량 산정에 영향력이 큰 것으로 나타났다. 모델 9의 경우 R^2 는 0.697이고, 독립변수인 포화미흡량, 기온 그리고 풍속의 표준화계수(δ)가 각각 0.783, 0.087, 0.077을 보여서 포화미흡량이 증발량 산정에 영향력이 가장 큰 것으로 나타났다. 모델 11에서 보는 바와 같이 모든 기상요소자료(풍속, 포화미흡량, 기온, 대기압)를 독립변수로 적용하는 경우 포화미흡량이 가장 중요한 기상요소인 것으로 나타났고, 다음으로 기온, 풍속 그리고 대기압인 것으로 나타났다. 또한 대기압을 제외한 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온)들이 증발량 산정에 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 모델 11의 경우 모델 9와 비교하여 독립변수로서 대기압이 추가되었지만 R^2

값이 개선되지 않는 결과를 보였다. 따라서 연구지역의 고도에 영향을 받는 대기압의 경우 증발률에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 5는 11개 증발모델들의 매개변수 보정과정에서 56개 연구지역의 전반부기간 기상요소자료를 이용하여 산정된 월 증발량과 관측된 월 증발점시 증발량의 통계치를 보여준다. 56개 전 연구지역의 전반부기간 평균 월 증발점시 증발량은 101.49 mm/month이고, 표준편차는 46.67 mm/month, 그리고 왜곡도계수는 0.577을 보였다. 11개의 모델 중에서 모델 8, 9, 10이 증발점시 증발량과 가장 유사한 월 증발량 산정치를 보였다. 반면에 모델 2의 경우 전체 평균 월 증발량이 82.69 mm/month를 보여서 증발점시 증발량과 가장 다른 산정치를 보였다.

3.2 공기동력학적 증발모형 검증

Table 6은 11개 증발모델들의 매개변수 보정과정에서 56개 연구지역의 후반부기간 기상요소자료를 이용하여 산정된 월 증발량과 관측된 월 증발점시 증발량의 통계치를 보여준다. 56개 전 연구지역의 평균 월 증발점시 증발량은 98.12 mm/month이고, 표준편차는 43.98 mm/month, 그리고 왜곡도계수는 0.470을 보였다. 11개의 모델 중에서 모델 5가 증발점시 증발량과 가장 유사한 월 증발량 산정치를 보였다. 반면에 모델 6의 경우 전체 평균 월 증발량이 84.93 mm/month를 보여서 증발점시 증발량에 비해서 가장 큰 차이를 보였다.

Table 5. Statistics of measured and estimated monthly pan evaporation for 56 study stations (model calibration period)

	Pan	Model										
		1	2	3	4	5	6	7	MLR			
									8	9	10	11
Mn	101.49	92.21	82.69	97.78	97.40	94.79	84.50	94.63	101.49	101.49	101.49	101.46
SD	46.67	45.47	57.27	46.36	46.91	47.66	56.52	38.58	38.65	39.31	38.71	39.38
Sk	0.577	0.484	1.386	0.553	0.603	0.650	1.282	0.269	0.302	0.002	0.308	0.002

pan: pan evaporation (mm/month); Mn: mean (mm/month), SD: standard deviation (mm/month), Sk: skewness

Table 6. Statistics of measured and estimated monthly pan evaporation for 56 study stations (model validation period)

	Pan	Model										
		1	2	3	4	5	6	7	MLR			
									8	9	10	11
Mn	98.12	107.25	86.27	106.48	105.76	103.08	84.93	104.19	108.38	106.75	108.42	106.74
SD	43.98	50.06	59.82	50.72	51.21	53.01	56.61	42.75	42.53	41.58	42.64	41.71
Sk	0.470	0.501	1.364	0.550	0.592	0.647	1.305	0.314	0.360	0.068	0.357	0.061

pan: pan evaporation (mm/month); Mn: mean (mm/month), SD: standard deviation (mm/month), Sk: skewness

Table 7은 우리나라 56개 전 연구지역의 후반부 기간자료와 개별 연구지역의 후반부 기간자료(Table 1)를 이용하여 11개의 증발량 산정모델들을 검정한 결과를 보여준다. **Dark italic** 숫자는 증발모델들로부터 산정된 증발량과 관측된 증발량으로부터 얻어진 NSE 지수를 순서대로 나열하였을 때 두 번째까지의 NSE지수 값을 보여준다. 56개 전 연구지역을 대상으로 증발모델을 검정한 경우에 11개 모델 중에서 모델 11이 가장 높은 NSE지수를 보였고 다음으로 모델 9가 높은 NSE지수를 보였다. 반면에 모델 2와 6의 경우 음(-)의 NSE지수 값을 보였다. 공기동력학적 방법에 기초한 모델들만 비교했을 때 Romanenko (1961)에 의해서 제안된 모델 형식이 가장 양호한 증발량 산정결과를 보였다.

개별 연구지역에 대해서 11개의 증발모델들을 검정한 결과로 판단할 때, 공기동력학적 방법을 이용한 증발모델들은 연구지역별로 각기 다른 정도의 모의수준을 보이는 것으로 나타났다. 모델 1의 경우 56개 연구지역 중에서 8개 연구지역이 **Dark italic** 숫자로 표시되었으며, 모델 2의 경우 1개 연구지역, 모델 3의 경우 7개 연구지역, 모델 4의 경우 8개 연구지역, 모델 5의 경우 2개 연구지역, 모델 6의 경우 1개 연구지역 그리고 모델 7의 경우 5개 연구지역이 포함되었다. 또한 모델 2와 6의 경우 가장 많은 지역에서 음(-)의 NSE지수 값을 보이는 것으로 나타났다.

Table 7. Evaluation of monthly pan evaporation estimates based on Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient

Study station	Model										
	1	2	3	4	5	6	7	MLR			
								8	9	10	11
All stations	0.370	-0.161	0.439	0.431	0.302	-0.049	0.459	0.527	0.607	0.529	0.610
Sokcho (1)	0.516	-0.204	0.415	0.352	0.293	0.498	0.438	0.424	0.557	0.445	0.582
Daegwallyeong (2)	0.032	0.158	0.359	0.187	0.393	0.321	0.103	0.562	0.657	0.555	0.583
Chuncheon (3)	0.723	0.074	0.830	0.841	0.781	0.106	0.816	0.852	0.870	0.852	0.869
Seoul (4)	-0.029	0.541	-0.022	0.012	-0.281	0.671	0.269	0.209	0.423	0.198	0.415
Incheon (5)	0.444	0.439	0.516	0.519	0.463	0.485	0.452	0.491	0.584	0.494	0.589
Wonju (6)	0.821	-0.703	0.856	0.830	0.612	-0.698	0.873	0.882	0.859	0.886	0.866
Suwon (7)	0.589	-0.130	0.666	0.670	0.612	-0.038	0.680	0.717	0.767	0.719	0.766
Chungju (8)	0.582	-0.593	0.757	0.769	0.533	-0.549	0.763	0.807	0.836	0.803	0.832
Seosan (9)	0.741	0.282	0.742	0.739	0.745	0.460	0.692	0.771	0.809	0.767	0.809
Uljjin (10)	0.526	-0.795	0.547	0.491	0.563	-0.265	0.442	0.490	0.603	0.496	0.613
Cheongju (11)	0.239	0.694	0.480	0.533	0.528	0.649	0.515	0.580	0.721	0.583	0.727
Daejeon (12)	0.389	0.433	0.567	0.605	0.583	0.467	0.548	0.614	0.703	0.615	0.706
Chupungnyeong (13)	0.856	0.637	0.905	0.893	0.896	0.737	0.811	0.865	0.876	0.863	0.877
Pohang (14)	0.421	0.252	0.338	0.291	0.134	0.371	0.363	0.435	0.539	0.457	0.560
Gunsan (15)	0.679	0.555	0.782	0.775	0.760	0.252	0.605	0.734	0.738	0.744	0.755
Daegu (16)	0.610	0.189	0.383	0.326	0.119	0.389	0.778	0.647	0.737	0.652	0.744
Jeonju (17)	0.313	-0.034	0.552	0.589	0.506	0.018	0.564	0.606	0.693	0.611	0.698
Ulsan (18)	0.608	0.246	0.644	0.646	0.642	0.456	0.461	0.611	0.713	0.613	0.716
Gwangju (19)	0.820	0.487	0.851	0.853	0.854	0.588	0.796	0.841	0.848	0.842	0.850
Busan (20)	0.241	-5.007	-0.832	-1.157	-1.007	-4.348	0.060	-0.401	-2.226	-0.403	-0.225
Tongyeong (21)	0.096	0.162	0.211	0.226	0.123	0.285	-0.020	0.183	0.318	0.210	0.352
Mokpo (22)	0.430	-0.517	0.267	0.197	0.180	-0.597	0.381	0.306	0.371	0.318	0.391
Yeosu (23)	-0.047	0.316	0.374	0.423	0.308	0.343	0.013	0.442	0.429	0.441	0.428
Wando (24)	0.260	-0.706	0.280	0.268	0.277	-0.407	0.138	0.344	0.551	0.328	0.540
Jeju (25)	0.415	-0.323	0.221	0.146	0.067	-0.199	0.337	0.259	0.353	0.279	0.379
Seogwipo (26)	0.082	-1.314	-0.400	-0.534	-0.787	-1.164	0.026	-0.038	0.106	-0.024	0.126

Table 7. Evaluation of monthly pan evaporation estimates based on Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient (Continue)

Study station	Model										
	1	2	3	4	5	6	7	MLR			
								8	9	10	11
Jinju (27)	0.432	-0.109	0.669	0.699	0.713	-0.027	0.599	0.680	0.745	0.697	0.761
Ganghwa (28)	0.700	-0.420	0.749	0.742	0.675	-0.291	0.692	0.746	0.799	0.747	0.799
Yangpyeong (29)	0.601	-0.226	0.840	0.865	0.768	-0.206	0.769	0.812	0.823	0.818	0.828
Icheon (30)	0.745	-0.934	0.767	0.741	0.407	-0.884	0.774	0.792	0.806	0.791	0.804
Inje (31)	0.850	0.465	0.874	0.867	0.877	0.496	0.854	0.874	0.863	0.874	0.868
Hongcheon (32)	0.909	-1.202	0.874	0.821	0.229	-1.136	0.915	0.900	0.883	0.907	0.891
Jecheon (33)	0.784	0.087	0.910	0.921	0.867	0.098	0.871	0.903	0.895	0.880	0.879
Boeun (34)	0.860	-0.625	0.763	0.706	0.537	-0.521	0.807	0.795	0.811	0.812	0.830
Cheonan (35)	0.616	0.022	0.657	0.657	0.604	0.163	0.684	0.724	0.808	0.723	0.808
Boryeong (36)	0.646	-0.135	0.617	0.611	0.646	0.146	0.579	0.706	0.775	0.687	0.759
Buyeo (37)	0.843	-0.912	0.728	0.692	0.479	-0.642	0.776	0.794	0.840	0.772	0.820
Geumsan (38)	0.783	-0.776	0.759	0.716	0.552	-0.567	0.805	0.820	0.806	0.830	0.815
Buan (39)	0.332	-1.008	0.221	0.195	0.152	-0.677	0.242	0.378	0.547	0.343	0.514
Imsil (40)	0.898	-1.152	0.844	0.771	0.436	-0.942	0.902	0.888	0.889	0.905	0.903
Jeongeup (41)	0.698	-0.591	0.854	0.859	0.673	-0.440	0.816	0.850	0.851	0.854	0.856
Namwon (42)	0.628	-1.314	0.715	0.695	0.350	-1.132	0.179	0.753	0.798	0.751	0.797
Jangheung (43)	0.774	-0.835	0.771	0.750	0.652	-0.521	0.760	0.815	0.825	0.809	0.820
Haenam (44)	0.798	-0.099	0.792	0.785	0.768	0.165	0.757	0.790	0.815	0.789	0.820
Goheung (45)	0.750	-1.679	0.614	0.557	0.295	-1.360	0.648	0.683	0.756	0.672	0.745
Seongsanpo (46)	0.351	0.111	0.405	0.407	0.436	0.326	0.157	0.420	0.576	0.417	0.592
Yeongju (47)	0.775	-0.735	0.792	0.745	0.586	-0.738	0.774	0.825	0.799	0.839	0.822
Mungyeong (48)	0.605	-0.343	0.828	0.857	0.771	-0.553	0.741	0.813	0.867	0.797	0.862
Yeongdeok (49)	0.572	-0.059	0.632	0.637	0.622	-0.065	0.532	0.633	0.707	0.634	0.705
Uiseong (50)	0.726	-1.205	0.784	0.760	0.451	-1.192	0.825	0.836	0.795	0.834	0.792
Gumi (51)	0.616	-0.094	0.790	0.810	0.824	-0.070	0.770	0.835	0.802	0.836	0.800
Yeongcheon (52)	-0.014	-0.125	0.537	0.639	0.729	-0.209	0.419	0.496	0.605	0.486	0.598
Geochang (53)	0.735	-1.399	0.679	0.599	0.367	-1.266	0.762	0.761	0.719	0.795	0.760
Hapcheon (54)	0.879	-1.128	0.814	0.777	0.435	-1.037	0.871	0.846	0.825	0.835	0.810
Miryang (55)	0.496	-0.341	0.697	0.718	0.708	-0.286	0.667	0.734	0.783	0.741	0.787
Sancheong (56)	0.516	-1.213	0.845	0.873	0.653	-1.208	0.736	0.824	0.835	0.810	0.825

Dark italic NSE numbers indicate the evaporation equations in the order of providing appropriate results up to second equation

반면에 다변량 선형회귀모델(MLR 모델 8~11)의 경우 56개 전 연구지역을 대상으로 증발량을 모의할 때와 각각의 연구지역을 대상으로 모의할 때 모든 경우에서 모델 11이 증발량을 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다. 모델 11은 풍속, 포화미흡량, 기온 그리고 대기압 등을 독립변수로 포함하고 있다. 또한 모델 11에 적용된 기상요소자료 중에서 대기압이 포함되지 않은 모델 9 역시 증발량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Table 3의 모델 11에서 보는 바와 같이

대기압이 다른 기상요소들과 비교하여 가장 작은 표준화계수 값을 보여서 증발량 산정에 중요도가 가장 낮은 것에 기인한다.

Fig. 2는 11개 증발 모델들의 검증과정에서 각각의 모델들로부터 산정된 월 증발량과 관측된 월 증발량과의 상관관계를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 모델들로부터 산정된 증발량과 관측된 증발량 사이에 매우 높은 상관성이 있음을 알 수 있다. 특히 모델 매개변수 추정과정에서 보여준 바와 같이 모델 5가 가장 큰 결정계수 값($R^2 = 0.963$)을 보여서 증발

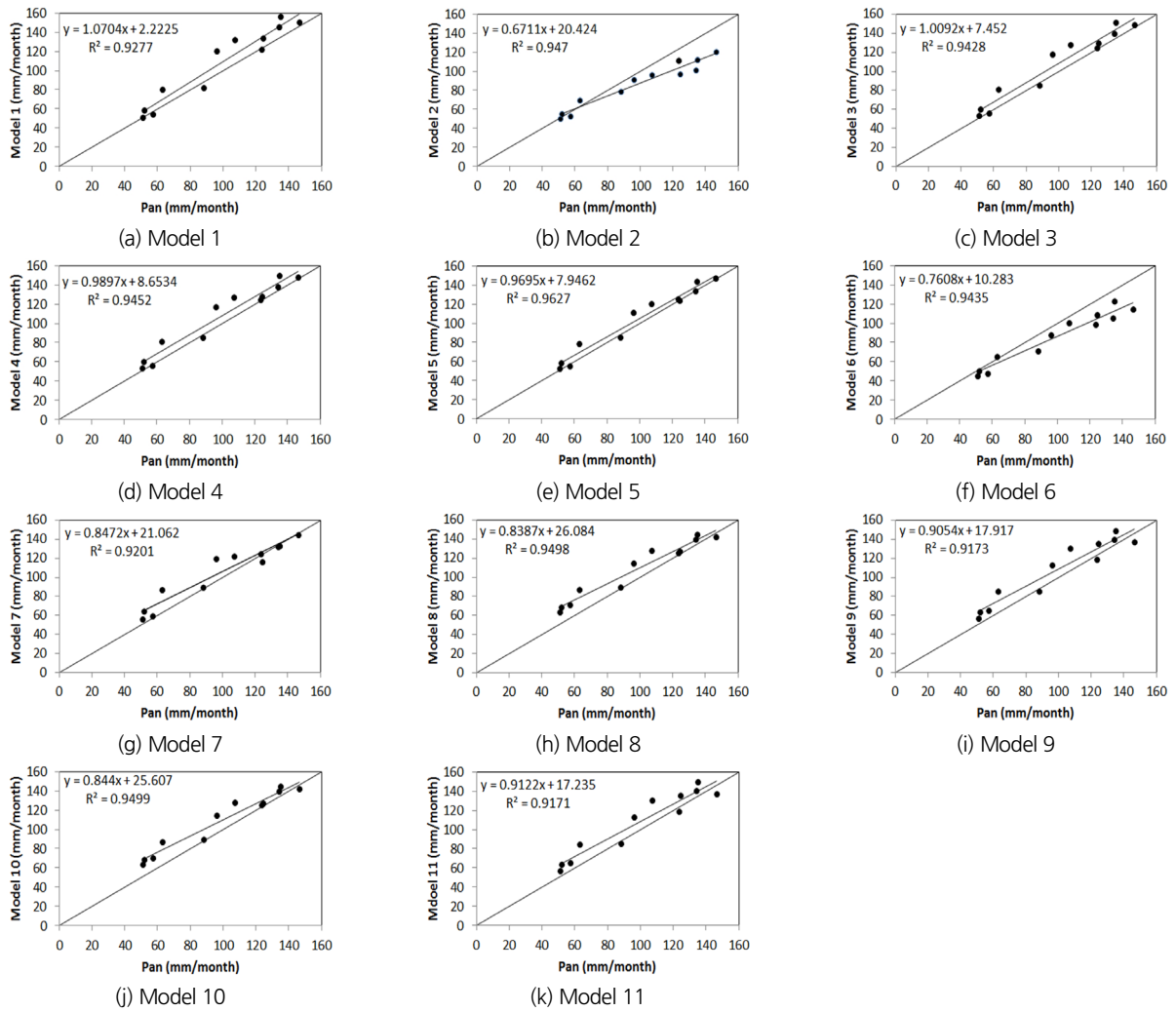


Fig. 2. 1:1 comparisons of measured and estimated pan evaporation (model validation period)

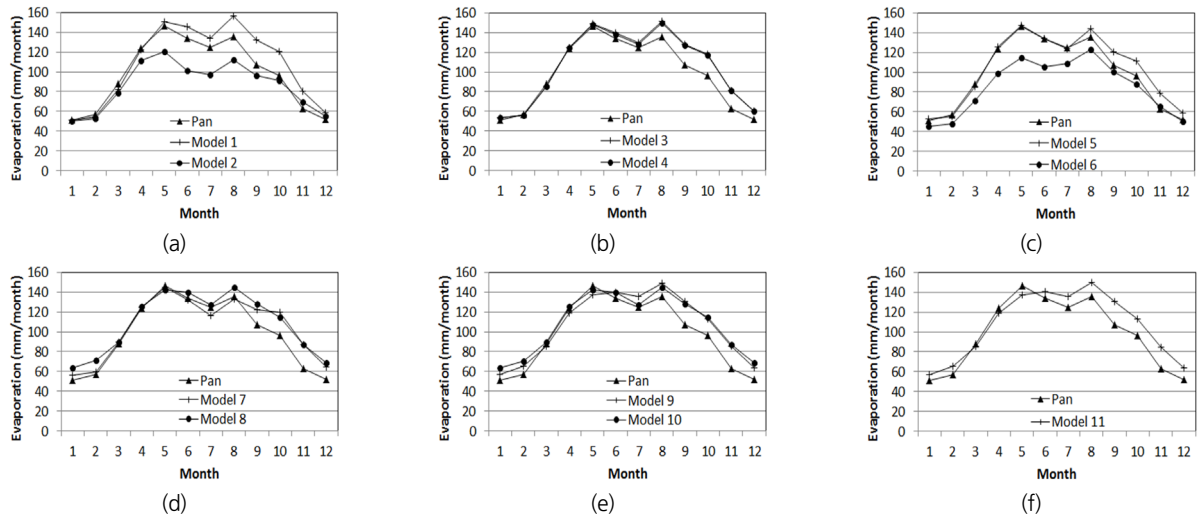


Fig. 3. Comparisons of monthly measured and estimated pan evaporation (model validation period)

접시 증발량과 산정된 증발량 사이에 매우 높은 상관성이 있음을 알 수 있다. 반면에 모델 11이 가장 작은 결정계수 값 ($R^2 = 0.917$)을 보였다. 모델 2와 6은 모델로부터 산정된 월 증발량이 관측된 월 증발량과 비교하여 증발접시 증발량이 많은 경우 증발접시 증발량을 과소하게 산정하는 것으로 나타났다, 모델 7, 8, 9, 10, 11은 증발접시 증발량이 작은 경우 증발접시 증발량을 과대하게 산정하는 것으로 나타났다. Fig. 3은 모델들의 검정과정에서 각각의 모델로부터 산정된 증발량과 관측된 증발접시 증발량의 월 변화를 보여준다. 월 증발량 모의결과를 비교할 때 대체적으로 모델 2와 6을 제외하고 산정된 증발량이 관측된 증발량을 적절하게 모의하고 있는 것으로 판단된다. 하지만 대부분의 모델에서 전반적으로 8, 9, 10, 11, 12월에 증발량을 과다 산정하고 있는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 증발량 산정방법 중에 하나인 공기동력학적 방법에 기초한 경험식들을 7개의 모델 형식으로 일반화하고 모델 보정과 검정을 실시하여 그 적용성을 분석하였다. 모델 보정과 검정은 전국 56개 연구지역을 대상으로 실시하였으며, 분석결과에 의하면 모델 보정과정에서는 Fitzgerald, Meyer, Kuzmin 그리고 Penman 등에 의해서 제안된 바 있는 모델 형식이 가장 양호한 증발량 산정결과를 보였고, 반면에 모델 검정과정에서는 Romanenko에 의해서 제안된 모델 형식이 가장 양호한 증발량 산정결과를 보였다. 모델들의 보정과 검정과정에서 산정된 월 증발량과 관측된 월 증발량 사이에 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다.

또한, 공기동력학적 방법에 적용된 기상요소자료들을 독립변수로 이용하여 다변량 선형회귀모델을 유도하고 그 적용성을 검토하였으며, 각 기상요소들의 상대적 중요도를 분석하였다. 기상자료들의 자기상관의 영향을 고려하기 위해 변수들을 차분시켜 회귀분석을 실시하였고 자기상관을 고려하지 않은 경우와 비교한 결과 결정계수 값에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 다변량 선형회귀모델의 경우 공기동력학적 방법에 기초한 경험식들과 비교하여 상대적으로 양호한 모의결과를 보였고, 다변량 선형회귀식에 이용된 기상요소(풍속, 포화미흡량, 기온)들은 대기압을 제외하고 모두 증발량 산정에 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 적용된 기상요소들 중에서 포화미흡량이 가장 중요한 기상요소이고, 다음으로 기온, 풍속 그리고 대기압의 순이었다.

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.
- Assouline, S., and Mahrer, Y. (1993). "Evaporation from Lake Kinneret: 1 eddy correlation system measurements and energy budget estimates." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 901-910.
- Dalton, J. (1802). "Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapor from water or other liquid in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat." *Manchester Literary and Philosophical Society. Memoirs and Proceedings*, Vol. 5, pp. 536-602.
- Fitzgerald, D. (1886). "Evaporation." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 98(HY12), pp. 2073-2085.
- Gangopaghaya, M., Harbeck, G. E., Nordenson, T. J., Omar, M. H., and Uryvaev, V. A. (1966). *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*. Technical Note 83, 121pp. World Meteorological Organization.
- Goddard, W. B., and Pruitt, W. O. (1966). "Mass transfer-eddy flux methods." *Proceedings, ASAE Conference on Evapotranspiration and Its Role in Water Resources Management*, Chicago Ill, pp. 38-41.
- Guitjens, J. C. (1982). "Models of alfalfa yield evapotranspiration." *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 108, No. 3, pp. 212-222.
- 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, No.1, pp. 91-97.
- Harbeck, G. E. (1958). "Water loss investigations, Lake Mead studies." *U.S. Geological Survey Professional Paper 298*, US Government Printing Office, Washington, D.C.
- Harbeck, G. E., Kohler, M. A., Koberg, G. E., and others. (1954). "Water loss investigations: Lake Mead studies." *USGS Professional Paper 298*, US Government Printing Office, Washing, D.C.
- Harbeck, G. E. (1962). "A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory." *Geological Survey Professional Paper 272-E*, 101-5. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Harbeck, G. E., Kohler, M. A., and Koberg, G. E. (1954). "Water loss investigations: Lake Hafner studies." *USGS Professional Paper 269*, pp. 1-158. US Geological Survey.
- Horton, R. E. (1919). "Rainfall interception." *Monthly Weather Review*, Vol. 47, No. 9, pp. 603-623.
- Jensen, M. E. (1973). *Consumptive use of water and irrigation requirements*. ASAE, New York.
- Kuzman, P. O. (1957). "Hydrophysical investigations of land waters." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 3, pp. 468-478.

- Lapworth, C. F. (1965). "Evaporation from a reservoir near London." *Journal of the Institution of Water Engineers*, Vol. 19, pp. 163-181.
- Linacre, E. T. (1993). "Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 64, No. 3-4, pp. 237-256.
- Meyer, A. F. (1915). "Computing runoff from and other physical data." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 79, pp. 1055-1155.
- Meyer, A. F. (1944). *Evaporation from lakes and Reservoirs*. Minnesota Resources Commission, St. Paul, MN.
- Mkhwanazi, M., Chavez, J. L., and Rambikur, E. H. (2012). "Comparison of large aperture scintillometer and satellite-based energy balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination." *International Journal of Remote Sensing Applications*, Vol. 2, No. 1, pp. 24-30.
- Paul, G., Gowda, P. H., Prasad, V., Howell, T. A., and Staggenborg, S. A. "Evaluating surface energy balance system (SEBS) using aircraft data collected during BEAREX07." *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing knowledge for sustainability*, pp. 2777-2786.
- Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, pp. 120-145.
- Priestley, 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, pp. 81-92.
- Rohwer, C. (1931). "Evaporation from free water surfaces." *Technical Bulletin 271*, US Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Sene, K. J. Gash, J. H., and McNeil, D. D. (1991). "Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements." *Journal of Hydrology*, Vol. 127, No. 1-4, pp. 193-217.
- Sill, B. L. (1981). "Free and forced convection effects on evaporation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 9, pp. 1216-1231.
- Stannard, D. I., and Rosenberry, D. O. (1991). "A comparison of short-term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods." *Journal of Hydrology*, Vol. 122, No. 1-4, pp. 15-22.
- Stewart, R. B., and Rouse, W. R. (1976). "A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 623-628.
- Sutton, O. G. (1949). "The application to micrometeorology of the theory of turbulent flow over rough surfaces." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 75, No. 326, pp. 335-350.
- Sverdrup, H. U. (1946). "The humidity gradient over the sea surface." *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-8.
- Tanner, C. B. (1966). "Comparison of energy balance and mass transport methods for measuring evaporation." *Proceedings, ASAE Conference on Evapotranspiration and Its Role in Water Resources Management*, Chicago Ill, pp. 45-48,
- Thornthwaite, C. W., and Holtman, B. (1939). "The determination of land and water surfaces." *Monthly Weather Review*, Vol. 67, pp. 4-11.
- Tyrvalainen, M. (1978). "Upper layer observations and simulation using Kraus and Tuner's model in Gulf of Finland." *Nordic Hydrology*, Vol. 9, pp. 207-218.
- Weisman, R. L. (1975). "Comparison of warm water evaporation equations." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 101, No. 10, pp. 1303-1313.