

제한적인 기상자료 조건에서의 잠재증발산량 추정을 위한 FAO56 Penman-Monteith 방법의 적용성 분석 - 안동댐 유역을 사례로 -

김세진* · 김문일* · 임철희* · 이우균** · 김백조**

*고려대학교 환경생태공학과, **국립기상과학원 응용기상연구과

Applicability Analysis of FAO56 Penman-Monteith Methodology for Estimating Potential Evapotranspiration in Andong Dam Watershed Using Limited Meteorological Data

Kim, Sea Jin*, Kim, Moon-il*, Lim, Chul-Hee*, Lee, Woo-Kyun** and Kim, Baek-Jo**

*Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

ABSTRACT

This study is conducted to estimate potential evapotranspiration of 10 weather observing systems in Andong Dam watershed with FAO56 Penman-Monteith (FAO56 PM) methodology using the meteorological data from 2013 to 2014. Also, assuming that there is no solar radiation data, humidity data or wind speed data, the potential evapotranspiration was estimated by FAO56 PM and the results were evaluated to discuss whether the methodology is applicable when meteorological dataset is not available. Then, the potential evapotranspiration was estimated with Hargreaves method and compared with the potential evapotranspiration estimated by FAO56 PM only with the temperature dataset. As to compare the potential evapotranspiration estimated from the complete meteorological dataset and that estimated from limited dataset, statistical analysis was performed using the Root Mean Square Error (RMSE), the Mean Bias Error (MBE), the Mean Absolute Error (MAE) and the coefficient of determination (R^2). Also the Inverse Distance Weighted (IDW) method was performed to conduct spatial analysis. From the result, even when the meteorological data is limited, FAO56 PM showed relatively high accuracy in calculating potential evapotranspiration by estimating the meteorological data.

Key words: Potential Evapotranspiration, FAO56 Penman-Monteith Methodology, Hargreaves Equation, Limited Data

1. 서 론

우리나라는 강우의 특성이 계절적으로 편중되어 있고, 기후변화로 인한 홍수 및 가뭄으로 수자원의 안정적인 공급이 어려운 실정이다(Hong, 2011; Ryu and Kim, 2011). 그러나 물은 농작물의 생산, 산업활동 등 인간의 삶에 필수적이며, 따라서 수자원의 수요와 공급에 관한 시기와 양을 이해하고 추정하는 것은 수자원 관리에 있어 매우 중요하다. 현재 수문학적 변화를 모의하고, 수문기상 관측정보를 활용한 연구가 확

대되고 있는 실정이며, 안동댐 유역에서는 수문기상 관측정보를 활용한 기후권역 구분 및 기상인자의 시공간분포 추정의 연구 등이 이루어진 바 있다 (Lim *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016).

증발산량은 수표면이나 토양면에서 수증기의 형태로, 대기 중으로 방출되는 증발량과 식물의 엽면을 통해 지중의 물이 대기 중으로 방출되는 증산량의 합으로, 전반적인 수문순환에서 전체 물수지의 많은 부분을 차지하므로 증발산의 측정은 유역 수자원 관리에 있어 매우 중요한 요소이다(Im, 2013). 또

† Corresponding author: leewk@korea.ac.kr

Received April 28, 2017 / Revised June 1, 2017 / Accepted June 9, 2017

한, 전 지구적인 수문순환에서 증발산을 통해 대기로 환원되는 강수량은 약 60%에 이른다(Chin, 2000). 증발산량은 기상학과 수문학에 사용되는 중요한 농업기상 매개 변수이며, 수문순환과 강우-유출모형의 검증과 개발, 기후예측 및 기상예측모형 등의 기본자료가 되며, 관계에 있어 결정적인 요소 중 하나이다(Rosenberg *et al.*, 1983; Allen *et al.*, 1998; Mavi and Tupper, 2004; Sentelhas *et al.*, 2010). 또한, 증발산량은 농작물 생산에서 생육단계나 기상 조건에 따라 변화가 심하므로, 증발산량을 정확히 산정한다면 수자원의 관리 및 계획을 수립하는데 용이하다(Cho, 1987).

증발산량의 관측 방법은 실제 증발산량을 측정기기로 관측하는 방법과, 구조화된 알고리즘을 이용하여 산출하는 방법이 있다. 그러나 증발산량의 측정은 표본점을 기준으로 한 관측이므로 조밀한 관측망이 구성되지 않는다면 증발산량의 공간적 분포와 변이를 추정하는데 많은 어려움이 따른다. 또한, 증발산량은 기상, 식생, 토지 피복 등 다양한 요인들에 의해 영향을 받기 때문에, 이를 실측하는 것은 현실적으로 어렵다(Yun *et al.*, 2004). 따라서 증발산량과 밀접한 관련이 있는 기상 또는 식생변수를 이용한 간접적인 추정이 더욱 현실적이며, 잠재증발산량으로 실제증발산량을 예측하고자 하는 연구 또한 다른 나라에서 많이 이루어졌다(Ritchie and Burnett, 1968; Jensen *et al.*, 1970; Ritchie, 1972; Hanks, 1974; Allen, 1986; Allen and Pruitt, 1986; Jensen *et al.*, 1990). 잠재증발산량은 일정지역의 기후조건하에서 표준잔디가 수분의 제한을 받지 않는 상태에서의 증발산 가능량을 말한다(Ryu *et al.*, 2000).

국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO)는 작물 계수(crop coefficients) (Kc)에 기반하여 잠재증발산량을 추정하는 방법을 개발하였다(Doorenbos and Pruitt, 1997). Allen *et al.*(1998)은 Penman-Monteith 방법을 기반으로 FAO56 Penman-Monteith(FAO56 PM) 방법을 개발하였고, 이 공식으로 일단위 이하의 잠재증발산량 산정시 비교적 정확한 결과를 가지는 것을 확인하였다. 또한, 이후에 이어지는 연구논문들에서도 FAO56 PM 방법의 우수성이 증명되었으며, 세계관개배수위원회(ICID), 세계기상기구(WMO)에서 추천하였다(Chiew *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998; Garcia *et al.*, 2004; López-Urrea *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2007). 그러나 우리나라에서는 FAO56 PM 방법에 따른 잠재증발산량 연구가 부족한 실정이다.

Allen *et al.*(1998)은 증발산량에 미치는 주된 기상요소는 복사(radiation), 대기온도(air temperature), 습도(humidity)와 풍속(wind speed)이라고 분석하였다. 잠재증발산량은 토양의 수분이 완전히 포화된 상태에서의 증발산량이며, 토양의 수분이

포화된 상태이기 때문에 증발산량은 지표의 성질 및 조건과 무관하며, 오직 기상요소에만 영향을 받게 된다. 따라서 잠재증발산량을 추정하는 FAO56 PM 식으로 일별 잠재증발산량을 계산하기 위해서는 위의 네 가지 기상자료를 필요로 한다. 그러나 잠재증발산량이 수자원 관리에 중요함에도 불구하고, 기상자료가 부족하거나 결측된 지역에서 연구가 진행될 경우는 상당하다.

기상자료가 부족한 조건에서도 연구가 진행될 수 있기 위해, Allen *et al.*(1998)은 기상자료의 추정 방법을 제안하였으며, 불가리아, 캐나다, 튀니지 등에서 수행한 연구로부터 이 방법은 적합하다고 결론지었다(Popova *et al.*, 2006; Jabloun and Sahli, 2008; Sentelhas *et al.*, 2010). 또한, 관측자료의 신뢰성이 낮거나 자료가 없는 경우, FAO56 PM 방법과 Hamon 방법이 잠재증발산량 산정방법으로 적합하다는 연구를 진행한 바 있다(Jung *et al.*, 2006). 또한, Allen *et al.*(1998)은 기온자료만 있는 경우에는 Hargreaves 식으로 잠재증발산량을 구하는 것을 제안하였으며, 이 방법은 주 단위 또는 그 이상의 예측에 정확도가 높았다(Hargreaves and Samani, 1982; Allen *et al.*, 1998; Hargreaves and Allen, 2003).

본 연구에서는 기상자료가 부족한 조건에서도 통계적으로 유의미한 범위 내에서 잠재증발산량을 추정가능한지를 알아보기 위해 Allen *et al.*(1998)이 제안한 FAO56 PM 방법으로 기상자료가 구축되어 있지 않은 경우와 필요한 기상자료가 모두 구축된 경우의 잠재증발산량을 산정하였다. 본 논문에서는 자료가 구축되어 있지 않은 경우를 자료가 제한적이라고 표현하고, 필요한 자료가 모두 구축될 수 있는 경우를 완전한 자료가 구축된 경우라고 표현하였다. 또한, 기상자료가 제한적일 때 이 방법의 정확성 및 유효성을 평가하고, 기상자료 중 최고기온과 최저기온만 존재하는 경우에 Hargreaves 식으로 추정된 잠재증발산량과 FAO56 PM 방법으로 추정한 잠재증발산량을 비교 및 평가하여 어떤 방법이 더 유효한지에 대한 분석을 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 활용 변수 및 자료

제한적인 기상자료 조건에서 FAO56 PM 방법을 이용해 잠재증발산량을 산정하기 위해 낙동강 상류 안동댐 유역의 10개 기상관측소의 기상자료를 활용하였다. 본 연구의 대상지는 약 1,628 km²에 해당하는 면적이며, 안동댐 상류 유역 중 87.7%는 산림으로 이루어져 있다(Ji *et al.*, 2012). 기상관측소 중 3

개소는 기상청이 설치하였으며, 그 중 2개소는 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System; ASOS), 1개소는 농업기상관측소(Automated Agricultural Observing System; AAOS)로 이루어져 있다. 나머지 7개소는 국립기상과학원이 설치한 수문기상 관측망으로, 그 중 5개소는 자동기상관측장

비(Automatic Weather System; AWS), 2개소는 플럭스(Flux) 타워로 이루어져 있다(Table 1, Fig. 1). 이들 기상관측소에서는 대기온도, 상대습도(relative humidity), 태양복사에너지(solar radiation), 풍속 자료를 ASOS와 AWS는 시간별로, AAOS와 플럭스 타워는 분별로 제공하고 있으며, 본 연구에서는 2013

Table 1. Geographical coordinates and characteristics of the weather observing systems

ID	Longitude	Latitude	Elevation (m)	Type	γ^* (kPa °C ⁻¹)	K_{ps}^{**} (°C ^{-0.5})
136	128.707	36.573	140	ASOS	0.066	0.1587
276	129.042	36.432	206	ASOS	0.066	0.1581
972	128.683	36.550	89	AAOS	0.067	0.1592
A1	128.901	36.858	216	AWS	0.066	0.1580
A2	128.949	36.834	352	AWS	0.065	0.1567
A3	128.955	36.784	364	AWS	0.065	0.1566
A4	128.871	36.771	221	AWS	0.066	0.1579
A5	128.879	36.839	248	AWS	0.065	0.1577
A6	128.875	36.732	180	Flux	0.066	0.1583
A7	128.683	36.550	89	Flux	0.067	0.1592

* Psychrometric constant (kPa °C⁻¹), ** Adjustment coefficient (°C^{-0.5}).

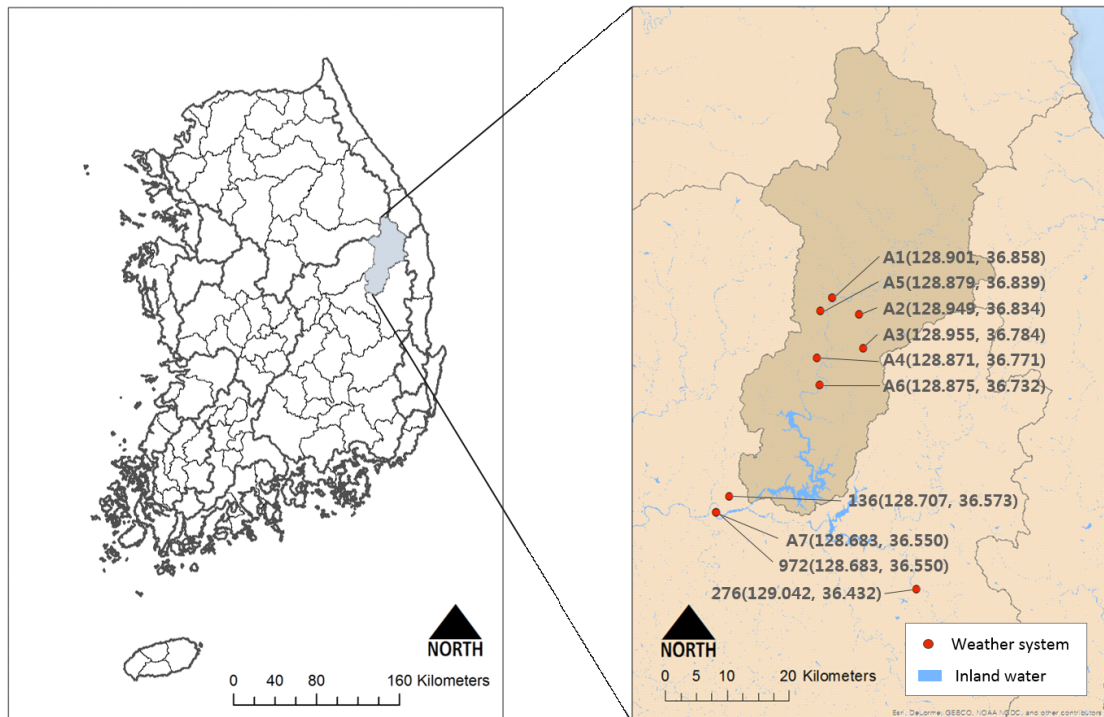


Fig. 1. Geographical locations of the 10 weather observing systems.

년에서 2014년까지 총 2개년 일별 기상자료를 이용하였다.

2.2 FAO56 Penman-Monteith 방법과 산정 절차

Penman-Monteith 방법론은 1965년에 제안된 증발산량 산정 방법으로, 공력저항(aerodynamic resistance) 및 표면저항(surface resistance)을 고려하여 증발산량을 추정한다. Jensen *et al.*(1990)은 건조지역 및 습윤지역에 대해서 이 식을 이용한 잠재증발산 산정 결과와 다른 20가지의 잠재증발산 산정 결과를 비교 및 검토하였을 때, 모든 지역에서 Penman-Monteith 방법론이 가장 우수하다는 것을 증명하였다.

FAO56 PM 방법은 Penman-Monteith 공식을 바탕으로 물이 충분히 공급되는 곳의 표면의 반사율(Albedo)이 0.23, 표면저항(surface resistance)이 70 s m^{-1} , 높이가 0.12 m인 잔디와 같은 기준작물을 설정하여 지표면을 모두 덮은 상태의 증발산량을 추정한다. FAO56 PM 방법으로 산정된 잠재증발산량은 전 세계적으로 작물생산에 필요한 실제 물의 양과 일관성 있는 결과를 나타낸다. 이 공식을 사용하기 위해서는 기온, 습도, 복사량 및 풍속에 관한 기상자료가 필요하며, 일별 잠재증발산량을 추정하는 공식은 다음의 식 (1)과 같다(Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T_{mean} + 273))u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

식 (1)에서 ET_o 는 기준잠재증발산량(mm day^{-1})이고, R_n 은 순복사량(net radiation, $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G 는 토양 열 유속 밀도(soil heat flux density, $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T_{mean} 은 2 m 높이에서의 일평균기온($^{\circ}\text{C}$), u_2 는 2 m 높이에서의 풍속(m s^{-1}), $e_s - e_a$ 는 포화증기압에서 실제증기압(kPa)을 감한 포화 결손량, Δ 은 증기압 곡선의 기울기($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), 그리고 γ 은 건습계상수(psychrometric coefficient, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)이다. 이 공식에는 0.408이라는 상수값이 에너지항에 포함되어 있는데, 이 값은 에너지 단위인 $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 를 mm day^{-1} 로 바꾸기 위한 단위환산계수이다.

FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 구하는 표준 방법은 태양복사에너지 또는 일조시간(sunshine duration), 최고기온, 최저기온, 최대상대습도, 최저상대습도, 그리고 풍속을 활용하여 구하는 것이다. FAO56 PM으로 잠재증발산량을 산정하기 위해 Allen *et al.*(1998)이 제안한 방법으로 R_n , $e_s - e_a$, Δ 를 관측된 기상자료로 구축하였다. G 는 복사열에너지와 비교하여 매우 작고, 지표가 식물로 피복되어 있을 때는 더욱 작아 지므로 1일 단위의 G 는 무시될 수 있다. 건습계 상수(γ)는 다

음의 식 (2)로 계산된다(Allen *et al.*, 1998).

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (2)$$

식 (2)에서 γ 은 건습계 상수($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), P 는 대기압(kPa), λ 는 수증기 잠열(2.45 MJ kg^{-1}), c_p 는 일정한 압력 하에서 측정된 비열(정압비열, specific heat at constant pressure)($1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), 그리고 ϵ 는 기체상수의 비(건조한 공기와 수증기의 분자량비, water vapour/dry air = 0.622)이다. 대기압은 정상 기온 범주에서 경미하게 변하므로 각 지점의 평균값을 사용하였고, 다음과 같이 구할 수 있다[식 (3)]. 따라서 건습계 상수는 각 지점에서 일정하다고 가정한다(Table 1).

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \times \text{elevation}}{293} \right)^{5.26} \quad (3)$$

그러나 경우에 따라서는, 부족하거나 결측된 기상자료로 인하여 FAO56 PM 방법을 사용하는데 제한이 있을 수 있다. 이에 대하여서, Allen *et al.*(1998)은 기상자료를 추정할 수 있는 대체의 방법 또한 제안하였다.

2.2.1 일사 자료의 추정

Allen *et al.*(1998)은 기온의 차를 이용한 방법으로 지표면에 도달하는 태양복사에너지(R_s)를 추정하는 방법을 식 (4)로 제안한다. 이는 최고기온과 최저기온의 차가 한 지점의 이미 존재하는 태양복사에너지와 밀접한 관련이 있다는 것에 기인한다. 일사 자료가 구축되면 Allen *et al.*(1998)이 제안한 일련의 방법으로 순복사량(R_n)를 계산할 수 있다.

$$R_s = k_{rs} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (4)$$

식 (4)에서 R_a 는 대기권 밖에서의 복사에너지($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)로 관측지점과 날짜에 따라 변화하는 주어진 값이다. T_{\max} 는 최고기온($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} 은 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 그리고 k_{rs} 는 조정 계수($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$)이다. k_{rs} 는 내륙지역과 해안지역에서 각각 다르다고 알려져 있으며, 경험적으로 내륙지역에서는 0.16, 해안지역에서는 0.19로 계산한다, Allen(1997)은 k_{rs} 를 추정하기 위해 고도를 식에 포함시켰다(Hargreaves and Samani, 1982).

$$k_{rs} = k_{r_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5} \quad (5)$$

식 (5)에서 P 는 평균 대기압(kPa)이고, P_0 는 해수면 기준 평균 대기압(101.3 kPa), k_0 는 조정계수로 경험적으로 내륙지역에서 $0.17 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$, 해안지역에서 $0.20 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$ 로 알려져 있다. PP_0^{-1} 은 고도가 대기의 용적열용량에 어떠한 영향을 미치는지를 알기 위한 것이다(Jabloun and Sahli, 2008).

2.2.2 습도 자료의 추정

상대습도는 실제증기압과 포화증기압의 비율로 구할 수 있으며, 증기압은 대기온도와 관련 있다. Allen *et al.*(1998)은 포화증기압($e^o(T)$)을 구하기 위해 식 (6)을 제안하였으며, 이 식에서 T 는 대기온도($^\circ\text{C}$)이다.

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (6)$$

식 (6)의 비선형성으로 인하여, 평균 포화증기압(e_s)은 식 (7)과 같이 최고기온으로 계산한 포화증기압과 최저기온으로 계산한 포화증기압의 평균값으로 표현되어야 한다(Allen *et al.*, 1998).

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad (7)$$

실제증기압(e_a)은 이슬점온도(T_{dew})가 일최저기온(T_{\min})과 비슷하다는 가정 하에 추정하여 구할 수 있다. 즉, 이슬점온도는 공기가 수증기로 포화되고 상대습도가 100%에 가까울 때 측정되는 일최저기온에 가까우므로, T_{dew} 를 T_{\min} 로 대체할 수 있다. 따라서 e_a 는 다음과 같이 추정된다[식 (8)](Allen *et al.*, 1998).

$$e_a = e^o(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \quad (8)$$

다만, T_{\min} 은 T_{dew} 보다 더 크거나 작은 값일 수 있고, 이런 경우에는 일최저기온에 대한 보정이 필요하다(Allen, 1996). Allen *et al.*(1998)은 식 (8)의 일최저기온으로 추정하는 e_a 가 유효한지 확인해볼 필요가 있다고 서술한다.

2.2.3 풍속 자료의 추정

풍속 자료가 없을 경우, Allen *et al.*(1998)은 평균풍속을 활용하라고 제안하지만, 습하고 바람이 많이 부는 지역인 경우를 제외하면 잠재증발산량에 미치는 풍속의 영향은 상대적으로

로 작다고 알려져 있다(Martinez-Cob and Tejero-Juste, 2004). 따라서 전 세계 2,000여 개의 기상관측소의 평균 풍속 값인 $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ 를 기본 값(default value)으로 활용할 수 있다(Allen *et al.*, 1998; Martinez-Cob and Tejero-Juste, 2004).

2.3 최고기온과 최저기온만을 사용한 잠재증발산량 추정

잠재증발산량 추정에 최고기온과 최저기온자료만 활용 가능한 경우, Allen *et al.*(1998)은 두 가지 방법을 제안한다. 첫 번째는 Hargreaves *et al.*(1985) 공식으로, 이 식에서는 최고기온과 최저기온만이 사용되며, 식물의 소비수량과 물수요를 산정하기 위하여 널리 사용된다(Hargreaves *et al.*, 1985; Hargreaves & Allen, 2003). 이 공식에 의한 기준곡물증발산은 높이가 0.12 m, 반사율(Albedo) 0.23, 그리고 표면저항(Surface Resistance) 69 s/m인 이상적인 초지에서의 증발율(rate of evaporation)을 의미한다. Hargreaves *et al.*(1985)에 의하면 이 식은 전 세계적으로 큰 수정 없이 이용할 수 있으며, 온도에 기초한 증발산량 산정 공식 중 비교적 정확도가 우수한 공식으로 알려져 있다(Lee and Park, 2008). 이는 식 (9)와 같이 쓰일 수 있다(Droogers and Allen, 2002).

$$ET_o = 0.0023(T_{\text{mean}} + 17.8) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} RA \quad (9)$$

식 (9)에서 잠재증발산량인 ET_o 는 일별 잠재증발산량(mm day^{-1}), T_{\max} 는 일최고기온($^\circ\text{C}$), T_{\min} 은 일최저기온($^\circ\text{C}$), T_{mean} 은 일최고기온과 일최저기온을 평균한 평균기온($^\circ\text{C}$), RA 는 대기권 밖에서의 복사에너지(extraterrestrial radiation)를 증발산량 단위(mm day^{-1})로 환산한 값이다. RA 은 위도와 계절에 따라 변하며, 이 값은 Hargreaves(1994)의 연구에 제시되어 있다.

두 번째로는 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 추정하는 방법으로, 최고기온과 최저기온만을 관측값으로 사용하고, 태양복사에너지, 습도, 풍속 인자에 대하여서는 Allen *et al.*(1998)이 제안한 인자들의 추정 방법인 식 (4), 식 (8), 그리고 풍속의 디폴트 값을 활용하여 잠재증발산량을 산정하는 방법이다. 본 연구에서는 태양복사에너지는 $T_{\max} - T_{\min}$ 을 활용하여 추정하는 식 (4)를, 습도는 T_{\min} 을 활용하여 추정하는 식 (8)을, 풍속은 기본 값을 사용한다.

2.4 통계 분석

잠재증발산량 추정 결과는 위에서 언급된 계산절차를 따라 구할 수 있으며, 본 연구에서는 제한된 기상자료를 추정하여

계산한 잠재증발산량과 완전한 기상자료를 활용하여 추정 한 잠재증발산량(ET_{0-ref}) 결과를 비교하였다. 모든 비교는 단순선형회귀분석으로 이루어졌다.

또한, 추정된 잠재증발산량 자료의 정확성을 평가하기 위하여 통계지표인 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE), 평균 편의 오차(Mean Bias Error; MBE), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error; MAE), 그리고 결정계수(R^2)를 이용하여 제한된 기상자료를 추정하여 계산한 잠재증발산량과 완전한 기상자료를 추정하여 계산한 잠재증발산량의 오차를 판별하였다[식 (10)~(12)].

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0-est} - ET_{0-ref})^2 \right)^{0.5} \text{ (mm day}^{-1}\text{)} \tag{10}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0-est} - ET_{0-ref}) \text{ (mm day}^{-1}\text{)} \tag{11}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET_{0-est} - ET_{0-ref}| \text{ (mm day}^{-1}\text{)} \tag{12}$$

식 (10)~(12)에서 ET_{0-est} 는 기상자료가 제한적일 경우에 추정된 잠재증발산량이고, ET_{0-ref} 는 기상자료가 완전하게 있을 때 추정된 잠재증발산량이며, n 은 자료의 개수를 뜻한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 완전한 기상자료로 산정한 잠재증발산량

본 연구에서는 완전한 기상자료를 가지고 잠재증발산량을 FAO56 PM 방법으로 산정하였다(Fig. 2). 추정한 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 $2.4741 \text{ mm day}^{-1}$ 이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 $2.4273 \text{ mm day}^{-1}$, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 $2.5211 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다. 또한, 각 관측소별로 추정된 잠재증발산량 값을 역거리가중법(Inverse distance weighted method; IDW)을 사용하여 안동댐 유역에 보간하였다(Fig. 3). 보간한 결과에서는 수역보다 산림 지역에서 보다 많은 평균 증발산량이 많았으며, 증발산량의 범위는 $2.1346 \text{ mm day}^{-1}$ 부터 $2.9105 \text{ mm day}^{-1}$ 이었고, 평균은 $2.5062 \text{ mm day}^{-1}$ 였다. 다만, 안동댐으로 인해 수몰된 부근에 기상관측소가 설치되어 있지 않았으므로 수역의 실제 증발산량을 보간으로 추정하는 것에 한계가 있다고 판단된다.

3.2 일사 자료가 없을 때 산정한 잠재증발산량

본 연구에서는 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 산정하기 위해 식 (4)의 태양복사에너지 자료 추정방법으로 산정된 일사 자료를 활용하였다. 추정한 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 $2.6567 \text{ mm day}^{-1}$ 이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 $2.5939 \text{ mm day}^{-1}$, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 $2.7196 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다. 또한, 산정된 잠재증발산량(ET_{0-R})과 완전한 기상자료가 있을 때 추정한 잠재증발산량(ET_{0-ref})을 비교하였다(Fig. 4). 이후, 역거리가중법을 사용하여 추정된 잠재증발산량을 안동댐 유역에 보간하였다(Fig. 5). 보간한 결과에서는 안동댐 하류와 농지에서 증발산량이 많았으며, 증발산량의 범위는 $2.3311 \text{ mm day}^{-1}$ 부터 $2.8871 \text{ mm day}^{-1}$ 이었고, 평균은 $2.6550 \text{ mm day}^{-1}$ 였다. 완전한 기상자료가 있었을 때 보간법으로 추정된 Fig. 3과 비교하

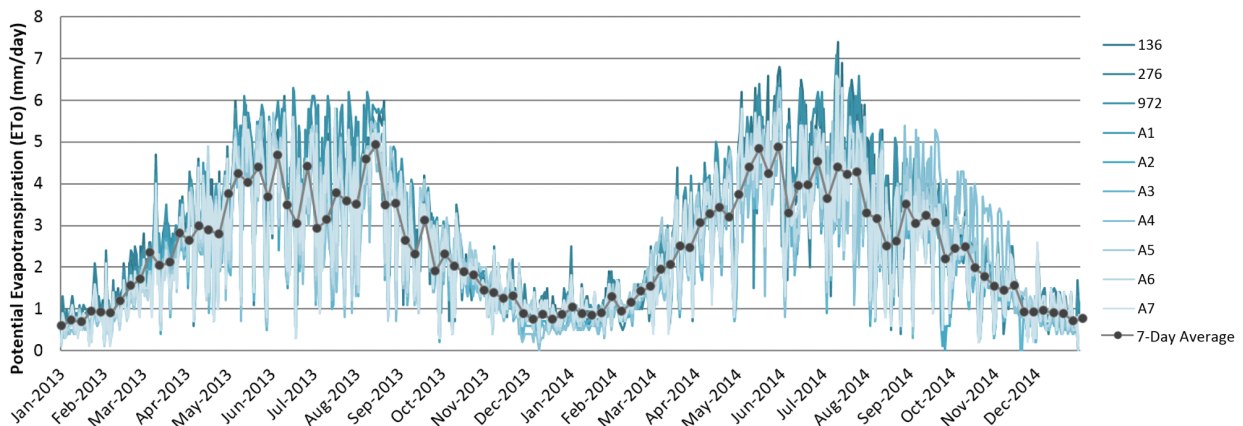


Fig. 2. Evapotranspiration computed from complete meteorological dataset (ET_{0-ref}).

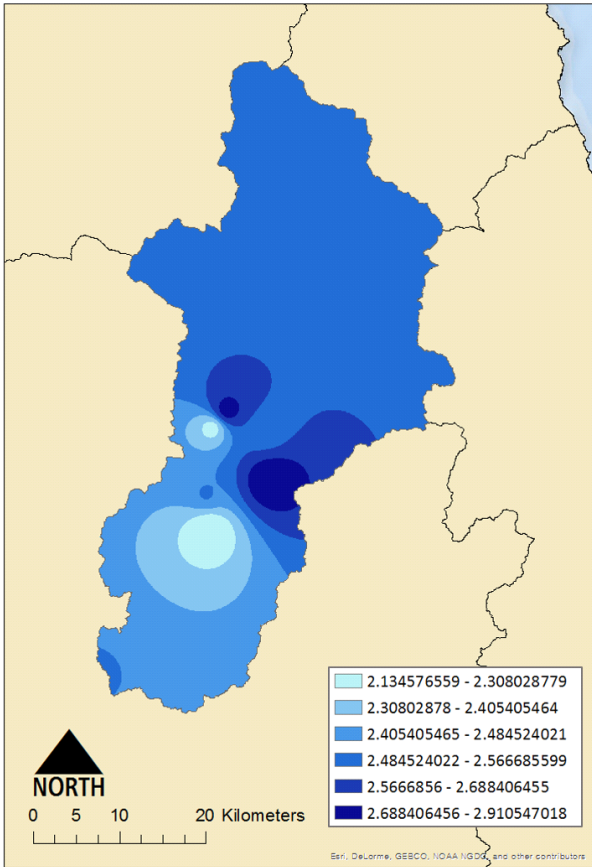


Fig. 3. Evapotranspiration with complete meteorological dataset interpolated by IDW method (ET_{0-ref}).

였을 때, 안동댐 하류에서 더 많은 증발산량이 추정되었고, 연구대상지의 평균 증발산량 또한 더 많이 추정되었다.

Table 2는 산정된 두 잠재증발산량의 RMSE, MBE, MAE, R²의 값이다. Jabloun and Sahli(2008)는 기준잠재증발산량과 기상자료가 제한된 경우에 잠재증발산량을 산정했을 때, 두 값의 RMSE 차이가 0.45 mm day⁻¹ 이하인 경우는 값이 적당하다고 언급하였다. ET_{0-R}과 ET_{0-ref}의 RMSE는 136번 기상 관측소를 제외하고 모두 0.45를 넘는 높은 값이다. MBE의 경우는 -0.2027 mm day⁻¹에서 0.3336 mm day⁻¹ 사이였으며, MAE는 0.2624 mm day⁻¹에서 0.4861 mm day⁻¹ 사이였고, R²는 0.9에 가까운 값이 많았다. 추정 값의 평균은 1개의 지점 (972) 이외에는 모두 과대 추정되는 경향을 보이고, RMSE, MBE, MAE의 값도 비교적 높게 나타났으나, R² 값을 기반으로 보면 추정 결과가 적절하다고 판단된다. R² 값이 통계적으로 유의하므로 Allen *et al.*(1998)이 제안한 식 (4)의 태양복사 에너지 자료 추정 방법은 일사 자료가 제한적일 때 약간의 오

차를 고려하며, 사용할 수 있는 방법이라고 사료된다.

3.3 습도 자료가 없을 때 산정한 잠재증발산량

본 연구에서는 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 산정하기 위해 일최저기온을 활용하는 식 (8)의 실제습도 자료 추정방법으로 산정된 습도 자료를 활용하였다. 추정한 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 2.3701 mm day⁻¹이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 2.3384 mm day⁻¹, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 2.4019 mm day⁻¹이었다. 또한, 산정된 잠재증발산량(ET_{0-e_a})과 완전한 기상자료가 있을 때 추정한 잠재증발산량(ET_{0-ref})을 비교하였다(Fig. 6). 이후, 역거리기중법을 사용하여 추정된 잠재증발산량을 안동댐 유역에 보간하였다(Fig. 7). 보간한 결과에서는 수역보다 산림지역에서 보다 많은 평균 증발산량이 많았으며, 증발산량의 범위는 2.1547 mm day⁻¹부터 2.7844 mm day⁻¹이었고, 평균은 2.3976 mm day⁻¹이었다. 완전한 기상자료가 있었을 때 보간법으로 추정된 Fig. 3과 일사 자료가 없을 때 보간법으로 추정된 Fig. 5와 비교하였을 때, 연구대상지의 평균 증발산량은 과소추정되었다.

Table 3은 산정된 두 잠재증발산량의 RMSE, MBE, MAE, R²의 값이다. 결정계수가 모든 지점에서 0.96을 넘는 등의 결과를 통해 ET_{0-e_a}과 ET_{0-ref}의 값 간에 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. RMSE 값은 모든 지점에서 0.39 mm day⁻¹ 이하이고, MBE의 경우는 -0.2722 mm day⁻¹에서 0.0202 mm day⁻¹ 사이였으며, MAE는 0.0730 mm day⁻¹에서 0.2797 mm day⁻¹ 사이로 모두 낮은 값으로, 2개의 지점 이외에는 과소추정하는 경향을 보였다. RMSE, MBE, MAE의 값이 낮고, 높게 나타나는 R² 값을 통해 T_{dew}를 T_{min}으로 구하는 식 (8)의 습도 자료 추정 방법이 적절함을 보여준다. 즉, ET_{0-e_a}와 ET_{0-ref} 간에는 높은 상관관계를 보이고 있으며, 두 방법의 잠재증발산량 추정값이 매우 비슷한 것 또한 알 수 있다. 따라서 습도 자료가 없을 때에 식 (8)을 이용하여 실제습도 자료를 추정하는 것이 유의미하다고 판단된다.

3.4 풍속 자료가 없을 때 산정한 잠재증발산량

본 연구에서는 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 산정하기 위해 기본 값(default value)인 세계 평균 풍속 자료를 활용하여 잠재증발산량을 산정하였다(ET_{0-u₂}). 추정한 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 2.7788 mm day⁻¹이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 2.7199 mm day⁻¹, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 2.8378 mm day⁻¹이었다. 이

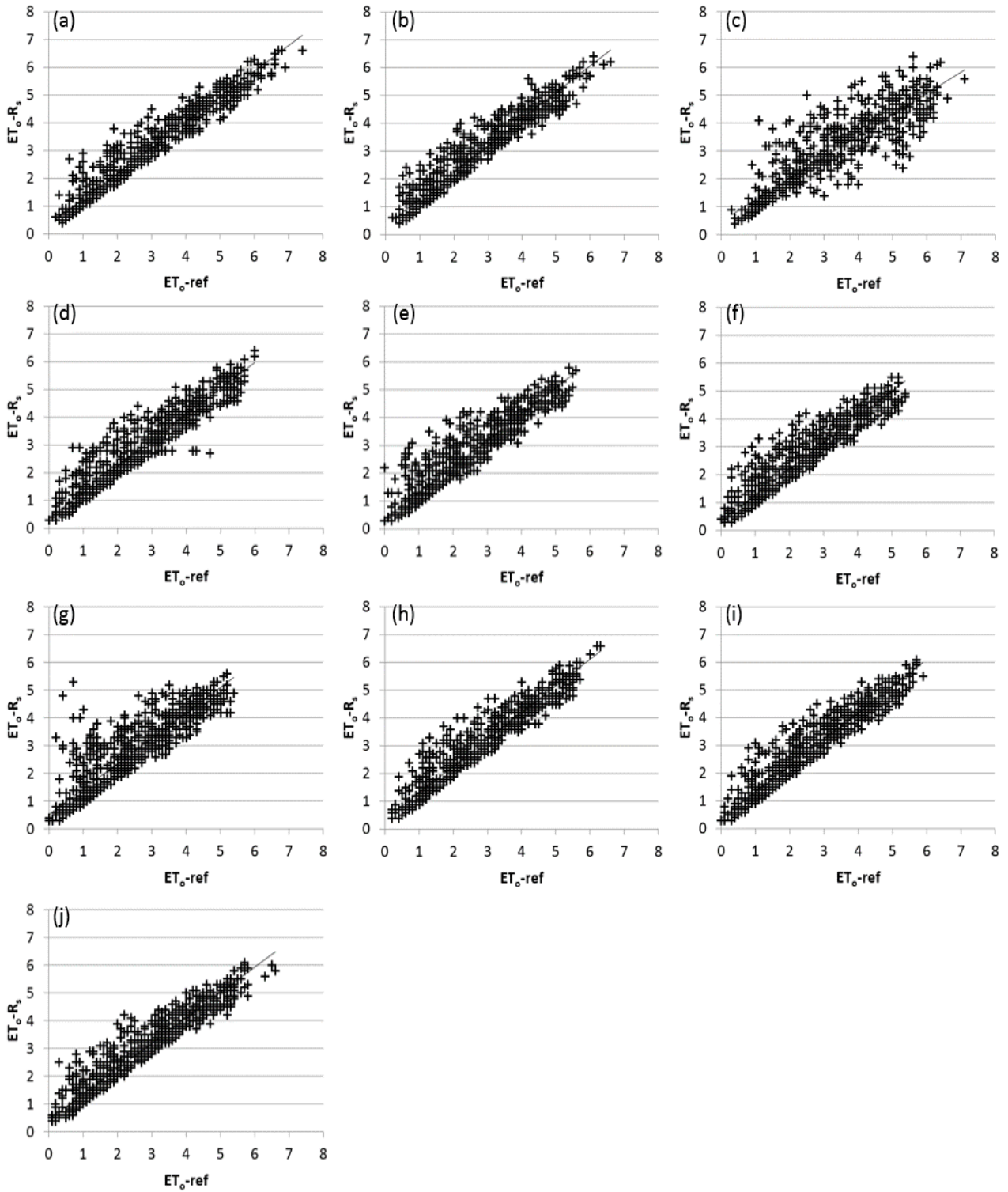


Fig. 4. Comparison between ETo estimates by the FAO56 PM using estimated solar radiation obtained from T_{max} and T_{min} (ET_o-R_s) and those calculated with a complete meteorological dataset (ET_o-ref) at (a) 136; (b) 276; (c) 972; (d) A1; (e) A2; (f) A3; (g) A4; (h) A5; (i) A6; (j) A7.

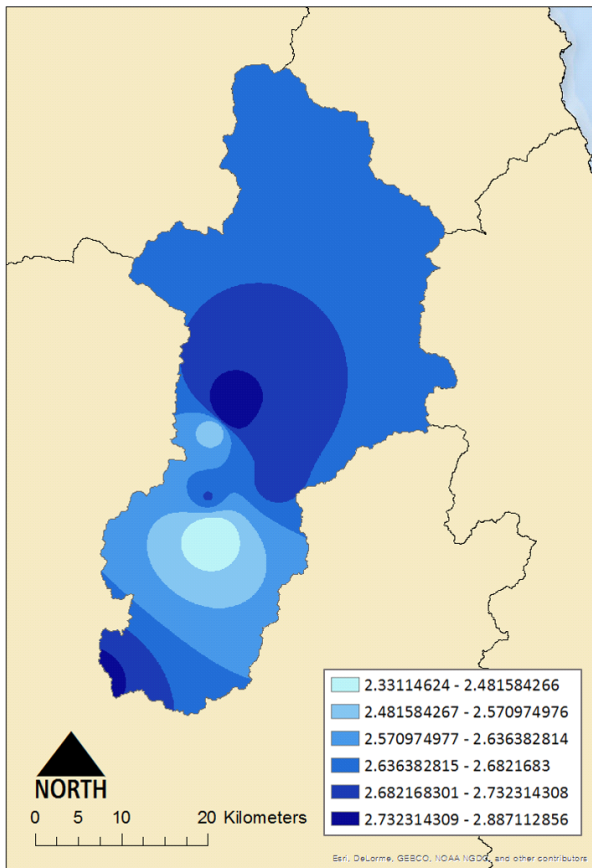


Fig. 5. Evapotranspiration with estimated solar radiation interpolated by IDW method (ET_0-R_s).

후, 이 잠재증발산량과 완전한 기상자료가 있을 때 추정된 잠재증발산량(ET_0-ref)을 비교하였다(Fig. 8). 또한, 역거리가중법을 사용하여 추정된 잠재증발산량을 안동댐 유역에 보간하였다(Fig. 9). 보간한 결과에서는 수역보다 산림지역에서 보다 많은 평균 증발산량이 많았으며, 증발산량의 범위는 $2.4626 \text{ mm day}^{-1}$ 부터 $3.1525 \text{ mm day}^{-1}$ 이었고, 평균은 $2.7949 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다. 완전한 기상자료가 있었을 때 보간법으로 추정한 Fig. 3과 일사 자료가 없을 때 보간법으로 추정한 Fig. 5, 그리고 습도 자료가 없을 때 보간법으로 추정한 Fig. 7과 비교하였을 때, 연구대상지의 평균 증발산량은 과대추정되었다.

Table 4는 산정된 두 잠재증발산량의 RMSE, MBE, MAE, R^2 의 값이다. 결정계수가 모든 지점에서 0.92를 넘는 등의 결과를 통해 ET_0-u_2 와 ET_0-ref 의 값 간에 상대적으로 높은 상관관계가 있다고 볼 수 있다. RMSE도 $0.2526 \text{ mm day}^{-1}$ 에서 $0.5358 \text{ mm day}^{-1}$ 사이였으며, 두 지점을 제외하고는 값이 0.45 mm day^{-1} 를 넘지 않았다. 그러나 MBE는 $0.1778 \text{ mm day}^{-1}$ 에서 $0.3949 \text{ mm day}^{-1}$, MAE 값도 $0.2915 \text{ mm day}^{-1}$ 에서 $0.4328 \text{ mm day}^{-1}$ 로 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 즉, 풍속을 디폴트 값으로 활용하여 잠재증발산량을 추정하면 모든 지점에서 조금은 과대 추정됨을 알 수 있었으나, 풍속 자료가 없는 경우에 대체될만한 방법이 될 것이라고 사료된다.

3.5 최고기온과 최저기온만으로 산정한 잠재증발산량

본 연구에서는 최고기온과 최저기온만으로 잠재증발산량

Table 2. Comparison between ET_0 computed from complete meteorological dataset (ET_0-ref) and when R_s is estimated from air temperature at the different locations

ID	RMSE (mm day^{-1})	MBE (mm day^{-1})	MAE (mm day^{-1})	R^2	Slope a^*
136	0.4188	0.1221	0.2624	0.9403	0.9227
276	0.4597	0.2101	0.2890	0.9254	0.9559
972	0.7613	-0.2027	0.4861	0.8175	0.7679
A1	0.5165	0.1960	0.3159	0.9037	0.9381
A2	0.5558	0.2377	0.3395	0.8825	0.9403
A3	0.5042	0.1966	0.3118	0.8942	0.9299
A4	0.7369	0.3336	0.4469	0.8089	0.9165
A5	0.5004	0.2497	0.3147	0.9159	0.9600
A6	0.5109	0.2547	0.3266	0.9146	0.9573
A7	0.5042	0.2281	0.3277	0.9105	0.9138

* Slope of the equation $ET_0-R_s = aET_0-ref$.

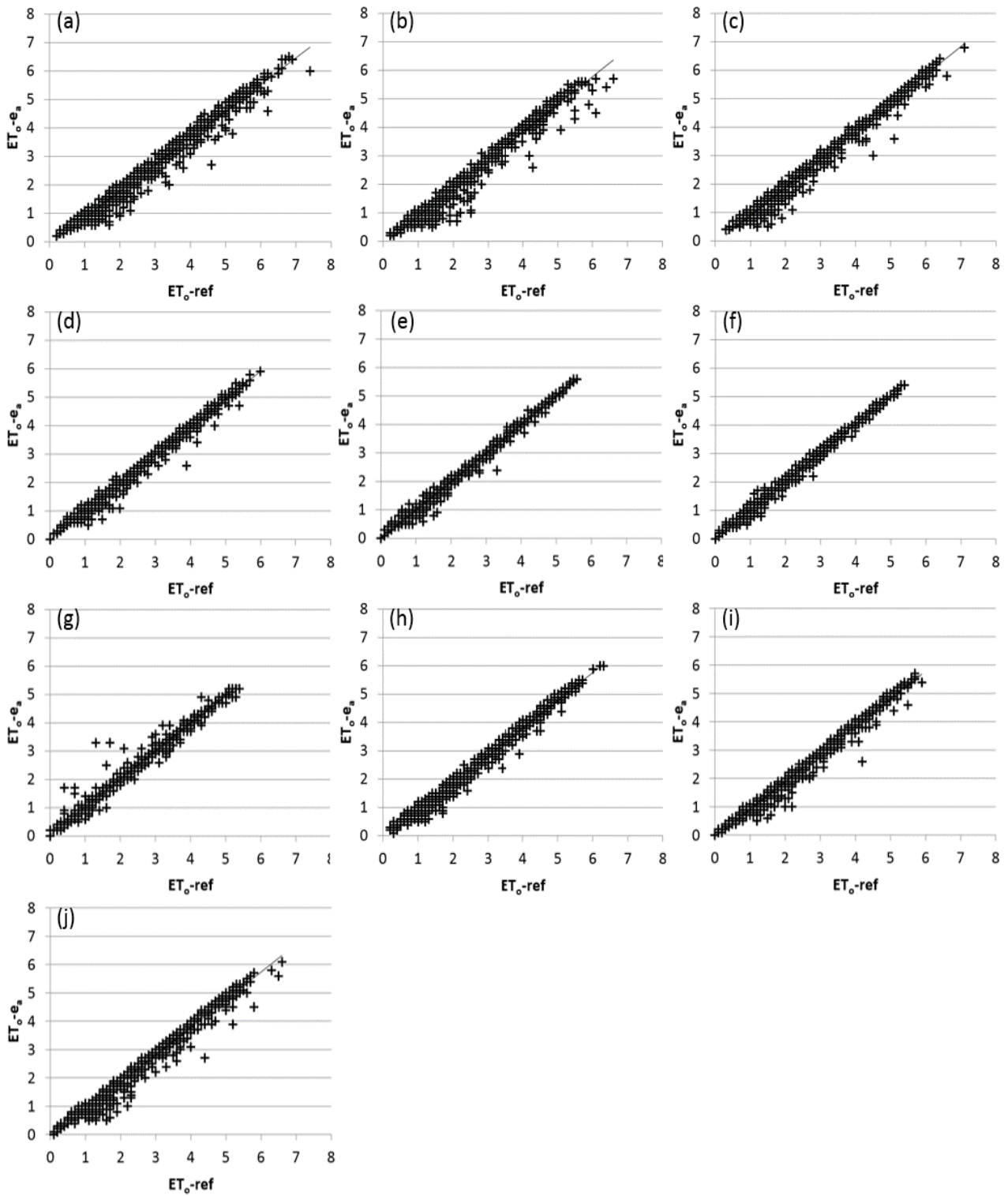


Fig. 6. Comparison between ETo estimates by the FAO56 PM using estimated humidity obtained from T_{min} (ET_o-e_a) and those calculated with a complete meteorological dataset (ET_o-ref) at (a) 136; (b) 276; (c) 972; (d) A1; (e) A2; (f) A3; (g) A4; (h) A5; (i) A6; (j) A7.

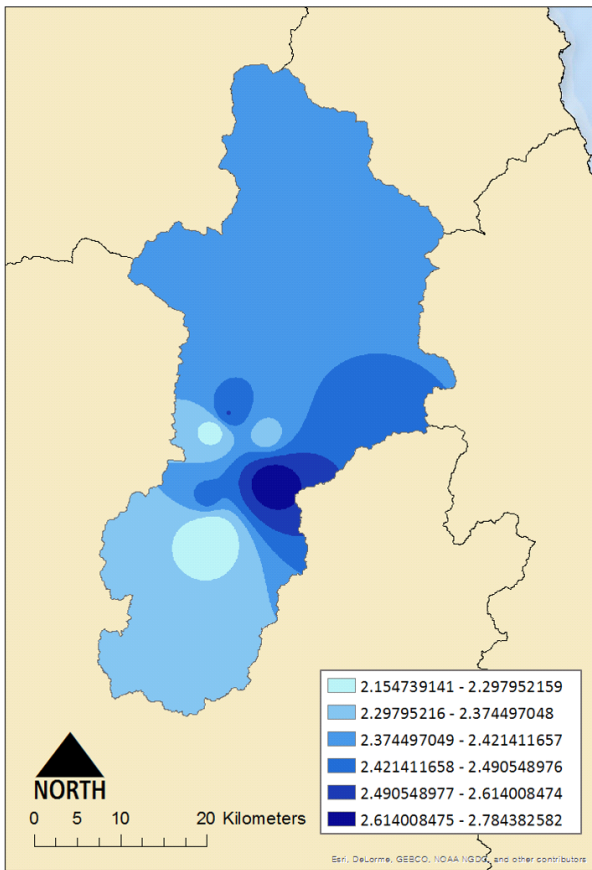


Fig. 7. Evapotranspiration with estimated humidity interpolated by IDW method (ET_o-e_a).

을 산정하는 Hargreaves 공식으로 잠재증발산량을 추정(ET_o-HG)하고, 완전한 기상자료가 있을 때 추정된 잠재증발산량(ET_o-ref)과 비교하였다(Fig. 10). Hargreaves 공식으로 추정된 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 $3.0459 \text{ mm day}^{-1}$ 이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 $2.9842 \text{ mm day}^{-1}$, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 $3.1077 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다.

또한, 관측된 최고기온과 최저기온을 활용하고, 부족한 나머지 인자인 태양복사에너지, 습도, 풍속에 대하여서는 Allen *et al.*(1998)이 제시한 방법인 식 (4), 식 (8), 그리고 풍속의 디플트 값을 활용하여 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 추정하였다(ET_o-T). 추정된 결과, 2013년부터 2014년까지의 평균 잠재증발산량은 $2.8418 \text{ mm day}^{-1}$ 이었으며, 2013년도의 평균 잠재증발산량은 $2.7817 \text{ mm day}^{-1}$, 2014년도의 평균 잠재증발산량은 $2.9021 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다. 이후, 이 잠재증발산량과 완전한 기상자료가 있을 때 추정된 잠재증발산량(ET_o-ref)과 비교하였다(Fig. 11). 이후, Hargreaves 공식과 FAO56 PM 방법으로 추정된 잠재증발산량은 역거리가중법으로 안동댐 유역에 보간되었다(Fig. 12). Hargreaves 공식으로 잠재증발산량을 보간하여 추정된 결과가 기온 자료만 있을 때 FAO56 PM 방법으로 잠재증발산량을 보간하여 추정된 결과보다 더 큰 값을 나타내었다. Hargreaves 공식으로 추정하여 보간한 증발산량의 범위는 $2.9026 \text{ mm day}^{-1}$ 부터 $3.1142 \text{ mm day}^{-1}$ 이었고, 평균은 $3.0253 \text{ mm day}^{-1}$ 이었다. 기온 자료만 있을 때

Table 3. Comparison between ET_o compared from complete meteorological dataset (ET_o-ref) and when e_a is estimated by considering $T_{min} = T_{dew}$ at the different locations

ID	RMSE (mm day^{-1})	MBE (mm day^{-1})	MAE (mm day^{-1})	R^2	Slope a^*
136	0.3851	-0.2722	0.2797	0.9735	0.9385
276	0.3069	-0.1562	0.1771	0.9686	0.9809
972	0.2421	-0.1262	0.1472	0.9858	0.9901
A1	0.1640	-0.0464	0.0996	0.9894	0.9864
A2	0.1235	-0.0069	0.0730	0.9927	0.9973
A3	0.1136	0.0202	0.0737	0.9938	1.0018
A4	0.1793	0.0123	0.0815	0.9848	0.9876
A5	0.2382	-0.1646	0.1797	0.9864	0.9852
A6	0.2213	-0.1277	0.1373	0.9855	0.9763
A7	0.2815	-0.1722	0.1804	0.9781	0.9735

* Slope of the equation $ET_o-R_s = aET_o-ref$.

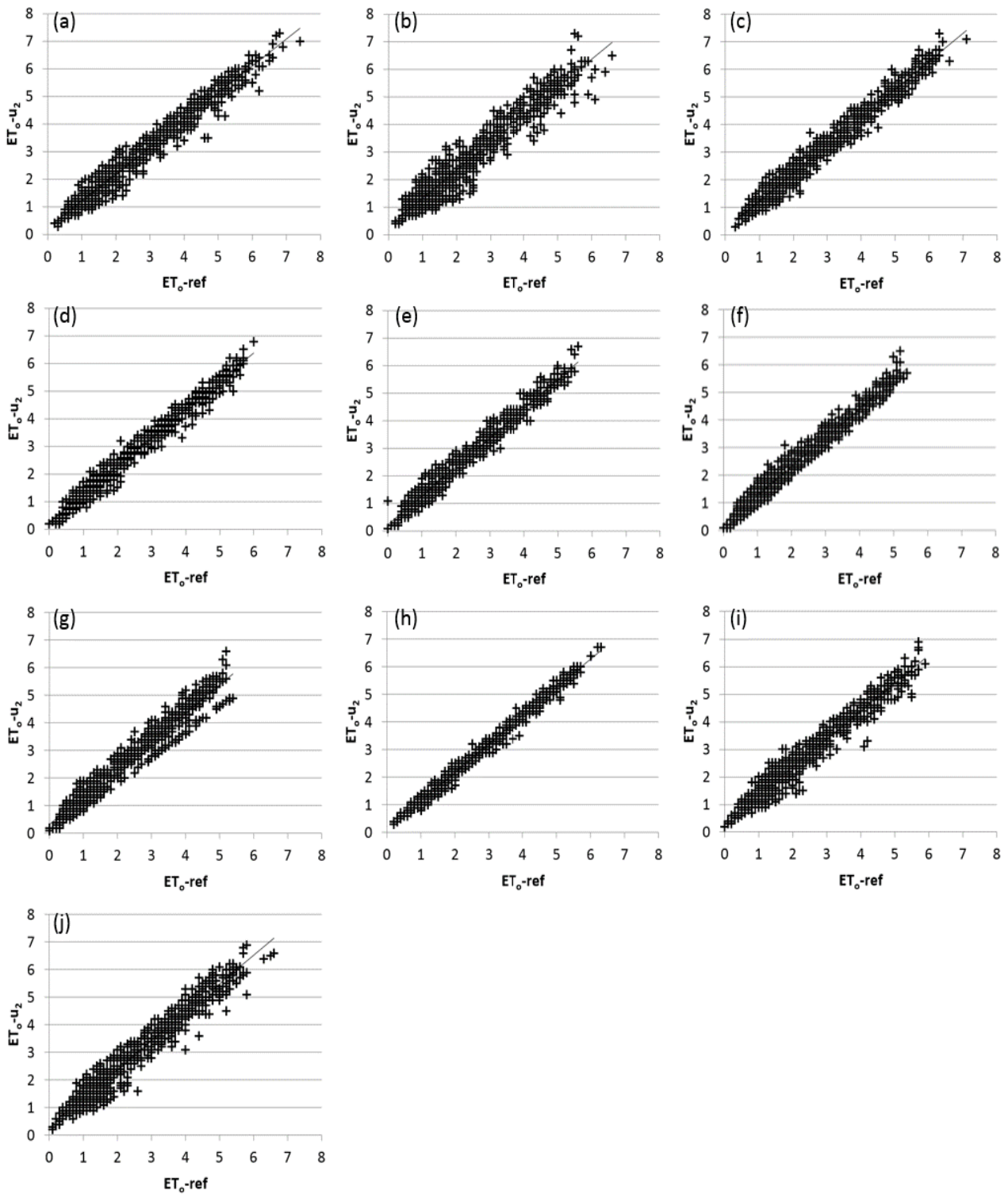


Fig. 8. Comparison between ET_0 estimates by the FAO56 PM using default value of wind speed (ET_0-u_2) and those calculated with a complete meteorological dataset (ET_0-ref) at (a) 136; (b) 276; (c) 972; (d) A1; (e) A2; (f) A3; (g) A4; (h) A5; (i) A6; (j) A7.

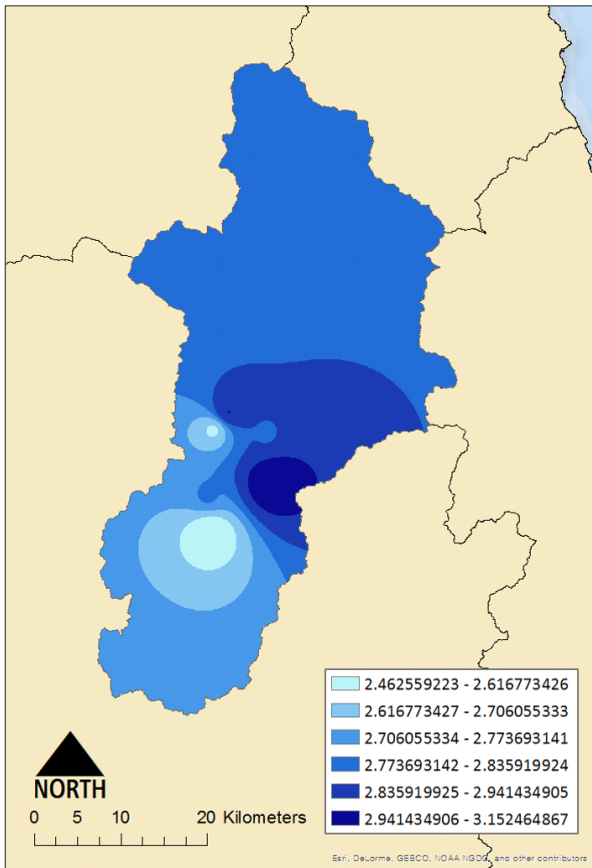


Fig. 9. Evapotranspiration with estimated wind speed interpolated by IDW method (ET_o-u_2).

FAO56 방법으로 추정하여 보간한 증발산량의 범위는 2.7246 $mm\ day^{-1}$ 부터 2.9211 $mm\ day^{-1}$ 이었으며, 평균은 2.8213 $mm\ day^{-1}$ 이었다. 또한, 두 결과 모두 완전한 기상자료가 있었을 때 보간법으로 추정한 Fig. 3과 일사 자료가 없을 때 보간법으로 추정한 Fig. 5, 습도 자료가 없을 때 보간법으로 추정한 Fig. 7, 그리고 풍속 자료가 없을 때 보간법으로 추정한 Fig. 9보다 안동댐 하류에서 큰 증발산량 결과를 보였으며, 평균 증발산량 또한 가장 크게 과대 추정되었다.

Table 5는 ET_o -HG와 ET_o -ref의 RMSE, MBE, MAE, R^2 의 값으로, RMSE는 0.7208 $mm\ day^{-1}$ 에서 1.3441 $mm\ day^{-1}$, MBE는 0.2309 $mm\ day^{-1}$ 에서 1.0275 $mm\ day^{-1}$, MAE는 0.5640 $mm\ day^{-1}$ 에서 1.0454 $mm\ day^{-1}$ 으로 높은 값을 나타내며, R^2 값도 본 연구의 기상관측소 지점 평균이 0.8285로 낮은 값이었다. 또한, 잠재증발산량을 추정했을 때에 모든 지점에서 과대 추정된 결과를 보였다.

Table 6은 ET_o -T와 ET_o -ref의 RMSE, MBE, MAE, R^2 의 값이다. RMSE는 0.5635 $mm\ day^{-1}$ 에서 1.1128 $mm\ day^{-1}$, MBE는 -0.1030 $mm\ day^{-1}$ 에서 0.8350 $mm\ day^{-1}$, MAE는 0.4184 $mm\ day^{-1}$ 에서 0.8594 $mm\ day^{-1}$ 으로 높은 값을 나타내었다. R^2 값도 평균이 0.8375로 상대적으로 낮았다. 또한, 잠재증발산량을 추정했을 때에 두 지점 이외에는 과대 추정하는 양상을 보였다.

두 방법을 비교해 보았을 때, ET_o -T와 ET_o -ref를 비교하였을 때의 평균 R^2 가 ET_o -HG와 ET_o -ref를 비교하였을 때의 평균 R^2 보다 높았고, RMSE, MBE, MAE 평균 또한 낮았다. 따

Table 4. Comparison between ET_o compared from complete meteorological dataset (ET_o -ref) and using default value for wind speed at the different locations

ID	RMSE ($mm\ day^{-1}$)	MBE ($mm\ day^{-1}$)	MAE ($mm\ day^{-1}$)	R^2	Slope a^*
136	0.3595	0.1778	0.2915	0.9638	0.9810
276	0.5358	0.3366	0.4328	0.9281	1.0073
972	0.3671	0.2419	0.2947	0.9754	1.0161
A1	0.3808	0.2953	0.3255	0.9776	1.0252
A2	0.4262	0.3414	0.3510	0.9752	1.0547
A3	0.4174	0.3280	0.3357	0.9720	1.0424
A4	0.4843	0.3520	0.4165	0.9510	1.0099
A5	0.2526	0.2011	0.2154	0.9907	1.0277
A6	0.4878	0.3775	0.4184	0.9601	1.0107
A7	0.5302	0.3949	0.4476	0.9523	1.0382

* Slope of the equation $ET_o-u_2 = aET_o$ -ref.

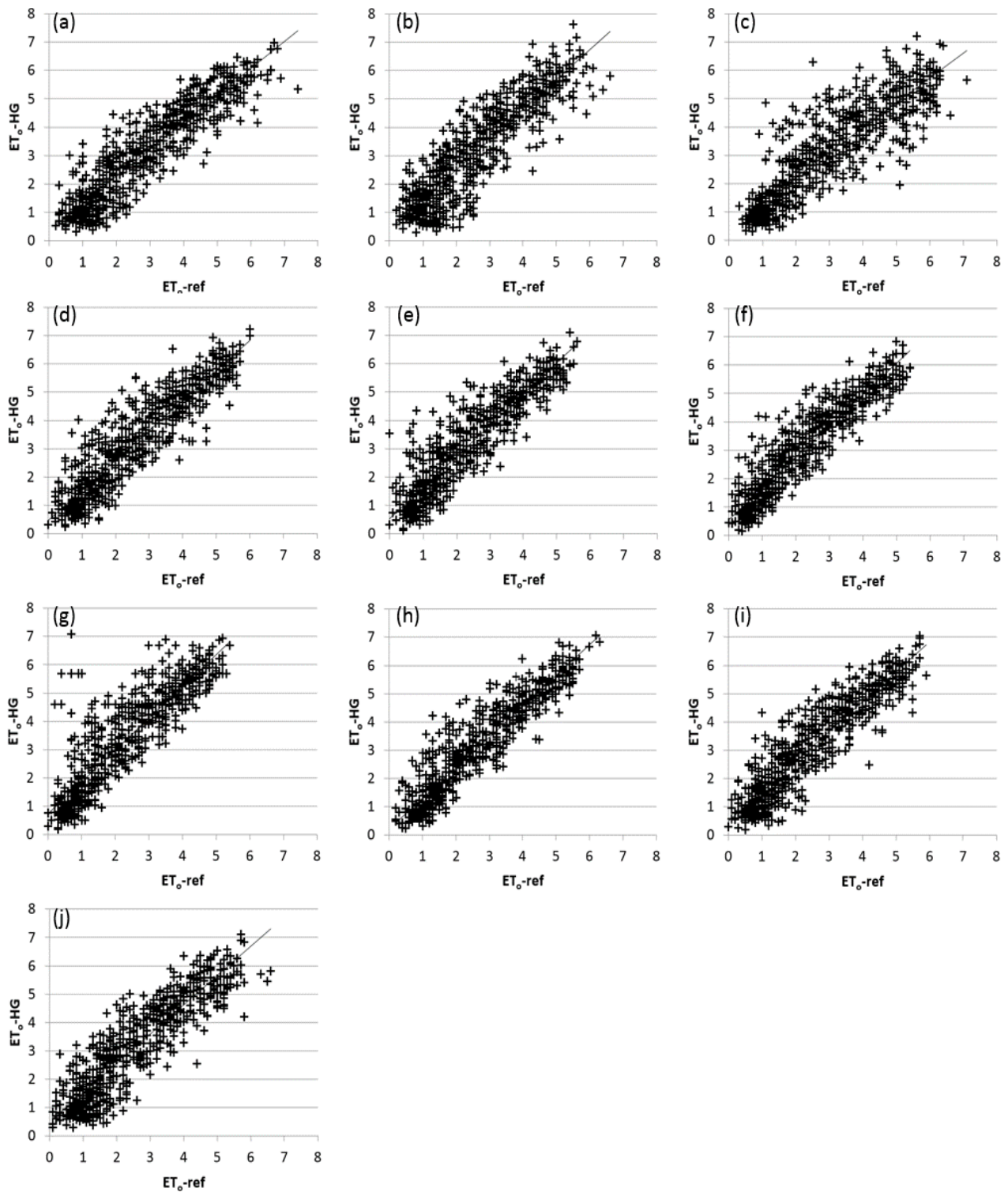


Fig. 10. Comparison between ETo estimates by the FAO56 PM using Hargreaves equation (ETo -HG) and those calculated with a complete meteorological dataset (ETo -ref) at (a) 136; (b) 276; (c) 972; (d) A1; (e) A2; (f) A3; (g) A4; (h) A5; (i) A6; (j) A7.

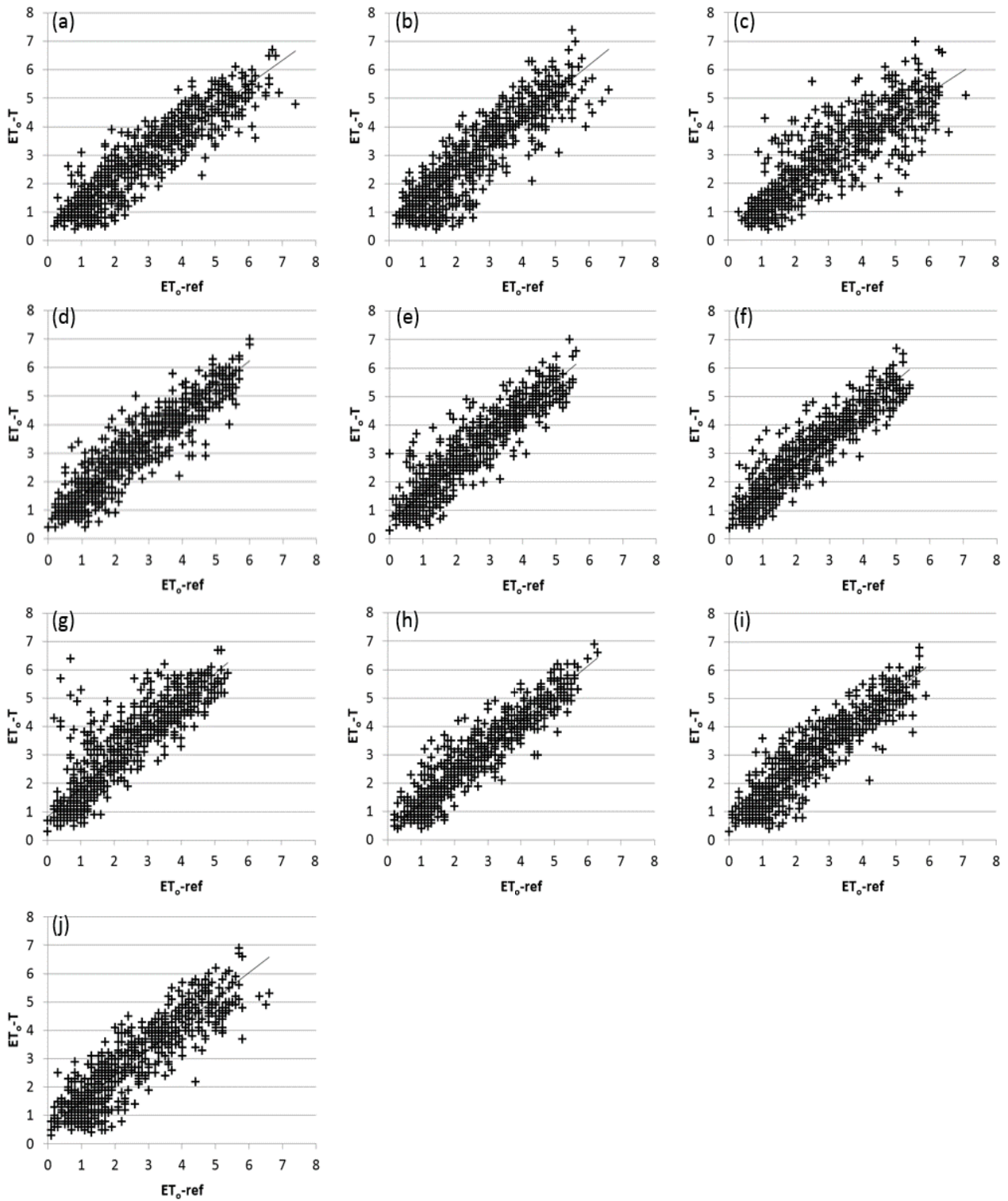


Fig. 11. Comparison between ET_0 estimates using FAO56 PM with observed maximum and minimum air temperature (ET_0-T) and those calculated with a complete meteorological dataset (ET_0-ref) at (a) 136; (b) 276; (c) 972; (d) A1; (e) A2; (f) A3; (g) A4; (h) A5; (i) A6; (j) A7.

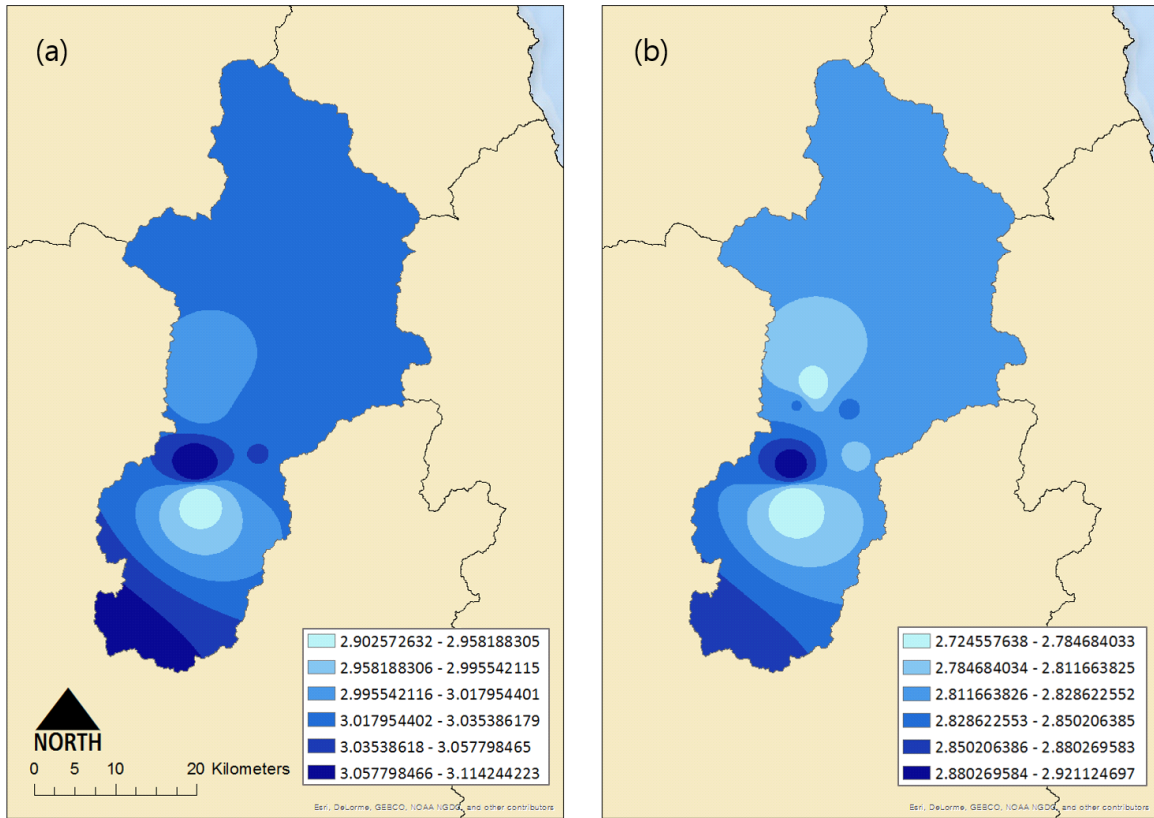


Fig. 12. (a) Evapotranspiration estimated with Hargreaves method interpolated by IDW method (ET_o -HG); (b) Evapotranspiration estimated with FAO56 PM with observed maximum and minimum air temperature interpolated by IDW method (ET_o -T).

Table 5. Comparison between ET_o compared from complete meteorological dataset (ET_o -ref) and using the Hargreaves equation (ET_o -HG) at the different locations

ID	RMSE (mm day ⁻¹)	MBE (mm day ⁻¹)	MAE (mm day ⁻¹)	R ²	Slope a*
136	0.7208	0.2309	0.5640	0.8400	0.9500
276	0.9557	0.5406	0.7883	0.8018	1.0596
972	0.8442	0.1264	0.6073	0.7736	0.8762
A1	0.9392	0.6225	0.7292	0.8444	1.0617
A2	1.0466	0.7560	0.8164	0.8353	1.1049
A3	0.9979	0.7680	0.7983	0.8656	1.1072
A4	1.3441	1.0275	1.0454	0.7865	1.1228
A5	0.7637	0.4392	0.5715	0.8729	1.0859
A6	0.9227	0.6318	0.7398	0.8488	1.0556
A7	0.9332	0.5746	0.7542	0.8160	1.0288

* Slope of the equation ET_o -HG = a ET_o -ref.

Table 6. Comparison between ET_o compared from complete meteorological dataset (ET_o -ref) and using FAO56 PM with observed maximum and minimum air temperature (ET_o -T) at the different locations

ID	RMSE (mm day ⁻¹)	MBE (mm day ⁻¹)	MAE (mm day ⁻¹)	R ²	Slope a*
136	0.6456	-0.0077	0.5062	0.8442	0.8412
276	0.7678	0.3421	0.6339	0.8089	0.9447
972	0.8477	-0.1030	0.6263	0.7562	0.7641
A1	0.7225	0.4294	0.5654	0.8633	0.9443
A2	0.8228	0.5798	0.6465	0.8565	0.9881
A3	0.7803	0.5900	0.6344	0.8825	0.9861
A4	1.1128	0.8350	0.8594	0.7969	1.0052
A5	0.5635	0.2390	0.4184	0.8875	0.9657
A6	0.7144	0.4273	0.5719	0.8601	0.9331
A7	0.7419	0.3453	0.6097	0.8191	0.9099

* Slope of the equation $ET_o-T = aET_o$ -ref.

라서 본 연구를 통해 안동댐 유역에서 최고기온과 최저기온만으로 일별 잠재증발산량을 산정하는 경우에 Hargreaves 공식보다는 FAO56 PM 방법으로 인자들을 추정하여 잠재증발산량을 산정하는 것이 낫다는 결론을 내릴 수 있었다. Hargreaves 공식을 사용하기 위해서는 과거 관측자료를 이용한 매개변수의 지역화가 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 2013년도와 2014년도의 안동댐 유역의 기상자료를 이용하여 FAO56 Penman-Monteith 방법으로 10개의 지점에 대하여 잠재증발산량을 산정하였다. 또한, 잠재증발산량 산정에 필요한 인자가 모두 있을 때의 산정과 기상자료가 제한되었을 때의 산정, 그리고 Hargreaves 공식을 사용할 때의 산정을 공간적, 통계적으로 비교하였다. 기상자료가 제한되었을 때에는 Allen *et al.*(1998)이 제안한 방법으로 기상인자를 추정하였으며, 본 연구를 통하여 기상자료가 부족할 때에도 이 방법으로 잠재증발산량을 산정할 수 있었다. 일사 자료를 추정하여 잠재증발산량을 산정한 결과는 완전한 기상자료가 있을 때보다 과대추정하는 경향을 보였지만, 통계적으로 유의미하였기 때문에 약간의 오차를 고려하여 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 습도 자료를 추정하여 잠재증발산량을 산정한 결과는 완전한 기상자료가 있을 때 산정한 결과와 높은 상관관계를 보였으며, 추정값도 정확하였기 때문에 이슬점 온도를 일최저온도로 대체할 수 있다고 결론지어진다. 풍속자료가 부족한 경우에는 전 세계의 평균 풍속을 디폴트 값

로 활용할 수 있으며, 그 결과 또한 용인될만 하였다.

기온 자료로만 잠재증발산량을 추정하는 Hargreaves 공식은 비교적 간단하지만, FAO56 PM 방법과 비교했을 때 정확도가 떨어졌으며, 과대추정하는 양상을 보였다. 또한, 최고기온과 최저기온 관측값만으로 FAO56 PM 방법을 사용하였을 때에도 정확도가 떨어졌으나, Hargreaves 공식보다는 적합할 것으로 판단되었다. Hargreaves 공식은 추후 지역 특성을 고려한 매개변수가 필요할 것으로 사료된다.

각 지점별로 다른 통계 결과는 고도와 큰 상관성이 없었으며, 972와 A7 기상관측소는 위치와 고도가 거의 일치함에도 불구하고 경향은 비슷하지만, 상이한 기온, 습도, 태양복사에너지, 풍속 자료를 생산하였다. 각 지점의 불일치하는 값과 통계 값은 물의 존재, 운량, 그리고 산림 규모의 차이에 따르기도 하므로 지점별로 다른 결과는 추후에 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 기상자료를 추정하여 잠재증발산량을 산정하는 FAO56 PM 방법은 비교적 높은 정확성을 가지는 산정 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 기상자료가 제한적이어서 잠재증발산량 산정이 어려움이 있는 경우에는 FAO56 PM 방법을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국립기상과학원 “수문기상모델 개선을 위한 요소 기술 개발(IV)”의 지원과 환경부 “기후변화대응 환경기술개발 사업(과제번호: 2014001310008)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allen RG. 1986. A penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112(4):348-368.
- Allen RG. 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 122(2):97-106.
- Allen RG. 1997. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic engineering* 2(2):56-67.
- Allen RG, Pruitt WO. 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112(2):139-155.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 300(9):D05109.
- Cai J, Liu Y, Lei T, Pereira LS. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology* 145(1):22-35.
- Chiew FHS, Kamaladasa NN, Malano HM, McMahon TA. 1995. Penman-monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management* 28(1):9-21.
- Chin DA, Mazumdar A, Roy PK. 2000. *Water-resources engineering (Vol. 12)*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Cho KS. 1987. Validity period analysis for evapotranspiration estimation formula: Focusing on water crops (in Korean). Master dissertation, Seoul National University, Korea.
- Doorenbos J, Pruitt WO, Aboukhaled A. 1997. Crop water requirements. Technical Report. Food and Agriculture Organization.
- Droogers P, Allen RG. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16(1):33-45.
- Garcia M, Raes D, Allen R, Herbas C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1):67-82.
- Hanks RJ. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agronomy Journal* 66(5):660-665.
- Hargreaves GH. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(6):1132-1139.
- Hargreaves GH, Allen RG. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1):53-63.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108(3):225-230.
- Hargreaves GL, Hargreaves GH, Riley JP. 1985. Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 111(3):265-275.
- Hong S. 2011. Future active water resources securing technology (in Korean). Water for Future. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(8):14-18.
- Im JS. 2013. Applicability evaluation of SEBAL using multi-temporal satellite images and observed evapotranspiration data: Focused on Wangsuk river basin (in Korean). Master dissertation, Seoul National University, Korea.
- Jabloun MD, Sahli A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. *Agricultural Water Management* 95(6):707-715.
- Jensen ME, Burman RD, Allen RG. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.
- Jensen ME, Robb DC, Franzoy CE. 1970. Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division* 96(IRI):25-38.
- Ji U, Hwang MH, Lim KS, Kang SU. 2012. Analysis of watershed characteristics and land use of four major rivers using GIS (in Korean). Water for Future. *Magazine of Korea Water Resources Association* 45(10):26-33.
- Jung IW, Koo BY, Bae DH. 2006. A study on evaporation estimation of Tank model (in Korean). *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. Korea Water Resources Association.
- Kim SJ, Lim CH, Lim YJ, Moon JY, Song CH, Lee WK. 2016. Analyzing climate zones using hydro-meteorological observation data in Andong Dam watershed, South Korea (in Korean). *Journal of Climate Change Research* 7(3):269-282.

- Lim CH, Moon JY, Lim YJ, Kim SJ, Lee WK. 2015. Estimating spatio-temporal distribution of climate factors in Andong Dam basin. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* 23(4):57-65.
- Lee KH, Park JH. 2008. Calibration of the Hargreaves Equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale (in Korean). *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(6B):675-681.
- López-Urrea R, de Santa Olalla FM, Fabeiro C, Moratalla A. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management* 85(1):15-26.
- Martinez-Cob A, Tejero-Juste M. 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ET_0 estimation equation in semiarid regions. *Agricultural Water Management* 64(3):251-264.
- Mavi HS, Tupper GJ. 2004. *Agrometeorology: Principles and applications of climate studies in agriculture*. CRC Press.
- Popova Z, Kercheva M, Pereira LS. 2006. Validation of the FAO methodology for computing ET_0 with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage* 55(2):201-215.
- Ritchie JT. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5):1204-1213.
- Ritchie JT, Burnett E. 1968. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies. *Agronomy Journal* 60(5):545-549.
- Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB. 1983. *Microclimate: The biological environment*. John Wiley & Sons. p 495.
- Ryu MH, Kim SM. 2011. Social value of multiregional water system-using conjoint valuation method (in Korean). *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. Korea Water Resources Association.
- Ryu SH, Kim KH, Kim MK, Park MU, Yang JY, Yu IS, Yoon SY, Lee WJ, Im JN, Jung YT, Jung YS. 2000. *Soil Dictionary* (in Korean). Seoul National University Press.
- Sentelhas PC, Gillespie TJ, Santos EA. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management* 97(5):635-644.
- Yun JI, Nam JC, Hong SY, Kim J, Kim KS, Chung U, Chae NY, Choi TJ. 2004. Using spatial data and land surface modeling to monitor evapotranspiration across geographic areas in South Korea (in Korean). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 6(3):149-163.