



## 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 관개수량 산정방법에 관한 연구

### A Study on the Estimation of Irrigation Water for Sewage Treated Water Reuse for Agriculture

조현경<sup>a</sup> · 김상민<sup>b, †</sup>

Hyun Kyung Cho · Sang Min Kim

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to establish the estimation method of irrigation water amount for sewage treated water reuse for agricultural purpose. To calculate the irrigation water amount, we adopted Penman-Monteith for potential evapotranspiration estimation and applied crop coefficient and irrigation efficiency factor. We developed the irrigation water amount calculation program using C language in Xcode environment. The target district for calculation is having 259 ha of agricultural land located near the Jinyeong Clear Water Circulation Center in Hanrim-myeon, Gimhae city. The meteorological data of the study area were obtained from Changwon weather station from 1986 to 2017. Calculated average and maximum of annual mean potential evapotranspiration were 2.72 mm/day and 6.22 mm/day, respectively. We used K-S (Kolmogorov-Smirnov) for goodness-of-fit test to find optimal probability distribution of annual mean and maximum evapotranspiration. As a result, the normal distribution was selected for the appropriate distribution. The annual mean and maximum potential evapotranspiration for 10-year return period by applying normal distribution were 2.88 mm/day and 6.76 mm/day, respectively. Assuming that the irrigation efficiency is 80%, the irrigation water requirement was calculated as 36.05 m<sup>3</sup>/day/ha and 84.45 m<sup>3</sup>/day/ha, respectively, when annual mean and maximum potential evapotranspiration were applied. The actual irrigation water amount can be calculated by applying the crop coefficient and cropping days for the study area based on the developed irrigation water amount estimation program in this study.

Keywords: Penman-Monteith; irrigation water requirement; wastewater reuse for agriculture; potential evapotranspiration

#### 1. 서 론

시설재배지 증가에 따른 농업용수의 계절적 수요변화와 기후변화로 인한 극한 가뭄을 대비하기 위해서는 신규 농업용수 개발이 필요하지만, 신규 농업용수 개발은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 댐 개발과 관련한 환경문제 등으로 인해 많은 어려움이 있어 신규 농업용수 개발을 대신할 수 있는 대체수자원의 개발이 필요하다(Jeong et al., 2013). 우리나라의 경우 공공하수처리시설로부터 발생하는 하수처리량은 연간 총 7,005,179천m<sup>3</sup>으로, 2015년 우리나라의 연간 수자원 이용량 372억m<sup>3</sup>의 18.8% 수준으로 조사되었다(MOLIT and K-water, 2017). 하수처리수 재이용률은 꾸준히 증가하고 있기는 하나, 2008년 대비 불과 1.4배 증가하여, 2015년 재이

용률은 14.7% 수준에 불과하다(Cho and Hong). 2001부터 2011년까지 수자원프린티어사업단에서 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 개발 및 적용에 대한 연구를 추진하였으며(Park, 2011), 이 연구에서는 현장 포장 실험을 통해 하수처리수 재이용에 따른 작물생육, 수질, 토양, 병해충 영향 등을 분석하였고, 이로부터 하수처리수의 농업용수 재이용 수질기준을 제시하는 등 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위한 기술적인 지침을 마련하였다. 환경부는 하수처리수의 재이용을 지속적으로 추진하고 있으며, 2008년 연간 7억톤이던 하수처리수 재이용량이 2015년 10억톤, 2016년 11억톤으로 증가하였으며, 2016년 기준 주요 용도는 하수처리장 내 이용 (5.7억톤, 50.7%), 하천유지용수 (3.9억톤, 35.4%), 공업용수 (0.6억톤, 5.6%), 농업용수 (0.1억톤, 1.1%)순으로 조사되었다(Ministry of Environment, 2017).

하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 하수처리수의 수질에 따른 재처리 시설을 설계하고, 대상지구의 필요수량에 따른 공급용량을 산정이 필요하다. 대상지구의 필요수량 산정을 위해 본 연구에서는 Penman-Monteith의 잠재증발산량 산정식을 이용하였다. Penman-Monteith 방법은 현재 잠재 증발산량의 산정을 위해 가장 많이 이용되고 있는 방법으로, Jensen et al. (1990)은 건조지역 및 습윤지역에 대해서 이 식을 이용한 잠재증발산 산정 결과와 다른 20가지의 잠재

<sup>a</sup> MS Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University, Korea

<sup>b</sup> Professor, Department of Agricultural Engineering (Insti. of Agric. and Life Sci.), Gyeongsang National University, Korea

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1930 Fax.: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: February 25, 2019

Revised: March 15, 2019

Accepted: March 15, 2019

증발산 산정결과를 비교 및 검토하였을 때, 모든 지역에서 Penman-Monteith 공식이 가장 우수하다는 것을 증명하였다 (Kim et al., 2017). 1998년 국제식량농업기구 (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998)에서는 기존에 사용되던 증발산량 공식을 검증한 결과 Penman-Monteith 공식을 통일하여 사용하기로 결정하였다(Allen et al., 1998). 이후 이어지는 연구논문들에서도 Penman-Monteith 방법의 우수성이 증명되었으며, 세계관개배수위원회(ICID), 세계기상기구(WMO)에서 추천하였다(Allen et al., 1998; Garcia et al., 2004; López-Urrea et al., 2006; Cai et al., 2007).

본 연구에서는 하수처리수의 농업용수 재이용 대상지구인 김해시 한림면에 위치한 진영맑은물순환센터에 인접한 본산리, 가산리, 가동리의 농경지에 해당하는 259ha를 대상으로 Mac OS의 Xcode 기반으로 C 언어를 이용하여 Penman-Monteith 방법을 적용한 잠재증발산량 산정프로그램을 개발하고, 통계 프로그램 R을 이용하여 적합도 분석과 빈도분석을 실시하여 대상지구의 확률분포형을 추정하고 10년빈도 잠재증발산량을 산정한 후 이로부터 대상지구에 대한 관개수량을 산정하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상지구

본 연구의 대상지구는 김해시 한림면에 위치한 진영맑은물순환센터에 인접한 본산리, 가산리, 가동리의 농경지에 해당하는 지역으로 면적은 총 257ha이다. 한림면은 김해시의 북쪽에 위치하고 있으며, 북동쪽으로 낙동강을 경계로 밀양시 하남면, 서쪽으로 진영읍과 창원시 대산면, 남쪽으로 주촌면, 진례면과 접하고 있다. 대상지구는 다음의 Fig. 1에서 보는 바와 같이 김해의 주요 하천인 주천강과 낙동강 하류가 만나는 지점에 위치하며, 대상지구의 농경지는 김해에 속하는 가산지구(김해)와 가산지구에서 창원에 속하는 부분인 가산지구(창원), 시산지구로 구성된다. 농경지 면적은 가산지구(김해)가 93.2ha, 가산지구(창원)이 45.7ha, 시산지구가 118.1ha으로, 각 지구별 농경지 면적과 시설재배 면적은 다음의 Table 1에서

정리하여 보여주고 있다. 가산지구(김해)의 농경지 면적은 93.2ha이며, 논과 노지의 면적은 약 67.6ha이며 시설재배 면적은 약 25.6ha로 주로 당근(15.7ha), 고추(2.3ha), 수박(0.7ha) 등을 재배하고 있다. 가산지구(창원)의 농경지 면적은 45.7ha이며 논과 노지의 면적은 약 26.1ha이며, 시설재배면적은 19.6ha로 당근(7.5ha), 수박(4.2ha), 감자(1.7ha), 가지(1.6ha) 등을 재배하고 있으며, 상대적으로 시설재배면적의 비율이 높은 구역이다. 시산지구의 농경지 면적은 118.1ha이며, 논과 노지의 면적은 약 99.2ha, 시설재배면적은 약 18.9ha이며, 당근(5.3ha), 수박(2.6ha) 등을 재배하고 있으며, 가산지구에 비해 상대적으로 논의 비중이 높은 구역이다.



Fig. 1 Overview of study area

### 2. Penman-Monteith 방법을 이용한 증발산량 산정

Penman-Monteith 방법은 Penman의 증발산량 산정방법을 일부 개선하여 관개작물에 의한 증발산량(소비수량)을 산정하기 위한 방법으로 세계식량기구(FAO)에서 표준으로 사용하고 있는 방법이다. Penman-Monteith 식은 다음의 식 (1)과 같이 표시된다(Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

Table 1 Cultivated area of greenhouse crops and paddy fields area by section

Section	Area (ha)	Cultivated area of greenhouse crops (ha)	Paddy field area (ha)	Percent of cultivated area of greenhouse crops (%)
Gasan(Gimhae)	93.2	25.6	67.6	27
Gasan(Changwon)	45.7	19.6	26.1	42
Sisan	118.1	18.9	99.2	16
Total	257	64.1	192.9	24

여기서,  $ET_0$ 는 잠재증발산량(mm/day),  $R_n$ 은 작물 표면에서의 순복사량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $G$ 는 토양으로 흡수되는 열유동량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $T$ 는 일평균 대기온도(°C),  $u_2$ 는 지표면 2m에서의 풍속(m/s),  $e_s$ 는 포화증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제증기압(kPa),  $e_s - e_a$ 는 포화증기압과 실제증기압의 차(kPa),  $\Delta$ 는 대기온도에서 포화증기압 곡선에 그은 접선의 경사로 수증기압곡선(kPa/°C),  $\gamma$ 는 습도계 계수(kPa/°C)이다.

수증기압 곡선( $\Delta$ )는 다음의 식 (2)에서 구한다.

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237.3)^2} \quad (2)$$

여기서,  $e_s$ 는 포화수증기압,  $T$ 는 일평균 대기온도(°C)이다. 작물 표면에서의 순일사량  $R_n$  (MJ/m<sup>2</sup>/day)은 다음의 식 (3)과 같이 계산된다.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3)$$

여기서,  $R_{ns}$  (MJ/m<sup>2</sup>/day)는 유입되는 순단파복사에너지이며,  $R_{nl}$  (MJ/m<sup>2</sup>/day)는 방출되는 순장파복사에너지를 나타낸다.  $R_{ns}$ 는 다음의 식 (4)와 같이 계산된다.

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 알베도로 작물의 반사계수를 나타내는 무차원계수로 작물의 경우 0.23을 적용한다.  $R_s$  (MJ/m<sup>2</sup>/day)는 유입되는 태양복사에너지를 나타내며 다음의 식 (5)와 같이 계산된다.

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N})R_a \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 일조시간(hour),  $N$ 은 가능 일최대 일조시간(hour),  $\frac{n}{N}$  상대 일조시간,  $R_a$ 는 외기복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $a_s$ 는 흐린 날에 지구에 도달하는 외기복사에너지의 비율을 표현하는 회귀 상수 ( $n=0$ ),  $a_s + b_s$ 는 맑은 날에 지구에 도달하는 외기복사에너지의 비율 ( $n=N$ )을 나타낸다.

### 3. 확률분포에 따른 관개수량의 산정

농업용수 관개량 산정을 위한 관개계획기준치 (설계기준)은 원칙적으로 가뭄피해 자료에 따라 결정하지만 보통 10년

에 한번 일어나는 정도의 가뭄을 극복할 수 있도록 결정한다. 관개계획기준치를 구하는 방법에는 10년 빈도에 해당하는 계획기준년을 선정하여 구하는 방법과 전체 관측자료로 10년 빈도에 해당하는 값을 확률계산하는 방법이 있으며, 자료기간이 충분히 길면 관측자료에 대한 통계와 확률이론으로 10년 빈도 관개계획기준치를 구하는 방법이 바람직하다 (Ministry of Agriculture and Forest, 1998).

산정된 잠재증발산량으로부터 10년 빈도 잠재증발산량을 산정하기 위하여 빈도분석을 실시하였다. 적합도 검정을 통해 연평균 잠재증발산량의 확률분포를 추정하고 이로부터 대상지구의 10년 빈도 잠재증발산량을 산정하였다. Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정을 이용하여 확률분포의 적합도를 검정하였다. K-S검정은 표본자료의 수가 크지 않을 경우에도 확률분포형의 적합도를 적절한 신뢰도를 가지고 검정할 수 있는 장점이 있다. K-S 검정은 표본자료의 누기확률분포와 가정된 이론확률분포의 누기확률분포를 비교하는 것으로 양자의 최대편차가 표본의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계편차보다 크면 분포는 기각된다.

적합도 검정을 통해 확률분포가 결정되면 확률분포에 따른 재현빈도별 잠재증발산량을 산정하게 된다. 재현기간별 잠재증발산량은 다음의 식 (6)과 같이 계산된다.

$$x_T = \bar{x} + sz_T \quad (6)$$

여기서,  $x_T$ 는 재현빈도별 잠재증발산량이며,  $\bar{x}$ 는 평균,  $s$ 는 표준편차,  $z_T$ 는 재현기간에 따른 변수  $z$ 를 나타낸다.

대상지구의 관개수량은 다음 식 (7)과 같다. 관개효율은 대상지구 시설재배지 내의 점적관개의 수치를 적용하였다.

$$Q = 10 \times \frac{D}{E} \quad (7)$$

여기서,  $Q$ 는 관개수량(m<sup>3</sup>/day),  $D$ 는 10년 빈도 잠재증발산량(mm/day),  $E$ 는 관개효율(%)을 나타내며 송수손실 등을 고려하여 본 연구에서는 0.8을 적용하였다(Jung et al., 2016).

다음의 Fig. 2는 본 연구에서 개발한 하수처리수 재이용 대상지구의 관개용수 산정을 위한 흐름도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 Mac OS에서 Xcode기반으로 C 언어를 이용하여 Penman-Monteith의 잠재증발산량을 산정하고, 통계 프로그램 R을 이용하여 K-S 적합도 검정을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 적합한 확률분포와 관개효율을 적용하여 재현빈도별 관개수량을 산정하였다.

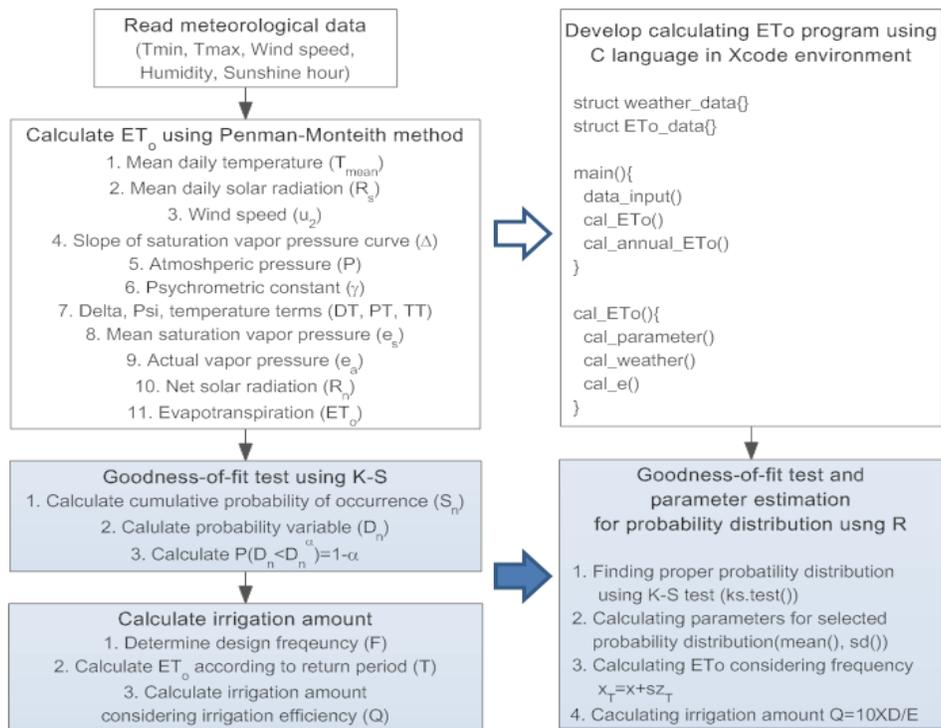


Fig. 2 Procedure of calculating irrigation amount using Penman-Monteith evapotranspiration, K-S goodness-of-fit test, and frequency analysis

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 잠재증발산량의 산정

대상지구의 필요수량을 산정하기 위한 잠재증발산량의 산정은 Penman-Monteith 방법을 적용하였으며, 기상자료는 인

접한 창원 기상관측소의 자료를 이용하였다. 대상지구에서 가장 가까운 기상관측소는 김해 기상관측소이나 2007년말 설립되어 2008년부터 기상관측을 실시하여 자료기간이 짧아 인접한 창원 기상관측소의 자료를 이용하였다. 창원 기상관측소는 1985년 7월부터 자료관측을 시작하였으며, 본 연구에서

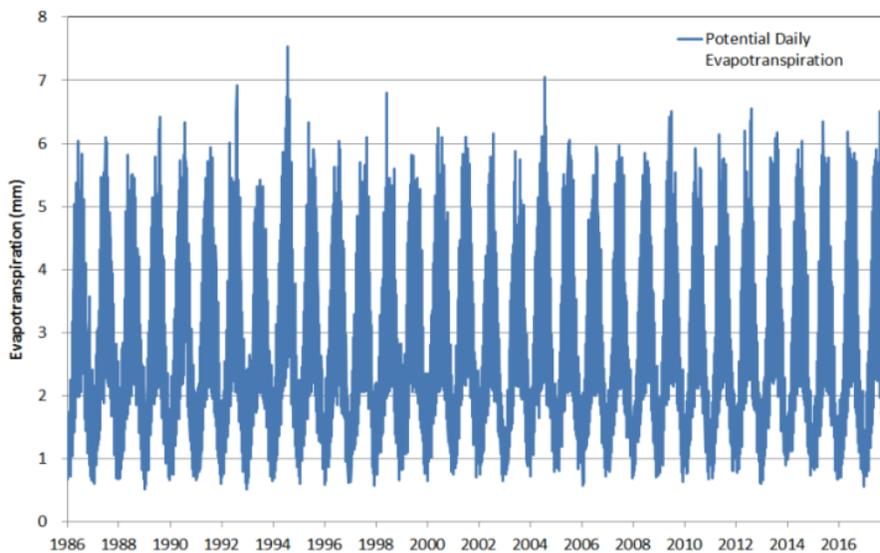


Fig. 3 Daily potential evapotranspiration for study area (1986-2017)

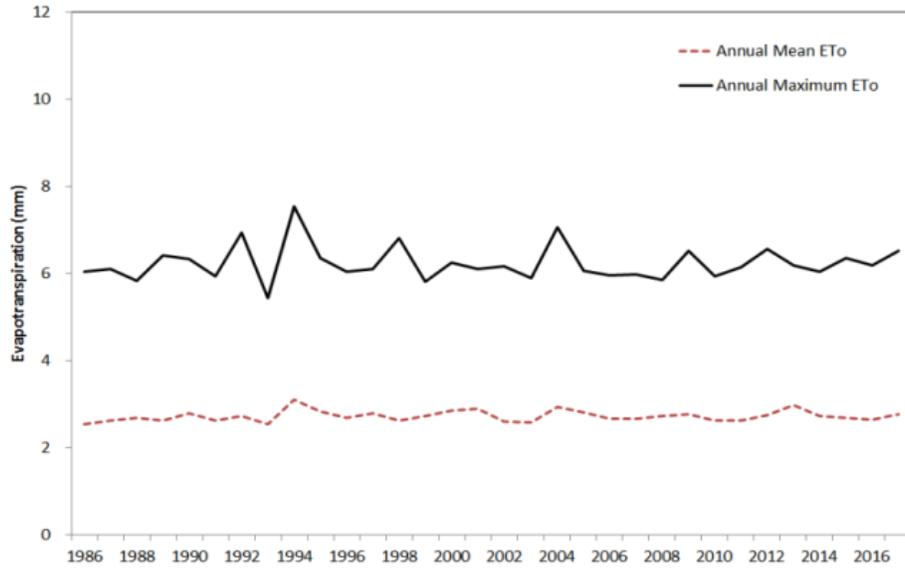


Fig. 4 Annual mean and annual maximum potential evapotranspiration for study area (1986–2017)

는 1986년부터 2017년까지 32년간의 자료를 이용하였다. 잠재 증발산량을 산정하기 위해 일 최저기온(°C), 최고기온(°C), 평균 풍속(m/s), 상대습도(%), 일조 시간(hr) 등의 자료를 구축하였다.

Fig. 3은 대상지구에 대한 일별 잠재증발산량을 보여주고 있으며, 모의기간에 대한 일평균 잠재증발산량은 2.72mm/day, 최대값은 7.53mm/day, 최소값은 0.52mm/day의 값을 보였다. 위의 Fig. 4는 연평균 및 연최대 잠재증발산량을 보여주고 있다. 모의기간 동안의 연평균 잠재증발산량의 평균값은 2.72mm/day, 최대값은 3.10mm/day, 최소값은 2.53mm/day였

으며, 연최대 잠재증발산량의 평균값은 6.22mm/day, 최대값은 7.53mm/day, 최소값은 5.42mm/day였다.

## 2. 잠재증발산량의 빈도분석

적합도 검정을 위해 1986년부터 2017년까지 32년간의 연평균과 연최대 잠재증발산량(mm/day)에 대해 빈도분석을 실시하였다. 자료에 대한 빈도분석시에는 유의수준을 5%로 채택하였다. 연평균 잠재증발산량과 연최대 잠재증발산량의 적합도 검정결과는 아래의 Table 2에 정리하였으며, 각각의 분포형에 대한 최대편차(D)값과 p값을 산정한 결과를 보여주고

Table 2 Probability distribution type goodness-of-fit test for annual mean potential evapotranspiration

Distribution	Function name in R	Annual mean ET <sub>0</sub>		Annual maximum ET <sub>0</sub>	
		D	p	D	p
Normal	pnorm	0.117	0.774	0.167	0.327
Student t	pt	0.942	<0.001	0.998	<0.001
Chi-square	pchisq	0.562	<0.001	0.453	<0.001
Exponential	pexp	0.999	<0.001	1	<0.001
Beta	pbeta	1	<0.001	1	<0.001
Cauchy	pcauchy	0.191	0.191	0.219	0.094
F	pf	0.785	<0.001	0.502	<0.001
Gamma	pgamma	0.985	<0.001	0.920	<0.001
Log-normal	plnorm	1	<0.001	1	<0.001
Logistic	plogis	0.189	0.204	0.237	0.054
Poisson	ppois	0.710	<0.001	0.713	<0.001
Weibull	pweibull	1	<0.001	1	<0.001

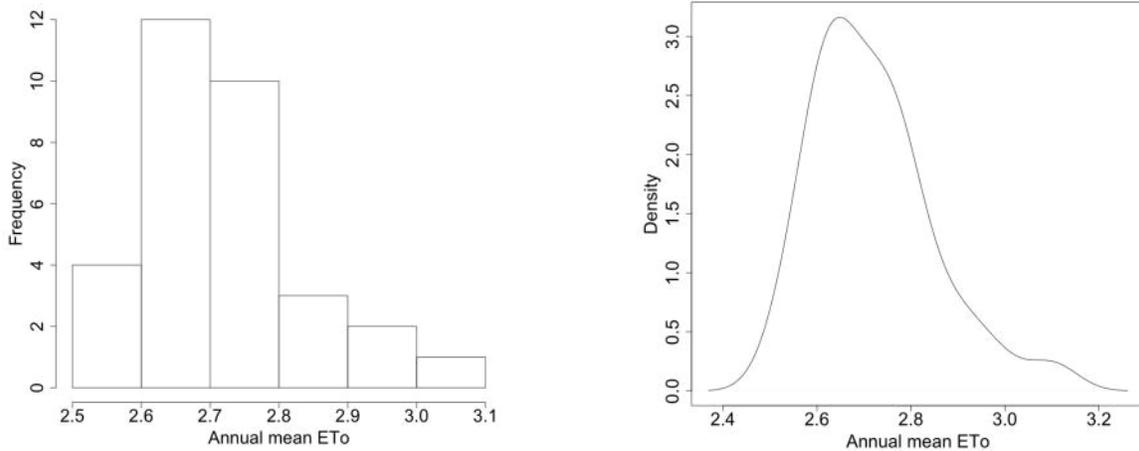


Fig. 5 Frequency distributions and probability distributions of annual mean potential evapotranspiration (1986-2017)

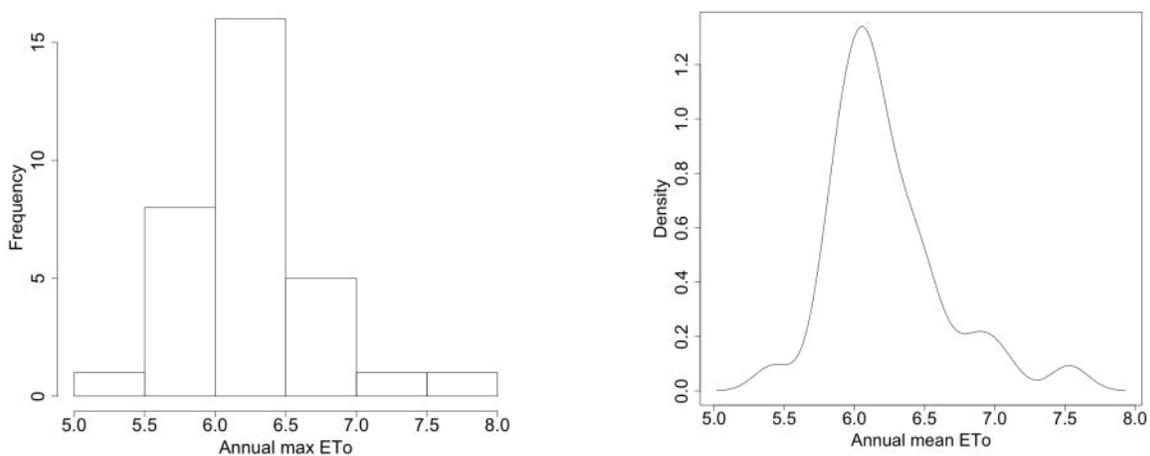


Fig. 6 Frequency distributions and probability distributions of annual maximum potential evapotranspiration (1986-2017)

있다. 적합도 검정은 통계프로그램 R을 이용하였고, Table 2에서 적합도 검정을 위해 적용한 분포와 각각에 대한 R 프로그램에서의 함수명을 정리하였다. 연평균 및 연최대 잠재증발산량의 표본수(n)는 32, 유의수준 5%에 대한 p값은 0.240로 적합도 검정결과 연평균 잠재증발산량과 연최대 잠재증발산량은 모두 정규분포(normal distribution)가 가장 적합한 것으로 나타났다. 연평균 잠재증발산량의 평균은 2.718, 표준편차는 0.129이며 연최대 잠재증발산량의 평균은 6.225, 표준편차는 0.414이다. 위의 Fig. 5와 Fig. 6은 대상지구에 대한 연평균 잠재증발산량과 연최대 잠재증발산량의 도수분포 및 확률분포를 각각 보여주고 있다.

### 3. 관개수량의 산정

다음의 Table 3은 대상지구에 대한 재현기간별 연평균 잠재증발산량과 연최대 잠재증발산량을 산정한 결과를 보여주고 있다. 농업용수의 공급을 위한 10년 빈도 연평균 잠재증발산량은 2.884 mm/day, 연최대 잠재증발산량은 6.756 mm/day로 산정되었다.

식 (7)을 이용하여 대상지구의 10년 빈도 연평균 잠재증발산량을 적용하여 산정한 결과 36.05 m<sup>3</sup>/day/ha, 연최대 잠재증발산량을 적용하여 산정한 결과는 84.45 m<sup>3</sup>/day/ha이다. 논의 경우 기준에 농어촌공사로부터 농업용수를 공급받고 있으므로 하수처리수를 재이용한 관개수량 산정에서 제외하고 시설 재배단지 면적만 대상으로 하여 관개수량을 산정하였다. Table 4는 대상지구의 현재 농경지 면적에서 논면적은 감소하

**Table 3** Annual mean and maximum potential evapotranspiration by return period

T	P(X)x	W	z	Annual mean ET <sub>o</sub> (mm/day)	Annual max. ET <sub>o</sub> (mm/day)
2	0,5	1,177	0,000	2,718	6,225
5	0,2	1,794	0,841	2,827	6,573
10	0,1	2,146	1,282	2,884	6,756
20	0,05	2,448	1,645	2,931	6,906
50	0,02	2,797	2,054	2,984	7,076
100	0,01	3,035	2,327	3,019	7,189
200	0,005	3,255	2,576	3,051	7,292
500	0,002	3,526	2,879	3,090	7,417
1000	0,001	3,717	3,091	3,118	7,505

고 시설재배 면적은 증가하는 추세를 고려한 시나리오를 적용하여 잠재증발산량을 고려한 관개수량을 대상지구의 면적을 고려한 값이다. 현재의 농경지를 기준으로 했을 때, 10년 빈도 연평균 잠재증발산량을 고려할 경우 2,311 m<sup>3</sup>/day, 연최대 잠재증발산량을 고려할 경우 5,413 m<sup>3</sup>/day의 관개수량이 필요할 것으로 분석되었으며, 해마다 시설재배 단지의 면적을 20ha씩 증가한다고 가정하고 미래에 논면적이 모두 시설재배면적으로 전환되면 각각 9,265 m<sup>3</sup>/day, 21,704 m<sup>3</sup>/day의 관개수량이 필요할 것으로 추정된다. 이 값은 매일 대상지구 전체를 대상으로 일별 잠재증발산량을 공급할 경우의 값이 되며 대상지구의 작물재배계획에 따라 작물재배일수와 작물계수 등을 적용하면 실제 대상지구에서의 필요수량이 산정된다.

본 연구에서는 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 시설용량 설계를 위해 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하고, 적합도 검정을 통한 확률분포 추정을 통해 재현빈도에 따른 설계 관개수량을 산정하였다. 산정된 일평균 잠재증발산량은 2.72mm/day으로 나타났으며, 산정된 값의 적합성을 평가하기 위해 기존 연구에서 제시된 잠재증발산량과 비교하였다. Yoo et al. (2006)의 연구에서 관개기간 수원지방의 순별 잠재증발산량을 산정한 결과, 3.4~3.7mm/day의 결과를 보였으며, 증발산량이 많은 관개기간을 대상으로 산정하여 본 연구의 결과에 비해 다소 높게 산정된 것으로 추정되며, Kim et al. (2017)은 안동댐 유역을 대상으로 잠재증발산량을 산정한 결과, 2.47mm/day로 본 연구의 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 산정된 잠재증발산량을 이용하여 대상지구의 설계빈도, 관개면적, 관개효율, 미래 토지이용 변화, 작물변화 등을 고려하여 관개용량을 산정할 수 있을 것으로 생각되며, 최근 급격한 기후변화에 따른 가뭄을 극복하

**Table 4** Estimation of irrigation water requirement according to the scenario of change in greenhouse crop area

Paddy field area (ha)	Greenhouse crop area (ha)	Irrigation water requirement (m <sup>3</sup> /day/ha)	
		Applied annual mean ETo	Applied annual max ETo
192.9*	64.1*	2,311	5,413
172.9	84.1	3,032	7,102
152.9	104.1	3,753	8,791
132.9	124.1	4,474	10,480
112.9	144.1	5,195	12,169
92.9	164.1	5,916	13,858
72.9	184.1	6,637	15,547
64.1	192.9	6,954	16,290
44.1	212.9	7,675	17,979
24.1	232.9	8,396	19,668
0	257	9,265	21,704

\* Current status

고 시설재배 단지의 수막용수 증가로 인한 지하수 자원의 고갈에 대비하기 위해 증가할 것으로 예상되는 하수처리수 재이용을 위해 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용 대상지구의 관개수량을 산정하였다. 본 연구의 대상지구는 김해시 한림면에 위치한 진영맑은물순환센터에 인접한 본산리, 가산리, 가동리의 농경지에 해당하는 지역으로 면적은 총 259ha이다. 대상지구의 기상자료는 인접한 창원 기상관측소의 1986년부터 2017년까지 32년간의 자료를 이용하였다.

Penman-Monteith 방법을 이용하여 대상지구의 모의기간에 대한 일평균 잠재증발산량을 산정한 결과, 연평균 잠재증발산량의 평균값은 2.72 mm/day, 최대값은 3.10 mm/day, 최소값은 2.53 mm/day였으며, 연최대 잠재증발산량의 평균값은 6.22 mm/day, 최대값은 7.53 mm/day, 최소값은 5.42 mm/day로 모의되었다.

산정된 잠재증발산량으로부터 10년 빈도 잠재증발산량을 산정하기 위해 빈도분석을 실시하였으며, K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 이용하여 1986년부터 2017년까지 32년간의 연평균과 연최대 증발산량에 대해 빈도분석을 실시한 결과 연평균, 연최대 잠재증발산량 모두 정규분포에 적합한 것으

로 나타났다. 표준정규분포를 적용하여 산정한 10년 빈도 연평균 잠재증발산량 2.884 mm/day, 연최대 잠재증발산량은 6.756 mm/day였다.

대상지구에 대해 시설재배단지를 대상으로 10년 빈도 잠재증발산량을 이용하여 관개효율을 80%로 하여 관개수량을 산정한 결과 연평균 잠재증발산량을 적용하면 36.05 m<sup>3</sup>/day/ha, 연최대 잠재증발산량을 적용하면 84.45 m<sup>3</sup>/day/ha였다. 대상지구의 현재 농경지를 기준으로 논은 농어촌공사로부터 물을 공급받고 있으므로 제외하고 시설재배단지의 경우 연중 관개용수를 공급한다고 가정할 경우 연평균 잠재증발산량을 고려했을 경우 2,311 m<sup>3</sup>/day, 연최대 잠재증발산량을 고려할 경우 5,413 m<sup>3</sup>/day의 관개수량이 필요할 것으로 분석되었다. 하수처리수 재이용에 따라 안정적인 농업용수가 공급되어 미래에 논면적이 모두 시설재배로 전환되었을 때 관개수량은 각각 9,265 m<sup>3</sup>/day, 21,704 m<sup>3</sup>/day로 모의되었다. 산정된 시설재배의 관개수량은 일별 잠재증발산량을 공급할 경우의 값으로 대상지구의 작물재배일수와 작물계수 등을 적용하면 실제 대상지구에서의 필요수량이 산정된다.

본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용 대상지구의 관개수량을 산정하여 최적 생육에 필요한 물 소비량에 대비하여 관개계획 및 하수처리수 재이용 사업계획을 가능하게 하고, 향후 관개구역에 합리적인 공급량 산정을 위한 방법론 및 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 대상지구의 설계용량과 수자원현황을 고려한 적정 하수재이용 시스템을 선정하기 위한 연구가 필요하며 이를 통해 대상지구에 대한 하수처리수의 농업용수 재이용에 적합한 시스템이 개발될 수 있을 것으로 예상된다.

## REFERENCES

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 300(9): D05109.
- Cai, J., Y. Liu, T. Lei, and L. S. Pereira, 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology* 145(1): 22-35. doi:10.1016/j.agrformet.2007.04.012.
- Cho, Y. M., and I. S. Hong, 2017. Solving water shortage using sewage treated water (in Korean).
- Garcia, M., D. Raes, R. Allen, and C. Herbas, 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1): 67-82. doi:10.1016/j.agrformet.2004.03.005.
- Jensen, M. E., R. D. Burman, and R. G. Allen, 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.
- Jeong, H. S., J. H. Park, C. H. Seong, T. I. Jang, M. S. Kang, and S. W. Park, 2013. Effects of indirect wastewater reuse on water quality and soil environment in paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 91-103 (in Korean). doi:10.5389/ksae.2013.55.3.091.
- Jung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. K. Son, K. S. Yoon, K. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Jung, J. D. Choi, and J. Y. Choi, 2016. Irrigation and drainage engineering 2<sup>nd</sup> edition. Dongwhasa (in Korean).
- Kim, S. J., M. I. Kim, C. H. Lim, W. K. Lee, and B. J. Kim, 2017. Applicability analysis of FAO56 Penman-Monteith methodology for estimating potential evapotranspiration in Andong Dam watershed using limited meteorological data. *Journal of Climate Change Research* 8(2): 125-143 (in Korean). doi:10.15531/ksccr.2017.8.2.125.
- Lo'pez-Urrea, R., F. Martin de Santa Olalla, C. Fabeiro, and A. Moratalla, 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management* 85: 15-26.
- Ministry of Agriculture and Forest, 1998. Agricultural land and water development design standard - Irrigation (in Korean).
- Ministry of Environment, 2017. 2016 Statistics of Sewerage (in Korean).
- MOLIT and K-water, 2017. Water and Future, 2017 Nature for Water (in Korean).
- Park, S. W., 2011. Application of integrated technologies for wastewater reclamation and reuse system for agriculture, sustainable water resources research center (in Korean).
- Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006. Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and modified Penman method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(1): 13-23 (in Korean). doi:10.5389/ksae.2006.48.1.013.
- Yoon, Y. N., 2008. Basic Hydrology. Chungmoongak (in Korean).