Evaluation of Evapotranspiration in Different Paddy Soils Using Weighable Lysimeter Before Flooding Stage

Dong-Jin Kim, Kyung-hwa Han, Yong-seon Zhang, Hee-rae Cho, Seon-ah Hwang, Jung-hun Ok*,
Kum-Sik Choi, and Jung-soon Choi

Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Jeonbuk 55365, Korea

*Corresponding author: okjh@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 30, 2018

Revised: November 28, 2018

Accepted: November 29, 2018

Water is closely linked to agricultural productivity and is an essential resource for agriculture. Climate change and drought are causing water scarcity, and that has an enormous impact on agricultural productivity. Efficient water management methods are needed to prepare for water shortages. The lysimeter is well known as a facility for precisely measuring water and nutrient movement in the soil. Therefore, this study was conducted to investigate the evapotranspiration of different paddy soils using weighable lysimeter and to evaluate the relationship between the evapotranspiration estimated by weighable lysimeter and the reference evapotranspiration estimated by FAO Penman-Monteith equation and Hargreaves equation. This study was performed in lysimeter facility located at the National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, and used lysimeter weight values and meteorological data measured from 1st January to 30th April in 2018. The daily evapotranspiration estimated by the lysimeter was ET_{LY} , the reference evapotranspiration estimated by FAO Penman-Monteith equation was ET_{PM} , and the reference evapotranspiration estimated by Hargreaves equation was ET_{HS} . ET_{LY} showed that loam (L) was higher than that of sandy loam (SL) and silty clay loam (SiCL). The accumulated evapotranspiration from 1st January to 30th April in 2018 was in the order of L (235 mm) > SL (231 mm) > SiCL (192 mm). Solar radiation showed a higher coefficient of determination (R^2) than mean temperature in the correlation between the meteorological data and ET_{LY} . The relationship between ET_{LY} and ET_{HS} showed a relatively low coefficient of determination, whereas the coefficient of determination in the relationship between ET_{LY} and ET_{PM} showed relatively high fitness for SiCL (0.631), L (0.860) and SL (0.884). Precise measurement and management of soil moisture using lysimeter are expected to be possible.

Keywords: Evapotranspiration, FAO Penman-Monteith equation, Hargreaves equation, Lysimeter, Paddy soil, Water scarcity

The coefficient of determination (R^2) and linear equation between the ET_{LY} and ET_{PM}/ET_{HS} estimated by the regression equation.

Soil	$ET_{LY}-ET_{PM}$		$ET_{LY}-ET_{HS}$	
	Linear equation	R^2	Linear equation	R^2
Silty clay loam	$y=0.853x+0.263$	0.631	$y=0.535x+0.448$	0.407
Loam	$y=1.179x+0.107$	0.860	$y=0.793x+0.248$	0.638
Sandy loam	$y=1.237x-0.018$	0.884	$y=0.841x+0.112$	0.669

[†] ET_{LY} , evapotranspiration estimated by weighable lysimeter; ET_{PM} , reference evapotranspiration estimated by FAO Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998); ET_{HS} , reference evapotranspiration estimated by Hargreaves equation (Hargreaves and Samani, 1985).

Introduction

전 세계적으로 물 공급량의 70%가 농업용수로 사용되고 있으며, 물은 농업에 있어 매우 중요한 자원이다 (UNESCO, 2001; Chartzoulakis and Bertaki, 2015; Saccon, 2018). 국내에서는 수자원 중 농업용수의 비율이 62%를 차지하고 있다 (MOLIT, 2011). 전 세계적으로 기후변화는 가뭄 등의 물 부족을 야기하고 있으며, 물 부족은 농업환경을 위협하고 있다 (Pereira et al., 2002; Hanjra and Qureshi, 2010; Vargas-Amelin and Pindado, 2014). 농업분야에서는 물 부족 대비를 위해 다양한 물 관리 방안 연구가 진행되고 있다. 관개수 절약을 위한 논토양의 투수량 산출 (Chae and Kim, 2001), 지역별 봄배추의 관개기준 설정 (Eom et al., 2010), 시설재배 오이의 적정 관개시점 평가 (Jeon et al., 2010) 등의 연구결과가 보고된 바 있으며, 농업에서는 물 절약을 위한 물 관리 방법이 중요한 수단이다. 농업환경에서 효율적인 물 관리를 위해서는 기상조건, 기준증발산량 등의 기본 자료가 필요하다. 기준작물증발산량 (reference crop evapotranspiration, ET_0)은 수분 부족이 없는 조건에서 잔디 등 기준작물의 증산과 토양표면의 증발을 합한 값이다 (Allen et al., 1998). ET_0 를 산정하는 다양한 공식 중 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 공식 (Allen et al., 1998)이 활용도가 가장 높고, 여러 학자들에 의해서 FAO P-M 공식의 우수성이 입증된 바 있다 (Jensen et al., 1990; Cai et al., 2007; Pereira et al., 2015). 국내에서는 Yoo et al. (2007)이 FAO P-M 공식과 빈도분석법을 이용하여 10년 빈도 한발에 대한 기준증발산량을 산정한 바 있다. Rim (2008a)은 FAO P-M 공식을 이용하여 월별 및 연별 기준증발산량 추세를 분석하였다. Lee and Cho (2011)은 일조시간과 FAO P-M 공식을 적용하여 우리나라 20개 지점의 기준증발산량을 추정하였다. FAO P-M 공식에 비해 Hargreaves 공식은 기본 기상자료만 있으면 비교적 간단히 기준증발산량을 산정할 수 있다 (Hargreaves and Samani, 1985). 그러나 Moon et al. (2013)은 Hargreaves 공식을 이용할 경우 지역적 기후특성에 따라 기준증발산량이 과소 또는 과대 산정될 수 있음을 제시하였고, FAO P-M 공식과 비교하여 국내 71개 지점에 대한 지역별 매개변수 추정을 통해 수정된 Hargreaves 공식을 제안하였다. Lee et al. (2008)은 경기만 유역에서 기상자료의 결측 또는 부족 지역에 대하여 Hargreaves 공식의 매개변수를 추정하였다. Lee and Park (2008)은 국내 23개 지점의 1997-2006년 동안의 기상자료를 토대로 Hargreaves 공식의 보정계수를 산정한 바 있다. 최근 농업 환경에서 물 절약을 위한 정밀한 물 이동 측정이 요구되고 있으며, 이러한 토양수분 이동의 정밀한 측정을 위하여 교란되지 않은 자연상태 토양을 중량식 라이시미터로 측정되는 연구가 활발히 진행되고 있다 (Meißner et al., 2010). Kim et al. (2010)은 지하수위 조절 라이시미터에서 보리, 밀, 조의 수분이용효율을 평가한 바 있고, Seo et al. (2016)은 중량식라이시미터를 이용하여 동절기 동안 논토양의 물수지를 평가하였다. 또한 Lee et al. (2017)은 라이시미터를 이용한 물 관리 방법에 따른 콩 재배지에서 양분 용탈 및 흡수 특성을 조사하였고, Seo et al. (2017)은 중량식 라이시미터를 이용하여 토성이 다른 토양에서 토양수분함량 추정모델 적용을 위한 토양수분특성곡선을 평가한 바 있다. 증발산량을 산정하는 것은 효율적 물 관리를 위한 필수 기초자료라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 중량식 라이시미터를 이용하여 토성이 다른 논토양의 증발산량을 조사하고, 중량식 라이시미터를 이용하여 산출한 증발산량과 FAO Penman-Monteith 및 Hargreaves 공식을 이용하여 산출한 기준증발산량 간 관계 적합도를 평가하였다. 조사된 결과는 정밀한 농업용수 관리를 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

Materials and Methods

연구지점 및 라이시미터 구성 본 연구는 전라북도 완주군 농촌진흥청 국립농업과학원 (National Institute of

Agricultural Sciences, NAS) 토양수분이동실험동 내의 중량식 라이시미터 (weighable lysimeter) 시설을 이용하여 수행하였다. 연구지점은 해발 33 m, 북위 35°49'29", 동경 127°02'46"에 위치하고 있다. 중량식 라이시미터는 자연토양 구조 그대로의 교란되지 않은 토양을 이용하였으며, 표면적 1 m², 깊이 1.5 m이다. 라이시미터를 이용하여 측정된 데이터는 1시간 단위로 data logger (UGTLog, UGT, Germany)에 자동수집 되었다. 라이시미터의 구성은 Fig. 1과 같다. 본 라이시미터 시설은 Seo et al. (2016)과 Seo et al. (2017)의 연구에서 사용된 바 있다.

Fig. 1. The cross-sectional design of a weighable lysimeter (a: weighable monolithic lysimeter; b: load cells with 10 g accuracy; c: drainage measurement device; d: sensors for measurements of soil condition such as soil water tension, soil water moisture, temperature, and electrical conductivity; e: groundwater control device; f: automatic data logger; g: surface runoff measurement tool) (Seo et al., 2016; Seo et al., 2017).

시험토양 및 기상측정 본 연구에서는 미사질식양토 (silty clay loam, SiCL), 양토 (loam, L), 사양토 (sandy loam, SL) 세 종류의 비교란 논토양을 사용하였다. 미사질식양토 (부용토)는 전라북도 익산지역에서, 양토 (강서토)와 사양토 (강서토)는 전주지역에서 각각 채취하였다. 각 토양의 물리적 특성은 깊이별로 토양입자분포 (particle size distribution)와 용적밀도 (bulk density)를 분석하였다. 토양입자분포는 Gee and Bauder (1986)의 비중계법을 이용하여 입자분포비율을 산정한 후 미국농무부 (United States Department of Agriculture, USDA)의 토성삼각표 (soil texture triangle)를 이용하여 토성을 결정하였다. 용적밀도는 Blake and Hartge (1986)의 코아법을 이용하였다. 시험 토양의 물리적특성은 Table 1과 같고, 본 시험토양은 Seo et al. (2017)의 연구에서 사용된 바 있다. 시험에 사용된 기상자료는 국립농업과학원 중량식 라이시미터 시설에 설치된 기상정보시스템 (Weather Information System, WIS, STA Co., Korea)으로 측정하였다. 담수전 비경작기간 동안 논토양의 증발산량 산정을 위하여 2018년 01월 01일부터 2018년 04월 30일까지 자료를 활용하였다.

Table 1. Physical properties of soils used in this study.

Soil [†]	Soil depth	Bulk density	Particle size distribution			Soil texture
			Sand	Silt	Clay	
	cm	Mg m ⁻³	----- % -----			
SiCL	0-19	1.11	5.9	64.1	30.0	Silty clay loam
	19-48	1.38	5.3	54.5	40.2	Silty clay
	48-71	1.37	2.7	55.1	42.2	Silty clay
	71-114	1.40	3.9	58.7	37.4	Silty clay loam
	114-150	1.40	4.6	59.1	36.3	Silty clay loam
L	0-20	1.20	42.3	47.7	10.0	Loam
	20-40	1.47	44.7	45.3	10.0	Loam
	40-67	1.41	43.8	47.2	9.0	Loam
	67-89	1.41	51.8	40.2	8.0	Loam
	89-114	1.28	75.3	22.7	2.0	Loamy sand
	114-150	1.25	83.9	14.1	2.0	Sand
SL	0-13	1.20	52.6	37.4	10.0	Sandy loam
	13-28	1.33	52.8	39.2	8.0	Sandy loam
	28-69	1.41	50.1	40.9	9.0	Loam
	69-95	1.36	61.4	32.6	6.0	Sandy loam
	95-130	1.40	59.8	34.2	6.0	Sandy loam
	130-150	1.42	57.4	34.6	8.0	Sandy loam

[†]SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

증발산량 산정 증발산량은 2018년 01월 01일부터 2018년 04월 30일까지 수집된 라이시미터 자료와 기상정보 시스템 자료를 이용하여 산정하였다. 본 연구에서는 라이시미터를 활용한 증발산량 (evapotranspiration, ET_{LY}), Allen et al. (1998)이 제안한 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Penman-Monteith 공식에 따른 기준증발산량 (reference evapotranspiration, ET_{PM}), Hargreaves and Samani (1985)가 제안한 Hargreaves 공식에 따른 기준증발산량 (reference evapotranspiration, ET_{HS})을 산정하였다. 라이시미터를 활용한 ET_{LY} 산출 공식은 Klammler and Fank (2014)가 제안한 방법을 따랐으며, 그 공식은 Eq. 1과 같다.

$$ET_{LY} = P + I - D - R \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, ET_{LY} 는 증발산량 (mm day^{-1}), P 는 강우량 (mm day^{-1}), I 는 관개량 (mm day^{-1}), D 는 지하배수량 (mm day^{-1}), R 은 지표유출량 (mm day^{-1})이다. 일자마다 누적된 증발산량은 누적증발산량 (accumulated evapotranspiration, ET_A)으로 하였다.

ET_{PM} 산정을 위한 FAO Penman-Monteith 공식은 Eq. 2와 같다.

$$ET_{PM} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{Eq. 2})$$

ET_{PM} 는 기준증발산량 (mm day^{-1}), Δ 는 포화수증기압과 온도곡선 기울기 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ 는 건습계상수 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), u_2 는 지상 2m 높이에서의 풍속 (m s^{-1}), R_n 은 이용가능복사열 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G 는 토양열유동밀도 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T 는 일평균온도 ($^\circ\text{C}$), e_s 는 포화수증기압 (kPa), e_a 는 실제수증기압 (kPa)이다.

ET_{HS} 산정을 위한 Hargreaves 공식은 Eq. 3과 같다.

$$ET_{HS} = K_{ET} R_a (T + 17.8) \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \quad (\text{Eq. 3})$$

ET_{HS} 는 기준증발산량 (mm d^{-1}), K_{ET} 는 Hargreaves and Samani (1985)가 미국 캘리포니아주 데이비스의 8년간 기상자료를 이용하여 산정한 값으로 0.0023이 기본값이다. R_a 는 대기권 밖의 복사에너지를 증발산량 단위 (mm day^{-1})로 환산한 값이며, 위도 (latitude)와 줄리안데이 (Julian day)로 계산할 수 있다. $T_{\max}$ 는 일 최고온도 ($^\circ\text{C}$)과 $T_{\min}$ 은 일 최저온도 ($^\circ\text{C}$)이다.

통계분석 기상자료 (평균온도, 일사량)와 라이시미터를 활용하여 산정한 증발산량 (ET_{LY}) 간 관계, 대중적 기준 증발산량 공식으로 산정된 ET_{PM} (FAO Penman-Monteith equation) 및 ET_{HS} (Hargreaves equation)와 ET_{LY} 간 관계의 적합도를 평가하기 위하여 회귀분석 (regression analysis)을 실시하였다. 회귀식의 결정계수 (coefficient of determination, R^2)는 SigmaPlot (SigmaPlot 10.0, Systat Software Inc., USA)을 이용하여 산출하였다.

Results and Discussion

기상자료 분석 및 기준증발산량 (ET_{LY}) 기상정보시스템으로부터 얻어진 2018년 01월 01일에서 2018년 04월 30일까지의 평균온도, 일사량, 강우량을 Fig. 2에 나타내었다. 1월과 2월은 강한 추위로 인하여 영하온도를 기록하는 날이 빈번하였으며, 3월부터 서서히 영상온도를 회복하였다. 강우가 발생한 일자에는 낮은 일사량을 보였으며, 평균온도 증가와 함께 3월부터 일사량이 서서히 증가하였다. 이 기간 동안 10 mm 이상 강우를 11차례 기록하였다. 라이시미터를 이용하여 산출한 증발산량 (evapotranspiration, ET_{LY})과 그 누적증발산량 (accumulated evapotranspiration, ET_A)은 Fig. 3과 같다. ET_{LY} 는 양토 (L)가 대체적으로 높게 나타났으며 미사질식양토 (SiCL)는 낮게 나타났다. 미사질식양토 (SiCL), 양토 (L), 사양토 (SL)의 ET_{LY} 경향은 비슷하였으며, 영상기온으로 회복된 3월부터 ET_{LY} 가 증가하였다. 2018년 1월 1일부터 2018년 4월 30일까지의 ET_A 는 ET_{LY} 의 결과가 반영되어 $L (235 \text{ mm}) > SL (231 \text{ mm}) > SiCL (192 \text{ mm})$ 순서로 나타났다. 다만 1월 30일 시점으로 SL과 SiCL의 ET_A 순위가 역전되었다 (Fig. 3). SiCL의 높은 점토함량으로 수분보유력이 높아 증발량이 낮은 것으로 보인다. Seo et al. (2017)의 연구에서도 점토함량이 높은 토양이 높은 수분보유력을 보였다. 또한 ET_{LY} 가 증가하기 시작한 3월은 영상온도 회복으로 잡초가 발생하였으며 (Fig. 4), 잡초 피복이 증산량 증가에 영향을 준 것으로 보인다. L의 잡초 피복도가 상대적으로 높았으며 (Fig. 4), 이는 L의 증산량 증가로 이어져 ET_{LY} 가 높아진 것으로 보인다. L의 낮은 점토함량은 증발량을 증대시키고 높은 잡초 피복도는 증산량을 증대시켜 L의 증발산량이 높은 것으로 추정된다. Anapalli et al. (2016)는 라이시미터를 이용한 연구에서 옥수수 생육 발달에 따라 바이오매스와 엽면적이 증가할 수록 증발산량이 증가함을 보고하였다.

Fig. 2. Daily variation of weather factors in the study site from 1st January to 30th April in 2018.

[†] SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

Fig. 3. Changes in daily evapotranspiration (ET_{LY}) and accumulated evapotranspiration (ET_A) estimated by weighable lysimeter from 1st January to 30th April in 2018.

[†]SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

Fig. 4. State of different paddy soils before flooding stage from January to April in 2018.

기상과 증발산량 (ET_{LY}) 관계 2018년 01월 01일부터 2018년 04월 30일까지 강우량과 증발산량 (ET_{LY})을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 강우가 발생된 일자에는 미사질식양토 (SiCL), 양토 (L), 사양토 (SL) 모두 ET_{LY} 가 매우 낮았다. 강우가 발생된 일자에는 일사량이 급격히 감소하여 (Fig. 2) 증발산량에 영향을 준 것으로 보인다. 평균온도 및 일사량을 ET_{LY} 와 회귀분석하여 결정계수 (coefficient of determination, R^2)를 산출한 결과, 평균온도와 토양별 ET_{LY} 의 R^2 는 SiCL (0.257), L (0.392), SL (0.416)로 낮게 나타난 반면, 일사량과 토양별 ET_{LY} 의 R^2 는 SiCL (0.654), L (0.819), SL (0.798)로 높게 나타났다 (Fig. 6). 평균온도보다는 일사량이 ET_{LY} 에 보다 많은 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 또한 강우가 발생된 일자에 일사량이 급격히 감소하여 ET_{LY} 가 낮아진 것과 동일하게 해석할 수 있다. Lee et al. (2012)은 라이시미터 관측 증발산량과 일사량이 높은 상관성 ($R^2=0.889$)이 있음을 확인한 바 있다.

[†]SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

[‡]ET_{LY}, evapotranspiration estimated by weighable lysimeter.

Fig. 5. Comparison of rainfall and daily evapotranspiration (ET_{LY}) in different paddy soils from 1st January to 30th April in 2018.

증발산량과 기준증발산량의 관계 기준증발산량 산정을 위하여 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 공식 (Allen et al., 1998) 및 Hargreaves 공식 (Hargreaves and Samani, 1985)을 사용하였고, 라이시미터를 이용하여 증발산량을 산정하였다. 각각의 기준증발산량 및 증발산량을 ET_{PM}, ET_{HS}, ET_{LY}라 하였으며, 상호간 적합도 평가를 위한 회귀분석을 실시하여 결정계수 (coefficient of determination, R²)를 산출하였다. ET_{PM}과 ET_{HS} 간 기울기는 1.204 ($y=1.204x+0.264$), R²는 0.887으로 높은 적합도를 나타내었다 (data not shown). Rim (2008b)의 증발산량 산정 방법

[†] SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

Fig. 6. Correlation between the mean temperature/solar radiation and daily evapotranspiration (ET_{LY}) using regression equations.

들간 비교에서 전국 21개 지역을 조사한 결과 Hargreaves 공식이 FAO P-M 공식과 유사함을 밝힌 바 있다. 또한 Yoon and Choi (2018)의 기준증발산량 공식별 비교에서 대구, 부산, 서울 지역의 FAO P-M 공식과 Hargreaves 공식 간 R^2 값이 각각 0.983, 0.972, 0.867로 상관성이 높게 나타났다. ET_{PM} 과 토양별 ET_{LY} 간 관계, ET_{HS} 와 토양별 ET_{LY} 간 관계를 Fig. 7에 나타내었다. ET_{PM} - ET_{LY} (SiCL)의 기울기 (0.853)는 1보다 작으나 1에 가깝고, R^2 는 0.631이다. ET_{PM} - ET_{LY} (L)의 기울기 (1.179)는 1보다 크나 1에 가깝고, R^2 는 0.860이다. ET_{PM} - ET_{LY} (SL) 또한 기울기 (1.237)는 1보다 크나 1에 가깝고, R^2 는 0.884이다. ET_{PM} 과 ET_{LY} 간 관계는 비교적 높은 적합도를 나타내었다. ET_{PM} - ET_{LY} 간 적합도가 높은 것은 FAO P-M 공식의 우수성 (Jensen et al., 1990; Cai et al., 2007; Pereira et al., 2015)으로 설명이 가능하다. ET_{HS} - ET_{LY} 간 관계의 R^2 는 SiCL (0.407), L (0.638), SL (0.669)로서 비교적 낮은 적합도를 나타내었다. Yoon and Choi (2018)는 기상자료 결측과 산정에 따라 기준증발산량을 비교 평가한 결과, Hargreaves 공식은 지역특성을 고려한 계수 보정이 필요함을 언급하였다. 그러나 ET_{HS} 가 ET_{PM} 과 비교적 높은 상관성이 있으므로 Hargreaves

공식의 적절한 보정계수 산정이 이루어진다면 간편한 기준증발산량 추정이 가능할 것으로 판단된다. 더욱이 라이시미터를 이용하여 산정된 증발산량은 FAO P-M 공식에 높은 적합도를 나타내어 라이시미터를 이용한 증발산량의 정밀한 측정이 가능할 것으로 기대된다. 이를 통해 재배지 토양의 정밀한 수분 관리가 가능할 것으로 생각된다.

[†]SiCL, L, and SL are indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.

[‡] ET_{LY} , evapotranspiration estimated by weighable lysimeter; ET_{PM} , reference evapotranspiration estimated by FAO Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998); ET_{HS} , reference evapotranspiration estimated by Hargreaves equation (Hargreaves and Samani, 1985).

Fig. 7. Correlation between the ET_{PM}/ET_{HS} and ET_{LY} using regression equations.

Conclusions

본 연구에서는 중량식 라이시미터를 이용하여 담수전 비경작기간 동안 토성이 서로 다른 논토양의 증발산량을 산정하였다. 그리고 산정된 증발산량과 기상인자의 관계성을 조사하였고, 대중적으로 사용되는 FAO Penman-Monteith 공식 및 Hargreaves 공식을 이용하여 산정된 기준증발산량과 라이시미터를 이용하여 산정된 증발산량 간 관계를 조사하여 적합도를 평가하였다. 평균온도 보다 일사량이 라이시미터를 이용하여 산정된 증발산량과 높은 관계성이 있는 것으로 나타났으며, 강우 발생은 일사량에 영향을 주어 증발산량에도 영향을 주었다. 라이시미터를 이용하여 산정된 증발산량은 우수성이 검증된 FAO Penman-Monteith 공식으로 산정된 기준증발산량과 높은 적합도를 나타내었다. 따라서 라이시미터를 이용한 토양수분의 정밀한 측정이 가능하며 정밀한 토양수분 관리가 가능한 만큼 물 절약형 작물재배기술 개발이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ01086701) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. FAO irrigation and drainage paper, No. 56, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Anapalli, S.S., L.R. Ahuja, P.H. Gowda, L. Ma, G. Marek, S.R. Evett, and T.A. Howell. 2016. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. *Agric. Water Manag.* 177:274-283.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density in methods of soil analysis. In: A. Klute (ed.). *Method of soil analysis. Part 1. (2nd edition)*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Chae, J.C. and S.W. Kim. 2001. Effect of soil texture on rice growth and paddy soil percolation under lysimeter condition. *Korean J. Crop Sci.* 46:236-240.
- Chartzoulakis, K. and M. Bertaki. 2015. Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 4:88-98.
- Eom, K.C., P.K. Jung, M.H. Koh, S.H. Kim, S.Y. Yoo, S.H. Park, S.O. Hur, and S.K. Ha. 2010. Water saving irrigation manual of spring chinese cabbage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):812-822.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute (ed.). *Method of soil analysis. Part 1. (2nd edition)*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Hanjra, M.A. and M.E. Qureshi. 2010. Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy* 35:365-377.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Am. Soc. Agric. Eng.* 1(2):96-99.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen. 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. American Society of Civil Engineers Manuals and Reports on Engineering. Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, USA.

- Jeon, S.H., S.O. Hur, S.K. Ha, H.J. Jun, K.H. Han, H.R. Cho, and S.D. Hung. 2010. Water saving irrigation point in cucumber cultivation under greenhouse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):418-423.
- Kim, B.K., H.Y. Gong, J.S. Shim, and S.D. Hong. 2010. Water use efficiency of barley, wheat, and millet affected by groundwater table under lysimeter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3):253-259.
- Klammmler, G. and J. Fank. 2014. Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Sci. Total Environ.* 499:448-462.
- Lee, B.Y., S.K. Yang, K.H. Kwon, and J.B. Kim. 2012. The effect of evapotranspiration by altitude and observation of lysimeter. *J. Environ. Sci.* 21(6):749-755.
- Lee, K.H. and H.Y. Cho. 2011. Estimation of the reference evapotranspiration using daily sunshine hour. *J. Environ. Impact Assess.* 20(5):627-640.
- Lee, K.H. and J.H. Park. 2008. Calibration of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale. *Korean Soc. Civil Eng.* 28(6B):675-681.
- Lee, K.H., H.Y. Cho, and N.S. Oh. 2008. Calibration and validation of the Hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation in Gyeonggi bay watershed. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 41(4):413-422.
- Lee, Y.J., K.H. Han, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2017. Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management. *Korean J. Environ. Agric.* 36(3):147-153.
- Meißner, R., M.N.V. Prasad, G. Du Laing, and J. Rinklebe. 2010. Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Curr. Sci. India* 99(5):601-607.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). 2011. Water resource long-term plan (2011-2020). Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Gwacheon, Korea.
- Moon, J.W., C.G. Jung, and D.R. Lee. 2013. Parameter regionalization of Hargreaves equation based on climatological characteristics in Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 46(9):933-946.
- Pereira, L.S., T. Oweis, and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manag.* 57:175-206.
- Rim, C.S. 2008a. Trends of annual and monthly FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Korean Soc. Civil Eng.* 28(1B):65-77.
- Rim, C.S. 2008b. Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 41(2):212-228.
- Saccon, P. 2018. Water for agriculture, irrigation management. *Appl. Soil Ecol.* 123:793-796.
- Seo, M.J., K.H. Han, H.R. Cho, J.H. Ok, Y.S. Zhang, Y.H. Seo, K.H. Jung, H.S. Lee, and G.S. Kim. 2017. Interpreting in situ soil water characteristics curve under different paddy soil types using undisturbed lysimeter with soil sensor. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(5):336-344.
- Seo, M.J., K.H. Han, K.H. Jung, H.R. Cho, Y.S. Zhang, and S.Y. Choi. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter with paddy sandy loam soil during winter season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(4):300-309.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2001. Securing the food supply. UNESCO, Paris.
- Vargas-Amelin, E. and P. Pindado. 2014. The challenge of climate change in Spain: Water resources, agriculture and land. *J. Hydrol.* 518:243-249.
- Yoo, S.H., J.Y. Choi, and M.W. Jang. 2007. Estimating paddy rice evapotranspiration of 10-year return period drought using frequency analysis. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 49(3):11-20.
- Yoon, P.R. and J.Y. Choi. 2018. Assessment of reference evapotranspiration equations for missing and estimated water data. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 60(3):15-25.