Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.51, No.4, pp.555-563, 2018

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.555
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Water Balance for Chinese Cabbage in Spring Season with Different Upland Soils Evaluated Using Weighable Lysimeters

Jung-hun Ok, Kyung-hwa Han, Ye-Jin Lee, Yong-seon Zhang, Hee-rae Cho, Seon-ah Hwang, Soon-sun Kim, Jin-hee Lee, and Dong-Jin Kim*

Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

***Corresponding author:** gimdj@jbnu.ac.kr

Received: October 5, 2018
Revised: November 15, 2018
Accepted: November 17, 2018

A B S T R A C T

In this study, we evaluated the water balance for Chinese cabbage cultivation in spring season with different upland soils using weighable lysimeter, and investigated the evapotranspiration at different growth stage of Chinese cabbage and total inflows and outflows as affected by soil texture . Outflows such as percolation and evapotranspiration were different with soil type (i.e., soil texture), while no significant difference for total inflows. It was also shown that the least amount of drainage in the loam with high bulk density and the largest amount of drainage in silty clay loam. This is thought to be the result of the vertical movement of water through macropore along with the cracking of the soil that was created by repeated shrinkage and expansion of the silt clay loam during the winter season. The evapotranspiration during the Chinese cabbage cultivation period was the highest in loam, and this is probably due to the large leaf area of the Chinese cabbage grown in loam and high biomass weight. Based on the data obtained using the weighable lysimeter, water movement and water balance of the upland soil could be evaluated. Our study will contribute to the development of national factors in Korea for the estimation of the water management for upland crops with production and accumulation of several years data.

Keywords: Chinese cabbage, Evapotranspiration, Upland soil, Water balance, Weighable lysimeter

The water balance for Chinese cabbage cultivation in spring season on different upland soils using weighable lysimeters from April 9 to June 4 in 2018.

Water use		Soil texture†		
		SiCL	L	SL
Input (mm)	Effective precipitation	175.5±3.1	175.4±2.5	175.7±0.9
	Irrigation	36.0±2.3	37.3±0.5	38.4±1.2
	Total	211.5	212.7	214.1
Output (mm)	Drainage	78.5±18.4	51.8±2.5	78.4±0.3
	Evapotranspiration	205.7±22.0	237.4±5.5	218.9±3.5
	Runoff	0	0	0
	Total	284.2	289.2	297.3
Changes in soil water storage		-72.7	-76.5	-83.2

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

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

기후변화에 따라 가뭄 빈도 및 강도가 증가함에 따라 농업 분야 물절약 기술 개발 및 농업용수량의 정확한 산정과 평가가 중요시 되고 있다 (Chae and Kim, 2001; Vargas-Amelin and Pindado, 2014). 작물 재배에서 관개량의 결정 및 농업용수량 산정을 위해 중요하게 고려해야 할 것은 강수량, 지하배수량, 증발산량 산정 등의 물수지 평가이며, 이를 위해서는 증발산량과 지하배수량을 보다 정확하게 산정해야 한다.

증발산량 산정을 위해서는 기준증발산량과 작물계수 등의 자료가 필요하며 이들은 기상조건에 많은 영향을 받는다 (Allen et al., 1998). 기상 데이터와 함께 다양한 기준증발산량 산출 공식들이 수분이용 평가에 활용되어져 왔으며, 온도나 복사열 자료 등을 이용하여 산출 가능한 Hargreaves 공식과 일사량, 풍속, 온도, 습도 등의 신뢰할 수 있는 다양한 기상 데이터를 필요로 하는 FAO Penman-Monteith 공식이 대표적이라 할 수 있다 (Hargreaves and Samani, 1985; Allen et al., 1998; Hargreaves and Allen, 2003). FAO Penman-Monteith 공식은 다양한 기상 데이터를 요구하나 여러 기후조건에 적용할 수 있고 산정결과의 정확도가 우수하여 연구자들이 증발산량의 산정에 많이 활용하고 있다 (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998). 밭토양에서 지하배수량 산정을 위해서는 토양 특성을 고려하는 것이 중요하다. 수분의 수직이동은 토양의 구조, 용적밀도, 토성, 입도분포 등의 토양특성에 따라 많은 영향을 받는다 (Durner, 1994; Hillel, 1998; Assouline, 2006; Jung et al., 2015). 여러 연구들이 토양내의 수분 수직이동에 대하여 진행되어져 왔으나 이들은 교란된 토양을 이용한 실내실험이거나 현장에서 측정된 소수의 자료들이 대부분이며 (Kim, 2003; Shin et al., 2004; Park et al., 2010), 교란된 토양은 토양구조 변화 등으로 인하여 토양내 물의 이동 양상에 영향을 미친다 (Jung et al., 2015).

증발산량과 지하배수량을 산정하는 다른 방법으로 라이시미터를 활용하여 실측하는 방법이 있다. 장비운영 및 시설관리 등에 따른 비용의 부담은 있으나 정확도 및 신뢰도가 높아 많은 연구자들이 물수지 평가 및 증발산량 산정에 많이 활용하고 있다. Ok et al. (2012, 2015)은 소형 라이시미터를 활용하여 물수지 평가와 함께 온도 변화에 따른 제초제의 유출특성 및 훈탄 처리에 따른 제초제 저감효과를 구명하였으며, 중량식 라이시미터를 활용하여 콩 재배시 물관리 방법에 의한 양분수지 및 작물흡수에 대한 연구 (Lee et al., 2017), 동절기 사양토에서 온도와 경반층에 따른 토양수분이동 및 토성에 따른 토양수분함량 변화 추정 등에 대한 연구 (Seo et al., 2016; 2017) 등을 통하여 라이시미터가 물수지 평가를 위한 유용한 도구임이 증명되었다. 또한 중량식 라이시미터는 비교란 상태로 채취한 토양을 충진한 시설로서 자연상태에서 토양수분의 수직이동 양상을 보다 정밀하게 해석할 수 있어 앞에서 언급한 교란 토양에 대한 영향을 최소화할 수 있다 (Seo et al., 2016; 2017). 토성은 토양수분함량 뿐만 아니라 지하배수량, 증발산량 등 물수지 평가 인자에 영향을 주게 된다. 증발산량은 토양 증발과 작물 증산이 동시에 일어나는 과정으로 토양 특성의 영향을 받게 되며 (Allen et al., 1998), Han et al. (2008)의 소형 라이시미터 연구에서 점토함량이 높은 양토가 사양토보다 수분보유력이 높은 것으로 나타났다. Chae and Kim (2001)은 라이시미터 조건의 논토양에서 식토가 사양토와 식양토보다 관개용수량과 지하투수량이 낮다는 결과를 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 토성이 다른 밭토양에서 봄배추 재배기간 중 중량식 라이시미터에서 실측한 데이터를 분석하여 토성별 증발산량, 지하배수량 등 물수지를 비교하였으며 봄배추 생육단계별 증발산량 변화를 평가하였다.

Materials and methods

중량식 라이시미터 개요 및 시험토양 특성 국립농업과학원(전라북도 완주군)에 설치된 중량식 라이시미터(UGT, Germany)는 북위 35°49'29", 동경 127°02'46", 해발 33 m에 위치하며 표면적 1 m^2, 깊이 1.5 m의 원통코어형 라이시미터이다. 본 연구 토양은 우리나라 대표 토성인 미사질식양토 (silt clay loam, SiCL; 송정통), 양토 (loam, L; 상주통), 사양토 (sandy loam, SL; 상주통)를 자연토양 상태로 유지한 비교란 토양이다. Gee and Bauder (1986)의 비중계법에 따라 입자분포율을 산정 후 미국농무성의 토성삼각표 (soil texture triangle)에 따라 토성을 결정하였다. 토양의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 라이시미터의 구성은 Fig. 1과 같다. 각 라이시미터에는 층위별 (10, 30, 55, 85, 125 cm)로 토양수분센서 (UMP-1, UGT, Germany) 등이 설치되어 있으며, 전체 중량변화를 측정할 수 있는 로드셀은 맨바닥에 설치되어 있어 수분이동, 물수지 및 증발산량을 정밀하게 측정할 수 있다 (Seo et al., 2016; Lee et al., 2017). 측정된 데이터는 1시간단위 평균 데이터로 저장되며, 티핑카운터 (tipping counter)로 지하배수량을 측정하고, 유거수량은 샘플링 박스 무게를 측정하여 구하였다.

시험전 토양 화학성 분석 및 봄배추 정식 시험전 토양은 라이시미터 표토에서 15 cm이내의 토양을 채취하여 국립농업과학원의 토양 및 식물체 분석법 (NAAS, 2011)에 준하여 분석하였다. 유기물함량은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1.0 *M* NH_4OAc (pH 7.0)으로 추출하여 유도결합플라즈마 분광광도계 (ICP-OES, GBC, Integra XL Dual, Australia)로 분석하였다.

Table 1. Soil physical properties of lysimeters used in this study.

Soil texture† (Soil series)	Soil depth (cm)	Bulk density (Mg m^{-3})	Particle size distribution (%)		
			Sand	Silt	Clay
SiCL (Songjeong)	0-12	1.18	6.8	64.0	29.2
	20-36	1.26	5.8	57.5	36.7
	36-61	1.34	6.7	56.6	36.7
	61-98	1.32	17.6	55.8	26.6
	98-150	1.43	34.0	41.9	24.1
L (Sangju)	0-13	1.29	51.0	41.0	8.0
	13-26	1.44	50.3	41.7	8.0
	26-61	1.45	45.3	42.7	12.0
	61-105	1.43	40.9	47.1	12.0
	105-137	1.42	42.3	47.7	10.0
	137-150	1.29	60.7	32.3	7.0
SL (Sangju)	0-13	1.27	54.0	37.0	9.0
	13-26	1.36	61.8	30.2	8.0
	26-41	1.38	47.2	40.8	12.0
	41-66	1.34	61.7	29.3	9.0
	66-108	1.34	69.2	25.8	5.0
	108-150	1.29	75.7	19.3	5.0

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

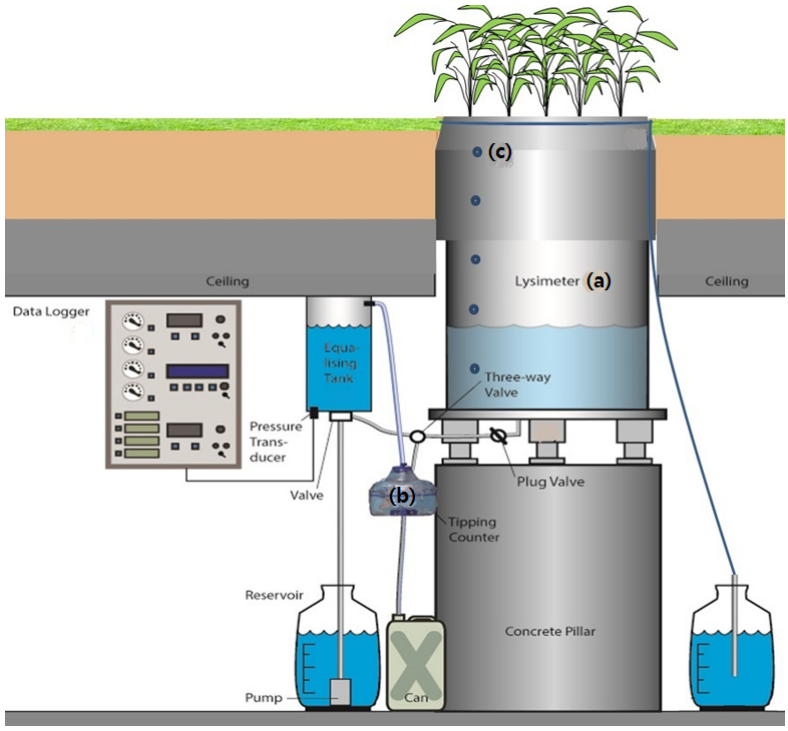

Fig. 1. Weighable lysimeter structure and vertical view. It has three 10 g-resolution load cells for measuring weight of lysimeter (a), tipping counter counting the number of times for every 100 ml of drained water, for measuring a drainage amount (b), and sensors for five layers (10, 30, 55, 85, and 125 cm depths) for measuring soil water content (c) (Seo et al., 2016).

봄배추 (해파랑골드)는 2018년 4월 9일에 라이시미터 1기당 4주씩 정식하였으며, 6월 4일에 수확하였다. 양분관리는 봄배추 정식 전 pH 교정을 위하여 석회고토 (300 kg $10a^{-1}$)를 투입하였으며, 비료 시비는 작물별 비료사용처방 기준 (NIAS, 2017)에 따라 밑거름으로 미사질식양토에는 요소-용성인비-염화칼리=22-103-31 g m^{-2}, 양토에는 요소-용성인비-염화칼리=22-14-27 g m^{-2}, 사양토에는 요소-용성인비-염화칼리=27-14-29 g m^{-2}를 각각 시용하였다. 이후 5월 9일에 웃거름으로 미사질식양토에는 요소-염화칼리=19-21 g m^{-2}, 양토에는 요소-염화칼리=19-18 g m^{-2}, 사양토에는 요소-염화칼리=23-19 g m^{-2}를 각각 추비하였다. 관개는 강우 상황과 토양내의 수분장력값 (33 kPa)을 기준으로 하여 관개를 실시하였다.

봄배추 재배기간 중 기상 데이터 분석 기상데이터는 라이시미터 인근에 설치된 기상장치를 활용하여 강우량과 기준증발산량 산정에 필요한 시간별 기온, 풍속, 일사량 등의 데이터를 수집하였다. 강우이벤트는 기상장치의 강우량계 측정값과 라이시미터 무게 변화값을 함께 비교 및 분석하였다.

물수지 산정 및 데이터 처리 중량식 라이시미터에 설치되어 있는 로드셀을 활용하여 무게변화에 의한 물의 유입량과 유출량을 계산하였으며 물수지는 아래의 Eq. 1로 산출하였다.

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

여기에서 ET_{LY}는 증발산량 (mm day^{-1}), P는 강우량 (mm day^{-1}), I는 관개량 (mm day^{-1}), D는 지하배수량 (mm day^{-1}), R은 지표유출량 (mm day^{-1})이다. 일일 누적으로 산정한 증발산량은 누적증발산량 (accumulated evapotranspiration, ET_A)이다. 또한 총유입량에서 총유출량을 감하여 토양수분 변화량 (changes in soil water storage)을 산출하였다. 각각의 데이터는 평균과 표준편차로 나타내어 유의적 차이를 설명하였다.

Results and Discussion

봄배추 재배기간 동안 기상자료 평가 기상자료는 라이시미터 인근에 설치된 기상장치에서 수집된 자료를 이용하여 분석하였으며, 평년 (1981-2010) 자료와 비교하였다 (Fig. 2). 봄배추 재배기간 동안에 월별 평균 온도의 경우, 전북 전주 지역의 평년과 2018년 온도 변화 경향은 유사하게 나타났으나, 강우량의 경우에는 평년대비 4월, 5월에는 30% 높게 나타났고, 6월에는 20% 적은 강수량을 보였다.

시험전 표토의 화학성 및 생육단계별 봄배추 생육상태 봄배추 시험전 표토의 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다. 양토와 사양토에 높은 유효인산 및 치환성 양이온 (칼륨, 칼슘) 농도를 보였으며, 미사질식양토에서 토양화학성은 유기물함량을 제외하고 전반적으로 낮은 수치를 보여 봄배추의 생육변화에 영향을 준 것으로 생각된다.

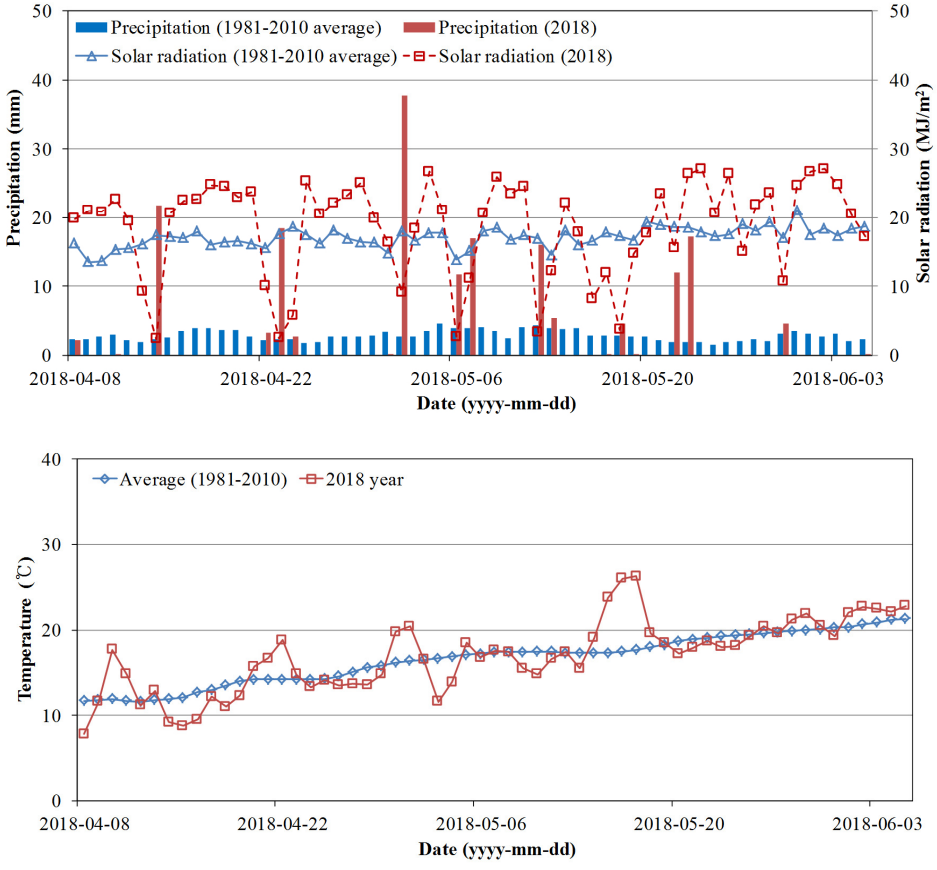

Fig. 2. Comparison of precipitation, solar radiation, and average temperature between normal (1981-2010) during Chinese cabbage cultivation from April 9 to June 4 in 2018.

봄배추 생육은 초장, 구폭, 엽색도 (SPAD), 생체중 등을 주기적으로 조사하였다 (Table 3). 봄배추 생육기간 중 양토에서 생체중, 엽면적 등 전반적으로 가장 좋은 생육을 보였으며, 사양토 > 미사질식양토 순으로 좋은 생육상태를 나타내었다. 특히 엽면적에서 양토가 사양토와 미사질식양토보다 약 40%, 37% 높게 나타나 증발산량 비교에서도 토성별로 차이가 발생할 것으로 생각된다.

Table 2. Soil chemical properties used in this study before transplanting.

Soil texture†	pH	EC‡	OM	T-N	Av.P_2O_5	Ex.Cation			
						K	Ca	Mg	Na
	1:5, H_2O	dS m^{-1}	---------- g kg^{-1} ----------		mg kg^{-1}	---------- $cmol_c$ kg^{-1} ----------			
SiCL	5.5	0.37	29.7	1.2	118.6	0.14	2.83	2.55	0.06
L	5.9	0.22	19.7	1.1	726.4	0.40	4.68	1.92	0.08
SL	6.3	0.25	17.1	1.0	932.7	0.32	4.81	2.26	0.06

†SiCL, L, and SL indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.
‡EC, electrical conductivity; OM, organic matter; T-N, total-nitrogen.

Table 3. Growth response for Chinese cabbage cultivation in spring season with different upland soils using weighable lysimeters from April 9 to June 4 in 2018.

Soil texture†	Date	Plant height	Plant diameter	Leaf color	Plant area	Plant weight
		cm	cm	SPAD value	cm^2	g
SiCL	May 2	16.7	33.5	-	-	45.4
	May 9	22.9	42.2	44.5	2982.1	216.4
	May 24	30.5	51.9	47.3	6174.2	611.8
L	May 2	18.9	36.6	-	-	45.5
	May 9	25.0	43.8	44.6	3248.8	271.4
	May 24	30.0	53.8	47.1	8642.2	920.6
SL	May 2	18.5	34.2	-	-	46.9
	May 9	23.6	40.8	46.8	3213.6	259.4
	May 24	26.5	51.0	48.1	6314.4	673.6

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

토성별 물수지 평가 중량식 라이시미터에서 봄배추 재배기간 동안에 밭토양 토성별 물수지를 산정하였다 (Table 4). 토성별 총유입량과 총유출량을 비교한 결과, 강수량과 관개량 등의 총유입량에는 뚜렷한 차이를 확인할 수 없으나, 총유출량 중에서 지하배수량과 증발산량에서 토성별 다른 경향을 보였다. 지하배수량은 미사질식양토, 양토, 사양토에서 각 78.5, 51.8, 78.4 mm로 양토에서 가장 적은 유출량을 보였으며 오히려 미사질식양토에서 많은 지하배수량을 보였다. 점토함량이 높은 식토의 논토양 조건에서 언급한 사양토와 식양토보다 지하투수량이 낮은 것 (Chae and Kim, 2001)과는 다소 상반된 결과이다. 이는 동절기를 지나면서 미사질식양토에서 수축 및 팽창의 반복으로 인하여 토양내에 균열이 발생하고 이로 인해 대공극이 많아짐에 따라 지하배수량이 많아진 것으로 판단된다 (Keith and Germann, 1982). 또한 채취한 양토의 깊이별 용적밀도가 다른 토성의 용적밀도보다 높아 양토에서 가장 적은 지하배수량을 나타낸 것으로 생각된다 (Table 1). 증발산량의 경우에는 미사질식양토, 양토, 사양토에서 각 205.7, 237.4,

218.9 mm로 나타나 양토 > 사양토 > 미사질식양토 순으로 높게 나타났다. 점토함량이 높은 토양이 상대적으로 수분보유력이 높아 (Han et al., 2008; Seo et al., 2017) 점토함량이 높은 미사질식양토에서 증발이 낮게 평가된 것으로 판단되며, 양토에서 가장 높은 증발산량을 보인 것은 봄배추의 생육조사에서 엽면적 및 생체중에서 가장 양호한 생육에 기인한 것으로 생각된다 (Table 3). 총유입량에서 총유출량을 감한 토양수분 변화량 (changes in soil water storage)은 토양별로 미사질식양토 (-72.7), 양토 (-76.5), 사양토 (-83.2)로 나타났으며 (Table 4), 상대적 수분보유력이 사양토가 낮음을 알 수 있다. Sang et al. (2017)의 연구에서 사양토의 수분 스트레스 지수가 식질토양에 비해 높은 것으로 보고된 바 있다.

봄배추 생육단계별 증발산량 평가 토성이 다른 라이시미터에서 봄배추 생육단계별로 누적증발산량을 비교하였다 (Fig. 3.). 식양토, 양토, 사양토에서 생육단계별 평균누적증발산량은 생육초기 (4월 9일-4월 25일)에 47.3, 59.1, 51.8 mm, 생육중기 (4월 26일-5월 25일)에 116.0, 134.2, 125.2 mm, 생육후기에는 42.4, 44.1, 41.9 mm로 나타

Table 4. The water balance for Chinese cabbage cultivation in spring season on different upland soils using weighable lysimeters from April 9 to June 4 in 2018.

Water use		Soil texture†		
		SiCL	L	SL
Input (mm)	Effective precipitation	175.5±3.1	175.4±2.5	175.7±0.9
	Irrigation	36.0±2.3	37.3±0.5	38.4±1.2
	Total	211.5	212.7	214.1
Output (mm)	Drainage	78.5±18.4	51.8±2.5	78.4±0.3
	Evapotranspiration	205.7±22.0	237.4±5.5	218.9±3.5
	Runoff	0	0	0
	Total	284.2	289.2	297.3
Changes in soil water storage		-72.7	-76.5	-83.2

†SiCL, L, and SL indicated silty clay loam, loam, and sandy loam in soil texture, respectively.
‡Data are means±standard deviation.

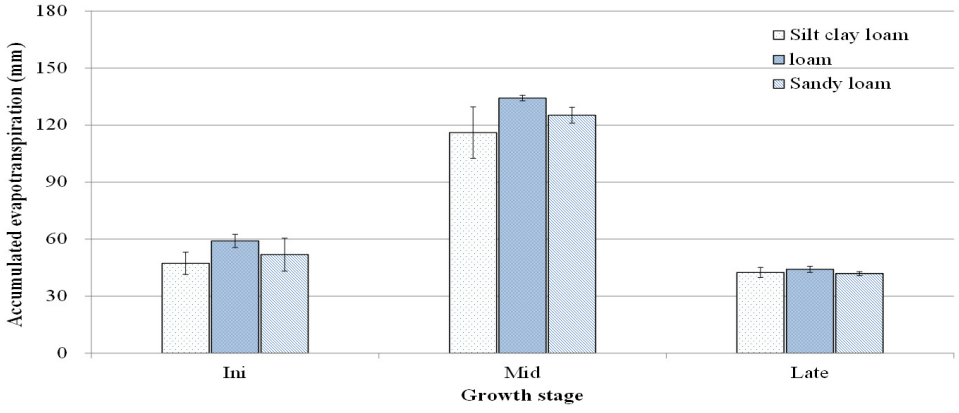

Fig. 3. Accumulated evapotranspiration at three growth stages (Ini: the initial stage, Mid: the mid-season stage, Late: late-season stage) depending on different upland soils during Chinese cabbage cultivation using weighable lysimeters from April 9 to June 4 in 2018.

났다. 생육초기와 중기에서 양토가 가장 높은 누적증발산량을 나타내었는데 이는 앞에서 언급한 봄배추의 양호한 생육상태와 넓은 엽면적에 기인한 것으로 판단된다. 생육후기에 토성별 누적증발산량의 유의적 차이는 확인할 수 없었다.

Conclusion

본 연구에서는 중량식 라이시미터를 활용하여 봄배추 재배기간 중 토성이 다른 밭토양에서 물수지를 비교하고 생육단계별 증발산량 변화를 평가하였다. 토성별 총유입량과 총유출량을 비교한 결과, 총유입량에는 뚜렷한 차이를 확인할 수 없으나, 지하배수량과 증발산량에서 토성별 다른 경향을 보였다. 점토함량은 지하배수와 증발산량에 영향을 주는 인자라 할 수 있다. 지하배수량의 경우, 다른 토성과 비교하여 깊이별 용적밀도가 높은 양토에서 가장 적은 유출량을 보이는 반면 식양토에서 많은 지하배수량을 보였다. 이는 동절기를 지나면서 식양토에서 수축과 팽창의 반복으로 인하여 토양내에 균열 발생과 함께 대공극으로 수분의 수직이동이 많아진 것으로 생각된다. 봄배추 생육단계별 증발산량 비교에서는 양토에서 가장 높은 값을 보였으며 이는 양토에서 봄배추의 엽면적 및 생체중 등 양호한 생육 상태의 결과에 기인한 것으로 생각된다. 중량식 라이시미터를 활용하여 실측한 데이터를 바탕으로 하여 토양내의 수분이동 및 토성별 물수지 평가를 정확하게 평가할 수 있었으며 향후 다년간의 데이터 축적을 통하여 밭작물 농업용수량 산정을 위한 국가계수 개발에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

Acknowledgement

This work was supported by the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01086702),” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations-Food and Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy.

Assouline, S. 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. Vadose Zone J. 5(2):697-705.

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.

Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resour. Res. 30(2):211-223.

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.

Han, K.H., H.M. Ro, H.J. Cho, L.Y. Kim, S.W. Hwang, H.R. Cho, and K.C. Song. 2008. Mobility of nitrate and phosphate through small lysimeter with three physico-chemically different soils. Korean J. Soil Sci. Fert. 41(4):260-266.

Hargreaves, G.H. and R.G. Allen. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. 129(1):53-63.

Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1(2):96-99.

Hillel, D. 1998. Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. Academic Press, California, USA.

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. Am. Soc. Civil Eng. New York.

Jung, Y.S., H.D. Sa, S. Kang, S.B. Oh, and J.S. Lee. 2015. Soil water characteristic curve using volumetric pressure plate extractor incorporated with TDR system. J. Korean Geotech. Soc. 31(8):17-28.

Keith, B. and P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res. 18(5):1311-1325.

Kim, S.N. 2003. Analysis of influence by soil water-characteristic curve and permeability-suction relationship for the water flow in unsaturated soil. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 3(2):119-125.

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.

NAAS. 2011. Soil and plant analyses. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.

NIAS. 2017. Fertilization standard on crops (3rd edition). National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea.

Ok, J.H, N.H. Doan, H. Watanabe, D.Q. Thuyet, and J. Boulange. 2012. Behavior of butachlor and pyrazosulfuron-ethyl in paddy water using micro paddy lysimeters under different temperature conditions in spring and summer. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 89:306-311.

Ok, J.H, S. Pisith, H. Watanabe, D.Q. Thuyet, J. Boulange, and K. Takagi. 2015. Effect of rice husk gasification residue application on herbicide behavior in micro paddy lysimeter. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 94:791-795.

Park, S.W., J.Y. Park, D.H. Tae, and Y.J. Sim. 2010. Effects of overburden pressure and clay content on water retention characteristics of unsaturated weathered soils. J. Korean Soc. Civ. Eng. 30(1C):53-63.

Sang, W.G., J.H. Kim, P. Shin, H.S. Cho, M.C. Seo, and G.H. Lee. 2017. A study on grain yield response and limitations of CERES-barley model according to soil types. Korean J. Soil Sci. Fert. 50(6):509-519.

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.

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.

Shin, E.C., H.J. Lee, and Y.I. Oh. 2004. Prediction of soil-water characteristic curve and unsaturated permeability coefficient of reclaimed ground. J. Korean Geotech. Soc. 20(1):109-120.

Vargas-Amelin, E. and P. Pindado. 2014. The challenge of climate change in Spain: Water resources, agriculture and land. J. Hydrol. 518:243-249.