Weighable Lysimeter Study for Water Balance Estimation of Chinese Cabbage in the Fall Season

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

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

*Corresponding author: gimdj@jbnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 26, 2019**Revised:** September 4, 2019**Accepted:** September 4, 2019

ORCID

Dong-Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5828-6732>

In this study, we estimated and compared the water balance and total water requirement for Chinese cabbage cultivation in the fall season using weighable lysimeters. The water balance of input and output were investigated according to by two different upland soils. In Chinese cabbage cultivation, the total input was different in precipitation and irrigation, and total output was different in evapotranspiration and drainage. The estimated total water requirement for Chinese cabbage cultivation in the fall season in 2017 and 2018 were lower as compared to that in normal years (1981 - 2010) because of large amount rainfall around transplanting in 2017 and several rainfall events in 2018. The total water requirements for normal years, 2017, and 2018 were 147.2 mm, 143.6 mm, and 135.5 mm, respectively, compared to the normal years, it decreased by 2% in 2017 and by 8% in 2018. The weighable lysimeter has provided a useful tool for the water balance and water requirement estimation of Chinese cabbage and could be developed for several crops in upland condition based on obtained data.

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

The water balance for Chinese cabbage cultivation in the fall season on different upland soils using weighable lysimeters in 2017 and 2018.

Water balance		Water management			
		NIR [†]		IR	
		SiCL [‡]	SL	SiCL	SL
2017 (Sep. 4. - Oct. 31.)					
Input (mm)	Effective precipitation	137.8	136.1	135.4	136.9
	Irrigation	13.7	13.9	61.1	60.4
	Total	151.5	150.0	196.5	197.3
Output (mm)	Drainage	36.7	7.9	56.0	58.6
	Evapotranspiration	196.1	203.3	202.2	224.4
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	232.8	211.2	258.2	283.0
Changes in soil water storage (mm)		-81.3	-61.2	-61.7	-85.7
2018 (Aug. 31. - Oct. 30.)					
Input (mm)	Effective precipitation	165.7	163.6	157.1	165.2
	Irrigation	4.4	4.6	4.5	4.5
	Total	170.1	168.2	161.6	169.7
Output (mm)	Drainage	58.9	3.6	65.3	14.0
	Evapotranspiration	208.5	210.4	185.7	177.9
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	267.4	214.0	251.0	191.9
Changes in soil water storage (mm)		-97.3	-45.8	-99.4	-22.2

[†] NIR, not irrigated after rooting stage; IR, irrigated by furrow irrigation.

[‡] SiCL and SL indicated silty clay loam and sandy loam in soil texture of surface soil, respectively.

Introduction

농산물 생산에 있어서 물은 필수 요소이다. 하지만 최근 기후변화의 영향으로 가뭄빈도와 강도의 증가, 온도상승 등에 따라 물부족이 심화되고 있으며 이에 따른 농업생산성 감소도 우려되고 있다 (Allen et al., 1998; Hanjra and Qureshi, 2010). 기후변화에 민감할 수 밖에 없는 농업 분야에서는 물부족에 대응하여 물절약 기술 개발, 물수지 산정, 농업용수량의 산정과 평가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Vargas-Amelin and Pindado, 2014; Ok et al., 2018). 발작물 재배에서 물수지 산정과 농업용수량 산정은 강수량, 온도, 일사량 등의 기상인자와 지하배수량, 증발산량, 유거수량 등 물수지 인자, 그리고 토양특성 인자 등을 함께 고려하여 평가해야 한다. 하지만 현장에서 이러한 여러 환경인자와 토양특성을 고려하여 물수지를 산정하는 것에는 현실적으로 한계가 있었다. 많은 연구들이 현장에서 직접 측정하거나 교란된 토양을 이용한 실내실험을 통하여 토양내의 수분이동과 물수지 산정하였으나 (Kim, 2003; Shin et al., 2004; Park et al., 2010), 최근에는 비교란 토양을 이용한 중량식 라이시미터를 활용하여 물수지를 정확하게 산정하는 연구가 증가하고 있다 (Meißner et al., 2010; Anapalli et al., 2016; Seo et al., 2016; Ok et al., 2018). 중량식 라이시미터는 장비운영과 시설관리 등에 대한 비용 부담은 있으나 정확도 및 신뢰도가 높아 물수지 산정 연구에 많이 활용되고 있으며, 비교란 상태의 토양은 토양수분의 수직이동 양상을 보다 자연상태와 가깝게 해석할 수 있다 (Seo et al., 2016; Ok et al., 2018). 중량식 라이시미터를 활용하여 동절기 사양토에서 온도와 경반층에 따른 토양수분이동 및 토성에 따른 토양수분함량 변화 (Seo et al., 2016), 콩 재배시 물관리 방법에 의한 물수지, 양분수지 및 양분의 작물흡수에 대한 연구 (Lee et al., 2017), 봄배추 재배시 발토양 토서이별 물수지 평가 (Ok et al., 2018) 등 중량식 라이시미터가 물수지 산정을 위한 유용한 도구임이 증명되었다. 따라서 본 연구에서는 발토양 중량식 라이시미터에서 가을배추 재배시 실측한 데이터를 분석하여 토양특성에 따라 물수지를 산정하고 비교 분석하였다.

Materials and Methods

중량식 라이시미터 개요 및 시험토양 특성 국립농업과학원 (전라북도 완주군)에 설치된 중량식 라이시미터 (UGT, Germany)는 표면적 1 m^2 , 깊이 1.5 m의 코어형 라이시미터이로서 토양은 식양질 (미사질식양토, silty clay loam), 사양질 (사양토, sandy loam)을 자연 상태 그대로 채취하여 비교란 토양으로 설치하였다. 중량식 라이시미터의 구성과 깊이별 토양 물리적 특성은 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 토성은 미국농무성의 토성삼각표 (soil texture triangle)에 따라 결정하였다. 각 라이시미터에는 층위별 (10, 30, 55, 85, 125 cm)로 토양수분센서 (UMP-1, UGT, Germany) 등이 설치되어 있으며, 중량변화를 측정할 수 있는 로드셀 (최소 10 g 감지)은 라이시미터 베셀 맨바닥에 설치되어 있어 물의 증감에 따른 무게 변화를 정밀하게 측정할 수 있다. 티핑카운터 (tipping counter)로 지하배수량을 측정하고, 측정된 데이터는 1시간단위 평균 데이터로 저장된다. 유거수량은 샘플링 박스 무게를 직접 측정하여 구하였다.

시험전 토양 화학성 분석 및 가을배추 정식 시험전 토양은 라이시미터 표토 15 cm 이내의 토양을 채취하여 유기물함량은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 $1.0\text{ M NH}_4\text{OAc}$ (pH 7.0)으로 추출하여 유도결합 플라즈마 분광광도계 (ICP-OES, GBC, Integra XL Dual, Australia)로 정량화하는 등 국립농업과학원의 토양 및 식물체 분석법에 준하여 실시하였다 (NAAS, 2011).

Fig. 1. Weighable lysimeter structure and vertical view. It has three 10 g-resolution load cells for measuring weight of lysimeter (a), has tipping counter, which counts the number of times for every 100 mL of drained water, for measuring a drainage amount (b), and has sensors for five layers (10, 30, 55, 85, and 125 cm depths) for measuring soil water content (c) (Seo et al., 2016; Ok et al., 2018).

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

Soil texture [†]	Soil depth (cm)	Bulk density (g cm ⁻³)	Particle size distribution (%)		
			Sand	Silt	Clay
Fine loamy (SiCL)	0 - 20	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
Coarse loamy (SL)	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 and SL indicated silty clay loam and sandy loam in soil texture of surface soil, respectively.

가을배추 (해파랑골드)는 2017년 8월 30일과 2018년 9월 4일에 정식하여 2017년 10월 31일과 2018년 10월 31일에 각각 수확하였다. pH 교정을 위하여 석회고토 (300 kg 10a⁻¹)를 정식 전에 투입하였으며, 비료는 작물별 비료사용처방 (NIAS, 2017)의 표준시비량을 기준으로 사용하였다. 관개는 정식후 약 2주간은 무관개 처리구와 적습관개 처리구에 같은 관수량으로 관개하였으며, 이후 적습관개 처리구는 강우 상황과 토양내의 수분장력값 (-30 kPa)을 기준으로 여 관개를 실시하였다.

가을배추 재배기간 중 기상 데이터 분석 기상데이터는 중량식 라이시미터 시설 인근에 설치된 기상장치를 활용하여 필요한 시간별 강수량, 온도, 일사량, 풍속 등의 데이터를 수집하였다. 또한 기상데이터 비교·분석을 위하여 평년 (1981 - 2010) 기상데이터는 라이시미터와 가장 가까운 지점인 전주기상대 데이터를 수집하여 활용하였다.

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

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

여기에서 ET_{LY} 는 증발산량 (mm day^{-1}), P 는 강수량 (mm day^{-1}), I 는 관개량 (mm day^{-1}), D 는 지하배수량 (mm day^{-1}), R 은 지표유출량 (mm day^{-1})이다. 또한 총유입량에서 총유출량을 감하여 토양수분 변화량 (changes in soil water storage)을 산출하였다.

Results and Discussion

가을배추 재배기간 동안 기상 특성 기상데이터는 중량식 라이시미터 인근에 설치된 기상대에서 수집된 자료와 전주기상대 평년 (1981 - 2010) 자료와 비교하였다 (Fig. 2). 가을배추 재배기간 동안의 월별 평균 온도는 전북 전주 지역의 평년과 2017년, 2018년 온도변화 경향은 유사하였다. 강수량의 경우에는 2017, 2018년 가을배추 재배기간 동안 누적 강수량은 120.0 mm와 157.7 mm로 나타났으며 평년대비 2017년 9월, 10월에 각 39%, 79%, 2018년 9월, 10월에는 각 52%, 117% 수준의 강수량을 보였다. 하지만 2017년은 가을배추 정식 직전에 많은 강우량이 발생하였으며, 2018년에는 여러 차례에 걸쳐 강우이벤트가 발생하여 강우 양상은 다르게 나타났다.

시험전 토양의 화학성 및 가을배추 생육상태 가을배추 시험전 토양의 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다. 2017년 시험전 토양에서 pH는 식양질 (미사질식양토)에서 다소 낮게 나타났으며 유기물함량과 총질소는 높게 나타났다. 반면, 유효인산과 칼륨은 사양질 (사양토)에서 높은 수치를 보였다. 2018년 시험전 토양에서는 식양질 (미사질식양토)에서 유기물함량이 다소 높고 유효인산이 낮은 것을 제외하면 토성간의 유의적인 차이는 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다.

가을배추 생육은 구고, 구폭, 건물중을 조사하였다 (Table 3). 2017 - 2018년 가을배추 적습관개구의 평균 수량은 식양질 (미사질식양토) 624, 사양질 (사양토) 517 $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ 이었고, 무관개구의 평균 수량은 식양질 (미사질식양토) 585, 사양질 (사양토) 532 $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 나타났다. 무관개구 대비 적습관개의 평균 수량은 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토) 각각 107%, 97% 수준이었다. 식양질 (미사질식양토)과 사양질 (사양토)에서는 관개방법에 따른 수량은 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 그 이유로는 가을배추 재배기간 동안에 강우 이벤트가 여러 차례 발생하여 관개처리가 없었기 때문이다.

Fig. 2. Comparison of average precipitation, temperature, and solar radiation between normal years (1981 - 2010) and Chinese cabbage cultivation in the fall season in 2017 and 2018.

Table 2. Soil chemical properties used in this study before transplanting in 2017 and 2018.

Soil texture [†]	pH	EC [‡]	OM	T-N	Av.P ₂ O ₅	Ex.Cation		
						K	Ca	Mg
	(1:5, H ₂ O)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(cmol _c kg ⁻¹)	
2017								
SiCL	5.2	0.3	33	1.5	128	0.14	2.8	2.3
SL	5.9	0.3	15	0.9	743	0.25	4.0	1.4
2018								
SiCL	6.0	0.5	29	1.3	127	0.69	4.4	2.4
SL	6.2	0.4	19	1.2	822	0.58	4.5	1.7

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

[‡]EC, electrical conductivity; OM, organic matter; T-N, total-nitrogen.

Table 3. Growth response for Chinese cabbage cultivation in the fall season with different upland soils using weighable lysimeters in 2017 and 2018.

Soil texture [†]	Water management	Plant height	Plant diameter	Plant weight
		(cm)	(cm)	(dry, kg 10a ⁻¹)
2017				
SiCL	Not irrigated after rooting stage	30.3 ± 2.1	61.3 ± 6.7	447
	Irrigated by furrow irrigation	30.5 ± 1.7	60.5 ± 3.7	591
SL	Not irrigated after rooting stage	33.3 ± 3.0	72.5 ± 9.5	605
	Irrigated by furrow irrigation	32.8 ± 2.2	78.0 ± 4.0	533
2018				
SiCL	Not irrigated after rooting stage	34.8 ± 3.2	59.8 ± 1.8	723
	Irrigated by furrow irrigation	33.4 ± 12.2	57.9 ± 3.4	657
SL	Not irrigated after rooting stage	29.8 ± 11.9	53.4 ± 3.6	459
	Irrigated by furrow irrigation	26.6 ± 15.0	55.4 ± 2.4	501

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

토성별 물수지 평가 중량식 라이시미터에서 가을배추 재배기간 동안에 발토양 토성별, 물관리 방법별로 물수지를 산정하고 비교하였다 (Table 4). 총유입량과 총유출량을 비교한 결과, 총유입량에서는 관개의 유무에 의하여 물유입량의 차이가 발생하였으며, 2017년에 유효강우량이 부족할 때 관개실시에 의하여 적습관개구에서 물유입량이 높게 산정되었다. 2018년에는 많은 양의 유효강우는 아니었지만 강우이벤트가 여러차례 발생하였으며 이에 따라 무관개구와 적습관개구간의 총유입량에는 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었다.

총유출량에서는 토성에 따른 지하유출량과 작물 생육에 따른 증발산량의 변화에 의하여 물유출량의 차이가 발생하였다. 2017년 토성별 지하유출량은 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 무관개구에서는 각 36.7, 7.9 mm로, 적습관개구에서는 각 56.0, 58.6 mm로 나타났으며, 무관개구에서는 식양질 (미사질식양토)에서 많은 지하유출량을 보였고 적습관개구에서는 토성간 유의적인 차이를 확인할 수 없었다. 2017년에 지하유출량의 대부분은 가을배추 생육초기에 발생하였는데 이는 가을배추 정식 직전 강우와 직후 1차례 발생한 많은 강우량의 영향으로 생각된다. 2018년 토성별 지하유출량은 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 무관개구에서는 각 58.9, 3.6 mm로, 적습

Table 4. The water balance for Chinese cabbage cultivation in the fall season on different upland soils using weighable lysimeters in 2017 and 2018.

Water balance		Water management			
		NIR [†]		IR	
		SiCL [‡]	SL	SiCL	SL
2017 (Sep. 4. - Oct. 31.)					
Input (mm)	Effective precipitation	137.8	136.1	135.4	136.9
	Irrigation	13.7	13.9	61.1	60.4
	Total	151.5	150.0	196.5	197.3
Output (mm)	Drainage	36.7	7.9	56.0	58.6
	Evapotranspiration	196.1	203.3	202.2	224.4
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	232.8	211.2	258.2	283.0
Changes in soil water storage (mm)		-81.3	-61.2	-61.7	-85.7
2018 (Aug. 31. - Oct. 30.)					
Input (mm)	Effective precipitation	165.7	163.6	157.1	165.2
	Irrigation	4.4	4.6	4.5	4.5
	Total	170.1	168.2	161.6	169.7
Output (mm)	Drainage	58.9	3.6	65.3	14.0
	Evapotranspiration	208.5	210.4	185.7	177.9
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	267.4	214.0	251.0	191.9
Changes in soil water storage (mm)		-97.3	-45.8	-99.4	-22.2

[†] NIR, not irrigated after rooting stage; IR, irrigated by furrow irrigation.

[‡] SiCL and SL indicated silty clay loam and sandy loam in soil texture of surface soil, respectively.

관개구에서는 각 65.3, 14.0 mm로 식양질 (미사질식양토)에서 가장 높은 지하유출량을 보였다. 2017년과 2018년 모두 식양질 (미사질식양토)에서 높은 지하유출량이 관측되었는데 이러한 경향은 일반적으로 점토함량이 높은 식토의 토양 조건에서 사양토보다 지하투수량이 낮은 결과 (Chae and Kim, 2001)와는 다소 상반된 결과로 이는 여러해 동절기를 지나면서 식양질 토양이 수축 및 팽창의 반복으로 인하여 토양내 대공극이 많아지고 균열 등이 발생한 것에 기인된 것으로 생각된다 (Keith and Germann, 1982; Ok et al., 2018).

증발산량의 경우, 2017년에 무관개구는 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 각각 196.1, 203.3 mm로 나타나 토성 간 차이가 크지 않았다. 적습관개구에서는 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 각각 202.2, 224.4 mm로서 사양질 (사양토)가 높게 나타났다. 2018년 증발산량의 경우, 무관개구는 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 각각 208.5, 210.4 mm로, 적습관개구에서는 식양질 (미사질식양토), 사양질 (사양토)에서 각각 185.7, 177.9 mm로 나타났다. Anapalli et al. (2016)의 연구에서는 옥수수의 엽면적과 바이오매스 생산량이 증가할수록 증발산량이 증가하는 것으로 보고되었으나, 본 연구에서는 배추의 생육 상태와 증발산량의 상관관계는 나타나지 않았다.

총유입량에서 총유출량을 감한 토양수분 변화량 (changes in soil water storage)은 2017년 무관개에서 미사질식양토 - 81.3 mm, 사양토 - 61.2 mm, 적습관개에서 미사질식양토 - 61.7 mm, 사양토 - 85.7 mm이었으며, 2018년 무관개에서 미사질식양토 - 97.3 mm, 사양토 - 45.8 mm, 적습관개에서 미사질식양토 - 99.4 mm, 사양토 - 22.2 mm이었다.

Table 5. Comparison of water requirement for Chinese cabbage cultivation in the fall season for normal years (1981 - 2010), 2017, and 2018.

Growth stage		Initial stage	Mid-season stage	End of late season stage	Total (mm)
Date (month/day)		9/10 - 9/20	9/21 - 10/25	10/26 - 11/10	
Crop coefficient		0.62	1.25	1.16	
Water requirement (mm)	1981 - 2010	19.3	99.2	28.7	147.2
	2017	18.5	93.0	32.2	143.6
	2018	20.9	84.4	30.2	135.5

미사질식양토에서 상대적으로 높은 지하유출량으로 인하여 토양수분 감소가 높게 나타났다 (Table 4). Sang et al. (2017)의 연구에서 사양토의 수분 스트레스 지수가 높은 것과 상반된 결과를 보였다.

가을배추 재배시 물 필요량 산정 비교 가을배추 재배기간 동안 물 필요량을 산정하고 평년 (1981 - 2010)과 비교하였다. 기준증발산량에 작물계수를 반영하여 산정하였으며 평년, 2017년, 2018년 기상데이터를 바탕으로 하여 생육단계별 물량과 총 물 필요량을 산정하였다 (Table 5). 총 물량은 평년, 2017, 2018년에 각 147.2, 143.6, 135.5 mm로 나타나 평년과 비교하여 2017년과 2018년 모두 다소 적은 물량이 산정되었다. 2017과 2018년의 강우 양상은 다르지만 충분한 강우량에 의하여 물 필요량이 적게 산정된 것으로 판단된다. 장기간 연구를 통해 기상 조건, 작물의 생육 조건 등과 물수지 및 물 필요량의 관계를 조사할 필요가 있다.

Conclusions

본 연구에서는 중량식 라이시미터를 활용하여 가을배추 재배시 물수지와 물 필요량을 산정하고 평년과 비교하였다. 가을배추 재배시 물수지 산정 결과, 총 유입량에서는 강우량과 관개 관리에 의하여 차이가 나타났으며 총 유출량에서는 지하유출량과 증발산량 변화에 의하여 차이가 나타났다. 지하유출량은 토성에 따라 다른 경향을 보였으며 증발산량은 작물 생육상태에 따라 다른 경향을 보였다. 가을배추의 물 필요량 산정 결과, 2017년과 2018년 연구기간 동안 총 물량은 평년과 비교하여 다소 적은 물 필요량이 산정되었는데 2017년은 정식시기의 많은 강우량, 2018년은 여러 차례의 강우이벤트 영향에 의한 것으로 판단된다. 중량식 라이시미터를 활용하여 실측한 데이터를 바탕으로 하여 가을배추의 물수지와 물 필요량을 정확하게 산정할 수 있었으며 향후 다년간의 데이터 축적을 통하여 가을배추 등 여러 밭작물의 물 필요량 산정에도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

Acknowledgement

This work was supported by the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01426203),” 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.* 99(5):601-607.
- 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., K.H. Han, Y.J. Lee, Y.S. Zhang, H.R. Cho, S.A. Hwang, S.S. Kim, J.H. Lee, and D.J. Kim. 2018. Water balance for Chinese cabbage in spring season with different upland soils evaluated using weighable lysimeters. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):555-563.
- 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.
- 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.