

중량식 라이시미터를 활용한 재배시기에 따른 조생종 벼의 물 필요량 평가

박민경* · 옥정훈**† · 김동현*** · 허승오**** · 황선아** · 오부영**

*국립농업과학원 토양비료과 석사후연구원, **국립농업과학원 토양비료과 연구사,
국립농업과학원 토양비료과 박사후연구원, *국립농업과학원 토양비료과 연구관

Evaluation of water requirements for early maturing rice on different cultivation period using weighable lysimeter

Park, Min-kyeong* · Ok, Jung-hun**† · Kim, Dong-hyun*** · Hur, Seung-oh**** ·
Hwang, Seon-ah** and Oh, Bu-Yeong**

*Post-Master's Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

**Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

***Post-Doctor's Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

****Senior Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

ABSTRACT

Water scarcity, which is exacerbated by climate change, poses significant challenges for agriculture, which accounts for more than half of global water consumption. This study investigated the water balance of early-maturing rice cultivation over three years using weighable lysimeters. Cultivation periods were classified as optimum season (OS) and late season (LS), and the analysis compared sandy loam and silty clay loam soils under continuous irrigation (maintaining a 5-cm water level). Water inflow and outflow were calculated based on changes in lysimeter weight. Sandy loam demonstrated higher water inflow and outflow compared to silty clay loam, mainly due to its faster infiltration rate and greater subsurface outflow under continuous irrigation. The OS cultivation period exhibited greater water inflow and outflow than LS, which was attributed to higher OS evapotranspiration rates. The crop coefficients for OS were 0.97, 1.21, 1.61, and 1.47 across growth stages, peaking mid-growth, while those for LS were 0.86, 1.29, 1.26, and 1.45, with the highest values appearing later in the growth cycle. Water requirements were calculated as 4.7 mm day⁻¹ for OS and 3.8 mm day⁻¹ for LS, with the highest demand recorded in 2020 due to increased solar radiation and rainfall. Overall, OS required more water than LS due to higher mean temperatures and cumulative radiation. These findings offer valuable data for water resource management and adaptive agricultural strategies to address climate-induced water scarcity.

Key words : Weighable Lysimeter, Water Balance, Crop Coefficient, Water Requirement

1. 서론

기후변화의 영향으로 우리나라는 40년간 전국적으로 연 평균기온, 최고기온, 최저기온이 상승하는 경향을 보이고 있으며 과거 30년(1912년 ~ 1941년) 대비 전국 평균 약 1.4℃ 상승한 것으로 나타났다(ME, 2020). 지구온난화에

따른 국지성 호우 및 가뭄은 우리나라에서도 발생하고 있는 재해로서 매년 피해 면적이 커지고 있으며 잦은 이상 기변에 따라 수자원 확보의 불확실성이 커지고 있다(Sung et al., 2017). 물은 모든 생물에 필수적인 요소이기도 하지만 수자원 이용률 중 절반 이상은 농업용수로 쓰이므로 농업에서의 물을 확보하는 것은 매우 중요하다. 또한, 농

†Corresponding author : okjh@korea.kr (NIAS, Nongsaengmyeong-ro 166, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Korea. Tel. +82-63-238-2433)

ORCID 박민경 0000-0002-4348-9112
옥정훈 0000-0002-5854-0179
김동현 0009-0001-4625-5223

허승오 0000-0001-5388-9657
황선아 0000-0003-1829-402X
오부영 0000-0002-4565-6869

Received: November 22, 2024 / Revised: January 24, 2025 1st, February 12, 2025 2nd / Accepted: March 18, 2025

업은 기후의 직접적인 영향을 받는 산업으로 기후변화에 따라 재배시기 및 기후지대별 작기 이동 변화가 발생하고 있으며(Jo et al., 2023; Lee and Kim, 2008) 작물별 적합한 생육조건이 충족되지 않을 경우, 생산성 및 품질이 떨어지게 된다(Hanjra and Qureshi, 2010; Kim et al., 2018; Ok et al., 2019).

벼는 속기에 따라 조생종, 중생종, 만생종으로 구분할 수 있고 그중에서 조생종은 생육시기가 짧은 종이다. 2010년부터 2019년까지 중만생종이 84.1%로 가장 많은 벼농사가 이루어지고 있으나, 최근 추석 전 출하를 위한 조기, 적기 및 만기재배와 같이 목적에 따라 이앙시기를 달리할 수 있는 조생종 벼 재배가 증가하고 있다. 조생종은 다른 종에 비해 재배기간이 단축되어 병해충 방제 문제를 줄일 수 있으며, 기존 중만생종 위주 재배에 따른 노동력 및 농작업 배분 문제 등을 해결할 수 있다(Lee et al., 2022; Nam et al., 2013, 2018; Park et al., 2020, 2021). 조생종 벼의 연구 경향은 대부분 품질개선과 관련된 품종 개발 연구가 수행되고 있으며 기상요소에 따른 물 필요량 연구는 부족한 실정이다. 그러나 벼는 담수상태로 재배되므로 물 요구도가 높고 기온과 강수량과 같은 기상조건에 민감하게 반응하는 작물이며 Djaman et al. (2018)과 Omaid et al. (2018) 등 여러 연구에서 미래의 기후를 분석하였을 때, 평균온도가 상승함에 따라 증발산량 증가로, 물 소비량이 증가할 것으로 보고하고 있어 기후변화에 따른 벼 작물의 적정 물 필요량 연구가 필요하다(An and Cho, 2010; Jo et al., 2023; Lee et al., 2012). 최근, 물 필요량을 파악하기 위한 도구로써 라이시미터가 활발히 활용되고 있다(Anapalli et al., 2016; Kim et al., 2019; Meißner et al., 2010; Meissner et al., 2010). 중량식 라이시미터는 라이시미터의 한 종류로 하단에 설치된 로드셀(Load cell)을 활용하여 실시간으로 무게 변화를 통해 작물 생장 및 토양의 수분 이동을 감지하는 시설이며, 무게 변화를 통해 물 유입량과 물 유출량을 측정하고 티핑카운터(Tipping Counter)를 통해 지하 유출량도 파악이 가능하여 물수지 산정에 용이한 도구이다. 일반적으로 라이시미터 연구는 교란된 토양에서 수행된 경우가 많지만(Kim and Lee, 2022; Oh and Koh, 2020; Seo et al., 2020) 토양이 교란될 경우, 토양수분 이동 양상에 영향을 미친다(Jung et al., 2015; Ok et al., 2018; Seo et al., 2017). 비교란 토양으로 충진되어 있는 비교란 중량식 라이시미터는 자연상태의 토양의 수분 이동과 유사하기 때문에 현장토양과 보다 높은 적응성과

정확성을 보인다(Ok et al., 2018; Seo et al., 2016, 2017). 토성을 달리하여 토양의 이화학적 특성 연구 및 논과 밭 토양에서의 작물계수, 물수지 분석 등이 수행되고 있으며(Kim et al., 2019, 2023; Ok et al., 2018; Tall and Pavelková, 2020), 센서를 활용한 토양수분 이동 특성 연구도 활발히 진행되고 있다(Seo et al., 2016). 또한, 증발산량을 직접 측정하는 도구로써 기준증발산량 및 식물의 증산량 산정 연구도 다수 수행되고 있다(Kim et al., 2018, 2019, 2020; Seo et al., 2020). 중량식 라이시미터는 작물의 생육에 필요한 물 소비량을 정량적으로 파악할 수 있어 수자원 공급 계획의 기초적인 연구 수행이 가능하고 시설의 정확성은 다양한 연구에서 증명되었다(Han and Seo, 2019; Liu et al., 2020). 따라서, 본 연구에서는 비교란 중량식 논토양 라이시미터에서 조생종 벼의 재배시기에 따른 물수지 분석 및 생육단계별 작물계수를 산정하여 물 필요량을 비교·평가하였다.

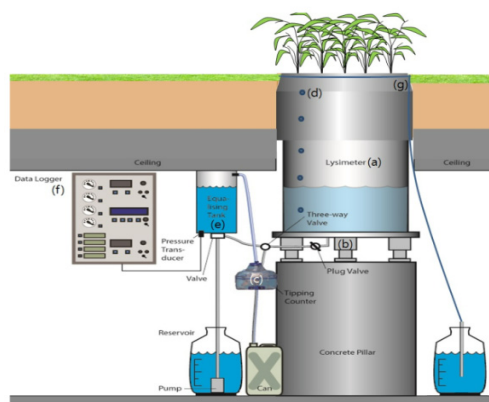
2. 연구 방법

2.1. 중량식 라이시미터 개요

본 연구는 전북특별자치도 완주군 국립농업과학원(National Institute of Agriculture Sciences, NIAS)에 위치한(위도 35°49'29", 경도 127°02'46") 중량식 논토양 라이시미터(UGT, Germany)에서 수행되었다. 중량식 라이시미터는 표면적 1 m², 깊이 1.5 m의 원통형 시설로, 코어 형태로 시료를 채취하여 비교란 상태의 논토양이 충진되어 있다(Fig. 1). 토양 시료 채취 및 작물 재배를 위해 표토(10 cm)는 교란되나, 심토는 비교란을 유지하여 실험을 수행하였다. 로드셀(Load cell)을 설치하여 무게변화를 통해 강수량과 관개량, 증발산량을 시간단위로 측정하며(Lee et al., 2017; Ok et al., 2018; Seo et al., 2016) 티핑카운터(Tipping Counter)로 지하유출량을 자동으로 기록하였다. 지표유거수는 60 L 실린더에 수집하여 직접 무게를 측정하며 산정하였다. 본 중량식 라이시미터는 Ok et al. (2018), Kim et al. (2023), An et al. (2023)의 연구에서 활용된 도구이다.

2.2. 연구 작물 및 처리 방법

연구작물은 조생종 벼(조평)로 연구기간은 2019년, 2020년, 2022년 3개년 동안 수행하였다. 적기와 만기재배로 재배시기를 구분하였고 적기재배는 각각 2019년 5월



(a) Weighting lysimeter



(b) Overview lysimeter

Fig. 1. Information of lysimeter station

31일부터 9월 4일, 2020년 5월 20일부터 9월 10일, 2022년 5월 23일부터 9월 7일이었으며, 만기재배는 2019년 7월 10일부터 10월 16일, 2020년 7월 10일부터 10월 14일, 2022년 7월 11일부터 10월 12일까지이다. 생육단계는 생육기간을 참고하여 달관조사를 통해 활착기~분얼기, 유수형성기, 출수기, 등숙기 4단계로 구분하였으며, 활착기~분얼기와 유수형성기는 최고분얼기를 기점으로 구분하였고, 유수형성기는 대략 30~40일 사이로, 시험포장의 60% 이상의 벼에 유수가 형성되는 시점, 출수기는 40% 이상이 나오는 시기까지로 하였다. 등숙기는 출수기 이후의 기간으로 정하였으며 등숙종료는 품종별 생육기간을 참고하였다.

작물별 표준재배법을 준용하여 재배하였고 양분은 비료사용처방의 표준시비량 기준(N:P:K = 11:4.5:5.7 kg 10a⁻¹, 목표수량 500 kg 10a⁻¹기준)에 준하여 시용하였다. 관개방법은 연속관개(답수위 5 cm 유지)로 하였으며 토성은 사양토(Sandy Loam, SL)와 미사질식양토(Silty Clay Loam, SiCL)를 사용하였다. 시험전 논토양의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었으며 토성은 비중계법(Gee and Baudé, 1986)에 따라 모래, 미사, 점토 비율을 산정하여 미국농무성의 토성삼각표(Soil texture triangle)에 따라 결정하였다. 용적밀도는 코아법(Blake and Hartge, 1986)에 따라 분석하였다.

Table 1. Physical properties by paddy soil depth of weighable lysimeter

Soil	Soil depth (cm)	Bulk density (Mg m ⁻³)	Particle size distribution (%)			Soil texture
			Sand	Silt	Clay	
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
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

2.3. 기상데이터 수집

기상데이터는 라이시미터 시설 인근에 설치한 기상대에서 전체 벼 재배기간 동안의 강수량과 풍속, 일사량 등의 기상자료를 시간단위로 수집하여 분석하였고, 평년(1991~2020)과 비교하기 위해 전주기상대를 기준으로 1991년부터 2020년 자료를 수집하여 활용하였다.

2.4. 물수지, 작물계수, 물 필요량 산정 방법

2.4.1. 물수지 산정

물수지는 Klammler and Fank (2014)가 제안한 방법으로 산정하였으며 산정식은 식 (1)과 같다.

$$ET = P + I - D - R \quad (1)$$

여기서, ET는 증발산량(Evapotranspiration, mm day⁻¹), P는 강수량(Precipitation, mm day⁻¹), I는 관개량(Irrigation, mm day⁻¹), D는 지하유출량(Drainage, mm day⁻¹), R은 지표유거량(Runoff, mm day⁻¹)이다.

2.4.2. 작물계수 산정

작물계수 산정은 작물의 실제 증발산량을 기준증발산량으로 나누어 다음과 같은 식 (2)로 계산하였으며 기준증발산량은 Penman-Monteith 식을 활용하여 산정하였다.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (2)$$

여기서, K_c는 작물계수, ET_c는 작물 증발산량(mm), ET₀는 기준증발산량(mm)이다.

2.4.3. 물 필요량 산정

물 필요량은 기준증발산량과 생육단계별 작물계수를 곱한 총합으로 산정되며 다음과 같은 식 (3)으로 계산하였다.

$$\text{물 필요량(mm)} = \sum [\text{일일 기준증발산량}(ET_0) \times \text{생육 단계별 작물계수}(K_c)] \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 연구기간 동안 기상 특성

연구기간 동안의 기상특성은 Fig. 2와 같다. 적기재배 기준 2019년의 평균온도, 총 강수량, 누적일사량은 각각 25.4℃, 365.9 mm, 1,537.3 MJ m⁻²였고 2020년은 24.0℃, 1,522.0 mm, 1,694.7 MJ m⁻², 2022년은 25.1℃, 691.2 mm, 1,217.8 MJ m⁻²였다. 만기재배 기준 2019년의 평균온도, 총 강수량, 누적일사량은 각각 25.3℃, 565.7 mm, 1,304.8 MJ m⁻²였고, 2020년은 23.1℃, 1,289.8 mm, 1,217.8 MJ m⁻², 2022년은 23.8℃, 536.1 mm, 1,243.6 MJ m⁻²였다. 평균온도는 만기재배보다 적기재배에서 0.1~1.3℃ 높았고 강수량은 2019년은 만기재배에서 약 200 mm 많고, 2020년과 2022년은 적기재배에서 각각 약 250, 150 mm 많았다. 누적일사량은 2019년과 2020년에 적기재배에서 각각 200, 400 MJ m⁻² 많았고 2022년은 뚜렷한 차이가 없었다.

생육단계로 구분하여 분석한 결과, 적기재배 기준 생육단계의 평균온도는 평년은 22.9, 26.2, 27.9, 26.0℃, 2019년은 22.9, 26.0, 29.8, 26.7℃, 2020년은 21.9, 23.6, 27.0, 26.4℃, 2022년은 22.4, 28.1, 26.1, 26.0℃로 2022년을 제외한 나머지 조건에서 출수기에 가장 높았다. 출수기는 7월 하순부터 8월 초순으로 온도가 높았으며 2022년은 다른 연도에 비해 6월 하순부터 7월 중순에 평균온도가 높아 유수형성기에 가장 높았다. 생육단계별 강수량의 경우, 평년은 202.7, 239.0, 71.7, 261.4 mm, 2019년은 76.2, 161.8, 4.7, 123.2 mm, 2020년은 193.0, 379.0, 195.0, 755.0 mm, 2022년은 189.6, 33.3, 94.7, 373.7 mm로 2022년을 제외한 나머지 연도에서 출수기에 가장 적고, 2022년은 유수형성기에 가장 적은 강수량을 보였다. 누적일사량을 분석한 결과, 평년은 621.7, 410.0, 138.0, 476.9 MJ m⁻², 2019년은 601.8, 349.6, 164.1, 421.8 MJ m⁻², 2020년은 846.4, 283.7, 81.6, 483.0 MJ m⁻², 2022년은 633.6, 247.6, 238.3, 499.0 MJ m⁻²를 보였다. 만기재배 기준 생육단계의 평균온도의 경우, 평년은 27.0, 25.5, 22.7, 18.8℃, 2019년은 27.8, 25.8, 25.9, 22.0℃, 2020년은 25.0, 28.3, 26.3, 19.1℃, 2022년은 27.3, 26.5, 22.9, 20.3℃로 나타났고, 강수량의 경우, 평년은 313.5, 204.6, 32.1, 96.8 mm, 2019년은 192.9, 108.3, 47.5, 277.1 mm, 2020년은 1,057.0, 30.5, 105.0, 97.3 mm, 2022년은 137.1, 261.6, 50.3, 87.1 mm를 보였다. 누적일사량을 분석한 결과, 평년은 621.7, 410.0, 138.0, 476.9 MJ m⁻², 2019년은 601.8,



Fig. 2. Comparison of average temperature and cumulative solar radiation, and precipitation between normal years (1991 ~ 2020) and 2019, 2020, 2022 year

349.6, 164.1, 421.8 MJ m⁻², 2020년은 846.4, 283.7, 81.6, 483.0 MJ m⁻², 2022년은 633.6, 247.6, 238.3, 499.0 MJ m⁻²을 보였다.

전주기상대를 기준으로 평년(1991 ~ 2020)과 비교하여 평균온도와 강우량, 누적일사량을 분석한 결과, 평균온도는 2019년 7월 중순부터 평년보다 높았으며, 2020년은 전반적으로 평년보다 낮은 평균온도를 보였다. 2022년은 평년과 유사하였으나 6월 중순 ~ 7월 중순과 9월 중순에 평년보다 다소 높았다. 누적일사량은 적기재배 기준 2019년, 2020년, 2022년 각각 93%, 86%, 66% 수준으로, 만기

재배 기준 각각 88%, 82%, 85% 수준으로 모두 평년보다 낮았다. 총 강우량은 적기재배에서 2019년, 2020년, 2022년 각각 평년대비 47%, 148%, 86% 수준, 만기재배에서 88%, 200%, 83% 수준으로 2019년과 2022년은 평년보다 적었고 2020년은 잦은 강우이벤트로 많은 강우량을 기록하였다.

3.2. 조생종 벼의 연도별 물수지 산정 결과

2019년, 2020년, 2022년의 3개년의 물수지 산정 결과는 Table 2에 나타내었다. 2019년은 적기재배와 만기재배

Table 2. Comparison of water balance on different paddy soil texture and cultivation periods

(Unit: mm)

Water balance		Soil Texture			
		SiCL [*]		SL ^{**}	
		Optimum	Late	Optimum	Late
2019					
Input (mm)	Effective precipitation	351.5	426.3	345.7	434.1
	Irrigation	335.8	174.1	526.3	458.0
	Total	687.3	600.4	872.0	892.1
Output (mm)	Drainage	91.7	77.6	352.1	552.1
	Evapotranspiration	594.5	538.1	551.7	444.1
	Runoff	27.1	0.0	0.0	0.0
	Total	713.3	615.7	903.8	996.2
Total water balance (mm) (Input - Output)		-26.0	-15.2	-31.8	-104.1
2020					
Input (mm)	Effective precipitation	592.3	365.6	593.7	382.0
	Irrigation	257.0	179.5	233.0	154.0
	Total	849.3	545.1	826.7	536.0
Output (mm)	Drainage	216.2	27.4	335.2	356.3
	Evapotranspiration	686.9	631.9	638.7	535.7
	Runoff	806.8	817.2	847.0	725.5
	Total	1,709.9	1,476.5	1,820.9	1,617.5
Total water balance (mm) (Input - Output)		-860.6	-931.4	-994.2	-1,081.5
2022					
Input (mm)	Effective precipitation	493.0	405.7	521.7	328.5
	Irrigation	398.5	89.0	538.4	405.9
	Total	891.5	494.7	1,060.1	734.4
Output (mm)	Drainage	122.8	34.7	329.5	344.7
	Evapotranspiration	654.8	491.9	637.5	481.4
	Runoff	167.0	138.5	96.0	92.6
	Total	944.6	665.1	1,063.0	918.7
Total water balance (mm) (Input - Output)		-53.1	-170.4	-2.9	-184.3

^{*}Silty Clay Loam, ^{**}Sandy Loam

모두 관개량과 지하유출량의 차이로 인해 미사질식양토보다 사양토에서 높은 물 유입량과 물 유출량을 나타내었다. 사양토는 미사질식양토보다 상대적으로 모래함량이 높으므로 지하로 투수되는 속도가 빨라 지하유출량이 많으며, Chae and Kim (2001)의 연구에서도 식양질 토양보다 사질 토양에서 지하유출량이 더 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서도 연속관개로 처리하여 지하유출량이 높을수록 관개량도 높다. 적기재배 물수지는 미사질식양토 -26.0 mm, 사양토 -31.8 mm, 만기재배 물수지는 미사질식양토 -15.2 mm, 사양토 -104.2 mm 값을 보였다. 2020

년은 토성에 따른 물 유입량과 물 유출량의 차이는 다소 적었으나, 재배시기에 따른 강우량과 관개량은 적기재배에서 높았다. 이에 따라 적기재배의 물 유입량이 높게 나타났다. 적기재배 물수지는 미사질식양토 -860.6 mm, 사양토 -994.2 mm, 만기재배 물수지는 미사질식양토 -931.4 mm, 사양토 -1,081.5 mm로 물 유입량보다 물 유출량이 컸으며 이는 7월과 8월에 여러 번의 강우로 인해 지표유거량이 높았기 때문이다. 2020년은 2019년과 2022년에 비해 강우량이 적기 및 만기 모두 2~3배 높은 값을 보인 연도로(적기-만기 평균 1,410.4 mm) 라이시미

터 베셀의 수위를 초과하여 지표로 유거되는 양이 많았다. 지표유거량을 제외하여 물수지를 산정하면 적기재배 기준으로 미사질식양토는 -53.8 mm, 사양토는 -147.2 mm, 만기재배 기준으로 미사질식양토 -114.2 mm, 사양토는 -356.0 mm으로 나타났다. 2022년은 2019년과 유사한 경향으로 적기재배와 만기재배 모두 관개량과 지하유출량의 차이로 인해 사양토에서 더 높은 물 유입량과 물 유출량을 나타내었다. 재배시기별 비교시, 적기재배에서 더 높은 물 유입량과 물 유출량을 나타냈다. 만기재배보다 적기재배에서 유효강우량이 다소 높았는데 이는 강우 이벤트가 발생한 시기에 담수위에 따른 차이에 의한 것으로 판단되며, 미사질식양토와 사양토의 유효강우량 차이도 이와 같은 이유인 것으로 판단된다. 적기재배 물수지는 미사질식양토 -53.1 mm, 사양토 -2.9 mm, 만기재배 물수지는 미사질식양토 -170.4 mm, 사양토 -184.4 mm로 나타났다. 3년동안 물 유입량보다 물 유출량이 높아 음의 물수지 값을 나타내었으며, 토성에서는 지하유출량의 차이로 미사질식양토보다 사양토에서, 재배시기는 2019년 미사질식양토를 제외하고 유효강우량이 적은 만기재배에서 음의 물수지 값이 높았다. 연도별로 비교하였을 때, 물수지 값의 차이는 강우량에 따른 차이로 유효강우량과 지하유출량 증감의 영향이 높았다.

3.3. 재배시기에 따른 생육단계별 작물계수 및 물 필요량 산정

재배시기에 따른 생육단계별 벼 작물계수를 Table 3에 나타내었다. 생육단계는 활착기~분얼기, 유수형성기, 출수기, 등숙기 4단계로 구분하였다. 적기재배 기준 작물계수는 0.97, 1.21, 1.61, 1.47, 만기재배 기준 0.86, 1.29, 1.26, 1.45로 산정되었다. 적기재배와 만기재배 모두 활착기~분얼기 단계에서 가장 낮은 작물계수를 보였고, 적기재배는 출수기에서 1.61, 만기재배는 등숙기에서 1.45로 높은 작물계수를 보였다. 작물계수는 기준증발산량과 실제증발산량의 비로 산정하므로 작물의 생육과 기상요소의 영향을 많이 받아 대부분의 작물계수는 초기에 낮고 후기로 갈수록 높은 작물계수를 보이는데 본 연구결과에서도 유사하게 나타났다. 4단계의 작물계수 범위는 적기재배 0.95~1.61 만기재배 0.87~1.45 범위로 나타났다. Yoo et al. (2006)은 Penman-Monteith (PM) 식과 FAO Modified Penman (FMP) 공식으로 이앙재배와 답수직파재배를 구분하여 전국 9개의 작물계수의 평균을 산정하였으며 이앙

재배-PM 0.78~1.58, 이앙재배-FMP는 0.65~1.35, 답수직파재배-PM 0.87~1.74, 답수직파재배-FMP 0.70~1.58의 범위를 제시하였다. 증발산량 평균 범위는 423.1~560.5 mm 범위며, 본 연구의 증발산량 범위는 444.1~686.9 mm로 본 연구에서 다소 높았으나, 작물계수는 유사한 범위로 나타났다. Tyagi et al. (2000)은 Penman-Monteith 기준 1.15, 1.23, 1.14, 1.02, FAO-Blaney and Criddle 기준 1.11, 1.19, 1.09, 0.97, FAO-56 기준 1.1-1.15, 1.1-1.6, 1.1-1.3, 0.95-1.05의 범위로 본 연구결과보다 생육초기에는 높고, 생육중·후기에는 낮은 값을 보였으며, 작물계수는 지역에 따라 차이가 발생한다고 보고하였다. Kumari et al. (2022)는 라이시미터를 활용하여 실제 증발산량, FAO Penman-Monteith와 Pan 계수를 활용하여 작물계수를 산정하여 상관분석 등을 수행하였으며 연구에서 제시한 실제 증발산량은 1.13 ± 0.13 , 1.27 ± 0.2 , 1.23 ± 0.16 , 0.93 ± 0.18 로 본 연구보다 생육초기에는 높고, 중·후기에는 다소 낮았지만, 엽면적 증가로 인한 생육중기에 최대, 생육후기에 식물 생장 감소 등으로 낮은 작물계수로 경향은 유사하였다. 연구에 따르면 작물계수가 높게 산정된 부분은 물이 정체되어 있기 때문이라고 보고하였는데, 연속관개로 물관리를 할 경우, 증발작용이 활발하므로 작물계수가 과대산정될 가능성이 있을 것으로 판단된다.

벼를 재배하기 위한 총 물 필요량을 산정한 결과, 적기재배는 평년 452.7 mm, 2019년, 2020년, 2022년은 각각 430.6, 615.2, 450.7 mm, 만기재배는 평년 370.4 mm, 2019년, 2020년, 2022년은 각각 335.1, 490.5, 306.2 mm로 산정되었다. 적기재배를 기준으로 평년과 비교하였을 때, 2022년은 유사하였고 2019년은 5% 적은 물 필요량을 보였고, 2020년은 36% 높은 물 필요량을 보였다. 벼 재배기간을 고려하기 위해 물 필요량을 재배기간으로 나누어 산정한 결과, 평년, 2019년, 2020년, 2022년의 1일 평균 물 필요량은 각각 4.7, 4.4, 5.4, 4.2 mm day⁻¹로 산정되었다. 평년 대비 2019년과 2022년은 물 필요량이 적었으며, 2020년은 가장 높은 값을 보였다. 2020년은 3개년 중 총 강우량이 많은 연도였으나 누적일사량 1,694.7 MJ m⁻²로 높아 물 필요량이 높았다. 생육단계별 물 필요량은 유사하였으나, 2019년 출수기에 7.8 mm day⁻¹로 상대적으로 높은 값을 보였다. 반면, 2022년은 평균 물 필요량이 가장 적었고 평년 대비 월별(5월~9월) 총 강우량은 적었지만, 평균온도는 낮고 누적일사량도 적어 가장 적은 물 필요량을 보였다. 연도의 생육단계별 물필요량은 출수기에 가장

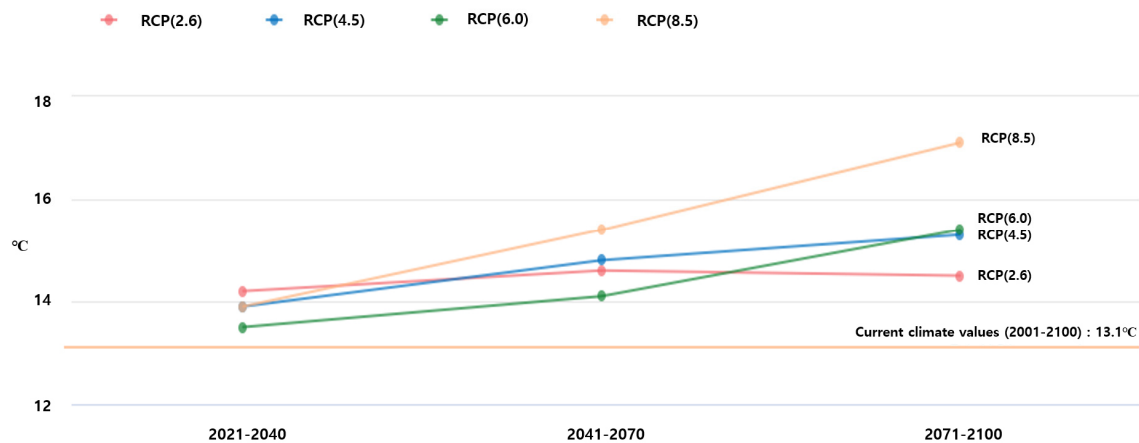


Fig. 3. Projected average temperature results according to KMA climate change scenarios based on RCP (Wanju-gun, Jeollabuk-do)

많았으며, 이는 기상 특성에 따라 상대적으로 높은 평균 온도와 적은 강우량에 의한 것으로 판단된다. 만기재배의 경우, 평년 대비 2019년은 11%, 2022년은 21%의 낮은 물 필요량을 나타내었고, 2020년은 평년보다 32% 높은 물 필요량을 나타내었다. 벼 재배기간을 고려하여 물 필요량을 산정한 결과, 평년, 2019년, 2020년, 2022년의 1일 평균 물 필요량은 3.8, 3.4, 5.1, 3.3 mm day⁻¹로 2020년이 가장 높았다. 이는 2020년에 유수형성기와 출수기에 일 물 필요량이 각각 6.6, 6.5 mm day⁻¹로 높았는데 유수형성기와 출수기 단계에서 다른 연도보다 평균온도가 높고, 강우량이 적었기 때문으로 판단된다. 재배시기별로 비교하였을 때, 물 필요량 및 1일 평균 물 필요량 모두 만기재배보다 적기재배에서 높았다. 물 필요량은 기상과 밀접하게 연관되어 있어 평균온도 및 적산온도와 같은 요소가 높을수록 물 필요량도 높아지는데, 적산온도 범위를 분석하면 적기재배 2,466.7 ~ 2,765.3°C, 만기재배 2,263.37 ~ 2,500.8°C 범위로 적기재배가 높기 때문에 더 많은 물이 필요하다.

기상청에서 제시한 기후변화 시나리오 결과, 전북특별자치도 완주군 기준 RCP 2.6은 평균온도가 상승을 보이다 2071년 이후로 하강하지만, RCP 4.5와 6.0, 8.5 모두 상승하는 경향을 보였으며 특히, 8.5는 가장 높은 증가율을 보였다(Fig. 3). 이를 바탕으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오를 적용하여 2019년-적기재배 기준으로 기준증발산량(Penman-Monteith)의 증가율을 분석하였을 때, 2071 ~ 2100년 기준증발산량이 각각 0.9, 1.4, 1.5, 2.6%로

RCP 8.5 시나리오에서 가장 높은 증가율을 보였다. 본 연구에서 활용한 작물계수와 기준증발산량을 곱하여 물 필요량을 산정한 결과, 2019년 대비 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 각각 1.0, 1.5, 1.5, 2.7% 증가율을 보였다. 이처럼 평균온도가 상승할 경우, 증발과 증산 작용이 더욱 활발해지며 작물의 물 필요량이 높아질 것으로 판단된다. Incoom et al. (2022) 연구에서도 가나지역의 미래 기후 분석을 수행하였는데, RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 토마토와 양파의 2020년, 2050년, 2080년의 증발산량 증가율을 분석한 결과, 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 특히 RCP 8.5 기준 2080년에 5 ~ 18%로 가장 높은 증가율을 보였다. 관개 요구량 또한 2080년에 가장 높았으며 RCP 8.5 기준 6 ~ 27%로 가장 높은 증가율을 보였다. 또한, Abraham and Mulunch (2025)의 연구에서 지역 기후 모델(RCM)을 활용하여 RCP 4.5 및 RCP 8.5를 적용한 결과, 2080년대 작물의 물 요구량이 2.5% 증가하는 것을 확인하였으며, 기후변화로 인해 생장 기간이 점진적으로 짧아질 것으로 보고하고 있다. 이처럼 여러 연구에서 기후변화 시나리오를 적용하였을 때, 증발산량 증가로 작물의 수분 요구량이 증가하고 있다고 보고하고 있어 농업에서 보다 많은 수자원 확보가 요구될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 증량식 라이시미터를 활용하여 적기 및 만기재배로 벼 재배시기를 구분하여 2019년, 2020년,

Table 3. Comparison of water requirement of rice for normal years (1991 ~ 2020), 2019, 2020, and 2022

			Stage of rice growth				Total (mm)
			Tillering	Panicle Formation	Heading	Ripening	
Optimum Season			05-31 ~ 07-03	07-04 ~ 07-28	07-29 ~ 08-05	08-06 ~ 09-04	
Date							
Crop coefficient			0.97	1.21	1.61	1.47	
Water requirement (average)	Normal years (1991 ~ 2020)	DAT*	1~34	35~59	60~67	68~97	97
		mm	128.8	114.2	52.6	157.1	452.7
		(mm day ⁻¹)	(3.8)	(4.6)	(6.6)	(5.2)	(4.7)
	2019	DAT	1~34	35~59	60~67	68~97	97
		mm	124.5	98.7	62.5	144.9	430.6
		(mm day ⁻¹)	(3.7)	(4.0)	(7.8)	(4.8)	(4.4)
	2020	DAT	1~45	46~70	71~77	78~115	115
		mm	168.8	135.4	46.3	264.8	615.2
		(mm day ⁻¹)	(3.8)	(5.4)	(6.5)	(5.2)	(5.4)
	2022	DAT	1~36	37~52	53~67	68~108	108
		mm	128.6	72.9	83.4	165.9	450.7
		(mm day ⁻¹)	(3.6)	(4.6)	(5.6)	(4.1)	(4.2)
Late Season			07-10 ~ 08-12	08-13 ~ 09-06	09-07 ~ 09-14	09-15 ~ 10-14	Total (mm)
Date							
Crop coefficient			0.86	1.29	1.26	1.45	
Water requirement (average)	Normal years (1991 ~ 2020)	DAT	1~34	35~59	60~67	68~99	99
		mm	114.2	110.8	52.6	157.1	370.4
		(mm day ⁻¹)	(3.4)	(4.4)	(3.7)	(3.6)	(3.7)
	2019	DAT	1~34	35~59	60~67	68~99	99
		mm	104.4	94.9	26.5	109.3	335.1
		(mm day ⁻¹)	(3.1)	(3.8)	(3.3)	(3.4)	(3.4)
	2020	DAT	1~34	35~49	50~57	58~97	97
		mm	132.9	98.9	51.9	206.8	490.5
		(mm day ⁻¹)	(3.9)	(6.6)	(6.5)	(5.2)	(5.1)
	2022	DAT	1~30	31~46	47~57	58~94	94
		mm	85.8	53.0	32.0	135.5	306.2
		(mm day ⁻¹)	(2.9)	(3.3)	(2.9)	(3.7)	(3.3)

*DAT: Day after transplanting

2022년의 조생종 벼의 물수지를 비교하였으며, 작물계수 및 물 필요량을 비교·평가하였다. 물수지는 관개량과 지하 유출량의 차이로 인하여 미사질식양토보다 사양토에서 높은 물 유입량과 물 유출량을 보였다. 이는 모래함량이 높은 사양토에서 미사질식양토보다 상대적으로 투수속도가 빠르므로 지하유출 발생량이 많으며 지하유출량이 높을수록 관개량도 높아지게 된다. 재배시기별로 비교하였을 때 만기재배보다 적기재배에서 높은 물 유입량과 물 유출량을 보였으며 이는 관개량과 증발산량이 적기재배

에 높았기 때문으로 판단된다. 작물계수는 4단계의 벼 생육단계로 나뉘어 산정한 결과, 적기재배 기준 0.97, 1.21, 1.61, 1.47로 나타났고 생육초기에 가장 낮고 생육중기에 가장 높았다. 만기재배는 0.86, 1.29, 1.26, 1.45로 적기재배와 달리 생육후기에 높은 작물계수를 보였다. 작물계수를 통해 평년 및 연도별 물 필요량을 산정한 결과, 적기재배는 평년 대비 2022년은 유사하였으며 2019년은 5% 적었고, 2020년은 36% 높은 물 필요량을 보였다. 재배기간을 고려하여 산정하였을 때, 평년, 2019년, 2020년, 2022

년의 1일 평균 물 필요량은 4.7, 4.4, 5.4, 4.2 mm day⁻¹로 평년대비 2020년에 5.4 mm day⁻¹로 가장 많았고, 2020년은 총강우량이 많은 연도였지만 누적일사량도 많았기 때문에 판단된다. 만기재배 기준 평년 대비 2019년은 11%, 2022년은 21% 적었지만 2020년은 32% 높은 물 필요량을 나타내었다. 벼 재배기간을 고려하여 물 필요량을 산정하였을 때 평년, 2019년, 2020년, 2022년의 1일 평균 물 필요량은 3.8, 3.4, 5.1, 3.3 mm day⁻¹로 적기재배와 동일하게 2020년이 가장 높았다. 2020년은 유수형성기와 출수기에 일 물 필요량이 높았는데 두 생육단계에서 다른 연도보다 평균온도가 높고, 강우량이 적었기 때문에 판단된다. 재배시기를 비교하였을 때, 만기재배보다 적기재배에서 물 필요량이 높았고, 이는 적기재배의 평균온도 및 적산온도 등이 만기재배보다 높았기 때문이다. 기상청에서 제공한 기후변화 시나리오로 미래 기후의 기준증발산량과 물 필요량을 산정하였을 때, 2019년 대비 2071~2100년 기준증발산량이 각각 0.9, 1.4, 1.5, 2.6% 증가율을 보였으며 물 필요량은 1.0, 1.5, 1.5, 2.7%로 RCP 8.5에서 높은 증가율을 보였다. 이처럼 평균온도가 상승할 경우, 증발과 증산 작용이 활발해지며 작물의 물 필요량이 높아질 것으로 판단된다. 증량식 라이시미터를 활용하여 물수지 요소별로 정밀하게 측정하여 물수지를 비교하였으며 생육단계별 작물계수를 산정하여 조생종 벼의 재배시기에 따른 물 필요량을 제시하였다. 기후변화의 대표적인 현상은 평균온도 상승이며 이로 인해 재배적지와 재배시기 변화 및 증발산량 등의 영향이 있으며 본 연구에서는 재배시기를 구분하여 평균온도와 강수량 등 기상요소와 벼의 물 필요량이 미치는 영향에 대해 분석하였다. 일반적인 재배방법인 적기재배에서 생육초기 단계부터 평균온도가 높은 만기재배보다 높은 물 필요량을 보이긴 하였으나, 생육단계별 분석시 평균온도가 높은 시기에 많은 물 필요량이 요구되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 도출된 결과는 벼 재배시기를 고려한 물관리 계획 및 농업용수 확보 등의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ014262012022)의 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

Reference

- Abraham T, Muluneh A. 2025. Quantifying impacts of future climate on the crop water requirement, growth period, and drought on the agricultural watershed, in Ethiopia. *Air Soil Water Res* 15. doi: 10.1177/11786221221135151
- An JB, Cho JW. 2010. Meteorological response against yield and yield component of rice in Chungnam and Daejeon area (in Korean with English abstract). *Korean J Agric Sci* 37(2): 177-189. doi: 10.7744/cnujas.2010.37.2.177
- An JH, Lee CW, Ok JH, Park HJ, Song YS, Lee YJ. 2023. Nutrient balance during crop (forage barley) cultivation in winter season: A weighing lysimeter study (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Agric* 42(3): 211-219. doi: 10.5338/KJEA.2023.42.3.25
- Anapalli SS, Ahuja LR, Gowda PH, Ma L, Marek G, Evett SR, Howell TA. 2016. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. *Agric Water Manag* 177: 274-283. doi: 10.1016/j.agwat.2016.08.009
- Blake GR, Hartge KH. 1986. Bulk density. In: Klute A (ed). *Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods*, 2nd edn. Madison, WI: American Society of Agronomy. p. 377-382. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14
- Chae JC, Kim SW. 2001. Effect of soil texture on rice growth and paddy soil percolation under lysimeter condition (in Korean with English abstract). *Korean J Crop Sci* 46: 236-240.
- Djaman K, O'Neill M, Owen CK, Smeal D, Koudahe K, West M, Allen S, Lombard K, Irmak S. 2018. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water* 10(4): 405. doi: 10.3390/w10040405
- Gee GW, Bauder JW. 1986. Particle-size analysis. In: Klute A (ed). *Method of soil analysis, part 1: Physical*

- and mineralogical methods, 2nd edn. Madison, WI: American Society of Agronomy. p. 383-411. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
- Han KH, Seo MJ. 2019. Tillage effect on evapotranspiration of three different paddy soils in spring season as tested by monolithic weighable lysimeters (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 52(2): 160-171. doi: 10.7745/KJSSF.2019.52.2.160
- Hanjra MA, Qureshi ME. 2010. Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy* 35(5): 365-377. doi: 10.1016/j.foodpol.2010.05.006
- Incoom ABM, Adjei KA, Odai SN, Akpoti K, Siabi EK. 2022. Impacts of climate change on crop and irrigation water requirement in the Savannah regions of Ghana. *J Water Clim Change* 13(9): 3338-3356. doi: 10.2166/wcc.2022.129
- Jo SR, Kim YS, Hur JN, Lee JL, Kim ES, Shim KM, Kang MG. 2023. Climatic yield potential changes under climate change over Korean Peninsula using 1-km high resolution SSP-RCP scenarios (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 25(4): 284-301. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.284
- Jung YS, Sa HD, Kang S, Oh SB, Lee JS. 2015. Soil water characteristic curve using volumetric pressure plate extractor incorporated with TDR system (in Korean with English abstract). *J Korean Geotech Soc* 31(8): 17-28. doi: 10.7843/kgs.2015.31.8.17
- Kim DH, Hur SO, Hwang SA, Oh BY, Park MK, Yang HS, Ok JH. 2023. Evaluation of water balance for winter crop (forage barley) using different upland soil weighable Lysimeters (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 56(4): 375-385. doi: 10.7745/KJSSF.2023.56.4.375
- Kim DJ, Han KH, Zhang YS, Cho HR, Hwang SA, Ok JH, Choi KS, Choi JS. 2018. Evaluation of Evapotranspiration in Different Paddy Soils Using Weighable Lysimeter Before Flooding Stage (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 51(4): 510-521. doi: 10.7745/KJSSF.2018.51.4.510
- Kim DJ, Han KH, Zhang YS, Cho HR, Hwang SA, Ok JH. 2019. Verification of reference evapotranspiration estimated by weighable lysimeters and its applicability (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 52(3): 284-296. doi: 10.7745/KJSSF.2019.52.3.284
- Kim DJ, Ok JH, Hur SO, Hwang SA. 2020. Effects of precipitation on soil water and evapotranspiration differently-textured paddy soils during non-cultivated period: A weighable lysimeter study (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 53(3): 309-322. doi: 10.7745/KJSSF.2020.53.3.309
- Kim YK, Lee BY. 2022. Observation of moisture fluctuations in the upper canopy and the ground surface of Deogyusan-flux (in Korean with English abstract). *J Environ Sci Int* 31(1): 43-50. doi: 10.5322/JESI.2022.31.1.43
- Klammler G, Fank J. 2014. Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Sci Total Environ* 499: 448-462. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.009
- Kumari A, Upadhyaya A, Jeet P, Al-Ansari N, Rajput J, Sundram PK, Saurabh K, Prakash V, Singh KA, Raman RK, et al. 2022. Estimation of actual evapotranspiration and crop coefficient of transplanted puddled rice using modified non-weighing paddy lysimeter. *Agronomy* 12(11): 2850. doi: 10.3390/agronomy12112850
- Lee SH, Kim SY. 2008. Impacts of climate change on highland agriculture over Taebak mountainous region (in Korean with English abstract). *Geogr J Korea* 42(4): 621-633
- Lee TG, Kim MS, Jeon SH, Jung HI, Ok JH. 2022. Nutrients runoff and rice growth by soil texture and transplanting time during early maturing rice cultivating (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 55(1): 38-47. doi: 10.7745/KJSSF.2022.55.1.038
- Lee TS, Choi JY, Yoo SH, Lee SH, Oh YJ. 2012. Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change (in Korean with English

- abstract). J Korean Soc Agric Eng 54(1): 47-54. doi: 10.5389/KSAE.2012.54.1.047
- Lee YJ, Han KH, Lee SB, Sung JK, Song YS, Lee DB. 2017. Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management (in Korean with English abstract). Korean J Environ Agric 36(3): 147-153. doi: 10.5338/KJEA.2017.36.3.30
- Liu C, Cui N, Gong D, Hu X, Feng Y. 2020. Evaluation of seasonal evapotranspiration of winter wheat in humid region of East China using large-weighted lysimeter and three models. J Hydrol 590: 125388. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125388
- ME (Ministry of Environment). 2020. Korean climate change assessment report.
- Meißner R, Prasad MNV, Du Laing G, Rinklebe J. 2010. Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. Curr Sci 99(5): 601-607.
- Meissner R, Rupp H, Seeger J, Ollesch G, Gee GW. 2010. A comparison of water flux measurements: Passive wick-samplers versus drainage lysimeters. Eur J Soil Sci 61(4): 609-621. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01255.x
- Nam JK, Ko JK, Kim KY, Kim BK, Kim WJ, Ha KY, Shin MS, Ko JC, Kang HJ, Park HS, et al. 2013. A new early-maturing rice with blast, bacterial blight, rice stripe virus resistant and high grain quality, 'Jopyeong' (in Korean with English abstract). Korean J Breed Sci 45(2): 177-182. doi: 10.9787/KJBS.2013.45.2.177
- Nam JK, Park HS, Kim KY, Kim BK, Cho YK, Ko JK, Baek MK, Kim JJ, Kim WJ, Shin WC, et al. 2018. Multiple disease resistant early maturing rice cultivar 'Joil' with high grain quality adaptable to early transplanting cultivation in the Southern Plain area (in Korean with English abstract). Korean J Breed Sci 50(3): 280-288. doi: 10.9787/KJBS.2018.50.3.280
- Oh SY, Koh SC. 2020. Growth and mineral content of southern-type garlic grown in volcanic and non-volcanic ash soils on Jeju island (in Korean with English abstract). Hortic Sci Technol 38(1): 56-65. doi: 10.7235/HORT.20200006
- Ok JH, Han KH, Lee YJ, Zhang YS, Cho HR, Hwang SA, Kim SS, Lee JH, Kim DJ. 2018. Water balance for chinese cabbage in spring season with different upland soils evaluated using weighable lysimeters (in Korean with English abstract). Korean J Soil Sci Fert 51(4): 555-563. doi: 10.7745/KJSSF.2018.51.4.555
- Ok JH, Han KH, Zhang YS, Cho HR, Hwang SA, Kim DJ. 2019. Weighable lysimeter study for water balance estimation of Chinese cabbage in the fall season (in Korean with English abstract). Korean J Soil Sci Fert 52(4): 325-333. doi: 10.7745/KJSSF.2019.52.4.325
- Omaid N, Golam R, Abid H, David M, Sharhriar W, Bijan D. 2018. Low water productivity for rice in Bihar, India - A critical analysis. Water 10(8): 1082. doi: 10.3390/w10081082
- Park HS, Baek MK, Lee CM, Kim SM, Suh JP, Jeong OY, Cho YC. 2021. Characterization of quality-related traits and pasting properties of early maturing rice varieties by cultivation times in the Honam plain, Korea (in Korean with English abstract). Korean J Breed Sci 53(1): 1-15. doi: 10.9787/KJBS.2021.53.1.1
- Park HS, Suh JP, Baek MK, Lee CM, Kim WJ, Lee GM, Kim SM, Kim CS, Cho YC. 2020. Characterization of yield and panicle-related traits of early maturing rice varieties by cultivation times in the Honam plain area of Korea (in Korean with English abstract). Korean J Breed Sci 52(2): 115-130. doi: 10.9787/KJBS.2020.52.2.115
- Seo MJ, Han KH, Cho HR, Ok JH, Zhang YS, Seo YH, Jung KH, Lee HS, Kim GS. 2017. Interpreting in situ soil water characteristics curve under different paddy soil types using undisturbed lysimeter with soil sensor (in Korean with English abstract). Korean J Soil Sci Fert 50(5): 336-344. doi: 10.7745/KJSSF.2017.50.5.336
- Seo MJ, Han KH, Jung KH, Cho HR, Zhang YS, Choi SY. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter

- with paddy sandy loam soil during winter season (in Korean with English abstract). Korean J Soil Sci Fert 49(4): 300-309. doi: 10.7745/KJSSF.2016.49.4.300
- Seo YJ, Kim KS, Kim DC, Nam HH, Kim JH, Lee BY. 2020. Lysimetric analysis for transpiration and carbon accumulation of *Cnidium officinale* Makino in hot weather conditions (in Korean with English abstract). Korean J Med Crop Sci 28(6): 463-470. doi: 10.7783/KJMCS.2020.28.6.463
- Sung JH, Chae KS, Kim DE. 2017. The effects of droughts and public investment in irrigation facilities on rice yields in Korea (in Korean with English abstract). Korean J Agric For Meteorol 19(4): 209-303. doi: 10.5532/KJAFM.2017.19.4.293
- Tall A, Pavelková D. 2020. Results of water balance measurements in a sandy and silty-loam soil profile using lysimeters. J Water Land Dev 45(4-5): 179-184. doi: 10.24425/jwld.2020.133492
- Tyagi NK, Sharma DK, Luthra SK. 2000. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. Agric Water Manag 45(1): 41-54. doi: 10.1016/S0378-3774(99)00071-2
- Yoo SH, Choi JY, Jang MW. 2006. Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman method (in Korean with English abstract). J Korean Soc Agric Eng 48(1): 13-23.