Water Use Efficiency of Soybean, Sorghum, Sesame with Different Groundwater Levels Using Lysimeter

Dong Hyun Kim, Jin Young Choi, Soon Hong Kwon, Jung Duck So¹, Soon Goo Kwon, Ki Yeol Chung², Sang Hun Lee², and Jong Soon Kim*

Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

¹Department of Manufacturing and Design Engineering, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea

²Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea

*Corresponding author: jongsoon-kim@pusan.ac.kr

ABSTRACT

Received: April 20, 2018

Revised: November 21, 2018

Accepted: November 28, 2018

In South Korea, the area of agricultural land has steadily decreased and the overall food self-sufficiency rates have consistently dropped with a decrease in farm population since 2000. This study aimed to evaluate water requirements of crops soybean, sorghum, and sesame using lysimeter. Using the lysimeter with different groundwater levels, 20 cm and 40 cm, and different types of soils, sandy loam and clay loam, the evapotranspiration for crops was measured to determine the water requirement and the water use efficiency. The results showed that the maximum evapotranspiration of soybean and sesame was at the blooming stage, and that of sorghum was at the panicle formation stage. In water use efficiency, the optimal soil texture (groundwater level) for soybean was clay loam (40 cm), for sorghum was sandy loam (20 cm), and for sesame was sandy loam (40 cm). The water requirement of soybean and sesame was lowest at sandy loam (40 cm), while sorghum had the lowest at sandy loam (20 cm). The 100-kernel weight of soybean was found to be higher under the groundwater level 40 cm than 20 cm regardless of soil types, and 1,000-kernel weight of sorghum and sesame was found to be the highest under the sandy loam (40 cm). In consideration of these results, sandy loam (40 cm) was more suitable for cultivating soybean and sesame, and so was sandy loam (20 cm) for sorghum. The results of this study are expected to provide useful data for the development of an irrigation system which is possible to set the groundwater level as desired.

Keywords: Water Requirement, Lysimeter, Soybean, Sorghum, Sesame

Evapotranspiration of soybean and precipitation at sandy loam.

Introduction

농경지는 농작물을 파종, 재배, 수확하는 경작 가능한 토지이며 생산기반임과 동시에 예로부터 중요한 삶의 터전이다. 그러나 2000년대에 들어서 우리나라의 농경지 면적은 지속적으로 감소하고 있으며 또한 도시화 및 공업화로 과거에 비해 우리나라 총인구는 증가한 반면 농가인구는 계속적으로 감소하고 있어 우리나라의 식량자급률을 악화시키고 있다. 따라서 국내생산량으로는 수요를 감당할 수 없어 수입에 의한 식량 의존도가 높은 편이다. 2013년 기준 경제협력개발기구 (OECD) 34개 회원국 중에서 우리나라의 곡물 자급률은 32위로 최하위에 해당한다. 자급률이 100%를 넘는 쌀을 제외하면 특히 주요 발작물인 보리는 전체 소비량의 19.9%, 밀 0.5%, 옥수수 1.0%, 콩 9.7%만 우리나라에서 생산되고 있어 수입에 의존해야하는 실정이다 (MAFRA, 2017).

농경지의 비율을 살펴보면 우리나라의 경우 논 면적이 밭 면적보다 넓으나 농경지의 면적은 2010년 대비 2017년 전체 94.5 천 ha가 줄었다. 논 면적은 119.3 천 ha가 줄었으나 밭 면적은 오히려 24.8 천 ha가 늘었다 (MAFRA, 2017). 논 면적 감소 원인은 논발전환, 공공시설, 건물건축, 유흥지 순이며 밭 면적의 증가사유로는 논발전환, 개간, 복구 순이다. 이를 보면 논을 밭으로 전용 및 사용하여 발작물의 자급률을 상승시키고 수익성 또한 높일 수 있다 (Hyun et al., 2012).

논을 전용하여 발작물을 재배 시 배수의 불량, 토양물리성, 도복 발생이 증가하여 논에서의 수확량이 밭에 비해 낮다 (Seo et al., 2012). 그중 가장 큰 문제점은 토양의 과습으로 인한 산소공급의 부족이다 (Lee and Ku, 1995). 특히 장마철의 경우 질소 영양면에서 악조건에 처해 수량감소를 초래할 수 있다 (Lee et al., 2011). 논 토양은 대부분 수분을 많이 머금고 있는 점질로서 수직배수가 잘되지 않기 때문에 논에서 발작물의 재배 시 습해가 수량을 좌우할 수 있다. 밭의 경우 초기에 흡습하고 있는 수분의 양이 논에 비해 작기 때문에 과습의 경우 논에서 그 피해가 더 크다고 볼 수 있다 (Griffin and Saxton, 1988).

토양의 과습으로 인한 문제점 외에도 우리나라는 기상여건상 발작물 재배 시 파종기 및 종실 비대기에 만성적인 한발 피해가 크다. 그로 인해 농작물의 피해, 하천수의 감소, 지하수 및 토양의 수분 고갈을 야기하기 때문에 한발에 의한 감수피해 경감을 위한 기술과 안정적 발작물 생산을 위한 토양 정밀 종합관리 및 자동화 시스템 개발이 요구된다 (Condon et al., 2004).

수분은 작물의 반 이상을 구성하고, 광합성과 호흡 등 대사활동에 필요한 원료이다. 작물은 수분을 통해 토양내 양분을 흡수 및 이동시킨다. 따라서 토양수분은 작물의 생육에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다 (Kim et al., 2011). 대표적인 발작물인 콩, 수수, 참깨는 토양수분 변동이 심한 환경에서 생육하기 때문에 증발산량, 이수량, 광합성, 기타 관련 형질에 따라 영향을 받는다 (Lee et al., 1999). Jung et al. (2011)의 연구에서 배수가 불량한 농경지에 토양이 과습할 경우 작물은 수분과잉에 인해 수분 스트레스가 증가하고 수량의 변화차이가 크다고 보고되었다. 이러한 연구를 통하여 논에서 발작물의 안정적인 생산을 위해서는 토양수분이 중요하다고 밝혀졌으며, Kim et al. (2008)의 연구에서는 지하수위 (0, 25, 50, 75, 100 cm)에 따른 수분 이용효율 특성을 연구하였다. 하지만 사양질과 식양질에서의 수분 이용효율 특성을 비교하는 연구는 되어 있지 않다.

본 연구의 목적은 라이시미터를 이용하여 사양질, 식양질 두가지 토양조건에서 지하수위를 조절하여 주요 발작물인 콩, 수수, 참깨의 증발산량을 측정하고 생육시기별 이수량, 수분 이용효율을 산정하는데 있다. 이 연구결과는 수분의 변화로 인한 발작물의 생장 및 생육환경에 미치는 영향을 추정하고 안정적인 생산을 위한 생육 단계별 필요 수량을 예측하는데 좋은 자료가 될 것이다.

Materials and Methods

시험 작물 시험 작물은 콩, 수수, 참깨를 선택하였으며 토양의 성질과 지하수위를 달리하여 증발산량을 산정하였다. 품종은 콩은 대원콩, 수수는 남풍찰, 참깨는 건백으로 하였다.

대원콩은 양질 다수성이면서 장류용 콩으로 가공적성이 높으며 도복과 콩 모자이크병에 강하고 제주 및 산간 고랭지를 제외한 전국에서 적응성 있는 품종이다. 따라서 이번 연구에 적합한 품종으로 선택하였다 (RDA).

남풍찰은 키가 작고 줄기가 굵어 쓰러짐에 강하며 이삭 형태가 뭉쳐있지 않아 이삭곰팡이병으로 피해를 입을 위험이 낮다. 고온에 잘 적응하여 넓은 범위의 기후조건에서 재배가 가능하며 콩과작물, 유지작물, 옥수수보다 물이용 효율이 높아 마름견딜성 (내건성)이 강하다. 또한 배수가 잘 되는 찰흙 토양에서 잘 자라지만 사양토에서 식양토에 이르기까지 넓은 범위의 다양한 흙에서도 잘 자라기 때문에 이번 연구에 적합한 품종으로 선택하였다 (RDA).

건백은 일반 참깨보다 지방이 50.2%, 리그난이 6.52 mg/g 더 높다. 또한 키가 크지만 쓰러짐에 강하고 생육후기에 많이 발생하는 역병과 도복에 강한 품종이다. 강원도를 제외한 전국 각지에서 재배하며 토양적응성이 높아 여러 가지 토양에 비교적 잘 자라기 때문에 이번 연구에 적합한 품종으로 선택하였다 (RDA).

세 작물 모두 2017년 6월 5일에 파종하여 콩, 수수, 참깨는 각각 2017년 10월 27일, 2017년 10월 11일, 2017년 9월 18일에 수확하였다.

토양 시험토양은 점토 성분이 많아 점착력과 보수력이 큰 식양질과 모래 성분이 많아 배수가 좋은 사양토로 하였다. 시험 토양의 이화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 시험 전 토양의 수분을 포화시킨 다음 자연배수를 하여 토양의 용적밀도가 균일하게 되도록 하였다. 라이시미터를 이용한 수분 공급을 제외하고 추가적인 수분 공급을 막기 위하여 유리온실에서 재배하였으며, 유리온실의 측면을 개방하여 온도와 습도는 외부 조건과 같게 하였다.

라이시미터 라이시미터는 증발산량을 측정하기 위하여 만들어진 현장 실험장치로 통제된 조건하에 토양으로부터 유출되는 물량을 측정할 수 있다. 본 연구에 사용된 라이시미터는 가로 2 m, 세로 2 m, 높이 2 m로 Fig. 1과 같이 수분 공급구를 통해 수분공급을 할 수 있게 제작하였으며 지하수위 센서와 유량센서를 이용하여 지하수위를 조절하였다. 지하수위 깊이는 20 cm, 40 cm 2가지 조건으로 처리하였으며, 지하수위 센서를 사용하여 지하수위가 낮아지면 수분을 공급하였다.

증발산량 및 강수량 증발산량은 지면에서 대기로 증발되는 증발량과 식물의 잎에서 대기로 증산되는 증산량의 합이다. 토양이 포화상태일 때 최대가 되고 기온에 크게 좌우되며 본 연구에서는 증발산량을 구하기 위하여 투입되는

Table 1. Physio-chemical properties of soil.

Soil texture	PH	EC	T-N	O.M.	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			Particle size distribution		
						K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
	(1:5)	dS m ⁻¹	%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----			----- (%) -----		
Clay loam	6.85	0.71	0.27	25.9	248.1	1.34	21.03	6.04	33.2	31.4	35.4
Sandy loam	6.44	0.43	0.27	26.5	264.8	1.75	14.91	4.5	61.5	30.5	8.0

물의 양을 유량센서를 사용하여 매 30분마다 측정하였다. 또한 강수량은 농촌진흥청 농업기상정보서비스의 데이터를 이용하였다.

수분 이용효율과 요수량 작물 수확 후 측정된 각 작물의 지상부 건물중과 라이시미터에서 측정한 증발산량으로부터 수분 이용효율 (Water use efficiency)을 평가하였다 (Eq. 1). 또한 수확 후 수량과 건물중을 조사하여 작물의 건물 1g을 생산하는데 소비된 수분량 (g)을 의미하는 요수량을 구하였다 (Eq. 2). 수분 이용효율과 요수량의 계산식은 아래와 같다.

$$\text{수분 이용효율 (Water use efficiency)} = [\text{건물중 (g)} / \text{총 증발산량 (mL)}] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{요수량 (water requirement)} = [\text{총 증발산량 (g)} / \text{건물중 (g)}] \quad (\text{Eq. 2})$$

생육단계 생육단계별 증발산량을 구하기 위하여 콩과 참깨는 생육단계를 유묘·신장기, 개화기, 성숙기로 나누었으며 수수는 유묘기, 신장기, 유수형성기, 출수기, 등숙기로 나누었다 (Fig. 2). 유묘기는 종자가 발아하여 이엽기를 지나 본엽이 2-4엽 정도 출현하는 시기이다. 이후 신장기에 주로 키가 자라고 유수형성기에는 이삭이 3-5 cm 정도 자라

Fig. 1. Lysimeter used in this study.

Fig. 2. Growth stages of soybean, sorghum, and sesame.

꽃밥 속에 생식 세포가 나타나며 출수기에 이삭이 나오고 꽃이 피는 개화기를 지나 성숙기 이후 수확한다.

콩은 파종 후 55일까지 유묘·신장기, 56일부터 91일까지 개화기, 92일부터 144일까지 성숙기로 나누었다. 수수는 파종 후 30일까지 유묘기, 31일부터 52일까지 신장기, 53일부터 86일까지 유수형성기, 86일부터 106일까지 출수기, 107일부터 131일까지 등숙기로 나누었으며 참깨는 파종 후 51일까지 유묘·신장기, 52일부터 90일까지 개화기, 91일부터 107일까지 등숙기로 나누어 생육 단계별 증발산량과 증발량을 산정하였다.

데이터 분석 (통계처리) 실험 데이터는 Origin (OriginLab, Northampton, MA)를 이용하여 통계처리하였다. 데이터 평균값의 비교는 일원배치 분산분석법 (one-way ANOVA)을 사용하였고, 평균간의 상호 비교는 Tukey 검정을 이용하였다.

Results and Discussion

콩의 증발산량 및 수분 이용효율 사양질과 식양질에서의 증발산량 및 강수량을 각각 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다. 대기의 증기압이 식물과 토양표면에서의 증기압보다 낮을 때 증발산이 일어나므로 대기의 상대습도가 높을 수록 증발산량이 작다. 그 결과 강수량이 많은 날의 경우 증발산량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 작물의 생육단계 별 평균 증발산량을 도식화하여 Fig. 5에 나타내었다. 두 토양 조건에서 증발산량은 유묘·신장기에 증가하다 개화기에 최대값이 되며, 성숙기에 다시 감소하는 경향을 보였다.

사양질에서 증발산량은 지하수위 20 cm 처리가 40 cm 처리보다 유묘·신장기와 개화기에 대부분 컸으며 성숙기로 갈수록 비슷한 경향을 보였다. 20 cm 처리에서는 지하수위와 토양 표면과의 수리 구배가 커서 수분의 이동이 40 cm 처리보다 활발히 일어난다. 하지만 성숙기에는 작물의 수분 이동이 적어서 큰 차이가 나지 않는다 (Lee et al., 2017). 식양질에서의 증발산량은 생육단계에 관계없이 20 cm 처리와 40 cm 처리가 비슷한 값으로 나타났다 ($P>0.05$). 식양질의 경우 배수가 원활하지 않아 토양의 과습으로 증발산량이 지하수위에 관계없이 비슷하게 측정됨으로 판단된다.

사양질과 식양질에서의 생육단계 별 증발산량과 수분 이용효율을 Table 2에 나타내었다. 지하수위에 따른 증발산

Fig. 3. Evapotranspiration of soybean and precipitation at sandy loam.

Fig. 4. Evapotranspiration of soybean and precipitation at clay loam.

Fig. 5. Evapotranspiration of soybean at different crop growth stage.

량의 차이가 크게 없는 식양질에 비해 사양질의 지하수위 20 cm 처리에서 증발산량은 40 cm 처리 일 때의 약 1.67배 높게 나타나고 있다. 하지만 건물중은 식양질 40 cm 처리에서 가장 크다. 건물을 생산하기 위한 토양의 증발과 식물의 증산 등을 포함한 물 요구량인 수분 이용효율 또한 식양질 40 cm 처리에서 가장 크게 나타나고 있다. 식양질 20 cm 처리에서는 습해에 의해 수분 이용효율이 가장 낮다. 사양질의 경우는 모래 성분이 많아 작물의 생육에 좋지 않다. 하지만 식양질에는 점토 입자를 많이 포함하고 있어서 수분과 양분이 오래 보존된다. 따라서 식양질 40 cm 처리가 콩의 재배 조건으로 적합해 보인다.

콩의 요수량 산정 사양질과 식양질에서의 생육단계 별 요수량을 Table 3에 나타내었다. 요수량은 작물의 건물 1 g을 생산하는 데 소비된 수분량 (g)으로 콩의 경우 유묘·신장기에 가장 작고 개화기와 성숙기로 갈수록 증가하였으며 사양질에서보다 식양질에서 높게 나왔다. 두 토양조건에서 사양질의 경우 지하수위 20 cm 처리가 지하수위 40 cm 처리보다 약 1.62배, 식양질의 경우 1.89배로 지하수위 20 cm 처리가 지하수위 40 cm 처리보다 총 요수량이 더 크게

측정되었다. 요수량이 높을수록 한발에 대한 저항성이 약하기 때문에 콩 재배 시, 요수량이 가장 낮은 사양질의 지하수위 40 cm 처리 조건에서 한발에 대한 저항성이 강하다고 추정할 수 있다 (Kang, 2012).

지하수위별 콩의 생육조사 콩의 생육조사 결과를 Table 4에 나타내었다. 콩은 사양질에서보다 식양질에서 생육이 활발한 것으로 보이며 특히, 경장과 착엽고가 크게 나타났다. 남알 100개의 총 무게인 백립중의 경우, 지하수위 40 cm 처리에서 재배된 콩의 백립중이 지하수위 20 cm 처리보다 사양질의 경우 5.01 g, 식양질의 경우 8.08 g 만큼 더 크게 나타났다. 이는 지하수위 10 cm 처리와 20 cm에서는 과습 피해로 인해 생육이 떨어졌으며, 지하수위 30 cm 이

Table 2. Evapotranspiration and water use efficiency of soybean at sandy loam and clay loam.

	Growth stage	Sandy Loam		Clay Loam	
		20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Evapotranspiration (mm day ⁻¹)	Seeding·Elongation stage	5.70b	4.28a	5.00ab	5.17ab
	Blooming stage	7.90c	3.24a	6.93bc	5.56b
	Ripening period	2.96a	2.18a	2.53a	2.87a
Dry weight (g)		504.6c	427.9d	314.3a	682.2b
Water use efficiency (g mL ⁻¹)		0.081b	0.115c	0.058a	0.131d

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Table 3. Water requirement of soybean at sandy loam and clay loam.

	Growth stage	Sandy Loam		Clay Loam	
		20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Water requirement (g g ⁻¹)	Seeding·Elongation stage	396.80c	244.61a	486.24d	256.81b
	Blooming stage	408.48c	251.80a	500.54d	264.37b
	Ripening period	606.88b	394.10a	743.67c	392.77a
Total Water requirement (g g ⁻¹)		1412.16c	870.51a	1730.45d	913.95b

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Table 4. Growth parameters of soybean at sandy loam and clay loam.

	Sandy Loam		Clay Loam	
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Stem length (cm)	57.23ab	55.05a	61.45b	61.45b
Height of the first pod (cm)	10.51a	6.10a	15.05b	15.05b
Width of the first pod (cm)	53.33ab	52.70a	58.65b	58.65b
Stem diameter (mm)	9.42b	8.14a	9.69b	9.69b
Number of branches (ea)	5.50a	5.90a	5.95a	5.95a
Number of pod (ea)	129.78a	105.95a	105.65a	105.65a
100-kernel weight (g)	24.984b	29.989c	22.157a	30.238c

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

상에서는 비슷한 생육을 나타냈다는 Kim et al. (2003)의 보고와 유사한 경향으로 보인다.

수수의 증발산량 및 수분 이용효율 사양질과 식양질에서의 증발산량 및 강수량을 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었으며, 생육단계 별 평균 증발산량을 도식화하여 Fig. 8에 나타내었다. 두 토양 조건에서 증발산량은 유묘기에서 신장기로 갈수록 증가하다 유수형성기에 최대값이 되며, 출수기와 등숙기를 지나며 다시 감소하는 경향을 보였다. 수수의 증발산량의 경우도 콩과 동일하게 강수량이 많은 날의 경우 증발산량이 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

사양질과 식양질에서의 생육단계 별 증발산량과 수분 이용효율을 Table 5에 나타내었다. 수수의 경우 두 토양조건에서의 증발산량은 대부분의 생육단계에서 지하수위 20 cm 처리가 40 cm 처리보다 높게 나타났다. 지하수위 20 cm 처리에서 증발산량은 40 cm 처리에 비해 사양질은 약 1.44배, 식양질은 약 1.66배 높게 나타나고 있다. 수분 이용효율의 경우 식양질보다 사양질에서 더 높게 나타났으며 지하수위 40 cm 처리보다 20 cm 처리에서 사양질은 약 1.9배, 식양질은 약 1.9배 높게 나타났다. 사양질 20 cm 처리에서 가장 높게 나타났는데, 이는 수수 (남풍찰)가 높은 수분 이용

Fig. 6. Evapotranspiration of sorghum and precipitation at clay loam.

Fig. 7. Evapotranspiration of sorghum and precipitation at sandy loam.

Fig. 8. Evapotranspiration of sorghum at different crop growth stage.

Table 5. Evapotranspiration and water use efficiency of sorghum at sandy loam and clay loam.

Growth stage		Sandy Loam		Clay Loam	
		20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Evapotranspiration (mm day ⁻¹)	Seeding stage	2.08bc	1.27a	2.46c	1.38ab
	Elongation stage	3.03b	2.44ab	4.29c	2.10a
	Panicle formation stage	4.44bc	3.65ab	5.19c	3.05a
	Heading stage	3.95b	4.38b	3.74ab	2.54a
	Ripening stage	2.20a	1.85a	2.05a	1.53a
Dry weight (g)		355.1d	163b	216.8c	95.5a
Water use efficiency (g mL ⁻¹)		0.099c	0.052b	0.054b	0.039a

[†] Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

효율과 다양한 토양조건에서 잘 자라는 특징을 가지고 있어 과습조건에 강하기 때문에, 토양수분이 충분한 20 cm 처리에서 건물중이 높게 나타난 것으로 판단된다.

수수의 요수량 산정 사양질과 식양질에서의 생육단계 별 요수량을 Table 6에 나타내었다. 요수량의 경우 유묘기에서 신장기로 갈수록 증가하고 유수형성기에 가장 높은 값을 보이며 출수기와 등숙기로 갈수록 감소한다. 요수량은 사양질에서보다 식양질에서 높게 나왔으며 두 토양조건에서 지하수위 40 cm 처리가 지하수위 20 cm 처리보다 생육단계별 요수량이 더 크게 측정되었다. 그에 따라 총 요수량의 경우도 지하수위 40 cm 처리가 지하수위 20 cm 처리에서보다 더 높았다. 총 요수량이 가장 낮은 조건은 사양질의 지하수위 20 cm 처리였으며 가장 높은 조건은 식양질의 지하수위 40 cm 처리이다. 시험조건 중 사양질의 지하수위 20 cm 처리 조건이 수수가 자라기 좋은 조건임을 추정할 수 있다.

지하수위별 수수의 생육조사 수수의 생육조사 결과를 Table 7에 나타내었다. 수수의 생육조사 결과 사양질에

Table 6. Water requirement of sorghum at sandy loam and clay loam.

Growth stage	Sandy Loam		Clay Loam	
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Seeding stage	100.65a	130.40b	126.16b	172.14c
Elongation stage	301.95a	391.18c	378.50b	516.43d
Panicle formation stage	474.50a	614.71c	594.77b	811.53d
Heading stage	287.57a	372.55c	360.47b	491.83d
Ripening stage	316.33a	409.81b	396.52b	541.02c
Total Water requirement (g g ⁻¹)	1481a	1918.65b	1856.42c	2532.95d

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Table 7. Growth parameters of sorghum at sandy loam and clay loam.

	Sandy Loam		Clay Loam	
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Stem length (cm)	84.0a	83.3a	80.3a	81.2a
Ear length (cm)	28.5a	27.9a	28.9a	29.3a
Stem diameter (mm)	26.2b	24.8b	22.1a	24.9b
1000-kernel weight (g)	27.9ab	28.2b	27.0ab	26.3a

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

서 낱알 1,000개의 총 무게인 천립중은 식양질보다 조금 높게 나타났으나 큰 차이는 보이지 않았다 ($P>0.05$). 경장, 수장과 경태의 경우도 지하수위에 관계없이 거의 비슷한 값을 보였다. 이에 따라 수수의 경우 지하수위의 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이 또한 수수 (남풍찰)가 높은 물이용 효율과 다양한 토양조건에서 잘 자라기 때문인 것으로 판단된다.

참깨의 증발산량 및 수분 이용효율 사양질과 식양질에서의 증발산량 및 강수량을 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었으며, 각 토양 및 지하수위 조건에 따른 평균 증발산량을 도식화하여 Fig. 11에 나타내었다. 참깨의 증발산량은 콩과 동일하게 두 토양 조건에서 유묘·신장기에 증가하다 개화기에 최댓값이 되며, 성숙기에 다시 감소하는 경향을 보였으며 강수량이 많은 날에 증발산량이 줄어드는 모습을 보였다.

사양질에서 증발산량은 생육단계에 관계없이 지하수위 20 cm 처리가 40 cm 처리보다 대부분 높은 값을 보였으며, 식양질에서 증발산량은 대부분 지하수위에 관계없이 비슷한 값으로 나타났으나 개화기 후반에 지하수위 40 cm 처리가 20 cm 처리보다 높은 값을 보였다. 또한 8월 중순 증발산량이 낮아진 이유는 장마의 영향으로 추정된다.

사양질과 식양질에서의 생육단계 별 증발산량과 수분 이용효율을 Table 8에 나타내었다. 유묘·신장기와 등숙기에서는 큰 차이를 보이지 않지만, 개화기에서는 식양질의 증발산량이 사양질보다 약 1.2배 높은 것으로 나타났다. 수분 이용효율은 사양질의 지하수위 40 cm 조건에서 가장 높게 나타났다. 특히, 지하수위 40 cm 조건에서 사양질의 수분 이용효율은 식양질의 약 1.5배 정도 높은 것으로 나타났으나, 지하수위 20 cm 처리에서 식양질의 수분 이용효율은 사양질의 약 1.7배 정도 높은 것으로 나타났다. 수분 이용효율은 사양질에서 지하수위 40 cm 처리일 때 가장 높았으며

Fig. 9. Evapotranspiration of sesame and precipitation at sandy loam.

Fig. 10. Evapotranspiration of sesame and precipitation at clay loam.

Fig. 11. Evapotranspiration of sesame at different crop growth stage.

사양질에서 지하수위 20 cm 처리일 때 가장 낮았다. 참깨는 과습을 받을 경우 수량 감소가 커진다는 Jeon et al. (2017)의 연구결과와 유사하게 과습조건인 지하수위 20 cm 처리의 참깨의 수량이 감소하여 지하수위 20 cm 처리에서 수분 이용효율이 낮게 나타난 것으로 보인다.

참깨의 요수량 산정 사양질과 식양질에서의 생육단계 별 요수량을 Table 9에 나타내었다. 요수량의 경우 다른 작물과 동일하게 유묘·신장기에서 증가하고 개화기에 가장 높은 값을 보이며 성숙기로 갈수록 감소한다. 요수량은 사양질의 경우 지하수위 20 cm 처리, 식양질의 경우 지하수위 40 cm 처리에서 더 크게 측정되었다.

총 요수량이 가장 높은 사양질의 지하수위 20 cm 처리 조건의 경우 수분 이용효율이 가장 낮았다. 이와 반대로 총 요수량이 가장 낮은 사양질의 지하수위 40 cm 처리조건에서 수분 이용효율이 가장 높게 측정되었다. 이에 따라 수분 이용효율이 높은 성장 환경이 작물이 자라는데 필요한 요수량이 작아 작물이 자라기 좋은 조건임을 추정할 수 있다.

지하수위별 참깨의 생육조사 참깨의 생육조사 결과를 Table 10에 나타내었다. 참깨의 생육조사 결과 사양질 토양의 경우 지하수위 20 cm 처리와 40 cm 처리는 거의 차이가 없었으나 40 cm 처리에서 천립중이 더 크게 나타났다. 이는 지하수위가 높아질수록 생장량이 감소되었던 Kim et al. (2008)의 실험과 유사한 경향을 보였다. 식양질 토양의 경우 사양질보다 지하수위의 영향이 더 크게 나타났다. 지하수위 20 cm 처리에서 재배된 참깨는 지하수위 40 cm 처리에서의 참깨보다 경태, 초삭절수, 주당삭수가 큰 값을 보이고 있다. 천립중은 사양질의 지하수위 40 cm 처리에서 가장 크고 식양질의 지하수위 40 cm 처리에서 가장 작게 측정되었다.

Table 8. Evapotranspiration and water use efficiency of sesame at sandy loam and clay loam.

Growth stage		Sandy Loam		Clay Loam	
		20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Evapotranspiration (mm day ⁻¹)	Seeding·Elongation stage	3.12b	3.03b	3.16b	2.27a
	Blooming stage	5.42ab	4.77a	6.62c	6.15bc
	Ripening period	4.07a	3.87a	4.03a	4.00a
Dry weight (g)		69.4a	137.7c	134.5c	87.1b
Water use efficiency (g mL ⁻¹)		0.019a	0.042d	0.033c	0.024b

[†] Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Table 9. Water requirement of sesame at sandy loam and clay loam.

Growth stage		Sandy Loam		Clay Loam	
		20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Water requirement (g g ⁻¹)	Seeding·Elongation stage	1763.05d	813.01a	1003b	1416.22c
	Blooming stage	2392.72d	1103.38a	1361.20b	1922.01c
	Ripening period	1007.46d	464.58a	573.14b	809.27c
Total Water requirement (g g ⁻¹)		5163.23d	2380.97a	2937.34b	4147.50c

[†] Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Table 10. Growth parameters of sesame at sandy loam and clay loam.

	Sandy Loam		Clay Loam	
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Stem length (cm)	165.9b	186.7ab	183.2a	184.1ab
Stem diameter (mm)	13.8ab	13.6ab	14.0a	12.1b
Nodes of first flower cluster set	4.3ab	4.5ab	3.9b	6.0a
Height of the first ovary (cm)	26.4a	41.1a	27.6a	43.1a
Ovary length (mm)	27.4a	28.7a	29.4a	27.7a
Ovary width (mm)	8.5ab	8.2a	8.5ab	8.0b
Capsule number (ea)	126.8ab	118.1ab	131.9a	90.9b
1000-kernel weight (g)	2.873ab	3.016c	3.0bc	2.858a

[†]Means by the same letter within a row are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

Conclusions

발작물 생산성 향상을 위한 자동 물관리 기반기술 개발에 활용하기 위해 라이시미터를 이용하여 사양질과 식양질 두 가지의 토양과 지하수위를 20 cm 처리와 40 cm 처리로 변화를 주어 주요 발작물인 콩, 수수와 참깨의 증발산량 및 수분 이용효율, 생육단계별 요수량을 산정하고 생육을 조사하였다.

콩과 참깨의 경우 증발산량은 유묘·신장기에서 점차 증가하다 개화기에 가장 높은 값이 되었으며 성숙기에 다시 감소하는 경향을 보였으며 수수의 경우 증발산량은 유묘기에서 신장기로 갈수록 증가하다 유수형성기에 최댓값이 되며, 출수기와 등숙기를 지나며 다시 감소하는 경향을 보였다.

관개된 수분 중 식물이 흡수하여 증발산에 이용한 수분의 비율인 수분 이용효율의 경우 콩은 식양질의 지하수위 40 cm 처리 (0.115), 수수는 사양질의 지하수위 20 cm 처리 (0.099), 참깨는 사양질의 지하수위 40 cm 처리 (0.042)에서 가장 높았다.

건물 1g을 생산하는데 필요한 수분량인 요수량의 경우 콩은 사양질의 지하수위 40 cm 처리 (871), 수수는 사양질의 지하수위 20 cm 처리 (1481), 참깨는 사양질의 지하수위 40 cm 처리 (2381)에서 요수량이 가장 낮은 값으로 나타났다. 요수량이 작은 조건에서 작물은 건조한 토양과 한발에 대한 저항성이 강하기 때문에 콩과 수수, 참깨는 식양질보다 사양질에서 저항성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

콩의 백립중은 지하수위 20 cm 처리에서 사양질의 경우 24.90 g, 식양질은 22.16 g, 지하수위 40 cm 처리에서 사양질은 29.99 g, 식양질은 30.24 g로 측정되었으며 토양에 관계없이 지하수위 20 cm 처리보다 40 cm 처리에서 더 높게 나타났다. 수수와 참깨의 천립중은 사양질의 지하수위 40 cm 처리에서 각각 28.20 g과 3.01 g으로 가장 높게 측정되었다.

증발산량, 수분 이용효율, 요수량, 백립중 및 천립중을 고려해 봤을 때, 사양질이 식양질보다 콩과 수수, 참깨의 재배에 적합하였으며, 콩과 참깨는 지하수위 40 cm 처리, 수수는 지하수위 20 cm 처리가 작물을 재배하는데 적합하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 토양과 지하수위, 증발산량, 수분 이용효율, 요수량의 관계에 대하여 알 수 있었으며 이번 연구의 결과가 안정적인 생산과 생산량을 극대화 할 수 있는 최적화 모델을 개발하고 배수 및 관수 기능을 겸비하고 자유로운 지하수위 설정이 가능한 농지 범용화 기반 기술 개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 어젠다 사업 (과제번호: PJ01228705)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Condon, A.G., R.A. Richards, G.J. Rebetzke, and G.D. Farquhar. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55(407):2447-2460.
- Griffin, J.L. and A.M. Saxton. 1988. Response of solid seeded soybean to flood irrigation. II. Flood duration. *Agron. J.* 80:885-888.
- Hyun, B.K., Y.K. Soon, C.W. Park, K.C. Song, H.C. Chun, S.Y. Hong, Y.H. Moon, D.C. Noh, and S.Y. Jung. 2012. Study on soil survey results of rapid change in land use. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 45(4):475-483.
- Jeon, H.J., W.Y. Han, and Y.N. Yoon. 2017. Analyses of sesame epidemic occurrence in paddy field and selection of protective system to epidemic occurrence. *Annual Research Report of National Institute of Crop Science*. pp. 429-491.
- Jung, K.Y., E.S. Yun, C.Y. Park, J.B. Hwang, Y.D. Choi, and K.D. Park. 2011. Stress day index to predict soybean yield response by subsurface drainage in poorly drained sloping paddy fields. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44(5):702-708.
- Kang, B. 2012. Korea's plant resources used as medicine and foods. Korean Studies Information (KSI) Publishing.
- 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.
- Kim, B.K., J.S. Shim, J.H. Hwan, H.J. Jeong, and S.D. Hong. 2008. Efficiency of water use for sorghum, beans, and sesame affected by ground water table. *Proceedings of Korean Soil. Sci. Fert. Conference, 2008.5*, 171-172. (Abstr.)
- Kim, H.L., Y.B. Kwack, H.D. Kim, J.G. Kim, and Y.H. Choi. 2011. Effect of different soil water potentials on growth properties of northern-highbush blueberry. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44:161-167.
- Kim, M.T., S.B. Pae, C.D. Hwang, S.G. Lim, and J.T. Kim. 2003. The effect of soil moisture on soybean growth and yield. *Annual Research Report of Yeoungnam Agricultural Research Institute*. pp. 157-162.
- Lee, C.Y., S.M. Kim, Y.C. Kim, I.S. Choi, and H.C. Park. 1999. Ecophysiological studies on the matter production of soybean to the environmental stress. *Korean J. Life Sci.* 9(4):368-374.
- Lee, H.S. and J.H. Ku. 1995. Effect of water table depth in different soil texture on quality of barley and wheat grain. *Korean J. Crop Sci.* 40(3):278-284.
- Lee, J.E., H.S. Kim, Y.U. Kwon, G.H. Jung, and S.L. Kim. 2011. Changes of leaf nitrogen and petiole ureide content in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] under water logging condition. *Korean J. Crop Sci.* 56(4):385-393.
- 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.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2017. <https://www.mafra.go.kr>.
- RDA (Rural Development Administration). <http://www.nongsaro.go.kr>.
- Seo, J.H., S.B. Back, Y.U. Kwon, C.G. Kim, K.H. Jung, G.H. Jung, J.E. Lee, and S.J. Kim. 2012. Effect of subsoiling on silage maize yield in paddy field converted to upland condition. *Korean J. Crop Sci.* 57(4):430-435.