Characterizations of Growth, Yield and Water Use Efficiency of Adzuki Bean as Affected by Drought Stress

Hyen Chung Chun^{1*}, Sanghun Lee¹, Dong Hyeok Gong¹, Young Dae Choi¹, and Ki Yuol Jung²

¹Researcher, Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea

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

*Corresponding author: hyen2010@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 20, 2020

Revised: November 9, 2020

Accepted: November 10, 2020

Accurate and optimal water supply to crop is critical in growing stalks and producing maximum yields. Adzuki bean is one of the representative legume crops and known as a vulnerable crop to water stress. This study investigated drought effect on adzuki bean at various growth stages and water use efficiency (WUE) with different soil moisture contents in order to evaluate response of adzuki bean to drought. The experiment was performed at National Institute of Crop Science in Miryang. Adzuki beans were planted in a Wagner pot filled with 50% of silt loam soil and 50% of bed soil. Drought treatment was applied at six growth stages: V1, V3, V5, R1, R3, R5. Another pot experiment was performed in a stainless steel pot with an automated irrigation system in order to maintain targeted soil moisture content (40, 60 and 80% of field capacity). Growth and yield characteristics of adzuki bean were measured from all pots. Crop susceptibility (CS) was calculated from the Wagner pots to quantify drought effect at each growth stage and WUE was measured from the stainless pots to determine the least water requirement to prevent drought damage. Drought effect was the greatest in growth reduction at V1 and yield reduction at R3. CS value was the smallest value at V3 and the greatest at R3. Growth, yield and WUE data of adzuki bean were not different between soil moisture 60% of field capacity and 80%, while ones from 40% soil moisture content were smaller than others. Adzuki bean exhibited great vulnerability to drought stress at reproductive stage and it required at least soil moisture 60% of field capacity to prevent drought damage. These results will be useful to water management of adzuki bean and prevent drought damage in adzuki bean cultivation.

Keywords: Adzuki bean, Soil moisture content, Crop susceptibility, Water use efficiency

Results of daily water used from adzuki bean cultivated with different soil moisture content (40, 60, 80% of field capacity). DAP represents days after planting.

Introduction

팥 (*Adzuki bean*, *Vigna angularis* var. *nipponensis*)은 한국, 일본, 중국과 같은 동아시아 지역에서 가장 오래 재배된 두과작물중에 하나이며 단백질을 공급하는 주요 식량자원으로 콩 다음으로 널리 사용되고 있다 (Sacks, 1977). 최근 기후변화의 영향으로 팥의 재배기간 (6월 - 8월) 동안 대기 기온 상승과 강수량 감소가 심화되었다 (Lee et al., 2020). 팥의 재배기간 (6 - 8월) 동안 평균 기온은 2014년 23.3°C에서 2018년에 25.1°C로 상승을 하였고 평균 강우량은 2014년은 213.8 mm에서 2018년은 202.7 mm로 감소하고 있다. 이러한 조건은 작물이 가뭄 피해를 받기 더 쉬워지고 이는 결과적으로 작물 생육 발달과 수량을 감소시킨다 (Lee et al., 2013).

가뭄 영향에 대한 두류 작물의 반응은 주로 콩 위주로 연구가 이루어져왔다. 가뭄 강도가 증가할수록 콩의 줄기 및 잎 크기 감소 (Hoogenboom et al., 1987; Sloane et al., 1990)가 나타나고, 콩 생육 시기별 가뭄의 피해는 개화기와 협형성기 사이에 가장 크고 이 시기에 가뭄으로 인하여 수량 감소가 가장 크게 나타났다 (Desclaux et al., 2000). 팥의 가뭄 영향에 대한 연구는 주로 생리학적 반응을 규명하는데 주력해왔다 (Wu et al., 2016; Srivastava et al., 2018; Kang et al., 2020). 생리학적 반응을 연구한 논문들은 생리적 기작을 바탕으로 팥의 가뭄 피해를 줄이려는 연구내용을 주로 하고 또한 품종 개발을 위한 기초연구로 이루어져왔다. 팥의 수분 스트레스에 대한 반응 연구들은 공통적으로 팥이 수분 스트레스에 매우 취약한 것으로 나타났다. 가뭄 조건에서 콩과 팥 뿌리의 생육 발달을 비교한 결과 콩은 파종시 포장용수량 70%까지 낮아져도 뿌리가 정상 생육을 하지만, 팥은 파종시 포장용수량 100% 보다 감소하면 뿌리 생육이 저하되는 것으로 밝혀졌다 (Chun et al., 2019). 기존 연구 결과들에 따르면 팥은 토양 수분 함량 차이에 따라 생육과 수량 차이가 확연히 나타났고 수분 스트레스에 민감한 것으로 나타났다.

효율적인 물 사용은 가뭄과 같은 제한적인 재배 환경에서 작물의 생육과 수량을 결정짓는 중요한 요인 중에 하나로 인식되어 왔다. (Oweis et al., 2000). 작물 수분 이용 효율은 투입한 관개량당 생산된 종자 수량이나 생체량을 나타낸다 (Van Duivenbooden et al., 2000). 수분 이용 효율은 환경 스트레스, 특히 수분 스트레스에 대한 작물의 반응을 판단하는데 활용되어 왔다 (Raeini-Sarjaz and Barthakur, 1997). Rosales et al. (2012)은 콩 품종별 가뭄 스트레스 저항성을 진단하기 위하여 광합성, 기공전도도와 함께 수분이용효율 분석을 하였다. Polania et al. (2016)은 강낭콩의 가뭄 저항성을 판별하기 위하여 수량성과 수분이용효율값을 같이 비교하였다. 팥의 수분이용효율에 대한 연구는 국내 외적으로 이루어지지 않았다. 이와 같은 선행연구들을 바탕으로 팥의 가뭄 영향에 따라 나타날 생육과 수량의 차이를 알아야 할 필요가 있고 또한 효율적인 물 관리를 위하여 재배기간 동안 토양 수분에 따른 팥의 생육과 수량수분이용효율 변화를 평가하는 것이 필요하다. 이에 따라 본 연구의 목표는 팥의 가뭄에 대한 영향을 분석하기 위하여 생육 시기 별로 가뭄 처리를 하여 생육과 수량을 평가하고 또한 재배 기간 동안 토양 수분 함량에 따른 수량 및 수분이용효율을 평가하는 것이었다.

Materials and Methods

토양 및 작물 팥의 가뭄에 대한 연구는 국립식량과학원 남부작물부 부내 온실에서 2019년 6월부터 10월까지 이루어졌다. 팥 품종은 아라리이고 토양은 시판용 상토 바로커 (원예용) 50%와 일반 토양 (미사질 양토) 50%가 섞여서 사용되었다. 토성분석은 일반토양의 경우 hydrometer로 분석하였고 상토는 업체 분석값을 이용하였다. 일반 토양의 특성과 상토 특성은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Physical and chemical characteristics of silt loam soils used in the experiments.

pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	Organic matter (g kg ⁻¹)	Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Cation Exchange Capacity (CEC) (cmol _c kg ⁻¹)			Particle size distribution (%)		
				K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
7.19	0.07	1.33	151.40	0.33	7.72	1.57	25.4	74.2	0.4

Table 2. Physical and chemical characteristics of bed soil used in the experiment.

pH (1:5, v v ⁻¹)	EC (ds m ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Cation Exchange Capacity (cmol ⁺ l ⁻¹)	Bulk density (Mg m ⁻³)
7.0	0.65	200	150	200	35	0.15

포트 실험 포트 실험은 모두 두가지 실험으로 나뉘어 이루어졌다. 첫번째 실험은 팥의 생육 시기별 가뭄 처리에 따른 생육과 수량 변화를 분석하였다. 두번째 실험은 팥의 재배기간 동안 일정한 토양 수분을 관리하여 작물 생육 기간 동안 일정한 가뭄 영향을 받도록 하여 이에 따른 생육과 수량, 수분이용효율을 조사하였다.

생육 시기별 가뭄 영향 실험을 위해 와그너 포트 (1/5000)에 일반 토양 50%와 상토 50%를 채워 넣었다. 파종 전 토양에 비료는 작물별 비료사용처방 기준 (NIAS, 2017)에 따라 요소 0.26 g, 용성인비 0.60 g, 염화加里 0.20 g을 포트당 시비하였다. 팥은 6월 1일에 파종하여 일반 재배법에 따라 포트당 5 종자씩 파종 한 후 V1 시기에 2분씩 솎은 후 재배하였다. 파종 후 6일 후부터 V1, V3, V5, R1, R3, R5 시기에 5일 동안 가뭄 처리가 이루어 졌다. 파종 후 매일 토양수분 관리를 위하여 물을 주었고 하루 2번 수분센서를 체크하여 물을 주입하였다. 가뭄 처리 3일 전부터 가뭄 영향을 원하는 시기에 주기 위하여 물 공급량을 감소하였다. 5일 가뭄 처리가 끝난 후 포트들은 충분히 수분을 투입하여 수확 시기까지 정상 재배하였다. 정상 재배 동안 포트의 토양 수분은 $23.8 \pm 3.9\%$ 를 유지하였고 가뭄 처리 기간 동안의 토양 수분은 $8.2 \pm 1.6\%$ 를 유지하였다. 대조구 (control)는 파종부터 수확까지 가뭄의 영향을 받지 않도록 토양 수분은 25% 이상 유지하였다. 포트는 각 처리 마다 5개의 반복을 두고 대조구의 5 반복을 합하여 총 35개의 포트에 팥을 재배하였다. 잎의 광합성 특성은 잎 엽록소 측정장치 (SPAD chlorophyll meter, Minolta Corp. Ramsey, NJ)와 기공전도도 (Leaf porometer, Meter Group, WA, USA)를 사용하여 측정하였다. 잎의 광합성 특성은 가뭄 처리가 들어가고 5 일차에 각 포트마다 3반복으로 측정하였다. 수확 후 기본적 생육과 수량구성요소들을 측정하였다. Hiler (1969)가 제안한 작물 민감성 요인 (Crop Susceptibility Factor, CS)을 바탕으로 작물의 가뭄에 대한 민감도를 계산하였다.

$$CS_i = \frac{x - x_i}{x} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, x_i : i 생육기에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량, x : 아무런 스트레스를 받지 않은 경우의 작물의 수량

가뭄 영향에 따른 팥의 생육 반응과 수분이용효율을 측정하기 위하여 스테인레스 포트를 제작하여 사용하였다 (Fig. 1). 각 포트는 지름이 15 cm와 50 cm 높이의 원기둥 모양으로 제작되었다. 이 포트 안에 각 40 kg의 토양 (50% 바로커, 50% 일반 토양)을 채워 넣었다. 각 포트마다 비료는 요소 1.05 g, 용성인비 2.41 g, 염화加里 0.80 g을 시비하였다. 총 24개의 포트가 제작되어 토양 수분 함량 (포장용수량의 40% (40%FC), 60% (60%FC), 80% (80%FC))을 자동으로 유지하며 팥을 재배하도록 실험하였다. 포장용수량에 따른 토양 수분 함량은 Table 3과 같다. 각 포트에 토양

수분 센서가 지표에서 10 cm 깊이에 설치되어 매 30분마다 토양 수분을 측정하고 토양 수분 함량이 지정한 함량보다 낮아지면 미니 스프링클러를 통해 물이 공급되었다 (Fig. 1b). 각 토양 수분함량마다 7개의 반복을 두었다. 증산량을 측정하기 위해 2개의 포트는 똑같은 토양 조건에 팥을 재배하지 않고 매일 일정량의 수분을 공급하였다. 모든 포트는 저울 위에 설치하여 매 30분마다 무게를 측정하도록 하였다. 일일 수분 소모량은 매일 같은 시간에 측정된 포트 무게와 전날 같은 시간의 포트 무게를 뺀 후 그 값에서 증산량을 뺀 값으로 계산되었다.

수분이용효율 (WUE, water use efficiency)은 토양 수분 함량에 따라 재배기간 동안 조사된 증발산량과 지상부 생장량 및 수량의 상호관계로부터 수분이용 효율을 평가하였다. 재배기간 동안 작물 생육과 수량에 쓰여진 총 물 양으로 생산된 종자 수량을 나누어서 구하였다 (Varga et al., 2013).

Fig. 1. Diagram of the experiment pots. (a) is a pot layout with an automated control and (b) is a pot diagram showing a location of soil moisture sensor and an irrigation method to measure water use efficiency.

Table 3. Actual soil moisture contents for each treatment. 40 % soil moisture content of field capacity is presented as 40%FC, 60% soil moisture content of field capacity as 60%FC, and 80% soil moisture content of field capacity as 80%FC.

Treatment	Soil moisture content (%)
40%FC	14
60%FC	22
80%FC	27
Field capacity	33.8

$$\text{WUE (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Grain yield (kg)}}{\text{Water used (m}^3\text{)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

통계분석 모든 조사 및 분석한 결과는 분산분석 (ANOVA) 및 다변량분석을 SPSS (v.9.0.1, SPSS Inc., Chicago, USA)에서 유의적 차이를 95% 유의수준에서 조사하였다.

Results

생육 시기별 가뭄 처리에 따른 팥 생육 및 수량 특성 분석 각 생육 시기별 가뭄 처리에 따른 수량구성요소 조사결과는 다음과 같았다 (Table 4, 5). 가뭄 처리를 받지 않은 팥의 경장과 종실 수량은 각 32.94 ± 4.26 cm, 6.80 ± 1.93 g pot⁻¹으로 가장 높은 값을 보였다 ($p = 0.0$). 팥은 V1 (21.17 ± 6.08 cm)에 가뭄 처리를 받은 경우 가장 저조한 생육을 보였다 ($p = 0.02$). 반면 수량에서는 R3에 가뭄 처리를 받은 경우가 2.13 ± 2.64 g pot⁻¹으로 가장 낮았다. 수량에서 팥은 V3를 제외하고 모든 생육시기에서 가뭄 처리에 의한 수량 감소가 나타났다. SPAD 값들과 기공전도도 값들 또한 V5에서 R3 사이에 가장 낮은 값들을 나타냈다. 기존 연구결과들에 의하면 콩과 같은 작물들이 초기 생육시기에서 가뭄 영향을 받아도 생육과 수량의 감소가 적다고 알려져 왔다 (Gwathmey and Hall, 1992). Turk and Hall (1980)은 초기 생육시기에 가뭄 처리가 된 후 가뭄이 완화되면 초기 가뭄 피해를 빠르게 극복하고 생육과 협 형성을 정상화시킨다고 설명하였다. 그러나 작물 또는 품종에 따라 생육 초기 가뭄 영향에 대한 반응이 다르고 이는 작물 생존율 또

Table 4. Growth characteristics of adzuki bean, photosynthesis and yield components from all growth stages.

Growth stage	Height (cm)	Thickness (mm)	Branches per plant	No. capsule per plant	Yield (g pot ⁻¹)
V1	21.17 ± 6.08 b	5.29 ± 1.00 c	2.00 ± 1.10	6.67 ± 3.78	4.70 ± 2.19 b
V3	29.50 ± 2.88 b	6.18 ± 1.39 b	3.33 ± 2.7	10.50 ± 3.83	6.19 ± 4.27 ab
V5	37.75 ± 4.91 a	7.47 ± 0.95 ab	4.33 ± 2.52	7.67 ± 3.06	4.95 ± 1.80 b
R1	32.75 ± 17.26 ab	5.91 ± 1.30 c	2.00 ± 1.41	9.00 ± 6.08	4.48 ± 2.66 b
R3	38.00 ± 12.92 a	7.74 ± 0.68 a	3.20 ± 1.64	5.60 ± 5.39	2.13 ± 2.64 c
R5	31.80 ± 1.30 ab	5.78 ± 0.67 c	3.40 ± 1.14	6.60 ± 2.19	4.70 ± 0.65 b
Control	32.94 ± 4.26 ab	6.34 ± 0.93 ab	2.44 ± 1.67	8.89 ± 3.48	6.80 ± 1.93 a

Growth stage	SPAD [†]	Stomatal conductance [†] (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Withering rate (%)
V1	21.17 ± 6.08 a	5.29 ± 1.00 ab	22.0
V3	29.50 ± 2.88 a	6.18 ± 1.39 b	0.0
V5	37.75 ± 4.91 b	7.47 ± 0.95 c	0.0
R1	32.75 ± 17.26 ab	5.91 ± 1.30 c	42.5
R3	38.00 ± 12.92 b	7.74 ± 0.68 c	33.3
R5	31.80 ± 1.30 b	5.78 ± 0.67 b	0
Control	32.94 ± 4.26 a	6.34 ± 0.93 a	0

[†] Measured under drought condition.

[‡] a,b,c,d: statistical differences across growth stages at 95% level.

는 후기 생육과 수량에 영향을 준다는 연구 결과들도 있다 (Mai-Kodomi et al., 1999; Chun et al., 2019). 본 연구에서도 팔은 초기 가뭄 처리 (V1)에 따라 고사율이 22%로 생식 성장기를 제외하고 가장 높은 고사율을 보였다. 생육시기별 가뭄 처리에 따른 광합성 관련 특성을 보면 SPAD 값들과 기공전도도 모두 R1, R3가 가장 낮았다 ($p = 0.04$). 기존 연구들에서 콩에 가뭄 처리를 생육시기별로 할 경우 R1 - R4사이에 가뭄으로 인하여 잎의 광합성 기능이 가장 떨어지고 이로 인한 수량 저하가 가장 크게 나타났다고 알려져 있다 (Jin et al., 2007; Sengupta et al., 2019). 이와 같이 본 연구에서도 생식 성장기인 R3에서 광합성 기능과 수량 감소가 가장 컸다.

CS값은 환경 스트레스에 대한 민감도를 나타내는 지수로 현재까지 옥수수, 콩, 팥의 생육시기별 과습에 대한 민감도가 밝혀져 있다 (Evans and Skaggs, 1984; Purwanto et al., 1993; Chun et al., 2016). CS값이 1에 가까울수록 가뭄 처리에 따른 영향이 강하다는 뜻으로 본 연구에서 생육 시기별 가뭄에 대한 CS값은 Fig. 2에 나타나있다. CS 값은 V1에서 0.3이었고 V3에서 0.1로 낮아졌다. 이후 증가세를 보이다가 R3에서 0.6으로 가장 높은 값을 보였다. 이는 팥 재배기간 동안 V3기간에 가뭄이 발생하여도 팥 생육과 수량에 대한 영향이 가장 적다는 뜻이고 R3시기에 가뭄이 들면 수량 감소가 가장 크게 나타날 것임을 뜻한다.

Fig. 2. Results of crop susceptibility (CS) from six growth stages; V1, V3, V5, R1, R3, R5.

Table 5. Growth characteristics of adzuki bean, photosynthesis and yield components from all soil moisture contents. 40 % soil moisture content of field capacity is presented as 40%FC, 60% soil moisture content of field capacity as 60%FC, and 80% soil moisture content of field capacity as 80%FC.

Soil moisture content (%FC)	Height (cm)	Thickness (mm)	Branches per plant	No. capsule per plant	Yield (g pot ⁻¹)
40	27.88 ± 2.75c	5.36 ± 0.88c	0.0b	4.00 ± 3.21b	22.85 ± 13.91b
60	81.00 ± 4.16b	10.93 ± 2.05a	8.50 ± 1.29a	89.50 ± 22.01a	92.49 ± 23.98a
80	90.25 ± 2.5a	8.56 ± 0.69b	7.25 ± 2.06a	74.00 ± 20.70a	108.74 ± 30.35a

Soil moisture content (%FC)	Biomass (g/ plant)	100 grain weight (g)	Withering rate (%)	SPAD [†]	Stomatal conductance [†] (mmol/m ² s)
40	20.75 ± 12.54b	0.0b	90.0	18.08 ± 4.13b	0.06 ± 0.04b
60	235.95 ± 91.05a	14.55 ± 1.42a	0.0	42.33 ± 2.71a	0.46 ± 0.26a
80	164.23 ± 33.98a	15.66 ± 1.07a	0.0	47.30 ± 3.28a	0.59 ± 0.17a

[†] Measured at the 60th day after planting.

[‡] a,b,c,d: statistical differences across growth stages at 95% level.

토양수분 함량별 수분이용효율 분석 팔의 재배기간 동안 토양 수분을 포장용수량의 40 (40%FC), 60 (60%FC), 80% (80%FC)를 유지하여 생육과 수량을 조사한 결과는 Table 5와 같다. 40%FC의 팔은 재배기간 동안 생육이 다른 토양 수분 함량과 비교하여 현저히 낮은 값 (경장, 경태, 주당협수 등)을 보였고 이는 낮은 수량 ($22.85 \pm 13.91 \text{ g pot}^{-1}$)으로 나타났다 ($p = 0.00$). 60%FC에서 재배된 팔의 경우 생육은 80%FC에서 재배된 팔보다 저조하였으나 수량에서는 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 이와 같은 결과는 잎의 광합성 기능인 SPAD와 기공전도도에서 같은 경향을 보였다. 40%FC에서 재배된 팔은 재배기간 동안 가뭄 스트레스를 받아 생육과 수량이 모두 저조한 반면 60%FC 이상에서 재배된 팔은 가뭄으로 인한 영향이 거의 나타나지 않았다.

각 토양 수분 함량에서 재배한 팔의 일일 수분 소모량 결과는 Fig. 3에 나타나있다. 팔의 일일 수분 소모량은 토양 수분 함량에 따라 다른 경향을 나타냈다. 파종 후 5일부터 15일까지 60%FC와 80%FC는 0.79 mm day^{-1} 와 0.93 mm day^{-1} 로 나타났고 40%FC는 0.1 mm day^{-1} 로 현저히 낮은 값을 나타냈다. 이는 파종 시 토양 수분 함량이 낮은 경우 발

Fig. 3. Distributions of daily water used from adzuki bean which were cultivated with different soil moisture content; 40% of field capacity (40% FC), 60% of field capacity (60% FC), and 80% of field capacity (80% FC). DAP represents day after planting.

Fig. 4. Averaged and standard deviation results of water use efficiency from adzuki bean which were cultivated with different soil moisture content; 40% of field capacity (40% FC), 60% of field capacity (60% FC), and 80% of field capacity (80% FC).

아 후에도 수분을 많이 흡수하지 못하는 것으로 판단된다. Chun et al. (2019)는 콩과 팥의 뿌리 발달을 다양한 토양 수분에서 비교한 결과 팥은 포장용수량의 100% 미만인 경우 뿌리 발달이 저조한 결과를 보였다. 이를 바탕으로 파종 후 토양 수분 함량이 낮은 경우 뿌리 발달에서부터 생육이 저조하고 이로 인하여 수분 소모량 또한 저조한 것으로 판단된다. 40%FC에서 재배된 팥은 수분 소모량이 크게 증가하지 못하고 파종 후 55일 이후 급격한 감소를 보였다. 팥 지상부는 이 시점부터 고사가 진행되어서 최종 고사율이 90%에 이르렀다. 60%FC와 80%FC 포트의 팥은 수분 소모량이 파종 후 50일 이후부터 꾸준한 증가를 보이다가 파종 후 70 - 80일에 최고 높은 수분 소모량을 보였다. 80%FC의 팥은 파종 후 75일에 9.13 mm day^{-1} 로 가장 높은 값을 보였고 60%FC는 80일에 5.53 mm day^{-1} 로 가장 높은 수분 소모량 값을 보였다. 팥에 관한 수분 소모(요구)량을 연구한 결과는 없으나 콩을 연구한 결과를 살펴보면, 콩 수분 소모량은 파종 후 75일에 가장 높은 수분 소모량을 나타냈다 (Kuo et al., 2006). 콩 품종 간 수분 소모량 차이를 분석한 결과 $183 \text{ mL plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ - $64 \text{ mL plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 까지 다양하게 나타났다 (Park et al., 2014). 수분 소모량의 계산 방식, 작물, 품종에 따라 수분 소모량은 다양하게 나타나나 공통적으로 파종 후 70일 이후로 가장 높은 수분 소모량을 보이고 있는 이는 본 연구 결과와 같다. 60%FC에서 재배된 팥은 80%FC의 팥보다 토양 수분 함량이 낮아 더 낮은 수분 소모량을 보였으나 콩 생육에서는 일정한 경향을 보이며 감소하지 않았고 수량에서는 통계적 차이가 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 팥 재배시 토양 수분 함량이 포장 용수량의 60%까지 떨어져도 생육과 수량에는 차이가 나지 않은 것으로 판단된다.

수량과 사용한 물의 양을 바탕으로 수분이용효율을 계산하였다 (Fig. 4, Eq. 2). 통계적으로 수분이용효율 값들은 60%FC와 80%FC는 차이가 나타나지 않았고 40%FC는 현저히 낮은 값을 보였다. 수분이용효율은 가뭄 조건에서 작물 반응도를 측정하는 지표로도 활용이 가능하다 (Blum, 2009). Raeini-Sarjaz et al. (1998)는 가뭄 스트레스 강도가 증가할수록 수분이용효율은 감소하는 것을 밝혔고 Webber et al. (2006)은 약한 가뭄 처리로 작물의 수분 이용효율이 더 높아지는 것을 밝혔다. 또한 적은 물 양으로도 수량성을 유지할 수 있는 최소 물량 산정을 위해 수분 이용효율을 이용하여 왔다 (Zhang et al., 1998; Kang et al., 2000; Webber et al., 2006). 본 연구 결과에서 토양 수분 함량을 포장용수량의 60%로 유지하여도 팥의 생육과 수량성이 떨어지지 않고 수분이용효율도 낮아지지 않는 결과를 보였다.

팥의 수분 스트레스에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았고 주로 콩 중심으로 이루어져왔다. 따라서 팥 재배시 콩과 같은 두과 작물로 물관리를 동일하게 처리하여 왔다. 콩의 일일 수분 소모량을 연구한 연구들은 평균적으로 파종 후 초기 20일 동안은 $0.1 - 0.2 \text{ mm day}^{-1}$ 의 수분을 사용하고 그후 꾸준히 상승하여 파종 후 70일 경에 $15.24 \text{ mm day}^{-1}$ 로 최고값을 나타내는 것으로 알려져 있다 (Karam et al., 2005). 본 연구에서 팥은 파종 후 15일 정도까지 수분 소모량이 $0.7 - 0.9 \text{ mm day}^{-1}$ 로 콩보다 더 높게 나타났다. 반면 최고 소모량은 콩 최고량의 반도 되지 않았다. 이와 같은 결과는 팥은 초기 한발에 매우 취약하면서도 개화기 이후에는 콩보다는 더 적은 물량을 요구하는 것으로 판단된다. Chun et al. (2018)에서 콩과 팥의 과습 스트레스에 대한 반응 평가에서 팥은 콩보다 과습 조건에 더 약하다는 결과를 밝혔다. 이는 팥이 콩보다 수분 소모량이 적기 때문에 과습에 더 취약한 것으로 여겨진다. 이와 같은 결과들을 바탕으로 팥은 생육 시기별로 수분 요구량이 콩과는 매우 다르고 또한 수분 스트레스에 더 민감하므로 재배시 물관리에 더 관심을 가져야 하는 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 가뭄 영향에 따른 팥의 생육시기별 반응과 토양 수분 함량에 따른 수분이용효율 특성을 분석하였다. 팥은 생육 시기 중 R3에 가뭄 영향을 가장 크게 받았고 재배 기간 동안 토양 수분 함량이 포장용수량의 60%까지는 가뭄

영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에 따라 팥 재배시 콩과 비교하여 초기 생육에서는 토양 수분을 높게 잡고 이후는 콩보다 낮게 수분을 공급하는 것이 팥 재배 기간 동안 가뭄과 과습 피해를 최소화 하는데 도움을 줄 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호: PJ01348201)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Blum, A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Res.* 112(2-3):119-123.
- Chun, H.C., K.Y. Jung, Y.D. Choi, S.H. Lee, and H.W. Kang. 2019. Root growth and spatial distribution characterization of soybean (*Glycine max* L.) and adzuki bean (*Vigna angularis* L.) under drought stress. *Korea J. Soil. Sci. Fert.* 52(4):489-501. [in Korean]
- Chun, H.C., K.Y. Jung, Y.D. Choi, S.H. Lee, and H.W. Kang. 2016. The growth and yield changes of foxtail millet (*Setaria italic* L.), proso millet (*Panicum miliaceum* L.), sorghum (*Sorghum bicolor* L.), adzuki bean (*Vigna angularis* L.), and sesame (*Sesamum indicum* L.) as affected by excessive soil-water. *Korean J. Agri. Sci.* 43(4): 547-559. [in Korean]
- Chun, H.C., K.Y. Jung, Y.D. Choi, S.H. Lee, and H.W. Kang. 2018. Growth and yield characterization of soybean (*Glycine max* L.) and adzuki bean (*Vigna angularis* L.) cultivated from paddy fields with different topographic features. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):536-546. [in Korean]
- Desclaux, D., T. Huynh, and P. Roumet. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Sci.* 40(3):716-722.
- Evans, R.O., and R.W. Skaggs. 1984. Crop susceptibility factors for corn and soybeans to controlled flooding. ASAE Paper No. 84-2567, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
- Gwathmey, C.O., and A.E. Hall. 1992. Adaptation to mid-season drought of cowpea genotypes with contrasting senescence traits. *Crop Sci.* 32:773-778.
- Hiler, E.A. 1969. Quantative Evaluation of Crop-Drainage Requirments. *Trans. ASAE.* 12(4):499-505.
- Hoogenboom, G., M.G. Huck, and C.M. Peterson. 1987. Root growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agron. J.* 79:607-614.
- Jin, J., G. Wang, X. Liu, X. Pan, S.J. Herbert, and C. Tang. 2007. Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differeing in protein concentration in grains. *J. Plant Nutr.* 29(8):1433-1449.
- Kang, S.M., A. Adhikari, K.E. Lee, M.A. Khan, A.L. Khan, R. Shahzad, S.K. Dhungana, and I.J. Lee. 2020. Inoculation with indole-3-acetic acid-producing rhizospheric rhodobacter sphaeroides KE 149 augments growth of adzuki bean plant under water stress. *J. Microbiol. Biotechnol.* 30(5):717-725.
- Karam, F., R. Masaad, T. Sfeir, O. Mounzer, and Y. Rouphael. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agric. Water Manag.* 75(3):226-244.
- Kuo, S.F., S.S. Ho, and C.W. Liu. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agric. Water Manag.* 82(3):433-451.
- Lee, E., S. Lee, J. Park, E. Kim, Y. Hong, S. Lee, and Y. You. 2020. Correlation between a soil respiration and environmental factors, air temperature and precipitation in pinus densiflora community in Namsan and meaning

- on an urban forest management. J. Korea Soc. For. Sci. 109(2):136-144. [in Korean]
- Lee, Y.H., Y.J. Oh, C.S. Na, M.H. Kim, K.K. Kang, and S.T. Yoon. 2013. Vulnerability assessment on spring drought in the field of agriculture. Climate Change Res. 4(4):397-407. [in Korean]
- Mai-Kodomi, Y., B.B. Singh, O. Myers, J.H. Yopp, P.J. Gibson, and T. Terao. 1999. Two mechanisms of drought tolerance in cowpea. Indian J. Genet. 59:309-316.
- NIAS (National Institute of Animal Science). 2017. Fertilization standard on crops (3rd edition). National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea.
- Oweis, T., H. Zhang, and M. Pala. 2020. Water use efficiency of rainfed and irrigation bread wheat in a Mediterranean environment. Aron. J. 92(2):231-238.
- Park, S.J., J.Y. Park, K.C. Eom, and J.K. Moon. 2014. Determination of water use efficiency on the amount of water use for 20 Korean soybean cultivars. Korean J. Breed. Sci. 46(4):381-388. [in Korean]
- Polania, J., C. Poschenrieder, S. Beebe, and I.M. Rao. 2016. Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. Front. Plant. Sci. 7:660.
- Purwanto, M.Y., S. Hardjoamdojo, R. Nakamura, and N. Kubo. 1993. Crop yield prediction by stress day indices under both excessive and deficient soil water conditions. Irri. Engin. Rural Plan. 25:31-41.
- Raeini-Sarjaz, M., and N. N. Barthakur. 1997. Water use efficiency and total dry matter production of bush bean under plastic covers. Agr. Forest Meteorol. 87(1):75-84.
- Raeini-Sarjaz, M., N.N. Barthakur, N.P. Arnold, and P.J.H. Jones. 1998. Water stress, water use efficiency, carbon isotope discrimination and leaf gas exchange relationships of the bush bean. J. Agron. Crop SCI. 180(3):173-179.
- Rosales, M.A., E. Ocampo, R. Rodrigues-Valentin, Y. Olvera-Carrillo, J. Acosta-Gallegos, and A.A. Covarrubias. 2012. Physiological analysis of common bean (*phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. Plant Physiol. Biochem. 56:24-34.
- Sacks, F.M. 1977. A literature review of *phaseolus angularis*- the adzuli bean. Econ. Bot. 31:9-15.
- Sengupta, D., D. Kariyat, S. Mariboina, and A.R. Reddy. 2019. Pod-wall proteomics provide novel insights into soybean seed-filling process under chemical-induced terminal drought stress. J. Sci. Food Agr. 99(5):2481-2493.
- Sloane, R.J., R.P. Patterson, and T.E. Carter Jr. 1990. Field drought tolerance of soybean plant introduction. Crop Sci. 30(1):118-123.
- Srivastava, R., S. Kumar, Y. Kobayashi, K. Kusunoki, P. Tripathi, Y. Kobayashi, H. Koyama, and L. Sahoo. 2018. Comparative genome-wide analysis of WRKY transcription factors in two Asian legume crops: Adzuki bean and Mung bean. Nature, 8:16971.
- Turk, K., and A.E. Hall. 1980. Drought Adaptation of Cowpea. II. Influence of Drought on Plant Water Status and Relations with Seed Yield. Agron. J. 72(3):421-427.
- Van Duivenbooden, N., M. Pala, C. Studer, C.L. Biielders, and D.J. Beukes. 2000. Cropping systems and crop complementarity in dryland agriculture to increase soil water use efficiency: a review. NJAS-Wagen. J. Life Sc. 48(3):213-236.
- Varga, B., E. Varga-Laszlo, S. Bencze, K. Balla, and O. Veisz. 2013. Water use of winter cereals under well-watered and drought-stressed conditions. Plant Soil Environ. 59(4):150-155.
- Webber, H.A., C.A. Madramootoo, M. Bourgault, M.G. Horst, G. Stulina, and D.L. Smith. 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. Agric. Water Manag. 86(3):259-268.
- Wu, J., L. Wang, and S. Wang. 2016. Comprehensive analysis and discovery of drought-related NAC transcription factors in common bean. BNC Plant Biol. 16:193-206.
- Zhang, J., S. Xiangzhen, L. Bin, S. Baolin, L. Jianmin, and Z. Dianxi. 1998. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. Field Crop Res. 59(2):91-98.