Root Growth and Spatial Distribution Characterization of Soybean (*Glycine max* L.) and Adzuki Bean (*Vigna angularis* L.) Under Drought Stress

Hyen Chung Chun*, Ki Yuol Jung, Young Dae Choi, Sanghun Lee, and Hang Won Kang

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

*Corresponding author: hyen2010@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 17, 2019

Revised: November 4, 2019

Accepted: November 5, 2019

Recently Korea has severe drought during sowing and early vegetative period of soybean and adzuki bean cultivation. Soybean and adzuki bean are an important legume crops in Korea, so it is important to understand adaptation of these crops to water stress. This study investigated changes of morphological properties and spatial distribution of soybean and adzuki bean roots under different soil moisture contents. The experiment was performed at National Institute of Crop Science in Miryang. Soybeans and adzuki beans were planted in a test tube with 40 in length, 20 in width, and 4 cm in depth and grew for 20 days. The tubes were filled with surface soil with six soil moisture treatments (30, 40, 50, 60, 70 and 100%). The root images were obtained every 2 days using a scanner. Root properties from the images were characterized by root length, depth, surface area, number of roots and fractal parameters (fractal dimension and lacunarity). The root depth, length, surface area and number of roots increased as soil moisture increased from both crops. The values of fractal dimension and lacunarity increased as soil moisture increased. These results indicated that greater soil moisture induced more heterogeneous root structure. Correlation analysis among morphological properties and fractal parameters resulted in that the fractal dimension had the greatest correlation with depth, number of roots and surface area from soybean. Lacunarity from soybean showed a greater correlation with number of roots and surface area than ones from adzuki bean. This result indicates that fractal dimension is strongly related to branching of roots. Soybean and adzuki bean are sensitive to soil moisture content in early vegetative stage and they require soil moisture greater than 70% to develop full root structure. These results would be useful to understand soybean and adzuki bean responses to water stress and to manage irrigation amounts in cultivation.

Keywords: Soybean, Adzuki bean, Root, Morphology, Fractal dimension, Soil water content

Example root images of soybean and adzuki bean with no water stress after planting (DAP -days after planting).

Introduction

적절한 뿌리 성장과 생육은 작물 수량에 중요한 요인으로 인식되고 있다 (Wilson, 1988). 뿌리의 왕성한 성장은 토양 상태와 깊은 관련을 갖고 있다. 뿌리 성장은 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 상태에 따라 달라지며 이 중 하나라도 불충분한 조건이 되면 뿌리 성장은 제한을 받게 된다. 여러 토양 특성들 중에서 토양 수분은 뿌리 성장에 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Fukai and Cooper, 1995; Price et al., 2002). 기존 연구들은 수분 스트레스 하에서 뿌리 생육 특성들을 조사하였다: 뿌리 길이, 표면적, 부피 (Osonubi, 1985; Zhang and Davies, 1989; Li et al., 2006; Cai et al., 2017), 뿌리 성장 길이 비율 (Whalley et al., 1998; Bengough et al., 2011), 뿌리의 공간적 분포 (Fitter and Stickland, 1992; Nielsen et al., 1997; Wang et al., 2009). 한발과 같은 수분 스트레스는 뿌리의 성장 및 확산을 감소시킨다 (Malik et al., 1979; Taylor, 1983). 한발 조건에서 뿌리는 토양 내 습윤선을 따라 깊이 성장을 하나 한발 정도가 강해지면 이러한 성장도 감소한다 (Ludlow and Muchow, 1990). Wasaya et al. (2018)는 직경이 더 작고 잔뿌리의 길이가 길수록 한발시 수분 흡수에 더 유리하다고 밝혔다. 이와 같이 뿌리는 토양 수분 상태에 따라 생육과 형태적 특성의 변화가 큰 것으로 판단된다.

특정 대상의 공간 분포 분석은 상대적으로 간단히 대상의 구조를 특정 지을 수 있는 효과적인 분석 방법이다. 여러 공간 분포 분석 방법들 중 프랙탈 디멘션 (fractal dimension, Db)과 라쿠나리티 (lacunarity, Lac)는 여러 연구들에서 대상물들의 다양한 구조 특성화를 성공적으로 분석한 것으로 나타났다 (Pozdnyakova et al., 2005; Chun et al., 2008). Db는 기하학적 대상의 다양성을 측정하는데 효과적이고 Lac는 대상의 반복성 (같은 구조의 반복성)을 측정한다 (Smith et al., 1996). 프랙탈 분석 방법은 여러 분야에 적용되어 왔다: 조경학 (Burrough, 1981; Shi et al., 2018; Zuo, 2018), 분자학 (Rubini et al., 2018), 토양학 (Zeng et al., 1996; Gimenez et al., 2002), 식물학 (Bruno et al., 2008; Chandra and Rani, 2009; Jiang et al., 2009). 프랙탈 분석 방법은 또한 식물 뿌리 구조를 분석하고 정량화하는데 적용되었다 (Tatsumi et al., 1989; Fitter and Stickland, 1992; Eghball et al., 1993; Hauck et al., 2015). Wang et al. (2009)은 한발에 의한 벼 뿌리의 변화를 프랙탈 분석으로 조사하였다. 그 결과 프랙탈 분석 방법은 한발로 인한 뿌리 구조적 변화를 반영하는데 매우 효과적이라고 결론지었다. Ketipearachchi and Tatsumi (2000)는 두과작물의 뿌리 구조를 분석하기 위해 프랙탈 분석방법을 사용하였고 프랙탈 분석방법은 품종간 뿌리 구조 차이를 정량화 하는데 매우 유용한 방법이 될 것이라고 주장하였다.

콩과 팥은 우리나라의 대표적인 두과 작물로서 단백질을 공급하는 주요 식량자원으로 널리 사용되고 있다 (Kim et al., 1988). 최근 기후변화의 영향으로 인하여 우리나라에서도 겨울부터 봄철까지 만성적인 가뭄 횟수가 증가하고 있다. 이러한 봄철에 발생하는 가뭄은 봄에 파종하는 작물들의 발아와 생육에 심각한 피해를 주고, 작물 수량을 감소시키는 요인이다 (Lee et al., 2013). 콩과 팥의 파종은 주로 6월이며 이때 가뭄의 영향으로 토양 수분이 낮은 경우 작물 뿌리 생육에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다.

Jung et al. (2011)은 배수불량 논에서 콩의 수분스트레스 반응을 분석하였고 Chun et al. (2016)은 팥의 11 품종을 논 토양에서 재배하여 토양 수분 스트레스에 따른 품종 간 수량 차이를 분석하였다. 기존 연구 결과들에 따르면 콩과 팥은 토양 수분 함량 차이에 따라 생육과 수량 차이가 확연히 나타났고 수분 스트레스에 민감한 반응을 나타낸 것으로 나타났다. 이와 같은 결과들을 바탕으로 콩과 팥의 뿌리 발달 형태 또한 토양의 수분함량 차이에 따라 나타날 것이고 이에 따른 콩과 팥의 토양 수분 함량에 따른 뿌리 생육 차이를 연구 분석해야 할 필요가 있다.

본 연구는 작물 생육 초기 토양 수분 함량에 따라 뿌리 생육에 영향을 줄 것이라 가정하였다. 따라서 본 연구 목적은

콩과 팥 파종 시 토양 수분 함량을 다르게 하여 뿌리 생육 차이를 형태적, 공간 분포적 특성을 분석하고자 하였다.

Materials and Methods

Soil and crop 콩, 팥의 뿌리 분석 실험은 국립식량과학원 남부작물부 부내 온실에서 2019년 6월부터 8월까지 이루어졌다. 콩과 팥의 품종은 각각 대원과 아라리였다. 실험에 사용된 토양은 시판용 상토로 바로커 (원예용)였고 토양의 구성성분은 다음과 같았다, 코코피트 65 - 70%, 피트모스 8 - 12%, 질석 10 - 14%, 제올라이트 3 - 5%, 펄 라이트 5 - 8%, 수용성비료, 항균물질, 습윤제 외 (서울바이오). 토양의 물리성과 화학성은 Table 1에 나타나있다. 토양 수분 함량은 중량 포화도를 측정하여 투입할 수분량을 결정하였다 (Table 2).

Table 1. Chemical and physical properties of soil (turfce).

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

Table 2. Amounts of water added to each box in order to reach moisture contents with 1 kg of soil.

Soil moisture content (%)	Volume of water added (ℓ)
100	0.93
70	0.68
60	0.56
50	0.46
40	0.37
30	0.28

Experimental test box 뿌리 관찰을 위해서 투명한 플라스틱 직사각형 박스가 제작되었다 (Fig. 1). 박스 크기는 40 × 20 × 4 cm이었다. 이 박스에 토양을 1 kg씩 같은 양을 채운 후 물을 토양 수분 30, 40, 50, 60, 70, 100%에 맞게 투여하였다 (Table 2). 임의 5 반복법으로 박스를 토양수분별로 만들었고 대조구로 파종 시부터 충분한 물을 투여하여

Fig. 1. A diagram of the test box to scan roots.

재배기간 동안 토양수분이 25% 이상을 유지하는 박스 5개를 만들었다. 콩과 팥 종자는 토양표면에서 1 - 2 cm 깊이에 심어졌고 대조구 외의 박스들은 추가 수분 투여가 없었다. 파종 후 모든 박스들은 2일 간격으로 20일 동안 스캐너 (Epson Expression 1200 XL)로 스캔 되었다. 대조구와 토양수분 100%의 작물은 20일 전 후로 뿌리 변화가 나타나지 않아서 20일까지 결과를 나타냈고 토양수분 70%이하의 작물은 18일 전후로 시드름과 고사가 진행되어 20일까지 측정하였다 (Fig. 2). 토양 내 뿌리 형태를 추출하기 위하여 뿌리 추출 프로그램을 개발하였다. 스캔 이미지들은 뿌리 추출 프로그램을 통하여 뿌리 이미지를 얻고 뿌리 길이, 뿌리 수, 표면적을 구하였다. 뿌리 깊이는 스캔하기 전에 뿌리가 관찰되는 맨 끝점에서 토양 표면까지의 길이로 측정하였다.

a. Soybean

Scanned Image
Root extracted image
DAP	2	6	10	14	18

b. Adzuki bean

Scanned Image
Root extracted image
DAP	2	6	10	14	18

Fig. 2. Examples of root extract results from scanned root images with no water stress after planting (DAP- Days after planting): a-Soybean and b-Adzuki bean.

Fractal analysis 뿌리 이미지는 Image J (National Institutes of Health, Bethesda, MD, US) 프로그램을 통하여 프랙탈 디멘션 (fractal dimension, Db)과 라쿠나리티 (Lacunarity, Lac)를 구하였다. Db와 Lac는 박스-카운팅 (box-counting) 방법으로 계산하였다. 뿌리의 Db는 뿌리를 포함하는 박스 수와 박스 크기의 선형 관계로 계산하였다 (Gimenez et al., 1997).

$$N(C) = KC^{-Db} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, $N(C)$ 는 뿌리를 포함한 박스의 수이고 C 는 박스 크기이다. K 는 길이 단위 계수로 1로 가정하였다.

Lac는 다른 크기의 박스들 내에서 뿌리를 포함하는 박스 수들의 분산값을 계산하였다.

$$Lac = (\sigma/\mu)^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 Lac는 여러 박스크기들에서 Lac 값을 나타내는 것이고, σ 는 박스 사이즈 c 에서 뿌리를 포함한 박스 수의 표준 편차값과 μ 는 평균값이다.

모든 박스들 내부에 Watchdog SM 100 측정기 (Spectrum Technologies, Plainfield, Illinois, USA)를 설치하였다. 센서는 15 cm 깊이에서 한 시간마다 토양 수분을 측정하여 데이터 로거 (Watchdog 1000 Data Logger, Spectrum Technologies, Plainfield, Illinois, USA)에 저장하였다

통계 분석은 SAS program (SAS institute, v.9.2, Cary, NC, USA)을 사용하여 ANOVA (Analysis of Variance)와 상관 분석 (Correlation analysis)을 95% 유의수준에서 분석하였다.

Results and Discussion

토양 수분 콩, 팥의 재배기간 동안 콩, 팥의 토양 수분은 토양 센서로 1시간마다 측정되었고 값은 Fig. 3과 같다. 대조구는 파종 후 25% 이상을 유지하도록 수분을 보충하였다. 토양 수분 100%의 박스는 초기 토양 수분값은 $41.4 \pm$

Fig. 3. Distributions of soil moisture contents from test boxes. DAP means days after planting.

5.16%이었다. 토양 수분 70% 박스는 $27.5 \pm 5.08\%$, 60% 박스는 $25.5 \pm 6.76\%$, 50% 박스는 $22.1 \pm 5.11\%$, 40% 박스는 $18.2 \pm 2.27\%$, 30% 박스는 $14.0 \pm 4.10\%$ 이었다. 이후 토양 수분은 증발과 뿌리의 수분 흡수에 따른 토양 수분 감소량은 차이가 있었다. 일수가 증가할수록 토양 수분이 감소하여 파종 후 20일인 경우 토양 수분 100%는 $7.2 \pm 3.01\%$, 토양 수분 30%는 $0.1 \pm 2.31\%$ 를 보였다. 토양 수분 30 %는 파종 후 10일 이후부터 10% 이하의 토양 수분을 보였고 토양 수분 40%는 14일 이후로 10% 이하의 토양 수분 값을 보였다. 토양 수분 100%와 70%는 파종 후 18일까지 토양 수분 10% 이상의 값을 유지하였다.

뿌리의 형태 측정결과 콩과 팥은 파종 후 2일 간격으로 스캔 된 이미지들에서 토양 수분에 따른 뿌리 길이, 뿌리 수, 표면적, 뿌리 깊이를 측정하였다(Fig. 4). 파종 후 6일까지 콩 뿌리 길이, 뿌리 수, 표면적, 깊이에서 토양 수분에 따른 차이가 나타나지 않았다(Fig. 5, $p > 0.05$). 토양 수분 70%를 제외한 모든 토양 수분의 콩 뿌리 길이는 파종 후 꾸준히 증가하다가 파종 후 14일부터 변화가 나타나지 않았다. 파종 후 8일부터 대조구와 토양 수분 100%가 다른 토양 수분의 뿌리보다 길이와 깊이에서 가장 큰 값을 보였다. 특히 토양 수분 100%의 뿌리는 길이, 뿌리 수, 표면적, 깊이에서 다른 토양 수분의 뿌리들보다 월등히 큰 값을 보였다($p < 0.05$). 반면 파종 후 8일부터 토양 수분 30%의 뿌리 길이와 깊이는 다른 토양 수분의 뿌리들보다 가장 작은 값을 보였다. 이러한 경향을 파종 후 20일까지 이어졌다. 파종 후 20일의 뿌리 길이는 토양 수분 100%인 경우 34.95 ± 1.15 cm, 대조구는 32.73 ± 6.67 cm, 70%는 32.14 ± 2.65 cm로 가장 길었고 토양 수분 30%는 12.49 ± 3.82 cm로 가장 작았다($p = 0.00$). 이외 토양 수분의 뿌리 길이들은 통계적 유의성 없이 최고값과 최저값 사이에 분포하였다. 뿌리 수와 표면적은 대조구와 토양수분 100%를 제외하고 다른 토양수분의 뿌리들에서 차이가 나타나지 않았다. 대조구와 토양수분 100%는 파종 후 20일까지 지속적으로 증가하여 다른 토양 수분의 뿌리들보다 더 많은 뿌리 수와 더 큰 표면적 값을 나타냈다. 그 외 토양 수분의 뿌리들은 12일까지 증가세를

a. Soybean

Root Image
Soil moisture content (%)	30	40	50	60	70	100	No stress

b. Adzuki bean

Root Image
Soil moisture content (%)	30	40	50	60	70	100	No stress

Fig. 4. Examples of root extracted images with different soil water contents on 20th day after planting: a-Soybean and b-Adzuki bean. No stress means the test boxes with no water stress.

Fig. 5. Results of morphological analyses from soybean root images at various soil moisture contents after planting (DAP means days after planting): a- Root length, b- Number of roots, c- Surface area of roots and d- Root depth from soil surface.

보이다 이후에 감소하는 양상을 보였다. 토양 수분 50% 이하의 콩 뿌리들은 파종 후 16일 전후로 고사를 하였고 18일에는 모두 고사를 나타냈다.

팔 뿌리 길이는 콩과 비슷하게 파종 후 8일까지 토양 수분간 차이는 나타나지 않았다 (Fig. 6). 파종 후 8일 이후부터 대조구와 토양 수분 100%가 다른 토양 수분의 뿌리들보다 더 큰 길이와 깊이 값을 보였다. 그러나 파종 후 20일에 뿌리 길이가 토양 수분 100%에서 32.40 ± 3.23 cm로 가장 큰 값을 보였다 ($p = 0.02$). 토양 수분 30%는 8.71 ± 2.65 cm로 뿌리 길이가 가장 작았다. 반면 다른 토양 수분의 팔 뿌리들은 길이에서 크게 차이를 나타내지 않았다. 대조구, 토양 수분 100%, 70%는 파종 후 20일까지 꾸준한 증가세를 보였다. 반면 토양 수분 60%, 50%, 40%, 30%는 파종 후 16일 이후로 변화가 없거나 감소하는 경향을 보였다. 뿌리 수와 표면적에서도 대조구와 토양 수분 100%가 높은 값을 보였고 다른 토양 수분의 뿌리들은 통계적 차이를 보이지 않았다. 대조구의 팔을 제외한 모든 토양 수분의 뿌리 수와 표면적은 파종 후 공통적으로 증가를 하다가 파종 후 18일 이후에 감소를 하는 경향을 보였다. 토양 수분 60% 이하 팔 뿌리는 16일부터 시드름과 고사를 하기 시작하여 콩과 비슷하게 18일 전후로 모두 고사하였다.

콩과 팔 뿌리 길이를 비교한 결과 대조구와 토양 수분 100%에서 두 작물 뿌리 길이는 파종 후 12일까지 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). 대조구와 토양 수분 100%인 경우 파종 후 12일 이후부터 콩 뿌리 길이가 팔 뿌리 길이보다 더 큰 값을 나타냈다. 토양 수분 30%와 40%는 파종 후 6일까지 콩 뿌리 길이가 더 큰 값을 보이거나 이와 같은 차이는 6일 이후로 나타나지 않았다. 토양 수분 70%, 60%, 50%는 파종 후 12일까지 콩과 팔 뿌리 길이에 차이가 나타나지 않았고 파종 후 12일 이후부터 콩 뿌리 길이가 팔 뿌리 길이보다 더 높은 값을 나타냈다. 대조구와 토양 수분 100% 콩, 팔 뿌리 수와 표면적은 파종 후 20일까지 크게 차이가 나타나지 않았다. 반면 토양 수분 30, 40, 50, 60, 70% 뿌리 수와 표면적에서 콩과 팔 사이에 차이가 나타났다. 파종 후 12일 이후부터 이 토양 수분의 팔 뿌리는 콩 뿌리보다 더 큰 뿌리

Fig. 6. Results of morphological analyses from adzuki bean root images at various soil moisture contents after planting (DAP means days after planting): a-Root length, b- Number of roots, c- Surface area of roots and d- Root depth from soil surface.

수와 표면적 값들을 보였다.

뿌리의 공간분포도 측정결과 모든 뿌리 이미지들은 프랙탈 분석을 하였다. 프랙탈 디멘션 (Db)와 라쿠나리티티 (Lac) 값들은 (Eq. 1), (Eq. 2) 방법으로 계산되었다. Db는 뿌리가 있는 박스 수와 박스 크기의 선형관계의 기울기 값으로 정해진다. 여기서 선형관계의 r^2 이 0.9보다 낮은 경우 선형관계가 성립이 되지 않고 프랙탈 구조를 갖고 있지 않다고 정의되어 있다 (Klinkenberg, 1994). 파종 후 6일전까지 Db의 r^2 값이 0.9보다 낮게 나왔고 이는 6일까지 뿌리의 구조가 프랙탈 구조를 이루지 못한 것으로 판단된다 (Fig. 7). 이에 따라 Db와 Lac값은 6일 이후부터 계산되었다. 콩과 팥의 Db값은 파종 후 8일전까지 토양 수분 차이에 따른 뿌리 구조의 차이는 나타나지 않았다 (Figs. 8, 9). 콩의 뿌리

Fig. 7. Example of fractal dimension results from root images at various days after planting (DAP): a-DAP 4 (4th day after planting) and b- DAP 10 (10th day after planting).

리는 8일부터 대조구와 토양 수분 100%에서 더 큰 값을 나타내기 시작하였다 ($p = 0.00$). 대조구와 토양 수분 100%는 파종 후 20일까지 다른 토양 수분의 뿌리들보다 1.7 ± 0.12 , 1.50 ± 0.04 로 다른 토양 수분의 Db값 $1.32 \pm 0.05 - 1.45 \pm 0.10$ 들보다 확연히 높았다. Db값과 달리 Lac값들은 파종 후 일수가 지나도 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 모든 Lac값들은 파종 후 14일까지 크게 차이가 나지 않았다 ($p > 0.60$). 파종 후 14일부터 토양 수분 100%, 대조구, 토양 수분 70%가 0.72 ± 0.20 , 0.83 ± 0.21 로 더 큰 Lac 값을 나타냈고 토양 수분 50, 30%는 가장 작은 값을 나타냈다 ($p = 0.01$).

팔의 Db값들을 분석한 결과 파종 후 10일부터 대조구와 토양 수분 100%의 값이 다른 토양 수분들의 Db값들보다 더 높았다 (Fig. 8, $p < 0.02$). 콩 뿌리의 Db값과 비슷하게 대조구와 토양 수분 100%는 생육기간 내내 더 높은 Db값을 유지하고 다른 토양 수분의 뿌리는 차이가 나지 않는 Db값들을 보였다. 대조구와 토양 수분 100%의 Db값은 파종 후 6일부터 1.18 ± 0.34 , 1.15 ± 0.01 값을 보이다 파종 후 20일에 1.28 ± 0.33 , 1.33 ± 0.07 로 증가하는 경향을 보였다. 팔의 경우 대조구와 토양 수분 100%인 경우를 제외한 나머지 토양 수분의 뿌리에서 Db값의 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). Lac값은 파종 후 12일부터 토양 수분 100%가 Lac값 0.88 ± 0.18 로 다른 토양수분의 뿌리들보다 더 높은 Lac 값을 보였다 ($p = 0.01$). 파종 후 20일에는 토양 수분 100%가 다른 토양수분의 뿌리들보다 더 높은 Lac값들은 나타났다.

콩과 팔 뿌리의 Db값을 비교한 결과 파종 후 6일부터 차이를 보였다. 대조구와 토양 100% 콩의 Db값이 6일부터 20일까지 재배기간 내내 더 높은 Db값을 보였다. 반면 Lac값은 파종 후 6일까지 팔이 확연히 높은 값을 보이다가 이후는 콩의 Lac값과 큰 차이를 보이지 않았다 ($p > 0.05$). 토양수분 60, 50, 40, 30%에서 콩 뿌리의 Db와 Lac값들은 파종 12 일 후부터 확연히 팔 뿌리의 프랙탈 분석 값들보다 더 큰 값들을 보였다 ($p < 0.05$).

Fig. 8. Results of fractal analyses from soybean root images at various soil moisture contents after planting (DAP means days after planting): a-Fractal dimension (Db) and b- Lacunarity (Lac).

Fig. 9. Results of fractal analyses from adzuki bean root images at various soil moisture contents after planting (DAP means days after planting): a-Fractal dimension (Db) and b- Lacunarity (Lac).

Discussion

본 연구는 다른 토양 수분 조건에서 콩과 팥 뿌리의 형태학적 분석을 통하여 뿌리 구조를 정량화하였다. 이번 연구에서는 파종 시 토양 수분을 다양하게 설정하여 초기 뿌리 생육에 미치는 영향을 조사하였다. 콩과 팥 뿌리 모두 토양 수분 함량에 따른 생육 차이를 보였다. 콩과 팥 뿌리 모두 한발 스트레스가 없는 대조구와 파종 시 토양수분 100%인 경우가 뿌리 생육이 가장 좋았다. 뿌리 길이, 깊이, 뿌리 수와 표면적에서 모두 최고값을 보였다. 토양 수분이 감소함에 따라 콩과 팥의 뿌리들은 현저히 저조한 뿌리 생육을 나타냈다. 뿌리 깊이의 경우 토양 수분 60%까지 크게 차이가 나지 않게 콩 뿌리가 발달하였다. 반면 팥은 대조구와 토양 수분 100%를 제외하고 다른 토양 수분들은 비슷한 생육을 보였다. 이는 팥 뿌리는 파종 시 토양 수분이 70% 이하인 경우 한발 스트레스에 의해 생육이 감소하는 것으로 판단된다. Chun et al. (2018)은 콩과 팥의 습해 실험에서 콩이 팥보다 환경 스트레스에 덜 민감하다고 결론지었다. 한발 스트레스인 경우도 팥은 수분이 약간 감소하여도 뿌리 생육에 영향을 받았고 콩은 60%까지는 뿌리 길이와 같은 생육에는 영향을 크게 받지 않은 것으로 보인다.

많은 연구들은 작물 뿌리가 한발 조건 시 더 깊은 토양 속으로 향하여 뿌리 길이가 더 길다고 밝혔다 (Benjamin and Nielsen, 2006; Kashiwagi et al., 2006; Cai et al., 2017). 이와 같은 연구들은 모두 한발 조건을 파종 후 2주후에 적용하여 조사한 결과들이다. 본 연구는 파종 때부터 한발 조건을 설정하여 뿌리 생육 상황을 조사하였다. Guo et al. (2013)은 밀의 발아율, 뿌리 발달 등을 파종 때부터 다른 토양 수분상태에서 조사하였다. 그 결과 밀 뿌리는 파종 시 한발 스트레스가 있으면 생육을 제한하는 요소라고 결론지었다. Sadeghian and Yavari (2004)는 파종과 초기 생육 때 한발 스트레스를 받으면 한발 스트레스와 뿌리 길이가 반비례한다는 것을 밝혔다. 본 연구에서도 한발 스트레스가 강할수록 뿌리 생육이 더 좋지 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서 콩과 팥은 토양 수분이 증가할수록 Db와 Lac 값들이 증가하였다. 작물에 따라 토양 수분에 따라 정도의 차이는 있었으나 한발 스트레스가 약할수록 Db와 Lac 값들이 증가하였다. 두 작물 모두 토양 수분 70% 이하에서는 토양 수분 차이와 상관없이 비슷한 Db와 Lac 값들을 보였다. Db값의 증가는 뿌리가 더 복잡한 구조를 발달한다는 것을 의미하고 이에 따라 토양 수분이 70% 이상의 경우에는 뿌리 구조 발달이 더 이루어진것으로 판단된다. 즉 뿌리가 더 다양한 방향으로 뻗어 나갔고 더 많은 박스들에서 뿌리가 관찰되었다는 것을 의미한다. 반면 Lac는 여러 방향들에서 같은 양의 뿌리가 분포할수록 값이 감소한다. 토양 수분이 높을수록 Lac값이 증가한 것은 뿌리가 한 방향으로 증가한 것이 더 많았다는 것을 뜻한다. 즉 뿌리 주근의 발달이 더 이루어졌다는 것을 뜻한다. 한발 스트레스가 클수록 Lac값들이 감소하는데 이는 뿌리가 여러방향으로 균등하게 분포해 나갔다는 것을 뜻한다. 즉 주근 발달이 상대적으로 부진하였고 잔뿌리의 발달이 상대적으로 좀 더 발달한 것으로 판단된다. Wang et al. (2009)은 한발 조건하에 벼 뿌리의 Db를 계산하였고 그 결과 한발 조건이 강해질수록 Db값들이 더 감소하였다. Pierce et al. (2012)은 토양 수분이 증가할수록 작물 뿌리의 Db값들이 증가하고 반면, Lac값들은 감소한다고 하였다. 이런 연구들은 토양 수분이 증가할수록 뿌리 길이가 증가하고 뿌리 구조의 다양성이 증가한다고 공통적으로 결론지었다. 본 연구에서 콩과 팥 모두 토양 수분이 많을수록 뿌리 주근이 더 발달하면서 구조의 다양성이 증가한 것으로 판단된다. 특히 팥의 Lac값들이 콩의 Lac값들보다 더 작은 값을 갖는 것은 팥에서 잔뿌리의 발달이 더 많았다는 것으로 보여진다.

뿌리의 형태적 측정값들 (길이, 깊이, 뿌리 수, 표면적)과 프랙탈 분석값들 (Db, Lac) 간의 상관관계를 조사하였다. 그 결과 콩의 Db값은 뿌리 길이와 깊이, 표면적, 뿌리 수 값들과 높은 상관관계를 보였고 Lac값은 뿌리 수와 표면적과 상대적으로 더 높은 상관관계를 보였다 (Table 3). 반면 팥은 Db와 Lac값 모두 뿌리 길이, 깊이, 표면적과 상대적으로

높은 상관관계를 보였다. 이와 같은 결과는 콩의 뿌리 구조의 다양성은 주로 주근의 발달로 이루어진 것으로 해석된다. Lac값이 콩 뿌리 수와 표면적과 높은 상관관계를 보임으로 Lac값은 콩 잔뿌리의 발달 영향을 받은 것으로 판단된다. 반면 팔은 Db와 Lac값이 같은 변수들과 상관관계를 보임으로 주근과 잔뿌리의 발달에 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다.

Conclusions

결론적으로 파종 시 토양 수분의 감소는 콩과 팥 뿌리 생육에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 콩은 정상조건에서 생육 초기 주근의 발달이 잔뿌리의 발달보다 더 활발하였다. 그러므로 생육 초기 한발 스트레스가 강할수록 콩의 주근 발달이 더디어지면서 잔뿌리의 발달도 감소되었다. 반면 팥은 한발 스트레스가 증가할수록 콩 뿌리와 비슷하게 주근의 발달은 감소하였으나 잔뿌리의 발달은 영향을 덜 받았다. 이와 같은 결론은 콩과 팥이 같은 두과작물이나 뿌리 발달 양상이 매우 다르고 초기 토양 수분 함량에 따른 생육 또한 매우 다르다는 것을 보인다. 뿌리 생육을 정량화하기 위해 프랙탈 분석을 통해서 콩과 팥 뿌리 구조를 정량화하고 구조적 차이를 비교하였다. 그 결과 프랙탈 분석은 잔뿌리 발달에 따른 구조의 변화를 판별하기에 매우 유용한 방법으로 판단된다. 본 연구결과는 앞으로 콩과 팥 재배 시 물 관리 방법을 뿌리 생육에 맞게 설정하여 농민의 한발 피해를 최소화 하는데 도움을 줄 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호: PJ013482012019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Bengough, A.G., B.M. McKenzie, P.D. Hallett, and T.A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62(1):59-68.
- Benjamin, J.G. and D.C. Nielsen. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Res.* 97(2-3):248-253.
- Bruno, O.M., R. de Oliveria-Plotze, M. Falvo, and M. de Castro. 2008. Fractal dimension applied to plant identification. *Information Sci.* 178(12):2722-2733.
- Burrough, P.A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature.* 294:240-242.
- Cai, G., J. Vanderborght, V. Covreur, C.M. Mboh, and H. Vereecken. 2017. Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation. *Vad. Zone J.* 17(1):1-21.
- Chandra, M. and M. Rani. 2009. Categorization of fractal plants. *Chaos, Solitons & Fractals.* 41(3):1442-1447.
- Chun, H.C., D. Gimenez, and S.W. Yoon. 2008. Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: aggregate size and soil management effects. *Geoderma.* 146(1-2):83-93.
- 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.
- 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.
- Eghball, B., J.R. Settimi, J.W. Maranville, and A.M. Parkhurst. 1993. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. Agr. Journal. 85:287-289.
- Fitter, A.H. and T.R. Stickland. 1992. Fractal characterization of root system architecture. Func. Eco. 6(6):632-635.
- Fukai, S. and M. Cooper. 1995. Development of drought-resistant cultivars using physiomorphological traits in rice. Field Crop. Res. 40(2):67-86.
- Gimenez, D., J.L. Karmon, A. Posadas, and R.K. Shaw. 2002. Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates. Soil. Til. Res. 64(1-2):165-172.
- Guo, R., W.P. Hao, D.Z. Gong, X.L. Zhong, and F.X. Gu. 2013. Effects of water stress on germination and growth of wheat, photosynthetic efficiency and accumulation of metabolites. Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment, (Ed.) M. C. H. Soriano, InTech, DOI: 10.5772/51205.
- Hauck, A., J. Novais, T.E. Grift, and M.O. Bohn. 2015. Characterization of mature maize (*Zea mays* L.) root system architecture and complexity in a diverse set of Ex-PVP inbreds and hybrids. SpringerPlus. 4:424.
- Jiang, W., C. Ji, and H. Zhu. 2009. Fractal study on plant classification and identification. International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications. pp. 434-438.
- Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) Limitations to efficient water use in crop production. ASA. Madison, WI.
- 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.
- Kashiwagi, J., L. Krishnamurthy, J.H. Crouch, and R. Serraj. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought stress. Field Crop. Res. 95(2-3):171-181.
- Ketipearachchi, K.W. and J. Tatsumi. 2000. Local fractal dimensions and multifractal analysis of the root system of legumes. Plant Prod. Sci. 3(3):289-295.
- Kim, J.G., S.K. Kim, and J.S. Lee. 1988. Fatty acid composition and electrophoretic patterns of protein of Korean soybeans. Korean J. Food Sci. Technol. 20(2):263-271.
- Klinkenberg, B. 1994. A reviews of methods used to determine the fractal dimension of linear features. Math. Geo. 26(1):23-46.
- Lee, H.L., K.H. Park, M.H. Lee, H.T. Kim, W.D. Seo, J.Y. Kim, I.Y. Baek, D.S. Jang, and T.J. Ha. 2013. Identification, characterization, and quantification of phenolic compounds in the antioxidant activity-containing fraction from the seeds of Korean perilla (*perilla frutescens*) cultivars. Food Chemistry. 136:843-852.
- 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.
- Li, K.Y., R.D. Jong, M.T. Coe, and N. Ramankutty. 2006. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. Earth Inter. 10:1-22.
- Ludlow, M.M. and R.C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. Adv. Agron. 43:107-153.
- Malik, R.S., J.S. Dhankar, and N.C. Turner. 1979. Influence of soil water deficits on root growth and cotton seedlings. Plant Soil. 53:109-115.
- Moran, J.F., R. Klucas, R. Grayer, J. Abian, and M. Becana. 1997. Complexes of iron with phenolic compounds from soybean nodules and other legume tissues. Free Rad. Biol. Medi. 22(5):861-870.
- Nielsen, K.L., J.P. Lynch, and H.N. Weiss. 1997. Fractal geometry of bean root systems: correlations between spatial and fractal dimension. American J. Bot. 84(1):26-33.

- Osonubi, O. 1985. Responses of cowpeas (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) to progressive soil drought. *Oecologia*. 66(4):554-557.
- Pierce, S. M. B. Koontz, S. R. Pezeshki, and R. Kroger. 2012. Response of *Salix nigra* [Marsh.] cutting to horizontal asymmetry in soil saturation. *Environ. Experi. Botany*. 87:137-147.
- Pozdnyakova, L., D. Gimenez, and P.V. Oudemans. 2005. Spatial analysis of cranberry yield at three scales. *Agron. J.* 97(1):49-57.
- Rubini, S., S.J. Bharathi, B. Latha, and A. Seethalakshmy. Estimation of fractal dimension in the analysis of single abnormal gene structure. *Taga J.* 14:775-751.
- Sadeghian, S.Y. and N. Yavari. 2004. Effect of water-deficit stress on germination and early seedling growth in sugar beet. *J. Agr. Crop Sci.* 190:138-144.
- Shim, K.B., C.D. Hwang, S.B. Pae, and M.H. Lee. 2010. Comparison of physiochemical characters of sesame seeds according to the different producing origin. *J. Korean Soc. Inter. Agr.* 29(4):350-355.
- Smith Jr, T.G., G.D. Lange, and W.B. Marks. 1996. Fractal methods and results in cellular morphology-dimensions, lacunarity and multifractals. *J. Neur. Meth.* 69(2):123-136.
- Tatsumi, J., A. Yamauchi, and Y. Kono. 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Annals of Botany*. 64(5):499-503.
- Taylor, H.M. 1983. Managing root systems for efficient water use: An overview. pp. 87-113. In H.M. Taylor, W.R. Wang, H., J. Siopongco, L. Wade, and A. Yamauchi. 2009. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress. *Envir. Experi. Bot.* 65(2-3):338-344.
- Wasaya, A., X. Zhang, Q. Fang, and Z. Yan. 2018. Root phenotyping for drought tolerance: A review. *Agronomy*. 8(11):241-251.
- Whalley, W.R., A.G. Bengough, and A.R. Dexter. 1998. Water stress induced by PEG decreases the maximum growth pressure of the roots of pea seedlings. *J. Experi. Bot.* 49(327):1689-1694.
- Wilson, J.B. 1988. A review of evidence on the control of shoot: root ratio, in relation to models. *Annal. Botany*. 61(4):433-449.
- Zeng, Y., R.L. Payton, C.J. Gantzer, and S.H. Anderson. Fractal dimension and lacunarity of bulk density determined with x-ray computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60(6):1718-1724.
- Zhang, J. and W.J. Davies. 1989. Absciscic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure the water status of the soil. *Plant, Cell & Environment*. 12(1):73-81.
- Zuo, R. 2018. A fractal measure of mass transfer in fluid-rock interaction. *Ore Geol. Rev.* 95:569-574.