

Interspecific Differences of the Capacities on Excessive Soil Moisture Stress for Upland Crops in Converted Paddy Field

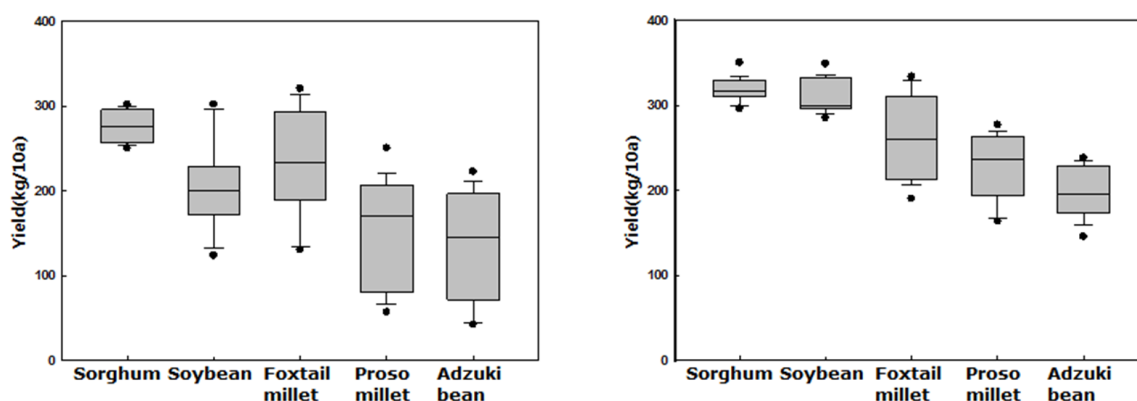
Ki-Yuol Jung*, Young-Dae Choi, Hyen-Chung Chun, Sanghun Lee, and Hang-Won Kang

Crop Production Technology Research Division, NICS, RDA, Milyang, 50424, Rep. of Korea

(Received: January 27 2016, Revised: April 25 2016, Accepted: April 26 2016)

The interspecific estimation for tolerance capacities of upland crop species to excessive soil water stress in paddy field is significant in agricultural practices. Most of upland crops can be damaged by either excessive soil water or capillary rise of the water table during rainy season in paddy fields. The major objective of this study was to evaluate water stress of upland crops under different drainage classes in converted paddy field. This experiment was carried out in poorly drained soil (PDS) and imperfectly drained soil (IDS) of alluvial sloping area located at Toero-ri, Bubuk-myeon, Miryang-si, Gyeongsangnam-do. The soil was Gagog series, which was a member of the fine silty, mixed, nonacid, mesic family of Aeric Endoaquepts (Low Humic-Gley soils). Two drainage methods, namely under Open ditch drainage methods (ODM) and, Closed pipe drainage methods (PDM) were installed within 1-m position at the lower edge of the upper paddy fields. The results showed that sum of excess water days (SWD₃₀), which was used to represent the moisture stress index, was 42 days (the lowest) in the PDM compared with 110 days in the ODM. Most of upland crops were more susceptible to excessive soil water during panicle initial stage on more PDS than on IDS. Yield of upland crops in the PDM was continuously increased by the rate of 15.1% on sorghum, 15.4% foxtail millet, 53.6% proso millet, 49.6% soybean and 47.9% adzuki bean as compared in the ODM. The capacity for tolerance by excessive soil water based on yield of each upland crop in the poorly drained sloping paddy fields was the order of sorghum, soybean, foxtail millet, proso millet and adzuki bean. Therefore, Sorghum is relatively tolerant to excessive soil water conditions and, may be grown successfully in converted paddy field.

Key words: Upland crop, Excessive water stress, Stress Day Index, Paddy field



Yield variation of upland crops under water stress in converted Poorly drained paddy field; (A) ODM (Open ditch drainage methods) (B) PDM (Closed pipe drainage methods).

*Corresponding author: Phone: +821025098358, Fax: +82553523059, E-mail: jungky@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ00872303)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

최근 산업화에 따른 노동력 감소와 농산물 수입개방의 가속 등 농업·농촌을 둘러싼 여건 변화로 농경지 이용률은 지속적으로 감소하여 1970년의 142%에서 2013년 101%까지 하락되었고 곡물 자급률은 23% (2013) 이하로 매년 감소되고 있다 (MAFRA, 2014). 논에서 밭작물의 재배면적이 증가하고 있으나 논은 대체로 평탄하여 물관리가 용이하지만 지하수위가 높고 6월~7월 장마기를 경과할 때 습해를 야기해 안정적 생산에 제한요인으로 작용하게 된다 (Choi, 1994; Lee et al., 1993). 또한 대부분의 밭작물은 내습성이 매우 약한 특성을 갖고 있어 논에 재배할 경우 습해로 수량 감소가 우려되므로 특별한 수분관리가 필요하다. 논에서 전환한 초기 전환 밭에서 작물을 재배할 때의 문제점은 과습으로 인한 산소공급의 부족이며 (Lee et al., 1994), 과습 토양의 지하수위는 작물 생산성을 제한하는 중요한 요인이 되고 있다. 배수가 불량한 논에서 토양수분이 과다하게 되면 산소가 부족하게 되고 토양환원에 의한 유해 물질의 발생 등으로 미생물의 활동이 제한되어 작물에 스트레스를 주게 된다고 알려져 있다 (Box, 1991; Cannell and Jackson, 1981; Hiller, 1976; Plamenac, 1988, Wesseling, 1974;). 또한 토양의 과습에 의한 급격한 토양산소의 감소는 뿌리 생육을 저해하는 주요한 요인이 된다고 하였으며 (Box, 1991; Cannell and Jackson, 1981), Huck (1970)은 혐기적인 조건에서 5시간 동안 과습으로 포화되게 되면 콩 뿌리 성장점은 완전히 고사된다고 하였고, 6시간 동안 콩을 과습 조건에서 산소를 1~2%로 처리했을 때 콩의 수량은 약 25% 정도 감소된다고 보고하였다. Kono et al. (1987)은 주요 작물의 과습에 대한 평가를 통해 내습성 정도를 네 개의 등급으로 분류하였다. 내습에 가장 강한 작물은 밭벼 (Upland rice), 울무 (Job' tears)이며, 두 번째로 강한 작물은 손가락 조 (Finger millet), 피 (Japanese barnyard millet)이었으며, 세 번째 등급은 기장 (Proso millet), 진주조 (Pear millet), 수수 (Sorghum) 등이었고 가장 습해에 약한 작물은 조 (Foxtail millet), 옥수수 (Maize) 등 이라고 보고하였다. 또한 Hundal et al. (1984)은 수수의 경우 토양 과습에 대한 내성이 다른 잡곡에 비해 상대적으로 강한 편이며 강우기에도 잘 견디는 작물이라고 보고하였다. 일반적으로 콩의 경우에는 다른 생육시기에 비해 개화기에서 협 형성기 (R2/R3 Stage)에 수분과다 시 스트레스를 가장 많이 받고 수량감소가 크다고 알려져 있다 (Desmond et al., 1985; Evans et al., 1990; Griffin and Saxton, 1988; Scott et al., 1989). 배수가 불량한 논에 배수시설을 설치하고 밀, 옥수수, 콩 등 여러 가지 작물을 재배하면 농경지가 건답화 되어 노동력 및 농작업이 크게 향상되고 작물 생산비가 줄어들고 (Plamenac 1988), 생산량이 증가하고 품질도 개선된다고 하였으며 (Bolton et al., 1982),

암거배수에 의해 옥수수 35%, 콩 35%, 밀 48%, 귀리 47% 목초 27%가 증가되었다고 하였다 (Colwell, 1978). 작물 생육기간 중 수분과잉에 의한 수분 스트레스 반응을 해석하기 위한 여러 가지 모델이 개발되어 왔으며, Hiler (1969)은 수분 스트레스 반응을 정량화하기 위해 지하수위의 누적일수 기준으로 수분 스트레스 지표 (Stress-day Index, SDI)를 제안하였다. 또한 Sieben (1964)은 작물 수분스트레스 지표인 지표에서 30 cm를 초과한 일평균 지하수위 상승빈도 (SEW₃₀, Sum of Excess Water Depth)를 SD factor (Stress Day factor) 값을 계산하여 이용하였다. Skaggs (1978)는 토양수분 과습에 의한 물 수지를 분석하고 배수개선 효과를 평가하기 위해 토양특성, 지하수위, 강우량, 증발산량, 투수량, 표면 유거량, 보수력 등의 요인을 적용한 물관리 모델 (DRAINMOD)을 개발하였으며, Hardjoamidjojo et al. (1982)은 과잉 토양수분 스트레스에 의한 작물의 수량 예측모델을 개발하였다. 최근 논에서 밭작물 재배면적이 계속 증가되고 있는 추세이나 논에서 밭작물 안정적인 생산을 위한 토양수분 관리가 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 밭 전환 논에서 콩, 팥, 조, 기장, 수수 등 주요 밭작물의 안정적인 생산기술을 개발하기 위해 배수개선 효과를 분석하고, 토양 수분조건, 지하수위 조건에 따른 스트레스 반응과 주요 밭작물의 내습성과 생산성을 비교 분석 하였다.

Materials and Methods

시험토양의 특성 시험 토양은 경남 밀양시 부북면 퇴로리에 소재한 경사 7~15%의 곡간 상부에 위치한 토양으로 화강암에서 유래된 산성암 층적층을 모재로 이루어진 토양으로 미농무성 (USDA)의 새로운 분류방법에 의하면 식양계의 회색토로 가곡토 (fine silty, mixed, nonacid, mesic family of Aeric Endoaquepts (Low Humic-Gley soils)에 해당된다. 표토 (Ap층)는 암회갈색 (2.5Y 4/2)의 양토이고 심토1 (Bg층)에는 회색 (5Y 5/1)의 식양토이며 심토2 (BCg층)은 회색 (5Y 5/1)의 사양토로 이루어진 토양이었다 (Table 1). 지형상으로 주변이 산으로 둘러싸여 있어 연중 농경지 눈 독 아래에서 용출수가 유입되어 눈독 밑은 연중 과습하고 눈독 측은 상대적으로 수분이 낮아 필지 내 수분상태가 불균일한 농경지 이었다. 배수 "매우불량"지는 눈독밑에서 눈독방향으로 논의 중앙부분 (10 m) 까지 토양수분인 포화되어 있는 토양이었으며, 배수 "약간불량"지는 눈독 밑 (5 m)까지 포화되어 있는 토양이었다 (Fig. 1).

반베리오그램 (semivariogram)은 일정거리만큼 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지를 나타내는 정량적 지표라 할 수 있으며, 베리오그램의 주요 인자로는 Fig. 3과 같이 문턱값 (Sill), 상관거리 (Separation distance) 너

Table 1. Physical properties of the soil research field before experiment.

Horizon	Depth cm	Bulk density Mg m ⁻³	Three phases			Porosity %	Textural Class
			Solid	Water	Air		
Ap1	0-10	1.18	44.5	40.2	15.3	55.5	loam
Ap2	10-20	1.55	58.6	25.9	15.5	41.4	loam
Ag	20-24	1.62	61.2	24.1	14.7	38.8	loam
Bg	24-35	1.60	60.3	22.3	17.4	39.7	Sandy loam
BCg	35+	1.60	60.4	25.0	14.6	39.6	Sandy loam

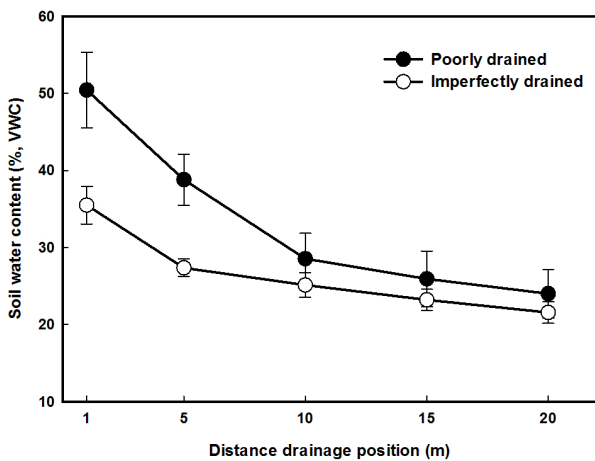


Fig. 1. Spatial variation of subsurface soil water content before experiment.

Table 2. Isotropic semivariogram parameter for surface water content by drainage classes before experiment.

Drainage classes	Nugget [†]	Sill [‡]	Separation Distance	R ²
	(Co)	(Co+C)	(Ao)(m)	
Poorly drained	0.10	133.6	21.5	0.93
Imperfectly drained	0.01	31.21	24.97	0.86

[†]Nugget: variance (unaccountable variance), within the sampling distance.

[‡]sill: minus nugget variance (accountable variance), range (lag closer than a are correlated to each other), and slope of the semivariogram

깃 (Nugget) 등이 있다 Journal and Huijbregts (1978). 자료들 간의 상관성이 없는 일정한 상태의 베리오그램 값이 나타나는 데 자료값들이 아무런 관계를 나타내지 않게 되어 반베리오그램이 일정한 값을 가질 때의 거리를 구간거리 또는 상관거리라 하고 이때 자료값을 문턱값 (Sill)이라 한다 (Johnston et al., 2001). 문턱값 (Sill)을 기준으로 시험 전 배수조건에 따른 표토 수분 함량에 대한 공간변이를 분석한 결과 Table 2에서와 같이 배수등급별 배수 “매우불량”인 논에서 133.6 보다 “약간불량”인 논 31.21보다 변이가 높아 균일성이 낮은 토양이었다.

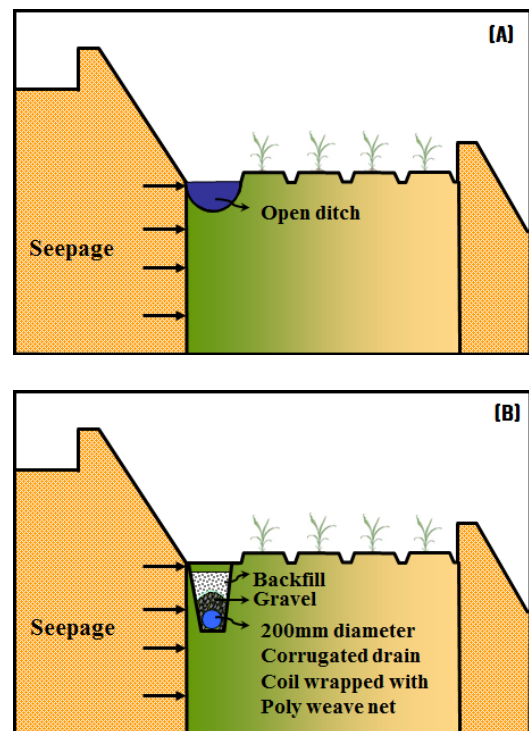


Fig. 2. Schematic showing drainage system. (A) ODM (Open ditch drainage methods) (B) PDM (Closed pipe drainage methods).

배수개선 방법 배수개선 방법은 “매우불량”과 “약간불량”인 토양의 각 필지에 명거배수 (ODM, Open ditch drainage methods)와 암거배수 (PDM, Closed pipe drainage methods) 시설을 논둑 바로 밑에 1열로 장변 방향으로 각각 설치하였다. 명거배수는 폭 30 cm에 깊이 30 cm의 지표 배수로를 설치하였고, 암거배수는 폭 50 cm 깊이는 상류부 60 cm, 하류부 90 cm로 굴삭하고 20 cm 직경의 유공흡수관을 매설하고 상류로부터 침출수를 최대한 흡수하기 위해 소수재 (자갈층)를 논 면의 15~20 cm 깊이까지 충전하여 설치하였다 (Fig. 2).

토양 물리성 분석 토양 물리성은 직경 5 cm × 30 cm 실린더 코어 (Cylinder Core)를 이용하여 콩 수확 후 배수방

법별로 3반복 채취하여 5 cm 길이로 절단하여 토양을 105°C에서 24시간 건조시켜 흡착된 수분을 제거한 후 건조토양의 무게를 대상으로 고체가 차지하는 부피를 고상 (%), 물이 차지하는 부피를 액상 (%), 100%에서 액상과 고상을 제한 값을 기상 (%)으로 하여 계산하였으며, 토양 및 식물체분석법 (NIAS, 2000)에 준하여 토양삼상, 공극률, 용적중 등을 분석하였다. 또한 토성분석은 미농무성의 피펫분석법 (USDA, 1996)을 기준으로 분석하였으며, 토양경도는 산중식 토양경도계를 이용하여 토양의 층위별로 배수개선 전후 각각 측정하였다. 토양단면의 특성 조사는 미농무성 Soil Survey Manual (USDA, 1993)을 기준으로 토양 층위분화, 층위두께, 토양구조 등을 조사하였으며, 환원층 출현깊이는 배수방법별로 포장의 배수개선 지점에서 논둑 밑 (3 m), 논 중앙 (10 m), 논 두렁 (15 m) 등 3지점에서 조사하였다. 또한 토양단면의 토색변화는 Munsell 토색첩 (Soil Color Chart)으로 토양 깊이별 토색의 변화를 조사하였다.

토양의 투수력은 내경 30 cm, 외경 55 cm, 높이 25 cm인 무저 금속원판으로 된 Double ring Infiltrometer를 이용하여 배수방법별로 포장의 배수지점에서 논둑 밑 (3 m), 논 중앙 (10 m), 논두렁 (15 m) 등 3지점에서 각각 측정하였고, 침투속도는 단위면적, 단위 시간에 토양에 침투하는 물의 양을 측정하여 Darcy's 법칙 (Darcy, 1856)에 따라 계산하였다.

지하수위 및 토양수분 측정 배수방법별 전 생육기간 동안 지하수위의 실시간 변동을 측정하기 위해 논둑 밑에서 각각 3 m, 10 m, 15 m 지점에 깊이 1.5 m까지 측정할 수 있는 데이터로거가 장착된 수위측정기 (Ecotone TM WM)를 설치하고 1시간 단위로 수위 변화를 조사하였다. 또한 토양 깊이별 토양수분은 배수개선지점에서 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에 각각 Electrical Capacitance 방식의 층위별 수분측정센서 (Easy AG50-5Wire, Sentek Pty Ltd.)를 설치하여 토양 면에서 토양의 깊이에 따라 10 cm 단위로 0~50 cm까지 1시간 간격으로 파종기부터 수확기까지 잡곡 생육기간 동안 토양수분을 측정하였다.

작물의 수분 스트레스 반응 분석 배수방법별 지하수위를 기준으로 생육기간 중 작물이 받는 수분과잉에 의한 스트레스의 누적일수를 정량화하기 위해 Hiler (1969)가 제안한 수분 스트레스 지표 (Stress-day Index, SDI)를 적용하여 Eq. 1과 같이 분석하였다.

$$SDI = \sum_{i=1}^n SD_i \times CS_i \quad P \quad (Eq. 1)$$

여기서, SDI : 수분 스트레스 지표

SDI : Stress day factor for stage i

CSi : Crop susceptibility factor for stage i

n : 생육기의 수

i : 생육시기

SD (Stress Day Factor)는 토양 중에 수분과부족, 산소부족, 투수력, 지하수위 등의 값을 극한치와 연관하여 얻어진 값으로 Hardjoamidjojo et al. (1982)은 과잉 토양수분으로 인하여 생기는 작물의 스트레스 정도를 나타내는 기준값으로 Sieben (1964)이 제안한 수분스트레스 지표인 지표에서 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)를 SD factor로 대신할 수 있다고 밝혀 Eq. 2와 같이 SD factor 값을 계산하였다.

$$SEW_{30} = \sum_{i=1}^n (30 - WTD_i) \quad (Eq. 2)$$

여기서, SEW₃₀ : 지표 하 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도

WTDi : i 일의 일 지하수위의 깊이 (cm)

n : 생육기간 일수

과잉수분의 초과일수 (SED₃₀)는 Eq. 3와 같이 지하수위 깊이가 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 누적일수를 이용하여 지하수위 변화를 분석하였다.

$$SED_{30} = (\text{Sum of Excess Water over 30cm}) \quad (Eq. 3)$$

CS (crop susceptibility factor)는 작물의 주요 생육기간 동안에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량을 조사하여 Hiler (1969)가 제안한 각각 생육시기에 대한 Crop susceptibility factor 산출수식 (Eq. 4)을 적용하여 계산하였다.

$$CS_i = \frac{X - X_i}{X} \quad (Eq. 4)$$

여기서, Xi : i 생육기에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량

X : 아무런 스트레스를 받지 않은 경우의 작물 수량

시험작물 및 재배법 본 시험은 전 전환 논에서 콩, 팥, 조, 기장, 수수 등 주요 발작물의 배수조건에 따른 생육 반응과 품질 특성을 비교 평가하고자 수수 (*Sorghum bicolor* L.), 기장 (*Panicum miliaceum* L.), 조 (*Setaria italica* L.) 곡류 3작물과 콩 (*Glycine max* L.), 팥 (*Vigna angularis* L.) 두류 2작물을 대상으로 2012년부터 2014년까지 3년간 농가포장에서 수행하였다. 시험 품종은 국립식량과학원에

Table 3. Comparison of the physical properties by drainage methods

Drainagemethods	Horizon	Soil depth (cm)	Bulk density (Mg m ⁻³)	SWC [†] (%, VWC)	Hardness (mm)	Shear Strength (kPa)	Infiltration & Percolation (cm hr ⁻¹)
Open ditch drainage	Ap	0~17	1.28	35.5	10.0	36.0	0.85
	Bg	17~30	1.62	22.0	22.5	130 <	0.76
	BCg	30~42	1.60	23.9	23.6	123.3	0.04
Closed pipe drainage	Ap	0~19	1.24	20.5	10.8	31.3	1.08
	B	19~30	1.53	20.2	21.1	53.0	2.67
	BC	30~43	1.73	20.1	23.0	127.3	1.20

[†]SWC: Soil water content

Table 4. General statistics for surface water content by drainage methods in experiment field.

Drainage methods	Soil water content (%, VWC)			Std Dev.	CV [§]	Skew [†]	Kut [‡]
	Mean	Min	Max				
Poorly drained							
Open ditch drainage	34.0	23.3	46.7	5.59	16.4	-0.43	-0.08
Closed pipe drainage	29.7	24.4	37.7	3.25	10.9	0.05	-0.22
Imperfectly drained							
Open ditch drainage	30.4	23.1	35.6	4.24	13.9	-0.54	-1.14
Closed pipe drainage	26.7	23.1	30.7	2.57	9.6	0.02	-1.36

[†]Skew : Skewness , [‡]Kut : Kutosis, [§]CV: Variation coefficient

서 육성한 남풍찰수수 (Nampungchal-susu), 이백찰기장 (Hwanggeum-gijang)과 삼다찰조 (Sandachal-jo), 대원콩 (Daewon), 아라리팔 (Arari)을 각각 이용하여 시험하였다. 시험구 배치는 시험지역의 배수등급의 불균일성을 감안하여 배수 “매우불량”지와 “약간불량”지 대상으로 “명거배수와”와 “암거배수와”를 설치하여 논외 단변방향으로 단구제로 배치하여 시험하였다. 기타 재배법은 농촌진흥청의 작물별 표준재배법에 준하여 재배하였다. 수량조사는 농촌진흥청 농사시험연구조사기준 (RDA, 2012)에 준해 시험포장의 단면 방향으로 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에서 3반복으로 작물별 1개 지점에서 3.3 m² (1.8 m × 1.8 m)을 예취한 다음 수량을 조사하였다.

Results and Discussion

토양 물리성 변화 배수개선에 의한 토양환경개선 효과를 평가하는 방법으로는 토양구조, 토양층위 분화, 층위의 두께, 토색, 반분, 결핵, 회색층위 (gray)의 유무, 투수성 등이 있으며, 배수가 불량한 논에 배수개선이 이루어지면 토양의 물리성이 개선되어 토양구조가 발달되어 작물의 생육과 수량 증가에 영향을 준다고 알려져 있다 (Doh et al., 1994). 토양에 적당한 수분과 공기를 함유하고 있으면 작물의 생장이 촉진되고, 발작물의 근부병을 막는 효과가 있어 작물생장을 위해서는 반드시 일정량 이상 함유되어 있어야

한다. 일반적으로 토양에서 고상이 차지하는 비율은 토성과 토양구조에 따라 차이가 나지만 대략 35%~55%정도이고, 액상은 15%~45%정도로 알려져 있다. 작물의 생육을 좋게 하기 위해서는 포장용수량 범위에 수분을 유지시켜 주는 것이 좋으며 위조점 2%~25% 이하로 떨어지지 않게 하는 것도 중요하다. 또한 기상은 적당한 작물생육을 위해서는 근권 영역에서 최소 15% 이상 유지시켜 주어야 한다고 알려져 있다 (Wesseling et al., 1957). 배수불량 경사지 논에서 배수시설 설치 후 배수방법별 경작층의 물리성을 비교해 보면 Table 3에서와 같이 명거배수에 비해 암거배수 처리구에서 층위별 수분함량이 훨씬 낮아 통기성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 용적밀도는 처리 간에 큰 차이가 없었으나 집적층 (B층)의 투수력은 암거배수구에서 2.67 cm hr⁻¹로 높았으나 명거배수에서는 0.8 cm hr⁻¹ 내외로 낮았다. 특히 암거배수 처리구에서 토양의 투수성 및 통기성이 개선되어 토양의 작토층이 깊어지고 점차 층위분화가 진행됨을 확인할 수 있었다.

토양수분 변화 토양의 배수조건이 다른 “매우불량”인 논과 “약간불량”인 논에 배수시설을 시공하고 토양 근권부 (깊이 20 cm)의 배수방법별 표토 수분함량 측정하여 기술통계량을 분석한 결과는 Table 4와 같았다. 배수방법별 토양의 평균 수분함량은 배수 “약간불량”가 배수 “매우불량”에 비해 낮았으며, 배수 방법별로 비교해 보면 배수 “매우불량”

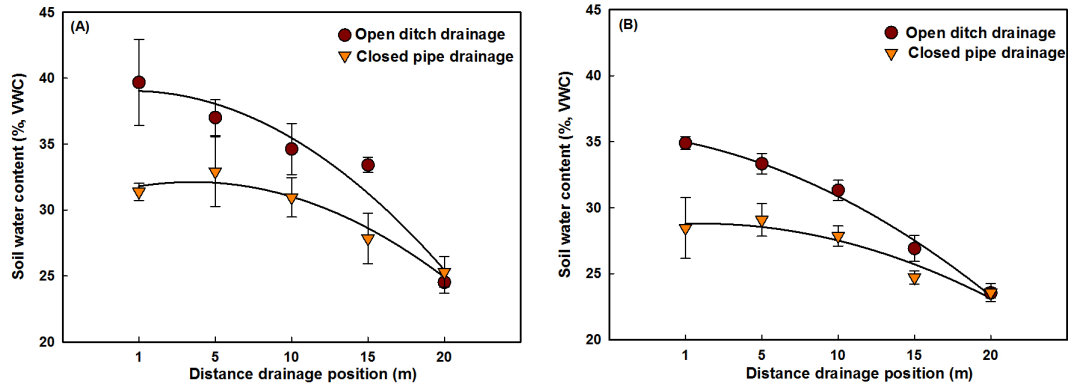


Fig. 3. Comparison of surface soil water content by distance at drainage position of the field. (A) PDS (Poorly drained soil) and (B) IDS (Imperfectly drained soil).

지에서 명거배수 34.0% (v/v)인 반면 암거배수 29.7%로 낮은 경향을 보였고, 배수 “약간불량”지에서도 명거배수 30.4% (에 비해 암거배수에서 26.7%로 크게 낮아지는 경향을 보였다. 또한 토양수분의 변이계수를 비교해 보면 배수 “약간불량”지에 비해 배수 “매우불량”지에서 배수방법별 변이계수의 차이가 뚜렷하였다. 배수 “매우불량”지에서 암거배수 처리구에서의 변이계수가 10.9로 명거배수 16.4에 비해 포장 내에서 수분함량이 균일한 것으로 나타나 암거배수에 의한 배수개선 효과가 높은 것으로 판단되었다. 배수 “매우불량”지에서 각각 왜도값 (skewness)이 -0.43 으로 평균값 (mean)이 중앙값 (median)보다 작은 비대칭분포 (skewed distribution)인 양성왜도 (negatively skewed)의 특성을 보이는 반면 암거배수구에서는 왜도값이 0.05 로 평균값 (mean)이 중앙값 (median)보다 약간 큰 양의 부호를 갖는 음성왜도 (positively skewed)를 보이거나 거의 정규화 분포 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 배수 “매우불량”에 비해 배수 “매우불량”지에서 왜도값이 낮은 경향을 보였다. 배수 방법별 첨도값 (kurtosis)은 명거배수구에서의 첨도값이 -0.08 으로 정규분포보다 덜 뾰족하고 분산이 커 피침분포 (platykurtic) 보이는 반면 암거배수구에서는 -0.34 로 작은 분산을 보이며 평균을 중심으로 밀집분포 (leptokurtic) 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이처럼 명거배수 처리구에서의 첨도값이 낮은 것은 수분함량이 넓은 범위에 분포하고 있어 표준편차가 크다는 것을 의미하며 암거배수에서 첨도값이 낮은 것은 표준편차가 아주 작아 거의 대부분의 수분함량이 평균 근처에 밀집되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

배수지점에서 논 의 단면방향으로 거리별로 토양 표토의 수분 변화를 분석한 결과는 Fig. 3과 같았다. 배수등급에 따른 배수방법별 표토의 수분함량은 명거배수 처리구에 비해 암거배수 처리구에서 균일한 경향을 보였으며, 명거배수 처리구에서는 논둑 밑에서 논 중앙 (10 m)까지 토양수분이 과습된 상태인 반면, 오히려 암거배수 처리구에서는 논둑 밑에 1열 암거배수 시공으로 논둑 밑의 수분함량은 논 중앙

지점에 비해 낮은 경향을 보였다.

토양의 배수조건이 다른 “매우불량”인 논과 “약간불량”을 선정하여 명거배수 (ODM, Open ditch drainage methods)와 암거배수 (PDM, Closed pipe drainage methods)를 각각 논둑 밑 기저부에 시공하고 배수개선지점에서 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에 각각 Electrical Capacitance 방식의 층위별 수분측정센서 (Easy AG50-5Wire, Sentek Pty Ltd.)를 설치하고 생육기간 중 토양 면에서 토양의 깊이에 따라 10 cm 단위로 0~50 cm까지 층위별 토양수분을 측정 한 결과는 Table 5와 같았다. 배수가 “매우불량”인 논에서 포장 위치에 따른 층위별 평균 수분함량은 34.0% (v/v)에서, 29.7%로 높고 불균일한 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 30.4에서 26.7%로 대체로 낮아 균일한 특성을 보였다. 생육기간 중 토양수분이 $30\% \text{ day}^{-1}$ 을 초과한 토양수분 포화 누적일수는 “매우불량”인 논에서 80일에서 54일인 반면 “약간불량”인 논은 62일에서 37일로 상대적으로 과습누적 일수가 짧게 나타났다. 따라서 “약간불량”인 논은 토양수분포화 누적일수, 토양수분포화 지속시간, 생육기간 중 평균 수분함량 등은 “매우불량”인 논에 비해 훨씬 낮은 경향을 보였다. 전체적으로 시험지 토양의 수분함량은 중간부분 (5~15 m)이 높은 함량을 보이는 것으로 나타났다. 배수 “매우불량” 토양의 경우 암거배수 처리는 $18.52 \pm 4.58\%$, 명거배수는 $19.01 \pm 4.25\%$ 로 나타났으며, 배수 “약간불량” 토양은 각각 14.87 ± 4.82 및 $18.64 \pm 3.85\%$ 로 명거배수 처리 토양이 약간 높았다. 명거배수 처리 1 및 5 m의 배수로 가까이에서 배수 “매우불량” (25.53 및 20.90%) 및 “약간불량” 토양 (18.55 및 23.14%) 모두 높은 토양 수분함량을 보였다. 토양수분이 $30\% \text{ day}^{-1}$ 을 초과한 토양수분 포화 누적일수는 “매우불량”인 논 의 명거배수 처리구에서는 논둑 밑 지점 65 day^{-1} 에서 논두렁 지점 23 day^{-1} 인 반면 암거배수 처리구에서는 논둑 밑 지점 42.5 day^{-1} 에서 논두렁 지점 41 day^{-1} 이었다. “약간불량”인 논 의 명거배수 처리구에서는 논둑 밑 지점 47 day^{-1} 에서 논두렁 지점 11 day^{-1} 인 반면 암거배수 처리구에서는

Table 5. Comparison of soil water content in different drainage field.

Drainage methods	Distance (m)	Av. Soil water content		Duration day of excess water			Ratio of duration day [†] (%)
		2012 ----- (% , VWC) -----	2013 -----	2012 ----- (days > 30%, VWC) -----	2013 -----	Average -----	
Poorly drained							
Open ditch drainage	1	17.9	29.4	20	110	65.0	90.2
	5	23.5	34.2	25	94	59.5	77.0
	10	21.0	36.0	13	88	50.5	72.1
	15	18.9	30.8	7	92	49.5	75.4
	20	11.3	28.7	0	46	23.0	37.7
Closed pipe drainage	1	25.5	24.7	43	42	42.5	34.4
	5	20.9	30.6	34	41	37.5	33.6
	10	16.9	33.2	5	44	24.5	36.1
	15	16.8	31.8	5	76	40.5	62.3
	20	14.9	24.9	4	78	41.0	63.9
Imperfectly drained							
Open ditch drainage	1	8.4	33.2	0	94	47.0	77.0
	5	14.7	28.9	6	76	41.0	62.3
	10	16.9	24.3	9	41	25.0	33.6
	15	13.0	29.2	2	65	33.5	53.3
	20	21.4	23.8	1	21	11.0	17.2
Closed pipe drainage	1	18.6	14.4	19	0	9.5	0.0
	5	23.1	26.9	37	17	27.0	13.9
	10	20.5	19.4	33	9	21.0	7.4
	15	18.4	23.0	4	7	5.5	5.7
	20	12.7	18.8	0	3	1.5	2.5

[†]Ratio of duration day = Duration day of excess water (> 30%, VWC)/Crop growing day (122) x 100

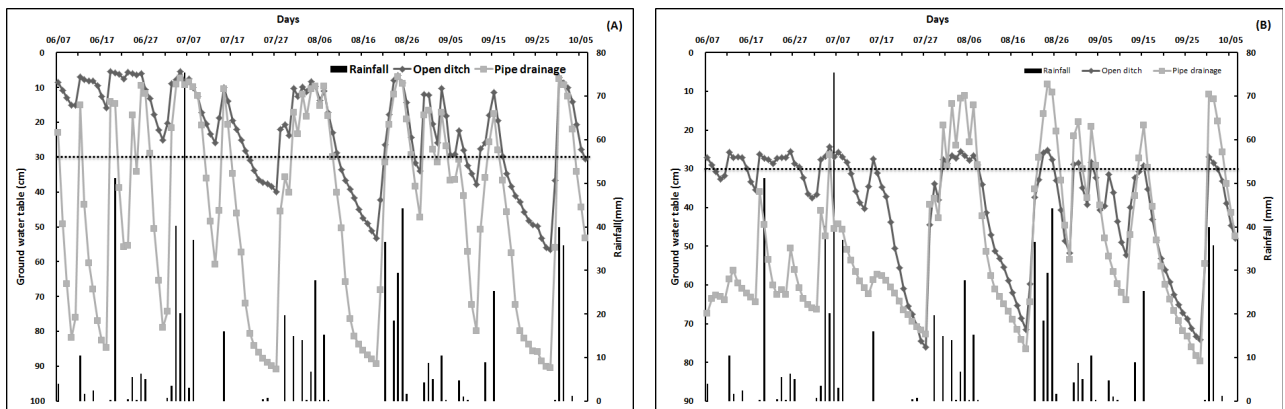


Fig. 4. Fluctuations of ground water table in different drainage field. (A) PDS (Poorly drained soil and) (B) IDS (Imperfectly drained soil).

논둑 밑 지점 9.5 day⁻¹에서 논두렁 지점 1.5 day⁻¹이었다.

지하수위 변화 특성 작물 생육기간 중 경과일수별 지하수위의 변화 특성을 보면 Fig. 4에서와 같이 지하수위의 감소는 명거배수에 비해 암거배수 처리구에서 낮았으며, 특히 배수가 매우 불량한 농경지에서 명거배수 처리구는 전 생

육기간을 통해 높은 수위가 유지되는 반면 암거배수 처리구에서는 강우 후 5 일이 경과 후에 수위가 30 cm 이하로 감소되는 경향을 보여 배수개선 효과가 가장 높게 나타났다.

배수조건에 따른 지하수위를 기준으로 생육기간 중 발작물의 수분과잉에 의한 스트레스의 누적일수를 정량화하기 위해 분석한 결과는 Table 6에서와 같았다. 생육기간 중 지

Table 6. Comparative values of ground water table in different drainage field.

Drainage methods	Av. ground water table (cm)	Decrease of ground water table (cm/day)	SED ₃₀ [†] (day >30 cm)	SEW ₃₀ [‡]
Poorly drained				
Open ditch	-22.77	3.52	87	1,331
Pipe drainage	-45.24	6.63	46	755
Imperfectly drained				
Open ditch	-40.08	3.74	77	1,177
Pipe drainage	-49.29	5.25	26	511

[†]SED₃₀ : Sum of Excess Water over 30 cm, [‡]SEW₃₀ : Sum of Excess Water Depth

하수위 변화는 배수 “매우불량” 논이 “약간불량” 논 보다 높았으며, 배수가 “매우불량”인 논에서 명거배수 처리구의 평균 지하수위는 논둑 밑이 -22.77 cm인 반면 암거배수 처리구에서는 -22.77 cm로 대체로 낮았으며 균일한 지하수위를 보였다. 지하수위 30 cm를 초과한 일수의 합 (SED₃₀)은 배수가 “매우불량”인 논에서 명거배수에서는 87일로 높은 반면 암거배수에서는 46일로 대체로 낮은 경향을 보였다.

발작물의 수분 스트레스 반응 일반적으로 배수불량 농경지에 암거배수를 설치하면 토양 물리성이 크게 개선되어 무처리구에 비해 수량이 10~25%이상 증가한다고 알려져 있으며 (Poole et al., 2009), Bolton et al. (1982)과 Plamenac et al. (1988)은 배수불량지에 암거배수를 설치하고 밀 옥수수, 콩 등을 시험한 결과 농경지가 건답화 되어 작물 생산량이 증가하고 품질도 개선된다고 하였으며, Colwell (1978)은 암거배수에 의해 옥수수 35%, 콩 35%, 밀 48%, 귀리 47% 목초 27% 가 증가되었다고 하였다. 배수조건 및 배수개선 방법별 시험포장의 위치에 따른 수수, 기장, 조, 콩, 팥 등 주요 발작물 수량의 변이성을 분석한 결과 Fig. 5에서와 같이 배수 “약간불량”지에서 보다 “매우불량”지에서 변이가 크게 나타났으며, 암거배수 처리구가 명거배수 처리구에 비해 상대적으로 변이가 적었다. 또한 작물별 수량의 변이성은 전체적으로 수수 < 콩 < 기장 < 조 < 팥 순으로 변이가 크게 나타났고, 특히 수수는 토양과습에 의한 변이가 가장 적은 작물로 나타났다.

토양의 과습에 의한 스트레스는 작물의 종류와 생육시기에 따라 큰 차이가 있으며, 일반적으로 콩의 경우에는 다른 생육시기에 비해 개화기에서 협 형성기에 수분과다에 스트레스를 가장 많이 받고 수량감소가 크다고 알려져 있다 (Jung et al., 2011; Evans et al., 1991; Griffin and Saxton, 1988; Scott et al., 1989). 배수불량 농경지에서 강우와 높은 지하수위로 인하여 토양이 과습하게 되면 작물뿌리의 활력이 떨어져 토양에서 작물로 양수분의 이동능력이 감소되고, 토양산소 부족, 토양환원에 따른 환원생성물에 의한 뿌

리신장 저해로 수량감소를 가져오는 주요한 요인이 되며, 배수불량지에서 토양 과습에 의한 수량 감소 요인해석을 위한 여러 가지 모델이 개발되었다. 과잉수분에 의한 작물 스트레스 지표 (Stress day factor; SD)로 이용되는 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)는 배수가 “매우불량”인 논에서 명거배수구에서 1,331이었으나 암거배수에서는 755로 크게 낮았다. 또한 “약간불량”인 논에서는 1,177와 5,111로 상대적으로 낮은 경향을 보였다. Sieben (1964)은 발작물은 지하수위 30 cm 초과수위의 합 (SEW₃₀)이 1,000~2,000보다 크면 수량감소를 가져오며, 1,000 이내에 있으면 안전하다고 하였다. 따라서 위의 SEW₃₀ 기준으로 배수방법별로 스트레스 지표를 비교하면 명거배수처리구는 발작물 안전기준을 초과하였으나 암거배수구에서는 지하수위가 안전기준에 부합되는 것으로 나타났다. 배수조건 및 배수방법별 작물이 받는 수분 스트레스 지표 (SD)를 분석한 결과 배수 “매우불량” 토양이 “약간불량”에 비해 높았으며, 배수 “매우불량” 토양의 명거배수에서 팥 1388.6 > 기장 1064.8 > 조 677.1 > 콩 398.0 > 수수 119.7 순이었으며, 암거배수에서도 팥 14.0 > 기장 230 > 조 173.3 > 콩 26.1 > 수수 14.0 순으로 낮았다. 또한 배수 “약간불량” 토양의 명거배수에서 팥 342.0 > 기장 304.2 > 조 254.1 > 콩 238.8 > 수수 90.2 순이었으며, 암거배수에서도 팥 98.7 > 기장 87.0 > 조 74.6 > 콩 44.7 > 수수 27.0 순으로 낮았다 (Table 7). 이러한 결과는 Hundal et al. (1984)이 수수의 경우 토양 과습에 대한 내습성이 다른 잡곡에 비해 상대적으로 강한 편이며 강우기에도 잘 견디는 작물이라고 보고와 유사한 결과를 보였다. 따라서 논에서는 수수가 조와 기장, 콩과 팥에 비해 상대적으로 습해에 강한 작물로 밝혀졌다.

Conclusion

논에서 발작물의 안정생산 기술을 개발하기 위하여 배수 불량 경사지 논토양을 대상으로 배수조건에 따라 배수 “매우 불량” 논과 “약간불량”한 논의 논둑 밑 기저부에 1열로 명거

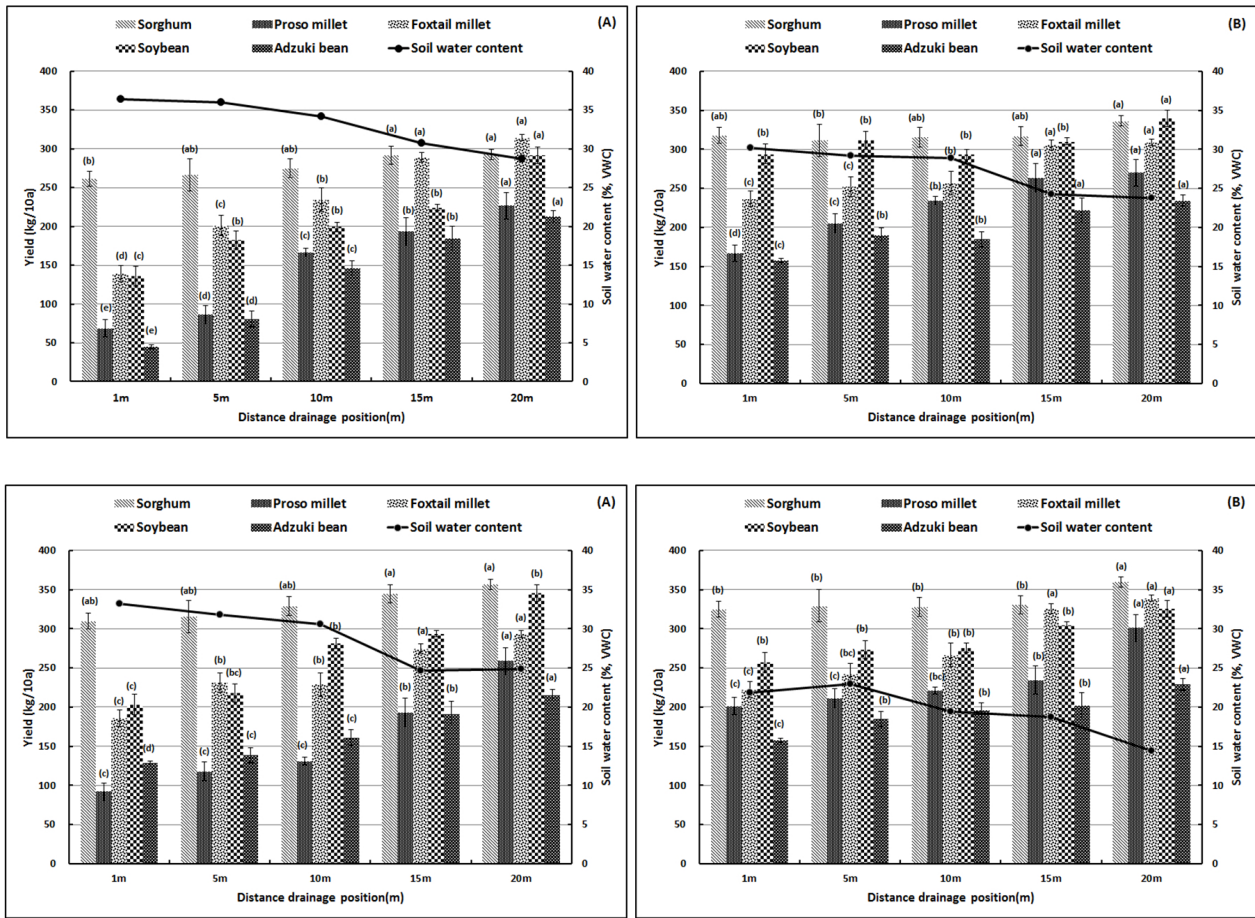


Fig. 5. Comparison of yield of sorghum, proso millet, foxtail millet, soybean, adzuki bean as distance at installed drainage position under drainage classes. Upper: Poorly drained, Under: Imperfectly drained; (A) ODM (Open ditch drainage methods) (B) PDM (Closed pipe drainage methods).

Table 7. Comparison of Stress Day Index(SDI) upland crops by drainage methods.

Drainage methods	CS [†]	Factors	SEW ₃₀ [‡]	SDI [§]				
				Sorghum	Proso millet	Foxtail millet	Soybean	Adzuki bean
Poorly drained								
Open ditch	0.55		1,331	119.7	1,064.8	677.1	398.0	1,388.6
Pipe drainage	0.17		755	14.0	230.2	173.3	26.1	190.3
Imperfectly drained								
Open ditch	0.23		1,177	90.2	304.2	254.1	238.8	342.0
Pipe drainage	0.12		511	27.0	87.0	74.6	44.7	98.7

[†]CS : Crop susceptibility factor for stage; Crop susceptibility values of soybean by excessive soil water stress described by (Evans et al., 1990).

[‡]SEW₃₀ : Sum of Excess Water Depth

[§]SDI : Stress-Day Index

배수와 암거배수 시설을 설치하여 배수개선 효과와 주요 발작물의 내습성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

배수불량 경사지 논에서 배수시설 설치 후 배수방법별 경작층의 물리성은 명거배수에 비해 암거배수 처리구에서 층위별 수분함량이 훨씬 낮아 통기성이 증가하는 것으로 나타났다으며, 또한 용적법도는 처리 간에 큰 차이가 없었으나

집적층 (B층)의 투수력은 암거배수구에서 2.67 cm hr⁻¹로 높았으나 명거배수에서는 0.8 cm hr⁻¹ 내외로 낮았다. 배수가 “매우불량”인 논에서 포장위치에 따른 층위별 평균 수분함량은 34.0%에서, 29.7%로 높고 불균일한 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 30.4에서 26.7%로 대체로 낮아 균일한 특성을 보였다. 배수방법별 토양 수분함량의 공간적 변이를

분석한 결과 배수등급별 문턱값 (Sill)을 기준으로 “매우불량”인 논에서 보다 “약간불량”인 논에서 대체적으로 낮게 나타나 수분함량 균일도가 높은 것으로 판단되었다.

생육기간 중 일평균 토양수분 함량이 30%을 초과한 토양 수분 포화 누적일수는 “매우불량”인 논에서 80일에서 54일 인 반면 “약간불량”인 논은 62일에서 37일로 상대적으로 과습누적 일수가 짧게 나타났다. 과잉수분에 의한 작물 스트레스 지표 (Stress day factor; SD)로 이용되는 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)는 배수가 “매우불량”인 논에서 명거배수구에서 1,331이었으나 암거배수에서는 755로 크게 낮았다. 또한 “약간불량”인 논에서는 1,177와 511로 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 배수조건 및 배수방법별 작물이 받는 수분 스트레스 지표 (SDI)를 분석한 결과 배수 “매우불량” 토양이 “약간불량”에 비해 높았으며, 배수 “매우불량” 토양의 명거배수에서 팔 1,388.6 > 기장 1,064.8 > 조 677.1 > 콩 398.0 > 수수 119.7 순이었으며, 암거배수에서도 팔 14.0 > 기장 230 > 조 173.3 > 콩 26.1 > 수수 14.0 순으로 낮았다. 또한 배수 “약간불량” 토양의 명거배수에서 팔 342.0 > 기장 304.2 > 조 254.1 > 콩 238.8 > 수수 90.2 순이었으며, 암거배수에서도 팔 98.7 > 기장 87.0 > 조 74.6 > 콩 44.7 > 수수 27.0 순으로 낮았다. 따라서 경사지 배수불량 논에서 배수개선 효과와 주요 발작물의 내습성을 평가한 결과 명거배수에 비해 암거배수에서 토양 물리성이 크게 향상되어 작물의 습해가 줄었고, 주요 발작물의 내습성을 평가한 결과 팔 > 조 > 기장 > 콩 > 수수 순으로 수량 변이가 적어 다른 작물에 비해 수수가 내습성이 가장 강한 작물로 평가되었다.

References

- Bolton, E.F., V.A. Dirks, and M.M. McDonnell. 1982. The effect of drainage, rotation and fertilizer on corn yield, plant height, leaf nutrient composition and physical properties of Brookston clay soil in Southwestern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 62:297-309.
- Box, J.E.Jr. 1991. The effect of waterlogging on rooting intermittent flooding on germination and seeding growth of cotton. *Trans. ASAE.* 14:567-570.
- Cannell, R.Q. and M.B. Jackson. 1981. Alleviating aeration stress. p. 141-192. In G.f. Arkin and H.M. Talors(ed) *Modifying the root environment to reduce crop stress.* ASAE. St. Joseph. MI.
- Choi, K.J. 1994. Effect of Excessive water stress on the growth and yield of soybean. Research reports of agronomy. Seoul National Univ.Ph. D. Dissert.
- Colwell, H.T.M. 1978. The economics of increasing crop productivity in Ontario and Quebec by tile drainage installation. *Canadian Farm Economics.* 13(3):1-7.
- Darcy, H. 1856. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- Desmond, E.D., G.F. Barkle, and G.O. Schwab. 1985. Soybean yield response to excess water ASAE. Pap. No.85-2562. ASAE. St Joseph. MI.
- Doh, D.H., S.J. Kim, S.K. Jin, and R.C. Jo. 1994. A Study on Variation of the Soil Physical Characteristics of Multiutilized Paddy Field by the Introduction of Subsurface Drainage Facility. *J. Life Sci.* V(1): 87-96.
- Evans, R.O., R.W. Skaggs, and R.E. Sneed. 1990. Normalized crop susceptibility factor for corn and soybean to excess water stress. *Transactions of the ASAE.* 33(4):1153-1161.
- Evans, R.O., R.W. Skaggs, and R.E. Sneed. 1991. Stress say index models to predict corn and Soybean relative yield under high water table condition. *Trans. ASAE.* 34:1997-2005.
- Griffin, J.L. and A.M. Saxton. 1988. Response of soild-seeded soybean to flood irrigation. Flood duration. *Agron. J.* 80:885-888.
- Hardjoamidjojo. S. and R.W. Skaggs. 1982. Predicting the effects of drainage systems on corn yields. *Agric. Water Manag.* 5(2):127-144.
- Hiler, E.A. 1969. Quantitative evaluation of crop drainage requirements. *Trans. ASAE.* 12:499-805.
- Hiler, E.A. 1976. Drainage requirements of crops Proc. ASE, Third national Drainage Symposium. ASAE, pp. 127-129.
- Huck, M.G. 1970. Variation in tap root elongation rate as influenced by composition of the soil air. *Agron J.* 62: 815-818.
- Hundal, S.S. and S.K. De Datta. 1984 Water table and tillage effect on root distribution, soil water extration, yield of sorghum grown after wetland rice in a tropical soil. *Field Crops Res.* 9:291-303.
- Johnston, K., J.M. Ver Hoef, K. Krivoruchko, and N. Lucas. 2001. ArcGISTM Geostatistical Analyst extension User's Guide. ETRI.
- Journel, A.G. and C.J. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics.* Academic Press, London, p. 600.
- 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.* 44:702-708.
- Kono, Y., A. Yamauchi, N. Kawamura, J. Tatsumi, T. Nonoyama, and N. Inagaki. 1987. Interspecific difference of the capacities of waterlogging and drought tolerance among summer cereals. *Japan. Jour. Crop Sci.* 56(1): 115-129.
- Lee, H.S., J.W. Gu, and S.H. Yun. 1993. Effects of water potential and underground water table on the rhizobium activity, growth, yield and seed quality of soybean 1. Effects of underground water table at different soil on

- the rhizobium activity, growth, yield and seed quality of soybean. *RDA J. Agri. Sci. (Agri. Inst. Coop.)* 35:1-11.
- Lee, H.J., S.H. Kim, and H.S. Lee. 1994. Growth of maize and sorghum-sudangrass hybrid affected by soil texture and ground water levels. *Korean J. Crop Sci.* 39(6): 585-593.
- MAFRA. 2014. Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook.
- NIAST. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Plamenac, N. 1988. Effects of subsurface drainage on heavy hydromorphic soil in the Nelindvor area, Yugoslavia. *Agric. Water Manag.* 14:19-27.
- Poole, C.A., R.W. Skaggs, G.M. Cheschier, M.A. Youssef, and C.R. Crozier. 2009. Effects of Drainage Water Management on Crop Yields. ASABE Annual International Meeting, Reno, Nevada. June 21 - June 24.
- RDA. 2012. Standards for Agricultural Science and Technology Research Analysis.
- Scott, H.D., J. DeAngulo, M.B. Deniels, and L.S. Wood. 1989. Flood duration effect on soybean growth and yield. *Agron. J* 81:631-636.
- Sieben, W.H. 1964. Relation of drainage conditions and crop yields on young light clay soils in the yssellake polders. *Van Zee tot Land*, No. 40.
- Skaggs, R.W. 1978. A water management model for shallow water table soils, Rep. No. 134, Water Resour. Res. Inst. Univ. North Carolina. p. 178.
- USDA. 1993. Soil survey manual.
- USDA. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. soil survey investigations report No. 42 version 3.0.
- Wesseling, J. 1974. Crop growth and wet soils. In J. van Schitfgaard (Ed) *Drainage for Agriculture*. Agron. Monogr. 17.ASA. Madison. WI. pp. 39-90.
- Wesseling, J. and W.R. van Wijk. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: Luthin, J.N. (Ed.), *Drainage of Agricultural Lands*. Madison, WI, pp. 461-504.