

Response of Millet and Sorghum to Water Stress in Converted Poorly Drained Paddy Soil

Ki-Yuol Jung*, Eul-Soo Yun, Chang-Young Park, Jae-Bok Hwang, Young-Dae Choi, and In-Seok Oh

Coarse Cereal Crop Research Division, NICS, RDA, Milyang, 627-830, Republic of Korea

(Received: October 26 2013, Accepted: November 6 2013)

Millet and sorghum are major dryland cereal crops, however their growth and productivity is limited by soil water stress with varying intensity. The major objective of this study was to evaluate water stress of millet and sorghum yield under drainage classes of poorly drained soil and to test the effect of the installed pipe drainage in poorly drained paddy soil to minimize crop stress. The research was carried out in poorly drained paddy fields located at alluvial slopping area resulting in non-uniform water content distribution by the inflow of ground water from the upper part of the field. Stress Day Index (SDI) was determined from a stress day factor (SD) and a crop susceptibility factor (CS). SD is a degree of measurement by calculating the daily sum of excess water in the profile above 30cm soil depth (SEW₃₀). CS depends on a given excess water on crop stage. The results showed that sum of excess water day (SWD₃₀) used to represent the moisture stress index was lower on somewhat poorly drained soil compared with poorly drained soil on 117 days. CS values for sorghum were 57% on 3rd leaf stage, 44% on 5th leaf stage, 37% on panicle initiation, 23% on boot stage, and 16% on soft dough stage. For proso millet CS values were 84% on 3rd leaf stage, 70% on 5th leaf stage, 65% on panicle initiation, 53% on boot stage, and 28% on soft dough stage. And for foxtail millet the values were 73% on 3rd leaf stage, 61% on 5th leaf stage, 50% on panicle initiation, 29% on boot stage, and 15% on soft dough stage. SDI of sorghum and millet was more susceptible to excess soil water during panicle initiation stage more poorly drained soil than somewhat poorly drained soil. Grain yield was reduced especially in proso millet and Foxtail millet compared to Sorghum.

Key words: Sorghum, Millet, Water stress, Crop susceptibility, Stress day index

Response of millet and sorghum to water stress under drainage classes in converted paddy soil.

Growth Stage	Duration		CS [†] Factors	SDI [‡]		
	Start	Stop		Sorghum	Proso millet	foxtail millet
Emergence	0	6	0.20	28.2	42.8	42.8
3 rd Leaf Stage	6	15	0.22	34.9	45.1	44.7
5 th Leaf Stage	15	28	0.32	47.3	71.3	78.6
Panicle Initiation Stage	28	47	0.19	11.6	31.8	49.4
Booting Stage	47	61	0.08	11.4	7.4	7.4
Soft dough Stage	61	75	0.02	3.7	4.4	2.9

[†]CS = Crop susceptibility factor

[‡]SDI = Stress-day Index

*Corresponding author : Phone: +82553501263, Fax: +82553523059, E-mail: jungky@korea.kr

[§]Acknowledgement: This Study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development(Project No. PJ00854602)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

내건성 작물인 조, 수수, 기장 등의 잡곡류는 내습성이 매우 약한 특성을 갖고 있어 논에 재배할 경우 습해로 인한 생산량 감소가 우려되므로 안정적인 생산을 위해서는 내습성 품종 선택, 특별한 수분관리기술이 반드시 필요하다. 배수가 불량한 농경지에서는 토양수분이 과다하게 되면 토양공극에 수분이 포화되어 작물에 산소공급이 부족하게 되고 토양환원에 의한 유해 물질의 발생 등으로 미생물의 활동이 제한되어 작물에 스트레스를 주게 된다고 알려져 있다 (Box, 1991; Cannell & Jackson, 1981; Hiller, 1976; Plamenac, 1988, Wesseling, J. 1974;). Hiller (1969)는 토양의 배수가 불량하게 되면 토양 공극의 대부분이 수분으로 포화되게 되어 미생물의 활동으로 산소가 부족하게 되고 황화수소 (H_2S)와 같은 유해 가스가 발생하게 되며 작물뿌리의 성장을 저해하게 되어 작물 생육과 수량에 영향을 미친다고 보고하였다 (Box, 1991; Cannell & Jackson, 1981). Kono et al. (1987)은 주요 작물의 과습에 대한 평가를 통해 내습성 정도를 네 개의 등급으로 분류하였다. 내습에 가장 강한 작물은 발벼 (Upland rice), 울무 (Job' tears) 이며, 두 번째로 손가락 조 (Finger millet), 피 (Japanese barnyard millet) 이었으며, 세 번째 등급은 기장 (Proso millet), 진주조 (Pear millet), 수수 (Sorghum) 등 이었고 가장 습해에 약한 작물은 조 (Foxtail millet), 옥수수 (Maize) 등 이라고 보고하였다. 또한 Kono et al. (1988)은 생육기간 중 인위적으로 장기간 과습 조건을 처리하여 뿌리 형태를 평가한 결과 조는 전체 뿌리의 수가 감소하며, 기장과 진주조는 약간 감소하고, 발벼, 울무, 피, 수수, 옥수수 등은 뿌리의 수가 증가한다고 하였다. 그리고 발벼, 손가락 조, 울무, 피 등은 뿌리 분얼수가 증가하는 반면 수수, 옥수수 등은 분얼수가 변화하지 않는다고 보고하였다. Hundal et al. (1984)은 수수의 경우 토양 과습에 대한 내성이 다른 잡곡에 비해 상대적으로 강한 편이며 강우기에도 잘 견디는 작물이라고 보고하였다.

작물 생육기간 중 작물이 받는 수분과잉에 의한 수분 스트레스 반응을 해석하기 위한 여러 가지 모델이 개발되어 왔으며, Hiler (1969)는 수분 스트레스 반응을 정량화하기

위해 지하수위의 누적일수기준으로 수분 스트레스 지표 (Stress-day Index, SDI)를 제안하였다. SDI는 SD (Stress day factor)와 CS (Crop susceptibility factor)를 이용하여 정량화 하였다. SD는 토양 중에 수분과부족, 산소부족, 투수력, 지하수위 등의 값을 극한치와 연관하여 얻어지며 주로 과잉 토양수분으로 인하여 생기는 작물의 스트레스 정도를 나타내는 기준값이다. Sieben (1964)이 제안한 대부분의 작물 수분스트레스 지표인 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW_{30})를 SD factor 값을 계산하여 이용하였다. 또한 CS는 주요 생육기간 동안에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량을 조사하여 실험적으로 계산하였다. Evans et al. (1991)은 옥수수와 콩을 대상으로 토양수분 과잉에 의한 수분 스트레스 반응을 정량화 하여 6년간 시험을 통해 Stress-day Index (SDI) 모델을 개발하였다. Jung et al. (1991)은 경사지 논토양에서 배수개선 방법에 따른 콩의 생육기간 중 수분 스트레스 지표 (SDI)를 분석한 결과 명거배수 355.40, 비닐차단막 271.55, 관다발 171.55로 높은 반면 암거배수에서는 64.75로 크게 낮아진다고 밝혔다. Skaggs (1978)는 토양수분 과습에 의한 물 수지를 분석하고 배수개선 효과를 평가하기 위해 토양특성, 지하수위, 강수량, 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.

따라서 본 연구는 논에서 잡곡의 안정적인 생산기술을 개발하기 위해 품종별 내습성을 평가하고, 수분조건, 지하수위, 재배양식 및 재배방법에 따른 스트레스 반응을 비교 분석 하였다.

Materials and Methods

시험토양의 특성 잡곡의 논 재배를 위한 내습성 평가 시험이 수행된 토양은 경남 창원시 북면 외산리에 소재한 경사 7~15%의 곡간 상부에 위치하고 있으며 화강암에서 유래된 산성암 층적층을 모재로 이루어진 토양이다. 미농무성 (USDA)의 새로운 분류방법에 의하면 식양계의 회색토로 지산통

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

Horizon	Depth	Bulk density	Three phases			Porosity	Textural Class
			Solid	Water	Air		
	cm	Mg m ⁻³	------(%)-----			%	
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

(fine loamy, mixed, mesic family of Fluvaquentic Endoaquept)에 해당된다. 주변이 산으로 둘러싸여 있어 연중 농경지 논둑 아래에서 용출수가 유입되어 돈둑 밑은 연중 과습하고 논두렁 부분은 상대적으로 수분이 낮아 필지 내 수분상태가 불균일한 농경지 이었다. 표토 (Ap층)는 암회갈색 (2.5Y 4/2)의 양토이고 심토1 (Bg층)은 회색 (5Y 5/1)의 식양토이며 심토2 (BCg층)는 회색 (5Y 5/1)의 사양토로 이루어져 있다 (Table 1).

시험포장은 배수가 “매우불량”인 논 1개 필지, 배수등급이 “약간불량”인 논 1개 필지로 선정하였다. 시험포장은 토양수분을 조절하기 위해 각 필지에 명거배수와 암거배수 시설을 장변 방향으로 논둑 바로 밑에 1열로 각각 설치하였다. 배수가 “매우불량”인 논은 폭 30 cm에 깊이 30 cm의 지표 명거배수로를 설치하였고, 배수등급이 “약간불량”인 논은 논둑 밑 기저부에 폭 50 cm에 깊이는 상류부 60 cm, 하류부 90 cm로 굴삭하고 20 cm 직경의 유공흡수관을 매설하고 흡수거는 상류로부터 침출수를 최대한 흡수하기 위해 소수재 (자갈층)를 논 면의 15~20 cm 깊이까지 충전하여 암거배수처리를 하였다.

시험구 배치 및 재배방법 시험구 배치는 배수가 “매우불량”인 논과 “약간불량”인 논에서 단구제 2반복으로 수행하였으며, 시험작물은 수수 3 품종, 기장 3 품종, 조 3 품종을 각각 공시하였으며, 논 면의 단면 방향으로 배치하였다. 수수는 황금찰수수, 토종수수, 중모 4001이었고, 기장은 황금기장, 만홍기장, 노랑찰기장 이었으며, 조는 경관1호, 삼다메조, 삼다차조 등을 공시하여 2010년부터 2011년까지 2년간 수행하였다. 재배법은 농촌진흥청의 잠곡 표준재배법에 준하여 재배하였으며, 생육 및 수량조사는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준 (농촌진흥청, 2012)에 준해 논 면의 단면 방향으로 3 m, 6 m, 9 m, 12 m, 15 m 지점에서 3반복으로 경장, 수장, 경태, 천립중, 주당립수, 주당협수, 수량 등을 조사하였다.

지하수위 및 토양수분 측정 배수방법별 지하수위의 실시간 변동을 측정하기 위해 논둑 밑에서 각각 3 m, 10 m, 15 m 지점에 깊이 1.5 m 까지 측정할 수 있는 데이터로거가 장착된 수위측정기 (Ecotone TM WM)를 설치하고 1시간 단위로 수위 변화를 조사하였다 (Fig. 3-1). 또한 토양 깊이별 토양수분은 배수개선지점에서 3 m, 10 m, 15 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 잠곡 생육기간 동안 토양수분을 측정하였다.

수분 스트레스 지표 배수방법별 지하수위를 기준으로 생육기간 중 작물이 받는 수분과잉에 의한 스트레스의 누적일수를 정량화 하기위해 Hiler (1969)가 제안한 수분 스트레스 지표 (Stress-day Index, SDI)를 적용하여 식(1)과 같이 분석하였다.

$$SDI = \sum_{i=1}^n SD_i \times CS_i \tag{1}$$

여기서, SDI : 수분 스트레스 지표

SD_i : Stress day factor for stage i

CS_i : 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 값이다. Hardjoamidjojo et al. (1982)은 과잉 토양수분으로 인하여 생기는 작물의 스트레스 정도를 나타내는 기준값으로 Sieben (1964)이 제안한 수분스트레스 지표인 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW30)를 SD factor로 대신할 수 있다고 밝혀 식(2)과 같이 SD factor 값을 계산하였다.

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

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

WTD_i : i 일의 일 지하수위의 깊이 (cm)

n : 생육기간 일수

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

$$SED_{30} = (\sum \text{of Excess Water} - 30 \text{ cm}) \tag{3}$$

작물의 주요 생육시기별 CS (Crop susceptibility factor)를 산출하기 위해 과습처리 조건인 W-plot (water logged conditions)와 관행 처리조건 M-plot (moderated soil moisture conditions)를 두어 시험하였다. W-plot 처리는플라스틱 (1/5,000)와그너포트에 4 kg의 토양을 채우고, 다시 1/2,000 와그너포트에 넣은 후에 1/5,000 와그너포트 밑면의 급수구로부터 수분이 공급되어 토양표면 10 cm 깊이까지 포화 되도록 처

리하였다. 또한 W-plot의 과습처리는 3엽기 (3rd leaf stage), 5엽기 (5th leaf stage), 출아기 (Panicle initiation), 출수기 (Boot stage), 유숙기 (Soft dough stage)에 각 작물별로 10 일간 과습 조건이 되도록 처리하고 처리 후에는 1/2,000와 그너포트는 꺼내어 관행 처리조건 (M-plot)으로 재배하였다. CS (Crop susceptibility factor)는 수확기에 각 생육시기별 처리된 수량을 조사하여 Hilier (1969)가 제안한 각각 생육시기에 대한 Crop susceptibility factor 산출수식(4)를 적용하여 계산하였다.

$$CSI = \frac{X - i}{X} \tag{4}$$

여기서, X_i : i 생육기에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량
 X : 아무런 스트레스를 받지 않은 경우의 작물 수량

Results and Discussion

토양 수분 변화 토양의 배수조건이 다른 “매우불량”인 논과 “약간불량”인 논에 배수시설을 시공하고 포장내 위치에 따른 층위별 토양수분 측정 장치를 설치하여 잡곡 생육

기간 중 토양의 깊이에 따른 토양수분의 변화특성을 분석하였다 (Table 2). 배수가 “매우불량”인 논에서 포장위치에 따른 평균 수분함량은 30.61 mm에서, 24.85 mm로 높고 불균일한 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 26.95에서 22.15 mm로 대체로 낮았으며 균일한 수분함량을 보였다. 토양수분이 30 mm day⁻¹을 초과한 토양수분 포화 누적시간은 “매우불량”인 논에서 논둑 밑 지점 1,934 hr에서 논두렁 지점 1,934 hr인 반면 배수가 “약간불량”인 논은 1,493 hr에서 836 hr으로 상대적으로 과습누적 지속시간이 낮았다. 또한 생육기간 중 토양수분이 30 mm day⁻¹을 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.

지하수위 변화 시험 포장의 배수조건에 따른 지하수위 변화를 조사한 결과는 Fig. 1에서와 같았다. 생육기간 중 지하수위 변화는 배수 “매우불량” 논이 “약간불량” 논 보다 높았으며, 배수가 “매우불량”인 논에서 포장위치에 따른 평균 지하수위는 논둑 밑이 -14.90 cm이고 논두렁 가까이

Table 2. Comparison of soil water content in different drainage fields.

Type of Drainage	Distance	Average Soil water content	Duration time of excess water	Duration day of excess water
		mm	Hr >30 mm	Day >30 mm
Poorly drained	1m	30.61	1,934	80
	5m	27.05	1,678	69
	10m	24.96	1,470	62
	15m	24.85	1,258	54
Somewhat poorly drained	1m	26.95	1,493	62
	5m	24.57	1,011	40
	10m	24.02	945	41
	15m	22.15	836	37

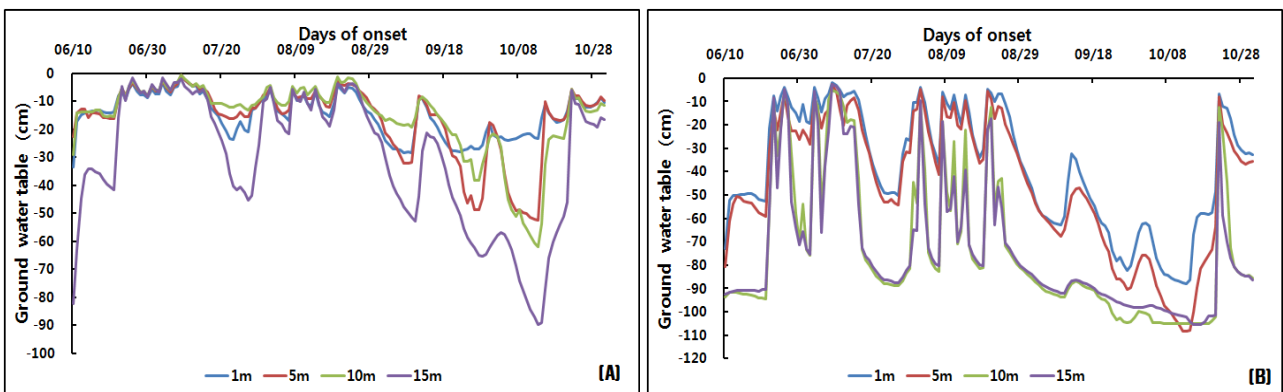


Fig. 1. Ground water level fluctuations in different drainage field. (A) Poorly drained. (B) Somewhat poorly drained.

서는 -30 cm로 대체로 높고 불균일한 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 -38.45 cm에서 -74.19 cm로 대체로 낮았으며 균일한 지하수위를 보였다.

배수조건에 따른 지하수위를 기준으로 생육기간 중 잡곡의 수분과잉에 의한 스트레스의 누적일수를 정량화하기 위해 분석한 결과는 Table 3에서와 같았다. 지하수위 30 cm를 초과한 일수의 합 (SED₃₀)은 배수가 “매우불량”인 논에서는 포장위치에 따라 143일에서 81일로 높은 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 59일에서 19일로 대체로 낮은 경향을 보였다. 또한 과잉수분에 의한 작물 스트레스 지표 (Stress day factor; SD)로 이용되는 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)는 배수가 “매우불량”인 논에서 2,178 mm에서 1,423 mm로 조사 되었으며, “약간불량”인 논에서는 1,014 mm에서 221 mm로 상대적으로 낮은 경향을 보였다. Sieben (1964)은 발작물은 지하수위 30 cm 초과수위의 합 (SEW₃₀)이 1,000 mm 보다 크면 작물에 스트레스를 주어 수량감소를 가져오며, 1,000 mm이내에 있으면 안전하

다고 하였다. 따라서 위의 SEW₃₀ 기준으로 배수조건별로 스트레스 지표를 비교하면 배수가 “매우불량”인 논에서는 발작물 안전기준을 초과하였으나 “약간불량”인 논에서는 지하수위가 안전기준에 부합되어 습해에 안전한 것으로 나타났다.

주요 생육 시기별 수분 스트레스 반응 수수 (*Sorghum bicolor* L.)와 서속 (黍粟)류 잡곡인 조 (*Setaria italica* L.)와 기장 (*Panicum miliaceum* L.)의 주요 생육시기별 토양 과습처리에 따른 생육반응을 조사한 결과는 Fig. 2에서와 같았다. 과습처리 (W-plot)에 의한 수량 감소율은 생육초기에 가장 낮았고 생육후기로 갈수록 수량 감소율이 높아지는 경향을 보였다. 또한 조와 기장이 수수에 비해 과습처리 (W-plot)에 의한 수량 감소율이 대체로 낮았고, 생육초기인 3엽기에 수량 감소율은 조와 기장이 가장 크게 나타났다. 이러한 결과로 수수의 CS (Crop susceptibility factor)는 3엽기 0.57, 5엽기 0.44, 유수형성기 0.37, 출수기 0.23, 유숙기 0.16 이었고, 기장의 경우 3엽기 0.84, 5엽기 0.70, 유

Table 3. Comparative values of water table in different drainage fields.

Drainage	Distance	Av. Water table level	SED ₃₀ [†]	SEW ₃₀ [‡]
		cm	day	mm
Poorly drained	1m	-14.90	143	2,178
	5m	-16.52	121	2,228
	10m	-15.63	126	2,340
	15m	-30.54	81	1,423
	Average	-15.68	130.00	2,248.67
Somewhat poorly drained	1m	-38.45	59	1,014
	5m	-45.40	53	710
	10m	-73.65	22	347
	15m	-74.19	19	221
	Average	-43.30	66.00	1,079.92

$$^{\dagger} SED_{30} = (\sum \text{of Excess Water} - 30 \text{ cm})$$

$$^{\ddagger} SEW_{30} (\sum \text{of Excess Water Depth}) = \sum_{i=1}^n (30 - WTD_i)$$

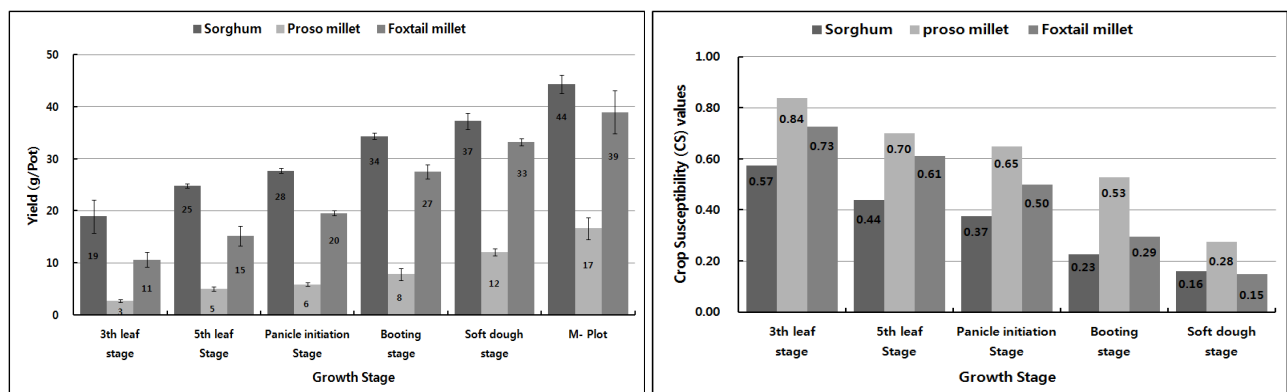


Fig. 2. Comparison of crop susceptibility of cereals crop growth stage by excessive water stress.

수형성기 0.65, 출수기 0.53, 유숙기 0.28 이였으며, 조는 3엽기 0.73, 5엽기 0.61, 유수형성기 0.50 출수기 0.29, 유숙기 0.15 이였다.

수분 스트레스 반응 조, 수수, 기장 등 잡곡의 논 재배 시 배수조건에 따른 수분 스트레스 지표 (SDI)를 분석한 결과는 Table 4에서와 같았다. 배수가 “매우불량”인 논에서 생육단계별 수수가 받는 SDI는 출아기 28.2에서 유숙기 3.7로 나타났으나, 기장은 출아기 42.8에서 유숙기 4.4로 나타났으며, 조는 출아기 42.8에서 유숙기 2.9로 수수에 비해서 조와 기장이 스트레스 지수가 높아 과습에 의한 영향을 가장 많이 받은 것으로 나타났다. 또한 출아기와 유묘기, 3엽기 등 주로 생육초기의 SDI가 높았으며 생육후기로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 배수가 “약간불량”인 논에서 수수가 받는 SDI는 출아기 3.4에서 출수기 0.1로 나타났으나,

기장은 출아기 10.5에서 출수기 0.3로 나타났으며, 조는 출아기 10.5에서 유숙기 0.1로 상대적으로 배수가 “약간불량”인 논에서 보다 “매우불량”인 논에서 수분 스트레스 지표 (SDI) 높은 경향을 보였다. 이러한 결과는 Kono et al. (1987)이 주요 작물의 내습성 평가를 통해 조와 기장이 습해에 약하다는 보고와 유사하였다.

잡곡의 논 재배 시 배수조건별 전 생육기간 동안 포장의 위치에 따른 수분 스트레스 지표 (SDI)를 분석한 결과는 Fig. 3에서와 같았다. 수수의 경우 배수가 “매우불량”인 논은 논둑 밑 1 m 지점에서는 367.4이였으나 15 m 지점에서는 245로 나타난 반면 “약간불량”인 논에서는 각각 197과 53으로 크게 낮아지는 경향을 보여 “매우불량”인 논보다 낮았다. 기장의 경우 “매우불량”인 논에서는 논둑 밑에서 거리별 SDI가 각각 310, 292, 269, 196으로 나타나 논의 중간 지점까지 수분과습에 의한 스트레스를 받는 것으로 나타났다. 또한

Table 4. Response of millets and sorghum to excess water stress under drainage classes.

Growth Stage [†]	Duration		CS [‡] Factors	SDI [§]		
	Start	Stop		Sorghum	Proso millet	foxtail millet
Poorly drained						
Emergence	0	6	0.20	28.2	42.8	42.8
3 rd Leaf Stage	6	15	0.22	34.9	45.1	44.7
5 th Leaf Stage	15	28	0.32	47.3	71.3	78.6
Panicle Initiation Stage	28	47	0.19	11.6	31.8	49.4
Booting Stage	47	61	0.08	11.4	7.4	7.4
Soft dough Stage	61	75	0.02	3.7	4.4	2.9
Somewhat poorly drained						
Emergence	0	6	0.20	3.4	10.5	10.5
3 rd Leaf Stage	6	15	0.22	5.2	12.4	11.9
5 th Leaf Stage	15	28	0.32	1.1	5.2	4.7
Panicle Initiation Stage	28	47	0.19	0.9	0.3	1.6
Booting Stage	47	61	0.08	0.1	0.3	0.2
Soft dough Stage	61	75	0.02	-	-	0.1

[†]Stage = Refers to stage of sorghum development described by Vanderlip. (1979).

[‡]CS = Crop susceptibility factor

[§]SDI = Stress-day Index

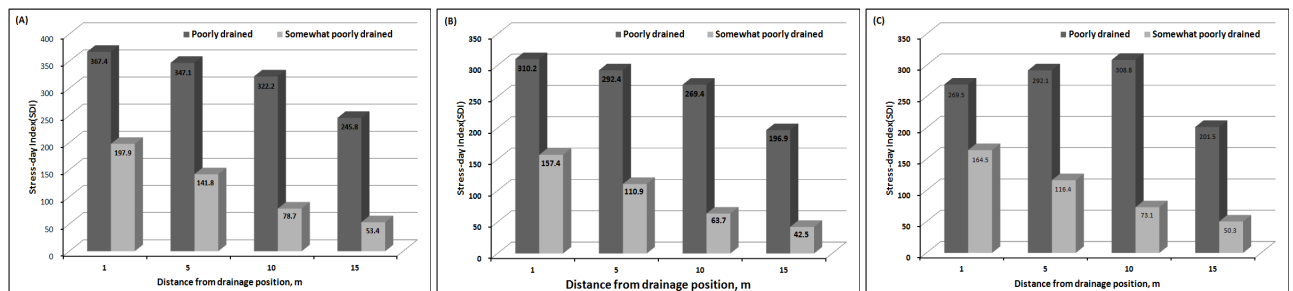


Fig. 3. Response to excess water stress as distance at installed drainage position under drainage classes; (A)sorghum, (B)proso millet(C)Foxtail millet.

조도 기장과 유사한 결과를 보여 상대적으로 조와 기장은 습해에 약한 것으로 나타났다.

토양수분 조건에 따른 잡곡의 생육반응 배수조건별 포장위치에 따른 조, 수수, 기장의 생육반응을 조사한 결과는 Fig. 4에서와 같았다. 생육기간 중 과습에 의한 생육장해는 간장에 가장 영향을 미치는 것으로 나타났다. 포장의 위치에 다른 간장의 변화는 배수 “매우불량”인 논이 “약간불량”인 논에 비해 변이가 크게 나타났으며, 수수는 포장의 위치에 따라 품종 간에 간장이 거의 균일한 반면, 조와 기장은 습해에 약해 대체로 차이가 크게 나타났으며, 조가 기장에 비해 과습에 영향을 많이 받는 것으로 보였다. 특히 배수

“매우불량”인 논에서 기장의 경우 노랑찰기장이 만홍기장과 황금기장에 비해 습해에 강하였으며, 조는 경관1호, 삼다메, 삼다찰 순으로 품종 간에 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 삼다메와 삼다찰의 경우 논둑 밑에서는 과습에 의해 습해를 받아 생육초기에 고사되었다.

배수조건별 포장위치에 따른 조, 수수, 기장의 수량반응을 조사한 결과는 Fig. 5에서와 같았다. 배수 “매우불량”인 논이 “약간불량”인 논에 비해 배수조건에 따라 수량변화의 차이가 크게 나타났다. 수수는 조와 기장에 비해 포장의 위치에 따라 수량의 변이가 낮았으며, 조와 기장은 수수에 비해 배수조건과 포장의 위치에 따라 수량의 변이가 크게 나타났다. 수수의 경우 토종수수와 황금찰수수가 습해에 강하

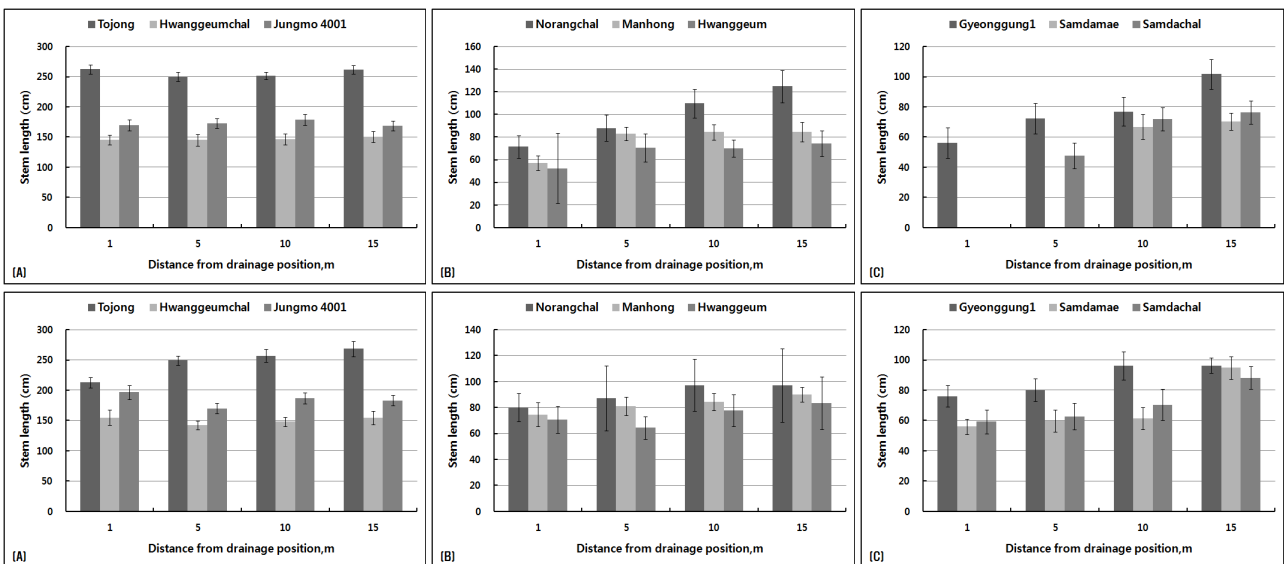


Fig. 4. Comparison of sorghum, proso millet and foxtail millet stem length as distance at installed drainage position under drainage classes. Upper: Poorly drained field, Under : Somewhat poorly drained field; (A)sorghum, (B)proso millet, (C)Foxtail millet.

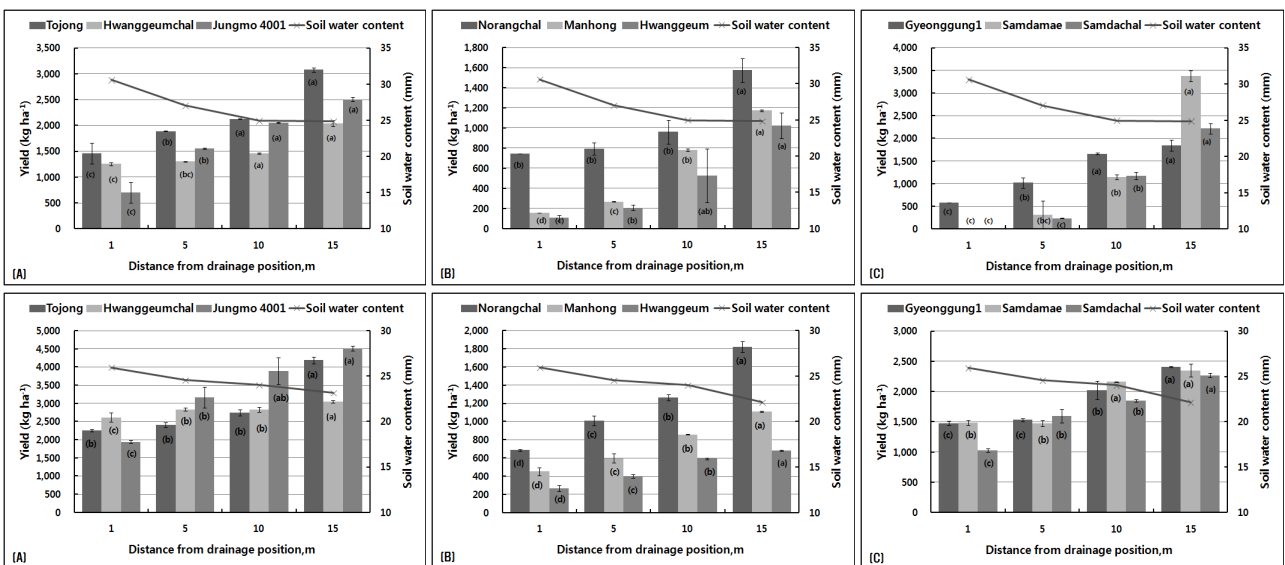


Fig. 5. Comparison of sorghum, proso millet and foxtail millet yield as distance at installed drainage position under drainage classes. Upper: Poorly drained field, Under : Somewhat poorly drained field; (A)sorghum, (B)proso millet, (C)Foxtail millet.

였으나 중모 4001은 습해에 약한 것으로 나타났다. 기장은 노랑찰기장, 만홍기장, 황금기장 순으로 습해에 약해 수량이 낮았으며, 조는 경관 1호, 삼다메, 삼다찰 순으로 수량이 낮았다. 이러한 결과는 Hundal et al. (1984)이 수수의 경우 토양 과습에 대한 내습성이 다른 잡곡에 비해 상대적으로 강한 편이며 강우기에도 잘 견디는 작물이라고 보고한 내용과 유사하였다. 따라서 논에서는 수수가 조와 기장에 비해 습해에 강한 작물임을 알 수 있었다.

Conclusions

수수 (*Sorghum bicolor* L.)와 서속 (黍粟)류 잡곡인 조 (*Setaria italica* L.)와 기장 (*Panicum miliaceum* L.)의 논 재배시 안정적인 생산기술을 개발하기 위해 품종별 내습성을 평가하고, 수분조건, 지하수위, 재배양식 및 재배방법에 따른 수분과잉에 의한 스트레스 반응을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

배수조건에 따른 지하수위를 기준으로 생육기간 중 지하수위 30 cm를 초과한 일수의 합 (SED₃₀)은 배수가 “매우불량”인 논에서는 포장위치에 따라 143일에서 81일로 높은 반면 배수가 “약간불량”인 논에서는 59일에서 19일로 대체로 낮은 경향을 보였다. 또한 과잉수분에 의한 작물 스트레스 지표 (Stress day factor; SD)로 이용되는 지하수위 30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)는 배수가 “매우불량”인 논에서 2,178 mm에서 1,423 mm로 조사 되었으며, “약간불량”인 논에서는 1,014 mm에서 221 mm로 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

주요 생육 시기별 잡곡의 수분 스트레스 반응은 (Crop susceptibility factor)은 수수의 수수의 경우 3엽기 0.57, 5엽기 0.44, 유수형성기 0.37, 출수기 0.23, 유숙기 0.16 이었고, 기장의 경우 3엽기 0.84, 5엽기 0.70, 유수형성기 0.65, 출수기 0.53, 유숙기 0.28 이었으며, 조는 3엽기 0.73, 5엽기 0.61, 유수형성기 0.50 출수기 0.29, 유숙기 0.15 이었다. 조, 수수, 기장 등 잡곡의 논 재배시 배수조건에 따른 수분 스트레스 지표 (SDI)는 배수가 “매우불량”인 논에서 수수는 출아기 28.2에서 유숙기 3.7로 나타났으나, 기장은 출아기 42.8에서 유숙기 4.4로 나타났으며, 조는 출아기 42.8에서 유숙기 2.9로 수수에 비해서 조와 기장이 스트레스 지수가 높아 과습에 의한 영향을 가장 많이 받았다.

배수조건별 포장위치에 따른 조, 수수, 기장의 수량반응을 조사한 결과 수수는 조와 기장에 비해 포장의 위치에 따라 수량의 변이가 낮았으며, 조와 기장은 수수에 비해 배수조건과 포장의 위치에 따라 수량의 변이가 크게 나타났다.

따라서 잡곡의 논 재배시 수수가 조와 기장에 비해 습해에 강한 작물이었으며, 수수는 토종수수와 황금찰수수가 습

해에 강하였으나 중모 4001은 습해에 약한 것으로 나타났고, 기장은 노랑찰기장, 만홍, 황금기장 순으로 습해에 약해 수량이 낮았으며, 조는 경관 1호, 삼다메, 삼다찰 순으로 습해에 약한 품종으로 나타났다.

References

- 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.
- 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.
- 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.
- Hardjoamidjojo. S. and R.W. Skaggs. 1982. Predicting the effects of drainage systems on corn yields. *Agricultural Water Management*. 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. ASEA, Third national Drainage Symposium*. ASAE. p. 127-129.
- 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 Research*. 9:291-303.
- 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.
- Kono, Y., A. Yamauchi, N. Kawamura, T. Nonoyama, and J. Tatsumi. 1988. Comparison of Growth responses to waterlogging of summer cereals with special reference to rooting ability. *Japan. Jour. Crop Sci.* 57(2):321-331.
- Plamenac, N. 1988. Effects of subsurface drainage on heavy hydromorphic soil in the Nelindvor area, Yugoslavia. *AWM*. 14:19-27.
- 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.
- Wesseling, J. 1974. Crop growth and wet soils. p. 39-90. In J. van Schitfgaard (Ed) *Drainage for Agriculture*. Agron. Monogr. 17.ASA. Madison. WI.