

Characterizations of Yields and Seed Components of Sesame (*Sesamum indicum* L.) as Affected by Soil Moisture from Paddy Field Cultivation

Hyen Chung Chun*, Ki Yuol Jung, Young Dae Choi, Sanghun Lee, Sung-Up Kim¹, and Eunyong Oh¹

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

¹Upland crop breeding research division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea

*Corresponding author: hyen2010@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 18, 2017

Revised: October 16, 2017

Accepted: October 25, 2017

Accurate and optimal water supply to cereal crop is critical in growing stalks and producing maximum yields. Recently, upland crops are cultivated in paddy field soils to reduce overproduced rice in Korea. In order to increase productivity of cereal crops in paddy fields which have poor percolation and drainage properties, it is necessary to fully understand crop response to excessive soil water condition and management of soil drainage system in paddy field. The objectives of this study were to investigate effects of excessive soil water to sesame growth and to quantify stress response using groundwater levels. Two cultivars of sesame were selected to investigate; Gunbak and Areum. These sesames were planted in paddy fields located in Miryang, Gyeongnam with different soil drainage levels and drainage systems. The experiment site was divided into two plots by drainage class; very poorly and somewhat poorly drained. Two different drainage systems were applied to alleviate excessive soil water in each plot: open ditch and pipe drainage system. Soil water contents and groundwater levels were measured every hour during growing season. Pipe drainage system was significantly effective to alleviate wet injury for sesame in paddy fields. Pipe drainage system decreased average soil moisture content and groundwater level during sesame cultivation. This resulted in greater yield and lignan contents in sesame seeds than ones from open ditch system. Comparison between two cultivars, Gunbak had greater decrease in growth and yield by excessive soil water and high groundwater level than Areum. Seed components (lignan) showed decrease in seeds as soil water increased. When soil moisture content was greater than 40%, lignan content tended to decrease than ones from less soil moisture content. Based on these results, pipe drainage system would be more effective to reduce wet injury to sesame and increase lignan component in paddy field cultivation.

Keywords: Paddy field, Sesame, Soil moisture content, Stress day index, Lignan

Results of yield and seed component of sesame cultivated in paddy fields with various soil moisture contents.

Cultivar	Soil moisture content (mm m ⁻¹)	Yield (kg 10a ⁻¹)	Seed component content			
			Protein (%)	Sesamin (mg g ⁻¹)	Sesamolol (mg g ⁻¹)	Lignan (mg g ⁻¹)
Gunbak	20~25	129.2 ^{ab}	22.9	4.6 ^a	2.9 ^a	7.6 ^a
	26~30	130.7 ^a	23.6	4.3 ^{ab}	2.6 ^{ab}	6.9 ^{ab}
	31~35	118.9 ^{ab}	23.1	3.9 ^{bc}	2.4 ^{ab}	6.3 ^{ab}
	36~40	104.1 ^b	23.1	3.8 ^{bc}	2.6 ^{ab}	6.4 ^{ab}
	> 41	86.9 ^c	24.0	3.5 ^c	2.2 ^b	5.7 ^b
Areum	20~25	100.7 ^a	21.5	1.1	1.6	2.7
	26~30	99.5 ^a	22.3	1.1	1.7	2.8
	31~35	86.4 ^a	22.6	1.1	1.7	2.8
	36~40	83.0 ^{ab}	22.7	1.1	1.8	2.9
	> 41	73.8 ^{ab}	22.7	1.1	1.8	2.9



Introduction

참깨는 유지작물 중 우리나라에서 들깨 다음으로 많이 재배되고 있는 작물이다. 참깨는 참깨과 (Pedalidaceae)에 속하는 1년생 초본식물로서 재배종은 *Sesamum indicum* L.이다. 일반적으로 참깨 종자에는 지방 50%, 단백질 20%, 탄수화물 15%, 리그난 0.5% 정도 함유되어 있으며, 참기름의 지방산 중 주성분은 불포화산인 올레인산, 리그레산으로 이들은 동맥경화를 예방하고 혈압상승을 억제하는 작용을 한다 (Fukuda et al., 1985). 특히 참깨 종자에 함유된 리그난 성분은 강력한 항산화 물질로서 참기름의 산패를 억제하여 저장안정성을 높이고 인체 면역기능 강화 등의 역할이 알려지면서 종자에서 리그난을 추출하고 성분 분석을 하는 연구가 활발히 이루어져왔다 (Fukuda et al., 1985; Kato et al., 1998; Osawa et al., 1995). 참깨는 주로 건조한 기후대에 잘 자라는 작물로 알려져 있다 (Ucan et al., 2007). 리그난 성분에는 세사민, 세사몰린, 피노레지놀, 피페리톨, 코부신, 에피세사민, 세사미놀 등이 있고 주성분은 지용성인 세사민과 세사몰린이다. 세사민과 세사몰린 모두 쥐를 통한 연구에서 비타민 E와 K 활성 강화효과, 간에서 지방산 산화를 유도하는 등 인체 유효한 역할을 유추할 수 있다는 연구결과들이 보고되었다 (Hanzawa et al., 2013). 이런 종자 성분함량은 일반적으로 유전적인 영향보다는 재배환경에 영향을 받는다. Shim et al. (2010)은 참깨종자의 단백질, 리그난 함량은 원산지 및 재배환경에 따라 유의적 차이를 보였다는 결과를 보고하였다. 특히 참깨는 원산지와 세계적으로 재배되는 지역이 건조나 반건조 기후대에서 이루어지고 있다. 이에 따라 참깨는 환경 영향, 특히 토양 수분의 영향에는 영향을 많이 받는다. 기존의 참깨와 토양수분과의 관계 연구는 주로 한발 또는 물 부족상황의 물관리를 위한 연구로 이루어져왔다 (Ucan et al., 2007). 기존 연구결과에서 참깨 수량은 토양수분 또는 관개수량과 상당한 유의적 관계를 보이고 있다. 과습상태에서 참깨 생육과 수량 연구로 Chun et al. (2016)은 참깨의 생육시기별 습해 처리를 통하여 참깨는 다른 작물과 같이 유효기 (Tillering)때 과습 처리를 받을 시 수량이 무처리와 대조하여 약 40%의 수량 감소가 있다고 결론 내었다.

현재 정부는 과잉 생산되는 쌀 생산량을 줄이고 자급률이 10%내로 낮은 밭작물의 생산량을 높이기 위해 논토양에서 벼 대체작물로 밭작물 재배를 활발히 추진하고 있다. 우리나라의 논은 침수상태로 벼 재배를 하기 때문에 논토양은 배수불량과 높은 지하수위를 나타내고 있다 (Jung et al., 2011). 높은 지하수위로 인한 상승류는 근권부의 수분 균형에 직접적으로 영향을 주는 요인으로 알려져 있다 (Benz et al., 1984; Meyer et al., 1989). 배수가 양호한 사양질 토양에서 재배되는 밭작물을 배수가 불량한 논토양에서 재배할 경우 적은 강우에도 쉽게 과습상태가 되어서 뿌리 생육에 안 좋은 영향을 주게 된다. 과습조건은 토양 내 산소공급이 부족하게 하며, 양분 부족 및 독성 물질 생성 등의 문제를 야기시키고 이러한 문제는 작물의 생장억제, 노화촉진, 뿌리썩음 등의 현상을 유발시킨다 (Jo et al., 1996; Ji et al., 2009; Lee et al., 2010). 이런 현상들로 인하여 논토양에서 밭작물은 생육부진과 수량감소가 나타나고, 밭작물의 안정적인 생산이 어려운 원인으로 나타났다. 이를 해결하기 위해서는 참깨와 토양수분과의 관계를 세밀히 살펴보아야 하고 최적의 수량을 논 토양에서 내기 위한 적절한 토양수분 관리 방법을 알아보아야 할 필요가 있다.

본 연구는 배수등급이 다른 논 토양에 암거배수와 명거배수 처리를 하여 참깨 두 품종을 재배한 후 참깨 생육과 수량 및 종자성분 차이를 비교 분석하고 지하수위를 이용한 토양수분에 의한 스트레스 반응 특성을 파악하여 적정 토양수분과 토양수분 관리방법을 추정하고자 하였다.

Materials and Methods

토양 및 작물 시험연구가 진행된 토양은 경남 밀양시 부북면 퇴로리에 소재한 논토양으로 토양의 특성은 Table 1과 같다. 곡간지 지형의 가곡통으로 경사 2~7%이고 표토토성은 미사질양토이며 심토토성은 미사식양질이었다. 논 토양은 세부지형적 차이에 따라 배수등급이 매우불량과 약간불량 토양으로 나뉘어졌다 (Fig. 1). 배수방법은 논둑 밑 기저부 1열 암거배수 (pipe drainage line) 방법과 30 cm 깊이의 명거배수 (open ditch drainage line) 방법을 처리하였다. 암거배수는 폭 50 cm에 깊이 상류부 60 cm, 하류부 90 cm로 굴삭하고 20 cm 직경의 유공흡수관을 매설하였다. 배수등급과 배수처리 별 처리구간은 다음과 같이 나뉘어졌다; 매우불량의 암거처리가 된 구간 (매우불량-암거), 매우 불량의 명거처리가 된 구간 (매우불량-명거), 약간 불량 암거처리된 구간 (약간 불량-암거), 약간 불량의 명거처리된 구간 (약간 불량-명거). 각 배수방법별 처리구간 내 논 토양의 토양수분을 측정하기 위하여 토양수분 센서 (EasyAG[®] 50-5 Wire, Sentek Sensor Technologies, SA, Australia)를 이용하여 측정하였다 (Fig. 1). 토양수분 센서를 배수처리 시설에서부터 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에 각 20 cm 깊이에 설치하여 토양수분을 측정하였다. 배수 처리구간 마다 1, 10 m 지점에 지하수위를 측정하는 센서를 설치하였다 (Ecotone TM WM, Fig. 1). 토양수분과 지하수위는 매 1시간마다 토양수분 함량과 지하수위를 측정하여 데이터로거에 저장하였다. 각 배수등급별 토양의 이화학적 특성은 Table 2와 같다. 수리적 특성을 측정하기 위한 토양은 참깨 수확 후 배수등급과 배수처리 별로 나누어 시료 채취하거나 현장에서 측정하였다. 작물은 참깨 품종 중 소분지형인 건백 (Gunbak)과 다분지형 아름 (Areum)을 사용하였고 2015년부터 2016년까지 2년 동안 시험을 진행 하였다. 재배 방식은 휴복 30 cm × 파폭 80 cm의 재식거리, 재식본수는 1본으로 파종하였으며, 표준재배법을 따랐다. 수확시 각 배수처리별 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에서 3반복으로 작물 시료를 채취하였다. 참깨 파종전 작물별 시비처방기준에 따라 비료량을 2.9-3.1-3.2 (N- P₂O₅ - K₂O) 산정하여 토양에 처리하였다. 참깨는 수확 후 생육, 수량구성요소 및 종자성분을 조사하였다.

Table 1. Soil characteristics from the experiment site.

Soil series	Topology	Slope (%)	Effective soil depth (cm)	Soil texture	Soil texture (deep soil)	Soil type
Gagog	Local valley	2~7	> 100	Silt loam	Fine silty	Normal paddy

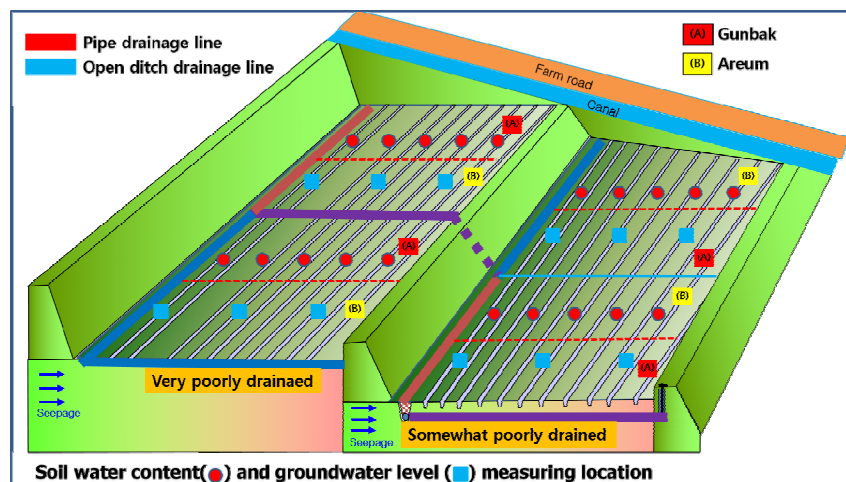


Fig. 1. Diagram of the experiment site and locations of measurements.

Table 2. Chemical and physical properties of paddy field soil from the experiment site.

	Drainage method	Hori-zon	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Organic matter (%)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	K Ca Mg Na			
							(cmlo _c kg ⁻¹)			
Very poorly	Pipe	Ap	7.0	0.2	2.2	127.1	0.5	6.1	2.2	0.1
		B	7.4	0.2	1.8	87.1	0.2	6.2	2.2	0.1
		BC	7.5	0.2	0.8	9.6	0.1	6.6	2.5	0.2
	Open ditch	Ap	7.0	0.2	2.2	99.5	0.4	6.1	2.2	0.1
		B	7.4	0.2	1.8	87.6	0.1	7.4	2.4	0.2
		BC	7.5	0.2	0.8	9.6	0.1	8.1	2.9	0.2
Somewhat poorly	Pipe	Ap	7.0	0.2	1.6	92.5	0.4	6.7	2.3	0.1
		B	7.7	0.1	0.6	2.2	0.1	8.4	2.8	0.1
		BC	7.8	0.1	0.7	2.5	0.1	8.5	2.8	0.1
	Open ditch	Ap	6.6	0.1	1.4	39.1	0.2	5.4	1.8	0.1
		B	7.9	0.1	0.8	3.6	0.1	7.8	2.5	0.1
		BC	7.7	0.1	0.7	2.1	0.1	6.9	2.3	0.1

	Drainage method	Horizon	Depth (cm)	Hardness (mm)	Soil color	Bulk density (g cm ⁻³)
Very poorly	Pipe	Ap	~15	25.8	7.5YR 4/2	1.5
		B	15~30	26.5	7.5YR 3/1	1.6
		BC	30~45	20.2	10YR 3/2	1.6
	Open ditch	Ap	~20	21.7	7.5YR 4/1	1.5
		B	20~35	24.1	10YR 3/2	1.5
		BC	35~45	21.1	10YR 4/1	1.5
Somewhat poorly	Pipe	Ap	~20	24.5	10YR 3/3	1.6
		B	20~35	24.9	10YR 4/2	1.6
		BC	35~45	22.9	10YR 3/2	1.6
	Open ditch	Ap	~15	22	7.5YR 1/2	1.6
		B	15~30	24.2	7.5YR 3/2	1.5
		BC	30~40	23.3	10YR 3/2	1.5

수분 스트레스 지수 작물생육기간 중 작물이 받는 수분과잉에 의한 스트레스의 누적일수를 지수화 하기 위해 Hiller (1969)가 제안한 수분 스트레스 일수 지표 (Stress Day Index, SDI)를 다음과 같이 계산하였다,

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

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, 산소 부족, 투수력, 지하수위 등의 값을 극한치와 연관하여 얻어진 값으로 Hardjoamidjojo et al. (1982)은 과잉 토양수분으로 인하여 생기는 작물의 스트레스 정도를 나타내는 기준 값으로 Sieben (1964)이 제시한 수분스트레스 지표인 지하 -30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도 (SEW₃₀)를 SD 요인으로 대체할 수 있다고 밝혀 Eq. 2와 같이 계산하였다;

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

여기서, SEW₃₀: 지하수위 -30 cm를 초과한 일평균 지하수위의 상승빈도

x_i : i 일의 일 지하수위 깊이 (cm)

n : 생육기간 일수

과잉수분의 초과일수 (SED₃₀)는 Eq. 3과 같이 지하수위 깊이가 -30 cm 초과한 일평균 지하수위의 누적일수를 이용하여 지하수위 변화를 분석하였다;

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

작물 민감성 요인 (Crop Susceptibility factor, CS)는 작물의 주요 생육기간 동안에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량을 조사하여 Hiller (1969)가 제안한 가가 생육시기에 대한 CS 산출식은 다음과 같다;

$$CS_i = \frac{x - x_i}{x} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, x_i : i 생육기에 임계 스트레스를 받은 작물의 수량

x : 아무런 스트레스를 받지 않은 경우의 작물의 수량

종실 성분 분석 참깨 종장 함유된 세사몰린 성분 추출을 위해서 Rangkadilok et al. (2010) 방법을 바탕으로 분석하였다. 분쇄한 종자 1 g을 Falcon tube (50 ml)에 넣고 메탄올 (MeOH) 20 ml를 용매로 하여 24시간 동안 상온에서 교반한 후에 0.2 μm membrane filter로 여과 후 액체 크로마토그래피 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)로 분석하였다. 세사민, 세사몰린 성분 분석은 Shahidi et al. (2006)과 Rangkadilok et al. (2010) 방법으로 하였다. HPLC는 Agilent 1100 series (Agilent technologies Inc., Santa Clara, CA, USA) 모델을 사용하였고, 컬럼은 Lichrospher 100 RP-18e column (125 \times 4.0 mm, 5 μm , Merck)을 사용하여 추출시료 20 μL 를 분석하였다. 용매 조건은 등용 이동상 (isocratic mobile phase)으로 60% MeOH를 사용하였고, 용매 유속은 0.8 ml min⁻¹으로 하였으며 diode array detector로 290 nm에서 검출하였다. 표준물질인 세사민과 세사몰린은 시그마사에서 구입하였고 종자 시료 내 리그난 분석은 표준물질의 머무르는 시간과 비교하여 검량선을 설정하여 계산하였다.

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 and Discussion

배수방법 처리별 토양 및 토양 수분 특성 분석 토양의 물리성과 화학성은 배수등급 또는 배수방법 처리 간 차이가 없었다 (Table 2). 층위 별로 Ap와 B층이 공통적으로 경도가 높고 P₂O₅ 함량값이 높았다. Jung et al. (2012)은 배수불량 경사지 논 토양의 물리성 변화를 살펴본 결과 논토양의 특성으로 20 cm 부근에서 경반층이 형성되어 있고 이로 인한 배수불량 또는 과습 상태가 쉽게 나타나는 경향이 나타난다고 밝혔다. Jung et al. (2012)의 논토양의 용적 밀도 측정시 각 층위별로 1.3~1.6 g cm⁻³ 분포를 보였다. 본 연구의 토양은 표토와 심토의 차이가 거의 없으므로 배수 불량이 표토에서부터 시작되고 경반층의 존재는 나타나지 않았다. 용적밀도 시료를 수확 후 가을에 채취하였는데 당시 토양수분이 매우 낮았으므로 표토의 용적밀도 또한 심토와 비슷한 용적밀도를 보인 것으로 판단된다. 이번 연구 포장의 논토양 또한 이러한 토양적 특성으로 인하여 배수불량 현상과 일부 화학성이 표토층에 밀집해 있는 특성을 보인 것으로 판단된다.

평균 토양 수분값과 과습기간에 대한 결과는 Table 3과 같다. 참깨 재배기간 동안 토양수분은 20 cm 깊이에서 매 시간마다 측정되었고 매우불량-암거 논토양은 23.00 ± 2.79 mm m⁻¹, 매우불량-명거 논토양은 30.39 ± 2.52 mm m⁻¹, 약간불량-암거 논토양 18.95 ± 2.86 mm m⁻¹, 약간불량-명거 논토양은 27.96 ± 4.38 mm m⁻¹ 였다. 배수방법별 토양수 분 평균값은 통계적으로 확연한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 각 구간별 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 지점에서 측정된 토 양수분 값은 Fig. 2에 나타나있다. 매우불량 논은 암거와 명거 처리된 논 모두 1 m 지점 이후 토양수분이 감소하나 10 m 지점에서 다시 증가하고 이후 감소하다가 20 m 지점에서 증가하는 경향을 보이고 있다. 매우불량-명거 구간은 측정 지점마다 변이가 매우 컸고 암거배수는 지점간 토양수분 변이가 작았다. 이와 같은 경향은 약간 불량 논에서도 나타났 다. Jung et al. (2011)은 경사지 논토양에서 다양한 배수처리를 한 결과 암거배수가 다른 배수처리들보다 처리구간 내 토양수분 변이가 가장 작다는 결과를 밝혔다. 이번 연구결과에서도 암거배수 구간은 토양배수 등급과 상관없이 명거 배수보다 구간 내 토양수분 함량 변이가 상대적으로 더 작았다. 이는 암거배수시설이 포장 내 토양수분을 공간적으로 균일하게 유지하는데 더 효과적이라고 판단된다.

Table 3. Duration of excessive soil moistures that were over saturation level from the experiment soils.

Drainage class / Drainage method	Saturation level (%)	Duration of excess soil water (hr)	Average soil water content (mm m ⁻¹)
Very poorly			
Pipe	36.7	127	23.00 ^a
Open ditch	32.5	1455	30.39 ^b
Somewhat poorly			
Pipe	32.6	87	18.95 ^a
Open ditch	30.9	1237	27.960 ^b

^{a,b}: statistical difference between drainage methods.

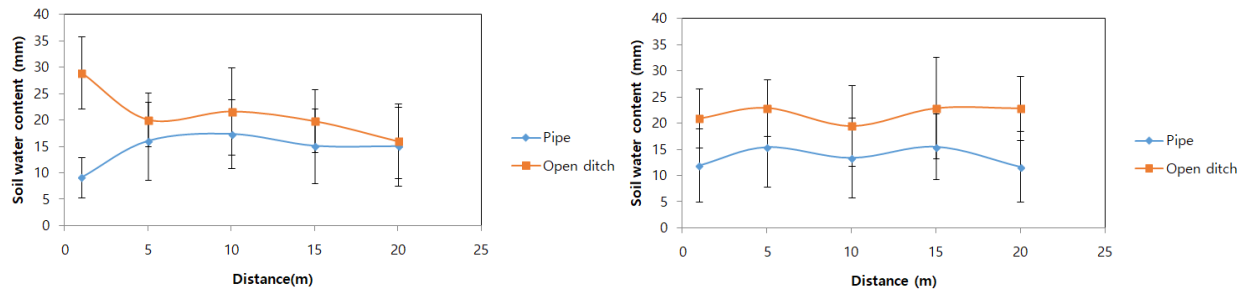


Fig. 2. Average and standard deviation values of soil moisture contents from 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, and 20 m in very poorly drained class paddy field (top) with open ditch and pipe drainage and somewhat poorly drained class paddy field (bottom) with open ditch and pipe drainage.

2015~2016년 재배기간 동안 매 시간마다 측정된 데이터를 바탕으로 과습이 지속된 시간을 측정한 결과가 Table 3에 나타나있다. 각 구간마다 토양의 포화도를 측정하여 이를 바탕으로 과습한 일수 즉 토양 수분이 포화도를 초과하는 일수는 매우불량 논이 약간불량 논 보다 더 많았고 명거배수가 암거배수보다 더 많은 과습일수가 있었다. 과습기간을 살펴보면 명거배수 시설 구역은 암거배수보다 열 배 이상의 높은 값들을 보이고 있다. 매우불량-암거 처리된 구간은 평균 127시간의 과습 지속 시간이 있었고 명거 처리된 구간은 1,455시간이 과습한 상태였다. 약간불량-암거는 87시간 그리고 약간불량-명거는 평균 1,237시간이 과습 상태이었다. Jung et al. (2011)는 암거배수, 명거배수, 비닐차단 및 관다발배수와 같은 배수시설을 논토양에 설치한 후 과습지속 시간을 조사한 결과 암거배수가 100시간으로 가장 작은 값을 보였고 명거배수가 1,270시간으로 가장 높았다. 이 연구에서도 암거배수와 명거배수가 약 열 배 이상의 차이를 보였고 암거배수가 강우 후에도 토양 내 과습지속 시간을 단축시키므로 토양의 과습상태를 최소화 하는 것으로 나타났다. 이와 같은 토양수분의 과습지속 기간과 평균 토양 수분값은 참깨의 토양수분 스트레스 반응 결과와 비슷한 경향을 보였다.

배수방법별 참깨 생육 및 수량구성요소 분석 건백과 아람 참깨의 수량구성요소 조사결과는 다음과 같았다 (Tables 4, 5). 건백 참깨는 토양 수분에 따른 수량의 차이가 확연히 나타났고 아람은 토양 수분에 따른 수량차이가 작았다. 건백은 약간불량-암거 처리된 구간에서 $146.1 \pm 10.5 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 높은 평균 수량을 보였고 매우불량-명거 구간이 $91.6 \pm 11.9 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 낮은 평균 수량값을 보였다 ($p < 0.05$). 세부적으로 약간 불량-암거 구간 내 15 m 지점이 $163.8 \pm 12.9 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 높았고 매우불량-명거 구간 내 10, 15 m 지점이 평균 수량 $77.2 \pm 5.8 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, $75.5 \pm 6.8 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 아람은 배수등급과 배수처리 구역간 수량차이가 통계적으로 나타났으나 토양수분 함량과 연관되어 있지는 않았다. 가장 높은 수량은 매우불량-암거처리 구간으로 $114.5 \pm 13.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 높았고 약간불량-암거와 명거 처리구간이 $75.5 \pm 11.9 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, $73.5 \pm 5.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 매우불량 논이 약간불량 논보다 월등히 높은 값을 나타난 것은 아람이 토양수분에 따른 스트레스로 수량감소가 나타나지 않았다고 판단된다. 이 결과를 바탕으로 아람은 토양 수분의 영향을 건백 참깨보다는 상대적으로 적게 받는 것으로 판단할 수 있었다. Jung et al. (2011)과 Woo et al. (2014)는 명거와 암거 배수처리를 한 논토양에서 콩과 팥을 재배하여 토양수분과 수량의 관계를 연구하였다. 이 연구결과들도 배수방법 별로 수량차이가 확연히 나타났다. 암거 배수시설을 한 경우 과잉 토양수분이 제거되고 제거 속도 또한 빨라서 수량증가가 명거 배수에서 재배된 콩과 팥의 수량보다 확연히 컸다.

Table 4. Characteristics of Gunback growth and yield components from soils of all drainage classes and drainage methods.

Drainage class	Drainage method	Distance (m)	Stem length (cm)	Stem thickness (mm)	No. capsule per plant	1000 grain weight (g)	Yield (kg 10a ⁻¹)
Very poorly	Pipe	1	131.3 ^c	9.6 ^b	55.8 ^c	3.1 ^a	84.2 ^b
		5	127.1 ^c	9.0 ^d	49.2 ^c	3.0 ^a	77.0 ^b
		10	161.6 ^b	11.3 ^b	79.8 ^b	2.8 ^a	113.3 ^a
		15	176.9 ^a	12.7 ^a	118.1 ^a	2.6 ^b	113.6 ^a
		20	174.6 ^a	13.1 ^a	126.0 ^a	2.5 ^b	118.4 ^a
	Open ditch	1	131.0 ^a	8.5 ^b	59.0 ^b	2.9	92.8 ^b
		5	134.7 ^a	10.0 ^a	73.8 ^a	2.8	115.9 ^a
		10	105.9 ^c	7.8 ^c	56.1 ^b	2.9	77.2 ^c
		15	100.9 ^d	7.0 ^d	52.1 ^b	2.8	75.5 ^c
		20	111.3 ^b	9.7 ^a	27.5 ^b	3.0	96.7 ^b
Somewhat poorly	Pipe	1	143.8 ^c	11.2 ^d	79.3 ^c	2.8	124.1 ^b
		5	159.8 ^b	11.7 ^c	95.8 ^b	2.8	145.8 ^{ab}
		10	170.5 ^a	12.2 ^b	101.5 ^b	2.7	157.0 ^a
		15	155.3 ^b	12.4 ^{ab}	112.9 ^a	2.7	163.8 ^a
		20	173.2 ^a	12.7 ^a	113.6 ^a	2.8	139.8 ^b
	Open ditch	1	148.5 ^c	10.6 ^c	73.7 ^b	2.8	118.8 ^b
		5	151.5 ^c	10.6 ^c	73.7 ^b	2.8	123.5 ^{ab}
		10	164.4 ^b	11.5 ^b	95.4 ^a	2.7	131.7 ^{ab}
		15	166.7 ^{ab}	11.3 ^b	95.2 ^a	2.7	133.8 ^a
		20	169.0 ^a	12.0 ^a	97.4 ^a	2.7	136.5 ^a

a,b,c,d: statistical differences across drainage methods and distance from the drainage lines at 95% level.

Table 5. Characteristics of Areum growth and yield components from soils of all drainage classes and drainage methods.

Drainage class	Drainage method	Distance (m)	Stem length (cm)	Stem thickness (mm)	No. capsule per plant	1000 grain weight (g)	Yield (kg 10a ⁻¹)
Very poorly	Pipe	1	166.2 ^c	12.1 ^d	6.6 ^b	2.7 ^b	94.9 ^c
		5	193.0 ^b	12.6 ^b	6.9 ^a	2.7 ^b	119.3 ^a
		10	167.9 ^c	11.9 ^{cd}	6.6 ^b	2.8 ^a	107.8 ^b
		15	195.1 ^b	12.4 ^b	6.5 ^b	2.8 ^a	124.1 ^a
		20	210.3 ^a	12.9 ^a	6.6 ^b	2.8 ^a	126.5 ^a
	Open ditch	1	142.5 ^e	10.8 ^c	6.9 ^a	2.9 ^a	89.9 ^b
		5	148.3 ^d	10.4 ^c	6.9 ^a	2.9 ^a	74.8 ^b
		10	152.9 ^c	11.3 ^b	6.6 ^b	2.8 ^b	91.4 ^{ab}
		15	166.1 ^b	10.6 ^c	6.7 ^{ab}	2.8 ^b	107.7 ^a
		20	171.7 ^a	11.8 ^a	6.8 ^{ab}	2.8 ^b	110.7 ^a
Somewhat poorly	Pipe	1	118.1 ^e	10.6 ^b	6.8 ^a	2.6 ^{bc}	79.3 ^{ab}
		5	132.3 ^d	8.4 ^c	6.3 ^b	2.7 ^{ab}	58.8 ^b
		10	138.9 ^c	10.5 ^b	6.4 ^b	2.8 ^a	75.1 ^{ab}
		15	145.3 ^b	13.8 ^a	6.7 ^a	2.4 ^d	91.7 ^a
		20	174.0 ^a	10.5 ^b	6.4 ^b	2.5 ^{cd}	72.6 ^{ab}
	Open ditch	1	150.8 ^c	11.4 ^b	6.9 ^a	2.8 ^a	74.6 ^{cd}
		5	142.0 ^d	10.0 ^c	6.6 ^b	2.8 ^a	66.8 ^d
		10	167.8 ^b	11.8 ^b	41.5 ^a	3.1 ^a	72.4 ^a
		15	180.8 ^a	12.5 ^a	89.0 ^a	3.0 ^a	81.0 ^a
		20	180.3 ^a	12.6 ^a	61.1 ^a	2.8 ^a	72.5 ^a

a,b,c,d: statistical differences across drainage methods and distance from the drainage lines at 95% level.

Jung et al. (2011)은 암거 배수가 설치된 논토양은 암거 배수시설에서부터 수량이 일정한 패턴으로 증가를 하는 경향을 보였고 이 연구에서도 암거배수 처리된 구역은 처리시설로부터 멀어질수록 수량이 증가하는 균일성을 보였다. 반면 명거배수는 포장 중앙과 그 이후 지점까지 수량 증가 또는 감소가 불규칙하게 나타났다. 반면 이와 같은 반응도 건백과 같이 토양수분에 민감한 참깨는 같은 경향을 보이거나 아름과 같이 토양수분의 영향을 적게 받는 품종은 배수시설에서 거리와 상관관계를 보이지 않았다.

배수방법별 지하수위 변화와 토양수분 스트레스 지수 참깨 재배 기간 동안 평균 지하수위 높이와 과습 상태인 -30 cm 보다 더 높은 지하수위를 유지한 일수 (SED₃₀)는 Fig. 3과 Table 6과 같다. 매우불량-명거처리 구간이 평균 지하수위 값이 -42.87 cm로 다른 처리구간보다 더 높은 지하수위를 보였고 약간불량-암거처리구간이 -74.34 cm로 가장 낮은 지하수위를 보였다. 배수방법별 지하수위는 암거처리 구간이 공통적으로 명거처리 구간보다 더 낮은 지하수위를 보였다. 반면, SED₃₀은 매우불량-암거와 약간불량-암거로 처리된 구간이 비슷한 값을 보였고 이것은 명거처리 구간들보다 확연히 낮은 값이었다. 2년 동안 평균 참깨 재배기간이 87일였으므로 암거처리 구간은 재배기간의 17%, 명거처리 구간은 평균 45% 이상이 과습상태였다. 매우불량-명거 구간은 재배기간의 80%가 과습한 상태였다. Sieben (1964)은 여러 작물을 비교하여 지하수위 -30 cm를 초과한 합 (SEW₃₀)이 100~200 cm 보다 크면 수량감소가 일어나며, 100 cm 이내에 있으면 안전하다고 하였다. 약간불량-암거 구간 내 참깨는 재배기간 동안 SEW₃₀값이 74.48 cm 이므로 과습으로 인한 수량감소가 최소화 또는 수량감소가 없는 것으로 판단되고 다른 구간들은 과습으로 인한 수량감소가 일어난 것으로 나타났다. 참깨의 생육시기별 토양수분 스트레스를 정량화하기 위하여 Eq. 1에 따라 SDI를 계

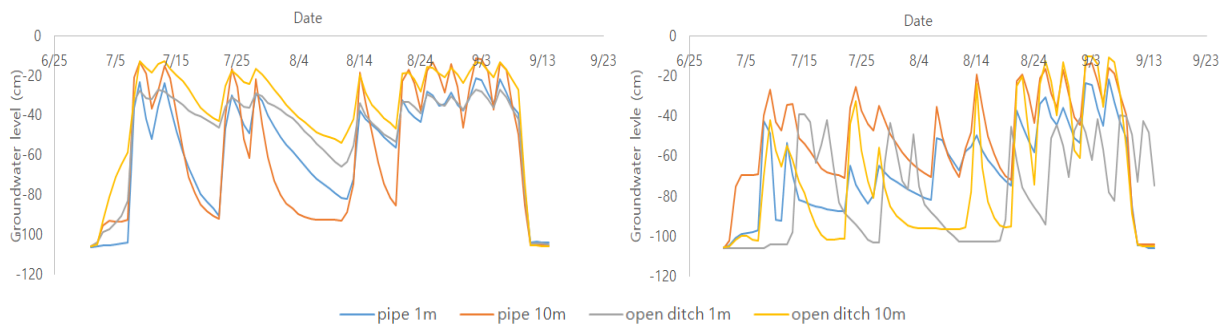


Fig. 3. Distributions of groundwater levels during sesame cultivation from very poorly (top) and somewhat poorly (bottom) drained paddy fields with pipe and open ditch drainage method.

Table 6. Results of groundwater levels and days of excessive groundwater level.

Drainage class / Drainage method	Average groundwater level (cm)	SED30 (day)	SEW30 (cm)
Very poorly			
Pipe	-56.95 ^b	14	150.33
Open ditch	-42.87 ^a	69	210.24
Somewhat poorly			
Pipe	-74.34 ^b	14.5	74.48
Open ditch	-59.51 ^a	40.5	167.76

^{a,b}: statistical differences across drainage methods at 95% level.

산하였고 결과는 Table 7, 8과 같다. 토양수분과 지하수위에 따른 과습상태 지속과 SDI의 결과는 비슷한 경향을 보였다. 약간불량 논이 매우불량 논보다, 암거처리 구역이 명거처리 구역보다 SDI 값이 더 낮았고 이는 토양수분에 의한 스트레스가 상대적으로 작았다. CS값은 Chun et al. (2016)이 건백과 아름의 생육시기별 CS값을 연구한 결과를 따랐다. Chun et al. (2016) 연구에서 참깨의 생육시기별로 기간을 나누어 살펴보면 과습에 의한 피해는 유묘기 (Tillering) 때 가장 컸고 CS factor는 유묘기때 가장 컸었다. 이번 연구에서는 실제 포장에서 파종기가 5월말이므로 유묘기때는 강우량이 적고 이로 인하여 토양수분이 많지 않았다. 따라서 암거처리 구간의 SDI값은 유묘기때 모두 0으로 나타났다. 반면 명거 구간은 암거 처리 구간들보다 높은 SDI값을 보였다. 강우량이 적어도 배수가 불량하고 토양수분값이 높았으므로 참깨에 더 크게 스트레스를 주어 다른 생육기간보다 높은 SDI값을 보였다. 생육기간 내내 암거처리 구간은 명거처리 구간보다 낮은 SDI값을 보였다. 참깨 생육기간 중 유묘기 이후부터 개화기 (Flowering)까지는 장마가 시작되면서 지하수위의 상승이 나타났고 이로 인한 토양수분의 증가와 SDI값의 증가도 나타났다. 건백과 아름을 비교하면 같은 토양 수분 조건에서도 아름 참깨가 건백보다 낮은 SDI값을 보였다. 이는 아름이 토양수분에 의한 스트레스를 상대적으로 더 적게 받았다는 결과로 해석된다. Kanwar (1988)은 다양한 배수등급의 토양에서 옥수수를 3년간 재배하여 SDI값을 계산하였다. 매우불량에서부터 양호한 배수 상태의 토양들을 조사한 결과 옥수수의 SDI 결과는 173.1에서 0.2까지 다양한 결과를 보였다. 배수가 불량한 토양일수록 높은 SDI값을 보였고 이와 비슷한 결과는 콩 (Purwanto et al., 1993)과 옥수수 (Evans et al., 1986; Hardjoamidjojo et al., 1982)에서도 같은 경향을 보였다. Jung et al. (2011)은 다양한 배수방법을 논 토양에 적용하여 콩의 수분스트레스 지수를 조사한 결과 지하수위가 상대적으로 낮았던 암거배수 구간의 콩이 SDI값이 가장 적은 값을 보였고 이는 토양 수분 스트레스가 가장 낮았다고 결론지었다. 반면 명거배수는 다른 배수방법들보다도 더 높은 지하수위를 보였고 콩의 SDI 값들도 상대적으로 더 높았다. 이 연구에서 참깨는 장마기간이 과습에 상대적으로 취약한 화아형성기와 개화기때 겹치면서 SDI 값들이 이 기간 동안 콩과 비교하여 상대적으로 더 큰 값을 보이고 이는 과습으로 인한 수량 감소에 상당한 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 7. Stress- Day Index (SDI) results of two sesame cultivars (Gunbak and Areum) from the four experiment sections; very poorly - pipe, very poorly - open ditch, somewhat poorly - pipe and somewhat poorly - open ditch.

Cultivar	Growth stage	CS Factors	SDI (cm-day)			
			Poorly-pipe	Poorly-open ditch	Somewhat poorly-pipe	Somewhat poorly-open ditch
Gunbak	Tillering	0.52	0	110.46	0	54.91
	Booting	0.29	28.17	60.52	23.98	54.16
	Flowering	0.27	19.54	47.51	19.00	30.96
	Milk development	0.20	4.70	31.55	1.87	21.59
	Ripening	0.12	3.81	18.73	2.53	5.73
	Sum		56.22	268.77	47.36	167.34
Areum	Tillering	0.32	0	40.95	0	42.38
	Booting	0.27	26.14	56.15	22.25	50.25
	Flowering	0.21	12.28	29.85	11.93	19.45
	Milk development	0.10	1.70	11.38	0.68	7.78
	Ripening	0.07	3.22	15.82	2.13	4.84
	Sum		43.26	154.15	36.99	124.7

Growth stages followed Zadoks growth scale.

Table 8. Summary of yield and seed components by different soil moisture contents from Gunbak and Areum cultivated from paddy fields.

Cultivar	Soil moisture content (mm m ⁻¹)	Yield (kg 10a ⁻¹)	Seed component content			
			Protein (%)	Sesamin (mg g ⁻¹)	Sesamolins (mg g ⁻¹)	Lignan (mg g ⁻¹)
Gunbak	20~25	129.2 ^{ab}	22.9	4.6 ^a	2.9 ^a	7.6 ^a
	26~30	130.7 ^a	23.6	4.3 ^{ab}	2.6 ^{ab}	6.9 ^{ab}
	31~35	118.9 ^{ab}	23.1	3.9 ^{bc}	2.4 ^{ab}	6.3 ^{ab}
	36~40	104.1 ^b	23.1	3.8 ^{bc}	2.6 ^{ab}	6.4 ^{ab}
	> 41	86.9 ^c	24.0	3.5 ^c	2.2 ^b	5.7 ^b
Areum	20~25	100.7 ^a	21.5	1.1	1.6	2.7
	26~30	99.5 ^a	22.3	1.1	1.7	2.8
	31~35	86.4 ^a	22.6	1.1	1.7	2.8
	36~40	83.0 ^{ab}	22.7	1.1	1.8	2.9
	> 41	73.8 ^{ab}	22.7	1.1	1.8	2.9

a,b,c,d: statistical differences across drainage methods and distance from the drainage lines at 95% level.

배수방법별 종자성분 분석 참깨 종자 성분은 결과는 Fig. 4와 같다. 단백질 함량은 건백과 아름 모두 배수등급과 배수처리 별 통계학적 차이가 없었다. 단백질을 제외한 세사민, 세사몰린과 리그난 함량은 건백 참깨의 경우 토양 배수등급간 차이는 유의하지 않는 값들을 보였고 ($p > 0.05$), 반면 배수방법 별 차이에서는 종자성분 값들이 확연한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 약간불량-암거처리 구간은 건백의 리그난 함량값이 $7.40 \pm 0.30 \text{ mg g}^{-1}$ 으로 가장 높았고 명 거처리 구간은 리그난 성분 함량값이 $6.51 \pm 0.50 \text{ mg g}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 세사민함량과 세사몰린 함량은 리그난 함량과 비슷한 경향을 보였다. 반면 아름 참깨는 배수등급과 배수방법별 처리구간 간 종자성분 함량의 차이가 없었다. 참깨의 리그난 성분은 일반적으로 유전적인 영향을 많이 받지만 재배환경에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2002). Ryu et al. (1993)은 참깨 품종 별로 온도와 일장 시간에 변화를 주었을 경우 재배온도가 최적의 온도로 올라갈수록 세사민값이 증가하고 최적의 온도가 지난 후엔 다시 떨어지고 일장이 길어짐에 따라서 세사민값이 높아졌다가 최적의 일장길이가 지나면 다시 세사민값이 떨어졌다. Kim et al. (2002)은 참깨 재배조건에 따라 리그난 값의 변화를 분석한 결과 시설재배보다는 노지재배에서 세사민과 세사몰린값이 모두 높았다. 이와 같이 기존 연구결과에서 참깨의 리그난 성분은 환경과 재배여건에 따라 성분 변화를 보이는데 환경스트레스를 받거나 재배환경이 나빠질 경우

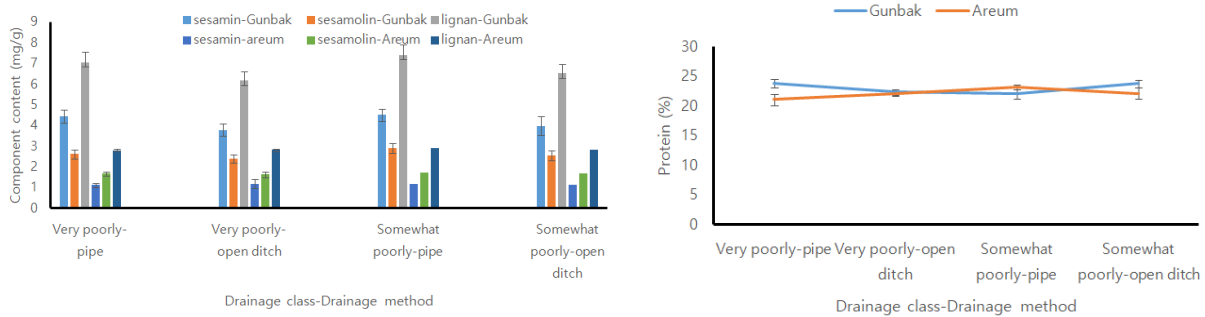


Fig. 4. Distributions of sesame seed components from very poorly and somewhat poorly drained paddy fields with pipe and open ditch drainage method; top- contents of sesamin, sesamolins and lignan, bottom- protein content.

리그난 값이 감소하는 경향을 보였다. 이 연구에서는 토양 수분 스트레스에 대한 반응으로 참깨 리그난 함량 값이 영향을 받은 것으로 판단된다. 다만 참깨 품종에 따라 토양 수분 스트레스에 대한 리그난 함량 반응이 다른 것으로 보인다.

참깨는 논 토양의 배수등급과 배수시설 별 처리에 따라 수량의 차이가 나타났다. 이는 토양수분과 지하수위의 차이에 따라 참깨가 생육과 수량차이를 보인 것으로 판단된다. 품종 별로 건백 참깨는 아름 참깨보다 상대적으로 더 토양 수분에 민감한 반응을 보였고 이는 건백 참깨가 논 토양의 과습 피해에 더 취약하다는 의미로 해석된다. 지형적 배수 등급 차이보다는 인위적 배수시설이 초과 토양수분을 제거하는데 더 효과적이었다. 참깨 생육과 수량은 배수등급보다는 암거 배수시설과 같은 배수처리 시설에서 더 확연한 토양 수분 및 지하수위 감소와 수량의 증가를 보였다. 지하수위에 따른 토양수분 스트레스를 정량화한 SDI값은 이러한 차이가 더 확연히 나타났다. 암거처리 구간은 명거처리 구간보다 매우불량 논은 80% 감소한 SDI값을 보였고 약간불량 논은 66% 감소한 SDI 값을 보였다. 종자의 리그난 함량도 적절한 과습조건이 최소화된 암거처리 구간에서 상대적으로 더 높은 함량 값을 보였다. Woo et al. (2014)는 배수방법에 따른 토양 수분이 높은 토양에서 재배된 팥이 더 높은 항산화성분 및 항산화활성 값을 나타낸다고 보고하였다. 즉 토양수분 스트레스를 더 받은 팥에서 종자의 기능성 성분이 증가하는 경향을 밝혔다. 참깨는 팥과 달리 과습에 더 지속된 경우 리그난 함량이 감소하는 경향을 보였다. 이런 결과는 팥의 기능성 성분이 수용성 성분이고 참깨 종자 성분인 리그난은 지용성 성분이므로 토양수분 스트레스에 다른 반응을 보인 것으로 판단된다. 위에서 논한 바와 같이 기존의 연구에서 참깨는 환경 스트레스를 받을 경우 리그난 성분이 감소하는 결과를 보였다 (Kim et al., 2002). 참깨 재배기간 동안 평균 토양수분에 따른 수량과 종자성분의 관계는 Table 8에 나타나있다. 건백 참깨는 토양 수분이 26~30 mm m⁻¹인 경우 수량이 가장 높았고 35 mm m⁻¹까지 수량과 종자성분이 큰 감소 없이 유지되었다 ($p < 0.05$). 반면 토양 수분이 36 mm m⁻¹를 초과할 경우 수량 감소가 확연히 나타나고 41 mm m⁻¹를 초과한 경우 수량과 종자성분인 세사민, 세사몰린과 리그난 함량이 같이 감소하였다. 아름 참깨는 토양 수분 35 mm m⁻¹까지 수량의 감소가 없었고 ($p > 0.05$) 36 mm m⁻¹부터 수량이 약간 감소하나 감소률은 건백보다 작았고 41 mm m⁻¹가 초과되어도 수량 감소률이 건백보다 상대적으로 완만하였다. 아름은 토양수분 변화에 따른 종자 성분의 차이는 없었다. 평균 토양 수분값을 바탕으로 참깨의 수량과 종자성분 영향을 살펴본 결과 참깨 재배시 적정 토양수분함량은 논 토양에서 30 mm m⁻¹ 이하인 경우 과습에 의한 피해가 거의 나타나지 않았다. 또한 35 mm m⁻¹의 토양 수분까지도 참깨는 과습 피해가 크지 않았다. 기존의 여러 논문들이 참깨 재배 시 건조한 조건에서 더 좋은 수량을 낸다는 연구결과들이 있었다 (Mensah et al., 2006). 반면 수분과 참깨의 관계를 살펴보면 Choi et al. (1990) 연구에서 참깨의 생육과 수량을 토성과 관개량에 따라 차이를 분석하였다. 경장은 사양질 토양인 경우 관개량에 따라 차이를 보였으나 식양질 토양은 관개량에 상관없었다. Choi et al. (1990)과 Ucan et al. (2007)의 연구 결과는 참깨 재배에 중요한 요인은 관개량 보다는 토양 배수가 더 중요한 요인이라는 결과도 냈었다. 이는 참깨가 단순한 토양수분 함량보다는 토양의 배수상태에 따라 수량과 종자성분이 매우 밀접하게 연관되어 있는 것으로 판단된다. 현장에서 지하수위가 높고 배수가 불량한 논 토양에서 참깨를 재배 할 때는 습해 영향으로 질병발생과 리그난 함량 감소를 줄이기 위해서는 토양 배수와 이에 따른 초과 토양수분을 제거할 수 있는 상태가 매우 중요한 요인으로 판단된다.

Conclusion

본 연구는 벼 대체작물로 참깨의 논 토양 재배를 위하여 수분 스트레스에 대한 생육, 수량과 종실 성분 특성을 분석하였다. 배수가 불량한 논 토양에서 참깨의 과습으로 인한 피해를 최소화 하기 위하여 암거배수와 같은 배수시설의 설

치가 매우 효과적이었다. 암거배수는 논 토양의 과습지속 상태를 최소화시키면서 구간 내 토양 수분 분포를 균일하게 하여 참깨 수량 증가에 중요한 요인으로 나타났다. 참깨의 리그난과 같은 종자성분은 건백과 같은 참깨는 과습 상태를 줄일수록 성분 함량 값의 증가를 보였다. 이에 따라 논 토양에 벼 대체작물로 참깨를 재배 할 때 수량뿐만 아니라 종자 성분의 감소를 줄이기 위하여 토양 배수관리 및 수분관리 방법에 대한 세밀한 연구가 필요할 것이다. 본 연구의 결과에 따라 논토양의 발작물 재배시 과습피해를 최소화 하기 위해서는 암거배수를 설치하는 것이 안정적인 발작물 생산에 도움이 될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호: PJ01163803)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Benz, R., F. Conti, and R. Fioravanti. 1984. Extrinsic charge movement in the squid giant axon membrane. Effect of pressure and temperature. *Eur. Biophys. J.* 11:51-59.
- Choi, H.K., Y.J. Kim, J.O. Guh, J.K. Hwang, and H.J. Kim. 1990. Influences of water-logging period at different growth stages on agronomic characters in sesame. *Korean J. Crop Sci.* 35(3):224-232 (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. Agric. Sci.* 43(4):547-559.
- 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.
- Fukuda, Y., T. Osawa, M. Namiki, and T. Ozaki. 1985. Studies on antioxidative substances in sesame seed. *Agric. Biol. Chem.* 49:301-306.
- Hanzawa, F., S. Nomura, E. Sakuma, T. Uchida, and S. Ikeda. 2013. Dietary sesame seed and its lignan, sesamin, increase tocopherol and phyloquinone concentrations in male rats. *J. Nutri.* 143(7):1067-1073.
- Hardjoamidjojo, S., R.W. Skaggs, and G.O. Schwab. 1982. Corn yield response to excessive soil water conditions. *Trans. ASAE* 25:922-927, 934.
- Hiller, E.A. 1969. Quantitative evaluation of crop-drainage requirements. *Trans. ASAE* 12:499-505.
- Ji, C.H., W.H. Kim, K.Y. Kim, S.H. Lee, S.H. Yoon, and Y.C. Lim. 2009. Effect of different drained conditions on growth, forage production and quality of silage corn at paddy field. *J. Kor. Soc. Grass. Forage Sci.* 29:329-336 (in Korean).
- Jo, J.S., C.S. Kim, and J.Y. Won. 1996. Crop rotation of the Korean ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) and the rice in paddy field. *Kor. J. Medi. Crop Sci.* 4:19-26 (in Korean).
- Jung, K.Y., E. Yun, C. Park, J. Hwang, Y. Choi, and K. 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 (in Korean).
- Jung, K.Y., E. Yun, C. Park, J. Hwang, Y. Choi, S. Jeon, and H. Lee. 2012. Variation of soil physical characteristics by drainage improvement in poorly drained sloping paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(5):704-710 (in Korean).

- Kanwar, R.S., J.L. Baker, and S. Mukhtar. 1988. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. *Trans. ASAE* 31(1):133-141.
- Kato, M. J. A. Chu, B. Davin, and N.G. Lewis. 1998. Biosynthesis of antioxidant lignans from *Sesamum indicum*. *Phytochemistry*, Oxford, 47(4):583-591.
- Kim, D.K., Y.I. Kuk, S.U. Chon, M.H. Kang, J.C. Lee, M.S. Kim, and G.C. Bak. 2014. Growth and seed quality as affected by growing condition in sesame. *Korean J. Crop Sci. J.* 47(6):443-447 (in Korean).
- Lee, J.E., H.S. Kim, Y.U. Kwon, G.H. Jung, C.K. Lee, H.T. Yun, and C.K. Kim. 2010. Responses of root growth characters to waterlogging in soybean [*Glycine max (L.) Merrill*]. *Korean J. Crop Sci.* 55:1-7 (in Korean).
- Mccarty, L.B., L.R. Hubbard, and V. Quisenberry. 2016. Applied soil physical properties, drainage and irrigation strategies. Spring International Publishing AG, Switzerland.
- Meyer, S.E., E.D. McArthur, and G.L. Jorgensen. 1989. Variation in germination response to temperature in rubber rabbitbrush (*Chrysothamnus nauseosus*: Asteraceae) and its ecological implications. *Am. J. Bot.* 76:981-991.
- Osawa, T., M. Nagata, M. Namiki, and Y. Fukuta. 1995. Sesamolol, a novel antioxidant isolated from sesame seeds. *Agric. Biol. Chem.* 49:3351-3352.
- Purwanto, M.Y.J., S. Hardjoamidjojo, R. Nakamura, and N. Kubo. 1993. Crop yield prediction by stress day indices under both excessive and deficient soil water conditions. *J. Irri. Eng. Rural Plan.* 25:101-110.
- Rangkadilok, N., N. Pholphana, C. Mahidol, W. Wongyai, K. Saengsooksree, S. Nookabkaew, and J. Satayavivad. 2010. Variation of sesamin, sesamolol, and tocopherols in sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds and oil products in Thailand. *Food Chem.* 122:724-730.
- Ryu, S.R., J.L. Lee, and H.S. Lee. 1993. Effect of temperature and day-length on antioxidants in sesame. *Korean J. Crop Sci.* 38(4):330-335 (in Korean).
- Shahidi, F., C.M. Liyana-Pathirana, and D.S. Wall. 2006. Antioxidant activity of white and black sesame seeds and their hull fractions. *Food Chem.* 99:478-483.
- Shim, K.B., C.D. Hwang, S.B. Pae, M.H. Lee, T.J. Ha, C.H. Park, and K.Y. Park. 2010. Comparison of physiochemical characters of sesame seeds according to the different producing origin. *Korea J. Intl. Agric.* 22(4):371-375 (in Korean).
- Sieben, W.H. 1964. Relation of drainage conditions and crop yields on young clay soils in the Ysellake polders. *VanZee tot Land* 40.
- Ucan, F., C. Killi, H. Gencoglan, and H. Merdun. 2007. Effect of irrigation frequency and amount on water use efficiency and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under field conditions. *Field Crops Res.* 101:249-258.
- Woo, K.S., K.Y. Jung, S.B. Song, J.Y. Ko, J.S. Lee, Y.D. Choi, Y.S. Yoon, T.W. Jung, and I.S. Oh. 2014. Effects of the drainage methods on antioxidant compounds and antioxidant activity of ethanolic extracts on adzuki bean. *Korean J. Crop Sci.* 59(3):350-358 (in Korean).