Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.55, No.4, pp.273-285, 2022

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.273
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Growth Responses of Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) to Irrigation and Fertilization in Saemangeum Reclaimed Land

Heekyoung Ock[1], Kwangseung Lee[2], Kangho Jung[3], Suwhan Lee[1], and Yangyeol Oh[1]*

[1]Researcher, Reclaimed Land Agriculture Research Team, NICS, Wanju 55365, Korea
[2]Post-Doctoral, Reclaimed Land Agriculture Research Team, NICS, Wanju 55365, Korea
[3]Senior Researcher, Reclaimed Land Agriculture Research Team, NICS, Wanju 55365, Korea

***Corresponding author:** nubira7777@korea.kr

Received: August 12, 2022
Revised: November 8, 2022
Accepted: November 8, 2022

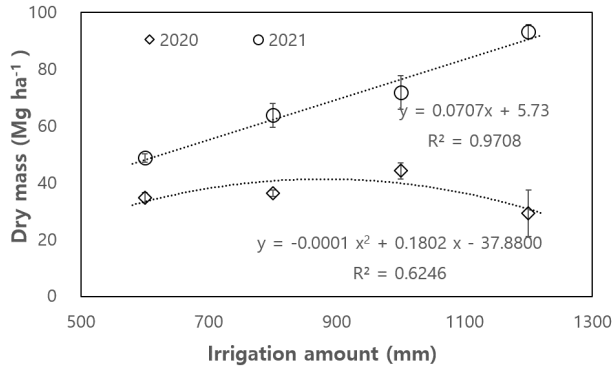
Edited by
Seok-In Yun,
Wonkwang University, Korea

ORCID
Heekyoung Ock
https://orcid.org/0000-0002-9519-7023
Kwangseung Lee
https://orcid.org/0000-0002-0132-0765
Kangho Jung
https://orcid.org/0000-0001-8854-7278
Suwhan Lee
https://orcid.org/0000-0002-5354-3020
Yangyeol Oh
https://orcid.org/0000-0002-7471-0406

ABSTRACT

Irrigation is required to control salinity and drought stress but it is difficult to secure water resources with good quality in reclaimed lands. This study was conducted to 1) examine applicability of river water as irrigation resources, and 2) estimate suitable irrigation amount and nitrogen fertilization rate (NFR) according to root zone condition for kenaf in the Saemangeum reclaimed land. Under the limited rooting depth, kenaf was cultivated with four irrigation levels (600, 800, 1,000 and 1,200 mm) and four NFRs (0, 36, 84 and 120 N kg ha^{-1}) in 2020. With the extended rooting depth, kenaf was subjected to same irrigation treatments to those in 2020 and three NFRs (0, 60 and 120 N kg ha^{-1}). The Total organic carbon (TOC) and Biochemical oxygen demand (BOD) of river water slightly exceeded the agricultural water quality standard in some periods on 2020 and 2021, but water quality generally met the standard. Kenaf growth and yield increased with irrigation of 1,000 mm, but decreased in 1,200 mm compared to those in 1,000 mm under the limited rooting condition. With extended root zone, kenaf yield continuously increased with irrigation. At irrigation of 1,200 mm, kenaf yield increased with increasing NFR. Consequently, the nitrogen fertilizer effect was amplified as soil moisture was sufficiently supplied through irrigation. It is concluded that the amount of water and fertilizer should be determined according to the environmental conditions in the Saemangeum reclaimed land.

Keywords: Irrigation, Kenaf, Reclaimed land, Saemangeum



Growth responses of kenaf to irrigation amount with 600, 800, 1,000, and 1,200 mm between 2020 and 2021 in Saemangeum reclaimed land.

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

우리나라는 하계 강우량이 많아 밭농업은 천수농업이 일반적이었으나, 최근 기후변화로 농업가뭄의 빈도와 강도의 지속적인 증가로 토양수분을 부족하게 하여 작물 수확량에 큰 피해를 발생시키므로 밭작물 관개의 필요성이 증가하고 있다 (Lee, 2015; Shin et al., 2020). 새만금간척지는 밭작물 중심의 농업생산기반이 조성되어 밀, 콩, 사료작물 등 수입의존도가 높은 작물을 대체하고 소득작물, 바이오에너지 작물 등 다양한 밭작물 재배가 가능하다 (MAFRA, 2019). 그러나 새만금호의 염도가 높고 주변 하천수의 염도 및 양분 함량의 계절적인 편차가 커 좋은 수질의 농업용수를 확보하기 어렵다 (Ryu and Kim, 2016, Kim et al., 2020). 따라서 관개용수를 공급하기 위해 이용 가능한 주변 하천수의 수질을 분석하여 이용 적합성을 검토해볼 필요가 있다.

케나프는 아프리카 원산의 일년생 아열대성 작물로 생장속도가 빠르고 생체 수량이 120 Mg ha^{-1} 정도로 바이오매스 생산성이 매우 높은 작물이다 (Kang et al., 2021). 아프리카, 동남아시아, 유럽 등에서 오래 전부터 섬유용으로 재배되어 왔다. 단백질 함량이 높아 조사료 자원으로 이용되며 섬유는 강도가 높아 건축자재 보드, 차량 부품 등 산업분야의 소재로도 이용된다 (Bosisio, 1988; Kulger, 1996; Ramaswamy and Easter, 1997; Alexopoulou et al., 2013). 케나프는 열대작물이지만 환경에 대한 적응성이 강하여 다양한 기후 특성을 지닌 지역과 척박한 토양환경에서도 잘 자란다 (Webber III and Bledsoe, 1993). 또한 케나프의 재배가능 토양 염도는 4.0 dS m^{-1}로 비교적 높은 염농도에서도 생산성을 유지할 수 있어 토양 염도가 높은 간척지에서 재배가 가능한 작물로 알려져 있다 (Kang et al., 2014a).

환경적응성이 높은 케나프를 척박한 간척지에서 안정적으로 생산하기 위해 재배 적정 염도 설정, 간척지 시비기준 설정 등 다양한 간척지 적합 안정생산기술 연구가 이루어지고 있으나 (Kang et al., 2014b, 2021; Ko, 2018). 최적 관개량에 대한 기준이 설정되어 있지 않은 실정이다. 케나프는 적절한 관개를 통해 수분이 충분이 공급될 때 바이오매스량이 증가한다고 알려져 있다 (Muchow, 1992; Evans and Hang, 1993; Danalatos and Archontoulis, 2010).

새만금간척지는 토양 입단이 거의 형성되지 않은 토양이고 일부 심토는 판상구조를 가져 동일 사질토양보다 물빠짐이 어렵고 토양 배수등급이 불량하다 (Kim, 2013). 따라서 배수가 불량하고 지하수위가 높은 새만금간척지 토양 특성을 고려한 케나프 관개법 설정이 필요하다. 관개를 통해 토양 수분을 적정범위로 유지했을 때 무관개구에 비해 식물의 질소흡수가 원활하다고 알려져 있다 (Liao and Bartholomew, 1974; Zand-Parsa and Sepaskhah, 2001; Lee et al., 2017). 케나프 역시 작물 증발산량의 25%, 50%, 100%만큼 관개량이 늘어날수록 질소비료로부터 케나프 식물체로 흡수되는 질소 비율이 증가한다 (Mantineo et al., 2008). 현재 알려진 간척지 케나프 표준시비량은 무관개 조건에서 적용되는 시비 기준이므로 관개 조건에서 토양 수분함량이 적절하게 유지될 때 질소흡수율에 미치는 영향을 고려한 시비기준 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 새만금간척지에서 케나프 재배 시 관개수로 하천수 이용의 적합성을 검정하고, 바이오매스 증수를 위해 근권환경에 따른 적정 하천 관개수 투입량과 관개량을 고려한 적정 질소 시비량을 산정하고자 하였다.

Materials and Methods

하천수 조사 관개용수로서 하천수의 이용적합성을 검토하기 위해 2020년과 2021년에 케나프 재배기간인 5월부터 10월까지 매월 1회 시료를 채취하여 분석하였다. 채취지점은 전라북도 김제시 청하면 만경대교 (36°91'N, 126°89'E)으로 멸균된 폴리에틸렌 채수병 (2 L)에 채취하여 채수통에 밀봉 후 아이스박스로 운반하여 수질오염공정시험

방법 (ME, 2000) 및 Standard Methods (APHA, 1995)에 준하여 분석하였다. pH와 EC (electrical conductivity)는 pH-EC 미터 (ORION STAR A215, Thermo, USA)로 측정하였고, 용존산소 (dissolved oxygen, DO)는 DO meter (YSI model 58, USA)로 측정하였다. 총 유기탄소 (total organic carbon, TOC)는 TOC Analyzer (Sievers 5310C, USA)로, 생화학적산소요구량 (biochemical oxygen demand, BOD)은 20°C 항온기에서 5일간 배양하여 용존산소 적정법에 의해 소비된 산소량을 측정하였다. 양이온은 ICP-OES (USA and Agilent Technologies, 5800 ICP-OES, USA)로 분석하였고, 음이온은 IC 분석기 (Thermo, ICS-1600)를 이용하여 이온크로마토그래피법으로 하였다.

관개·시비량 산정 토양 근권환경 조건별 생육반응을 평가하기 위해 시험 1 (근권 제한 조건, 2020년)과 시험 2 (근권 양호 조건, 2021년)는 시험 1과 2는 포트 규모를 다르게 하여 뿌리가 생장하는 토양 깊이에 차이를 두고 수행하였다. 시험 1, 2 모두 새만금간척지 농생명용지 소재 국립식량과학원 광활시험지 (35°49'N, 126°41'E)의 비가림하우스에서 포트 시험으로 실시하였다. 시험기간 동안 기상은 케나프 재배기간인 5월부터 10월까지의 평균기온은 2020년, 2021년 각각 21.0°C, 21.7°C로 평년기온인 21.7°C과 유사하였다 (Fig. 1). 시험토양은 광활시험지에서 채취한 사양토로 유기물 함량이 1.8 - 2.0 g kg^{-1}인 척박한 토양이었다 (Table 1).

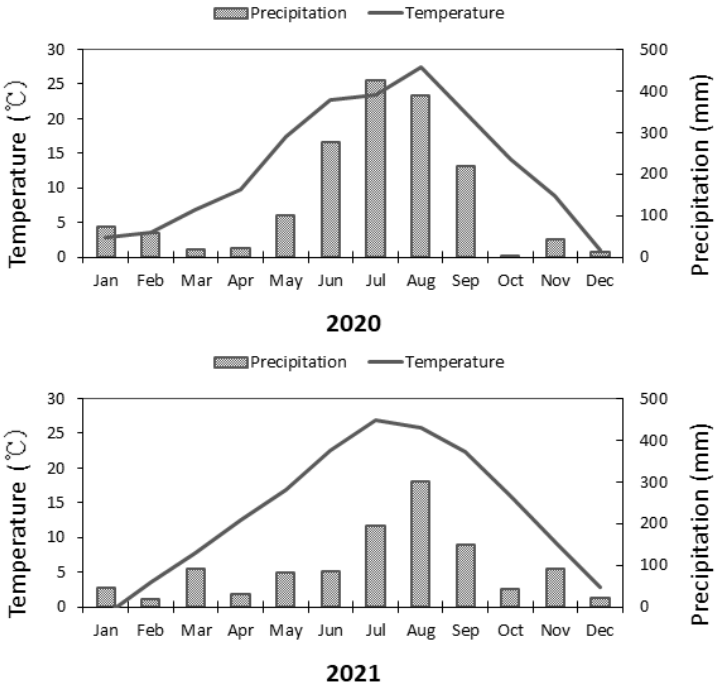


Fig. 1. The monthly average air temperature and the monthly accumulation rainfall of 2020 and 2021 in Seamangeum.

Table 1. Soil properties for the experiments collected from Saemangeum reclaimed land.

	pH (1:5)	EC (1:5) (dS m^{-1})	OM (g kg^{-1})	Avail. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Exch. cations ($cmol_c$ kg^{-1})				Texture (%)		
					K	Ca	Mg	Na	Sand	Silt	Clay
Optimal range	6.0 - 6.5	<2.0	20 - 30	150 - 250	0.45 - 0.55	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	-	-	-	-
2020	6.07	3.13	1.83	36.3	1.2	1.2	2.2	2.8	67	26	7
2021	6.87	0.18	1.96	43.3	0.6	1.1	2.7	0.3			

시험 1은 1:2,000 와그너포트 (∮256 × 297 mm)에 토양을 20 cm 깊이로 충전하여 근권이 제한된 조건을 형성하여 수행하였다. 파종은 7월 2일에 케나프 공시품종 홍마 74-3을 주간 20 cm간격으로 한 포트당 2주씩 파종하였다. 관개량은 600 mm, 800 mm, 1,000 mm, 1,200 mm 4처리 3반복으로 하였고, 질소는 표준시비량의 0, 0.3, 0.7, 1.0배 4수준 3반복으로 하였다. 인산과 칼리는 표준시비량을 투입하였으며 간척지 케나프 표준시비량 N-P_2O_5-K_2O = 12-11.8-10.2 kg ha^{-1}를 포트면적 (0.05 m^2)에 해당하는 양을 시비하였다. 관개수는 만경강 상류에 위치한 만경대교에서 하천수를 이용하였고, 파종 후 케나프 생육과 기온을 고려하여 수확인 11월 10일까지 처리구별로 전 생육기간 동안 한 포트 (1:2,000 와그너포트)당 총 30 L, 40 L, 50 L, 60 L씩 물조리개를 이용하여 관개하였다.

시험 2는 가로 및 세로 각 1.1 m, 높이 0.7 m인 포트에 토양을 60 cm 높이로 충전하여 근권이 양호한 조건을 형성하여 수행하였다. 파종은 5월 25일에 케나프 공시품종 홍마 74-3을 조간 × 주간 간격 20 × 20 cm로 한 포트당 16주씩 파종하였다. 관개량 600 mm, 800 mm, 1,000 mm, 1,200 mm 4처리 3반복으로 하였고, 질소는 표준시비량의 0, 0.5, 1.0배 3수준 3반복으로 시비량은 시험 1과 동일하게 간척지 케나프 표준시비량을 포트면적 (1 m^2)에 해당하는 양을 시비하였다. 관개수는 시험 1과 동일한 하천수를 이용하여 파종 후 수확기인 10월 5일 까지 처리구별로 전 생육기간 동안 한 포트 (가로×세로×높이: 1.1×1.1×0.7 m)당 총 600 L, 800 L, 1,000 L, 1,200 L씩 점적관개하였다.

생육조사 및 토양 분석 관개 및 시비처리에 따른 케나프의 반응을 평가하기 위해 생육 및 수량을 조사하였다. 초장은 수확기에 지면의 지상부 하단부터 최장엽까지 길이를 전수 조사하였다. 건물중은 수확기에 잎과 줄기를 모두 수확하여 자연건조 후 측정하였으며 시험 1은 전수 조사, 시험 2는 포트당 3주를 수확하여 조사하였다. 토양시료는 풍건 후 분쇄한 시료를 2 mm 체에 통과시켜 화학성 분석에 사용하였다. 토양 화학성 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 토양화학분석법 (NIAST, 2010)에 준하였다. pH와 EC (electrical conductivity)는 1:5침출법으로 pH-EC 미터기로 분석하였고, 토양 유기물함량은 원소분석기 (Elementar, Vario MAX Cube, Germany)를 이용하여 Dumas법으로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster법으로 분광광도계 (Libra S80, Biochrom, England)로 분석하였다. 교환성양이온은 1 M ammonium acetate (pH 7.0)로 침출 후 ICP-OES (Agilent Technologies, 5800 ICP-OES, USA)로 분석하였다.

통계분석 근권환경 조건별 관개량과 질소시비량 수준에 따른 케나프 초장과 건물중을 처리구당 3반복씩 측정하였다. 통계분석을 위해 R (×64, 3.5.3) 프로그램을 이용하여 관개조건과 질소시비수준에 따라 각각 분산분석 (ANOVA)을 하였고, 관개와 시비수준간 상호효과를 확인하기 위해 이원분산분석 (two-way ANOVA)을 하였으며, 유의수준 0.05 이하에서 Duncan test를 수행하였다.

Results

하천수 수질 2020년과 2021년의 케나프 재배기간 동안 투입된 하천수 수질특성을 분석한 결과, pH는 2020년 7.14에서 8.43, 2021년 7.5에서 8.0으로 하천수 농업용수 수질기준인 6.0에서 8.5의 범위를 충족하였다 (Fig. 2). EC는 2020년은 9월이 1.5 ds m^{-1}로 가장 높은 값을 나타냈으며, 2021년은 4월이 1.0 ds m^{-1}로 가장 높은 값을 나타냈다. 양이온은 2020년, 2021년 모두 4월이 각각 Ca^{2+}는 35.5 mg kg^{-1}, 28 mg kg^{-1}였고, K^+는 11.5 mg kg^{-1}, 11 mg kg^{-1}이고, Mg^{2+}는 7.79 mg kg^{-1}, 10 mg kg^{-1}, Na^+는 178 mg kg^{-1}, 121 mg kg^{-1}로 가장 높은 값을 나타냈고, 음이온 역시 Cl^-와 SO_4^{2-}는 2020년과 2021년 모두 4월에 Cl^-은 각각 267 mg kg^{-1}, 250 mg kg^{-1}이고 SO_4^{2-}는 57 mg kg^{-1}, 49.3 mg kg^{-1}로

가장 높은 값을 나타내다가 5월부터 4월보다 낮은 값을 나타냈다. 이는 겨울철 갈수기를 거쳐 4월에 양분 농도가 높아졌다가 강우량의 증가로 5월, 6월, 7월의 농도가 낮게 나타났다. BOD 값은 2020년 7월과 2021년 4월, 5월에 BOD가

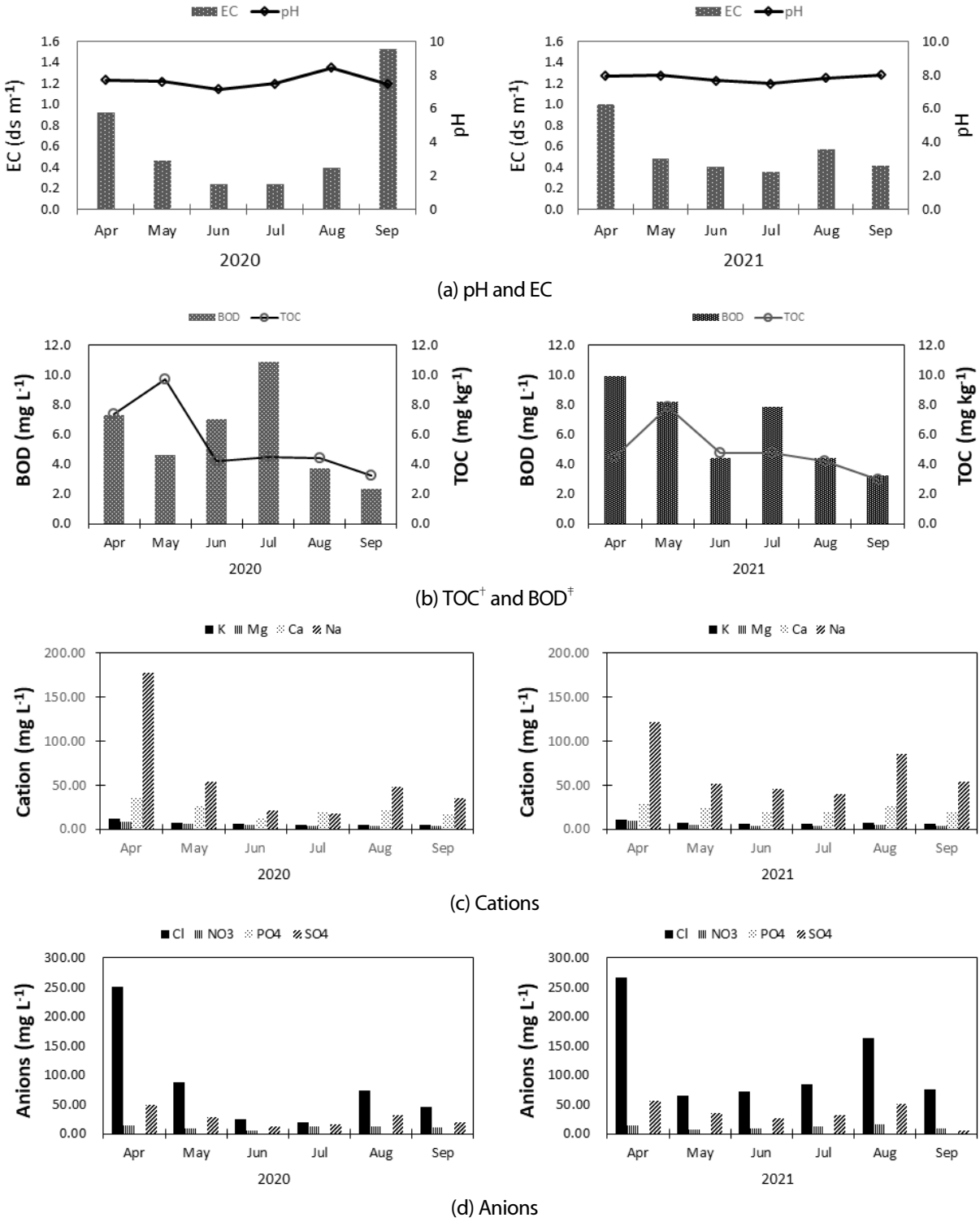


Fig. 2. Seasonal variation of irrigation water quality between 2020 and 2021 in Saemangeum (†TOC, total organic carbon; ‡BOD, biochemical oxygen demend).

각각 10.85 mg L^{-1}, 9.98 mg L^{-1}, 8.2 8 mg L^{-1}로 수질기준을 초과하였다. TOC는 2020년 3.2 - 9.7 mg kg^{-1}의 범위로 4월과 5월 각각 7.4 mg kg^{-1}, 9.7 mg kg^{-1}로 농업용수 수질기준인 6 mg kg^{-1} 이하를 초과하였고, 2021년 TOC값은 3.0 - 7.8 mg kg^{-1} 범위로 5월이 7.8 mg kg^{-1}로 수질기준을 초과하였다.

근권제한 조건에서 수분・시비반응 케나프 초장은 관개량 600 mm에서 193 cm, 800 mm에서 203 cm, 1,000 mm에서 225 cm로 1,000 mm까지 관개량이 늘어날수록 증가하였으나 1,200 mm 관개 시 초장은 176 cm로 오히려 감소하였다 ($p < 0.001$) (Table 2). 케나프 건물중 역시 1,000 mm에서 가장 많았고 1,200 mm에서는 1,000 mm보다 감소하는 경향으로 나타나 관개량 901 mm에서 건물중을 최대로 수확할 수 있었다 (Fig. 3). 각 관개량별 질소시비수준에 대한 케나프 건물중을 회귀식으로 나타낸 결과 600 mm 관개 시 질소표준시비량 0.9배에서 최대 건물중을 나타냈고, 1,000 mm 관개 시 표준시비량 수준에서 최대 건물중을 나타냈다 (Fig. 4).

Table 2. Statistics on the growth and yield responses of kenaf to irrigation amount and fertilization rates at the limited root zone.

2020		Height (cm)	Dry mass (Mg ha^{-1})	2020		Height (cm)	Dry mass (Mg ha^{-1})
IR†	N‡						
IR1	N1	199	32.3	IR	IR1	193 bc	34.8
	N2	200	34.7		IR2	203 bc	36.3
	N3	191	35.8		IR3	225 a	44.1
	N4	181	36.3		IR4	176 c	29.7
	p-value	ns	ns		*p*-value	***	ns
IR2	N1	186	35.5	N	N1	188	32.9 a
	N2	218	48.3		N2	209	35.8 a
	N3	209	42.3		N3	206	36.7 a
	N4	200	50.7		N4	195	39.6 a
	p-value	ns	ns		*p*-value	ns	*
IR3	N1	184 b§	35.5	IR*N	*p*-value	*	ns
	N2	234 a	48.3				
	N3	238 a	42.3				
	N4	246 a	50.7				
	p-value	*	ns				
IR4	N1	183	28.8 ab				
	N2	185	25.8 b				
	N3	185	32.6 a				
	N4	152	30.1 ab				
	p-value	ns	***				

†IR: Irrigation treatment (IR1-600 mm, IR2-800 mm, IR3-1,000 mm, IR4-1,200 mm).
‡N: Nitrogen rate treatment (N1-0, N2-36, N3-84, N4-120 kg ha^{-1}).
§Within each variable, means followed by the same letter are not differ significantly at $p < 0.05$ (DMRT).
*, **: indicates that the effect was significant at 95% level.

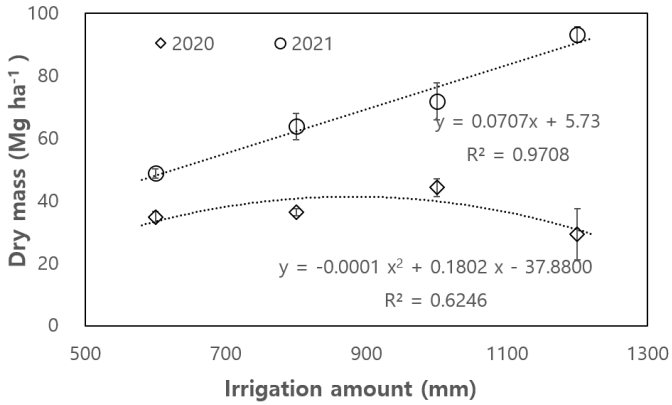


Fig. 3. Growth responses of kenaf to irrigation amount with 600, 800, 1,000, and 1,200 mm between 2020 and 2021 in Saemangeum reclaimed land.

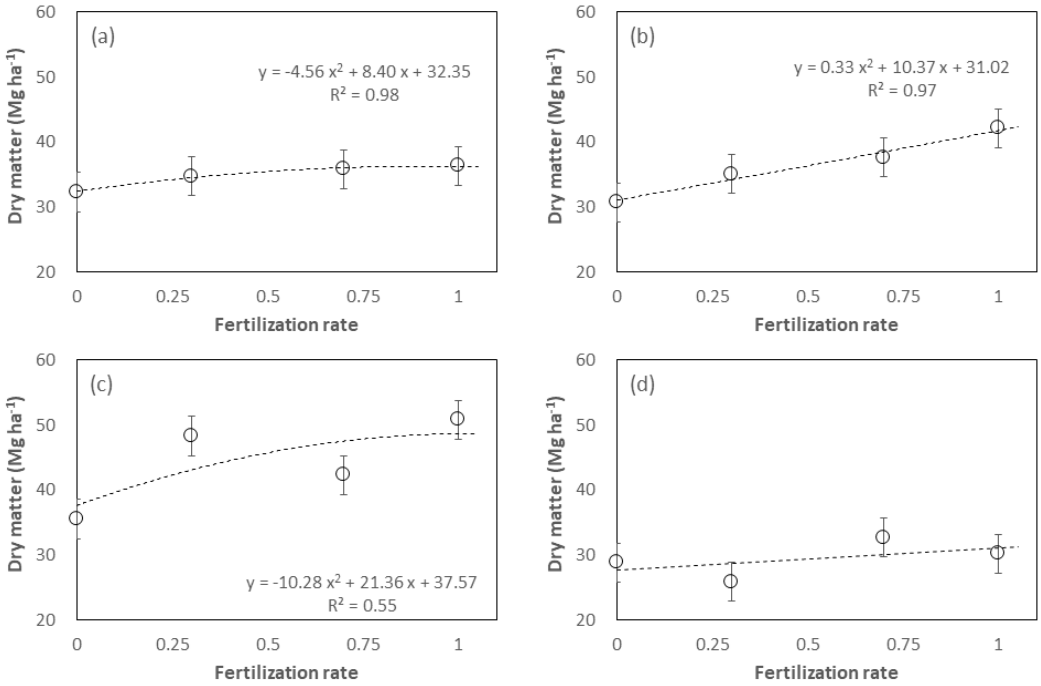


Fig. 4. Growth responses to fertilization rates in four levels of irrigation amount for kenaf in Saemangeum reclaimed land in 2020: (a) 600 mm, (b) 800 mm, (c) 1,000 mm, and (d) 1,200 mm. The standard fertilization rate means N-P_2O_5-K_2O = 120-118-102 with a unit of kg ha^{-1}.

근권양호 조건에서 수분 · 시비반응 수확기 케나프 초장과 건물중은 관개량이 늘어날수록 증가하여 1,200 mm에서 초장과 건물중은 322 cm, 93.1 Mg ha^{-1}로 가장 높았고 ($p < 0.001$), 시비수준별 통계적인 차이는 없었지만 1,200 mm 관개 시 질소시비량이 늘어남에 따라 초장은 304 cm, 328 cm, 334 cm였고, 초장은 83.1 Mg ha^{-1}, 93.1 Mg ha^{-1}, 103.4 Mg ha^{-1}로 생육이 향상되는 경향을 나타냈다 (Table 3). 관개량 수준별 케나프 생육과 수량을 비교했을 때, 초장은 1,200 mm 관개 시 322 cm로 관개량 600 mm의 241 cm 대비 34% 증가했고, 관개량 800 mm의 279 cm 대비 15%, 관개량 1,000 mm의 283 cm 대비 14% 증가했다. 건물중은 1,200 mm 관개 시 93.1 Mg ha^{-1}로 관개량 600 mm의

Table 3. Statistics on the growth and yield responses of kenaf to irrigation amount and fertilization rates at the extended root zone.

2021 IR†	N‡	Height (cm)	Dry mass (Mg ha^{-1})
IR1	N1	240	47.5
	N2	244	47.5
	N3	240	51.3
	p-value	ns	ns
IR2	N1	299	63.8
	N2	263	63.1
	N3	276	65.6
	p-value	ns	ns
IR3	N1	271	70.0
	N2	292	75.6
	N3	287	69.4
	p-value	ns	ns
IR4	N1	304	83.1
	N2	328	93.1
	N3	334	103.4
	p-value	ns	ns

2021		Height (cm)	Dry mass (Mg ha^{-1})
IR	IR1	241 d§	48.8 c
	IR2	279 c	63.8 b
	IR3	283 b	71.8 b
	IR4	322 a	93.1 a
	p-value	***	***
N	N1	279	66.3
	N2	282	70.0
	N3	284	72.5
	p-value	ns	ns
IR*N	*p*-value	ns	ns

†IR: Irrigation treatment (IR1-600 mm, IR2-800 mm, IR3-1,000 mm, IR4-1,200 mm).
‡N: Nitrogen rate treatment (N1-0, N2-36, N3-84, N4-120 kg ha^{-1}.
§Within each variable, means followed by the same letter are not differ significantly at $p < 0.05$ (DMRT).
*, **: indicates that the effect was significant at 95% level.

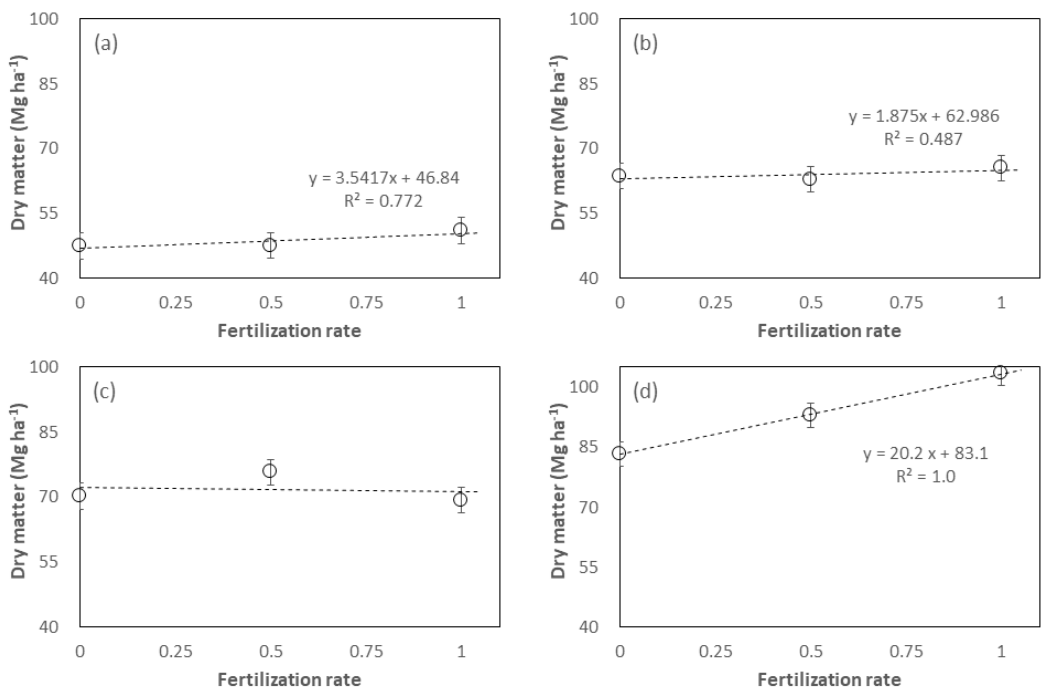


Fig. 5. Growth responses to fertilization rates in 4 levels of irrigation amount for kenaf in Saemangeum reclaimed land in 2021: (a) 600 mm, (b) 800 mm, (c) 1,000 mm, and (d) 1,200 mm. The standard fertilization rate means N-P_2O_5-K_2O = 120-118-102 with a unit of kg ha^{-1}.

48.8 Mg ha^{-1} 대비 91% 증가했고, 관개량 800 mm의 63.8 Mg ha^{-1} 대비 46%, 관개량 1,000 mm의 71.8 Mg ha^{-1} 대비 30% 증가했다. 관개량별 시비수준에 의한 케나프 건물중의 반응을 식으로 나타낸 결과 1,200 mm 관개 시 질소비료량이 늘어날수록 케나프 건물중이 직선적으로 증가함을 나타내고 있다 (Fig. 5).

Discussion

하천수 이용 적합성 환경정책기본법에 따르면 우리나라 농업용수의 수질기준은 하천수, 호소수, 지하수 각각 다르며 하천수의 경우 6등급 중 4급수 이상의 수질일 때 농업용수로 사용할 수 있도록 되어 있다 (ME, 2022).

새만금간척지에서 케나프 재배 시 하천수의 이용 적합성을 판단하기 위해 시기별로 수질을 분석한 결과 BOD는 2020년 7월과 2021년 4월과 5월에 TOC는 2020년 4월과 5월, 2021년 5월에 수질기준을 초과하였으며 다른 항목은 전 생육기간에 걸쳐 수질기준에 합당하였다. 중국에서는 밭작물 농업용수 BOD 기준은 150 mg L^{-1}이며 BOD 농도가 30 mg L^{-1} 이상일 때 수확량의 4.2%, 80 mg L^{-1}일 때 12.2%가 감소한다고 보고하였다 (An et al., 2006; RRI, 2006). 오히려 새만금간척지 주변 하천수의 수질을 평가하기 위해 중요한 항목은 수질기준에 배제되어 있는 EC로 볼 수 있다. 농업용수 수질을 평가하는데 전기전도도를 이용하는 기관으로 FAO와 일본 농무성이 있다 (An et al., 2006). FAO의 경우 EC 0.7 dS m^{-1} 이하, 일본은 EC 0.3 dS m^{-1} 이하로 정해져 있다. 본 연구에서 사용된 하천수는 2020년도의 경우 4월과 9월에 FAO와 일본의 기준을 초과하였고 5월과 8월은 일본의 기준을 초과하였으며, 2021년도 4월에 FAO의 EC 기준을 초과하였고 일본의 기준을 모두 초과하여 일시적으로 농업용수로 부적합한 것으로 나타났다. 농업용수의 EC가 4.2 dS m^{-1}일 때 염도에 민감한 콩의 수량지수는 0%이며, 내염성인 보리는 5.3 dS m^{-1}까지 수량이 감소하지 않는 것으로 알려져 있다 (Ayers and Westcot, 1985). 케나프는 염에 강한 작물로 하천수의 EC가 농업용수 수질 기준을 약간 초과하더라도 케나프 재배를 위한 관개용수로서 적합하다고 할 수 있다.

근권제한조건 양수분 관리 새만금 간척지는 용배수체계 정비, 농업용수 공급 등 기반을 조성하여 밭작물 재배를 목적으로 경지를 조성하고 있으나 (Son et al., 2008; SDIA, 2021) 평지에 위치하고 고도가 낮아 높은 지하수위 등으로 근권이 제한된 조건이 형성될 수 있다. 토양의 수분함량은 지형적 위치에 많은 영향을 받는데 평야지에 위치한 농경지는 산록경사지나 곡간지에 위치한 농경지보다 더 높은 수분함량과 지하수위를 나타낸다 (Chun et al., 2018). 본 연구에서 근권이 제한된 간척지 토양에서 케나프를 재배했을 때 관개량 1,000 mm까지 생육과 수량이 증가하였고 1,200 mm를 관개했을 때 모든 처리구 중 가장 낮은 수량과 생육을 나타냈다. 케나프는 최적 생육을 위한 물 소모량은 780 - 1,200 mm이며 이 때 작물계수는 1.0 - 1.25 수준이다 (Rivelli et al., 1998; Bañuelos et al., 2002). 1,200 mm의 관개량은 케나프 최적 생육을 위한 물 소모량 범위 안에 있으나 근권이 제한된 조건에서는 생육과 증산이 줄어들 수 있으며, 이 때 잉여의 용수로 과습이 발생하여 기상율이 감소할 수 있다. 토양의 과습상태가 지속되면 토양 내 용존산소함량이 부족하여 뿌리 호흡과 활력이 저하된다 (Carpenter and Mitchell, 1980; Ro et al., 1995). 작물이 생육하는데 뿌리는 물과 양분흡수의 역할을 하는데 과습 토양에서 뿌리 활력이 떨어지면 식물체에 필요한 영양분이 전달되지 못해 생육이 떨어진다 (Steffens et al., 2005). 뿐만 아니라 과습으로 인해 뿌리에서 1-Aminocyclopropane-1-carboxilic acid (ACC)생성하여 줄기, 잎으로 전달하여 ethylene이 증가하고 결과적으로 광합성량이 감소된다고 하였다 (Chun et al., 2022). Kaur et al. (2017)은 옥수수 생육과 수량은 침수기간이 3일 이상 지속되면 감소한다고 하였고, 콩과 밀의 경우에도 침수로 인해 곡실 수량과 품질이 저하된다고 보고되었다 (Fehr and Caviness, 1977; Rhine et al., 2010;

Hossain et al., 2011). 근권이 제한된 조건에서는 과습에 의해 생육불량이 가속화될 수 있다.

근권이 제한된 조건에서 적정 물소모량 범위로 간주할 수 있는 800 - 1,000 mm 관개 시 케나프의 생육은 시비량에 따라 증가하였으나 토양수분이 부족한 조건이나 과습으로 추정되는 조건에서는 양분 공급에 의한 생육 증가가 미진하였다. 이는 토양수분이 부족한 조건에서는 토양의 이온 확산속도가 떨어져 양분 이용률이 낮지게 되고 (Pinkerton and Simpson, 1986; Lee et al., 2017) 반면 토양수분이 과다한 경우 토양 중 산소 부족으로 뿌리 호흡이 어려워지고 아질산염등 환원된 형태의 이온이 독성물질로 작용하여 뿌리의 붕괴가 촉진되어 뿌리는 넓게 뻗어 나가지 못한다 (Sairam et al., 2008). 결국 뿌리 활력 저하로 인해 양분 이용률이 떨어진다 (Steffens et al., 2005). 근권이 제한된 조건에서 부족 관개와 과다 관개는 뿌리가 토양 중 양분을 제대로 흡수하지 못해 생육저하를 초래한다. 또한 토양 포장용수량을 고려한 적정 관개 시 과다한 관개보다 용탈수의 양이 감소하여 비점오염원 발생을 방지할 수 있다 (Li, 2018). 기후변화와 환경문제에 대응하여 적절한 양수분관리에 대한 연구의 필요성이 중요해지며 국내에서도 물관리와 연계된 양분이용 연구가 장려되고 있다. 이에 따라 새만금간척지의 수질 및 환경보전을 위해 적정 관개량과 비료사용량의 설정이 필요할 것으로 판단된다 (Kim et al., 2020; Lee et al., 2021).

근권양호조건에서 양수분관리 관개를 통해 적정 토양수분함량을 유지하며 작물에 충분한 수분을 공급하면 자연강우로만 물을 공급하는 것보다 작물 수확량을 증대시킬 수 있다고 알려져 있다 (Lee et al., 2017). 본 연구에서는 근권환경이 제한되지 않는 간척지 토양 조건에서 케나프 바이오매스 생장을 위한 최적 관개량을 찾기 위해 전 생육기간 동안 관개량을 600 mm부터 1,200 mm까지 투입하였고, 관개량이 증가함에 따라 케나프 건물중이 직선적으로 증가하였다. 옥수수의 경우에도 관개량이 늘어날수록 질소 흡수율이 좋아져 바이오매스량이 계속적으로 증가하며, 콩 역시 노지에서 관개를 통해 토양 적습조건을 유지했을 때 수량이 높고 품질이 증가한다 (Stockle et al., 2001; Di Paolo and Rinaldi, 2008; Lee et al., 2017). 관개량 600 mm, 800 mm, 1,000 mm에서는 시비수준에 따라 케나프 생육과 수량에 큰 차이가 없었으나 1,200 mm를 관개했을 때 질소 시비량이 늘어남에 따라 케나프 수량이 증가하며 높은 질소 비료이용율을 보였다. 많은 연구에서 뿌리가 충분한 물을 흡수할 수 있는 토양수분 조건에서 작물 뿌리의 질소 흡수를 용이하게 한다고 나타났다 (Liao and Bartholomew, 1974; O'Neill et al., 2004).

따라서 근권이 양호한 조건에서 케나프 재배 시 필요한 물소모량은 1,200 mm 이상이며 토양 수분이 충분히 공급되었을 때 질소 시비 효과가 나타났다. 이는 관개량이 충분한 조건에서 표준질소시비량 이상 질소비료를 시용했을 때 케나프 최대 수확량을 기대할 수 있을 것이라 판단된다. 옥수수 역시 질소시비량 차이에 따라 곡실수량 차이가 없었으나 증발산량 기준 50%, 100% 관개로 토양 수분이 충분히 공급될 때 케나프와 마찬가지로 질소시비량이 늘어날수록 곡실 수량이 증가한 것과 유사한 결과가 나타났다 (Di Paolo and Rinaldi, 2008). 따라서 농업용수 이용이 제한적인 새만금간척지에서 밭작물 재배 시 효율적인 자원 관리를 위해 물과 비료 이용률을 고려하여 토양에 남겨진 비료량을 감소시키고 비점오염원을 최소화 할 수 있는 최적 양수분관리 방법에 대한 연구가 필요할 수 있다.

Conclusions

새만금간척지에서 케나프 바이오매스 생산을 향상시키기 위해 하천수를 활용하여 최적 관개량과 그에 따른 질소 시비량을 산출하고자 하였다. 관개수로 활용하기 위한 하천수의 월별 수질분석 결과 BOD와 TOC를 제외한 항목은 수질기준을 만족하였다. 전기전도도 (EC)는 염농도가 높은 간척지에서 중요한 항목으로, 해당 하천수의 전기전도도

는 FAO와 일본의 농업용수 수질기준을 초과하였으나 케나프의 경우 재배 가능 염농도가 4.2 dS m^{-1}로 관개수로 이용이 적합하다. 근권환경 조건별 케나프 관개량과 질소시비수준에 따른 케나프 생육을 비교한 결과 근권이 제한된 경우 적정 관개량 범위는 800 - 1,000 mm였으며, 1,200 mm에서는 과다한 토양수분으로 바이오매스 수량이 감소하였다. 또한 근권이 제한된 조건에서 최적 물소모량인 1,000 mm를 관개했을 때 표준시비량 수준에서 최대 생산량을 나타냈다. 근권이 양호한 조건에서 케나프 바이오매스 증수를 위한 물소모량은 1,200 mm 이상이며 토양 수분이 충분히 공급되었을 때 질소 흡수율이 계속하여 증가하였다. 이는 관개량이 충분한 조건에서 표준질소시비량 (N-120 kg ha^{-1}) 이상 질소비료를 시용했을 때 케나프 최대 수확량을 기대할 수 있다. 따라서 새만금간척지와 같이 농업용수 이용이 제한적이고 비점오염원 관리를 통한 수질개선을 위해 케나프 재배 시 물과 비료 이용률을 고려하여 토양의 남겨진 비료량을 감소시키고 안정적인 작물 생산을 위한 최적의 양수분관리 방법에 대한 연구가 계속 되어야한다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업 '새만금 간척지 케나프 안전재배기술 개발' (PJ015100022022)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Alexopoulou, E., Y. Papatheohari, M. Christou, and A. Monti. 2013. Origin, description, importance and cultivation area of kenaf. p. 1-15. In A. Monti and E. Alexopoulou (ed.) Kenaf: A multi-purpose crop for several industrial applications. Springer, London, UK.

An, Y.J., W.M. Lee, and C.G. Yoon. 2006. Evaluation of korean water quality standards and suggestion of additional water parameters. Korean J. Limnol. 39(3):285-295.

APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.). American Public Health Association, Washington, D.C., USA.

Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. p. 1-174. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Bañuelos, G.S., D.R. Bryla, and C.G. Cook. 2002. Vegetative production of kenaf and canola under irrigation in central California. Ind. Crops Prod. 15(3):237-245.

Bosisio, M. 1988. Kenaf paper: A forest-saving alternative. USDA-ARS. Agric. Res. 36(9):6-8.

Carpenter, J.R. and C.A. Mitchell. 1980. Root respiration characteristics of flood-tolerant and intolerant tree species. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 105(5):684-687.

Chun, H.C., K.Y. Jung, Y.D. Choi, S. 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. 5:536-546.

Chun, H.C., S.H. Lee, D.H. Gong, W.C. Kim, S.H. Lee, and K.Y. Jung. 2022. Growth characteristics and physiological responses of soybean (*Glycine max* L.) under excessive soil moisture stress. Korean J. Soil Sci. Fert. 55(3):185-197.

Danalatos, N.G. and S.V. Archontoulis. 2010. Growth and biomass productivity of kenaf (*Hibiscus cannabinus*, L.) under different agricultural inputs and management practices in central Greece. Ind. Crops Prod. 32(3):231-240.

Di Paolo, E. and M. Rinaldi. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. Field Crops Res. 105(3):202-210.

Evans, D.W. and A.H. Hang. 1993. Kenaf in irrigated central Washington. p. 409-410. In J. Janick and J.E. Simon (ed.) New crops. Wiley, New York, USA.

Fehr, W.R. and C.E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. p. 1-12. Special Report 80. Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, USA.

Gilcreas, F.W. 1966. Standard methods for the examination of water and waste water. Am. J. Public Health Nation's Health 56(3):387-388.

Hossain, M.A., H. Araki, and T. Takahashi. 2011. Poor grain filling induced by waterlogging is similar to that in abnormal early ripening in wheat in Western Japan. Field Crops Res. 123(2):100-108.

Kang, C.H., I.S. Lee, J.J. Lee, and H.J. Kim. 2021. Effect of irrigation of river water and swine slurry liquid fertilizer on kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) growth cultivated using soil moisture control system in reclaimed land. Korean J. Crop Sci. 66(1):87-96.

Kang, C.H., W.Y. Choi, Y.J. Yoo, K.H. Choi, H.J. Kim, Y.J. Song, and C.K. Kim. 2014a. The growth phase and yield difference of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) on soil salinity in reclaimed land. Korean J. Crop Sci. 59(4):511-520.

Kang, C.H., Y.J. Yu, K.H. Choi, H.J. Kim, Y.K. Shin, G.J. Lee, D.Y. Ko, Y.J. Song, and C.K. Kim. 2014b. Development of stable culture techniques for kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). Korean J. Crop Sci. 59(3):375-384.

Kaur, G., B.A. Zurweller, K.A. Nelson, P.P. Motavalli, and C.J. Dudenhoeffer. 2017. Soil waterlogging and nitrogen fertilizer management effects on corn and soybean yields. Agron. J. 109(1):97-106.

Kim, B.K., H.S. Kim, and H.J. Jo. 2020. Research on response to water quality changes according to Saemangeum development. Pending Issue. jthink Res. ISBN:978-89-6612-363-6.

Kim, H.W. 2013. Analysis of soil characteristics of farming sites in Saemangeum reclaimed land. Master's Thesis, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea.

Kim, Y.M., C.W. Lee, and Y.J. Lee. 2020. Trends of lysimeter studies to investigate nutrient leaching loss. Korean J. Soil Sci. Fert. 53(4):677-686.

Ko, D.Y. 2018. Setting of standard fertilization for kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) cultivation in reclaimed land and general upland soil. Information on Agricultural Technology. Nongsaro, RDA, Junju, Korea.

Kulger, D.E. 1996. Kenaf commercialization: 1986-1995. p. 129-132. In J. Janick (ed.) Progress in new crops. ASHS Press, Arlington, Virginia, USA.

Lee, E.G. 2015. Recent agricultural drought state and case analysis. J. Korean Soc. Agric. Eng. 57(2):2-12.

Lee, Y.J., K.H. Han, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2017. Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management. Korean J. Environ. Agric. 36(3):147-153.

Lee, Y.J., S.B. Lee, and J. Sung. 2021. Optimal fertigation guide for greenhouse strawberry: Development and validation. Korean. J. Soil Sci. Fert. 54(3):322-330.

Li, Y., J. Li, L. Gao, and Tian, Y. 2018. Irrigation has more influence than fertilization on leaching water quality and the potential environmental risk in excessively fertilized vegetable soils. PloS ONE 13(9):e0204570.

Liao, C.H. and W.V. Bartholomew. 1974. Relation between nitrate absorption and water transpiration by corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 38(3):472-477.

MAFRA. 2019. Master plan of state-run reclaimed land of Korea. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affair, Sejong, Korea.

Mantineo, M., C. Patane, S.L. Cosentino, and G. D'Agosta. 2008. The recovery of 15N-labelled fertilizer applied to kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). Ital. J. Agron. 3:537-538.

ME. 2000. The test methods of pollutions process in water quality. Ministry of Environment, Sejong, Korea.

ME. 2022. Article 10 of the framework act on environmental policy. Article 20 of the groundwater act. Ministry of Environment, Sejong, Korea.

Muchow, R.C. 1992. Effect of water and nitrogen supply on radiation interception and biomass accumulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) in a semi-arid tropical environment. Field Crops Res. 28:281-293.

NIAST. 2010. Methods of soil chemical analysis. p. 23-165. National institute of Agricultural Science and Technology, Junju, Korea.

O'Neill, P.M., J.F. Shanahan, J.S. Schepers, and B. Caldwell. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate levels of water and nitrogen. Agron. J. 96:1660-1667.

Pinkerton, A. and J.R. Simpson. 1986. Interactions of surface drying and subsurface nutrients affecting plant growth on acidic soil profiles from an old pasture. Aust. J. Exp. Agric. 26(6):681-689.

Ramaswamy, G.N. and E.P. Easter. 1997. Durability and aesthetic properties of kenaf/cotton blend fabrics. Text. Res. J. 67:803-808.

Rhine, M.D., G. Stevens, G. Shannon, A. Wrather, and D. Sleper. 2010. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. Irrig. Sci. 28:135-142.

Rivelli, A.R., M. Perniola, E. Tarantino, and G. Disciglio. 1998. Water use and irrigation requirement of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) in Southern Italy [Basilicata]. Irrig. Drain. (Basilicate, Italy) 45(3):29-36.

Ro, H.M., J.M. Park, and K.Y. Kim. 1995. Effect of dissolved oxygen on the leaf water potentials, leaf nutrient compositions, root activities of 'Tsugaru' apple tree and the chemical environment of rhizosphere. Hortic. Environ. Biotechnol. 36:493-499.

RRI. 2006. Studies on the establishment of agricultural water quality guideline for safety agricultural products. Research Report. Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Naju, Korea.

Ryu, J.H. and Y.D. Kim. 2016. Monitoring of water quality of freshwater lake and inflow river in government controlled reclaimed land. p. 475-546. Rural Development Administration, Junju, Korea.

Sairam, R.K., D. Kumutha, K. Ezhilmathi, P.S. Deshmukh, and G.C. Srivastava. 2008. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. Biol. Plant. 52:401-412.

SDIA. 2021. Master plan of Saemangeum. Saemangeum Development and Investment Agency, Gunsan, Korea.

Shin, J.H., W.H. Nam, N.K. Bang, H.J. Kim, H.U. An, and K.Y. Lee. 2020. Assessment of irrigation efficiency and water supply vulnerability using SWMM. J. Korean Soc. Agric. Eng. 62(6):380 73-83.

Son, Y.M., H.T. Kim, and D.W. Seo. 2008. Development for coming conversion to reclaimed farm land. p. 37-44. In Association for Research on Reclaimed Land (ed.) Reclaimed Land Research, National Institute of Crop Science, Wanju, Korea.

Steffens, D., B.W. Hutsch, T. Eschholz, T. Lošak, and S. Schubert. 2005. Waterlogging may inhibit plant growth primarily by nutrient deficiency rather than nutrient toxicity. Plant, Soil Environ. 51:545-552.

Stockle, C.O. 2001. Environmental impact of irrigation: A review. p. 1-15. In IV International Congress of Agricultural Engineering, Washington, D.C., USA.

Webber III, C.L. and V.K. Bledsoe. 1993. Kenaf: Production, harvesting, processing, and products. p. 416-421. In J. Janick and J.E. Simon (ed.) New crops. Wiley, New York. USA.

Zand-Parsa, S. and A.R. Sepaskhah. 2001. Optimal applied water and nitrogen for corn. Agric. Water Manage. 52(1): 73-85.