

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.2.139>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Optimum Application Rate of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers for Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) Yield and Soil Chemical Properties in a Reclaimed Paddy Soil: A Pot Experiment

Sohee Yoon<sup>1</sup>, Suyong Park<sup>2</sup>, Seongwoo Choi<sup>1</sup>, Seung Ho Jeon<sup>3</sup>, Kwang-Kyo Oh<sup>4</sup>, and Sang Yoon Kim<sup>3,5\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

<sup>2</sup>Undergraduate Student, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

<sup>4</sup>Professor, Department of Electrical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

<sup>5</sup>Professor, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

\*Corresponding author: [sykim@scnu.ac.kr](mailto:sykim@scnu.ac.kr)

### ABSTRACT

**Received:** April 27, 2023

**Revised:** May 31, 2023

**Accepted:** May 31, 2023

#### Edited by

Yong Bok Lee,  
Gyeongsang National University,  
Korea

#### ORCID

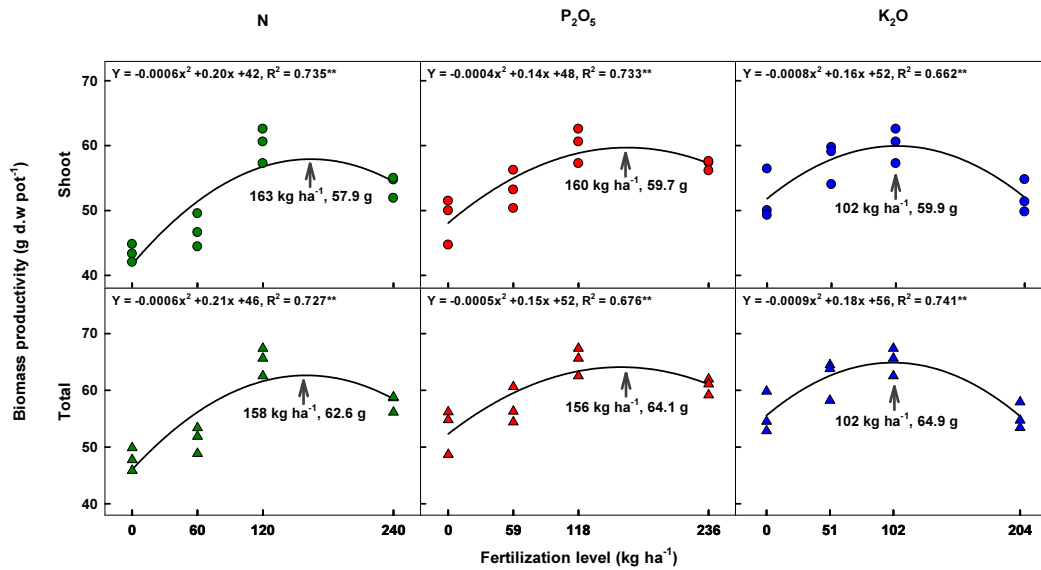
Seung Ho Jeon  
<https://orcid.org/0000-0002-2377-9286>

Sang Yoon Kim  
<https://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) has been considered one of the alternative crops for bioenergy production, potentially replacing fossil fuel. However, there are few studies available on systematically investigating kenaf growth characteristics and its fertilization conditions so far. Our study investigated its biomass productivity and soil properties at the different fertilization regimes including three major treatments (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O) with four application levels [0%-50%-100% (as recommended), and 200%] in a reclaimed paddy soil during pot experiment under upland condition in 2021. The results showed the maximum of kenaf biomass productivity was observed when 158 kg ha<sup>-1</sup> of N, 156 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 102 kg ha<sup>-1</sup> of K<sub>2</sub>O were applied, showing 62.6 g d.w pot<sup>-1</sup>, 64.1 g d.w pot<sup>-1</sup>, and 64.9 g d.w pot<sup>-1</sup>, respectively. Our study revealed that kenaf biomass mainly showed positive correlations with electrical conductivity (EC) and total N contents in soils, suggesting that these could be major growth limiting factors for kenaf production. Our study provides a better understanding for producing the maximum kenaf biomass, filling the gap on a promising nutrient management strategy for its optimum production in southern reclaimed paddy soils.

**Keywords:** Biomass productivity, Fertilizer, Nitrogen, Nutrients, Phosphorus, Potassium





The effect of kenaf biomass productivity at different inorganic fertilization regimes in a reclaimed paddy soil during the pot experiment.

## Introduction

화석연료의 과도한 사용은 범지구적 이산화탄소 배출량을 급격히 증가시켰으며, 지구온난화 가속화 등으로 인한 다양한 기후 환경 문제를 야기하고 있다 (IPCC, 2014). 화석 연료를 대체하기 위해 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 그 중에서도 바이오 에너지는 전체 신재생 에너지 생산량의 약 25%를 차지할 만큼 중요한 분야로 여겨지고 있다 (KEEI, 2019).

케나프 (*Hibiscus cannabinus* L.)는 대표적인 바이오 에너지 작물로 에너지, 섬유생산 및 가축사료 등 다양한 용도로 활용되는 다목적 작물이며 (Webber III and Bledsoe, 2002; Alexopoulou et al., 2004; Meryemoğlu et al., 2014), 서아프리카가 원산지인 아열대 일년생 식물이다 (Meints and Smith, 2003). 케나프는 파종 후 3 - 4개월 내에 수확할 수 있어 경제적 가치가 높을 뿐만 아니라, 바이오매스 생산량이 평균 70 - 90 Mg ha<sup>-1</sup> 수준으로 (Kang et al., 2018), 옥수수에 비해 약 1.4배 가량 높은 편이어서 (NIAS, 2017) 에너지작물로서 가치 또한 매우 높은 편이다 (Sim and Nyam, 2021).

케나프는 다양한 토양환경에 대한 적응성이 강하기 때문에 비교적 지리적으로 넓은 기후대에서 재배되고 있다 (Meints and Smith, 2003). 특히, 케나프는 중간 단계 이상의 염 내성 (salt tolerance)을 지니고 있어 (Francois et al., 1990), 토양 내 전기전도도 (electrical conductivity, EC)가 약 4 dS m<sup>-1</sup>에 가깝게 유지되더라도 생산성을 일반 농경지 대비 약 80% 이상으로 유지할 수 있다고 보고된 바 있다 (Kang et al., 2014). 케나프 최적 생육 연평균기온은 11 - 28°C이며, 관개 또는 강수 시 780 - 1,200 mm의 물을 필요로 하기 때문에 (Bañuelos et al., 2002), 국내에서는 간척지가 잠재적 재배가능지로서 관심이 집중되고 있다 (Kang et al., 2014, 2021).

현재 국내 작물 재배면적 중 사료작물이나 인삼 등을 포함하는 기타작물의 경지이용률은 11%에 불과하다 (KOSIS, 2021). 2021년 기준 국내 간척지 면적은 약 135,100 ha이며 그 중 전라남도 간척지는 전라북도 다음으로 넓은 면적인 24,171 ha를 차지한다 (MAFRA, 2021). 전라남도 기후는 전라북도와 비교하여 연평균기온이 약 1.2°C 높

고, 최고기온, 최저기온, 강수량 및 일조량이 더욱 높은 특징을 보여 (KMA, 2021), 아열대 작물인 케나프 생육에 더 유리한 생육환경을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 간척지에서 환경적응성이 높은 케나프의 생산성을 향상시키기 위해 양·수분관리 기술에 대한 연구가 이루어지고는 있다 (Kang et al., 2021, 2023; Ock et al., 2022). 하지만 여전히 남부지역 간척지에서 무기질 비료 사용에 따른 케나프 생육 특성 및 바이오매스 생산성, 토양화학성을 조사한 연구는 부족한 실정이며, 최적 시비량 산정을 비롯한 최적 생육 조건 확립을 위한 충분한 기초 자료 구축이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 남부지역 간척지 토양에서 무기질 비료 사용에 따른 1) 케나프의 바이오매스 생육 및 생산성을 평가하고, 2) 토양화학성, 3) 생산성에 영향을 미치는 환경요인을 분석하여, 케나프 바이오매스 최적 생산을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## Materials and Methods

**공시토양 및 재료특성** 본 연구에 사용된 토양은 전라남도 고흥군 점암면에 위치한 일반 간척 논에서 채취하였으며, 전라남도 순천시에 위치한 순천대학교 첨단 시설하우스에서 수행되었다. 공시토양의 토성은 미사질양토 (silt loam)였으며, 전반적인 토양화학성은 Table 1에 나타내었다. 시험토양의 경우 pH는 7.64, EC가 3.48 dS m<sup>-1</sup>, 교환성 나트륨의 경우 1.7 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 일반적인 논 토양에 비해 높은 특성을 보였다. 교환성 칼슘이 일반 간척지 논 토양 보다 높고, EC 및 교환성 나트륨은 낮은 것으로 보아, 간척 이후 제염 및 석고 사용과 같은 토양개량제 투입 등을 통해 육답화 및 개량이 다소 진행된 토양인 것으로 판단된다 (NICS, 2017).

**Table 1.** Chemical properties of soils before the experiment.

Parameters	Value	Average range <sup>†</sup> (paddy soils)
pH (H <sub>2</sub> O, 1:5)	7.64 ± 0.04	5.5 - 6.5
EC (dS m <sup>-1</sup> )	3.48 ± 0.16	<2.0
Total C (g kg <sup>-1</sup> )	17.2 ± 1.44	
Total N (g kg <sup>-1</sup> )	1.81 ± 0.08	
C/N ratio	9.52 ± 1.14	
Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	27.9 ± 1.20	80 - 120
Exchangable cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
K <sup>+</sup>	0.35 ± 0.04	0.25 - 0.30
Ca <sup>2+</sup>	16.7 ± 0.33	5.0 - 6.0
Mg <sup>2+</sup>	4.32 ± 0.02	1.5 - 2.0
Na <sup>+</sup>	1.70 ± 0.03	
Soil texture	Silt loam	

<sup>†</sup> Average range of soil chemical properties for paddy soils was reported in NICS (2017).

**시험 처리구 및 재배관리** 남부지역 간척지 논 토양에서 무기질 비료 사용에 따른 케나프의 바이오매스 생육 및 생산성을 평가하기 위하여 질소 및 인산, 가리 비료를 각각 시비 수준에 따라 처리한 후 포트 실험을 수행하였다. 본 연구는 강우, 광조건 등을 포함한 기후조건을 정밀한 제어를 위해 첨단 온실 내에서 진행되었다. 와그너포트 (1

2,000 a<sup>-1</sup>)에 토양 10 kg을 각각 채워 넣고, 용적밀도가 1.2 g cm<sup>-3</sup> 되도록 높이를 맞추어 채워주었다. 시비관리는 전복을 기준으로 설정된 기존 농촌진흥청 케나프 추천량을 참고하였다 (NIAST, 2019). 요소, 용성인비, 염화加里로 질소 (N) - 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - 가리 (K<sub>2</sub>O)를 120-118-102 kg ha<sup>-1</sup> 수준으로 표준 (1배, 100%)량 처리하였으며, 표준량의 0 (0%), 0.5 (50%), 2 (200%)배 수준으로 각각 추가 처리하였다. 단, 50%는 기비로 50%는 정식 90일 후 추비로 사용하였다 (Table 2). 공시품종은 장대 (*Jangdae*)로 선발하였으며, 2021년 3월 9일에 종자 3립을 포트에 파종한 다음, 1립만 제외하고 솟아내었다. 정식 이후 물관리는 토양이 충분히 젖을 때까지 관수하였고, 모든 처리구는 3반복으로 하여 실험을 수행하였다.

**Table 2.** The overview of all fertilization regimes used in this study.

Treatment	Application level (%)	Fertilization level (kg ha <sup>-1</sup> )		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Nitrogen (N)	0	0	118	102
	50	60	118	102
	100	120	118	102
	200	240	118	102
Phosphorus (P)	0	120	0	102
	50	120	59	102
	100	120	118	102
	200	120	236	102
Potassium (K)	0	120	118	0
	50	120	118	51
	100	120	118	102
	200	120	118	204

**케나프 바이오매스 생육 특성 및 생산성 평가** 케나프의 생산량 조사는 농촌진흥청 농사시험연구 기준에 근거하여, 수확 후 70°C 건조기에서 약 72시간 건조시킨 후 지상부와 지하부 건물중 (dry weight)을 따로 측정하였다 (NIAST, 2012). 케나프 최적생산량을 평가하기 위해 개별 비료 시비량과 케나프 건물중 간 2차 회귀곡선 (regression curve)을 이용하여 최대 생산량을 추정하였다.

**토양 특성 평가** 시험토양은 그늘에서 말린 후 2 mm 체를 통과시켜 분석용 시료로 사용하였으며, 토양시료는 국립농업과학원 토양분석법에 따라 분석되었다 (NIAST, 2010). 토성은 피펫법을 사용하였고, 미국농무성법 분류기준으로 분류하였다. 토양 pH 및 EC는 토양시료 5 g에 증류수 25 mL를 가하여 30분간 진탕한 후 pH meter (Orion Star A211, Thermo Scientific, Indonesia) 및 EC meter (Conductivity Meter, Orion Star A212, Thermo Scientific, Indonesia)로 측정하였다. 토양 총탄소 및 질소 함량은 원소분석기 (EA2400II, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 측정하였으며, 유효인산은 Lancaster법, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 나트륨 성분은 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrophotometer, Perkin Elmer Model OPTIMA 8300, USA)을 이용하여 측정하였다.

**통계분석** 통계분석은 SAS package (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하여 일원분산분석 (one-way ANOVA) 또는 이원분산분석 (two-way ANOVA)을 수행하였다. 처리간 유의차가 인정될 경우 사후 분석을 수행하였으며, Duncan test를 이용하여 5% ( $p \leq 0.05$ ) 확률의 유의 수준에서 사후 분석을 수행하여 각 처리 효과를 비교하였다.

## Results and Discussion

**시비에 따른 케나프 생육 특성 및 생산성** 남부지역 간척지에서 무기질 비료 시용에 따른 케나프의 생육 특성과 바이오매스 생산성을 조사한 결과는 Table 3과 같다. 질소의 경우 처리량이 증가함에 따라 케나프 바이오매스 생산량이 증가하다가 질소 100% 이후에는 감소되는 경향을 보였다. 이는 질소비료 과다 시용으로 토양 내 EC가 유의하게 증가함에 따라, 염농도 증가에 의한 토양 내 삼투압이 증가하여, 식물의 수분흡수 저해현상이 발생하여 생육이 감소했던 것으로 판단된다 (Sohn et al., 2009; Lee et al., 2013). 또한 질소 무시용구에 비해 질소시용에 따라 토양 pH가 다소 감소하는 경향은 있었으나, 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다. 인산의 경우 케나프의 생육이 질소 처리와 유사한 경향을 나타내었다. 인산 100% 처리에서 바이오매스 생산량이 가장 높았고, 이후 감소하는 추세를 보였다. 인산을 과다시비 할 경우 양분의 길항작용으로 인해 식물체 내 철, 아연 등과 같은 미량원소의 흡수와 대사가 저해될 수 있는 것으로 판단되며 (Jones et al., 1991; Kang et al., 2003; Shukla et al., 2017), 이로 인해 과량 처리구에서 작물의 생육이 감소한 것으로 판단된다. 가리 처리량에 따른 케나프 생산성을 조사한 결과 질소와 인산과 유사한 반응을 보였으며, JBARES (2019)의 기존 연구와 동일하게 가리 처리량에 따라 수량이 증가하다가, 과량 처리시 감소하는 경향을 보였다. 주로 가리를 과잉 시비할 경우, 토양 내 길항작용으로 인해 마그네슘 흡수가 억제될 수 있으며 (Salmon, 1963; Heenan and Campbell, 1981), 이로 인해 케나프의 광합성 및 산물의 이동량 감소에 영향을 주어 전반적인 생산성이 감소한 것으로 판단된다.

**Table 3.** Characteristics of kenaf biomass production under different fertilization regimes.

Treatment	Application level (%)	Biomass productivity (g d.w pot <sup>-1</sup> )		
		Shoot	Root	Total
Nitrogen (N)	0	43.4 c	4.44 ab	47.8 c
	50	46.9 c	4.51 ab	51.4 c
	100	60.1 a	5.04 a	65.2 a
	200	53.9 b	3.99 b	57.9 b
Phosphorus (P)	0	48.7 c	4.50 ab	53.2 c
	50	53.3 cb	3.85 b	57.1 bc
	100	60.1 a	5.04 a	65.2 a
	200	57.0 ab	3.70 b	60.7 ab
Potassium (K)	0	51.9 b	3.82 b	55.7 b
	50	57.6 ab	4.54 a	62.2 a
	100	60.1 a	5.04 a	65.2 a
	200	52.0 b	3.37 b	55.4 b

<sup>†</sup>Different letters are significantly different at  $p \leq 0.05$  according to Duncan's test. Same letter indicates no significant differences among treatment.

비료 시비에 따른 케나프의 지상부 및 총 바이오매스 생산량을 나타낸 결과는 Fig. 1과 같다. 질소 처리량에 따른 케나프 지상부 및 총 바이오매스 생산량을 이용하여 작성된 추세 식은  $Y = -0.0006x^2 + 0.21x + 46$  ( $R^2 = 0.727^{**}$ )이었다. 2차 회귀곡선을 통해 질소비료의 사용량이  $158 \text{ kg ha}^{-1}$ 일 때 케나프 총 바이오매스 생산량이 최대 ( $62.6 \text{ g d.w pot}^{-1}$ )가 되는 것으로 나타났다. 인산 처리량과 케나프 바이오매스 생산량의 검량관계식은  $Y = -0.0005x^2 + 0.15x + 52$  ( $R^2 = 0.676^{**}$ )이었고 이때 총 바이오매스의 최대 생산량 ( $64.1 \text{ g d.w pot}^{-1}$ )을 보이는 인산 시비량은  $156 \text{ kg ha}^{-1}$ 이었다. 가리 처리량별 검량관계식은  $Y = -0.0009x^2 + 0.18x + 56$  ( $R^2 = 0.741^{**}$ ) 이었고, 총 바이오매스 최대 생산량을 보이는 가리 시비량은  $102 \text{ kg ha}^{-1}$ 였으며, 이때 총 바이오매스 생산량은  $64.9 \text{ g d.w pot}^{-1}$  수준으로 조사되었다. 본 연구에서는 가리 처리의 경우 기존의 연구에서 보였던 생육 증진 패턴과 매우 유사한 경향을 나타내었으며, 최적시비량도 거의 유사한 수준으로 조사되었다 (JBARES, 2019). 하지만 질소와 인산의 경우 기존 연구의 추천시비량 보다 과량으로 처리 하였음에도 불구하고, 전반적인 케나프 생육이 증진되는 것으로 조사되었다. 케나프 바이오매스 생산량은 타작물에 비해 높아 질소와 같은 영양분의 요구도가 높은 편이며 (Anfinrud et al., 2013), 본 연구에 사용된 공시토양 자체의 총 질소와 유효인산 함량 또한 일반 농경지에 비해 상대적으로 적었기 때문에 질소와 인산 공급에 따른 수량 증진효과가 두드러지게 나타난 것으로 판단된다.

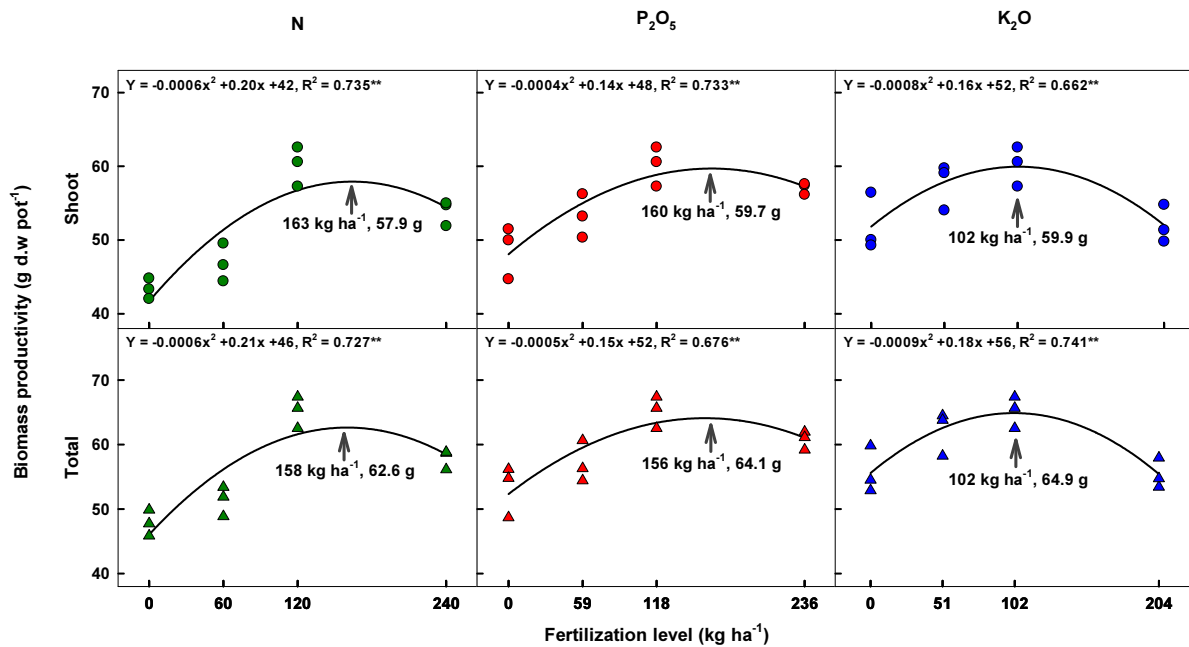


Fig. 1. Estimation of the maximum kenaf biomass productivity in a reclaimed soil in the pot experiment. The arrows indicate the optimum fertilization levels to show the highest biomass productivity.

**시비에 따른 토양화학성 및 상관관계** 케나프 수확 후 토양 특성을 조사한 결과, 비료 처리는 특히 토양 EC, 유효인산 및 암모니아태 함량, 총질소, 교환성 칼슘에 유의한 영향을 미쳤다 (Table 4). 일반적으로 토양 EC의 증가는 토양의 삼투압 및 특정 이온 흡수에 영향을 미쳐 작물 생산성을 감소시키는 것으로 알려져 있으며 (Huang et al., 2017), 케나프가 염에 반응하여 스트레스를 받는 한계 염농도는  $4.0 \text{ dS m}^{-1}$ 로 보고된 바 있다 (Kang et al., 2014). 본 연구에서 토양 EC는 질소와 인산 처리에 따라 감소하다가 과량으로 처리시 증가하는 경향을 보였으며, 지상부 및 총 바이오

**Table 4.** Chemical properties of soils at the kenaf harvesting stage.

Treatment	Application level (%)	pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (g kg <sup>-1</sup> )	Total (g kg <sup>-1</sup> )		Exch. cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			
						C	N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
N	0	7.54 a <sup>†</sup>	2.53 b	46.1 a	7.02 ab	16.5 ab	1.63 b	0.29 a	17.5 c	3.87 a	2.05 a
	50	7.63 a	2.52 b	48.9 a	7.89 ab	17.1 a	1.70 ab	0.29 a	19.2 b	3.75 a	2.10 a
	100	7.59 a	2.44 b	49.0 a	4.64 b	15.3 b	1.72 ab	0.36 a	17.9 c	3.79 a	2.44 a
	200	7.42 a	3.69 a	50.2 a	10.32 a	16.9 ab	1.80 a	0.36 a	20.1 a	3.72 a	2.04 a
P	0	7.46 a	3.35 ab	19.8 c	4.77 b	16.9 a	1.76 b	0.42 a	18.5 b	4.00 a	2.19 a
	50	7.49 a	3.59 ab	37.3 b	5.89 b	17.1 a	1.93 a	0.43 a	21.5 a	4.23 a	3.30 a
	100	7.59 a	2.44 b	49.0 b	4.64 b	15.3 a	1.72 b	0.36 a	17.9 b	3.79 a	2.44 a
	200	7.30 a	4.38 a	133.3 a	8.60 a	15.6 a	1.84 ab	0.42 a	18.4 b	4.26 a	2.01 a
K	0	7.42 a	4.24 b	80.8 a	5.70 ab	15.7 a	1.91 bc	0.19 c	19.5 b	3.75 b	2.37 a
	50	7.32 a	6.42 a	63.9 b	8.25 a	16.8 a	2.14 a	0.38 b	22.9 a	4.48 a	2.90 a
	100	7.59 a	2.44 c	49.0 c	4.64 b	15.3 a	1.72 c	0.36 b	17.9 b	3.79 b	2.44 a
	200	7.60 a	3.53 bc	70.7 ab	5.33 ab	15.8 a	2.09 ab	0.62 a	18.4 b	3.72 b	1.64 b
Statistical analysis											
T <sup>‡</sup>		ns <sup>§</sup>	***	***	*	ns	***	ns	*	ns	ns
F		ns	***	***	***	**	***	**	***	ns	*
T × F		ns	**	***	ns	ns	*	**	**	ns	ns

<sup>†</sup>Different letters are significantly different at  $p \leq 0.05$  according to Duncan's test. Same letter indicates no significant differences among treatment.

<sup>‡</sup>T and F denote treatment and fertilization level in two way ANOVA analysis.

<sup>§</sup>ns denote not significant, and \*, \*\*, and \*\*\* indicate significant differences at levels of  $p < 0.05$ , 0.01, and 0.001, respectively.

매스와 토양 EC는 정의 상관관계를 나타내었다 ( $r = 0.405^*$ ,  $r = 0.387^*$ , Table 5). 이는 케나프의 생육을 저해하는 4.0 dS m<sup>-1</sup> 이상의 토양 EC 관찰이 적었기 때문에 케나프 생산성과 토양 EC가 정의 상관관계를 보일 수 있었던 것으로 판단된다. 토양의 총 질소 함량은 무기질 비료 시용에 따라 증가하는 경향을 보였으며 특히 질소비료 처리량이 증가함에 따라 토양의 총 질소 함량이 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 질소는 농업생산성을 제한하는 가장 중요한 인자 중 하나이며 (Abril et al., 2007), 작물생산성과 토양 내 총질소는 강한 정의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다 (Zhang et al., 2008). 본 연구에서도 케나프 바이오매스 생산성과 토양 내 총질소 함량이 정의 상관관계를 나타내었으며 ( $r = 0.414^*$ ,  $r = 0.384^*$ ), 토양 내 질소의 흡수량이 증가함에 따라 케나프 생산성이 향상된 것으로 판단된다. 특히, 토양 질소 중에서도 무기태 질소는 작물의 생산성에 직접적인 영향을 미친다 (Fageria and Baligar, 2005). 본 연구에서는 질소비료 처리량에 따라 토양 내 암모니아태 함량이 증가하는 경향을 보였으나, 표준 시비 처리구에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 이는 질소 표준 시비 처리구에서 케나프의 무기태 질소 흡수량 증가가 원인인 것으로 판단되며, 이에 따라 케나프 생산성도 가장 높았던 것으로 보인다. 인은 질소 다음으로 중요한 식물 영양소 중 하나이며, 산성조건에서는 철과 알루미늄, 알칼리조건에서는 칼슘과 결합하여 토양 내에서 불용성 인산염으로 고정되기 때문에 일반적으로 토양에서 가용성이 매우 낮은 편이다 (Hellal et al., 2019). 특히, 우리나라 간척지 토양의 경우 평균 유효인산 함량은 13 - 24 mg kg<sup>-1</sup> 수준으로, 일반 농경지에 비해 매우 부족한 실정이다 (Ryu et al., 2019). 본 연구에서도 토양 내 유효인산 함량이 27.9 mg kg<sup>-1</sup>로 낮은 수준을 보였으며, 토양 내 유효인산 함량은 인산 처리량이 증가함에

**Table 5.** Correlation between kenaf biomass productivity and soil properties.

Biomass productivity	Soil properties	Correlation coefficient (r) <sup>†</sup>
Shoot biomass	pH	-0.351
	EC	0.405*
	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.375*
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.019
	Total C	-0.133
	Total N	0.414*
	Exchangeable K <sup>+</sup>	0.160
	Exchangeable Ca <sup>2+</sup>	0.215
	Exchangeable Mg <sup>2+</sup>	0.165
	Exchangeable Na <sup>+</sup>	0.068
Root biomass	pH	-0.098
	EC	-0.111
	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.328
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.180
	Total C	0.162
	Total N	-0.218
	Exchangeable K <sup>+</sup>	-0.286
	Exchangeable Ca <sup>2+</sup>	-0.017
	Exchangeable Mg <sup>2+</sup>	0.113
	Exchangeable Na <sup>+</sup>	0.307
Total biomass	pH	-0.358
	EC	0.387*
	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.332
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.040
	Total C	-0.112
	Total N	0.384*
	Exchangeable K <sup>+</sup>	0.124
	Exchangeable Ca <sup>2+</sup>	0.210
	Exchangeable Mg <sup>2+</sup>	0.177
	Exchangeable Na <sup>+</sup>	0.104

<sup>†</sup> \*, \*\*, and \*\*\* denotes significance at the 5, 1, and 0.1% levels, respectively.

따라 증가하는 경향을 보였다. 케나프 지상부 바이오매스와 토양 내 유효인산 함량의 상관관계를 조사한 결과, 토양 내 유효인산 함량은 작물 생산성과 유의한 정의 상관관계가 있다는 Lee et al. (2021)의 보고와 유사하게 정의 상관관계가 있는 것으로 조사되었다 ( $r = 0.375^*$ ). 따라서 인산 시비량이 증가함에 따라 유효인산의 함량 또한 증가하였으며, 이는 케나프 생산성 증가에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 토양 내 교환성 칼륨은 비료 처리량이 증가할수록 높아지는 정의 상관관계를 나타내며 (Kang et al., 2022) 본 연구에서도 가리 처리량이 증가함에 따라 토양 내 교환성 칼륨이 증가하였다. 또한 증가된 교환성 칼륨의 함량은 케나프 바이오매스 생산성 증가에 긍정적인 영향을 준 것으로 판단된다.



## Conclusions

남부지역 간척지 토양에서 무기질 비료 사용에 따른 케나프 바이오매스 최적 생산을 위한 기초 자료를 제공하기 위해 케나프의 바이오매스 생육 및 생산성과 토양화학성, 생산성에 영향을 미치는 환경요인을 조사하였다. 무기질 비료 사용에 따른 바이오매스 생산량은 표준 시비처리구에서 가장 높았으며, 최적 생산을 위해 2차 회귀식을 평가한 결과 최고 생산량을 나타내는 시비량은  $N-P_2O_5-K_2O = 158-156-102 \text{ kg ha}^{-1}$ 인 것으로 조사되었다. 또한 수확 후 토양의 EC와 총질소 함량은 바이오매스 생산성에 유의한 영향을 미치는 주요 요인으로 조사되었다. 본 연구를 통해 남부지역 간척지 토양에서 케나프의 최적 생산을 위한 무기질 비료 사용 및 환경인자에 대한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

## Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ017132042023)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

- Abril, A., D. Baleani, N. Casado-Murillo, and L. Noe. 2007. Effect of wheat crop fertilization on nitrogen dynamics and balance in the Humid Pampas, Argentina. *Agric., Ecosyst. Environ.* 119(1-2):171-176.
- Alexopoulou, E., M. Christou, A. Nicholaou, and M. Mardikis. 2004. Biokenaf: A network for industrial products and biomass for energy from kenaf. p. 2040-2043. In *Proceedings of the 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Rome, Italy.
- Anfinrud, R., L. Cihacek, B.L. Johnson, Y. Ji, and M.T. Berti. 2013. Sorghum and kenaf biomass yield and quality response to nitrogen fertilization in the Northern Great Plains of the USA. *Ind. Crops Prod.* 50:159-165.
- 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.
- Fageria, N.K. and V.C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88:97-185.
- Francois, L.E., T.J. Donovan, and E.V. Mass. 1990. Salt tolerance of kenaf. p. 300-301. In J. Janick et al. (ed.) *Advances in New Crops: Proceedings of the First National Symposium ‘New Crops: Research, Development, Economics’*, Indianapolis, Indiana, USA.
- Heenan, D.P. and L.C. Campbell. 1981. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of manganese by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). *Plant Soil* 61:447-456.
- Hellal, F., E.S. Saied, R. Zewainny, and A. Amer. 2019. Importance of phosphate rock application for sustaining agricultural production in Egypt. *Bull. Natl. Res. Cent.* 43:11.
- Huang, L., X. Liu, Z. Wang, Z. Liang, M. Wang, M. Liu, and D.L. Suarez. 2017. Interactive effects of pH, EC and nitrogen on yields and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.). *Agric. Water Manage.* 194:48-57.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- JBARES. 2019. *Development of cultivation techniques of roughage kenaf in reclaimed land*. Jeollabuk-do Agricultural Research & Extension Services, RDA, Iksan, Korea.

- Jones, J., B.W. Benton, and H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook, 1. Methods of plant analysis and interpretation. p. 3-17. Micro-Macro Publishing Inc., Athens, Georgia.
- Kang, C.H., I.S. Lee, D.Y. Go, H.J. Kim, and Y.E. Na. 2018. The growth and yield differences in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) in reclaimed land based on the physical types of organic materials. Korean J. Crop Sci. 63(1):64-71.
- 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., I.S. Lee, Y.R. Choi, and H.J. Kim. 2023. Annual changes in soil physicochemical properties and kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) growth when returning grown kenaf as organic matter in reclaimed land. Korean J. Soil Sci. Fert. 56(1):49-59.
- Kang, C.H., W.Y. Choi, Y.J. Yoo, K.H. Choi, H.J. Kim, Y.J. Song, and C.K. Kim. 2014. 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, H.J., M.H. Oh, and W.P. Park. 2022. Determination of application rates of nitrogen fertilizer for 'Shiranuhi' mandarin in plastic film houses using soil electrical conductivity. Korean J. Soil Sci. Fert. 55(4):413-423.
- Kang, Y.K., M.R. Ko, B.K. Kang, S.Y. Kang, Z.K. U, and K.Z. Riu. 2003. Effect of phosphorous fertilizer rate on growth, dry matter yield, and phosphate recovery in *Achyranthes japonica*. Korean J. Crop Sci. 48(3):173-178.
- KEEI. 2019. Yearbook of energy statistics. ISSN 1226-606X. Korean Energy Economics Institute, Ulsan, Korea.
- KMA. 2021. <https://data.kma.go.kr/climate/average30Years/selectAverage30YearsList.do?pgmNo=113>. Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea.
- KOSIS. 2021. 2020 Agricultural area statistics. Korean Statistical Information Service, Statistics Korea, Daejeon, Korea.
- Lee, K.S., K.H. Jung, J.H. Ryu, and S.H. Lee. 2021. Applicability of conventionally recommended fertilizer rates for potato cultivated in Saemangeum reclaimed land in the fall season. Korean J. Soil Sci. Fert. 54(3):289-296.
- Lee, S.B., K.M. Cho, P. Shin, C.H. Yang, N.H. Back, K.B. Lee, S.H. Baek, and D.Y. Chung. 2013. Effect of soil salinity on growth, yield and nutrients uptake of whole crop barley in newly reclaimed land. Korean J. Environ. Agric. 32(4):332-337.
- MAFRA. 2021. Current status of reclaimed land completion by district. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- Meints, P.D. and C. Smith. 2003. Kenaf seed storage duration on germination, emergence, and yield. Ind. Crops Prod. 17(1):9-14.
- Meryemoğlu, B., A. Hasanoğlu, S. Irmak, and O. Erbatur. 2014. Biofuel production by liquefaction of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) biomass. Bioresour. Technol. 151:278-283.
- NIAS. 2017. Development of forage resources and new grass varieties. National Institute of Animal Science, RDA, Wanju, Korea.
- NIAS. 2010. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Jeonju, Korea.
- NIAS. 2012. Standard investigation methods for agriculture experimental. National Institute of Agricultural Science and Technology, Jeonju, Korea.
- NIAS. 2019. Fertilization standard of crop plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NICS. 2017. Monitoring on soil, water, biota changes at government-controlled reclaimed lands. National institute of crop science, RDA, Wanju, Korea.
- Ock, H.Y., K.S. Lee, K.G. Jung, S.H. Lee, and Y.Y. Oh. 2022. Growth responses of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) to irrigation and fertilization in Saemangeum reclaimed land. Korean J. Soil Sci. Fert. 55(4):273-285.

- Ryu, J.H., S.H. Lee, Y.Y. Oh, and J.T. Lee. 2019. Soil chemical properties of reclaimed tide lands under government management in Korea: Results of 4-years monitoring. *Korean J. Environ. Agric.* 38(4):273-280.
- Salmon, R.C. 1963. Magnesium relationships in soils and plants. *J. Sci. Food Agric.* 14(9):605-610.
- Shukla, D., C.A. Rinehart, and S.V. Sahi. 2017. Comprehensive study of excess phosphate response reveals ethylene mediated signaling that negatively regulates plant growth and development. *Sci. Rep.* 7(1):3074.
- Sim, Y.Y. and K.L. Nyam. 2021. *Hibiscus cannabinus* L. (kenaf) studies: Nutritional composition, phytochemistry, pharmacology, and potential applications. *Food chem.* 344:128582.
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, and M.E. Park. 2009. Effect of spatial soil salinity variation on the growth of soiling and forage crops seeded at the newly reclaimed tidal lands in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):179-186.
- Webber III, C.L. and V.K. Bledsoe. 2002. Kenaf yield components and plant composition. p. 348-357. In J. Janick et al. (ed.) *Trends in new crops and new uses: Proceedings of the Fifth National Symposium, Atlanta, Georgia, USA.*
- Zhang, W., M. Xu, B. Wang, and X. Wang. 2008. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of Southern China. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 84:59-69.