

PLANT&FOREST

Effect of biochar derived from rice husk and chicken manure on lettuce growth and soil chemical properties

Jun-Yeong Lee^{1,†}, Do-Gyun Park^{1,2,†}, Yun-Gu Kang¹, Jun-Ho Kim¹, Ji-Hoon Kim¹, Ji-Won Choi¹, Yeo-Uk Yun^{1,3}, Taek-Keun Oh^{1,*}

¹Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

³Division of Environmentally Friendly Agriculture, Chungcheongnam-do Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

[†]These authors equally contributed to this study as first author.

*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

Abstract

The application of biochar to soil for sustainable agriculture has been considered to have a positive impact on soil fertility and crop productivity. In this study, biochar derived from rice husk and chicken manure was applied to the soil at rates of 1% and 3% by weight, respectively, for lettuce cultivation experiments. The results indicated that both rice husk biochar and chicken manure biochar were effective in improving soil fertility through soil pH correction and increased nutrient content. The nitrogen content and pH of the biochar increased the available nitrogen and phosphate in the soil, creating a soil environment conducive to the growth enhancement of lettuce. In particular, after the application of 3% chicken manure biochar, the soil exhibited the highest levels of available nitrogen and phosphate at 87.42 mg·kg⁻¹ and 69.07 mg·kg⁻¹, respectively. Plant fresh weight increased with rising biochar amount, with the 3% chicken manure biochar treatment (228.25 g·plant⁻¹ fresh weight [FW]) exhibiting superior fresh weight compared to 3% rice husk biochar treatment (120.88 g·plant⁻¹ FW). The nutrient content in lettuce, except for K₂O, was higher in the chicken manure biochar treatment compared to the same dosage of rice husk biochar. Therefore, for enhancing lettuce productivity and soil fertility, chicken manure biochar appears to be more effective than rice husk biochar, and increasing the application rate up to 3% showed improvement effects without adverse impacts. However, excessive application of chicken manure biochar may lead to an increase in soil pH and electrical conductivity (EC) beyond the optimal range, requiring further assessment of application rates.

Keywords: application rate, chicken manure biochar, crop productivity, rice husk biochar, soil fertility

OPEN ACCESS

Citation: Lee JY, Park DG, Kang YG, Kim JH, Kim JH, Choi JW, Yun YU, Oh TK. 2024. Effect of biochar derived from rice husk and chicken manure on lettuce growth and soil chemical properties. Korean Journal of Agricultural Science 51:271-281. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510303>

Received: April 16, 2024

Revised: May 22, 2024

Accepted: June 25, 2024

Copyright: © 2024 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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

화학비료의 보급은 20세기 중반 이후로 수십 년간 이루어져왔으며, 농업 생산량의 향상에 기여해왔다(Chirinda et al., 2010; Wijesingha et al., 2023). 화학비료의 사용으로 인한 작물 공급량 증가는 인구 기아 문제를 완화해왔으나, 지속된 남용 및 오용으로 인한 환경 악화는 지속가능한 농업에 위협이 되고 있다(Rahman and Zhang, 2018; Biswas and Kim, 2023). 화학비료의 시비에 따른 부정적인 영향으로는 온실가스 배출, 토양 비옥도 악화 및 용출로 인한 수질 오염 등이 있으며, 과다 시비로 인한 작물 수량 감소를 유발할 수 있다(Guo et al., 2010; Dai et al., 2020; Park et al., 2023). 따라서, 이러한 화학비료의 부정적인 영향을 감소시키고 지속가능한 농업을 달성하기 위해서 토양개량제를 화학비료와 함께 토양에 적용하는 것이 필요하다. 이에 따라, 국내외적으로 화학비료와 유기질비료, 퇴비, 바이오차 등 친환경 토양개량제의 혼합 적용을 통한 작물 생산성 및 토양 개량 효과에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Chirinda et al., 2010; Kang et al., 2022).

바이오차(biochar)는 제한된 산소 조건에서 유기성 자원을 열분해하여 얻은 큰 비표면적과 다공성의 특징을 지닌 고형 물질이다(Oh et al., 2017; Kang et al., 2023a). 유기성 폐자원을 농경지에 환원하는 친환경적인 물질인 바이오차는 토양 비옥도를 개선하고 작물의 생산성을 향상시키는 유망한 토양개량제로 기대되고 있다(Lee et al., 2019; Kang et al., 2023c). 탄소 함량이 높은 고형 물질인 바이오차의 토양 내 적용은 탄소격리를 통한 대기 중 CO₂ 감축 효과 외에도 N₂O, CH₄과 같은 온실가스(greenhouse gases, GHGs)를 저감할 수 있으며, 토양에서 양분 침출을 감소시켜 영양분 순환 환경을 개선하고 토양 미생물의 활성을 자극하는 것으로 알려져 있다(Semida et al., 2019). 바이오차를 생산하는 원료로는 농작물 부산물, 목본 물질, 가축 분뇨 및 기타 유기성 폐기물 등이 광범위하게 사용되고 있으며, 원료에 따라 이화학적 성에 차이를 나타낸다(Kang et al., 2021). 식물 유래 바이오차는 일반적으로 침출 가능한 양분 함량이 낮아 비료보다는 토양개량제로 간주되는 반면, 가축분 유래 바이오차는 방출 양분 함량이 비교적 높아 토양개량제 및 비료로 사용될 수 있다(Uchimiya et al. 2010). 바이오차의 원료 특성, 처리량, 그리고 토양 조건 등은 작물의 양분 가용성과 생산성에 차이를 나타내는 것으로 알려져 있으며(Dai et al., 2020), 최근 국내에서 바이오차의 비료 공정규격 설정 고시가 설정됨에 따라(RDA, 2024), 다양한 원료로 제조된 바이오차 적용을 통한 토양 개량 효과, 작물 생산성, 그리고 적정 처리량 선정에 관한 추가적인 연구가 필요한 현황이다.

따라서, 본 연구는 농업에서 배출되는 식물과 동물 유래 바이오매스인 왕겨와 계분을 활용하여 제조한 바이오차를 토양에 처리하였을 때, 토양의 화학성과 작물의 생산성에 미치는 영향을 비교하고자 수행되었으며, 화학비료를 시비한 관행 토양에서 바이오차의 개량 효과를 확인하고자 화학비료와 바이오차를 함께 처리하였다.

Materials and Methods

Experimental region and official materials

작물 재배 실험은 충남대학교 농업생명과학대학 부속 유리온실(36°22'11"N, 127°21'15"E)에서 실시하였다. 실험에 사용된 토양은 (주)참그로(Cham Grow Inc., Korea)에서 상토 생산에 사용하는 토양을 구매하여 하우스에서 충분히 건조시킨 후, 체거름(mesh < 2 mm)을 통해 걸러진 토양을 사용하였다. 토양의 실험 전 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1. Chemical properties of soil used in this experiment.

Sample	pH (1 : 5, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	TC (%)	TN (%)	Avail. N (mg·kg ⁻¹)	Avail. P (mg·kg ⁻¹)	Exchangeable cations (cmol _c ·kg ⁻¹)			
							Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Initial soil	5.72 ± 0.05	0.75 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.02 ± 0.00	44.87 ± 3.56	42.89 ± 1.62	8.42 ± 0.09	0.21 ± 0.00	3.82 ± 0.06	0.24 ± 0.00

EC, electrical conductivity; TC, total carbon; TN, total nitrogen; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphate.

토양에 처리한 왕겨 바이오차는 충남대학교 부속 논 포장에서 재배한 벼에서 발생한 왕겨를 하우스에서 건조시킨 후, 400°C 온도 조건에서 30분간 회화로(1,100°C Box Furnace, Thermo Scientific Inc., USA)에서 열 분해하였다. 계분 바이오차는 충남지역 소재의 양계장에서 구매한 계분을 왕겨와 동일 조건에서 건조 후, 열 분해하였다. 실험에 사용된 왕겨 및 계분 바이오차의 이화학적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타내었으며, 바이오차는 분쇄하여 체거름(mesh < 0.5 mm)을 통해 걸러진 powder 형태로 재배토양의 상층부(depth: 0 - 10 cm)에 혼합하였다.

Table 2. Physico-chemical properties of amendments used in this experiment.

Amendments	Carbonization temperature (°C)	Carbonization time (min)	Yield (%)	pH (1 : 10, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	TC	TN (%)	TH
Chicken manure biochar	400.00	30.00	40.60 ± 1.43	11.55 ± 0.02	3.88 ± 0.03	29.97 ± 0.15	2.12 ± 0.10	0.70 ± 0.00
Rice husk biochar	400.00	30.00	34.79 ± 0.10	10.13 ± 0.03	3.63 ± 0.03	50.27 ± 0.25	1.41 ± 0.05	2.09 ± 0.01

EC, electrical conductivity; TC, total carbon; TN, total nitrogen; TH, total hydrogen.

Lettuce growth test under biochar treatments

작물 생육 평가는 2022년 10월 14일에서 12월 2일까지 총 49일간 상추(*Lactuca sativa* L.)로 수행하였으며, 와그너 포트(1·5,000 a⁻¹)를 이용하여 작물을 재배하였다. 포트는 처리구별로 3반복 실시하였으며, 처리구는 무기질비료만 처리한 대조구(control)를 포함하여 토양 중량 기준 왕겨 바이오차를 1% 처리한 처리구(rice husk biochar 1%, RB1), 왕겨 바이오차를 3% 처리한 처리구(rice husk biochar 3%, RB3), 계분 바이오차를 1% 처리한 처리구(chicken manure biochar 1%, CB1), 그리고 계분 바이오차를 3% 처리한 처리구(chicken manure biochar 3%, CB3)로 구분하였다. 무기질비료(N - P₂O₅ - K₂O)는 농촌진흥청의 작물 별 시비처방기준에 준하여 200 - 59 - 128 kg·ha⁻¹를 처리하였으며, 정식일을 포함하여 총 3회에 걸쳐 분시하였다(RDA, 2022).

Properties analysis of biochar and soil

왕겨와 계분 바이오차의 회수율은 회화 전과 후 무게를 측정하여 계산하였다. 바이오차의 pH와 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 바이오차와 증류수를 1 : 10 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 후 30분간 진탕하여 상층액을 Benchtop Meter with pH and EC (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Scientific Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 바이오차 내 total carbon (TC), total nitrogen (TN), 그리고 total hydrogen (TH) 함량은 dry oven에서 수분을 제거한 후, elemental analyzer (TruSpec Micro, LECO Corp., USA)로 분석하였다.

실험 전과 후 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 후 30분간 진탕하여 상층액을 Benchtop Meter with pH and EC로 측정하였다. 토양의 TC 및 TN 함량은 105°C로 설정된 dry oven에서 24시간 건조하여 수분을 완전히 제거한 후, elemental analyzer로 분석하였다. 토양 내 available nitrogen (avail. N)은 2 M KCl로 토양을 침출시킨 후, 침출액을 각각 Brucine법과 Indophenol blue법을 이용하여 UV/Vis-spectrophotometer (GENE-

SYS 50 UV-Visible Spectrometer, Thermo Scientific Inc., USA)로 측정된 NO_3^- 함량 및 NH_4^+ 함량을 합산하였다. 토양의 available phosphate (avail. P)는 Lancaster법으로 분석하였으며, UV/Vis-spectrophotometer를 이용하였다. Exchangeable cations인 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , 그리고 Na^+ 는 pH 7.0으로 교정한 1 M ammonium acetate (NH_4OAc)로 토양을 침출한 후, inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES, ICAP 7000 Series ICP Spectrometer, Thermo Scientific Inc., USA)로 분석하였다.

Plant growth characteristic and element analysis

수확한 상추의 생육 특성 분석을 위해 생체중, 수분함량, 엽장, 엽폭, 엽수, 그리고 엽록소 함량을 조사하였으며, 상추 내 TC, TN, total phosphate (TP), 그리고 K_2O 함량을 조사하였다. 수확 직후, 상추의 지상부를 대상으로 생체중을 조사하였으며, 생육 조사 이후 dry oven을 이용하여 건조한 무게를 측정하여 수분함량을 계산하였다. 엽장 및 엽폭은 개체 당 상위 3개의 엽을 측정하였으며, 엽수는 1 cm 이상의 엽을 대상으로 조사하였다. 엽록소 함량은 MINOLTA Chlorophyll meter (SPAD-502, Konica Minolta, Japan)를 이용하여 개체 당 3반복 측정하였다. 생육 조사 이후 열풍 건조된 작물 시료는 elemental analyzer를 이용하여 TC와 TN 함량을 분석하였으며, TP와 K_2O 함량 분석을 위해 과염소산(perchloric acid) 및 질산(nitric acid)으로 산 분해한 작물 시료를 ICP-OES로 분석하였다.

Statistical analysis

본 연구에서 수행된 토양, 생육 특성 및 작물 내 원소함량 분석 결과는 모두 3반복 실시한 결과를 평균값으로 계산하여 나타내었다. 결과값은 SPSS (IBM SPSS Statistics version 26, USA)의 일원배치분산분석(one way analysis of variance, ANOVA)을 통해 통계적 유의차를 확인하였으며, 통계 분석의 신뢰수준은 95%로 수행되었다. 사후 분석으로는 Duncan의 multiple range test를 실시하였다.

Results and Discussion

Soil chemical characteristics

시험 후 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 토양의 pH는 시험 전 토양의 pH 5.72에 비해 control (pH 5.63)을 제외한 모든 처리구의 토양 pH가 상승하였으며, 특히 계분 바이오차 3% (CB3)처리구에서 pH 7.28로 가장 높게 증가하였다. 동일 바이오차 처리구의 비교에서는 처리량이 많을수록 pH가 높게 상승하였으며, 처리량에 관계없이 왕겨 바이오차 처리구에 비해 계분 바이오차 처리구에서 높은 증가율을 나타내었다. Hailegnaw 등(2019)은 토양에 바이오차의 처리량이 증가할수록 토양 pH가 더 높게 상승한다고 보고하였으며, pH가 높은 바이오차로 인한 토양의 pH 상승은 여러 선행연구에서 나타난 바 있다(Wang et al., 2014; Wisnubroto et al., 2017; Kang et al., 2021; Lee et al., 2023). 본 연구에 사용된 왕겨 바이오차 및 계분 바이오차의 pH는 각각 pH 10.13, pH 11.55로 알칼리성을 나타내었으며, 상대적으로 pH가 더 높은 계분 바이오차가 토양의 pH 상승에 더욱 영향을 미친 것으로 판단된다(Table 2). 시험 후 토양의 EC는 control 처리구($0.25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)를 제외한 왕겨 바이오차 1% (RB1), 왕겨 바이오차 3% (RB3), 계분 바이오차 1% (CB1), 그리고 CB3 처리구에서 각각 0.41 , 0.75 , 0.68 , $0.89 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 시험 전 토양의 EC ($0.34 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)에 비해 증가하는 결과를 보였으며, CB3 처리구에서 가장 높게 증가하였다. 토양에 바이오차를 처리한 선행연구에서는 토양의 EC 증가가 바이오차의 원료 및 처리량에 기인하는 것으로 보고하였다(Da Silva Mendes et al., 2021; Kang et al., 2021, 2023b). 실험 후 토양의 EC 변화는 왕겨 및 계분 바이오차 처리구 모두 바이오차의 처리량의 상승에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 동일 처리량 대비 계분 바이오차 처리구에서 높은

전기전도도를 보였는데, 이는 왕겨 바이오차($3.63 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)에 비해 높은 EC값을 나타낸 계분 바이오차($3.88 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)가 토양의 EC 상승률에 영향을 미친 것으로 판단된다(Table 2).

Table 3. Chemical properties of soil after experiment.

Treatments	pH (1 : 5, H ₂ O)	EC ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	TC	TN	Avail. N	Avail. P	Exchangeable cations ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)			
			(%)		$(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Control	5.63 ± 0.09e	0.25 ± 0.00d	0.17 ± 0.01e	0.06 ± 0.00b	33.41 ± 1.55e	47.88 ± 0.26c	7.41 ± 0.04d	0.16 ± 0.02d	3.43 ± 0.12ab	0.18 ± 0.04ab
CB1	6.93 ± 0.04b	0.68 ± 0.02b	0.42 ± 0.02d	0.08 ± 0.00a	54.24 ± 1.91c	60.65 ± 1.40b	9.36 ± 0.65b	0.39 ± 0.04b	3.34 ± 0.03ab	0.20 ± 0.01ab
CB3	7.28 ± 0.04a	0.89 ± 0.02a	1.03 ± 0.01b	0.08 ± 0.01a	87.42 ± 1.83a	69.07 ± 3.70a	10.67 ± 0.27a	0.62 ± 0.07a	3.19 ± 0.26b	0.23 ± 0.04a
RB1	6.25 ± 0.05d	0.41 ± 0.02c	0.69 ± 0.01c	0.08 ± 0.00a	45.42 ± 3.48d	50.13 ± 3.70c	8.44 ± 0.20c	0.26 ± 0.01c	3.48 ± 0.09a	0.16 ± 0.01b
RB3	6.53 ± 0.07c	0.75 ± 0.02b	1.56 ± 0.05a	0.09 ± 0.00a	67.59 ± 1.94b	60.18 ± 5.28b	9.26 ± 0.34b	0.44 ± 0.05b	3.43 ± 0.06ab	0.19 ± 0.03ab
p-value	***	***	***	***	***	***	***	***	-	-

EC, electrical conductivity; TC, total carbon; TN, total nitrogen; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphate; CB1, chicken manure biochar 1%; CB3, chicken manure biochar 3%; RB1, rice husk biochar 1%; RB3, rice husk biochar 3%.

a - e: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

토양의 TC 함량은 모든 처리구에서 시험 전 토양의 0.15%에 비해 증가하는 경향을 보였으며, 계분 바이오차 처리구(CB1, CB3)에 비해 왕겨 바이오차 처리구(RB1, RB3)에서 동일 처리량 대비 높은 결과를 나타내었다. Biederman과 Harpole (2012)은 탄소가 풍부한 바이오차를 토양에 적용하였을 때, 난분해성 특징을 가진 바이오차가 토양에 탄소를 격리하는 효과가 있다고 보고하였다. 본 실험에서도 토양에 비해 높은 탄소함량을 나타내는 바이오차가 powder 형태로 토양에 혼합되어 실험 후 토양 내 TC 함량을 증가시켰다. 또한, 토양에 처리한 왕겨 바이오차의 TC 함량이 50.27%로 계분 바이오차(29.97%)에 비해 높아 토양의 TC 함량 상승에 더욱 영향을 미친 것으로 판단된다(Table 2). 토양의 TN 함량은 시험 전 0.02%에 비해 모든 처리구에서 증가하였으며, 시험 후 바이오차 처리구 모두 control 처리구(0.06%)보다 높았으나, control 처리구를 제외한 처리구간 유의차는 나타나지 않았다. 본 연구에서 모든 처리구에서 시험 후 토양의 TN 함량 증가는 질소 비료의 투입과 잔류에 기인하며, control 처리구에 비해 바이오차를 처리한 처리구에서 바이오차에 존재하는 질소 함량이 토양 내 TN 함량 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다(Table 2).

시험 후 토양의 avail. N 함량은 시험 전의 $44.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에 비해 control 처리구($33.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)를 제외한 모든 처리구에서 증가하였으며, CB3 처리구($87.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), RB3 처리구($67.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), CB1 처리구($54.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), RB1 처리구($45.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 순으로 높은 수치를 나타내었다. Phillips 등(2022)은 바이오차가 원료에 관계없이 토양 내에서 질소 무기화를 통해 식물이 이용 가능한 질소 형태인 NH_4^+ 및 NO_3^- 를 증가시킨다고 보고하였다. 또한, 다른 선행 연구에서는 질소함량이 높은 분뇨 바이오차에서 NH_4^+ 및 NO_3^- 의 증가를 나타내었다(Nguyen et al., 2017b; Gao et al., 2019). 본 연구에서 바이오차 처리구의 avail. N 함량은 질소 무기화에 의해 증가하였으며, 원료의 질소 함량이 높은 계분 바이오차(2.12%) 처리구에서 왕겨 바이오차(1.41%)에 비해 동일 처리량 대비 높은 avail. N 함량을 나타낸 것으로 판단된다(Table 2). 토양 내 avail. P는 모든 처리구에서 시험 전 $42.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에 비해 증가하였으며, CB3 처리구에서 $69.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 가장 높은 결과를 나타내었다. Avail. P 함량은 바이오차의 처리량이 높아질수록 증가하였으며, 계분 바이오차 처리구에서 왕겨 바이오차에 비해 높은 결과를 나타내었다. Hannet 등(2021)은 바이오차를 토양에 시비하였을 때, avail. P의 농도가 증가하였으며, 다른 선행연구에서도 토양 pH가 7.5 이하인 조건에서는 토양의 pH가 증가함에 따라 토양 내 인의 가용성이 증가하는 것이 밝혀진 바 있다(Ch'ng et al., 2019; Glaser and Lehr, 2019). 본 연구의 시험 후 토양은 모든 처리구에서 pH 7.5 이하의 조건으로 나타났으며, pH가 비교적 높은 계분 바이오차 토양에서 avail. P 함량이 더 높은 경향을 보였다(Table 3). Laird 등(2010)은 토양 표층에 바이오차의 처

리가 N, P 등의 양분 침출 방지에 효과적이며, 바이오차의 적용량이 증가함에 따라 더욱 감소하였다. 본 연구에서 나타난 바이오차 적용 토양의 높은 avail. N 및 avail. P 함량도 바이오차의 양분 보유능이 관수로 인한 양분 침출 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다(Table 3).

토양 내 exchangeable Ca^{2+} , K^+ 은 시험 전 토양의 각각 8.42, 0.21 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ 에 비해 시험 후 control 처리구를 제외한 모든 처리구에서 증가하였으며, CB3 처리구에서 각각 10.67, 0.62 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 가장 높은 결과를 나타내었다. Exchangeable Mg^{2+} , Na^+ 은 시험 전 토양의 3.82, 0.24 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ 에 비해 모든 처리구에서 감소하는 경향을 나타내었다. 바이오차 처리에 따른 토양 내 교환성 양이온 함량 변화에 대한 최근 연구에서는 바이오차 적용 토양에서 Ca^{2+} , K^+ 함량의 증가, 토성에 따른 Mg^{2+} 함량 변화, 그리고 Na^+ 의 감소를 나타내었으며, 이는 바이오차의 pH 및 EC와 양의 상관관계를 보였다(Adhikari et al., 2024). 본 연구에서 계분 및 왕겨 바이오차를 적용하였을 때, 선행연구와 유사한 양이온 함량 변화를 확인할 수 있었으며, pH가 더 높은 계분 바이오차에서 교환성 Ca^{2+} , K^+ 함량이 높은 증가폭을 나타내었다(Table 2).

Plant growth characteristics

수확한 상추의 생육을 조사한 결과는 Table 4에 나타내었다. 상추의 생체중을 조사한 결과, control 처리구에서 61.55 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ FW (fresh weight)로 가장 낮았으며, 계분 바이오차가 처리된 CB1 (146.04 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ FW) 및 CB3 (228.25 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ FW)에서 왕겨 바이오차가 처리된 RB1 (116.87 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ FW) 및 RB3 (120.88 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ FW)에 비해 높은 결과를 나타내었다. 처리한 바이오차의 함량이 증가할수록 우수하였으나, RB1과 RB3의 처리구간 통계적 유의차는 발견되지 않았다. 토양에 바이오차의 적용을 통한 작물의 생육 촉진 효과는 여러 선행 연구에서 밝혀진 바 있으며, 바이오차의 특성 및 처리량에 따라 차이를 나타낸다(Schulz et al., 2013; Dai et al., 2020; Kumar et al., 2021). 또한, Torres 등(2020)은 바이오차의 처리량이 많아질수록 작물 생산성이 선형적으로 증가하였으며, 식물 유래 바이오차에 비해 분뇨로 제조된 바이오차 처리구의 생산량이 높게 나타났다. 본 연구의 상추 생체중 또한, 앞선 선행 연구와 유사하게 바이오차의 처리량에 기인하여 증가하였으며, 계분 바이오차 처리구에서 왕겨 바이오차 처리구에 비해 동일 처리량(1%, 3%) 대비 각각 1.26, 1.90배 높은 결과를 보였다. 수확한 상추의 수분함량은 CB3 처리구에서 94.15%로 가장 높은 수치를 나타내었으나, RB3 처리구(94.13%)와 유의차를 나타내지 않았다. 수분 함량은 바이오차의 처리량이 3%인 처리구에서 수치적으로 높게 나타났는데, 이는 보수력이 높은 바이오차의 증가로 인해 작물의 수분 흡수가 높은 것으로 판단된다(Chen et al., 2018). 상추의 엽장 및 엽폭은 유사한 경향을 보였으며, CB3 처리

Table 4. Growth characteristics of lettuce in different treatments.

Treatments	Fresh weight (g)	Moisture contents (%)	Leaf			Chlorophyll content (SPAD)
			Length (cm)	Width (cm)	Counts ($\text{ea} \cdot \text{plant}^{-1}$)	
Control	61.55 ± 32.77d	92.31 ± 0.51ab	14.49 ± 2.77d	9.80 ± 1.96d	22.67 ± 3.51c	23.62 ± 3.07bc
CB1	146.04 ± 3.20b	92.05 ± 0.16b	18.58 ± 1.25c	12.79 ± 0.64bc	32.33 ± 2.52ab	28.98 ± 3.28a
CB3	228.25 ± 4.07a	94.15 ± 0.58a	23.11 ± 1.78a	14.81 ± 1.32a	33.67 ± 3.21a	30.66 ± 4.92a
RB1	116.87 ± 3.67c	92.28 ± 1.88ab	20.81 ± 1.04b	13.40 ± 0.61b	32.33 ± 2.89ab	24.38 ± 3.55b
RB3	120.88 ± 1.04bc	94.13 ± 0.75a	18.27 ± 0.88c	12.07 ± 0.66c	27.00 ± 2.00bc	20.37 ± 1.88c
p-value	***	*	-	-	**	-

CB1, chicken manure biochar 1%; CB3, chicken manure biochar 3%; RB1, rice husk biochar 1%; RB3, rice husk biochar 3%. a - e: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

구에서 각각 23.11, 14.81 cm로 가장 높은 수치를 나타내었다. 수확한 상추의 엽수 또한, CB3 처리구에서 33.67 ea·plant⁻¹로 가장 우수한 결과를 나타내었으며, control 처리구(22.67 ea·plant⁻¹)에 비해 1.49배 높았다. 잎의 엽록소를 측정된 결과, CB1, CB3에서 각각 28.98, 30.66 SPAD로 RB1 (24.38 SPAD), RB3 (20.37 SPAD)에 비해 높게 나타났다.

일반적으로 상추는 pH 6.5 - 7.0 범위 및 EC 2.0 dS·m⁻¹ 이하의 토양 조건에서 생육에 적합하며, 인산이 생체중과 잎의 분화 속도에 주요 인자로 작용한다(RDA, 2018). 또한, Carter 등(2013)은 화학비료 단독 적용에 비해 화학비료와 함께 바이오차를 함께 처리하였을 때, 포트 실험으로 재배한 상추의 생체중이 259 - 658%까지 증가하였으며, 이는 바이오차의 적용에 따른 토양 용적밀도 교정 및 화학성(pH 교정 및 양분 공급) 변화에 의한 것으로 보고하였다. 본 연구에서 왕겨 및 계분 바이오차를 처리한 토양은 control 처리구에 비해 상추의 적정 pH 범위로 증가하였으며, 토양 내 avail. P의 함량을 향상시켜 수확한 상추의 생체중과 잎 생육 매개변수를 높게 증진시킨 것으로 판단된다 (Tables 3 and 4).

Plant element contents

상추 내 양분 함량(TC, TN, TP, K₂O)을 분석한 결과는 Table 5에 나타내었다. 상추 내 TC 함량은 처리된 바이오차 함량이 높은 CB3, RB3 처리구에서 각각 39.53, 39.50%로 높게 나타났다. 바이오차를 3% 시비한 처리구간 통계적 유의차는 나타나지 않았으나, 상추 내 축적된 탄소 함량으로 환산하였을 때, CB3 처리구는 5.28 g으로 RB3 처리구의 2.80 g에 비해 1.89배 높은 결과를 보였다. 수확한 작물 내 탄소 함량은 토양 영양소, 온도에 따라 차이를 나타내며, 생육이 우수한 작물일수록 탄소 축적이 증가한다(Sánchez-Sastre et al., 2018). 본 연구에서 수확한 상추도 축적된 탄소 함량으로 환산한 결과, 생체중이 높을수록 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5. Elements contents of lettuce.

Treatments	TC	TN	TP	K ₂ O
	(%)			
Control	37.83 ± 0.55b	2.75 ± 0.07c	1.04 ± 0.00e	3.27 ± 0.04e
CB1	38.43 ± 0.15b	3.35 ± 0.21b	1.89 ± 0.01c	4.15 ± 0.06d
CB3	39.53 ± 0.35a	4.09 ± 0.12a	4.34 ± 0.06a	5.64 ± 0.12b
RB1	38.20 ± 0.20b	2.64 ± 0.08c	1.23 ± 0.08d	5.45 ± 0.05c
RB3	39.50 ± 0.20a	3.66 ± 0.38b	2.80 ± 0.04b	5.81 ± 0.04a
p-value	***	***	***	***

TC, total carbon; TN, total nitrogen; TP, total phosphate; CB1, chicken manure biochar 1%; CB3, chicken manure biochar 3%; RB1, rice husk biochar 1%; RB3, rice husk biochar 3%.

a - e: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

상추 내 TN 함량은 동일 처리량 대비 계분 바이오차 처리구에서 왕겨 바이오차 처리구에 비해 높은 결과를 보였으며, 토양에 적용된 바이오차 처리량 증가에 따라 CB3 처리구에서 4.09%로 가장 높은 TN 함량을 나타내었다. RB1 처리구의 TN 함량은 2.64%로 control 처리구의 2.75%에 비해 낮은 함량을 보였으나, 두 처리구간 통계적 유의차는 나타나지 않았다. Nguyen 등(2017a)은 바이오차가 적용된 토양의 avail. N이 증가함에 따라, 작물의 질소 이용 효율(nitrogen use efficiency, NUE)이 상승하여 잎에서 높은 TN 함량을 나타내었으며, TN 함량의 증가는 바이오

차의 처리량과 양의 상관관계를 보였다. 본 연구에서 토양 내 avail. N 함량은 바이오차의 처리량이 증가할수록 높은 결과를 보였으며, 상추 내 TN 함량은 토양 내 avail. N 함량에 기인한 것으로 판단된다(Table 3). 수확한 상추의 TP 함량은 CB3 처리구(4.34%), RB3 처리구(2.80%), CB1 처리구(1.89%), RB1 처리구(1.23%), 그리고 control 처리구(0.21%) 순서로 높게 나타났으며, 가장 높은 함량을 나타낸 CB3 처리구는 그 다음으로 높은 RB3 처리구에 비해서도 1.55배 높은 결과를 보였다. 토양 내 인은 산성토양에서 바이오차 적용을 통해 pH가 6.0 - 7.0 범위로 증가함에 따라 작물이 이용 가능한 것으로 알려져 있다(Tesfaye et al., 2021). 본 연구의 상추 TP 함량의 차이는 바이오차 적용으로 인한 토양 pH 상승으로 인해 증가한 avail. P의 함량에 기인한 것으로 판단된다(Table 2). 상추의 K₂O 함량은 바이오차 처리량의 증가에 따라 높은 결과를 나타내었으며, 바이오차의 처리량이 높은 RB3 처리구(5.81%)와 CB3 (5.64%) 처리구의 K₂O 함량은 control 처리구(3.27%)에 비해 각각 1.78, 1.72배 높은 결과를 보였다. 바이오차를 적용한 토양에서 작물 잎의 K₂O 함량 증가는 여러 선행연구에서 밝혀진 바 있으며, 바이오차의 처리량 및 바이오차 원재료에 따라 작물의 K₂O 흡수 효율에 차이를 나타낸다(Farrar et al., 2022; Phares et al., 2022). 본 연구에서도 엽채류인 상추 잎의 K₂O 함량도 바이오차의 처리량에 따라 증가하였으며, 왕겨 바이오차가 계분 바이오차에 비해 높은 결과를 나타내어 상추의 K₂O 증가에 왕겨 바이오차가 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

식물 근권부 토양의 양분 증가는 식물 뿌리의 양분 흡수율을 증가시킬 수 있으며(Laird et al., 2010), 여러 선행연구에서는 바이오차의 적용이 작물의 N, P, 그리고 K 흡수율을 각각 최대 1.56, 5.63, 그리고 2.22배까지 증가시키는 결과를 나타내었다(Sigua et al., 2016; Kocsis et al., 2020). 본 연구에서 바이오차를 처리한 토양의 양분(N, P, 그리고 K) 함량 증가가 상추의 양분 흡수율을 상승에 영향을 미친 것으로 판단된다(Tables 3 and 5).

Conclusion

본 연구는 식물성 및 동물성 유래인 왕겨와 계분을 이용해 제조한 바이오차가 상추의 생육과 토양의 화학적 특성에 미치는 영향을 비교 평가하고자 수행하였다. 토양에 바이오차의 적용은 pH, EC, C 및 양분(N, P, K) 함량을 증가시켰으며, 계분 바이오차와 왕겨 바이오차 모두 처리량에 따라 상승하였다. 특히, 동일 처리량 기준 계분 바이오차는 식물성인 왕겨 바이오차에 비해 pH, EC, avail. N, avail. P, Ca²⁺, 그리고 K⁺ 함량이 높게 나타났다. 토양의 화학성 변화는 바이오차 원료의 화학성에 기인하며, 상대적으로 TN 함량이 높고 토양의 pH를 높게 상승시킨 계분 바이오차 처리구에서 가용성 양분 함량(avail. N, avail. P)이 증가한 것으로 판단된다. 수확한 상추의 생육은 control 처리구에 비해 모든 바이오차 처리구에서 증가하였으며, 특히 계분바이오차 3% 처리구에서 생체중을 포함한 엽장, 엽폭, 엽수, 그리고 엽록소 함량이 가장 우수하게 나타났다. 상추 내 양분 함량도 K₂O를 제외한 항목에서 계분바이오차 3% 처리구에서 가장 높았다. 상추의 생체중은 계분 바이오차 처리구에서 왕겨 바이오차 처리구에 비해 높게 나타났으며, 바이오차 처리로 인한 토양 내 가용성 양분 증가에 기인한 상추의 양분 이용 효율 상승으로 생체중이 우수하게 나타난 것으로 판단된다. 왕겨 바이오차 처리는 계분 바이오차 처리에 비해 토양 내 TC 함량, 작물 내 K₂O 함량의 증가에 긍정적인 영향을 나타내었다. 왕겨 바이오차의 처리도 control 처리구에 비해 토양 개선과 작물의 생육 증진에는 효과적인 것으로 판단되나 계분 바이오차의 처리가 작물의 생산성에 더욱 유리한 것으로 사료된다.

본 연구 결과는 동물 유래 부산물 바이오차인 계분 바이오차가 식물 유래 부산물인 왕겨 바이오차에 비해 작물의 생육과 토양의 양분 개선 측면에서 더욱 효과적인 토양개량제로 사용될 수 있음을 시사하였다. 계분 바이오차의 처리량 증가는 토양 양분 가용성 및 작물의 생산성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되나 과투입으로 인한 pH 및 EC의 증가, 토양 내 C 저장, K의 가용성 측면에서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

This research study was conducted with support from a research grant awarded by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development of Rural Development Administration, Korea (Project No. RS-2022-RD010351).

Author Information

Taek-Keun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

References

- Adhikari S, Moon E, Timms W. 2024. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils. *Journal of Cleaner Production* 446:141454.
- Biederman LA, Harpole, W. 2012. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy* 5:202-214.
- Biswas S, Kim IH. 2023. Determination of garlic extract efficacy on growth, nutrient digestibility, and fecal score of growing pigs via diet supplementation. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:391-398.
- Carter S, Shackley S, Sohi S, Suy TB, Haefele S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy* 3:404-418.
- Ch'ng HY, Haruna AO, Majid MNA, Jalloh MB. 2019. Improving soil phosphorus availability and yield of *Zea mays* L. using biochar and compost derived from agro-industrial wastes. *Italian Journal of Agronomy* 14:34-42.
- Chen H, Ma J, Wei J, Gong X, Yu X, Guo H, Zhao Y. 2018. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of The Total Environment* 635:333-342.
- Chirinda N, Olesen JE, Porter JR, Schjønning P. 2010. Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139:584-594.
- Da Silva Mendes J, Fernandes JD, Chaves LHG, Guerra HOC, Tito GA, Chaves IDB. 2021. Chemical and physical changes of soil amended with biochar. *Water, Air, & Soil Pollution* 232:338.
- Dai Y, Zheng H, Jiang Z, Xing B. 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Science of The Total Environment* 713:136635.
- Farrar MB, Wallace HM, Xu CY, Joseph S, Nguyen TTN, Dunn PK, Bai SH. 2022. Biochar compound fertilisers increase plant potassium uptake 2 years after application without additional organic fertiliser. *Environmental Science and Pollution Research* 29:7170-7184.
- Gao S, DeLuca TH, Cleveland CC. 2019. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Science of The Total Environment* 654:463-472.
- Glaser B, Lehr VI. 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports* 9:9338.
- Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, Christie P, Goulding KWT, Vitousek PM, Zhang FS. 2010.

- Significant acidification in major chinese croplands. *Science* 327:1008-1010.
- Hailegnaw NS, Mercl F, Pračke K. 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments* 19:2405-2416.
- Hannet G, Singh K, Fidelis C, Farrar, MB, Muqaddas B, Bai SH. 2021. Effects of biochar, compost, and biochar-compost on soil total nitrogen and available phosphorus concentrations in a corn field in Papua New Guinea. *Environmental Science and Pollution Research* 28:27411-27419.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Hatamleh AA, Al-Dosary MA, Al-Wasel YA, Lee KS, Oh TK. 2022. Influence of individual and co-application of organic and inorganic fertilizer on NH₃ volatilization and soil quality. *Journal of King Saud University - Science* 34:102068.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Oh TK, Sung JK. 2021. Evaluation of NH₃ emissions in accordance with the pH of biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:787-796. [in Korean]
- Kang YG, Lee JH, Lee JY, Kim JH, Oh TK. 2023a. Effects of biochar-based fertilizer on ammonia volatilization under controlled conditions. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:479-488. [in Korean]
- Kang YG, Lee JH, Lee JY, Oh TK. 2023b. Effects of application rate and pH of carbonized rice husk on the reduction of NH₃ volatilization and soil quality. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:273-281. [in Korean]
- Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK, Yun YU. 2023c. Effects of organic amendments on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil chemical properties in acidic and non-acidic soils. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:713-721. [in Korean]
- Kocsis T, Kotroczó Z, Kardos L, Biró B. 2020. Optimization of increasing biochar doses with soil-plant-microbial functioning and nutrient uptake of maize. *Environmental Technology & Innovation* 20:101191.
- Kumar A, Singh E, Singh L, Kumar S, Kumar R. 2021. Carbon material as a sustainable alternative towards boosting properties of urban soil and foster plant growth. *Science of The Total Environment* 751:141659.
- Laird D, Fleming P, Wang B, Horton R, Karlen D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158:436-442.
- Lee JH, Luyima D, Ahn JY, Park SY, Choi BS, Oh TK, Lee CH. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:931-939. [in Korean]
- Lee JY, Kang YG, Kim JH, Oh TK, Yun YK. 2023. Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:967-976. [in Korean]
- Nguyen TTN, Wallace HM, Xu CY, Xu Z, Farrar MB, Joseph S, Zwieter LV, Bai SH. 2017a. Short-term effects of organo-mineral biochar and organic fertilisers on nitrogen cycling, plant photosynthesis, and nitrogen use efficiency. *Journal of Soils and Sediments* 17:2763-2774.
- Nguyen TTN, Xu CY, Tahmasbian I, Che R, Xu Z, Zhou X, Wallace HM, Bai SH. 2017b. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma* 288:79-96.
- Oh TK, Lee JH, Kim SH, Lee HC. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 44:359-365. [in Korean]
- Park JW, Youn WB, Park BB, Cho MS. 2023. Effect of 16 different (N, P combination) fertilizer treatments on the growth of *Liriodendron tulipifera* seedlings and soil chemical properties in the Nursery Station. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:223-234. [in Korean]
- Phares CA, Amoakwah E, Danquah A, Afrifa A, Beyaw LR, Frimpong KA. 2022. Biochar and NPK fertilizer co-applied with plant growth promoting bacteria (PGPB) enhanced maize grain yield and nutrient use efficiency of inorganic fertilizer. *Journal of Agriculture and Food Research* 10:100434.
- Phillips CL, Meyer KM, Garcia-Jaramillo M, Weidman CS, Stewart CE, Wanzek T, Grusak MA, Watts DW, Novak J, Trippe KM. 2022. Towards predicting biochar impacts on plant-available soil nitrogen content. *Biochar* 4:9.
- Rahman KMA, Zhang D. 2018. Effects of fertilizer broadcasting on the excessive use of inorganic fertilizers and environmental sustainability. *Sustainability* 10:759.
- RDA (Rural Development Administration). 2018. Agricultural Technology Guide 160: Lettuce. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- RDA (Rural Development Administration). 2022. Fertilizer Recommendation for Crops (5th). RDA, Jeonju, Korea. [in

- Korean]
RDA (Rural Development Administration). 2024. Establishing Fertilizer Process Specifications. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- Sánchez-Sastre LF, Martín-Ramos P, Navas-Gracia LM, Hernández-Navarro S, Martín-Gil J. 2018. Impact of climatic variables on carbon content in sugar beet root. *Agronomy* 8:147.
- Schulz H, Dunst G, Glaser B. 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development* 33:817-827.
- Semida WM, Beheiry HR, Sétamou M, Simpson CR, El-Mageed TAA, Rady MM, Nelson SD. 2019. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany* 127:333-347.
- Sigua GC, Novak JM, Watts DW, Johnson MG, Spokas K. 2016. Efficacies of designer biochars in improving biomass and nutrient uptake of winter wheat grown in a hard setting subsoil layer. *Chemosphere* 142:176-183.
- Tesfaye F, Liu X, Zheng J, Cheng K, Bian R, Zhang X, Li L, Drosos M, Joseph S, Pan G. 2021. Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus? A meta-analysis of published experiments. *Environmental Science and Pollution Research* 28:34108-34120.
- Torres WGA, Colen F, Pandey SD, Frazão LA, Sampaio RA, Fernandes LA. 2020. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. *Ciência e Agrotecnologia* 44:e014620.
- Uchimiya M, Lima IM, Klasson KT, Wartelle LH. 2010. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. *Chemosphere* 80:935-940.
- Wang Y, Yin R, Liu R. 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 110:375-381.
- Wijeysingha S, Walpola BC, Kang YG, Yoon MH, Oh TK. 2023. Practical significance of plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: A review. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:759-771.
- Wisnubroto EI, Utomo WH, Soelistyari HT. 2017. Biochar as a carrier for nitrogen plant nutrition: The release of nitrogen from biochar enriched with ammonium sulfate and nitrate acid. *International Journal of Applied Engineering Research* 12:1035-1042.