

PLANT&FOREST

Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables

Jun-Yeong Lee^{1,†}, Yun-Gu Kang^{1,†}, Jun-Ho Kim¹, Taek-Keun Oh^{1,*}, Yeo-Uk Yun^{1,2,*}

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

²Division of Environmentally Friendly Agriculture, Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

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

*Corresponding authors: ok5382@cnu.ac.kr, aogg61@korea.kr

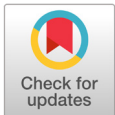
Abstract

Biochar is emerging as a promising substance for achieving carbon neutrality and climate change mitigation. It can absorb several nutrients via ion bonding on its surface functional groups, resulting in slow dissociation of the bonds. Biochar, like organic fertilizers, contributes to sustainable nutrient management. The purpose of this study was to investigate the effects of nutrient-coated biochar amendments on leafy vegetables production and soil fertility. The nutrient-coated biochar was produced by soaking rice husk biochar in a nutrient solution containing nitrogen (N), phosphorus, and potassium for 24 hours. Nutrient-coated biochar and organic fertilizers were applied to soil at a rate of 120 kg·N·ha⁻¹. The growth components of the leafy vegetables showed that nutrient-coated biochar led to the highest fresh weight (FW) of both lettuce and kale (i.e., 146.67 and 93.54 g·plant⁻¹ FW, respectively). As a result, nutrient-coated biochar amendments led to superior yield compared to the control treatment and organic fertilization. The elemental composition of leafy vegetables revealed that soil amended with nutrient-coated biochar resulted in higher nutrient contents, which was attributed to the high nutrient contents supplied by the rice husk biochar. Soil amendment with nutrient-coated biochar positively enhanced the soil fertility compared to amendment with organic fertilizer. Therefore, nutrient-coated biochar is a promising substance for enhancing agronomic performance of leafy vegetables and improving soil fertility.

Keywords: eco-friendly agriculture, kale, lettuce, nutrient-coated biochar, organic fertilizer

Introduction

작물 재배를 위해 투입된 화학비료 중 약 30%가 작물 생육에 이용되고, 토양에 투입된 비료의 가용성과 작물의 양분 수요가 불일치하는 경우, 양분 이용 효율(nutrient use efficiency, NUE)은 감소하여 작물 생육 저해, 온실가스(N₂O) 배출량 증가, 농업용수 및 토양의 질 악화



OPEN ACCESS

Citation: Lee JY, Kang YG, Kim JH, Oh TK, Yun YU. Effects of nutrient-coated biochar amendments on growth and element components of leafy vegetables. Korean Journal of Agricultural Science 50:967-976. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500430>

Received: September 20, 2023

Revised: November 28, 2023

Accepted: November 30, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



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.

등 여러 부작용을 초래한다(Sun et al., 2020; Kang et al., 2022). 이에 따라 최근 우리나라에서는 작물의 양분 수요에 비료의 양분 가용성을 일치시키기 위해 양분 용출을 제어하는 비료(controlled release fertilizer, CRF)에 대한 연구가 진행되고 있다. CRF는 주로 물리적으로 용해도가 낮은 화합물과 양분을 혼합하는 방식과 양분에 친수성 화합물을 얇은 막의 형태로 코팅하는 2가지 방식으로 제조한다(Azeem et al., 2014). 특히, 코팅하는 방식으로 제조한 CRF는 친수성 화합물의 종류에 따라 양분의 용출 특성이 달라진다(Azeem et al., 2014). CRF는 환경 친화적이라는 장점이 있는 반면, 여러 단계의 생산과정과 높은 재료비용으로 일반 화학비료보다 비교적 높은 가격으로 판매되고 있다. 이로 인해 농가의 생산단가를 낮추기 위한 가격이 저렴하고 효과적인 CRF의 개발이 요구되고 있다.

최근 기후변화 완화를 위한 탄소중립(carbon neutrality)에 대해 관심이 증가됨에 따라 토양 내 탄소를 반 영구적으로 격리시킬 수 있는 바이오차(biochar)를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 바이오차는 산소가 제한된 환경에서 농업부산물과 같은 바이오매스(biomass)를 열분해하여 얻을 수 있는 탄소 함량이 높은 고형 물질이다(Kang et al., 2021b). 토양에 투입된 바이오차는 높은 표면적과 미세공극을 보유하고 있어, 양분을 흡착해 토양 내에 고정시키고, pH, 양이온 치환 용량(cation exchange capacity, CEC), 보수력을 증가시켜 농업 생산성을 향상시킬 수 있는 것으로 보고하였다(Kang et al., 2021a). 그 중에서도 바이오차의 흡착 특성에 따른 양분 고정 효과는 여러 선행연구에서 보고되었으며, 토양 내 양분을 비교적 장기간 고정할 수 있는 것으로 알려져 있다(Nguyen et al., 2017; Farrar et al., 2019; Kang et al., 2021a). 이러한 바이오차는 토양 개량제로서 유용한 재료로 평가받고 있으며, 양분을 코팅한 바이오차는 양분 용출을 서서히 하는 비료로 사용될 가능성이 있으나, 이와 관련한 연구가 부족한 현황이다(Kizito et al., 2019). 또한, Kizito 등(2019)은 양분을 코팅한 바이오차가 보유한 양분을 서서히 방출하여, 작물의 이용 효율을 증가시켜 작물 생육에 긍정적인 영향을 미치며, 이는 작물의 영양분 보유 증가에 기인한다고 설명하였다.

따라서, 본 연구는 시판되는 화학비료의 양분을 코팅한 바이오차를 토양에 처리하여 상추와 케일의 생산성과 토양 특성에 미치는 영향에 대해 바이오차를 친환경 농업자재로 사용되는 유기질비료와 비교·평가하였으며, 양분 용출을 제어하는 비료로서 기능을 확인하고자 하였다.

Materials and Methods

Preparation of soil and biochar

재배실험은 (주)참그로(Cham Grow Inc., Korea)에서 상토 생산과정 중 사용되는 토양을 구매하여 유리온실에서 2주간 건조시킨 후, 2 mm 이하로 체거름하여 사용하였다. 실험에 사용한 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 1에 나타내었다. 바이오차는 충남대학교 농업생명과학대학 내 논 포장에서 발생한 왕겨를 유리온실에서 건조시킨 후, 600°C에서 30분간 회화로(1100°C Box Furnace, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)에서 열 분해하였다. 열 분해 후, 왕겨 바이오차를 분쇄하여 요소($\text{CO}(\text{NH}_4)_2$), 용성인비(P_2O_5), 염화 칼륨(K_2O)을 상추와 케일의 작물 별 시비처방기준의 평균값에 따라 각각 55, 15, 30% ($\text{w}\cdot\text{v}^{-1}$)로 혼합한 수용액에 24시간 동안 충분히 침지시켜 코팅하였다. 코팅을 마친 시료는 80°C로 설정한 dry oven (OF-12, Jeio Tech Co., Ltd., Korea)에서 48시간 동안 건조시켜 재배 실험에 이용하였다. 실험에 사용한 유기질비료는 대두박과 미강을 배합하여 제조하였다. 제조한 왕겨 바이오차와 양분 코팅 바이오차, 유기질비료의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타내었다.

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

Sample	pH(1:5, H ₂ O)	T-C	T-N	OM	Avail. N	Avail. P	Exchangeable cations			
							Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			(%)		(mg·kg ⁻¹)		(cmol _c ·kg ⁻¹)			
Soil	5.72 ± 0.05	0.15 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.26 ± 0.02	44.87 ± 3.56	42.89 ± 1.62	8.42 ± 0.09	0.21 ± 0.00	3.82 ± 0.06	0.24 ± 0.00

T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphate.

Table 2. Chemical properties of amendments used in this experiment.

Amendments	pH (1 : 10, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	T-C	T-N	T-H	T-P ₂ O ₅	K ₂ O	H : C ratio
			(%)					
Organic fertilizer	7.43 ± 0.02	76.43 ± 3.40	39.50 ± 0.20	4.07 ± 0.23	5.51 ± 0.11	2.10 ± 0.05	0.99 ± 0.02	1.66
Rice husk biochar	10.99 ± 0.05	6.59 ± 0.13	54.90 ± 0.20	0.60 ± 0.01	4.87 ± 0.01	0.21 ± 0.00	0.07 ± 0.00	1.06
Nutrient-absorbing biochar	10.99 ± 0.05	7.12 ± 0.07	45.37 ± 0.35	4.80 ± 0.11	1.88 ± 0.04	1.75 ± 0.02	1.07 ± 0.03	0.49

EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen; T-P₂O₅, total phosphate.

Growth test for leafy vegetables

작물 생육 평가는 유리온실에서 2022년 10월 14일부터 12월 2일까지 총 49일간 1·5,000 a⁻¹ 크기의 와그너 포트에 상추(*Lactuca sativa* L.)와 케일(*Brassica oleracea* var. *sabellica*)을 재배하였다. 작물 별로 포트는 각 3반복으로 완전 임의 배치하였으며, 화학비료만 처리한 대조구(control)를 포함하여 유기질비료를 처리한 처리구(organic fertilizer, OF)와 양분 코팅 바이오차를 처리한 처리구(nutrients-coated biochar, NB)로 구분하였다. 화학비료(N-P₂O₅-K₂O)는 농촌진흥청의 작물 별 시비처방기준에 준하여 상추와 케일에 각각 200-59-128 kg·ha⁻¹, 128-30-54 kg·ha⁻¹를 처리하였으며, 기비를 포함하여 총 3회에 걸쳐 분시하였다(RDA, 2022). 양분 코팅 바이오차 및 유기질비료는 powder 형태로 사용하였으며, 퇴비 사용량의 질소(N) 기준으로 각각 120 kg·N·ha⁻¹를 전량 기비 처리하였다.

Characterization of soil and biochar

토양의 pH 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 후 30분간 진탕하여 상층액을 benchtop meter with pH and EC (electrical conductivity) (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 토양의 total carbon (T-C) 함량과 total nitrogen (T-N) 함량은 105°C로 설정한 dry oven에서 수분을 제거한 후, elemental analyzer (TruSpec Micro, Leco Corporation, USA)로 분석하였으며, T-C 함량을 분석한 결과에 환산계수인 1.724를 곱하여 유기물(organic matter, OM) 함량을 계산하였다(NAAS, 2010).

토양 내 available nitrogen (Avail. N)은 2 M KCl로 침출한 토양 침출액을 Indophenol blue법과 Brucine법을 이용하여 각각 NH₄⁺ 함량과 NO₃⁻ 함량을 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50 UV-Visible spectrometer, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석한 결과를 합하여 계산하였다. Available phosphate (Avail. P)는 Lancaster법을 이용하여 UV/vis-spectrophotometer로 분석하였다. Exchangeable cations (Ex. cations, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺)은 pH를 7.0으로 교정한 1 M 농도의 NH₄OAc로 토양을 침출한 후, inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES, ICAP 7000 series ICP spectrometer, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석하였다.

바이오차와 유기질비료의 pH와 EC는 1 : 10 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 액의 상층부를 benchtop meter with pH and EC로 측정하였다. 바이오차와 유기질비료의 T-C와 T-N, total hydrogen (T-H)는 Elemental analyzer로 분석하였으며, total phosphate (T-P)와 무기 조성(CaO, K₂O, MgO, Na₂O)은 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

Growth survey

작물 생육 특성은 수확 후 생체중(fresh weight), 수분함량(water content), 엽장(leaf length), 엽폭(leaf width), 엽수(leaf counts), 엽록소 함량(chlorophyll content), 원소 함량(elemental contents; C, N, P, K)을 조사하였다. 생체중은 지상부와 뿌리를 구분한 후, 지상부를 대상으로 측정하였으며, 엽장과 엽폭은 상위 3개 엽의 값을 측정하였다. 엽수의 경우, 1 cm 이상의 엽을 모두 측정하였으며, 엽록소 함량은 chlorophyll meter (SPAD-502 plus, Konica Minolta Inc.,

Japan)를 이용하여 개체당 3반복 측정하였다. 원소분석을 제외한 생육 조사를 모두 마친 시료를 열풍 건조하여 elemental analyzer와 ICP-OES를 이용하여 작물 내 C, N, P, 그리고 K 함량을 분석하였다.

Statistical analysis

본 연구에서 제시한 토양 및 생육 특성, 작물의 원소분석 결과는 3반복 수행한 결과를 모두 평균값으로 계산하여 나타내었다. 처리구 사이의 통계적 유의차는 SPSS (version 26, IBM, USA) 일원배치분산분석(one way analysis of variance, ANOVA)을 통해 95% 신뢰수준에서 통계 분석을 수행하였으며, 사후 분석으로 Duncan의 multiple range test를 수행하였다.

Results and Discussion

Soil properties

시험 후 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 3과 같다. 상추 재배 토양의 시험 후 pH는 시험 전 토양의 pH 5.72에 비해 모든 처리구에서 증가하였으며, 그중 양분 코팅 바이오차를 처리한 NB 처리구에서 pH 6.28로 가장 높게 증가하였다. 화학비료만 처리한 control 처리구와 화학비료와 유기질비료를 혼합처리한 OF 처리구의 시험 후 토양 pH는 각각 pH 6.05와 pH 6.12이었으며, 두 처리구간의 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 바이오차의 알칼리 효과(alkali effect)로 인해 토양 pH가 상승한 것으로 여겨지며, 여러 선행연구에서는 바이오차의 pH가 높아짐에 따라 토양 pH도 높게 증가한다고 보고하였다(Wang et al., 2014; Wisnubroto et al., 2017; Hailegnaw et al., 2019; Kang et al., 2021b).

상추 재배 후 토양의 T-C 및 T-N 함량은 NB 처리구에서 가장 높게 증가하였으며, 시험 전 토양(T-C 함량, 0.15%; T-N 함량, 0.02%)에 비해 각각 2.33배와 7.00배 증가한 0.35%와 0.14%로 나타났다. 시험 후 토양의 OM 함량은 NB 처리구에서 시험 전 토양의 0.26%보다 2.35배 높은 0.61%를 나타내었다. 시험 후 토양의 T-C 함량의 높은 상승은 유기질비료와 바이오차의 난분해적 특성으로 화학비료보다 토양 내 장기간 체류하기 때문인 것으로 판단되며, 특히 바이오차는 토양에 처리하여 탄소를 토양 내에 반 영구적으로 저장하는 탄소격리 물질로 밝혀진 바 있다(Bhatt et al., 2023). 토양 내 T-N 함량 변화는 화학비료만 처리한 control 처리구(200 kg·N·ha⁻¹)에 비해 OF 혹은 NB 처리구

Table 3. Chemical properties of soil treated with different amendments.

Crops	Treatments	pH (1:5, H ₂ O)	T-C	T-N	OM	Avail. N	Avail. P	Exchangeable cations			
								Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			(%)			(mg·kg ⁻¹)		(cmol _c ·kg ⁻¹)			
Lettuce	Control	6.05±0.07b	0.17±0.00c	0.06±0.00b	0.29±0.00c	37.02±1.22c	55.09±0.90c	7.38±0.08b	0.22±0.02b	2.96±0.19a	0.14±0.00a
	OF	6.12±0.03b	0.22±0.01b	0.11±0.03a	0.38±0.02b	67.83±2.32b	77.56±5.91b	7.75±0.14a	0.24±0.01ab	3.15±0.18a	0.18±0.04a
	NB	6.28±0.03a	0.35±0.01a	0.14±0.02a	0.61±0.02a	80.04±3.13a	146.46±6.83a	7.85±0.13a	0.25±0.01a	3.19±0.03a	0.16±0.03a
p-value		**	***	**	***	***	***	**	*	-	-
Kale	Control	6.03±0.01b	0.16±0.00b	0.05±0.01b	0.28±0.01b	34.58±2.39c	54.19±5.32b	7.32±0.10a	0.22±0.02a	2.93±0.07b	0.15±0.02b
	OF	6.14±0.02a	0.18±0.00b	0.12±0.00a	0.31±0.00b	70.31±1.37b	55.98±0.29b	7.39±0.05a	0.25±0.04a	3.18±0.01a	0.20±0.02a
	NB	6.15±0.03a	0.31±0.03a	0.14±0.01a	0.54±0.06a	88.98±2.12a	107.53±3.58a	7.41±0.03a	0.26±0.03a	3.20±0.02a	0.16±0.01b
p-value		**	***	***	***	***	***	-	-	***	*

Control, untreated unit; OF, organic fertilizer treatment; NB, nutrient-coated biochar treatment; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphate.

a - c: 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.

(320 kg·N·ha⁻¹)의 총 N 투입량이 1.60배 높은 것에 기인한 것으로 판단된다. 토양에 투입된 N 대비 토양 T-N 함량 증가 효율은 control 처리구보다 OF와 NB 처리구에서 각각 1.41배와 1.88배 높았다. 따라서, 본 연구에서 유기질비료와 양분 코팅 바이오차의 투입은 토양 내 T-C 함량을 비롯한 T-N 함량과 OM 함량 증가에 기여하며, 각 성분의 증가 효율은 유기질비료에 비해 양분 코팅 바이오차가 더 우수한 것으로 확인되었다. 이는 유기질비료에 비해 양분 코팅 바이오차의 높은 T-C 및 T-N 함량에 기인한 것으로 판단되며(Table 2), 다만 토양 내 T-N 함량의 경우, OF 처리구와 NB 처리구간의 통계적 유의차를 나타내지 않았다.

토양 내 Avail. N과 Avail. P 함량의 경우, NB 처리구에서 각각 80.04 mg·kg⁻¹과 146.46 mg·kg⁻¹으로 가장 높았으며, control 처리구에서 각각 37.02 mg·kg⁻¹과 55.09 mg·kg⁻¹으로 가장 낮았다. OF 처리구의 Avail. N과 Avail. P 함량은 NB 처리구에 비해 각각 1.18배와 1.89배 낮은 67.83 mg·kg⁻¹과 77.56 mg·kg⁻¹으로 나타났다. 토양 내 Avail. N 함량은 T-N 함량과 유사한 경향을 보였으며, 이는 양분 코팅 바이오차(NB)의 높은 T-N 함량에서 기인한 것으로 판단된다. Glaser와 Lehr (2019)는 토양 pH가 pH 7.5 이하인 조건에서 토양 pH가 증가함에 따라 인의 가용성이 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서는 pH 10.99 왕겨 바이오차를 처리한 NB에서 토양 pH가 가장 높게 상승하였으며, 이에 따라 인의 가용성도 증가하여 가장 높은 Avail. P 함량을 나타낸 것으로 판단된다(Table 2). Laird 등(2010)은 바이오차를 처리한 토양에서 양분 용출 평가를 실시하여 바이오차의 토양 내 N, P와 같은 양분 보유능 증가를 확인하였으며, 토양 내에서 양분 손실 방지 효과가 있다고 보고하였다. 또한, Bhatt 등(2023)은 바이오차를 토양에 처리하였을 때, 바이오차가 N, P, K와 같은 영양분을 지속적으로 방출하는 결과를 나타내었다고 보고하였다. 이에 따라, 본 연구의 실험 후 토양에서 나타난 높은 Avail. N 및 Avail. P의 함량은 후기도 지속된 양분 방출과 바이오차의 높은 양분 보유능이 추가적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

상추 재배 후 토양의 교환성 Ca²⁺ 및 K⁺ 함량은 NB 처리구에서 각각 7.85 cmol_c·kg⁻¹과 0.25 cmol_c·kg⁻¹으로 가장 높아, control 처리구와 비교하였을 때에는 통계적으로 유의하게 증가하였으나, OF 처리구와는 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 반면, 교환성 Mg²⁺과 Na⁺ 함량은 모든 처리구에서 통계적 유의차가 확인되지 않았으나, 각각 NB 처리구(exchangeable Mg²⁺, 3.19 cmol_c·kg⁻¹)와 OF 처리구(exchangeable Na⁺, 0.18 cmol_c·kg⁻¹)에서 가장 높게 나타났다. 토양에 바이오차를 처리하는 경우, 바이오차 표면의 음(-)전하에 의한 킬레이트(chelate) 작용으로 양이온 용출량이 감소하며, 이는 토양 내 양이온 고정 효과를 유발한다(Laird et al., 2010). 본 연구도 선행연구와 유사하게 바이오차를 처리한 NB 처리구에서 교환성 양이온 손실이 가장 적게 나타났다.

케일 재배 후 토양의 pH도 시험 전 토양(pH 5.72)에 비해 모든 처리구에서 증가하였으며, NB 처리구에서 pH 6.15로 가장 높게 증가하였다. 하지만, OF 처리구와 NB 처리구 사이의 통계적 유의차는 확인되지 않았으며, control 처리구와 OF 처리구의 토양 pH는 각각 pH 6.03과 pH 6.14로 나타났다. 이는 상추 재배 토양과 유사한 경향을 나타내어 바이오차의 알칼리 효과에 의한 것으로 판단된다.

토양 내 T-C 함량은 양분 코팅 바이오차(NB)를 투입하였을 때, 0.31%로 가장 높게 증가하였으며, 유기질비료(OF)를 처리하였을 때에는 0.18%로 1.72배 낮은 결과를 보였다. 또한, NB 처리구에서는 control 처리구(0.16%)에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 반면 OF 처리구는 control 처리구와 통계적 유의차가 나타나지 않았다. OF 처리구와 NB 처리구의 T-N 함량은 control 처리구(0.05%)에 비해 각각 2.40배와 2.80배 높은 0.12%와 0.14%를 나타내었으며, OF와 NB 처리구간의 통계적 유의차는 확인되지 않았다. 토양 T-C 함량을 기초로 계산한 OM 함량은 NB 처리구에서 0.54%로 가장 높아, 상추 재배 토양과 유사한 경향을 나타내었으며, 이는 바이오차의 높은 T-C 함량에 기인한 것으로 판단된다(Table 2). 실험 후 토양의 T-N 함량 또한, 상추 실험 후 토양과 유사한 경향으로 control 처리구에 비해 N 투입량이 1.94배 높은 OF와 NB 처리구에서 상승폭이 크게 나타났다. 케일을 재배한 토양에 투입된 N 대비 토양 T-N 함량 증가 효율은 control 처리구보다 OF와 NB 처리구에서 각각 1.72배와 2.06배 높았으며, 양분 흡착 바이오차 처리구의 N 흡수 효율이 가장 높았다.

케일 재배 후 토양의 Avail. N 함량은 NB 처리구에서 88.98 mg·kg⁻¹으로 가장 높았으며, control 처리구에서 34.58 mg·kg⁻¹으로 가장 낮은 결과를 나타내었다. 또한, Avail. P 함량도 NB 처리구에서 107.53 mg·kg⁻¹으로 가장 높았으며, control 처리구에서 54.19 mg·kg⁻¹으로 가장 낮았다. OF 처리구의 Avail. N 및 Avail. P 함량은 각각 70.31 mg·kg⁻¹과 55.98 mg·kg⁻¹이었으며, 이는 NB 처리구와 비교하였을 때, 각각 1.27배와 1.88배 낮게 나타났다. 케일 시험 후 토양의 Avail. N 및 Avail. P 함량은 상추 재배 후 토양과 유사한 경향을 나타내었으며, 양분 코팅 바이오차의 높은 질소 함량 및 양분 보유능과 pH 상승으로 인한 인의 가용성이 증가한 것으로 판단된다(Table 2).

실험 후 토양의 교환성 Ca²⁺, K⁺, 그리고 Mg²⁺ 함량은 NB 처리구에서 각각 7.41, 0.26, 3.20 cmol_c·kg⁻¹으로 가장 높게 나타난 반면, 교환성 Na⁺ 함량은 OF 처리구에서 0.20 cmol_c·kg⁻¹으로 가장 높았다. 또한, NB 처리구의 교환성 Ca²⁺ 및 K⁺, Mg²⁺ 함량은 OF 처리구(7.39, 0.25, 3.18 cmol_c·kg⁻¹)와 통계적 유의차가 확인되지 않았으나, OF 처리구의 교환성 Na⁺ 함량은 control 처리구(0.15 cmol_c·kg⁻¹)와 NB 처리구(0.16 cmol_c·kg⁻¹)에 비해 유의적으로 높았다. 케일 재배 토양의 교환성 양이온 손실은 상추 재배 토양과 유사한 경향을 나타냈으나, OF 처리구에서 교환성 Na⁺ 함량이 유의하게 높았다. 이와 유사한 결과를 보고한 선행연구에서는 유기질비료의 높은 Na 함량에 기인한 것으로 보고하였다(Plaza et al., 2016; Sasmita et al., 2017; Wang et al., 2022).

Plant growth

Table 4는 상추와 케일의 생육 특성을 분석한 결과를 나타내었다. 상추의 생체중은 OF 처리구(142.66 g·plant⁻¹ FW, fresh weight)와 NB 처리구(146.67 g·plant⁻¹ FW)에서 control 처리구의 116.27 g·plant⁻¹ FW에 비해 높은 결과를 나타내었다. 상추의 수분함량은 처리구 별로 각각 90.82% (control 처리구), 92.02% (OF 처리구), 92.05% (NB 처리구)로 수치적 차이는 존재하였으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 상추의 엽장과 엽폭은 control 처리구(leaf length, 18.29 cm; leaf width, 11.70 cm), OF 처리구(leaf length, 19.60 cm; leaf width, 12.62 cm), NB 처리구(leaf length, 22.01 cm; leaf width, 13.03 cm)의 순서로 높게 나타났다. 처리구 별 길이가 1 cm 이상인 엽의 수량을 조사한 결과, 엽장과 엽폭을 분석한 결과와 유사하게 NB 처리구에서 38.00개로 가장 높았으며, control 처리구와 OF 처리구는 각각 31.00개와 35.67개를 나타내었다. 하지만, control 처리구를 제외한 처리구에서 통계적 유의차는 확인되지 않았다. 상추의 엽록소 함량은 OF 처리구(27.54 SPAD value)에서 가장 높았으나, 모든 처리구에서 통계적 유의차는 나타나지 않았다.

케일의 생육 특성 중 생체중은 NB 처리구(93.54 g·plant⁻¹ FW)에서 가장 높았고, control 처리구(60.62 g·plant⁻¹ FW)

Table 4. Growth characteristics of leafy vegetables in different treatments.

Crop	Treatments	Fresh weight (g)	Moisture (%)	Leaf			Chlorophyll content (SPAD)
				Length	Width (cm)	Counts (ea·plant ⁻¹)	
Lettuce	Control	116.27 ± 10.98b	90.82 ± 0.31a	18.29 ± 0.52c	11.70 ± 1.26b	31.00 ± 1.00b	26.51 ± 4.37a
	OF	142.66 ± 4.63a	92.02 ± 1.07a	19.60 ± 1.61b	12.62 ± 1.01ab	35.67 ± 2.52a	27.54 ± 4.34a
	NB	146.67 ± 1.13a	92.05 ± 0.82a	22.01 ± 1.35a	13.03 ± 0.84a	38.00 ± 2.00a	25.77 ± 1.84a
p-value		**	-	***	*	*	-
Kale	Control	60.62 ± 2.64b	87.55 ± 1.35a	22.78 ± 1.89b	11.31 ± 1.31b	12.67 ± 1.53a	58.98 ± 7.03a
	OF	87.04 ± 14.43a	87.50 ± 3.52a	25.48 ± 1.97a	13.09 ± 0.70a	14.00 ± 1.00a	57.73 ± 7.12a
	NB	93.54 ± 7.88a	85.85 ± 0.35a	24.60 ± 1.05a	12.63 ± 0.44a	15.00 ± 1.00a	54.40 ± 5.58a
p-value		*	-	**	**	-	-

Control, untreated unit; OF, organic fertilizer treatment; NB, nutrient-coated biochar treatment.

a - c: 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.

에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 수확한 케일의 수분함량은 control 처리구에서 87.55%로 가장 높았고, OF 처리구와 NB 처리구에서는 각각 87.50%와 85.85%로 나타났으나, 처리구 간 통계적 유의차를 보이지 않았다. 본 연구에서 유기질비료와 양분 코팅 바이오차는 케일의 엽장 및 엽폭, 엽수 증가에 기여하는 것으로 확인되었다. 특히, OF 처리구에서는 엽장과 엽폭이 각각 25.48 cm와 13.09 cm로 가장 높았으며, control 처리구(leaf length, 22.78 cm; leaf width, 11.31 cm)와 NB 처리구(leaf length, 24.60 cm; leaf width, 12.63 cm)는 그보다 낮은 결과를 나타내었다. 케일의 엽수는 NB 처리구에서 15.00개로 가장 높았으며, control 처리구와 OF 처리구는 각각 12.67개와 14.00개로 나타났다. 하지만, 엽장, 엽폭, 그리고 엽수에 대해 OF 처리구와 NB 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다. 케일의 엽록소 함량을 측정한 결과, control, OF, NB 처리구에서 각각 58.98, 57.73, 그리고 54.40 SPAD value로 control 처리구에서 가장 높게 분석되었으나, 처리구간 통계적 유의차가 나타나지 않았다.

Liu 등(2022)의 연구결과에서는 유기질비료 처리보다 양분을 코팅한 바이오차의 처리 시 작물의 생육 증진 효율이 2.5배 이상 높았다. 또한, 우드 칩 바이오차를 사용하여 근대를 재배한 선행연구에서도 정식 후 13일차에 실시한 1차 수확 시에는 유기질비료를 처리한 처리구의 엽장 및 엽폭, 생체중이 높았으나, 1차 수확 후, 10일 간격으로 수행한 2 - 5차 수확부터는 우드 칩 바이오차를 처리한 처리구에서 높은 생육 지표를 나타내었다(Rivelli and Libutti, 2022). 본 연구에서는 상추와 케일을 49일간 재배하였으며, 선행 연구의 5차 수확 결과와 비교하였을 때, 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서도 양분 코팅 바이오차가 토양 내에서 양분공급과 함께 토양의 물리성을 개선하여 상추와 케일의 생산성이 증가한 것으로 판단하였다. 또한 Phares 등(2022)은 작물의 N, P, 그리고 K의 양분 흡수 효율은 작물 수확량과 양(+)의 상관관계를 나타낸다고 보고하였으며, 본 연구에서도 작물 내 양분 함량 분석하였을 때 NB 처리구에서 N, P, 그리고 K의 함량이 가장 높아 생육 지표가 우수한 것으로 판단된다(Table 5).

Element contents of leafy vegetables

수확한 상추와 케일의 원소 조성을 분석한 결과, 수확한 상추의 C 함량은 OF 처리구에서 39.50%로 가장 높았으며, NB 처리구에서 38.60%로 가장 낮게 나타났다(Table 5). 하지만, 이를 상추의 총 C 함량으로 환산하였을 때, OF 처리구와 NB 처리구는 각각 4.49 g과 4.50 g으로 나타났으며, control 처리구는 4.18 g으로 비교적 낮은 결과값을 보였다. 상추의 C 함량은 통계적 유의차가 확인되지 않았지만, 실제 총 C 함량으로 환산하였을 때, OF 및 NB 처리구는 control 처리구에 비해 1.24배 높게 나타났다. 상추 내 N 함량은 NB 처리구에서 2.19%로 가장 높은 값을 보였으며, OF 처리구(1.95%)와 control 처리구(1.18%)에 비해 각각 1.12배와 1.86배 높은 수준이었다. 상추의 P 함량과 K 함

Table 5. Constituent elements content of leafy vegetables.

Crops	Treatments	C N P K			
		(%)			
Lettuce	Control	39.13 ± 0.75a	1.18 ± 0.00c	0.83 ± 0.00c	2.79 ± 0.03b
	OF	39.50 ± 0.95a	1.95 ± 0.17b	1.15 ± 0.00b	2.81 ± 0.04b
	NB	38.60 ± 0.53a	2.19 ± 0.01a	2.44 ± 0.03a	3.91 ± 0.07a
p-value		-	***	***	***
Kale	Control	40.07 ± 0.45a	1.30 ± 0.01b	1.07 ± 0.01c	2.41 ± 0.04b
	OF	40.20 ± 0.26a	1.63 ± 0.20a	1.44 ± 0.01b	2.65 ± 0.08a
	NB	40.13 ± 0.06a	1.75 ± 0.08a	1.73 ± 0.01a	2.72 ± 0.01a
p-value		*	**	***	***

Control, untreated unit; OF, organic fertilizer treatment; NB, nutrient-coated biochar treatment.

a - c: 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.

량도 양분 코팅 바이오차(NB)를 투입하였을 때, 각각 2.44%와 3.91%로 가장 높게 나타났으며, control 처리구에서 각각 0.83%와 2.88%로 가장 낮았다. 반면, OF 처리구의 P 함량은 control 처리구에 비해 1.39배 높은 1.15%로, P 함량의 증진 효율은 확인되었으나, NB 처리구에 비해 2.12배 낮은 함량을 나타내었다. OF 처리구의 K 함량은 2.81%로 NB 처리구와 비교하여 1.39배 낮았고, control 처리구와 통계적 유의차는 나타내지 않았다.

케일의 C 함량은 control 처리구, OF 처리구, NB 처리구에서 각각 40.07, 40.20, 40.13%로 통계적 유의차는 확인되지 않았으나, 총 C 함량으로 환산하였을 때에는 3.02 g (control 처리구), 4.37 g (OF 처리구), 그리고 5.31 g (NB 처리구)으로 NB 처리구에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 케일 내 N 함량은 NB 처리구에서 1.75%로 가장 높았으나, OF 처리구(1.63%)와 NB 처리구 사이의 통계적 유의차는 확인되지 않았다. P 함량의 경우, NB 처리구에서 1.73%로 가장 높았으며, control 처리구와 OF 처리구는 NB 처리구에 비해 각각 1.62배와 1.20배 낮은 1.07%와 1.44%로 나타났다. 케일 내 K 함량은 control 처리구에서 2.41%로 분석되어 OF 처리구와 NB 처리구의 2.65%와 2.72%에 비해 낮은 수치를 보였다.

수확한 엽채류 내 C 함량은 작물을 구성하는 구조적 구성 요소, 조직, 기질의 이용가능한 영양소 형태, 그리고 기타 영양소의 농도에 따라 달라지며, 작물 내 C 함량이 높을수록 우수한 생육을 나타낸다(Hossain et al., 2015). 본 연구에서 상추와 케일 내 C 함량 분석 결과는 각각 통계적 유의차를 나타내지 않았으나, C 함량 분석 결과를 바탕으로 작물 내 총 C 함량을 계산하였을 때에는 생체중을 포함한 생육 지표가 높게 조사된 NB 처리구에서 높은 총 C 함량을 나타내었다. 또한, NB 처리구에서 재배한 상추와 케일은 높은 N 함량을 나타내었는데, 이는 유기질비료에 비해 높은 T-N 함량을 나타낸 양분 코팅 바이오차 사용으로 인해 토양 내 Avail. N 함량이 증가하였고, 이에 따라 상추의 N 이용 효율이 증가한 것으로 판단된다(Table 2). 작물의 인 흡수와 토양 pH의 상관관계를 보고한 선행연구에서는 바이오차 사용에 의한 토양 pH 상승은 토양 내 P의 가용성을 증가시킬 수 있으며, 결과적으로 작물의 P 흡수 효율을 증진시킬 수 있다고 보고하였다(Glaser and Lehr, 2019). 또 다른 선행연구에서도 바이오차를 처리한 토양에서 작물의 P 흡수 효율이 개선되어 작물체 내 P 함량이 유의하게 증가되었다고 보고한 바 있다(Zhang et al., 2022). 이에 따라, 본 연구에서도 양분 코팅 바이오차 사용은 토양 pH 및 Avail. P 함량을 개선하여 상추와 케일의 P 흡수율을 증진시킨 것으로 판단하였다(Table 3). K 함량은 N 함량과 유사하게 양분 코팅 바이오차의 높은 K 함량으로 인해 토양 내 교환성 K^+ 함량이 증가하여 NB 처리구에서 상추와 케일의 K 흡수가 용이했던 것으로 판단된다. Phares 등(2022)은 토양에 처리한 바이오차는 작물의 K 이용 효율을 증진시키며, 이는 처리한 바이오차의 K 함량이 증가할수록 그 효율은 더 증가한다고 보고하였다. 또 다른 선행연구에서는 이러한 결과를 양분 코팅 바이오차의 양분 가용성과 작물의 양분 수요가 일치한 것으로 판단했다(Wen et al., 2017). 따라서, 본 연구에서 양분 코팅 바이오차의 토양 처리가 재배한 작물의 양분 이용 효율을 증대시켜, 작물체 내 양분의 축적을 비롯하여 작물의 우수한 생육 지표를 나타낸 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구는 작물 재배 중 양분을 느리게 공급하는 완효성의 특징을 가진 양분 코팅 바이오차와 유기질비료 사용이 상추와 케일의 생육 및 토양에 미치는 영향을 비교·평가하기 위해 수행되었다. 이에 따라, 무처리(control), 유기질비료(OF), 그리고 양분 코팅 바이오차(NB)를 사용한 처리구에서 상추와 케일을 49일간 온실재배하였다. 양분 코팅 바이오차의 사용은 유기질비료 처리에 비해 토양 pH를 비롯한 T-C, OM, Avail. N, 그리고 Avail. P 함량을 유의하게 증가시켰다. 또한, 토양 T-N 함량도 양분 코팅 바이오차를 처리하였을 때, 가장 높게 증가하였으나, 유기질비료 처리와 통계적 유의차는 나타내지 않았다. 양분 코팅 바이오차 투입에 따른 토양 내 Avail. P 함량 증가는 작물의 P 이용 효율을 증가시켜 상추와 케일 내 P 함량을 높게 증진시켰으며, control 처리구와 OF 처리구와 비교하였을

때에도 통계적으로 유의하게 증가하였다. 상추와 케일 내 N 함량과 K 함량도 P 함량과 유사한 결과를 나타내었다. 상추와 케일의 생육 조사 결과, 양분 코팅 바이오차 사용은 가장 높은 생체중 및 엽장, 엽폭, 엽수를 나타내었으나, 상추의 엽장을 제외한 모든 생육 지표에서 유기질비료 처리구와 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 따라서, 토양 내 양분 코팅 바이오차의 처리는 작물 재배과정 중 양분을 느리게 공급하여 작물의 양분 수요에 맞춰 작물 생육을 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라 토양 pH 및 Avail. P 함량과 같은 작물 생육에 영향을 미치는 화학적 특성을 개선하여 작물 재배에 유리한 환경을 조성할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 양분 코팅 바이오차의 작물별 적정 시비량의 산정과 연용 시험에 따른 장기적인 영향 평가가 진행되지 않아, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

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, Republic of Korea (Project No. PJ017028022023).

Authors Information

Jun-Yeong Lee, <https://doi.org/0000-0001-7486-3405>

Yun-Gu Kang, <https://doi.org/0000-0001-5368-5910>

Jun-Ho Kim, <https://doi.org/0000-0001-7678-1657>

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

Yeo-Uk Yun, Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Researcher

References

- Azeem B, KuShaari K, Man ZB, Basit A, Thanh TH. 2014. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release* 181:11-21.
- Bhatt N, Buddhi D, Suthar S. 2023. Synthesizing biochar-based slow-releasing fertilizers using vermicompost leachate, cow dung, and plant weed biomass. *Journal of Environmental Management* 326:116782.
- Farrar MB, Wallace HM, Xu CY, Nguyen TTN, Tavakkoli E, Joseph S, Bai SH. 2019 Short-term effects of organo-mineral enriched biochar fertiliser on ginger yield and nutrient cycling. *Journal of Soils and Sediments* 19:668-682.
- Glaser B, Lehr VI. 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports* 9:9338.
- Hailegnaw NS, Mercl F, Pračke K, Száková J, Tlustoš P. 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.
- Hossain M, Siddique MRH, Saha S, Abdullah SMR. 2015. Allometric models for biomass, nutrients and carbon stock in *Excoecaria agallocha* of the Sundarbans, Bangladesh. *Wetlands Ecology and Management* 23:765-774.

- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Oh TK. 2021a. Adsorption characteristics of NH_4^+ by biochar derived from rice and maize residue. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 40:161-168. [in Korean]
- 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 NH_3 volatilization and soil quality. *Journal of King Saud University-Science* 34:102068.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Oh TK, Sung JK. 2021b. Evaluation of NH_3 emissions in accordance with the pH of biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:787-796. [in Korean]
- Kizito S, Luo H, Lu J, Bah H, Dong R, Wu S. 2019. Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability* 11:3211.
- 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.
- Liu M, Linna C, Ma S, Ma Q, Guo J, Wang F, Wang L. 2022. Effects of biochar with inorganic and organic fertilizers on agronomic traits and nutrient absorption of soybean and fertility and microbes in purple soil. *Frontiers in Plant Science* 13:871021.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Method of soil chemical analysis. NAAS, Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Nguyen TTN, Wallace HM, Xu CY, Xu Z, Farrar MB, Joseph S, Van Zwieten L, Bai SH. 2017. 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.
- 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.
- Plaza C, Giannetta B, Fernández JM, López-de-Sá EG, Polo A, Gascó G, Méndez A, Zaccone C. 2016. Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 225:150-159.
- RDA (Rural Development Administration). 2022. Fertilizer recommendation for crops. 5th edition. RDA, Jeonju, Korea.
- Rivelli AR, Libutti A. 2022. Effect of biochar and inorganic or organic fertilizer co-application on soil properties, plant growth and nutrient content in Swiss chard. *Agronomy* 12:2089.
- Sasmita KD, Anas I, Anwar S, Yahya S, Djajakirana G. 2017. Application of biochar and organic fertilizer on acid soil as growing medium for cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* 36:261-273.
- Sun C, Chen L, Zhai L, Liu H, Wang K, Jiao C, Shen Z. 2020. National assessment of nitrogen fertilizers fate and related environmental impacts of multiple pathways in China. *Journal of Cleaner Production* 227:123519.
- Wang S, Gao P, Zhang Q, Shi Y, Guo X, Lv Q, Wu W, Zhang X, Li M, Meng Q. 2022. Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: Effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield. *Soil Use and Management* 38:1679-1692.
- 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.
- Wen P, Wu Z, Han Y, Cravotto G, Wang J, Ye BC. 2017. Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity. *ACS Sustainable Chemical & Engineering* 5:7374-7382.
- 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.
- Zhang Y, Chen H, Xiang J, Xiong J, Wang Y, Wang Z, Zhang Y. 2022. Effect of rice-straw biochar application on the acquisition of rhizosphere phosphorus in acidified paddy soil. *Agronomy* 12:1556.