

목질계 농림부산물 바이오차의 과량 투입과 처리방법이 상추 생육 및 탄소 격리 효과에 미치는 영향

이슬린^{1,2}, 이재훈¹, 노준석¹, 박유진¹, 이정목¹, 박종환^{3**}, 서동철^{1,2*}

Effects of Lettuce Growth and Carbon Sequestration by Different Application Methods with Excessive Amount of Wood-based Agricultural and Forestry By-product Biochar

Seul-Rin Lee ^{1,2}, Jae-Hoon Lee ¹, Jun-Suk Rho ¹, Yu-Jin Park ¹, Jung-Mok Lee ¹,
Jong-Hwan Park ^{3**} and Dong-Cheol Seo ^{1,2*}

¹경상국립대학교 응용생명과학부(BK21 Four) · 농업생명과학연구원, ²경상국립대학교 환경생명화학과,
³동아대학교 생명자원산업학과

¹Division of Applied Life Science (BK21 Four) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, ²Department of Applied Life Chemistry, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, ³Department of Life Resources Industry, Dong-A University, Busan 49315, Korea

* Correspondence: dcseo@gnu.ac.kr

** Correspondence: zoqlsqkr@dau.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.24>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 251-260

Received: October 10, 2024

Revised: November 11, 2024

Accepted: November 14, 2024

Published: December 5, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Biochar is typically applied at rates of 2-4 t ha⁻¹; however, its excessive application has been limited due to potential negative impacts on crop productivity, despite its benefits for carbon sequestration. This study examined the growth characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by applying 20 t ha⁻¹, which is ten times the conventional biochar application rate, using both band-application (B-BC) and overall-application (O-BC) methods to maximize carbon sequestration while maintaining crop productivity. The results showed that lettuce yield was highest in the B-BC (15.7 t ha⁻¹), followed by the Control (14.2 t ha⁻¹), and lowest in the O-BC (7.8 t ha⁻¹). The absorption of Fe, Mn, Cu, and Zn in lettuce leaves and roots was lower in the O-BC due to its higher pH (>7.67) compared to other treatments. Greenhouse gas (GHG) reduction in both biochar treatments was 33.62 t ha⁻¹, which is ten times higher than the conventional application. Furthermore, B-BC increased yield by 10.58% and 101.67% compared to the Control and O-BC, respectively. Therefore, the band-application method is effective in enhancing carbon sequestration and improving crop productivity with excessive biochar application.

Keywords: Biochar, Carbon sequestration, Excessive biochar application, Fertilization method, Lettuce

서 론

전 세계의 농업 활동에서 배출되는 온실가스는 총 배출량의 약 10%를 차지하며, 2050 탄소 중립 달성을 위한 다양한 감축 방안들이 실행되고 있다. 농경지의 온실가스 감축을 위한 방법으로는 산림 조성, 바이오차 등 유·무기물에 의한 토양 탄소 격리 등이 있으며[1-3], 우리나라에서는 농림축산식품부가 농민들에게 논 중간 물떼기와 바이오차 투입 등을 장려하고 있다.

바이오차란 바이오매스를 무산소 조건에서 열분해한 것으로 가축분뇨 등 폐기물의 재활용으로도 사용되고 있으며, 토양의 비옥도 향상, 탄소 격리 및 온실가스 배출 감소 등 다양한 효과를 가지고 있다[3-5]. 2024년 4월, 농촌진흥청은 농림부산물 및 가축분뇨로 제조한 바이오차를 온실가스 감축에 적극 활용하기 위하여 비료 공정규격을 설정하였다. 현재 농촌진흥청에서 “바이오차의 농작물 맞춤형 표준사용기준 설정 및 현장실증연구”가 진행 중이며, 보편적으로 적용된 바이오차 처리량은 2~4 t ha⁻¹로 보고되고 있다[6,7].

농경지의 온실가스 감축을 위해서는 바이오차의 투입량을 증가시켜 탄소 격리량을 최대화할 필요가 있지만 바이오차를 과량 처리할 경우 작물의 생육 저해 및 증진 효과들이 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다. 바이오차 과량 처리에 의한 대표적인 생육 저해 효과로, Kang et al. (2017) [8]이 고온 옥수수 바이오차 5~20 t ha⁻¹를 사용하여 옥수수를 재배했을 때 5 t ha⁻¹에서 옥수수 생육이 가장 왕성하였고 바이오차 처리량이 증가할수록 옥수수의 생중량이 감소했다고 보고하였다. Oh et al. (2017) [9]의 연구 결과에 따르면, 목본류 바이오차를 0~90 t ha⁻¹ 사용하였을 때, 54 t ha⁻¹ 이상에서 배추의 생육이 저해되었고 바이오차에 의한 토양의 pH 증가를 그 원인으로 제시하였다[9]. 이에 반해, 바이오차의 과량 처리에 의한 생육 증진 효과로 Jeffery et al. (2011) [10]이 바이오차와 작물 생산성의 관계를 평가하기 위하여 1,483개의 연구를 메타 분석한 결과, 100 t ha⁻¹의 바이오차 사용이 39%까지 작물 생산성을 증가시켰다고 보고하였다.

종합적으로 볼 때, 바이오차의 과량 처리는 탄소 격리 효과가 있음에도 작물 생산성을 저해시킬 수도 있다는 이유로 시행되지 못하고 있어 바이오차를 과량 처리하면서 작물 생산성을 유지시킬 수 있는 방법을 확립할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 탄소 격리량 증대를 위하여 바이오차의 과량 처리 조건에서 작물의 생산성을 유지시킬 수 있는 방법을 규명하기 위하여 고온 목재 바이오차를 관행 대비 10배 많은 20 t ha⁻¹를 토양에 골처리와 전면처리로 구분하여 투입한 후 상추 생육 시험을 통해 상추 생산성과 탄소 격리량을 비교하였다. 궁극적으로, 본 연구를 통해 바이오차의 과량 처리에 의한 작물 생산성과 탄소 격리량을 동시에 만족시킬 수 있는 처리 방법 개발의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

공시재료

바이오차는 목재 펠릿을 650°C에서 열분해하여 생산된 고온 농림부산물 바이오차를 사용하였으며, 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 시험 작물은 적상추(*Lactuca sativa* L.)를 사용하였다. 재배 전 공시토양의 이화학적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같다.

실험 방법

바이오차 과량 처리에 의한 상추 재배 시험은 경남 사천시에 위치한 (35°06'32.3"N 128°07'09.5"E) 비닐하우스에서 수행하였다. 골처리(B-BC)와 전면처리(O-BC)로 구분된 바이오차 처리구는 각각 가로 1 m, 세로 1 m로 총 면적을 1 m²로 하였고, 처리구 배치는 완전임의배치법으로 3반복하였다.

Table 1. Physicochemical properties of the wood-based biochar used in this study

pH 1:10	EC ^{b)} dS m ⁻¹	C	N	T-P ^{c)}	K	Ca	Mg	Na	SSA ^{d)}
		----- % -----				mg kg ⁻¹ -----			m ² g ⁻¹
9.0±0.07 ^{a)}	25.1±0.76	63.4±2.06	0.54±0.01	2,394±156	125±12	19,466±470	4,116±1	2,181±63	301.5

^{a)}Data are presented as mean values±standard deviation, ^{b)}EC: Electrical conductivity, ^{c)}T-P: Total phosphorus, ^{d)}SSA: Specific surface area.

Table 2. Physicochemical properties of the soil used in this study

pH 1:5	EC ^{b)} dS m ⁻¹	O.M. ^{c)} g kg ⁻¹	T-N ^{d)} %	T-P ^{e)}	K	Ca	Mg
----- mg kg ⁻¹ -----							
7.1±0.22 ^{a)}	1.8±0.08	13±0.1	0.025±0.018	46.1±1.1	10,465±765	2,874±272	2,674±562

^{a)}Data are presented as mean values±standard deviation, ^{b)}EC: Electrical conductivity, ^{c)}O.M.: Organic matter, ^{d)}T-N: Total nitrogen, ^{e)}T-P: Total phosphorus.

모든 처리구는 시험토양의 상추시설재배 조건의 검정시비량을 기준으로 N-P-K (t ha⁻¹)는 밀거름으로 0.035-0.03-0.018, 옷거름으로 0.035-0-0.018되게 시비하였고 모든 처리구에 소석회 3 t ha⁻¹ 사용한 토양에 바이오차를 과량으로 처리하였다. 본 시험은 토양검정이 완료된 정상적인 밭 토양에서 바이오차의 과량 투입과 처리방법에 대한 영향을 평가한 연구로 바이오차 투입 이전에 검정시비에 따라 모든 처리구에 석회가 투입되었으며, 연구 결과에서 석회의 영향은 배제되었다.

각 처리구는 바이오차를 기존 관행 처리 대비 10배 많은 20 t ha⁻¹를 골처리와 전면처리의 2가지 방법으로 토양에 처리하였다. 골처리구는 이랑의 가운데 두 줄을 약 10 cm 깊이, 20 cm 너비로 골을 내어 바이오차를 첨가 후 토양으로 살짝 덮어주었고, 전면처리구는 토양 표면에 뿌린 후 표층에서 15 cm까지 골고루 섞어주었다.

상추의 재식 간격은 가로 40 cm × 세로 30 cm로 처리구당 상추 모종을 3 × 4개씩 이식하고 34일간 재배하였다.

상추의 생육조사는 농촌진흥청의 농작물 생육조사 규정에 따라 엽장, 엽폭, 엽수를 1주 간격으로 측정하였고, 34일간 재배 후 수확한 상추의 엽장, 엽폭, 엽수, 생중량, 건중량, T-N, T-P, K, Ca, Mg 및 Fe 등 무기성분의 총합량을 조사하였다.

바이오차의 과량 처리에 의한 온실가스 감축량은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에 제시된 아래의 공식으로 계산하였다[11].

$$B_y = \sum_{p=1}^n (BC_{TOT_p} \times F_{C_p} \times F_{perp_p}) \times 3.664 \quad (\text{Eq.1})$$

B_y : y년도 바이오차 사용에 따른 온실가스 흡수량(tCO₂-eq/년)

BC_{TOT_p} : 생산 유형별 바이오차의 사용량(건중량 기준)(ton/년)

F_{C_p} : 생산 유형별 바이오차의 유기탄소 함량(건중량 기준)(%)

F_{perp_p} : 생산 유형별 살포된 바이오차의 100년 후 잔여 탄소 비율(%)

p : 바이오차의 생산 유형

분석 방법

토양의 화학성 분석은 농촌진흥청 토양화학분석법에 따라 분석하였다(RDA, 2010) [12]. 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 30분 동안 진탕하여 pH meter (Orion 2 Star, Thermo scientific Singapore)와 EC meter (COM-100, HH Digital, USA)를 사용하여 측정하였다. 토양의 유기물 함량 분석은 Tyurine법을 적용하였고, T-N 및 무기성분 함량을 분석하기 위해서 건조된 시료를 습식 분해하였다. T-N 함량 분석은 Kjeldahl법, 중금속과 무기성분의 총합량은 습식분해 후 ICP-OES (iCAP Pro × Duo, Thermo Fisher Scientific, USA)로 분석하였다.

수확한 상추는 지상부와 지하부로 분리한 후 엽장, 엽폭, 엽수, 뿌리길이, 생중량 및 건중량을 측정하였다. 상추의 수량은 재배 후 34일째의 생중량으로 산출하였다. 상추의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Fe 등의 무기성분 총합량은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법으로 분석하였다(RDA, 2000) [13].

통계처리

각 처리조건별 무기성분 함량 변화의 통계 분석을 위해 SPSS (IBM SPSS Statistics 27) 프로그램을 사용하여 평균 및 표준편차를 구하였고, ANOVA (analysis of variance) 및 Duncan's Multiple Range Test를 통해 5% 이내 수준($p < 0.05$)에서 분석하였다.

결과 및 고찰

바이오차의 과량 처리에 따른 상추의 생육 특성

바이오차의 과량 처리 방법에 따른 상추의 엽장, 엽폭 및 엽수에 대한 생육특성 변화는 Table 3에서 보는 바와 같다. 바이오차 처리구의 상추 초/중/후기 생육은 엽장과 엽폭이 과량 처리 방법에 따라 큰 차이 없이 비슷하였고, 엽수는 엽장과 엽폭과 달리 생육 후기에 전면처리에서 다소 감소되는 경향이였다.

바이오차의 과량 처리 방법에 따른 상추의 수확 후 건중량(g plant^{-1})은 지상부의 경우 골처리구(8.1 g) > 대조구(7.7 g) >> 전면처리구(5.0 g) 순으로 골처리구와 대조구가 전면처리구에 비해 많았으며, 지하부의 경우 골처리구(1.18 g) > 대조구(0.97 g) > 전면처리구(0.75 g) 순으로 많았으며, 골처리로 바이오차를 과량 처리한 경우가 가장 좋았다. 상추의 지상부와 지하부를 합친 건중량은 골처리구(9.28 g) > 대조구(8.67 g) >> 전면처리구(5.75 g) 순으로 골처리구는 대조구에 비해 7.04%, 전면처리구에 비해 38.04% 많았다(Fig. 1A). Fig. 1B에서 보는 바와 같이 생중량도 건중량(수분 함량 약 89~94%)과 유사한 경향을 보였다. 건중량의 S(줄기)/R(뿌리) 비율을 보면, 바이오차 처리구 모두의 S/R비는 6.66~6.86 정도였고 대조구는 7.94였다.

전면처리구에 의한 상추 지상부의 생육저해 효과는 바이오차가 작물 근권 토양의 pH를 증가시켜 양분 이용성을 감소시켰기 때문으로 판단되며, Oh et al. (2017) [9]의 연구에서도 목분류 바이오차를 54 t ha^{-1} 이상 과량 처리하였을 때 토양의 pH 증가에 의해 작물의 생육이 저해되었다고 보고하였다.

바이오차의 과량 처리 방법에 따른 상추의 수확 후 초장의 경우 골처리구와 대조구는 유사한 경향이였으나, 전면처리구는 다른 처리구들에 비해 11.5~17.0% 정도 짧았고, 지하부의 경우 바이오차 처리구 모두에서 대조구보다 16.2~20.5% 정도 길었다. S(줄기)/R(뿌리) 비율을 보면, 바이오차 처리구 모두의 S/R비는 0.90-0.96정도로 지하부의 생육이 더 좋았고, 이에 비해 대조구는 1.29로 지하부보다 지상부의 생육이 좋았다. 지상부와 지하부를 합친 상추의 전체 길이는 골처리구(46 cm) >> 대조구(42.5 cm) $\approx$ 전면처리구(42.2 cm) 순으로 골처리구가 다른 처리구들에 비해 월등히 길었다(Fig. 1C). 이와 같이 바이오차 처리가 지하부의 생육을 증진시키는 이유는 바이오차의 다공성 구조가 토양의 통기와 배수 기능을 향상시켜 식물의 뿌리 성장과 영양분 섭취량을 증가시킬 수 있고, 넓은 비표면적은 영양분을 흡착하여 용탈을 방지함으로써 더 오랜 기간 식물이 영양분을 공급받을 수 있게 도와준 것으로 판단된다[4,5,14,15].

상추의 수량은 골처리구(15.67 t ha^{-1}) > 대조구(14.17 t ha^{-1}) >> 전면처리구(7.77 t ha^{-1})로 건중량 및 생중량과 유사하게 골처리구가 가장 높았다(Fig. 2). 상추의 수량은 골처리구가 대조구 대비 10.58%, 전면처리구 대비 101.67% 높았다.

이와 같이 바이오차의 처리법으로 골처리가 전면처리에 비해 좋았는데, 본 연구와 일치되는 바이오차 처리법 연구는 문헌 검색을 통하여 찾지 못하였다. Tewolde et al. (2022) [16]이 토양에 유기물을 골처리와 전면처리로 나누어 사용하여 옥수수를 재배한 결과 골처리법이 보비력 향상으로 옥수수 수확량이 증가하였다고 보고하였는데 이는 본 연구 결과와 유사하였다. 하지만

Table 3. Growth status of *Lactuca sativa* L. during 34 days after transplanting under different excessive biochar treatments

Items	Treatments ^{a)}	7	17	24	34
		At days after transplanting			
Leaf length (cm)	Control	6.70±0.58 ^{b) a}	11.78±1.87ab	14.60±2.87b	18.88±1.69a
	B-BC	6.50±0.62a	13.70±1.35b	15.62±1.68b	19.07±1.38a
	O-BC	6.20±0.81a	10.42±1.01a	10.54±1.84a	17.87±1.66a
Leaf width (cm)	Control	3.82±0.22a	7.40±1.12b	9.18±2.13b	12.22±1.07a
	B-BC	3.78±0.18a	8.10±1.19b	10.86±1.96b	13.00±1.00a
	O-BC	3.50±0.31a	5.74±0.46a	6.64±1.04a	11.78±1.06a
Leaf No. (ea)	Control	5.60±0.55a	10.20±0.84a	13.20±1.92a	27.00±2.53b
	B-BC	6.40±0.89ab	10.60±1.52a	14.20±2.49a	28.33±1.03b
	O-BC	6.60±0.55b	9.20±0.84a	12.00±1.00a	21.33±3.27a

^{a)}B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall-application method, ^{b)}Data are presented as mean values± standard deviation, ^{c)}The same letters are not significantly different (Duncan test, $p<0.05$).

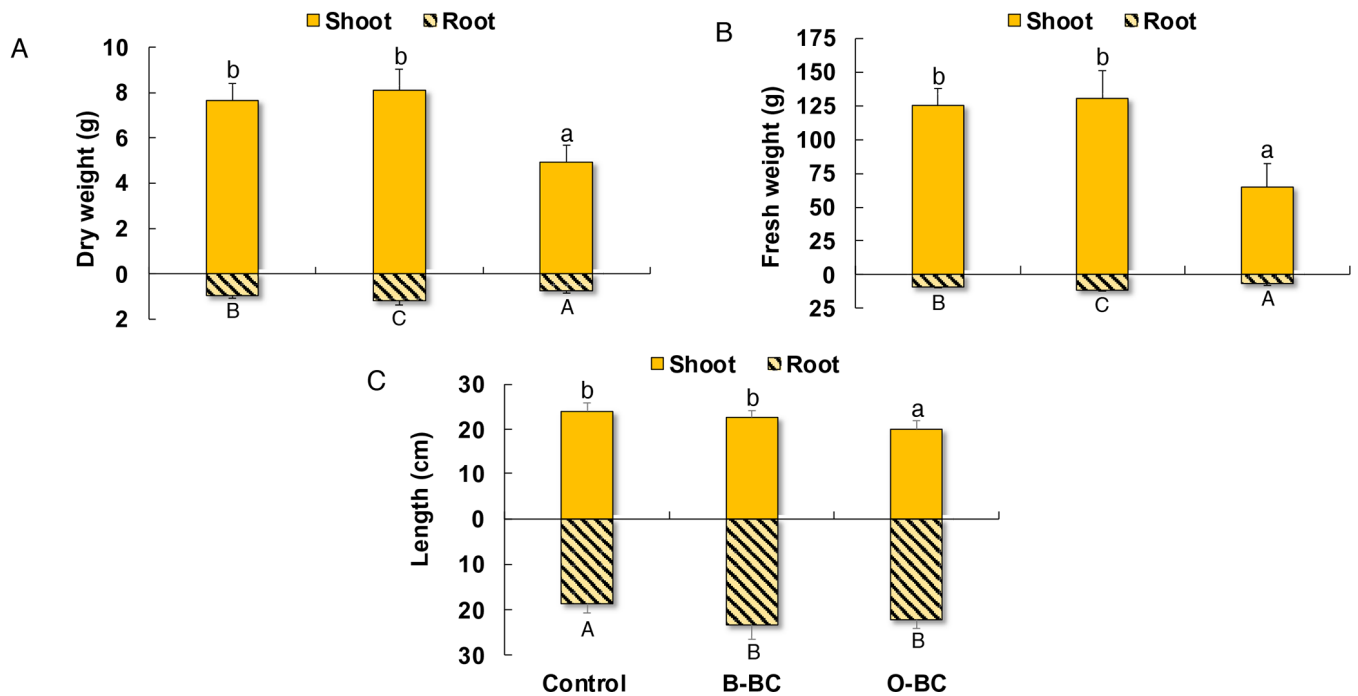


Fig. 1. Growth status of *Lactuca sativa* L. after harvesting under different excessive biochar treatments.

Data are presented as mean values with standard deviation. One-way ANOVA: Post Hoc-Duncan's multiple range test ($p=0.05$). Lowercase means the difference of value in shoot of the crop. Uppercase means the difference of value in root of the crop. Averages sharing the same letter are not statistically significantly different. B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall- application method.

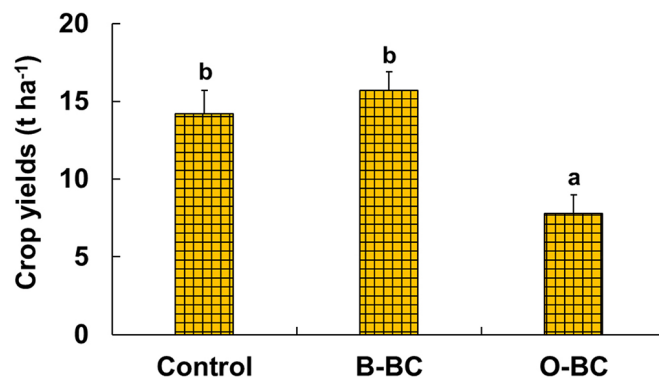


Fig. 2. Yields of *L. sativa* L. after harvesting under different excessive biochar treatments.

Data are presented as mean values with standard deviation. One-way ANOVA: Post Hoc-Duncan's multiple range test ($p=0.05$). Lowercase means the difference in value. Averages sharing the same letter are not statistically significantly different. B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall- application method.

이들의 결과가 바이오차를 직접 투입한 연구가 아니라 직접적인 비교는 힘들 것으로 판단된다. Singh et al. (2022) [14]이 보고한 바이오차의 농경지 적용에 대한 메타분석 결과에 의하면, 가축분, 목분류, 초분류 및 리그노셀룰로스계 바이오차를 처리량에 따라 낮은 그룹(1~39 t ha⁻¹), 중간 그룹(40~80 t ha⁻¹) 및 높은 그룹(> 80 t ha⁻¹)으로 사용하였을 때, 리그노셀룰로스계와 초분류 바이오차에서는 작물 수확량이 각각 35% 및 53%로 증가한 반면 목분류 바이오차의 수확량에는 17% 증가로 유의미한 영향이 없었으며, 중간 그룹의 바이오차 사용량에서 가장 높은 작물 생산성을 나타냈다고 보고하였다. 일반적으로 토양 및 바이오차의 특성(원료, 열분해 온도 및 시간, 입자 크기, 탄소 함량 등)에 따라 작물 생산성에 상이한 결과를 나타낼 것이라 판단되며, 비료와 함께 농경지에 적용된 적절한 투입량의 바이오차는 작물 생산성을 증가시켰다고 알려져 있다. 과량의 바이오차 적용이 작물의

생산성을 감소시키는 이유는, 토양의 pH 증가, 양분 가용화를 감소, EC 증가에 따른 염스트레스 제공 등에 의하여 작물의 영양분 섭취를 방해하는 것으로 보인다[10,14,15].

바이오차의 과량 처리에 따른 상추의 양분 흡수 특성

바이오차의 과량 처리 방법에 따른 상추의 양분 함량과 흡수량 결과는 Fig. 3과 같다. 상추의 지상부 T-N 함량은 처리 방법에 상관없이 바이오차 처리구가 대조구에 비해 약간 더 높았고, 지하부는 전면처리구가 다른 처리구들에 비해 약간 높았다(Fig. 3A). 상추의 T-N 흡수량은 건중량을 고려한 결과 지상부의 경우 골처리구가 $228.5 \text{ mg plant}^{-1}$ 로 대조구와 전면처리구에 비해 각각 3.36 및 63.59% 높았고, 지하부의 경우 평균 $6.1 \sim 10.5 \text{ mg plant}^{-1}$ 정도였다(Fig. 3B).

상추의 T-P 함량은 T-N과는 달리 처리구에 상관없이 지상부의 경우 0.35~0.39% 정도였고, 지하부의 경우 0.24~0.25%였다. 상추의 T-P 흡수량은 지상부의 경우 골처리구 > 대조구 >> 전면처리구 순으로 T-N의 흡수량과 유사한 경향이였다. 이는 Table 2와 6에서 보는 바와 같이 토양의 pH 증가가 원인으로 판단되며, 유사한 결과로 Vélez-Bermúdez와 Schmidt (2023) [17]에 의하면, 토양의 pH가 7.5 이상일 때 인산은 칼슘과 결합하여 불용성 화합물을 형성하기 때문에 가용성이 감소하여 이로 인해 농작물의

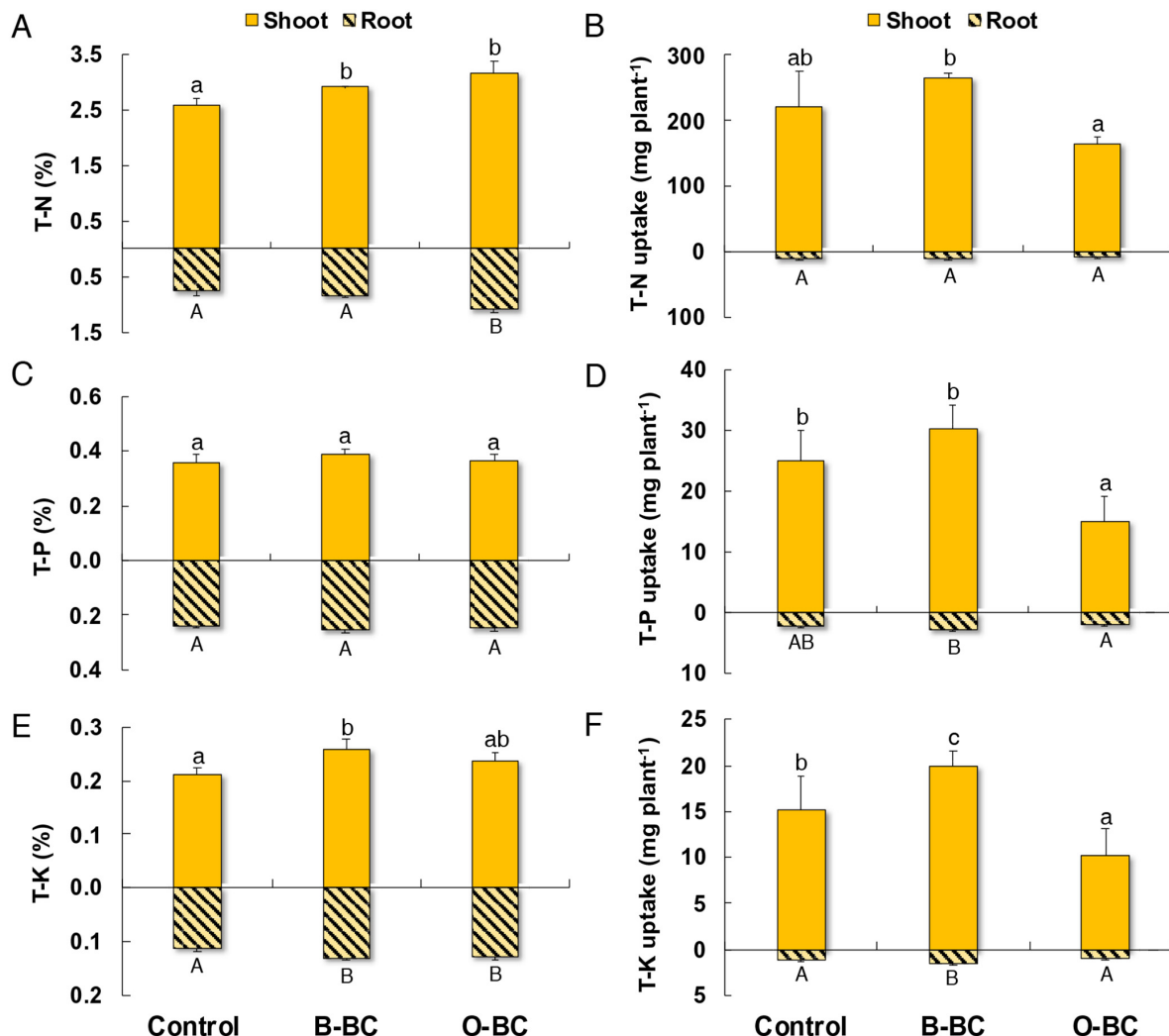


Fig. 3. Total nitrogen, total phosphorus, and potassium content and uptake of *L. sativa* L. after harvesting under different excessive biochar treatments.

Data are presented as mean values with standard deviation. One-way ANOVA: Post Hoc - Duncan's multiple range test ($p=0.05$). Lowercase means the difference of value in shoot of the crop. Uppercase means the difference of value in root of the crop. Averages sharing the same letter are not statistically significantly different. T-N, T-P, and T-K means total nitrogen, total phosphorus, total potassium, respectively. B-BC: Biochar 20 t ha^{-1} with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha^{-1} with overall-application method.

인 흡수가 저해된다고 하였다. 본 연구와 일치되는 바이오차 토양처리 시험은 아니지만, 상추를 수경 재배하여 pH를 5.0부터 0.5씩 증가시켰을 때 약간의 pH 변화에서도 상추의 성장에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고된 바 있다[18].

상추의 K의 함량은 지상부가 0.21~0.26%였고, 지하부는 0.11~0.13% 범위로 처리구에 따라 큰 차이 없이 비슷하였다. 하지만, K의 상추 지상부 흡수량은 골처리구($19.9 \text{ mg plant}^{-1}$) > 대조구($15.2 \text{ mg plant}^{-1}$) > 전면처리구($10.2 \text{ mg plant}^{-1}$)로 골처리구의 흡수량이 가장 높았으며 전면처리구의 흡수량이 가장 낮게 나타났다(Fig. 3F).

전반적으로 골처리구가 작물의 양분 이용성을 향상시켰으며 이는 바이오차의 보수/보비력이 작물의 양분 흡수율에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 바이오차가 작물의 영양분 이용성을 증가시키는 이유는 토양의 pH, CEC, TOC, 공극률 및 미생물 다양성 등을 증가시키면서 작물의 생장에 도움을 준 것으로 보인다[10,14,15].

상추 재배 34일 후의 상추 내 무기성분 함량과 흡수량은 Table 4, 5에 나타내었다. 상추 내 Ca, Mg, Fe 및 Cu의 지상부 및 지하부 총함량은 모든 처리구에서 큰 차이 없이 비슷하였다. 상추 내 Mn 및 Zn 함량은 지하부는 큰 차이 없었으나, 지상부의 전면처리구가 다른 처리구에 비해 약간 낮은 경향을 보였다. Fe 흡수량은 전면처리구가 지상부와 지하부 모두에서 대조구와 골처리구의 평균값에 비해 각각 37.0% 및 22.4% 낮았다. Fe는 알칼리성 조건에서 가용성이 크게 감소하여 Fe의 결핍을 초래할 수 있으며, 특히 엽록소 형성에 필수적인 Fe가 부족하면 잎이 황변 증상이 나타날 수 있는 것으로 알려져 있다[17-20]. 본 연구에서는 Fe 흡수량은 감소하였지만 잎의 황변 증상은 나타나지 않아 결핍 증상이 심하지는 않은 것으로 사료되었다. Mn 흡수량은 전면처리구가 지상부와 지하부 모두에서 대조구와 골처리구의 평균값에 비해 각각 43.3% 및 31.0% 낮았다. Tyler (2003) [21]에 의하면 Mn은 알칼리성 조건에서 가용성이 줄어드는데 Mn 결핍은 성장을 저해하고, 잎에 황변이나 반점이 생길 수 있으나 본 실험에서는 상추잎의 황변이나 반점이 생기지는 않았지만 성장은 저해되었다. Cu 흡수량은 전면처리구가 지상부와 지하부 모두에서 대조구와 골처리구의 평균값에 비해 각각 35.0% 및 28.0% 낮았다. Cu 결핍은 식물의 성장을 저해하고, 잎과 줄기에 이상이 발생할 수 있다[21]. 따라서 Cu 결핍이 상추의 생육을 저해시킨 것으로 보인다. Zn 흡수량은 전면처리구가 지상부와 지하부 모두에서 대조구와 골처리구의 평균값에 비해 각각 52.9% 및 32.0% 낮았다. Zn 역시 가용성이 감소하는데, Zn의 결핍은 잎의

Table 4. Mineral content of *L. sativa* L. after harvesting under different excessive biochar treatments

Parts	Treatments ^{a)}	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
		mg kg ⁻¹					
Shoot	Control	14,730±887 ^{b)a)}	4,242±403a	345±107a	462±27.7b	5.2±1.7ab	193±88b
	B-BC	14,767±811a	4,663±373a	341±105a	461±70.3b	4.6±1.5a	136±78a
	O-BC	17,025±1,672b	4,465±551a	344±90a	416±58.1a	5.7±1.3b	123±82a
Root	Control	4,675±326a	2,149±424a	348±79a	86.4±11.0a	16.8±9.7a	63.4±4.4a
	B-BC	4,747±368a	2,144±344a	345±69a	87.7±27.5a	16.0±5.4a	64.7±30.6b
	O-BC	4,807±292a	2,592±386b	385±41b	85.5±3.0a	16.9±4.6a	62.5±16.1a

^{a)}B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall-application method, ^{b)}Data are presented as mean values± standard deviation, ^{c)}The same letters are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).

Table 5. Mineral uptake of *L. sativa* L. after harvesting under different excessive biochar treatments

Parts	Treatments ^{a)}	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
		mg plant ⁻¹					
Shoot	Control	113.0±6.8 ^{b)b)}	32.6±3.09b	2.6±2.2b	3.5±0.21b	0.04±0.01a	1.48±0.67b
	B-BC	119.6±6.8b	37.8±3.02b	2.8±0.85b	3.7±0.57b	0.04±0.01a	1.10±0.63ab
	O-BC	84.3±8.3a	22.1±2.73a	1.7±0.45a	2.1±0.29a	0.03±0.01a	0.61±0.45a
Root	Control	4.52±0.32ab	2.08±0.41a	0.34±0.08ab	0.08±0.01ab	0.02±0.01a	0.06±0.00a
	B-BC	5.62±0.44b	2.54±0.41b	0.41±0.08b	0.10±0.03b	0.02±0.01a	0.08±0.04b
	O-BC	3.72±0.25a	1.94±0.29a	0.29±0.03a	0.06±0.00a	0.01±0.00a	0.05±0.01a

^{a)}B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall-application method, ^{b)}Data are presented as mean values± standard deviation, ^{c)}The same letters are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).

성장을 저해하고 작은 잎이 형성되며 잎의 변색이 나타날 수 있다[22]. 전면처리구에서 Zn의 낮은 흡수량이 상추의 잎 형성에 영향을 미쳐 작은 잎이 형성된 것으로 관찰되었다.

종합적으로, 상추 내 Fe, Mn, Cu 및 Zn의 흡수량은 지상부 및 지하부 모두에서 전면처리구는 다른 처리구에 비해 낮았다. 상추 지상부의 무기성분별 흡수량 감소율은 전면처리구가 대조구와 골처리구의 평균값에 비해 Fe가 37.0%, Mn이 43.3%, Cu가 35.0% 및 Zn이 52.9%로 Mn과 Zn이 가장 컸다.

상추 지하부의 무기성분별 흡수량은 전면처리구가 대조구와 골처리구 평균값 대비 22.4~32.0% 정도로 낮았다. 이는 상추재배 지 토양의 pH가 전면처리구(7.67) > 골처리구(7.15) ≒ 대조구(7.14) 순으로 바이오차가 전면 처리된 토양에서 가장 높게 나타났기 때문으로 판단된다(Table 6).

토양의 이화학적 특성

상추 수확 후 토양의 이화학적 특성은 Table 6에 나타내었다. 초기 토양의 pH는 7.10으로 중성이었으며, 대조구는 상추 재배 34일 후에는 큰 차이 없이 비슷하였다. 하지만 바이오차 처리구에서는 바이오차의 pH가 9.0으로 높아 전반적으로 토양의 pH를 높이는 경향을 보였다. 골처리구는 작물 근권에 직접적인 영향을 주지 않아 토양 pH의 증가폭이 크지 않았다. 전면처리구는 바이오차의 기본 처리량인 2 t ha⁻¹의 [6,7] 10배 많은 양인 20 t ha⁻¹이 처리되어 토양의 pH를 7.67까지 증가시킨 것으로 판단된다. 바이오차가 과량 처리된 토양의 pH의 증가 폭이 크지 않은 것은 토양의 완충 능력 때문으로 판단된다[10,14]. EC는 바이오차 처리구가 대조구에 비해 약간 증가하였으며, pH와 유사한 경향으로 전면처리구에서 증가 폭이 가장 컸다. 상추 수확 후의 유기물, T-N, T-P, K, Ca 및 Mg 총함량은 전면처리구 > 골처리구 ≒ 대조구 순이었다.

Table 6. Physicochemical properties of the soil after harvesting under different excessive biochar treatments

Treatments ^{a)}	pH	EC ^{d)}	O.M. ^{e)}	T-N ^{f)}	T-P ^{g)}	K	Ca	Mg
	1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹			
Control	7.14±0.05 ^{b)a)}	1.91±0.1a	18.6±3.7a	0.67±0.1a	0.05±0.015a	9,745±284a	3,475±467a	2,181±229a
B-BC	7.15±0.09a	2.01±0.05a	24.3±4.4ab	0.68±0.13a	0.05±0.0001a	9,489±326a	4,078±1,353a	2,314±329a
O-BC	7.67±0.12b	3.17±0.2b	31.6±1.5b	0.84±0.2b	0.06±0.002a	9,966±264a	5,292±788b	2,628±224a

^{a)}B-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with band-application method, O-BC: Biochar 20 t ha⁻¹ with overall-application method, ^{b)}Data are presented as mean values ±standard deviation, ^{c)}The same letters are not significantly different (Duncan test, *p*<0.05), ^{d)}EC: Electrical conductivity, ^{e)}O.M.: Organic matter, ^{f)}T-N: Total nitrogen, ^{g)}T-P: Total phosphorus.

탄소 격리 효과

본 실험에 사용된 농림부산물 바이오차의 온실가스 감축량은 IPCC 가이드라인에 따라 산정되었으며[11], 식에 C 함량(63.4%), 수분 함량(18.7%), (바이오차의 100년 후 잔여 탄소 비율)은 고온바이오차(650°C)로 인정되어 0.89를 대입하여 1.681톤 CO₂로 산정되었다. 이 결과를 이용하여 농림부산물 바이오차를 농경지에 1톤 투입할 경우 온실가스 감축량은 1.681톤 CO₂였다.

상기 결과를 통한 바이오차 처리 방법별 온실가스 감축량은 바이오차 처리량이 20 t ha⁻¹이므로 33.62 t ha⁻¹였다. 현재 바이오차 관행 처리량인 2 t ha⁻¹의 경우 온실가스 감축량은 3.36 t ha⁻¹ [23]로 본 실험의 과량 처리법에 비해 10배 적은 양이었다. 따라서 본 실험과 같이 바이오차를 과량 처리하는 것은 탄소 중립 효과를 극대화할 수 있으나, 전면처리 방법의 경우 수확량이 감소될 수 있어 골처리법을 활용하여 작물 생산성을 유지하면서 탄소 중립 효과를 극대화할 필요가 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 바이오차를 과량 투입 시 처리 방법별 상추 생육 특성을 조사한 것으로 다른 종류의 작물이나 바이오차를 적용 시 한계가 있을 수 있으므로 추후 타 작물에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: D.-C.S. and S.-R.L. designed the research; S.-R.L., J.-H.L., J.-S.R., Y.-J.P., and J.-M.L. collected the data and performed the analysis, S.-R.L. wrote the first manuscript. D.-C.S. and J.-H.P. supervised and revised the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was supported by the Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through the Livestock Industrialization Technology Development Program (121034-03) and Technology Commercialization Support Program (821007-03), funded by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.24>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Dong-Cheol Seo.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

- Guo C, Liu X, He X (2022) A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application. *Science of the Total Environment*, 831, 154982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154982>.
- Kamyab H, SaberiKamarpashti M, Hashim H, Yusuf M, (2024) Carbon dynamics in agricultural greenhouse gas emissions and removals: A comprehensive review. *Carbon Lett*, 34, 265–289. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00647-4>.
- Dong X, Singh BP, Li G, Lin Q, Zhao X (2019) Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application. *Soil and Tillage Research*, 186, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.013>.
- Elkhilfi Z, Iftikhar J, Sarraf M, Ali B, Saleem MH, Ibranshahib I, Bispo MD, Meili L, Ercisli S et al. (2023) Potential role of biochar on capturing soil nutrients, carbon sequestration and managing environmental challenges: A review. *Sustainability*, 15(3), 2527. <https://doi.org/10.3390/su15032527>.
- Zahra H, Payam G, Mohammad RK, Bijan Y (2023) Biomass-derived biochar and its application in agriculture. *Fuel*, 341, 127701. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127701>.
- Kim SS, Rho JS, Lee JH, Choi AY, Lee SR, Park YJ, Park JH, Lee YH, Seo DC (2023) Salt removal and agricultural application of food waste-biochar. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 42(2), 159–167. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2023.42.2.19>.
- Jeong TU, Lee JH, Rho JS, Lee DY, Lee JM, Park JH, Seo DC (2023) Application effect of rendering livestock carcass-based carbonized material in Chinese cabbage cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 42(3), 177–183. <https://doi.org/10.5338/kjea.2023.42.3.21>.
- Kang SW, Kim SH, Park JH, Seo DC, Cho JS (2017) Selection of optimal application condition of corn waste biochar for improvement of corn growth and soil fertility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 50(5), 452–461. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.5.452>.
- 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. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170039>.
- Jeffery S, Verheijen FGA, van der Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan.
- Rural Development Administration (RDA) (2010) Soil Chemical Analysis, National Institute of Agricultural Sciences, Korea.
- Rural Development Administration (RDA) (2000) Soil and Plant Analysis, National Institute of Agricultural Sciences, Korea.
- Singh H, Northup BK, Rice CW, Prasad PVV (2022) Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4, 8. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>.
- Ruan R, Wang Y (2024) Effects of biochar amendment on root growth and plant water status depend on maize genotypes. *Agricultural Water Management*, 293, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108688>.

16. Tewolde H, Way TR, Buehring N, Jenkins JN (2022) Fertilizer value of poultry litter applied by subsurface band vs. surface broadcast in corn production. *Journal of Plant Nutrition*, 46(9), 2044–2059. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2118133>.
17. Vélez-Bermúdez IC, Schmidt W (2023) Plant strategies to mine iron from alkaline substrates. *Plant Soil*, 483, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05746-1>.
18. Kudirka, Gediminas, Akvilė Viršilė, Rūta Sutulienė, Kristina Laužikė, Giedrė Samuolienė. (2023) Precise management of hydroponic nutrient solution pH: the effects of minor pH changes and MES buffer molarity on lettuce physiological properties. *Horticulturae*, 9(7), 837. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070837>.
19. Chutia R, Abel S, Ziegler J (2019) Iron and phosphate deficiency regulators concertedly control coumarin profiles in *Arabidopsis thaliana* roots during iron, phosphate, and combined deficiencies. *Frontiers in Plant Science*, 10, 113. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00113>.
20. Hsieh EJ, Waters BM (2016) Alkaline stress and iron deficiency regulate iron uptake and riboflavin synthesis gene expression differently in root and leaf tissue: implications for iron deficiency chlorosis. *Journal of Experimental Botany*, 67(19), 5671–5685. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw328>.
21. Tyler G (2003) Some ecophysiological and historical approaches to species richness and calcicole/calcifuge behaviour—contribution to a debate. *Folia Geobotanica*, 38(4), 419–428. <https://doi.org/10.1007/BF02803249>.
22. Álvarez-Ayuso E, Abad-Valle P (2021) Application of different alkaline materials as polluted soil amendments: A comparative assessment of their impact on trace element mobility and microbial functions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 227, 112927. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112927>.
23. Park J, Wang JJ, Seo DC (2023) Agronomic and environmental performance of bottom ash discharged from biomass-based thermal power plant. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101097. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101097>.