

농업부산물 바이오차 처리가 토양 화학성 및 배추 생육에 미치는 영향

홍수영^{1*}, 김민경¹, 김동민¹, 홍성유¹, 김희연¹, 허수정¹, 김기선¹, 김혁수²

Effects of Agricultural By-product Biochar on Soil Properties, Growth and Yield of Chinese Cabbage (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*)

Soo-Young Hong ^{1*}, Min-Gyeong Kim ¹, Dong-Min Kim ¹, Seong-Yu Hong ¹, Hee-Yeon Kim ¹,
Su-Jeong Heo ¹, Ki-Sun Kim ¹ and Hyuck-Soo Kim ²

¹강원특별자치도 농업기술원, ²강원대학교 환경융합학부

¹Agricultural Environment Research Section, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon, 24203, Korea, ²Department of Biological Environment, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

* Correspondence: hsy6520@korea.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.47>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 502-508

Received: October 14, 2025

Revised: November 3, 2025

Accepted: December 9, 2025

Published: December 19, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



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: Recent revisions to Korea's Fertilizer Process Standards (2024) have allowed a wider variety of agricultural by-products to be used as biochar feedstocks, reflecting the growing emphasis on resource recycling in agriculture. Along with this expansion, interest in the agronomic use of crop by-product-derived biochars has increased. This study aimed to characterize biochars from peach, grape, red pepper, melon, and asparagus by-products and evaluate their effects on crop growth. By-products were pyrolyzed (500°C), analyzed for C, nutrients, and heavy metals, and applied at 500 kg/10a to soil for Chinese cabbage cultivation (60 days). Carbon contents ranged 53.9~65.0%. Asparagus biochar had highest N (3.09%) and K (3.54%), melon biochar highest P (1.52%), and all heavy metals were below RDA's guideline. Red pepper biochar yielded the greatest crop performance, with fresh weight (1.74 kg) showing a 28% increase over the control (1.36 kg). Crop by-product biochars differ in nutrient composition. Red pepper biochar enhanced Chinese cabbage yield most. Guidelines are needed to optimize safe and sustainable biochar use.

Keywords: Agri-food, Carbon sequestration, Crop by-products, Soil improvement

서론

최근 기후변화에 따른 농업 생산 기반의 불안정성과 탄소중립 이행 요구가 확대되면서, 지속가능한 농업자원 활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 바이오차(biochar)는 바이오매스 원료를 열분해하여 제조한 탄소 기반 고체 물질로, 토양에 적용 시 탄소 고정, 비옥도 개선, 수분 보유력 향상, 병원균 억제 등의 효과가 보고되어 왔다[1,2]. 또한 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 바이오차를 온실가스 감축 수단으로 인정하고 있으며, 이는 저탄소 농업 실현을 위한 핵

심 기술로 주목받고 있다. 우리나라에서도 2024년 4월 「비료공정규격설정기준」 개정을 통해 바이오차의 원료 범위가 기존 목재 숲에서 농작물 잔사, 왕겨, 과수 전정지, 가축분 퇴비 등으로 확대되었으며, 제조온도 기준도 1,000°C 이상에서 350°C 이상으로 완화되어 실용화 가능성이 크게 향상되었다. 그러나 농작업 과정에서 발생하는 다량의 부산물은 여전히 대부분 단순 폐기되거나 퇴비화되는 실정으로, 지역 여건에 맞는 자원순환형 활용 전략이 요구된다. 바이오차의 효과는 제조 원료, 열분해 온도, 토양 조건, 작물의 생리적 반응에 따라 달라진다. 목질계 바이오차는 비표면적과 기공 부피가 커 수분 유지와 양분 흡착에 유리하고[3], 가축분 바이오차는 양분 함량이 높아 질소와 인을 공급하며 토양 비옥도를 향상시킨다[4]. 원료별로 pH, EC, CEC, 보비력 등 이화학적 특성이 상이하고[5,6], 생산 조건에 따라 토양 미생물 군집에도 영향을 주는 것으로 보고되었다[7]. 따라서 바이오차 적용 시 지역 특성과 작물에 적합한 원료 선택이 필요하다. 강원특별자치도는 멜론, 아스파라거스, 고추, 포도, 복숭아 등 특화작목 재배가 활발히 이루어지고 있으며 이에 따른 줄기·잎·전정지 등 부산물 발생량 또한 많으나 원료로서 활용은 제한적인 실정이다. 이들 부산물을 단순 처리하는 대신 바이오차로 전환하여 활용한다면, 토양 개량과 작물 생산성 향상뿐 아니라 지역 농업의 자원순환과 경제성 증대에도 기여할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 도 내 주요 작목 부산물을 원료로 제조한 바이오차의 화학적 특성과 작물 생육 반응을 비교·평가함으로써, 지역 여건에 적합한 바이오차 활용 방안을 제시하고자 한다.

결과 및 고찰

바이오차 성분 분석

부산물 원료별 바이오차의 총탄소(T-C), pH, H/C 몰비, 수분, 염분을 분석한 결과는 Table 1에 제시하였다. 복숭아(*Prunus persica*), 포도(*Vitis vinifera*), 고추(*Capsicum annuum*), 멜론(*Cucumis melo*), 아스파라거스(*Asparagus officinalis*) 바이오차의 총탄소는 각각 70.1%, 70.4%, 61.8%, 49.6%, 59.6%로 나타났으며 비료공정규격 기준($\geq 40\%$)을 충족하였다. Ippolito et al.[8]와 Tomczyk et al.[3]에 따르면 목질계 원료는 리그닌 함량이 높고 열분해 시 휘발성 성분이 낮아 고정 탄소는 많이 잔류한다고 보고하였는데 본 시험에서도 목질계 원료인 복숭아, 포도 부산물 바이오차의 총탄소 함량이 높게 나타났다. 염분은 복숭아, 포도, 아스파라거스 부산물 바이오차가 각각 0.06%, 0.04%, 0.56%로 1% 미만이었으며 멜론과 고추 부산물 바이오차는 0.98%, 0.90%로 상대적으로 높은 함량을 보였다. 시설재배에서의 염류비료 집적과 열분해 시 재(ash) 형태의 무기염 농축 등 복합적인 요인으로 염분이 높게 나타난 것으로 추정되며, 비록 비료공정규격 기준($<2\%$)에는 적합하였으나, 토양에 고농도로 사용할 경우 초기 EC 상승으로 인한 생육 지연이 우려되므로 사전 염류 평가 및 세척·혼합 처리 등의 관리가 필요할 것으로 판단된다[9]. 향후 바이오차 사용 후 토양 및 작물 내 Na^+ 농도 변화를 평가하여 염류 축적에 따른 생리적 영향을 정량화할 필요가 있다고 판단된다. 복숭아, 포도, 고추, 멜론, 아스파라거스 부산물 바이오차의 중금속 8종(Cu, Zn, Ni, Cr, Hg, As, Pb, Cd)은 비료공정규격 기준을 모두 충족하였다(Table 2). 바이오차 제조 시 열분해 온도가 높아질수록 중금속 총 함량은 휘발되지 않고 대부분 고체에 농축되어 증가하기 때문에 본 시험에 적용한 500°C 외에도 온도에 따른 중금속 함량변화에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다[10]. European Biochar Certificate - Guidelines (EBC, 2023)에 따르면 H/C 몰비는 바이오차의 안정성을 판단하는 지표로, <0.7 일 때 안정적인 바이오차로 평가된다. 시험에 사용된 부산물 바이오차의 H/C 몰비는 복숭아 0.65, 포도 0.65, 고추 0.55, 멜론 0.52, 아스파라거스

Table 1. Chemical characteristics of biochars derived from various agricultural by-products

Biochar feedstock ¹⁾	T-C	pH	H/C molar ratio	O/C molar ratio	Moisture content	$\text{NaCl}^{2)}$
	(%)				(%)	
PC	70.1	8.5	0.65	0.17	4.3	0.06
GR	70.4	9.0	0.65	0.17	5.8	0.04
PP	61.8	9.1	0.55	0.31	5.6	0.90
ML	49.6	9.0	0.52	0.49	2.5	0.98
AS	59.6	8.9	0.49	0.34	3.6	0.56
Optimum range	$> 40\%$	-	$\text{H/C} < 0.7$	$\text{H/C} < 0.4$	$\leq 30\%$	$\leq 2\%$

¹⁾ PC: peach branch, GR: grape branch, PP: pepper stem, ML: melon stem, AS: asparagus stem

²⁾ NaCl content of biochar was analyzed on a dry weight basis.

Table 2. Heavy metal concentrations in biochars derived from agricultural by-products

Biochar feedstock ¹⁾	Cu	Zn	Ni	Cr	Hg	As	Pb	Cd
	(mg/kg)							
PC	10.3	34.1	6.7	N.D. ²⁾	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
GR	17.4	60.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
PP	9.1	107.0	N.D.	3.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ML	63.7	108.2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
AS	16.0	92.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RDA's guideline	≤ 360	≤ 900	≤ 45	≤ 200	≤ 2	≤ 45	≤ 130	≤ 5

¹⁾ PC: peach branch biochar, GR: grape branch biochar, PP: pepper stem biochar, ML: melon stem biochar, AS: asparagus stem biochar

²⁾ N.D.: Not detected

Heavy metals content of biochar was analyzed on a dry weight basis.

Table 3. Contents of major nutrients (T-N, T-P, K₂O, CaO, and MgO) in biochars derived from different agricultural by-products

Biochar feedstock ¹⁾	T-N	T-P	K ₂ O	CaO	MgO
	(%)				
PC	0.81	0.19	0.62	0.29	0.26
GR	1.49	0.45	1.77	0.51	0.45
PP	1.93	0.42	2.90	2.74	0.87
ML	2.24	1.51	2.95	3.03	0.91
AS	3.09	0.83	3.54	0.92	0.49

¹⁾ PC: peach branch biochar, GR: grape branch biochar, PP: pepper stem biochar, ML: melon stem biochar, AS: asparagus stem biochar

0.49로 모두 <0.7이었으나 복숭아와 포도의 H/C 물비가 높아 상대적으로 낮은 탄화도를 보였다. Spokas et al.[11]은 열분해 조건에 따라 H/C 물비가 민감하게 변화하며 이는 바이오차의 장기적 토양 안정성과 밀접히 관련된다고 보고하였으며, Gai et al.[12]과 Paiva et al.[13]도 원료와 열분해 온도의 차이가 H/C 물비에 영향을 미친다고 제시한 바 있어 안정적 품질의 부산물 바이오차 제조를 위해 원료별 최적 탄화 조건에 대한 구명이 필요하다고 판단된다. 과채류는 세포벽의 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 비율이 높고 리그닌 함량이 낮은 것으로 알려져 있으며, 이러한 구조적 특징은 산소를 포함하는 다당류의 비중이 높음을 의미하므로 [14,15] O/C 물비에도 영향이 있을 것으로 추론된다. 본 연구에서는 장비의 한계로 인해 O/C 물비는 분석하지 못하였으나 O/C 물비를 병행 분석함으로써, 바이오차의 탄화 정도와 장기적 안정성을 보다 정밀하게 평가할 필요가 있다. 바이오차의 비효(T-N, T-P, K₂O, CaO, MgO) 함량을 분석한 결과(Table 3), 아스파라거스 부산물 바이오차의 T-N과 K₂O가 0.83%, 3.54%로 가장 높았다. 질소는 열분해 과정에서 휘발성이 높아 손실되기 쉬운 특성이 있으나 부산물 바이오차의 함량으로 높게 검출되었다. Goñi et al.[16]은 아스파라거스 줄기 부산물의 회분(ash) 4.87 g/100 g, 칼륨(K) 5.01 g/100 g로 매우 높은 무기성분을 포함한다고 보고하였는데 이러한 고농도 무기성분은 열분해 과정에서도 잔존하는 특성을 가지며 이에 따라 아스파라거스 바이오차의 높은 T-N과 K₂O 함량 또한 부산물의 원료 특성과 열분해 과정에서의 무기성분 농축 효과가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 멜론 바이오차는 T-P 함량이 1.51%로 가장 높게 나타났으며 바이오차 사용이 인산 공급 효과를 높여 생육을 향상시킨다고 보고한 Kang et al.[17]의 결과에 따라 작물의 생육 초기나 시설 재배지에서 인산 고정 문제를 보완하기 위한 선택적 사용이 가능할 것으로 판단된다. 고추 부산물 바이오차의 T-C와 T-N는 61.8%, 1.93%로 분석되었는데 Park et al.[18]가 수행한 고춧대 바이오차의 T-C (66.56%), T-N(2.21%)과 같은 수준의 결과를 보였다. 양이온 중 CaO과 MgO 함량은 각각 0.29~3.03%, 0.26~0.91%의 범위를 보여 원료 간 차이가 뚜렷하게 나타났고, 특히, MgO 함량은 바이오차의 총탄소 함량과 반비례하는 경향을 보였는데, 탄소 함량이 높은 바이오차일수록 무기 함량이 상대적으로 낮게 분석된 Yuan et al.[19]의 연구와 같은 결과를 보였다.

작물 생육 비교 및 토양 화학성

재배시험에 사용한 토양은 pH 6.3, 전기전도도(electrical conductivity, EC) 2.2dS/m, 유기물 함량(organic matter, OM) 20

g/kg으로 유기물이 부족하고 Ca는 6.8 cmol_c/kg으로 적정 범위를 초과한 토양이었다(Table 4). 배추(*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*) 재배 시 바이오차를 처리한 결과(Table 5), 고추 부산물 바이오차(NPK+PP) 처리구에서 배추의 생체중이 1.74 kg/plant로 가장 높은 수량을 보였다. 엽수와 SPAD값은 아스파라거스 부산물 바이오차(NPK+AS) 처리구에서 각각 25.0매, 42.2로 가장 높았으며, 고추, 멜론 부산물 바이오차 처리구에서도 잎의 길이, 너비, 엽수 등 전반적인 생육 지표가 향상되었다. 배추 준광 품종의 생체중은 2 kg/plant 내외로 알려져 있으나 본 시험에서는 생육 면적 및 사용한 토양의 양 등 포트의 제한된 재배환경에 따른 영향으로 다소 낮은 경향을 보였다. 토양 화학성 분석 결과(Table 6), pH는 모든 처리구에서 6.2~6.3 범위로 적정 범위에서 유지되었고, 처리구간 유의한 차이는 없었으며 EC는 일부 처리구(NPK, NPK+PC, NPK+PP)에서 증가하는 경향을 보였으나 작물 생장에 유해한 영향은 관찰되지 않았다. 유기물(OM) 함량은 무처리구 20 g/kg 대비 복숭아(NPK+PC) 및 포도(NPK+GR) 부산물 바이오차 처리구에서 각각 25, 26 g/kg로 높게 나타났으며 바이오차의 유기물 공급효과에 대하여 보고된 연구들과 같은 결과를 보였다 [6,20]. 양이온 함량 중 K의 편차가 비교적 크게 나타났으며, 멜론, 아스파라거스 부산물 바이오차를 처리한 토양의 K 함량이 각각 0.87, 0.86 cmol_c/kg으로 높게 나타났다. Yuan et al.[19]에 따르면 K는 바이오차에서 수용성 및 이온교환성 형태로 존재하여 토양에 빠른 공급원이 될 수 있다고 하였는데, 본 시험에서도 멜론과 아스파라거스 부산물 바이오차의 K 함량이 높게 나타난 결과가 토양 처리에도 영향을 준 것으로 추론된다. 유효인산(available phosphate, Av. P₂O₅)은 멜론 부산물 바이오차 처리구의 토양에서 500 mg/kg으로 가장 높았으며 고추 부산물 바이오차 처리구를 제외한 모든 처리구에서 무처리 대비 증가하는 경향을 보였는데 Cho et al.[20]과 Lee et al.[21]의 연구에서 바이오차 처리가 토양 중 인산의 가용성 증진에 영향을 미친다고 보고한 바와 같이 본 시험에서도 바이오차 처리가 토양 내 인산 형태의 분포에 변화를 유도하였을 가능성이 있을 것으로 추정된다.

결론

본 연구에서는 복숭아, 포도, 고추, 멜론, 아스파라거스 등 다양한 농업 부산물을 원료로 제조한 바이오차의 이화학적 특성과 작물 생장 및 토양 병원균 밀도에 미치는 영향을 평가하였다. 복숭아(70.1%)와 포도(70.4%) 부산물 바이오차는 총탄소 함량이 높았으며, 아스파라거스 부산물 바이오차는 전질소(T-N, 3.09%) 및 칼륨(K₂O, 3.54%) 함량이 높았고 멜론 부산물 바이오차는 총 인(T-P, 1.51%) 함량이 높아, 토양의 양분 특성이나 작물 요구도에 따라 선택적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후

Table 4. Chemical properties of soil used in this experiment

pH ¹⁾	EC	OM	K	Ca	Mg	Av. P ₂ O ₅
(1:5)	(dS/m)	(g/kg)		(cmol _c /kg)		(mg/kg)
6.3	2.2	20	0.80	6.8	1.2	443

¹⁾ pH: potential of hydrogen, EC: electrical conductivity, OM: organic matter, Av. P₂O₅: available phosphorus.

Table 5. Chinese cabbage growth in response to biochars derived from different agricultural by-products

Treatment ¹⁾	Fresh weight (kg/plant)	Leaf length (cm)	Leaf width	Leaf number (ea/plant)	SPAD (value)
NF	1.36 b ²⁾	26.34 c	12.46 b	18.6 c	31.8 d
NPK	1.54 b	30.44 b	17.28 a	21.2 bc	39.2 c
NPK+PC	1.57 ab	29.98 b	18.00 a	21.8 bc	37.8 c
NPK+GR	1.58 ab	29.90 b	17.92 a	21.6 bc	43.1 ab
NPK+PP	1.74 a	31.92 ab	18.44 a	23.6 b	42.0 b
NPK+ML	1.50 b	30.18 b	18.60 a	22.2 b	37.7 c
NPK+AS	1.48 b	32.30 ab	18.80 a	25.0 a	42.2 ab

¹⁾ NF: no fertilizer applied, NPK: treatment with NPK fertilizer, PC: peach branch biochar treatment, GR: grape branch biochar treatment, PP: pepper stem biochar treatment, ML: melon stem biochar treatment, AS: asparagus stem biochar treatment.

²⁾ Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to DMRT.

Table 6. Soil chemical properties after lettuce cultivation under different biochar and fertilizer treatments

Treatment ¹⁾	pH ²⁾ (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	K	Ca (cmol _c /kg)	Mg	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)
NF	6.2 ac)	2.1 c	20 c	0.79 b	8.1 b	1.3 ab	447 c
NPK	6.2 a	2.3 a	22 b	0.83 ab	7.9 b	1.3 a	451 c
NPK+PC	6.2 a	2.3 a	25 a	0.81 ab	8.0 b	1.3 a	491 bc
NPK+GR	6.3 a	2.2 b	26 a	0.82 ab	7.9 b	1.2 b	476 b
NPK+PP	6.3 a	2.3 bc	22 bc	0.85 ab	9.0 a	1.3 a	455 c
NPK+ML	6.2 a	2.3 bc	22 bc	0.87 a	8.2 b	1.2 ab	500 a
NPK+AS	6.3 a	2.3 a	22 b	0.86 ab	8.2 b	1.4 a	474 b
Optimum range	6.0-6.5	≤2	25-35	0.65-0.80	5.0-6.0	1.5-2.0	350-450

¹⁾ NF: no fertilizer applied, NPK: treatment with NPK fertilizer, PC: peach branch biochar treatment, GR: grape branch biochar treatment, PP: pepper stem biochar treatment, ML: melon stem biochar treatment, AS: asparagus stem biochar treatment.

²⁾ pH: potential of hydrogen, EC: electrical conductivity, OM: organic matter, Av. P₂O₅: available phosphorus.

³⁾ Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to DMRT.

바이오차의 원료 특성에 따른 맞춤형 활용 기준을 마련하여, 작물별·토양별 최적 적용 매뉴얼을 구축할 필요가 있다고 판단되며, 토양환경·기후조건·재배시스템을 고려한 장기적·반복적 평가 연구가 필요하다.

재료 및 방법

공시재료

본 시험에 사용된 부산물 바이오차는 복숭아(PC), 포도(GR), 고추(PP), 멜론(ML), 아스파라거스(AS)를 원료로 하였으며, 강원 특별자치도 농업기술원 시험포장에서 발생한 농업 부산물을 수집하여 활용하였다. 복숭아, 포도는 춘천시 신북읍 유포리 소재의 원예연구과 시험포장에서 2024년 1~2월 전정작업 후의 부산물을 사용하였으며, 고추, 멜론, 아스파라거스는 2023년 10월 신북읍 산천리 소재의 농업환경연구과 시험포장에서 수확 후 줄기 부위를 원료로 사용하였다. 수집된 각 부산물은 60일 이상 자연 건조하였으며, 장비 운용 조건 및 원료 확보 여건을 고려하여 완전탄화 및 비표면적의 안정성이 확보되었다고 보고한 Jang et al.[22]의 조건을 채택하여 500°C에서 60분간 열분해한 탄화물을 시험재료로 사용하였다.

바이오차 원료별 특성 분석

부산물 바이오차의 원료별 특성을 비교하고자 화학성 분석을 수행하였으며, 농촌진흥청의 「비료의 이화학적 검사방법」에 따라 분석하였다. 바이오차의 이화학적 검사방법에 따라 pH 측정은 시료와 0.01M CaCl₂ 용액을 1:5로 혼합하여 진탕한 후, pH meter (SevenDirect SD20, Mettler Toledo, Switzerland)로 측정하였다. 총탄소(total carbon, T-C), 전질소(total nitrogen, T-N) 함량과 H/C 몰비는 원소분석기(UNICUBE, Elementar, Germany)를 이용한 고온 건식연소법으로 분석하였다. 시료는 100°C에서 24시간 건조하여 균질화 후 시료로 사용하였으며, 생성된 CO₂와 H₂O를 검출하여 C 및 H 함량을 산출하였고 측정된 원소 조성을 바탕으로 H/C 몰비를 산출하였다. P, K, Ca, Mg, 함량은 같은 고시의 유도결합플라즈마 발광분광법에 의한 비료 정량법에 따라 분석하였다. 바이오차 시료를 왕수(HNO₃:HCl = 1:3)로 분해한 후, 여액을 유도결합플라즈마 발광분광분석기(ICP-OES, Integra Dual, GBC, Australia)로 분석하여 정량하였으며 Ca, Mg, K는 CaO, MgO, K₂O의 산화물 형태로 환산하였다. 중금속(Cu, Zn, Ni, Cr, As, Pb, Cd) 및 염분 분석을 위해 시료를 질산(HNO₃)과 염산(HCl)을 비효성분분석과 같은 비율(HNO₃:HCl = 1:3) 혼합한 산으로 마이크로웨이브 분해장치(ETHOS EASY, Milestone, Italy)를 이용해 전처리한 뒤, ICP-OES로 분석하였으며, Na는 분자량 환산계수를 적용하여 염분(NaCl) 함량으로 산출하였다. 수은(Hg) 함량은 열분해식 수은 분석기(DMA-80, Milestone, Italy)를 사용하여 정량하였다.

작물 생육 비교 및 토양 화학성

부산물 바이오차 처리에 따른 배추 생육 반응을 평가하기 위해 Wagner pot (1/2,000 a 규모)을 이용한 포트 재배시험을 수행하였다. 시험 작물은 배추였으며, 시험 토양의 화학적 특성은 농촌진흥청 토양화학분석법에 따라 분석하였으며 결과는 Table 4에 제시하였다. 처리구는 무시비구(NF), 표준시비구(NPK), 및 표준시비 후 각 부산물 바이오차 500 kg/10a를 혼합한 처리구(NPK+ biochar)로 구성하였다. Jang et al.[23]의 연구에서 적용한 바이오차 처리량은 100~500 kg/10a 수준이었고, 200 kg/10a 수준에서 유의한 생육 차이가 나타나지 않았다는 결과를 참고하여 부산물 원료별 처리 효과를 명확히 검증하기 위하여 상대적으로 높은 수준인 500 kg/10a를 적용하였다. 표준시비(NPK)는 농촌진흥청의 작물별 비료 사용 처방에 제시된 배추 표준 시비량을 적용하였으며, 밑거름($N-P_2O_5-K_2O = 11.0-7.8-11.0$ kg/10a)은 정식 1주 전, 웃거름($N-P_2O_5-K_2O = 21.0-0.0-8.8$ kg/10a)은 정식 3주 후 15일 간격으로 2회 분시하였다. 수확기에는 생체중, 엽장, 엽폭, 엽수, SPAD 값을 조사하였으며, 생육조사는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준에 따라 수행하였다. 처리 간 유의성은 SPSS Statistics ver. 29.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하였으며, 평균 비교는 Duncan 다중검정법($p<0.05$)을 적용하였다.

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

Author Contributions: S.-Y. Hong, data curation, writing-original draft, visualization, formal analysis; M.-G. Kim, D.-M. Kim, S.-Y. Hong and H.-Y. Kim, data curation; S.-J. Heo and K.-S. Kim, project administration; H.-S. Kim, writing-review & editing.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: The authors thanks Gangwon Agricultural Research and Extension Service for providing the research sites and experimental materials.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.47>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Soo-Young Hong.

Peer review information Agricultural and Environmental Sciences 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

- Li S, Tasnady D (2023) Biochar for soil carbon sequestration: current knowledge, mechanisms, and future perspectives. *Journal of Carbon Research*, 9(3), 67. <https://doi.org/10.3390/c9030067>.
- Ducey TF, Novak JM, Sigua GC, Ippolito JA, Rushmiller HC, Watts DW, Trippe KM, Spokas KA, Stone KC, et al. (2021) Microbial response to designer biochar and compost treatments for mining-impacted soils. *Biochar*, 3, 299-314. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00093-3>.
- Tomczyk A, Sokołowska Z, Boguta P (2020) Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(3), 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- 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(3), 271-281. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510303>.
- Jang JE, Lim GJ, Park JS, Shim JM, Kang CS, Hong SS (2018) Application effects of biochar derived from pruned stems of pear tree on growth of crops and soil physico-chemical properties. *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association*, 26(4), 11-19. <https://doi.org/10.17137/korrae.2018.26.4.11>.
- Park DG, Lee JM, Choi EJ, Gwon HS, Lee HS, Park HR, Oh TK, Lee SI (2022) Carbon mineralization in different soils cooperated with barley straw and livestock manure compost biochars. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 30(4), 67-83.

- <https://doi.org/10.17137/korrae.2022.30.4.67>.
7. Gul S, Whalen JK, Thomas BW, Sachdeva V, Deng H (2015) Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 206, 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>.
 8. Ippolito JA, Cui L, Kammann C, Wrage-Mönnig N, Estavillo J, Fuertes-Mendizabal T, Cayuela ML, Sigua G, Novak J, et al. (2020) Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421-438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>.
 9. Kim SS, Noh JS, Lee JH, Choi AY, Lee SL, 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>.
 10. Souza CdS, Bomfim MR, Almeida MC, Alves LS, de Santana WN, Amorim ICS, Santos JAG (2021) Induced changes of pyrolysis temperature on the physicochemical traits of sewage sludge and on the potential ecological risks. *Scientific Reports*, 11, 974. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79658-4>.
 11. Spokas KA (2010) Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289-303. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.32>.
 12. Gai X, Wang H, Liu J, Zhai L, Liu S, Ren T, Liu H (2014) Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PLoS One*, 9(12), e113888. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113888>.
 13. Paiva IO, Morais EG de, Jindo K, Silva CA (2024) Biochar N content, pools and aromaticity as affected by feedstock and pyrolysis temperature. *Waste and Biomass Valorization*, 15(6), 3599-3619. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02415-x>.
 14. Szymańska-Chargot M, Chylińska M, Gdula K, Koziół A, Zdunek A (2017) Isolation and characterization of cellulose from different fruit and vegetable pomaces. *Polymers*, 9(10), 495. <https://doi.org/10.3390/polym9100495>.
 15. Delmer D, Dixon RA, Keegstra K, Mohnen D (2024) The plant cell wall—dynamic, strong, and adaptable—is a natural shapeshifter. *Plant Cell*, 194(2), 1234-1250. <https://doi.org/10.1093/plcell/koad325>.
 16. Goñi I, García-Alonso A, Alba C, Rodríguez JM, Sánchez-Mata MC, Guillén-Bejarano R, Redondo-Cuenca A (2024) Composition and functional properties of the edible spear and by-products from *Asparagus officinalis* L. and their potential prebiotic effect. *Foods*, 13, 1154. <https://doi.org/10.3390/foods13081154>.
 17. Kang YG, Choi J, Lee JY, Kim JH, Kim JH, Park DG, Oh TK, Yun YU (2024) Response of biochar amendment for substituting organic fertilizer ingredients in kale-grown soils. *Korean Journal of Agricultural Science*, 51(4), 819-827. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510430>.
 18. Park SY, Kim SJ, Cho AY, Kim Y, Lee DH, Oh KC, Jang CS, Kim DH (2022) Effect of agro-byproduct biochar fertilization on cherry tomato growth and carbon sequestration. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 34(Special Issue), 229-237. <https://doi.org/10.22698/jales.20220023>.
 19. Yuan JH, Xu RK, Zhang H (2011) The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>.
 20. Cho JY, Yoon YE, Choe HJ, Godagedara LT, Lee KA (2024) Influences of continuous wood-derived biochar application on soil chemical properties and lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 57(2), 96-105. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.2.096>.
 21. Lee YN, Kim SS, Lee DW, Shim JH, Jeon SH, Roh AS, Kwon SI, Seo D-C, Kim SH (2024) Characterization and application of biochar derived from greenhouse crop residues for soil improvement and crop productivity in South Korea. *Applied Biological Chemistry*, 67, 112. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00968-6>.
 22. Jang WS, Yang TH, Ham JW, Heo SG, Oh SJ (2023) Physicochemical properties of biochar modified with deep-sea water and phosphate adsorption efficiency in aqueous solution. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 35(4), 367-381. <https://doi.org/10.22698/jales.20230030>.
 23. Jang JE, Lim SH, Shin MW, Moon JY, Nam JH, Lim GJ (2023) Effects of spent oyster mushroom substrate biochar application on soil physicochemical properties and crop growth. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 31(3), 73-82. <https://doi.org/10.17137/korrae.2023.31.3.73>.