

왕겨 바이오차 혼합 유기질비료가 토양 질 및 작물 생산성에 미치는 영향

강윤구¹, 이준영¹, 최지원¹, 김준호¹, 김지훈¹, 윤여옥^{1,2*}, 오택근^{1*}

Effects of Organic Fertilizer Combined with Rice Husk Biochar on Soil Quality and Crop Productivity

Yun-Gu Kang ¹, Jun-Yeong Lee ¹, Jiwon Choi ¹, Jun-Ho Kim ¹, Ji-Hoon Kim ¹,
Yeo-Uk Yun ^{1,2*} and Taek-Keun Oh ^{1*}

¹충남대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과, ²충청남도농업기술원 친환경농업과

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

* Correspondence: aoggi61@korea.kr (YU Yun); ok5382@cnu.ac.kr (TK Oh)

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.19>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 180-187

Received: April 1, 2025
Revised: April 30, 2025
Accepted: May 14, 2025
Published: June 4, 2025

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537



© 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: As global warming accelerates, carbon sequestration in agricultural soils is essential for mitigating climate change. This study investigated the effects of organic fertilization with the 0%, 10%, and 30% (w/w) of rice husk biochar on soil quality and Chinese cabbage yield. The field-based experiments were conducted with four treatments, including non-organic fertilization and three mixing ratios of rice husk biochar in organic fertilizer. The combination of organic fertilizer and rice husk biochar at a 7:3 ratio improved the soil fertility, as indicated by increased available nitrogen (219.00 mg/kg) and phosphorus (404.77 mg/kg) contents for crop plants. Additionally, carbon sequestration efficiency increased with higher biochar ratios in organic fertilizer, reaching 23.60 Mg C/ha in the 7:3 mixture of organic fertilizer and rice husk biochar. Although the crop yield decreased as the mixing ratio of biochar increased, the differences were not significant across treatments. This study found that combination of organic fertilizer and biochar improved soil carbon stock and nutrient availability, but crop yield was not varied by mixing ratio of biochar. For effective soil improvement, combining organic fertilizer and rice husk biochar at a ratio of 7:3 (w/w) is the optimal strategy.

Keywords: Biochar, Carbon sequestration, Climate change, Organic fertilizer, Sustainable agriculture

서론

전세계적으로 기후변화가 가속화됨에 따라 농업부문에서도 토양 황폐화, 작물 생육 불량 등 다양한 피해가 발생하고 있으며, 이는 농업 생산성 및 식량안보를 위협하는 요인으로 작용한다[1,2]. 농경지 토양 내 탄소저장(carbon sequestration)

기술은 기후변화 대응 혹은 적응하기 위한 핵심 기술 중 하나로 [3], 다양한 유기물원 투입을 통해 농경지 토양 내 탄소를 격리시킨다[4]. 농경지 토양에 투입되는 유기물원에는 유기질비료, 바이오차, 그리고 퇴비 등 다양하게 존재하며[5,6], 유기물원의 종류 및 제조 원료에 따라 토양 내 탄소저장 효율이 달라질 수 있다. 또한, 토양 내 탄소저장 용량은 토양 유형에 따라 제한적이기 때문에 토양 내 탄소를 효과적으로 저장할 수 있는 유기물 투입방법의 개발이 필요한 실정이다[7].

다양한 유기물원 중 유기질비료와 바이오차는 모두 비료공정규격상 부산물비료에 속하며, 다양한 농업부산물을 활용하여 제조한다는 공통점이 있다[8]. 하지만, 유기질비료는 토양 미생물에 의해 분해되면서 양분을 서서히 공급하는 특징을 가지는 반면, 바이오차는 방향족 구조로 구성됨에 따라 토양 환경 중에서 거의 분해되지 않아 안정적으로 장기간 탄소 저장에 기여할 수 있다[9,10]. 그 예로, Shi et al.[11]의 연구에서는 밀 재배지에 유기질비료를 적용함에 따라 토양 내 질소(N) 함량이 증가하는 반면, 바이오차를 처리한 토양에서는 비료를 처리하지 않은 토양과 유사한 N 함량을 나타내었다. 또 다른 선행연구에서는 유기질비료 처리 시, 무기질비료를 처리한 토양보다 토양의 양분 보유량이 증가하였으나, 토양 내 저장된 탄소 저장량은 바이오차를 단독 처리한 토양보다 낮다고 보고하였다[12]. 이와 같이, 많은 선행연구들이 특정 유기물원을 단독으로 처리한 조건 혹은 작물이 재배되지 않는 제한된 조건에서 수행되고 있으며, 국내 관련 연구들도 대부분 토양 개량을 위해 바이오차를 단독으로 활용하여 작물 재배 중 다양한 유기물원의 혼합처리에 따른 영향을 평가하는 것이 필요하다[2,3,5,8,9].

따라서, 본 연구에서는 가을배추 재배 토양에 유기질비료 처리 과정 중 왕겨 바이오차의 혼합비율(0%, 10%, 그리고 30%)을 달리 적용하였을 때, 토양 질 및 가을배추 생육특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 노지 재배시험을 실시하였다. 또한, 본 연구에서는 작물을 재배한 토양의 유기탄소 저장량 분석을 통해 유기질비료와 왕겨 바이오차 혼합처리에 따른 토양 탄소저장 효율을 평가하였다.

재료 및 방법

실험 재료

시험에 사용된 유기질비료는 아주까리유박, 참깨박, 대두박이 각각 75%, 13%, 12% (v/v) 혼합된 제품을 Sinsung-agro Inc. (Goesan, South Korea)에서 구매하여 이용하였다. 유기질비료와 혼합하기 위한 왕겨 바이오차는 대전광역시 유성구 소재의 충남대학교 농업생명과학대학 내 시험 논 포장에서 2023년에 발생한 원료를 이용하여 제조하였으며, 열분해 조건은 400°C 및 1시간으로 설정하였다. 시험에 사용된 유기개량제 2종의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 1에 제시한 바와 같다.

Table 1. Chemical properties of organic amendments used for Chinese cabbage cultivation

Amendments	pH _w (1:10)	EC (ds·m ⁻¹)	Salt conc. (%)	TC	TN	TH	T-P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	C/N ratio	H/C ratio
Organic fertilizer	7.43± 0.02	76.43± 3.40	1.89± 0.15	39.50± 0.20	4.47± 0.23	5.51± 0.11	2.01± 0.06	1.06± 0.04	1.32± 0.02	0.58± 0.02	0.22± 0.03	8.84± 0.14	1.66± 0.03
Rice husk	6.23± 0.03	4.28± 0.10	0.27± 0.01	41.23± 0.05	0.41± 0.03	4.37± 0.08	0.14± 0.02	0.48± 0.05	0.15± 0.01	0.06± 0.02	0.02± 0.01	99.56± 0.23	1.26± 0.03
Rice husk biochar	8.71± 0.02	6.31± 0.08	0.38± 0.04	52.23± 0.12	0.76± 0.07	1.55± 0.01	0.25± 0.01	0.66± 0.03	0.23± 0.02	0.10± 0.01	0.14± 0.01	68.72± 0.18	0.35± 0.02

EC, electrical conductivity; Salt conc., salt concentration; TC, total carbon; TN, total nitrogen; TH, total hydrogen; T-P₂O₅, total phosphorus.

시험 장소 및 설계

유기질비료와 왕겨 바이오차의 혼합비율에 따른 가을배추 생육 평가를 위한 작물 재배시험은 2023년 9월 16일부터 11월 18일까지 총 63일간 충청남도 예산군에 위치한 충청남도 농업기술원 내 시험포장에서 실시하였다. 해당 시험포장의 토성(soil texture)은 모래, 미사, 그리고 점토 함량이 각각 53.6%, 26.0%, 그리고 20.4%의 비율로 구성된 양토(loam)로 분류되었다. 시험기간

중 기상요인의 변화는 Fig. 1에 나타내었다.

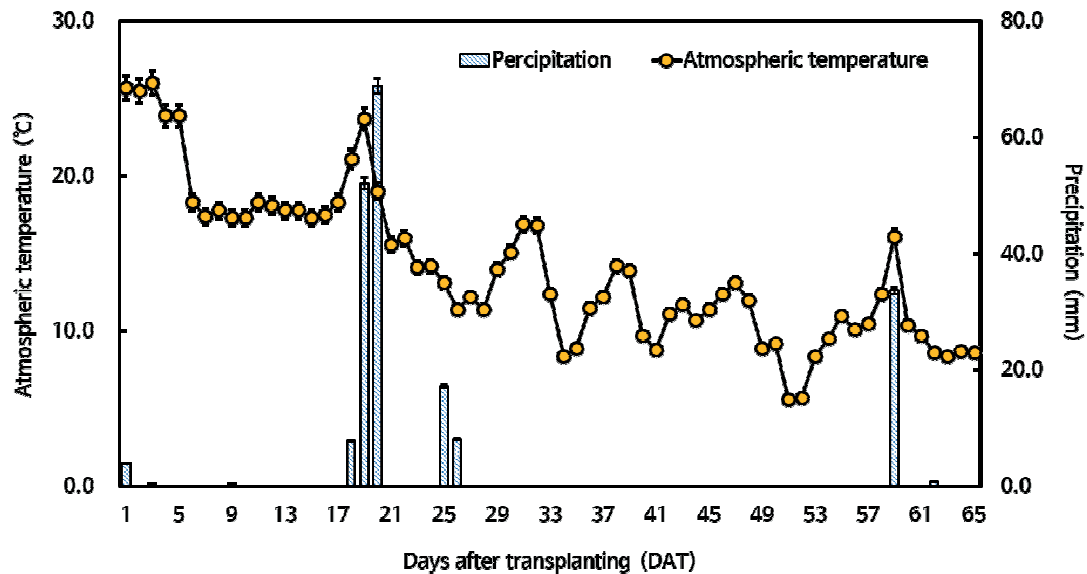


Fig. 1. Meteorological data during the autumn Chinese cabbage cultivation.

본 연구에서 가을배추 재배시험을 위해 처리구는 총 4개로 구성하였으며, 유기질비료 무처리구(control), 유기질비료 100% 처리구($\text{OF}_{10}\text{BC}_0$), 유기질비료와 왕겨 바이오차를 9:1 (w/w) 비율로 혼합한 처리구(OF_9BC_1), 그리고 유기질비료와 왕겨 바이오차를 7:3 (w/w) 비율로 혼합한 처리구(OF_7BC_3)로 구분하였다. 각 처리구별 크기는 3.3 m × 4.0 m (13.2 m²)로 설정하였으며, 누수, 비료 혼입 등 시험적 오류의 발생을 억제하기 위해서 처리구간 사이를 1 m씩 띄운 후, 난괴법을 이용해 3반복 배치하였다. Control 처리구를 포함한 총 4개의 처리구에는 농촌진흥청에서 고시한 노지배추의 시비처방기준에 따라 무기질비료($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$, 320-78-198 kg/ha)를 처리하였으며, 유기질비료는 선행연구를 따라 비료 내 N 함량을 기준으로 120 kg/ha를 처리하였다[3,12].

특성 분석

시험에 사용된 포장의 토성은 비중계법을 이용하여 결정하였으며, 공시 토양의 pH 및 electrical conductivity (EC)는 토양에 증류수를 1:5 (w/v) 비율로 처리하여 pH 및 EC meter (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 측정하였다. 토양 내 유기물(organic matter, OM) 함량은 원소분석기(CHN828, Leco Corp., USA)를 이용해 분석한 탄소(C) 함량에 보정계수를 적용하여 계산하였다. 또한, 토양 C 함량은 토양 용적밀도 및 층위(20 cm)를 적용하여 유기질비료 처리에 따른 탄소 저장량 변화를 계산에 이용되었다. 토양 내 유효질소(available nitrogen, Avail. N) 및 유효인산(available phosphorus, Avail. P) 함량은 분광광도계(GENESYS 50, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 정량하였으며, 분석에는 Indophenol blue법(NH_4^+), Brucine법(NO_3^-), 그리고 Lancaster법이 이용되었다. 토양 내 교환성 양이온 함량은 pH 7.0의 아세트산암모늄(NH_4OAc)을 이용하여 침출한 시료를 Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES, ICAP 7000, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석하였다.

노지배추 생육특성은 각 처리구 내 상위 10개체를 선정하여 평가하였다. 수확한 배추는 수분 손실에 따른 오류를 최소화하기 위해 생체중을 측정 후, 구고와 구폭, 엽장과 엽폭, 그리고 엽록소 함량의 순으로 측정하였다. 또한, 엽록소 함량은 chlorophyll meter (SPAD-502 Plus, Konica Minolta, Japan)를 이용하여 개체당 3반복 측정하였다.

통계 분석

본 연구에서 제시한 결과는 모두 3반복의 평균값을 나타내었으며, 처리구간 통계적 유의차를 확인하기 위해 SPSS 소프트웨어

(IBM, Armonk, New York, USA)를 이용하여 95% 수준에서 유의성 검증을 실시하였다. 또한, Duncan의 다중검정을 이용하여 사후검정을 수행하였으며, 그 결과는 알파벳 형태로 나타내었다.

결과 및 고찰

토양 화학성 변화

유기질비료와 왕겨 바이오차 혼합에 따른 토양의 화학적 특성 변화를 분석한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 왕겨 바이오차의 혼합비율이 0%에서 30%로 증가함에 따라 토양 pH와 EC는 점차 감소하는 경향을 나타내어 OF₇BC₃에서 각각 pH 6.21과 0.92 dS/m로 가장 낮았다. 또한, 시험 전 토양과 비교하였을 때, 모든 처리구의 토양 pH는 시험 전 토양(pH 6.69)보다 낮게 감소한 반면, 토양 EC는 유기질비료 처리에 따라 시험 전 토양보다 높게 증가하였다. 유기질비료 및 왕겨 바이오차를 처리한 토양의 OM 함량은 유기개량제를 처리하였음에도 시험 전 토양(15.86 g/kg)과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으나, control 처리구(13.69 g/kg)보다는 높게 조사되었다. 본 연구에서 가장 높은 OM 함량은 OF₁₀BC₀ 처리구의 15.90 g/kg이었으며, control 처리구보다 1.16배 높게 증가하였다. 토양 내 유효한 형태의 양분 함량을 나타내는 Avail. N 및 Avail. P 함량은 유기질비료에 포함된 왕겨 바이오차의 혼합비율과 양(+)의 상관관계를 나타내었으며, 왕겨 바이오차가 30% 혼합된 OF₇BC₃ 처리구에서 각각 219.00 mg/kg과 404.77 mg/kg으로 가장 높았다. 하지만, 토양 Avail. P 함량은 유기질비료 및 왕겨 바이오차 처리구 간의 유의한 차이를 보이지 않은 반면, Avail. N 함량은 왕겨 바이오차 혼합비율에 따라 유의한 증가 추세를 나타내었다. 교환성 양이온 중 K⁺ 및 Mg²⁺ 함량은 유기질비료와 왕겨 바이오차를 혼합처리함에 따라 유의하게 증가하였으나, 왕겨 바이오차 혼합 비율에 따른 변화는 서로 상반된 경향을 나타내었다. 이에 따라, 교환성 K⁺ 함량은 OF₇BC₃ 처리구에서 각각 1.27 cmol/kg으로 가장 높은 반면, 교환성 Mg²⁺ 함량은 OF₁₀BC₀ 처리구에서 2.20 cmol/kg으로 가장 높았다.

Table 2. Change in the soil chemical characteristics affected by the mixing ratios of organic fertilizer and rice husk biochar

Treatments	pH _w (1:5)	EC (dS·m ⁻¹)	OM (g·kg ⁻¹)	Avail. N (mg·kg ⁻¹)	Avail. P (mg·kg ⁻¹)	Exchangeable cations			
						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
						(cmol _c ·kg ⁻¹)			
Initial soil	6.69±0.02a	0.71±0.02c	15.86±0.03a	61.49±5.14e	360.47±5.63b	0.50±0.00d	6.90±0.17bc	1.27±0.01b	0.04±0.00b
Control	6.64±0.12a	0.51±0.01d	13.69±0.79b	74.79±13.73d	390.61±14.48a	0.52±0.03d	6.72±0.01b	1.99±0.03a	0.17±0.05a
OF ₁₀ BC ₀	6.29±0.03b	1.40±0.02a	15.90±0.09a	177.36±12.09c	401.11±23.91a	0.69±0.02c	7.21±0.22a	2.20±0.02a	0.13±0.00a
OF ₉ BC ₁	6.22±0.02b	0.94±0.00b	15.85±1.03a	199.44±8.23b	404.27±3.44a	0.83±0.07b	6.64±0.04c	2.12±0.01a	0.14±0.00a
OF ₇ BC ₃	6.21±0.03b	0.92±0.02b	15.70±0.34a	219.00±9.03a	404.77±7.66a	1.27±0.02a	6.63±0.08c	2.11±0.00a	0.14±0.02a
p-value	***	**	**	*	***	**	*	**	***

OF_xBC_y, Combination of organic fertilizer and rice husk biochar at a ratio of X:Y (w·w⁻¹); EC, electrical conductivity; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphorus. Within each column, values followed by the same letters are not significant difference at $p < 0.05$. *, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

토양 유기탄소 저장량 변화

유기질비료 및 왕겨 바이오차 처리에 따른 토양 유기탄소 저장량 변화는 Fig. 2에 제시하였다. 시험 후 토양의 유기탄소 저장량은 유기질비료 및 왕겨 바이오차 처리 유무에 따라 상반된 경향을 나타내었으며, control 처리구에서 19.85 Mg C/ha로 가장 낮았다. 또한, control 처리구의 유기탄소 저장량은 시험 전 토양의 20.50 Mg C/ha보다 3% 낮은 수준이었으나, 유기개량제 처리로 인해 토양 유기탄소 저장량은 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 토양 유기탄소 저장량은 왕겨 바이오차 혼합비율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 왕겨 바이오차를 30% 혼합한 OF₇BC₃ 처리구에서 23.60 Mg C/ha로 가장 높았다.

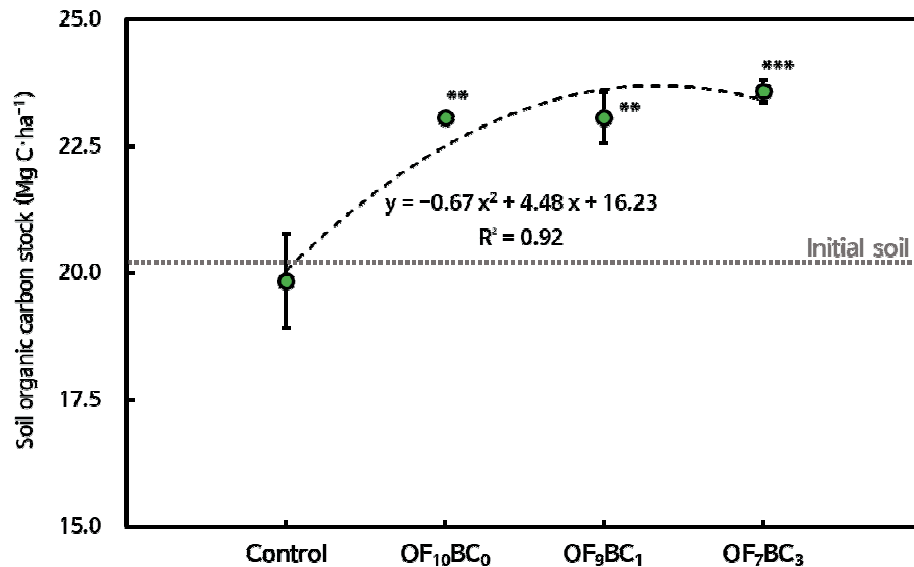


Fig. 2. Soil organic carbon stock affected by the mixing ratios of organic fertilizer and rice husk biochar.

OF_xBC_y, Combination of organic fertilizer and rice husk biochar at a ratio of X:Y (w·w⁻¹).

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

가을배추 생육특성 변화

유기질비료에 왕겨 바이오차 혼합비율을 달리 적용하여 처리한 가을배추의 생육특성 변화를 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 가을배추의 수량은 유기질비료에 왕겨 바이오차를 10% 혼합한 OF₉BC₁ 처리구에서 4.55 Mg/ha로 가장 높았다. 또한, OF₇BC₃ 처리구는 수량이 다소 감소하는 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 이는 고함량의 바이오차 혼합이 작물 생육에 부정적 영향을 줄 수 있다는 가능성을 시사하나, 본 실험에서는 명확한 통계적 검증은 어려웠다. 가을배추 내 수분함량을 조사한 결과, 모든 처리구에서 유의한 차이를 보이지 않았으나, control 처리구에서 94.50%로 가장 높았다. 가을배추의 구고는 수량과 유사한 경향을 나타내어 OF₉BC₁ 처리구에서 27.20 cm로 가장 높았으나, 구폭은 control (14.70 cm), OF₉BC₁ (14.40 cm), OF₁₀BC₀ (13.80 cm), 그리고 OF₇BC₃ (13.50 cm) 순으로 높게 조사되었다. 가을배추의 엽장 및 엽폭의 경우, OF₉BC₁ 처리구에서 각각 39.10 cm와 28.70 cm로 가장 높았으며, control 처리구에서 각각 36.90 cm와 26.00 cm로 가장 낮은 수준을 나타내었다. 엽록소 함량은 왕겨 바이오차 혼합처리에 따라 증가하였음에도 모든 처리구에서 유의한 차이를 보이지 않았으며, 가장 높은 수량을 보인 OF₉BC₁ 처리구에서 49.35 SPAD value로 가장 높았다.

Table 3. Growth components of Chinese cabbage affected by the mixing ratios of organic fertilizer and rice husk biochar

Treatments	Yield (mg · ha ⁻¹)	Moisture content (%)	Head		Leaf		Chlorophyll content (SPAD value)
			Height	Width	Length	Width	
			(cm)		(cm)		
Control	4.17±0.65ns	94.50±1.18ns	27.10±1.35ns	14.70±1.23ns	36.90±4.29ns	26.00±5.00ns	42.50±6.37ns
OF ₁₀ BC ₀	4.10±0.57ns	94.00±2.52ns	26.70±0.83ns	13.80±1.30ns	38.00±2.28ns	26.90±2.38ns	44.73±5.97ns
OF ₉ BC ₁	4.55±0.68ns	94.20±1.26ns	27.20±1.52ns	14.40±1.36ns	39.10±3.34ns	28.70±2.70ns	49.35±5.15ns
OF ₇ BC ₃	3.90±0.75ns	94.20±1.38ns	26.40±1.78ns	13.50±1.27ns	37.70±2.36ns	27.00±3.06ns	47.47±10.65ns
<i>p</i> -value	***	**	*	*	**	**	***

OF_xBC_y, Combination of organic fertilizer and rice husk biochar at a ratio of X:Y (w·w⁻¹). Within each column, values followed by the same letters are not significant difference at $p < 0.05$. *, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

고 찰

유기질비료, 왕겨 바이오차 등과 같은 다양한 유기개량제 처리에 따른 토양 탄소 및 비옥도 증진 효과는 많은 선행연구를 통해 검증되었으며, 이는 대부분 양질의 유기물원 투입에 기인하는 것으로 알려져 있다[13-16]. 실제로, Yun et al. (2024)의 연구 결과에서는 유기질비료 시용으로 인해 토양 내 양분이 축적됨에 따라 작물의 양분 이용 효율 및 수량이 증가한다고 보고한 바 있다[13]. 또한, 바이오차 투입에 따른 토양 비옥도 증진 효율을 비교한 선행연구에서는 바이오차의 높은 양이온 교환 용량(cation exchange capacity, CEC) 및 표면의 기공 구조를 통한 흡착 특성으로 인해 토양 내 무기양분(예, NH_4^+ , K^+ 등)을 고정시켜 토양 비옥도를 향상시킬 수 있으며, 안정한 구조의 탄소를 공급함에 따라 토양 탄소 저장량을 증진시킨다고 보고하였다[16]. 본 연구에서도 유기질비료 및 왕겨 바이오차 처리에 따라 토양 내 OM, Avail. N, 그리고 교환성 K^+ 함량이 높게 증가하였으며, 선행연구들과 일치하는 경향을 나타내었다. 그러나, 토양 내 OM 및 Avail. P 함량은 왕겨의 혼합비율 증가에 따른 OM 및 Avail. P의 증가 효과는 통계적으로 명확하지 않았으며, 이는 토양의 pH 저하, 계절적 온도 변화 및 분해 지연 등의 복합적 요인에 기인한 것으로 추정된다[17]. 선행연구에서는 바이오차 투입에 따라 토양 내 탄소저장 기능으로 인해 토양 내 OM 함량이 증가한다고 보고한 반면, 본 연구에서는 왕겨 바이오차 혼합비율이 증가함에 따라 처리구 간 유의한 차이를 보이지 않았다[8,17]. 선행연구에서는 유기질비료 내 커피 슬러지 바이오차의 포함비율이 증가함에 따라 토양 pH 개선 및 난분해성 탄소원 공급을 통해 토양 내 OM 및 Avail. P 함량이 증가한다고 보고하였다[8]. 하지만, 본 연구에서는 유기개량제를 투입하였음에도 토양 pH가 감소하여 인산 가용성을 증진시키지 못한 것으로 판단된다. 또한, 일반적으로 유기질비료가 분해되는 기간을 고려하였을 때, 대부분 토양 내 안정한 탄소구조 형태로 남아있어 토양 OM 함량도 유의한 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서 유기질비료와 혼합한 왕겨 바이오차의 혼합비율에 따른 토양 OM 함량은 유의한 차이를 보이지 않았으나, 토양 내 유기탄소 저장량은 왕겨 바이오차의 혼합비율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 선행연구에서는 토양 내 유기탄소는 작물 유형, 시비 방법, 기후 조건, 토양 특성 등에 따라 거동이 달라지며, 그중에서도 기후 조건에 따라 유기탄소 분해율이 달라진다고 보고하였다[18]. 본 연구에서는 가을배추 재배기간 중 계절이 가을에서 겨울로 지나감에 따라 유기개량제의 분해율이 감소하여 유기탄소가 높게 저장된 것으로 판단되며, 유기개량제를 처리하지 않은 토양의 유기탄소 저장량(19.85 Mg C/ha)은 시험 전 토양의 20.50 Mg C/ha 와 유의한 차이를 보이지 않았다. 또한, Gross et al. (2022)에서는 바이오차에 의한 토양 내 유기탄소 저장량 증진 효과는 작물의 뿌리 활동 증가에 따른 유기탄소 분해 저해에 기인하여 토양 내 유기탄소 저장량이 증가한다고 보고하였다[19]. 하지만, 본 연구에서는 작물의 수량이 유기개량제 처리구 간 유기탄소 저장량이 유의한 차이를 보이지 않아 작물 뿌리 활동 증가보다는 기온 감소에 따른 유기개량제의 분해 저해로 인한 유기탄소 저장량 증진으로 판단하였다. 또한, 기온 감소 외에도 유기개량제의 분해율은 미생물 활동, 배수성 등 토양 내 다양한 물리·화학·생물학적 요소에 의해 복합적으로 영향을 받을 수 있다[20-23].

유기질비료는 토양 미생물에 의해 분해되면서 무기양분을 천천히 공급하는 완효적 특성을 갖는 반면, 바이오차는 표면의 미세공극을 이용한 흡착 특성을 통해 토양 내 양이온 형태의 양분을 고정할 수 있다[24]. 이러한 두 유기개량제의 양분 공급 특성은 작물 수량을 증대시키는 주요 원인으로 알려져 있으며, 많은 연구에서 무기질비료 외에 유기질비료 혹은 바이오차 처리를 통해 작물 수량을 증대시켰다고 보고하였다[24-28]. 하지만, 본 연구에서는 유기질비료와 왕겨 바이오차를 9:1 (w/w)로 혼합한 처리구에서 가을배추 수량이 가장 높았으며, 그 외의 처리구 간 유의한 수량 변화는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 바이오차의 높은 처리량은 작물의 수량 감소를 유도할 수 있음을 나타내며, 바이오차 처리량별 수박의 수량을 평가한 선행연구에서는 바이오차 처리량에 따른 수량 변화는 2차 방정식 형태($y = ax^2 + b$)를 나타낸다고 보고하였다[29]. 본 연구에서 유기질비료의 단독처리 무처리구와 유의한 차이를 보이지 않았음에도 불구하고, 유기질비료와 왕겨 바이오차의 혼합은 가을배추 수량 증진에 있어 양날의 검으로 작용할 수 있으며, 과도한 양의 왕겨 바이오차 혼합은 가을배추 수량을 저해하는 요인을 작용할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 가을배추 재배 토양에 유기질비료 처리 시, 왕겨의 혼합비율이 토양 특성 및 가을배추 수량에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 본 연구에서 유기질비료와 혼합한 왕겨 바이오차의 비율이 증가함에 따라 토양 내 유기탄소 저장량이

증가하여 왕겨 바이오차를 30% 혼합한 토양에서 23.60 Mg C/ha로 가장 높았다. 또한, 작물이 이용가능한 형태의 양분인 유효태 질소, 인산, 칼륨, 그리고 마그네슘의 함량도 왕겨 바이오차의 혼합비율이 증가함에 따라 증가하여 토양질 및 비옥도 개선을 위해서는 왕겨 바이오차의 혼합비율을 높게 설정하는 것이 유리할 것으로 판단되었다. 하지만, 가을배추의 수량을 고려하였을 때, 본 연구에서 유기질비료내 왕겨 바이오차 30% 혼합 처리(OF₇BC₃)는 수치상으로 가장 낮은 수량을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 따라서, 수량 감소에 대한 명확한 인과를 판단하기에는 한계가 있다. 하지만, 토양 개선 측면에서는 유기질 비료와 왕겨 바이오차를 7:3 (w/w) 비율로 혼합하는 것이 토양 내 탄소 저장을 위해 가장 유리할 것으로 판단된다.

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

Author Contributions: Y.-G. Kang, Conceptualization, Formal analysis, Methodology, and Writing – original draft; J. Choi, Data curation, Formal analysis, Validation, and Writing – original draft; J.-Y. Lee, Data curation and Formal analysis; J.-H. Kim, Data curation and Formal analysis; J.-H. Kim, Data curation and formal analysis; Y.-U. Yun, Conceptualization, Formal analysis, Methodology, Resources, and Supervision; T.-K. Oh, Conceptualization, Writing – review & editing, Fund acquisition, and Supervision.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was supported by research fund of Chungnam National University.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.19>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Yeo-Uk Yun and Taek-Keun Oh.

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

- Kim SS, Lee YN, Lee DW, Shim JH, Jeon SH, Roh AS, Kwon SI, Kim SH (2025) Determination of optimal mixing ratio of organic fertilizer and biochar derived from agricultural waste to increase crop growth and soil carbon sequestration. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 58, 118-124. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2025.58.1.118>.
- Park DG, Kim HW, Lee HS, Lee MJ, Park HR, Oh TK, Lee SI (2024) Evaluation of the impact of continuous use of rice hull biochar on greenhouse gas emissions and net ecosystem carbon balance in Kimchi cabbage cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 43, 117-127. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12>.
- Kang YG, Chun JH, Yun YU, Lee JY, Sung J, Oh TK (2024) Pyrolysis temperature and time of rice husk biochar potentially control ammonia emissions and Chinese cabbage yield from urea-fertilized soils. *Scientific Reports*, 14, 5692. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54307-2>.
- Kim SH, Hwang HY, Lee SM, An NH, Lee CR (2024) Effect of long-term crop rotation with beans on soil chemistry and production efficiency. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 43, 435-442. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.43>.
- Shin JH, Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK (2024) Effect of poultry manure biochar on soil nutrition and carbon improvement in Saemangeum reclaimed soils. *Korean Journal of Agricultural Science*, 51, 643-654. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510418>.
- Yun JJ, Shim JH, Kim SH, Jeon SH, Lee YN, Roh AS (2024) Effect of different type of organic matter application on rice yield and soil organic carbon stock in paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 43, 413-420. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.40>.
- Sommer R, Bossio D (2014) Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 144, 83-87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.017>.
- 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, 819-827. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510430>.
- 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>.
10. Hu W, Zhang Y, Rong X, Zhou X, Fei J, Peng J, Luo G (2024) Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality. *Biochar*, 6, 3. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00296-w>.
 11. Shi Y, Liu X, Zhang Q, Li Y (2022) Contrasting effects of biochar- and organic fertilizer-amendment on community compositions of nitrifiers and denitrifiers in a wheat-maize rotation system. *Applied Soil Ecology*, 171, 104320. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104320>.
 12. Arif M, Ilyas M, Riaz M, Ali K, Shah K, Haq IU, Fahad S (2017) Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in low fertility alkaline soil. *Field Crop Research*, 214, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.018>.
 13. Yun JJ, Jeong YJ, Kim SH, Jeon SH, Roh AS, Kwon SI, Lee YN, Shim JH (2024) Evaluation on growth characteristics of red pepper (*Capsicum annuum* L.) and soil chemical properties by continuous application of food waste compost with manure. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 32, 31-41. <https://doi.org/10.17137/korrae.2024.32.3.31>.
 14. Agegnehu G, Nelson PN, Bird MI (2016) Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil and Tillage Research*, 160, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.003>.
 15. Saleque MA, Abedin MJ, Bhuiyan NI, Zaman SK, Panaullah GM (2004) Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice. *Field Crops Research*, 86, 53-65. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00119-9).
 16. Guo M, Song W, Tian J (2020) Biochar-facilitated soil remediation: Mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 521512. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512>.
 17. Bai SH, Omidvar N, Gallart M, Kamper W, Tahmasbian I, Farrar MB, Singh K, Zhou G, Muqadass B, et al. (2022) Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 808, 152073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073>.
 18. Liu R, Hu Y, Zhan X, Zhong J, Zhao P, Feng H, Dong Q, Siddique KHM (2024) The response of crop yield, carbon sequestration, and global warming potential to straw and biochar applications: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 907, 167884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167884>.
 19. Gross CD, Bork EW, Carlyle CN, Chang SX (2022) Biochar and its manure-based feedstock have divergent effects on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in croplands. *Science of the Total Environment*, 806, 151337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151337>.
 20. Jeon YJ, Kang YG, Eun JA, Oh TK (2024) Yield, functional properties and nutritional compositions of leafy vegetables with dehydrated food waste and spent coffee grounds. *Applied Biological Chemistry*, 67, 22. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00863-0>.
 21. Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK, Yun YU (2023) 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. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500410>.
 22. Wijesingha 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. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500414>.
 23. Kong MJ, Lee SM, Lee CR, Hwang HY, Lee YM, An NH, Cho JL (2024) Effects of green manures on fruits yield and nitrogen utilization efficiency of cucumbers cultivated in organic systems. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 43, 394-403. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.38>.
 24. Lee JY, Kang YG, Kim JH, Oh TK, Yun YU (2023) Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables. *Korean Journal of Agricultural Science*, 50, 967-976. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500430>.
 25. Zhang K, Khan Z, Khan MN, Luo T, Luo L, Bi J, Hu L (2024) The application of biochar improves the nutrient supply efficiency of organic fertilizer, sustains soil quality and promotes sustainable crop production. *Food and Energy Security*, 13, e520. <https://doi.org/10.1002/fes3.520>.
 26. Cho JY, Yoon YE, Choe H, Godagedara LT, Lee KA, Kim SC, Kim YN, Lee YB (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, 96-105. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.2.096>.
 27. Park JO, Kang YG, Lee DB, Lee BO, Oh TK (2024) Effect of liquid fraction from livestock manure on short-term cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivation. *Korean Journal of Agricultural Science*, 51, 625-634. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510416>.
 28. Antonious GF (2024) Impact of biochar and organic fertilizers on sweet potato yield, quality, ascorbic acid, β -carotene, sugars, and phenols contents. *International Journal of Environmental Health Research*, 34, 3708-3719. <https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2318368>.
 29. Kim YS, Kim KH, Han JW, Jeong TG, Kim MJ, Kim IJ (2022) Effect of rice hull-derived biochar application on watermelon growth, and soil physico-chemical properties under greenhouse. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 55, 175-184. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.3.175>.