

음폐혼합펠렛퇴비가 밭 토양의 탄소 형태 및 배추 생육에 미치는 영향

윤진주, 박재혁, Govind Dnyandev Vyavahare, 전상호, 노안성, 김성현, 심재홍*

Effects of Food Waste-Mixed Pellet Compost on Soil Carbon Form and Growth of Kimchi Cabbage (*Brassica rapa* L.) in Upland Field

Jin-Ju Yun , Jae-Hyuk Park , Govind Dnyandev Vyavahare , Sang-Ho Jeon , Ahn-Sung Rho ,
Seong-Heon Kim  and Jae-Hong Shim 

국립농업과학원 토양물환경과

Division of Soil and Water Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

* Correspondence: jaysoil@korea.kr

Abstract: This study investigated the effects of applying food waste with biochar pellet compost (FWCB) on soil carbon fractions and crop productivity in upland field. A field experiment using Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L.) was conducted under five treatments, including FWCB and conventional fertilization regimes. FWCB treatment significantly improved crop growth, with fresh weight and yield increasing by 38% and 27%, respectively, compared to 100% NPK treatment, despite using only 50% of the inorganic fertilizer. Soil organic carbon stock was also highest in the FWCB treatment (28.78 t C ha⁻¹), followed by the FWC (23.72 t C ha⁻¹) and NPK treatments. Fractionation analysis revealed that FWCB application increased both labile (WEC, HWC) and recalcitrant carbon forms (fulvic acid and humic acid), indicating enhanced carbon stabilization. These results suggest that FWCB not only boosts crop productivity but also enhances long-term soil carbon sequestration by enriching stable carbon fractions. Therefore, FWCB can serve as an effective strategy to improve soil fertility and mitigate greenhouse gases (GHGs) in upland agriculture while reducing dependency on chemical fertilizers.

Keywords: Biochar, Food waste compost, Kimchi cabbage productivity, Pellet compost, Soil carbon sequestration

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.22>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 211-219

Received: May 12, 2025

Revised: June 2, 2025

Accepted: June 9, 2025

Published: June 20, 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.

서론

최근 세계기상기구(WMO)가 발표한 보고서에 따르면 지구온난화의 주요 원인인 이산화탄소(CO₂)의 대기 중 농도가 인류 역사상 가장 빠른 속도로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 이산화탄소 농도 증가는 기후변화는 물론 생물다양성의 감소, 농업 생산성 저하 등 다양한 문제를 유발하고 있다. 이에 국제사회는 탄소배출 저감을 위한 다양한 기술을 모색하고 있으며, 특히, 농업 분야에서는 토양탄소격리(Soil carbon sequestration) 기술이 중요한 해결 방안으로 주목받고 있다[1].

토양은 대기보다 약 3배 이상의 탄소를 저장하고 있는 지구 최대의 탄소 저장소

로 이산화탄소 증가에 따른 기후변화를 완화할 수 있는 핵심 수단이다[2]. 농경지에서 유기물 투입은 토양 유기탄소 함량을 증가시키는 가장 일반적인 방법의 하나이며 볏짚, 가축분, 농업부산물 등 다양한 유기자원이 유기물원으로 활용된다. 유기물원은 토양의 화학적 및 물리적 특성을 개선하여 토양개량제로 작용할 뿐만 아니라 작물에 필요한 양분을 제공함으로써 작물 생산성을 향상시키는 데 기여한다[3].

음식물류폐기물은 2023년 기준 국내에서 연간 480만 톤이 발생하고 있으며, 처리방법은 매립, 해양배출, 소각, 자원화 등이 있지만 직매립과 해양배출이 금지됨에 따라 주로 사료화, 퇴비화, 메탄화 등으로 자원화하고 있다. 퇴비화는 경제적으로 우수하다고 알려져 있고, 이를 농경지에 활용하는 자원 순환적 접근은 점차 확대되고 있다[4,5]. 음식물류폐기물 퇴비는 음식물류폐기물 자체의 유기탄소 및 다량의 영양성분을 함유하고 있어 토양 유기물 함량을 높이고 작물 생육에 긍정적인 영향을 준다. 그러나 음식물류폐기물 퇴비는 주로 쉽게 분해되는 성분으로 구성되어 있어 장기적인 탄소 저장에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다[6,7].

이에 따라 최근에는 음식물류폐기물 퇴비에 바이오차를 혼합하여 양분 공급과 동시에 탄소 저장 안정성을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 바이오차는 대표적인 토양개량제로 토양에 적용하면 물리적 특성 개선, 양분 공급, 유기탄소 함량 증가 등 토양의 비옥도와 농업 생산성을 향상시키며, 고온 열분해에 의해 생성된 다공성 구조로 분해 저항성이 높아 토양 내에서 수천 년간 안정적으로 잔류할 수 있다[8-10].

그러나 바이오차는 농경지에 투입 시 미세 분진 발생으로 살포시 어려움이 있어 공급 및 살포 방법에 대한 개선이 요구되고 있다[11]. 따라서 본 연구에서는 탄소 격리, 지력 증진 등 다양한 효과가 예상되는 음식물류폐기물 퇴비와 바이오차를 혼합하고 이를 펠렛화하여 농경지에 투입하고 이에 따른 배추 생육, 토양 화학성 및 토양 탄소축적량, 탄소 형태를 평가하였다.

결과 및 고찰

배추 생육 특성

음폐혼합펠렛퇴비 사용에 따른 배추의 생육 특성을 조사한 결과 엽장, 엽폭, 구고 및 구폭은 NF, NPK 처리구보다 음폐퇴비를 투입한 FWC 처리구에서 증가하는 경향을 보였으며 음폐혼합펠렛퇴비를 투입한 FWCB 처리구에서 가장 높은 생육을 보였다. 생체중 또한 FWCB 처리구에서 가장 높게 나타났으며, NPK0.5와 NPK 처리구 대비 64.0, 37.7% 증가했다(Table 1). 이러한 결과는 음폐퇴비를 통해 작물 생육에 필요한 유기물, 양분 등이 공급되었기 때문으로 판단된다. 선행연구 결과 배추 재배 시 무기질비료를 단독 처리하였을 때보다 음폐퇴비와 무기질비료를 함께 처리하였을 때 생육과 수량이 증가한다는 결과와 일치하였다[12].

배추 수량은 FWCB ($10,479 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) > FWC ($8,848 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) > NPK ($8,307 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) > NPK0.5 ($7,126 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) > NF ($2,186 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) 순으로 생육 특성과 유사한 결과를 보였다(Fig. 1). 특히 FWCB 처리구에서 NPK 처리구에 비해 무기질비료 처리량이 50% 수준이었으나 수량은 약 27% 높게 나타났다. 이는 바이오차로부터 직접적으로 공급되는 K, Ca, P 등과 같은 양분뿐만 아니라 바이오차 표면에 존재하는 이분해성 유기탄소가 점차 분해되면서 작물에 공급되는 양분 등이 생산성 향상에 도움을 준 것으로 판단되며, 바이오차를 무기질비료나 퇴비와 혼용 시 작물 생육이 증가한다는 선행 연구와 유사한 결과를 보였다[13-15].

Table 1. Growth properties of kimchi cabbage on different type food waste compost

Treatments	Leaf length	Leaf width (cm)	Head height	Head width	Fresh weight (g plant ⁻¹)
NF [†]	30.5±1.87c [‡]	19.3±0.94d	23.8±3.62d	14.2±2.83b	801±164.32e
NPK0.5	41.4±1.89b	30.0±2.40c	26.4±1.58c	15.8±1.50ab	2,920±33.47d
NPK	43.9±2.83b	32.0±0.84bc	28.7±0.67b	15.6±1.25ab	3,478±169.94c
FWC	50.2±2.48a	34.6±1.86ab	31.8±1.35a	17.8±0.54ab	3,750±63.40b
FWCB	48.6±0.56a	36.3±0.56a	33.2±0.93a	18.4±2.84a	4,789±115.14a

[†]NF, no fertilization; NPK0.5, inorganic fertilizer 50%; NPK, inorganic fertilizer 100%; FWC, inorganic fertilizer 50% + food waste compost; FWCB, inorganic fertilizer 50% + food waste with biochar pellet compost

[‡]Different letters are significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's multiple range test (DMRT). Same letter indicates no significant differences among treatment

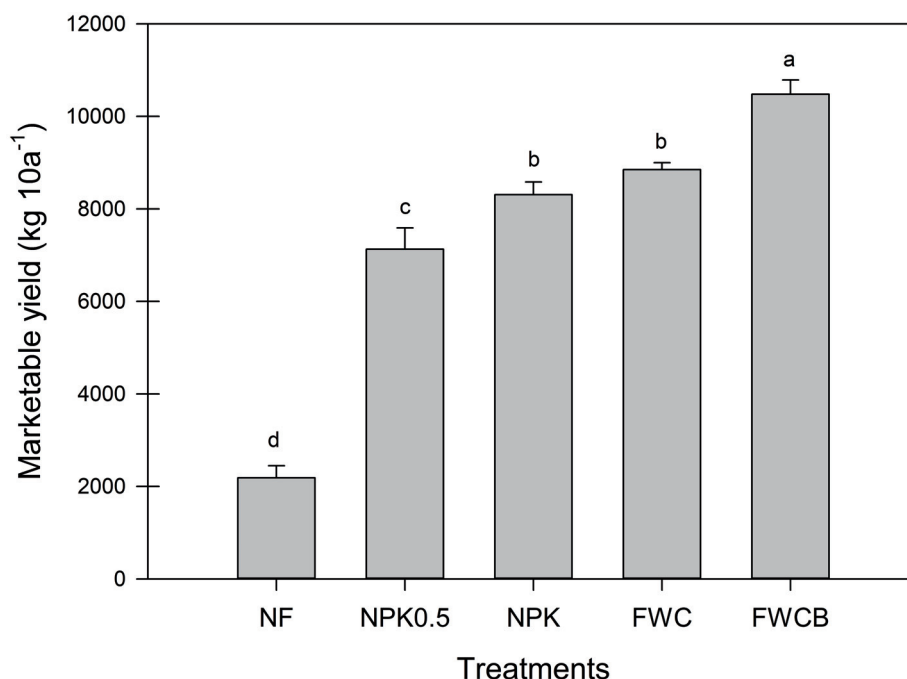


Fig. 1. Marketable yield of kimchi cabbage on different type food waste compost.

Bars represent standard deviation (n=3). The same letter indicates no significant differences among treatments (DMRT, $p < 0.05$), NF, no fertilization; NPK0.5, inorganic fertilizer 50%; NPK, inorganic fertilizer 100%; FWC, inorganic fertilizer 50% + food waste compost; FWCB, inorganic fertilizer 50% + food waste with biochar pellet compost.

토양 화학성 및 토양 탄소축적량

음폐혼합펠렛퇴비 사용에 따른 배추 재배 후 토양 화학성 및 토양 탄소축적량은 Table 2와 같다. 토양의 pH는 음폐퇴비 처리구 (FWC, FWCB)에서 다른 처리구보다 높게 나타났다. FWCB 처리구에서는 투입된 음폐혼합펠렛퇴비의 pH가 음폐혼합퇴비에 비해 낮았음에도 재배 후 토양의 pH가 높게 나타났는데, 이는 퇴비 내 바이오차가 토양 내 산성이온(H^+ , Al^{3+} 등)을 흡착, 불활성화하고 칼슘, 칼륨 등 염기성 양이온을 공급함으로써 토양의 산 완충능 및 양이온 교환능을 증가시켰기 때문으로 판단된다[16].

EC와 교환성 양이온은 다른 처리구에 비해 FWCB 처리구에서 높게 나타났으며, 이는 투입한 음폐혼합펠렛퇴비에 포함된 높은 양이온 함량의 영향으로 판단된다[17]. 특히, 공시재료 음폐퇴비의 EC는 음폐혼합펠렛퇴비보다 높았지만, 수확 후 토양 EC는 유의적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 FWCB는 펠렛형태로 바이오차와 돌로마이트가 함유하고 있는 교환성양이온을 점진적으로 공급하고, 시간이 지남에 따라 미생물에 의한 무기화가 지속적으로 이루어지는 완효성 특성을 가지기 때문으로 판단된다[18, 19]. 토양 EC는 토양 내 총 양이온 함량과 매우 밀접한 정의 상관관계를 나타내며, 유기질비료나 음식물류폐기물에 K, Ca, Mg 등의 양이온이 다량 포함되어 토양의 pH를 상승시키고, 동시에 질소 무기화 과정을 통해 무기태 질소가 증가함에 따라 EC가 상승하는 경향을 나타낸다는 기존 연구 결과와 일치하였다[4]. 유기물과 유효인산 함량 또한 FWCB 처리구에서 유의성 있게 높게 나타났다.

토양 탄소축적량은 FWCB ($28.78 \text{ t C ha}^{-1}$) > FWC ($23.72 \text{ t C ha}^{-1}$) > NPK0.5 ($19.88 \text{ t C ha}^{-1}$) > NPK ($19.76 \text{ t C ha}^{-1}$) > NF ($16.98 \text{ t C ha}^{-1}$) 순으로 나타났다. 선행 연구에서 퇴비 투입 시 용적밀도가 감소하고 공극이 증가함에 따라 물과 산소의 공급이 원활해지고 이에 유기물의 분해가 증가하여 토양 탄소축적량이 높아진다고 보고한 바와 같이 본 연구에서도 음폐퇴비 (FWC, FWCB) 처리구에서 높은 토양 탄소축적량이 확인되었다[20]. 특히 음폐혼합펠렛퇴비 처리구의 경우 퇴비에 혼합된 바이오차로 인해 토양의 물리적 특성이 개선되고, 분말 형태가 아닌 펠렛화 된 형태로 장기적으로 양분이 공급됨에 따라 토양 내 탄소고정이 증가한 것으로 판단된다[21]. 바이오차는 생물학적 분해에 대한 저항성이 높은 탄소 구조로 되어 있어 토양 내에서 장기간 안정적으로 잔류하며 탄소 저장 효과를 증진하는 것으로 알려져 있다.

Table 2. Soil chemical properties after kimchi cabbage cultivation on different type food waste compost

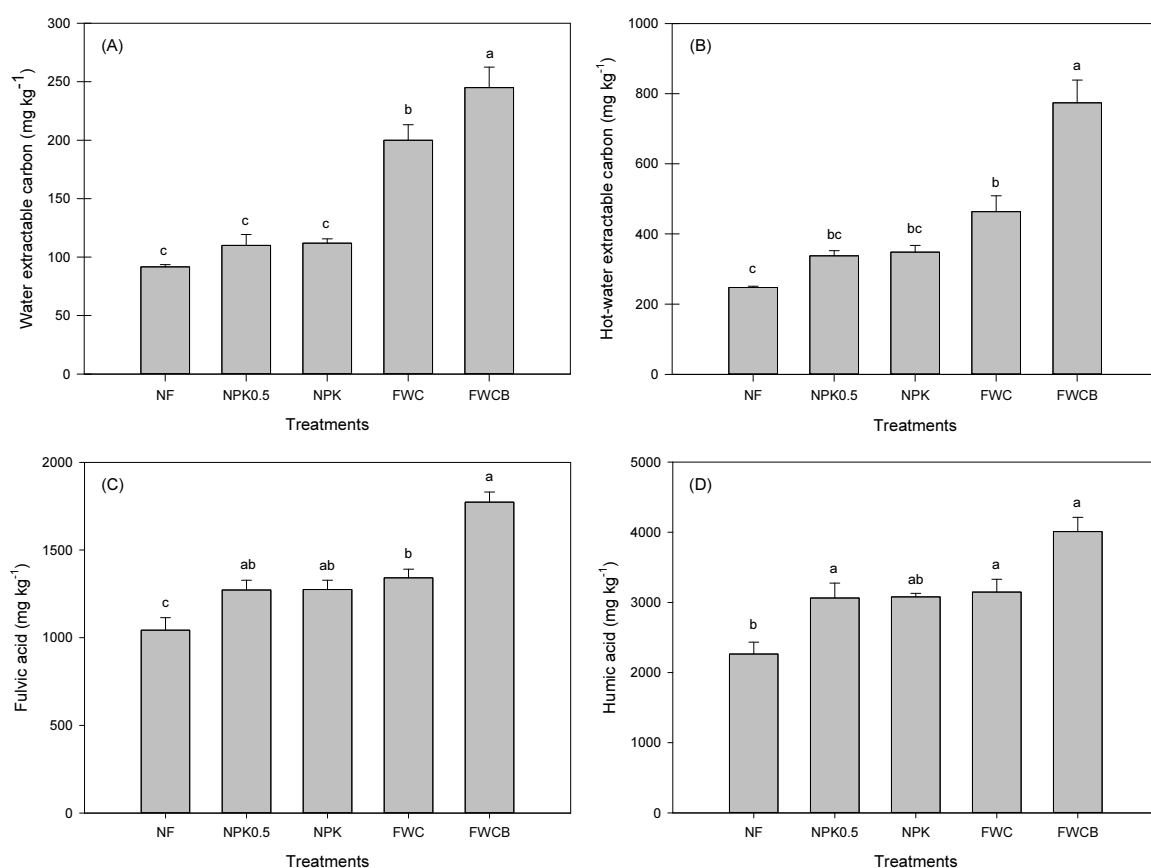
Treatments	pH	EC	Av. P ₂ O ₅	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)				OM	Total N	SC stock
	(1:5)	(dS m ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	(g kg ⁻¹)	(%)	(t C ha ⁻¹)
NF [†]	5.90c [‡]	0.22d	37.37c	0.17b	6.72b	1.58ab	0.09c	16.81c	0.11c	16.98c
NPK0.5	5.52d	0.32c	191.37b	0.24ab	6.18b	1.74a	0.07c	19.57bc	0.13c	19.88bc
NPK	5.22e	0.46bc	206.35b	0.32ab	5.62b	1.54ab	0.06c	19.43bc	0.13bc	19.76bc
FWC	6.53b	0.51b	229.33b	0.28ab	6.85b	1.45b	0.13b	23.53b	0.17b	23.72b
FWCB	7.27a	1.02a	420.05a	0.40a	10.06a	1.76a	0.17a	29.65a	0.22a	28.78a
Optimal range	6.0-6.5	≤ 2	340-450	0.65-0.80	5.0-6.0	1.5-2.0	-	25-35	-	-

[†]NF, no fertilization; NPK0.5, inorganic fertilizer 50%; NPK, inorganic fertilizer 100%; FWC, inorganic fertilizer 50% + food waste compost; FWCB, inorganic fertilizer 50% + food waste with biochar pellet compost

[‡]Different letters are significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's multiple range test (DMRT). Same letter indicates no significant differences among treatment

토양 탄소 형태 평가

음폐혼합펠렛토비 사용에 따른 토양 내 탄소 형태는 Fig. 2와 같다. 토양 이분해성 탄소인 WEC는 FWCB 처리구에서 245 mg kg⁻¹로 가장 높았으며 HWEC 또한 FWCB 처리구에서 유의적으로 높게 나타났다. 이분해성 탄소는 미생물의 주요 에너지원으로 작용하며, 토양 내에서 빠르게 분해되어 토양 미생물 활성 및 초기 양분 공급에 직접적으로 기여한다[22,23]. 특히, HWEC는

**Fig. 2. Soil organic carbon fractions on different type food waste compost.**

Bars represent standard deviation (n=3). The same letter indicates no significant differences among treatments (DMRT, $p < 0.05$), NF, no fertilization; NPK0.5, inorganic fertilizer 50%; NPK, inorganic fertilizer 100%; FWC, inorganic fertilizer 50% + food waste compost; FWCB, inorganic fertilizer 50% + food waste with biochar pellet compost.

WEC보다 상대적으로 안정적인 저분자 유기산, 아미노산 등의 형태로 존재하며, 토양 미생물 군집구조와 효소활성에 영향을 미치는 중요한 요소이다[8].

난분해성 탄소 FA와 HA는 FWCB > FWC > NPK > NPK0.5 > NF 순으로 앞서 확인한 토양 탄소축적량의 결과와 같이 음폐퇴비 처리구에서 높게 나타났으며, 이는 앞서 확인한 토양 탄소축적량 결과와 일치하였다. FA와 HA는 고분자 방향족 구조를 가진 안정된 형태의 탄소에 미생물에 의해 분해되기 어려우며 장기간 토양 내 잔류하여 탄소 저장고 역할을 한다[22,24]. 또한 FWCB 처리구에서 FA 함량은 $1,773 \text{ mg kg}^{-1}$, HA 함량은 $4,052 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 무기질비료(NPK0.5, NPK) 처리구 대비 약 31.7~39.4% 높게 나타났다. 이러한 결과는 투입된 음폐퇴비 자체에 포함된 풍부한 유기물과 미생물 분해산물 뿐만 아니라 이들이 토양 내 미생물의 생물학적 활성을 증가시킨 것으로 판단되며, 퇴비나 잔재물 등과 같은 유기물원을 투입하면 FA와 HA 함량이 11~28% 증가한다는 보고와 일치한다[25-27]. 특히 바이오차가 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는 안정적인 탄소원을 제공하고 부식화 과정을 유도함으로써 탄소의 장기적 고정에 기여하고, 높은 비표면적과 기능성 작용기는 유기물의 흡착과 결합을 촉진해 HA와 FA의 형성에 긍정적인 영향을 미친 것으로 보인다[27]. 따라서 음폐혼합펠렛퇴비는 WEC와 HWEC를 통한 단기적 미생물 활성 촉진과 더불어 FA와 HA의 장기적 축적을 동시에 달성함으로써 단기 및 장기 탄소 공급원의 균형 있는 제공과 토양 내 탄소 저장 기능 강화라는 이중 효과가 있는 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 바이오차가 혼합된 음폐혼합펠렛퇴비 사용에 따른 배추 생육, 토양 화학성 및 토양 탄소축적량을 조사하고 축적되는 탄소를 분획하여 탄소 형태를 평가하고자 하였다. 연구 결과 FWCB 처리구에서 NPK 처리구에 비해 작물 생육 및 생산량이 증가하였다. 무기질비료를 50% 수준으로 처리하였음에도 생체중 및 수량은 각각 38%, 27% 증가하였다. 토양 화학성에서도 FWCB 처리구는 다른 처리구에 비해 유의성 있게 높게 나타났으며, 토양 내 탄소축적량 또한 가장 높게 나타났다. 특히, 휴믹산과 풀빅산 같은 안정된 형태의 탄소 함량의 증가를 통해 음폐혼합펠렛퇴비가 토양 내 탄소고정 및 저장 기능을 증진하는 데 효과적임을 확인하였다. 이러한 결과를 종합해 보았을 때, 음폐혼합펠렛퇴비의 사용은 단순히 작물 생육을 촉진할 뿐만 아니라 토양 내 탄소 저장을 증가시키고 농경지의 토양 탄소 축적에 기여할 수 있는 효과적인 방법으로 판단된다. 또한 향후 무기질비료 의존도를 줄이면서도 수량 확보와 토양 환경 개선을 도모할 방안으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구에 사용한 음폐퇴비(Food waste compost; FWC)는 음식물류폐기물에 계분과 톱밥을 혼합하고 퇴비화하여 사용하였으며, 음폐혼합펠렛퇴비(Food waste with biochar pellet compost; FWCB)는 음폐퇴비에 왕겨바이오차 5%와 조립제인 돌로마이트 10%를 혼합하고 펠렛화하여 사용하였다. 돌로마이트는 펠렛퇴비의 물리적 강도 향상 및 칼슘과 마그네슘 공급을 목적으로 국내에서 시판되는 제품을 사용하였고, 주요 화학성분은 산화칼슘(CaO) 28~32%, 산화마그네슘(MgO) 18~22%, 산화규소(SiO_2) 0.5~3%, 산화철(Fe_2O_3) 0.1~1%, 산화알루미늄(Al_2O_3) 0.10~5%로 구성되어 있다. 연구에 사용한 바이오차 및 음폐퇴비, 음폐혼합펠렛퇴비의 화학적 특성은 Table 3, 4와 같다. 음폐퇴비의 EC는 64.7 dS m^{-1} 로 바이오차가 혼합된 음폐혼합펠렛퇴비보다 높게 나타났는데, 이는 음식물류폐기물에는 교환성나트륨 등 더 많은 수용성 염류를 포함하고 있고 바이오차가 혼합되면 이온성 물질의 표면흡착기작으로 인한 영향으로 판단된다. 일반적으로 EC는 용해된 염류의 농도와 밀접한 관련이 있으며, 특히 나트륨과 같은 양이온이 농도가 높을수록 EC가 증가한다고 알려져 있다[28].

Table 3. Chemical properties of rice husk biochar used in this experiment

pH (1:10)	EC (dS m ⁻¹)	TC	TOC [†] (%)	TIC	TN
8.79	7.25	31.8	29.5	3.3	0.2

[†]TOC, total organic carbon; TIC, total inorganic carbon

Table 4. Chemical properties of compost on different types food waste compost used in this experiment

Treatments	Water content (%)	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)				OM (g kg ⁻¹)	TC (%)	TN
					K	Ca	Mg	Na			
FWC [†]	16.0	8.19	64.7	3.53	1.14	8.72	0.62	1.24	587	32.6	3.26
FWCB	3.1	6.55	60.3	1.83	1.43	10.91	1.22	0.53	599	33.3	3.64

[†]FWC, food waste compost; FWCB, food waste with biochar pellet compost

시험 포장 및 처리구

본 시험은 전북특별자치도 고창군 고창읍에 위치한 시험 포장에서 수행되었으며, 시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 5와 같다. 처리구는 분할구배치법으로 3반복 배치하였으며, 배추(*Brassica rapa* L.)는 9월 초에 정식하여 10월 말에 수확하였다. 처리구는 1) 무처리구(NF, No fertilization), 2) NPK 50% 처리구(NPK0.5, Inorganic fertilizer 50%), 3) NPK 100% 처리구(NPK, Inorganic fertilizer 100%), 4) 음폐퇴비 처리구(FWC, food waste compost + inorganic fertilizer 50%), 5) 음폐혼합펠렛퇴비 처리구(FWCB, food waste with biochar pellet compost + inorganic fertilizer 50%)로 설정하였다. 무기질비료는 농촌진흥청 작물별 비료사용처방 토양검정에 의한 비료사용량 추천식(Eq. (1))에 따라 NPK100%는 32.7-54.8-30.4 kg 10a⁻¹ (N-P₂O₅-K₂O), NPK 50%, FWC, FWCB 처리구는 NPK 기준량의 50% 16.4-27.4-15.2 kg 10a⁻¹ (N-P₂O₅-K₂O) 수준으로 처리하였다. 퇴비는 토양 유기물 함량을 기준으로 혼합 가축분퇴비 기준에 따라 처리하였다.

$$\text{질소비료 사용량(kg 10a}^{-1}\text{)} = 44.082 - 0.588x \quad (x : \text{토양 유기물 함량})$$

$$\text{인산비료 사용량(kg 10a}^{-1}\text{)} = 132.40 - 46.630x \quad (x : \text{토양 유효인산 함량})$$

$$\text{칼리비료 사용량(kg 10a}^{-1}\text{)} = 34.767 - 98.286x \quad (x : K / \sqrt{Ca + Mg}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Table 5. Chemical properties of soil used in this experiment

pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	K	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)				OM (g kg ⁻¹)	TC (%)	TN
				Ca	Mg	Na				
5.56	0.37	17.87	0.11	6.54	1.53	0.23		12.45	0.72	0.10

작물 생육 조사 및 토양 화학성 분석

작물 생육 조사는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준에 따라 엽장, 엽폭, 구고, 구폭 및 생체중을 측정하였다. 수량은 처리구별 평균 생체중에 재식밀도를 곱하여 계산하였다[29].

토양 화학성은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법에 따라 분석하였다. 토양은 수확 후 토양을 채취하여 풍건 후 2 mm (10 mesh) 체를 통과한 토양을 화학성 분석에 사용하였다. pH와 EC는 토양시료와 증류수를 1:5 (w/v) 비율로 혼합하고 30분 동안 교반한 후 pH meter (Orion 5 star, Thermo Scientific, USA)와 EC meter(Orion star A222, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 측정하였다. 유효인산은 Lancaster법, 교환성 양이온은 1 M NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 각각 비색계(UV-1900i, Shimadzu, Japan)와 ICP-OES (AU/CINTRA6, GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Malaysia)로 측정하였다. 총탄소는 원소분석기

(vario Max CN, Elementar Analysensysteme GmbH, German)로 분석하였으며, 유기물 함량은 분석된 토양 탄소 함량에 1.724를 곱하여 환산하였다. 토양의 용적밀도는 Core법을 이용하여 표층(0~15 cm)에서 채취한 후 건조기(HQDO 84, Coretech, Korea)에서 105°C에서 건조한 후 무게를 측정하였다. 토양 유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)은 탄소 함량과 아래와 같은 산출식(Eq. (2))을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Soil organic carbon stock}(\text{ton C ha}^{-1}) = \text{Soil organic carbon}(\text{g kg}^{-1}) \times \text{Bulk density}(\text{Mg m}^{-3}) \times \text{Depth}(\text{m}) \times 10$$

Eq. (2)

토양 탄소 분획

토양 내 가용성 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)는 Fig. 3A와 같이 water extraction (WEC) 및 hot water extraction (HWE)법을 이용하여 분석하였다[14,15]. WEC는 토양 3 g에 증류수 30 mL를 첨가하여 30분간 진탕하고, 이후 3,600 rpm에서 20분간 원심분리하여 상층액과 침전물을 분리하였다. 상층액은 0.45 µm membrane filter를 이용하여 여과한 후 TOC 분석기(TOC-V 5050A, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. HWE는 WEC 여과 후 남은 침전물에 증류수 30 mL를 첨가하여 10초간 교반한 뒤 80°C 항온수조에서 16시간 방치한 후 3,600 rpm에서 20분간 원심분리하였다. 이후 상층액을 0.45 µm membrane filter를 이용하여 여과한 후 2배 희석하여 TOC 분석기로 분석하였다.

탄소의 형태별 함량(휴믹산, 풀빅산)은 Fig. 3B와 같이 산-염기 분획법을 이용하여 측정하였다[24,30]. 토양 3 g에 1 M NaOH 용액 30 mL를 첨가하여 125 rpm에서 24시간 동안 진탕하였다. 원심분리(3,600 rpm, 30분) 후 상층액(Solution A)을 분리하고, 0.45 µm membrane filter로 여과하여 20배 희석한 후 분석하였다. Solution A는 풀빅산(fulvic acid, FA)과 휴믹산(humic acid, HA)이 혼합된 용액으로 분류하였다. 여과된 Solution A 용액에 30 mL 6 M HCl을 첨가한 후 다시 3,600 rpm에서 20분간 원심분리하여 상층액(Solution B)과 침전물을 분리하고 20배로 희석한 후 탄소 함량을 분석하였다. 산에 용해된 상층액 Solution B에 포함된 탄소는 풀빅산, 침전물은 휴믹산 탄소로 분류하였으며 산, 염기로 분획한 상층액의 탄소 함량은 TOC 분석기를 이용하여 분석하였다. 휴믹산과 풀빅산의 탄소 함량은 아래의 Eq. (3), (4)를 이용하여 계산하였다.

$$\text{휴믹산(humic acid, HA)} = \text{Solution A} - \text{Solution B}$$

Eq. (3)

$$\text{풀빅산(Fulvic acid, FA)} = \text{Solution B}$$

Eq. (4)

통계분석

통계분석은 SPSS statistics 27을 이용하여 Duncan's multiple range test (DMRT)로 처리구간 평균 차이에 대한 사후검정을 유의수준 5%에서 실시하였다.

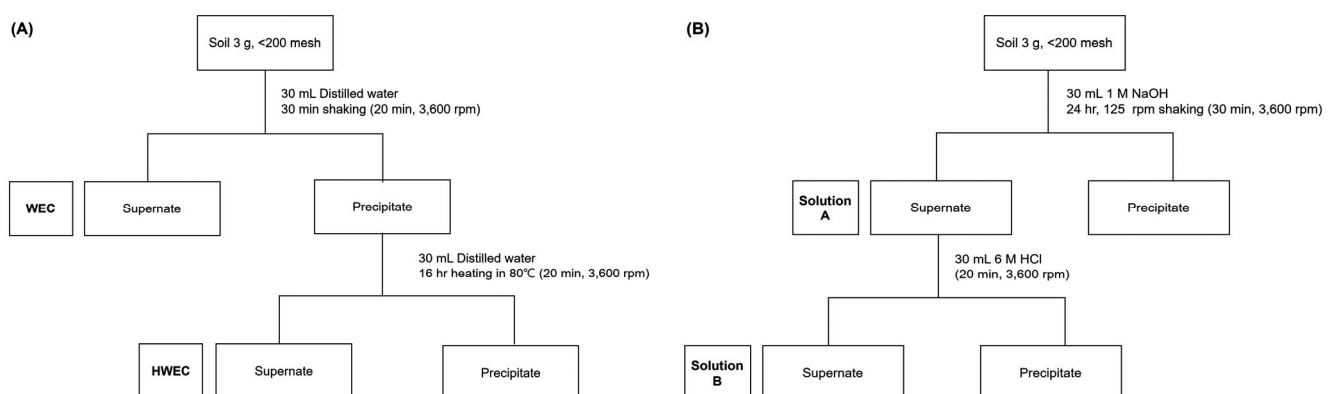


Fig. 3. Procedures of soil carbon fraction used in this study.

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

Author Contributions: Y.J.J. wrote the manuscript; S.J.H reviewed the manuscript; Y.J.J., P.J.H., Vyavahare. G., J.S.H., R.A.S., and K.S.H. measurement and collected the data. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This study was supported by 2025 the RDA Fellowship Program of National Institute of Agricultural Science and the Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ017273), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.22>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Jae-Hong Shim.

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

1. Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49-57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>.
2. Lal R (2008) Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.
3. Hwang SA, Bae HS, Lee SH, Kang JG, Kim HK, Lee KB (2013) Changes of soil properties and rice quality by long-term application of rice straw and rice straw compost in paddy field. *Journal of Agriculture and Life Sciences*, 44(2), 65-70.
4. Kwon SI, So KH, Hong SG, Kim GY, Seong KS, Park WK, Jung KY (2009) The continuous application effect of the food waste composts on the cultivated upland soils and plants. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 17(3), 71-81. <https://doi.org/10.17137/korrae.2009.17.3.71>.
5. Lee CH, Park SJ, Kim MS, Yun SG, Ko BG, Lee DB, Kim SC, Oh TK (2015) Characteristics of compost produced in food waste processing facility. *CNU Journal of Agricultural Science*. 42(3), 177-181. <https://doi.org/10.7744/cnujas.2015.42.3.177>.
6. Kim YS, Kim BT (2007) Effect of food waste and poultry manure compost on the growth of young radish and the change of soil properties. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 15(1), 159-170.
7. Lee S, Park JR, Ahn CH (2020) Development of sustainable food waste management for reducing greenhouse gases emissions in Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 7(4), 248-255. <https://doi.org/10.17820/eri.2020.7.4.248>.
8. Jeong YJ, Lee SH, Na HS, Kim SH, Kwon SI, Shim JH (2022) Evaluation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil chemical properties using food waste compost with manure, black carbon and Plant-Growth-Promoting Bacteria (PGPB). *Journal of Agriculture and Life Sciences*, 56(6), 111-119. <https://doi.org/10.14397/jals.2022.56.6.111>.
9. Park DG, Hong SG, Jang E, Shin JD (2019) Assessment of an optimum biochar application rate for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation. *Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(1), 39-48. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.1.39>.
10. Woo SH (2013) Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology*, 19(3), 201-211. <https://doi.org/10.7464/ksct.2013.19.3.201>.
11. Shin JD, Park DG, Kim HS, Lee SI, Hong SG (2020) Evaluation of agro-environmental effect and soil carbon sequestration to different application ratios of supplemented biochar pellet in the paddy during rice cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 39(2), 114-121. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.2.15>.
12. Ryu DB, Jeong YJ, Shim JH, Kim SH, Jeon SH, Lee DW, Yun JJ (2024) Contribution of food waste-mixed livestock manure pellet compost to soil chemical properties and kimchi cabbage (*Brassica rapa* L.) yield. *Journal of Agriculture and Life Science*, 58, 41-47. <https://doi.org/10.14397/jals.2024.58.5.41>.
13. Kuz'yakov Y, Bogomolova I, Glaser B (2014) Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 70, 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.021>.
14. Hong SC, Yu SY, Kim KS, Lee GH, Song SN (2020) Effects of biochar on early growth and nutrient content of vegetable seedlings.

- Korean Journal of Environmental Agriculture, 39(1), 50-57. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.1.7>.
15. Kang SW, Lee WJ, Jeong HG, Park JH, Lee JH, Yun JJ, Cho JS (2018) Effect of application levels of inorganic fertilizer with biochar on corn growth in an upland field. Korean Society of Soil Science and Fertilizer, 51(4), 547-554. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.547>.
 16. 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>.
 17. Kim JG, Lee KB, Lee SB, Lee DB, Kim SJ (1999) The effect of long-term application of different organic material sources on chemical properties of upland soil. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 32(3), 239-253.
 18. Lee SH, Jeong YJ, Kwon OY, Na HS, Cho HJ, Shim JH (2023) Effect of continuous application for growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in greenhouse using food waste compost with manure. Journal of Agriculture and Life Science, 57(1), 25-34. <https://doi.org/10.14397/jals.2023.57.1.25>.
 19. Jeong YJ, Lee SH, Na HS, Kim SH, Kwon SI, Shim JH (2024) Effect on growth and yield of red pepper (*Capsicum annuum* L.) by the application ratio of food waste compost with manure under upland. Journal of Agriculture and Life Science, 58(2), 43-51. <https://doi.org/10.14397/jals.2024.58.2.43>.
 20. Byeon JE, Kim SH, Shim JH, Jeon SH, Lee YH, Kwon SI (2023) Effects of rice straw compost application on soil chemical properties and soil organic carbon stock in paddy fields. Korean Journal of Crop Science, 68(2), 90-96. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.2.090>.
 21. Kim SS, Lee YN, Lee DW, Shim JH, Jeon SH, Roh AS, 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(1), 118-124. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2025.58.1.118>.
 22. Ghani A, Dexter M, Perrott KW (2003) Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. Soil Biology and Biochemistry, 35(9), 1231-1243. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00186-X).
 23. Lee YH, Kim MS, Park SJ, Hwang HY, Kim SH (2020) Assessment of soil organic carbon fractions and stocks under different farming practice in a single maize cropping system. Korean Society of Soil Science and Fertilizer, 53(4), 626-634. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.626>.
 24. Hayes MH (2006) Solvent systems for the isolation of organic components from soils. Soil Science Society of America Journal, 70(3), 986-994. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0107>.
 25. Kang JS, Suh JM, Shin HM, Cho JH, Hong CO (2013) Effects of compost application and plastic mulching on soil carbon sequestration in upland soil. Korean Journal of Environmental Agriculture, 32(4), 260-267. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2013.32.4.260>.
 26. Zhou X, Li J, Zhang J, Deng F, Chen Y, Zhou P, Li D (2022) Bioaugmentation mechanism on humic acid formation during composting of food waste. Science of the Total Environment, 830, 154783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154783>.
 27. Arlauskienė A, Maikstienienė S (2010) The effect of cover crop and straw applied for manuring on spring barley yield and agrochemical soil properties. Zemdirbyste-Agriculture, 97(2), 61-72.
 28. Planning C (2003) Natural Resources Conservation Service.
 29. Lee SG, Lee HJ, Kim SK, Choi CS, Park ST, Jang YA, Do KR (2015) Effects of vernalization, temperature, and soil drying periods on the growth and yield of Chinese cabbage. Horticultural Science and Technology, 33(6), 820-828. <https://doi.org/10.7235/hort.2015.15076>.
 30. Christl I, Knicker H, Kogel-Knabner I, Kretzschmar R (2000) Chemical heterogeneity of humic substances: characterization of size fractions obtained by hollow-fibre ultrafiltration. European Journal of Soil Science, 51(4), 617-625. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2000.00352.x>.