

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.3.246>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Evaluation of Potential Organic Resources as Low Carbon-Emitting Soil Amendment in a Red Pepper Cultivated Soil

Yeomyeong Lee¹, Hyerin An¹, Sohee Yoon¹, Chang Hoon Lee², Seung Tak Jeong³, and Sang Yoon Kim^{4,5*}

¹Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

²Professor, Department of Fruit Science, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

³Researcher, Horticultural & Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Korea

⁴Professor, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

⁵Professor, Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: sykim@snu.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 1, 2023

Revised: August 15, 2023

Accepted: August 17, 2023

Edited by

Won-Pyo Park,
Jeju National University, Korea

ORCID

Seung Tak Jeong
<https://orcid.org/0000-0003-1765-1355>

Sang Yoon Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Application of soil organic matter (SOM) is one of the most important strategies to enhance soil quality and combat climate changes by mainly increasing soil carbon stocks in agriculture. However, there is still a lack of information on soil respiration rate and temperature sensitivity in soils amended with different organic amendments in red pepper cultivation soil. To evaluate effects of different organic resources on enhancing soil carbon (C) balance in red pepper cultivation soil, four different low-carbon organic amendments (red pepper residue, compost, rice hull biochar, and wood biochar) with different application levels (0, 5, 10, and 20 Mg d.w ha⁻¹) were set on a laboratory experiment by investing soil respiration rate, Q₁₀ value, and soil chemical properties including pH, total C, dissolved organic C, etc. This study showed that all organic amendments significantly increased soil C input, showing the highest mean value (49.8 mg C) in NPK+wood biochar treatment as followed by NPK+rice husk biochar (38.7 mg C) > NPK+red pepper residue (33.3 mg C) > NPK+compost (26.7 mg C). However, NPK+rice husk biochar showed C output, showing the lowest mean soil respiration rates (0.86 mg C) during the incubation as followed by NPK+compost (1.08 mg C) > NPK+wood biochar (1.13 mg C) > NPK+red pepper residue (2.70 mg C) during the experiment. The C balance was the highest in the NPK+wood biochar (48.7 mg ΔC) mainly due to increased C input as compared to low C output. This result might be due to having different chemical properties that possessed a more stable C source than easily degradable C in the biomass. As an indicator of temperature sensitivity, the Q₁₀ value was the highest in NPK+red pepper residue treatment (1.38) that could be comparatively sensitive for SOM degradation with rising air temperature and then followed by NPK+compost (1.21) > NPK+wood biochar (1.19) > NPK+rice hull biochar (1.18). In conclusion, wood biochar application could be a better soil management strategy to increase soil C storage particularly in the greenhouse conditions, showing high temperature during the cultivation.

Keywords: Biochar, Carbon balance, Compost, Pepper residue, Q₁₀ value, Soil organic matter



Soil carbon input, output, and balance of different organic material application regimes at the different levels under laboratory-scale experiments.

Treatment [†]	OM application level (Mg ha ⁻¹)	C input (A) (mg C)	C output (B) (mg C)	C balance [‡] (A - B) (mg ΔC)
NPK + R	5	14.3 k [§]	0.71 c	13.5 j
	10	28.5 g	2.66 b	25.8 g
	20	57.0 c	4.74 a	52.3 c
	Mean	33.3	2.70	30.6
NPK + Com	5	11.5 l	0.47 c	11.0 k
	10	22.9 h	1.05 c	21.9 h
	20	45.8 d	1.72 bc	44.1 d
	Mean	26.7	1.08	25.7
NPK + RB	5	16.6 j	0.45 c	16.1 i
	10	33.2 f	1.00 c	32.2 f
	20	66.4 b	1.14 c	65.2 b
	Mean	38.7	0.86	37.9
NPK + WB	5	21.3 i	0.89 c	20.5 h
	10	42.7 e	1.24 bc	41.5 e
	20	85.4 a	1.25 bc	84.1 a
	Mean	49.8	1.13	48.7
Type (A)		***	***	***
Level (B)		***	***	***
A × B		***	***	***

[†]Incubation temperature: 25°C; R: Red pepper residue; Com: Compost; RB: Rice hull biochar; WB: Wood biochar.

[‡]C balance: C input (OM application level × C content) - C output (OM application soil - NPK soil respiration (0.24 g by urea)).

[§]The different letter means a significant difference among the treatments (at $p \leq 0.05$, Tukey's test). The same letter indicates no significant differences among treatments. *, **, and *** donate significant differences at levels of $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

Introduction

유기물은 작물에게 필요한 양분 (nutrient)을 공급할 뿐만 아니라 토양질 (soil quality)을 향상시키는 데 매우 중요한 역할을 수행한다. 농경지에서 유기물 사용은 토양 입단화를 촉진시켜 공극을 발달시키고, 토양의 통기성 및 보수력을 증진시켜, 전반적인 물리성을 개선할 수 있다 (Ouedraogo et al., 2001; Barzegar et al., 2002; Tavali, 2021). 더불어 유기물은 자체적으로 높은 양이온 교환용량을 지니고 있기 때문에, 토양에서 수분과 양분보유능을 증진시켜 작물 생산에 긍정적인 영향을 줄 수 있다 (Kimetu et al., 2008; Thangarajan et al., 2013). 또한, 토양유기물은 토양미생물의 에너지원을 공급함으로써 생물다양성과 토양건강성을 개선할 수 있기 때문에 농업에서 지속가능한 작물생산을 위해 필수 요소이기도 하다 (Lima et al., 2009; Reeve et al., 2012; Thangarajan et al., 2013; Kätterer et al., 2014).

토양 내 유기물 함량을 증진시키기 위해 풋거름작물 재배, 퇴비 및 바이오차 활용, 퇴비 혼용 등 유기자재의 전체적인 투입량을 증가시키기 위한 기술을 중심으로 연구가 수행되어 왔다 (Fan et al., 2014; Iwasaki et al., 2017; Gross and Glaser, 2021; An et al., 2022). 그러나 토양 내 유기자재의 투입은 미생물의 분해 과정을 통해 최종적으로 CO₂ 또는

CH₄과 같은 온실가스의 배출을 증가시켜 지구온난화를 가속화시킬 가능성이 있기 때문에 (Thangarajan et al., 2013), 토양 유기물을 증진하면서 상대적으로 분해속도가 낮은 저탄소 유기자재에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 현재까지의 기존 연구는 주로 밭 토양보다는 상대적으로 유기물 축적량이 많은 논 토양을 중심으로 다수의 연구가 수행되어 왔다 (Zhang et al., 2012; Hwang et al., 2015; Chen et al., 2016). 또한 비교적 고온조건에서 집약적으로 재배하는 시설재배지의 경우 유기물 분해 속도가 높을 것으로 예상되나, 이에 대한 연구는 미미한 실정이다. 고추 (*Capsicum annuum* L.)는 2021년 기준 노지와 시설하우스 등을 포함하여 약 37,761 ha 면적에서 재배되고 있으며, 주요 채소류 중에서 가장 넓은 면적을 차지하는 중요한 작물이다 (KOSIS, 2022). 고추는 과채류 중에서도 고온성 채소류에 속하며, 실제 노지에 비해 상대적으로 고온조건인 시설하우스에서 주로 재배되고 있다.

일반적으로 토양에서 유기물의 분해 속도는 C/N율, 리그닌 함량 등과 같은 유기자재 자체의 화학적 조성뿐만 아니라 온도, 수분함량과 같은 토양환경 조건 등에 따라 결정된다 (Sierra et al., 2015; Xu et al., 2016; Hall et al., 2020). 특히 투입된 유기자재의 특성에 따라 토양환경 조건 또한 동시에 변할 수 있기 때문에 유기자재 종류에 따라 그 분해 양상에 차이가 날 수 있다. 퇴비 또는 바이오차와 같은 난분해성 유기자재는 대부분 구조적으로 안정한 형태를 지니며, 주로 미생물이 분해하기 어려운 형태인 리그닌과 같은 성분을 다량 함유하고 있어, 토양에 투입 시 장기간 분해되지 않고 저장될 수 있기 때문에 저탄소 유기자재로서 잠재력이 높은 제재로 평가되고 있다 (Bolan et al., 2012; Lee et al., 2021; Park et al., 2021). 또한 분해에 안정한 유기자재 투입을 통해 토양 내 유기물 축적량을 높여 전반적인 토양질을 개선함과 동시에 유기물 분해로 인한 온실가스 배출 또한 완화시킬 수 있기 때문에 그 활용 가치 또한 충분할 것으로 판단된다. 반면, 고추 수확 후 발생하는 잔사의 경우 상대적으로 이분해성이며 현장에서 쉽게 활용할 수 있는 유기물원으로 대부분 토양에 직접 환원하여 자연 부속시키는 경우가 많다. 하지만 다른 측면에서 잔사는 목질부(줄기 부위)에 분해가 어려운 형태의 리그닌과 같은 성분을 포함하고 있기 때문에 (Kim et al., 2004), 저탄소 유기자재로서 잠재적 가치가 높을 것으로 판단되나, 유기자재의 종류와 분해 특성에 대한 정밀한 평가와 자료는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시설재배지 고추재배 토양에서 유기물 증진을 목적으로 투입될 수 있는 저탄소 유기자재의 종류 및 온도에 따라 기본적인 토양 탄소 투입량 및 분해 잠재성 등에 차이가 있을 것이라는 가설을 설정하고 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 고추재배지 토양에서 여러 저탄소 유기자재 투입을 통해 1) 토양호흡량, 2) 탄소수지, 3) 온도민감성 (Q₁₀), 4) 토양의 화학적 특성을 평가함으로써 고추재배지 토양의 유기물 증진 및 분해 잠재성에 대한 기초자료를 제공하고, 저탄소 유기자재로서 잠재력 있는 최적 제재를 선별하고자 하였다.

Materials and Methods

고추재배지 토양시료 채취 저탄소 유기자재 투입에 따른 고추재배지 토양 호흡량 및 온도민감성을 평가하기 위해 경남 진주 대곡면 소재의 고추 시설재배지에서 토양시료를 채취하였다. 현장에서 오우거 시료채취기를 이용하여

Table 1. Chemical properties of soils before the experiment (n = 3).

pH (1:5)	EC [†] (dS m ⁻¹)	Total C (g kg ⁻¹)	DOC (mg kg ⁻¹)	Total N (g kg ⁻¹)	DON (mg kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)			
							K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
6.45 ± 0.04	9.24 ± 1.12	16.8 ± 0.83	103 ± 22.6	2.9 ± 0.04	890 ± 5.22	639.0 ± 5.96	2.2 ± 0.06	13.0 ± 0.11	4.2 ± 0.04	0.7 ± 0.02

[†]EC: Electrical conductivity; DOC: Dissolved organic carbon; DON: Dissolved organic nitrogen; Av. P₂O₅: Available P₂O₅; Exch. cations: Exchangeable cations.

표층토 (0 - 15 cm)를 채취하였으며, 풍건 후 2 mm체에 통과시켜 분석용 시료로 사용하였다. 시험토양은 EC가 높고 유효인산 및 교환성 양이온 함량이 높은 일반적인 시설재배지의 특성을 나타냈다 (Table 1).

유기자재 선정 및 처리방법 본 연구에서는 고추재배지에서 활용될 수 있는 대표 유기자재로 고추잔사 (red pepper residue, R), 퇴비 (compost, Com), 왕겨바이오차 (rice hull biochar, RB), 목재바이오차 (wood biochar, WB)를 선정하였다. 고추잔사는 실제 시설재배지에서 수확 후 직접 수집한 고추잔사를 건조한 다음 분쇄하여 사용하였으며, 퇴비, 왕겨 및 목재바이오차는 일반적인 효과를 평가하기 위해 시판되고 있는 제품을 구매하여 사용하였다. 사용된 모든 종류의 유기자재는 분쇄 후 2 mm체로 걸러 균질화 시킨 뒤 실험에 이용하였으며, 공시재료의 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Chemical properties of organic material used in this study (n = 3).

Parameter	pH (1:10)	Total C (g kg ⁻¹)	Total N (g kg ⁻¹)	C/N ratio	DOC [†] (g kg ⁻¹)	DON (mg kg ⁻¹)
Red pepper residue (R)	5.74 d [‡]	380.1 b	23.4 a	16.3 c	49.3 a	4,552 a
Compost (Com)	7.01 c	305.4 b	17.8 b	17.4 c	6.0 b	4,923 a
Rice hull biochar (RB)	10.2 a	442.5 ab	6.8 c	64.2 a	0.16 c	11.2 b
Wood biochar (WB)	7.30 b	569.2 a	13.6 b	42.0 b	0.94 c	98.1 b

[†]DOC: Dissolved organic carbon; DON: Dissolved organic nitrogen.

[‡]The different letter means a significant difference among the treatments (at $p \leq 0.05$, Tukey's test). The same letter indicates no significant differences among treatments.

토양 및 유기자재의 이화학적 특성 토양 및 유기자재의 이화학성은 토양 및 식물체 분석법 (NAS, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양 및 공시재료의 산도 (pH)를 분석하기 위해 시료와 증류수를 1:5 또는 1:10 비율로 30분간 각각 진탕한 후 pH meter (Orion star A211, Thermo Scientific, Indonesia)를 이용하여 측정하였으며, 토양의 경우 동일한 침출액으로 전기전도도 (Orion star A212, Thermo Scientific, Indonesia)를 측정하였다. 총 탄소 및 질소함량은 원소분석기 (Elemental A2400II, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 조사하였으며, 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC) 및 질소 (dissolved organic nitrogen, DON)는 습도와 3차 증류수를 1:10 비율로 하여 1시간 진탕한 후, 여과 (0.45 μm , acrodisc syringe filter)하여 총유기탄소 분석기 (TOC-VCPN, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 시험 전 토양의 유효인산 (available P₂O₅)은 Lancaster법, 교환성양이온 (exchangeable cations)은 1 N NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 침출하여 Atomic absorption spectrophotometer (AA-7000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 정량하였다.

토양 호흡량 평가 고추재배지 토양에서 유기자재 처리에 따른 토양호흡량을 평가하기 위해 선행연구에서 보고된 실험방법을 활용하였다 (Lee et al., 2021). 125 mL serum vial에 토양시료 15 g을 넣고, 농촌진흥청 고추재배 표준 시비량 (NAS, 2019)에 준하여 질소 (N) - 인산 (P₂O₅) - 가리 (K₂O)를 225-64-101 kg ha⁻¹로 시비처리 한 다음 유기자재를 0, 0.25, 0.5, 1% (wt wt⁻¹), 즉 현장 기준으로 0 (NPK), 5, 10, 20 Mg d.w ha⁻¹을 토양과 혼합하여 각각 처리하였다. 수분조건은 전체공극의 약 60% (wt wt⁻¹)에 해당하는 수분을 추가하여 25°C 항온기에 난괴법 3반복으로 배치한 후 전배양 (pre-incubation)을 실시하였으며, 이때 공극률은 용적밀도 (1.2 g cm⁻³)와 입자밀도 (2.65 g cm⁻³)를 이용하

여 계산하였다. 증발로 인해 부족해진 토양 수분을 보충하기 위해 3일 간격으로 vial 무게를 측정하여 증발된 만큼 증류수를 공급하였다. 토양 호흡량을 평가하기 위해 vial 밀폐 전 및 밀폐 후 30분 후 각각 5 mL의 가스시료를 채취하였으며 시료채취 간격은 주 1회 수행되었다. 채취된 가스 시료는 gas chromatography (GC-2014, Shimadzu, Japan)를 이용하여 CO₂ 및 CH₄를 정량 분석하였으며, 토양호흡량은 아래 Eq. 1을 이용하여 계산하였다 (Curiel Yuste et al., 2007; Ko et al., 2016; Lee et al., 2021). 배양일수는 초기농도에 비해 가스농도가 더 이상 유의미하게 증가하지 않는 시점에서 시료채취를 종료하여 약 4주간 진행되었다.

$$\text{Soil respiration rate (SR)} = \frac{PV}{RT} \times \frac{\Delta C}{\Delta T} \times \frac{AW}{\text{soil}} \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 1})$$

Soil respiration rate (토양호흡량, SR) : 이산화탄소 및 메탄 배출량 ($\mu\text{g soil g}^{-1} \text{ day}^{-1}$)

P : 1기압 (atm)

V : 용기 부피 (L)

R : 0.08205 (L atm/mol K)

T : 273+항온온도 (°C)

$\Delta C / \Delta t$: 단위시간당 가스농도차 (ppm)

AW : 탄소원자량

Soil : 토양시료의 무게 (g)

탄소 수지 평가 고추재배지 토양에서 유기자재 처리에 따른 토양 탄소 수지를 평가하기 위해 아래 Eq. 2를 이용하였다.

$$\text{C balance (mg}\Delta\text{C)} = \text{C input (mgC)} - \text{C output (mgC)} \quad (\text{Eq. 2})$$

C input : 총 투입 탄소량 (유기자재 투입량 (g) × 유기자재 탄소함량 (mg C g⁻¹))

C output : 탄소 제거량 (유기자재 투입 토양 호흡량 (mg CO₂-C + CH₄-C) - NPK 토양 호흡량 (mg CO₂-C + CH₄-C))

Q₁₀ 지수 평가 고추재배지 토양호흡량에 대한 온도민감성을 평가하기 위해 위와 동일한 방법으로 토양에 각 유기자재를 10 Mg d.w ha⁻¹씩 처리한 vial을 제작하였다. 15, 20, 25, 30, 35°C 항온기에 난괴법 3반복으로 각각 배치한 후 배양을 실시하였으며, 동일한 방법으로 가스시료를 채취하여 발생하는 CO₂를 정량한 후 5°C씩 온도가 증가하는 조건에서 토양호흡량 변화를 나타내는 Q₁₀값을 아래의 Eq. 3을 이용하여 산정하였다 (Chen et al., 2010; Ko et al., 2016).

$$R = ae^{bT} \quad (\text{Eq. 3})$$

R : 토양호흡량 (mg CO₂-C soil kg⁻¹)

a : 경험식인자 (fitting parameter)

T : 온도 (°C)

b : 온도에 의존하는 토양호흡인자

통계처리 통계분석은 SAS package (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 처리 간 통계적인 유의성이 인정될 경우, Tukey's test를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의수준에서 사후 분석을 실시하여 각 처리간 효과를 비교하였다. 유기자재 종류 및 처리량간 차이는 Two-way ANOVA 분석을 통해 수행되었다.

Results and Discussion

유기자재 처리에 따른 토양 호흡량 평가 고추 재배지에서 유기자재 처리에 따른 토양호흡량을 실내실험을 통해 평가한 결과 (Fig. 1), 유기자재 종류와 관계없이 전반적인 토양호흡량은 유기자재 처리 후 3주차까지 점차 증가하다 이후부터 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였다. 고추잔사 처리구의 경우 다른 처리구들과 달리 1주차 토양호흡량이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며 (Fig. 1A), 이는 상대적으로 이분해성인 용존 유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC) 함량이 많았던 고추잔사 투입으로 인해 토양 미생물의 초기 유기물 분해가 활발히 진행되었기 때문인 것으로 판단된다 (Table 2). 배양기간 중 총 토양호흡량을 평가한 결과 (Fig. 2), 유기자재를 처리하지 않은 NPK 처리구 (control)에서 가장 낮았으며, NPK 처리구와 비교하여 유기자재 처리 시 토양호흡량이 거의 대부분 처리구에서 유의하게 증가하였다. 유기자재 종류 및 시용량에 따른 전반적인 호흡량 증가율을 비교한 결과 (Fig. 3), 고추잔사 처리구에서 13.6으로 가장 높았으며, 이후 퇴비 (5.72) > 왕겨 바이오차 (3.74) > 목재 바이오차 (3.72) 순으로 낮았다. 토양 유기물의 분해 (decomposition)는 토양호흡량 (soil respiration rate)에 의해 결정되며, 이는 주로 토양 내 미생물 대사에 필요한 탄소기질의 종류 및 이·난분해성 탄소 함량 등에 의해 영향을 받는다 (Eberwein et al., 2015; Ko et al.,

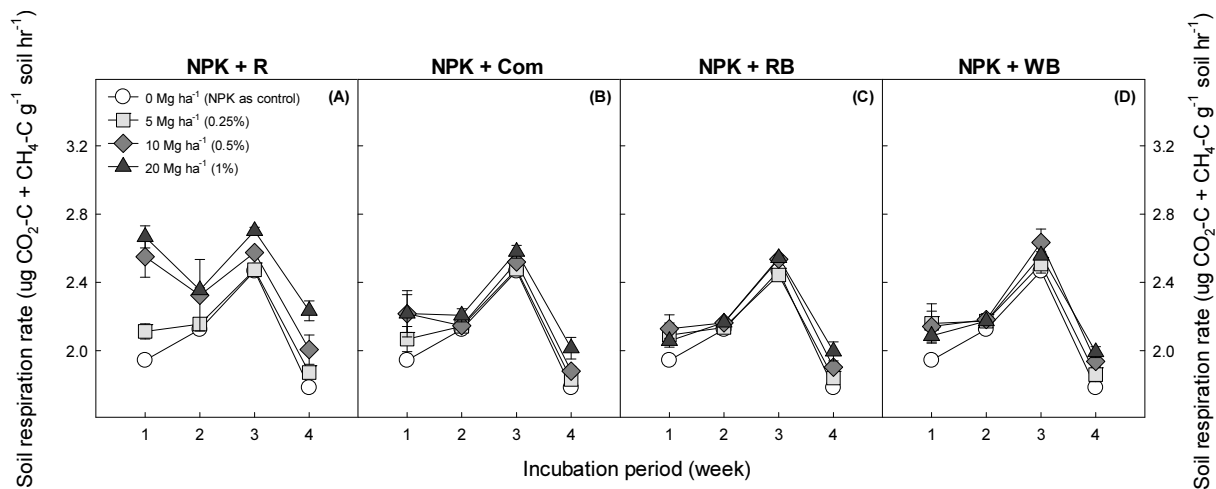


Fig. 1. Changes in soil respiration rates under different organic material application regimes over 4 weeks. Vertical bars represent standard deviations ($n = 4$). R: Red pepper residue (A); Com: Compost (B); RB: Rice hull biochar (C); WB: Wood biochar (D).

2016). 본 연구에서도 기존 연구와 마찬가지로 이분해성인 고추잔사 처리구에 비해 상대적으로 난분해성인 퇴비 및 바이오차 처리구에서 유기자재 투입량 대비 분해량이 더욱 완만하게 증가하는 결과를 보였으며, 특히 목재 및 왕겨바이오차의 경우 더 큰 분해 지연효과를 나타냈다(Fig. 3). 특히 퇴비와 바이오차를 각각 사용할 경우, 탄소 배출 저감 측면에서 고추잔사 동량 처리구 대비 퇴비는 63%, 바이오차의 경우 78 - 79%의 저감 효과가 있는 것으로 조사되었다. 따라서 고추재배지에서 고추잔사 대비 퇴비 및 바이오차와 같은 안정된 유기자재의 투입은 낮은 분해율로 인해 탄소 배출량 저감에 효과가 높은 제재로 판단되며, 추후 고추 재배지의 저탄소 토양관리에 적합할 것으로 판단된다.

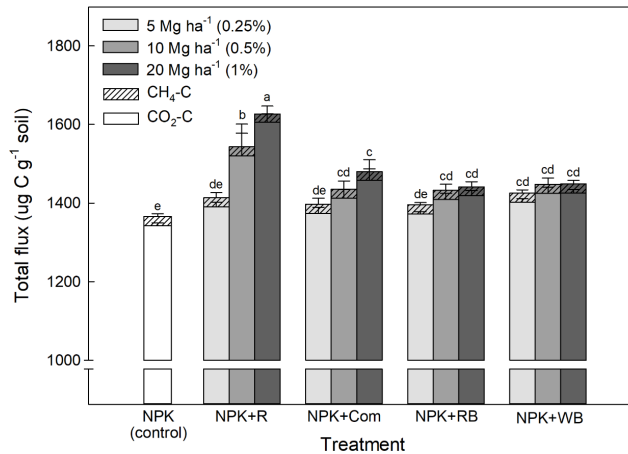


Fig. 2. Total soil respiration under different organic material application regimes over 4 weeks. Vertical bars represent standard deviations (n = 4). The different letters indicate significant differences among treatments ($p \leq 0.05$, Tukey's test). R: Red pepper residue (A); Com: Compost (B); RB: Rice hull biochar (C); WB: Wood biochar (D).

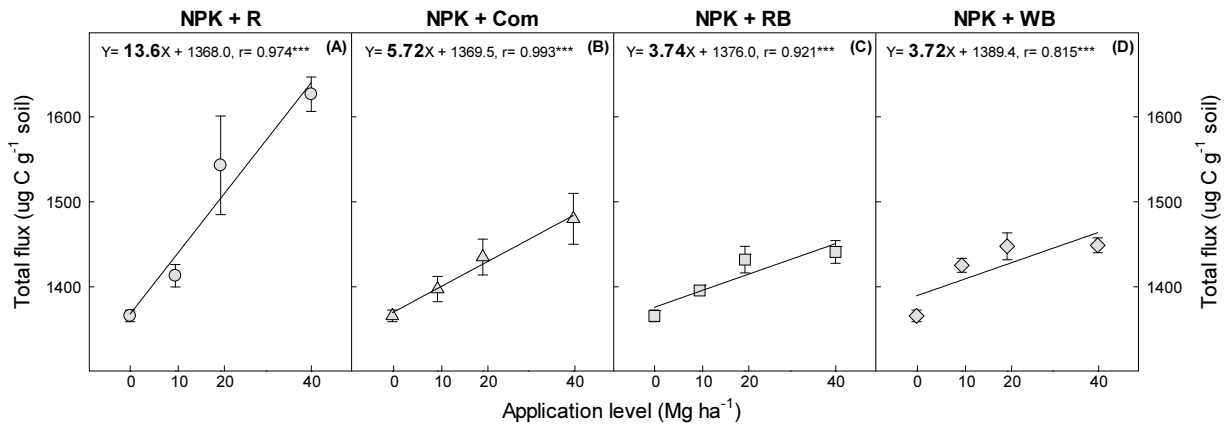


Fig. 3. Increase in soil respiration rate under different organic material application with increasing the application levels. Vertical bars represent standard deviations (n = 4). R: Red pepper residue (A); Com: Compost (B); RB: Rice hull biochar (C); WB: Wood biochar (D).

유기자재 처리에 따른 탄소수지 평가 유기자재 처리에 따른 탄소수지를 평가하기 위해 탄소투입량과 제거량을 평가한 결과, 탄소투입량과 제거량 모두 유기자재의 종류와 처리량에 따라 유의미하게 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 3). 본 연구에서는 평균적으로 총 탄소함량이 가장 높았던 목재바이오차(49.8 mg C)에서 가장 높은 탄소

투입량을 나타냈으며 이후 왕겨바이오차 (38.7 mg C) > 고추잔사 (33.3 mg C) > 퇴비 (26.7 mg C) 순으로 높았다 (Table 3). 탄소제거량의 경우 상대적으로 이분해성 유기자재인 고추잔사 (2.7 mg C)에서 가장 높은 제거량을 나타내는 것으로 조사되었으며, 이후 목재바이오차 (1.13 mg C), 퇴비 (1.08 mg C), 왕겨바이오차 (0.86 mg C) 순으로 낮은 특성을 보였다. 전체적인 탄소투입량 및 제거량을 종합하여 유기자재 사용에 따른 탄소수지를 평가한 결과 평균적으로 목재바이오차가 가장 높은 탄소수지를 보였으며, 왕겨바이오차 > 고추잔사 > 퇴비 순으로 높게 나타났다. 이는 비교적 난분해성인 바이오차의 특성에 의해 투입된 탄소량 대비 분해되어 제거되는 탄소량이 미미했기 때문인 것으로 판단된다. 최근 연구에 따르면 경작지에서 분해저항성이 높은 바이오차와 같은 유기자재의 투입은 토양 탄소수지를 개선하는 것으로 알려져 있으며, 주로 탄소제거량 보다는 투입량에 의해 결정되는 것으로 보고된 바 있다 (Majumder et al., 2019; Canatoy et al., 2022a, 2022b). 따라서 탄소 투입량이 높고, 제거량이 적은 바이오차의 투입이 탄소수지를 증진할 수 있는 효과적인 유기물 관리 방안이 될 수 있을 것으로 판단한다. 고추잔사의 경우 탄소 투입량은 다소 높은 편이었으나, 제거량이 상대적으로 높아 전반적인 탄소수지 증진 측면에서는 덜 효과적이었다. 다만, 본 연구에서 퇴비는 비교적 난분해성 유기자재임에도 불구하고 고추잔사에 비해 더 낮은 탄소수지를 보였다 (Table 3). 기존 연구

Table 3. Soil carbon input, output, and balance of different organic material application regimes at the different levels under laboratory-scale experiments (n = 4).

Treatment [†]	OM application level (Mg ha ⁻¹)	C input (A) (mg C)	C output (B) (mg C)	C balance [‡] (A - B) (mg ΔC)
NPK + R	5	14.3 k [§]	0.71 c	13.5 j
	10	28.5 g	2.66 b	25.8 g
	20	57.0 c	4.74 a	52.3 c
	Mean	33.3	2.70	30.6
NPK + Com	5	11.5 l	0.47 c	11.0 k
	10	22.9 h	1.05 c	21.9 h
	20	45.8 d	1.72 bc	44.1 d
	Mean	26.7	1.08	25.7
NPK + RB	5	16.6 j	0.45 c	16.1 i
	10	33.2 f	1.00 c	32.2 f
	20	66.4 b	1.14 c	65.2 b
	Mean	38.7	0.86	37.9
NPK + WB	5	21.3 i	0.89 c	20.5 h
	10	42.7 e	1.24 bc	41.5 e
	20	85.4 a	1.25 bc	84.1 a
	Mean	49.8	1.13	48.7
Type (A)		***	***	***
Level (B)		***	***	***
A × B		***	***	***

[†]Incubation temperature: 25°C; R: Red pepper residue; Com: Compost; RB: Rice hull biochar; WB: Wood biochar.

[‡]C balance: C input (OM application level × C content) - C output (OM application soil - NPK soil respiration (0.24 g by urea)).

[§]The different letter means a significant difference among the treatments (at $p \leq 0.05$, Tukey's test). The same letter indicates no significant differences among treatments. *, **, and *** donate significant differences at levels of $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

에서 퇴비는 부속 과정 중 평균적으로 초기탄소량의 절반에 해당하는 약 49%가 가스 형태로 손실될 수 있다고 보고된 바 있다 (Jeong et al., 2018; Zhang et al., 2021). 본 연구에서 사용된 모든 유기자재 중 퇴비의 유기탄소 함량이 가장 낮았으며 (305.4 g kg⁻¹), 퇴비화 과정 중 손실된 탄소로 인해 퇴비자체의 탄소 함량이 전반적으로 낮아진 것으로 판단된다. 따라서 퇴비의 경우 분해되는 탄소량은 적었으나 (Table 3), 고추잔사에 비해 낮았던 퇴비 자체의 탄소함량으로 인해 전반적인 탄소투입량이 감소하였기 때문에 유기자재 중 탄소수지가 가장 낮았던 것으로 판단된다. 전체적으로 탄소수지는 고추잔사, 퇴비에 비해 바이오차 종류에서 높은 것으로 평가되었으며, 특히 목재바이오차에서 더 유의미한 증진 효과를 나타내는 것으로 판단된다. 유기자재 사용량의 경우, 유기자재의 종류와 관계없이 처리량이 증가됨에 따라 탄소수지는 유의한 효과를 보였다. 결론적으로 유기자재의 종류에 따른 탄소수지를 종합적으로 평가했을 때, 저탄소 유기자재로 바이오차가 가장 잠재성 있는 제재로 평가되며, 특히 목재바이오차가 다른 제재에 비해 유기물 투입량이 상대적으로 높고 비교적 분해량이 낮아 토양의 전반적인 유기물 축적량을 효과적으로 높일 수 있는 최적의 제재로 판단된다.

유기자재 처리에 따른 온도민감도 (Q₁₀) 평가 일반적으로 Q₁₀ 지수는 온도가 10°C 상승할 때 토양에서 방출되는 호흡산물의 변화비를 의미하며, 이 지수가 높을수록 온도에 대한 민감도가 높아 온도 증가에 따라 토양유기물 분해가 촉진될 수 있음을 시사한다 (Kirschbaum, 1995; Heimann and Reichstein, 2008). 본 연구에서 유기자재 처리에 따른 Q₁₀ 지수는 고추잔사 처리구 (1.38)에서 가장 높았던 반면 퇴비 (1.21), 왕겨 (1.18) 및 목재 (1.19) 바이오차 처리구의 경우 상대적으로 낮은 수치를 나타냈으며, 특히 바이오차 종류가 더 효과적으로 Q₁₀ 지수를 낮추는 것으로 조사되었다 (Fig. 4). 많은 연구에서 토양 온도가 토양호흡에 영향을 주는 중요한 환경인자로 보고된 바 있으며, 유기물의 분해에도 직접적인 영향을 미칠 수 있다 (Lloyd and Taylor, 1994; Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Conant et al., 2011). 결과적으로 비교적 분해안정성이 높은 유기자재인 바이오차는 온도증가에 덜 민감하게 반응하기 때문에 추후 기후변화로 인하여 대기 온도가 증가하더라도 유기물 분해가 촉진될 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 따라서 고추잔사와 같은 생분해성 유기자재 보다는 바이오차화 시키는 방법 등을 이용하여 안정된 유기자재, 즉 저탄소 유기자재를 투입하는 것이 토양 탄소를 증진할 수 있는 합리적인 토양관리 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

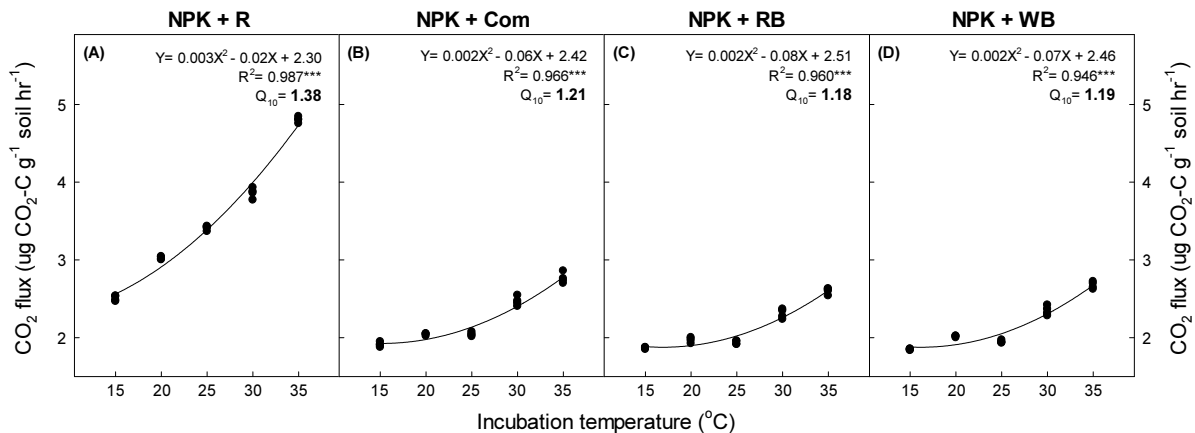


Fig. 4. Changes in soil respiration rates at five different temperatures and temperature sensitivity (Q₁₀) in soils treated with different organic material (n = 4). Each organic material was treated with 10 Mg d.w ha⁻¹. R: Red pepper residue (A); Com: Compost (B); RB: Rice hull biochar (C); WB: Wood biochar (D).

유기자재 처리에 따른 토양특성 변화 고추 재배지에서 유기자재 처리에 따른 토양 특성을 평가한 결과 (Table 4), 유기자재의 종류에 따라서는 pH, C/N율, DOC함량이 차이 나며, 대부분 유기자재 처리량에 따라 유의한 영향을 받는 것으로 조사되었다. 토양 pH는 유기물을 분해하는 미생물의 활성에 영향을 미치는 직·간접적 요인이며 (Adams and Adams, 1983; Bååth and Anderson, 2003), 이에 따라 유기물 분해속도 또한 영향을 받을 것이라고 예상된다. 많은 선행연구에서 중성범위 (6.5 - 7.5)의 pH에서 미생물 활성이 최대가 되며, 그 호흡량 즉 분해량 또한 증가한다고 보고된 바 있다 (Tian et al., 2008; Rousk et al., 2009). 본 연구에서 토양 pH는 시험 전 토양 (6.45)에 비해 NPK (5.47) 처리구를 비롯한 유기자재 처리구에서 대체로 낮아졌다 (Table 4). 유기자재 처리구 중에서는 고추잔사 처리구에서 평균 토양산도가 5.61로 가장 높게 나타났으며, 이후 왕겨바이오차 (5.43) > 퇴비 (5.40) > 목재바이오차 (5.36) 순으로 낮았다. 또한 토양 pH는 유기자재 처리량에 따라서는 유의미한 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이는 비교적 pH 중성범위에 가까운 고추잔사 처리가 미생물 활성 증진과 토양호흡량 증가에 긍정적인 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만 일부 연구에서는 토양 pH보다 토양의 유기탄소 함량 및 유기자재의 화학적 조성 차이가 토양호흡량과 더욱

Table 4. Chemical properties of soils after the experiment under different organic material application regimes at the different application levels (n = 4).

Treatment	OM application level (Mg ha ⁻¹)	pH (1:5)	Total C (g kg ⁻¹)	Total N (g kg ⁻¹)	CN ratio	DOC (mg kg ⁻¹)	DON (mg kg ⁻¹)
NPK	0	5.47 bcd [†]	15.9 bc	2.75 f	5.82 e	462.2 a	1,235.9 efg
	5	5.52 bc	16.5 abc	2.78 def	5.93 de	429.0 a	1,264.7 defg
NPK + R [†]	10	5.58 ab	17.1 abc	2.92 cde	5.87 de	424.9 a	1,289.6 bcd
	20	5.73 a	17.9 abc	3.10 ab	5.77 e	462.5 a	1,402.5 a
	Mean	5.61	17.2	2.93	5.89	438.8	1,318.9
NPK + Com	5	5.45 bcd	17.6 abc	2.85 cdef	6.18 cd	444.2 a	1,252.1 defg
	10	5.37 cd	17.7 abc	2.93 bcd	6.03 cde	436.4 a	1,309.4 bc
	20	5.38 cd	19.1 ab	3.11 a	6.16 cd	447.9 a	1,370.2 a
	Mean	5.40	18.2	2.96	6.12	442.8	1,310.6
NPK + RB	5	5.42 cd	17.7 abc	2.78 def	6.36 bc	338.4 a	1,224.5 g
	10	5.39 cd	19.0 ab	2.85 cdef	6.67 b	438.9 a	1,287.1 bcd
	20	5.47 bc	21.7 a	2.93 bcd	7.42 a	389.4 a	1,267.2 def
	Mean	5.43	19.5	2.85	6.82	388.9	1,259.6
NPK + WB	5	5.39 cd	17.3 c	2.75 ef	6.27 c	434.8 a	1,225.4 fg
	10	5.39 cd	19.7 ab	2.98 abc	6.62 b	393.3 a	1,310.7 b
	20	5.31 d	21.4 ab	2.95 abc	7.24 a	400.2 a	1,268.7 cde
	Mean	5.36	19.5	2.90	6.71	409.4	1,268.3
Treatment (A)		***	ns	ns	***	ns	***
Level (B)		ns	***	***	***	ns	***
A × B		***	*	ns	***	ns	***

[†]R: Red pepper residue; Com: Compost; RB: Rice hull biochar; WB: Wood biochar; DOC: Dissolved organic carbon; DON: Dissolved organic nitrogen.

[†]The different letter means a significant difference among the treatments (at $p \leq 0.05$, Tukey's test). The same letter indicates no significant differences among treatments. ns denotes not significant, and *, **, and *** denote significant differences at levels of $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

밀접한 관계를 지닌다고 보고된 바 있다 (Pietri and Brookes, 2008; Choi et al., 2017). 본 연구에서도 토양호흡량과 직결되는 미생물 활성은 pH보다는 이용하기 쉬운 형태인 용존탄소 (DOC) 함량 및 C/N을 등과 같은 토양 및 투입된 유기자재의 화학적 특성이 유기물 분해에 더 직접적인 영향을 끼친 것으로 판단된다.

토양 총 탄소함량 (Total C)의 경우 시험 전 토양 (16.8 g g^{-1})에 비해 NPK (16.0 g g^{-1})에서 감소하였으며, 유기자재를 처리하지 않은 경우 토양 탄소함량이 감소하는 것으로 조사되었다. 이는 자연적으로 토양에 존재하는 미생물의 호흡으로 인해 지속적으로 탄소가 고갈된 것으로 해석된다. 그 결과 유기자재를 투입함에 따라 NPK 처리구와 비교하여 토양탄소함량은 유의하게 증가하였으며, 처리간 평균적으로 목재바이오차 (19.5 g kg^{-1}) \approx 왕겨바이오차 (19.5 g kg^{-1}) > 퇴비 (18.2 g kg^{-1}) > 고추잔사 (17.2 g kg^{-1}) 순으로 높았으나 통계적인 차이는 없었다. 유기자재 처리량을 증가시킬 경우 토양탄소함량 또한 처리량에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 토양 탄소함량은 토양의 질 및 비옥도의 지표로 사용된다 (Haynes, 2005). 바이오차와 같은 저탄소 유기자재의 지속적인 처리를 통한 토양 유기물의 증진은 지속가능한 농업환경을 구축하고 토양질 개선을 위한 핵심 전략이 될 수 있을 것으로 판단된다.

토양 총 질소함량 (Total N)의 경우 시험 전 토양 (2.90 g g^{-1})에 비해 NPK 처리구 (2.75 g g^{-1})에서 감소하였으며, 유기자재 처리구의 경우 NPK 처리구에 비해 다소 증가하는 경향으로 유기자재 종류에 따라서 유의한 차이를 찾을 수 없었으나, 유기자재 처리량이 증가됨에 따라서는 처리량에 비례하여 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 토양 내 DON (dissolved organic nitrogen) 함량의 경우 전반적으로 투입된 유기자재 자체적으로 DON 함량이 높았던 고추잔사와 퇴비에서 유의하게 높은 경향을 나타냈으며, 유기자재 처리량이 증가함에 따라서 유의하게 증가하는 결과를 보였다.

C/N율은 토양 및 식물체 등의 탄소 및 질소 함유비율을 의미하며, 미생물의 유기물 분해정도, 즉 토양 유기물의 무기화 속도를 평가하는 지표로 활용될 수 있다 (Probert et al., 2005). 토양 C/N율은 무기화속도 및 미생물 활성에 직간접적으로 영향을 미쳐 토양호흡량과 강한 음의 상관관계를 갖는다 (Riffaldi et al., 1996; Huang et al., 2022). 본 연구에서는 NPK 처리구와 비교하여 고추잔사 처리구를 제외하고 유기자재 투입시 C/N율이 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 특히 평균적으로 고추잔사 및 퇴비에 비해 바이오차에서 유의하게 높은 결과를 보였다. 이는 비교적 이용하기 쉬운 형태의 탄소 및 질소 (DOC 및 DON)가 많았던 점을 고려할 때 상대적으로 분해되기 쉬운 형태의 유기자재인 고추잔사 및 퇴비에서 무기화속도가 촉진되었던 것으로 해석된다. 토양 내 DOC 함량의 경우 바이오차 대비 퇴비 및 고추잔사 처리구에서 다소 높게 나타났으나 유기자재 종류 및 처리량에 따라 통계적인 유의차는 없는 것으로 조사되었다.

Conclusions

본 연구에서는 고추재배지 토양에서 저탄소 유기자재 종류 및 온도에 따른 토양 호흡량, 탄소수지, 온도민감성, 토양특성을 평가하여 고추재배지 토양의 유기물 증진을 위한 잠재력 있는 최적의 저탄소 유기물 제재를 선정하고자 하였다. 전반적인 토양호흡량 및 유기자재 투입 수준에 따른 호흡량 증가율은 이분해성인 고추잔사 처리구에 비해 비교적 난분해성인 바이오차 처리구에서 낮은 것으로 조사되었으며, 이 결과는 이·난분해성과 같은 유기자재 특성에 따라 미생물에 의한 초기 유기물 분해량에 차이가 났기 때문인 것으로 판단된다. 종합적인 탄소수지 측면에서도 목재바이오차가 다른 제재에 비해 유기물 투입량이 상대적으로 많고 분해량이 낮은 결과를 나타냈으며, Q_{10} 지수 역시 바이오차 종류에서 온도증가에 있어 덜 민감하게 반응하는 것으로 조사되었다. 또한 토양 유기자재 투입량을 증가시키면

따라 토양 탄소 함량 또한 투입량에 비례하여 증가하는 경향을 나타낸 것으로 보아 농경지에서 토양 유기물 증진을 위해 유기자재 투입은 필수적인 것으로 판단된다. 결과적으로 고추잔사와 같은 생분해성 유기자재 보다는 유기자재를 바이오차로 변환시키는 방법 등을 통해 안정된 유기자재를 지속적으로 투입함으로써 토양 유기물을 증진시킴과 동시에 분해량을 줄일 수 있는 충분히 가능성 있는 토양관리 방안이 될 것으로 판단된다. 다만, 추후 장기적인 현장 실증 연구를 통해 고추재배지에서 저탄소 유기자재 사용이 토양 탄소격리능 증진 및 고추생산성 개선에 미치는 영향을 종합적으로 평가해야 필요가 있을 것으로 판단한다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ015136012023)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Adams, T.M. and S. Adams. 1983. The effects of liming and soil pH on carbon and nitrogen contained in the soil biomass. *J. Agric. Sci.* 101(3):553-558.
- An, H., S. Bae, Y. Lee, J. Lee, S.H. Jeon, and S.Y. Kim. 2022. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on mitigating greenhouse gas emissions and improving maize productivity in a field condition. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 55(4):261-272.
- Bååth, E. and T.H. Anderson. 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biol. Biochem.* 35(7):955-963.
- Barzegar, A.R., A. Yousefi, and A. Daryashenas. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant Soil* 247(2):295-301.
- Bolan, N.S., A. Kunhikrishnan, G.K. Choppala, R. Thangarajan, and J. Chung. 2012. Stabilization of carbon in composts and biochars in relation to carbon sequestration and soil fertility. *Sci. Total Environ.* 424:264-270.
- Bond-Lamberty, B. and A. Thomson. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464:579-582.
- Canatoy, R.C., S.R. Cho, Y.S. Ok, S.T. Jeong, and P.J. Kim. 2022a. Critical evaluation of biochar utilization effect on mitigating global warming in whole rice cropping boundary. *Sci. Total Environ.* 827:154344.
- Canatoy, R.C., S.T. Jeong, S.J.C. Galgo, P.J. Kim, and S.R. Cho. 2022b. Biochar as soil amendment: Syngas recycling system is essential to create positive carbon credit. *Sci. Total Environ.* 809:151140.
- Chen, A., X. Xie, M. Dorodnikov, W. Wang, T. Ge, O. Shibistova, W. Wei, and G. Guggenberger. 2016. Response of paddy soil organic carbon accumulation to changes in long-term yield-driven carbon inputs in subtropical China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 232:302-311.
- Chen, X., J. Tang, L. Jiang, B. Li, J. Chen, and C. Fang. 2010. Evaluating the impacts of incubation procedures on estimated Q_{10} values of soil respiration. *Soil Biol. Biochem.* 42(12):2282-2288.
- Choi, W.S., Y.K. Hong, K.J. Min, K.J. Kim, and S.C. Kim. 2017. Evaluating soil respiration as indicator of heavy metal pollution in agricultural field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(5):472-481.
- Conant, R.T., M.G. Ryan, G.I. Ågren, H.E. Birge, E.A. Davidson, P.E. Eliasson, S.E. Evans, S.D. Frey, C.P. Giardina, and M.A. Bradford. 2011. Temperature and soil organic matter decomposition rates - Synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biol.* 17(11):3392-3404.

- Curiel Yuste, J., D.D. Baldocchi, A. Gershenson, A. Goldstein, L. Misson, and S. Wong. 2007. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biol.* 13(9):2018-2035.
- Eberwein, J.R., P.Y. Oikawa, L.A. Allsman, and G.D. Jenerette. 2015. Carbon availability regulates soil respiration response to nitrogen and temperature. *Soil Biol. Biochem.* 88:158-164.
- Fan, J., W. Ding, J. Xiang, S. Qin, J. Zhang, and N. Ziadi. 2014. Carbon sequestration in an intensively cultivated sandy loam soil in the North China Plain as affected by compost and inorganic fertilizer application. *Geoderma* 230:22-28.
- Gross, A. and B. Glaser. 2021. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. *Sci. Rep.* 11(1):5516.
- Hall, S.J., W. Huang, V.I. Timokhin, and K.E. Hammel. 2020. Lignin lags, leads, or limits the decomposition of litter and soil organic carbon. *Ecology* 101(9):e03113.
- Haynes, R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Adv. Agron.* 85:221-268.
- Heimann, M. and M. Reichstein. 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451 (7176):289-292.
- Huang, X., X. Lu, G. Zhou, Y. Shi, D. Zhang, W. Zhang, and S.H. Bai. 2022. How land-use change affects soil respiration in an alpine agro-pastoral ecotone. *Catena* 214:106291.
- Hwang, H.Y., G.W. Kim, Y.B. Lee, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2015. Improvement of the value of green manure via mixed hairy vetch and barley cultivation in temperate paddy soil. *Field Crops Res.* 183:138-146.
- Iwasaki, S., Y. Endo, and R. Hatano. 2017. The effect of organic matter application on carbon sequestration and soil fertility in upland fields of different types of Andosols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 63(2):200-220.
- Jeong, S.T., G.W. Kim, H.Y. Hwang, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2018. Beneficial effect of compost utilization on reducing greenhouse gas emissions in a rice cultivation system through the overall management chain. *Sci. Total Environ.* 613:115-122.
- Kätterer, T., G. Börjesson, and H. Kirchmann. 2014. Changes in organic carbon in topsoil and subsoil and microbial community composition caused by repeated additions of organic amendments and N fertilisation in a long-term field experiment in Sweden. *Agric. Ecosyst. Environ.* 189:110-118.
- Kim, C.H., Y.Y. Kim, S.B. Park, and T.J. Eom. 2004. Chemical composition and alkaline pulping of a stem of red pepper (*Capsium annuum* L.). *J. Korean Wood Sci. Technol.* 32(2):26-32.
- Kimetu, J.M., J. Lehmann, S.O. Ngoze, D.N. Mugendi, J.M. Kinyangi, S. Riha, L. Verchot, J.W. Recha, and A.N. Pell. 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11:726-739.
- Kirschbaum, M.U. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol. Biochem.* 27(6):753-760.
- Ko, B.G., C.H. Lee, M.S. Kim, G.Y. Kim, S.J. Park, and S.G. Yun. 2016. Effect of soil respiration on light fraction-C and N availability in soil applied with organic matter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(5):510-516.
- KOSIS. 2022. Agricultural area statistics. Korean Statistical Information Service (<https://kosis.kr/index/index.do>).
- Lee, Y., S. Choi, J. Lee, H. An, C.H. Lee, P.H. Yi, S.T. Jeong, and S.Y. Kim. 2021. Characteristics of distribution and decomposition of organic matter in soils cultivated with various fruits and vegetables in plastic film house fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(4):401-412.
- Lima, D.L., S.M. Santos, H.W. Scherer, R.J. Schneider, A.C. Duarte, E.B. Santos, and V.I. Esteves. 2009. Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. *Geoderma* 150(1-2):38-45.
- Lloyd, J. and J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.* 8(3):315-323.
- Majumder, S., S. Neogi, T. Dutta, M.A. Powel, and P. Banik. 2019. The impact of biochar on soil carbon sequestration:

- Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages. *J. Environ. Manage.* 250:109466.
- NAS. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NAS. 2019. Fertilizer recommendation for crops (4th ed.). National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Wanju, Korea.
- Ouédraogo, E., A. Mando, and N.P. Zombré. 2001. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 84(3):259-266.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):151-160.
- Pietri, J.A. and P.C. Brookes. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biol. Biochem.* 40(7):1856-1861.
- Probert, M.E., R.J. Delve, S.K. Kimani, and J.P. Dimes. 2005. Modelling nitrogen mineralization from manures: Representing quality aspects by varying C:N ratio of sub-pools. *Soil Biol. Biochem.* 37(2):279-287.
- Reeve, J.R., J.B. Endelman, B.E. Miller, and D.J. Hole. 2012. Residual effects of compost on soil quality and dryland wheat yield sixteen years after compost application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76(1):278-285.
- Riffaldi, R., A. Saviozzi, and R. Levi-Minzi. 1996. Carbon mineralization kinetics as influenced by soil properties. *Biol. Fertil. Soils* 22:293-298.
- Rousk, J., P.C. Brookes, and E. Bååth. 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *J. Appl. Environ. Microbiol.* 75(6):1589-1596.
- Sierra, C.A., S.E. Trumbore, E.A. Davidson, S. Vicca, and I. Janssens. 2015. Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 7(1):335-356.
- Tavali, I.E. 2021. Short-term effect of compost amendment on the fertility of calcareous soil and basil growth. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 52(2):172-182.
- Thangarajan, R., N.S. Bolan, G. Tian, R. Naidu, and A. Kunhikrishnan. 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Sci. Total Environ.* 465:72-96.
- Tian, Y., K. Haibara, H. Toda, F. Ding, Y. Liu, and D. Choi. 2008. Microbial biomass and activity along a natural pH gradient in forest soils in a karst region of the upper Yangtze River, China. *J. For. Res.* 13(4):205-214.
- Xu, X., Z. Shi, D. Li, A. Rey, H. Ruan, J.M. Craine, J. Liang, J. Zhou, and Y. Luo. 2016. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-assimilation analysis. *Geoderma* 262:235-242.
- Zhang, W., M. Xu, X. Wang, Q. Huang, J. Nie, Z. Li, S. Li, S.W. Hwang, and K.B. Lee. 2012. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. *J. Soils Sediments* 12:457-470.
- Zhang, Z., D. Liu, Y. Qiao, S. Li, Y. Chen, and C. Hu. 2021. Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 783:147103.