

논 토양에서 유기물원 투입에 따른 벼 수량과 토양유기탄소 축적 효과

윤진주, 심재홍, 김성현, 전상호, 이유나, 노안성*

Effect of Different Type of Organic Matter Application on Rice Yield and Soil Organic Carbon Stock in Paddy Soil

Jin-Ju Yun , Jae-Hong Shim , Seong-Heon Kim , Sang-Ho Jeon , Yu-Na Lee  and Ahn-Sung Roh 

국립농업과학원 토양비료과

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

* Correspondence: roansung@korea.kr

Abstract: This study evaluated the effects of organic material inputs on rice productivity, soil chemical properties, and organic carbon (SOC) accumulation in paddy soils. The results demonstrated significant increases in rice yield, SOC, and SOC stock. Among the treatments, the NPKCC treatment exhibited the highest yield ($712.6 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) and SOC stock ($42.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$), along with increased exchangeable cation content due to the higher cation levels, such as K and Ca, in compost. While rice straw, with its high C/N ratio, decomposed slowly and favored long-term carbon storage, cattle and swine manure composts decomposed relatively faster, providing enhanced nutrient supply and boosting crop productivity. In summary, the application of organic matter to paddy soils not only promotes crop growth but also enhances SOC storage, contributing to carbon sequestration in agricultural soils. However, excessive application of organic matter can leave unabsorbed nutrients in the soil, potentially leading to negative environmental impacts. Therefore, it is recommended to adhere to standard application rates that consider soil and agricultural conditions. Proper organic matter application is expected to improve rice productivity and soil physical and chemical properties, as well as contribute to climate change mitigation efforts aimed at achieving carbon neutrality.

Keywords: Manure compost, Organic matter, Rice straw, Rice yield, Soil organic carbon

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.40>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 413-420

Received: November 24, 2024

Revised: December 9, 2024

Accepted: December 19, 2024

Published: December 22, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



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

서론

산업혁명 이후 급격히 증가한 이산화탄소(CO_2) 등 온실가스 증가로 지구의 평균대기 온도가 상승하여 지구온난화가 심화되었다. 그 결과로 예상치 못한 기상재해의 발생 빈도와 강도가 점차 증가하고 있다. 또한, 극한 가뭄, 폭우, 폭염 등의 이상기후가 빈번해지며 기후변화의 속도 역시 가속화되어 인류의 생활과 경제에 심각한 위협이 되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 세계 각국은 온실가스 배출량을 평가하고, 저감 기술 개발과 탄소중립 선언 등 기후위기 대응을 위한 다양한 노력을 기울이고 있으

며, 세계 기후 변화 협의체인 IPCC에서는 토양의 탄소 저장을 다양한 기후변화 완화 수단 중 하나로 보고하였다[1,2]. 토양 탄소 저장은 대기 중 이산화탄소를 분해되기 어려운 형태의 유기탄소로 전환하여 토양에 장기간 저장하는 것으로 최근 기후 변화를 막을 수 있는 기술로 주목받고 있다[3]. 토양 유기탄소(Soil Organic Carbon, SOC)는 토양 유기물의 주요성분으로 토지이용 및 탄소순환에 있어 매우 중요한 요소이다[4]. 농경지에 유기물원을 투입하는 것은 토양유기탄소 저장을 증가시키는 방법 중 하나로, 볏짚이나 퇴비같은 유기물원을 투입하거나 녹비작물을 재배 후 환원하면 토양 유기탄소함량이 증가한다[5,6].

토양에서 유기물은 물리적, 화학적, 생물학적으로 중요한 지표로서 토양의 물리성과 화학성을 개선하고 생물상과 활성을 유지 또는 증진시키며 작물의 양분공급원으로서 작물의 생산성을 향상시킨다[7]. 토양에 투입된 유기물은 1차적으로 토양 미생물에 의해 분해되며, 이 과정은 토양 온도, 수분함량, 토양특성, 질소함량 및 유기물 종류 등에 따라 분해 속도와 기간이 달라진다[1,8]. 특히, 퇴비는 상대적으로 분해가 빨라 작물에 즉각적인 양분을 제공하는 반면, 볏짚은 높은 C/N 비율로 인해 서서히 분해되어 장기적인 탄소 저장에 기여한다. 이러한 유기물원의 특성 차이는 토양의 탄소 축적량과 작물생육에 직, 간접적으로 영향을 미친다[9,10].

현재 다양한 유기물원(볏짚, 가축분퇴비 등)의 투입에 따른 작물 생산성 및 토양특성에 미치는 영향들이 보고되고 있다[5,6]. 그러나 대부분의 선행연구는 특정 유기물원의 장점과 단점을 평가하거나 제한된 환경 조건에서 단기간에 효과를 확인하는 데 집중되어 있다. 따라서 본 연구에서는 볏짚, 우분퇴비, 돈분퇴비와 같은 서로 다른 특성을 가진 유기물원을 논 토양에 투입하여 벼 생산성과 토양특성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

시험 포장 및 처리구

본 시험은 전북특별자치도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 내 시험 포장에서 수행되었으며, 시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같다. 시험구는 구당 200 m²로 하여 완전임의배치법 3반복으로 배치하였다. 벼는 신동진(*Oryza sativa* L., Sindongjin) 품종으로 5월 말에 재식거리 30×15 cm로 기계 이앙하였으며, 10월 중순에 수확하였다. 처리구는 투입 유기물원 종류에 따른 효과를 확인하고자 무비구(NF, No fertilizer)와 무기질비료(NPK, Inorganic fertilizer), 유기물원 종류에 따라 NPKRS (NPK+rice straw), NPKCC (NPK+cow manure compost), NPKPC (NPK+pig manure compost)로 설정하였다. 볏짚은 전년도에 수확된 잔재물을 토양에 전량 환원하였으며, 우분퇴비와 돈분퇴비는 시중에서 유통되고 있는 제품을 구입하여 사용하였다. 무기질비료는 N-P₂O₅-K₂O=9.0-4.5-5.7 kg 10a⁻¹를 기비(5.0-4.5-4.0 kg 10a⁻¹), 분얼비(2.0-0.0-0.0 kg 10a⁻¹), 수비(2.0-0.0-1.7 kg 10a⁻¹)로 분시하였다. 볏짚은 현물중 기준으로 1,500 kg 10a⁻¹, 퇴비는 작물별 비료사용 처방 토양 유기물 함량 기준으로 우분 및 돈분퇴비를 각각 1,600, 350 kg 10a⁻¹을 처리하였다. 투입된 유기물원의 총 양분량 및 화학적 특성은 Table 2, Table 3과 같다.

Table 1. Chemical properties of experimental raw soil used in the study

Treatments	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)			Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	C/N (%)
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
NF [†]	6.3±0.14a [‡]	0.29±0.02c	15±1.67c	36±2.70d	0.19±0.02c	4.9±0.46b	1.6±0.15a	160±16.17b	10.01±0.28a
NPK	6.0±0.04ab	0.33±0.02bc	15±0.61bc	61±7.46c	0.20±0.03c	4.7±0.24b	1.5±0.18ab	177±7.28b	9.99±0.29a
NPKRS	5.9±0.19b	0.36±0.03b	16±1.69ab	57±8.67c	0.32±0.04b	4.6±0.20b	1.3±0.11b	230±14.43a	9.90±0.46a
NPKCC	6.3±0.05a	0.46±0.03a	18±2.44a	115±6.16a	0.40±0.04a	5.5±0.07a	1.6±0.04a	203±32.10ab	10.01±0.32a
NPKPC	6.1±0.15ab	0.36±0.01b	17±1.62ab	79±4.15b	0.24±0.06c	5.0±0.19ab	1.5±0.11ab	196±30.50ab	9.93±0.32a
Optimum range	5.5-6.5	≤2	20-30	80-120	0.20-0.30	5.0-6.0	1.5-2.0	≥157	-

[†]NF, no fertilization; NPK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure 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.

Table 2. Application amount of inorganic fertilizer and organic matter

Treatments	Inorganic fertilizer			Organic matter	Total input		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(kg 10a ⁻¹)						
NF [†]	0	0	0	0	0	0	0
NPK	9	4.5	5.7	0	9	4.5	5.7
NPKRS	9	4.5	5.7	1,500	18.0	9.0	7.3
NPKCC	9	4.5	5.7	1,600	44.2	41.3	8.7
NPKPC	9	4.5	5.7	350	18.1	15.7	6.8

[†]NF, no fertilization; NPK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure compost.

Table 3. Chemical properties of different type organic matter in this study

	OM	T-N	T-C	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	C/N
	(%)							
RS [†]	64.1	0.6	37.3	0.3	1.6	0.5	0.2	64
CC	47.1	2.2	31.1	2.3	3.0	4.6	1.4	14
PC	52.2	2.6	32.8	3.2	1.1	5.3	1.6	13

[†]RS, rice straw; CC, cow manure compost; PC, pig manure compost.

토양 이화학성 분석

토양 화학성은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양시료는 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. EC는 단위 환산을 위해 측정값에 5를 곱하여 사용하였다. 유효인산은 Lancaster법, 유효규산은 1M NH₄OAc (pH 4.0) 침출액으로 토양 시료를 추출하여 각각 720 nm, 700 nm에서 비색계(UV-1900i, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 또한, 토양 총탄소, 총질소는 원소 분석기(vario Max CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)로 분석하였으며, 유기물 함량은 분석된 토양 탄소 함량에 1.724를 곱하여 환산하였다. 교환성 양이온은 1M NH₄OAc(pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 ICP-OES(AU/CINTRA6, GBC Scientific Equipment Pty Ltd., Malaysia)로 측정하였다. 유기물원(벧짚, 돈분퇴비 및 우분퇴비)의 P₂O₅는 vanado molybdate법을 사용하여 비색계로 측정하였으며, K₂O, CaO 및 MgO의 함량은 ICP-OES를 사용하여 분석하였다. 토양의 용적밀도는 Core법을 이용하여 표층(0-15 cm)에서 채취한 후 건조기(HQDO 84, Coretech, Korea)에서 105°C에서 건조한 후 무게를 측정하였다. 토양유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)은 탄소 함량과 아래와 같은 산출식(Eq. 1)을 이용하여 계산하였다.

Soil organic carbon stock (mg C ha⁻¹)
= Soil organic carbon (g kg⁻¹) × Bulk density (mg m⁻³) × Depth (m) × 10 (Eq. 1)

벼 수량 조사 및 식물체 질소 분석

벼 수량은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석 기준(RDA, 2013)에 준하여 조사하였으며, 수확기에 각 처리구별로 70주씩 3반복으로 채취하여 10a당 수량으로 환산하였다. 식물체(알곡, 벧짚) 질소 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 식물체 시료는 수확기인 10월에 채취하여 건조 후 분쇄한 시료를 원소분석기를 이용하여 분석하였다. 질소 흡수량 및 질소이용효율은 아래의 식 Eq. 2, Eq. 3을 각각 이용하여 계산하였다. 질소는 벼 생육에 필수적인 양분으로 질소 흡수량과 질소이용효율은 유기물원에 따른 벼의 생산성과 환경에 미치는 영향을 분석하는데 중요한 지표로 사용된다. 질소

흡수량은 작물이 유기물원에서 공급받는 질소를 실제로 얼마나 활용하는지를 평가하며, 질소이용효율은 공급된 질소가 작물 성장에 얼마나 효과적으로 기여하는지를 나타낸다[11].

Nitrogen uptake ($\text{kg } 10\text{a}^{-1}$)

$$= [\text{Dry weight of grain and straw (kg } 10\text{a}^{-1}) \times \text{Nitrogen concentration of grain and straw (\%)}] / 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Nitrogen use efficiency (\%)} = [(\text{Amount of the nitrogen uptake with application (kg } 10\text{a}^{-1}) - (\text{Amount of the nitrogen uptake without application (kg } 10\text{a}^{-1})) / (\text{Amount of the nitrogen applied (kg } 10\text{a}^{-1}))] \times 100 \quad (\text{Eq.3})$$

결과 및 고찰

벼 생산량

벼의 생산량은 유기물원을 투입한 NPKRS, NPKCC 및 NPKPC 처리구에서 각각 684.6, 712.6, 697.0 $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 NPK 처리구보다 벼의 생산량이 높게 나타났으나 유의적 차이는 없었다(Fig. 1). 이는 유기물원의 투입이 벼의 생산량을 증가시킨다고 보고한 선행연구 결과와 일치하였다[9]. 또한, NPKRS 처리구는 퇴비를 투입한 NPKCC, NPKPC 처리구에 비해 생산량이 낮게 나타났는데 이는 투입한 볏짚의 C/N 비가 높아 작물생육에 필요한 질소 공급이 상대적으로 낮음이 원인으로 보고되어져 있다[12]. 볏짚은 셀룰로오스, 리그닌과 같은 미생물이 분해하기 어려운 난분해성 탄소로 구성되어 있어 작물에 양분공급이 어려웠던 것으로 판단된다[10,13]. 작물생산량과 식물체의 양분흡수량은 서로 밀접한 관계가 있으며, 그 중 수도작으로 재배되는 벼의 경우 퇴비의 사용은 주요 유기물 공급원으로서 토양 비옥도 유지 및 생산성을 증대시킨다고 알려져 있다[14].

식물체 질소 흡수량 및 이용 효율

식물체(벼짚, 알곡) 질소 흡수량은 NF, NPK 처리구에 비해 유기물원 처리구에서 높았으며 생산량과 유사한 경향을 보였다(Fig. 2A). 특히, 가축분퇴비를 투입한 NPKCC, NPKPC 처리구에서 유의성 있게 높게 나타났는데, 이는 투입된 유기물원(우분, 돈분)에 의해 질소 공급이 많았을 뿐만 아니라 미생물에 의해 유기물이 분해되어 작물이 흡수할 수 있는 질소가 증가한 것으로

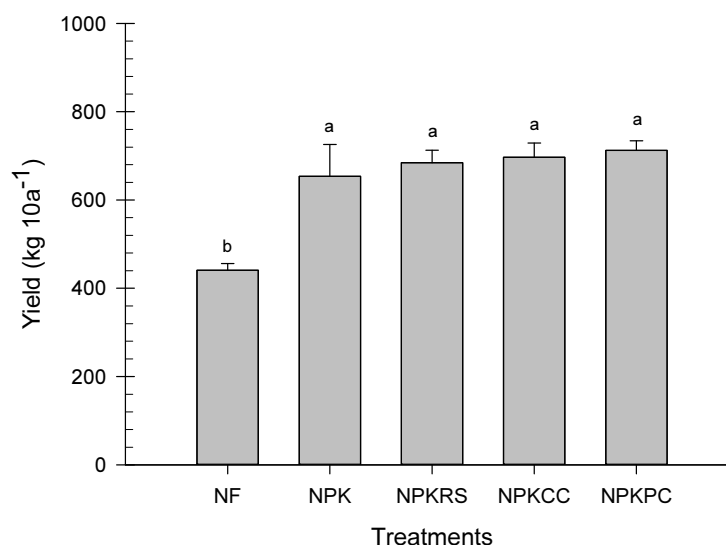


Fig. 1. Grain yield according to the application of different type organic matter.

Bars represent standard deviation ($n=3$). The same letter indicates no significant differences among treatments (DMRT, $p<0.05$). NF, no fertilization; NPK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure compost.

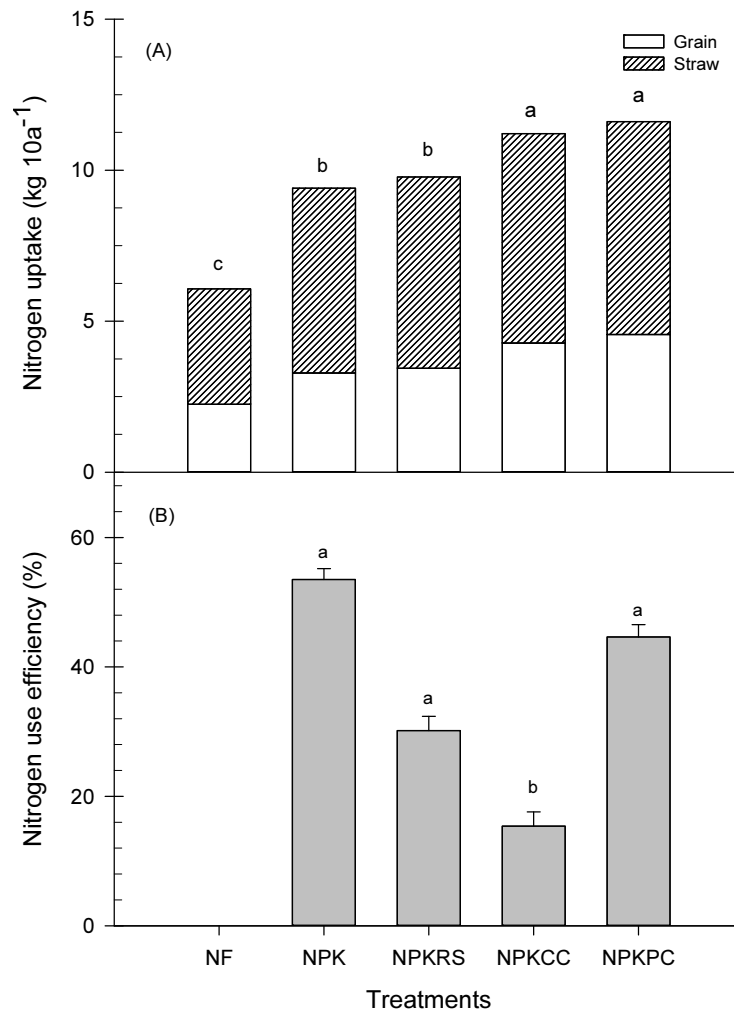


Fig. 2. Nitrogen uptake(A) and nitrogen use efficiency(B) to the application of different type organic matter.

Bars represent standard deviation (n=3). The same letter indicates no significant differences among treatments (DMRT, $p < 0.05$). NF, no fertilization; NPK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure compost.

판단된다[15]. 질소이용효율은 NPK 처리구에서 53.5%로 가장 높게 나타났으며, NPKPC(44.6%) > NPKRS(30.1%) > NPKCC (15.4%) 처리구 순으로 나타났다(Fig. 2B). 이러한 결과는 유기물원 투입에 따라 미생물 활성이 증가되어 토양에 부동화된 질소의 양이 증가되어 질소이용효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한, NPKCC 처리구는 퇴비 투입량에 따라 NPKPC 처리구에 비해 질소의 투입이 훨씬 많았기 때문에 같은 퇴비 처리임에도 낮게 나타났다. 선행연구 결과 토양에 유기물원 투입시 유기물 분해과정에서 무기화를 촉진시켜 작물이 흡수하게 되고, 일부는 미생물에 의해 부동화가 일어난다고 보고되고 있다[11]. 또한, Lee et al.[16]의 연구 결과 유기물에 의한 질소 공급은 토양에서 미생물에 의해 NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- 로 변환되는 무기화 과정과 미생물체에 합성되는 부동화과정을 포함하는 질소 순환을 통해 이루어지기 때문에 작물의 단기적인 질소이용효율은 무기질비료에 비해 낮다고 보고하였으며, 본 연구 결과도 이와 유사하게 나타났다.

토양 화학성 변화

유기물원 투입에 따른 토양 화학성 변화는 Table 4와 같다. 토양의 pH는 모든 처리구에서 시험 전에 비해 미미하게 증가하였으나 적정범위인 pH 5.5~6.5 이내였다. EC는 유기물원 투입 처리구에서 약간 높게 나타났는데 이는 미생물에 의한 유기물의 무기화 기작으로 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 같은 양분이 증가되어 토양 EC가 증가한 것으로 판단된다[17]. 유기물 함량은 유기물원을 투입한 처리구에서 높았으며, NPKCC 처리구에서 20 g kg^{-1} 으로 가장 높았다. 그러나 처리구간 큰 차이를 보이지 않았는데 이는

Table 4. Change in soil chemical properties according to the application of different type organic matter

Treatments	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)			Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	C/N (%)
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
NF [†]	6.4a±0.05 [‡]	0.21±0.01c	14±0.88b	34±3.79d	0.20±0.02b	5.2±0.40abc	1.8±0.07a	139±8.60b	9.5±0.82a
NPK	6.3±0.04a	0.26±0.02bc	16±2.58b	49±2.90c	0.18±0.02b	4.9±0.10bc	1.6±0.07ab	206±17.38a	10.4±1.11a
NPKRS	6.2±0.10a	0.27±0.02bc	18±1.91ab	49±4.51c	0.28±0.06b	4.9±0.21c	1.5±0.03b	227±19.43a	10.6±0.53a
NPKCC	6.5±0.28a	0.39±0.03a	20±4.76a	109±3.82a	0.41±0.04a	5.7±0.20a	1.6±0.20ab	219±20.92a	9.8±0.57a
NPKPC	6.4±0.09a	0.30±0.01b	17±5.07ab	73±2.91b	0.25±0.06b	5.4±0.06ab	1.7±0.05a	220±7.80a	9.8±0.52a
Optimum range	5.5-6.5	≤2	20-30	80-120	0.20-0.30	5.0-6.0	1.5-2.0	≥157	-

[†]NF, no fertilization; NPK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure 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.

벼 수확 후 남아있던 그루터기에 의해 유기물원이 투입되었기 때문에 판단된다[18]. 유효인산 함량은 NPKCC, NPKPC 처리구에서 각각 109, 73 mg kg⁻¹으로 통계적으로 유의성 있게 높게 나타났는데, 이는 무기질비료와 퇴비를 함께 투입함에 따라 무기질비료의 인산이 퇴비의 유기물원과 결합하여 인산의 고정여 억제되어 토양에 집적되었기 때문에 판단된다[19]. 교환성 양이온은 다른 처리구에 비해 NPKCC, NPKPC 처리구에서 높게 나타났으며, NPKCC 처리구에서 교환성칼륨은 0.41 cmol_c kg⁻¹으로 적정범위인 0.2-0.3 cmol_c kg⁻¹보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 투입한 퇴비 내 포함되어 있는 K, Ca 등과 같은 양이온 함량에 영향으로 판단되며[19], Ahn et al.[20]의 선행연구에서 작물 재배시 가축분퇴비와 같은 유기물원은 토양 교환성 양이온을 증가시킨다는 보고와 일치하였다. 유효규산은 벼 수량이 높았던 NPK, NPKRS, NPKCC 및 NPKPC 처리구에서 무처리구에 비해 높게 나타났다. 규산은 벼, 보리와 같은 화본과 작물의 생육을 촉진하고 수량을 증대시키며, 벼 수량과 높은 양(+)의 상관관계가 있다고 알려져 있다[21,22].

토양 유기탄소 축적량

유기물원 투입에 따른 토양 유기탄소의 축적은 Table 5와 같다. 토양 유기탄소(Soil organic carbon, SOC)는 NPKCC (11.9 g kg⁻¹) > NPKPC (10.6 g kg⁻¹) ≅ NPKRS (10.6 g kg⁻¹) > NF (9.2 g kg⁻¹) > NPK (8.6 g kg⁻¹) 순으로 유기물원을 투입한 처리구에서 높게 나타났으며, 유기물 투입시 무비구와 무기질비료 처리구보다 토양유기탄소가 높았다는 Yu et al.[23]의 연구 결과와 일치하였다. 토양 유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)의 경우에도 유기물원 투입 처리구에서 높게 나타났으며 NPKCC 처리구에서 42.5 mg C ha⁻¹로 가장 높게 나타났다. 특히, NPKCC 처리구는 토양 내 퇴비투입으로 용적밀도가 감소하고 공극을 통해 산소와 물의 공급이 원활해짐에 따라 유기물의 공급량이 증가하여 유기탄소 저장량이 높아진 것으로 판단되며, 선행연구에서도 퇴비투입 처리구에서 SOC stock이 높아 본 연구와 유사한 결과를 보였다[24,25]. 일반적으로 용적밀도는 토양 유기탄소 저장량 산정에 높은 상관성을 가지며, 용적밀도가 낮은 토양에서는 유기물의 분해가 증가하여 토양의 유기탄소로 저장되기 때문에 용적밀도가 낮은 경우 토양 유기탄소 저장량이 증가한다[26]. 또한, NPKRS 처리구는 투입한 볏짚의 질소함량이 낮고 C/N비가

Table 5. Soil organic carbon, bulk density, and soil organic carbon stock according to the application of different type organic matter

Treatment	SOC (g kg ⁻¹)	Bulk density (mg m ⁻³)	SOC stock (mg C ha ⁻¹)
NF [†]	9.2±0.49b [‡]	1.14±0.03b	31.4±0.81b
NPK	8.6±0.89b	1.24±0.03a	32.0±2.94b
NPKRS	10.6±1.66ab	1.15±0.06b	36.5±3.81ab
NPKCC	11.9±1.18a	1.19±0.04ab	42.5±4.83a
NPKPC	10.6±1.09b	1.18±0.06ab	37.5±2.35ab

[†]NF, no fertilization; PK, inorganic fertilizer; NPKRS, inorganic fertilizer + rice straw; NPKCC, inorganic fertilizer + cow manure compost; NPKPC, inorganic fertilizer + pig manure 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.

높으며 리그닌과 같은 난분해성 화학물의 비율이 높아 유기탄소 축적량이 높게 나타난 것으로 판단된다[25]. 그러나 유기물원의 투입 시 토양 내 유기탄소 축적을 증가시키더라도 작물로 흡수되지 못한 양분이 토양에 남아 토양 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있어 토양 환경을 고려하여 표준사용량을 사용하고 과다하게 투입되지 않도록 주의해야 할 것으로 판단된다[23,25].

결 론

본 연구에서는 논 토양에서 유기물원 투입에 따른 벼 생산성, 토양 화학성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향을 평가하였다. 연구 결과, 벼 생산량과 SOC 및 SOC stock을 유의미하게 증가시켰다. 특히, NPKCC 처리구에서 가장 높은 생산량($712.6 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$)과 SOC 축적량($42.5 \text{ mg C ha}^{-1}$)을 보였으며, 퇴비 내 K, Ca와 같은 양이온 함량 증가로 인해 교환성 양이온 함량도 증가하였다. 또한 벼짚은 높은 C/N 비율로 인해 분해가 느리며 장기적인 탄소 저장에 유리한 반면, 우분퇴비와 돈분퇴비의 경우 상대적으로 분해가 빨라 증가적인 양분공급과 작물생산성 증대에 효과적이었다. 이러한 결과를 종합하면, 논 토양에 유기물원을 투입하는 것은 단순히 작물 생육을 촉진할 뿐만 아니라 토양 내 유기탄소 저장을 증가시키고 농경지의 토양 탄소 축적에 기여할 수 있는 효과적인 방법으로 판단된다. 그러나 유기물원의 투입 시 토양 내 유기탄소 축적을 증가시키더라도 작물로 흡수되지 못한 양분이 토양에 남아 토양 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 따라서, 유기물원 투입 시 토양 등 농업환경을 고려한 표준사용량을 사용해야 할 것으로 판단되며, 적절한 유기물원의 투입은 벼 생산성 향상과 더불어 토양의 물리적, 화학적 특성을 개선하며 탄소중립을 위한 기후변화 대응에도 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

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 and R.A.S. reviewed the manuscript; Y.J.J., S.J.H., K.S.H., J.S.H., L.Y.N., and R.A.S. 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 work was supported by the “Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ017283), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.40>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Ahn-Sung Roh.

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. 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(4), 713-721. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500410>.
2. Jeong GW, Shim WJ, Lee JM, Ji DH (2024) Effective sampling design for assessing forest soil carbon stocks and environmental correlations. Korean Journal of Geoenvironmental Society, 59(4), 471-486. <https://doi.org/10.22776/kgs.2024.59.4.471>.
3. Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. Soil Science Society of America Journal, 70(2), 555-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>.
4. Hong SG, Shin J, Park KL, Lee SB, Kim J, Kim SC, Shiedung H, Amelung W (2015) Feasibility of analyzing soil organic carbon fractions

- using mid-infrared spectroscopy. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 23(3), 85-92. <https://doi.org/10.17137/korrae.2015.23.3.085>.
5. Rasool R, Kukal SS, Hira GS (2008) Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system. *Soil and Tillage Research*, 101(1-2), 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.015>.
 6. Li T, Gao J, Bai L, Wang Y, Huang J, Kumar M, Zeng X (2019) Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 195, 104428. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104428>.
 7. Gilmour JT, Norman RJ, Mauromoustakos A, Gale PM (1998) Kinetics of crop residue decomposition: variability among crops and years. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 750-755. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030030x>.
 8. Ali MA, Sattar MA, Islam MN, Inubushi K (2014) Integrated effects of organic, inorganic and biological amendments on methane emission, soil quality and rice productivity in irrigated paddy ecosystem of Bangladesh: Field study of two consecutive rice growing seasons. *Plant soil*, 378, 239-252. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2023-y>.
 9. Tang H, Cheng K, Shi L, Li C, Wen L, Li W, Long Z (2022) Effects of long-term organic matter application on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in a double-cropping rice field. *Environmental Research*, 213, 113700. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113700>.
 10. Zhang W, Xu M, Wang X, Huang Q, Nie J, Li Z, Lee KB (2012) Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. *Journal of soils and sediments*, 12, 457-470. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0467-8>.
 11. Ro HM, Choi WJ, Yun SI (2003) Uptake and recovery of Urea-15 N blended with different rates of composted manure. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 36, 376-383.
 12. Brar BS, Singh K, Dheri GS (2013) Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure. *Soil and Tillage Research*, 128, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.10.001>.
 13. Liu B, Xia H, Jiang C, Riaz M, Yang L, Chen Y, Fan X, Xia X (2022) 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China. *Science of the Total Environment*, 841, 156608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156608>.
 14. Kwon SI, Lee YH, Hwang HY, Kim SH (2022) Long-term application effects of soil amendments on yield and soil properties in paddy. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 30(1), 5-11. <https://doi.org/10.17137/korrae.2022.30.1.5>.
 15. Rahman MM, Kamal MZU, Ranamukhaarachchi S, Alam MS, Alam MK, Khan MAR, Ahmed F (2022) Effects of organic amendments on soil aggregate stability, carbon sequestration, and energy use efficiency in wetland paddy cultivation. *Sustainability*, 14(8), 4475. <https://doi.org/10.3390/su14084475>.
 16. Lee YJ, Yun HB, Song YS, Lee CH, Sung JK, Ha SK (2015) Effects of organic matter sources on nitrogen supply potential in arable land. *Korean Journal of Agricultural Science*, 42(4), 431-437. <https://doi.org/10.7744/cnujas.2015.42.4.431>.
 17. Kim JG, Lee KB, Lee SB, Lee DB, Kim SJ (2000) The effect of long-term application of different organic material sources on chemical properties in upland soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 33, 416-431.
 18. 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 Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53(4), 626-634. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.626>.
 19. 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 & Life Science*, 57, 25-34. <https://doi.org/10.14397/jals.2023.57.1.25>.
 20. Ahn BG, Ko DY, Kim HJ, Kim JH, Lee JH (2017) Effect of application amount of livestock manure compost on soil properties and rice growth. *Journal of Agriculture & Life Sciences*, 48(1), 1-7.
 21. Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(1), 11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>.
 22. Lim JS (2021) Effects of organic fertilization on the growth, yield, and inorganic nutrients of the golden queen rice using soil testing. *Journal of the Korean Society of International Agriculture*, 33(1), 60-66. <https://doi.org/10.12719/KSIA.2021.33.1.60>.
 23. Yu Q, Hu X, Ma J, Ye J, Sun W, Wang Q, Lin H (2020) Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields. *Soil and Tillage Research*, 196, 104483. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104483>.
 24. Lee TH, Kim SW, Shin YC, Jung YH, Lim KJ, Yang JE, Jang WS (2019) Development of soil organic carbon storage estimation model using soil characteristics. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 61(6), 1-8. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2019.61.6.001>.
 25. Cheng W, Padre AT, Shiono H, Sato C, Nguyen-Sy T, Tawaraya K, Kumagai K (2017) Changes in the pH, EC, available P, SOC and TN stocks in a single rice paddy after long-term application of inorganic fertilizers and organic matters in a cold temperate region of Japan. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 1834-1842. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1544-9>.
 26. Lee T, Kim S, Shin Y, Jung Y, Lim KJ, Yang JE, Jang WS (2019) Development of soil organic carbon storage estimation model using soil characteristics. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 61(6), 1-8. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2019.61.6.001>.