

볏짚퇴비 사용이 논토양의 화학성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향

변지은¹ · 김성현² · 심재홍² · 전상호² · 이윤혜³ · 권순익^{3,†}

Effects of Rice Straw Compost Application on Soil Chemical Properties and Soil Organic Carbon Stock in Paddy Fields

Ji-Eun Byeon¹, Seong Heon Kim², Jae Hong Shim², Sang Ho Jeon², Yun Hae Lee³, and Soon Ik Kwon^{3,†}

ABSTRACT The aim of this study was to investigate the effect of application rate of rice straw compost on soil chemical properties and soil organic carbon stock (SOC stock). The experiments were performed with no fertilizer (NF), inorganic fertilizer (NPK), NPK + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹ (NPKC7.5), NPK + rice straw compost 15 ton ha⁻¹ (NPKC15), NPK + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹ (NPKC22.5), and NPK + rice straw compost 30 ton ha⁻¹ (NPKC30). The SOC and SOC stock were highest in the NPKC30 treatment at 22.8 g kg⁻¹ and 71.2 Mg C ha⁻¹, respectively. Rice production was in the range of 621.2–654.4 kg 10a⁻¹ in NPKC22.5 and NPKC30 treatments, which was higher than that in the NPK treatment. However, with increase in compost application, the exchangeable K and Ca of the soil increased, and the exchangeable K and Ca were higher than the optimum range in NPKC22.5 and NPKC30 treatments. Excessive application of compost can have negative impacts on the environment, including nutrient accumulation in the soil and water pollution from nutrient runoff. Therefore, applying the standard amount of compost according to the agricultural environment would be appropriate, despite the relatively lower rice production and SOC stock than that observed with the application of 22.5 and 30 ton ha⁻¹.

Keywords : application rate, nitrogen uptake, rice straw compost, soil organic carbon, soil organic carbon stock

비료의 사용은 작물 생산 증진에 많은 기여를 함으로써 농민들의 경제적 소득을 가져오게 하였다(Chung & Lee, 2008). 그러나 급격한 산업화 및 인구 증가 등에 따라 다수확 목적으로 화학비료 사용량이 증가되었으며, 이로 인해 논 토양의 산성화로 각종 생리적인 장애가 유발시킬 뿐만 아니라 토양의 물리성 및 화학성이 악화되고 있어 토양 관리가 필요하다(Chung & Lee, 2008; Kim *et al.*, 2006).

볏짚과 퇴비 등의 유기물원은 토양의 화학성과 물리성 개선을 통해 토양개량제로서의 역할뿐만 아니라 작물에 공급이 가능한 양분이 포함되어 있어 작물의 생산성을 향상시킬 수 있다(Hwang *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2004; Kwon

et al., 2022). 현재 지자체에서는 토양 지력 증진과 토양 환경 개선 등을 위해 벼 재배 농경지에 볏짚을 잘게 절단하여 환원하도록 볏짚환원사업을 시행하고 있으며, 이와 같이 농경지에 볏짚을 환원하게 되면 토양의 유기물, 유기탄소 및 공극율이 증가하고 용적밀도가 감소하는 등 토양 개선이 가능하다(Jeong *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2010).

토양유기탄소(Soil organic carbon, SOC)는 탄소 순환과 토지 이용에 있어 중요한 요소이며, 기후변화 문제로 토양 유기탄소 격리에 대한 중요성이 커지고 있다(Hong *et al.*, 2015). 농경지에 유기물원을 투입하는 것은 토양유기탄소 격리를 위해 권장하는 영농관리방법 중 하나로서 볏짚, 퇴

¹농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 박사후연구원 (Postdoctoral Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea)

²농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 농업연구사 (Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea)

³농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 농업연구관 (Senior Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea)

†Corresponding author: Soon Ik Kwon; (Phone) +82-63-238-2454; (E-mail) sikwon@korea.kr

<Received 23 March, 2023; Revised 1 May, 2023; Accepted 2 May, 2023>

비 등과 같은 유기물원을 투입하거나 녹비작물을 재배한 후 환원하게 되면 토양유기탄소 함량이 증가한다(Lal, 2004; Rasool *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2019). 그러나 토양유기탄소를 늘리기 위해 유기물원을 장기적으로 과다 사용하면 토양 내 염류 집적을 가속화시켜 토양 특성을 악화시키는 원인이 되고 수계에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 적정량의 유기물원을 사용할 필요가 있다(Chang *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2013). 이에 본 연구는 볏짚퇴비의 사용량이 토양 화학성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

시험 포장 및 처리구

본 시험은 국립식량과학원 내 장기연용 시험 포장(37° 16'29.0"N 126°59'31.7"E)으로서 2020년 결과를 활용하여 볏짚퇴비 사용량이 토양 화학성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 벼는 삼광(*Oryza Sativa* L., Samkwang)품종으로 5월말에 이앙하였으며, 유기물원은 볏짚퇴비를 사용하였다. 처리구는 무비구(NF; No fertilizer)와 무기질비료(NPK, Inorganic fertilizer), 볏짚퇴비 사용량에 따라 NPK+볏짚퇴비 7.5 ton ha⁻¹ (NPK + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹, NPKC7.5), NPK+볏짚퇴비 15 ton ha⁻¹ (NPK + rice straw compost 15 ton ha⁻¹, NPKC15), NPK+볏짚퇴비 22.5 ton ha⁻¹ (NPK + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹, NPKC22.5), NPK+볏짚퇴비 30 ton ha⁻¹ (NPK + rice straw

compost 30 ton ha⁻¹, NPKC30)로 설정하였다. 토양의 토성은 사양토이며, 시험 초기 토양 화학성은 Table 1과 같다.

볏짚퇴비는 수확기에 볏짚 3 ton을 수거하여 절단하고 물을 뿌린 후 비닐로 덮어 부숙하였으며, 부숙 시 요소비료를 4~6 kg에 양을 첨가하였으며(Kim *et al.*, 2018), 볏짚퇴비의 화학적 성분은 Table 2와 같다. 전년도에 벼를 수확한 후 남아 있는 그루터기와 뿌리는 토양에 전량 환원하였으며, 볏짚퇴비는 4월 중순에 살포 후 경운하였다. 무기질비료는 N-P₂O₅-K₂O = 11.0-7.0-8.0 kg 10a⁻¹를 기비(5.5-7.0-5.6 kg 10a⁻¹), 분얼비(2.2-0.0-0.0 kg 10a⁻¹), 수비(2.2-0.0-2.4 kg 10a⁻¹), 실비(1.1-0.0-0.0 kg 10a⁻¹)로 분시하였다.

토양 특성 및 식물체 질소 분석

토양과 식물체 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법에 준하여 실시하였다(NIAST, 2000). 토양 시료는 풍건하여 분쇄한 후 2 mm 체에 통과된 시료를 화학성 분석에 이용하였다. pH는 토양과 증류수를 1:5로 추출하여 pH meter (Orion 5-star, Thermo scientific, Singapore)를 이용해 측정하였으며, 유기물(Organic matter, OM)은 Tyurin법을 이용하여 분석하였다. 유효인산(Av. P₂O₅)은 Lancaster 법으로 추출하여 720 nm, 유효규산(Av. SiO₂)은 1 M NaOAc (pH 4.0)용액으로 추출하여 700 nm에서 분광광도계(U-3000, Hitachi, Japan)를 이용해 분석하였으며, 교환성 양이온(Ex. K, Mg, Ca)은 1N NH₄OAc (pH 7.0)용액을 이용하여 추출하여 유도결합플라즈마 발광광도계(AU/CINTRA 6, GBC

Table 1. Chemical properties of soil under different treatments.

Treatments*	pH (1:5)	Organic matter (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exchangeable K (cmol _c kg ⁻¹)
NF	6.0	19	40	0.08
NPK	5.6	21	186	0.10
NPKC7.5	5.7	32	139	0.12
NPKC15	6.0	33	129	0.19
NPKC22.5	5.9	34	166	0.21
NPKC30	5.7	35	174	0.28

NF, No fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; NPKC7.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹; NPKC15, Inorganic fertilizer + rice straw compost 15 ton ha⁻¹; NPKC22.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹; NPKC30, Inorganic fertilizer + rice straw compost 30 ton ha⁻¹.

Table 2. Chemical properties of rice straw compost.

T-N	T-C	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂
----- % -----						
0.64	7.38	0.20	1.13	0.46	0.20	7.56

Scientific Equipment Pty Ltd., Australia)로 측정하였다. 식물체(알곡, 볏짚)의 N은 건조 후 분쇄한 시료를 원소분석기(CHNS-932, LECO, USA)를 이용하여 분석하였다. 용적밀도(Bulk density, BD)는 토양을 코어를 이용하여 채취한 후 105°C에서 건조한 후 산정하였으며, 토양유기탄소(Soil organic carbon, SOC)는 유기물 함량을 이용하여 환산 계수에 의해 산출하였고, 토양유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)은 아래와 같은 산출식을 이용하여 계산하였다.

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

통계 처리

벼 생산량, 토양 이화학성, 토양유기탄소 축적량 및 식물체(알곡, 볏짚)의 질소 흡수량 및 이용효율의 처리구 간의 비교는 IBM SPSS statistics 27를 이용하여 5%의 유의수준으로 Duncan 다중분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

벼 생산량 비교

벼의 생산량은 볏짚퇴비 사용량이 많을수록 증가하는 경향을 보였으며, NPKC22.5와 NPKC30처리구에서 각각 621.2 kg 10a⁻¹과 654.4 kg 10a⁻¹로 NPK 처리구보다 벼의 생산량이 높았다(Fig. 1). 벼의 생산량과 식물체의 흡수량이 밀접한 관계가 있는데 볏짚퇴비의 사용량이 늘어날수록 작물이 흡수할 수 있는 양분 형태가 많기 때문에 퇴비 사용량 늘어남에 따라 양분 흡수량이 증가하여 벼의 생산량이 높았던 것으로 판단된다(Kim & Choi, 2002). 선행 연구에서도 유기물원 사용량이 증가할수록 벼의 생산량이 증가하는 경향을 보여 본 연구 결과와 일치하였다(Ahn *et al.*, 2017; Gharieb *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2001).

볏짚퇴비 사용량에 따른 질소 흡수량 및 이용효율

식물체(알곡, 볏짚)의 질소 흡수량 및 이용효율은 Fig. 2와 같다. 질소의 흡수량은 NPK (11.3 kg 10a⁻¹)와 NPKC7.5 처리구(13.1 kg 10a⁻¹)보다 NPKC30 처리구에서 16.4 kg 10a⁻¹로 높았으며, 선행 연구에서도 퇴비 사용량이 많을수록 질소의 흡수량이 높은 경향을 보였다(Yang *et al.*, 2010; Pradhan *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 1999). NPK와 볏짚퇴비 혼합 처리구는 퇴비 투입량에 따라 질소 투입이 많았을 뿐만 아니라 미생물에 의해 유기물이 분해되어 작물이 흡수

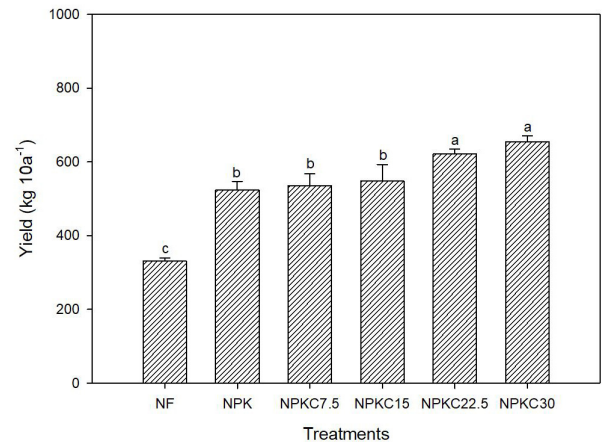


Fig. 1. Grain yield according to application rate of rice straw compost. NF, No fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; NPKC7.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹; NPKC15, Inorganic fertilizer + rice straw compost 15 ton ha⁻¹; NPKC22.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹; NPKC30, Inorganic fertilizer + rice straw compost 30 ton ha⁻¹. The different letters indicate significance according to the application rate of rice straw compost in Duncan's multiple range test.

할 수 있는 질소가 증가하여 질소 흡수량이 NPK 처리구보다 많았던 것으로 보인다. 질소이용효율은 NPKC30 처리구가 38.1%로 처리구 중 가장 낮았으며, 볏짚퇴비 사용량이 늘어날수록 질소이용효율이 낮은 경향을 보였다. 토양에 퇴비를 투입하면 유기물이 분해되는 과정에서 무기화를 촉진시켜 작물에 이용되지만 일부는 미생물에 의해 부동화 작용이 일어나는데 퇴비 사용량이 증가함에 따라 미생물 활성 증가로 인해 토양에 부동화된 질소의 양이 증가되어 질소이용효율이 퇴비 사용량이 많을수록 낮았던 것으로 판단된다(Ro *et al.*, 2003; Havlin *et al.*, 2007; Ku, 2018).

토양 화학성 변화

볏짚퇴비 사용량에 따른 토양 화학성 변화는 Table 3과 같다. 토양의 pH는 NPK 처리구와 NPK와 볏짚퇴비 혼합 처리구 간에 큰 차이를 보이지 않았으며, 모든 처리에서 적정범위인 pH 5.5~6.5에 속하였다. NPKC7.5 처리구와 비교하여 NPKC30 처리구에서 pH가 5.8로 낮았는데 이는 토양 내 유기물을 분해하는 과정에서 생성되는 지방산이나 유기물의 분해로 생성된 무기태 질소 산화물 등의 영향으로 판단된다(Chang *et al.*, 1999). pH의 감소는 토양 양분의 유효도에 영향을 미칠 수 있으므로 퇴비 사용에 주의할 필요가 있다(Cheng *et al.*, 2017).

토양의 유기물 함량은 볏짚퇴비 사용량이 많을수록 유기물함량이 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비 사용량이 가장 많았던 NPKC22.5와 NPKC30 처리구가 37~39 g kg⁻¹로 처리구 중 유기물 함량이 높았다. 선행연구의 결과에서도 유기물원의 사용량이 증가함에 따라 유기물 함량이 증가하는 경향을 보여 본 연구 결과와 일치하였다(Lee *et al.*, 1999; Hossen *et al.*, 2015; Redda & Kebede, 2017). 이와 같이 유기물원 투입은 토양 유기물 함량 증가에 효과가 있지만 교환성 염기가 증가한다는 선행연구가 있어 유기물원을 과다

하게 투입되지 않도록 주의할 필요가 있다(Ahn *et al.*, 2017). 유효인산은 NPK 처리구에서 120 mg kg⁻¹으로 처리구 중 가장 높았으나 NPKC30 처리구(110 mg kg⁻¹)와 차이를 보이지 않았다. 볏짚퇴비 사용량에 따른 유효인산의 함량은 NPKC 7.5 처리구와 비교하여 NPKC15처리구에서 76 mg kg⁻¹으로 차이가 없었으나 NPKC22.5와 NPKC30 처리구는 103~110 mg kg⁻¹으로 NPKC7.5 처리구보다 높았다. 이처럼 NPKC30 처리구가 NPKC7.5 처리구보다 유효인산이 높았던 것은 Fe²⁺이온이 산화환원전위(Eh)의 감소로 증가

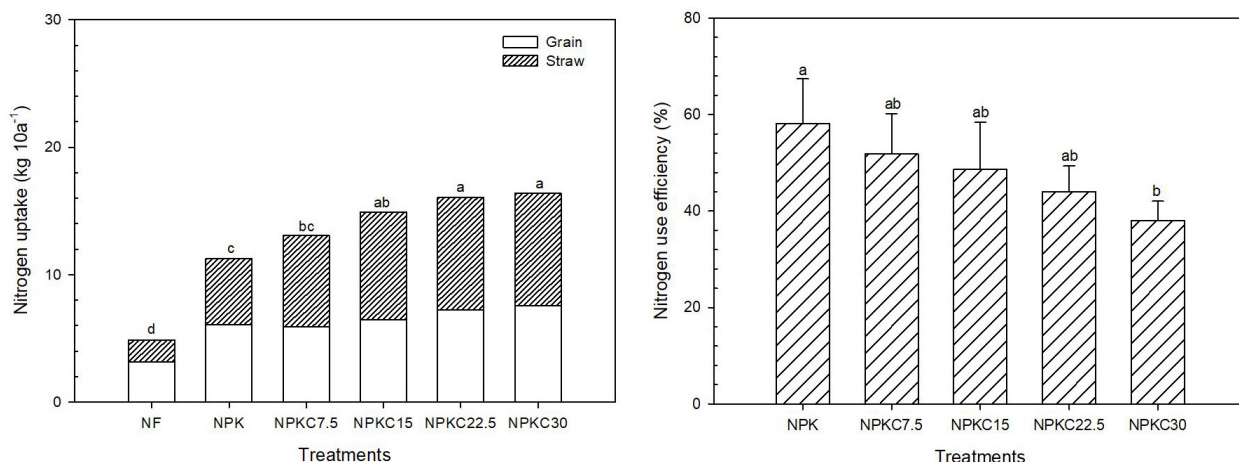


Fig. 2. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency according to the application rate of rice straw compost. NF, No fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; NPKC7.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹; NPKC15, Inorganic fertilizer + rice straw compost 15 ton ha⁻¹; NPKC22.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹; NPKC30, Inorganic fertilizer + rice straw compost 30 ton ha⁻¹. The different letters indicate significance according to the application rate of rice straw compost in Duncan’s multiple range test.

Table 3. Change in soil properties according to the application rate of rice straw compost.

Treatments*	pH (1:5)	Organic matter (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Exchangeable cations		
					K	Ca	Mg
					(cmol _c kg ⁻¹)		
NF	6.3a**	18d	20d	126c	0.14e	4.54d	0.95c
NPK	5.9d	22c	120a	81e	0.11f	4.51d	0.95c
NPKC7.5	6.2ab	26b	82c	110d	0.18d	5.61c	1.19b
NPKC15	6.0cd	29b	76c	104d	0.23c	5.65c	1.17b
NPKC22.5	6.1bc	37a	103b	166a	0.35b	6.68a	1.40a
NPKC30	5.8d	39a	110ab	147b	0.46a	6.28b	1.36a
Optimum range	5.5~6.5	20~30	80~120	157≤	0.2~0.3	5.0~6.0	1.5~2.0

*NF, No fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; NPKC7.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹; NPKC15, Inorganic fertilizer + rice straw compost 15 ton ha⁻¹; NPKC22.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹; NPKC30, Inorganic fertilizer + rice straw compost 30 ton ha⁻¹.

**The different letters indicate significance according to the application rate of rice straw compost in Duncan’s multiple range test.

Table 4. Differences in soil organic carbon, bulk density, and soil organic carbon stock according to the application rate of rice straw compost.

Treatments*	SOC (g kg ⁻¹)	Bulk density (Mg m ⁻³)	SOC stock (Mg C ha ⁻¹)
NF	10.3d**	1.46a	45.1c
NPK	12.7c	1.41a	53.7b
NPKC7.5	15.3b	1.26b	57.8b
NPKC15	16.6b	1.08c	53.5b
NPKC22.5	21.2a	1.03c	65.3a
NPKC30	22.8a	1.04c	71.2a

*NF, No fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; NPKC7.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 7.5 ton ha⁻¹; NPKC15, Inorganic fertilizer + rice straw compost 15 ton ha⁻¹; NPKC22.5, Inorganic fertilizer + rice straw compost 22.5 ton ha⁻¹; NPKC30, Inorganic fertilizer + rice straw compost 30 ton ha⁻¹.

**The different letters indicate significance according to the application rate of rice straw compost in Duncan's multiple range test.

하여 활성철에 흡착된 인산철의 가용화에 의해 용출이 되었거나 퇴비가 지속적으로 토양에서 환원되어 유효도가 증가된 것으로 판단된다(Oh *et al.*, 2016).

교환성 칼륨은 볏짚퇴비의 사용량이 증가할수록 교환성 칼륨이 높아 NPKC22.5와 NPKC30 처리구에서 각각 0.35 cmol_c kg⁻¹, 0.46 cmol_c kg⁻¹으로 적정범위인 0.2~0.3 cmol_c kg⁻¹보다 높았다.

토양유기탄소 축적량 비교

볏짚퇴비를 사용량에 따라 장기연용하였을 때 토양유기탄소의 축적은 Table 4와 같다. 토양유기탄소(Soil organic carbon, SOC)는 볏짚퇴비 사용량이 많았던 NPKC22.5, NPKC30 처리구가 21.2~22.8 g kg⁻¹로 처리구 중 가장 높았으며, 볏짚퇴비 사용량이 많을수록 높은 경향을 보여 Lee *et al.* (2013)의 연구결과와 일치하였다. 퇴비 사용량이 늘어날수록 SOC가 증가되지만 이러한 SOC의 증가는 강우 시 배출되는 유출수의 TOC (Total organic carbon)농도에 영향을 주기 때문에 농경지에 퇴비를 적절히 투입할 필요가 있다(Lee *et al.*, 2013).

토양유기탄소 축적량(Soil organic carbon stock, SOC stock)의 경우에도 볏짚퇴비 사용량이 가장 많았던 NPKC30 처리구에서 71.2 Mg C ha⁻¹로 높았으며, Cheng *et al.* (2017)와 Yang *et al.* (2014)의 연구에서도 퇴비 사용량이 많을수록 SOC stock이 높아 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 용적밀도가 높았던 무비구가 SOC stock이 낮았는데 일반적으로 토양의 용적밀도가 낮을 경우 토양의 공극을 통해 산소와 물 공급으로 유기물의 분해가 증가하여 토양유기탄소로 저장되기 때문이다(Lee *et al.*, 2019).

적 요

본 연구는 볏짚퇴비의 사용량(7.5, 15, 22.5, 30 ton ha⁻¹) 이 토양 화학성 및 유기탄소 축적에 미치는 영향을 알아보 고자 하였다. 연구결과 NPKC7.5 처리구에서 SOC와 SOC stock이 각각 15.3 g kg⁻¹, 57.8 Mg C ha⁻¹으로 NPKC22.5와 NPKC30 처리구보다 낮았으며, 볏짚퇴비 사용량이 가장 많았던 NPKC30 처리구는 SOC가 22.8 g kg⁻¹, SOC stock이 71.2 Mg C ha⁻¹로 NPKC 22.5처리구와 유의한 차이를 보이지 않았으나 처리구 중 높은 경향을 보여 퇴비 사용량이 많을수록 SOC의 축적이 많아진다는 것을 알 수 있었다. 그러나 교환성 칼륨과 칼슘이 퇴비 사용량이 늘어날수록 높아져 NPKC22.5와 NPKC30 처리구는 적정범위를 초과하였다. 과도한 유기물원 투입은 토양유기탄소 축적을 증가시키더라도 작물에 흡수되지 못한 양분이 수계로 유출되어 수질을 오염시키거나 토양에 축적되어 토양 환경에 악영향을 미칠 수 있으므로 지속적으로 볏짚퇴비를 투입하기 위해서는 토양, 수질 등 농업 환경을 고려하여 표준사용량을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ017283)의 지원에 의해 이루어진 것임

인용문헌(REFERENCES)

Ahn, B. K., D. Y. Ko, H. J. Kim, J. H. Kim, and J. H. Lee. 2017.

- Effect of application amount of livestock manure compost on soil properties and rice growth. *Journal of Agriculture & Life Sciences*. 48(1) : 1-7.
- Chang, K. W., S. H. Cho, and J. H. Kwak. 1999. Changes of soil physico-chemical properties by repeated application of chicken and pig manure compost. *J. of KOWREC*. 7(1) : 23-30.
- Cheng, W., A. T. Padre, H. Shiono, C. Sato, T. Nguyen-Sy, K. Tawarayaya, and K. Kumagai. 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 cool temperate region of Japan. *J. Soils Sediments*. 17 : 1834-1842.
- Chung, D. Y. and K. S. Lee. 2008. Role of chemical fertilizer and change of agriculture in Korea. *Jour. Agri. Sci*. 35(1) : 69-83.
- Gharieb, A. S., T. F. Metwally, S. H. Abou-Khadrah, and A. A. Glelah. 2015. Rice soil properties and nutrients uptake as affected by compost and antioxidant application. *Int. J. ChemTech Res*. 8(4) : 1543-1556.
- Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson, and J. D. Beaton. 2007. *Soil fertility and fertilizers* Pearson education.
- Hong, S. G., J. D. Sin, K. L. Park, S. B. Lee, S. H. Kim, S. C. Kim, H. Shiedung, and W. Amelung. 2015. Feasibility of analyzing soil organic carbon fractions using mid-infrared spectroscopy. *J. of KORRA*. 23(3) : 85-92.
- Hossen, S., N. Islam, R. Alam, and A. Baten. 2015. Effects of different rates of compost application on methane emission and crop yield in aman rice. *The Journal of Agriculture and Natural Resources Sciences*. 2(3) : 530-536.
- Hwang, S. A., H. S. Bae, S. H. Lee, J. G. Kang, H. K. Kim, and K. B. Lee. 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 & Life Sciences*. 44(2) : 65-70.
- Jeong, J. H., B. W. Sin, and C. H. Yoo. 2001. Effects of the successive application of organic matters on soil properties and rice yields. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 34(2) : 129-133.
- Kim, C. B., and J. Choi. 2002. Changes in rice yield, nutrients' use efficiency and soil chemical properties as affected by annual application of slag silicate fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 35(5) : 280-289.
- Kim, J. D., S. G. Kim, and C. H. Kwon. 2006. Effect of tillage system and fertilizer type on the forage yield, quality, and production cost of winter rye. *J. Anim. Sci & Technol*. 48(1) : 115-122.
- Kim, J. G., S. B. Lee, K. B. Lee, D. B. Lee, and J. D. Kim. 2001. Effect of applied amount and time of rice bran on the rice growth condition. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 20(1) : 15-19.
- Kim, L. Y., H. J. Cho, and K. H. Han. 2004. Changes of physical properties of soils by organic material application in farm land. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 37(5) : 304-314.
- Kim, M. S., S. C. Kim, S. J. Park, and C. H. Lee. 2018. Changes of exchangeable K in paddy soil applied potassium fertilizer for 62 years. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 51(3) : 239-246.
- Ku, H. H. 2018. Comparison of different approaches on determining nitrogen balance in a lowland paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 51(3) : 306-315.
- Kwon, S. I., Y. H. Lee, H. Y. Hwang, and S. H. Kim. 2022. Long-term application effects of soil amendments on yield and soil properties in paddy. *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc*. 30(1) : 5-11.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts in global climate change and food security. *Science*. 304 : 1623-1627.
- Lee, K. S., K. S. Yoon, D. H. Choi, J. W. Jung, W. J. Choi, and S. S. Lim. 2013. Agricultural soil carbon management considering water environment. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 22(1) : 1-17.
- Lee, S. M., I. S. Ryu, C. S. Lee, Y. H. Park, and M. H. Um. 1999. Determination of application rate of composted pig manure for wetland rice. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert*. 32(2) : 182-191.
- Lee, T. H., S. W. Kim, Y. C. Shin, Y. H. Jung, K. J. Lim, J. E. Yang, and W. S. Jang. 2019. Development of soil organic carbon storage estimation model using soil characteristics. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 61(6) : 1-8.
- Li, T., J. Gao, L. Bai, Y. Wang, J. Huang, M. Kumar, and X. Zeng. 2019. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil. *Soil&Tillage Research*. 195 : 104428.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology. RDA. Suwon, Korea.
- Oh, T. S., C. H. Kim, S. M. Kim, M. J. Jang, Y. J. Park, K. S. Kwon, and Y. K. Cho. 2016. Effects of paddy soil chemical changes and yield components of rice in accordance with the age and usage of organic fertilizer and chemical fertilizers. *Korean J. Org. Agric*. 24(4) : 969-980.
- Pradhan, S. R., S. Dash, M. R. Chowdhury, S. P. Das, K. Sar, and S. Moharana. 2022. Impact of integrated vermicompost and chemical fertilizer use on productivity, nutrient uptake and economics of rice. *Biological Forum-An International Journal*. 14(2a) : 89-95.
- Rasool, R., S. S. Kukal, and G. S. Hira. 2008. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system. *Soil & Tillage Research*. 101 : 31-36.
- Redda, A. and F. Kebede. 2017. Effects of integrated use of organic and inorganic fertilizers on soil properties performance, using rice (*oryza sativa* L.) as an indicator crop in tselemti district of north-western Tigray, Ethiopia. *International Research Journal of Agricultural Science and Technology*. 1(1) : 6-14.

- Ro, H. M., W. J. Choi, and S. I. Yun. 2003. Uptake and recovery of Urea-¹⁵N blended with different rates of composted manure. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(6) : 376-383.
- Yang, C. H., J. H. Jeong, T. K. Kim, S. Kim, N. H. Baek, W. Y. Choi, Y. D. Kim, W. K. Jung, and S. J. Kim. 2010. Effect of long-term annual dressing of organic matter on physico-chemical properties and nitrogen uptake in the paddy soil of fluvio-marine deposit. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6) : 981-986.
- Yang, X., W. D. Reynolds, C. F. Drury, R. Fleming, C. S. Tan, K. Denholm, and J. Yang. 2014. Organic carbon and nitrogen stocks in a clay loam soil 10 years after a single compost application. *Can. J. Soil Sci.* 94 : 357-363.