Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.56, No.2, pp.191-198, 2023

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Short Communication

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.2.191
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Effect of Green Manure on Water-Stable Soil Aggregates and Carbon Storage in Paddy Soil

Cho-Rong Lee[1]*, So Hui Kim[2], Yura Oh[2], You Jin Kim[2], and Sang-Min Lee[3]

[1]Researcher, Organic Agriculture Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea
[2]Researcher Assistant, Organic Agriculture Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea
[3]Senior Researcher, Organic Agriculture Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

***Corresponding author:** echrong@korea.kr

Received: May 9, 2023
Revised: May 24, 2023
Accepted: May 25, 2023

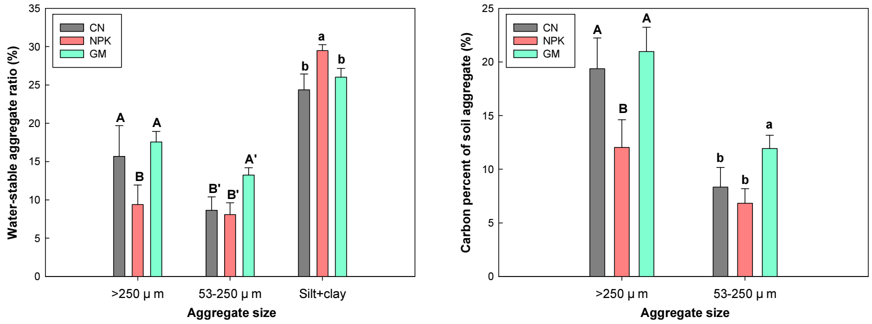
Edited by
Seok-In Yun,
Wonkwang University, Korea

ORCID
Cho-Rong Lee
https://orcid.org/0000-0002-4912-8035
So Hui Kim
https://orcid.org/0000-0002-5216-9364

ABSTRACT

Green manure, used for eco-friendly agriculture, supplies organic matter (OM) and nutrients to soil and improves soil fertility. Green manuring also has the potential to affect physical stability and carbon storage. The objective of this study was to investigate the effect of green manure on water-stable soil aggregates and carbon stock in paddy. Soil samples were collected from 3 treatments in Chungcheongnam-do Agricultural Research and Extension Services on 29 April 2022; Control (CN), Green manure treatment (GM), and Chemical fertilizer treatment (NPK). Water-stable aggregate fractions (<53 μm, 53 - 250 μm, and >250 μm), carbon contents in bulk soil and aggregate fractions, and total carbon stock were analyzed. Carbon content in GM was 15% higher than in NPK. However, there was no significant difference in soil carbon stock (Mg C ha^{-1}) in GM and NPK. Water-stable aggregate ratio (%) and carbon percent of macro-aggregates (>250 μm) and micro-aggregates (53 - 250 μm) in GM were significantly higher than in NPK. As a result, green manure promoted soil aggregation and stabilized carbon in soil aggregates. These results confirmed that green manure, used for nutrient supply, improves soil carbon storage and soil physical stability.

Keywords: Carbon stock, Green manure, Organic farming, Organic matter, Soil quality



Distribution of water-stable aggregate and carbon of each fraction in treatments: CN, control; NPK, chemical fertilizer treatment; GM, green manure treatment. Vertical bars represent standard deviations (n = 3) and different letter in the same aggregate size indicates significantly different at the 5% level by DMRT.

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

친환경농업 실천을 위해 사용되는 풋거름작물은 토양에 양분과 유기물을 공급하는 효과가 있다. 풋거름작물을 재배하여 토양에 환원하면 유기물 공급효과가 있고, 토양에서 풋거름작물 잔사는 분해되어 리그닌, 셀룰로오스 등의 탄소화합물로 변환되고 (Meena et al., 2018), 그 과정 중 토양 전용적밀도를 낮추고 공극률을 높이는 물리성 개선효과가 있다고 알려져 있다 (Lei et al., 2022). 이뿐만 아니라 이러한 탄소화합물이 토양의 점토 입자 표면에 결합하여 토양의 응집력을 향상시키면 토양 입단화를 촉진시킬 수 있다 (Son and Cho, 2009; Blanco-Canqui et al., 2011).

이렇게 입단이 발달하는 과정에서 식물 뿌리나 잔사 등의 유기물이 토양 입자 주변을 둘러싸고 입단 사이에 탄소를 격리하는데 (Gale et al., 2000), 이렇게 입단 내에 저장된 탄소는 안정화된 형태로 토양에 수십 년에서 수세기까지 장기간 저장이 가능하다고 한다 (Ontl and Schulte, 2012). 특히 소입단은 크기가 53 - 250 μm로 작아 미생물 접근이 제한되어 저장된 유기탄소의 안정성을 높일 수 있다 (Totsche et al., 2018). 크기가 250 μm 이상인 대입단은 미생물에 의해 분해되지 않게 소입단을 보호하여 탄소 저장에 기여할 수 있다 (Six et al., 2000).

논 토양은 1년 중 벼를 재배하는120일 동안 담수상태로 관리되며 (Choi et al., 2018), 나머지 약 240일은 호기 상태로 유지된다. 벼 수확 후 논이 호기 상태가 되면 미생물활성이 증가하고 토양 유기물 분해가 촉진될 수 있다 (Haque et al., 2016). 이때 풋거름작물과 같은 유기물을 투입하는 경우 토양 입단 형성이 촉진 (Son and Cho, 2009; Blanco-Canqui et al., 2011)되고 입단 내부에 격리된 탄소량이 증가 (Gale et al., 2000)하여 미생물의 접근이 어려워질수록 논 토양에서 탄소격리 효과가 높아질 것으로 보인다.

국내에서는 논 토양에 풋거름작물을 사용하였을 때 토양의 화학성 및 비옥도 개선 효과에 대한 연구는 많지만 (Choi et al., 2010; Kim et al., 2012), 풋거름작물을 지속적으로 환원하였을 때 논 토양의 입단 발달과 같은 물리적 안정성 개선과 이에 따른 탄소 저장능 향상에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구는 논 토양에서 지속적인 풋거름작물 투입이 토양의 입단화 촉진과 입단 내 탄소 격리에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

시험 장소 및 처리구 풋거름작물이 논 토양의 입단 변화 및 탄소 저장에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 충청남도농업기술원 시험포장에서 벼 이앙 전인 2022년 4월 29일에 토양 시료를 채취하였다. 본 연구에 사용된 토양은 5년 이상 동일한 처리로 관리된 논으로 모든 처리에서 벼 수확 후 남은 볏짚은 토양에 환원하였다. 처리구는 외부 자재 투입 없이 벼를 재배한 무처리 (CN)와, 호밀과 헤어리베치를 혼파하여 재배한 풋거름작물 처리구 (GM), 표준시비량에 준하여 무기질비료를 투입한 처리구 (NPK) 총 3가지로, 모든 처리구는 단구로 구획되어 각 처리구를 임의로 3개 구획으로 나누어 처리구 당 3개의 시료로 채취하였다.

토양의 이화학성 분석 토양의 전용적밀도 분석을 위한 시료는 현장에서 100 cm^3 코어를 이용하여 채취하였으며, 토성분석은 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 비중계법으로 분석 후 USDA 분류기준을 적용하였다. 화학성 분석 시료는 현장에서 20 cm 깊이로 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과시켜 분석에 사용하였다. 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5 (w/w)의 비율로 혼합한 뒤 30분간 진탕한 후 pH meter (Orion Star pH Conductivity Meter A215, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 분석하였다. 토양 총 탄소 (total carbon, T-C)와 총

질소 (total nitrogen, T-N) 함량은 원소분석기 (Vario Max CN, Elementar, Germany)를 이용하여 분석하였다. 토양의 총 탄소 저장량 (C_{stock})은 Mukherjee et al. (2014)을 참고하여 Eq. 1을 이용해 산정하였다. 아래 식에서 C는 토양의 총탄소 함량 (%)이고, D는 토양 깊이 (cm)로 본 연구에서 20 cm를 사용하여 계산하였다. 그리고 BD는 토양의 전용적 밀도 (Mg m^{-3})이다.

$$C_{stock}\ (\mathrm{Mg\ C\ ha^{-1}}) = C \times D \times BD \qquad \text{(Eq. 1)}$$

토양의 내수성입단률 및 입단 내 탄소 저장량 분석 내수성입단 분석 위한 토양 시료는 입단이 파괴되지 않게 삽을 이용하여 채취 후 8 mm 체를 통과시킨 건토 30 g을 사용하였다. 입단 분석은 Yoder형 습식사별진탕기 (DIK-2012, Daiki, Japan)를 이용한 습식사별법 (NIAST, 2000)으로 2 mm, 250 μm, 53 μm 체를 1개 세트로 하여 30°C의 항온수조에서 30분간 상하로 진탕하였다. 진탕 후 53 μm를 통과한 토립을 실트와 점토로 보았다. 체에 걸러진 토양 중 입단과 비입단을 구분하기 위해 1차 교반한 체를 분산제 (0.2% sodium hexametaphosphate)에 넣고 다시 교반하여 입단을 파괴하였다. 1차 교반 후 체에 걸러진 토양을 건조한 무게와, 분산제로 넣고 입단을 파괴한 후 체에 걸러진 토양 무게를 빼서 각 크기별 입단의 무게로 보았다. 분산제 투입 후 2 mm와 250 μm 체를 통과한 토양 (Fig. 1A, 1B)을 대입단, 53 μm 체를 통과한 토양 (Fig. 1C)을 소입단으로 구분하였다. 처리별 내수성입단율 (%)은 Eq. 2를 이용하여 산정하였다.

$$\text{Macro-aggregate ratio (\%)} = [A+B\ (g)] / W\ (g) \times 100$$
$$\text{Micro-aggregate ratio (\%)} = [C\ (g)] / W\ (g) \times 100 \qquad \text{(Eq. 2)}$$
$$\text{Water-stable aggregate ratio (\%)} = \text{Macro-aggregate ratio} + \text{Micro-aggregate ratio}$$

A, B, C는 1차 교반 후 분산제를 이용하여 토양 입단을 파괴했을 때 2 mm, 250 μm, 53 μm 체를 통과한 토양의 무게 (Fig. 1의 A, B, C)이며, W는 내수성입단 분석에 사용한 토양 시료의 무게 (g)이다.

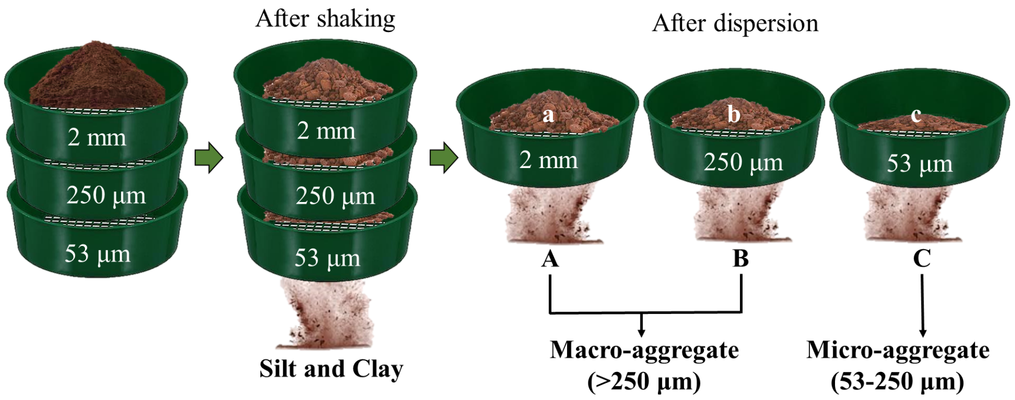


Fig. 1. Process of water-stable soil aggregate fraction.

토양 탄소 중 입단에 저장된 탄소의 비율 (C_a)을 측정하기 위해 분산제 투입 후 각 체를 통과한 토양을 건조하였다.

이때 Fig. 1의 2 mm와 250 μm 체를 통과한 A와 B를 합쳐 대입단으로, 53 μm체를 통과한 C를 소입단으로 구분하고 총 탄소함량 (C_s)을 원소분석기를 이용하여 측정하였다. C_a는 Huang et al. (2017)을 참고하여 Eq. 3을 이용해 산정하였다.

$$C_a\ (\%) = C_s \times WSA / M_c \times 100 \qquad \text{(Eq. 3)}$$

C_s는 각 입단의 탄소 함량 (g kg^{-1})이며, WSA는 입단율 (%)이다. M_c은 전체 토양의 탄소 함량 (g kg^{-1})이다.

통계 분석 실험에서 얻어진 데이터의 통계 분석은 SPSS를 이용하여 one-way ANOVA 분석을 수행하였으며, 5% 유의수준 ($p < 0.05$)에서 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)를 이용하여 처리간의 효과를 비교 분석하였다.

Results and Discussion

풋거름작물 처리에 따른 토양의 이화학성 변화 처리별 토양 이화학성 분석결과는 Table 1과 같다. CN, NPK, GM의 점토함량은 19 - 22%로 큰 차이가 없었으며, 토성은 모든 처리에서 양토였다. 토양 pH는 5.2 - 5.5로 약산성 범위였는데, 논 토양은 규산질비료와 같은 개량제를 투입하지 않으면 pH가 6 이하로 낮게 유지 (Kim et al., 2011) 되기 때문으로 보인다. 또한 풋거름작물을 지속적으로 투입한 GM는 풋거름 분해로 생성된 유기산 때문에 (Choi et al., 2010; Lei et al., 2022) pH가 5.2로 다른 처리구보다 다소 낮아지는 경향을 보였지만, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 ($p = 0.10$). 토양의 총 탄소 및 총 질소 함량은 GM이 가장 높았으며, NPK, CN 순으로 낮았다. 5년 이상 풋거름 작물을 투입으로 인한 바이오매스 공급 때문에 탄소 함량이 증가 (Ansari et al., 2022)한 것으로 보이며, 이러한 결과는 농경지에 풋거름작물을 처리한 다른 연구 (Yang et al., 2009; Choi et al., 2010)와 유사하였다. CN과 NPK는 동일하게 볏짚 환원을 실시하였으나 총 탄소함량에서 차이를 보였다. Kim et al. (2011) 및 Byeon et al. (2022)의 연구결과, 동일비료 장기연용 논에서 무비구와 3요소구의 벼 수량차이는 연차별로 약간의 변동은 있으나 20 - 30% 정도 였는데 우리 연구에서도 NPK에서 벼 수량 증가로 볏짚의 생산량이 CN에 비해 많았을 것으로 보인다. 이러한 볏짚의 환원량 차이로 인해 총 탄소 함량이 CN보다 NPK에서 높았을 것으로 판단된다.

Table 1. Soil physicochemical properties in treatments.

Treatment	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture (USDA)	pH (1:5 H_2O)	T-C (%)	T-N (%)	Bulk density (Mg m^{-3})
CN†	43.2	34.5	22.2	Loam	5.5 ns	0.79 c‡	0.08 c	1.14 ns
NPK	46.7	34.0	19.3	Loam	5.4	1.04 b	0.10 b	1.31
GM	43.2	34.5	22.2	Loam	5.2	1.20 a	0.11 a	1.16

†CN, control; NPK, chemical fertilizer treatment; GM, green manure treatment.
‡Different letter in same column indicates significantly different at the 5% level by DMRT.

토양 내 탄소 축적량을 의미하는 C_{stock}는 CN (17.9 Mg C ha^{-1})에 비해 NPK와 GM에서 약 10 Mg C ha^{-1} 증가한 27.1, 27.6 Mg C ha^{-1}로 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (Fig. 2). 밭 토양에서 무비구 대비 풋거름작물, 화학비료 처

리시 토양 탄소 축적량이 유의한 증가를 보였던 것 (Hwang et al., 2022)과 같은 경향을 나타냈다. CN 대비 Table 1에서 총 탄소 함량이 1.2%, 1.0%로 달랐던 GM과 NPK의 탄소 축적량은 유사한 경향을 보였다. 이는 GM에서 지속적인 풋거름작물 투입으로 인해 토양 탄소 함량이 증가하였고 전용적밀도는 다소 낮아진 것과 관련된 것으로 보인다.

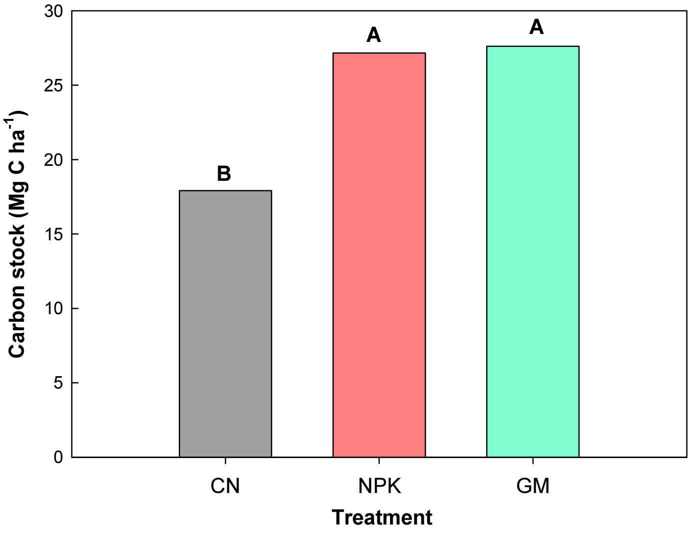


Fig. 2. Carbon stock (C_{stock}) in treatment: CN, control; NPK, chemical fertilizer treatment; GM, green manure treatment. Different letter indicates significantly different at the 5% level by DMRT.

풋거름작물 처리에 따른 토양의 내수성입단율 변화 처리별 논 토양의 내수성입단율 (%)을 조사한 결과, CN은 24.3%였다. NPK는 17.5%로 처리 중 가장 낮았으며 GM은 30.8%로 가장 높았다. 내수성입단 중 입단의 크기가

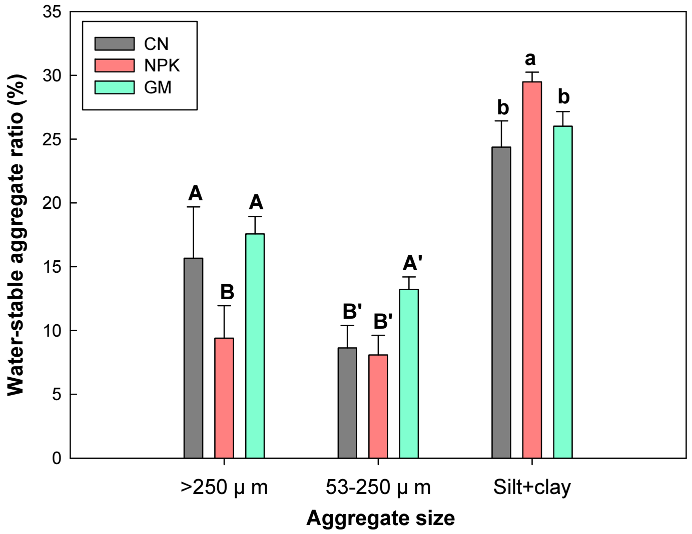


Fig. 3. Distribution of water-stable aggregate about macro-aggregates (>250 μm), micro-aggregates (53 - 250 μm), and silt and clay (<53 μm) in treatments: CN (rice straw), NPK (rice straw + NPK), GM (rice straw + green manure). Vertical bars represent standard deviations (n = 3) and different letter in the same aggregate size indicates significantly different at the 5% level by DMRT.

250 μm 이상인 대입단의 비율 (%)은 GM (17.6%)이 NPK (9.4%)에 비해 통계적으로 유의한 증가를 보였다. 53 - 250 μm 사이의 소입단의 비율 (%) 역시 GM에서 13.2%로 NPK (8.1%) 보다 증가하였다 (Fig. 3). 또한, 실트와 점토 크기의 토양입자의 비율 (silt and clay in Fig. 1)은 GM (26.0%)과 CN (24.4%)이 NPK (29.5%)보다 낮았다 ($p < 0.05$). 본 연구에서 논 토양에 풋거름작물을 재배 및 환원하면 무기질비료를 처리한 것보다 입단이 발달되고 이에 따라 실트와 점토의 비율은 감소하는 것으로 나타났다. 최근 연구결과 토양에 풋거름작물과 볏짚 처리 시 유기물 투입으로 인해 토양 안정성이 개선되어 무처리보다 토양의 소입단율과 대입단율이 29.4% 증가 (Zhang et al., 2023)하였다고 보고하였다. Tang et al. (2022) 역시 농경지에 유기물을 공급 시 토양 탄소 함량 증가로 토양의 입단이 안정화한다고 하였다. 본 연구에서도 GM의 총 탄소 함량은 1.2%로 CN (0.79%)이나 NPK (1.04%) 보다 높았는데 (Table 1), 5년 이상 풋거름작물과 볏짚 환원에 의한 유기물 투입이 토양 입단 안정화에 영향을 주었음을 알 수 있었다.

풋거름작물 처리에 따른 토양 입단 내 탄소 저장률 변화 처리별 토양 탄소 중 대입단과 소입단에 저장된 탄소 비율 (C_a)을 조사한 결과는 Fig. 4와 같다. 입단 내 탄소 비율 (%)은 모든 처리구에서 대입단이 소입단보다 높게 나타나 소입단보다 대입단에 더 많은 탄소가 저장되어 있음을 알 수 있었다. 대입단 내 탄소 비율은 GM이 21.0%로 NPK (12.0%)에 비해 높았다. 또한, 소입단 내 탄소 비율은 GM이 11.9%로 CN (8.3%)과 NPK (6.8%)보다 통계적으로 유의하게 높았다. GM의 입단 내 탄소 증가는 헤어리베치 등 분해가 쉬운 유기물 투입을 통한 탄소 공급 때문으로 판단되다 (Sharma et al., 2021). 농경지에서 풋거름작물은 토양의 미생물 활성을 촉진해 토양 탄소로 저장한다 (Chen et al., 2020). 이렇게 토양에 일차적으로 저장된 탄소가 대입단에 저장되면 1 - 10년간 분해되지 않고 토양 내 저장이 가능하며, 매우 안정적인 구조를 가진 소입단에 저장되면 수십 년에서 1세기까지 분해되지 않고 저장이 가능하다 (Ontl and Schulte, 2012). 본 연구 결과, 논 토양에 장기간 풋거름작물을 처리하면 무기질비료를 사용하는 것 보다 토양의 대입단 및 소입단을 발달시키고, 입단 내 탄소 함량을 증가시켜 토양 내 탄소 저장 기간이 증대될 수 있음을 알 수 있었다.

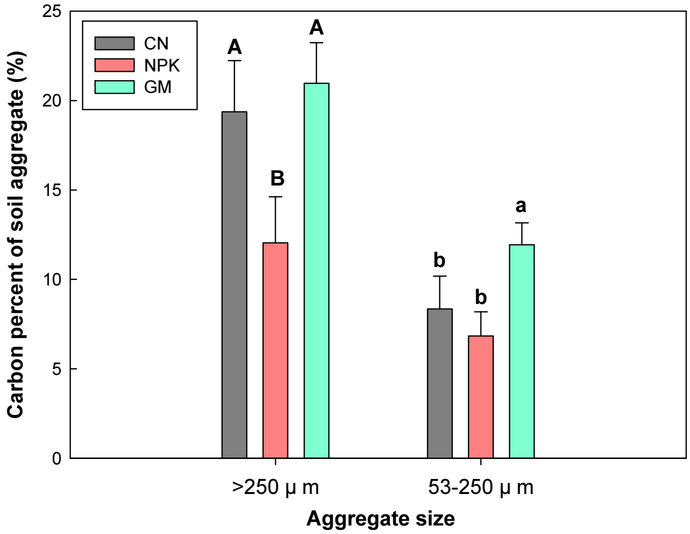


Fig. 4. Carbon percent of macro-aggregates (>250 μm) and micro-aggregates (53 - 250 μm) in treatments: CN (rice straw), NPK (rice straw + NPK), GM (rice straw + green manure). Vertical bars represent standard deviations (n = 3) and different letter in the same aggregate size indicates significantly different at the 5% level by DMRT.

Conclusions

본 연구는 풋거름작물을 5년 이상 논에 시용하였을 때 토양의 입단화 촉진 및 탄소 저장에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 토양 탄소 함량 (%)은 GM에서 가장 높았으나, 토양 탄소 축적량 (Mg C ha^{-1})은 GM과 NPK에서 비슷한 경향을 보였다. 토양의 내수성입단율 (%)은 GM에서 증가되는 것으로 나타났으며, 토양 탄소 중 대입단 및 소입단에 저장된 탄소 비율 (%)도 GM에서 NPK보다 증가하였다. 즉 논 토양에서 지속적인 풋거름작물 시용은 무기질비료 시용에 비해 토양에 유기탄소 함량을 높이고 내수성입단의 발달을 촉진하여 토양의 물리적 안정성을 개선시켰다. 또한, GM은 NPK와 토양 탄소 축적량은 유사하였지만, 입단 내 격리된 탄소를 증가시켜 토양의 탄소 저장기간을 늘리는데 효과적임을 확인하였다. 이러한 결과로 볼 때 친환경농업에서 비옥도 증진을 위해 사용되는 풋거름작물이 물리적 안정성과 탄소 저장능 향상에도 기여하는 효과적인 수단이라 생각된다. 본 연구는 각 처리구의 시험 전 토양에 대한 데이터가 없어 현재 시점의 토양을 처리구간 비교하였다. 또한 시험에 사용된 처리구는 논으로 농기계 활용을 위해 단일 구획으로 구성되었다는 한계가 있으나, 구획 내 임의로 3개의 반복을 두어 시료를 채취하여 분석하였다.

Acknowledgement

This study was conducted by the support of “Research Program for Agricultural Science and Technology Development (Project No. PJ015869012023)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Ansari, M.A., B.U. Choudhury, J. Layek, A. Das, R. Lal, and V.K. Mishra. 2022. Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India). Soil Tillage Res. 218:105318.

Blanco-Canqui, H., M.M. Mikha, D.R. Presley, and M.M. Claassen. 2011. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 75(4):1471-1482.

Byeon, J.E., S.H. Kim, J.H. Shim, Y.N. Lee, S.I. Kwon, and Y.H. Lee. 2022. Evaluation of soil characteristics and rice productivity in a paddy field with annual application of organic resources. Korean J. Soil Sci. Fert. 55(4):541-547.

Chen, S., X. Zhang, L. Shao, H. Sun, J. Niu, and X. Liu. 2020. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China plain. Catena 187:104359.

Choi, B.S., J.A. Jung, M.K. Oh, S.H. Jeon, H.G. Goh, Y.S. Ok, and J.K. Sung. 2010. Effects of green manure crops on improvement of chemical and biological properties in soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 43(5):650-658.

Choi, S.W., J. Kim, M.S. Kang, S.H. Lee, N.G. Kang, and K.M. Shim. 2018. Estimation and mapping of methane emissions from rice paddies in Korea: Analysis of regional differences and characteristics. Korean J. Agric. For. Meteorol. 20(1):88-100.

Gale, W.J., C.A. Cambardella, and T.B. Bailey. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. 64(1):201-207.

Haque, M.M., G.W. Kim, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2016. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping. Field Crops Res. 193:133-142.

Huang, R., M. Lan, J. Liu, and M. Gao. 2017. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land and paddy soil: The role of different straws returning. Environ. Sci. Pollut. Res. 24:27942-27952.

Hwang, H.Y., N.H. An, S.M. Lee, D.I. Kang, J.A. Jeong, and C.R. Lee. 2022. Soil labile organic carbon fractions and carbon management index in response to different fertilization under organic maize farming system. Korean J. Soil Sci. Fert. 55(4):522-532.

Kim, K.M., B.J. Lee, and Y.S. Cho. 2012. Differences of soil carbon by green manure crops in rotated cropping system. Korean J. Soil Sci. Fert. 45(6):1027-1031.

Kim, M.S., Y.H. Kim, B.K. Hyun, J.E. Yang, Y.S. Zhang, H.B. Yun, Y.K. Sonn, Y.J. Lee, and S.K. Ha. 2011. Rice yield and changes of available silicate in paddy soils from long-term application of chemical fertilizers and soil amendments. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(6):1118-1123.

Lei, B., J. Wang, and H. Yao. 2022. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. Agriculture 12(2):223.

Meena, B.L., R.K. Fagodiya, K. Prajapat, M.L. Dotaniya, M.J. Kaledhonkar, P.C. Sharma, R.S. Meena, T. Mitran, and S. Kumar. 2018. Legume green manuring: An option for soil sustainability. p. 387-408. In R.S. Meen et al. (ed.) Legumes for Soil Health and Sustainable Management. Springer, Kallang, Singapore.

Mukherjee, A. and R. Lai. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. PLoS One 9(8):e105981.

NIAST. 2000. Soil and plant analysis method. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.

Ontl, T.A. and L.A. Schulte. 2012. Soil carbon storage. Nat. Educ. Knowl. 3(10):35.

Sharma, S., P. Singh, O.P. Choudhary, and Neemisha. 2021. Nitrogen and rice straw incorporation impact nitrogen use efficiency, soil nitrogen pools and enzyme activity in rice-wheat system in north-western India. Field Crops Res. 266:108131.

Six, J., E.T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biol. Biochem. 32:2099-2103.

Son, J.G. and J.Y. Cho. 2009. Effect of organic material treatments on soil aggregate formation in reclaimed tidelands. Korean J. Soil Sci. Fert. 42(3):201-206.

Tang, H., K. Cheng, L. Shi, C. Li, L. Wen, W. Li, G. Sun, and Z. Long. 2022. Effects of long-term organic matter application on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in a double-cropping rice field. Environ. Res. 213:113700.

Totsche, K.U., W. Amelung, M.H. Gerzabek, G. Guggenberger, E. Klumpp, C. Knief, E. Lehndorff, R. Mikutta, S. Peth, A. Prechtel, N. Ray, and L. Kogel-knabner. 2018. Microaggregates in soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 181(1): 104-136.

Yang, C.H., J.H. Ryu, T.K. Kim, S.B. Lee, J.D. Kim, N.H. Baek, S. Kim, W.Y. Choi, and S.J. Kim. 2009. Effect of green manure crops incorporation with rice cultivation on soil fertility improvement in paddy field. Korean J. Soil Sci. Fert. 42(5):371-378.

Zhang, Z.H., N. Jun, L. Hai, W. Cui-lan, W. Yun, L. Yu-lin, L. Yan-hong, G.P. Zhuou, S.J. Gao, and W.D. Cao. 2023. The effects of co-utilizing green manure and rice straw on soil aggregates and soil carbon stability in a paddy soil in southern China. J. Integr. Agric. 22(5):1529-1545.