

Research Article



CrossMark

Open Access

벼 재배 시 바이오차 펠릿 시용 수준에 따른 농업 환경 영향 및 토양 탄소격리 평가

신중두^{1*}, 박도균¹, 김희선¹, 이선일¹, 홍승길²

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ²농촌진흥청 기술협력국 국외농업기술과

Evaluation of Agro- Environmental Effect and Soil Carbon Sequestration to different Application Ratios of Supplemented Biochar Pellet in the Paddy during Rice Cultivation

JoungDu Shin^{1*}, Dogyun Park¹, Huiseon Kim¹, SunIl Lee¹ and SeungGil Hong² (¹Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Division for Korea Program for International Cooperation in Agricultural Technology, Technology Cooperation Bureau, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea)

Received: 1 June 2020/ Revised: 12 June 2020/ Accepted: 16 June 2020

Copyright © 2020 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

ORCID

JoungDu Shin

<https://orcid.org/0000-0002-5941-3438>

SeungGil Hong

<https://orcid.org/0000-0002-5214-8061>

Abstract

BACKGROUND: Biochar-based fertilizers delay the nutrient release and feature a slow release effect for agricultural and environmental advantages. This experiment was conducted to evaluate agro-environmental effects of different application ratios of modified biochar pellets supplemented.

METHODS AND RESULTS: The treatments consisted of the control, 40% N, 60% N and 60% N (0.07M MgO) of modified supplemented biochar pellets (MSBP), which were based on recommended ratio of nitrogen for rice cultivation. For the paddy water, the NH₄-N and NO₃-N concentrations in whole treatments rapidly increased at 84 days and 40 days after transplanting, respectively. The PO₄-P concentrations in the MSBP were generally lower than those of the control. For the paddy soil, NH₄-N concentrations in the MSBP were higher than those of the control at 5 days after transplanting, while NO₃-N concentrations were not significantly different

in the treatments through rice cultivation. P₂O₅ concentrations in the control were higher than those of the MSBP until 40 days after transplanting while K₂O concentrations were not significantly different among the treatment. The highest carbon sequestration was 970 kg ha⁻¹ in the 60% N (0.07M MgO), and the potential carbon storage in the 60% N (0.07M MgO) was higher at 222 kg ha⁻¹ than the control during rice cultivation. It shown that the rice yield in the control was not significantly different from the 40% N and 60% N (0.07M MgO) application plots.

CONCLUSION: Application of MSBP for rice cultivation was effective for carbon sequestration and agro-environmental effects even though nitrogen application ratio was reduced at 40% based on recommended application ratio of fertilizer.

Key words: Agro-environmental effect, Carbon sequestration, Modified blended biochar pellet, Rice cultivation

서론

선진국 중심으로 온실가스 감축 의무가 부여되는 기후체제에서 개도국을 포함한 유엔 가입국 모두 온실가스 감축 의무가 부여된 신기후체제가 출범하게 됨에 따라서 기후변화를

*Corresponding author: JoungDu Shin
Phone: +82-63-238-2494; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: jdshin1@korea.kr

완화할 수 있는 온실가스 감축 기술 개발이 더욱 필요하게 되었다. 농업 부문도 효율적이고 체계적인 온실가스 감축 기술 개발이 필요한 시점에 도달하게 되었다. 우리나라는 2030년까지 온실가스 배출전망치(BAU; Business As Usual) 대비 37% 감축 목표를 설정하였으며, 농축산부문은 BAU 대비 7.9% 감축량이 할당되었다.

최근에 바이오차와 같은 탄소가 풍부한 바이오매스 전환 산물은 농업 생태계로부터 온실가스를 완화하는 좋은 소재로 주목받고 있다[1]. 다양한 목적으로 이용할 수 있는 바이오차는 산소가 없는 조건에서 바이오매스 전환 기술을 통하여 생산된 다공성 탄소 소재이다[2]. 바이오차의 구성 물질은 원료와 열분해 조건에 좌우된다고 하였다[3-5]. 농업 부산물로부터 생산된 바이오차는 100년 동안 미생물에 의해 분해되지 않는 탄소 이중 고리와 방향족으로 구성되어있다[6]. 바이오차를 사용한 논 토양에서 NH₃ 휘산으로 인해 논 표면수의 NH₄-N 농도가 증가하였으며, 벼 수량은 증수되었다[7]. 반면에 농업 생태계에서 바이오차 시용의 효과는 양분을 흡착하거나 보유하는 능력이 있다고 제안하였다[8]. 바이오차를 농경지에 시용함으로써 돈분 퇴비 및 녹비에 포함된 질소 이동에 관여한다[9-11]. 또한, 바이오차를 시용함으로써 논 토양에서 CO₂ 발생량을 줄이며[12], 콩 재배지에서 N₂O 배출량의 50%를 줄이는 효과가 있는 것으로 발표되었다. 돈분 및 바이오차 펠릿을 사용한 논 표면수의 NH₄-N과 NO₃-N의 농도는 시판되고 있는 완효성 비료 보다 1.6배 낮았으며, 토양에서의 NH₄-N의 농도는 높게 관측되었다[13].

단기간 탄소격리는 토양에서 유기물이 분해되는 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 줄이는 것을 말하며, 반면 장기간 탄소격리는 열 전환 물질인 바이오차로서 저장되는 것을 말한다. 왕겨나 옥수수대로부터 전환된 바이오차는 토양에서 장기간 탄소를 격리하는 효과가 있다[14]. 바이오차 펠릿을 사용한 논 토양에서 탄소격리량은 2.94 tonnes ha⁻¹로 산정되었다[13].

그러므로 기후변화 대응 농업 분야 온실가스 배출권 거래 제 확대 방안의 하나로 탄소격리가 대두되었으나 농촌 현장에서 바이오차의 투입 시 미세분진이 형성되어 실제로 농경지 살포에 어려움이 있어 바이오차 공급 및 농경지 살포 방법 개선이 필요하였다. 따라서 일 회 시용으로 탄소격리, 지력 증진, 생력 효과 등 다양한 효과를 얻을 수 있는 바이오차 및 가축분뇨를 이용한 펠릿 형태의 완효성 비료를 제조하였다. 본 연구는 벼 재배 시 바이오차 펠릿 사용량에 따른 논물과 토양 중의 화학성 평가, 토양 탄소격리량 평가 및 벼 생육 특성을 고려한 농업 환경 영향 평가를 수행하였다.

재료 및 방법

바이오차 펠릿 조제

돈분 퇴비와 개량 왕겨 바이오차를 6 : 4로 혼합하여 N-P-K 용액을 분사한 후 펠릿 형태로 조제하였다(Fig. 1). 바이오차 펠릿 제조 공정에 이용된 원료 물질에 대한 화학성분 함량은 Table 1에 나타내었다.

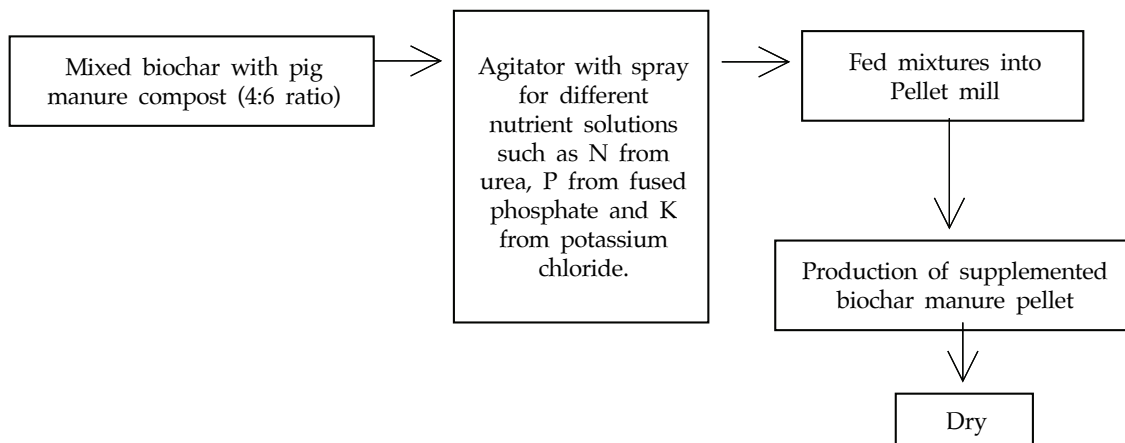


Fig. 1. Diagram of processing the supplemented biochar manure pellets with different types of fertilizer.

Table 1. Chemical properties of biochar and pig manure compost used^{a)}

Materials Used	pH	EC	TC	TOC	TIC	TN
		(dS m ⁻¹)		-----g kg ⁻¹ -----		
Biochar	9.67 (1:10)	1.4	566	533	33.5	2.0
Pig manure compost	8.77 (1:5)	3.4	289	259	30.2	29.1

^{a)} EC; Electric conductivity, TC; Total carbon, TOC; Total organic carbon, TIC; Total inorganic carbon, and TN; Total nitrogen.

바이오차 펠릿 및 돈분 퇴비의 총질소 함량은 Table 2에 나타내었으며, 바이오차 펠릿의 총질소 함량은 각각 68.7과 69.4 g kg⁻¹을 함유하고 있었으며, 돈분 퇴비는 30.2 g kg⁻¹이었다.

벼 재배 관리

본 연구는 국립농업과학원 논 시험포(위도, 35° 49.510'N; 경도, 127° 2.536'E)에서 수행되었으며, 본 실험에 이용한 벼 품종은 신동진으로, 재식거리는 30cm × 60cm이었다. 대조구는 농촌진흥청의 벼 재배 시 표준비료사용량(N-P-K, 9-4.5-5.7 kg 10a⁻¹)과 돈분 퇴비(260 kg 10a⁻¹)를 기준으로 질소와 가리는 기비와 추비로 나누어 2회에 걸쳐 분할 사용하였으며, 돈분 퇴비와 인산은 전량 기비로 사용하였다. 바이오차 펠릿형 완효성 비료는 각각 대조구의 질소 사용량 기준 40% (40% N), 60% (60% N) 수준 및 질소 60% 수준에 0.07M MgO를 반응시켜(60% N + 0.07M MgO), 3수준 모두 전량 기비로 사용하였다. 시험구 배치는 3 반복 세구배치법으로 수행하였다. 시험 전 토양에 대한 이화학성 성분을 각각 Table 3에 나타내었다. 시험 포장의 토양은 pH 6.0으로 중성이며, 질소 함량이 낮은 식양토이었다.

벼 재배 관리는 농촌진흥청 표준 재배법에 따랐다. 처리 간에 벼 생육을 비교하기 위해 초장과 분얼수를 조사하였으며, 조곡 수량 및 벧짚 무게는 재배 면적 중 1×1 m를 조사하여 산정하였다.

토양 화학 성분 분석

논의 물 시료는 이앙 후 5일, 9일, 19일, 40일 및 84일에 시료를 채취하였고, 토양 시료는 논 표면 수 시료와 같이 연이어 117일까지 확장하여 시료 채취한 후, 풍건하여 2 mm체에 걸러 화학성분 분석에 이용하였다. 논 표면수는 여과지(Whatman #4)에 여과 후 NH₄-N 및 NO₃-N은 UV Spectrophotometer를 사용하여 측정용 키트(C-Mac, Korea)로 당일 분석한 후, 나머지 물 시료는 4°C에 냉장 보관하였다. 그 후 PO₄-P와 K는 UV Spectrophotometer를 사용하여 측정용 키트로 분석하였다.

논 토양의 pH와 EC는 (1:10)으로 100 mL삼각플라스크에 체 거름한 건조한 토양 5g과 증류수 50 ml를 가하여 항온 진탕기(JP/NTS-3000 Eyela Japan)에서 30분간 200 rpm으로 진탕한 후, pH, EC meter (Orion 4 star, Thermo scientific, USA)로 측정하였다. 2M KCl 침출액은 EPA Method 350.2에 따라 UV Spectrophotometer 측정용 키트로 NH₄-N과 NO₃-N의 농도를 측정하였다. 토양 중의 PO₄-P와 K의 농도는 Mehlich III 분석 방법 [15]에 따라 100 mL 삼각플라스크에 체 거름한 토양 4g과 Mehlich III 추출액 40mL를 넣고 항온진탕기(JP/NTS-3000 Eyela Japan)로 5분간 200 rpm으로 진탕한 후 여과지(Whatman No.2)로 여과한 침출액을 UV Spectrophotometer를 사용하여 측정용 키트로 분석한 후 변환 수식을 이용하여 계산하였다. TN (Total Nitrogen)과 TC (Total Carbon)은 체 거름 한 건조 토양을 원소분석기(Vario EL II, Elementar, Germany)를 이용하여 측정하였다.

토양 탄소격리 산정

바이오차 완효성 비료 사용에 따른 토양 탄소격리량 산정은 이앙 직후와 수확 후 토양의 탄소 함량을 수식 1을 이용하여 산정하였다[13].

$$SS_{TC} = \left\{ \sum_{i=0}^n T_{TC} (L_i - I_i) - NT_{TC}(L_i - I_i) \right\} \times SW \quad (1)$$

SS_{TC}는 토양의 잠재 탄소 격리(kg 10a⁻¹), T는 바이오차 펠릿 처리구, NT는 대조구, TC는 시료 채취 시기별 토양 탄소 함량(g kg⁻¹), L_i와 I_i는 초기와 수확 후 토양 탄소 함량(g kg⁻¹), 그리고 SW는 토양 비중을 고려한 작토층 10 cm의 토양 무게(kg 10a⁻¹)를 말한다.

통계처리

실험 자료에 대한 통계 분석은 Excel 2016 version을 이용하였으며, 처리 간에 논물과 토양에 대한 화학성분 비교를 위해 표준편차를 이용하였다.

Table 2. Total nitrogen contents of supplemented biochar pellets and pig manure compost

Biochar pellets	TN ^{a)} (g kg ⁻¹)
Supplemented biochar pellet	69.4
Supplemented biochar pellet catalyzed 0.07M MgO	68.7
Pig manure compost	30.2

^{a)} TN; Total nitrogen

Table 3. Physicochemical properties of soil used in this study

Characteristics	Soil texture	pH	EC ^{a)} μS cm ⁻¹	TN ^{b)}	TC ^{c)} ---g kg ⁻¹ ---	P ₂ O ₅ ---mg kg ⁻¹ ---	K ₂ O
Soil	Clay loam	6.0	0.56	7.7	9.2	64.3	70.3

^{a)} EC: Electrical conductivity, ^{b)}TN: Total nitrogen, ^{c)}TC: Total carbon

탄소격리량 및 작물 생육 특성에 대한 처리간 유의성 검정은 SAS version 9.2 Software (SAS, Inc., Cary, NC, USA)를 사용하여 ANOVA검정을 하였다.

결과 및 고찰

바이오차 펠릿 처리에 따른 논 표면수 수질 평가

벼 재배 시 바이오차 펠릿 사용 수준에 따른 논 표면수의 NH₄-N 및 NO₃-N 농도 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 사용된 요소비료 사용은 NH₄⁺ 이온과 OH⁻ 이온으로 가수 분해되기 때문에 암모늄 이온의 주요한 공급원(Source)이다. 전반적으로 논물에서 이양 후 짧은 기간 내에 NH₄-N의 농도가 증가하였으며, 논 표면수의 질소 함량 변화는 처리와 관계없이 NH₄-N 농도는 이양 후 40일까지 2 mg L⁻¹ 이하였으며, NO₃-N농도는 이양 후 15일까지 1 mg L⁻¹ 이하로 낮게 지속하였다. 볏짚과 바이오차를 각각 6과 2 tonnes ha⁻¹를 처리한 구에서 NH₄-N의 농도는 증가하였다고 보고하였다 [16]. 또한, NH₄-N은 이양 후 84일 그리고 NO₃-N은 이양 후 40일에 갑자기 증가하였다. 이는 바이오차가 NH₄-N을 흡착하고 있어 초기에 용출이 거의 이루어지지 않다가 84일 이후에 용출되어 나온다는 [13]의 연구 결과와도 일치하는 것이다.

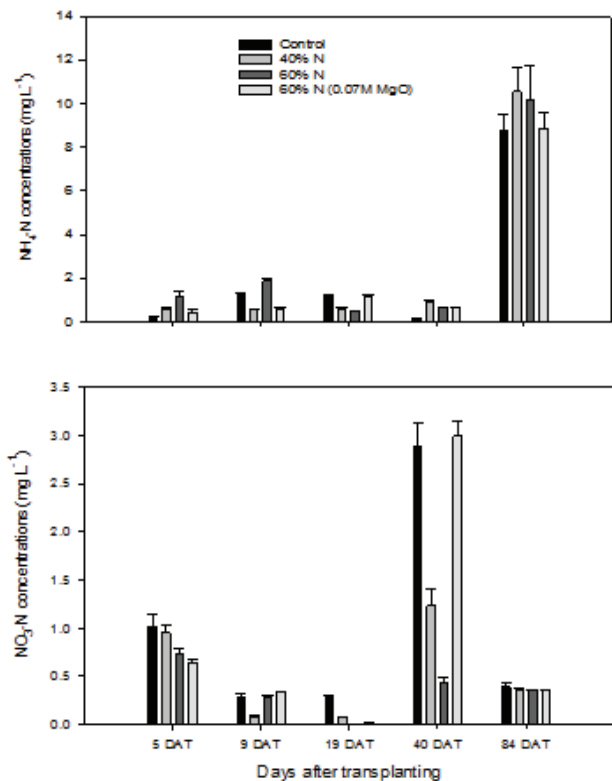


Fig. 2. Effects of different application rates of modified supplemented biochar pellets on NH₄-N and NO₃-N concentrations in paddy water during rice cultivation. The values were average of three replications, and error bars displayed standard deviation (p<0.05).

벼 재배 시 바이오차 펠릿 완효성 비료 처리에 따른 논 표면수의 PO₄-P 및 K 함량 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 논 표면수의 PO₄-P의 함량은 이양 후 9일째 모든 처리구에서 1 mg L⁻¹ 이상 높게 나타났으며, 대조구의 1.25 mg L⁻¹와 비교하여 처리구에서 전반적으로 낮게 나타났다. 또한, 대조구의 K의 농도는 벼 재배 기간에 N 60% 처리구의 이양 후 84일을 제외하고는 모든 바이오차 펠릿 처리구 보다 높게 나타났다.

바이오차 펠릿 처리에 따른 논 토양 화학성 평가

벼 재배 시 바이오차 펠릿 완효성 비료 처리에 따른 논 토양 중의 NH₄-N 및 NO₃-N 함량 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 토양 중에 질소 순환은 유기태 질소로부터 질소 무기화 과정을 거치게 되면 NH₄-N로 변환되며, 질산화 과정을 거치게 되면 NO₃-N으로 최종적으로 (NO)_x로 변환되어 탈질과 휘산에 관여하게 된다는 사실은 일반적으로 잘 알려진 질소 순환 사이클이다. 토양 중에 NH₄-N 농도는 이양 후 5일까지는 대조구가 바이오차 펠릿 처리구 보다 높게 나타났으며, 벼 생육 시기가 지남에 따라, 바이오차 펠릿 처리구에서 NH₄-N 농도가 높게 나타났다. 이러한 현상은 NH₄-N을 흡착한 바이오차 [17]에서 벼 생육에 필요한 암모늄태 질소 성분이 지속적으로 공급되고 있는 것으로 판단된다. 그리고 NO₃-N의 농도는 처리구간에 유의차를 보이지 않았다.

벼 재배 시 바이오차 펠릿 완효성 비료 처리에 따른 논 토양 중의 P₂O₅ 및 K₂O 함량 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 토양 중의 P₂O₅의 농도는 이양 후 40일까지는 대조구가 바이오차 펠릿 처리구 보다 높았으며, K₂O 함량은 처리 간에 유의차가 없었다. 하지만, 벼 재배하는 동안 바이오차를 혼용한 토양은

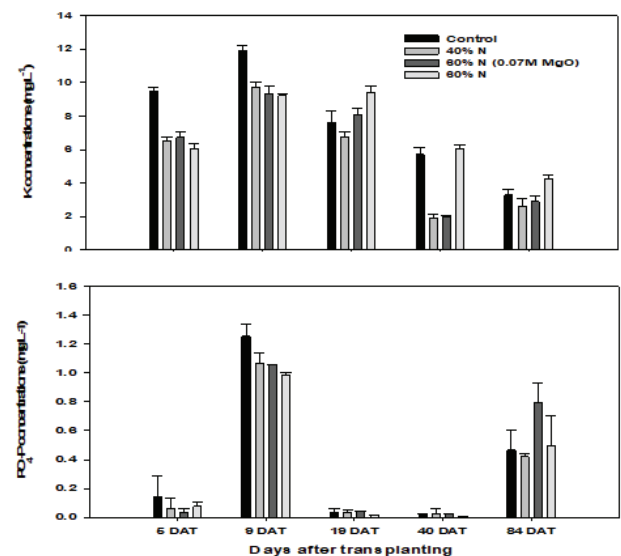


Fig. 3. Effects of different application rates of modified supplemented biochar pellets on PO₄-P and K concentrations in paddy water during rice cultivation. The values were average of three replications, and error bars displayed standard deviation (p<0.05).

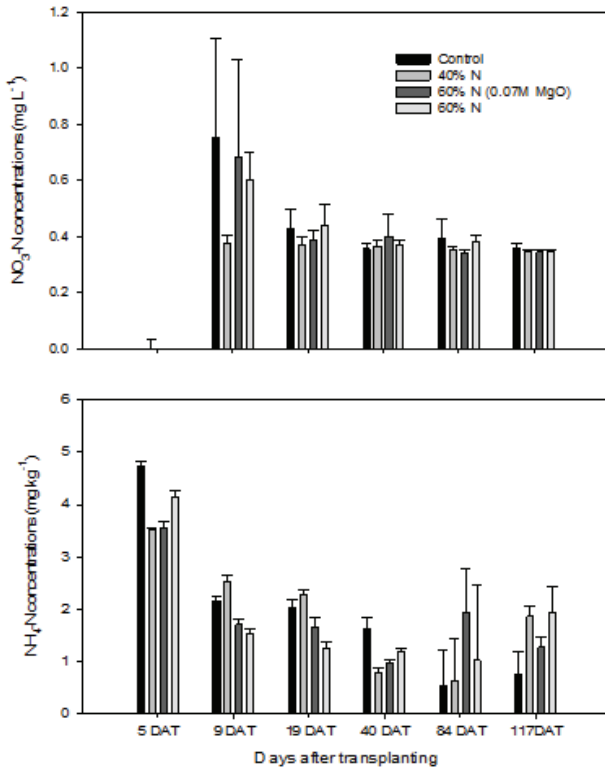


Fig. 4. Effects of different application rates of modified supplemented biochar pellets on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in paddy soil during rice cultivation. The values were average of three replications, and error bars displayed standard deviation ($p < 0.05$).

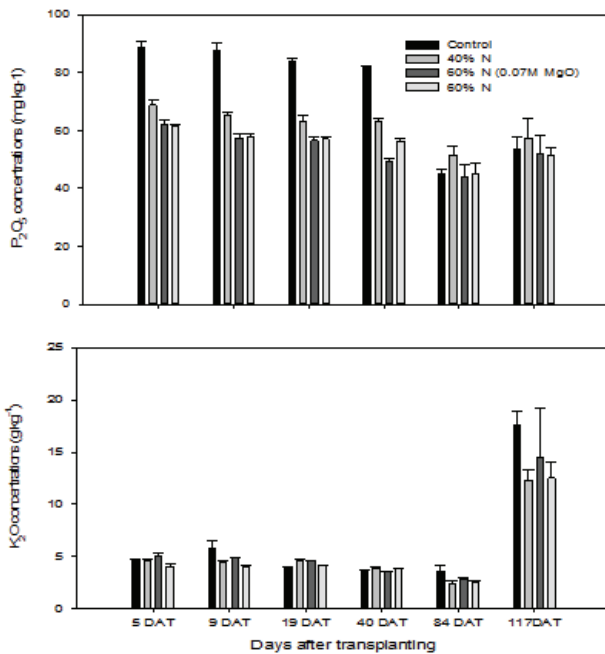


Fig. 5. Effects of different application rates of modified supplemented biochar pellets on P_2O_5 and K_2O concentrations in paddy soil during rice cultivation. The values were average of three replications, and error bars displayed standard deviation ($p < 0.05$).

바이오차의 높은 함량 때문에 벼의 K^+ 이용성을 증가시킨다는 보고도 있다[18].

바이오차 펠릿 처리에 따른 토양 탄소 함량 변화

벼 재배 시 바이오차 펠릿 완효성 비료 처리에 따른 이양 직후와 수확 후 논 토양 중의 총 탄소 함량 변화는 Table 4에 나타내었다. 벼 이양 직후와 수확 후 토양의 총 탄소 함량은 대조구가 각각 6.53 g kg^{-1} 과 11.87 g kg^{-1} 으로 가장 높았으며, 바이오차 펠릿 N 60%처리구가 3.77 g kg^{-1} 와 9.50 g kg^{-1} 으로 가장 낮게 나타났다. 하지만 순 탄소 증가율을 보면 대조구는 약 89% 증가했지만 40% N에서는 123%, 60% N (0.07M MgO)에서는 170%, 60% N에서는 152% 각각 증가한 것으로 나타나 대조구 대비 34~81% 높게 나타났다. 이는 논에 바이오차를 $29.6 \text{ tonnes ha}^{-1}$ 사용 했을 때 대조구와 비교하여 총 탄소 함량이 약 58%가 증가하였다는 결과와 유사하였다[19].

바이오차 펠릿 처리에 따른 탄소격리량은 수식 1에 의해 산정 되었다(Table 5). 잠재 토양 탄소 격리량은 대조구에 비해 60% N (0.07M MgO)처리구가 $222 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 으로 가장 높게 나타났다.

[13]은 벼 재배하는 동안 바이오차 펠릿 처리에 따른 탄소 격리량은 $1.65 \text{ tonnes ha}^{-1}$ 라고 발표하였는데, 본 연구에서는 60% N (0.07M MgO) 처리구에서는 $2.2 \text{ tonnes ha}^{-1}$ 로 약 $0.55 \text{ tonnes ha}^{-1}$ 더 많게 산정되었다.

바이오차 펠릿 처리에 따른 벼 생육 특성 및 수량

바이오차 펠릿 사용에 따른 벼 생육 반응은 Table 6에 나타내었다. 대조구의 초장은 바이오차 펠릿 처리구에 비해 1.2 배 높았으며, 벼 조곡 수량은 대조구의 $650 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 에 비해 질소 추천 시비량인, 바이오차 펠릿 40% N 처리구와 60% N + 0.07M MgO 처리구간에는 유의차($P > 0.05$)가 인정되지 않았다. 벧짚 무게는 대조구와 40% N, 60% N + 0.07M MgO 사이에는 유의차가 인정되지 않았지만, 60% N 처리구는 $768 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로서 가장 낮았다. 목재 바이오차 혼용 퇴비 펠릿을 사용함으로써 조곡 수량이 대조구와 비교하여 16.1%~36.3% 증가 하였다고 발표하였다[20]. 바이오차를 사용한 포장의 벼 수량이 대조구에 비해 약 8.8%~22% 범위로 증수하였다고 발표한 결과도 있으나[21, 22], 본 연구의 결과는 바이오차 펠릿 처리구와 대조구 사이에 벼 수량에 유의차가 없는 것으로 나타나 기존 결과와 유사하였다[13].

결론

벼 재배 시 바이오차 펠릿의 사용에 따른 논물과 토양에서 환경영향 평가를 수행하였다. 논 표면수의 질소 함량 변화는 처리와 관계없이, $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는 이양 후 40일까지 그리고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 이양 후 15일까지 낮은 농도를 유지하였다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 및 K의 농도는 대조구와 비교하여 바이오차 펠릿 처리구에서 전반적으로 낮게 나타났다. 토양 중에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도

Table 4. Total carbon contents to different application rates of modified supplemented biochar pellets in paddy soil during rice cultivation

Treatments ^{a)}	1 st day of transplanting	Days after harvesting
Control	6.56±1.01	11.87±0.18
40% N	4.53±0.05	10.10±0.15
60% N (0.07M MgO)	3.89±0.06	10.53±0.25
60% N	3.77±0.01	9.50±0.11

^{a)}Control; Recommended application amounts of fertilizers and pig manure compost, 40% N, 60% N and 60% N (0.07M MgO) of modified supplemented pellets (MSBP) which were based on 40% N, 60% N and 60% N of recommended rate of nitrogen and 60% N (0.07M MgO) reacted with major nutrient solution and 0.07M MgO for rice cultivation. The values were average of three replications with standard deviations.

Table 5. Evaluation of potential carbon sequestration to different application rates of modified supplemented biochar pellets during rice cultivation^{a)}

Treatments	Carbon sequestration (kg ha ⁻¹)	Potential carbon sequestration (kg ha ⁻¹)
Control	748	-
40% N	819	71
60% N (0.07M MgO)	970	222
60% N	876	128
F-value	555.06	-
Pr>F	<0.01	-

^{a)}Mean values followed by different letters, which indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments with One way ANOVA by the mean comparison for all pairs using Tukey-Kramer HSD analysis for carbon sequestration.

Table 6. Rice growth components to different application rates of modified supplemented biochar pellets during rice cultivation

Treatments	Plant height (cm)	Number of Tiller	Grain yield (kg ha ⁻¹)	Straw yield (kg ha ⁻¹)	Harvest index
Control	105±11.9	13±4.5	650±78.0	968±178.5	0.67
40% N	83±1.7	14±2.8	593±27.7	985±112.8	0.62
60% N (0.07M MgO)	84±2.8	11±2.1	644±14.4	888±127.2	0.73
60% N	86±4.2	14±1.3	535±37.6	768± 61.0	0.70
F-value	3.69	2.45	36.8	630.3	-
Pr>F	<0.053	<0.13	<0.01	<0.05	

는 벼 생육기간이 지남에 따라 바이오차 펠릿 처리구의 농도가 높게 나타남에 따라, 벼 생육에 필요한 암모늄태 질소 성분이 지속적으로 공급되고 있다고 판단되었다. 그리고 잠재 토양 탄소저리량은 대조구에 비해 60% N (0.07M MgO) 처리구가 222 kg 10a⁻¹으로 가장 높게 나타났다. 벼 정조 수량은 대조구의 650 kg 10a⁻¹에 비해 질소 추천 시비량인 바이오차 펠릿 40% N 처리구와 60% N (0.07M MgO) 처리구 간에는 유의차가 인정되지 않았다. 따라서 벼 재배 시 개량한 바이오차 펠릿의 가장 적절한 사용량은 60% N (0.07M MgO)로 나타났다. 바이오차 펠릿 사용은 기후변화 대응 탄소저리뿐만

아니라 논 표면수 및 토양에서의 환경 영향을 줄일 수 있는 완효성 비료로서 적합하다고 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was supported by the National Institute of

Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea [project no. PJ 01381401].

References

- Liu X, Zhou J, Chi Z, Zheng J, Li L, Zhang X, Zheng J, Cheng K, Bian R, Pan G (2019) Biochar provided limited benefits for rice yield and greenhouse gas mitigation six year following an amendment in a rice paddy. *Catena* 179, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.033>.
- Zhang X, Zhang L, Li A (2017) Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and pinewood sawdust for nutrient-rich hydrochar production: Synergistic effects and products characterization. *Journal of Environmental Management*, 201, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.018>.
- Subedi R, Bertora C, Zavattaro L, Grignani C (2017) Crop response to soils amended with biochar: expected benefits and unintended risks. *Italian Journal of Agronomy*, 12, 161-173.
- Domene X, Enders A, Hanley K, Lehmann J (2015). Eco-toxicological characterization of biochars: role of feedstock and pyrolysis temperature. *Science of The Total Environment*, 512-513, 552-561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.035>.
- Genesio L, Miglietta F, Baronti S, Vaccari FP (2015) Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: results from a four years field experiment in Tuscany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 201, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.021>
- Liu WJ, Jiang H, Yu HQ (2015) Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. *Chemical Reviews*, 115(22), 12251-12285. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00195>
- Sun X, Zhong T, Zhang L, Zhang K, Wu W (2019) Reducing ammonia volatilization from paddy field with rice straw derived biochar. *Science of The Total Environment*, 660, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.450>
- Ding Y, Liu Y, Liu S, Li Z, Tan X, Huang X, Zeng G, Zhou L, Zheng B (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Clough TJ, Bertram JE, Ray JL, Condon LM, O'Callaghan M, Sherlock RR, Wells NS (2010) Unweathered wood bio-char impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine amended pasture soil. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 852-860. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0185>
- Laird D, Fleming P, Wang B, Horton R, Karlen D (2010) Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Knowles OA, Robinson BH, Contangelo A, Clucas L (2011) Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of The Total Environment*, 409(17), 3206-3210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.011>.
- Zhang A, Cui L, Pa G, Li L, Hussain Q, Zhang X, Zheng J, Crowley D (2010) Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4), 469-475. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.003>.
- Shin J, Jang E, Park S, Ravindran B, Chang S (2019) Agro-environmental impacts, carbon sequestration and profit analysis of blended biochar pellet application in the paddy soil-water system. *Journal of Environmental Management*, 244, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.099>.
- Mohan D, Abhishek K, Sarswat A, Patel M, Singh P, Pittman CU (2018) Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India. *Royal Society of Chemistry Advances*, 8(1), 508-520. <https://doi.org/10.1039/C7RA10353K>.
- Mehlich A (1984) Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(12), 1409-1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>.
- CUI YF, Meng J, WANG QX, ZHANG WM, CHENG XY, CHEN WF (2017) Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(5), 1064-1074. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61578-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61578-2).
- Choi YS, Kim SC, Shin JD (2015) Adsorption characteristics and kinetic models of ammonium nitrogen using biochar from rice hull in sandy loam soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 48(5), 413-420.
- Lai WY, Lai CM, Ke GR, Chung RS, Chen CT, Cheng CH, Pai CW, Chen SY, Chen CC (2013) The effects of woodchip biochar application on crop yield, carbon sequestration and greenhouse gas emissions from

- soils planted with rice or leaf beet. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(6), 1039-1044. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.06.028>.
19. Sui Y, Gao J, Liu C, Zhang W, Lan Y, Li S, Meng J, Xu Z, Tang L (2016) Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of Northeast China. *Science of The Total Environment*, 544, 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.079>.
 20. Pokharel P, Chang SX (2019) Manure pellet, Wood chip and their biochars differently affect wheat yield and carbon dioxide emission from bulk and rhizosphere soils. *Science of The Total Environment*, 659, 463-472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.380>.
 21. Wang J, Pan X, Liu Y, Zhang X, Xiong Z (2012) Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant and Soil*. 360, 287-298.
 22. Zhang A, Bian R, Pan G, Hussain Q, Li L, Zheng L, Zhang X, Han X, Yu X (2012) Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emissions in Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.020>.