

FOOD&CHEMISTRY

# Effect of poultry manure biochar on soil nutrition and carbon improvement in Saemangeum reclaimed soils

Ju-Hyoung Shin<sup>1,2</sup>, Yun-Gu Kang<sup>2</sup>, Jun-Yeong Lee<sup>2</sup>, Jun-Ho Kim<sup>2</sup>, Taek-Keun Oh<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Management, Saemangeum Project Office, Korea Rural Community Corporation, Gimje 54397, Korea

<sup>2</sup>Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*Corresponding author: [ok5382@cnu.ac.kr](mailto:ok5382@cnu.ac.kr)

## Abstract

Low nutrient and organic matter (OM) contents in reclaimed agricultural soils can hinder crop growth, making it essential to improve the chemical characteristics of reclaimed agricultural soil to maintain crop productivity. Poultry manure (PM) can effectively supply nutrient content by its high nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations, while leads to environmental issues, including odor and greenhouse gas emissions, by improper pre-treatment. This study aimed to evaluate the effect of PM-based biochar containing the varying rate of rice husk on soil improvement in reclaimed agricultural land. Soil samples were collected from the Saemangeum reclaimed land, and biochars were produced using PM as the primary ingredient, with different proportions (i.e., 0, 10, 30, 50, 70, 90, and 100%) of rice husk. All biochar samples were pyrolyzed at 350°C for 1 h. Chemical characteristics of biochar showed that increasing the proportion of rice husk decreased the pH electrical conductivity, and nutrient (N, K<sub>2</sub>O, CaO, and MgO) contents, while carbon and OM contents increased. Regarding soil improvement, the nutrient and OM contents significantly increased when biochar was applied at a rate of 5.0 Mg · ha<sup>-1</sup> or more. Lettuce yield increased as the biochar application rate increased and the rice husk ratio in the PM-based biochar decreased, with the highest yield (33.52 Mg · ha<sup>-1</sup>) observed in reclaimed soil treated with 10.0 Mg · ha<sup>-1</sup> of PM-based biochar without rice husk. Therefore, to improve soil nutrient content, minimizing the rice husk proportion in the PM-based biochar was most effective, while OM improvement was enhanced with increasing rice husk ratios.

**Keywords:** lettuce, livestock manure, soil health, soil improver, sustainable agriculture

## OPEN ACCESS

**Citation:** Shin JH, Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK. 2024. Effect of poultry manure biochar on soil nutrition and carbon improvement in Saemangeum reclaimed soils. Korean Journal of Agricultural Science 51:643-654. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510418>

**Received:** October 04, 2024

**Revised:** October 09, 2024

**Accepted:** October 23, 2024

**Copyright:** © 2024 Korean Journal of Agricultural Science



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

일반적으로, 모래 함량이 높은 토양에서는 입단이 형성되지 못해 무구조 혹은 판상형 구조가 형성되며, 이는 토양의 수분 보유력을 감소시키는 원인으로 작용한다(Oh et al., 2022). 이러한 토양은 낮은 양분 및 유기물 함량, 낮은 미생물의 활성, 높은 침수해 및 염해 발생 등의 특징으로 인해 토지 생산성이 일반 농경지의 10분의 1 수준으로 알려져 있다(Oh et al., 2020;

Kang et al., 2024b). 국내에서는 농업을 목적으로 조성된 새만금 간척농지가 이에 속하며, 새만금 간척농지는 2023년 기준 전체 국가관리 간척농지(총 32,000 ha)의 약 29.5%를 차지한다. 새만금 간척농지는 증가하는 인구 수에 따른 국내 곡물자급률을 높이기 위해 밭 작물을 재배하도록 요구받고 있으나, 낮은 양분, 유기물, 그리고 수분 보유력으로 인해 밭 작물의 생산성 확보가 어려운 실정이다(Wijeyesingha et al., 2023). 따라서, 국내 곡물자급률 향상을 위해서는 대규모 영농이 가능한 새만금 간척농지의 낮은 양분 및 유기물 함량과 수분 보유력을 개선하기 위한 연구가 필요하다.

가축 사육 시 발생하는 가축분뇨는 질소(N), 인산( $P_2O_5$ ), 그리고 탄소(C)가 풍부하게 존재하여 농업부문에서는 주로 퇴·액비로 활용되고 있다(Lee et al., 2024b). 특히, 계분은 다른 가축분뇨보다 높은 양분함량을 보유하고 있어 양분 공급 능력이 우수하다고 알려져 있다(Lee et al., 2024a). 하지만, 농지 면적 감소와 악취 및 온실가스의 발생 등으로 인해 친환경 재활용 기술을 이용한 가축분뇨 관리가 필요하다(Kang et al., 2022; Jeon et al., 2024). 바이오차(biochar)는 유기성 자원을 친환경적으로 재활용할 수 있는 기술 중 하나로, 퇴·액비와 달리 구조적 안정성이 뛰어나 토양 내에서 탄소를 반 영구적으로 격리시킬 수 있다(Chun et al., 2022a; Kang et al., 2023a, 2023b, 2023c; Lee et al., 2024a). 토양에 처리된 바이오차는 높은 표면적과 미세공극을 이용하여 양분을 고정할 수 있으며, 토양 내 양이온 교환 용량(cation exchange capacity, CEC)과 수분 보유력을 개선하여 농업생산성을 향상시킬 수 있다(Kang et al., 2023d; Lee et al., 2023). 토양 내 바이오차 처리에 따른 토양 질 개선 효과는 많은 선행연구에서 보고된 바 있으나, 바이오차의 제조 원료, 열분해 조건, 방법 등에 따라 효과가 모두 다르게 조사되었다(Chun et al., 2022b; Park et al., 2022). 또한, 가축분 바이오차 제조 과정 중 깔짚으로 사용되는 식물성 원료(예, 왕겨, 톱밥, 볏짚 등)의 혼입이 가능하도록 비료공정규격이 고시됨에 따라 가축분 바이오차 내에 식물성 원료의 혼합비율에 따른 바이오차의 토양 질 개선 효과를 평가하는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 계분의 포함비율이 증가함에 따라 토양 내 양분 비옥도가 증가하여 작물 생육이 향상될 것이라고 가설을 설정하였으며, 이를 위해 계분을 이용하여 바이오차 제조 시, 왕겨의 혼합비율을 달리 설정하였다. 또한, 실험적 가설을 확인하기 위해 왕겨의 혼합비율이 다른 계분 바이오차의 화학적 특성 변화를 확인하였으며, 이를 기반으로 새만금 간척농지 토양에 처리함에 따라 토양의 양분 및 유기물 개선 효과를 평가하였다.

## Materials and Methods

### 공시 재료

왕겨의 혼합비율을 달리하여 제조한 계분 바이오차 처리가 간척지 토양 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 새만금 간척지 내 농생명용지에서 토양을 채취하여 시설상추 재배시험에 사용하였다(Fig. 1). 해당 시험 포장의 토성(soil texture)은 사양토(sandy loam)로 분류되었으나, 모래(sand) 함량이 높아 양분 보유력이 낮은 것이 특징이다. 토양은 작토층(5 - 20 cm)을 대상으로 채취하였으며, 유기물과 이물질(예, 조개 껍데기, 폐플라스틱 등)을 모두 제거하여 외부 요인에 의한 교란을 최소화하였다. 채취한 토양은 충남대학교 농업생명과학대학 부속 유리온실 내에서 3주간 건조하여 수분을 모두 제거하였으며, 2 mm 이하로 체거름하여 시설상추 재배시험에 이용하였다.

바이오차는 계분을 주 원료로 사용하여 제조하였으며, 계분은 충청남도 부여시 소재의 퇴비 제조시설에서 원물 형태로 수거하여 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 계분 바이오차 내 왕겨의 혼합비율(0 - 100%)을 임의로 조정하기 위해 충청남도 계룡시 소재의 정미소에서 수거한 왕겨를 사용하였다. 각각의 원료들은 비닐하우스에서 2주간 충분히 수분을 제거한 후, 바이오차의 제조 원료로 이용하였다. 바이오차는 계분 내 왕겨가 혼합된 비율을 달리하여 stainless steel barrel ( $\varnothing 280 \times 120$  mm)과 electrical furnace (Lindberg/Blue M<sup>TM</sup> 1, 100°C Lab Box Furnace, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 제조하였으며, 열분해 온도와 시간은 각각 350°C와 1.0시간으로 모두 동일하게 설정

하였다. 계분 내 왕겨의 포함 비율에 따라 바이오차를 분류 및 명명한 결과는 Table 1에 나타내었다.



**Fig. 1.** Overview of the soil sampling points in Saemangeum reclaimed soils of South Korea. Locations of the sampling points are shown as yellow dots.

**Table 1.** Summary of brief description and abbreviation of poultry manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Abbreviation	Mixing ratio of (w·w <sup>-1</sup> )		Full name
	Chicken manure	Rice husk	
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub>	100.0	0.0	Poultry manure (100%)-based biochar containing 0% of rice husk
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub>	90.0	10.0	Poultry manure (90%)-based biochar containing 10% of rice husk
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub>	70.0	30.0	Poultry manure (70%)-based biochar containing 30% of rice husk
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>	50.0	50.0	Poultry manure (50%)-based biochar containing 50% of rice husk
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub>	30.0	70.0	Poultry manure (30%)-based biochar containing 70% of rice husk
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub>	10.0	90.0	Poultry manure (10%)-based biochar containing 90% of rice husk
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub>	0.0	100.0	Poultry manure (0%)-based biochar containing 100% of rice husk

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

## 시설상추 재배실험

시설상추(*Lactuca sativa* L. ssp. *Jeogchima*) 재배실험은 충남대학교 농업생명과학대학 내 부속 유리온실에서 2024년 08월 03일부터 09월 07일까지 총 35일간 실시하였으며, 작물은 1·5,000 a<sup>-1</sup> 크기의 Wagner pot (Kenis, Japan)를 이용하였다. 본 연구에서는 왕겨의 비율을 달리한 계분 바이오차의 영향을 객관적으로 비교 및 검토하기 위해 선행연구들에서 주로 선정된 시설상추를 이용하였다. 왕겨의 혼합비율에 따른 토양 내 양분 보유력 및 탄소 격리효과 차이를 평가하기 위해 처리구는 총 9개로 구성하였으며, 바이오차의 처리량(1.0 Mg·ha<sup>-1</sup>, 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup>, 10.0 Mg·ha<sup>-1</sup>)에 따라 Table 2와 같이 세분화하였다. 무기질비료는 농촌진흥청에서 고시한 시설상추의 시비처방기준(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 200-59-128 kg·ha<sup>-1</sup>)에 준하여 처리하였다(NAAS, 2022). 또한, 비료 시용에 따른 작물의 생육 장애를 방지하기 위해 생육 기간 중 총 2회에 걸쳐 분시하였으며, 유리온실 외부의 평균 기온을 고려하여 관수는 재배 기간 중 일 2회 실시하였다.

**Table 2.** Summary of experimental setup for evaluating the effect of poultry manure-based biochar on reclaimed soil properties.

Biochar type	Biochar application rate		
	1.0 Mg·ha <sup>-1</sup>	5.0 Mg·ha <sup>-1</sup>	10.0 Mg·ha <sup>-1</sup>
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub>	PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -1	PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -5	PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -10
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub>	PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -1	PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -5	PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -10
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub>	PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -1	PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -5	PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -10
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>	PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -1	PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -5	PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -10
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub>	PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -1	PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -5	PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -10
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub>	PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -1	PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -5	PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -10
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub>	PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -1	PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -5	PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -10

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

### 공시 재료의 특성분석

시험 토양의 토성은 비중계(hydrometer)법을 이용하여 모래(sand), 미사(silt), 그리고 점토(clay) 함량을 각각 계산하였으며, 각각의 함량과 토성 분류표를 기준으로 soil texture를 결정하였다. 토양의 pH와 electrical conductivity (EC)는 수분을 제거한 토양과 distilled water (DW)를 1 : 5 (w·v<sup>-1</sup>)의 비율로 혼합한 후, 상층액을 대상으로 Benchtop Meter with pH and EC (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석하였다. 토양 내 total carbon (T-C) 및 total nitrogen (T-N) 함량은 elemental analyzer (CHN828, Leco Corporation, USA)을 이용하여 정량하였으며, T-C 분석값에 환산계수(1.724)를 곱하여 organic matter (OM) 함량을 계산하였다. 토양 내 available nitrogen (avail. N) 함량은 질소의 무기태 형태인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 함량을 Indophenol blue법과 Brucine법으로 각각 분석한 후, 합하여 계산하였으며, 분석에는 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 이용하였다. 토양 available phosphorus (avail. P) 함량은 Lancaster법을 이용하여 토양을 산 용액으로 침출한 후, UV/Vis-spectrophotometer로 정량하였다. 토양 내 치환성 양이온(exchangeable cations, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) 함량은 1.0 N ammonium acetate (NH<sub>4</sub>OAc)로 침출한 후, 침출하여 inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES, iCAP Pro, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석하였다.

바이오차의 pH와 EC는 시료와 DW를 1 : 10 (w·v<sup>-1</sup>)의 비율로 분석하였으며, 바이오차 내 염 농도(salt concentration, Salt Con.)는 Na<sup>+</sup>과 Cl<sup>-</sup> 함량을 각각 ICP-OES와 질산은법으로 분석하여 가장 낮은 값을 사용하였다. 바이오차의 OM 함량은 회화법을 이용하여 electrical furnace로 분석하였으며, 각 원소(C, H, N, O)의 함량은 elemental analyzer로 정량하였다. 그 중, T-C, total hydrogen (T-H), 그리고 total oxygen (T-O) 함량을 분석한 결과는 H : C ratio, O : C ratio, 그리고 (O+N) : C ratio를 결정하기 위해 사용되었다. 바이오차 내 무기조성(K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O)과 중금속 8종(As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn)의 함량은 질산, 과염소산, 그리고 염산을 이용하여 시료를 분해한 액을 대상으로 ICP-OES와 수은 분석기(DMA-80, Milestone, Italy)로 정량하였다.

### 통계분석

본 연구는 3반복 수행한 결과를 제시하였으며, 각 처리구간 통계적 유의차는 SPSS 통계 소프트웨어(IBM SPSS Statistics version 26, IBM, USA)를 이용하여 분석하였다. 유의성 검증은 분산 분석(one-way ANOVA)을 이용하여 95% 신뢰수준에서 실시하였으며, Duncan의 multiple range test를 이용하여 사후검증을 실시하였다.

## Results and Discussion

### 계분 내 왕겨의 포함비율 별 바이오차의 특성 평가

계분 내 왕겨의 혼합비율을 달리하여 제조한 바이오차의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 바이오차의 pH는 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 왕겨를 단독으로 이용한 바이오차(PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>)의 pH가 pH 8.39로 가장 낮았다. 또한, PM<sub>10</sub>RH<sub>0</sub>는 pH 10.28로 가장 높은 pH를 보유하고 있었으나, PM<sub>9</sub>RH<sub>1</sub> (pH 10.23)과 통계적 유의차는 보이지 않았다. 바이오차의 EC는 pH와 유사한 경향을 나타내어 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>에서 2.82 dS·m<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이는 EC가 가장 높은 PM<sub>10</sub>RH<sub>0</sub> (81.67 dS·m<sup>-1</sup>)보다 약 29배 낮은 수준이었다. 바이오차 내 Salt Con.의 경우, 왕겨의 혼합비율에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았으나, 계분 내 왕겨가 70% 이상 포함되었을 때에는 검출치 미만(not detected, N.D.)으로 조사되었다. 바이오차의 OM 함량은 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>에서 83.20%로 가장 높게 분석되었으며, 왕겨의 혼합비율이 감소함에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 바이오차 내 T-C 및 T-H 함량은 OM 함량과 유사하게 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>에서 각각 53.62%와 3.36%로 가장 높게 조사되었으며, 바이오차 내 왕겨가 혼합된 비율이 10% 증가함에 따라 T-C와 T-H의 함량은 약 2.05%와 0.16%가 증가하였다. 이와 반대로, T-N과 T-O 함량은 왕겨의 포함비율과 음(-)의 상관관계를 나타내어 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>에서 각각 3.58%와 21.95%로 가장 높게 조사되었다. 무기조성 함량(K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O)의 경우, 바이오차 내 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, PM<sub>10</sub>RH<sub>0</sub>과 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub> 내 K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O의 차이는 각각 6.59배, 16.25배, 20.73배, 그리고 33.50배이었다.

**Table 3.** Chemical characteristics of poultry manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Biochar	pH (1 : 10, CaCl <sub>2</sub> )	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Salt con.	OM	T-C	T-N	T-H	T-O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O		
													(wt%)	
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub>	10.23 ± 0.12a	81.67 ± 1.88a	0.01 ± 0.00a	50.22 ± 0.83f	32.37 ± 0.54e	3.58 ± 0.23a	1.81 ± 0.07f	21.95 ± 0.42a	4.68 ± 0.14a	5.85 ± 0.03a	3.11 ± 0.03a	0.67 ± 0.03a		
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub>	10.28 ± 0.00a	76.93 ± 1.93b	0.01 ± 0.00a	52.60 ± 0.87f	33.90 ± 0.56e	3.27 ± 0.14b	1.92 ± 0.07f	20.45 ± 1.35a	3.86 ± 0.44b	5.67 ± 0.10b	2.72 ± 0.34b	0.55 ± 0.06ab		
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub>	10.07 ± 0.01b	63.86 ± 2.12c	0.01 ± 0.00a	56.97 ± 1.01e	36.72 ± 0.65d	2.97 ± 0.10c	2.11 ± 0.04e	16.35 ± 0.52b	3.64 ± 0.39bc	5.39 ± 0.22bc	2.26 ± 0.37c	0.50 ± 0.05b		
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>	9.78 ± 0.07c	47.45 ± 1.43d	0.01 ± 0.00a	65.34 ± 0.19d	42.11 ± 0.12c	2.59 ± 0.04d	2.53 ± 0.02d	14.19 ± 0.76c	3.22 ± 0.17c	5.28 ± 0.07c	2.15 ± 0.10cd	0.45 ± 0.04c		
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub>	9.65 ± 0.03d	35.94 ± 2.11e	N.D.	75.47 ± 0.85c	48.64 ± 0.54b	1.82 ± 0.08e	2.96 ± 0.03c	12.60 ± 0.41d	1.83 ± 0.18d	3.63 ± 0.32d	0.96 ± 0.08e	0.24 ± 0.04d		
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub>	9.27 ± 0.02e	14.23 ± 0.54f	N.D.	80.34 ± 0.70b	51.78 ± 0.45a	1.15 ± 0.01f	3.16 ± 0.04b	12.48 ± 0.15d	1.01 ± 0.12e	2.48 ± 0.71e	0.39 ± 0.11f	0.03 ± 0.03e		
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub>	8.39 ± 0.03f	2.82 ± 0.04g	N.D.	83.20 ± 0.28a	53.62 ± 0.18a	0.76 ± 0.00g	3.36 ± 0.01a	10.69 ± 0.18e	0.71 ± 0.03f	0.36 ± 0.04f	0.15 ± 0.02f	0.02 ± 0.02e		
p-value	**	**	***	**	**	*	*	**	**	***	*	***		

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%) based biochar containing YY% of rice husk.

EC, electrical conductivity; Salt con., salt concentration; OM, organic matter; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen; T-O, total oxygen, N.D., not detected.

a - g: Within each column values followed by the same small letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Duncan's multiple range test ( $n = 3$ ).

\*, \*\* and \*\*\* were denote the statistically significant differences at significant level  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.001$ , respectively, based on Duncan's multiple range test.

바이오차의 H : C ratio는 바이오차의 안정성(aromaticity)을 나타내며, O : C ratio 및 (O+N) : C ratio는 바이오차의 극성(polarity)을 나타내는 지표로 사용된다(Kang et al., 2024a). 국내 비료공정규격 상에서는 H : C ratio와 O : C ratio를 각각 0.70과 0.40 미만으로 설정하도록 고시되어 있다(KLIC, 2024). 본 연구에서 제조한 바이오차는 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 H : C 비율이 증가하였으며, 왕겨의 혼합비율이 50% 이상일 때, H : C ratio가 0.70 이상으로 조사되었다(Table 4). 비료공정규격 상 바이오차의 H : C ratio는 0.70 미만으로 규정하고 있어 계분 바이오차 내 왕겨는 50% 미만으로 혼합하였을 때, 사용이 가능할 것으로 판단된다. 바이오차의 O : C ratio 조사 결과, O : C ratio는 H : C ratio와 상반된 경향을 나타내었으며, 왕겨를 30% 이상 혼합하였을 때, 기준치(0.40 미만)에 부합하였다. 바이오차 내 왕겨 혼합비율에 따른 중금속 함량 변화를 조사한 결과는 Table 5에 나타낸 바와 같다. 본 연구에서 중금속 8종 중 Cd, Hg, Cr, 그리고 Ni 함량은 모두 검출한계 미만으로 조사되었으며, As와 Pb 함량은 원료의 혼합비

율에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다. 바이오차 내 Cu와 Zn 함량은 왕겨의 혼합비율에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 왕겨가 100% 혼합된 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>에서 각각 0.02 mg·kg<sup>-1</sup>과 0.62 mg·kg<sup>-1</sup>으로 조사되었다.

**Table 4.** Aromaticity and polarity indices of poultry manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Biochar	H : C ratio	O : C ratio	(O+N) : C ratio
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub>	0.67 ± 0.02b	0.51 ± 0.02a	0.60 ± 0.01a
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub>	0.68 ± 0.01b	0.45 ± 0.04a	0.54 ± 0.04b
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub>	0.68 ± 0.00b	0.33 ± 0.01b	0.40 ± 0.01c
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>	0.72 ± 0.01a	0.25 ± 0.01c	0.31 ± 0.01d
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub>	0.73 ± 0.00a	0.19 ± 0.00d	0.23 ± 0.00e
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub>	0.73 ± 0.00a	0.18 ± 0.00d	0.20 ± 0.00e
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub>	0.75 ± 0.00a	0.15 ± 0.00d	0.16 ± 0.00e
p-value	***	**	**

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

H : C ratio, atomic ratio of hydrogen and carbon; O : C ratio, atomic ratio of oxygen and carbon; (O+N) : C ratio, atomic ratio of nitrogen, oxygen, and carbon.

a - e: Within each column values followed by the same small letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Duncan's multiple range test ( $n = 3$ ).

\*\* and \*\*\* were denote the statistically significant differences at significant level  $p < 0.01$  and  $p < 0.001$ , respectively, based on Duncan's multiple range test.

**Table 5.** Heavy metal concentrations of poultry manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Biochar	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
	(mg·kg <sup>-1</sup> )							
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub>	0.02 ± 0.01a	N.D.	N.D.	0.02 ± 0.00a	N.D.	1.09 ± 0.05a	N.D.	9.67 ± 0.39a
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub>	0.02 ± 0.00a	N.D.	N.D.	0.02 ± 0.01a	N.D.	0.90 ± 0.16ab	N.D.	8.11 ± 1.21ab
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub>	0.01 ± 0.00a	N.D.	N.D.	0.02 ± 0.00a	N.D.	0.82 ± 0.03b	N.D.	7.25 ± 0.53b
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>	0.01 ± 0.00a	N.D.	N.D.	0.01 ± 0.00a	N.D.	0.68 ± 0.06c	N.D.	6.15 ± 0.37c
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub>	0.02 ± 0.01a	N.D.	N.D.	0.01 ± 0.00a	N.D.	0.29 ± 0.02d	N.D.	2.98 ± 0.32d
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub>	0.01 ± 0.00a	N.D.	N.D.	0.01 ± 0.00a	N.D.	0.08 ± 0.03e	N.D.	1.23 ± 0.28e
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub>	0.01 ± 0.01a	N.D.	N.D.	0.01 ± 0.00a	N.D.	0.02 ± 0.01e	N.D.	0.62 ± 0.05f
p-value	***	-	-	***	-	**	-	**

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

N.D., not detected.

a - f: Within each column values followed by the same small letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Duncan's multiple range test ( $n = 3$ ).

\*\* and \*\*\* were denote the statistically significant differences at significant level  $p < 0.01$  and  $p < 0.001$ , respectively, based on Duncan's multiple range test.

최근 국내에서는 비료공정규격을 개정하면서 가축분뇨 바이오차의 법적 기준을 고시하였으며, 주 성분인 탄소의 최소 함유량, 유해성분(중금속)의 최대 함유량, 수분함량, 염분 농도, 그리고 탄화 안정도(H : C ratio, O : C ratio) 등을 설정하였다(Table 6). 본 연구에서 제조한 바이오차는 탄소의 최소 함유량과 유해성분의 최대 함유량 기준을

모두 만족하였으나,  $PM_7RH_3$  (H : C ratio, 0.68; O : C ratio, 0.33)를 제외한 다른 바이오차는 탄화 안정도 기준을 충족하지 못하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 계분을 단독으로 이용하여 가축분뇨 바이오차 제조하였을 때, 법적 기준을 충족하지 못해 식물성 원료와 혼합이 필요함을 시사한다. 또한, 본 연구 결과에서는 식물성 원료 중 왕겨를 사용하였을 때에는 30%를 혼합하는 것이 가축분뇨 바이오차의 법적 기준을 충족시킬 수 있을 것으로 나타났다. Lee 등(2024a)은 왕겨와 계분을 이용하여 바이오차를 각각 제조하였으며, 계분 바이오차는 법적 고시 기준인 T-C 함량이 30% 미만으로 조사되어 실제 농가에서 사용이 어려운 반면, 왕겨 바이오차는 높은 H : C ratio로 인해 법적 기준에 불충족하였다. 이러한 선행 연구 결과는 본 연구에서 제시한 계분과 왕겨를 7 : 3 ( $w \cdot w^{-1}$ )의 비율로 혼합하여 제조하는 방식의 필요성을 나타내었다.

**Table 6.** Fertilizer process specification standard for livestock manure biochar.

Minimum amount of main ingredients	Maximum amount of hazardous substances	Other specification
1. Carbon content > 30.0%	1. Arsenic (As) 45.0 mg·kg <sup>-1</sup> 2. Cadmium (Cd) 5.0 mg·kg <sup>-1</sup> 3. Mercury (Hg) 2.0 mg·kg <sup>-1</sup> 4. Lead (Pb) 130.0 mg·kg <sup>-1</sup> 5. Chromium (Cr) 200.0 mg·kg <sup>-1</sup> 6. Copper (Cu) 360.0 mg·kg <sup>-1</sup> 7. Nickel (Ni) 45.0 mg·kg <sup>-1</sup> 8. Zinc (Zn) 900.0 mg·kg <sup>-1</sup>	1. Moisture content ≤ 30.0% 2. Salinity ≤ 2.0% 3. Hydrochloric acid insoluble matter ≤ 25.0% 4. Carbonization stability (select one) - H/C molar ratio less than 0.7 - O/C molar ratio less than 0.4

### 계분 내 왕겨의 포함비율 별 바이오차 처리에 따른 토양 화학성 변화

시설상추 재배 후 토양의 화학적 특성 변화를 분석한 결과는 Table 7에 나타내었다. 시험 후 토양의 pH는 control 처리구, only-urea 처리구, 그리고  $PM_0RH_{10}$ 을 처리한 처리구( $PM_0RH_{10-1}$ ,  $PM_0RH_{10-5}$ ,  $PM_0RH_{10-10}$ )에서 모두 감소하였으며, 무기질비료만 처리한 only-urea 처리구에서 pH 5.98로 가장 낮게 감소하였다. 토양은 바이오차 처리량에 따라 각기 다른 경향을 나타내었으며, 바이오차를 1.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 처리한 토양의 pH는 왕겨가 50% 이하로 혼합된 바이오차를 처리함에 따라 증가하였다. 바이오차의 처리량이 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup>와 10.0 Mg·ha<sup>-1</sup>인 경우에는 계분이 90% 이상 혼합된 바이오차를 처리하였을 때, 시험 전 토양(pH 6.51)보다 유의하게 높았다. 시설상추 재배 후, 모든 처리구에서 토양 EC는 높게 증가하였으나, 이는 바이오차의 처리량 증가에 기인하는 것으로 나타났다. 계분 내 왕겨의 혼합 비율에 따른 토양 EC 변화를 확인하였을 때, 바이오차를 1.0 Mg·ha<sup>-1</sup>을 처리한 토양에서는 처리구 간 유의한 차이를 나타내지 않았으나, 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup>와 10.0 Mg·ha<sup>-1</sup>을 처리한 토양에서는 계분 내 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 토양 EC는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 토양 내 T-C 함량 변화 조사 시, control 처리구, only-urea 처리구, 그리고 바이오차를 1.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 처리한 처리구에서는 시험 전 토양(0.28%)과 유의한 차이를 나타내지 않았으나, 바이오차를 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 이상 처리한 토양에서는 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 토양 T-C 함량도 증가하였다. 가장 높은 T-C 함량을 보인 처리구는  $PM_0RH_{10-10}$ 로 1.06%이었으며, 이는 시험 전 토양과 control 처리구보다 각각 3.79배와 3.93배 높게 조사되었다. 시설상추 재배 후 토양 내 T-N과 OM 함량은 T-C 함량과 유사한 경향을 나타내었으나, 토양의 T-N 함량은 계분 내 왕겨의 혼합비율에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다. 토양 내 Avail. N 함량의 경우, 시험 전 토양(54.48 mg·kg<sup>-1</sup>)과 control 처리구, only-urea 처리구, 바이오차를 1.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 처리한 처리구에서 통계적 유의차를 나타내지 않았으나, 바이오차를 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup>와 10.0 Mg·ha<sup>-1</sup>을 처리한 토양에서는 유의하게 증가하였다. 토양 내 Avail. P 함량은 시설상추 재배 후 모든 처리구에서 증가하였으며, 바이오차 처리량과 양(+)의 상관관계를 나타내었다. 또한, 토양 Avail. P 함량은 계분 내 왕겨의 포함비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내어

PM<sub>10</sub>RH<sub>0</sub>-10 처리구에서 360.24 mg·kg<sup>-1</sup>로 가장 높게 분석되었다. 치환성 Ca<sup>2+</sup>과 K<sup>+</sup>의 함량은 토양에 처리한 바이오차 처리량이 높고, 계분 내 왕겨의 혼합비율이 낮을수록 높았으며, PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub>-10 처리구에서 각각 3.94 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>과 1.13 cmol<sub>c</sub>·kg<sup>-1</sup>으로 가장 높게 조사되었다. 그러나, 치환성 Mg<sup>2+</sup>과 Na<sup>+</sup> 함량은 시험 전 토양을 포함하여 모든 처리구에서 통계적 유의한 차이를 보이지 않았다.

바이오차 처리에 따른 토양 pH 및 T-C, OM 함량 개선 효과는 많은 선행연구에서 보고되었으며, 이러한 개선 효과는 바이오차의 높은 pH 및 T-C 함량에 기인하는 것으로 알려져 있다(Chun et al., 2022a; Kang et al., 2023a, 2024a; Lee et al., 2023, 2024a). 실제로, 본 연구에서도 토양 화학성은 바이오차의 특성에 따라 좌우되었으며, 왕겨의 혼합비율이 높아 상대적으로 낮은 pH를 보유한 PM<sub>0</sub>RH<sub>10</sub> (pH 8.39)를 처리한 토양은 실험 전 토양보다 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 다른 선행연구에서는 바이오차의 처리량에 따라 토양 개선 효과가 달라진다고 보고하였으며, 본 연구에서도 처리량이 5.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 이하인 조건에서 토양 T-C, T-N, 그리고 OM 함량은 바이오차 처리 유무에 따른 유의한 차이를 보이지 않았다(Chun et al., 2022b; Park et al., 2022, 2024; Kang et al., 2023b). 본 연구에서는 바이오차 처리에 따라 토양 내 양분(N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) 함량이 개선되었으며, 이러한 변화는 바이오차의 이온 흡착 특성과 pH 개선 효과에 기인한다(Kang et al., 2023a, 2023c; Lee et al., 2023). Kang 등(2023a)은 농경지 토양에 처리된 바이오차는 표면의 음(-) 전하를 통해 각종 양이온을 고정할 수 있으며, 토양 내 K<sup>+</sup> 및 Ca<sup>2+</sup> 함량을 증진시킬 수 있다고 보고하였다. Jeon 등(2024)에서는 토양 내 양분 공급을 목적으로 유기 개량제를 처리하는 경우, 토양 내 양분 보유력

**Table 7.** Chemical properties of experimental soils affected by chicken manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Treatments	pH (1 : 5, H <sub>2</sub> O)	EC (dS·m <sup>-1</sup> )	T-C	T-N	OM	Avail. N	Avail. P	Exchangeable cations			
								Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
			(% )			(mg kg <sup>-1</sup> )		(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			
Initial soil	6.51 ± 0.03g	0.28 ± 0.02g	0.28 ± 0.02h	0.09 ± 0.00b	0.48 ± 0.03h	54.48 ± 3.83f	28.33 ± 1.49j	1.86 ± 0.09i	0.91 ± 0.04b	3.71 ± 0.18a	0.18 ± 0.00a
Control	6.11 ± 0.02h	0.26 ± 0.01g	0.27 ± 0.02h	0.09 ± 0.00b	0.47 ± 0.03h	51.73 ± 2.37f	33.21 ± 0.44j	1.87 ± 0.06i	0.74 ± 0.01cd	3.10 ± 0.10b	0.18 ± 0.00a
Only-urea	5.98 ± 0.00i	0.31 ± 0.01f	0.27 ± 0.01h	0.09 ± 0.00b	0.46 ± 0.01h	50.69 ± 1.66f	47.26 ± 2.01j	2.03 ± 0.01h	0.75 ± 0.02cd	3.07 ± 0.16b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -1	6.92 ± 0.03f	0.33 ± 0.01f	0.28 ± 0.02h	0.09 ± 0.00b	0.49 ± 0.03h	51.65 ± 2.22f	95.82 ± 0.33h	2.03 ± 0.01h	0.73 ± 0.01cd	3.00 ± 0.07b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>1</sub> -1	6.82 ± 0.04f	0.35 ± 0.02f	0.31 ± 0.02h	0.09 ± 0.01b	0.53 ± 0.03h	52.77 ± 3.64f	87.90 ± 1.81h	2.06 ± 0.00h	0.73 ± 0.00cd	2.98 ± 0.03b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>3</sub> -1	6.82 ± 0.03f	0.32 ± 0.02f	0.31 ± 0.01h	0.09 ± 0.00b	0.53 ± 0.01h	51.49 ± 1.51f	79.25 ± 2.15h	2.09 ± 0.01h	0.70 ± 0.01d	2.90 ± 0.04b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -1	6.71 ± 0.03f	0.33 ± 0.01f	0.28 ± 0.01h	0.08 ± 0.00b	0.48 ± 0.02h	50.18 ± 1.81f	62.27 ± 5.11i	2.03 ± 0.01h	0.73 ± 0.01cd	3.20 ± 0.06b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -1	6.42 ± 0.02g	0.34 ± 0.03f	0.30 ± 0.03h	0.08 ± 0.00b	0.51 ± 0.05h	53.10 ± 4.26f	54.72 ± 6.44j	2.03 ± 0.01h	0.73 ± 0.01dc	3.12 ± 0.03b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -1	6.23 ± 0.03h	0.35 ± 0.02f	0.30 ± 0.00h	0.09 ± 0.00b	0.52 ± 0.01h	53.69 ± 3.70f	47.56 ± 2.55j	2.04 ± 0.02h	0.70 ± 0.01d	3.01 ± 0.09b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -1	6.11 ± 0.04h	0.33 ± 0.06f	0.30 ± 0.01h	0.09 ± 0.00b	0.51 ± 0.01h	51.24 ± 2.76f	34.92 ± 0.91j	2.04 ± 0.09h	0.73 ± 0.03cd	3.06 ± 0.17b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -5	7.88 ± 0.02b	0.64 ± 0.04c	0.40 ± 0.04g	0.09 ± 0.00b	0.70 ± 0.06g	80.60 ± 1.95b	163.92 ± 3.87b	3.03 ± 0.05cd	0.90 ± 0.02b	2.93 ± 0.04b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>1</sub> -5	7.73 ± 0.02c	0.54 ± 0.01d	0.48 ± 0.03f	0.11 ± 0.01b	0.83 ± 0.06f	75.58 ± 5.40c	127.75 ± 8.12d	2.98 ± 0.04cd	0.83 ± 0.02c	2.96 ± 0.03b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>3</sub> -5	7.55 ± 0.00d	0.53 ± 0.01d	0.53 ± 0.04f	0.11 ± 0.00b	0.92 ± 0.06f	73.76 ± 4.37c	110.61 ± 11.66ef	2.59 ± 0.18e	0.80 ± 0.02c	2.95 ± 0.10b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -5	7.30 ± 0.02e	0.44 ± 0.01e	0.53 ± 0.04f	0.10 ± 0.01b	0.91 ± 0.06f	71.49 ± 5.31c	98.56 ± 3.79f	2.48 ± 0.01f	0.79 ± 0.02c	3.00 ± 0.02b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -5	6.68 ± 0.02g	0.42 ± 0.01e	0.61 ± 0.07e	0.10 ± 0.00b	1.04 ± 0.12e	68.63 ± 3.98cd	86.36 ± 2.65g	2.33 ± 0.05g	0.78 ± 0.01c	2.95 ± 0.07b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -5	6.61 ± 0.04g	0.36 ± 0.01f	0.73 ± 0.04d	0.10 ± 0.01b	1.26 ± 0.06d	66.24 ± 3.59d	72.04 ± 0.99h	2.22 ± 0.06g	0.75 ± 0.01cd	2.98 ± 0.06b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -5	6.56 ± 0.01g	0.33 ± 0.02f	0.73 ± 0.01d	0.09 ± 0.00b	1.26 ± 0.02d	60.23 ± 3.93e	62.01 ± 2.71i	2.21 ± 0.04g	0.70 ± 0.00d	2.89 ± 0.13b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -10	8.01 ± 0.01a	0.78 ± 0.02a	0.73 ± 0.02d	0.12 ± 0.01a	1.26 ± 0.03d	89.65 ± 0.61a	260.24 ± 10.07a	3.94 ± 0.15a	1.13 ± 0.02a	2.94 ± 0.07b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>1</sub> -10	7.82 ± 0.01b	0.76 ± 0.01a	0.74 ± 0.05d	0.12 ± 0.00a	1.28 ± 0.09d	85.87 ± 2.20a	176.90 ± 9.10b	3.55 ± 0.04b	1.05 ± 0.00a	2.95 ± 0.01b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>3</sub> -10	7.61 ± 0.01d	0.70 ± 0.03b	0.82 ± 0.02c	0.11 ± 0.00a	1.41 ± 0.03c	76.04 ± 3.45c	157.67 ± 1.44b	3.20 ± 0.13c	1.00 ± 0.01b	3.00 ± 0.06b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -10	7.42 ± 0.00e	0.69 ± 0.01b	0.84 ± 0.03c	0.11 ± 0.01a	1.45 ± 0.05c	75.97 ± 0.95c	101.92 ± 1.81c	2.89 ± 0.09d	0.95 ± 0.04b	2.97 ± 0.15b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -10	7.39 ± 0.03e	0.69 ± 0.02b	0.97 ± 0.03b	0.12 ± 0.00a	1.68 ± 0.06b	72.49 ± 2.60c	98.32 ± 2.76d	2.83 ± 0.03d	0.88 ± 0.01b	2.96 ± 0.05b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -10	6.87 ± 0.05f	0.67 ± 0.01bc	1.04 ± 0.02a	0.11 ± 0.00a	1.79 ± 0.04a	68.08 ± 2.55d	84.52 ± 1.27h	2.58 ± 0.06e	0.83 ± 0.02c	2.95 ± 0.09b	0.18 ± 0.00a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -10	6.68 ± 0.04g	0.66 ± 0.02bc	1.06 ± 0.04a	0.11 ± 0.00a	1.82 ± 0.08a	65.62 ± 3.57d	49.91 ± 3.48j	2.29 ± 0.03g	0.82 ± 0.01c	2.96 ± 0.04b	0.18 ± 0.00a
p-value	*	**	**	***	**	*	*	***	**	**	***

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphorus.

a - j: Within each column values followed by the same small letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Duncan's multiple range test ( $n = 3$ ).

\*, \*\* and \*\*\* were denote the statistically significant differences at significant level  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.001$ , respectively, based on Duncan's multiple range test.

증진 효율은 처리된 유기 개량제 내의 양분 함량에 비례한다고 보고한 바 있다. 또한, Lee 등(2023)은 바이오차에 의해 개선된 토양 pH는 인산의 가용성에 영향을 미치며, 토양 pH가 중성 범위로 개량됨에 따라 인산의 가용성은 2.66 배 증가한다고 보고하였다. 공통적으로, 선행연구들은 모두 바이오차 처리는 토양의 양분 보유력을 개선시킬 수 있음을 나타내며, 본 연구에서도 바이오차의 이온 흡착력과 토양 개선 효과로 인해 양분 보유력이 증가하였다고 판단하였다.

### 계분 내 왕겨의 포함비율 별 바이오차 처리에 따른 시설상추의 생육 특성 변화

계분 내 왕겨의 혼합비율을 달리하여 제조한 바이오차 처리에 따른 시설상추의 생육 특성 변화는 Table 8에 나타

**Table 8.** Growth characteristics of lettuce affected by poultry manure-based biochar containing the varying rate of rice husk.

Treatments	Yield (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Leaf			Chlorophyll content (SPAD value)
		Length	Width	Counts	
		(cm)		(ea·plant <sup>-1</sup> )	
Control	1.95 ± 0.10j	6.21 ± 0.12e	5.56 ± 0.37g	7.00 ± 0.82g	19.58 ± 1.95a
Only-urea	10.61 ± 1.71i	10.89 ± 1.35d	9.86 ± 1.62g	10.33 ± 2.49f	20.02 ± 2.27a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -1	25.58 ± 1.23e	15.21 ± 0.70ab	13.48 ± 0.94d	16.33 ± 1.70c	20.00 ± 0.55a
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -1	25.03 ± 2.40e	14.98 ± 0.23c	14.02 ± 0.10d	15.50 ± 0.41d	19.17 ± 0.71a
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -1	22.00 ± 2.07f	14.97 ± 0.48c	13.64 ± 0.43d	15.33 ± 0.47d	19.28 ± 0.99a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -1	18.12 ± 1.11g	14.97 ± 0.77c	12.96 ± 0.38e	15.00 ± 0.82d	18.34 ± 0.33a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -1	17.15 ± 4.32g	14.96 ± 1.03c	12.32 ± 0.71f	14.67 ± 1.70d	19.71 ± 1.48a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -1	15.88 ± 3.89h	15.01 ± 1.04c	12.22 ± 0.96f	13.67 ± 1.25e	19.13 ± 1.37a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -1	11.11 ± 4.27i	14.67 ± 2.63c	11.76 ± 1.16f	11.00 ± 0.82f	19.18 ± 0.86a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -5	30.93 ± 1.50ab	15.43 ± 0.14b	14.37 ± 0.22c	18.67 ± 1.25a	21.19 ± 2.13a
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -5	28.08 ± 2.87c	15.49 ± 1.30b	13.76 ± 0.97d	18.33 ± 1.25a	19.96 ± 0.79a
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -5	27.38 ± 5.44d	15.06 ± 0.87c	13.78 ± 0.58d	17.33 ± 1.70b	19.13 ± 1.85a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -5	25.51 ± 5.61e	14.81 ± 0.99c	13.11 ± 1.24e	17.00 ± 1.63b	19.99 ± 1.86a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -5	23.98 ± 0.00f	14.73 ± 0.11c	13.28 ± 1.18e	16.00 ± 1.63c	19.68 ± 0.61a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -5	23.11 ± 0.49f	14.73 ± 0.57c	12.84 ± 0.32e	15.00 ± 0.82d	19.09 ± 0.93a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -5	21.72 ± 3.26f	14.93 ± 0.80c	12.39 ± 0.66f	14.00 ± 1.63de	21.73 ± 4.19a
PM <sub>10</sub> RH <sub>0</sub> -10	33.52 ± 2.79a	16.56 ± 0.94a	16.26 ± 0.78a	19.00 ± 1.41a	22.03 ± 0.80a
PM <sub>9</sub> RH <sub>1</sub> -10	30.24 ± 2.13ab	16.72 ± 0.71a	15.84 ± 1.07ab	17.33 ± 1.25b	21.99 ± 6.30a
PM <sub>7</sub> RH <sub>3</sub> -10	30.11 ± 2.88ab	16.53 ± 0.93a	15.27 ± 0.26b	17.67 ± 0.47b	20.32 ± 2.23a
PM <sub>5</sub> RH <sub>5</sub> -10	29.44 ± 3.19b	16.08 ± 0.10ab	15.14 ± 0.19b	17.67 ± 1.25b	20.76 ± 0.70a
PM <sub>3</sub> RH <sub>7</sub> -10	28.35 ± 3.88c	16.03 ± 0.54ab	14.61 ± 0.36c	16.00 ± 1.41c	20.36 ± 2.37a
PM <sub>1</sub> RH <sub>9</sub> -10	27.55 ± 4.27d	15.80 ± 1.02ab	14.09 ± 0.74d	14.67 ± 2.05d	20.40 ± 1.34a
PM <sub>0</sub> RH <sub>10</sub> -10	25.81 ± 3.22e	15.71 ± 0.53ab	13.97 ± 0.71d	14.67 ± 0.47d	20.14 ± 1.53a
p-value	**	***	*	**	**

PM<sub>XX</sub>RH<sub>YY</sub>, poultry manure (XX%)-based biochar containing YY% of rice husk.

a - j: Within each column values followed by the same small letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Duncan's multiple range test ( $n = 3$ ).

\*, \*\* and \*\*\* were denote the statistically significant differences at significant level  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.001$ , respectively, based on Duncan's multiple range test.

년 바와 같다. 비료를 처리하지 않은 control 처리구의 토양의 시설상추 수량은  $1.95 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 이었으며, 무기질비료 처리(only-urea 처리구,  $10.61 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )에 따라 시설상추의 수량은 5.44배 증가하였다. 바이오차 처리량이  $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 에서  $5.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 으로 증가함에 따라 시설상추의 수량도 증가하는 경향을 나타내었으나,  $5.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  이상의 처리량에서는 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 계분 내 왕겨의 혼합비율에 따른 시설상추의 수량을 비교하였을 때, 계분 내 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 시설상추의 수량은 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 가장 높은 시설상추의 수량은  $\text{PM}_{10}\text{RH}_0\text{-5}$  처리구에서  $33.93 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 이었으며, 이는 control 및 only-urea 처리구보다 각각 17.40배와 3.20배 높은 수준이었다. 시설상추의 엽장과 엽폭은 control과 only-urea 처리구를 제외한 모든 처리구에서 유의한 차이를 보이지 않았으며, control 처리구에서 6.21 cm와 5.56 cm로 가장 낮게 조사되었다. 엽수의 경우,  $\text{PM}_{10}\text{RH}_0$ 을 처리한 토양에서 유의하게 높았으며, 바이오차 내 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 바이오차의 높은 처리량은 시설상추의 엽수를 증진시켰으며,  $\text{PM}_{10}\text{RH}_0\text{-10}$  처리구에서  $19.00 \text{ ea}\cdot\text{plants}^{-1}$ 로 가장 높았다. 시설상추의 엽록소 함량은 모든 처리구에서 통계적 유의한 차이를 나타내지 않았다.

바이오차 처리에 따른 작물 수량 증진은 바이오차에 의한 토양 개량 효과로부터 기인하며, 바이오차에 의한 토양 내 양분 및 유기물 증진은 작물의 생산 효율을 증가시킬 수 있다(Lee et al., 2024a; Park et al., 2024). 또한, 바이오차에 의한 토양 미생물 활성 증가 및 작물의 양분 이용 효율 향상도 바이오차 처리에 의한 작물 수량을 증진시키는 주요 원인으로 알려져 있다(Kang et al., 2023d, 2024a). 본 연구에서도 시설상추의 수량은 바이오차 처리량 및 계분이 차지하는 비율과 양(+)의 상관관계를 나타내었으며, 시설상추는 계분함량이 높은 바이오차를  $10.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  처리하였을 때,  $33.52 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 최대 수확량을 나타내었다. 이러한 결과들은 일반 농경지 토양보다 낮은 양분과 유기물 함량을 보유하고 있는 간척농지 토양에서 작물의 수확량을 증진시키기 위해서는 바이오차의 활용이 필수적임을 시사한다. 하지만, 일부 연구에서 바이오차의 과량 처리는 작물 생육을 저해하는 요인을 작용할 수 있다는 결과를 보고함에 따라 간척농지에서 바이오차를 효과적으로 활용하기 위해서는 최적 사용량을 결정하는 것이 필요하며, 본 연구의 결과에서는  $10.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 을 처리하였을 때, 작물 생육이 가장 우수할 것으로 판단된다(Khan et al., 2024).

## Conclusion

본 연구는 양분 및 유기물 함량이 낮은 새만금 간척농지 토양에서 작물 재배 시, 바이오차의 종류 및 처리량이 시설상추의 생육과 토양 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 바이오차는 계분을 주 원료로 제조하였으며, 바이오차의 종류는 계분 바이오차 내 왕겨의 혼합비율을 달리하여 구분하였다. 종류 별 바이오차의 특성을 분석한 결과, 바이오차의 화학적 특성은 왕겨의 혼합비율에 따라 변화하였으며, 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 바이오차의 pH, EC, 무기 조성( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) 함량은 감소하는 경향을 나타내었다. 반면, 바이오차의 주요 특징인 탄소 및 유기물 함량은 왕겨의 혼합비율에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 왕겨를 단독으로 이용한 바이오차에서 53.62%와 83.20%로 가장 높게 분석되었다. 하지만, 비료공정규격에서 고시한 바이오차의 탄화 안정도(H : C ratio와 O : C ratio)를 비교하였을 때, 왕겨를 30% 혼합한 바이오차만이 법적기준을 만족하여 실제 농업현장에서 사용가능할 것으로 판단된다. 왕겨의 혼합비율을 달리한 바이오차의 토양 개량 효과를 확인하였을 때, 계분 내 왕겨의 혼합비율이 증가함에 따라 토양 pH 및 양분 개량 효율은 감소하였으나, 탄소 및 유기물 함량은 유의하게 높게 증가하였다. 양분 함량이 높은 계분의 함량이 높은 바이오차를 토양에 처리하는 것은 토양 내 유효 질소, 유효 인산, 그리고 치환성 양이온 함량을 효과적으로 증진시킬 수 있었으며, 이에 따라 토양 EC도 증가하였다. 계분 내 왕겨의 혼합비율과 함께 바이오차의 처리량도 바이오차의 토양 개량 효과에 영향을 미쳤으며, 바이오차는 최소  $5.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 를 처리하였을 때, 토양 내 양분과 유기물 함량을 개선할 수 있었다. 바이오차 내 계분의 비율과 바이오차의 처리량이 증가함에 따라 시설상추의 수량은 유의하게 향상되었으며, 계분을 단독으로 이용한 바이오차를  $10.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  처리하

였을 때, 33.52 Mg·ha<sup>-1</sup>로 가장 높았다. 본 연구에서 제시한 결과를 기초로 새만금 간척지 토양 내 양분 및 유기물 함량 증진을 위한 최적의 계분 바이오차 처리 조건은 바이오차의 법적 기준과 토양 및 작물 생육에 미치는 영향을 모두 고려하였을 때 왕겨가 30% 혼합된 계분 바이오차를 10.0 Mg·ha<sup>-1</sup> 처리하는 것으로 판단된다.

## Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## Acknowledgements

This research study was conducted with support from a research grant awarded by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development of Rural Development Administration, Republic of Korea (Project No. PJ017028).

## Authors Information

Ju-Hyoung Shin, <https://orcid.org/0009-0001-3479-8095>

Yun-Gu Kang, <https://orcid.org/0000-0001-5368-5910>

Jun-Yeong Lee, <https://orcid.org/0000-0001-7486-3405>

Jun-Ho Kim, <https://orcid.org/0000-0001-7678-1657>

Taek-Keun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

## References

- Chun JH, Kang YG, Lee JH, Yun YU, Oh TK, Yoon MH. 2022a. The combined effect of nitrogen and biochar amendments on the yield and glucosinolate contents of the Chinese cabbage. *Journal of King Saud University - Science* 34:101799.
- Chun JH, Kang YG, Yu YJ, Lee JH, Yun YU, Oh TK. 2022b. Effects of different nitrogen fertilizer applications on growth of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 49:657-666. [in Korean]
- Jeon YJ, Kang YG, Eun JA, Oh TK. 2024. Yield, functional properties and nutritional compositions of leafy vegetables with dehydrated food waste and spent coffee grounds. *Applied Biological Chemistry* 67:22.
- Kang YG, Chun JH, Yun YU, Lee JY, Sung J, Oh TK. 2024a. Pyrolysis temperature and time of rice husk biochar potentially control ammonia emissions and Chinese cabbage yield from urea-fertilized soils. *Scientific Reports* 14:5692.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Hatamleh AA, Al-Dosary MA, Al-Wasel YA, Lee KS, Oh TK. 2022. Influence of individual and co-application of organic and inorganic fertilizer on NH<sub>3</sub> volatilization and soil quality. *Journal of King Saud University - Science* 34:102068.
- Kang YG, Lee JH, Lee JY, Kim JH, Oh TK, Sung J. 2023a. Effect of pyrolysis conditions on chemical properties of carbonized rice husks for efficient NH<sub>4</sub><sup>+</sup> adsorption. *Applied Biological Chemistry* 66:45.
- Kang YG, Lee JH, Lee JY, Oh TK. 2023b. Effects of application rate and pH of carbonized rice husk on the reduction of NH<sub>3</sub> volatilization and soil quality. *Korean Journal of Agricultural Science* 50:231-239. [in Korean]
- Kang YG, Lee JH, Lee JY, Oh TK. 2023c. Effects of biochar-based fertilizer on ammonia volatilization under controlled

- conditions. Korean Journal of Agricultural Science 50:437-446. [in Korean]
- Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK, Yun YU. 2023d. 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 50:713-721. [in Korean]
- Kang YG, Lee JY, Kim JH, Oh TK. 2024b. Quantifying soil organic matter for sustainable agricultural land management with soil color and machine learning technique. Agronomy Journal 116:982-989.
- Khan S, Irshad S, Mehmood K, Hasnain Z, Nawaz M, Rais A, Gui S, Wahid MA, Hashem A, Abd\_Allah EF, et al. 2024. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. Plants 13:166.
- KLIC (Korean Law Information Center). 2024. Setting fertilizer process specifications. Accessed in <https://www.law.go.kr> on 1 September 2024. [in Korean]
- Lee J, Yu M, Oketch EO, Nawarathne SR, Kim YB, Chathuranga NC, Maniraguha V, Sta. Cruz BG, Seo E, Park H, et al. 2024a. Effect of dietary protein levels and age on growth performance, total excreta and nitrogen balance of laying hens during the growing phase. Korean Journal of Agricultural Science 51:193-203. [in Korean]
- Lee JY, Kang YG, Kim JH, Oh TK, Yun YU. 2023. Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables. Korean Journal of Agricultural Science 50:967-976. [in Korean]
- Lee JY, Park DG, Kang YG, Kim JH, Kim JH, Choi JW, Yun YU, Oh TK. 2024b. Effect of biochar derived from rice husk and chicken manure on lettuce growth and soil chemical properties. Korean Journal of Agricultural Science 51:271-281. [in Korean]
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2022. 5th Fertilization Standard of Crop Plants. Rural Development Administration, Wanju, Korea. [in Korean]
- Oh YY, Jeong KH, Lee SH, Lee KS, Seo BS, Kim KY. 2022. Using reclaimed land for potato cultivation in Saemangeum, South Korea: Determining the optimal nitrogen fertilization rate with the giant *Miscanthus* used as a source of soil organic matter. Journal of Environmental Science International 31:911-922. [in Korean]
- Oh YY, Kim SY, Lee KS, Ryu JH, Lee SH, Ock HK, Jung KH, Kang BH, Kim KY. 2020. Assessment of growth and inulin for Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) cultivation in Saemangeum reclaimed land and upland soils. Korean Journal of Environmental Agriculture 39:188-196. [in Korean]
- Park DG, Kim HW, Lee HS, Lee MJ, Park HR, Oh TK, Lee SI. 2024. Evaluation of the impact of continuous use of rice hull biochar on greenhouse gas emissions and net ecosystem carbon balance in Kimchi cabbage cultivation. Korean Journal of Environmental Agriculture 43:117-127. [in Korean]
- Park DG, Lee JM, Choi EJ, Gwon HS, Lee HS, Park HR, Oh TK, Lee SI. 2022. Carbon mineralization in different soils cooperated with barley straw and livestock manure compost biochars. Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association 30:67-82. [in Korean]
- Wijeysingha S, Walpola BC, Kang YG, Yoon MH, Oh TK. 2023. Practical significance of plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: A review. Korean Journal of Agricultural Science 50:759-771.