Effect of Soil Amendments Derived from Agricultural Biomass to Improve Corn Growth and Soil Fertility in an Upland Field

Jae-Hyuk Park¹, Jin-Ju Yun¹, Han-Na Cho², Seung-Gyu Lee², So-Hui Kim², Ju-Sik Cho³, and Se-Won Kang^{4*}

¹Doctor's Degree, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

²Master's Degree, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

³Professor, Department of Agricultural Life Sciences & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

⁴Assistant Professor, Department of Agricultural Life Sciences & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: kangsw@scnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: September 30, 2021

Revised: November 15, 2021

Accepted: November 22, 2021

ORCID

Se-Won Kang

<https://orcid.org/0000-0003-2038-5465>

This study was conducted to investigate corn growth and soil fertility after soil amendment application of three types in an upland field in South Korea. Each of the barley straw biochar (BSB, applied at 1,000 kg 10a⁻¹), animal carcass biochar (ACB, applied at 1,000 kg 10a⁻¹) along with compost (applied at 2,000 kg 10a⁻¹), and bottom ash (BA, applied at 1,000 kg 10a⁻¹); the Control area was only treated compost. The corn grain yield was improved when grown under BSB, ACB, and BA with compost. Overall, biochar application had more effect on the productivity of biomass and corn yield, and showed significant results in corn cultivation. In particular, the corn grain yield was the highest under BSB treatment was over 22%, 11%, and 7% higher than those grown under Control, ACB, and BA treatments, respectively. Soil chemical properties after soil amendment addition were improved. In particular, soil pH and CEC related to crop nutrient availability were significantly increased in BSB, ACB, and BA areas compared to those in Control area. Therefore, these results indicate that corn productivity, when cultivated in soil conditions such as those in an upland field in South Korea, can be increased by application of soil amendments including BSB, ACB, and BA with compost.

Keywords: Animal carcass biochar, Barley straw biochar, Bottom ash, Productivity

Corn production under different soil amendments of three types.

Introduction

비료는 작물에 영양분을 공급하고 성장에 도움이 되도록 토양 또는 식물의 옆면에 적용하는 원료이다. 특히, 무기질 비료는 편리성과 그 효과를 바탕으로 작물의 수확량 증대와 작물의 생산성을 안정적으로 확보할 수 있도록 도움을 주는 중요한 물질이다 (Kang et al., 2021a). 그러나 농경지에 무기질 비료를 과도하게 사용하거나 장기적으로 사용하면 토양 양분의 불균형을 초래하고 토양 유기물 함량을 낮추게 된다. 농경지 토양의 유기물 함량 감소는 토양의 물리적, 화학적 및 생물학적 특성을 저하시켜 토양의 비옥도 감소를 초래한다. 우리나라의 무기질 비료 사용량은 OECD 국가에서 높은 수준으로 분류되고 있음에도 불구하고 작물 생산의 안정성을 유지하기 위해 정기적으로 무기질 비료를 사용하고 있다 (Park et al., 2021). 따라서 현대적인 농업 시스템 내에서 작물의 생산량은 안정적으로 유지하고 토양의 비옥도는 증진시킬 수 있는 방안이 요구되고 있다.

최근 들어 국민의 소득수준이 높아짐과 동시에 건강에 대한 관심이 크게 증가하여 친환경 농산물에 대한 수요도가 지속적으로 증가하였고, 미국과 유럽을 중심으로 시작된 유기농업은 시장규모가 점차 커져가고 있다 (Liu et al., 2017). 이에 우리나라에서는 생태환경을 보존하면서 소비자에게 건강하고 안전한 먹거리를 제공하기 위해 비료, 농약, 그리고 항생제 등을 사용하지 않거나 최소한으로 투입하여 농산물 생산과정에서 물, 공기 및 토양의 오염을 최소화하기 위한 연구가 진행 중이다.

기존에 국내에서는 토양개량제로서 녹비작물과 가축분뇨액비를 이용한 연구가 상당히 진행되었고, 토양내 탄소를 증가시키고 비옥도를 개선하여 건강한 토양환경을 유지할 수 있는 연구 결과들을 보여주었다 (Lee et al., 2014; Kang et al., 2020). 그러나 농촌노동력 감소와 동계작물 재배 기피 등의 현상은 경지이용률과 식량자급률을 점점 감소시키고 있기 때문에 농업생산성을 증대시키기 위한 새로운 작부체계가 요구되었다.

최근 주목할 만한 연구내용으로는 바이오차의 효과와 관련된 문헌을 살펴볼 수 있다 (Jung et al., 2020; Lee et al., 2020). 바이오차는 산소가 제한된 조건에서 유기성 바이오매스를 이용하여 열분해를 통해서 제조된 탄소 함량이 높은 물질을 뜻한다. 바이오차의 주요 특징은 안정적인 방향족 유기탄소로 구성되어 있기 때문에 토양에 투입되면 쉽게 분해되지 않고 토양에 오랫동안 저장될 수 있는 특성으로 크게 주목을 받았다. 또한 바이오차는 pH, CEC, 비표면적, 부피, 밀도 등의 고유한 특성으로 인해 토양에 적용되었을 때 작물 생육 개선 및 토양 비옥도 증진 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다 (Woo, 2013; Kim et al., 2020). 이와 같은 측면에서 접근할 때, 농작물 재배 후 버려지는 바이오매스의 바이오차 전환은 폐자원의 재활용 및 친환경 농산물 생산적인 측면에서 농업환경에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있는 매력적인 방법으로 판단된다 (Yi et al., 2019). 하지만, 현재까지 농업환경에 활용하여 그 효과가 보고된 바이오차는 초본류를 이용하여 제조한 바이오차 연구가 대부분이며, 축산분야와 산업분야로부터 발생하는 바이오차를 농업환경에 적용한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 농업, 축산, 그리고 산업에서 발생하는 바이오매스로부터 제조된 바이오차의 비료학적 가치를 평가하였고, 바이오차의 토양 시용이 작물의 생산성과 토양의 비옥도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

시험포장 본 시험은 바이오차 종류별 시용이 옥수수 재배환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었으며, 시험지역은 전라남도 광양시에 위치한 옥수수 재배지를 선정하였다. 시험포장은 옥수수와 배추 윤작 재배지이며 작물

재배는 농가에서 일반적으로 많이 사용하는 축분퇴비를 사용하는 곳으로, 축분퇴비의 TC, TN, P_2O_5 , K_2O , CaO 및 MgO 함량은 각각 41.8%, 1.82%, 2.06%, 1.80%, 1.69% 및 0.28%이었다. 옥수수 재배기간 동안 (3 - 7월) 시험지역은 평균기온이 18.8°C, 총 강우량은 773 mm, 그리고 평균 일조시간이 7.12 hr이었다.

시험지역의 공시 토양의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 pH는 6.08, EC는 0.65 dS m⁻¹, OM은 22.6 g kg⁻¹, 그리고 CEC는 7.56 cmol_c kg⁻¹이었으며, 미사질 양토의 특성을 가지고 있었다.

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

pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)			
					K	Ca	Mg	CEC
6.08	0.65	22.6	0.94	75.5	0.32	3.67	1.86	7.56

바이오차 제조 본 시험에 사용된 바이오차는 보릿짚 바이오차 (barley straw biochar, BSB), 가축사체 바이오차 (animal carcass biochar, ACB), 그리고 남동발전에서 배출되는 바이오차 (bottom ash, BA)를 사용하였다. BSB와 ACB는 보리 수확 후 발생하는 보릿짚과 가축사체를 랜더링 처리한 후 남은 잔류물을 각각 원료로 사용하여 바이오차로 제조하였고, BA는 바이오매스 기반 전소화력발전소에서 우드펠릿을 사용하고 배출되는 저회를 바이오차로 사용하였다.

보릿짚과 가축사체 랜더링 잔류물을 이용한 바이오차 제조는 공시 원료를 완전히 건조하여 수분을 제거하였으며, 건조된 원료는 밀폐형 내부 챔버에 넣은 후 열분해 장치 (Nabertherm, Germany)를 이용하여 제조하였다. 열분해 장치의 내부는 무산소 조건을 유지하였고, 열분해 온도는 500°C, 그리고 열분해 시간은 2시간으로 설정하여 BSB와 ACB를 제조하였다.

옥수수 재배 본 연구에서 옥수수 재배 시험을 수행하기 위한 처리조건은 대조구 (Control), BSB, ACB 및 BA로 각각 나누었으며, 모든 처리구는 4 m²로 나누었고 완전임의배치법에 의해 3반복으로 수행되었다. 각 처리조건에 따른 시비기준은 Control의 경우 농촌진흥청 작물별시비처방 기준에 준하여 축분퇴비만 2,000 kg 10a⁻¹으로 사용하였고, 퇴비와 함께 BSB, ACB 및 BA는 1,000 kg 10a⁻¹으로 각각 사용하였다. 현재 국내외적으로 작물별 바이오차 사용 수준이 정립되지 않았기 때문에 본 실험은 바이오차를 10a당 1,000 kg으로 고정하여 진행되었다.

축분퇴비, BSB, ACB, 그리고 BA 처리구는 각각의 토양개량제와 퇴비를 옥수수 이식 10일 전에 전량 기비로 사용하였고, 비닐멀칭을 하여 재배 관리하였다. 옥수수의 품종은 찰옥수수를 사용하였고, 재식밀도는 60 × 25 cm로 2021년 4월 6일에 이식하였으며, 7월 7일에 수확하였다.

옥수수의 수확기 생육조사는 지상부 길이, 생체중 및 단위면적 (m²) 당 바이오매스 생산량을 조사하였고, 수확한 옥수수는 길이, 옥수수과 껍질 그리고 낱알의 무게를 조사한 후 단위면적 (m²) 당 수확량을 산정하였다. 옥수수 수확 후 토양조사는 각 처리조건별 표층을 채취하여 화학적 특성을 조사하였다.

분석방법 본 시험에 사용된 공시재료, 바이오차 및 토양 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다.

공시재료로 사용된 보릿짚, 랜더링 잔류물, 그리고 우드펠렛과 열분해를 통해서 얻어진 바이오차들의 TN, TP, K, Ca 및 Mg 함량은 습식분해법 ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HClO}_4$)으로 전처리하여 TN은 Kjeldahl법 (질소자동분석기, Gerhardt auto-sampler Vapodest 50 carouse, Germany)으로 분석하였고, TP는 Vanado molybdate법 (UV2550PC, PekinElmer)으로 분석하였으며, K, Ca 및 Mg 함량은 산으로 전처리 후 여액을 ICP (ICPE-9000, Shimadzu)를 사용하여 분석하였다. 토양개량제로 사용된 BSB, ACB 및 BA의 pH는 pH meter을 이용하여 측정되었다.

통계 분석방법 바이오차 종류별 시용에 따른 옥수수의 생육 결과 및 토양 특성에 대한 통계분석은 SPSS 26 (IBM Corp., USA) 버전을 사용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

Results and Discussion

바이오차의 특성 농업, 축산, 그리고 산업에서 발생하는 바이오매스와 열분해를 통해 제조된 바이오차의 pH와 무기성분 함량을 조사한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다.

Table 2. Characteristics of soil amendments used in this study.

Item	Barley straw		Animal carcass		Wood pellet	
	Before (raw)	After (BSB [†])	Before (raw)	After (ACB)	Before (raw)	After (BA)
pH (1:10)	-	7.85	-	9.43	-	9.11
TN (%)	0.27	0.29	6.52	4.56	0.26	0.22
TP (%)	0.05	0.19	3.13	6.79	0.01	0.05
K (%)	0.44	1.54	0.06	1.63	0.19	0.54
Ca (%)	0.28	0.57	0.86	3.78	0.38	2.41
Mg (%)	0.09	0.65	0.02	0.93	0.07	0.54

[†]BSB, barley straw biochar; ACB, animal carcass biochar; BA, bottom ash.

생산된 바이오차의 pH는 모두 7 이상의 알칼리성을 나타내었고, $\text{ACB} \geq \text{BA} > \text{BSB}$ 순으로 높았다. 바이오차의 pH는 원재료와 열분해 온도에 따라서 달라지지만, 일반적으로 고온에서 제조되기 때문에 열분해를 통한 유기물 감소와 염기성 표면 산화물 형성 등으로 인해 pH가 증가된다 (Rehrah et al., 2014; Tomczyk et al., 2020). 이러한 변화는 원재료에서 열분해되지 않은 무기원소의 상대적 농도 증가로 인한 무기성분 함량의 증가 또한 바이오차의 pH가 증가 되는 하나의 요인으로 알려져 있다 (Novak et al., 2009). 이로 인해 본 연구에서 제조된 바이오차의 무기성분 함량은 전반적으로 공시재료에 비해 증가하였고, 원재료에 따라서 각 성분의 함량이 다른 것을 확인할 수 있었다. 단백질계 바이오매스로 사용된 가축사체는 육질과 뼈 부위에 질소와 인산, 그리고 칼슘 함량이 높은 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2011). 가축사체의 열분해를 통해 제조된 ACB는 질소 함량이 4.56%, 인 함량이 6.79%, 그리고 칼슘 함량이 3.78%로 유기농업에 많이 사용되고 있는 녹비작물과 대등하거나 높은 수준을 보였다 (Kang et al., 2020). 반면에 초본류와 목질계 바이오매스인 보릿짚과 우드펠렛은 기본적인 비료적 성분 함량이 낮아서 BSB와 BA의 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 그리고 마그네슘의 함량이 비슷한 수준을 나타내었다.

바이오차 종류에 따른 작물의 생육 특성 변화 옥수수 수확 후 식물체의 생육 특성을 조사한 결과는 Table 3 및 Fig. 1과 같고, 옥수수의 생육 특성을 조사한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다.

옥수수 식물체의 초장은 처리조건에 상관없이 179 - 191 cm plant⁻¹ 범위로 조사되었고, 옥수수 식물체의 부위별 생체중은 바이오차 종류에 따른 차이를 보였다. 조사된 생체중 결과를 이용하여 옥수수 수확 후 발생하는 대와 잎의 바이오매스 생산성을 조사한 결과, ACB 처리구에서 4.08 kg m⁻²으로 가장 높은 생산성을 보였고, BA, BSB 순으로 높았다. 바이오매스 생산성은 BSB, ACB, 그리고 BA 처리구가 Control 처리구에 비해 약 126%, 140% 및 134% 높은 증가율을 보였다.

Table 3. Growth characteristics of plant parts after corn harvest.

Treatment	Plant height (cm plant ⁻¹)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		
		Stem	Leaf	Root
Control	179 a [†]	340 a	147 a	124 ab
BSB	191 b	435 b	180 b	114 a
ACB	182 a	478 c	203 c	121 b
BA	180 a	505 d	149 a	127 c

[†] Means by the same within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test.

Fig. 1. Biomass productivity by soil amendments application (*Different letters indicate significant differences among treatments at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test).

Table 4. Growth characteristics of corn after corn harvest.

Treatment	Total weight (g plant ⁻¹)	Corn yield (g plant ⁻¹)	Straw (g plant ⁻¹)	Grain yield (g plant ⁻¹)	Corn productivity (kg m ⁻²)	Length (cm ea ⁻¹)
Control	245 b [†]	163 a	81.7 d	120 a	1.96 a	16.0 a
BSB	256 c	186 c	70.0 b	146 c	2.23 c	17.0 b
ACB	237 a	174 b	62.7 a	133 b	2.09 b	17.2 b
BA	252 c	175 b	77.6 c	137 b	2.10 b	17.0 b

[†] Means by the same within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test.

한편, 옥수수의 생육 특성은 식물체의 생육 특성과 달리 BSB 처리구에서 높은 생산량을 보였다. 옥수수의 단위면적 (m^2) 당 생산량은 BSB, ACB 및 BA 처리구에서 각각 2.23, 2.09 및 2.10 kg m^{-2} 으로 Control 처리구에 비해 약 114%, 107% 및 107% 증수율을 보였다.

바이오차의 토양 사용에 따른 효과는 많은 연구자들을 통해서 작물 생육과 생산성에 긍정적인 영향을 미친다고 보고되었다 (Afreh et al., 2018; Kang et al., 2021b). Kang et al. (2018)의 밭 작물 재배 연구에 의하면, 보릿짚 바이오차의 사용은 pH, 수분함량 등의 토양 물리화학적 특성들을 개선시켜 작물이 이용할 수 있는 양분이용률을 증가시킨다고 보고한 바 있다. 본 연구에서는 BSB를 비롯한 ACB 및 BA의 사용을 통해서 옥수수 수확 후 남은 바이오매스의 생산성과 옥수수의 생산성이 증가된 것을 확인하였다.

바이오차 사용 후 토양 특성 변화 원재료의 특성이 다른 바이오차 사용이 토양의 화학적 특성에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 2와 같이 모든 지표에서 바이오차 사용으로 인한 증가 효과가 나타났다. 특히, 작물의 생육과

Fig. 2. Changes in soil chemical characteristics after corn harvesting for each tested treatment group (*Different letters indicate significant differences among treatments at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test).

밀접한 관련이 있는 토양의 pH 및 CEC는 바이오차 처리구가 Control 처리구에 비해 각각 0.62 - 1.11 및 0.32 - 0.60 cmol_c kg⁻¹ 범위로 유의하게 증가되었다. Park et al. (2021)은 바이오차에 의한 pH 및 CEC 증가는 바이오차의 높은 pH와 표면적에 의한 영향으로 CEC가 증가된 것으로 보고하였고, 바이오차는 표면 및 전하 밀도가 높고, CEC가 높기 때문에 농경지에 바이오차를 적용하면 CEC가 증가된다고 Kamara et al. (2015)과 Peng et al. (2011)이 보고한 바 있다. 또한, 영양 공급, 보수력 및 미생물 활동을 증가시켜 토양 비옥도 개선에 영향을 미치는 SOC 함량은 pH, CEC 결과와 유사하게 BSB, ACB 및 BA 처리구가 Control 처리구에 비해 유의적으로 증가함을 보여주었다 (Kang et al., 2021a). 따라서 본 연구에서 조사된 바이오차 사용 효과는 바이오차의 종류에 상관없이 토양에서 작물 성장을 위한 양분유효도를 증가시킬 수 있음을 보여주었다.

Conclusions

본 연구는 다양한 분야에서 발생하는 바이오매스를 바이오차로 전환 후 농작물에 대한 사용 효과를 평가하였다. 공시원료로 사용된 보릿짚, 가축사체 및 우드펠릿을 열분해하여 바이오차로 전환하였고, 옥수수 재배에 사용하였다. 바이오차의 비료적 성분은 축산환경에서 발생하는 가축사체로부터 제조된 ACB의 pH와 무기성분 함량이 초본류 및 목질계 바이오매스로부터 제조된 바이오차에 비해 많았다. 옥수수 생육 및 토양 특성에 대한 바이오차 사용 효과는 전반적으로 바이오차 종류에 상관없이 Control 처리에 비해 옥수수의 생산량이 유의적으로 증가하였고, 양분유효도와 관련이 깊은 토양 pH와 CEC 특성 또한 Control 처리에 비해 상당히 개선된 결과를 보여주었다. 본 시험의 결과로 미루어 볼 때 농업, 축산, 산업분야에서 발생하는 바이오매스를 바이오차로 전환하여 농경지로의 적용은 작물 생산성 향상, 토양 환경 개선, 그리고 무기질 비료 대체 등의 긍정적인 효과를 가져다 줄 것으로 판단된다. 따라서 바이오차의 농업적 이용을 위한 작물별 시비처방기준이 정립될 수 있도록 바이오차 특성에 따른 장기적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

References

- Afreh, D., J. Zhang, D. Guan, K. Liu, Z. Song, C. Zheng, A. Deng, X. Feng, X. Zhang, Y. Wu, Q. Huang, and W. Zhang. 2018. Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China. *Soil Tillage Res.* 180:259-267.
- Jung, I.H., H.S. Na, H.J. Cho, O.Y. Kwon, S.G. Hong, and J.D. Shin. 2020. Response of cabbage growth to different application ratios of activated rice hull biochar mixed fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):635-642.
- Kamara, A., H.S. Kamara, and M.S. Kamara. 2015. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties. *Agric. Sci.* 6:798-806
- Kang, S.W., D.C. Seo, S.Y. Kim, and J.S. Cho. 2020. Utilization of liquid pig manure for resource cycling agriculture in rice-green manure crop rotation in South Korea. *Environ. Monit. Assess.* 192:323.
- Kang, S.W., J.J. Yun, J.H. Park, and J.S. Cho. 2021a. Exploring suitable biochar application rates with compost to

- improve upland field environment. *Agronomy* 11:1136.
- Kang, S.W., S.H. Kim, J.H. Park, D.C. Seo, Y.S. Ok, and J.S. Cho. 2018. Effect of biochar derived from barley straw on soil physicochemical properties, crop growth, and nitrous oxide emission in an upland field in South Korea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25(26):25813-25821.
- Kang, S.W., Y.H. Choeng, J.J. Yun, J.H. Park, J.H. Park, D.C. Seo, and J.S. Cho. 2021b. Effect of biochar application on nitrogen use efficiency for sustainable and productive agriculture under different field crops. *J. Plant Nutr.* 44(19):2849-2862.
- Kim, M., H. Kim, S.I. Yun, C. Lee, D. Park, M. Kim, and J.D. Shin. 2020. Growth responses and changes of soil chemical properties with application rate of supplemented biochar pellet as slow release fertilizer during tomato cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(3):268-276.
- Lee, S.G., D.C. Seo, S.W. Kang, Y.J. Seo, J.H. Ryu, H.W. Kang, W.T. Jeon, M.T. Kim, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2014. Effect of liquid pig manure on growth and nutrient contributions of green manure crops of gramineae and leguminous species in paddy soil. *J. Agric. Life Sci.* 48(2):175-184.
- Lee, S.L., J.H. Lee, J.H. Park, S.W. Hwang, and D.C. Seo. 2020. Characteristics of ammonia gas emission from soybean cultivation soil with biochar, fly ash and microorganisms. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):528-537.
- Liu, Q., Z. Yan, and J. Zhou. 2017. Consumer choices and motives for ecolabeled products in China: An empirical analysis based on the choice experiment. *Sustainability* 9:331-342.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Novak, J.M., I.M. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrah, D.W. Watts, W.J. Busscher, and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environ. Sci.* 3:195-206.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):151-160.
- Peng, X., L.L. Ye, C.H. Wang, H. Zhou, and B. Sun. 2011. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil Tillage Res.* 112:159-166.
- Rehrah, D., M.R. Reddy, J.M. Novak, R.R. Bansode, K.A. Schimmel, J. Yu, D.W. Watts, and M. Ahmedna. 2014. Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 108:301-309.
- Seo, D.C., S.W. Kang, I.W. Choi, H.H. Sung, T.Y. Hur, J.Y. Yoo, Y.J. Lee, J.S. Heo, S.J. Kang, and J.S. Cho. 2011. Evaluation of fertilizer value of animal cadavers for agricultural recycling. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):788-793.
- Tomczyk, A., Z. Sokosłowska, and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 19:191-215.
- Woo, S.H. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technol.* 19(3):201-211.
- Yi, Y.S., H.J. Cho, J.Y. Heo, and Y.H. Lee. 2019. Effects of wood-derived biochar application on soil chemical properties and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):457-466.