Effects of Wood-derived Biochar Application on Soil Chemical Properties and Growth of Lettuce (*Lactuca sativa* L.)

Yun-Sook Yi, Hyeon-Ji Cho, Jae-Young Heo*, and Young Han Lee*

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Korea

*Corresponding author: lyh2011@korea.kr, bopo@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 25, 2019

Revised: October 15, 2019

Accepted: October 17, 2019

Biochar is an amendment that can be used for reducing odors, enhancing crop productivity and soil fertility to revitalize the urban agriculture. The objective of this study was to evaluate the effects of biochar from the pyrolysis pine on the soil chemical properties, nutrient uptake, and growth of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) in an upland field. Lettuce was planted in a silt loam soil amended with four rates of biochar 0 (CFB1), 60 (CFB2), 120 (CFB3), and 240 kg 10a⁻¹ (CFB4) with chemical fertilizer (14.3 kg 10a⁻¹ N, 15.7 kg 10a⁻¹ P₂O₅, and 12.1 kg 10a⁻¹ K₂O), no fertilizer (NF), and animal compost 440 kg 10a⁻¹ with chemical fertilizer (CFC). Leaf number and fresh weight of lettuce plant were higher in CFB4 treatment than in the other treatments. Increasing rates of biochar caused a significant increase in lettuce yield, amount of nutrient uptake, and soil pH. The economically optimum application rate of fertilizer biochar was 200 kg 10a⁻¹ on the basis of the regression curve. The electrical conductivity of the CFB1 soil was significantly higher than in the other treatments, whereas the soil pH was significantly lower in the CFB1 soil than those in the biochar treatments and NF soils. These results showed that biochar amendment increased yield of crops as well as improving soil properties.

Keywords: Biochar, Soil amendment, Soil fertility, Upland field

A regression curve between yield of lettuce and application rate of wood-derived biochar.

Introduction

바이오차는 목재나 식물체 잔사를 이용하여 산소가 거의 없는 상태에서 약 350°C의 온도로 열분해하여 생성된 물질로서 악취가 없으며 1,000°C 이상의 고온으로 만들어지는 숯과 구별된다 (Kaudal et al., 2016). 주로 식물체의 40%에서 50%만 탄화시키기 때문에 숯의 성질에 유기물 성질을 가지고 있다. 그리고 바이오매스가 난분해성 탄소로 전환되기 때문에 토양의 유기탄소를 증가시켜 토양에 탄소를 고정하는 능력이 뛰어나 세계적으로 주목을 받기 시작하였다 (Han et al., 2011).

또한, 바이오차는 유기농업에 사용할 수 있는 토양개량제로 등록이 되어 있으며 토양 입단화 향상, 보비력과 보수력 증가, 유용미생물 증가와 토양내 중금속 및 농약잔여물 흡착 능력이 뛰어나 농업현장 뿐만 아니라 도시농업에도 활용 가치가 매우 높다고 할 수 있다. 토양개량 목적으로 토양에 처리할 경우 수분 보유능 증가 (Novak et al., 2009), 산도 개선 (Peng et al., 2011; Liang et al., 2014; Ahmad et al., 2016; Chen et al., 2017), 영양물질 공급 및 유지 (Kaudal et al., 2016), 그리고 온실가스 발생량을 저감하는 것으로 보고되었다 (Spokas et al., 2009; Atkinson et al., 2010; Spokas et al., 2010). 그리고 바이오차는 토양 및 수질에 존재하는 오염물질을 효과적으로 저감하는 효과가 있다 (Cao et al., 2009; Hartley et al., 2009; Uchimiya et al., 2010). 국내에서 바이오차 활용은 중금속 흡착 제거 등 오염물질 정화에 대한 연구가 가장 많으며 (Bae and Koh, 2011; Lee et al., 2011; Choi et al., 2013; Lim et al., 2014; Lim et al., 2015; Park et al., 2015), 온실가스 저감 (Seo et al., 2012; Yoo et al., 2013; Kim et al., 2014) 및 토양개량 (Han et al., 2011; Jung, 2012)에 관한 연구도 보고된 바 있다. 국외 논문은 바이오차의 원료 및 생산 조건에 따른 특성 연구 (Nguyen and Lehmann, 2009; Nguyen et al., 2010; Kim et al., 2012; Ahmad et al., 2013; Kim et al., 2013), 중금속 오염토양 정화 및 오염물질 제거 (Beesley et al., 2010; Ahmad et al., 2012; Uchimiya et al., 2012; Ahmad et al., 2016), 토양 탄소 저장 및 온실가스 저감 (Spokas et al., 2009; Atkinson et al., 2010; Spokas et al., 2010; Agegnehu et al., 2016), 작물에 대한 사용효과 (Nigussie et al., 2012; Carter et al., 2013; Akhtar et al., 2014; Liu et al., 2014; Blackwell et al., 2015; Pandey et al., 2016; Sun et al., 2016; Jaiswal et al., 2017), 토양 미생물에 미치는 영향 (Lehmann et al., 2011; Prayogo et al., 2014; Gul et al., 2015; Liao et al., 2016) 등에 관한 연구가 보고된 바 있다. 그러나 밭토양에서 원예작물을 대상으로 작물의 생육 및 토양 화학성을 검토한 결과는 미흡한 실정이다. 이러한 관점에서 지구온난화를 예방하고 비료 사용량을 줄이면서 작물 생산성을 획기적으로 증대시킬 수 있는 바이오차에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 바이오차에 대한 세계적인 연구 성과에 비해 국내의 바이오차 연구는 아직 초기 단계이며 향후 농업분야에서 기후변화에 기여하는 역할 뿐만 아니라 다양한 분야에서 활발한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 상추 생육향상을 위한 바이오차의 적정 사용량을 구명하고 토양 화학성에 미치는 영향을 검토하였다.

Materials and Methods

재배 및 토양 조건 본 시험에 사용한 상추 품종은 적축면 상추이며 이현미사질양토 (Ihyeon series, Coarse silty, mixed, mesic family of Dystric Fluventic Eutrochrepts)에서 바이오차의 사용효과를 검토하였다. 처리내용은 무처리 (NF), 화학비료 (N 14.3, P₂O₅ 15.7, K₂O 12.1 kg 10a⁻¹)와 돈분퇴비 (440 kg 10a⁻¹)를 사용한 토양 검정시비 (CFC) 그리고 화학비료와 바이오차를 10a당 0 kg (CFB1), 60 kg (CFB2), 120 kg (CFB3), 240 kg (CFB4)을 처리한

시험구 등 6수준으로 처리하여 난괴법 3반복으로 수행하였다. 상추는 재식거리를 20×20 cm로 하여 2016년 6월 19일에 정식하고 2016년 7월 13일에 수확하였다. 시험에 사용된 토양의 화학성은 Table 1과 같이 pH는 7.1, EC 1.09 dS m^{-1} , 유기물 15 g kg^{-1} , 유효인산 175 mg kg^{-1} , 치환성 칼륨 $0.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 치환성 칼슘 $9.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 치환성 마그네슘 $2.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 질산태 질소 함량은 56 mg kg^{-1} 을 나타냈다. 이러한 특성은 상추 재배지 적정수준인 pH 6.5 - 7.0, EC 2.0 dS m^{-1} 이하, 유기물 20 - 30 g kg^{-1} , 유효인산 250 - 400 mg kg^{-1} , 치환성 칼륨 0.4 - 0.6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 치환성 칼슘 6.0 - 7.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 치환성 마그네슘 2.0 - 2.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 와 유사하였다.

Table 1. Chemical properties of upland soil used in the experiment.

pH	EC	OM	Avail. P_2O_5	K	Ca	Mg	$\text{NO}_3\text{-N}$
1:5	dS m^{-1}	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	-----	Exch. Cat. $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	-----	mg kg^{-1}
7.1	1.09	15	175	0.70	9.7	2.7	56

시험에 사용된 바이오차는 소나무 목재를 분쇄하여 300°C 에서 1시간 탄화시킨 것을 사용하였으며 이화학적 특성은 Table 2와 같이 유기물 60.2%, 수분 17.0%, 질소 0.85%, 인산 0.03%, 칼리 0.11%의 수준이었다.

Table 2. Agronomic properties of wood-derived biochar and pig manure compost used in the experiment.

Fertilizer	OM	Moisture	N	P_2O_5	K_2O
	----- % -----				
Pig manure compost	34.2	34.4	1.21	1.56	1.14
Wood-derived biochar	60.2	17.0	0.85	0.03	0.11

토양 및 식물체 분석방법 토양시료는 음지에서 7일간 풍건하고 고무망치로 입자를 조제한 후 2 mm 체를 통과된 것을 분석에 사용하였다. 토양 화학성분은 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양 pH와 EC는 전극법을 적용하여 토양 10 g에 50 mL 증류수를 가하여 1시간 정지한 후 pH meter (Orion 520A pH meter, Orion Research Inc., Boston, USA)와 EC meter (Orion 3STAR EC meter, Orion Research Inc., Boston, USA)로 분석하였다. 유기물은 Tyurin법으로 적정하였고, 유효인산은 Lancaster법으로 비색계 (UV-1650PC, Shimadzu Co., Kyoto, Japan)를 사용하여 분석하였다. 치환성 양이온은 1M NH_4OAc 로 추출하여 ICP (AAAnalyst 300, Perkin-Elmer, Norwalk, USA)로 분석하였고 질산태 질소는 Kjeldahl법으로 정량하였다. 상추 무기성분 분석은 채취 후 80°C 에서 24시간 건조시키고 분쇄기 (RM100 Mortar Grinder, Retsch, Germany)를 사용하여 270 mesh로 조제한 후 건물 0.5 g을 습식 분해하여 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법으로 분석하였다 (NIAST, 2000). 그리고 양분흡수량을 조사하기 위하여 분석된 양분함량을 전체 식물체의 건물량으로 환산하였다.

상추 생육조사 상추 생육 및 수량조사는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준 (RDA, 2012)을 적용하여 수확기에 20주를 선정하여 실시하였다. 엽장 및 엽폭은 충분히 전개된 가장 긴 잎과 넓은 잎을 측정하였고 엽수는 1 cm 이상의 모든 잎수를 조사하였다. 주당 생체중은 뿌리를 제외한 식물체의 전체 무게를 조사하였고 수량은 3.3 m^2 의 상추 무게를 측정하여 10a 면적으로 환산하였다.

통계분석 조사된 상추 생육 및 수량과 분석된 토양 화학성은 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하여 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

Results and Discussion

토양 화학성 변화 바이오차 처리에 따른 수확기 토양 화학성은 Table 3과 같이 토양 pH는 CFB4 처리구가 7.1, CFB3 처리구는 7.0으로 CFC 처리구 6.8과 CFB1 처리구 6.7에 비해 유의적으로 증가되었다 ($p < 0.05$). 이러한 결과는 목재 바이오차 사용으로 발토양의 pH가 0.32 정도 높아지는 효과가 있다고 한 Jones et al. (2011)의 보고와 일치하였다. 토양 염류농도는 화학비료 처리구인 CFB1에서 1.50 dS m^{-1} 로 무처리 0.45 dS m^{-1} , 바이오차 처리구인 CFB3 0.81 , CFB2 0.95 , CFB4 0.97 dS m^{-1} 및 퇴비 처리구인 CFC 1.04 dS m^{-1} 에 비해 유의적으로 높았으며 ($p < 0.05$) 바이오차 처리구와 퇴비 처리구는 차이가 없었다. 치환성 칼륨 함량과 질산태 질소 함량도 토양 염류농도와 유사한 경향을 나타냈다. 유효인산 함량은 CFB3 처리구가 171 mg kg^{-1} 으로 무처리인 NF 156 mg kg^{-1} 과 CFB2 처리구 159 mg kg^{-1} 보다 많은 것으로 나타났다 ($p < 0.05$).

Table 3. Chemical properties of upland soil at harvesting stage.

Treatments [†]	pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	NO ₃ -N
	1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- Exch. Cat. cmol _c kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹
NF	7.0ab [‡]	0.45c	15a	156b	0.44c	10.0a	2.6a	14c
CFC	6.8cd	1.04b	16a	163ab	0.60b	9.5a	2.3a	114b
CFB1	6.7d	1.50a	14a	165ab	0.73a	9.9a	2.7a	219a
CFB2	6.9bc	0.95b	15a	159b	0.64ab	9.8a	2.6a	121b
CFB3	7.0ab	0.81bc	15a	171a	0.58b	10.0a	2.7a	76bc
CFB4	7.1a	0.97b	16a	163ab	0.55bc	9.6a	2.5a	87bc

[†]NF, no fertilizer; CFC, pig manure compost $440 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ + chemical fertilizer; CFB1, chemical fertilizer; CFB2, biochar $60 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ + chemical fertilizer; CFB3, biochar $120 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ + chemical fertilizer; CFB4, biochar $240 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ + chemical fertilizer.

[‡]Means followed by different letters within the same row are significantly different at $\alpha = 0.05$ significance level according to Duncan's multiple range test.

상추 생육 및 수량 바이오차 사용에 따른 수확기 상추의 엽장은 Table 4와 같이 CFB4 28.4 cm, CFB3 27.3 cm, CFB2 25.7 cm, CFB1 25.1 cm, CFC 26.6 cm로 나타났으며 CFB4가 CFB3를 제외한 다른 처리구에 비해 유의적으로 길었으며 엽폭도 비슷한 결과를 보였다 ($p < 0.05$). 상추의 주당 엽수는 CFB4 처리구가 23.1개, CFB3 22.5개, CFB2 20.5개, CFB1 17.6개로 CFB4 처리구가 다른 처리구에 비해 유의적으로 많았다 ($p < 0.05$). 상추의 주당 생체 중은 CFB4 처리구가 131 g, CFB3 128 g, CFB2 108 g, CFB1 89 g으로 나타나 바이오차의 사용량이 많아질수록 증가하는 경향이었으며 CFB4 처리구가 다른 처리구에 비해 유의적으로 무거웠다 ($p < 0.05$). 상추의 수량은 CFB4 처리구가 $1,976 \text{ kg}$ 으로 CFB3 $1,912 \text{ kg}$, CFB2 $1,624 \text{ kg}$, CFC $1,548 \text{ kg}$ 보다 각각 5%, 24%, 28% 증가한 것으로 나타났다. 화학비료 처리구인 CFB1 $1,337 \text{ kg}$ 에 비해 각각 23%, 43%, 48%로 유의적인 증가를 나타냈다 ($p < 0.05$). 이러한 결과는 토양의 산도 개선 및 양분 공급효과에 기인된 것으로 판단된다 (Peng et al., 2011; Liang et al., 2014;

Ahmad et al., 2016; Kaudal et al., 2016; Chen et al., 2017). Singla et al. (2014)은 일본 겨자시금치 재배에서 바이오차를 사용한 결과 화학비료 대비 5 - 19% 증수된다고 하였고 Yao et al. (2015)은 바이오차를 67 kg 10a⁻¹ 사용한 결과 피망의 수량이 13 - 18% 증대된 것을 확인하였다. Pandey et al. (2016)은 바이오차를 10a당 150 kg 사용한 결과 바질의 수량이 20% 증가하고 미생물체 탄소함량도 유의적으로 증가하는 것을 보고하였다. 또한, Olmo et al. (2016)은 바이오차를 10a에 4톤까지 처리하여도 밀의 수량이 유의적으로 증가한다고 하였다. 그리고 밭토양에서 추천비료의 절반인 바이오차를 6 ton ha⁻¹ 처리한 경우 밀의 수량이 대조구에 비해 340 kg ha⁻¹ 증가하여 18% 증수되었고 바이오차 1.5 ton ha⁻¹과 무기질비료를 혼합하여 처리한 경우 수량이 46% 증대된다는 Solaiman et al. (2010)의 결과와 일치하였다. 그러나 바이오차 사용으로 토양 유기물 함량이 1.5배 증가하지만 (Laird et al., 2017) 토양에 12 ton 10a⁻¹ 이상 과다하게 사용할 경우 양분 흡착으로 인한 작물 생육 부진이 올 수 있기 때문에 작물에 따른 적정 사용량을 검토할 필요가 있다 (Sorensen and Lamb, 2016). 바이오차 사용량에 따른 상추의 수량 회귀곡선은 Fig. 1과 같이 $Y = -0.019X^2 + 7.52X + 1,325$ ($R^2 = 0.972^{***}$)의 수식을 보였으며 고도로 유의적인 상관관계를 나타냈다. 그리고 수량 회귀식에 따라 상추에 대한 바이오차의 적정 사용량은 10a당 200 kg으로 나타났다.

Table 4. Effect of wood-derived biochar amendment on lettuce growth.

Treatments [†]	Leaf length	Leaf width	Leaf number	Fresh weight	Yield
	cm	cm	no. plant ⁻¹	g plant ⁻¹	kg 10a ⁻¹
NF	24.4d [‡]	11.3c	17.5c	68d	1,029d
CFC	26.6bc	12.7ab	19.5b	103b	1,548b
CFB1	25.1cd	12.0bc	17.6c	89c	1,337c
CFB2	25.7bcd	12.3b	20.5b	108b	1,624b
CFB3	27.3ab	12.9ab	22.5a	128a	1,912a
CFB4	28.4a	13.6a	23.1a	131a	1,975a

[†]NF, no fertilizer; CFC, pig manure compost 440 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB1, chemical fertilizer; CFB2, biochar 60 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB3, biochar 120 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB4, biochar 240 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer.

[‡]Means followed by different letters within the same row are significantly different at $\alpha = 0.05$ significance level according to Duncan's multiple range test.

Fig. 1. A regression curve between yield of lettuce and application rate of wood-derived biochar.

상추 무기성분 함량과 양분 흡수량 수확기 상추의 무기성분 함량은 Table 5와 같이 NF 처리구에 비해 CFC, CFB1 및 CFB2 처리구는 질소 함량이 유의적으로 증가하였다 ($p < 0.05$). 인산 함량은 CFC와 CFB4 처리구가 CFB1 처리구에 비해 유의적으로 증가하였으며 칼리 함량은 CFC 처리구가 NF에 비해 유의적으로 많았다 ($p < 0.05$). 그러나 칼슘과 마그네슘 함량은 모든 처리구에서 유의적인 차이가 없었다.

Table 5. Effect of wood-derived biochar amendment on nutrient concentrations by lettuce shoots under upland field condition.

Treatments [†]	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	%				
NF	4.35b [‡]	1.46ab	6.31b	0.98a	0.72a
CFC	5.21a	1.55a	7.53a	0.87a	0.61a
CFB1	5.17a	1.40b	7.03ab	1.05a	0.62a
CFB2	5.12a	1.48ab	7.38ab	0.97a	0.68a
CFB3	4.93ab	1.53ab	6.87ab	1.01a	0.64a
CFB4	4.87ab	1.55a	6.87ab	0.97a	0.64a

[†]NF, no fertilizer; CFC, pig manure compost 440 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB1, chemical fertilizer; CFB2, biochar 60 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB3, biochar 120 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB4, biochar 240 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer.

[‡]Means followed by different letters within the same row are significantly different at $\alpha = 0.05$ significance level according to Duncan's multiple range test.

상추의 양분 총흡수량은 Table 6과 같다. 바이오차 처리량이 많은 CFB3와 CFB4 처리구에서 총질소 흡수량은 7.54, 7.71 kg 10a⁻¹였고, 인산 흡수량은 2.33, 2.45 kg 10a⁻¹였으며, 칼슘 및 마그네슘 함량도 무처리인 NF, 퇴비 처리구인 CFC 및 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 유의적으로 증가하였다 ($p < 0.05$). 특히 바이오차 사용량이 많아질수록 상추의 무기성분 흡수량은 증가하는 경향이였다. 바이오차의 사용효과는 Blackwell et al. (2010)이 인산 성분이 충분한 토양이거나 인산비료를 50 kg ha⁻¹ 추가한 토양에서 효과가 크게 나타난다고 보고한 바와 같이 본 시험에서도 상추의 인산 함량과 흡수량이 증대되는 결과를 보였다.

Table 6. Effect of wood-derived biochar amendment on nutrient uptake by lettuce shoots under upland field condition.

Treatments [†]	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	kg 10a ⁻¹				
NF	3.61d [‡]	1.20d	5.21c	0.79c	0.59d
CFC	6.44bc	1.92b	9.29a	1.07b	0.75bc
CFB1	5.52c	1.50c	7.51b	1.13b	0.66cd
CFB2	6.64ab	1.92b	9.60a	1.26ab	0.88ab
CFB3	7.54ab	2.33a	10.52a	1.54a	0.98a
CFB4	7.71a	2.45a	10.88a	1.53a	1.01a

[†]NF, no fertilizer; CFC, pig manure compost 440 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB1, chemical fertilizer; CFB2, biochar 60 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB3, biochar 120 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer; CFB4, biochar 240 kg 10a⁻¹ + chemical fertilizer.

[‡]Means followed by different letters within the same row are significantly different at $\alpha = 0.05$ significance level according to Duncan's multiple range test.

본 연구에서 소나무 목재 바이오차는 작물 수량 증대와 토양 양분을 관리하는데 있어 매우 유용한 유기물 이라는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 농업현장에 활용하기 위해서는 장기적인 시용효과와 토양 물리성 개량 및 토양 탄소 저장 효과 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conclusions

밭토양의 유기물 공급과 토양개량을 목적으로 상추에 대한 바이오차의 적정 시용효과를 검토하였다. 상추의 수량은 바이오차 120 kg 10a⁻¹ 처리구인 CFB3와 240 kg 10a⁻¹ 처리구인 CFB4가 퇴비 처리구인 CFC에 비해 각각 24%와 28% 증가하였고 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 각각 43%와 48% 증가하였다. 그리고 상추의 최적 수량을 위한 바이오차의 적정 시용량은 200 kg 10a⁻¹로 나타났다. 바이오차를 처리한 CFB3와 CFB4는 토양의 pH가 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 각각 0.2와 0.3 증가되어 산성토양 개량효과가 있었으며 토양의 염류농도는 CFB1에 비해 CFB3 0.69 dS m⁻¹, CFB2 0.55 dS m⁻¹, CFB4 0.53 dS m⁻¹ 감소되어 적정 양분관리에 유용한 것으로 나타났다. 무기성분인 질소, 인산 등 총 흡수량은 바이오차 시용량이 많아질수록 CFB1에 비해 증가하는 경향이었으며 양분수지 측면에서 퇴비처리구인 CFC에 비해 효과적인 것으로 나타났다.

References

- Agegehu, G., A.M. Bass, P.N. Nelson, and M.I. Bird. 2016. Benefits of biochar, compost and biochar – compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.* 543:295-306.
- Ahmad, M., S.S. Lee, J.E. Yang, H.M. Ro, Y.H. Lee, and Y.S. Ok. 2012. Effects of soil dilution and amendments (mussel shell, cow bone, and biochar) on Pb availability and phytotoxicity in military shooting range soil. *Ecotox. Environ. Safe.* 79:225-231.
- Ahmad, M., S.S. Lee, S.E. Oh, D. Mohan, D.H. Moon, Y.H. Lee, and Y.S. Ok. 2013. Modeling adsorption kinetics of trichloroethylene onto biochars derived from soybean stover and peanut shell wastes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20:8364-8373.
- Ahmad, M., Y.S. Ok, A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, B.Y. Kim, J.H. Ahn, Y.H. Lee, M.I. Al-Wabel, S.E. Lee, and S.S. Lee. 2016. Lead and copper immobilization in a shooting range soil using soybean stover- and pine needle-derived biochars: Chemical, microbial and spectroscopic assessments. *J. Hazard. Mater.* 301:179-186.
- Akhtar, S.S., G. Li, M.N. Andersen, and F. Liu. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agr. Water Manage.* 138:37-44.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald, and N.A. Hips. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil.* 337:1-18.
- Bae, S. and E. Koh. 2011. Lead and zinc sorption on biochar of cabbage using hydrothermal carbonization. *J. Korean Soc. Environ. Anal.* 14(4):228-233.
- Beesley, L., E.M. Jiménez, and J.L.G. Eyles. 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ. Pollut.* 158:2282-2287.
- Blackwell, P., E. Krull, G. Butler, A. Herbert, and Z. Solaiman. 2010. Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in south-western Australia: An agronomic and economic perspective. *Aust. J. Soil*

- Res. 48(6):531-545.
- Blackwell, P., S. Joseph, P. Munroe, H.M. Anawar, P. Storer, R.J., Gilkes, and Z.M. Solaiman. 2015. Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonisation and nutrition of wheat and sorghum. *Pedosphere* 25:686-695.
- Cao, X.D., L.N. Ma, B. Cao, and W. Harris. 2009. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine. *Environ. Sci. Technol.* 43:3285-3291.
- Carter, S., S. Shackley, S. Sohi, T.B. Suy, and S. Haefele. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*. 3(2):404-418.
- Chen, J., S. Li, C. Liang, Q. Xu, Y. Li, H. Qin, and J.J. Fuhrmann. 2017. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate. *Sci. Total Environ.* 574:24-33.
- Choi, I.W., D.C. Seo, S.W. Kang, S.G. Lee, Y.J. Seo, B.J. Lim, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2013. Adsorption characteristics of heavy metals using sesame waste biochar. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(1):8-15.
- Gul, S., J.K. Whalen, B.W. Thomas, V. Sachdeva, and H. Deng. 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 206:46-49.
- Han, J.H., D.C. Seo, S.W. Kang, I.K. Choi, W.T. Jeon, U.G. Kang, S.J. Kang, J.S. Heo, S.D. Kim, and J.S. Cho. 2011. Evaluation of fertilizer value of biochars using water plants. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):794-800.
- Hartley, W., N.M. Dickinson, P. Riby, and N.W. Lepp. 2009. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with *Miscanthus*. *Environ. Pollut.* 157:2654-2662.
- Jaiswal, A.K., Y. Elad, I. Paudel, E.R. Graber, E. Cytryn, and O. Frenkel. 2017. Linking the belowground microbial composition, diversity and activity to soilborne disease suppression and growth promotion of tomato amended with biochar. *Sci. Rep.* 7:44382.
- Jones, D.L., J. Rousk, G. Edwards-Jones, T.H. DeLuca, and D.V. Murphy. 2011. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biol. Biochem.* 45:113-124.
- Jung, W.K. 2012. Rice yield response to biochar application under different water managements practices. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(1):16-19.
- Kaudal, B.B., D. Chen, D.B. Madhavan, A. Downie, and A. Weatherley. 2016. An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass Bioenerg.* 84:49-58.
- Kim, D., K. Cho, T. Won, I.T. Bak, and G. Yoo. 2014. Changes in crop yield and CH₄ emission from rice paddy soils applied with biochar and slow-release fertilizer. *Korean J. Environ. Biol.* 32(4):327-334.
- Kim, K.H., H.Y. Kim, T.S. Cho, and J.W. Choi. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technol.* 118:158-162.
- Kim, K.H., T.S. Kim, S.M. Lee, D.H. Choi, H.M. Yeo, I.G. Choi, and J.W. Choi. 2013. Comparison of physicochemical features of biooils and biochars produced from various woody biomasses by fast pyrolysis. *Renew. Energ.* 50:188-195.
- Laird, D.A., J.M. Novak, H.P. Collins, J.A. Ippolito, D.L. Karlen, R.D. Lentz, K.R. Sistani, K. Spokas, and R.S. Van Pelt. 2017. Multi-year and multi-location soil quality and crop biomass yield responses to hardwood fast pyrolysis biochar. *Geoderma*. 289:46-53.
- Lee, S.E., M. Ahmad, A.R.A. Usman, Y.M. Awad, S.H. Min, J.E. Yang, S.S. Lee, and Y.S. Ok. 2011. Effects of biochar on soil quality and heavy metal availability in a military shooting range soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1):66-77.
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday, and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biol. Biochem.* 43:1812-1836.

- Liang, F., G.T. Li, Q.M. Lin, and X.R. Zhao. 2014. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. *J. Integr. Agr.* 13(3):525-532.
- Liao, N., Q. Li, W. Zhang, G. Zhou, L. Ma, W. Min, J. Ye, and Z. Hou. 2016. Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil. *Eur. J. Soil Biol.* 72:27-34.
- Lim, J.E., H.W. Kim, S.H. Jeong, S.S. Lee, J.E. Yang, K.H. Kim, and Y.S. Ok. 2014. Characterization of burcucumber biochar and its potential as an adsorbent for veterinary antibiotics in water. *J. Appl. Biol. Chem.* 57(1):65-72.
- Lim, J.E., S.S. Lee, and Y.S. Ok. 2015. Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metals in contaminated soil. *J. Appl. Biol. Chem.* 58(1):39-50.
- Liu, Z., X. Chen, Y. Jing, Q. Li, J. Zhang, and Q. Huang. 2014. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena.* 123:45-51.
- Nguyen, B. and J. Lehmann. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Org. Geochem.* 40:846-853.
- Nguyen, B., J. Lehmann, W.C. Hockaday, S. Joseph, and C.A. Masiello. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environ. Sci. Technol.* 44:3324-3331.
- NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Methods of soil and plant analysis. Suwon, Korea.
- Nigussie, A., E. Kissi, M. Misganaw, and G. Ambaw. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 12(3):369-376.
- Novak, J.M., I.M. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, 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.
- Olmo, M., A.M. Lozano, V. Barrón, and R. Villar. 2016. Spatial heterogeneity of soil biochar content affects soil quality and wheat growth and yield. *Sci. Total Environ.* 562:690-700.
- Pandey, V., A. Patel, and D.D. Patra. 2016. Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Ecol. Eng.* 90:361-366.
- Park, J.H., S.H. Kim, J.H. Shin, H.C. Kim, and D.C. Seo. 2015. Competitive adsorption characteristics of copper and cadmium using biochar derived from *Phragmites communis*. *Korean J. Environ. Agric.* 34(1):21-29.
- Peng, C., 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 Till. Res.* 112:159-166.
- Prayogo, C., J.E. Jones, J. Baeyens, and G.D. Bending. 2014. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biol. Fertil. Soils.* 50:695-702.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Standard of analysis and survey for agricultural experiment. Suwon, Korea.
- SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.
- Seo, Y.H., S.W. Kim, S.C. Choi, I.J. Kim, K.H. Kim, and G.Y. Kim. 2012. Effects of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(4):540-543.
- Singla, A., H. Iwasa, and K. Inubushi. 2014. Effect of biogas digested slurry based-biochar and digested liquid on N₂O, CO₂ flux and crop yield for three continuous cropping cycles of komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*). *Biol. Fertil. Soils.* 50:1201-1209.
- Solaiman, Z.M., P. Blackwell, L.K. Abbott, and P. Storer. 2010. Direct and residual effect of biochar application on

- mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat. *Aust. J. Soil Res.* 48:546-554.
- Sorensen, R.B. and M.C. Lamb. 2016. Crop yield response to increasing biochar rates. *J. Crop Improvement.* 30(6):703-712.
- Spokas, K.A., J.M. Baker, and D.C. Reicosky. 2010. Ethylene: Potential key for biochar amendment impacts. *Plant Soil.* 333:443-452.
- Spokas, K.A., W.C. Koskinen, J.M. Baker, and D.C. Reicosky. 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere.* 77:574-581.
- Sun, J., F. He, H. Shao, Z. Zhang, and G. Xu. 2016. Effects of biochar application on *Suaeda salsa* growth and saline soil properties. *Environ. Earth Sci.* 75:630-635.
- Uchimiya, M., D.I. Bannon, L.H. Wartelle, I.M. Lima, and K.T. Klasson. 2012. Lead retention by broiler litter biochars in small arms range soil: Impact of pyrolysis temperature. *J. Agric. Food Chem.* 60:5035-5044.
- Uchimiya, M., I.M. Lima, K.T. Klasson, S.C. Chang, L.H. Wartelle, and J.E. Rodgers. 2010. Immobilization of heavy metal ions (CuII, CdII, NiII, and PbII) by broiler litter-derived biochars in water and soil. *J. Agric. Food Chem.* 58:5538-5544.
- Yao, C., S. Joseph, L. Li, G. Pan, Y. Lin, P. Munroe, B. Pace, S. Taherymoosavi, L. Van Zwieten, T. Thomas, S. Nielsen, J. Ye, and S. Donne. 2015. Developing more effective enhanced biochar fertilisers for improvement of pepper yield and quality. *Pedosphere.* 25(5):703-712.
- Yoo, G., Y. Son, S.H. Lee, Y. Yoo, and S.H. Lee. 2013. Greenhouse gas emissions from soils amended with biochar. *Korean J. Environ. Biol.* 31(4):471-477.
- Zhang, A., L. Cui, G. Pan, L. Li, Q. Hussain, X. Zhang, J. Zheng, and D. Crowley. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agr. Ecosyst. Environ.* 139(4):469-475.