Effect of Wood-derived Biochar Application on the Soil Microbial Community in Upland Field

Yun-Sook Yi, Dal-Yeon Choi, 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: February 5, 2020

Revised: February 19, 2020

Accepted: February 21, 2020

This study evaluated the effects of biochar from the pyrolysis pine on the soil microbial communities by fatty acid methyl ester (FAME) in upland field. The nutrient management for lettuce cultivation at silt loam soil was treated 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 pig manure compost 2 ton 10a⁻¹ with chemical fertilizer (CFC). Compared to the NF, the soil microbial biomass (total FAMES), Gram-negative bacteria biomass, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) biomass, and total glomalin concentration were significantly increased after biochar amendments treatment, while the microbial biomasses were not significant between CFB1 and biochar treatments. CFB3 and CFB4 had a significantly lower ratio of cy19:0 to 18:1 ω 7c when compared with that of CFC ($P < 0.05$), which indicates that a decrease in microbial stress was caused by organic matter soil inputs without competition from other microbes. Community of actinomycetes in CFC soil was significantly larger than those in biochar treatment soils ($P < 0.05$) indicating actinomycetes are potentially responsible for the microbial community differentiation between CFC and biochar treatments in upland field.

Keywords: Biochar, Soil microbial community, Actinomycetes, Upland field

Ratio of cy19:0 to 18:1ω7c of different biochar treated soils for lettuce cultivation.

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.

Introduction

도시농업은 도시지역의 다양한 생활공간을 활용하여 농작물을 경작 또는 재배하는 농업이다. 그리고 도시공동체 생태 복원으로 여가활용 뿐만 아니라 힐링, 치유 등으로 삶의 질을 높일 수 있어 최근 참여인구와 재배면적이 증가되고 있다. 우리나라는 도시농업의 활성화를 위해 2020년까지 주말농장 8,000개소 (3,000 ha), 유휴공간에 도심텃밭 7,200개소 (2,700 ha)를 조성하여 국민의 10%가 참여 할 수 있는 계획을 추진하고 있다 (Han and Chang, 2014). 그러나 도시농업에 사용되는 밭토양은 용적밀도가 높고, 낮은 유기물 함량과 양분, 미생물의 밀도와 활성이 낮으며 오염 물질로 인하여 적합하지 않은 경우가 많으며 유기물 공급으로 사용된 가축분 퇴비의 악취 등으로 사회적 문제를 야기하고 있어 이에 대한 개선이 시급하다. 실제 서울 및 수도권지역 도시텃밭 62개소에서 채취한 토양 130점을 대상으로 토양환경 평가를 실시한 결과 토양 pH가 가장 관리가 시급한 지표임을 확인할 수 있었고, 종합적인 토양환경 평가에서 상당수 도시텃밭의 토양이 작물재배에 미흡한 것으로 나타났다. 바이오차는 목재나 식물체 잔사를 산소가 거의 없는 상태에서 열분해하여 생산된다 (Kaudal et al., 2016). 바이오매스가 난분해성 탄소로 전환되어 토양에 탄소를 고정하며 미생물의 활성화 증대에 도움을 준다 (Han et al., 2011; Igalavithana et al., 2017; Yang et al., 2019). 토양에서 미생물 군집을 분석하는 방법은 미생물의 유전체 분석을 통한 파이로시퀀싱 기술 (Jones et al., 2009; Davinic et al., 2012)과 미생물의 세포벽 지방산 조성을 분석하는 지방산 메틸에스테르 (fatty acid methyl ester, FAME) 방법을 많이 사용하고 있다 (Lee and Kim, 2011; Lee and Yun, 2011; Yang et al., 2012). 바이오차 사용에 따른 토양의 미생물 군집의 변화와 미생물의 개체수가 증가된다는 보고가 있으며 (Anders et al., 2013; Liao et al., 2016), 특히 혐기성이며 섬유소 가수분해 세균의 군집이 증가하는 것으로 알려져 있다 (Kumar et al., 1987). 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 이러한 관점에서 밭토양에서 장기간 유기물 공급효과를 가진 바이오차를 상추재배지에 사용하고 토양 미생물 군집에 미치는 영향을 검토하였다.

Materials and Methods

재배 및 토양 조건 본 시험은 이현미사질양토 (Ihyeon series, Coarse silty, mixed, mesic family of Dystric Fluventic Eutrochrepts)에서 적축면 상추를 정식하여 바이오차 사용효과를 검토하였다. 처리내용은 무처리 (NF), 토양 검정시비 (CFC, N 14.3, P₂O₅ 15.7, K₂O 12.1 kg 10a⁻¹ + 돈분퇴비 440 kg 10a⁻¹), 그리고 무기질비료를 처리한 후 바이오차를 10a당 0 kg (CFB1), 60 kg (CFB2), 120 kg (CFB3), 240 kg (CFB4)을 처리하여 난괴법 3반복으로 수행하였다. 상추 재식거리는 20 × 20 cm 수준으로 2016년 6월 19일에 정식하고 2016년 7월 13일에 수확하였다. 시험에 사용된 토양의 화학성은 pH는 7.1, EC 1.09 dS m⁻¹, 유기물 15 g kg⁻¹, 유효인산 175 mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.7 cmol_c kg⁻¹, 치환성 칼슘 9.7 cmol_c kg⁻¹, 치환성 마그네슘 2.7 cmol_c kg⁻¹, 질산태 질소 함량 56 mg kg⁻¹이었다 (Table 1). 시험에 사용된 바이오차는 목재를 분쇄하여 300°C에서 1시간 탄화시킨 것을 사용하였으며 유기물 60.2%, 수분 17.0%, 질소 0.85%, 인산 0.03%, 칼리 0.11%의 수준이었으며 Table 2와 같이 돈분퇴비에 비해 유기물 함량은 1.8배 높은 반면 수분함량과 양분가치는 낮았다.

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

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
7.1	1.09	15	175	0.70	9.7	2.7	56

Table 2. Agronomic properties of biochar and compost used in the experiment.

Fertilizer	OM	Moisture	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			%		
Compost	34.2	34.4	1.21	1.56	1.14
Biochar	60.2	17.0	0.85	0.03	0.11

토양 미생물 군집 분석 발토양 미생물 군집은 습토를 사용하여 Schutter와 Dick (2000)의 방법에 준하여 fatty acid methyl ester (FAME) 방법을 이용하였다. 미생물의 함량과 군집 분석은 GC Agilent 6890N (Agilent Technologies, USA)과 HP-ULTRA 2 capillary column (25 m × 0.2 mm × 0.33 μm film thickness, Agilent Technologies, USA)을 사용하고 Internal standard 19:0을 이용하여 상대적인 함량과 비율을 계산하였다 (Hamel et al., 2006; Lee and Kim, 2011; Lee and Yun, 2011). 총 세균은 지방산 조성 i15:0, a15:0, 15:0, i16:0, 16:1 ω9, 16:1 ω7, i17:0, a17:0, 17:0, cy17:0, 18:1 ω7c와 cy19:0 (i, iso-branched FAMES; a, anteiso-branched FAMES; cy, cyclopropane groups; ω, aliphatic; c, cis-conformation)을 합산하여 분석하였다 (Macalady et al., 1998; Schutter and Dick, 2000). 그람음성 세균은 지방산 16:1 ω7c, 18:1 ω7c, cy17:0 및 cy19:0을 합산하였고, 그람양성 세균은 지방산 i15:0, a15:0, i16:0, i17:0 및 a17:0을 합산하여 구하였다 (Zelles, 1997). 방선균은 지방산 10Me18:0 (Me, methyl group)을 사용하였고 (Schutter and Dick, 2000), 곰팡이는 지방산 18:1 ω9c와 18:2 ω6c를 사용하였다 (Bradley et al., 2006). 지방산 16:1 ω5c는 내생균근균의 biomarker로 이용하였다 (Frostegård et al., 1993; Olsson et al., 1998). 그리고 cy19:0과 18:1 ω7c의 비율은 토양환경에 대한 활성 지표로 사용하였다 (Grogan and Cronan, 1997; Guckert et al., 1986).

글로말린 분석 글로말린 함량 분석을 위해 채취한 토양은 -20°C에 2일간 보관한 후 동결건조하고 2 mm 체를 통과시킨 토양을 100 mM (pH 9.0) sodium pyrophosphate 추출법을 사용하여 분석하였다 (Wright and Upadhyaya, 1998). 토양 2.0 g에 100 mM sodium pyrophosphate (pH 9.0) 8 mL를 첨가하여 121°C에서 1시간 가압으로 추출한 후 5,000 × g에서 10분간 원심분리하여 상침액을 채취하고 Bradford dye-binding assay 방법으로 비색계 (UV-1650PC, Shimadzu Co., Kyoto, Japan)를 사용하여 분석하였다.

통계분석 조사된 토양 미생물 특성과 글로말린 함량은 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하여 Duncan's multiple range test를 수행하였으며 미생물 군집은 주성분 분석을 통하여 처리간의 특성을 분석하였다.

Results and Discussion

토양 미생물 바이오매스 수확기 토양의 미생물 바이오매스량을 분석한 결과는 Table 3과 같다. 토양의 미생물 체량을 나타내는 총 FAME 함량은 CFB2 처리구가 164.5 nmol g⁻¹로서 NF 처리구 143.6 nmol g⁻¹, 화학비료 처리구

Table 3. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass in upland field.

Treatment [†]	FAMEs [‡]	TB	G (-)	G (+)	Act	F	AMF
	----- nmol g ⁻¹ -----						
NF	143.6c [§]	45.5a	19.5b	22.3a	2.3b	23.1a	3.94bc
CFC	156.9ab	46.8a	20.0ab	22.7a	3.0a	22.8a	4.13ab
CFB1	152.3bc	46.1a	21.1a	21.2a	2.2b	24.9a	3.71c
CFB2	164.5a	46.9a	21.2a	22.3a	2.2b	24.1a	4.19ab
CFB3	161.6ab	47.4a	21.2a	22.0a	2.2b	21.7a	4.54a
CFB4	159.8ab	46.3a	20.9a	21.6a	2.3b	22.0a	4.28ab

[†]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.

[‡]FAME, Fatty acid methyl ester; TB, Total bacteria; G (-), Gram negative bacteria; G (+), Gram positive bacteria; Act, Actinomycetes; F, Fungi; AMF, Arbuscular mycorrhizal fungi.

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

인 CFB1 152.3 nmol g⁻¹ 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 그람 음성 세균 바이오매스량은 화학비료 처리구인 CFB1이 21.1 nmol g⁻¹이고 바이오차 처리구 CFB4가 20.9 nmol g⁻¹, CFB3와 CFB2가 21.2 nmol g⁻¹로 무처리인 NF의 19.5 nmol g⁻¹ 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 특히 바이오차 처리구는 내생균근균 바이오매스량이 4.19에서 4.54 nmol g⁻¹으로 NF 처리구 3.94 nmol g⁻¹, CFB1 처리구 3.71 nmol g⁻¹ 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 토양의 방선균 바이오매스량은 퇴비를 처리한 CFC가 3.0 nmol g⁻¹으로 다른 처리구에 비해 유의적으로 높은 것으로 나타났다 ($P < 0.05$). 반면에 총 세균과 그람 양성 세균 및 곰팡이의 바이오매스량은 처리간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

도시농업 토양의 환경을 이해하기 위해서는 토양 미생물 활성화와 군집의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다 (Bossio et al., 1998; Buyer et al., 2010). 특히 미생물 군집의 구성과 활성화는 토양의 이화학적 특성에 영향을 받는다. 바이오차 시용은 토양의 pH, 수분함량, 공극 등 토양 특성을 개선하기 때문에 장기적인 효과를 기대할 수 있다 (Gul et al., 2015; Hernandez-Soriano et al., 2016). 본 연구에서 바이오차 처리와 퇴비 처리구의 총 미생물 바이오매스량이 무처리인 NF와 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 많은 것은 Igalavithana et al. (2017)이 보고한 바와 같이 미생물의 먹이인 탄소의 공급과 토양의 공극이 증가됨으로 호기성 세균들의 활성이 증대된 것으로 판단되었다. 실제 Gomez et al. (2014)도 바이오차 시용량과 미생물 바이오매스는 정의상관을 나타낸다고 하였다.

토양 미생물 군집 토양 미생물의 함량을 총 FAME 함량으로 나누어 미생물 군집을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 그람 양성 세균 군집은 NF 처리구가 15.5%로서 CFB1 처리구 13.9%, 바이오차 처리구인 CFB3가 13.6%, CFB2와 CFB4 13.5% 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 특히 CFC 처리구의 방선균 군집은 1.9%로서 바이오차 처리구인 CFB2 1.3%, CFB3와 CFB4 1.4% 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 반면에 곰팡이 군집은 CFB1 처리구가 16.4%, NF 처리구가 16.1%로서 CFB3 처리구 13.4%와 CFB4 처리구 13.8% 보다 많은 것으로 나타났다 ($P < 0.05$). 그리고 내생균근균 군집은 CFB3 처리구가 CFB1 처리구 2.4%와 CFB2 처리구 2.5% 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$).

Table 4. Effect of biochar amendment on soil microbial community in upland field.

Treatment [†]	TB [‡]	G (-)	G (+)	Act	F	AMF
----- % -----						
NF	31.7a [§]	13.6a	15.5a	1.6ab	16.1ab	2.7ab
CFC	29.9a	12.7a	14.5ab	1.9a	14.6abc	2.6abc
CFB1	30.3a	13.9a	13.9b	1.5ab	16.4a	2.4c
CFB2	28.5a	12.9a	13.5b	1.3b	14.6abc	2.5bc
CFB3	29.4a	13.1a	13.6b	1.4b	13.4bc	2.8a
CFB4	29.0a	13.1a	13.5b	1.4b	13.8c	2.7ab

[†]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.

[‡]TB, Total bacteria; G (-), Gram negative bacteria; G (+), Gram positive bacteria; Act, Actinomycetes; F, Fungi; AMF, Arbuscular mycorrhizal fungi.

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

바이오차 처리량에 따른 수확기 토양의 미생물 군집을 주성분으로 분석한 결과는 Fig. 1과 같다. 주성분 분석결과 제1주성분이 50.4%, 제2주성분이 21.8%로서 전체 72.2%의 자료를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 제1주성분은 총 세균 군집이 0.564로 가장 크게 기여하였고, 그람 양성 세균 군집 0.496, 그람 음성 세균 군집 0.468 순으로 정의기여를 하였다. 그리고 제2주성분은 방선균이 0.648로 가장 크게 기여하였고 곰팡이는 -0.460으로 부의기여, 내생균근균은 0.443으로 정의기여를 하였다. 주성분 분석결과 PC1은 세균 군집과 관련된 항목이었고 PC2는 포자를 형성하는 균으로 설명할 수 있었다. 특히 PC1에서 CFB2 처리구와 NF 처리구는 유의적인 차이를 나타냈으며 PC2에서는 CFC 처리구는 CFB2 처리구와 CFB1 처리구도 유의적인 차이를 보였다 ($P < 0.05$).

Fig. 1. Principal component analyses between microbial communities of different biochar treated soils for lettuce cultivation. The variance explained by each principal component (PC) axis is shown in parentheses. PC analysis shows loading values for the individual microbial biomarkers. 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 by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's multiple range test. Bars represent one standard deviation of the mean.

글로말린 함량 및 활성지표 내생균근균과 밀접한 관련이 있는 토양의 글로말린 함량은 Fig. 2와 같이 CFB3 처리구가 $1,341 \mu\text{g g}^{-1}$, CFB4 처리구가 $1,332 \mu\text{g g}^{-1}$ 으로 화학비료 처리구인 CFB1 $1,282 \mu\text{g g}^{-1}$ 보다 유의적으로 많았다 ($P < 0.05$). 일반적으로 내생균근균이 분비하는 당단백질인 글로말린은 토양을 입단화 하는 물질로서 물에 용해되지 않고 내생균근균의 군사가 소멸되어도 토양에 오랫동안 존재하여 탄소와 질소를 저장하여 온실가스를 감축하는 역할을 한다 (Wright and Upadhyaya, 1998; Rilling et al., 2005; Gillespie et al., 2011). 그리고 Wright et al. (2007)은 글로말린 함량이 토양 유기물 함량의 6 - 9%를 차지하고 있다고 하였으며 본 연구에서도 글로말린 함량은 토양 유기물 함량의 8.1 - 9.2%로서 평균 8.6%를 나타냈다. 특히 바이오차 처리구인 CFB3와 CFB4는 토양의 내생균근균 바이오매스량과 군집비율 및 글로말린 함량이 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 유의적으로 많아 토양 탄소 고정력이 높을 것으로 예상되며 기후변화에 대응할 수 있는 유기물 공급자재로 기대되었다.

토양 환경에 대한 미생물의 활성 지표로 사용되는 cy19:0과 18:1 $\omega 7c$ 비율은 Fig. 3과 같다. 토양의 cy19:0과 18:1 $\omega 7c$ 비율은 NF와 CFB4 처리구는 0.50, CFB3 처리구는 0.51로서 CFC 처리구 0.57, CFB1 처리구 0.54, CFB2 처리

Fig. 2. Effect of biochar amendment on glomalin concentration in a upland soil. 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 significance level $\alpha=0.05$ according to Duncan's multiple range test.

Fig. 3. Ratio of cy19:0 to 18:1 $\omega 7c$ of different biochar treated soils for lettuce cultivation. 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 significance level $\alpha=0.05$ according to Duncan's multiple range test.

구 0.53 보다 유의적으로 낮았다 ($P < 0.05$). 일반적으로 cy19:0과 18:1 ω 7c 비율이 낮을수록 미생물의 활성은 증가된다 (Mechri et al., 2010). 이러한 원인은 영양원 불균형, 산성 토양, 토양의 수분 부족 등의 다양한 요인에 따라 cyclopropyl 지방산이 집적되어 미생물의 활성이 감소되는 것으로 알려져 있다 (Guckert et al., 1986; Grogan and Cronan, 1997). 이러한 결과로 볼 때 바이오차는 퇴비 처리구인 CFC 보다 토양 미생물의 활성을 높이고 미생물 생태계에 유리한 작용을 하는 것으로 판단되었다. 따라서 바이오차는 도시농업을 추진함에 있어 토양 환경 및 생태계를 관리할 수 있는 매우 유용한 유기물원이며 향후 장기적인 사용효과와 토양 물리성 개량 및 온실가스 저감을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conclusions

밭토양에서 목재 유래 바이오차를 상추재배에 사용할 경우 토양 미생물 군집 변화를 검토하였다. 바이오차 사용으로 토양 미생물 바이오매스량은 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 5 - 8% 증가하였다. 그리고 CFB3와 CFB4 처리구의 내생균균 바이오매스량 및 군집비율과 글로말린 함량이 화학비료 처리구인 CFB1에 비해 많은 것으로 나타나 토양의 탄소고정과 양분공급 측면에서 활용 가능성이 기대되었다. 특히 미생물 스트레스 지표인 cy19:0과 18:1 ω 7c 비율은 CFB3와 CFB4 처리구가 퇴비 처리구인 CFC 보다 낮아 토양 미생물 생태계 유지에 유익한 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 새로운 토양개량제로 바이오차의 사용효과를 확인하였으며 도시농업 현장에서 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

References

- Anders, E., A. Watzinger, F. Rempt, B. Kitzler, B. Wimmer, F. Zehetner, K. Stahr, S. Zechmeister-Boltenstern, and G. Soja. 2013. Biochar affects the structure rather than the total biomass of microbial communities in temperate soils. *Agr. Food Sci.* 22:404-423.
- Bossio, D.A., K.M. Scow, N. Gunapala, and K.J. Graham. 1998. Determinants of soil microbial communities: Effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipid fatty acid profiles. *Microb. Ecol.* 36:1-12.
- Bradley, K., A. Rhae, R.A. Drijber, and J. Knopsc. 2006. Increased N availability in grassland soils modifies their microbial communities and decreases the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 38:1583-1595.
- Buyer, J.S., J.R. Teasdale, D.P. Roberts, I.A. Zasada, and J.E. Maul. 2010. Factors affecting soil microbial community structure in tomato cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 42:831-841.
- Davinic, M., L.J. Fultz, V. Acosta-Martinez, F.J. Calderón, S.B. Cox, S.E. Dowd, V.G. Allen, J.C. Zak, and J. Moore-Kucera. 2012. Pyrosequencing and mid-infrared spectroscopy reveal distinct aggregate stratification of soil bacterial communities and organic matter composition. *Soil Biol. Biochem.* 46:63-72.
- Frostegård, Å., A. Tunlid, and E. Bååth. 1993. Phospholipid fatty acid composition, biomass and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals. *Appl. Environ. Microbiol.* 59:3605-3617.
- Gillespie, A.W., R.E. Farrell, F.L. Walley, A.R.S. Ross, P. Leinweber, K. Eckhardt, T.Z. Regier, and R.I.R. Blyth. 2011. Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials. *Soil Biol. Biochem.* 43:766-777.
- Gomez, J.D., K. Denef, C.E. Stewart, J. Zheng, and M.F. Cotrufo. 2014. Biochar addition rate influences soil

- microbial abundance and activity in temperate soils. *Eur. J. Soil Sci.* 65:28-39.
- Grogan, D.W. and J.E. Cronan. 1997. Cyclopropane ring formation in membrane lipids of bacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61:429-441.
- Guckert, J.B., M.A. Hood, and D.C. White. 1986. Phospholipid ester-linked fatty acid profile changes during nutrient deprivation of *Vibrio cholerae*: increases in the trans/cis ratio and proportions of cyclopropyl fatty acid. *Appl. Environ. Microbiol.* 52:794-801.
- 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.
- Hamel, C., K. Hanson, F. Selles, A.F. Cruz, R. Lemke, B. McConkey, and R. Zentner. 2006. Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie. *Soil Biol. Biochem.* 38:2104-2116.
- Han, J. H. and Chang, D. M. 2014. A study on the sustainable development direction through theory, paradigm and typology of urban agriculture. *J. Urban Design Institute of Korea.* 15(6):33-46.
- 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.
- Hernandez-Soriano, M.C., B. Kerré, P. Goos, B. Hardy, J. Dufey, and E. Smolders. 2016. Long-term effect of biochar on the stabilization of recent carbon: Soils with historical inputs of charcoal. *GCB Bioenergy.* 8(2):371-381.
- Igalavithana, A.D., S.E. Lee, Y.H. Lee, D.C.W. Tsang, J. Rinklebe, E.E. Kwon, and Y.S. Ok. 2017a. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils. *Chemosphere.* 161:593-603.
- Jones, R.T., M.S. Robeson, C.L. Lauber, M. Hamady, R. Knight, and N. Fierer. 2009. A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses. *ISME J.* 3:442-453.
- 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.
- Kumar, S., M.C. Jain, and P.K. Chhonkar. 1987. A note on the stimulation of biogas production from cattle dung by addition of charcoal. *Biol. Wastes.* 20:1209-1215.
- Lee, Y.H. and H. Kim. 2011. Response of soil microbial communities to different farming systems for upland soybean cultivation. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(3):423-433.
- Lee, Y.H. and H.D. Yun. 2011. Changes in microbial community of agricultural soils subjected to organic farming system in Korean paddy fields with no-till management. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(3):434-441.
- 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.
- Macalady, J.L., M.E. Fuller, and K.M. Scow. 1998. Effects of metam sodium fumigation on soil microbial activity and community structure. *J. Environ. Qual.* 27:54-63.
- Mechri, B., H. Chehab, F. Attia, F.B. Mariem, M. Braham, and M. Hammami. 2010. Olive mill wastewater effects on the microbial communities as studied in the field of olive trees by analysis of fatty acid signatures. *Eur. J. Soil Bio.* 146:312-318.
- Olsson, P.A., R. Francis, D.J. Read, and B. Söderström. 1998. Growth of arbuscular mycorrhizal mycelium in calcareous dune sand and its interaction with other soil micro-organisms as estimated by measurement of specific fatty acids. *Plant Soil.* 201:9-16.
- Rilling, M.C., E.R. Lutgen, P.W. Ramsey, J.N. Klironomos, and J.E. Gannon. 2005. Microbiota accompanying different arbuscular mycorrhizal fungal isolates influence soil aggregation. *Pedobiologia.* 49:251-259.
- SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.
- Schutter, M.E. and R.P. Dick. 2000. Comparison of fatty acid methyl ester (FAME) methods for characterizing

- microbial communities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1659-1668.
- Wright, S.F. and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*. 198:97-107.
- Wright, S.F., V.S. Green, and M.A. Cavigelli. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil Till. Res.* 94:546-549.
- Yang, S.K., M.K. Kim, Y.W. Seo, K.J. Choi, S.T. Lee, Y.S. Kwak, and Y.H. Lee. 2012. Soil microbial community analysis of between no-till and tillage in a controlled horticultural field. *World J. Microb. Biot.* 28:1797-1801.
- Yang, X., A. Tsibart, H. Nam, J. Hur, A. El-Naggar, F.M.G. Tack, C.H. Wang, Y.H. Lee, D.C.W. Tsang, Y.S. Ok. 2019. Effect of gasification biochar application on soil quality: Trace metal behavior, microbial community, and soil dissolved organic matter. *J. Hazard. Mater.* 365:684-694.
- Zelles, L. 1997. Phospholipid fatty acid profiles in selected members of soil microbial communities. *Chemosphere*. 35:275-294.