

PLANT & FOREST

Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes

Jae-Han Lee¹, Deogratus Luyima¹, Ji-Young Ahn¹, Seong-Yong Park¹, Bong-Su Choi², Taek-Keun Oh^{1*}, Chang-Hoon Lee^{3*}

¹Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, Korea

³Department of Fruit Tree, National College of Agriculture and Fisheries, JeonJu 54874, Korea

*Corresponding authors: ok5382@cnu.ac.kr, chlee915@korea.kr

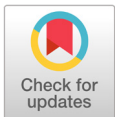
Abstract

Biochar is a solid carbon material made by pyrolyzing a biomass under limited oxygen conditions. Biochar has been reported to confer various benefits, such as increased soil productivity, pollutant absorption, and reduced greenhouse gas. In this study, oak pyrolyzed at 600°C for 3 hours was either powdered or pelleted. Each of the biochar types was added to the soil at a rate of 2%. The control did not receive any biochar while a combination of the biochar and NPK treatment (biochar 2% + NPK) was also included. The cherry tomatoes were grown in greenhouse pots for 50 days to compare the growth characteristics of the different treatments. The cherry tomato with the powdered biochar 2% + NPK treatment had the heaviest plant fresh shoot weight of 276.4 g and the highest chlorophyll content of 59.3 SPAD. The control had the lightest plant fresh shoot weight of 44.2 g and a chlorophyll content of 26.5 SPAD. Both forms of biochar affected the chemical properties of the soil, increased the pH, electrical conductivity, available phosphate, total carbon and total nitrogen and positively influenced the cherry tomato growth and productivity. From the above results, therefore, both biochar forms are suited for use as soil amendments.

Keywords: bead form, biochar, cherry tomato, pellet form

Introduction

바이오차는 산소가 제한된 조건에서 바이오매스를 열분해하여 얻을 수 있는 탄소 함량이 높은 물질이다(Sohi, 2012). 바이오매스의 열분해 온도가 높아짐에 따라 바이오차의 회수율은 감소하고 탄소함량은 증가한다(Tanaka, 1963). 바이오차는 농업부산물, 축산부산물, 해양부산물, 하수슬러지 등 다양한 부산물들을 이용한 생산이 가능하여, 원료확보를 경제적으로 할 수 있는 장점이 있다(Cao and Harris, 2010; Bird et al., 2011; Ahmad et al., 2012; Cantrell et al, 2012; Kim et al., 2013). 열분해 과정 중 바이오매스 내 탄소는 안정된 탄소로 변화되어, 바이오차의 토양 처리 시 탄소저장과 온실가스 발생을 억제효과를 가진다(Lehmann, 2007; Kim et al., 2014; Lim et al., 2014; Choi et al., 2017).



OPEN ACCESS

Citation: Lee JH, Luyima D, Ahn JY, Park SY, Choi BS, Oh TK, Lee CH. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. Korean Journal of Agricultural Science 46:931-939. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190075>

Received: September 04, 2019

Revised: October 23, 2019

Accepted: October 30, 2019

Copyright: © 2019 Korean Journal of Agricultural Science



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

바이오차는 대부분 알칼리성으로 산성 토양에 처리 시 토양의 pH를 높여 토양 개량 효과를 가지고 있으며, 토양의 생산성 향상 및 중금속 흡착 등의 효과가 있다(Choi et al., 2016). 또한, 최근에는 묘목용 상토에 바이오차를 혼합하는 연구도 진행되고 있다(Seo et al., 2019). Choi (2003)은 폐활성탄을 10 - 30% 첨가하여 재배한 시호(*Bupleurum falcatum*)의 경장과 경태가 크고 분얼수가 많아 생육이 양호하다고 보고 하였으며, Lee and Kim (2001)은 목탄의 토양 처리가 서양측백나무의 생육에 긍정적인 영향을 관찰하였다. Zhang et al. (2010)은 바이오차와 질소 비료를 함께 처리 시 옥수수의 수확량이 증가하는 경향을 보였으며, 수확량의 증가율은 바이오차의 원료에 따라 달랐다고 보고하였다. 하지만, Lee et al. (2018a)에 따르면 bead제형의 바이오차 2% 처리가 작물의 생육에 긍정적인 영향을 주지만, 5% 처리는 작물에 부정적인 영향을 준다고 보고하여 바이오차를 적용한 작물 생산성에 대한 많은 연구가 필요하다.

토마토(*Solanum lycopersicum* L.)는 가지과(Solanaceae)에 속하는 일년생 과채류로 국내뿐만 아니라 전세계적으로 생산량 및 소비량이 많아 작물 시장에서 높은 경제적 가치를 가진다(Park et al., 2018). 토마토는 국내에서 1960년대부터 케찰과 같은 토마토 가공식품 식품 소비가 증가하면서 전국적으로 재배하게 되었으며, 방울토마토는 1980년대에 처음 재배되기 시작하였다(Lee, 2004; Kim and Cho, 2009). 2017년 기준 국내 토마토 생산량은 355,107 ton으로 국내 과채류 생산량 중 수박 다음으로 많은 양을 차지하며, 이중 방울토마토의 생산량은 약 32.3%를 차지하는 114,977 ton 이었다(KOSTAT, 2017). 본 연구는 참나무를 이용하여 제조한 제형별 바이오차 함량에 따른 방울토마토의 생육과 토양의 화학성에 미치는 영향을 비교하는 실험을 진행하였다.

Materials and Methods

공시 토양 및 바이오차

공시 토양은 (주)참그로(Hongseong, Korea)에서 구매한 토양을 2주간 풍건한 후 2 mm 체거름하여 재배실험에 사용하였다. 바이오차는 참나무를 600°C에서 3시간 동안 열분해 후 powder와 pellet제형으로 성형하였다. Powder제형은 바이오차와 가축분퇴비를 2 : 8 (v/v)로 혼합하여 제조하였으며, pellet제형은 바이오차, 커피박, 아주까리박 그리고 미강을 각각 3 : 1 : 5 : 1 (v/v)의 비율로 혼합 후 pellet 제조기(Sps 200 model, Gungang engineering, Korea)를 이용하여 성형하였다(Table 1). 실험 전 토양 및 바이오차에 대한 특성은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

작물 재배 실험

본 실험은 충남대학교 농업생명과학대학 내 설치된 유리온실에서 수행되었다. 작물은 방울토마토(Wonhong 5ho, Danong Co., Ltd., Korea)를 선발하였으며, 파종 후 60일차 모종을 pot (1/2,000 wagner pot)에 정식하여 50일간 재배하였다.

바이오차는 토양 무게 기준으로 투입하였다. 무처리(Control)와 무기질비료(NPK)처리를 대조구, 제형별 바이오차 2% (Powder biochar 2%, Po; Pellet biochar 2%, Pe)와 바이오차 2% + 무기질비료(power biochar 2% + NPK, Po + N; pellet biochar 2% + NPK, Pe + N)로 구분하여 처리하였다. 각 처리구별 3반복 실험하였으며, 온실 내 pot는 난괴법으로 배치하였다.

재배는 농촌진흥청의 영농기술재배 방법에 따라 수행하였으며, 무기질비료는 농촌진흥청 ‘작물별 시비처방기준’(NAAS, 2010)에 따라 N-P₂O₅-K₂O를 22.6-10.6-11.9 kg 10a⁻¹로 시비하였다. 정식 후 매 1일 1회 관수하여 수분을 공급하였다.

Table 1. Chemical properties of soil used for this experiment.

Unit: % (v/v)

Biochar	Oak biochar	Livestock manure	Coffee sludge	Castor pomace	Rice bran
Powder	20	80	-	-	-
Pellet	30	-	10	50	10

Table 2. Chemical properties of soil used for this experiment.

Sample	pH (1 : 5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Elemental content (g kg ⁻¹)		OM (g kg ⁻¹)	C/N ratio	Ex. Cations (cmol _c kg ⁻¹)		
				C	N			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Soil	6.4 ± 0.0	0.16 ± 0.01	12.3 ± 1.04	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.0	1.1	1.15	0.18 ± 0.02	6.6 ± 0.3	11.0 ± 0.5

EC, electrical conductivity; Avail. P₂O₅, available phosphorus; C, carbon; N, nitrogen; OM, organic matter; Ex. cations, exchangeable cation.

Table 3. Chemical properties of biochar used for this experiment.

Biochar	pH (1 : 10)	EC (ds m ⁻¹)	T-P (mg kg ⁻¹)	Elemental content(%)		OM(%)	C/N ratio	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
				C	N					
Powder	7.2 ± 0.0	32.1 ± 2.4	190.0 ± 7.0	39.2 ± 5.0	2.7 ± 0.1	67.5	14.5	0.16 ± 0.00	0.35 ± 0.05	0.11 ± 0.00
Pellet	7.4 ± 0.0	11.4 ± 0.4	90.0 ± 5.0	50.4 ± 0.9	5.2 ± 0.3	86.8	9.6	0.28 ± 0.04	0.65 ± 0.22	0.29 ± 0.01

Values represent by means ± SD.

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

작물 생육 및 품질 조사

농촌진흥청이 발간한 ‘농업 과학기술 연구조사분석기준’(NAAS, 2012)에 의거하여 조사하였으며, 작물 생육조사 항목으로 초장, 지상부 생중량, 열매 수와 무게, 열매 직경과 길이, 엽록소 함량을 조사하였다. 초장은 지상부 하단에서 줄기 끝의 길이로 하였으며, 지상부 생중량은 오차를 줄이기 위해 수확 후 바로 측정하였다. 열매의 직경과 길이는 개체 내 상위 5개의 열매의 평균값으로 하였다. 엽록소 함량은 오전 10 - 12시 사이에 MINOLTA Chlorophyll meter (SPAD-501, Japan)를 이용하여 중위엽을 대상으로 3반복 측정하였다. 품질조사는 열매를 착즙하여 디지털 당도계 (HI 96801, Hanna Instruments Inc., Woon-socket, RI, USA)로 당도(Brix)를 측정하였다.

토양 및 바이오차 분석

토양

토양은 pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC), 유효인산, 총탄소 및 질소, 치환성양이온(K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)을 분석하였다. pH와 EC는 토양과 증류수를 1 : 5 방법으로 pH와 EC meter (ORION versastar pro, Thermo, USA)로 측정하였다. 유효인산은 Lancaster법을 활용하였으며, 총 탄소와 질소는 Elemental analyzer (Flash 1112 series EA, Thermo, USA)로 측정하였다. 치환성 양이온은 pH 7.0으로 교정한 1N-ammonium acetate용액으로 침출 후 유도결합플라즈마 분광계 (ICAP 7000series ICP spectrometer, Thermo, USA)를 이용해 측정하였다.

바이오차

바이오차는 pH, EC, 총 인산, 총 탄소 및 질소, 양이온을 분석하였다. pH와 EC는 바이오차와 증류수를 1:10 방법으로 pH와 EC meter (ORION versastar pro, Thermo, USA)로 측정하였다. 총 탄소와 질소는 Elemental analyzer (Flash 1112 series EA, Thermo, USA)로 측정하였다. 총 인산과 양이온(K₂O, CaO, MgO)은 Nitric acid와 Ternary용액을 이용한 분해

후 분해액을 각각 Vanadate법과 유도결합플라즈마 분광계(ICAP 7000series ICP spectrometer, Thermo, USA)로 측정하였다.

통계분석

통계분석은 SPSS (IBM SPSS Statistics version 24, IBM, NY, USA)의 일원배치분산분석(ONE way analysis of variance, ANOVA)을 통해 처리구별 95%의 신뢰수준에서 유의차 검정을 수행하였다. 사후검정은 Duncan을 이용하여 초장, 지상부 생중량, 열매 수와 무게, 열매 직경과 길이, 엽록소 함량, 당도를 분석하여 유의차에 따라 알파벳으로 표기하였다.

Result and Discussion

방울토마토 생육 및 품질 특성

작물 생육특성

방울토마토의 생육 조사 결과는 Table 4에 나타내었다. 방울 토마토의 작물 생육은 바이오차 처리구(Po, Pe, Po + N, Pe + N)가 대조구(Control, NPK)에 비해 높게 나타났다. 초장은 Pe가 115.3 cm로 가장 높았으며, 무처리구가 64.0 cm로 가장 낮았다. 바이오차 처리구는 무처리구에 비해 평균 약 42%, NPK처리구에 비해 평균 약 4.4%의 높은 초장을 보였다.

지상부 생중량은 Po + N이 276.4 g으로 가장 높았으며, 무처리구가 44.2 g으로 가장 낮았다. 바이오차 처리구는 무처리구에 비해 평균 약 79%, NPK처리구에 비해 약 33.8% 높은 지상부 생중량을 보였다. Lee et al. (2018b)은 바이오차를 처리한 고추의 생육이 무처리구에 비해 초장, 생중량 등에서 좋은 생육을 보인다고 보고하였다. 본 연구에서도 바이오차 처리구가 무처리구와 NPK처리구에 비해 좋은 생육을 보이는 일치하는 결과를 보였다.

토마토 잎의 엽록소 측정치는 엽면적 당 질소 흡수량과 유의성 있는 정의 상관관계를 보여 식물체의 질소 영양진단의 지표로 활용인 가능하다(Hong et al., 2001). Po + N이 59.3 SPAD로 가장 높은 엽록소 함량을 보였으며, 무처리구가 26.5 SPAD로 가장 낮았다. 바이오차 단독 처리구(Po, Pe)에 비해 NPK 추가 처리구(Po + N, Pe + N)에서 엽록소 함량이 높아지는 경향을 보였으며, 이는 질소비료 시비로 인하여 질소 흡수율이 높아져 엽록소 함량이 높아진 것으로 판단된다.

열매 생육 특성

열매 수와 무게는 바이오차 단독 처리구에 비해 NPK 추가 처리구에서 증가하는 경향을 보였다. Po + N이 각각 49.3 per plant, 276.4 g으로 가장 높았으며, 무처리구가 각각 11.6 per plant, 36.8 g으로 가장 낮았다. 열매 수의 NPK추가에 따른 증가율은 Po + N이 약 44%, Pe + N이 약 32% 증가하였으며, 열매 무게는 Po + N이 약 69%, Pe + N이 약 18% 증가하였다.

열매의 당도 분석 결과, Pe처리구에서 5.6 Brix로 가장 높았으며, Pe + N처리구에서 4.0 Brix로 가장 낮았다. 바이오차 단독처리구가 NPK 추가 처리구에 비해 높은 당도를 보였지만, 처리구간 통계적 유의차는 없었다.

Table 4. Growth characteristic of Cherry tomato.

Treatment	Plant			Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Fruit		
	Height (cm)	Shoot fresh weight (g)	Chlorophyll (SPAD)			Length (cm)	Diameter (cm)	Sweetness (Brix)
Control	64.0 ± 11.0b	044.2 ± 10.0c	26.5 ± 9.7b	11.6 ± 4.0b	36.8 ± 19.6b	1.8 ± 0.3a	1.9 ± 0.3a	5.0 ± 1.5a
N-P-K	105.8 ± 21.3a	142.4 ± 58.3b	57.1 ± 20.4a	35.5 ± 21.9ab	114.9 ± 83.1b	1.9 ± 0.3a	1.9 ± 0.3a	5.5 ± 0.6a
Po	111.6 ± 12.7a	155.2 ± 35.2b	44.2 ± 6.5ab	27.3 ± 10.9ab	84.9 ± 47.1b	1.8 ± 0.4a	2.1 ± 0.2a	5.6 ± 0.7a
Po + N	100.0 ± 3.6a	276.4 ± 30.9a	59.3 ± 12.4a	49.3 ± 32.3a	276.4 ± 30.9a	2.0 ± 0.2a	2.1 ± 0.2a	4.9 ± 0.8a
Pe	115.3 ± 41.2a	235.7 ± 46.7b	46.9 ± 7.4ab	16.0 ± 9.8ab	62.6 ± 30.1b	2.0 ± 0.3a	2.2 ± 0.2a	5.0 ± 0.8a
Pe + N	117.0 ± 6.2a	183.9 ± 34.0b	51.0 ± 5.8a	23.6 ± 31.4ab	76.4 ± 72.0b	1.8 ± 0.1a	1.9 ± 0.1a	4.0 ± 0.5a

Po, powder biochar 2%; Pe, pellet biochar 2%; Po + N, power biochar 2% + NPK; Pe + N, pellet biochar 2% + NPK.

a - c: One-way analysis of variance, ANOVA, Post Hoc Tests by Duncan in SPSS version 24.0.

Table 5. Chemical properties of soil at the end of the experiment.

Treatment	pH (1 : 5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (g kg ⁻¹)	C/N ratio	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)		
				T-C	T-N			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Control	6.7 ± 0.2	0.14 ± 0.04	32.3 ± 4.9	0.6 ± 0.0	0.4 ± 0.0	1.1	1.38	0.10 ± 0.02	5.3 ± 0.2	2.1 ± 0.1
N-P-K	6.3 ± 0.1	0.15 ± 0.02	31.5 ± 4.5	0.5 ± 0.0	0.4 ± 0.1	0.9	1.30	0.14 ± 0.09	5.7 ± 0.7	2.3 ± 0.1
Po	7.6 ± 0.1	0.62 ± 0.11	271.0 ± 44.3	3.1 ± 0.1	0.7 ± 0.0	5.3	4.68	0.08 ± 0.01	6.5 ± 0.3	2.7 ± 0.1
Po + N	7.7 ± 0.1	0.66 ± 0.09	249.0 ± 22.6	4.6 ± 0.8	0.7 ± 0.1	7.9	6.56	0.09 ± 0.01	7.1 ± 0.4	3.0 ± 0.2
Pe	7.2 ± 0.4	0.81 ± 0.14	97.2 ± 9.4	5.0 ± 0.1	0.9 ± 0.0	8.7	5.52	0.12 ± 0.06	5.2 ± 0.5	2.2 ± 0.1
Pe + N	7.1 ± 0.1	1.02 ± 0.13	132.3 ± 14.5	5.5 ± 2.1	0.9 ± 0.1	9.5	6.12	0.16 ± 0.06	6.5 ± 0.6	2.4 ± 0.1

재배 토양 분석

재배 후 토양의 pH는 대조구에 비해 바이오차 처리구의 pH가 높아지는 경향을 보였다. 선행 연구에 의하면 바이오차는 알칼리성의 높은 pH를 갖는 특성으로 토양 투입량에 따라 pH가 증가하는 경향을 보인다(Jeong, 2013; Oh et al., 2014; Oh et al., 2017). 본 실험에서 사용된 토양의 pH는 6.4로 약 산성이었다. 재배 후 토양의 pH는 무처리구가 6.7, 바이오차 처리구가 7.1 - 7.7로 재배 전 토양에 비해 상승하는 경향을 보였다. 재배 후 토양의 pH상승은 토양에 비해 비교적 높은 바이오차의 pH와 토마토의 뿌리에서 수소이온과 질산태질소를 선호하는 경향으로 인하여 pH가 증가된 것으로 판단된다(Kang et al., 2010).

바이오차는 토양에 투입 시 토양의 EC 증가에 기여하는 것으로 보고 되어있다(Jung, 2014). 본 연구에서도 바이오차를 처리한 토양의 EC는 증가하는 경향을 보였으며, NPK 추가 처리구가 더 높은 경향을 보였다. Pe + N이 1.02 dSm⁻¹ 로 가장 높았으며, 실험 전 토양(0.16 dS m⁻¹)에 비해 약 0.86 dS m⁻¹ 증가하였다. 방울토마토의 재배 토양의 적정 EC는 3.0 dS m⁻¹ 로 초과할 경우 작물 생육에 부정적인 영향을 줄 수 있어, 토양 내 바이오차 처리 시 EC 분석을 통해 적절한 바이오차 처리량에 대한 연구가 선행 되어야 할 것으로 판단된다.

총 탄소, 총 질소, 유기물함량은 바이오차를 사용하지 않은 처리구에 비해 바이오차를 사용한 처리구에서는 증가하였으며, 이는 바이오차의 높은 총 탄소, 총 질소, 유기물 함량으로 인하여 토양 내 함량이 증가된 것으로 판단된다.

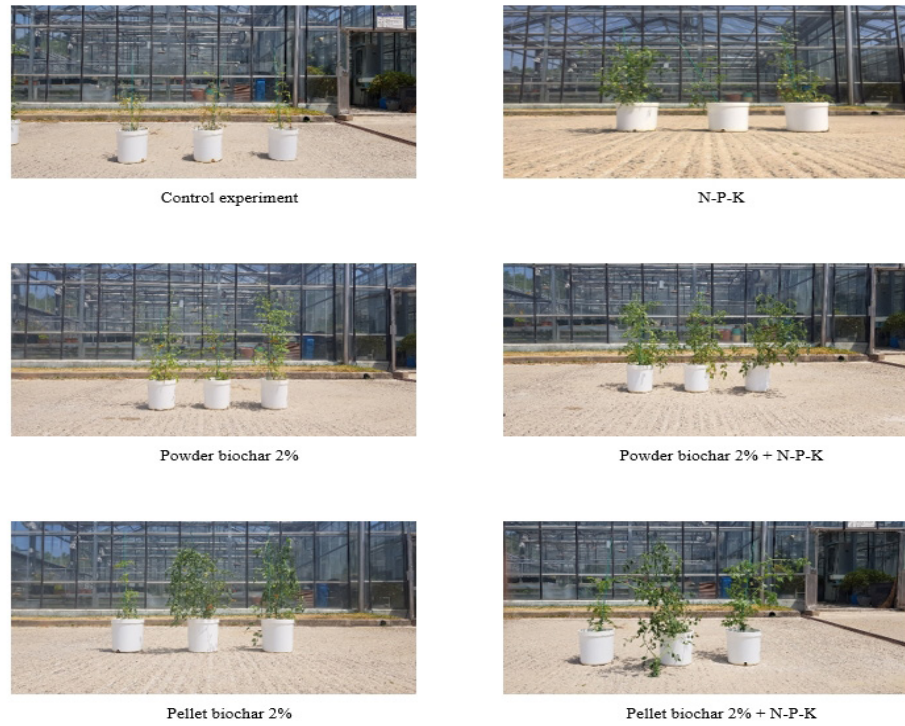


Fig. 1. Photographs of fully grown Cherry tomato plants.

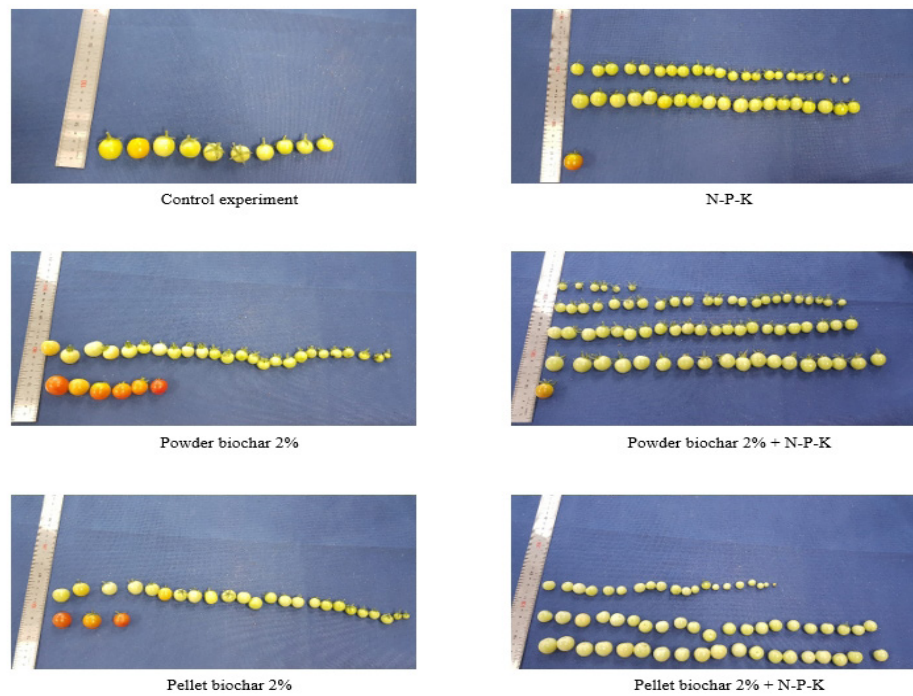


Fig. 2. Photographs of Cherry tomato fruits.

Conclusion

본 연구는 제형별 바이오차와 화학비료 혼합처리가 방울토마토의 생육과 토양의 화학성에 미치는 영향을 알아보기 위해 충남대학교 농업생명과학대학 내 유리온실에서 실시하였다. 방울토마토의 생육 특성 조사 결과 초장, 지상부 생중량, 엽록소 함량, 열매 수와 무게는 대조구에 비해 바이오차 처리구에서 좋은 생육 보였다. 엽록소 함량, 열매 수와 무게는 바이오차 단독처리구에 비해 NPK 추가 처리구에서 증가하는 경향을 보였다. 방울토마토 재배 후 토양 분석 결과, 바이오차가 토양에 처리됨에 따라 pH, EC, 유효인산, 총탄소 및 질소, 유기물 함량 등이 증가하는 경향을 보였다. 위 결과로, 방울토마토 재배 시 바이오차 처리는 생육에 긍정적인 영향을 주며, 토양의 화학성을 변화시켜 작물 생산 시 토양개량제로 이용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 화학비료의 추가 처리 시 바이오차 단독 처리에 비해 방울토마토의 생육을 증가시키는 경향을 보여, 바이오차와 화학비료의 혼합 시용이 작물생육에 긍정적인 효과를 주는 것으로 판단된다.

Acknowledgements

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

Authors Information

Jae-Han Lee, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Ph. D. student

Deogratus Luyima, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Master student

Ji-Young Ahn, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Undergraduate student

Seong-Yong Park, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Undergraduate student

Bong-Su Choi, National Institute of Biological Resources, Researcher

Chang-Hoon Lee, Department of Fruit Tree, National College of Agriculture and Fisheries, Professor

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

References

- Ahmad M, Lee SS, Dou X, Mohan D, Sung JK, Yang JE. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology* 118:536-544.
- Bird MI, Wurster CM, de Paula Silva PH, Bass AM, Nys R. 2011. Algal biochar - production and properties. *Bioresource Technol* 102:1886-1891.
- Cantrell KB, Hunt PG, Uchimiya M, Novak JM, Ro KS. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107:419-428.
- Cao X, Harris W. 2010. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology* 101:5222-5228.
- Choi EJ, Lee JH, Jeong HC, Kim SH, Lim JS, Lee DK, Oh TK. 2017. Analysis of research trends in methane emissions from rice paddies in Korea. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:463-476. [in Korean]
- Choi IW, Kim JH, Lee SH, Lee JK, Seo DC, Cho JS. 2016. Adsorption characteristics of Cd, Cu, Pb and Zn

- from Aqueous solutions onto reed biochar. Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer 49:489-494. [in Korean]
- Choi SK. 2003. The effect of activated charcoal on growth and yield in *Bupleurum falcatum*. The Plant Resources Society of Korea 16:130-133. [in Korean]
- Hong SD, Kim KI, Park HT, Kang SS. 2001. Relationship between leaf chlorophyll reading value and soil N-supplying capability for tomato in green house. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 34:85-91. [in Korean]
- Jeong SH. 2013. Effects of biochar derived from agricultural and forest residues on carbon sequestration and soil quality, M.S dissertation, Kangwon National Univ., Chuncheon, Korea. [In Korean]
- Jung SH. 2014. Effects of biochar derived from agricultural and forest residue on carbon sequestration and soil quality. Master dissertation, Kangwon National Univ., Chuncheon, Korea. [in Korean]
- Kang YI, Roh MY, Kwon JK, Park KS, Cho MW, Lee SY, Lee IB, Kang NJ. 2010. Changes of tomato growth and soil chemical properties as affected by soil pH and nitrogen fertilizers. Korean Journal of Environmental Agriculture 29:328-335. [in Korean]
- Kim DY, Cho KG, Bak IT, Yoo GY. 2014. Changes in crop yield and CH₄ emission from rice paddy soils applied with biochar and slow-release fertilizer. Korean Journal of Environmental Biology 32:327-334.
- Kim HW, Bae SY, Lee JY. 2013. A study on the removal of heavy metals in soil by sewage sludge biochar. Journal of Soil and Groundwater Environment 18:58-64. [in Korean]
- Kim JS, Cho MS. 2009. Quality changes of immature green cherry tomato pickles with different concentration of soy sauce and soaking temperature during storage. Journal of the Korean Society of Food Culture 24:295-307. [in Korean]
- KOSTAT. 2017. Crop production survey: Vegetable production (fruit vegetables). Accessed in http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01&parentId=F.1;F1.2;F1H.3;#SelectStatsBoxDiv on 28 June 2019.
- Lee DW, Kim BR. 2001. Effect of carbonized wastewoods on soil improvement. Journal of Korea Forestry Energy 20:1-5. [in Korean]
- Lee JH, Seong CJ, Kang SS, Lee HC, Kim SH, Lim JS, Kim JH, Yoo JH, Park JH, Oh TK. 2018a. Effect of different types of biochar on the growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). Korean Journal of Agricultural Science 45:197-203. [in Korean]
- Lee JH, Sung JK, Kim SH, Lee HC, Lee YK, Lim JS, Yoo JH, Kim JH, Park JH, Shinogi Y, Oh TK. 2018b. Effect of bead-form biochar as soil amendment. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University 63:405-409.
- Lee YM. 2004. Tomato. Kimyoungsa, Seoul, Korea. [in Korean]
- Lehmann J. 2007. A handful of carbon. Nature 447:143-144.
- Lim JE, Kim HW, Jeong SH, Lee SS, Yang JE, Kim KH, Ok YS. 2014. Characterization of burcucumber biochar and its potential as an adsorbent for veterinary antibiotics in water. Journal of Applied Biological Chemistry 57:65-72.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010. Recommendation of the amount of fertilizer for crops. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2012. Research and analysis criteria for crops. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- Oh TK, Lee JH, Kim SH, Lee HC. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). Korean Journal of Agricultural Science 44:359-365. [in Korean]
- Oh TK, Shinogi Y, Lee SJ, Choi BS. 2014. Utilization of biochar impregnated with anaerobically digested slurry as slow-release fertilizer. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177:97-103.
- Park GR, Jang HA, Jo SH, Park Y, Oh SK, Nam M. 2018. Development of SNP marker set for marker-assisted

- backcrossing (MABC) in cultivating tomato varieties. Korean Journal of Agricultural Science 45:385-400. [in Korean]
- Seo JM, An JY, Park BB, Han SH, Youn WB, Aung A, Dao HTT, Cho MS. 2019. The effects of additive biomaterials and their mixed-ratios in growing medium on the growth of *Quercus serrata* container seedlings. Korean Journal of Agricultural Science 46:93-102. [in Korean]
- Sohi SP. 2012. Carbon storage with benefits. Science 338:1034-1035.
- Tanaka S. 1963. Fundamental study on wood carbonization. Bulletin of Experimental Forest of Hokkaido University 17.
- Zhang W, Sharma BK, Rajagopalan N. 2010. Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture. Submitted to the Sustainable Agriculture Grant Program Illinois Department of Agriculture.