

바이오차 시용이 시설재배 멜론의 토양 환경 및 생육에 미치는 영향*

김은혜** · 윤건식*** · 정금재*** · 이규희*** ·
전유민*** · 윤철구*** · 김주형**** · 이상민*****

Effects of Biochar Application on Soil Environment and Melon Growth in Greenhouse

Kim, Eun-Hye · Yun, Geon-Sig · Chung, Guem-Jea · Lee, Kuy-Hoi ·
Jeon, Yu-Min · Youn, Cheol-Ku · Kim, Ju-Hyoung · Lee, Sang-Min

Biochar is a solid substance with a high carbon content, as it is made out of biomass pyrolyzed under the condition of limited oxygen. This product has attracted attention as an environment-friendly soil amendment because it contributes to carbon neutrally and has improvement effects on the soil environment. This study conducted an experiment to evaluate soil physiochemical properties and microbial community changes in a melon greenhouse according to the applied amount of biochar to investigate the growth characteristics and yields of melons accordingly. In soil physical properties, an increase in the applied amount of biochar resulted in a decrease in bulk density and an increase in porosity of the soil, improving air permeability. In soil chemical properties, an increase in the applied amount of biochar led to a increasing of pH, organic matter and available phosphate content. In the growth characteristics of melons, there was a growing tendency of plant height, leaf length and leaf width according to the increasing application of biochar until 10,000 kg/ha. Moreover, melon yields also increased as the amount of biochar, 13~16% higher in 10,000 kg/ha biochar application than no treatment. Compared differences among microbial communities in the soil according to the application of biochar and found that plant beneficial bacteria dominated in biochar

* 본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01573304)의 연구비 지원으로 수행됨.

** Corresponding author, 충청북도농업기술원 수박연구소, 농업연구사(ehkim0128@korea.kr)

*** 충청북도농업기술원 수박연구소

**** 충청북도농업기술원

***** 국립농업과학원 유기농업과

treatments. This study demonstrated the potential of biochar as an effective soil amendment in melon greenhouse by showing improvements in soil physicochemical properties and microbial communities.

Key words : *biochar, melon cultivation, soil amendment, soil physiochemical, soil microbial flora*

I. 서 론

안전한 고품질의 유기농산물을 생산하기 위해서는 건강한 토양 환경이 중요하며 지속 가능하고 건전한 토양을 유지하기 위해 적절한 토양관리는 매우 중요한 일이다. 작물의 생산성 향상을 위한 질소질비료나 가축분 퇴비의 과다시비는 수질오염과 염류집적 등으로 토양 환경 악화를 야기시키고 동시에 농경지 온실가스 배출 주요 요인으로 알려져 있다 (Jeong et al., 2015). 온실가스 배출에 의한 지구 온난화는 세계적으로 중요한 문제로 대두되고 있으며 특히, 농업 분야에서는 화학비료의 사용을 줄이고 온실가스 배출원을 감축하는 저탄소 친환경농업으로의 구조 전환을 추진 목표로 하고 있다. Lee 등(2015)은 유기농업이 온실가스 감축에 있어 긍정적인 영향을 미치는 결과가 67.7%라고 보고하였고, Kim 등(2016)은 작물과 재배 방식에 따라 다르나 유기농업이 일반 관행농업에 대비하여 10.6~89.3% 온실가스를 감축한다는 연구 결과를 나타내었다.

한편, 과잉 시비된 비료 성분은 토양의 염류 농도를 증가시켜 토양관리를 어렵게 한다. Kwak 등(2003)에 의하면 특히 시설재배지는 강우가 차단된 환경으로 과도하게 투입된 화학비료 및 가축분 성분이 작토층에 잔류하게 되어 염류집적이 일어난다고 하였다. 또한 제한된 공간 내에서의 고온으로 인해 수분 증발량이 관수에 의한 지하 투수량보다 상대적으로 많기 때문에 염류의 지표면 축적이 가속화되고 있다(Kim et al., 1997). 윤작을 기피하고 동일 작목을 연작하는 시설재배지 특성상 잦은 관수와 경운 등으로 물리성이 악화되기 때문에 안정적인 장기 재배를 위한 토양 환경 개선은 불가피하다. 토양의 이화학성 개선 및 온실가스 감축을 위하여 유기농업의 지속적인 실천을 강조할 필요가 있으며 화학비료를 대체할 수 있는 토양 유기물 공급 및 비옥도 증진 방안과 나아가 기후 위기 극복을 위하여 탄소배출 저감 실천하면서 농업 생산성을 향상시킬 수 있는 대책이 필요하다.

따라서, 친환경 탄소 격리 기술의 하나인 바이오차의 활용이 주목받고 있다(Paustian et al., 2016). 바이오차는 바이오매스를 산소가 없는 조건에서 열분해하여 만든 탄소 함량이 높은 고형물이다. 바이오매스의 탄소는 열분해를 거치면서 안정된 형태로 존재하여 토양에 투입하면 탄소를 반영구적으로 저장, 격리시키는 것으로 알려져 있어(Berglund & Berglund, 2011), 온실가스 저감효과를 기대할 수 있다(Fowles, 2007). 또한 토양의 물리적, 화학적, 생

물학적 특성을 개선시켜 토양 개량의 효과로 작물 생산성이 증진되는 것으로 보고되었다(Olmo et al., 2014; Sohi et al., 2010). 또한 바이오차 처리로 인한 토양의 이화학성의 변화는 토양 근권 미생물 군집의 대사와 다양성에 영향을 미쳐 작물의 성장을 향상 시킨다고 보고되었다(Joseph et al., 2014). 하지만 토양의 유형, 바이오차의 특성 및 환경적 변수에 따라 바이오차가 작물 생산성에 미치는 영향에는 큰 변동성이 있다(Jeffery et al., 2011; Liu et al., 2013).

바이오차 처리의 수량 증대 효과는 작물 및 바이오차 시용량에 따라 서로 다른 결과를 나타내었다. Yi 등(2019)은 상추의 최적 수량을 위한 바이오차의 적정 시용량은 2,000 kg/ha 라 보고하였고 Park 등(2021)의 실험에서는 보릿짚, 가축 사체, 우드펠렛으로 만든 각각의 바이오차를 옥수수 재배지에 10,000 kg/ha로 투입했을 때 옥수수의 생산이 7~14%의 증수하였다. Olmo 등(2016)은 바이오차를 ha당 40,000 kg까지 처리하여도 밀의 수량이 유의적으로 증가한다고 하였다. 그러나 토양에 120,000 kg/ha 이상 과다하게 시용할 경우 바이오차의 양분 흡착으로 인한 작물 생육 부진이 올 수 있기 때문에 작물에 따른 적정 시용량을 검토할 필요가 있다(Sorensen & Lamb, 2016).

국내 시설작물 재배면적은 전체 농경지 중 24%를 차지하고 있으며 채소 및 과채류의 경우 상당 부분 시설재배에서 생산되고 있다. 그 중 멜론(*Cucumis melo* L.)은 박과류 1년생 원예작물로 2021년 기준 우리나라 생산면적은 1,518 ha, 생산량은 41,264톤으로 2017년 이후 생산이 꾸준히 증가하는 추세이다(KOSIS, 2023). 특히 멜론은 생산 시 비료와 관개용수를 과도하게 사용하는 작물 중 하나로 알려져 있어(Deus et al., 2015) 멜론 재배지 연작은 토양의 물리성 악화 및 양분 불균형을 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 토양 비옥도 개선 및 작물 성장 촉진을 위한 친환경 토양개량제로써 바이오차 시용량에 따른 시설재배 멜론의 생육 및 과실특성, 상품 수량성에 미치는 효과와 토양 미생물 군집 변화에 미치는 영향을 종합적으로 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 멜론 생육 및 바이오차 시용

네트 계열 멜론(달고나, 럭키종묘)을 이용해 육묘용 트레이포트에 파종하여 본엽 4~5매까지 육묘하였다. 바이오차는 침엽수계 국내산 재활용 목재를 이용하여 저온(약 350°C)에서 탄화시켜 제작한 목재 바이오차를 사용하였다(주태진소재). 실험에 사용된 바이오차는 탄소 64.9%, 수소 1.9%, 산소 21.9%, 질소 0.6%의 원소조성으로 이루어졌고 pH는 약 7 정도로 측정되었다. 충북농업기술원 수박연구소 내 비닐하우스에서 실험을 수행하였으며 바

이오차의 시용량에 따른 토양 이화학성 변화와 멜론의 생산성 향상 효과를 확인하기 위하여 무처리, 기준량(2,000 kg/ha), 2.5배(5,000 kg/ha), 5배(10,000 kg/ha) 등 총 4처리로 토양 표층에 혼합 후 작토층 30 cm 경운하여 시용하였다. 바이오차는 2022년부터 2023년까지 2년간 연용하였고 2023년 같은 포장에서 바이오차 기준 시용량의 10배(20,000 kg/ha) 처리구를 추가하였다. 시설재배 하우스(가로 6 m, 세로 33 m)에 80 cm 폭의 4개의 이랑을 만들고, 2022년 3월 22일, 2023년 3월 20일에 주간 간격 40 cm로 정식한 후 지주 재배하였다. 2022~2023년 시험포장의 재배기간인 3~6월 평균온도는 각각 15.2, 15.7°C로 평년대비 2°C 정도 높았으며, 누적 강우량은 353.3, 412.2 mm로 평년대비 12.2~71.1 mm 증가하였다(KMA, 2023). 생육 단계별 점적관수를 통해 수분을 공급하였으며 관수 간격은 정식 후 개화기까지는 기상 상황에 따라 3에서 5일 간격으로 주당 2.5 L 관수하였고 착과기부터 평균 3일 간격으로 주당 5 L 씩 관수하였으며 수확 15일 전 2.5 L씩 관수하였고 수확 5일 전 관수를 중지하였다. 시험은 완전임의배치 3반복으로 배치하여 토양 이화학성, 멜론 생육 및 상품수량과 토양 미생물 군집 변화 등을 조사하였다.

2. 토양 물리성 분석

멜론 정식 후 80일경 토양 물리성을 조사하였다. 토양 시료는 이랑의 높이 중간지점 15 cm 깊이의 표토를 이랑의 작물 사이에서 Core법으로 채취하였다. 105°C에서 24시간 토양 수분을 제거한 후 건조토양의 무게를 측정하여 고상, 액상, 기상의 비율을 계산하였으며, 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 용적밀도, 공극률, 중량수분함량 등을 분석하였다.

3. 토양 화학성 분석

멜론 정식 후 80일경 토양 화학성을 조사하였다. 토양 시료는 표토를 10 cm 건어낸 다음 최대한 뿌리를 건드리지 않는 지점에서 300g 정도씩 채취하였다. 채취한 토양 시료는 7일간 건조하여 입자를 분쇄한 후 2 mm 체를 통과 시킨 후 화학성 분석에 사용하였다. pH와 EC는 토양시료와 증류수를 1:5의 비율로 혼합하여 30분간 180 rpm으로 교반하여 1시간 방치 후 pH meter (Thermo ORION STAR A21, Indonesia)로 측정하였고, EC는 Conductivity meter (YSI-32, Ohio, USA)로 측정하여 5배 한 값으로 나타내었다. 유기물 함량은 Tyurin법, 유효 인산은 Lancaster 법으로 비색계(Varian Cary 100, Australia)를 이용하여 측정하였다. 치환성 양이온의 함량은 1N 중크롬산 분해 비색계측정법을 이용하여 ICP (Agilent 5800 ICP-OES, USA)로 분석하였다.

4. 멜론 생육 및 과실특성 조사

무작위로 5주씩 선택하여 경경, 만장, 엽장, 엽폭, 엽수, SPAD (SPAD-502Plus, Konica minolta, Japan) 값에 대해서 정식 후 30일경에 초기 생육조사를 하였고, 70일경에 후기 생육 조사를 하였다. 과실의 경우 정식 후 100일경 수확 후 과중, 과장, 과폭, 과육 두께, 당도, 상품수량 등을 조사하였으며 당도는 과즙을 취하여 굴절식 당도계(Master Refractometer, Atago, Japan)로 측정하였다.

5. 토양 미생물 군집 분석

정식 후 90일경에 채취한 토양 시료를 (주)마크로젠에 의뢰하여 차세대 염기서열 분석(NGS: Next Generation Sequencing)을 통해 바이오차 처리구별 토양 메타게놈 분석을 수행하였다. 토양 시료를 DNeasyPowerSoil Kit (Qiagen, Hilden, Germany)로 DNA를 추출하고, DNA 증폭을 위하여 16S rRNA 유전자의 V3-V4 영역을 타겟으로 하는 341F/ 805R 프라이머를 사용하여 PCR을 하였다(Fadeev et al., 2021). PCR 조건은 Initial denaturation 95°C 3분, Denaturation 95°C 30초, Annealing 55°C 30초, Extension: 72°C 30초(25 Cycle), Final extension 72°C 5분 조건으로 수행하였다. 1차 PCR 산물을 정제 후 NexteraXT Indexed Primer를 사용하여 최종 라이브러리 구축을 위해 PCR을 수행하였고 1차 PCR 조건과 동일한 조건으로 10 Cycle 증폭하였다. 증폭된 샘플은 최종적으로 Illumina MiSeq® System의 Sequencing By Synthesis (SBS) 기술을 이용하여 시퀀싱하였다. 얻어진 염기서열을 이용하여 ASV (Amplicon Sequence Variants) analysis를 통하여 다양한 토양 미생물의 군집 비교 분석을 수행하였다.

6. 통계 분석

생육 및 과실특성, 토양 이화학성에 대한 통계처리는 2022년, 2023년 측정 결과를 각각 나누어 SPSS 프로그램 22버전을 사용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 토양 물리성의 변화

바이오차 시용량별 토양 물리성 분석 결과는 Table 1과 같다. 토양의 용적밀도는 바이오

차의 시용량이 증가할수록 유의성 있게 감소하였으며 반대로 공극률은 증가하였다. 이는 토양에 참깨대 바이오차를 혼입한 결과 용적밀도는 낮아지고, 공극률은 증가하여 토양 물리성이 개선된 결과와 일치했다(Kang et al., 2016). 바이오차의 다공성 구조가 토양의 수분 보유 능력을 증가시키고 토양 입단화를 촉진시켜 식물 뿌리의 성장을 증가시키고 양분과 물의 이용 효율을 향상시킨다고 보고된 바 있다(Wang & Liu, 2018). 본 실험 결과에도 토양의 중량수분함량이 바이오차 10,000 kg/ha 처리까지 시용량이 늘어남에 증가하는 경향치를 보였다. 2023년 시험구 역시 2022년 물리성검정 결과와 유사한 경향이 나타났으나, 바이오차 20,000 kg/ha 처리에서 대조구 대비 기상의 함량이 현저히 증가하면서 수분함량 또한 유의적으로 감소하였다. 지나친 바이오차의 시용은 오히려 토양의 대공극의 증가로 배수성을 증가시킨다고 보고된 바(Yi et al., 2019), 바이오차 20,000 kg/ha 처리에 따라 멜론재배지 토양의 수분함량을 줄어든게 하여 작물 생육에 불리한 환경을 만들어 주는 것으로 판단된다.

Table 1. Physical properties of soils by different amount of biochar addition in 2022 and 2023

Cultivation year	Treatment (kg/ha)	Bulk density (g/cm ³)	Porosity (%)	Three phases of soil (%)			Volumetric water contents (%)
				Solid	Liquid	Air	
2022	No treatment	1.42a ^z	46.5c	53.5a	22.5 ^{ns}	24.0b	15.9 ^{ns}
	2,000	1.39a	47.7b	52.3b	22.0	25.8ab	15.9
	5,000	1.36ab	48.6ab	51.4bc	22.3	26.3a	16.4
	10,000	1.34b	49.3a	50.7c	21.8	27.5a	16.2
2023	No treatment	1.42a	46.4d	53.6a	22.1b	24.3b	15.5b
	2,000	1.39ab	47.2cd	52.8ab	23.4a	23.8b	16.8a
	5,000	1.38a	48.3bc	51.7bc	23.0a	25.2b	16.8a
	10,000	1.35ab	49.0b	51.0c	23.2a	25.8b	17.1a
	20,000	1.30b	51.0a	49.0d	16.8c	34.2a	12.9c

Note: ^z Means Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p=0.05$, ns = not significant.

2. 토양 화학성의 변화

바이오차 시용량별 토양 화학성 분석 결과는 Table 2와 같다. 토양의 pH는 2022년은 유의적 차이는 보이지 않았으나 2023년에 무처리구 pH 6.2 대비 바이오차 처리 시 pH 6.5~7.0으로 유의적으로 증가하였다. 바이오차의 pH 교정은 농업에서 토양개량제로 사용하기 위한 중요한 특성 중 하나로 산성 토양의 pH를 증가시키는 경향이 있다(Buss et al., 2016). 토양의 EC는 바이오차 시용으로 작물의 적정 EC 기준인 2.0 ds/m 이하로 통계적으로 낮아졌으며, Huang 등(2022)에 의하면 바이오차의 시용에 의한 EC의 감소는 작물의 염류 스트레스

스를 완화시키며 시설재배지 염류장해 경감에 효과가 있음을 나타냈다. 유기물의 함량(OM)과 유효태 인산(P_2O_5)의 함량은 바이오차 처리구에서 유의적으로 증가하였다. 이는 바이오차가 함유하고 있는 유기물과 인에 의하여 토양 시료 내 총량이 증가한 것으로 판단된다. 치환성 양이온 칼슘, 마그네슘, 칼륨의 함량은 일반적으로 토양 pH와 정의 상관관을 보인다고 보고된 바 있으나(Zhang et al., 2016) 본 연구에서는 무처리구와 비교할 때 전반적으로 명시할 만한 경향은 보이지 않았다.

Table 2. Chemical properties of soil by different amount of biochar addition in 2022 and 2023

Cultivation year	Treatment (kg/ha)	pH	EC ($dS \cdot m^{-1}$)	OM ($g \cdot kg^{-1}$)	P_5O_2 ($mg \cdot kg^{-1}$)	Ex. cations ($cmol \cdot kg^{-1}$)		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
2022	No treatment	6.4ns	2.5a ^z	23.7b	418 ^{ns}	7.7a	2.0 ^{ns}	0.7 ^{ns}
	2,000	6.4	1.6b	24.2b	435	7.4b	2.0	0.7
	5,000	6.4	1.7b	24.7ab	442	7.3b	1.7	0.6
	10,000	6.5	1.6b	26.1a	442	7.2b	1.8	0.6
2023	No treatment	6.2c	2.3a	21.4c	459b	7.3 ^{ns}	1.7 ^{ns}	0.7 ^{ns}
	2,000	6.4b	1.6b	24.7b	463ab	7.8	1.8	0.7
	5,000	6.4b	1.5b	25.2b	467ab	7.4	1.7	0.8
	10,000	6.6b	1.3b	26.8ab	482a	7.2	1.6	0.7
	20,000	7.0a	1.4b	27.9a	482a	7.1	1.7	0.7

Note: ^z Means Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p = 0.05$, ns = not significant.

3. 멜론 생육 및 수량특성

바이오차 처리에 따른 멜론의 성장 차이를 파악하고자 바이오차 시용량별 멜론의 초기 및 후기생육특성을 조사하였다. 멜론의 초기 생육특성 결과는 10,000 kg/ha 처리구에서 무처리구 대비 2022년에는 만장, 엽장, 엽폭에서 유의적 증가를 보였으며 2023년에는 만장, 엽장, 엽폭, SPAD 수치에서 유의적인 증가를 나타내며 바이오차 시용이 증가할수록 생육이 촉진되는 경향이 관찰되었다(Table 3). 멜론의 후기생육 역시 2022년과 2023년의 결과에서 바이오차 10,000 kg/ha 처리구에서 엽장, 엽폭, SPAD 수치에서 유의적 증가를 보이며 생육이 양호하였다(Table 4). 반면, 바이오차 시용량이 증가할수록 멜론 생육이 지속적으로 증가하는지 확인하기 위하여 2023년 추가로 투입한 20,000 kg/ha 처리구에서는 멜론의 초기와 후기생육이 대조구과 비슷하거나 낮아지는 결과를 보였다(Table 3, 4). 다공성 구조를 지닌 바이오차의 과도한 투입은 토양의 총 공극량 및 대공극의 양을 증가시켜 토양 수분보유력을 감소시킨다고 보고된 바 있으며(Laghari et al., 2015) 본 연구의 물리성 검사 결과에서

확인했듯 바이오차 20,000 kg/ha 처리구에서 기상함량의 증가와 중량수분함량의 감소가 멜론의 생장에 부정적인 영향을 미친 것으로 추측되었다.

Table 3. Early growth characteristics of melons by different amount of biochar addition in 2022 and 2023

Cultivation year	Treatment (kg/ha)	Stem diameter (mm)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (ea/plant)	SPAD
2022	No treatment	7.9 ^{ns}	78b ^z	13.5b	14.6b	18 ^{ns}	54.8 ^{ns}
	2,000	7.9	79b	13.7b	14.6b	18	55.2
	5,000	8.0	80ab	13.6b	14.4b	18	55.3
	10,000	8.2	82a	15.1a	15.3a	20	55.1
2023	No treatment	7.8 ^{ns}	74c	14.0b	14.3b	18b	50.1 ^{ns}
	2,000	7.9	77bc	14.3b	14.7b	18b	50.3
	5,000	8.2	81ab	14.8ab	15.0b	18b	50.0
	10,000	8.6	85a	15.6a	15.8a	20a	50.8
	20,000	7.8	74c	14.0b	14.5b	18b	49.9

Note: ^z Means Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p = 0.05$. ns=not significant.

Table 4. Late growth characteristics of melons by different amount of biochar addition in 2022 and 2023

Cultivation year	Treatment (kg/ha)	Stem diameter (mm)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (ea/plant)	SPAD
2022	No treatment	10.9 ^{ns}	133 ^{ns}	22.8b ^z	23.0 ^{ns}	21 ^{ns}	54.7 ^{ns}
	2,000	10.9	134	22.9b	23.1	21	55.0
	5,000	11.0	134	23.1ab	23.2	21	55.9
	10,000	11.5	135	23.9a	23.2	21	55.9
2023	No treatment	10.7 ^{ns}	144 ^{ns}	22.2bc	22.8b	22 ^{ns}	56.7b
	2,000	10.9	145	23.1ab	23.2a	22	57.8b
	5,000	11.0	144	23.3ab	23.8a	22	57.4b
	10,000	11.8	145	24.2a	24.7a	23	59.2a
	20,000	10.8	142	21.0c	22.7b	22	55.5b

Note: ^z Means Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p = 0.05$, ns = not significant.

Jang 등(2018)의 연구에서는 바이오차 시용으로 배추의 생육이 관행 대비 적정수준으로 수량은 13~20% 증가하였고, Park 등(2021)은 바이오차 처리로 옥수수 수확량이 약 7~14% 증수하였다고 보고하였다. 본 실험에서도 멜론의 상품수량이 바이오차 처리로 증가함이 관찰되었다(Table 5). 바이오차 처리구별 멜론의 과실특성 결과를 보면 10,000 kg/ha 처리구에서 무처리구 대비 2022년과 2023년에 과중, 과장, 과폭, 과육두께의 유의적인 증가를 확인하였고 그 결과 바이오차 10,000 kg/ha 처리구에서 멜론의 상품수량이 가장 많았으며 대조구와 비교하여 2022년에는 13%, 2023년에는 16% 증가하였다. 반면, 20,000 kg/ha 처리에서의 상품수량은 대조구보다 낮았으며, 당도는 처리 간 유의적인 차이가 없었다. 이는 Lee 등(2019)와 Jang 등(2018)의 결과에서 바이오차의 처리가 토마토의 당도에 미치는 통계적 유의차가 없었던 결과와 같았다.

Table 5. Fruit characteristics and yield of melons by different amount of biochar addition in 2022 and 2023

Cultivation year	Treatment (kg/ha)	Fruit weight (kg)	Fruit length (cm)	Fruit width (cm)	Fruit thickness (cm)	Total sugar contents (°Bx)	Yield (kg/10a)
2022	No treatment	1.7b ^z	13.9 ^{ns}	14.0b	3.7 ^{ns}	14.0 ^{ns}	2,587c
	2,000	1.8b	14.0	14.0b	3.8	14.4	2,717b
	5,000	1.8b	14.3	14.1b	3.7	14.3	2,776b
	10,000	1.9a	14.6	14.6a	3.9	14.0	2,936a
2023	No treatment	1.7c	14.0b	14.1b	3.7b	13.8 ^{ns}	2,622c
	2,000	1.9b	14.5b	14.3b	3.9b	13.5	2,777b
	5,000	2.0b	14.7b	14.5b	4.0b	13.3	2,870b
	10,000	2.1a	15.8a	15.6a	4.4a	13.4	3,050a
	20,000	1.7c	13.5b	13.4b	3.6b	13.3	2,580c

Note: ^z Means Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p = 0.05$, ns = not significant.

4. 문(phylum) 수준에서의 토양 미생물 군집 비교

대조구와 바이오차 처리구 토양의 미생물 군집을 문(phylum) 수준에서 비교한 결과(Fig. 2) 모든 시료에서 Bacillota, Pseudomonadota, Acidobacteriota, Actinobacteriota의 순으로 상대적 풍부도가 높았고 이러한 결과는 이전 연구에서 보고된 농경지 우점 세균 문의 분포와 일치하였다(Wu et al., 2017; Kim et al., 2018).

Pyrosequencing 결과를 바탕으로 종 풍부도, 상대적 빈도수 등을 분석하여 바이오차 처리별 토양 미생물 군집의 다양성 차이를 확인하였다. 토양 세균 군집의 다양성의 지표인

ASVs (16s rRNA amplicon sequence variants) count는 수치가 높을수록 종 풍부도가 높은 것을 의미한다. Fig. 1(a) ASVs count 결과를 보면 바이오차 처리구에서 토양 미생물의 다양성이 감소하는 결과를 보였다. 이 밖의 군집 다양성을 나타내는 Chao 1, Shannon, Gini-Simpson 수치 역시 무처리구 대비 바이오차 처리구에서 전체적으로 다양성이 낮은 결과를 나타내었다(data not shown). 이러한 결과는 바이오차 처리 후 토양 미생물 군집의 종 다양성이 증가했다는 이전 연구 결과와는 다른 경향이였다(Gomez et al., 2014). 그러나 Fig. 1(b)의 토양 미생물의 총 서열수는 무처리구 대비 바이오차 처리에서 1~2% 증가하였는데, 이는 바이오차 처리에 의해 특정 미생물 군집의 생장이 우점화되어 다양성이 단순화되었다고 유추할 수 있다.

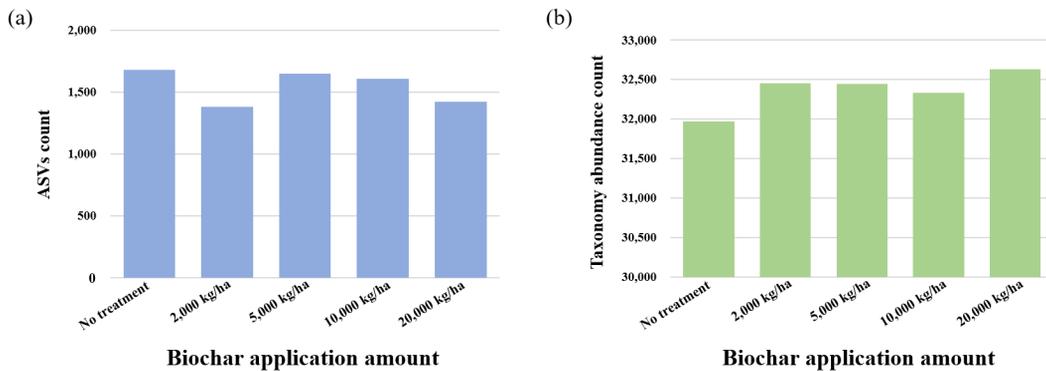


Fig. 1. (a) Number of sequences, a 16s rRNA amplicon sequence variants (ASVs), and diversity estimates of bacteria in soil samples applied amount of biochar, (b) Total number of microbial abundance in soil samples applied amount of biochar.

바이오차 처리 토양에서의 토양 미생물 우점 문(phylum) 수준 비율 변화를 살펴보면 Acidobacteriota와 Cyanobacteriota, Thermodesulfobacteriota가 무처리구 대비 바이오차 처리구에서 감소하는 경향을 보였으며 Actinobacteriota, Bacillota, Pseudomonadota 군은 증가하였다(Fig. 2). 미생물이 토양에서 서식할 때 토양 pH는 미생물의 다양성 및 군집 구조에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중 하나로 보고되었다(Wu et al., 2017; Gomez et al., 2014). 다수의 Acidobacteria는 주로 pH가 낮은 산성 토양에서 서식하는 호산성 미생물(acidophilic bacteria)로(Li et al., 2014), pH 값과 유의적인 부의 상관관계를 나타내는데(Zhang et al., 2017; Wang et al., 2019) 본 연구에서 약산성 토양인 무처리구에 비해 바이오차를 처리함으로써 토양 pH가 증가하고 Acidobacteriota의 서열은 감소하는 결과와 일치했다. 그리고 바이오차 처리에 의해 비율이 감소한 Cyanobacteriota와 Thermodesulfobacteriota는 다수의 혐기성 미생물을 포함하고 있기 때문에 바이오차 시용으로 토양 통기성이 개선되어 호기적 환경으로 바뀌면서 해당 미생물 군의 비율이 줄어든 것으로 판단된다.

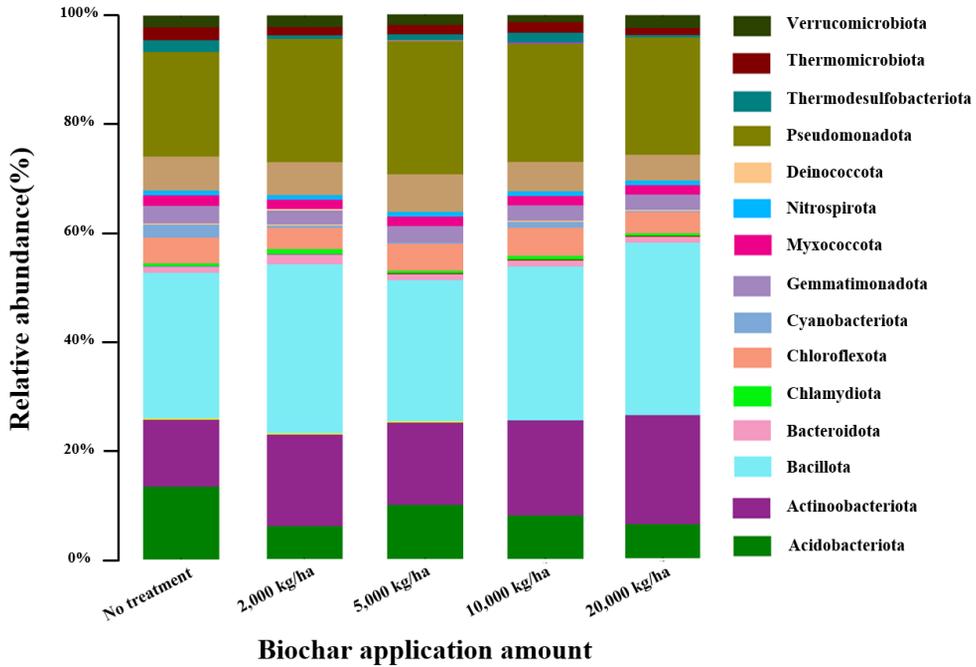


Fig. 2. Taxonomy abundance ratio of dominant bacteria in soil samples applied amount of biochar based on phylum level.

바이오차 처리로 증가한 Actinobacteriota는 토양의 pH와 정의 상관관계가 있다고 보고된 바 있으며(Zhang et al., 2017) 본 연구에서 바이오차 처리로 토양 pH가 증가하였으며, Actinobacteriota의 서열도 2.8%~7.5% 까지 증가하는 결과와 일치 했다. 이 미생물 군집은 대부분 산소를 요구하는 호기성이므로 바이오차를 시용함으로써 이들이 더욱 선호하는 환경으로 바뀌었고, 토양에서 유기물을 분해하여 작물의 생육을 돕는 미생물로 양분공급에 중요한 역할을 할 것으로 사료된다. Bacillota와 Pseudomonadota 문은 바이오차 처리구에서 비율이 증가하였는데 이 군집 역시 다수의 호기성 미생물을 포함하고 있기 때문으로 판단된다. 특히 Pseudomonadota 문은 바이오차 처리구에서 2.3%~5.2% 까지 증가하였는데 이 문은 질소고정, 셀룰로오스 분해, 질산화 세균을 포함하며 식물의 성장, 수확량 및 과실 품질에 유익한 질소 순환(Nitrogen recycling)에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다(Zhang et al., 2022).

미생물 군집의 구성과 활성은 토양의 이화학적 특성에 영향을 받는다(Wang et al., 2019). 본 연구에서도 바이오차의 시용으로 인한 토양의 물리, 화학적 특성 개선으로 *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Azospirillum* 등의 작물성장촉진 미생물의 서열이 우점화되었음을 보여 주었으며(Vázquez et al., 2000; Hao et al., 2021; Wolna-Maruwka et al., 2021), 바이오차가 하우스 내 토양 환경 개선을 통하여 작물의 수량 증대와 생육에 우호적인 미생물 군락 조성의 가능성을 나타내었다.(Gul et al., 2015; Hernandez-Soriano et al., 2016) 이러한 바이오차의

시용효과는 Major 등(2010)의 연구결과에서 투입 후 최소 4년까지 옥수수 수확량이 향상되었고, Shuxiu 등(2020)의 연구 결과에서는 바이오차 시용 6년까지 토양의 물리화학적 특성과 세균 군집 구성에 긍정적인 영향을 주는 것으로 보고되었다. 따라서, 온실가스 감축을 위한 탄소격리 기술인 바이오차의 시용은 멜론 시설재배지 토양 이화학적 및 미생물 군집 개선에 영향을 미쳐 지속적인 토양개량효과를 기대할 수 있으며 멜론의 생육 증진 및 수량 증대에 긍정적인 효과와 폐바이오매스의 자원화 측면에서 사회적 가치와 경제적 가치를 지닌 친환경 토양개량제로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

IV. 적 요

바이오차란 바이오매스를 산소가 제한된 조건에서 열분해하여 만든 탄소함량이 높은 고형물로서 토양환경 개선 효과로 탄소중립을 위한 친환경 토양개량제로 주목받고 있다. 본 실험에서는 멜론 시설재배지 바이오차의 시용량별 토양 이화학적 및 미생물 군집의 변화를 평가 하였고 이에 따른 멜론의 생육 특성 및 수량성을 조사하였다. 토양의 물리성은 바이오차 시용량이 증가함에 따라 용적밀도는 감소하고 공극률이 증가하여 토양의 통기성이 개선되는 효과가 있었다. 토양의 화학성은 바이오차 시용량이 증가할수록 pH가 증가하고 유기물 및 유효인산 함량이 증가하는 경향이었다. 멜론의 생육은 무처리 대비 바이오차 10,000 kg/ha 처리까지 시용량이 증가할수록 멜론의 만장, 엽장, 엽폭이 증가하는 경향이 있었다. 또한 멜론의 생산량도 시용량에 따라 증가하여 바이오차 10,000 kg/ha 처리에서 무처리 대비 13~16% 높았다. 바이오차 시용에 따른 토양 미생물 군집의 차이를 비교해 본 결과, 우점 유익균의 비율이 증가하는 결과를 보였다. 본 연구는 멜론 시설재배지 바이오차의 처리가 토양의 이화학적 특성 및 미생물군집 개선의 결과를 나타내며 효과적인 토양개량제로서의 가능성을 보여주었다.

[Submitted, November, 10, 2023; Revised, December, 12, 2023; Accepted, December, 19, 2023]

References

1. Berglund, Ö. and K. Berglund. 2011. Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biol and Biochem.* 43(5): 923-931.

2. Buss, W., M. C. Graham, J. G. Shepherd, and O. Mašek. 2016. Risks and benefits of marginal biomass-derived biochars for plant growth. *Sci Total Environ.* 496-506.
3. Deus, J. A. L. D., I. Soares, J. C. L. Neves, J. F. D. Medeiros, and F. R. Miranda. 2015. Fertilizer Recommendation System for Melon Based on Nutritional Balance. *Rev Bras Cienc Solo.* 39(2): 498-511.
4. Fadeev, E., M. G. Cardozo-Mino, J. Z. Rapp, C. Bienhold, I. Salter, V. Salman-Carvalho, M. Molari, H. Tegetmeyer, E. P. L. Buttigieg, and A. Boetius. 2021. Comparison of two 16S rRNA primers (V3-V4 and V4-V5) for studies of arctic microbial communities. *Front Microbiol.* 12: 1-11.
5. Fan, S., J. Zuo, and H. Dong, 2020. Changes in soil Properties and Bacterial community composition with biochar amendment after six years. *Agronomy.* 10(5): 746-761.
6. Fowles, M. 2007. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. *Biomass & Bioenergy.* 31(6): 426-432.
7. Gomez, J., K. Deneff, C. Stewart, J. Zheng, and M. Cotrufo. 2014. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *Eur J Soil Sci.* 65(1): 28-39.
8. Hao, J., Y. N. Chai, L. D. Lopes, R. A. Ordóñez, E. E. Wright, S. Archontoulis, and D. P. Schachtman, 2021. The effects of soil depth on the structure of microbial communities in agricultural soils in Iowa(United States). *Appl Environ Microbiol.* 87(4): 2673-2693.
9. Huang, J., C. Zhu, Y. Kong, X. Cao, L. Zhu, Y. Zhang, Y. Ning, W. Tian, H. Zhang, Y. Yu, and J. Zhang. 2022. Biochar application alleviated rice salt stress via modifying soil properties and regulating soil bacterial abundance and community structure. *Agronomy.* 12(2): 409-420.
10. Jang, J. E., G. J. Lim, J. S. Park, J. M. Shim, C. S. Kang, and S. S. Hong. 2018. Application effects of biochar derived from pruned stems of pear tree on growth of crops and soil physico-chemical properties. *J.KORRA.* 24(4): 11-19.
11. Jeffery, S., F. G. A. Verheijen, M. Velde, and A. C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ.* 144(1): 175-187.
12. Jeong, H. C., J. S. Lee, E. J. Choi, G. Y. Kim, S. U. Seo, H. K. Jeonand, and C. G. Kim. 2015. Post-2020 emission projection and potential reduction analysis in agricultural sector. *J. Climate Change Res.* 6(3): 233-241.
13. Joseph, S., E. R. Grabe, C. Chia, P. Munroe, S. Donne, T. Thomas, S. Nielse, C. Marjo, H. Rutledge, G. X. Pan, L. Li, P. Taylor, A. Rawal, and J. Hook. 2014. Shifting paradigms:

- development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Manage.* 4(3): 323-343.
14. Kang, S.-W., J. S. Cho, H. T. Kim, D. C. Seo, and S. D. Moon. 2016. Effect of sesame straw biochar application on soil physics and nitrous oxide emission in upland soil. *KJSSF.* 49(3): 259-264.
 15. Kim, C. G., H. K. Jeong, and Y. G. Kim. 2016. Effects of organic farming on greenhouse gas emission reduction. *J. Climate Change Res.* 7(3): 335-339.
 16. Kim, P. J., D. K. Lee, and D. Y. Chung. 1997. Vertical distribution of bulk density and salts in a plastic film house soil. *KJSSF.* 30(3): 226-233.
 17. Kim, Y., S. Y. Kim, J. H. An, M. K. Sang, H. Y. Weon, and J. Song. 2018. Changes in resident soil bacterial communities in response to inoculation of soil with beneficial *bacillus* spp. *Microbiol & Biotechnol Lett.* 46(3): 253-260.
 18. KMA. 2023. Korea Meteorological Administration. <https://kosis.kr>
 19. KOSIS. 2023. Korean Statistical Information Service. <https://www.kosis.kr>
 20. Kwak, H. K., K. S. Seong, N. J. Lee, S. B. Lee, M. S. Han, and K. A. Rho. 2003. Changes in chemical properties and fauna of plastic film house soil by application of chemical fertilizer and composted pig manure. *KJSSF.* 36: 304-310.
 21. Laghari, M., M. S. Mirjat, Z. Hu, S. Fazal, B. Xiao, M. Hu, Z. Chen, and D. Guo. 2015. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *CATENA.* 135: 313-320.
 22. Lee, J. H., L. Deogratius, J. Y. Aha, S. Y. Park, B. S. Choi, T. K. Oh, and C. H. Lee. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *KJOAS.* 46(4): 931-939.
 23. Lee, K. S., Y. C. Choe, and S. H. Park. 2015. Measuring the environmental effects of organic farming: A meta-analysis of structural variables in empirical research. *J. Environ Management.* 162: 263-274.
 24. Li, H., D. Ye. X. Wang, M. L. Settles, J. Wang, Z. Hao, L. Zhou, P. Dong, T. Jiang, and Z. Ma. 2014. Soil bacterial communities of different natural forest types in Northeast China. *Plant soil.* 383(1): 203-216.
 25. Liu, X., A. Zhang, C. Ji, S. Joseph, R. Bian, L. Li, G. Pan, and J. Paz-Ferreiro. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions a meta-analysis of literature data. *Plant soil.* 373(1): 583-594.
 26. Major, J., M. Rondon, D. S. Molina, J. Riha, and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savana oxisol. *Plant Soil.*

- 333: 117-128.
27. Olmo, M., J. A. Albuquerque, V. Barrón, M. C. Campillo, A. Gallardo, M. Fuentes, and R. Villar. 2014. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions. *Biol Fertil Soils*. 50(8): 1177-1187.
 28. Olmo, M., R. Villar, P. Salazar, and J. A. Albuquerque. 2016. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. *Plant soil*. 399(1): 333-343.
 29. Park, J. H., J. J. Yun, H. N. Cho, S. G. Lee, S. H. Kim, J. S. Cho, and S. W. Kang. 2021. Effect of soil amendments derived from agricultural biomass to improve corn growth and soil fertility in an upland field. *KJSSF*. 54(4): 478-485.
 30. Paustian, K., J. Lehmann, S. Ogle, D. Reay, G. P. Robertson, and P. Smith. 2016. Climate-smart soils. *Nature*. 532(7597): 49-57.
 31. Shuxiu, F., J. Zuo, and H. Dong. 2020. Changes in Soil Properties and Bacterial Community Composition with Biochar Amendment after Six Years. *Agronomy*. 10(5): 746-760.
 32. Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Academic Press*. 105: 47-82.
 33. Sorensen, R., and M. Lamb. 2016. Crop yield response to increasing biochar rates. *J. Crop Improvement*. 30(6): 703-712.
 34. Sun, S., S. Li, B. N. Avera, B. D. Strahm, and B. D. Badgley. 2017. Soil Bacterial and Fungal Communities Show Distinct Recovery Patterns during Forest Ecosystem Restoration. *Appl Environ Microbiol*. 83(14): 966-983.
 35. Vázquez, M. M., S. César, R. Azcón, and J. M. Barea. 2000. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Appl Soil Ecol*. 15(3): 261-272.
 36. Wang, C. Y., X. Zhou, D. Guo, J. h. Zhao, L. Yan, G. Feng, Q. Gao, H. Yu, and L. Zhao. 2019. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. *Ann Microbiol*. 69(13): 1461-1473.
 37. Wang, Y. and R. Liu. 2018. Improvement of acidic soil properties by biochar from fast pyrolysis. *Environ Prog Sustain Energy*. 37(5): 1743-1749.
 38. Wolna-Maruwka, A., T. Piechota, A. Niewiadomska, A. Kamiński, D. Kayzer, A. Grzyb, and A. A. Pilarska. 2021. The Effect of Biochar-Based Organic Amendments on the Structure of Soil Bacterial Community and Yield of Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*. 11(7): 1286-1307
 39. Wu, Y., J. Zeng, Q. Zhu, Z. Zhang, and X. Lin. 2017. pH is the primary determinant of the

- bacterial community structure in agricultural soils impacted by polycyclic aromatic hydrocarbon pollution. *J. Scientific Reports*. 7(1): 1-13.
40. 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.). *KJSSF*. 52(4): 457-466
 41. Zhang, C., Y. Lin, X. Tian, Q. Xu, Z. Chen, and W. Lin. 2017. Tobacco bacterial wilt suppression with biochar soil addition associates to improved soil physiochemical properties and increased rhizosphere bacteria abundance. *J. App Soil Ecol*. 112: 90-96.
 42. Zhang, H., C. Chen, E. M. Gray, S. E. Boyd, H. Yang, and D. Zhang. 2016. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*. 276: 1-6.
 43. Zhang, H., F. Ullah, R. Ahmad, S. U. Alishah, A. Khan, and M. Adnan. 2022. Response of Soil Proteobacteria to Biochar Amendment in Sustainable Agriculture- A mini review. *J. Soil Plant and Environ*. 1(2): 16-30.