

토마토 재배를 위한 바이오차 최적시용 비율 평가

박도균^a, 홍승길^b, 장은숙^c, 신중두[†]

Assessment of an Optimum Biochar Application Rate for Tomato(*Solanum lycopersicum* L.) Cultivation

Do-Gyun Park^a, Seung-Gil Hong^b, Eunsuk Jang^c, Joung-Du Shin[†]

(Received: Mar. 5, 2019 / Revised: Mar. 20, 2019 / Accepted: Mar. 20, 2019)

ABSTRACT: Objective of this study was to evaluate an optimum biochar application rate and estimate the carbon sequestration based on the soil chemical properties and growth responses for biochar application during tomatoes cultivation. The treatments consisted of control as recommended application rates of fertilizers, 0.01%, 0.03%, 0.05%, and 0.07% of biochar application(w/w, biochar:soil). For effects of soil chemical properties, the NO₃-N contents in the soil were peaked at 9 days after transplanting. But there was not significant difference(p>0.05) among the treatments during cultivation periods. However, NH₄-N contents in the biochar treatment were lower than the control until 14 days of transplanting. P₂O₅ contents in the biochar treatments were lower than that of the control until 19 days after transplanting except 0.01% of biochar application plot. K₂O contents in soils treated with 0.01% and 0.03% of biochar were higher until 6 days after transplanting than that in the control. For N use efficiency of biochar application, it was observed that the 0.05% biochar application plot was highest among the treatments. The highest carbon sequestration was estimated at 2.83 mg kg⁻¹ for 0.03% of biochar application. However, it is considered that the optimum biochar application rate was 0.05% for tomato cultivation, considering the growth characteristics and yield components.

Keywords: Biochar, carbon sequestration, plant major nutrients, tomato cultivation

초 록: 본 연구의 목적은 원예작물을 대상으로 밭에서 바이오차 시용에 따른 토마토 재배 시 바이오차의 적정 시용비율을 구명하고, 탄소 격리량을 산정하는 것이다. 바이오차는 0.01%, 0.03%, 0.05% 및 0.07%(w/w, 토양/바이오차)로 구분하여 처리하였으며, 비료는 N-P-K, 20.4-10.3-12.2 kg 10a⁻¹를 기비와 추비로 나누어 시용하였고, 돈분퇴비는 440 kg 10a⁻¹를 기준으로 전량 기비로 투입하였다. 토양 이화학성의 결과를 보면 토양중의 NO₃-N 함량은 바이오차 처리 9일 후 가장 높게 나타났지만 처리간 유의성은 없었지만(p>0.05) NH₄-N 함량은 바이오차 처리 후 14일 후 바이오차 처리구에서 낮게 나타났다. 토양중의 P₂O₅ 함량은 바이오차 처리 후 19일 후 0.01%를 제외한 바이오차 처리구에서 낮게 나타났다. 토양 중 K₂O 함량은 바이오차 처리 후 6일 때 대조구와 비교하였을 때 0.01%와 0.03%가

^a 국립농업과학원 기후변화생태과 연구원 (Researcher, Department of Climate Change and Agro-ecology, National Institute of Agricultural Sciences)

^b 농촌진흥청 기술협력국 국외농업기술과 농업연구사 (Agricultural researcher, Division for KOPIA, Technology Cooperation Bureau, Rural Development Administration)

^c 국립농업과학원 기후변화생태과 과장 (Chair, Department of Climate Change and Agro-ecology, National Institute of Agricultural Sciences)

^d 국립농업과학원 기후변화생태과 연구사 (Principal scientist, Department of Climate Change and Agro-ecology, National Institute of Agricultural Sciences)

† Corresponding author(e-mail: jdshin1@korea.kr)

높게 나타났다. 하지만 다른 처리구와 비교 하였을 때 유의차가 인정되지 않았다. 질소 효율성을 보면 0.05%에서 가장 높았으며, 또한 토마토 생육도 바이오차 처리량에 관계없이 좋았다. 바이오차 0.05% 시용구에서 질소 효율성 및 토마토 생육과 수량이 가장 높게 나타났다. 바이오차 투입량 변화에 따른 탄소 격리량 산정에서는 0.03% 처리에서 2.83 mg kg⁻¹으로 가장 높게 나타났지만, 토마토 수량 측면에서 바이오차 적정 시용비율은 0.05%라고 판단된다.

주제어: 바이오차, 탄소격리, 식물 주요 양분, 토마토 재배

1. 서론

세계적으로 지구 온난화는 중요한 문제로 부각되고 있으며, 많은 연구자들과 연구 기관들이 온실가스(greenhouse gas, GHG)와 관련된 다양한 실험을 수행하고 있다. 대기 중의 온실가스 농도는 산업혁명이 시작된 이후로 계속해서 증가하고 있으며, 많은 국가들이 온실가스의 중요성을 깨닫게 되었다. 주요 온실가스로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 및 아산화질소(N₂O)가 있으며, 이 중 메탄과 아산화질소의 지구 온난화 지수(global warming potential, GWP)는 이산화탄소보다 각각 25배, 298배 높다¹⁾. 농경지에서 발생하는 아산화질소는 질소비료 시용량의 15.3%, 인간의 활동으로 발생하는 양의 약 41.8%를 차지하고 있다²⁾. Bouwman 등³⁾은 온실 가스 발생은 질소 비료(N fertilizer)와 가축분뇨의 사용으로부터 발생한다고 보고하였다.

토마토는 지구상에서 원예작물 중 가장 다음으로 많이 재배되는 작물(164만톤)로서 47만 ha의 면적에서 생과로 재배되고 있다⁴⁾. 토마토는 생과일로 섭취하거나 다양한 종류의 요리, 소스, 음료로 널리 사용되고 있으며, 건강에 유용한 라이코펜, 카로틴 등이 풍부해 황산화 물질을 함유하고 있어 건강채소로도 많은 주목을 받고 있다⁵⁾. 또한 국내 재배면적은 약 6,344 ha로 전체 채소류 중에서 차지하는 비중은 작은 편이나 세계적으로 볼 때 중국 984,603 ha, 인도 880,000 ha, 터키 311,000 ha 등의 순으로 많이 재배하고 있다⁶⁾.

바이오차는 산소가 부족하거나 전혀 없는 상태에서 바이오매스를 열처리 하여 얻은 탄소성 생산물로 1000℃ 이상 고온에서 만들어지는 숯과 구별 된다⁷⁾. 바이오차는 탄소 격리, 온실가스 저감 효과, 오염토

양의 안정화 및 토양개량을 통한 식물 성장촉진 등 토양개량제로서의 효과가 보고되고 있으며, 토양의 유기탄소를 증가시켜 토양에 탄소를 고정하는 능력이 뛰어나 세계적으로 주목받고 있다⁸⁾. 토양 내 질소순환을 통하여 발생하는 아산화질소의 발생을 저감하기 위한 방법으로 바이오차가 각광 받고 있으며, 바이오차 또한 토양에 첨가하여 토양 내 탄소를 격리시킴으로써 기후 변화를 완화시킬 수 있는 방법 중 하나로 여겨지고 있다⁹⁾. 바이오매스를 토양에 투입하여 미생물에 의해 유기물 분해 과정이 발생하는 동시에 토양 비옥도를 유지하는데 도움을 주는 방법이다^{10,11)}. 바이오차를 처리한 작물의 평균 수확량이 10% 증가된다고 보고되고 있지만, 작물마다 평균 산출량과 토양, 기후에 따라 다르며¹²⁾ 바이오차의 처리가 모든 현장에서 수확량을 증가시키지 않는다고 보고되었다¹³⁾. 작물생산에 대한 바이오차의 영향은 산성토양과 열대환경의 척박한 토양에서의 실험을 수행함으로써 대부분 입증되었다¹⁴⁾. 바이오차를 척박한 토양에 시용하면 토양의 보수력을 증가시키고, 알칼리성을 높여 줌으로써 바이오차의 석회시용 대체효과를 가져 온다¹⁵⁾. 반대로 온대 기후 알칼리성 토양에 바이오차를 시용하는 것은 작물 생산성에 부정적인 영향을 보여줬다¹⁶⁻²⁰⁾. 농작물 생산에는 바이오차가 토양 비옥도에 제한적인 영향을 미치기도 하는데²¹⁻²²⁾, 최근 보고서에 따르면, 작물 수확량에 대한 바이오차의 효과는 토양 비옥도 상태와 반비례 관계임을 보여주었다²³⁾. 바이오차를 토양개량제로 토양에 첨가하게 되면, 탄소를 격리시켜 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 배출을 줄이고, 토양 보수력을 증가시키며, 이온교환작용을 향상시키는 등과 같이 농업 생산성을 향상시킬 수 있다고 보고된 바 있다²⁴⁾. 이러한 관점에서 비료 사용량을 줄

이고 작물 생산성을 증가시키며 지구 온난화를 예방할 수 있는 바이오차에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 많은 연구자들은 토양에 바이오차를 사용하는 것이 순수한 질화작용 비율을 증가시키고 작물이 이용하는 질소의 유효도를 변화시킨다고 보고하고 있다^{25,26}. 바이오차는 우분, 돈분, 음식물 쓰레기, 퇴비 및 생체 고형분과 같은 질소 함유 물질을 원료로 사용함으로써, 질소 순환의 변화 효과도 있다. 이러한 바이오차의 사용은 토양에서 원하는 목표를 달성하기 위한 이상적인 선택일 수 있다.

국내에서 바이오차 활용은 암모늄태 질소(NH₄-N) 흡착, 인산염 인(PO₄-P) 흡착 등 바이오차의 흡착 특성에 대한 연구, 탄소 격리 적용을 위한 바이오차 펠릿을 이용한 작물 재배²⁷, 토양 개량²⁸ 및 온실가스 저감²⁹에 관한 연구 등이 보고된 바 있다.

일반적 작물에 대한 적정 바이오차 사용량은 1~2%이지만 바이오매스 생산 한계 및 바이오차의 높은 단가로 인한 바이오차의 저투입량에 대한 토마토 생육 반응에 대한 연구가 전무한 실정이므로, 본 연구는 토마토 재배에서의 바이오차 적정 사용 비율을 구명하고, 탄소 격리량을 산정하기 위해 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 처리 내용

토마토 품종은 완숙토마토용으로 농우바이오에서 시판하는 썬글로브로, 육묘용 트레이포트 50구(50 × 5 × 5.5 cm)에 파종하였으며, 파종 후 2주된 묘를 원통형 원예용 포트(250 × 25 × 30 cm)에 정식하였다. 재배시설은 측창, 출입문 등에 0.2mm 방충망을 설치하고 밀폐한 2중 유리온실에서 시험을 수행하였다. 시험 토양은 식양토(clayey loam)로서 토

마토 재배 추천 시비량에 준하여 비료와 퇴비를 사용하였다. 바이오차는 토양 중량 대비 0.01%, 0.03%, 0.05% 및 0.07%(w/w, 바이오차/토양)로 처리 수준별로 포트에 일정 중량의 토양에 비료, 퇴비와 바이오차를 혼합한 후 증진하였다. 비료 사용량은 N-P-K, 20.4-10.3-12.2 kg 10a⁻¹를 기비와 추비로 나누어 사용하였고, 돈분퇴비는 440 kg 10a⁻¹를 기준으로 전량 기비로 투입하였다. 바이오차는 고창 단위협동조합에서 왕겨를 소재로 하여 만든 제품을 구매하여 사용하였다. 시험구 완전임의 배치 3반복을 이용하여 배치하였다. 실험 전 토양 및 바이오차에 대한 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 토마토 재배 관리

관개는 점적 관수 콘트롤러(네타팜, 아쿠아프로)를 통해 각 포트마다 균등하게 물을 관수하였다. 온실의 평균 온도는 28.5°C, 관수량은 하루에 평균 167.6ml를 주었고, 오후에 두 시간씩 온실 측창, 천창을 열어 환기를 시켜주었다(Fig. 1).

2.3. 토양 화학성분 분석

토양 시료는 각 포트 별로 표토를 1cm 걷어낸 다음 10cm 깊이로 최대한 뿌리를 건드리지 않는 지점에서 Auger를 사용하여 100g 정도씩 채취하였다. 채취한 토양시료는 NH₄-N과 NO₃-N분석에 사용할 토양만 먼저 5g씩 무게를 측정하여 시료를 추출하는데 사용하였고, 나머지는 무게를 측정한 후 7일간 건조하여 고무망치로 입자를 분쇄한 후 2mm 체(Sieve)를 통과된 것을 화학성분 분석에 사용하였다.

토양 화학성분은 토양화학분석법³⁰을 적용하여, 토양의 pH와 EC는 토양 5g에 25mL 증류수를 가하여 1:5 비율로 30분간 왕복식 항온 진탕기(JP/NTS-3000, Eyla, Japan)에서 교반 속도 200rpm으로 진탕한 후,

Table 1. Physiochemical Properties of Soil Used in this Study

Soil type	pH	EC*	TC**	TN***	P ₂ O ₅	K ₂ O
Clay loam	(1 : 5)	dS m ⁻¹	-- g kg ⁻¹ --		-- mg kg ⁻¹ --	
	6.9	0.25	4.4	0.3	12.18	473.7
Biochar	9.8	82.63	566.3	2.0	-	-

*EC : Electrical Conductivity, **TC : Total Carbon, ***TN : Total Nitrogen

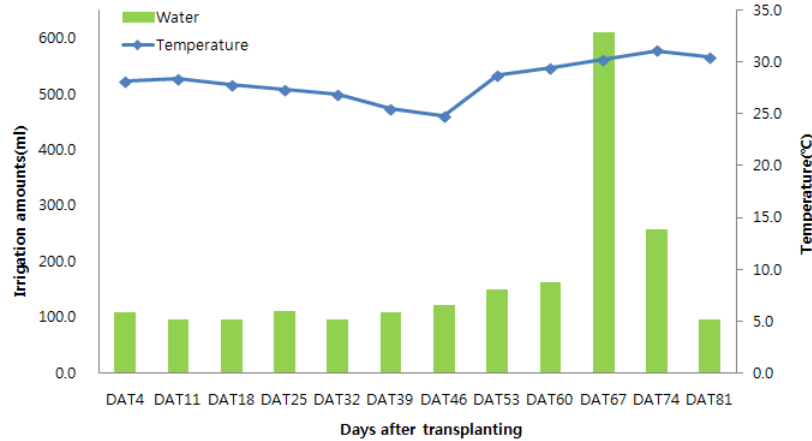


Fig. 1. Changes in temperature and irrigation amounts during tomato cultivation in the greenhouse over time.

Whatman 0.2 μm Nyl w/GMF 여과지를 사용하여 여과 후 pH/EC meter(Orion 4 star, Thermo scientific, USA)로 측정하였다.

토양의 TC(total carbon) 및 TN(total nitrogen)는 원소분석기(Vario EL II, Elementar, Germany)를 이용하여 측정하였다. 건조시킨 후 2mm 체에 거른 토양을 곱게 갈아, 350mg씩 정량하여 캔에 담은 후 950°C에서 WO_3 를 촉매로 사용하여 분석하였다.

$\text{NH}_4\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 채취해 온 습식 토양 5g과 2M KCl 25mL를 1:5 비율로 30분간 왕복식 항온 진탕기(JP/NTS-3000, Eyela, Japan)에서 교반 속도 200rpm으로 진탕한 후 Whatman 0.2 μm Nyl w/GMF 여과지를 사용하여 여과액을 걸러낸 후 UV Spectrophotometer 측정용 키트(C-Mac, Korea)로 질산성 질소 분석은 Chromotropic Acid 방법, 암모니아성 질소 분석은 Salicylate 방법으로 각각 분석하였다.

$\text{P}_2\text{O}_5\text{-P}$ 와 K_2O 의 분석은 Melich III(1984) 분석법을 이용하여 토양 2g에 추출액 20mL를 가하고 5분간 왕복식 항온 진탕기를 이용하여 교반 속도 200rpm으로 진탕한 후 Whatman 0.2 μm Nyl w/GMF 여과지를 사용하여 여과액을 걸러낸 후 UV Spectrophotometer를 사용하여 PO_4 와 K측정용 키트로 Molybdovanadate 및 Tetraphenylborate 방법을 이용하여 각각 분석한 후 변환하여 산출하였다.

2.4. 바이오차 투입량 변화에 따른 탄소 격리 산정

바이오차 투입량 변화에 따른 탄소 격리와 탄소 저장 효과를 산정하기 위해 다음 수식을 이용하였다.

$$SS_{TC} = (T_{TCi} - NT_{TCi}) \times SW \quad (\text{Eq. 1})$$

SS_{TC} 는 토양의 탄소량, T 는 바이오차 처리구의 탄소함량, NT 는 퇴비를 사용한 대조구의 탄소함량, i 는 시료 채취한 날짜이며 SW 는 토양의 무게이다.

이산화탄소($\text{CO}_2\text{-equiv.}$)의 저장 효과를 알아보기 위해 다음 공식을 사용하였다(Eq. 2).

$$\text{CO}_2\text{-equiv} = SS_{TC} \times CF_{SC} \quad (\text{Eq. 2})$$

SS_{TC} 는 토양의 탄소량, CF_{SC} 는 토양 탄소(1 kg C = 3.664 kg $\text{CO}_2\text{-equiv.}$)로부터의 CO_2 저장 변환 계수이다.

2.5. 토마토 생육조사 및 통계처리

토마토 생육 및 수량조사는 정식 후 60일에 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준³¹⁾을 적용하여 수확기에 각 포트마다 조사를 실시하였다. 주당 생체중은 뿌리를 제외한 식물체의 전체 무게를 조사하였다. 통계처리는 처리간에 유의차를 분석하기 위해 3반복 완전임의 배치법에 대한 SAS 9.0(SAS

Institute, Carry, NC, USA)을 이용한 ANOVA 분석을 하였으며, 결과는 평균과 표준편차로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 화학성의 변화

토양중의 NH_4^+ 는 질산화작용을 통해 용탈되기 쉬운 NO_3^- 로 빠르게 전환되며, 탈질 작용으로 인해 N_2O 또는 N_2 로 배출될 수 있으며, 그 결과 45~60%의 질소가 유실될 수 있다³²⁾. 만약 농경지에서 질산화작용이 억제된다면 식물은 토양으로부터 이용 가능한 NH_4^+ 를 더 많이 이용하게 될 것이고, 그렇게 함으로써 N 이용 효율이 개선되고, N 유실로 인한 환경 영향을 줄일 수 있다³²⁾.

바이오차 비율에 따른 토양 중 NO_3^- -N의 함량은 바이오차 0.05% 처리구에서 정식 후 12일에 102.0 mg kg^{-1} 으로 가장 높게 나타났으며, 토마토 정식 후 9일을 정점으로 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2).

질산화작용을 억제하기 위해 가장 일반적으로 사용하고 있는 방법은 질산화작용 억제제를 토양에 첨가하는 것이다³²⁾. 바이오차와 함께 사용되는 비료는 농작물의 질소 수요와 토양 질소 가용성 사이의 질소의 사용 효율을 높이고 환경에 대한 영향을 줄이기 위해 제안되었다. 그러나 바이오차가 이 과정

에 영향을 미치는 메커니즘은 아직 알려져 있지 않았다. London 등³³⁾은 최근에 바이오차가 토양 개량제로서 사용한 이후 N_2O 이 배출량 감소된다고 보고하였는데, 콜롬비아 사바나 지역에서 N_2O 배출이 대두는 50% 이상, 잔디는 80% 이상 각각 감소된다고 하였다.

바이오차를 토양에 처리하여 토마토를 재배할 경우 같은 영양분을 공급하였을 때 토양에 남아있는 질소가 많아 실질적인 질소이용효율도 높아져 비료의 사용량도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이는 바이오차의 양분보유능력에 대한 기존 연구결과³⁴⁾와도 같았으며, 질소의 토양 내 보유능력증가에 따른 질소 휘산량의 감소와도 연관될 것으로 판단된다.

처리별 바이오차 비율에 따른 NH_4 -N 함량을 보면 정식 후 3일째 대조구가 103.7 mg kg^{-1} 으로 가장 높았으며, 그 이후 감소하는 경향을 보였다. 그러나 정식 후 14일째 이후로 바이오차 처리가 대조구보다 NH_4 -N 함량이 적게 나타났다(Fig. 3).

처리별 바이오차 비율에 따른 토양중의 P_2O_5 의 함량은 정식 후 19일째에 바이오차 0.01% 처리에서 147.3 mg kg^{-1} 으로 높았지만 다른 처리구에서는 대조구보다 낮게 나타났다(Fig. 4). 바이오차 처리에 따라 토양의 유효태 인의 함량은 모든 처리구에서 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 바이오차가 함유하고 있는 인에 의한 총량이 증가한 것으로, 바이오

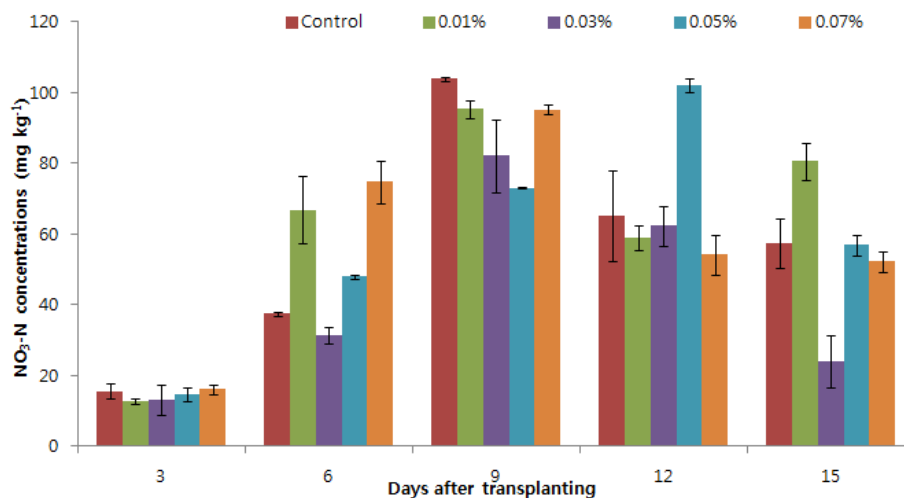


Fig. 2. Changes of NO_3 -N contents in the soil incorporated with different ratios of biochar during tomato cultivation.

차 처리에 의한 효과로 판단된다.

바이오차 투입비율에 따른 토양 중 K₂O 함량 변화를 보면, 정식 후 6일째에 바이오차 0.01%에서 7.5 mg kg⁻¹으로 가장 낮았으나 정식 후 11일 이후부터 모든 처리구에서 K₂O 함량이 올라가는 경향을 보였다. 이에 대조구와 각 처리구를 비교하였을 때 유의차는 인정되지 않았다(p>0.05) (Fig. 5).

처리별 질소 소모율은 0.05% 처리에서 1.34g로 가

장 크게 나타났고 바이오차 시용에 따른 질소 효율성을 보면 0.05% 처리에서 0.12g로 가장 높았으며, 바이오차 투입량 0.05% > 0.07% ≈ 0.03% > 0.01% 순으로 나타났다(Table 2).

처리별 바이오차의 탄소 격리량 산정은 수식1에 의해 산출하였다(Table 3). 이산화탄소 저감 효과는 수식2에 의해 산정되었고, 바이오차 0.03% 처리구에서 2.83 mg kg⁻¹로 높게 나타났으며, 탄소 격리량

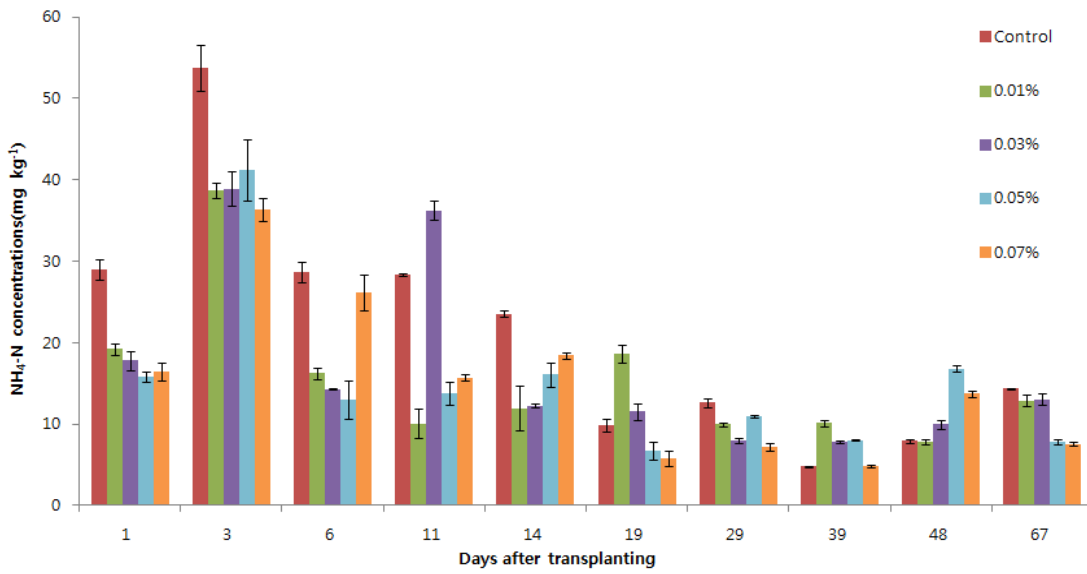


Fig. 3. Changes of NH₄-N contents in the soil incorporated with different ratios of biochar during tomato cultivation.

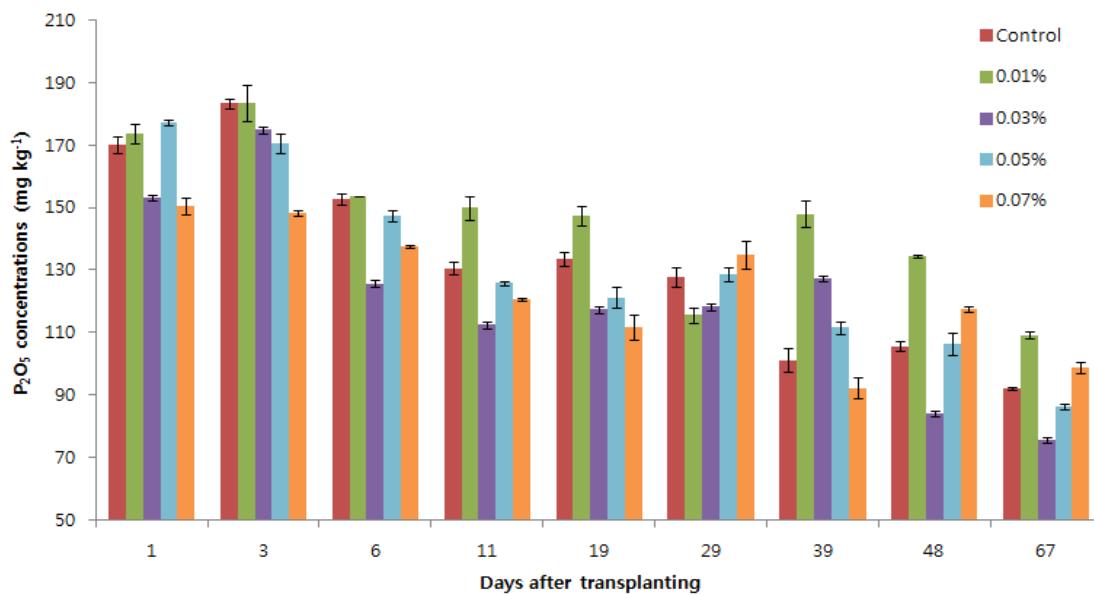


Fig. 4. Changes of P₂O₅ contents in the soil incorporated with different ratios of biochar during tomato cultivation.

은 바이오차 0.03% 처리구에서 0.77g kg⁻¹으로 가장 높게 산정 되었다. 탄소 격리를 위한 바이오차 펠렛형 완효성 비료를 사용하여 상추 재배를 하였을 때, 상추 수량을 13% 증가 시켰으며, 작물 재배 시 토양 탄소격리 및 온실가스 완화를 위해 유용하다고 보고하였다²⁷⁾.

밭 토양에서 추천 사용량의 절반인 바이오차를 6

ton ha⁻¹ 처리한 경우 밀의 수량이 대조구에 비해 340 ton ha⁻¹ 증가(18%)하였으며, 바이오차 1.5 ton ha⁻¹과 무기질 비료를 혼합하여 처리한 경우 수량이 46% 증대되었다³⁵⁾. 그러나 바이오차 사용으로 토양 유기물 함량이 1.5배 증가하였지만³⁶⁾ 토양에 12 ton · ha⁻¹ 이상 과다하게 사용할 경우 양분 흡착으로 인한 작물 생육 부진이 올 수 있기 때문에 작물에 따른 적정 시

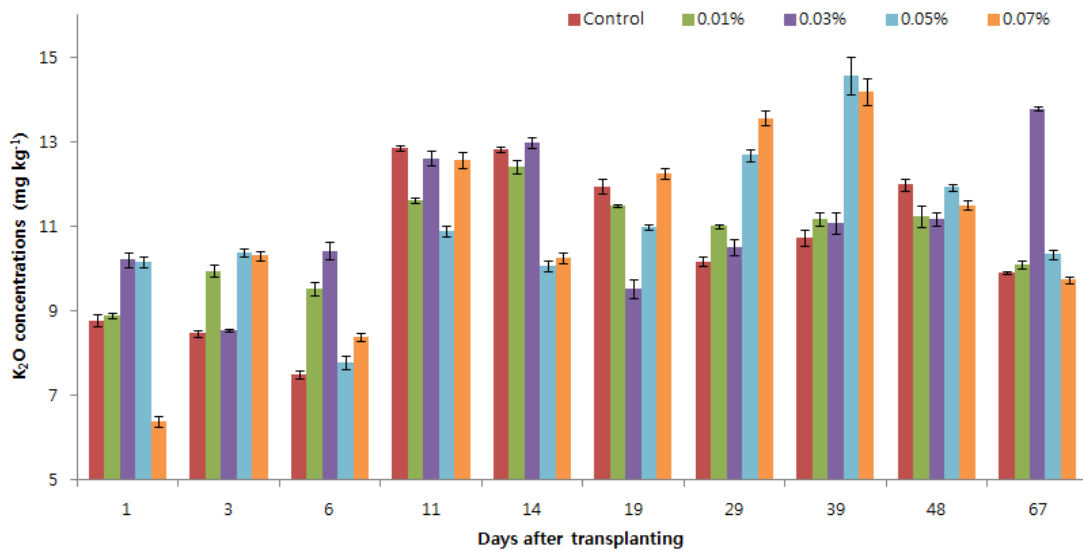


Fig. 5. Changes of K₂O contents in the soil incorporated with different ratios of biochar during tomato cultivation.

Table 2. Estimation of the Nitrogen Use Efficiency with Different Ratios of Biochar Application

Treatments	Input amounts of T-N (g)	Residual amounts of T-N (g)	Nutrient loss rates	Nitrogen use efficiency rates of biochar application
Control	131.2	107.6	1.22	-
0.01%	133.4	108.1	1.23	0.01
0.03%	137.6	106.1	1.30	0.08
0.05%	141.8	105.5	1.34	0.12
0.07%	146.0	111.3	1.31	0.09

Table 3. Estimation of the Efficiency Rates for Carbon Use with Different Ratios of Biochar Application

Treatments	Carbon sequestration (g kg ⁻¹)	Potential carbon sequestration (g kg ⁻¹)	Mitigation of CO ₂ - equiv. (mg kg ⁻¹)	Potential mitigation of CO ₂ - equiv. (mg kg ⁻¹)
Control	0.21	-	0.78	-
0.01%	0.60	0.39	2.21	1.43
0.03%	0.99	0.77	3.61	2.83
0.05%	0.94	0.73	3.43	2.65
0.07%	0.40	0.19	1.47	0.69

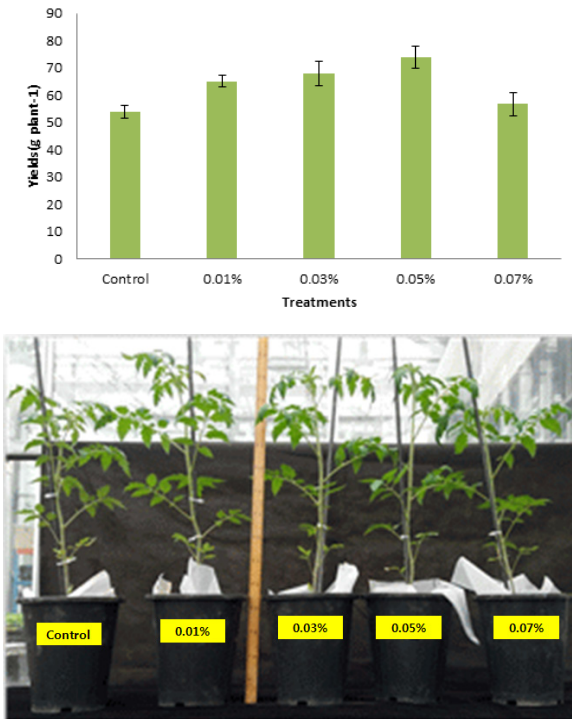


Fig. 6. Comparisons of tomato yield with different ratios of biochar application.

용량을 검토할 필요가 있다³⁷⁾. 본 연구는 토마토를 재배할 경우 바이오차 적정 시용비율과 탄소 격리량을 산정하기 위해 바이오차의 투입량을 변화시켰기 때문에 다른 작물 연구 결과와 비교하여 상호 비교하는 것은 바람직하지 않다고 생각된다. 이러한 관점에서 본 시험의 결과로 밭 토양에서 토마토를 재배하기 위한 바이오차 적정 시용량은 0.05%인 것으로 판단된다.

바이오차 처리별 토마토의 수량을 알아보기 위해 조사한 결과는 대조구보다 각 바이오차 처리구에서 수량이 높게 나타났고 특히 바이오차 투입량 0.05% 처리에서 가장 높게 나타났다(Fig. 6).

4. 결론

본 실험은 바이오차 시용량에 따른 작물 생육 반응과 바이오차 적정 시용비율을 구명하고, 탄소 격리량을 산정하기 위해 수행하였다. 토양 이화학적의 결과를 보면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 K_2O 함량은 바이오차 처리 후

시간이 경과할수록 높게 나타났고, $\text{NH}_4\text{-N}$ 및 P_2O_5 은 시간이 지날수록 바이오차 처리구에서 낮게 나타났다. 바이오차 0.05% 시용구에서 질소 이용 효율성 및 토마토 생육과 수량이 가장 좋게 나타났으며, 탄소 격리량 산정은 0.03% 처리에서 2.83 mg kg^{-1} 으로 가장 높게 나타났다. 토마토 수량 측면을 고려하면 바이오차 적정 시용비율은 바이오차 투입 0.05%라고 판단된다.

이처럼 바이오차는 작물 수량 증대와 토양 환경 관리에 매우 유용한 유기물 자원으로서 향후 장기적인 시용 효과 및 온실 가스 저감에 대한 지속적인 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구과제 (Project No. PJ013814012018)로 수행되었음을 감사하게 생각합니다.

References

1. Signor, D. and Cerri, C. E. P., "Nitrous Oxide Emissions in Agricultural Soils: A Review", *Pesq. Agropec. Trop.* 43(3), pp. 322~338. (2013).
2. Denman, K. L., et al., Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In: Solomon, S., et al., Eds., Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 500~587. (2007).
3. Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., and Batjes, N. H., "Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data", *Global Biogeochem. Cycles*, 16, doi:10.1029/2001GB001811, (2002).
4. FAOSTAT, Food and Agriculture Organization the United Nation. <http://faostat3.fao.org/download/Q/>

- QC/E. (2015).
5. Beecher, G. R., Nutrient Content of Tomatoes and Tomato Products. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 218, pp. 98~100. <http://dx.doi.org/10.3181/00379727-218-44282a>. (1998).
 6. FAO, FAO Statistical Databases of Agriculture, United Nations, Rome. (2012).
 7. Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., and Weatherley, A., "An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate", *Biomass Bioenerg.*, 84, pp. 49~58. (2016).
 8. Han, J. H., Seo, D. C., Kang, S. W., Choi, I. K., Jeon, W. T., Kang, U. G., Kang, S. J., Heo, J. S., Kim, S. D., and Cho, J. S., "Evaluation of fertilizer value of biochars using water plants", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44(5), pp. 794~800. (2011).
 9. Lehmann A., et al., "Blm10 binds to pre-activated proteasome core particles with open gate conformation", *EMBO Rep.*, 9(12), pp. 1237~1243. (2008).
 10. Biederman, L. A., Harpole, W. S., "Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis", *Global Change Biol. Bioenergy*, 5, pp. 202~214. (2013).
 11. Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., and Joseph, S., "Sustainable biochar to mitigate global climate change", *Nat. Commun*, 1(56), pp. 1~9. (2010).
 12. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., and Bastos, A. C., "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using met-analysis", *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, pp. 175~187. (2011).
 13. Amonette, J. E., Hu, Y., Schlekewey, N., Dai, S. S., Shaff, Z. W., Russell, C. K., et al., "Biochars are not created equal: a survey of their physical, structural, and chemical properties and implications for soil application", Presentation given at the North American Biochar Conference 2009, Boulder, CO Retrieved August 30, 2010, from <http://cees.colorado.edu/docs/AmonetteProductionPresentationNABC2009.pdf>. (2009).
 14. Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., and Torn, M. S., "Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis", *Environ. Res. Lett.*, 8(4), pp. 044049~044057. doi:<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044049>. (2013).
 15. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., and Bastos, A. C., "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using met-analysis", *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, pp. 175~187. (2011).
 16. Borchard, N., Siemens, J., Ladd, B., Möller, A., and Amelung, W., "Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice", *Soil Till. Res.*, 144, pp. 184~194. (2014).
 17. Jones, D. L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H., and Murphy, D. V., "Biochar mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial", *Soil. Biol. Biochem.*, 45, pp. 113~124. (2012).
 18. Quilliam, R. S., Marsden, K. A., Gertler, C., Rousk, J., DeLuca, T. H., and Jones, D. L., "Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate", *Agric. Ecosyst. Environ.*, 158, pp. 192~199. (2012).
 19. Rousk, J., Dempster, D. N., Jones, D. L., "Transient biochar effects on decomposer microbial growth rates: evidence from two agricultural case-studies", *Eur. J. Soil Sci.*, 64, pp. 770~776. (2013).
 20. Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F. L., Alakukku, L., and Helenius, J., "Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean", *Plant Soil*, 374, pp. 89~107. (2014).
 21. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., and Bastos, A. C., "A quantitative review of the effects

- of biochar application to soils on crop productivity using met-analysis”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, pp. 175~187. (2011).
22. Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., and Paz-Ferreiro, J., “Biochar’s effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions a meta-analysis of literature data”, *Plant Soil*, 373, pp. 583~594. (2013).
 23. Jay, C. N., Fitzgerald, J. D., Hipps, N. A., and Atkinson, C. J., “Why short-term biochar application has no yield benefits: evidence from three field-grown crops”, *Soil Use Manage.* doi:http://dx.doi.org/10.1111/sum.12181. (2015).
 24. Woo, S. H., “Biochar for soil carbon sequestration”, *Clean Technology*, 19(3), pp. 201~211. (2013).
 25. Ding, Y., Liu, Y., Wu, W., Shi, D., Yang, M., and Zhong, Z., “Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns”, *Water Air Soil Pollut.*, 213(1), pp. 448~453. (2010).
 26. Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., and Glaser, B., “Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments”, *Plant Soil*, 249(2), pp. 343~357. (2003).
 27. Shin, J. D., Choi, Y. S., Choi, E. J., Kim, M. S., and Heo, J. W., “Evaluation of efficiency to Plant Growth in Horticultural Soil Applied Biochar Pellet for Soil Carbon Sequestration”, *J. of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 25(3), pp. 73~78. (2017).
 28. Jung, W. K., “Rice yield response to biochar application under different water managements practices”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 45(1), pp. 16~19. (2012).
 29. Kim, D., K. Cho, T. Won, I.T. Bak, and G. Yoo., “Changes in crop yield and CH₄ emission from rice paddy soils applied with biochar and slow-release fertilizer”, *Korean J. Environ. Biol.*, 32(4), pp. 327~334. (2014).
 30. NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology), *Methods of soil chemical analysis*. Suwon, Korea. (2010).
 31. RDA (Rural Development Administration), *Standard of analysis and survey for agricultural experiment*. Suwon, Korea. (2012).
 32. Abbasi, M. K., Hina, M., and Tahir, M. M., “Effect of Azadirachta indica(neem), sodium thiosulphate and calcium chloride on changes in nitrogen transformations and inhibition of nitrification in soil incubated under laboratory conditions”, *Chemosphere*, 82, pp. 1629~1635. (2011).
 33. Rondon, M., Ramirez, J. A., and Lehmann, J., Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils, [http://soil carbon center.k-state.edu/conference/USDA/Abstracts/html/Abstract/Rondon.htm](http://soilcarboncenter.k-state.edu/conference/USDA/Abstracts/html/Abstract/Rondon.htm). (2005).
 34. Blackwell, P., Joseph, S., Munroe, P., Anawar, H. M., Storer, P., Gilkes, R. J., and Solaiman, Z. M., “Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonisation and nutrition of wheat and sorghum”, *Pedosphere.*, 25, pp. 686~695. (2015).
 35. Solaiman, Z. M., Blackwell, P., Abbott, L. K., and Storer, P., “Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat”, *Aust. J. Soil Res.*, 48, pp. 546~554. (2010).
 36. Laird, D. A., Novak, J. M., Collins, H. P., Ippolito, J. A., Karlen, D. L., Lentz, R. D., Sistani, K. R., Spokas, K., and Van Pelt, R. S., “Multi-year and multi-location soil quality and crop biomass yield responses to hardwood fast pyrolysis biochar”, *Geoderma*, 289, pp. 46~53. (2017).
 37. Sorensen, R. B. and M. C. Lamb, “Crop yield response to increasing biochar rates”, *J. Crop Improvement*, 30(6), pp. 703~712. (2016).