환경영향평가 Vol. 34, No. 4(2025), pp.209-222 J. Environ. Impact Assess. 34(4): 209-222(2025) ISSN 1225-7184
https://doi.org/10.14249/eia.2025.34.4.209

Research Paper

바이오차 처리에 따른 생활권 녹지 토양 환경과 수목 생육 변화

– 느티나무를 대상으로 –

이성훈 · 김학구 · 임윤경 · 권경원 · 황유경 · 피정훈 · 김찬범

한국수목원정원관리원

Changes in Tree Growth and Soil Environment Following Biochar Application in Urban Green Spaces

– A Case Study on *Zelkova serrata* –

SeongHun Lee · HakKoo Kim · YunKyung Lim · GyeongWon Kwon · YuGyeong Hwang · JungHun Pi · ChanBeom Kim

Korea Arboreta and Gardens Institute

요약: 바이오차는 탄소격리를 이용한 기후변화 대응과 토양 개량을 통한 식물 생육 등 다양한 측면에서 필요성을 가지고 있다. 농업에서는 작물 생육을 증가시키기 위한 바이오차 연구가 진행되고 있으나 수목을 대상으로 한 연구는 드문 상황이다. 이에 본 연구는 생활권 녹지에서 생육하고 있는 느티나무를 대상으로 바이오차 처리(16kg/m^2, 4kg/m^2, 0kg/m^2)에 따른 토양 환경과 수목 생육 변화에 대해서 모니터링하고 분석하였다. 2023년 7월부터 2025년 3월까지 각 처리구의 토양 수분, 토양 온도, 전기전도도 데이터를 취득하고 토양 이화학성 분석을 시행하였으며 느티나무의 흉고직경, 근원직경, 수고를 측정하였다. 모니터링 결과 토양 환경에서 토양 수분과 전기전도도가 통계적 유의성을 나타냈으며 16kg 처리구가 다른 처리구보다 확연하게 높은 수분보유능과 전기전도도를 가진 것으로 나타났다. 토양 이화학성 분석에서는 양이온치환용량, 유기물, 전질소, 총탄소에서 통계적 유의성이 나타났다. 수목 생육에서는 흉고직경에서 통계적 유의성이 나타났으며 4kg 처리구에서 가장 높은 생장률(24.55%)을 보였고 16kg 처리구에서는 가장 낮은 생장률(19.46%)을 보였다. 상관관계를 확인한 결과 토양 수분과 전기전도도가 높아질수록 흉고직경 생장에는 불리하다는 것을 확인하였다. 본 연구는 과도한 바이오차 처리(16kg/m^2)가 오히려 수목 생장을 저해할 수 있음을 규명하였고 토양의 탄소저장 능력과 느티나무 생육에 최적인 처리량(4kg/m^2)에 대해 확인하였다. 이는 생활권 녹지 조성 및 관리를 위한 바이오차의 효과적인 적용 방안을 마련하는 데 중요한 기초자료가 될 것이다.

주요어: 흉고직경, 토양 수분, 전기전도도, 탄소

First Author: SeongHun Lee, Tel: +82-44-251-0251, E-mail: dbajdls00@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0003-0562-494X
Corresponding Author: ChanBeom Kim, Tel: +82-44-251-0211, E-mail: misdb83@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3373-2000
Co-Authors: HakKoo Kim, Tel: +82-44-251-0218, E-mail: hakkoo1@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-4300-7590
YunKyung Lim, Tel: +82-44-251-0299, E-mail: dbsrud0224@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0001-8723-3269
GyeongWon Kwon, Tel: +82-44-270-5143, E-mail: tyg04003@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0008-8568-6801
YuGyeong Hwang, E-mail: aragonjr@naver.com, ORCID: 0009-0006-6399-0816
JungHun Pi, Tel: +82-44-251-0173, E-mail: ecopjh@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-2383-3991

Received: 28 April, 2025. Revised: 16 July, 2025. Accepted: 4 August, 2025.

www.kci.go.kr

Abstract: Biochar is necessary in various aspects such as responding to climate change using carbon sequestration and improving plant growth through soil improvement. In agriculture, biochar research is being conducted to increase crop growth, but research targeting trees is rare. Therefore, this study monitored and analyzed changes in soil environment and tree growth according to biochar treatment (16 kg/m², 4 kg/m², 0 kg/m²) of *Zelkova serrata* growing in green areas in residential areas. From July 2023 to March 2025, soil moisture, soil temperature, and electrical conductivity data for each treatment area were acquired, soil physicochemical analysis was performed, and the diameter at breast height, root diameter, and tree height of *Zelkova serrata* were measured. The monitoring results showed that soil moisture and electrical conductivity were statistically significant in the soil environment, and the 16 kg treatment area had significantly higher water retention capacity and electrical conductivity than other treatment areas. In soil physicochemical analysis, cation exchange capacity, organic matter, total nitrogen, and total carbon showed statistical significance. In tree growth, statistical significance was shown in the diameter at breast height, and the 4 kg treatment showed the highest growth rate (24.55%), while the 16 kg treatment showed the lowest growth rate (19.46%). As a result of confirming the correlation, it was confirmed that the higher the soil moisture and electrical conductivity, the more unfavorable it was for the growth of the diameter at breast height. This study revealed that excessive biochar application (16 kg/m²) can actually inhibit tree growth and identified the optimal application dose (4 kg/m²) for soil carbon storage capacity and *Zelkova serrata* growth. This will serve as valuable baseline data for developing effective biochar application strategies for creating and managing green spaces in residential areas.

Keywords: Diameter at breast height, Soil moisture, Electrical conductivity, Carbon

I. 서론

바이오차(Biochar)는 바이오매스(Biomass)와 숯(Charcoal)의 합성어로 목재, 농업부산물, 가축분뇨 등과 같은 바이오매스를 산소가 제한된 환경에서 열분해하여 제조한 탄소함량이 높은 고형물을 말한다(Lee et al. 2023; Jang et al. 2023). 바이오차 내 탄소는 열분해를 거치면서 안정된 형태의 방향족 구조로 재배열되어 토양 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는다(Hong et al. 2020; Lee et al. 2021). 바이오차는 탄소격리를 이용한 기후변화 대응과 농업 분야에서 토양비옥도와 작물 생육을 위한 토양개량 등 다양한 측면에서 연구와 활용의 필요성을 가지고 있다(Woo 2013; Hong et al. 2020; Baek et al. 2023). 기후변화 측면에서는 대기 중의 이산화탄소를 바이오차 형태로 고정화하며 토양에 격리함으로써 탄소 순환의 속도를 느리게 하고 이산화탄소 배출을 억제할 수 있다(Lehmann 2007; Woo 2013; Park et al. 2019). 토양 개량 측면에서는 바이오차를 토양에 첨가하면 pH 증가, 물 유지 능력 향상, 이온 교환 능력 향상 등 다양한 특성으로 인해 식물 생육을 향상시킬 수 있다(Woo 2013; Jang et al. 2023). 바이오차의 활용은 농업 분야뿐만 아니라 도시숲, 정원과 같은 생활권 녹지에서도 중요하다. 생활권 녹지는 미세먼지 저감, 폭염 완화, 생물다양성 증진 등 다양한 생태적, 사회적 기능을 수행하고 있다(Park & Seo 2023; Kim et al. 2023). 이곳에 바이오차를 적용한다면 토양의 물리적 특성 개선과 더불어 생육 향상을 통한 탄소저장량을 높일 수 있으며 도시 환경의 기후변화 대응력을 높일 수 있다.

그러나 바이오차의 효과는 처리량과 토양의 특성에 따라 달라질 수 있어 모든 상황에서 식물 생육을 향상시킬 수 있는 것은 아니다(Amonette et al. 2009). 특히 생활권 녹지에서는 제한된 생육 공간과 인간의 영향 등으로 인해 물리적, 화학적 특성이 일반적인 토양과는 다르고 유기물 함량이나 배수성이 부족할 수 있다(Yoon 2022). 적절한 양을 사용할 경우 토양의 물리적, 화학적 특성을 개선하고 탄소를 격리할 수 있지만 과도한 양을 사용할 경우 토양의 pH를 너무 높게 만들거나 양분 흡착으로 인해 식물의 생육이 저해될 수 있다

www.kci.go.kr

(Park et al. 2019; Lee et al. 2024). 따라서 바이오차의 효과를 극대화하려면 적절한 처리량을 규명하는 것이 필요하다.

지금까지의 바이오차에 관한 선행연구는 국내의 경우 농업 분야에서 주로 진행되었으며 바이오차 제작 재료에 따른 효과 분석(Jang et al. 2023), 바이오차 사용이 토마토, 상추 등 작물의 생육에 미치는 영향(Park et al. 2019; Park et al. 2022; Lee et al. 2024), 밭의 토양 이화학성 변화(Jang et al. 2018) 혹은 탄소저장량 분석(Lee et al. 2021) 등에 초점이 맞추어져 있었다. 산림 분야에서는 산불피해지에 바이오차를 사용하여 굴참나무 생육에 미치는 영향을 조사한 연구(Jung et al. 2023)가 있었으나 이를 제외하고는 산림 혹은 수목을 대상으로 한 연구는 찾아보기 어려웠다. 이러한 선행연구들은 밭에서 작물들을 대상으로 하거나 산지를 대상으로 진행하여 종, 생육환경 등의 차이로 인해 생활권 녹지에 적용하기에는 다소 한계가 있었다. 선행연구를 바탕으로 생활권 녹지에서 바이오차 효과를 극대화하기 위한 적절한 처리량을 파악하기에는 어려웠다. 국외의 경우 Mwadalu et al. (2021)은 *Casuarina equisetifolia*를 대상으로 한 연구에서 바이오차를 사용하였을 때 수고, 근원직경, 흉고직경이 더 높게 나타났다고 보고하였으며 바이오차를 사용하면 토양의 물리적 특성을 개선하는 동시에 생장을 촉진할 수 있다고 하였다. Zhang et al. (2022)은 바이오차 관련 96건의 연구를 요약한 결과 대부분의 경우 수목의 생장을 촉진하였으며 주로 영양분 공급, 토양 물리·화학적 특성 개선, 뿌리의 영양분 흡수 능력 향상, 생장 공간 확대에 기인한 것으로 나타났다고 보고하였다. Schaffert et al. (2022)은 바이오차의 효과를 평가한 연구는 생장 및 건강 증진에 상당한 효과를 보이는 경우부터 전혀 없는 경우까지 다양했으나 도시 내 수목에 대한 바이오차 연구는 극히 적었다고 보고하며 도시 환경의 다양한 조건에서 장기적인 연구가 필요하다고 언급하였다.

국내 연구는 주로 농업 분야에서 진행되어 생활권 녹지 수목에 적용하기에는 한계가 있었고 국외 연구는 국외 종을 이용한 연구와 환경 차이 등으로 인해 직접적으로 적용하기에는 어려웠다. 이에 본 연구는 생활권 녹지에서 느티나무를 대상으로 현장실험을 통해 바이오차 처리량에 따라 토양 환경과 수목 생육이 어떻게 달라지는지 분석하고 영향을 주는 인자를 파악하여 향후 도시숲, 정원 등 생활권 녹지에 현장 적용을 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

II. 연구방법

1. 대상지 개황

본 연구는 2020년 7월에 설립된 국내 최초의 도심형 수목원인 국립세종수목원에서 수행되었으며 세종특별자치시 연기면 수목원로 136에 있다. 국립세종수목원은 신도시 조성 계획에 따라 장남평야 논 지역에 1m의 인위적인 토양 복토 등 식생 복구를 통해 생활권 녹지를 조성한 곳으로 도시 중심부에 있다. 주변에는 금강이 흐르고 있으며 세종호수공원, 중앙공원과 함께 세종특별자치시의 주요 녹지공간으로 조성되어 있다(Kim et al. 2023). 연 평균 기온은 14.4°C, 연 강수량은 1,210.8mm이며 연 평균 풍속은 0.8m/s이다(National institute of forest science 2025). 국립세종수목원은 총 면적 65.0ha에 전시원 26개소로 구성되어 있으며 식물 4,367종 248만 본이 식재되어 있다(Sejong national arboretum 2025). 이러한 다양한 구성은 도시 녹지에 적용할 수 있는 식재 모델과 관리 기법을 개발하고 확산하기 위한 사례로서 역할을 수행하고 있다. 그 역할의 하나로 탄소중립 기능을 극대화할 수 있는 정원 모델을 개발하여 정원의 탄소흡수 기능 강화 및 확산에 기여하고자 2022년 12월 사계절 온실 옆 잔디밭 공터(사양토)에 약 1,500m^2 규모의 탄소정원을 조성하였다(녹지 면적 1,205m^2 / 약 80.3%)(Figure 1A).

탄소정원은 바이오차 처리량에 따른 탄소흡수량 차이를 알아보기 위한 A 실험구(207.9m^2), 교목 밀도에 따른 탄소흡수량 차이를 알아보기 위한 B 실험구(207.9 m^2), 탄소흡수 우수 수종에 따른 탄소흡수량 차이를 알아보기 위한 C 실험구(207.9m^2)로 구성되어 있다(Figure 1B). 본 연구는 A 실험구에서 진행되었다. A 실험구는 m^{2}당 바이오차(경동) 16kg 처리구(type-A3), 4kg 처리구(type-A2), 0kg 처리구(type-A1)로 구분하였으며 가로 7m, 세로 3.3m의 동일면적 3개소로 구분하여 총 9개의 시험구가 조성되어 있다(Figure 1C). 1개 시험구당

www.kci.go.kr

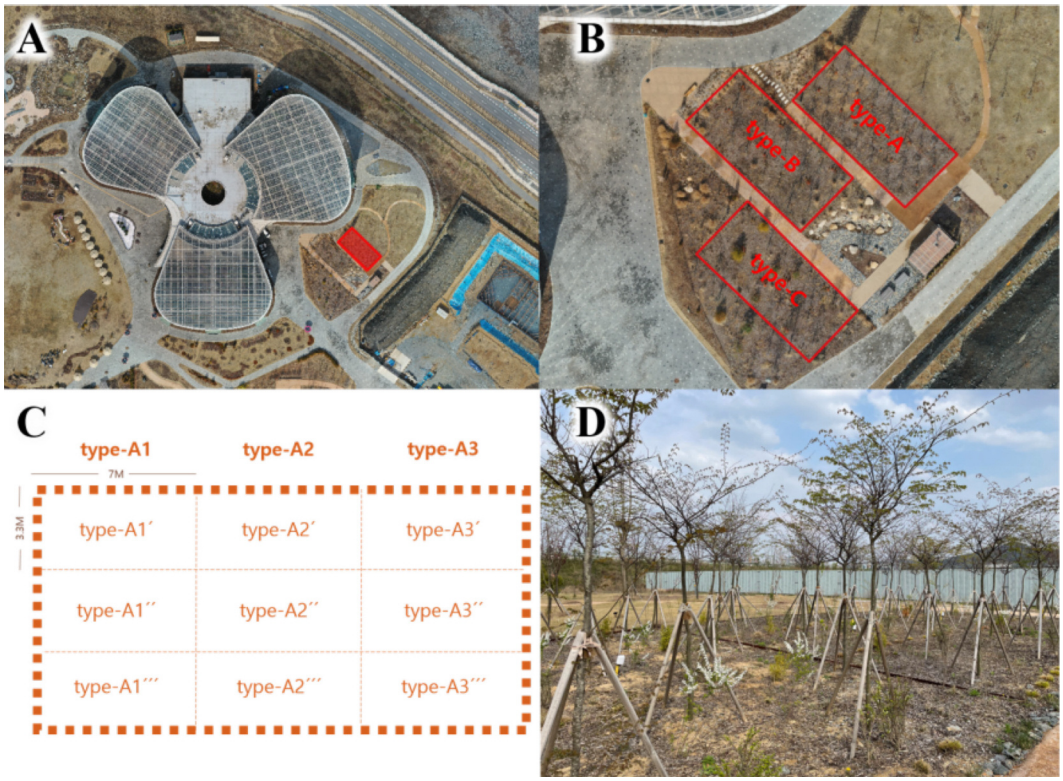

Figure 1. Biochar experiment site. A is the experiment site located in the carbon garden next to the National Arboretum's Four Seasons Greenhouse. B is the layout according to the type of carbon garden. C is the three test plots according to the amount of biochar used, and each test plot is divided into three parts, making a total of nine test plots. D is the *Zelkova serrata* planting site

면적은 23.1m²이며 바이오차의 처리는 수목(굴참나무)을 대상으로 진행된 선행연구(Jung et al. 2023)에서 더 좋은 생육을 보였다고 보고된 토양 내 바이오차를 혼합하는 식혈방법으로 처리하였다. m²당 16kg, 4kg, 0kg으로 시험구를 배치하였으며 4kg을 중심으로 두었다. 바이오차의 토양과 수목 생육에 대한 효과 검증과 향후 연구에서 바이오차 사용의 최적값을 찾아보기 위해 양쪽에 극값을 두어 m²당 16kg과 0kg 처리구를 두었다. 수목은 생활권 녹지 식재 수종 중 탄소흡수량이 우수한 종으로 알려진 느티나무(Jo & Ahn 2012)를 5주씩 식재하였다(Figure 1D). 느티나무는 국립세종수목원이 소재한 세종특별자치시에서 근원직경 5cm 초과 6cm 이하의 수목을 구하여 2022년 12월 식재하였다. 수목 관리에 있어 인위적인 간섭은 최소화하였으며 전정 작업에 대해서도 고사지에 대한 제거만 이루어졌을 뿐 생육 변화를 줄 수 있는 전정은 시행하지 않았다.

2. 조사 방법

2023년 7월부터 2025년 3월까지 바이오차 처리량에 따른 토양 환경 변화와 느티나무의 생육을 모니터링하였다. 토양 환경 변화를 모니터링하기 위해 토양 센서(WatchDog Station, Spectrum Technologies, Inc., USA)를 바이오차 처리구별로 토양 10cm 깊이에 1개씩 설치하였다. 이를 통해 1시간 주기로 토양 수분, 토양 온도, 전기전도도 데이터를 취득하였다. 또한 각 처리구(16kg, 4kg, 0kg)별로 깊이 20cm까지 혼합된 토양을 3반복 채취하여 토양의 이화학성을 분석하였다. 느티나무의 생육을 모니터링하기 위해 바이오차 처리구별로 구분하여 총 5차례(23년 7월, 24년 1월, 24년 7월, 24년 10월, 25년 3월)에 걸쳐 흉고직경, 근원직경, 수고를 측정하였다. 흉고직경과 근원직경(지상으로부터 1cm 지점)은 직경테이프를 이용하여 1mm 단위로 측정하였으며 수고는 수고봉을 이용하여 1cm 단위로 측정하였다.

www.kci.go.kr

3. 수목 생장률 계산

총 5차례의 모니터링 기간 동안 4번의 생장률을 계산하였다. 최초 모니터링으로 취득된 흉고직경, 근원직경, 수고 값을 바탕으로 다음 모니터링 때 취득된 값과 비교하여 생장률을 확인하였다. 각 바이오차 처리구(16kg, 4kg, 0kg)의 시험구 3개에 시험구 1개 당 느티나무 5주의 생장률을 평균하였고 시험구 3개에 동일하게 적용하였다(3반복). 이후 시험구 3개의 값을 평균하여 처리구 당 15주의 생장률을 구하였다. 본 연구의 결과에서는 바이오차 처리에 따른 차이를 확연하게 알아보기 위해 가장 최근의 모니터링(2025년 3월)에서 취득한 데이터와 가장 처음 시행한 모니터링(2023년 7월)에서 취득한 데이터를 대상으로 총 생장률을 계산하여 바이오차 처리구별 차이를 비교하였다.

4. 통계 분석

모니터링을 통해 취득된 데이터는 기초 통계 분석을 시행하고 일원분산분석(Analysis of varisan, ANOVA)을 통해 집단 간 통계적 차이(p<0.05)를 확인하였다. 바이오차 처리량에 따른 토양 환경(토양 수분, 토양 온도, 전기전도도)과 토양 이화학성(양이온치환용량[CEC], 유기물[OM], 유효인산[Av-P2O5], 전기전도도[EC], 전질소[T-N], 총탄소[TC], 치환성 나트륨[Ex-Na], 치환성 마그네슘[Ex-Mg], 치환성 칼륨[Ex-K], 치환성 칼슘[Ex-Ca], 토성[Soil texture], 토양 산도[pH]) 변화를 확인하였다. 또한 느티나무 생장량(흉고직경, 근원직경, 수고)의 변화를 파악하고 각 처리구(16kg 처리구, 4kg 처리구, 0kg 처리구) 간 비교·분석하였다. 각 모니터링 기간 사이에 발생한 생장량을 대상으로 t-검정을 시행하고 가장 최근의 모니터링 결과와 가장 처음 시행한 모니터링 결과를 대상으로 일원분산분석을 시행하여 총 생장량에 대한 통계 분석을 하였다. 이후 토양 환경과 느티나무 생장량 간의 각 인자가 느티나무 생장에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 Pearson 상관계수를 사용하여 상관관계를 분석하였다. 모든 통계 분석에는 Python(Python software foundation 2024)을 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양 환경 모니터링 결과

토양 센서를 통해 취득한 토양 수분, 토양 온도, 전기전도도를 통해 바이오차 처리량에 따른 차이가 있는지 확인하였다. 1년 간의 경향을 알아보기 위해 24년 1월부터 24년 12월까지의 데이터를 사용하였다. 모니터링 과정에서 2월 데이터가 소실되어 모든 분석에 2월은 제외하였다. 토양 수분을 비교한 결과 10월에 0kg 처리구가 4kg 처리구보다 토양 수분이 일시적으로 높게 나타난 것을 제외하고는 16kg 처리구(31.2%, 28.9-34.3%)>4kg 처리구(20.7%, 15.4-27.7%)>0kg 처리구(16.3%, 10.5-20.5%) 순으로 바이오차 처리량에 따라 확연한 차이를 보였다. 16kg 처리구와 4kg 처리구 사이에는 10% 이상, 4kg 처리구와 0kg 처리구 사이에는 4% 이상의 차이가 나타나 16kg 처리구가 다른 처리구보다 높은 수분보유능을 가진 것으로 나타났다(Figure 2A). 토양 온도를 비교한 결과는 각 처리구에서 약간의 온도 변화만 있을 뿐 바이오차 처리량에 따른 경향이 크게 나타나지 않았다(Figure 2B). 전기전도도를 비교한 결과 11월 이전까지 16kg 처리구의 전기전도도가 다른 처리구에 비해 상당히 높게 나타났다. 16kg 처리구의 값이

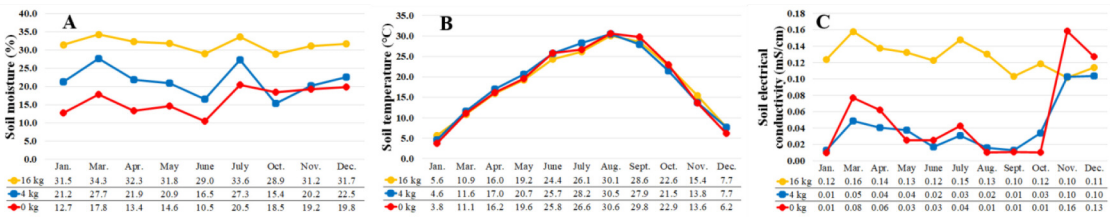

Figure 2. Results of monitoring soil environment changes according to biochar usage. A represents soil moisture, B represents soil temperature, and C represents electrical conductivity. Soil moisture and electrical conductivity showed statistical significance (p<0.001), but soil temperature did not show statistical significance

Table 1. Results of ANOVA analysis to determine statistical significance of biochar's effect on soil moisture, soil temperature, and electrical conductivity

Variable	Df	Sum Sq.	Mean Sq.	F ratio	*p*-value	Critical value
Soil moisture	2	1081.887	540.943	48.578	0.000000004***	3.403
Soil temperature	2	0.504	0.252	0.003	0.997	3.316
Electrical conductivity	2	0.048	0.024	17.886	0.000007697***	3.316

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

Table 2. Changes in soil physicochemical properties according to biochar treatment amount

Biochar throughput	Av-P2O5 (mg/kg)	CEC (cmolc/kg)*	EC (dS/m)	Ex-Ca (cmolc/kg)	Ex-K (cmolc/kg)	Ex-Mg (cmolc/kg)	Ex-Na (cmolc/kg)	OM (g/kg)*	pH (1:5)	Soil texture	TC (%)*	T-N (%)*
16 kg	22.71	9.98	0.27	6.44	0.24	1.01	0.12	31.26	6.57	Sandy loam	1.81	0.04
4 kg	13.81	9.04	0.19	4.66	0.25	0.73	0.13	10.11	5.83	Sandy loam	0.59	0.01
0 kg	16.51	7.99	0.19	4.78	0.24	0.83	0.11	4.58	5.87	Sandy loam	0.27	0.01

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

0.13mS/cm(0.10-0.16mS/cm)인데 비해 4kg과 0kg 처리구는 각각 0.04mS/cm(0.01-0.10mS/cm), 0.05mS/cm (0.01-0.16mS/cm)로 나타나 약 2.6배 차이가 났다. 이를 통해 16kg 처리구가 다른 처리구에 비해 높은 전기전도도를 가진 것을 확인하였다(Figure 2C). 토양 환경 변화에 대한 통계적 유의성을 확인하기 위한 일원분산분석에서 토양 수분과 전기전도도는 차이가(p<0.001)가 나타났으나 토양 온도에서는 차이가 나타나지 않았다 (Table 1).

바이오차 처리구에 따른 토양 이화학성을 분석한 결과 바이오차 처리량이 증가할수록 양이온치환용량, 유기물, 전질소, 총탄소가 증가하는 것으로 나타났다 (p<0.05)(Table 2). 바이오차의 넓은 표면적과 풍부한 기능기(Functional groups)는 토양의 음전하 부위를 확장시켜 양이온 흡착 능력을 향상시킨다(Premalatha et al. 2023; Khan et al. 2024). 이에 따라 토양의 양이온치환용량이 증가한 것으로 보인다. 또한 바이오차의 다공성 구조가 토양 미생물에게 안정적인 서식처를 제공하여 토양 내 유기물 분해 속도를 조절하고 안정화를 촉진하여 토양 유기물 및 총탄소 축적에 기여한 것으로 보인다(Khan et al. 2024). 전질소 함량의 증가는 바이오차가 질소 고정 미생물의 활성을 증진시키고 암모늄(NH_4^+) 이온과 같은 양이온 형태의 질소 성분을 표면에 흡착하여 질소 유실을 감소시켰기 때문으로 보인다 (Davys et al. 2023). 반면 유효인산, 전기전도도, 치환성 나트륨, 치환성 마그네슘, 치환성 칼륨, 치환성 칼슘, 토양 산도는 처리구 간 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다(Table 2). 토양 센서를 활용한 측정에서는 전기전도도가 통계적으로 유의하였지만 토양 이화학성 분석에서는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 토양 센서와 토양 이화학성 분석 결과가 다르게 나타난 것은 측정 시점과 측정 깊이의 차이 때문으로 보인다. 토양 센서는 깊이 10cm 지점에서 토양의 일일 및 계절별 변화를 모두 반영하여 장기적으로 측정되었으나 토양 이화학성 분석은 깊이 0-20cm의 토양을 혼합하여 특정 시점의 단편적인 상태만을 나타냈다. 토양 전기전도도는 표층(0-10cm)과 심층(10-20cm) 간 다를 수 있고 일회성으로 채취된 혼합 시료는 이러한 깊이별 미세한 차이를 반영하지 못했을 수 있다. 따라서 토양 센서 데이터는 특정 깊이의 장기적인 경향성을 나타내고 토양 이화학성 분석은 넓은 깊이의 단기적인 현상을 보여주므로 두 결과가 상이하게 나타난 것으로 보인다. 또한 일반적으로 바이오차는 알칼리성 특성을 가지며 토양 산도를 상승시키는 경향이 있지만 본 연구에서는 상이하게 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유는 첫 번째로 토양이 가지고 있는 완충 능력이 바

www.kci.go.kr

Table 3. Results of measurement of changes in *Zelkova serrata* growth according to biochar usage. Total growth according to each biochar usage was obtained using the latest data from March 2025 and the first data from July 2023

Biochar throughput	Measured month (YYYY/MM)	Diameter at breast height (cm)*	Growth rate (%)	Diameter atroot collar (cm)	Growth rate (%)	Height (cm)	Growth rate (%)
16 kg	2023 / 07	3.47(0.19)	-	5.21(0.33)	-	329(47.17)	-
	2024 / 01	3.71(0.28)	6.92	5.68(0.58)	11.04	329(24.37)	5.04
	2024 / 07	4.08(0.25)	10.22	6.35(0.55)	11.85	313(14.65)	4.12
	2024 / 10	4.12(0.26)	1.46	6.69(0.64)	6.03	322(13.12)	2.90
	2025 / 03	4.15(0.26)	0.32	6.79(0.71)	1.37	346(18.79)	0.71
	Total growth	0.68	19.46	1.58	30.90	17	5.08
4 kg	2023 / 07	3.58(0.21)	-	5.53(0.38)	-	326(58.76)	-
	2024 / 01	3.78(0.31)	5.57	5.63(0.78)	5.47	335(21.81)	4.88
	2024 / 07	4.38(0.47)	16.41	6.75(0.69)	15.85	314(19.10)	7.01
	2024 / 10	4.43(0.44)	0.79	6.88(0.72)	1.85	323(21.86)	0.54
	2025 / 03	4.49(0.43)	1.30	6.91(0.80)	0.42	341(30.68)	2.91
	Total growth	0.91	24.55	1.38	24.85	15	7.35
0 kg	2023 / 07	3.59(0.18)	-	5.67(0.28)	-	325(43.77)	-
	2024 / 01	3.87(0.23)	7.61	5.96(0.51)	5.81	333(21.05)	3.61
	2024 / 07	4.31(0.19)	11.55	6.84(0.31)	14.58	315(15.09)	4.07
	2024 / 10	4.36(0.27)	1.21	7.13(0.31)	4.29	328(20.02)	2.44
	2025 / 03	4.39(0.26)	0.63	7.32(0.45)	2.81	341(18.54)	1.14
	Total growth	0.80	22.18	1.65	29.20	16	5.22

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

이오차의 토양 산도 상승효과를 상쇄시켰기 때문일 수 있다. 토양의 점토 광물, 유기물, 산화물 등 다양한 성분은 토양의 수소(H^+) 이온 농도 변화에 저항하는 내재적 완충 능력을 가지고 있다. 따라서 바이오차와 같은 알칼리성 물질이 첨가되었더라도 토양이 가진 양분 흡착 능력(높은 양이온치환용량)과 치환성 마그네슘, 치환성 칼륨, 치환성 칼슘과 같은 치환성 염기 물질의 상호작용으로 인해 토양 산도가 통계적으로 유의미하게 변화하지 않았을 수 있다(Zhang et al. 2025). 두 번째로 바이오차의 특성과 시비량이 토양의 내재적 완충 능력을 극복하고 통계적으로 유의미한 토양 산도 변화를 일으키기에 충분하지 않았을 가능성이 있다(Saroop et al. 2017; Kabir et al. 2023). 바이오차의 토양 산도 상승효과는 원료 물질, 열분해 온도, 용해도 등 다양한 요인에 따라 달라지며 조건에 따라 다르게 발현될 수 있기 때문이다(Singh et al. 2022). 종합하였을 때 이 결과는 바이오차가 토양 산도에 미치는 영향은 단순한 일방적 관계가 아닌 바이오차의 고유한 특성과 토양의 특성이 복합적으로 상호작용을 하며 변화하는 관계라는 것을 시사한다.

2. 느티나무 생육 모니터링 결과

2023년 7월 모니터링과 2025년 3월 모니터링에서 측정된 느티나무의 흉고직경, 근원직경, 수고를 대상으로 총 생장(Total growth)을 확인한 결과 바이오차 처리량에 따른 차이가 나타났다(Table 3). 흉고직경에서는 4kg 처리구>0kg 처리구>16kg 처리구 순으로 나타났으며 4kg 처리구에서 24.55%로 가장 높은 생장률을 보였고 16kg 처리구에서는 19.46%로 가장 낮은 생장률을 보였다. 바이오차를 사용하지 않은 0kg 처리구에 비해 바이오차를 사용한 16kg 처리구에서 생장률이 더 낮게 나타났다. 근원직경에서는 16kg 처리구>0kg 처리구>4kg 처리구 순으로 나타났으며 16kg 처리구가 30.90%로 가장 높은 생장률을 보였고 4kg 처리구에서 24.85%로 가장 낮은 생장률을 보였다. 바이오차를 사용하지 않은 0kg 처리구에 비해 4kg 처리구에서 생장률이 더

www.kci.go.kr

Table 4. Results of ANOVA analysis to determine statistical significance of growth for each characteristic based on total growth amount

Variable	Df	Sum Sq.	Mean Sq.	F ratio	*p*-value	Critical value
Diameter at breast height	2	0.408	0.204	3.885	0.028*	3.220
Diameter at root collar	2	0.576	0.288	1.055	0.357	3.220
Height	2	160.533	80.267	0.036	0.964	3.220

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

Table 5. Absorption coefficient used to calculate annual carbon dioxide absorption by *Zelkova serrata*

Allometric equation	*a*	*b*	Basic wood density	Biomass expansion factor	Urban tree conversion factor	Root-shoot ratio	Carbon fraction
Y=0.0006DBH^1.73624	0.0006	1.73624	564	1.45	0.8	0.26	0.5

DBH: cm, Basic wood density: kg/m^3

Table 6. Correlation coefficients and statistical significance between diameter at breast height growth and soil moisture, electrical conductivity

Variable	Correlation coefficient	*p*-value
Diameter at breast height growth vs. Soil moisture	-0.460	0.016*
Diameter at breast height growth vs. Electrical conductivity	-0.403	0.037*

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

낮게 나타났다. 수고는 4kg 처리구>0kg 처리구>16kg 처리구 순으로 나타났으며 4kg 처리구가 7.35%로 가장 높은 생장률을 보였고 16kg 처리구가 5.08%로 가장 낮은 생장률을 보였다. 총 생장량을 바탕으로 통계적 유의성을 확인하기 위한 일원분산분석 결과 흉고직경에서는 유의미한 결과(p<0.05)가 나타났으나 근원직경과 수고에서는 유의미한 결과가 나타나지 않았다(Table 4).

바이오차 처리에 따른 느티나무 흉고직경 생장량 변화를 바탕으로 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하였다. 탄소흡수량 추정에는 국립산림과학원에서 발간한「탄소지킴이 도시숲(Korea forest research institute 2012)」의 느티나무 공원수 흉고직경 대비 줄기 재적식(흉고직경 범위 6.0-50.8cm)을 참고로 하였으며 흡수계수는 Table 5와 같다. 일반적으로 교목에서 개발하는 상대생장식의 흉고직경 범위(6cm 이상)보다 본 연구에서 측정된 흉고직경 범위가 더 작았다. 비록 적용 범위에는 차이가 있으나 본 연구의 범위 내에서는 유의미한 추정 결과를 제공하였다. 추정 결과 4kg(2.6kgCO_2/본)>대조구(2.3kgCO_2/본)>16kg(1.9kgCO_2/본) 순으로 4kg 처리구(2.6kgCO_2/본)에서 연간 이산화탄소 흡수량이 가장 높게 나타났고 16kg 처리구(1.9kgCO_2/본)에서 가장 낮게 나타났다. 통계적 유의성을 확인하기 위한 일원분산분석 결과 처리구 간 차이가 나타났다(p<0.05).

3. 느티나무 생육과 토양 환경 요인 간의 상관관계

일원분산분석을 통해 바이오차 처리량 변화에 따른 토양 수분, 전기전도도, 흉고직경 생장량 변화가 통계적으로 유의하다는 것을 확인하였다(Table 1, 3). 이에 흉고직경 생장량에 토양 수분과 전기전도도가 영향을 준 것인지 확인하기 위해 Pearson 상관계수를 사용하여 상관관계를 분석하였다. 그 결과 흉고직경 생장량과 토양 수분, 전기전도도 간의 상관계수는 각각 r=-0.460, r=-0.403으로 나타나 음의 상관관계가 나타났으며 통계적으로 유의한 것(p<0.05)으로 나타났다(Table 6). 이를 통해 토양 수분과 전기전도도가 높아질수록 흉고직경 생장에는 불리하다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 0kg 처리구보다 4kg 처리구에서 수분 함량이 높았음에도 불구하고 더 높은 생장량을 보였다. 따라서 향후 장기적인 모니터링과 세분화된 실험을 통해 최적의 수분함량에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

www.kci.go.kr

Table 7. Optimal biochar treatment amount reported in previous studies

Species	Optimal biochar throughput	Biochar experimental scope	Study area	References
Allium fistulosum	0.2 kg/m^2	0.1. 0.2, 0.3, 0.5 kg/m^2	Greenhouse	Jang et al. (2023)
Brassica rapa var. *glabra*	1%	1, 3, 5%	Greenhouse	Oh et al. (2017)
Brassica rapa var. *glabra*	0.3 kg/m^2	0.1, 0.2, 0.3 kg/m^2	Greenhouse	Jang et al. (2018)
Brassica rapa var. *glabra*	10%	10, 30, 50, 70%	Greenhouse	Hong et al. (2020)
Brassica rapa var. *glabra*	0.2 kg/m^2	0.1. 0.2, 0.3, 0.5 kg/m^2	Greenhouse	Jang et al. (2023)
Casuarina equisetifolia	0.25 kg/m^2 (Root collar diameter), 0.75 kg/m^2 (Height)	0, 0.25, 0.5, 0.75 kg/m^2	Farmland	Mwadalu et al. (2021)
Capsicum annuum	35%	10, 30, 50, 70%	Greenhouse	Hong et al. (2020)
Lactuca sativa	35%	10, 30, 50, 70%	Greenhouse	Hong et al. (2020)
Lycopersicon esculentum	0.2 kg/m^2	0.1, 0.2, 0.3 kg/m^2	Greenhouse	Jang et al. (2018)
Lycopersicon esculentum	0.05%	0.01, 0.03, 0.05, 0.07%,	Greenhouse	Park et al. (2019)
Pinus sylvestris	0.5 kg/m^2 (Height), 1 kg/m^2 (Diameter at breast height)	0.5, 1 kg/m^2	Forest	Palviainen (2020)
Quercus variabilis	4 kg/m^2	0, 0.4, 4 kg/m^2	Forest	Jung et al. (2023)
Zea mays	0.5 kg/m^2	0.5, 1.0, 1.5, 2 kg/m^2	Greenhouse	Kang et al. (2017)

4. 최적 바이오차 처리량과 생육 변화 요인에 대한 선행연구 검토

본 연구에서는 바이오차 처리량을 16kg, 4kg, 0kg으로 설정하여 실험한 결과 4kg에서 가장 생장이 좋은 것으로 나타났으며 토양 수분과 전기전도도가 생육에 변화를 일으키는 요인인 것으로 나타났다. 토양 수분과 전기전도도에서 16kg 처리구가 가장 높게 나타났는데(Figure 2) 오히려 16kg 처리구(31.2±1.7%VWC, 0.13±0.02mS/cm)와 0kg 처리구(16.3±3.4%VWC, 0.05±0.05 mS/cm)의 사이에 있는 4kg 처리구(20.7±3.9%VWC, 0.04±0.03mS/cm)에서 가장 생육이 좋았다(Table 3). 이를 통해 바이오차 과량 처리 시 높은 수준의 토양 수분과 전기전도도가 오히려 생육 저하를 불러올 수 있다는 것을 확인하였으며 높은 수준의 토양 수분이 생육저하를 불러올 수 있다는 선행연구도 있었다. 등나무 묘목을 대상으로 토양 함수율에 따른 근류 형성량을 확인한 선행연구(Park 2006)에 따르면 근류 형성량은 토양 함수율 60% 수준에서 최대를 나타내고 70% 수준에서는 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Gil et al. (2020)에서도 토양 수분 함량에 따른 산괴불주머니 생육 실험 결과 토양의 과습으로 인한 저산소 피해가 일어날 가능성이 있으며 과습한 조건에서는 오히려 생육의 저하가 일어난다고 보고하였다. 바이오차가 토양 수분을 높여 생장량을 향상시킨다는 것은 선행 연구(Baidoo et al. 2016; Palviainen 2020; Mwadalu et al. 2021)를 통해 확인되어 있다. 그러나 일정 수준 이상의 토양 수분은 오히려 생육의 저하를 불러 올 수 있어 수종별로 적절한 수분량을 유지하기 위한 바이오차 처리량에 대해서는 향후 연구를 통해 밝혀내야 할 것으로 보인다.

바이오차 처리가 어떤 영향을 미치는지 더 알아보기 위해 선행연구를 검토해 보았다(Table 7). 수목을 대상으로 한 바이오차 연구가 많지 않고 작물을 대상으로 한 연구들이 대부분이어서 직접적인 비교는 어렵지만 바이오차 최적 처리량에 대한 견해와 생육에 변화를 일으키는 요인에 대해 파악할 수 있었다. 바이오차 과량 처리에 따른 생육 저하가 나타난 대표적인 결과로 Kang et al. (2017)은 바이오차 0.5-2.0kg/m^{2}을 사용하여 옥수수를 재배하였는데 0.5kg/m^{2}를 최적 처리량으로 보고하였다. 바이오차 처리량이 증가할수록 옥수수의 생중량이 감소하였으며 바이오차 사용에 따른 염 스트레스, 높은 탄소 함량, 낮은 양분 함량으로 인한 C/N율 증가로 작물 양분 이용능력이 감소하였다고 원인을 제시하였다. Hong et al. (2020)은 상토에 대한 바이오차 비율(w/w)을 10-70% 사이로 혼합하여 바이오차를 사용하였는데 상추 35%, 배추 10%, 고추 35%가 최적 바

www.kci.go.kr

이오차 처리량이라고 보고하였다. 이 이상 사용할 경우 C/N율 증가로 인한 N 유효도 감소와 pH 증가로 인해 오히려 생육이 줄어드는 결과가 나타났다. Oh et al. (2017)도 배추를 대상으로 토양에 대한 바이오차 비율(w/w)을 1-5% 사이로 혼합하여 실험하였을 때 1% 처리가 가장 적절한 사용량이었다고 보고하였다. 3% 이상 처리했을 때 바이오차 처리에 따른 pH 증가가 생육에 악영향을 준 것으로 판단하였다. 이 외에도 토마토, 상추, 대파 등 다양한 작물에서도 바이오차 과량 처리 시 생육이 저하되는 결과들이 나타났다(Park et al. 2019; Hong et al. 2020; Jang et al. 2023). 이와 반대로 바이오차 처리량이 많을수록 생육이 증가하였다는 연구 결과도 있었다. Jung et al. (2023)은 산림의 산불피해지를 대상으로 0-4kg/m^{2}의 바이오차를 사용하였는데 4kg/m^{2}을 사용하였을 때 가장 생장량이 높았으며 근원직경의 변화가 잘 나타났다고 보고하였다. 변화 요인으로 용적 밀도 감소, 공극률 증가, pH 증가, 치환성 양이온 증가가 생육에 영향을 주었을 것이라고 판단하였다. Mwadalu et al. (2021)은 *Casuarina equisetifolia*를 대상으로 0-0.75kg/m^{2}의 바이오차를 사용하였는데 0.75kg/m^{2}을 사용하였을 때 수고가 대조군에 비해 20.2% 더 높았으며 0.25kg/m^{2}을 사용하였을 때 근원직경이 대조군에 비해 최대 30.2% 높았다고 보고하였다. 변화 요인으로 토양의 용적 밀도 감소와 토양 수분 함량의 증가가 영향을 주었을 것이라고 언급하였다. Palviainen (2020)은 *Pinus sylvestris*를 대상으로 0.5-1kg/m^{2}의 바이오차를 사용하여 연구를 진행하였는데 0.5kg/m^{2}의 바이오차를 사용하였을 때 수고가 대조구에 비해 12% 증가하였고 1kg/m^{2}의 바이오차를 사용하였을 때는 직경 생장이 대조구에 비해 25% 증가하였다고 하였다고 보고하였다. 변화 요인으로는 토양 수분 증가와 유기물 증가가 영향을 주었을 것으로 판단하였다. Jang et al. (2018)은 0.1-0.3kg/m^{2}의 바이오차 사용 실험에서 배추의 생육이 0.3kg/m^{2}일 때 가장 좋았으며 유기물 증가와 용적 밀도 감소, 공극률 증가가 영향을 주었을 것이라고 판단하였다. 선행연구에 따라 바이오차 처리량에 대한 견해는 조금씩 달랐지만 생육에 부정적인 요인으로 pH 증가, 질소 유효도 감소, 염 스트레스 등을 꼽았고 긍정적인 요인으로 토양 수분 증가, 용적 밀도 감소, 공극률 증가, 유기물 증가 등을 꼽았다.

IV. 결론

본 연구에서는 바이오차 처리량에 따른 생활권 녹지의 토양 환경과 수목 생육의 변화를 알아보기 위해 느티나무를 대상으로 시험구별로 바이오차 처리량을 다르게 하여 모니터링하였다. 토양 환경에서는 토양 수분, 토양 온도, 전기전도도의 변화를 확인한 결과 토양 수분과 전기전도도는 통계적으로 유의하였고 토양 온도는 통계적으로 유의하지 않았다. 토양 이화학성을 분석한 결과 양이온치환용량, 유기물, 전질소, 총탄소가 통계적으로 유의하였고 유효인산, 전기전도도, 치환성 나트륨, 치환성 마그네슘, 치환성 칼륨, 치환성 칼슘, 토양 산도는 통계적으로 유의하지 않았다. 수목 생육 변화를 확인하기 위해 흉고직경, 근원직경, 수고의 생장량을 확인한 결과 흉고직경에서 통계적인 유의성이 확인되었다. 흉고직경 생장량과 토양 수분, 전기전도도 간의 상관관계를 분석한 결과 음의 상관관계가 나타났으며 모두 통계적으로 유의하였다. 이를 통해 토양 수분과 전기전도도가 높아질수록 흉고직경 생장에는 불리하다는 것을 확인하였다.

바이오차 처리량에 따른 생육 변화를 측정한 선행연구는 농업 분야에서 작물을 대상으로 측정한 것이 대부분이었고 일부 산림 분야에서 수목(굴참나무)을 대상으로 측정한 것이었다. 기존 연구에서는 식물 종류에 따라 적정 바이오차 처리량에 차이가 있었으나 생육에 영향을 미치는 요인으로 용적 밀도 감소, 공극률 증가, 유기물 증가 등이 긍정적인 영향을 준다고 하였고 pH 증가, 질소 유효도 감소, 염 스트레스 등이 부정적인 영향을 준다고 하였다.

본 연구 결과와 선행연구 검토를 통해 바이오차 처리량의 차이가 수목의 생육에 영향을 준다는 것을 확인하였다. 이 연구는 도심 내에서 가장 많이 식재되는 대표 수종 중 하나인 느티나무를 대상으로 생활권 녹지에서 바이오차 처리량을 다르게 하여 토양 환경과 수목의 생육 변화를 확인한 것에 의의가 있다. 향후 느티나무뿐만 아니라 많은 수종의 장기 모니터링을 통해 바이오차 적정 처리량을 구명하는 것이 필요하다. 이를

www.kci.go.kr

통해 바이오차를 이용한 수목 생장 증가로 탄소흡수량을 증가시킬 수 있을 것이며 도시 환경의 기후변화 대응력을 높일 수 있을 것이다.

사사

한국수목원정원관리원의 생활권 탄소중립 기술지원 강화 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Amonette JE, Hu Y, Schlekewey N, Dai SS, Shaff ZW, Russell CK and Arey BW. (2009). Biochars are not created equal: a survey of their physical, structural, and chemical properties and implications for soil application. *In North American Biochar Conference, Boulder, CO-75*, 871-879.

백기태, 정원균, 장세은, 이가빈. (2023). 바이오차를 통한 탄소중립의 가능성과 한계. *한국농공학회지: 학술기술기사, 65*(2), 28-33.

Baek K, Jeong W, Jang S and Lee G. (2023). The potential and limitations of carbon neutrality through biochar. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers: Rural resource, 65*(2), 28-33.

Baidoo I, Sarpong D and Solwig S. (2016). Biochar amended soils and crop productivity: a critical and meta analysis of literature. *International Journal of Development an Sustaninability, 5*(9), 414-423.

Davys D, Rayns F, Charlesworth S and Lillywhite R. (2023). The effect of different biochar characteristics on soil nitrogen transformation processes: a review. *Sustainability, 15*(23), 16446. https://doi.org/10.3390/su152316446

길민, 권혁환, 권영현, 정미진, 김상용, 이용하. (2020). 토양 수분 함량에 따른 너도개미자리, 벼룩이울타리, 산괴불주머니의 노지 생육. *시설원예·식물공장, 29*(4), 344-353.

Gil M, Kwon HH, Kwon YH, Jung MJ, Kim SY and Rhie YH. (2020). Growth of *Minuartia laricina*, *Arenaria juncea*, and *Corydalis speciose* in field with various soil water contents. *Protected Horticulture and Plant Factory, 29*(4), 344-353. http://doi.org/10.12791/KSBEC.2020.29.4.344

홍성창, 유선영, 김경식, 이규현, 송새눈. (2020). 바이오차의 시용이 채소 유묘 생장 및 양분 흡수량에 미치는 영향. *한국환경농학회지, 39*(1), 50-57.

Hong SC, Yu SY, Kim KS, Lee GH and Song SN. (2020). Effects of biochar on early growth and nutrient content of vegetable seedlings. *Korean Journal of Environmental Agriculture, 39*(1), 50-57. http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.1.7

장재은, 임갑준, 박중수, 심재만, 강창성, 홍순성. (2018). 배 전정지 바이오차 시용이 작물 생육 및 토양 이화학성에 미치는 영향. *유기물자원화, 26*(4), 11-19.

Jang JE, Lim GJ, Park JS, Shim JM, Kang CS and Hong SS. (2018). Application effects of biochar derived from pruned stems of pear tree on growth of crops and soil physico-chemical properties. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association, 26*(4), 11-19. http://dx.doi.org/10.17137/korrae.2018.26.4.11

장재은, 임성희, 신민우, 문지영, 남주희, 임갑준. (2023). 느타리버섯 수확후배지 바이오차 시용이 토양 이화학성 및 작물 생육에 미치는 영향. *유기물자원화, 31*(3), 73-82.

Jang JE, Lim SH, Shin MW, Moon JY, Nam JH and Lim GJ. (2023). Effects of applied biochar derived from spent oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) substrate to soil physico-chemical properties and crop growth responses. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association, 31*(1), 73-82. http://dx.doi.org/10.17137/KORRAE.2023.31.3.73

조현길, 안태원. (2012). 도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장 및 흡수. *한국조경학회지, 40*(5), 160-168.

Jo HK and Ahn TW. (2012). Carbon storage and uptake by deciduous tree species for urban landscape.

www.kci.go.kr

Journal of the Korean linstitute of Landscape Architecture, 40(5), 160-168. https://doi.org/10.9715/kila.2012.40.5.160

정유경, 김소진, 김주은, 배정현, 강원석, 이영근, 박기형. (2023). 산불피해지 복원을 위한 바이오차 처리가 굴참나무 묘목 생육에 미치는 영향. *한국산림과학회지, 112*(3), 290-302.

Jung YG, Kim SJ, Kim JE, Bae JH, Kang WS, Lee YG and Park KH. (2023). Effect of biochar treatment on the growth characteristics of *Q. variabilis* for the restoration of post-fire forest areas. *Journal of Korean Society of Forest Science, 112*(3), 290-302. http://dx.doi.org/10.14578/jkfs.2023.112.3.290

Kabir E, Kim KH and Kwon EE. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science, 11*. http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533

Kang SW, Kim SH, Park JH, Seo DC and Cho JS. (2017). Selection of optimal application condition of corn waste biochar for Improvement of corn growth and soil fertility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 50*(5), 452-461. http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.5.452

Khan S, Irshad S, Mehmood K, Hasnain Z, Nawaz M, Rais A, Gul S, Wahid MA, Hashem A, Abd_Allah EF and Ibrar D. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. *Plants, 13*(2), 166. https://doi.org/10.3390/plants13020166

김학구, 홍용식, 임윤경, 윤이슬, 도기석, 정찬형, 이지문, 노회은, 강신구, 김찬범. (2023). 국립세종수목원 교목 4종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량 평가 - 소나무, 메타세쿼이아, 칠엽수, 이팝나무를 대상으로. *환경영향평가, 32*(1), 41-48.

Kim HK, Hong YS, Lim YK, Yun IS, Do KS, Jung CH, Lee MC, Roh HE, Kang SK and Kim CB. (2023). Estimation of carbon stock and annual CO_2 uptake of four species at the sejong national arboretum - *Pinus densiflora, Metasequoia glyptostroboides, Aesculus turbinata, Chionanthus retusus* -. *Journal of Environmental Impact Assessment, 32*(1), 41-48. http://dx.doi.org/10.14249/EIA.2023.32.1.41

국립산림과학원. (2012). 탄소지킴이 도시숲. *국립산림과학원*.

Korea forest research institute. (2012). Carbon guardian urban forests. *Korea Forest Research Institute*.

이선일, 정현철, 최은정, 권효숙, 이형석, 박혜란, 이종문, 박도균. (2023). 탄소중립 대응, 농경지 바이오차 적용 효과. *한국농공학회지: 학술기술기사, 65*(1), 35-41.

Lee S, Jeong H, Choi E, Kwon H, Lee H, Park H, Lee J and Park D. (2023). Carbon neutrality response, effect of applying biochar to farmland. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers: Rural Resource 65*(1), 35-41.

이선일, 강성수, 최은정, 권효숙, 이형석, 이종문, 임상선, 최우정. (2021). 바이오차를 이용한 밭 토양 탄소 저장: 동아시아 지역 연구 리뷰 및 데이터 분석. *한국환경농학회지, 40*(3), 219-230.

Lee S, Kang S, Choi E, Gwon H, Lee HS, Lee JM, Lim S and Choi W. (2021). Soil carbon storage in upland soils by biochar application in east asia: review and data analysis. *Korean Journal of Environmental Agriculture, 40*(3), 219-230. http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.26

이슬린, 이재훈, 노준석, 박유진, 이정목, 박종환, 서동철. (2024). 목질계 농림부산물 바이오차의 과량 투입과 처리방법이 상추 생육 및 탄소 격리 효과에 미치는 영향. *한국환경농학회지, 43*, 251-260.

Lee SR, Lee JH, Rho JS, Park YJ, Lee JM, Park JH and Seo DC. (2024). Effects of lettuce growth and carbon sequestration by different application methods with excessive amount of wood-based agricultural and forestry by-product Biochar. *Korean Journal of Environmental Agriculture, 43*, 251-260. http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.24

Lehmann J. (2007). A handful of carbon. *Nature, 447*(7141),

www.kci.go.kr

143-144.

국립산림과학원. (2025). 산악기상관측시스템, [접속 2025년 3월 10일]. *국립산림과학원*.

National institute of forest science. (2025). Mountain meteorology observation system, [cited 2025 March]. *Korea Forest Research Institute*. Available from: http://mw.nifos.go.kr/.

Mwadalu R, Mochoge B and Danga B. (2021). Assessing the potential of biochar for improving soil physical properties and tree growth. *International Journal of Agronomy, 2021*(1), 6000184. https://doi.org/10.1155/2021/6000184

Oh TK, Lee JH, Kim SH and Lee HC. (2017). Effect of biochar application on growth of chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science, 44*(3), 359-365. https://doi.org/10.7744/kjoas.20170039

Palviainen M, Aaltonen H, Lauren A, Koster K, Berninger F, Ojala A and Pumpanen J. (2020). Biochar amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management, 474*, 118362. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118362

박병훈, 서자유. (2023). 탄소저감 현장 실증을 위한 모델정원 설계와 조성 - 국립세종수목원 탄소저감 모델 정원을 사례로. *한국조경학회지, 51*(6), 75-87.

Park B and Seo JY. (2023). Designing and creating a model garden to demonstrate carbon reduction - case Study of carbon reduction model garden at the sejong national arboretum -. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 51*(6), 75-87. https://doi.org/10.9715/KILA.2023.51.6.075

박종민. (2006). 절개지 토양에서 수분조건과 근류균 접종이 등나무 유묘생장에 미치는 영향. *한국환경생태학회지, 20*(4), 425-435

Park CM. (2006). Effects of water conditions and *Rhizobium* inoculation on the Growth of *Wisteria floribunda* Seedlings in slope soils. *Korean Journal of Environment and Ecology, 20*(4), 425-435.

박도균, 홍승길, 장은숙, 신중두. (2019). 토마토 재배를 위한 바이오차 최적시용 비율 평가. *유기물자원화, 27*(1), 39-48.

Park DG, Hong SG, Jang E and Shin JD. (2019). Assessment of an optimum biochar application rate for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association, 27*(1), 39-48. https://doi.org/10.17137/KORRAE.2019.27.1.39

박선용, 김석준, 조아영, 김연미, 이동현, 오광철, 장철성, 김대현. (2022). 농업부산물 바이오차 시비를 통한 방울토마토의 생육 변화 및 탄소격리 효과 분석. *농업생명환경연구, 34*, 229-237.

Park S, Kim SJ, Cho AY, Kim Y, Lee DH, Oh WC, Jang CS and Kim DH. (2022). Effect of agro-byproduct biochar fertilization on cherry tomato growth and carbon sequestration. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences, 34*, 229-237. http://dx.doi.org/10.22698/jales.20220023

Premalatha RP, Poorna BJ, Nivetha E, Malarvizhi P, Manorama K, Parameswari E and Davamani V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research, 11*, 1092637. http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637

Python software foundation. (2024). python(version 3.11.8). *Python Software Foundation*. https://www.python.org.

Saroop S, Sandhu DAN, Ussiri SK, Rajesh C, Sharon KP, Douglas DM and Thomas ES. (2017). Analyzing the impacts of three types of biochar on soil carbon fractions and physiochemical properties in a corn-soybean rotation. *Chemosphere, 184*, 473-481. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.165.

Schaffert E, Lukac M, Percival G and Rose G. (2022). The influence of biochar soil amendment on tree

www.kci.go.kr

growth and soil quality: a review for the arboricultural industry. *Arboriculture & Urban Forestry, 48*(3), 176-202. http://dx.doi.org/10.48044/jauf.2022.014

국립세종수목원. (2025). 국립세종수목원, [접속 2025년 3월 10일], *국립세종수목원*.

Sejong National Arboretum. (2025). Sejong National Arboretum, [cited 2025 March]. *Sejong National Arboretum*. Available from: https://www.sjna.or.kr/.

Singh H, Northup BK, Rice CW, Vara Prasad PV. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar, 4*(8). https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1

우승한. (2013). 토양탄소격리를 위한 바이오차. *청정기술, 19*(3), 201-211.

Woo SH. (2013). Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology, 19*(3), 201-211. http://dx.doi.org/10.7464/ksct.2013.19.3.201

Yoon TK. (2022). Urban soil carbon: processes and patterns. Soils in Urban Ecosystem. *Springer, Singapore*, pp. 65-100.

Zhang J, Zhang S, Niu C, Jiang J and Sun H. (2022). Positive effects of biochar on the degraded forest soil and tree growth in China: a systematic review. *Phyton, 91*(8), 1601. http://dx.doi.org/10.32604/phyton.2022.020323

Zhang N, Xing J, Wei L, Liu C, Zhao W, Liu Z, Wang Y, Liu E, Ren X, Jia Z, Wei T, Kadambot HM. Siddique and Zhang P. (2025). The potential of biochar to mitigate soil acidification: a global meta-analysis. *Biochar, 7*(49). https://doi.org/10.1007/s42773-025-00451-5

www.kci.go.kr