

도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장 및 배출 특성과 토양호흡량과 기후요인인 기온과 강수량과의 관계

이응필 · 정현모 · 강성룡 · 장인영**

국립생태원

Soil Carbon Storage and Emission Characteristics in Urban Parks and Roadside Green Spaces, and Their Relationships with Soil Respiration and Climatic Factors (Temperature and Precipitation)

EungPill Lee · HeonMo Jeong · Sung-Ryong Kang · Inyoung Jang**

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

(Received : 09 October 2025, Revised : 11 November 2025, Accepted : 11 November 2025)

요약

본 연구는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지의 주요 탄소저장고인 토양의 탄소 저장량 및 환경 특성 비교와 기후요인인 기온과 강수량이 토양호흡량에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 선행연구 결과를 분석하였다. 그 결과 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성의 선행연구는 도시공원이 도로변 녹지보다 더 많은 연구가 진행되었다. 그리고 토양의 탄소 저장량, 토양호흡량, 용적밀도, 토양 유기물 함량, 양이온치환용량은 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 2.5 배, 약 6.0 배, 약 1.2 배, 약 10.6 배, 약 1.3 배 높았지만, 석력함량, 토양 pH, 전질소는 도로변 녹지가 도시공원보다 각각 약 1.2 배, 약 1.1 배, 약 1.4 배 높았다. 또한, 토양호흡량은 연평균기온($R^2=0.4902$, $p=0.0037$), 생육 초기 평균 기온($R^2=0.6935$, $p=0.0001$), 생육 중기 평균 기온($R^2=0.6490$, $p=0.0003$), 연강수량($R^2=0.3861$, $p=0.0134$), 생육 초기 월평균 적산 강수량($R^2=0.5647$, $p=0.0012$)과 유의한 관계가 있었다. 기후요인 중 생육 초기 및 중기의 기온과 강수량은 도시림의 생태계 서비스 증가 및 감소와 관련이 있음을 확인하였으며, 이러한 영향은 다른 도시림 유형에서도 유사할 것이다. 따라서 도시생태계의 탄소 저장 및 배출 기능을 안정적으로 유지하기 위해서는 기후요인의 변화 양상을 고려한 토양 환경 및 수분 관리가 필요함을 시사한다.

핵심어 : 도시림, 선행연구, 토양 탄소 저장량, 토양호흡량, 환경요인

Abstract

This study analyzed previous research comparing soil carbon storage and environmental characteristics between representative urban forests, such as urban parks and roadside green spaces, which serve as major carbon reservoirs, and to investigate how climatic factors, such as temperature and precipitation, affect soil respiration. The analysis showed that prior studies on soil carbon storage and emissions, as well as soil environmental characteristics, have been conducted more extensively in urban parks than in roadside green spaces. Soil carbon storage, soil respiration, bulk density, soil organic matter, and cation exchange capacity were approximately 2.5 times, 6.0 times, 1.2 times, 10.6 times, and 1.3 times higher in urban parks than in roadside green spaces, respectively. In contrast, gravel content, soil pH, and total nitrogen were about 1.2 times, 1.1 times, and 1.4 times higher in roadside green spaces than in urban parks. Furthermore, soil respiration showed significant correlations with annual average temperature ($R^2=0.4902$, $p=0.0037$), average temperature during the beginning of growth ($R^2=0.6935$, $p=0.0001$), average temperature during the middle of growth ($R^2=0.6490$, $p=0.0003$), annual precipitation ($R^2=0.3861$, $p=0.0134$), and monthly average of sum of daily precipitations during the beginning of growth ($R^2=0.5647$, $p=0.0012$). Among

*To whom correspondence should be addressed.

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

E-mail : ijjang@nie.re.kr

• EungPill Lee National Institute of Ecology/Associate Researcher(ecoman21@nie.re.kr)

• HeonMo Jeong National Institute of Ecology/Researcher(eimple01@nie.re.kr)

• Sung-Ryong Kang National Institute of Ecology/Team Leader(srkang@nie.re.kr)

• Inyoung Jang National Institute of Ecology/Senior Researcher(ijjang@nie.re.kr)



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.

climatic factors, temperature and precipitation during the early and mid-growing seasons were found to be related to the increase or decrease of ecosystem services in urban forests, and these effects are expected to be similar across other urban forest types. Therefore, to sustainably maintain carbon storage and emission functions in urban ecosystems, soil environment and moisture management should consider changes in climatic factors.

Key words : Urban Forests, Previous Studies, Soil Carbon Storage, Soil Respiration, Environmental Factors

1. 서론

기후변화는 인류가 직면한 가장 시급한 환경문제 중 하나로, 그 주된 원인으로 이산화탄소(CO₂)를 포함한 온실가스의 배출이 지목되고 있다(Maier and Kress, 2000). 특히 인간의 산업 활동으로 인해 대기 중 CO₂ 농도는 꾸준히 증가해 왔으며, 2021년 기준 약 410ppm, 일부 지역에서는 2022년 430ppm을 초과하는 수치가 기록되었다(IPCC, 2022; IPCC, 2023). 이러한 CO₂ 농도 증가는 지구 평균기온 상승을 초래하고 있으며, 최근 10년간(2011~2020년) 산업화 이전 대비 평균 1.09°C의 기온 상승이 확인되었다(IPCC, 2022; IPCC, 2023). 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 이러한 추세가 지속될 경우에는 2100년까지 기온이 최대 3.5°C 상승할 수 있다고 경고하고 있다(IPCC, 2022; IPCC, 2023).

이러한 기후변화 문제의 심각성에 따라 국제사회는 파리협정을 통해 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C 이하로 억제하고, 더 나아가 1.5°C 이내로 제한하는 것을 목표로 설정하였다(Jang *et al.*, 2023; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023). 이에 따라 각국은 탄소중립(Carbon Neutrality)을 실현하기 위한 전략을 수립하고 있으며, 탄소중립은 인간 활동으로 발생하는 온실가스 배출량과 자연흡수 또는 상쇄를 통해 균형을 맞춰 순배출을 '0'으로 만들고 기후변화 영향을 최소화하는 상태를 의미한다(United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023). 이러한 전략에서는 자연 기반 해법을 통해 온실가스를 흡수하고 저장하는 생태계의 역할이 특히 강조되고 있다(Jang *et al.*, 2023; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023).

기후변화에 관한 정부간 협의체는 산림, 초지, 습지, 농경지를 대표적인 육상생태계로 분류하고 있으며, 이들 생태계를 대상으로 탄소 저장량 및 흡수량의 정량적 분석이 전 세계적으로 진행되고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2008). 그리고 최근에는 생태계의 탄소 순환 메커니즘에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 생태계를 아우르는 탄소수지 연구가 활발히 이루어지고

있다(McCarl and Schneider, 2001; Jang *et al.*, 2023). 또한, LULUCF(Land Use, Land-Use Change and Forestry) 분야에서는 산림 외에도 정주지의 토지 이용이 온실가스 감축 수단으로 주목받고 있으며, 이에 따라 도시지역의 탄소흡수 능력에 대한 연구의 필요성이 커지고 있다(Korea Environment Institute, 2019).

도시지역은 전체 토지 면적의 일부에도 불구하고 전 세계 인구의 과반이 거주하고 있으며, 전 지구 CO₂ 배출의 대부분이 이곳에서 발생하는 것으로 보고되고 있다(O' Meara, 1999). 특히 도시 내에서 탄소중립 실현을 위해서는 다양한 형태의 도시림이 수행하는 탄소 흡수 기능에 주목할 필요가 있다.

도시림은 도시 내 다양한 식생을 포함하는 포괄적 녹지개념으로 도시공원, 도로변 녹지, 하천변 녹지, 학교숲, 담장 및 벽면 녹화 등 여러 형태로 구성되어 있다(Laclau, 2003; Son *et al.*, 2016). 이 중 도시공원은 시민 이용과 관리를 목적으로 조성된 공공녹지 공간이고, 도로변 녹지는 도로 인근에 조성된 선형의 제한적 녹지 공간이다(Laclau, 2003; Son *et al.*, 2016). 특히 도시공원은 연속적인 조성과 오랜 유지 기간으로 인해 생태계의 안정성이 상대적으로 높지만, 도로변 녹지는 교통량, 공해, 인위적 간섭 등 외부 요인의 영향을 크게 받는다(Karvinen *et al.*, 2024). 따라서 이러한 상이한 환경 특성을 지닌 두 유형의 도시림 탄소량을 비교함으로써 도시지역의 탄소 순환 특성을 보다 정밀하게 이해할 수 있다(Karvinen *et al.*, 2024).

최근에는 CO₂ 농도 상승에 따른 기후 요인의 변화, 특히 기온과 강수량 패턴 변화가 식물의 생태적 반응과 생태계 탄소 변화를 파악하는 데 큰 어려움을 주고 있다(Vitousek *et al.*, 1986; Choi *et al.*, 2001; He *et al.*, 2005; Florides and Christodoulides, 2009). 이에 기후요인과 생태적 반응 간의 상호작용을 밝히는 것이 필수적이며, 특히 기후인자와 토양 환경 변화가 탄소 흡수 및 배출에 미치는 영향을 통합적으로 분석할 필요가 있다(Vitousek *et al.*, 1986; Choi *et al.*, 2001).

토양권은 대기보다 약 2배, 식생보다 약 3배 많은 탄소를 저장하고 있으며, 지구 전체 탄소 저장고 중 가장 큰 비중을 차지한다(Waring and Running, 1998;

Bond-Lamberty *et al.*, 2004; Lee, 2012). 그리고 매년 약 75페타그램(Pg)의 탄소가 식물의 뿌리 호흡과 토양 미생물의 분해 활동을 통해 대기 중으로 방출되고 있기 때문에 토양권은 전 지구적 탄소 순환에서 핵심적인 역할을 수행한다(Waring and Running, 1998; Hanson *et al.*, 2000; Bond-Lamberty *et al.*, 2004; Lee, 2012; Lee *et al.*, 2019). 그리고 토양 내 이산화탄소 플럭스는 토양의 유형, 구조 그리고 이화학적 특성에 따라 크게 달라지기 때문에 다양한 환경 조건에서 토양의 탄소 저장과 방출 특성을 규명하는 연구가 필요하다(Ok *et al.*, 2002; Bhattacharyya *et al.*, 2012).

따라서 본 연구는 도시림의 대표적 형태인 도시공원과 도로변 녹지의 선행연구의 결과를 바탕으로 토양의 탄소 저장 및 환경 특성을 비교하고, 토양호흡량과 기온 및 강수량 등 기후요인과의 관계를 분석하고자 한다. 이를 통해 도시 생태계의 탄소 순환 메커니즘을 정밀하게 이해하고, 탄소중립 도시 조성을 위한 과학적 기반자료를 제공하는 데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 선행연구 수집 및 정리

IPCC Guidelines은 기후변화 평가와 온실가스 배출 산정을 위한 국제적 기준으로 IPCC Guidelines 상의 정주지 범주에 속해 있는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량 및 배출량을 평가하기 위해 국내 연구들을 수집하여 목록화 하였다.

선행연구 검색은 학술연구정보서비스(www.riss.kr), 구글 scholar(scholar.google.com) 등 검색엔진을 통해 수행하였으며, 검색 시점은 2025년 6월 기준으로 최근 20년간(2005-2024) 발행된 연구를 중심으로 수집하였다. 검색어는 도시공원, 도로변 녹지, 토양, 토양호흡, 탄소, 탄소 저장, 탄소 흐름 등을 활용하였다. 그리고 검색된 결과 중 신뢰성 있는 결과의 획득을 위해 동료 평가가 완료되어 발간된 문헌을 분석에 활용하였다.

수집된 선행연구는 크게 토양의 탄소 저장량 산정 연구와 토양호흡에 의한 탄소 배출량 산정 연구로 구분하였다. 그리고 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량 및 토양 환경 특성의 비교를 위해 토양의 탄소 저장량의 결과값과 토양호흡량의 결과값 및 토양 환경 특성(물리적 요인: 석력함량(%), 용적밀도(g/cm³), 화학적 요인: 토양 pH, 토양 유기물 함량(g/kg), 전질소(g/kg), 양이온치환용량(cmol/kg))의 결과값을 정리하였다(Table 1).

수집된 연구들을 대상으로 일정한 결과값들을 산출하기 위해서는 통일된 단위가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저장량 산정에는 ton C ha⁻¹의 단위로 통일하였고, 배출량을 대상으로 한 연구의 경우에는 시간을 고려하여 ton C ha⁻¹ yr⁻¹의 단위값을 사용하였다.

또한, 위의 단위값 통일을 위해서 선행연구 중 토양의 탄소 저장량과 토양호흡량이 면적 단위로 제시된 연구들만 활용하였고, 토양의 탄소 저장량의 경우에는 토양 g당 탄소 저장량을 산정한 연구들이 있었으나, 이를 면적으로 환산하기 위해서는 토양 가밀도(Bulk Density)나 토양 채취 깊이 등 추가 데이터들이 필요하므로 이와 같은 연구는 대푯값 산정에서 제외하고 진행하였다.

2.2 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성

도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성의 차이를 확인하기 위하여 수집한 자료의 정규분포 여부를 확인하기 위해 Kolmogorov-Smirnov test를 실시하였고, 정규분포를 따르지 않아 (p<0.05) 비모수 통계분석(Nonparametric Analysis)을 사용하였다(No and Jeong, 2002). 환경 구배별 차이의 유의성은 Mann-Whitney U Test와 Median Test로 확인하였다(No and Jeong, 2002). 통계분석의 유의확률은 0.05로 설정하였고, 모든 통계적 분석은 STATISTICA 7(Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA)을 사용하였다(No and Jeong, 2002).

Table 1. Categories of carbon storage, carbon emission, and soil environmental characteristics from previous studies

Category		Carbon storage	Carbon emission
Result	Soil	Soil organic carbon	Soil respiration
Soil environmental characteristics	Physical properties	Gravel content	
		Bulk density	
	Chemical properties	Soil pH	
		Soil organic matter	
		Total nitrogen	
		Cation exchange capacity	

2.3 토양호흡량과 기후요인과의 관계

도시공원과 도로변 녹지의 토양호흡량($\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)을 기후변화요소(연평균기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 초기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 중기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 생육 말기 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), 연 강수량(mm), 생육 초기 월평균 적산 강수량(mm), 생육 중기 월평균 적산 강수량(mm), 생육 말기 월평균 적산 강수량(mm))와 연결시켜 기후요인이 토양호흡량에 미치는 영향을 알아보았다(Table 2).

토양호흡량은 선행연구에서 수집된 도시공원과 도로변 녹지의 토양호흡량의 결과값을 사용하였고, 기후 요인은 기상청의 방재기상연보 자료를 사용하였다. 특히 계절 별로 기후요인이 토양호흡량에 미치는 영향을 알아보기 위해 기온과 강수량은 일반적으로 온대지역의 식물의 생육시기인 생육 초기(3월부터 5월까지), 생육 중기(6월부터 8월까지), 생육 말기(9월부터 11월까지)로 나누었고, 기온은 각 기간 동안의 평균값을, 강수량은 각 기간 내 월별로 적산값을 구한 후 이를 이용하여 월평균 적산값을 산출하였다.

토양호흡량과 기후변화요소와의 관계를 알아보기 위해 단순회귀분석을 시행하였고, 통계분석의 유의확률은 0.05로 설정하였다(No and Jeong, 2002). 이상의 통계학적 분석은 STATISTICA 7(Statsoft, Inc., Tulsa, OK,

USA)를 이용하였고, 선형회귀식은 엑셀프로그램 (Microsoft Office, 2016)에서 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선행연구 현황

검색엔진을 통해 수집된 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성의 선행연구는 총 15건이었고, 선행연구는 도시공원(11건, 73.3%)이 도로변 녹지(4건, 26.7%)보다 더 많은 연구가 진행되었다(Table 3).

수집된 선행연구 중 토양의 탄소 저장량과 배출량 결과값의 수는 총 111개(저장량: 96개(86.5%), 배출량: 15개(13.5%)) 이었고, 탄소 저장량 결과값의 수는 도시공원(61개, 63.5%)이 도로변 녹지(35개, 36.5%)보다 많았지만, 탄소 배출량 결과값의 수는 도로변 녹지(8개, 53.3%)가 도시공원(7개, 46.7%)보다 많았다(Table 3).

또한, 토양 환경 특성 결과값의 수는 총 287개(물리적 요인: 151개(52.6%), 화학적 요인: 136개(47.4%)) 이었고, 물리적 및 화학적 요인 결과값의 수는 모두 도시공원(물리적 요인: 84개(55.6%), 화학적 요인: 100개(73.5%))이 도로변 녹지(물리적 요인: 67개(44.4%), 화학적 요인: 36개(26.5%))보다 많았다(Table 3).

Table 2. Data collection of climate factors

Climate factors	Unit	Methods	Source of data	Period used data
Annual average temperature	°C	Calculate the average for the monthly average temperatures from January to December	Annual report of automatic weather station data	The period of execution of previous research
Average temperature during the beginning of growth		Calculate the average for monthly average temperature from March to May		
Average temperature during the middle of growth		Calculate the average for monthly average temperature from June to August		
Average temperature during the end of growth		Calculate the average for monthly average temperature from September to November		
Annual precipitation	mm	Sum the precipitation from January to December	Annual report of automatic weather station data	The period of execution of previous research
Monthly average of sum of daily precipitations during the beginning of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from March to May		
Monthly average of sum of daily precipitations during the middle of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from June to August		
Monthly average of sum of daily precipitations during the end of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from September to November		

국내에서 생태계 유형별 탄소 연구는 산림이 69.5% (82건)로 가장 높은 비중을 차지하였고, 농경지 16.9% (20건), 습지 8.5%(10건), 초지 5.1%(6건) 순으로 나타났다 (Jang *et al.*, 2023). 본 연구에서 정주지는 15건으로 습지나 초지보다는 많은 연구가 이루어졌지만, 산림과 농경지에 비해서는 여전히 부족한 수준이었다. 이는 국내 탄소 연구가 산림생태계에 편중되어 있음을 보여주며, 특히 도시지역을 포함한 비산림생태계에 대한 탄소 연구 확대의 필요성을 시사한다.

특히 정주지는 도시화에 따른 인구 집중과 개발 활동으로 면적이 지속적으로 확대되고 있고, 도시 내 다양한 기능과 목적에 따라 도시림의 유형도 점차 다양해지고 있다. 그리고 이러한 도시림의 탄소 저장 및 배출 특성은 도시 내 위치, 관리 방식, 식생 구성

등에 따라 상이하게 나타나기 때문에 정주지 내 다양한 도시림 유형을 대상으로 한 탄소 동태 연구가 필요하다 (Elvidge *et al.*, 2004; Gallo *et al.*, 2004; Theobald, 2004).

선행연구에서 도시공원은 도로변 녹지보다 토양의 탄소 저장량과 토양 환경 특성 결과값의 수가 많았지만, 토양의 탄소 배출량의 결과값의 수는 적었다(Table 3). 토양의 탄소 저장 및 배출은 생물 및 비생물적 요인 등 다양한 환경요인에 의하여 영향을 받으며, 특히 탄소 배출은 토양의 환경 특성에 영향을 받기 때문에 토양에서 탄소 변화를 이해하기 위해서는 이러한 특성에 영향을 미치는 환경요인을 파악하는 것이 필수적이다 (Chapin *et al.*, 1987; Davidson and Janssens, 2006; Robert *et al.*, 2007; Bichsel *et al.*, 2008; Klanderud, 2008).

Table 3. Results of previous studies on carbon storage and carbon emission, and soil environmental characteristics by urban parks and roadside green spaces used in analysis (SOC: Soil Organic Carbon (ton C ha⁻¹), SR: Soil Respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹), GC: Gravel Content (%), BD: Bulk Density (g/cm³), SP: Soil pH, SOM: Soil Organic Matter (g/kg), TN: Total Nitrogen (g/kg), CEC: Cation Exchange Capacity (cmol/kg))

Ecosystem types	Result		Soil environmental characteristics						Reference
	Carbon storage	Carbon emission	Physical properties			Chemical properties			
	SOC	SR	GC	BD	SP	SOM	TN	CEC	
Urban parks	15.6–28.4 (n=4)	-	12.3–24.2 (n=4)	1.0–1.1 (n=4)	6.0–7.1 (n=4)	-	-	-	An <i>et al.</i> , 2022
	-	5.3–7.3 (n=4)	-	-	-	-	-	-	Han <i>et al.</i> , 2014
	9.7–38.0 (n=12)	-	-	1.2–1.5 (n=12)	5.7–8.0 (n=12)	3.7–17.3 (n=12)	0.02–0.1 (n=12)	1.1–38.9 (n=12)	Jeong <i>et al.</i> , 2013
	76.5–88.3 (n=3)	-	15.8–48.1 (n=3)	1.0–1.3 (n=3)	-	-	-	-	Jeong, 2013
	-	6.1–9.5 (n=2)	-	-	6.3–6.5 (n=2)	8.6–58.0 (n=2)	0.3–0.9 (n=2)	-	Jung, 2016
	10.1–18.9 (n=4)	-	35.0–61.3 (n=4)	1.2–1.5 (n=4)	6.4 (n=1)	13.0 (n=1)	0.1 (n=1)	6.0 (n=1)	Korea Forest Service, 2020
	99.2–178.2 (n=8)	-	-	1.1–1.2 (n=8)	-	43.4–73.0 (n=8)	-	-	Kwak, 2019
	172.3 (n=1)	8.0 (n=1)	-	1.3 (n=1)	6.3 (n=1)	60.0 (n=1)	-	-	Lee, 2020
	12.7–36.2 (n=7)	-	-	-	6.2–7.8 (n=7)	29.0–43.0 (n=7)	0.04–0.3 (n=7)	4.7–12.4 (n=7)	Oh, 2024
	5.3–33.7 (n=19)	-	7.3–39.0 (n=19)	0.9–1.4 (n=19)	-	-	-	-	Seo, 2015
Roadside green spaces	12.8–23.4 (n=3)	-	-	1.1–1.3 (n=3)	-	-	-	-	Yoon <i>et al.</i> , 2016
	-	0.7–1.5 (n=8)	-	-	6.4–7.9 (n=8)	1.5–3.1 (n=8)	0.1–0.3 (n=8)	6.4–14.4 (n=8)	Kim, 2012
	11.1 (n=1)	-	25.3 (n=1)	1.5 (n=1)	6.9 (n=1)	7.4 (n=1)	0.1 (n=1)	4.7 (n=1)	Korea Forest Service, 2020
	4.4–47.4 (n=31)	-	18.7–50.3 (n=31)	0.6–1.2 (n=31)	-	-	-	-	Seo, 2015
	15.6–30.3 (n=3)	-	-	1.0–1.2 (n=3)	-	-	-	-	Yoon <i>et al.</i> , 2016

따라서 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 배출량을 정확히 산정하기 위해서는 다양한 토양 환경 특성에 대한 부족한 데이터를 확보해야 한다.

3.2 도시공원과 도로변 녹지의 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성

토양의 탄소 저장량과 배출량은 모두 도시공원(저장량: $38.5 \pm 43.2 \text{ ton C ha}^{-1}$, 배출량: $7.1 \pm 1.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)이 도로변 녹지(저장량: $15.5 \pm 9.0 \text{ ton C ha}^{-1}$, 배출량: $1.2 \pm 0.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)보다 높았다(Fig. 1(a), 1(b)).

그리고 토양 환경 특성에서 용적밀도, 토양 유기물 함량, 양이온치환용량은 도시공원(용적밀도: $1.17 \pm 0.16 \text{ g/cm}^3$, 토양 유기물 함량: $30.6 \pm 21.8 \text{ g/kg}$, 양이온치환용량: $13.4 \pm 9.6 \text{ cmol/kg}$)이 도로변 녹지(용적밀도: $0.95 \pm 0.19 \text{ g/cm}^3$, 토양 유기물 함량: $2.9 \pm 1.8 \text{ g/kg}$, 양이온치환용량: $10.2 \pm 3.6 \text{ cmol/kg}$)보다 높았다(Fig. 1(d), 1(f), 1(h)). 하지만, 석력함량, 토양 pH, 전질소는 도로변 녹지(석력함량: $34.8 \pm 10.1 \%$, 토양 pH: 7.2 ± 0.5 , 전질소: $1.7 \pm 0.8 \text{ g/kg}$)가 도시공원(석력함량: $29.1 \pm 11.7 \%$, 토양 pH: 6.6 ± 0.5 , 전질소: $1.2 \pm 1.8 \text{ g/kg}$)보다 높았다(Fig. 1(c), 1(e), 1(g)).

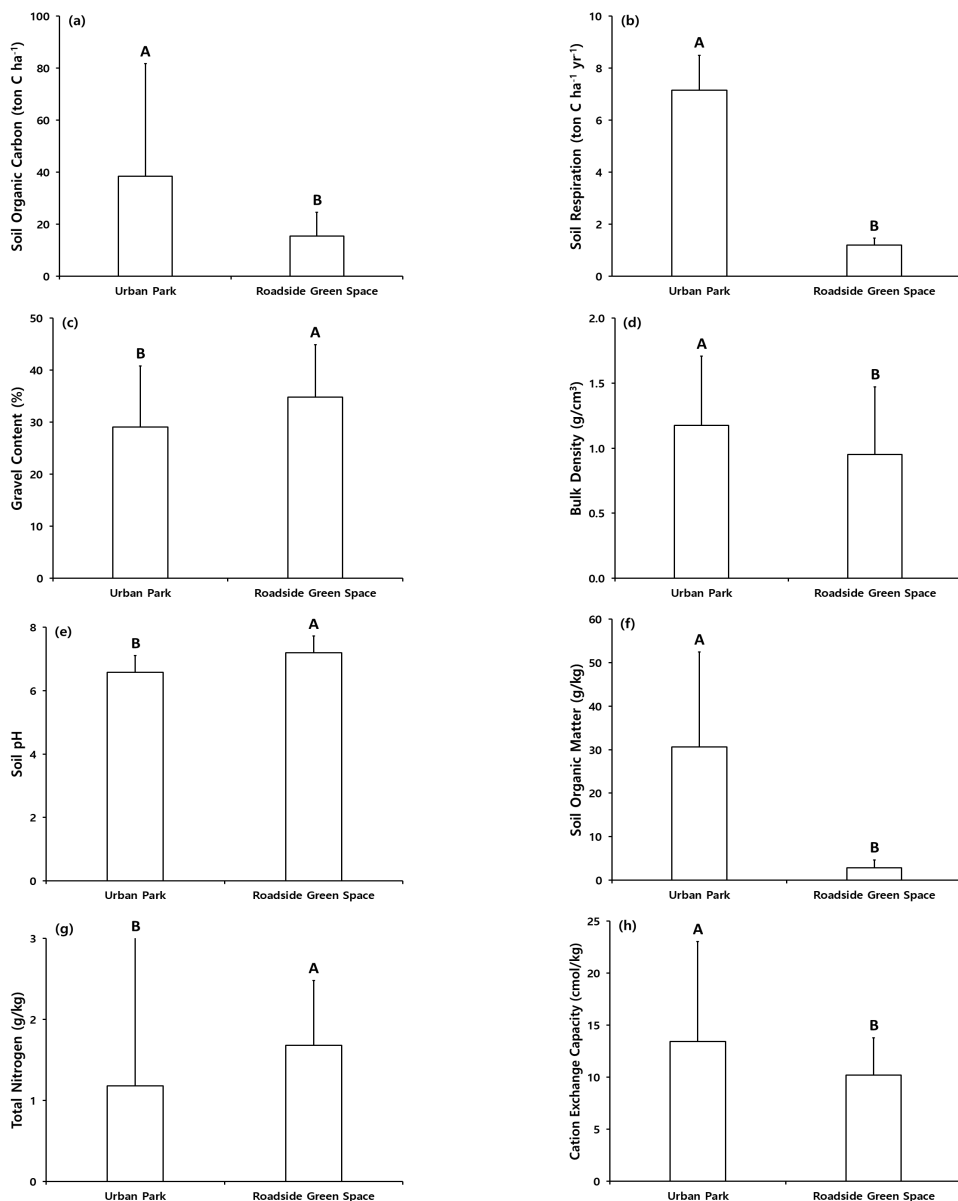


Fig. 1. Soil Organic Carbon (ton C ha^{-1}) (a), Soil Respiration ($\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) (b), Gravel Content (%) (c), Bulk Density (g/cm^3) (d), Soil pH (e), Soil Organic Matter (g/kg) (f), Total Nitrogen (g/kg) (g), Cation Exchange Capacity (cmol/kg) (h) measured under urban parks and roadside green spaces. Alphabets on the bars mean significant difference among urban parks and roadside green spaces ($p < 0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation.

본 연구에서 도시공원은 도로변 녹지보다 토양의 탄소 저장량과 배출량이 높았는데(Fig. 1(a), 1(b)) 이는 도시공원이 도로변 녹지보다 토양 내 장기간 축적된 유기물과 양이온치환용량이 더 많았기 때문이다. 토양 내 높은 유기물 함량은 탄소 저장에 핵심적인 역할을 하는데 유기물은 토양의 주요 탄소 저장고이며, 미생물의 생장과 토양 구조 안정화에 기여한다(Dixon *et al.*, 1994; Lal, 2004; Hu and Wang, 2008). 그리고 높은 양이온치환용량은 양분의 보유력이 크고, 식물의 생장이 활발할 수 있는 환경임을 의미하며, 이는 더 많은 유기물의 생산과 함께 토양으로의 탄소 유입으로 이어진다(Brady and Weil, 2008). 또한, 토양 내 높은 토양 유기물 함량과 양이온치환용량은 토양 미생물의 호흡과 식물의 뿌리 호흡을 촉진하는 환경을 제공하여 결과적으로 토양호흡을 증가시키는 요인으로 작용한다.

일반적으로 낮은 용적밀도는 공극률이 높아 미생물 및 식물 뿌리의 활동에 유리한 환경을 조성하며, 이는 토양 유기물 축적과 탄소 저장 증가에 기여할 수 있지만(Lapen *et al.*, 2001; Dam *et al.*, 2005), 본 연구에서는 도시공원이 도로변 녹지보다 용적밀도가 더 높았다. 이는 장기간 사람의 이용과 시설물 조성으로 인해 토양이 다소 압축되었을 가능성이 높지만, 도시 공원이 도로변 녹지보다 토양의 탄소 저장량이 높은 것은 물리적인 요인보다는 토양 내 유기물 함량, 양이온치환용량 등의 화학적인 요인이 더 중요한 요인으로 작용하였기 때문이다.

도로변 녹지는 도시공원보다 석력함량, 토양 pH, 전질소가 높았는데 높은 석력함량은 토양의 유효토심을 줄이고, 토양 내 유기물의 축적을 방해한다(Alameda *et al.*, 2012; Tracy *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015). 그리고 알칼리성 pH는 특정 미생물군의 활성화와 유기물 분해 속도를 줄이기 때문에 이는 토양 내 탄소 저장을 감소시킨다(Six *et al.*, 2002; Pennisi and Thomas, 2015). 또한, 전질소가 높은 것은 일시적으로 식물의 생장을 촉진할 수 있지만, 장기적으로는 토양 산성화 및 탄소 저장 감소를 초래할 수 있다(Galloway *et al.*, 2008).

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 도시공원의 토양은 높은 유기물 함량 및 양이온치환용량으로 인해 탄소의 장기적인 저장이 가능하지만, 도로변 녹지의 토양은 높은 석력함량과 낮은 유기물함량 및 탄소 저장량을 고려하였을 때 지속적인 토양 개량과 유기물 공급이 필요하다. 그리고 도시공원은 도로변 녹지에 비해 토양호흡량이 높게 나타났는데 이는 토양 미생물 및

식물 뿌리의 생물학적 활성이 활발하게 이루어지고 있음을 의미하며, 일정 수준의 토양호흡은 건강한 토양 생태계를 유지하는데 필수적인 요소이다(Six *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 2012). 반면에 도로변 녹지의 낮은 토양호흡량은 토양 미생물 활동 및 식물 뿌리 호흡이 낮은 것을 의미하며(Lapen *et al.*, 2001; Dam *et al.*, 2005), 이러한 조건은 토양의 탄소 방출을 억제할 수 있지만, 이는 토양생태계의 활력이 낮아 유기물의 순환 및 탄소 축적 과정이 제한됨을 의미한다.

이처럼 도시공원과 도로변 녹지와 같은 도시림은 일반 산림에 비해 인위적 교란을 많이 받기 때문에 토양의 탄소 저장과 배출이 동태적이고 변동성이 크다. 특히 본 연구에서 도시공원은 장기적으로 탄소를 저장하는 탄소흡수원으로 기능을 하지만, 미생물 호흡과 식물 뿌리 호흡 등 생물학적 활동으로 인해 단기적으로는 탄소 배출원으로도 작용할 수 있다. 이러한 동태적 특성은 도시림 내 탄소흐름을 이해하고, 도시생태계의 지속 가능한 관리 전략을 수립하는 데 중요한 시사점을 제공한다.

3.3 토양호흡량과 기후요인과의 관계

도시공원과 도로변 녹지의 토양호흡량은 $4.0 \pm 3.2 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었고, 생육시기별 기온 및 강수량을 비교하였을 때 기온은 생육 중기 평균 기온($24.3 \pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$)이 가장 높았고, 생육 말기 평균 기온($14.0 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$), 연평균기온($12.2 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$)과 생육 초기 평균 기온($11.8 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$) 순이었다(Table 4). 그리고 강수량은 연강수량($1215.7 \pm 155.6 \text{ mm}$)이 가장 높았고, 생육 중기 월평균 적산 강수량($246.6 \pm 34.2 \text{ mm}$), 생육 말기 월평균 적산 강수량($79.1 \pm 12.5 \text{ mm}$), 생육 초기 월평균 적산 강수량($61.3 \pm 8.1 \text{ mm}$) 순이었다(Table 4).

또한, 도시공원과 도로변 녹지의 토양호흡량과 통계적으로 유의한 관계를 보인 것은 연평균기온($R^2=0.4902$, $p=0.0037$), 생육 초기 평균 기온($R^2=0.6935$, $p=0.0001$), 생육 중기 평균 기온($R^2=0.6490$, $p=0.0003$), 연강수량($R^2=0.3861$, $p=0.0134$), 생육 초기 월평균 적산 강수량($R^2=0.5647$, $p=0.0012$) 이었다(Fig. 2(a), 2(b), 2(c), 2(e), 2(f)). 이러한 결과는 토양호흡량은 연평균기온과 생육 초기 및 중기 평균 기온이 증가할수록 토양호흡량은 증가하고, 연강수량과 생육 초기 월평균 적산 강수량이 증가할수록 토양호흡량은 감소한다는 것을 의미한다.

온도는 토양 내 미생물의 활성을 촉진시키고, 식물의 뿌리 생장과 호흡률을 증가시켜 토양호흡을 직접적으로 증가시키는 요인이다(Tamai, 2009). 특히 생육 초기

Table 4. Data of soil respiration and climate factors by urban parks and roadside green spaces used in analysis (SR: Soil Respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹), AAT: Annual Average Temperature (°C), TBG: Average Temperature during the Beginning of Growth (°C), TMG: Average Temperature during the Middle of Growth (°C), TEG: Average Temperature during the End of Growth (°C), AP: Annual Precipitation (mm), PBG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Beginning of Growth (mm), PMG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Middle of Growth (mm), PEG: Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the End of Growth (mm))

Ecosystem types	Study period	Result SR	Weather station	Climate factor								Reference											
				AAT	TBG	TMG	TEG	AP	PBG	PMG	PEG												
Urban parks	2011–2012	6.1 9.5	Nowon	12.1	11.9	24.5	13.6	1333.5	66.4	282.6	78.2	Jung, 2016											
	2011–2018	8.0	Junggu	12.0	11.6	24.0	14.1	1002.4	50.8	208.6	61.8	Lee, 2020											
	2012	5.3 6.7 7.2	Jiksan	12.7	12.3	25.0	14.5	1197.3	59.2	227.8	89.0	Han <i>et al.</i> , 2014											
		7.3																					
		0.7 1.0 1.2																					
Roadside green spaces	2011	1.2 1.3 1.4 1.4 1.5	Gwanak	11.9	11.3	23.7	13.8	1329.4	68.8	267.2	87.3	Kim, 2012											
		Mean											4.0	-	12.2	11.8	24.3	14.0	1215.7	61.3	246.6	79.1	-
		S.D.											3.2	-	0.4	0.4	0.6	0.4	155.6	8.1	34.2	12.5	-

및 증기의 기온이 증가하면 식물의 생리활성이 활성화 되고, 광합성 산물이 뿌리로의 이동이 활발해져 뿌리 호흡과 미생물 분해 작용이 증가되어 토양의 탄소 방출량이 증가한다(Raich and Schlesinger, 1992; Buchmann, 2000). 본 연구에서도 이러한 기온 상승이 토양호흡량 증가로 이어졌으며, 이는 토양 내 유기물 분해 속도 증가와 관련된 일반적인 생태계 반응과 일치한다(Kuzyakov *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2013; Kirkby *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2023).

반면에 강수량은 토양호흡에 있어 양면적인 역할을 하는데 일정 수준의 수분은 식물 및 미생물의 생장에 필수적이지만, 과도한 강수는 토양 과습 상태를 유발하여 산소 공급을 제한하고, 그로 인해 혐기성 조건이 형성 되면 미생물 활동과 뿌리 호흡이 억제되어 토양호흡량이 감소하게 된다(Linn and Doran, 1984; Franzluebbbers, 1999). 본 연구에서는 연강수량과 생육 초기 강수량이 증가할수록 토양호흡량이 유의하게 감소하는 경향을 보였으며, 이는 과도한 수분 공급으로 인해 토양 내 공극이 물로 채워져 산소 공급이 저해되고, 이에 따른 미생물 활성 저하가 주요 원인으로 작용했을 가능성을 시사한다(Pietikäinen *et al.*, 1999; Maier and Kress, 2000).

특히 생육 초기에 온도가 높고 동시에 강수량이 많을 경우에는 높은 증발산으로 인해 수분 스트레스와 과습

상태가 교차적으로 발생할 수 있고(Jones *et al.*, 1993; Yeh and Wensel, 2000), 이는 식물 뿌리 기능 저하와 미생물 군집의 변화로 이어져 토양호흡에도 복합적인 영향을 줄 수 있다(Mihailović *et al.*, 1997; Yordanov *et al.*, 2000; Baquedano and Castillo, 2006; Bailey-Serres and Voisenek, 2008; Wu *et al.*, 2008). 또한, 도시녹지와 같은 인공적 생태계는 토양 통기성과 배수 성능이 자연림에 비해 낮을 수 있기 때문에 강수에 따른 과습에 의한 영향이 더 두드러지게 나타날 수 있다.

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 도시공원과 도로변 녹지의 토양호흡량은 생육기 동안의 온도 상승에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 과도한 강수는 토양 호흡을 제한하는 요인으로 작용한다. 따라서 도시 생태계의 탄소 저장 및 배출 기능을 안정적으로 유지하기 위해서는 기후요인의 변화 양상을 고려한 토양 환경 및 수분 관리가 필수적이다. 특히 도시녹지 조성 시 토양 배수 능력 향상 및 수분 스트레스 저감 대책은 토양호흡 조절과 생태계서비스 유지에 중요한 역할을 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 대표적인 도시림인 도시공원과 도로변 녹지의 주요 탄소저장고인 토양의 탄소 저장량 및 환경 특성 비교와 기후요인인 기온과 강수량이 토양호흡량에

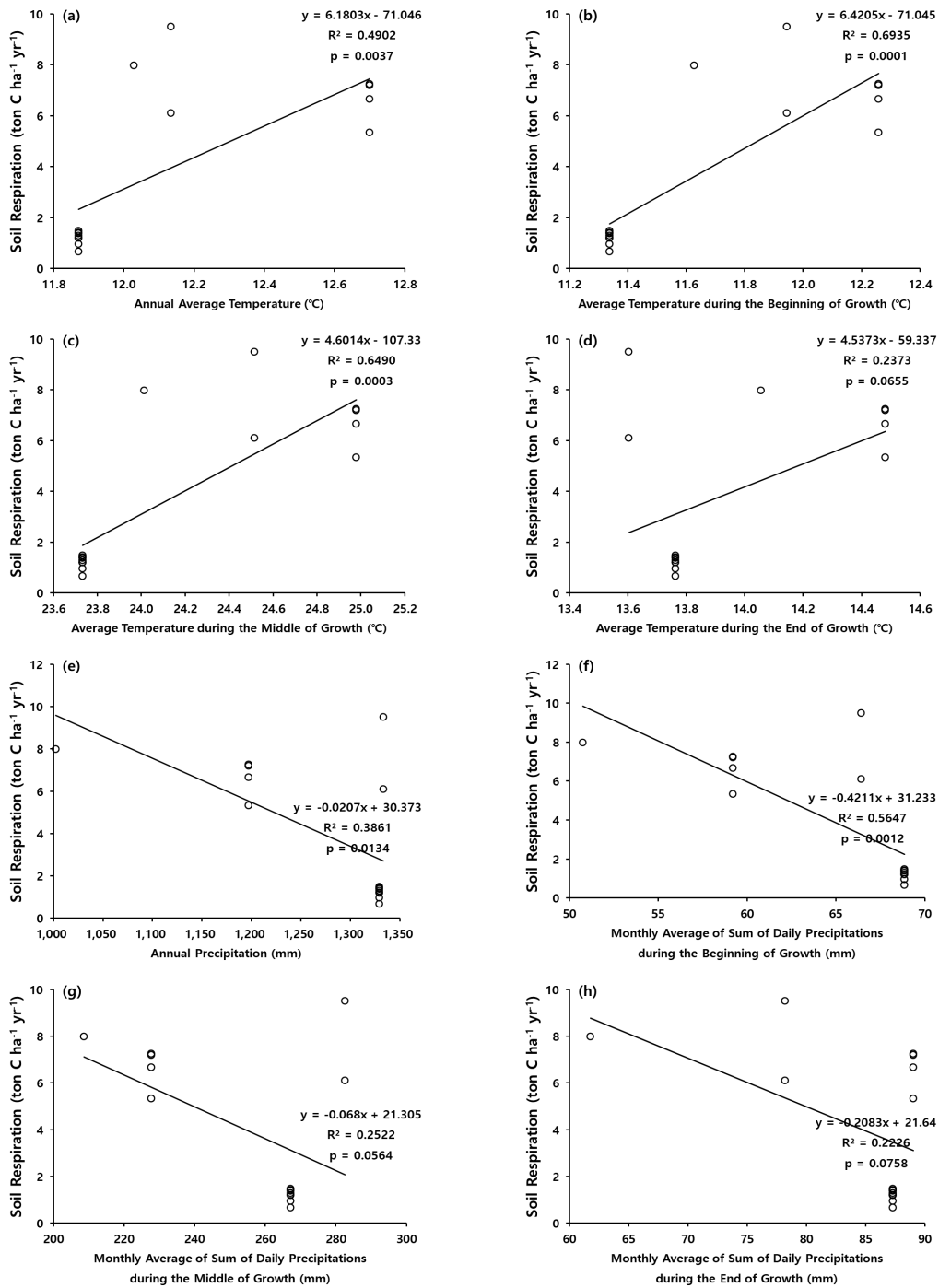


Fig. 2. The relationship among soil respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) and climate factors (Annual Average Temperature (°C) (a), Average Temperature during the Beginning of Growth (°C) (b), Average Temperature during the Middle of Growth (°C) (c), Average Temperature during the End of Growth (°C) (d), Annual Precipitation (mm) (e), Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Beginning of Growth (mm) (f), Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the Middle of Growth (mm) (g), Monthly Average of Sum of Daily Precipitations during the End of Growth (mm) (h)).

어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 선행연구 결과를 분석하였다.

그 결과 토양의 탄소 저장량과 배출량 및 토양 환경 특성의 선행연구 도시공원이 도로변 녹지보다 더 많은

연구가 진행되었지만, 정주지는 인간의 필요에 따른 토지 이용으로 다양한 도시림 유형이 형성되었으므로 다양한 유형의 도시림을 대상으로 탄소 저장 및 흐름에 대한 동태적 연구가 진행되어야 한다.

그리고 토양의 탄소 저장량, 토양호흡량, 용적밀도, 토양 유기물 함량, 양이온치환용량은 도시공원이 도로변 녹지보다 각각 약 2.5 배, 약 6.0 배, 약 1.2 배, 약 10.6 배, 약 1.3 배 높았지만, 석력함량, 토양 pH, 전질소는 도로변 녹지가 도시공원보다 각각 약 1.2 배, 약 1.1 배, 약 1.4 배 높았다. 이는 도시공원의 토양은 높은 유기물 함량 및 양이온치환용량을 나타내어 탄소의 장기적인 저장에 유리한 환경을 제공하며, 비교적 높은 토양호흡량은 토양 미생물 및 식물 뿌리의 활발한 생물학적 활동을 반영하는 것으로 건강하고 안정적인 토양생태계의 유지에 기여하고 있음을 시사한다. 반면 도로변 녹지의 토양은 석력 함량이 높고 유기물 함량 및 탄소 저장량이 낮아 상대적으로 생물학적 활성이 저하되어 있었으며, 낮은 토양호흡량은 탄소 방출의 억제 요인으로 작용함을 나타내지만, 동시에 토양생태계의 활력과 탄소 저장 기능이 제한적임을 의미한다.

또한, 토양호흡량은 연평균기온과 봄철 및 여름철의 평균 기온이 증가할수록 증가하고, 연강수량과 봄철의 강수량이 증가할수록 감소한다. 이는 토양호흡량은 생육기 동안의 온도 상승에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 과도한 강수는 토양호흡을 제한하는 요인으로 작용한다.

본 연구의 결과를 종합적으로 보았을 때 도시공원의 토양은 높은 유기물 함량 및 양이온치환용량으로 인해 탄소의 장기적인 저장이 가능하지만, 도로변 녹지의 토양은 높은 석력함량과 낮은 유기물함량 및 탄소 저장량을 고려하였을 때 지속적인 토양 개량과 유기물 공급이 필요하다. 그리고 기후요인 중 생육 초기와 중기의 기온과 강수량은 도시림의 생태계서비스 증가 및 감소에 관련되어 있음을 확인하였고, 이처럼 도시공원과 도로변 녹지에서 받는 환경요인의 영향은 다른 도시림 유형에서도 유사할 것이다.

따라서 도시생태계의 탄소 저장 및 배출 기능을 안정적으로 유지하기 위해서는 기후요인의 변화 양상을 고려한 토양 환경 및 수분 관리가 필수적이다. 특히 도시녹지 조성 시 토양 배수 능력 향상 및 수분 스트레스 저감 대책은 토양호흡 조절과 생태계서비스 유지에 중요한 역할을 할 수 있다. 하지만, 본 연구는 선행연구를 기반으로 하여 도시공원과 도로변 녹지의 식생 구성, 토양 유형 등 세부 환경요인을 충분히 고려하지 못한 한계가 있다. 특히 이러한 환경요인들은 토양 특성과 탄소 저장 능력에 영향을 미칠 수 있으므로 향후에는 세부 환경조건을 포함한 정량적 및 장기적 연구가 필요하다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2025-16).

References

- Alameda, D., Anten, N. P. R. and Villar, R. (2012). Soil Compaction Effects on Growth and Root Traits of Tobacco Depend on Light, Water Regime and Mechanical Stress. *Soil and Tillage Research*, Vol. 120, pp. 121–129, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.013>
- An, S. E., Lee, J. M. and Kim, C. S. (2022). Relationships between Soil Carbon Storage and Soil Properties of Urban Parks in Jinju-si, Gyeongsangnam-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 24(2), pp. 115–123. [Korean Literature]
- Bailey-Serres, J. and Voisenek, L. A. C. J. (2008). Flooding Stress: Acclimations and Genetic Diversity. *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 59, pp. 313–339, DOI : [10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752)
- Baldocchi, D. (2008). Breathing of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. *Australian Journal of Botany*, Vol. 56, pp. 1–26, DOI : <https://doi.org/10.1071/BT07151>
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem – Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 82(11), pp. 2415–2434, DOI : [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)

- Baquedano, F. J. and Castillo, F. J. (2006). Comparative Ecophysiological Effects of Drought on Seedlings of the Mediterranean Water-Saver *Pinus halepensis* and Water-Spenders *Quercus coccifera* and *Quercus ilex*. *Trees*, Vol. 20(6), pp. 689–700, DOI : <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0084-0>
- Bhattacharyya, P., Neogi, S., Roy, K. S. and Rao, K. S. (2012). Gross Primary Production, Ecosystem Respiration and Net Ecosystem Exchange in Asian Rice Paddy: an Eddy Covariance-based Approach. *Current Science*, Vol. 104(1), pp. 67–75, DOI : <https://www.jstor.org/stable/24110664>
- Bichsel, R. G., Starman, T. W. and Wang, Y. (2008). Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Requirements for Optimizing Growth and Flowering of the Nobile Dendrobium as a Potted Orchid. *Hortscience*, Vol. 43, pp. 328–332, DOI : <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.2.328>
- Bond-Lamberty, B., Wang, C. and Gower, S. T. (2004). Contribution of Root Respiration to Soil Surface CO₂ Flux in a Boreal Black Spruce Chronosequence. *Tree Physiology*, Vol. 24, pp. 1387–1395, DOI : <https://doi.org/10.1093/treephys/24.12.1387>
- Brady, N. C. and Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soil*, 14 ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Buchmann, N. (2000). Biotic and Abiotic Factors Controlling Soil Respiration Rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 32(11–12), pp. 1625–1635, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00077-8)
- Chapin, F. S., Bloom, A. J., Field, C. B. and Waring, R. H. (1987). Plant Responses to Multiple Environmental Factors. *BioScience*, Vol. 37, pp. 49–57, DOI : <https://doi.org/10.2307/1310177>
- Choi, J. K., Lorimer, C. G., Vanderwerker, J., Cole, W. G. and Martin, G. L. (2001). A Crown Model for Simulating Long-Term Stand and Gap Dynamics in Northern Hardwood Forests. *Forest Ecology and Management*, Vol. 152, pp. 235–258, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00606-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00606-X)
- Dam, R. F., Mehdi, B. B., Burgess, M. S. E., Madramootoo, C. A., Mehuys, G. R. and Callum, I. R. (2005). Soil Bulk Density and Crop Yield under Eleven Consecutive Years of Corn with Different Tillage and Residue Practices in a Sandy Loam Soil in Central Canada. *Soil and Tillage Research*, Vol. 84, pp. 41–53. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.006>
- Davidson, E. A. and Janssens, I. A. (2006). Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature*, Vol. 440, pp. 165–173, DOI : [10.1038/nature04514](https://doi.org/10.1038/nature04514)
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trxler, M. C. and Wisniewski, J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, Vol. 263, pp. 185–190, DOI : [10.1126/science.263.5144.185](https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185)
- Elvidge, C.D., Milesi, C., Dietz, J. B., Tuttle, B. T., Sutton, P. C., Nemani, R. and Vogelmann, J. E. (2004). U.S. Constructed Area Approaches the Size of Ohio. *EOS-Transactions of the American Journal*, Vol. 85, pp. 233–234, DOI : <https://doi.org/10.1029/2004EO240001>
- Florides, G. A. and Christodoulides, P. (2009). Global Warming and Carbon Dioxide through Sciences. *Environment International*, Vol. 35, pp. 390–401, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.007>
- Franzluebbers, A. J. (1999). Microbial Activity in Response to Water-Filled Pore Space of Variably Eroded Southern Piedmont Soils. *Applied Soil Ecology*, Vol. 11(1), pp. 91–101, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00128-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00128-0)
- Gallo, K. P., Elvidge, C. D., Yang, L. and Reed, B. C. (2004). Trends in Night-Time City Lights and Vegetation Indices Associated with Urbanization within the Conterminous USA. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, 2003–2007, DOI : <https://doi.org/10.1080/01431160310001640964>
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seitzinger, S. P. and Sutton, M. A. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, Vol. 320(5878), pp. 889–892, DOI : [10.1126/science.1136674](https://doi.org/10.1126/science.1136674)

- Han, M. K., Kim, K. J. and Yang, K. C. (2014). Comparison of Carbon Storages, Annual Carbon Uptake and Soil Respiration to Planting Types in Urban Park. *Korean Journal of Environment and Ecology*, Vol. 28(2), pp. 142–149. [Korean Literature]
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T. and Andrews, J. A. (2000). Separating Root and Soil Microbial Contributions to Soil Respiration: A Review of Methods and Observations. *Biogeochemistry*, Vol. 48(1), pp. 115–146, DOI : 10.1023/A:1006244819642
- He, J. S., Wolfe–Bellin, K. S. and Bazzaz, F. A. (2005). Leaf–Level Physiology, Biomass and Reproduction of *Phytolacca americana* under Conditions of Elevated CO₂ and Altered Temperature Regimes. *International Journal of Plant Sciences*, Vol. 166(4), pp. 615–622, DOI : <https://doi.org/10.1086/430196>
- Hu, H. and Wang, G. G. (2008). Changes in Forest Biomass Carbon Storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecology and Management*, Vol. 255(5–6), pp. 1400–1408, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.064>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khouradajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S. and Malley, J. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. pp. 1–34.
- Jang, I. Y., Jeong, H. M., Han, S. H., Ahn, N. H., Kim, D. Y. and Kang, S. R. (2023). Estimation of Carbon Storages and Fluxes by Ecosystem Type in Korea. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 25(4), pp. 417–425. [Korean Literature]
- Jang, J. H. (2022). A Study on the Restoration of Carbon Storage in Urban Parks due to Urban Development. Ph. D. dissertation, Dankook University, Yongin.
- Jeong, H. M., Kim, H. R., Shin, D. H., Lee, K. M., Lee, S. H., Han, Y. S., Jang, R. H., Lee, S. K., Kim, T. K. and You, Y. H. (2013). Litter Production and Soil Organic Carbon Dynamics of *Pinus densiflora*, *Quercus mongolica* and *Robinia pseudo-acacia* Forests in Mt. Nam. *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 31(2), pp. 87–95. [Korean Literature]
- Jones, E. A., Reed, D. D., Mroz, G. D., Liechty, H. O. and Catteelino, P. J. (1993). Climate Stress as a Precursor to Forest Decline: Paper Birch in Northern Michigan, 1985–1990. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, pp. 229–233, DOI : <https://doi.org/10.1139/x93-030>
- Jung, S. H. (2016). The Estimation of Carbon Budget in Urban Forests. Master thesis, Seoul Women's University, Seoul.
- Karvinen, E., Backman, L., Järvi, L. and Kulmala, L. (2024). Soil Respiration Across a Variety of Tree–Covered Urban Green Spaces in Helsinki, Finland. *Soil*, Vol. 10, pp. 381–406, DOI : <https://doi.org/10.5194/soil-10-381-2024>
- Kim, L. H. (2012). Comparison of Soil Microbial Characteristics in Urban Roadside Soils with and without Understory : A Case Study in Gwanak, Seoul. Master thesis, Seoul National University, Seoul.
- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Conyers, M. and Kirkegaard, J. A. (2014). Carbon–Nutrient Stoichiometry to Increase Soil Carbon Sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 68, pp. 57–69, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.011>
- Klanderud, K. (2008). Species–Specific Responses of an Alpine Plant Community under Simulated Environmental Change. *Journal of Vegetation Science*, Vol. 19, pp. 363–372, DOI : 10.3170/2008-8-18376
- Korea Environment Institute. (2019). The Transformation of Urban Park and Green Space Policy for

- Sustainability. Korea Environment Institute. Sejong, Korea Forest Service. (2020). The Development of Models, Technologies, and Management/Evaluation Systems for Enhancing Carbon Sinks and Multiple Benefits of Urban Forests in Living Areas in Response to the New Climate Regime. Korea Forest Service. Daejeon.
- Kuzyakov, Y., Friedel, J. K. and Stahr, K. (2000). Review of Mechanisms and Quantification of Priming Effects. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 32(11-12), pp. 1485-1498, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
- Kwak, D. (2019). Soil Organic Matter Content and Carbon Storage Change in Urban Green Spaces. Master thesis, Sungkyunkwan University, Suwon.
- Laclau, P. (2003). Biomass and Carbon Sequestration of Ponderosa Pine Plantations and Native Cypress Forests in Northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, Vol. 180, pp. 317-333, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00580-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00580-7)
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, Vol. 304, pp. 1623-1627, DOI : 10.1126/science.1097396
- Lapen, D. R., Topp, G. C., Gregorich, E. G., Hayhoe, H. N. and Curnoe, W. E. (2001). Divisive Field-Scale Associations between Corn Yields, Management, and Soil Information. *Soil and Tillage Research*, Vol. 58, pp. 193-206, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00168-9)
- Lee, E. P. (2020). Studies on Carbon Cycle, Valuation of Ecosystem Services and Relationship with Climate Factors in Conifer Forests of Metropolis and Subalpine Zone in Korea. Ph. D. dissertation, Kongju National University, Kongju.
- Lee, E. P., Lee, S. I., Jeong, H. M., Han, Y. S., Lee, S. Y., Park, J. H., Jang, R. H., Hong, Y. S., Jung, Y. H., Kim, E. J., Lee, S. H. and You, Y. H. (2019). Valuation of Ecosystem Services in the Organic Carbon of the *Pinus densiflora* Forest at Mt. Namsan, Seoul Metropolitan City. *Journal of Ecology And Environment*, Vol. 43(35). [Korean Literature]
- Lee, N. Y. (2012). Estimation of Carbon Storage in Three Cool-Temperate Broad-Leaved Deciduous Forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 30(2), 121-127. [Korean Literature]
- Linn, D. M. and Doran, J. W. (1984). Effects of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Non-Tilled Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 48(6), pp. 1267-1271, DOI : <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Liu, L., Zhang, T., Gilliam, F. S., Gundersen, P., Zhang, W., Chen, H. and Mo, J. (2013). Interactive Effects of Nitrogen and Phosphorus on Soil Microbial Communities in a Tropical Forest. *PLOS ONE*, Vol. 8(4), e61188, DOI : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061188>
- Liu, W., Liu, J., Dongxue, Y. and Zhao, X. (2015). Influence of Ecological Factors on the Production of Active Substances in the Anti-Cancer Plant *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T.S. Ying. *PLoS One*, Vol. 10(4), pp. e0122981, DOI : 10.1371/journal.pone.0122981
- Maier, C. A. and Kress, L. W. (2000). Soil CO₂ Evolution and Root Respiration in 11 year-old Loblolly Pine (*Pinus taeda*) Plantations as Affected by Moisture and Nutrient Availability. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 30(3), pp. 347-359, DOI : <https://doi.org/10.1139/x99-218>
- McCarl, B. A. and Schneider, U. A. (2001). Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry. *Science*, Vol. 294, pp. 2481-2482, DOI : 10.1126/science.1064193
- Mihailović, N., Lazarević, M., Dželetović, Z., Vučković, M. and Durdević, M. (1997). Chlorophyllase Activity in Wheat, *Triticum aestivum* L. Leaves during Drought and its Dependence on the Nitrogen Ion Form Applied. *Plant Science*, Vol. 129(2), pp. 141-146, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00189-1)
- No, H. J. and Jeong, H. Y. (2002). Well-Defined Statistical Analysis according to Statistica. Hyeonseol Publisher, Seoul.
- O' Meara, M. (1999). Reinventing Cities for People

- and the Planet. Worldwatch. Washington.
- Oh, J. Y. (2024). Carbon Reduction Service Enhancement of Urban Parks – Focused on the Gyeongin area on the West coast –. Master thesis, Daegu Catholic University, Gyeongsan.
- Ok, Y. S., Lim, S. and Kim, J. G. (2002). Electrochemical Properties of Soils: Principles and Applications. *Life Science and Natural Resources Research*, Vol. 10, pp. 69–84. [Korean Literature]
- Pennisi, B. V. and Thomas, P. A. (2015). Essential pH Management in Greenhouse Crops: pH and Plant Nutrition. Extension Floriculture Specialists, The University of Georgia.
- Pietikainen, J., Vaijärvi, E., Ilvesniemi, H., Fritze, H. and Westman, C. J. (1999). Carbon Storage of Microbes Ad Roots and the Flux of CO₂ Across a Moisture Gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 29(8), pp. 1197–1203, DOI : <https://doi.org/10.1139/x99-066>
- Raich, J. W. and Schlesinger, W. H. (1992). The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and Its Relationship to Vegetation and Climate. *Tellus*, Vol. 44(2), pp. 81–99, DOI : <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15428>
- Robert, J., Marcus, L., Lars, V., Bram, B., Rainer, B., Frank, H., Dale, W. J., Kari, M. and Kenneth, A. B. (2007). How Strongly Can Forest Management Influence Soil Carbon Sequestration?. *Geoderma*, Vol. 137, pp. 253–268, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>
- Seo, K. W. (2015). Estimation of Soil Carbon Storge by Urban Green Spaces. Ph. D. dissertation, Korea University, Seoul.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., and Paustian, K. (2002). Stabilization Mechanisms of Soil Organic Matter: Implications for C-saturation of Soils. *Plant and Soil*, Vol. 241(2), pp. 155–176, DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Son, Y. M., Kim, K. N. and Pyo, J. K. (2016). Developing Volume Equation of Street Tree and its Carbon Stock for Urban Forest in Seoul. *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 50(1), pp. 95–104. [Korean Literature]
- Tamai, K. (2009). Experimental Estimation of the Effect of Rainfall Interception on Soil Respiration in a Broad-Leaved Deciduous Forest in Western Japan. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11(4), pp. 247–251. [Korean Literature]
- Theobald, D. M. (2004). Placing Exurban Land-Use Change in a Human Modification Framework. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 2, pp. 139–144, DOI : [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0139:PELCIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0139:PELCIA]2.0.CO;2)
- Tracy, S. R., Black, C. R., Roberts, J. A. and Mooney, S. J. (2013). Exploring the Interacting Effect of Soil Texture and Bulk Density on Root System Development in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 91, pp. 38–47, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.003>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2023). Nationally Determined Contributions under the Paris Agreement: Synthesis Report by the Secretariat (FCCC/PA/CMA/2023/12). United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany. pp. 1–45.
- Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. and Matson, P. A. (1986). Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. *BioScience*, Vol. 36(6), pp. 368–373, DOI : <https://doi.org/10.2307/1310258>
- Wang, C., Mori, T., Mao, Q., Zhou, K., Wang, Z., Zhang, Y., Mo, H., Lu, X. and Mo, J. (2020). Long-Term Phosphorus Addition Downregulates Microbial Investments on Enzyme Productions in a Mature Tropical Forest. *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 20, pp. 921–930, DOI : <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02450-z>
- Waring, R. H. and Running, S. W. (1998). Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales. Academic Press, Cambridge.
- Wu, F. Z., Bao, W. K., Li, F. L. and Wu, N. (2008). Effects of Water Stress and Nitrogen Supply on Leaf Gas Exchange and Fluorescence Parameters of *Sophora davidii* Seedlings. *Photosynthetica*, Vol. 46(1), pp. 40–48, DOI : <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0008-x>

- Yeh, H. Y. and Wensel, L. C. (2000). The Relationship between Tree Diameter Growth and Climate for Coniferous Species in Northern California. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 30, pp. 1463–1471, DOI : <https://doi.org/10.1139/x00-074>
- Yoo, G. Y., Kim, H. J., Kim, Y. S. and Jung, M. H. (2012). Soil Carbon and Microbial Activity Influenced by Pasture and Rice Paddy Management. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 45(3), pp. 435–443, DOI : 10.7745/KJSSF.2012.45.3.435 [Korean Literature]
- Yoon, T. K., Seo, K. W., Park, G. S., Son, M. Y. and Son, Y. H. (2016). Surface Soil Carbon Storage in Urban Green Spaces in Three Major South Korean Cities. *Forests*, Vol. 7(6), pp. 115, DOI : <https://doi.org/10.3390/f7060115>
- Yordanov, I., Velikova, V. and Tsonev, T. (2000). Plant Responses to Drought, Acclimation, and Stress Tolerance. *Photosynthetica*, Vol. 38(1), pp. 171–186, DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1007201411474>
- Zhao, F., Yu, H., Wang, B., Jiao, F. and Huang, J. (2023). Response of Plant–Bacteria–Soil System to Phosphorus addition under Simulated Nitrogen Deposition: Evidence from a Dryland Ecosystem. *Plant and Soil*, Vol. 489, 593–611, DOI : 10.1007/s11104-023-06043-1