

ORIGINAL ARTICLE

브라운필드 복원 부산시민공원의 토양 유기탄소 추정 저장량 공간 분포 특성

손지아 · 강병호¹⁾ · 이영길¹⁾ · 배수정¹⁾ · 양건석*

동아대학교 조경학과, ¹⁾동아대학교 도시계획·조경학과

Spatial Distribution of Estimated Soil Organic Carbon Stock in a Brownfield –Restored Urban Park: A Case Study of Busan Citizens Park, Korea

Shu-Zi Sun, Byung-Ho Kang¹⁾, Young-Gil Lee¹⁾, Su-Jeong Bae¹⁾, Geon-Seok Yang*

Department of Landscape Architecture, Dong-A University, Busan 49315, Korea

¹⁾Department of Urban Planning and Landscape Architecture, Dong-A University Graduate School, Busan 49315, Korea

Abstract

Urban soils serve as critical carbon reservoirs in terrestrial carbon cycling; however, the carbon storage characteristics of anthropogenically disturbed soils, such as those in brownfield-restored parks, remain poorly understood. This exploratory study analyzed the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) stock and its associated soil properties in Busan Citizens Park, a representative brownfield-restored urban park in Korea. The site, which was used as a racetrack and U.S. military base before its conversion into an urban park in 2014, represents a typical Technosol environment. SOC content was estimated by applying the Van Bemmelen conversion factor (0.58) to physicochemical data from 48 sampling locations, whereas bulk density was estimated from soil texture classification using a simplified pedotransfer function. The spatial distribution of carbon stock was mapped using GIS-based inverse distance weighting (IDW), and interpolation reliability was evaluated through leave-one-out cross-validation and comparison with ordinary kriging. The results revealed a median carbon stock of 12.9 Mg C ha⁻¹ and a mean of 22.5 Mg C ha⁻¹ at a depth of 0–60 cm, substantially lower than the IPCC default reference stock for mineral soils under native vegetation in the warm temperate moist zone (88 Mg C ha⁻¹ for high-activity clay soils at a depth of 0–30 cm). Carbon stock exhibited pronounced spatial heterogeneity (CV = 118.9%). Spearman's rank correlation indicated significant positive relationships between carbon stock and total nitrogen ($\rho = 0.716$, $p < 0.001$) and electrical conductivity ($\rho = 0.443$, $p < 0.01$), whereas no significant relationships were observed with soil pH or available phosphorus. These results suggest that carbon distribution is associated with anthropogenic construction activities rather than natural pedogenic processes. This study provides preliminary baseline information for carbon management and soil improvement strategies for urban landscape restoration.

Key words : Brownfield, Busan Citizens Park, Soil organic carbon, Carbon stock, Spatial interpolation

Received 21 July, 2026; Revised 9 September, 2026;

Accepted 9 September, 2026

*Corresponding author : Geon-Seok Yang, Department of Landscape Architecture, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Phone : +82-51-200-7577

E-mail : ydrystone@dau.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1.1. 연구의 배경

전 지구적 기후위기 심화에 따라 2050 탄소중립 달성은 국제사회의 최우선 과제가 되었다. 산림(그린카본)과 연안 습지(블루카본) 등 자연 생태계의 탄소 흡수 기능에 관한 연구가 활발히 진행되는 가운데, 최근 연구의 집중과 고밀도 개발이 이루어지는 도시 내 녹색 인프라의 기후변화 완화 기능이 새롭게 조명받고 있다. 특히, 육상 생태계 탄소의 약 70~80% 이상을 저장하고 있는 토양(Batjes, 1996; IPCC, 2023)은 도시 환경에서도 핵심적인 탄소 저장고의 역할을 수행한다. 수목의 지상부 바이오매스에 비해 토양 유기탄소(soil organic carbon, SOC)는 장기적이고 안정적으로 탄소를 격리할 수 있으므로, 도시공원의 토양과 수목은 기후조절, 생물다양성 증진, 대기질 개선 등 다양한 생태계서비스 기능을 수행하는 녹색 인프라이다(Gong et al., 2020). 특히, 토양환경 탄소저장 기능을 정량적으로 평가하고 증진하는 것은 기후위기 대응을 위한 도시 공원·녹지계획의 필수적인 과제이다. 즉, 도시공원의 토양은 자연 토양과 달리 매립, 다짐, 오염, 외부토양 유입 등 인위적 교란에 의해 형성되며, 이러한 인공 교란 토양은 WRB(세계토양분류체계)에서 테크노솔(Technosol)로 분류된다(IUSS Working Group WRB, 2022).

1.2. 선행연구 고찰 및 연구 동향

1.2.1. 도시 토양 탄소 저장량 연구 동향 및 부족

지금까지의 토양 탄소 저장량 연구는 주로 훼손되지 않은 자연 산림이나 농경지, 자연 습지를 대상으로 이루어졌다. 반면, 인위적인 교란이 극심한 도시 토양에 대한 정량적 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 과거 군사시설, 산업단지, 매립지 등으로 사용되다 공원으로 전환된 브라운필드(Brownfield) 복원 공원의 경우, 조성 과정에서 대규모 절·성토, 다짐, 건설 폐기물 혼입, 외부 토양 반입 등 근본적인 물리·화학적 교란을 겪게 된다.

자연 토양의 SOC 축적은 주로 기후, 지형, 식생, 모재 등 자연 인자에 의해 설명되는 반면, 도시 토양은 인위적 토지이용 이력, 시공 행위, 관리 방식 등이 SOC 축적을 결정하는 주요 이론적 변수로 부상하고 있다. 그러나

기존 연구(Pouyat et al., 2006; Lorenz and Lal, 2009)는 대부분 자연 토양 중심의 탄소 모델을 도시 토양에 직접 적용하는 경향이 있어, 인위적 교란 이력이 탄소 축적에 미치는 차별적 영향을 충분히 고려하지 않았다. 또한 국내에서는 Bae(2021)이 서울 도심의 이질적 피복에 따른 토양 탄소 저장량을 평가하였고, An et al.(2022)이 진주시 도시공원의 토양 탄소와 이화학적 간 관계를 분석하였으며, Gong et al.(2020)은 경기도 12개 근린공원의 토양 이화학적 특성을 분석하여 생태 기능 향상을 위한 토양 관리 기준을 제시한 바 있다. 그러나 이들 연구는 일반 도시공원을 대상으로 하며, 브라운필드 복원 공원에 특화된 탄소 저장량 공간 분포 연구는 아직 이루어지지 않았기에 이론적 전환이 요구된다.

1.2.2. 브라운필드 복원지의 탄소 저장량 공간 분포 특성 연구

부산시민공원은 일제강점기 경마장과 미군기지를 거쳐 2014년 도시공원으로 재생된 대표적인 브라운필드 복원 사례이다. 이러한 복원지는 절·성토, 반입토 및 토양 개량 등 강한 인위적 교란을 거치면서 자연 토양과는 상이한 층위 구조와 유기물 축적 특성을 나타내며, 토양 특성의 공간적 이질성이 매우 크게 나타나는 경향이 있다. 특히 복원 초기의 토양 조성 및 시공 이력 차이는 장기적인 탄소 축적 패턴에 지속적인 영향을 미칠 수 있다는 점에서, 브라운필드 복원 토양은 이론적으로 '탄소 회복 궤적' 및 '초기 조건 민감성' 개념의 적용 가능성을 향후 검토해볼 수 있는 사례로 판단된다. 다만 본 연구는 2023년 단일 시점 자료에 기반하므로, 이러한 궤적·속도 개념을 직접 검증하는 것은 아니며 그 적용 가능성을 이론적으로 제시하는 데 그친다.

그러나 현재까지 부산시민공원 관련 연구는 주로 식재 수목의 생육 상태나 경관 이용 특성에 집중되어 왔으며(Choi, 2023), 공원 토양의 유기탄소 저장량과 공간 분포를 정량적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다. 또한 복원 공원 토양의 SOC 공간 분포를 인위적 시공 이력과 연계하여 해석한 연구 역시 거의 이루어지지 않았다.

1.2.3. 연구의 차별성 및 이론적 기여

본 연구는 기존의 단순 탄소 저장량 평가를 넘어, 브라운필드 복원 공원 토양의 탄소 저장량이 '인위적 시공 이력'에 의해 어떻게 공간적으로 양극화되는지를 정량

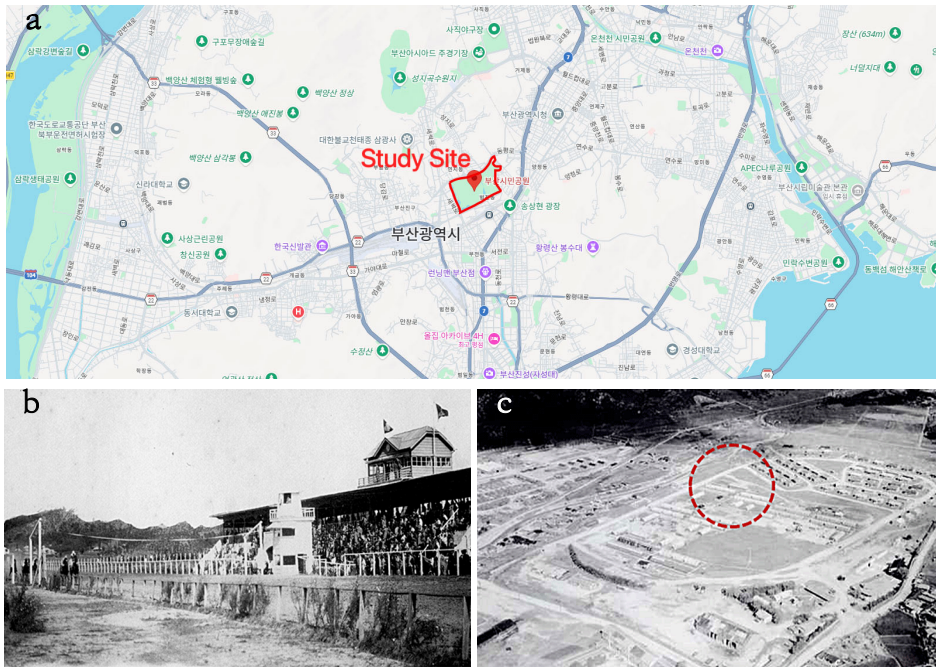


Fig. 1. Location of Busan Citizens Park and historical photographs. (a) Location map; (b) historical racetrack photograph; (c) historical aerial photograph of the U.S. military base period. (Busan Facilities Corporation, 2024).

적으로 기술하고, 테크노솔 환경에서 인위적 교란이 탄소 동태에 미치는 영향에 관한 탐색적 사례 자료를 제공하고자 한다. 또한 간접 추정 방법론의 적용 가능성과 한계를 이론적으로 검토함으로써, 도시 복원지 탄소 평가 연구의 방법론적 기준 설정에 기여한다. 부산시민공원은 국내 대표적 브라운필드 복원공원으로서 도시 탄소중립 정책 측면에서 시범적 연구대상지의 의미를 가진다.

1.3. 연구의 목적

본 연구의 목적은 브라운필드 복원 도시공원인 부산시민공원을 대상으로 토양 추정 탄소 저장량의 공간적 분포 특성을 파악하고, 인위적 교란 이력이 토양 분포에 미치는 영향을 탐색적으로 분석하는 데 있다. 이를 위해 공원 전역 48개 지점의 기존 토양 이화학 데이터를 활용하여 지점별 SOC 함량과 용적밀도를 추정하고, GIS 기반 공간 보간법을 통해 탄소 저장량 분포 지도를 구축한다. 도출된 공간 분포 패턴은 표토 개량 및 우선 관리 구역 선정 등 도시공원 관리 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 연구 대상지 및 연구 방법

2.1. 연구 대상지 개요

본 연구의 공간적 범위는 부산광역시 부산진구 범천동에 위치한 부산시민공원으로 총면적은 471,518 m²(47.15 ha)이다(Busan Facilities Corporation, 2024; Fig. 1). 이 부지는 1920년대 일제강점기 경마장으로 조성된 이래, 제2차 세계대전 시기 일본군 훈련소를 거쳐 1945년부터 2006년까지 약 60여 년간 미군기지로 사용되었다. 이후 오염 토양 정화 및 대규모 지형 재조성(절·성토, 다짐 등) 공사를 거쳐 2014년 5월 현재의 도시공원으로 개장하였다. 이러한 브라운필드 이력으로 인해 대상지의 토양은 자연적인 토양 단면의 발달을 보이지 않으며, 건설 잔재물 혼입과 외부 반입토에 의해 극심한 물리·화학적 교란을 겪은 전형적인 인공 교란 토양의 특성을 지니고 있어, 토양 유기탄소(SOC)의 축적 양상과 공간적 변이성이 매우 클 것으로 예상되는 지역이다.

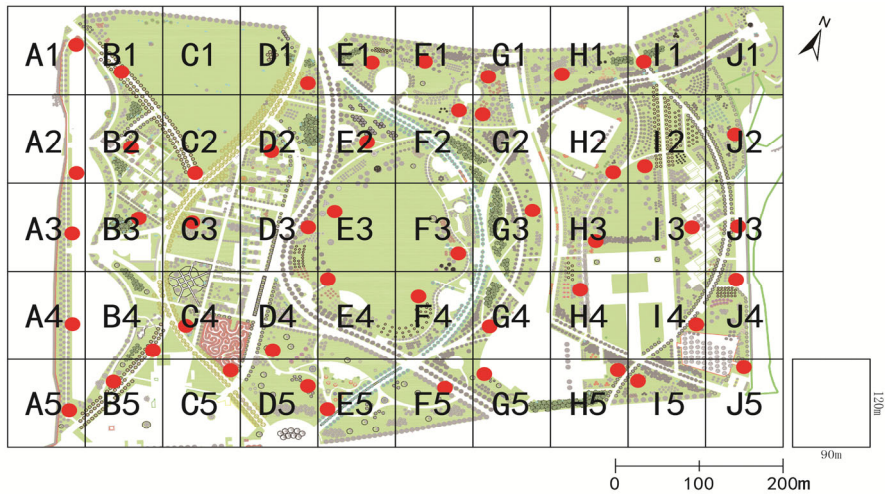


Fig. 2. Soil sampling grid layout of the study area (90 m × 120 m). ●, soil sampling points.

2.2. 기초 데이터 구축

본 연구는 브라운필드 복원 공원 토양의 탄소 저장량을 거시적·공간적 관점에서 평가하기 위해 동일 연구팀의 선행 연구(Choi, 2023)에서 구축된 토양 이화학성 데이터를 기반 자료로 활용하였다. 해당 데이터의 재분석 및 활용은 원저자의 동의를 얻어 수행되었다.

선행 조사에서는 공원 전역을 90 m × 120 m 격자로 구획하여 공간적 대표성을 확보하였다. 격자 구획 중 C1 및 J1 지점은 건축 구조물이 위치하여 토양 채취가 물리적으로 불가능하였으므로 조사 대상에서 제외하였다. 이에 따라 최종 조사 지점은 총 48개소로 설정되었으며(Fig. 2), 토양 채취 및 분석은 2023년 6월부터 9월 까지 수행되었다.

각 조사 지점에서는 코어샘플러를 이용하여 지표면 하 0~60 cm 깊이의 토양을 채취하였다. 지점별 공간적 대표성을 높이기 위해 동일 지점 내 2개의 코어를 채취한 후 균질하게 혼합한 복합시료를 구성하여 분석에 활용하였다.

본 연구에서는 선행 조사에서 분석된 다양한 토양 이화학성 항목 중 토양 유기탄소(SOC) 산출에 직접적으로 활용되는 유기물 함량(organic matter, O.M. %)과 토성(soil texture, USDA 분류 기준)을 1차 핵심 입력 변수로 추출하였다. 또한 탄소 저장량과의 상관관계 분석을 위한 보조 변수로서 토양산도(pH), 전기전도도(EC, dS m^{-1}), 전질소량(TN, %), 유효태인산(AP,

mg kg^{-1}), 양이온교환용량(CEC, $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$)을 추가로 활용하였다(Appendix 1). 각 항목의 분석 방법 및 기준은 선행 연구(Choi, 2023)에 준하였다.

부산시민공원은 2014년 5월에 개장하였으므로, 본 연구에서 활용된 데이터(2023년 수집)는 공원 조성 후 약 9년이 경과한 시점의 토양 특성을 반영한다. 이는 초기 조성 직후의 교란 상태에서 벗어나 일정 수준의 토양 안정화가 진행된 단계에 해당하나, 자연 산림 토양에 비해서는 유기물 축적 및 토양 발달이 초기 단계에 머물러 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과는 브라운필드 복원 공원의 중기적 탄소 축적 현황을 진단하는 기초 자료로서의 의미를 가진다.

2.3. 토양 유기탄소(SOC) 및 용적밀도 추정 모델링

본 연구는 선행 조사에서 현장 채취 및 실험 분석을 통해 확보된 토양 이화학 데이터(유기물 함량 및 토성)를 기반으로 한다. 다만, 토양 유기탄소(SOC) 함량과 용적밀도(bulk density)는 직접 측정되지 않았기 때문에, 이를 보완하기 위해 경험적 변환 계수와 토양전달 함수(pedotransfer function, PTF)를 적용한 간접 추정 모델링을 수행하였다. 본 결과는 측정값이 아닌 추정값이며, 절대값보다 공간적 분포 패턴에 초점을 둔 탐색적 공간분석의 성격을 가진다.

본 연구는 현장 실측 없이 기존 이화학 데이터를 활용하는 간접 추정 방법론을 적용하지만, 이는 예산과

Table 1. Estimated bulk density values by soil texture class (g cm^{-3})^a

Soil texture	SL	L	SiL	CL	SiCL
Bulk density (g cm^{-3})	1.45	1.35	1.30	1.35	1.30

^a Representative values by soil texture class based on Rawls(1983) and Saxton et al.(1986); values are estimates, not direct measurements.

장비의 제약 속에서도 도시 복원지의 탄소 저장 잠재력을 신속하게 평가할 수 있는 현실적인 대안이다. 방법론적 한계를 투명하게 논의하는 한편, 도출된 공간 분포 패턴은 향후 직접 측정이 필요한 핫스팟 및 콜드스팟을 특정하는 기초자료로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구는 추정에 머물지 않고, 후속 검증 연구를 위한 가설 생성과 우선 관리 구역 선정이라는 실무적·이론적 가치를 갖는다.

2.3.1. 토양 유기탄소(SOC) 함량 추정

추출된 유기물 함량(O.M. %) 데이터를 토양 유기탄소(SOC %)로 변환하기 위해 전 세계적으로 널리 통용되는 Van Bemmelen 변환계수(0.58)를 적용하였다. 이는 토양 유기물의 평균 약 58%가 탄소로 구성되어 있다는 화학적 특성에 근거한 것으로, 산출식은 다음과 같다.

$$\text{SOC (\%)} = \text{O.M. (\%)} \times 0.58$$

본 연구에서 활용된 유기물 함량 데이터는 현장 채취 후 실험 분석을 통해 확보된 1차 자료로, SOC 추정의 기초 입력값으로 활용되었다. Van Bemmelen 계수는 다양한 토양에서 광범위하게 검증된 경험적 상수이다. 다만, 석탄 잔재 등 난분해성 탄소 물질이 혼입된 경우 실제 SOC 대비 과대 추정될 가능성이 있으며(Pribyl, 2010), 이는 핫스팟 구역(B2, E3 등)의 탄소 저장량 해석 시 특히 주의가 필요하다.

한편, Allory et al.(2022)의 메타분석에 따르면, 테크노솔의 탄소 축적을 결정하는 주요 인자는 유기물 투입 이력과 건설 잔재물 혼입량으로, 자연 토양 대비 SOC/SOM 비율이 상이할 수 있다. 이는 본 연구에서 Van Bemmelen 계수 적용 시 불확실성이 발생할 수 있는 이론적 근거를 제공한다.

2.3.2. 토양 용적밀도(bulk density) 추정

토양 용적밀도는 토성 및 유기물 함량과 밀접한 상관관계가 있다. 본 연구에서는 현장 직접 측정이 제한된

조건에서 용적밀도를 합리적으로 추정하기 위해 Rawls (1983) 및 Saxton et al.(1986)의 PTF를 참고하여, 토성 분류군별 대표 용적밀도 추정값을 설정하고 이를 각 48개 지점에 적용하는 단순화된 방법을 채택하였다.

이는 지점별 연속적 PTF 계산이 아닌 토성 그룹별 고정값 대입 방식임을 명시한다. 즉, 선행 조사에서 확보된 지점별 토성과 추정 SOC 값을 입력 변수로 활용하여 48개 지점의 용적밀도를 산정하였다. 이러한 방법은 제한된 토양 정보만으로도 비교적 안정적인 물리적 특성 예측이 가능하다.

본 연구는 직접 측정 자료가 제한된 도시 생태복원지의 탄소 저장량 평가를 위한 기초 자료 구축을 목적으로 하며, PTF 기반 추정은 실용적이고 효율적인 접근법으로서 의의를 가진다.

본 연구에서 적용된 용적밀도 추정값은 직접 측정이 아닌 PTF 기반 간접 추정 결과로서 일정 수준의 불확실성을 내포한다. 다만, 본 연구는 절대값의 정밀 추정보다는 공간적 분포 패턴과 상대적 차이를 분석하는 데 목적이 있으므로, 해당 접근은 유효한 분석 방법으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 적용한 Rawls(1983) 및 Saxton et al.(1986) 기반의 PTF는 자연 토양을 대상으로 개발된 경험식으로, 건설 잔재물 혼입 및 인위적 다짐이 존재하는 테크노솔에 적용할 경우 추정 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 추정값을 절대값으로 해석하기보다 공간적 분포 경향 및 상대적 비교에 중점을 두어 해석하였으며, 향후 연구에서는 현장 실측 용적밀도 자료를 활용한 보정이 필요함을 한계로 제시한다.

용적밀도는 Rawls(1983) 및 Saxton et al.(1986)에서 제시된 토성 기반 용적밀도 추정 개념을 참고하여, 본 연구에서는 토성 분류군별 일반 대표값을 적용하는 방식으로 단순화하였다(Table 1). 구체적으로 양토(loam)는 1.35 g cm^{-3} , 식양토(Clay Loam)는 1.35 g cm^{-3} , 미사질양토(silt loam)는 1.30 g cm^{-3} , 사질양토(sandy loam)는 1.45 g cm^{-3} , 미사질식양토(silty clay loam)는 1.30 g cm^{-3} 의 값을 적용하였다.

2.4. 탄소 저장량 산출 및 공간 보간(GIS) 분석

각 지점의 탄소 저장량(Mg C ha^{-1})은 다음 식에 의해 산출하였다.

$$\begin{aligned} \text{Carbon stock (Mg C ha}^{-1}\text{)} \\ = \text{SOC (\%)} \times \text{BD (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{D (cm)} \end{aligned}$$

이 식은 단위 면적당 탄소량 $\text{SOC(g g}^{-1}\text{)} \times \text{BD(g cm}^{-3}\text{)} \times \text{D(cm)}(\text{g cm}^{-2})$ 에 $\text{g cm}^{-2} \rightarrow \text{Mg ha}^{-1}$ 환산계수($10^8 \text{ cm}^2 \text{ ha}^{-1} \div 10^6 \text{ g Mg}^{-1} = 100$)를 곱한 것과 동일하다. SOC를 % (= $\text{g g}^{-1} \times 100$)로 대입하면 이 환산계수 100이 상쇄되어 위와 같이 단순화된다.

D는 토양 채취 심도(60 cm)이다. 계산 예시: $\text{B2} = 1.496 \times 1.35 \times 60 = 121.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$; $\text{A1} = 0.1044 \times 1.45 \times 60 \approx 9.08 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

48개 지점에서 산출된 탄소 저장량은 공원 내 특정 위치의 값만 알려줄 뿐, 측정하지 않은 나머지 공간의 탄소량은 알 수 없다. 이처럼 점 단위로 흩어진 측정값을 공원 전체의 연속적인 분포 지도로 변환하기 위해 공간 보간법을 적용하였다.

본 연구에서는 ArcGIS Pro 3.1의 역거리 가중법(inverse distance weighting, IDW; Lu and Wong, 2008)을 사용하였다. IDW는 측정 지점에서 가까울수록 그 지점의 탄소값이 주변에 더 큰 영향을 미친다는 원리를 기반으로 한다. 즉, 알고 싶은 임의의 지점에 대해 주변 측정점 각각의 거리를 계산하고, 가까운 지점에는 높은 가중치를, 먼 지점에는 낮은 가중치를 부여하여 해당 지점의 탄소량을 추정한다.

IDW를 선택한 이유는 두 가지이다. 첫째, 이 방법은 토양 탄소처럼 공간적 자기상관이 있는 데이터에 적합하다. 둘째, 48개라는 제한된 표본 수에서도 안정적인 보간 결과를 얻을 수 있다.

보간 시 설정한 세부 조건은 다음과 같다. 거듭제곱 값은 2로 설정하였는데, 이는 거리가 2배 멀어지면 영향력이 4분의 1로 줄어드는 것을 의미한다. 탐색 반경은 150 m로 설정하였으며, 이는 공원 단축(약 300 m)의 1/2에 해당하여 공원 내 임의의 지점에서 최소 1개 이상의 측정점이 반드시 포함되도록 한 것이다. 참조 지점 수는 12개로 설정하였으며, 이는 LOOCV 결과 평균절대 오차(MAE)가 최소화되는 값으로 결정하였다. $p=1$, 2, 3의 세 가지 경우를 비교한 결과, $p=2$ 일 때 평균절대 오차(MAE)가 $6.87 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 가장 작아 최적값으로

채택하였다.

또한, IDW 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 정규 크리깅(ordinary Kriging)을 병행 적용하여 결과를 비교하였다. 비교 결과, 두 방법 모두 핫스팟(hot spot, 탄소 고축적 구역)과 콜드스팟(cold spot, 탄소 저축적 구역)의 위치와 범위가 전반적으로 일치하였다. 또한 크리깅의 MAE ($7.23 \text{ Mg C ha}^{-1}$)가 IDW ($6.87 \text{ Mg C ha}^{-1}$)와 유사한 수준이었으므로, 해석이 보다 직관적인 IDW를 주 분석 방법으로 채택하고 크리깅 결과는 보완 검증 자료로 활용하였다.

다만 IDW를 포함한 모든 공간 보간법은 측정하지 않은 구역의 값을 수학적으로 추정하는 것이므로 오차가 존재할 수밖에 없다. 특히 탄소량이 급격하게 변하는 핫스팟 경계 구역에서는 보간 과정의 평활화 효과로 인해 실제보다 낮은 값이 추정될 가능성이 있다. 향후 연구에서는 측정 지점을 확대하여 보간 정확도를 향상시키고, 다양한 보간 기법 간의 체계적인 비교 분석도 필요하다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 연구결과

3.1.1. 토양 이화학적 기반 SOC 및 추정 용적밀도 기술 통계 분석

부산시민공원 48개 조사지점의 유기물 함량(O.M. %) 및 토성 데이터를 기반으로 표층 하 60 cm 토양의 유기탄소(SOC) 함량과 용적밀도를 추정한 결과, 브라운필드 복원 토양 특유의 극심한 공간적 이질성과 불균형적 층위 발달이 확인되었다.

전체 48개 지점의 추정 SOC 평균은 0.277%로 나타났다. 지점 간 편차가 극심하게 발생하였다. B2 지점이 1.496%로 가장 높은 SOC 함량을 보였으며, E3 (1.235%), I2 (0.841%), D4 (0.818%) 등 소수의 지점만이 0.8% 이상의 유의미한 유기탄소 함량을 나타냈다.

반면, 전체 48개 지점 중 약 17%에 해당하는 8개 지점(A3, A4, E1, F1, G5, J2, J4, J5)은 SOC가 0.006%로 산출되어 유기물이 사실상 결핍된 나지 수준의 상태를 보였다.

또한 토성과 결합하여 도출된 추정 용적밀도는 평균 1.36 g cm^{-3} 수준이었으나, 유기물이 극히 부족한 사질양토(SL) 지점(A1, E1, F1 등 8개소)의 경우 1.45 g cm^{-3} 의 상대적으로 높은 용적밀도가 적용되었다.

이는 도시 근린공원 토양의 평균 용적밀도(1.21 g cm^{-3} ; Gong et al., 2020)를 크게 상회하는 수준으로, 브라운필드 복원 과정에서의 인위적 다짐과 유기물 결핍이 동반될 경우 토양의 공극률이 저하되어 물리적 견밀화가 가속화됨을 시사한다.

한편, pH 8.0 이상을 기록한 일부 지점(B4: 8.4, G5: 8.6, I1: 8.8 등)에서는 탄산칼슘(CaCO_3) 형태의 무기탄소가 축적되어 강열감량법 기반 유기물 측정값에 혼입될 가능성을 배제할 수 없다. 이는 해당 지점의 SOC가 과대 추정될 수 있는 추가적 불확실성 요인으로, 향후 연구에서는 산 전처리(acid fumigation) 후 SOC 직접 측정을 통한 보정이 필요하다.

3.1.2. 지점별 토양 탄소 저장량(carbon stock) 정량적 평가

부산시민공원 48개 지점의 토양 탄소 저장량 분포는 왜도 1.92, 변동계수 118.9%로 극심한 우편향 비정규 분포를 나타냈다(Table 2). 이러한 분포 특성을 고려할 때, 산술평균($22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$)은 대상지 전체의 대표값으로 사용하기에 한계가 있으며, 중앙값($12.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$)이 보다 강건한 대표 통계량으로 판단된다.

평균과 중앙값의 괴리(9.6 Mg C ha^{-1})는 소수의 극고축적 지점(B2: $121.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$, E3: $100.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$)이 산술평균을 상향 견인하는 것으로 나타났다.

분포의 양극화 구조를 파악하기 위해 사분위수 분석을 수행한 결과, 하위 25%(Q1)는 5.8 Mg C ha^{-1} , 상위 25%(Q3)는 $30.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 사분위 범위(IQR)가 $24.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 에 달하였다.

특히 전체 48개 지점 중 33개 지점(68.8%)이 평균 이하의 탄소 저장량을 보인 반면, 상위 10%에 해당하는 5개 지점이 전체 탄소 저장량 추정치의 약 39% 이상을 점유하는 극단적 편중 구조가 확인되었다. 이는 기존 도시 토양 탄소 연구에서 보고된 변동계수(CV 30~60%; Pouyat et al., 2006; An et al., 2022)를 크게 상회하는 수준으로, 브라운필드 복원 공원의 인위적 교란 이력이 탄소 분포의 통계적 구조 자체를 왜곡하고 있음을 시사한다.

따라서 본 연구에서는 이후 탄소 저장 현황의 기술에 평균과 중앙값을 병기하며, 공간 관리 전략 수립 시에는 중앙값 기준의 해석을 우선하였다.

본 연구의 탄소 저장량 추정값은 Van Bemmelen 계수(± 0.02 수준의 변동; Pribyl, 2010) 및 PTF 기반

용적밀도 고정값 적용에 따른 불확실성을 내포한다. 이러한 간접 추정치 특성상, 본 연구의 결과는 절대적 탄소 저장량 수치보다는 공간적 분포 패턴과 상대적 비교의 맥락에서 해석되어야 하며, 정책적 활용 시 이러한 불확실성이 고려되어야 한다.

Table 2. Descriptive statistics of soil carbon stock at 48 sampling points in Busan Citizens Park

Statistic	Value
Mean	$22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$
Median	$12.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$
Standard deviation (SD)	$26.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$
Coefficient of variation (CV)	118.9%
Minimum (Min)	$0.45 \text{ Mg C ha}^{-1}$
Maximum (Max)	$121.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$
Skewness	1.92
Number of sampling points (n)	48

3.1.3. 토양 탄소 저장량의 공간적 분포 특성 및 평가

48개 지점의 탄소 저장량 격자 데이터를 바탕으로 공원 전역의 공간적 분포 특성을 분석한 결과, 지형이나 수계와 같은 자연적 요인보다는 인위적 공간 구획 및 시공 이력과 연관된 것으로 판단되는 공간 편향성이 나타났다.

탄소 저장량이 상대적으로 높은 구역은 공원 중앙부 서측(B2, C3, D4, E3 일대)에 국지적으로 군집하는 경향을 보였으며, 동측 일부 지점(I2)에서도 높은 값이 나타났다. 이 구역들은 공원 조성 당시 기존의 양호한 표토가 일부 보존되었거나, 식재 기반 조성 시 유기질 개량재(퇴비 등)가 집중적으로 투입되었을 가능성이 있으며, 이는 현재 추론에 기반한 해석으로 향후 시공기록 검토를 통한 검증이 필요하다.

반면, 공원의 북서측 외곽부(A열 남측)와 동측 외곽부(J열 일대), 그리고 공원 중앙부 일부 패치(E1, F1 등)에서는 탄소 저장량이 전반적으로 낮게 나타났다. 다만 동일 열 내에서도 지점 간 편차가 크게 나타나 열 단위로 균일한 분포를 이루지는 않았으며, 지점별 구체적 수치는 Table 3에 제시하였다. 이 구역들은 준공 이후 약 9년이 경과했음에도 불구하고 유기물의 자연적인 축적이 충분히 이루어지지 못하고 있음을 의미한다.

Table 3. Estimated soil carbon stock at 48 sampling points in Busan Citizens Park

Zone (ID)	Organic matter (O.M. %)	Soil texture (based on Appendix 2-1)	Estimated bulk density (g cm^{-3})	Soil organic carbon (SOC %)	Carbon stock (Mg C ha^{-1})
A1	0.18	Sandy loam (SL)	1.45	0.104	9.08
A2	0.42	Loam (L)	1.35	0.244	19.73
A3	0.01	Clay loam (CL)	1.35	0.006	0.47
A4	0.01	Loam (L)	1.35	0.006	0.47
A5	0.052	Clay loam (CL)	1.35	0.030	2.44
B1	0.14	Clay loam (CL)	1.35	0.081	6.58
B2	2.58	Clay loam (CL)	1.35	1.496	121.2
B3	0.87	Loam (L)	1.35	0.505	40.87
B4	0.19	Loam (L)	1.35	0.110	8.93
B5	0.27	Loam (L)	1.35	0.157	12.69
C2	0.64	Clay loam (CL)	1.35	0.371	30.07
C3	1.50	Silty clay loam (SiCL)	1.30	0.870	67.86
C4	0.52	Loam (L)	1.35	0.302	24.43
C5	1.01	Sandy loam (SL)	1.45	0.586	50.96
D1	0.35	Loam (L)	1.35	0.203	16.44
D2	0.33	Loam (L)	1.35	0.191	15.50
D3	1.26	Loam (L)	1.35	0.731	59.20
D4	1.41	Loam (L)	1.35	0.818	66.24
D5	0.11	Silt loam (SiL)	1.30	0.064	4.98
E1	0.01	Sandy loam (SL)	1.45	0.006	0.50
E2	0.14	Loam (L)	1.35	0.081	6.58
E3	2.13	Clay loam (CL)	1.35	1.235	100.07
E4	0.72	Clay loam (CL)	1.35	0.418	33.83
E5	1.00	Loam (L)	1.35	0.580	46.98
F1	0.01	Sandy loam (SL)	1.45	0.006	0.50
F2	0.02	Silt loam (SiL)	1.30	0.012	0.90
F3	0.34	Loam (L)	1.35	0.197	15.97
F4	0.51	Loam (L)	1.35	0.296	23.96
F5	0.18	Clay loam (CL)	1.35	0.104	8.46
G1	0.31	Loam (L)	1.35	0.180	14.56
G2	0.21	Silt loam (SiL)	1.30	0.122	9.50
G3	0.87	Loam (L)	1.35	0.505	40.87
G4	0.26	Loam (L)	1.35	0.151	12.22
G5	0.01	Sandy loam (SL)	1.45	0.006	0.50
H1	0.26	Sandy loam (SL)	1.45	0.151	13.12
H2	0.41	Loam (L)	1.35	0.238	19.26
H3	0.32	Silt loam (SiL)	1.30	0.186	14.48
H4	0.25	Loam (L)	1.35	0.145	11.75
H5	0.41	Loam (L)	1.35	0.238	19.26
I1	0.69	Loam (L)	1.35	0.400	32.42
I2	1.45	Loam (L)	1.35	0.841	68.12
I3	0.03	Loam (L)	1.35	0.017	1.41
I4	0.21	Sandy loam (SL)	1.45	0.122	10.60
I5	0.13	Loam (L)	1.35	0.075	6.11
J2	0.01	Silt loam (SiL)	1.30	0.006	0.45
J3	0.16	Loam (L)	1.35	0.093	7.52
J4	0.01	Loam (L)	1.35	0.006	0.47
J5	0.01	Sandy loam (SL)	1.45	0.006	0.50

^a Carbon stock (Mg C ha^{-1}) = SOC (%) $\times$ BD (g cm^{-3}) $\times$ D (cm), D = 60 cm.

3.1.4. 토양 이화학적 지표와 탄소 저장량 간의 상관관계 분석

브라운필드 복원 토양에서 탄소 축적과 관련된 토양 이화학적 인자를 탐색적으로 살펴보기 위해, 48개 조사 지점의 토양 이화학적 데이터(pH, EC, 전질소량, 유효태인산, CEC)와 탄소 저장량 간의 스피어만 순위상관 분석을 수행하였다. 탄소 저장량이 왜도 1.92의 극심한 비정규 분포를 나타내므로 비모수 통계인 스피어만 상관계수를 적용하였으며, SOC 산출의 직접 입력 변수인 유기물 함량(O.M.)은 수학적 동어반복에 해당하므로 분석 대상에서 제외하였다(Table 4).

Table 4. Spearman correlation coefficients (ρ) between soil properties and carbon stock

Variable	Spearman's ρ	p-value	Sig.
Total nitrogen (TN)	0.716	<0.001	***
Electrical conductivity (EC)	0.443	<0.01	**
Cation exchange capacity (CEC)	0.359	<0.05	*
Soil pH	-0.164	>0.05	n.s.
Available phosphorus (AP)	-0.086	>0.05	n.s.

***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$; n.s., not significant ($n = 48$).
Organic matter was excluded because it was directly used to calculate soil organic carbon (SOC).

다만 본 연구는 탐색적 상관분석에 기반하므로 변수 간 다중공선성(multicollinearity)의 영향을 완전히 배제하기 어렵다. 분석 결과에서 가장 주목할 점은, 자연 토양에서 탄소 축적의 고전적 조절 인자로 알려진 변수들과 인위적 개량 이력을 반영하는 변수들이 탄소 저장량과 상반된 상관 양상을 보였다는 것이다.

인위적 개량 이력과 관련된 변수 중 전질소량(TN)은 탄소 저장량과 가장 강한 양의 상관($\rho = 0.716$, $p < 0.001$)을 나타냈다. 이는 퇴비·부엽토 등 유기질 개량재가 투입된 구역에서 탄소와 질소가 동시에 공급됨으로써, TN이 인위적 유기물 투입 이력의 공간적 불균형을 간접적으로 시사하는 결과로 해석된다. 전기전도도(EC) 또한 유의한 양의 상관($\rho = 0.443$, $p < 0.01$)을 보였다. 탄소 저장량 상위 지점의 일부(B2: 1.11, D4: 0.74 dS m⁻¹)에서 EC가 함께 높게 나타난 점은 과거 집중적 토양 개량이 이루어진 구역일 가능성을 시사한

다. 다만 EC가 높음에도 탄소 저장량이 낮은 지점(H4: 0.97 dS m⁻¹, 11.75 Mg C ha⁻¹)도 확인되므로, EC는 유기질 개량 이력 외에 염류 집적 등 다른 요인의 영향을 함께 받는 것으로 판단되며 해석에 주의가 필요하다. CEC 역시 유의한 양의 상관($\rho = 0.359$, $p < 0.05$)을 나타내, 유기물 공급이 활발했던 구역에서 탄소 저장량과 토양 비옥도가 함께 향상되었음을 시사하였다. 다만 CEC는 유기물 함량뿐만 아니라 점토 광물의 종류와 함량에 의해서도 결정되므로, 본 결과가 유기물 축적에 의한 것인지 점토 광물 특성에 의한 것인지를 분리하여 해석하기 위해서는 점토 광물 분석이 추가적으로 필요하다.

반면, 토양산도(pH)와 유효태인산(AP)은 탄소 저장량과 유의한 상관을 보이지 않았다(각각 $\rho = -0.164$, $\rho = -0.086$, $p > 0.05$). 자연 생태계에서 pH는 미생물 활성을 통해 탄소 축적에 영향을 미치는 인자로 알려져 있으나, 본 대상지의 전반적 알칼리 편향 환경(pH 6.6~8.8)에서는 pH 변이보다 유기물 공급원의 존재 여부 자체가 탄소 축적과 더 밀접하게 관련된 것으로 판단된다. 이는 인위적 교란 토양에서 pH의 탄소 축적 설명력이 제한적이라는 선행 연구(Allory et al., 2022)와 일치한다.

이상의 결과를 종합하면, 부산시민공원의 토양 탄소 저장량은 자연적 토양 생성 인자보다 인위적 유기물 투입 이력을 반영하는 변수들과 더 뚜렷한 상관을 보였다. 이는 브라운필드 복원 공원의 탄소 분포가 생태적 천이의 산물이 아니라 조성 당시의 시공 이력이 현재까지 지속적 영향을 미치는 '인위적 교란 유산'의 전형적 사례임을 시사하며, 도시 복원지 탄소 평가에서 인위적 시공 이력을 핵심 설명 변수로 포함하는 별도의 분석 체계가 필요함을 시사한다.

3.1.5. GIS 기반 토양 특성 및 탄소 저장량의 공간 분포 분석

Fig. 3은 부산시민공원 전역 48개 조사지점의 추정 용적밀도를 GIS 역거리 가중법(IDW)으로 공간 보간한 결과이다. 용적밀도는 토성 그룹별 대표값(SL 1.45, L·CL 1.35, SiL·SiCL 1.30 g cm⁻³)이 그대로 적용된 결과이므로, 공간 패턴은 실질적으로 토성 분포를 반영한다. 대부분의 지점은 양토(L) 및 세립질 계열(CL·SiL·SiCL, 용적밀도 1.30~1.35)로 나타났으며, 조립질인 사질양토(SL, 용적밀도 1.45) 지점(A1, C5, E1, F1,

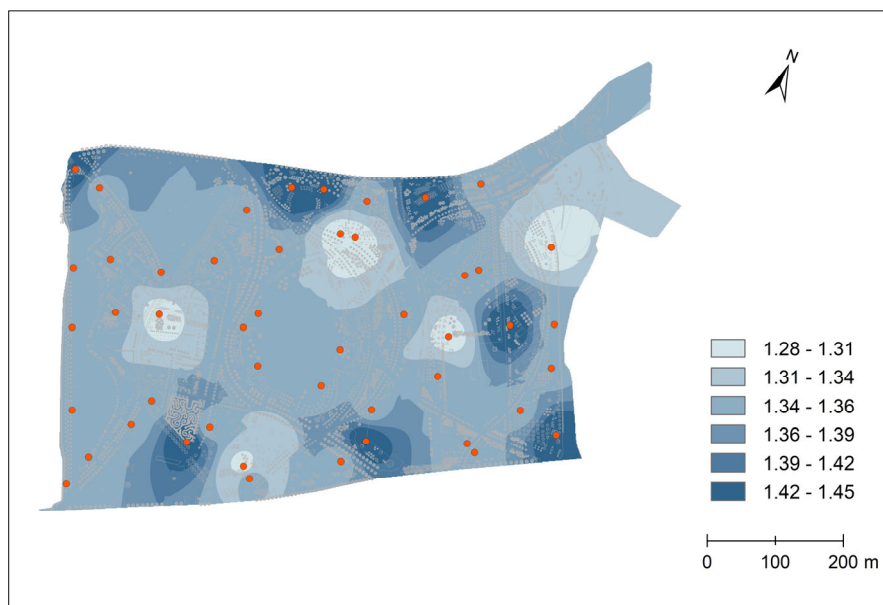


Fig. 3. Spatial distribution of estimated bulk density (g cm^{-3}) in Busan Citizens Park.

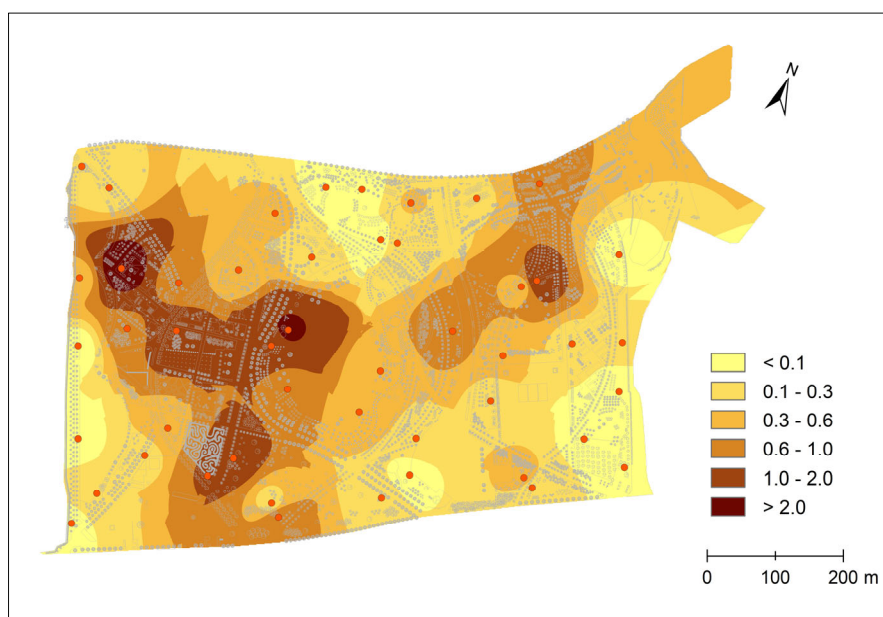


Fig. 4. Spatial distribution of soil organic matter (O.M., %) in Busan Citizens Park. Soil organic carbon (SOC, %) corresponds to $\text{O.M.} \times 0.58$ (e.g., O.M. 1.0% = SOC 0.58%); the spatial pattern of SOC is therefore identical to that shown here.

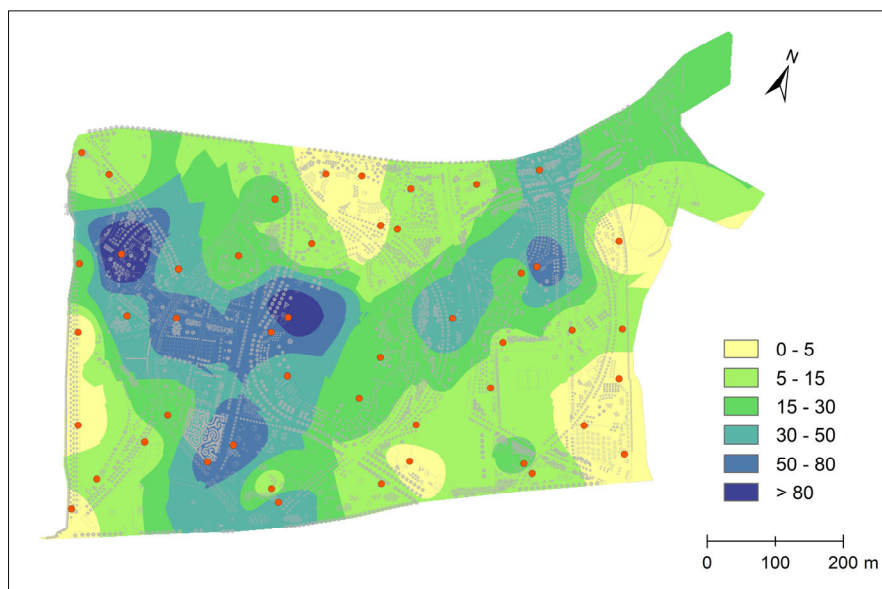


Fig. 5. Spatial distribution of soil carbon stock (Mg C ha^{-1}) in Busan Citizens Park.

G5, H1, I4, J5)은 공원 전역에 산재하여 국지적으로 높은 추정 용적밀도를 보였다. 이러한 공간적 이질성은 조성 당시의 절·성토 시공 이력 및 토양 반입 과정과 연관되어 있을 가능성이 있다.

Fig. 4는 대상지 토양 유기물 함량(O.M., %)의 공간 분포를 나타낸다. 분석 결과, 유기물 함량은 공원 전역에서 매우 불균질하게 분포하며, 특히 중앙부 일부 구역(E3, C3 등)에서 상대적으로 높은 값을 보인 반면, 외곽부(A열, J열) 및 광장 인접 구역에서는 0.1% 미만의 극히 낮은 값이 광범위하게 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 패턴은 자연적인 토양 생성 과정에 따른 점진적 변화라기보다, 조성 당시의 토양 반입 및 정지 작업 등 인위적 시공 이력에 의해 형성된 공간적 이질성과 연관되어 있을 가능성이 있다. 특히 유기물 결핍 구역은 식생 기반 형성이 미흡하거나 토양 개량이 제한적으로 이루어진 구역일 가능성이 높다.

한편 토양 유기탄소(SOC)는 유기물 함량에 상수 0.58을 곱한 선형 변환값이므로, SOC의 공간 분포는 Fig. 4와 수학적으로 동일한 패턴을 가진다. 따라서 본 연구에서는 SOC 분포도를 별도로 제시하지 않고 Fig. 4의 캡션에 환산 관계를 병기하였으며, SOC 기준으로는 1.0% 이상 구역이 매우 제한적이고 대부분의 지역이 0.3% 이하에 머무르는 것으로 나타났다. 이는 복원 이

후 일정 기간이 경과했음에도 유기물 순환 및 축적 과정이 충분히 활성화되지 않았음을 의미한다.

Fig. 5는 부산시민공원 전역의 0~60 cm 깊이 기준 토양 유기탄소 저장량(carbon stock, Mg C ha^{-1})을 GIS 역거리 가중법(IDW)으로 공간 보간한 결과이다. 탄소 저장량은 중앙값 $12.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$, 평균 $22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 자연식생 하 토양의 IPCC 기준값(온난 습윤 온대 고활성점토 88 Mg C ha^{-1} , 0~30 cm; IPCC, 2006)보다 현저히 낮은 수준이며, 변동계수 118.9%에 달하는 극심한 공간적 이질성이 나타났다. 고탄소 집적 구역은 공원 중앙부(B2·C3·D4·E3 일대)를 중심으로 분포하되 동측 일부 지점에서도 나타난 반면, 외곽 A열 남측·J열과 광장 인접 구역은 탄소 저장량이 낮아 뚜렷한 콜드스팟을 형성하였다. 이러한 비대칭적 공간 분포는 자연적 토양 생성 요인보다 조성 당시의 절·성토 이력 및 유기질 개량 시공 범위의 차이와 연관되어 있을 가능성이 있다.

결과적으로 본 연구에서 제시한 세 가지 공간 분포도는 서로 성격이 다르다. 추정 용적밀도(Fig. 3)는 토성 분류값이 그대로 반영된 결과이고, 유기물 함량(Fig. 4, SOC 환산값 포함)은 유기물 투입 이력을 반영한다. 탄소 저장량(Fig. 5)은 두 변수의 곱으로 산출되나, 용적밀도의 변동 폭($1.30\text{--}1.45 \text{ g cm}^{-3}$, 약 11%)이 유기물 함량의 변동 폭(0.01~2.58%, 약 250배)에 비해 현저히

작으므로 탄소 저장량의 공간 패턴은 사실상 유기물 분포에 의해 결정된다. 즉 토성에 기인한 용적밀도 분포와 유기물 투입 이력에 기인한 유기물 분포가 서로 다른 공간 패턴을 보인다는 점이, 복원 토양의 이질성과 인위적 교란 이력을 해석하는 단서가 된다.

3.1.6. GIS 기반 공간 분포 분석의 의의

48개 지점의 추정 탄소 저장량을 바탕으로 IDW 보간을 수행한 결과(Fig. 5), 핫스팟($>60 \text{ Mg C ha}^{-1}$)과 콜드스팟($<5 \text{ Mg C ha}^{-1}$)의 공간적 군집이 뚜렷하게 구분되었다. 이러한 패턴은 자연 지형 요인보다 인위적 시공 이력이 SOC 축적과 연관되어 있을 가능성을 공간적으로 시사한다. 비록 추정치에 기반하지만, 이 공간 정보는 현장 관리자가 우선 개량해야 할 구역을 객관적으로 선정할 수 있는 과학적 근거를 제공한다.

또한, 선행 조사(Choi, 2023)에서 실측된 토양경도(관입저항)의 전체 평균은 약 19.0 mm 로 식물 생육 한계로 알려진 25 mm 에는 미달하나, 일부 지점(A4-I5 등)에서는 50 cm 심도 경도가 $26\text{--}30 \text{ mm}$ 에 달해 국지적 경반층 형성이 시사된다. 지표면과 50 cm 심도 경도는 유사한 수준을 유지하나, 110 cm 심도에서는 전반적으로 낮아지는 경향을 보여 표층~중간 심도에 걸친 다짐 영향이 있을 가능성이 있다(세부 수치는 Appendix 2-1~2-3 참조).

다만 본 연구에서 도출된 공간 분포는 제한된 표본수(48개 지점)와 IDW 보간에 기반한 결과이므로, 국지적 변동성에 대한 과대 또는 과소 추정 가능성이 존재하며, 향후 추가적인 표본 확충 및 다른 보간 기법과의 비교 분석이 필요하다.

또한 IDW 보간 결과와 공원 총면적(47.15 ha)을 기반으로 추산하면, 부산시민공원의 토양 탄소 총 저장량은 약 $1,060 \text{ Mg C}$ 수준으로 추정되나, 이는 간접 추정값과 공간 보간 결과를 기반으로 산정된 참고치로 해석되어야 한다. 이는 향후 도시공원 토양 탄소 현황 파악 및 탄소 인벤토리 구축을 위한 참고자료로 활용될 수 있다.

3.2. 연구결과 고찰

3.2.1. 브라운필드 복원 공원 토양의 탄소 저장 현황 및 타 연구와의 비교

부산시민공원의 토양 탄소 저장량은 평균 $22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로, An et al.(2022)가 보고한 진주시 도시공원(평균 $21.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$, $0\text{--}30 \text{ cm}$)과 유사한 수준을 보였다. 한편 Gong et al.(2020)는 경기도 12개 근린공원의 토양 유기물 함량이 조정설계기준 '상급'(5.0% 이상)에 해당한다고 보고하였는데, 이를 SOC로 환산하면 약 2.9% 이상에 해당하여 본 연구 대상지의 평균 SOC(0.277%)와 극명한 대비를 이룬다. 아울러 도시공원 녹지의 식생 유형 및 조성 후 경과 시간이 토양 유기탄소 축적에 영향을 미친다는 선행 연구(Huang et al., 2021) 결과를 고려하면, 부산시민공원처럼 조성 후 약 9년이 경과한 브라운필드 복원지는 아직 식생 기반 유기물 순환이 충분히 성숙하지 않은 단계일 가능성이 있다. 이는 브라운필드 복원 공원이 동일한 '도시공원'이라는 범주에 속함에도 불구하고, 인위적 교란 이력으로 인해 일반 근린공원과는 근본적으로 상이한 탄소 기반 상태에 있음을 보여준다.

또한 본 연구는 $0\text{--}60 \text{ cm}$ 를 단일 심도로 처리하여 층위별 탄소 분포의 수직적 변이를 반영하지 못하였다. 테크노솔 환경에서는 절·성토에 의한 토층 역전이 발생할 수 있어, 표토($0\text{--}30 \text{ cm}$)와 심토($30\text{--}60 \text{ cm}$) 간 탄소 분포의 차이가 클 가능성이 있다. 향후 연구에서는 층위별 분리 분석이 요구된다.

이러한 결과는 과거 훼손지(브라운필드)를 도시공원으로 복원하는 과정에서, 단순히 수목을 식재하고 녹지면적을 확보하는 것만으로는 단기간에 온전한 '탄소 흡수원'의 기능을 담보할 수 없음을 시사한다. 특히 부산 시민공원의 경우 과거 미군기지 시절의 유류 오염 토양을 정화하기 위해 기존 표토층이 대량으로 삭박되었고, 그 자리를 유기물이 전무한 심토나 마사토, 외부 건설 잔토 등으로 성토하였기 때문에 초기 탄소 기저값 자체가 '0'에 가까웠을 것으로 추정된다.

공원 개장 후 약 9년이 경과하였음에도 평균 $22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 수준에 머물고 있다는 것은, 인공교란토양 환경에서 낙엽 등 유기물의 자연적인 분해와 토양 내 부식질 축적이 낮은 저장 수준에 머물러 있음을 보여준다.

본 연구에서 확인된 낮은 평균 탄소 저장량($22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$)은 이 대상지의 저장 수준이 상대적으로 낮음을 보여준다. 다만 본 연구는 단일 시점의 데이터만을 활용하므로 조성 초기 대비 탄소 축적 변화를 직접 평가하기 어렵다. 향후 조성 초기 토양 조사 자료 또는 인근 비복원 지역 토양과의 비교 분석이 필요하다.

또한 IPCC(2019) 국가 온실가스 인벤토리 지침에서는 도시 녹지의 토양 탄소를 별도 항목으로 관리할 것을 권고하고 있으나, 국내 탄소 계정 체계에서 브라운필드 복원 공원은 아직 명확한 분류 기준이 마련되지 않은 상태이다. 본 연구의 결과는 이러한 정책적 공백을 메우기 위한 기초자료로서의 의의를 가진다.

3.2.2. 인위적 토양 교란이 탄소 공간 분포 불균형에 미친 영향

본 연구의 공간 보간(GIS) 분석 결과에서 가장 주목할 점은 토양 탄소 저장량의 극심한 공간적 이질성과 양극화(핫스팟과 콜드스팟의 대비)이다. 자연 상태의 토양은 지형의 경사, 수분 구배 등에 따라 탄소 저장량이 연속적이고 점진적인 전이를 보이지만, 대상지는 격자별로 1.0 Mg C ha^{-1} 미만에서 $121.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 까지 극단적인 파편화 양상을 나타냈다.

이는 복원 공원의 토양 탄소 분포가 자연적 생태 천이의 결과라기보다는, 기반 조성 당시의 ‘인위적 시공 이력’과 밀접하게 연관되어 있을 가능성을 시사한다. 60 Mg C ha^{-1} 이상의 높은 탄소를 보유한 특정 핫스팟 구역(B2, E3 등)은 초기 식재 기반 조성 과정에서 퇴비 및 부엽토 등 유기질 토양개량제가 집중 투입된 구역일 가능성이 있으며, 이러한 해석은 현재 추론에 기반하므로 향후 공원 조성 당시의 시공 기록 및 식재 설계도서 검토를 통한 검증이 필요하다.

반면, A열 남측 및 J열 일대의 콜드스팟은 식재 밀도가 낮거나, 과거 구조물 철거 후 불량 토사가 대거 매립된 뒤 답압이 심화되어 식물 뿌리의 발달과 유기물 유입이 차단된 구역으로 해석된다. 결과적으로 브라운필드 복원 공원의 탄소 지도는 ‘인간의 토목·조경적 개입’이 남긴 흔적을 투영하는 것으로 판단된다.

이러한 공간적 양극화는 ‘인위적 교란 유산(anthropogenic disturbance legacy)’ 이론의 전형적 사례로 해석될 수 있다. 이는 토양 형성 과정에서의 경로 의존성(path dependency) 개념으로 설명될 수 있다. 즉, 과거의 토지이용 이력이 현재의 SOC 분포를 규정하는 초기 조건으로 작용하며, 그 효과는 수십 년 이상 지속될 수 있다(Emde et al., 2024).

3.2.3. 간접 추정 방법론의 학술적 의의와 실용적 가치

본 연구는 현장 직접 측정이 어려운 여건 속에서도 기존의 토양 이화학 데이터(유기물, 토성)를 활용하여

SOC 저장량을 공간적으로 추정하고, 복원 공원의 탄소 분포 특성을 탐색적으로 기술하였다는 점에서 의의가 크다. Van Bemmelen 계수와 PTF는 토양학 분야에서 널리 인정받는 간접 추정 도구이며, 본 연구는 이들을 도시 복원지라는 비정형 환경에 적용한 사례를 제공한다.

물론 직접 측정(연소법, 원소분석기, 코어링)에 비해 불확실성이 존재할 수 있다. 그러나 이러한 불확실성은 결과의 무효화를 의미하지 않는다. 오히려 본 연구는 다음과 같은 가치를 갖는다.

첫째, 예산과 장비 제약이 큰 지자체 및 연구자에게 저비용 탄소 평가 방법론의 가능성을 제시한다. 둘째, 핫스팟과 콜드스팟의 공간적 위치를 특정함으로써 향후 직접 측정이 가장 필요한 지역을 명확히 지목한다. 셋째, 도시 토양 탄소 모델링의 초기 조건 민감성을 검토할 필요가 있음을 시사한다.

따라서 본 연구의 결과는 ‘확정적 진리’라기보다 ‘과학적 가설과 관리 우선순위를 도출하는 탐색적 근거’로 이해되어야 한다. 후속 연구에서는 본 연구에서 확인된 극단값 지점들을 대상으로 층위별 직접 실측을 수행함으로써 추정 모델의 정확도를 검증하고, 복원 공원의 탄소 축적 속도를 시계열적으로 평가하는 작업이 필요하다. 이는 본 연구의 범위를 벗어나는 별도의 후속 과제이며, 본 연구가 2023년 단일 시점 자료에 기반한 저장량(stock) 평가라는 점과는 구분되어야 한다.

4. 결론

본 연구는 현장 직접 측정 없이 기존 토양 이화학 데이터와 간접 추정 방법론(Van Bemmelen 계수 및 PTF 기반 단순화 추정)을 활용하여, 브라운필드 복원 도시공원인 부산시민공원의 토양 유기탄소 추정 저장량과 그 공간적 분포 특성을 탐색적으로 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 대상지 토양(0-60 cm)의 평균 탄소 저장량은 $22.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로, IPCC(2006)가 제시한 자연식생 하 광질토양의 기준 유기탄소 저장량(SOCref, 0-30 cm) 중 대상지가 속하는 온난 습윤 온대(warm temperate, moist) 기후대의 값(고활성점토 토양 88, 사질토양 34 Mg C ha^{-1})에 비해 현저히 낮은 수준을 보였다(Table 2, 3). 본 연구의 조사 심도(0-60 cm)가 인용 기준값(0-30 cm)보다 깊음에도 저장량이 낮

게 나타났다는 점에서, 대상지의 탄소 축적 수준이 자연 토양에 비해 상당히 미흡함을 보여준다. 전체 48개 지점 중 탄소 저장량이 1.0 Mg C ha^{-1} 미만인 지점은 9개소(약 19%)로 유기물이 거의 결핍된 상태가 확인된 반면, 일부 핫스팟(B2: $121.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$, E3: $100.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$)에서는 100 Mg C ha^{-1} 를 초과하는 극단적 편중 구조가 확인되었다. 이는 복원 과정에서의 질·성토 및 유기질 개량제의 불균등 투입 등 인위적 시공 이력이 탄소 저장량의 공간적 양극화를 초래하였을 가능성을 시사한다.

둘째, GIS 기반 공간 분석 결과, 토양 탄소의 공간 분포는 지형적 요인보다 식재 기반 조성 시 개량제 투입 여부 및 불량 토사 매립 이력과 연관되어 있을 가능성이 크게 나타났다. 탄소 고농도 구역은 공원 중앙 서측을 중심으로 분포하되 동측 일부 지점에서도 나타난 반면, 외곽부(A열 남측, J열)는 저탄소 콜드스팟으로 나타나, 브라운필드 복원 토양의 탄소 분포가 '인위적 교란 유산'과 연관되어 있을 가능성을 공간적으로 뒷받침하였다.

셋째, 스피어만 상관분석 결과, 자연 토양의 고전적 탄소 조절 인자인 pH와 유효태인산(AP)은 탄소 저장량과 유의한 상관을 보이지 않은 반면, 인위적 유기물 투입 이력을 반영하는 전질소량(TN; $\rho = 0.716$, $p < 0.001$)과 전기전도도(EC; $\rho = 0.443$, $p < 0.01$)가 유의한 양의 상관을 나타냈다. 이는 브라운필드 복원 공원의 탄소 분포가 자연적 토양 생성 인자보다 인위적 시공 이력과 연관되어 있을 가능성을 통계적으로 뒷받침하며, 도시 복원지 탄소 평가 시 자연 토양 기반 접근법의 적용 가능성과 한계를 함께 고려할 필요성을 시사한다.

넷째, 공간 분포 분석과 토양 이화학 데이터를 연계한 결과, 구역별 차등 관리 방향(권고)을 도출하였다. 유기물이 극히 결핍된 외곽 콜드스팟 구역(A열)에는 유기질 개량제의 집중 투입과 유기질 멀칭을 우선 적용하여 유기물 공급 기반을 확보하는 방향을 제안한다. 반면, 외곽 동측 콜드스팟 구역(J열)에서는 유기물 투입과 병행하여 토양 통기(aeration) 작업을 실시함으로써 미생물 활성을 회복시킨 후 탄소 축적 효율을 높이는 단계적 접근이 필요하다. 이러한 관리 방향은 후속 현장조사를 통해 검증되어야 할 권고 사항이며, 확정적 처방은 아니다.

또한 한국조경설계기준(KILA, 2013)의 유기물 '상급' 기준(5.0% 이상; Gong et al., 2020) 대비 본 연구 대상지의 평균 유기물 함량(약 0.48%)은 극히 낮은 수

준으로, 적극적인 토양 개량이 시급히 요구되며 특히 유기물이 극히 결핍된 외곽 콜드스팟 구역(A열)에서 우선적으로 시행되어야 한다.

Six et al.(2002)의 탄소 포화 이론에 따르면, 탄소 포화 결핍 상태에 있는 토양은 유기물 투입 대비 탄소 축적 효율이 높다. 이는 본 연구에서 제안된 유기질 개량제 집중 투입 전략이 탄소 격리 측면에서도 효과적일 수 있음을 이론적으로 뒷받침한다. 이러한 증거 기반의 구역별 차등 관리 전략은 확립적 녹지 관리에서 벗어난 실천적 공원 관리 모델을 제시한다는 점에서 의의가 있다.

본 연구는 SOC 함량과 용적밀도의 직접 측정 없이 간접 추정값에 기반하므로 일정 수준의 불확실성이 존재하며, 특히 테크노솔 환경에서 Van Bemmelen 계수 적용의 과대 추정 가능성을 배제할 수 없다. 또한 단일 시점 데이터에 기반하여 탄소 축적의 시계열적 변화를 직접 평가하기 어렵다는 한계가 있다.

이러한 추정 기반 분석임에도 불구하고, 브라운필드 복원 도시공원의 토양 탄소 저장량을 공간적으로 진단하고 그 형성 요인을 탐색적으로 해석하였다는 점에서 의의를 가진다. 또한 향후 직접 측정 기반 연구를 위한 가설 설정 및 우선 조사 지점을 제시함으로써, 도시 토양 탄소 평가 연구의 방법론적 확장에 기여할 수 있음을 제시하였다. 비록 간접 추정 방법에 기반한 탐색적 연구라는 한계가 있으나, 본 연구는 국내 대규모 브라운필드 복원공원을 대상으로 토양 유기탄소 저장량의 공간분포를 정량적으로 평가한 초기 연구 사례로서 학술적 의의를 가진다.

REFERENCES

- Allory, V., Séré, G., Ouyard, S., 2022, A Meta-analysis of carbon content and stocks in Technosols and identification of the main governing factors, *Eur. J. Soil Sci.*, 73(1), e13141.
- An, S. E., Lee, J. M., Kim, C. S., 2022, Relationships between soil carbon storage and soil properties of urban parks in Jinju-si, Gyeongsangnam-do, *Korean J. Agric. For. Meteorol.*, 24(2), 115-123.
- Bae, J., 2021, Evaluation of soil organic carbon stocks in heterogeneous land cover types towards carbon neutral city, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Batjes, N. H., 1996, Total carbon and nitrogen in the soils of the world, *Eur. J. Soil Sci.*, 47(2), 151-163.

- Busan Facilities Corporation, 2024, Busan Citizens Park, https://www.citizenpark.or.kr/04_int/int01_2.asp (accessed on 20 July 2026)
- Choi, I. Y., 2023, Study on soil environmental characteristics of poorly growing trees in Busan Citizens Park, Ph. D. Dissertation, Dong-A University, Busan, Korea, <https://www.riss.kr/link?id=T1694433>
- Emde, D., Poeplau, C., Don, A., Heilek, S., Schneider, F., 2024, The centennial legacy of land-use change on organic carbon stocks of German agricultural soils, *Glob. Change Biol.*, 30(8), e17444.
- Gong, M. J., Kwon, T. G., Kim, C. H., Kim, N. C., Shin, Y. G., An, N. H., Lee, S. M., Son, J. G., 2020, Study on standards of soil physicochemical properties for improving ecological functions of urban parks, *J. Environ. Sci. Int.*, 29(4), 325-337.
- Huang, R., Lan, T., Song, X., Li, J., Ling, J., Deng, O., Wang, C., Gao, X., Li, Q., Tang, X., Tao, Q., Zeng, M., 2021, Soil labile organic carbon impacts C:N:P stoichiometry in urban park green spaces depending on vegetation types and time after planting, *Appl. Soil Ecol.*, 163, 103926.
- IPCC, 2006, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4: Agriculture, forestry and other land use, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, in: Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
- IPCC, 2019, 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, in: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P., Federici, S. (eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.
- IPCC, 2023, Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, in: Lee, H., Romero, J. (eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 184.
- IUSS Working Group WRB, 2022, World reference base for soil resources 2022, 4th ed., International Union of Soil Sciences, Vienna, Austria.
- KILA (Korean Institute of Landscape Architecture), 2013, Landscape design standards (Publication registration No. 11-1500000-000438-14), Korean Institute of Landscape Architecture, Seoul, Korea, <https://www.codil.or.kr>
- Lorenz, K., Lal, R., 2009, Biogeochemical C and N cycles in urban soils, *Environ. Int.*, 35(1), 1-8.
- Lu, G. Y., Wong, D. W., 2008, An Adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, *Comput. Geosci.*, 34(9), 1044-1055.
- Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D., Nowak, D. J., 2006, Carbon storage by urban soils in the United States, *J. Environ. Qual.*, 35(4), 1566-1575.
- Pribyl, D. W., 2010, A Critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor, *Geoderma*, 156(3-4), 75-83.
- Rawls, W. J., 1983, Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content, *Soil Sci.*, 135(2), 123-125.
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., Papendick, R. I., 1986, Estimating generalized soil-water characteristics from texture, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50(4), 1031-1036.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., Paustian, K., 2002, Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils, *Plant Soil*, 241, 155-176.
-
- Assistant Professor. Shu-Zi Sun
Department of Landscape Architecture, Dong-A University
shz6988@dau.ac.kr
 - Doctor's course. Byung-Ho Kang
Department of Urban Planning and Landscape Architecture, Dong-A University Graduate School
sharpkang74@naver.com
 - Doctor's course. Young-Gil Lee
Department of Urban Planning and Landscape Architecture, Dong-A University Graduate School
tusian@naver.com
 - Doctor's course. Su-Jeong Bae
Department of Urban Planning and Landscape Architecture, Dong-A University Graduate School
hsa8017@naver.com
 - Professor. Geon-Seok Yang
Department of Landscape Architecture, Dong-A University
ydrystone@dau.ac.kr

Appendices

Appendix 1. Survey of soil chemical properties

Zone	Soil pH	EC (dS m ⁻¹)	CEC (cmol (+) kg ⁻¹)	Total nitrogen (%)	Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	Exchangeable potassium (cmol (+) kg ⁻¹)	Exchangeable calcium (cmol(+) kg ⁻¹)	Exchangeable magnesium (cmol(+) kg ⁻¹)	Salinity (%)	O.M. (%)
A1	8.1	0.21	5.12	0.05	26.4	0.05	5.69	1.38	0.003	0.18
A2	8.2	0.27	9.99	0.058	26.4	0.13	11.5	1.31	0.002	0.42
A3	6.8	0.17	9.75	0.047	3	0.1	4.74	1.81	0.003	0.01
A4	7.0	0.11	7.67	0.043	11.4	0.09	6.24	1.69	0.003	0.01
A5	6.9	0.18	9.41	0.052	5.9	0.13	5.66	1.13	0.003	0.052
B1	7.4	0.24	10.14	0.044	5.8	0.13	6.48	1.99	0.003	0.14
B2	7.2	1.11	11.54	0.126	5.4	0.12	9.57	1.14	0.003	2.58
B3	7.7	0.15	9.18	0.068	11.1	0.09	7.41	1.39	0.002	0.87
B4	8.4	0.47	9.39	0.04	13.9	0.1	12.54	1.6	0.003	0.19
B5	7.1	0.21	11.39	0.051	2.8	0.14	7.72	1.78	0.003	0.27
C2	6.8	0.18	10.89	0.069	2.7	0.14	6.1	1.46	0.003	0.64
C3	7.4	0.29	7.23	0.108	32.1	0.11	8.07	0.78	0.003	1.5
C4	7.1	0.14	8.34	0.066	18.6	0.11	6.79	1.6	0.003	0.52
C5	6.6	0.16	19.71	0.036	16.9	0.1	12.7	4.93	0.003	1.01
D1	7.9	0.38	8.35	0.05	6.5	0.12	7.99	1.69	0.004	0.35
D2	7.0	0.19	12.43	0.053	6.5	0.09	5.67	1.41	0.003	0.33
D3	7.8	0.48	7.69	0.08	10.9	0.09	9.07	1.17	0.004	1.26
D4	8	0.74	9.08	0.083	8.1	0.12	11.46	1.17	0.004	1.41
D5	7.0	0.08	11.34	0.045	20.7	0.09	13.21	4.45	0.003	0.11
E1	7.7	0.15	7.48	0.035	23.7	0.06	8.43	1.77	0.003	0.01
E2	7.5	0.22	7.82	0.047	6.9	0.08	7.68	2	0.004	0.14
E3	7.1	0.33	9.64	0.095	4.3	0.11	7.16	1.21	0.005	2.13
E4	7.2	0.67	9.29	0.06	1.4	0.12	8.49	1.53	0.005	0.72
E5	7.1	0.19	10.25	0.063	50.1	0.1	8.94	1.79	0.003	1.0
F1	7.6	0.08	5.76	0.039	18.3	0.05	8.13	1.99	0.003	0.01
F2	8.1	0.24	6.69	0.043	58.9	0.11	7.56	1.17	0.003	0.02
F3	8.2	0.62	10.37	0.046	10.1	0.1	13.3	1.49	0.005	0.34
F4	7.3	0.38	8.4	0.053	11.3	0.1	6.87	1.68	0.004	0.51
F5	7.4	0.15	7.99	0.053	11.8	0.09	7.23	1.2	0.003	0.18
G1	7.8	0.51	12.87	0.056	9.6	0.13	12.11	2.53	0.004	0.31
G2	8.5	0.34	7	0.024	42.2	0.12	10.17	0.92	0.003	0.21
G3	6.7	0.22	8.85	0.057	34.3	0.13	5.94	1.55	0.003	0.87
G4	8.0	0.16	8.32	0.027	14.3	0.08	7.6	1.71	0.003	0.26
G5	8.6	0.28	12.64	0.019	15.7	0.13	12.01	2.12	0.004	0.01
H1	8.1	0.25	5.89	0.025	57.4	0.07	7.18	1.01	0.003	0.26
H2	7.1	0.56	10.78	0.03	40.9	0.1	11.43	3.41	0.004	0.41
H3	6.8	0.54	7.66	0.027	2.5	0.11	5.53	1.36	0.008	0.32
H4	8.2	0.97	11.44	0.02	34.2	0.11	15.47	2.73	0.004	0.25
H5	7.8	0.36	9.18	0.034	9.5	0.13	8.57	1.55	0.003	0.41
I1	8.8	0.51	11.19	0.046	18.8	0.12	10.09	1.99	0.004	0.69
I2	6.8	0.3	9.54	0.06	16.2	0.11	7.24	2.45	0.004	1.45
I3	7.2	0.11	7.15	0.016	24.7	0.1	7.71	1.8	0.003	0.03
I4	8.5	0.58	4.85	0.02	8	0.08	8	1.45	0.004	0.21
I5	7.7	0.34	9.41	0.024	12	0.12	8.19	1.97	0.004	0.13
J2	6.8	0.09	5.56	0.019	9.1	0.07	5.19	1.32	0.003	0.01
J3	7.2	0.15	7.81	0.017	35.4	0.11	6.96	1.34	0.002	0.16
J4	8.5	0.21	6.64	0.015	12.9	0.08	6.72	1.35	0.003	0.01
J5	8.3	0.35	8.05	0.014	17.7	0.11	7.55	2.04	0.003	0.01

^a The high CEC value at site C5 (19.71 cmol(+) kg⁻¹) reflects local soil characteristics, including relatively high organic matter content (1.01%), rather than measurement error.

Appendix 2-1. Soil texture and soil hardness (mm) at Surface and -20 cm depths

Zone	Soil texture	Soil hardness (mm)							
		Surface				Side wall (-20 cm)			
		North	Southeast	Southwest	Mean	North	Southeast	Southwest	Mean
A1	Sandy loam	26	22	26	25	22	19	20	20
A2	Loam	25	22	30	26	16	15	14	15
A3	Clay loam	20	28	26	25	23	22	17	21
A4	Loam	26	27	24	26	20	20	17	19
A5	Clay loam	28	29	32	30	20	14	14	16
B1	Clay loam	26	23	25	25	12	12	10	11
B2	Clay loam	22	19	17	19	12	12	10	11
B3	Loam	25	24	26	25	17	13	18	16
B4	Loam	21	23	20	21	12	14	11	12
B5	Loam	20	21	21	21	12	9	10	10
C2	Clay loam	22	19	20	20	11	13	12	12
C3	Silty clay loam	25	23	17	22	24	17	19	20
C4	Loam	20	21	20	20	15	12	5	11
C5	Sandy loam	16	19	22	19	20	11	19	17
D1	Loam	22	20	26	23	22	15	20	19
D2	Loam	29	26	25	27	26	17	19	21
D3	Loam	21	21	20	21	27	26	23	25
D4	Loam	22	21	24	22	22	19	14	18
D5	Silt loam	21	25	24	23	17	16	15	16
E1	Sandy loam	16	16	14	15	22	20	15	19
E2	Loam	22	25	24	24	17	17	22	19
E3	Clay loam	23	22	23	23	24	22	20	22
E4	Clay loam	17	23	20	20	22	14	14	17
E5	Loam	24	17	25	22	18	14	18	17
F1	Sandy loam	14	15	17	15	11	10	11	11
F2	Silt loam	17	14	17	16	25	25	25	25
F3	Loam	21	22	20	21	20	14	21	18
F4	Loam	19	22	21	21	25	18	23	22
F5	Clay loam	18	16	18	17	12	11	10	11
G1	Loam	17	16	20	18	20	16	14	17
G2	Silt loam	20	19	19	19	17	16	19	17
G3	Loam	17	23	19	20	9	9	9	9
G4	Loam	27	26	26	26	19	16	22	19
G5	Sandy loam	23	22	24	23	19	14	22	18
H1	Sandy loam	18	20	24	21	15	16	12	14
H2	Loam	25	18	18	20	18	10	15	14
H3	Silt loam	23	26	24	24	24	22	21	22
H4	Loam	19	15	16	17	24	26	19	23
H5	Loam	25	25	29	26	22	16	20	19
I1	Loam	25	26	20	24	19	20	15	18
I2	Loam	23	17	17	19	15	15	12	14
I3	Loam	14	23	17	18	22	14	14	17
I4	Sandy loam	25	26	26	26	22	20	21	21
I5	Loam	22	24	24	23	19	23	28	23
J2	Silt loam	15	19	18	17	21	17	18	19
J3	Loam	21	16	21	19	12	11	12	12
J4	Loam	20	24	23	22	24	15	17	19
J5	Sandy loam	22	26	25	24	17	23	14	18

Appendix 2-2. Soil texture and soil hardness (mm) at -50 cm and -80 cm depths

Zone	Soil texture	Soil hardness (mm)							
		Side wall (-50cm)				Side wall (-80cm)			
		North	Southeast	Southwest	Mean	North	Southeast	Southwest	Mean
A1	Sandy loam	26	25	23	25	26	19	24	23
A2	Loam	24	17	16	19	23	18	22	21
A3	Clay loam	23	23	27	24	17	21	15	18
A4	Loam	30	26	30	29	24	21	20	22
A5	Clay loam	22	13	19	18	16	12	14	14
B1	Clay loam	16	23	16	18	22	22	17	20
B2	Clay loam	28	17	24	23	25	29	24	26
B3	Loam	22	22	26	23	16	17	18	17
B4	Loam	22	16	17	18	21	22	20	21
B5	Loam	16	16	15	16	18	16	17	17
C2	Clay loam	10	20	16	15	20	28	18	22
C3	Silty clay loam	24	26	20	23	15	20	19	18
C4	Loam	26	21	6	18	19	20	20	20
C5	Sandy loam	28	21	15	21	26	21	16	21
D1	Loam	17	18	16	17	17	15	17	16
D2	Loam	24	25	21	23	27	24	17	23
D3	Loam	23	18	18	20	18	21	21	20
D4	Loam	15	21	22	19	22	22	24	23
D5	Silt loam	15	18	14	16	24	20	16	20
E1	Sandy loam	22	27	25	25	20	19	21	20
E2	Loam	23	19	13	18	22	17	14	18
E3	Clay loam	24	23	22	23	17	25	20	21
E4	Clay loam	25	21	17	21	17	18	20	18
E5	Loam	18	22	19	20	18	18	18	18
F1	Sandy loam	22	22	24	23	15	15	17	16
F2	Silt loam	20	15	19	18	16	17	16	16
F3	Loam	16	20	19	18	21	18	23	21
F4	Loam	17	20	20	19	23	21	23	22
F5	Clay loam	22	16	21	20	21	18	18	19
G1	Loam	20	15	17	17	24	22	20	22
G2	Silt loam	13	21	17	17	17	19	17	18
G3	Loam	17	16	16	16	22	12	17	17
G4	Loam	22	21	24	22	17	14	19	17
G5	Sandy loam	20	24	22	22	22	24	17	21
H1	Sandy loam	20	21	20	20	17	17	16	17
H2	Loam	24	23	23	23	19	21	20	20
H3	Silt loam	21	21	19	20	21	19	17	19
H4	Loam	21	22	23	22	20	20	20	20
H5	Loam	27	11	16	18	17	20	18	18
I1	Loam	14	17	15	15	16	22	17	18
I2	Loam	19	19	22	20	22	23	19	21
I3	Loam	21	24	22	22	22	22	22	22
I4	Sandy loam	17	19	18	18	21	21	17	20
I5	Loam	27	29	26	27	22	27	26	25
J2	Silt loam	18	19	17	18	19	17	17	18
J3	Loam	17	17	14	16	18	19	19	19
J4	Loam	20	23	16	20	14	21	19	18
J5	Sandy loam	25	26	24	25	23	22	22	22

Appendix 2-3. Soil texture and soil hardness (mm) at -110 cm and -130 cm (Bottom) depths

Zone	Soil texture	Soil hardness (mm)							
		Side wall (-110cm)				Bottom (-130 cm)			
		North	Southeast	Southwest	Mean	North	Southeast	Southwest	Mean
A1	Sandy loam	21	17	13	17	17	15	16	16
A2	Loam	19	22	18	20	16	15	16	16
A3	Clay loam	21	19	29	23	14	16	15	15
A4	Loam	20	23	24	22	16	17	15	16
A5	Clay loam	14	18	15	16	19	17	18	18
B1	Clay loam	18	24	14	19	14	12	15	14
B2	Clay loam	16	24	17	19	16	14	13	14
B3	Loam	27	29	20	25	20	23	19	21
B4	Loam	18	18	19	18	16	17	16	16
B5	Loam	22	15	16	18	16	15	15	15
C2	Clay loam	21	16	16	18	20	18	16	18
C3	Silty clay loam	17	16	23	19	18	16	15	16
C4	Loam	24	24	18	22	24	24	21	23
C5	Sandy loam	19	19	14	17	14	10	16	13
D1	Loam	18	18	17	18	17	15	14	15
D2	Loam	24	25	15	21	25	23	22	23
D3	Loam	18	23	16	19	10	11	15	12
D4	Loam	22	17	19	19	18	15	14	16
D5	Silt loam	15	16	10	14	12	13	15	13
E1	Sandy loam	19	22	16	19	20	18	15	18
E2	Loam	20	21	14	18	17	16	15	16
E3	Clay loam	10	15	11	12	15	13	15	14
E4	Clay loam	23	20	19	21	17	14	12	14
E5	Loam	25	20	25	23	18	15	15	16
F1	Sandy loam	15	13	15	14	16	15	14	15
F2	Silt loam	23	22	23	23	18	15	16	16
F3	Loam	20	17	19	19	17	18	20	18
F4	Loam	21	25	22	23	17	15	14	15
F5	Clay loam	17	21	14	17	16	16	15	16
G1	Loam	22	21	14	19	12	13	15	13
G2	Silt loam	22	20	17	20	19	18	16	18
G3	Loam	19	14	17	17	20	18	15	18
G4	Loam	17	19	22	19	16	15	14	15
G5	Sandy loam	19	18	21	19	12	15	16	14
H1	Sandy loam	15	12	19	15	16	14	15	15
H2	Loam	17	17	19	18	16	15	16	16
H3	Silt loam	22	19	20	20	20	18	16	18
H4	Loam	26	19	21	22	18	17	19	18
H5	Loam	24	23	21	23	20	21	18	20
I1	Loam	20	25	19	21	19	18	19	19
I2	Loam	20	19	18	19	18	16	18	17
I3	Loam	21	17	22	20	19	16	18	18
I4	Sandy loam	23	22	17	21	20	19	19	19
I5	Loam	17	22	19	19	18	16	15	16
J2	Silt loam	15	20	17	17	17	18	19	18
J3	Loam	19	20	12	17	15	18	16	16
J4	Loam	20	20	13	18	21	19	16	19
J5	Sandy loam	17	20	23	20	15	16	18	16