

중앙가로녹지대 토양 화학성과 중금속 변화량이 식재기반에 미치는 영향[†]

Impacts of the Chemical Properties and Heavy Metal Variations on Planting Substrates in Central Median Greenery[†]

탁승철*, 이시영**

*배재대학교 조경학과 박사과정, **배재대학교 조경학과 교수

Tak, SeongCheol*, Lee, Shiyoung**

*Ph.D. Course, Dept. of Landscape Architecture, Pai Chai University

**Professor, Dept. of Landscape Architecture, Pai Chai University

Received: May 12, 2026

Revised: May 27, 2026 (1st)

June 10, 2026 (2nd)

Accepted: June 11, 2026

3인익명 심사필

Corresponding author :

Shiyoung Lee

Professor, Dept. of

Landscape Architecture, Pai Chai

University, Daejeon 35345, Korea

Tel.: +82-42-520-5881

E-mail: sylee@pcu.ac.kr

국문초록

본 연구는 현대도시 그린인프라의 핵심 요소인 중앙가로녹지대 식재기반 토양을 대상으로 계절별 토양 화학성과 중금속 함량의 변화량을 종합적으로 규명하여 토양 유지관리방안 체계를 수립하고자 수행하였다. 대전광역시 내 4개 주요 노선의 중앙가로녹지대를 대상으로 사계절(11월, 2월, 4월, 7월)에 걸쳐 토양 화학성(CEC, 유기물, pH, EC, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, P, N, 염분) 및 중금속(Hg, As, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Ni, Pb, Zn) 변화량을 분석하였다. 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA) 결과, 1년에 걸친 계절적 변화 양상이 통계적으로 유의하게 입증되었다. 구체적으로 2월(동절기) 및 4월(춘절기)에는 제설제 유입의 직접적 지표인 Na⁺과 염분이 가을철 대비 유의하게 증가하였으며($p < .05$), 이와 동반하여 중금속 축적량 역시 유의하게 상승하여($p < .05$) 제설제가 단순한 화학적 스트레스를 넘어 토양 내 중금속 농도 변화와 상관성을 확인하였다. 이어진 7월(하절기)에는 고온 건조에 따른 토양 알칼리화(pH 상승, $p < .05$)와 함께, 대부분의 중금속 농도가 봄철 대비 상대적으로 상승하는 패턴이 확인되었다. 또한, 전체 중금속 중 최고 평균 농도를 기록한 아연(Zn)은 시기에 따른 주효과가 유의하게 나타났다. 환경 부하에 따른 높은 민감성(표준편차 최대 62.45)로 인해 사후검정(bonferroni)의 1:1쌍 간의 유의차는 도출되지 않았으나, 가을철 최저치(64.80mg/kg) 기록 후 2월(178.30mg/kg)과 7월(173.33mg/kg)에 3배 가까이 집중적으로 축적되는 가장 민감한 변동 폭을 보였다. 이는 아연(Zn)이 중앙가로녹지대 토양 내 타 중금속 대비 가장 높은 축적량을 보이는 주된 중금속 축적 항목임을 확인하였으며, 계절별 화학 교란에 민감하게 반응하는 지표임을 통계적으로 증명한다. 상관관계분석(Pearson) 결과, CEC, 유기물, 질소(N) 간에는 전반적으로 높은 정적(+) 상관관계가 나타난 반면, 이러한 비옥도 인자군과 중금속 간에 통계적으로 부적(-) 상관관계가 확인되었다. 이는 식재기반 토양의 비옥도가 영양 공급원을 넘어, 중금속 축적 양상과도 상반된 흐름의 상관성이 있다는 점을 통계적으로 확인하였다. 또한 검출된 4종의 중금속(Cu, Ni, Pb, Zn)들은 개별적으로 독립적인 거동을 보이지 않고, 상호 밀접하게 연동되어 동반 증감하는 것이 확인되었다. 결론적으로, 중앙가로녹지대 가로 식재수목의 생존율 및 생육 활력을 높이고 도시 그린 인프라의 본연의 기능을 극대화하기 위해서는, 표면적인 식재수목 관리뿐만 아니라 수목 생육의 근간인 토양 환경을 기반으로 한 시기별 맞춤형 유지관리를 도모해야 할 것이다.

주제어: 현대 도시, 그린인프라, 가로환경, 사계절, 계절적 변동

ABSTRACT

This study was conducted to comprehensively investigate seasonal variations in the chemical properties and heavy metal concentrations of soils in central median green strips, a key component of modern urban green infrastructure, and to establish a systematic framework for soil maintenance and management. Soil samples were collected from central median green strips along four major roadways in Daejeon Metropolitan City during four seasons—November, February, April, and July. Seasonal variations in soil chemical properties, including cation exchange capacity (CEC), organic matter, pH, electrical conductivity (EC), Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, phosphorus (P), nitrogen (N), and salinity, as well as the concentrations of heavy metals, including Hg, As, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Ni, Pb, and Zn, were analyzed. The results of repeated-measures analysis of variance (repeated measures ANOVA) statistically demonstrated significant seasonal variations over the one-year study

[†]이 논문은 2026년도 배재대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행된 것임.

period. In February and April, Na⁺ and salinity, which are direct indicators of deicing salt input, increased significantly compared with those in autumn ($p < .05$). Heavy metal concentrations also increased significantly during these periods ($p < .05$), indicating that deicing salt input was associated not only with chemical stress but also with changes in heavy metal concentrations in the soil. In July, soil alkalization, represented by a significant increase in pH under high-temperature and dry conditions ($p < .05$), was observed, while the concentrations of most heavy metals showed an increasing pattern relative to those recorded in spring. Among the heavy metals analyzed, Zn exhibited the highest mean concentration and a significant main effect of sampling time. Although no statistically significant differences were identified in the Bonferroni-adjusted pairwise comparisons because of its high sensitivity to environmental loading and substantial variability, with a maximum standard deviation of 62.45, Zn showed the greatest seasonal fluctuation. Following its lowest concentration in autumn (64.80 mg/kg), Zn concentrations increased to 178.30 mg/kg in February and 173.33 mg/kg in July, representing an increase of nearly threefold. These findings indicate that Zn was the predominant heavy metal accumulation component in the soils of central median green strips and was highly responsive to seasonal chemical disturbances. Pearson's correlation analysis revealed strong positive correlations among CEC, organic matter, and nitrogen (N), whereas statistically significant negative correlations were observed between these soil fertility-related factors and heavy metal concentrations. This result indicates that soil fertility in planting substrates is related not only to nutrient availability but also to heavy metal accumulation patterns in an inverse manner. In addition, the four detected heavy metals—Cu, Ni, Pb, and Zn—did not behave independently but exhibited closely interrelated patterns of concurrent increase and decrease. In conclusion, improving the survival and growth vitality of street-planted trees in central median green strips and maximizing the inherent functions of urban green infrastructure require more than the superficial management of planted trees. Seasonal and site-specific maintenance strategies should be implemented based on the soil environment, which serves as the fundamental growing medium supporting tree growth.

Keywords: Contemporary City, Green Infrastructure, Street Environment, Four Seasons, Seasonal Variation

1. 서론

현대 도시는 기후변화로 인한 극단적 환경 위기에 직면해 있으며, 이에 대응하여 외부 충격에 유연하게 대응하는 도시 회복탄력성(urban resilience)을 확보하는 것이 현대 도시 계획의 최우선 과제로 대두되고 있다. 이러한 맥락에서 가로녹지는 기후변화와 관련하여 도시에 발생하는 이산화탄소의 저장소 역할을 하며(한봉호 등, 2013), 녹지를 제공하여 운전자의 심리적 안정감과 쾌적감을 제공하며(김경석과 강승림, 2003) 단순한 경관 요소를 넘어 파편화된 도시 생태계를 연결하는 선상 녹지축이자 기후변화 적응의 핵심 그린인프라(green infrastructure)로서 그 가치가 매우 높다. 최근 식생 조경을 이용한 주거 환경 개선 요구가 폭발적으로 증가하고 있으며(김성민 등, 2016), 도로 내 환경 개선의 중요성도 대두되고 있다. 더욱이 도로 중앙이라는 입지 특성상 차량으로부터 발생하는 오염원과 겨울철 강설로 인해 도로를 주행하는 차량 안전을 위하여 살포하는 제설제가 최근에 심각한 환경문제를 야기하고 있으며(박주영, 2018), 일반 녹지보다 높은 하자율을 보이고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 녹지 조성 시 수목생장에 적합한 토양조건, 수목은 토양에 대한 생리·생태적 성질을 고려한 설계가 이뤄져야 하며(양승빈 등, 2015), 현재의 가로수 관리 체계는 문제 발생 후 수목을 교체하는 사후 처방(post-treatment)에 치중되어 있어 근본적인 토양 관리 매뉴얼의 부재가 지적되고 있으며, 도시 가로수 건강은 식재기반 개선에서 출발하며 토양 관리 제도화가 시급하다(서울기술연구원, 2022). 이러한 반복적인 사후 처방은 막대한 유지관리 예산의 낭비를 초래할 뿐만 아니라, 잦은 수목 교체로 인한 도시 경관의 훼손과 탄소 흡수원으로서의 생태적 기능 상실을 야기한다. 특히 중앙가로녹지대는 하절기의 고온 건조와 동절기의 제설제 유입과 같은 계절적 환경변화에 상시 노출되는 공간이다. 따라서 특정 시점에 국한된 단편적인 조사만으로는 토양 환경의 실질적인 악화 기제를 진단하기 어려우며, 연중 동태적인 변화 흐름을 파악하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구는 외부 교란 요인에 민감하게 반응하는 중앙가로녹지대를 대상으로 1년간의 계절별 추적 조사를 수행하여, 토양의 화학적 특성과 중금속 함량의 시기별 변화 양상을 실증적으로 분석하고자 한다. 구체적으로는 반복 측정된 토양 환경 변수 간의 통계적 상관관계를 규명하여, 계절적 환경 변화가 식재기반 토양에 미치는 영향을 파악하는 데 중점을 둔다. 최종적으로, 이러한 분석 결과를 바탕으로

중앙가로녹지대의 효과적인 연간 유지관리 체계를 구축함으로써, 도로 환경의 질적 향상과 도시 회복탄력성 증진에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상지 선정

본 연구는 중앙가로녹지대 식재기반 토양의 시기별 화학적 특성과 중금속 축적 기제를 규명하기 위해, 대전광역시 내 주요 간선 도로를 대상으로 사전 답사 및 공간 분석을 수행하여 선정된 기준은 다음과 같다(그림 1 참조).

첫째, 연구의 토양 화학 환경에 미치는 외적 변수(차량 통행 특성, 교통량, 주변환경, 도로 가로구조 등)의 영향을 체계적으로 비교·검증하기 위해 일정 수준 이상의 교통량이 전제되어야 하며, 동시에 각기 다른 도로 환경적 특성을 뚜렷하게 대변할 수 있는 대상지 선정을 우선순위로 지정하였다. 이에 본 연구는 2024년도 「대전광역시 교통현황조사 분석보고서」를 바탕으로 총 27개소로 구분되는 대전광역시 주요 간선 도로 중 상·하행 일 교통량 55,000대 이상인 7개 도로를 1차 후보군으로 추출하였다(표 1 참조).

둘째, 이들 후보군 중에서 단순한 교통량 수치를 넘어 본 연구가 규명하고자 하는 요인을 대표하는 4개의 대상지(대덕대로, 둔산대로, 천변도시고속화도로, 한밭대로)를 최종 선정하였다(표 2 참조). 구체적으로는 주변 토지이용 형태의 다양성을 반영하여 상업중심구간(대덕대로), 녹지중심구간(둔산대로)을 포함하였다. 또한 차량 통행 특성에 따른 화학적 교란 요인을 대변하기 위해, 일일 최고 교통량(91,960대/일)을 기록하며 고속 주행으로 인한 타이어 마모 분진 및 물리적 하중이 극심한 고속화 구간(천변도시고속화도로)과, 높은 교통량(69,214대/일) 속에서 가다 서기를 반복하여 배기가스 등 화학적 교란이 집중되는 상습 정체 구간(한밭대로)을 선정하였다.

셋째, 가로수 토양 연구에 있어 관리 방법이 상이하거나 지역적 기후가 다를 경우, 토양 환경 변화가 외부 교란 요인 때문인지, 대상지 고유의 특성 때문인지 규명하기 어렵다. 이에 본 연구는 대전광역시라는 동일한 기후대 및 동일한 지자체의 가로수 관리 매뉴얼이 적용되는 범위 내에서 연구 대상지를 선정하여 기후 및 유지관리 관행이라는 외적 변인을 최소화하였다.

2.2 조사 및 재료 수집

본 연구의 현장조사는 대전광역시 내 4개 주요 노선의 중앙가로녹지대 대상으로 2024년 11월부터 2025년 11월까지 약 1년에 걸쳐 수행되었으며, 구체적인 시료 채취방법은 다음과 같다.

첫째, 계절적 특정 시기에 연간 총 4회의 시료 채취를 진행하였으며, 구체적 시기는 낙엽기(11월 13일), 제설제 집중 살포기(2월 17일), 개엽 및 생육 활성화기(4월 9일), 하절기 고온건조기(7월 13일)로 세분화하여 설정하였다. 상세하게는 가을철에는 11월 13일에 앞이 다 떨어지고 난 후에 실시하였으며, 겨울철의 경우 총 15회(2024년 12월

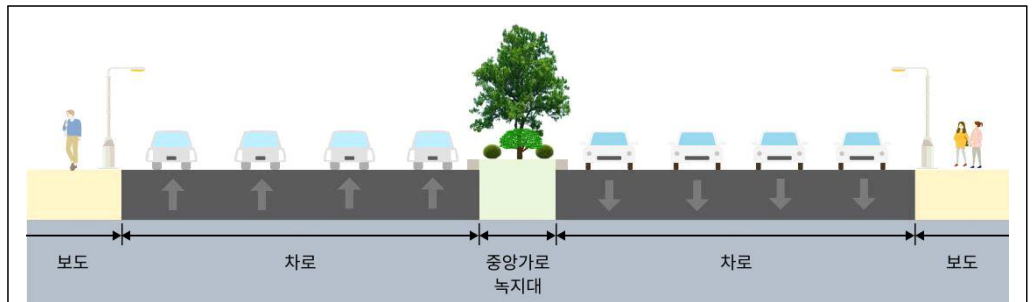


그림 1. 중앙가로녹지대 단면 모식도

표 1. 2024년 대전광역시 주요 간선도로 교통량(55,000대/일 이상) 및 선정 도로 (단위: 대/일)

구분	계룡로	계백로	대덕대로	동서로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
2024년 교통량	62,063	56,227	55,689	55,481	58,121	91,960	69,214
선정 도로			○		○	○	○

출처: 2024년 대전광역시 교통현황조사 분석보고서(2024)

표 2. 중앙가로녹지대 조사 대상지별 가로 환경 특성

구분	대덕대로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
주변 환경	상업중심	녹지중심	고속화도로	교통혼잡구간
2024년 교통량(대/일)	55,689	58,121	91,960	69,214
경계석 종류 및 규격 (cm)	콘크리트 경계석 180×250×1000	화강석 경계석 250×250×1000	콘크리트 경계석 180×300×1000	콘크리트 경계석 180×300×1000
주요 식재수목	반송 (<i>Pinus densiflora</i> for. <i>multicaulis</i>) 네티나무 (<i>Zelkova serrata</i>) 회양목 (<i>Buxus microphylla</i> var. <i>koreana</i>)	네티나무 (<i>Zelkova serrata</i>) 유카 (<i>Yucca gloriosa</i>),	반송 (<i>Pinus densiflora</i> for. <i>multicaulis</i>) 회양목 (<i>Buxus microphylla</i> var. <i>koreana</i>) 철쭉 (<i>Rhododendron schlippenbachii</i>)	반송 (<i>Pinus densiflora</i> for. <i>multicaulis</i>), 회양목 (<i>Buxus microphylla</i> var. <i>koreana</i>), 철쭉 (<i>Rhododendron schlippenbachii</i>)
식재 유형	교목 1열 + 관목 1열 + 관목	교목 1열 + 관목	관목 1열 + 관목 + 관목	관목 1열 + 관목 + 관목
잔디(<i>Zoysia japonica</i>)	×	○	×	○
도로 유형	왕복 4차선	왕복 4차선	왕복 3차선	왕복 3차선
녹지 폭(m)	2.0	2.0	2.5	2.5
겨울철 월동보호책 설치	○	×	×	○

2회, 2025년 1월 8회, 2월 5회) 이후 2월 17일에 채취하였다.

둘째, 시료 채취 지점은 각 도로의 보편적인 특성을 반영하기 위해 중앙가로녹지대 중간부로 선정하였으며, 대상 지역을 대표할 수 있는 토양 시료를 채취하기 위해, 각 대상지 내에서 지그재그형으로 5개 지점을 5m 간격으로 선정하여 채취하되, 대상 지역에 시설물 등이 있어 각 지점 간의 간격이 불충분할 경우 간격을 적절히 조절하였다(토양오염공정시험기준, 2018). 아울러 각 대상지는 조성 시기가 동일하고 제한된 공간 내에서 균일한 재배 관리가 이루어지고 있으므로, 2023년도 「농촌진흥청 종합검정실 분석매뉴얼」 기준에 따라 이를 하나의 필지로 간주하여 토양 시료를 채취하였다.

셋째, 현장 시료 채취 방법으로는 각 대상지별로 지표면의 식물체 및 이물질을 제거한 뒤 토심 0-15cm의 표토를 선정된 구역에서 채취하여 균일하게 혼합하였으며, 수집된 시료가 대상 지역 전체를 오차 없이 대표할 수 있도록 엄격하게 관리하였다(토양오염공정시험기준, 2018). 수집된 토양 시료는 직사광선이 배제되고 통풍이 원활한 장소에서 7일간 자연 풍건하였으며, 최종 정밀 분석 시료로 활용하였다(표 3 참조).

2.3 분석 내용 및 체계

분석 기준은 다음과 같다.

첫째, 도심 가로 환경은 강수량, 일조량, 국지적 미기후, 관리 방법 등 무수히 많은 통제 불가능한 외적 변수에 의해 절대적인 영향을 받는다. 이로 인해 토양 성분 변화와 식물 생육 간의 직접적인 연관성을 명확히 규정하기에는 어려움이 따르며, 수목의 생육 상태만을 지표로 삼아 토양과의 인과관계를 단정지를 경우 수많은 외적 교란 요인으로 인해 연구 데이터의 본질이 크게 왜곡될 위험이 존재한다. 이에 본 연구는 사후 처방에 치중하던 기존 관행을 탈피하고, 문제가 발생하기 전 조치할 수 있는 식재기반 토양의 선제적 관리 방안을 제안하기 위해 수목 생존의 절대적 토대인 ‘토양 환경’을 분석하고자 한다. 또한, 도심 중앙가로녹지대의 특수성을 고려할 때 오염되지 않은 자

표 3. 토양 시료 채취 시기 및 계절적 특징

구분	계절별	특징	조사 날짜
1차 조사	가을	낙엽이 떨어지는 시기	11월 13일
2차 조사	겨울	겨울 제설제 살포 시기	2월 17일
3차 조사	봄	개엽 및 활력기	4월 9일
4차 조사	여름	고온 토양 건조 시기	7월 13일

연 지반을 대조군으로 설정하여 단순 오염도를 비교하는 것은 본 연구의 목적에 부합하지 않는다. 따라서 외부 대조군을 두지 않고, 차량 통행 특성과 가로 환경이 구별되는 4개 주요 노선을 선정하여 통계분석을 수행하는 연구 설계를 채택하였다. 이를 바탕으로 1년에 걸친 사계절 반복 측정 조사를 실시하였으며, 계절별 환경 요인이 토양 화학성과 중금속 축적에 미치는 영향을 교차 분석하여 결과의 통계적 타당성과 신뢰성을 확보하였다.

둘째, 분석 대상에 있어서는 토양 화학성 11개 항목 양이온치환능력(CEC), 유기물, 토양산도(pH), 전기전도도(EC), 질소(N), 치환성양이온(K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺), 유효인산(P), 염분과 중금속 8개 항목 Hg, As, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Ni, Pb, Zn으로 구성하였다. 물리적 특성을 배제한 근거는 다음과 같다. 첫째, 산림청 「산림입업용어사전」에 근거하여 물리적 특성 중 토성은 토양 입자의 크기별 상대적인 구성비율로 즉 일정한 토양 내 들어있는 모래, 미사, 점토의 상대적인 비율을 말하며, 쉽게 바뀌지 않은 성질이 있다. 둘째, 지표면으로부터 약 30cm 이내인 표층의 토양에서는 구형(spherical)의 입상(granule) 및 판상(platy)의 구조가 주로 발견되나 판상 구조는 주로 논토양에서 많이 발견되고, 입상 구조는 주로 표토층에서 발달하며(김계훈 등, 2021), 밀도, 공극 등의 지표는 답압, 수분, 온도 등 외부 물리적 압력에 의존하여 결정되는 부분이 크고, 특히 CEC나 유기물 같은 화학적 특성에 의해 변동되는 영향이 크다. 결과적으로 이러한 물리적 특성의 척도는 고정되어 있는 부분과 외부 환경의 변수에 쉽게 변동되는 가변적 특성이 포함되어 있어, 계절적 변화보다는 물리·환경적 외부 압력에 의해 변동되는 경향이 크다. 이러한 변화는 토양 자체의 내재적 성분보다는 외적 요인에 의존하는 특성이 강해, 본 연구의 핵심 목적인 모니터링을 통해 반복 측정을 하여 토양화학성과 중금속 간의 변화량의 상관성을 규명하고자 하는 연구 초점을 명확히 하기 위해 반복 측정 및 분석 범주에서 최종 배제하였다. 수집된 시료는 2023년도 「농촌진흥청 종합검정실 분석매뉴얼」 절차에 따라 정밀 전처리 및 분석을 거쳤다. 세부적으로 CEC는 1N 초산암모늄치환침출법으로 산출하였고, 유기물은 Tyurin법을 적용하였으며, pH와 EC는 진탕 과정을 거친 현탁액을 전용 측정기로 분석하였다. 또한, 전질소(N)는 Kjeldahl법을 통해 분석하였으며, 치환성 양이온과 유효인산, 염분 및 8종의 중금속은 산분해 등의 전처리를 거친 후 유도결합플라즈마 발광분광분석기(ICP)를 활용하여 정량화하였다. 셋째, 도출된 데이터의 종합적 통계분석은 분석의 객관성을 높이기 위해 IBM SPSS Statistics 24.0 프로그램을 활용하였으며, 모든 검정의 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 엄격히 설정하였다(Fisher, 1925). 모수 통계 적용의 전제조건을 충족하고자 기술통계 및 Shapiro-Wilk 분석을 실시하였으며, 왜도 절댓값 3 이하, 첨도 절댓값 10 이하를 기준으로 데이터의 다변량 정규성을 확증(Kline, 2011)하여 이상치로 인한 분석 결과의 왜곡을 방지하였다. 또한, 분석 대상인 8종의 중금속 중 Hg, As, Cd은 전체 조사 시기 및 대상지에서 불검출되었고, Cr⁶⁺은 특정 시기 단일 지점에서만 극미량 검출되어 시기별 연속성과 통계적 유의성을 확보하기 어려워 종합 통계분석(repeated measures ANOVA 및 상관관계분석) 대상에서 최종 제외하여 데이터의 타당성을 높였다. 이를 바탕으로 4차례(11월, 2월, 4월, 7월)에 걸친 시기별 측정 변수 간의 유의미한 차이를 검증하기 위해 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA) 및 사후분석(bonferroni)을 수행하였다. 마지막으로 토양 화학 성분과 중금속 축적량 간의 연관성을 심층적으로 해석하기 위해 상관관계분석(pearson)을 수행함으로써, 시기별 맞춤형 토양 유지관리 전략 수립을 위한 과학적 근거를 확립하였다(표 4 참조).

표 4. 토양 화학성 및 중금속 항목과 분석 방법

구분	항목	분석법
분석(11항목)	CEC	1N 초산암모늄치환침출법
	유기물	Tyurin법
	pH	pH측정기
	EC	EC측정기
	N	Kjeldahl법
	K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , P	ICP분석, 1N 초산암모늄치환침출법
	염분	1N 초산암모늄치환침출법
중금속 분석(8항목)	Hg, As, Cd, Cr ⁶⁺ , Cu, Ni, Pb, Zn	ICP분석
통계분석	토양 화학성 및 중금속 분석 결과값	기술통계 및 사피로-윌크 검정 반복측정 분산분석 사후분석(본페로니), 상관관계분석

3. 연구 결과

3.1 토양 화학성 및 중금속 분석

3.1.1 낙엽기 가을, 11월

대전광역시 내 주요 간선도로 4곳(대덕대로, 둔산대로, 천변도시고속화도로, 한밭대로)의 중앙가로녹지대 토양 화학적 특성 및 중금속 함량을 분석한 결과는 다음과 같다(표 5 참조). 토양 화학성 분석 결과, 토양 산도(pH)는 6.6-7.3 범위로 대상지 전반에서 약산성 및 중성 수준을 나타냈다. 양이온치환능력(CEC)과 유기물 함량은 둔산대로에서 각각 12.8cmol/kg, 33g/kg으로 가장 높게 측정되었다. 전기전도도(EC)와 염분 농도는 한밭대로가 각각 0.50dS/m, 0.0056%로 타 대상지 대비 상대적으로 가장 높은 수치를 기록했다. 그 외 주요 무기양분(N, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 및 나트륨(Na⁺) 함량은 대상지별로 상이한 분포를 보였으며, 전반적으로 한밭대로와 대덕대로, 둔산대로 등에서 양분 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 토양 중금속 함량 분석 결과, 4개 대상지 전역에서 수은(Hg), 비소(As), 카드뮴(Cd), 6가크롬(Cr⁶⁺)은 검출되지 않았다. 반면 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn)은 모든 대상지에서 검출되었으며, 4개 항목 모두 둔산대로에서 가장 높은 농도(Cu 21.80mg/kg, Ni 2.80mg/kg, Pb 13.60mg/kg, Zn 95.60mg/kg)를 보였다. 반대로 천변도시고속화도로 구간에서는 타 대상지에 비해서 중금속 축적량이 상대적으로 낮게 확인되었다.

3.1.2 제설제 살포 시기 겨울, 2월

겨울철 제설제 살포 시기인 2월, 대상지 중앙가로녹지대 토양 화학성 특성 및 중금속 함량을 분석한 결과는 다음과 같다(표 6 참조). 토양 화학성 분석 결과, 나트륨(Na⁺) 함량은 11월 대비 크게 상승하여 한밭대로(0.44cmol/kg)와 대덕대로(0.42cmol/kg)에서 가장 높게 측정되었다. 염분 농도 또한 0.0093-0.026%로 전 대상지에서 급증하는 양상을 보였으며, 한밭대로(0.026%)와 대덕대로(0.024%)에서 상대적으로 높은 수치를 기록하였다. 전기전도도(EC) 역시 대덕대로, 한밭대로 2곳에서 0.80dS/m로 가장 높게 나타나, 11월 대비 전반적으로 큰 폭의 상승을 보였다. 반면 토양산도(pH)는 6.5-7.1 범위로 11월에 비해 전반적으로 낮아지는 경향이 확인되었다. 양이온치환능력(CEC)과 유기물 함량은 4개 대상지에서 모두 11월 대비 수치가 하락하였다. 토양 중금속 함량 분석 결과, 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 등 4종의 중금속은 11월 대비 농도가 일제히 상승하였다. 특히 아연(Zn)의 경우 대덕대로(243.30mg/kg), 둔산대로(193.30mg/kg)에서 현저한 증가 양상을 보였다.

표 5. 11월 가을 낙엽기 대상지별 토양 화학성 및 중금속 분석 결과

구분		대덕대로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
토양 화학성	CEC(cmol/kg)	10.59	12.8	6.43	8.94
	유기물량(g/kg)	28	33	14	21
	pH 양	7.3	7.0	6.6	7.3
	EC양(dS/m)	0.20	0.20	0.20	0.50
	N(%)	0.14	0.17	0.081	0.085
	K ⁺	0.33	0.47	0.17	0.22
	Ca ²⁺	6.5	6.4	3.2	7.5
	Mg ²⁺	1.0	1.2	0.6	1.3
	Na ⁺	0.0033	0.012	0.0095	0.095
	P	37	11	33	40
	염분(%)	0.00019	0.00072	0.00056	0.0056
중금속(mg/kg)	Cu	17.20	21.80	8.40	19.40
	Ni	2.60	2.80	1.00	1.60
	Pb	8.20	13.60	8.00	8.60
	Zn	57.00	95.60	30.60	76.00

표 6. 2월 겨울 제설제 살포 시기 대상지별 토양 화학성 및 중금속 분석 결과

구분		대덕대로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
토양 화학성	CEC(cmol/kg)	8.41	6.89	5.46	8.25
	유기물량(g/kg)	18	10	6	9
	pH 양	7.1	6.8	6.5	7.0
	EC양(dS/m)	0.80	0.60	0.30	0.80
	N(%)	0.11	0.077	0.041	0.050
	K ⁺	0.24	0.22	0.14	0.18
	Ca ²⁺	5.8	4.0	4.0	6.1
	Mg ²⁺	0.8	0.7	0.7	1.1
	Na ⁺	0.42	0.23	0.16	0.44
	P	31	1	27	74
	염분(%)	0.024	0.013	0.0093	0.026
중금속(mg/kg)	Cu	43.30	43.30	16.70	30.00
	Ni	16.70	10.00	10.00	10.00
	Pb	26.70	40.00	26.70	23.30
	Zn	243.30	193.30	93.30	183.30

3.1.3 개엽 및 활력기 봄, 4월

봄철 개엽 및 수목 활력기인 4월, 대상지 중양가로녹지대 토양 화학성 특성 및 중금속 함량을 분석한 결과는 다음과 같다(표 7 참조). 토양 화학성 분석 결과, 토양산도(pH)는 6.9-7.2 범위로 2월 대비 소폭 상승하였으며 둔산대로(7.2)에서 가장 높게 나타났다. 전기전도도(EC)는 0.40-0.80dS/m 범위로 2월과 유사한 높은 수준을 유지하였고, 나트륨(Na⁺) 함량과 염분 농도 역시 2월에 이어 전반적으로 높은 수치를 기록했다. 반면, 양이온교환능력(CEC)과 유기물 함량은 대상지별 편차는 존재하나 전체적으로 11월 수준을 회복하지 못한 양상을 보이는 것으로 확인되었다. 토양 중금속 함량 분석 결과, 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 4종의 중금속은 2월 대비 전반적으로 농

표 7. 4월 봄 개엽 및 활력기 대상지별 토양 화학성 및 중금속 분석 결과

구분		대덕대로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
토양 화학성	CEC(cmol/kg)	7.31	6.17	5.29	8.40
	유기물량(g/kg)	13	17	9	10
	pH 양	7.0	7	6.9	7.1
	EC양(dS/m)	0.40	0.40	0.60	0.80
	N(%)	0.11	0.090	0.064	0.057
	K ⁺	0.20	0.28	0.13	0.20
	Ca ²⁺	5.5	4.4	3.4	6.0
	Mg ²⁺	0.7	0.7	0.6	1.1
	Na ⁺	0.29	0.37	0.25	0.50
	P	35	18	31	58
	염분(%)	0.017	0.022	0.015	0.029
중금속(mg/kg)	Cu	23.30	46.70	16.70	20.00
	Ni	10.00	13.30	6.70	6.70
	Pb	13.30	40.00	16.70	13.30
	Zn	133.30	190.00	66.70	120.00

도가 감소하는 경향이 확인되었으며 특히, 아연(Zn)은 전 대상지에서 가장 높게 확인되었다.

3.1.4 고온 건조기 여름, 7월

여름철 고온 건조기인 7월, 대상지 중앙가로녹지대 토양 화학성 특성 및 중금속 함량을 분석한 결과는 다음과 같다(표 8 참조). 토양 화학성 분석 결과, 토양산도(pH)는 7.3-7.5 범위로 전 대상지에서 가장 높은 수치를 기록하였으며, 이는 알칼리화 현상이 진행되었음을 확인하였다. 전기전도도(EC)는 한밭대로에서 가장 높게 측정되었다. 나트륨(Na⁺) 함량 및 염분 농도는 2월, 4월 대비 다소 하락하는 경향을 보였다. 토양 중금속 함량 분석 결과, 검출된 4종의 중금속 중 니켈(Ni)은 대상지별로 유사한 수준을 유지하였고, 구리(Cu)의 경우 둔산대로는 이전 시기와 비슷한 수준을 보인 반면, 그 외 대상지에서는 농도가 상승하는 양상을 나타냈다. 또한, 납(Pb)과 아연(Zn)은 전 대상지에서 4월 대비 농도가 뚜렷하게 재상승하는 경향을 보였다. 특히 아연(Zn)의 경우 대부분의 대상지에서 고농도 축적량을 기록하여, 하절기에도 특정 중금속의 축적량이 집중됨을 확인하였다.

3.2 종합 분석

3.2.1 토양 화학성 및 중금속 분포 분석

본 연구에서 수집된 중앙가로녹지대 토양 시료에 대한 기술통계 및 Shapiro-Wilk 분석 결과는 다음과 같다(표 9 참조). 토양 화학성을 살펴보면, 토양산도(pH)는 평균 7.10 ± 0.30(범위 6.50-7.50), 전기전도도(EC)는 평균 0.43 ± 0.25dS/m로 나타났다. 토양 비옥도의 주요 지표인 양이온치환능력(CEC)과 유기물 함량은 각각 평균 7.46 ± 2.11cmol/kg, 13.75 ± 7.85g/kg으로 확인되었다. 유효인산(P)의 경우 평균 30.63 ± 18.19mg/kg으로 변동 폭이 가장 컸으며, 칼슘(Ca²⁺)과 나트륨(Na⁺)은 각각 평균 5.13 ± 1.32cmol/kg, 0.21 ± 0.17cmol/kg을 기록했다. 토양 중금속의 경우, 검출된 4종의 중금속 평균 축적량은 아연(Zn)이 135.98 ± 64.54mg/kg으로 가장 높았다. 분석에 사용된 모든 측정 변수의 왜도는 절댓값 3 이내, 첨도는 절댓값 10 이내로 분포하여, 단변량 정규성 확증을 위배하지 않는 것으로 확인·적용하였다(Kline, 2011). 또한, 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)의 모수 통계 적용의 기본 전제를 확인하기 위해 Shapiro-Wilk 분석을 실시한 결과, 전체 15개 항목 중 12개 항목이 정규성을 충족하였다($p > .05$). 일부 위반이 확인된 3개 항목(유기물, Mg²⁺, K⁺)에 대하여 데이터의 실제 분포를 추가 검토한 결과, 왜도(skewness)는 최대 1.77, 첨도(kurtosis)는 최대 3.79로 나타났다. 이는 정규성 충족 기준(Kline, 2011)을 범위 내에 모두 안정적으로 분포하는 것으로 확인되었으며, 왜도

표 8. 7월 여름 건조기 대상지별 토양 화학성 및 중금속 분석 결과

구분		대덕대로	둔산대로	천변도시고속화도로	한밭대로
토양 화학성	CEC(cmol/kg)	6.19	5.79	4.68	7.82
	유기물량(g/kg)	9	9	7	7
	pH 양	7.5	7.5	7.3	7.5
	EC양(dS/m)	0.20	0.10	0.10	0.60
	N(%)	0.095	0.077	0.043	0.058
	K ⁺	0.18	0.29	0.17	0.18
	Ca ²⁺	5.3	4.2	3.5	6.3
	Mg ²⁺	0.6	0.7	0.6	1.0
	Na ⁺	0.049	0.13	0.073	0.36
	P	22	6	28	38
	염분(%)	0.0029	0.0074	0.0043	0.021
중금속 (mg/kg)	Cu	40.00	43.33	23.33	36.67
	Ni	10.00	10.00	6.67	6.67
	Pb	26.67	46.67	30.00	23.33
	Zn	220.00	193.33	103.33	176.66

표 9. 토양 화학성 및 중금속의 기술통계 및 사피로-윌크 분석 결과

측정항목	최솟값	최댓값	평균	표준편차	왜도	첨도	사피로-윌크	
							통계량	p
CEC	4.68	12.80	7.46	2.11	1.11	1.42	.922	.180
유기물	6.00	33.00	13.75	7.85	1.40	1.32	.832	.007
pH	6.50	7.50	7.10	0.30	-0.44	-0.37	.944	.397
EC	0.10	0.80	0.43	0.25	0.28	-1.35	.897	.072
N	0.04	0.17	0.08	0.04	1.04	1.04	.922	.180
K ⁺	0.13	0.47	0.23	0.08	1.77	3.79	.838	.009
Ca ²⁺	3.20	7.50	5.13	1.32	0.02	-1.23	.936	.299
Mg ²⁺	0.60	1.30	0.84	0.24	0.70	-1.01	.850	.014
Na ⁺	0.00	0.50	0.21	0.17	0.28	-1.36	.923	.190
P	1.00	74.00	30.63	18.19	0.66	1.24	.945	.418
염분	0.00	0.03	0.01	0.01	0.28	-1.38	.922	.184
Cu	8.40	46.70	28.13	12.25	0.23	-1.43	.901	.082
Ni	1.00	16.70	7.80	4.32	0.11	-0.19	.928	.229
Pb	8.00	46.67	22.82	12.10	0.53	-0.63	.923	.188
Zn	30.60	243.30	135.98	64.54	0.04	-1.26	.947	.446

절댓값 2 미만, 첨도 절댓값 7 미만이 충족되면 분석 방법 사용 기준 적용 시 정규성을 가정한다(West et al., 1995)는 선행 연구의 근거로 통계적 당위성을 충족하였다. 더불어, 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)은 표본 수가 작은 경우에도 정규성 위반에 대해 일정 수준의 견고성(robustness)을 가지는 것으로 알려져 있으며(Field, 2013), 위반 정도가 분석 결과에 영향을 미치지 않는 경미한 수준임을 고려하여 최종적으로 모수 통계를 적용하였다.

3.2.2 시기에 따른 토양 화학성 및 중금속 변동성

토양 화학성의 변화를 검증하기 위해 4개 대상지를 대상으로 계절별 조사시기(2월, 4월, 7월, 11월)를 개체 내 요인으로 설정한 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)을 실시하였다. Mauchly의 구형성 검정 결과 CEC(W = .000, p = .023)에서만 구형성 가정이 위반되어 GG(greenhouse-geisser) 보정값을 적용하였으며, 나머지 14개 항목은 구형성 가정을 충족하였으며 결과는 다음과 같다(표 10 참조).

토양 화학성 분야에서는 유기물, pH, EC, N, Mg²⁺, Na⁺, 염분 7개 항목에서 시기 간 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 유기물은 F(3,9) = 13.788(p = .001, η² = .646)으로 가을(11월, M = 24.00g/kg)에 최고치를 기록한 후 겨울(M = 10.75g/kg), 봄(M = 12.25g/kg), 여름(M = 8.00g/kg)으로 전반적인 감소 추세를 보였으나, Bonferroni 사후검정에서 특정 시기 간 유의한 쌍은 확인되지 않았다. pH는 F(3,9) = 12.000(p = .002, η² = .551)으로 유의하였으며, 사후검정 결과 겨울(2월, M=6.850)과 봄(4월, M=7.050)에 비해 여름(7월, M=7.450)에서 유의하게 높아(p < .05), 하절기 고온 건조로 인한 토양 알칼리화 현상이 통계적으로 확인되었다. EC는 F(3,9) = 8.156(p = .006, η² = .458), N은 F(3,9) = 9.796(p = .003, η² = .364)으로 각각 유의하였으나 Bonferroni 사후검정에서 유의한 쌍은 도출되지 않았다. Mg²⁺는 F(3,9) = 5.082(p = .025, η² = .242)로 유의하였으나 마찬가지로 특정 시기 간 유의차는 확인되지 않았다. Na⁺와 염분은 각각 F(3,9) = 16.085(p = .001, η² = .623), F(3,9) = 16.581(p = .001, η² = .626)으로 고도로 유의하였으며, 사후검정 결과 가을(11월) 대비 봄(4월)에서 유의하게 높고(p < .05), 봄(4월)에서 여름(7월)으로 유의하게 감소하는 패턴이 두 항목에서 공통적으로 확인되어(p < .05), 동절기 제설제 유입의 잔류 영향이 봄철까지 지속되다 여름에 완화된을 통계적으로 뒷받침한다. 반면 CEC(GG보정, p = .095), K⁺, Ca²⁺, P는 시기 간 유의한 차이가 확인되지 않았다(p > .05).

토양 중금속 분야에서는 분석 대상 4종(Cu, Ni, Pb, Zn) 전 항목에서 시기 간 유의한 차이가 확인되었다(p < .01). Pb는 F(3,9) = 19.329(p = .000, η² = .542)로 가장 높은 F값을 나타냈으며, 사후검정 결과 가을(M =

표 10. 시기에 따른 토양 화학성 반복측정 분산분석 결과

항목	시기별 M ± SD				구형성 검정			반복측정 분산분석				사후검정 (본페로니)
	가을(11월)	겨울(2월)	봄(4월)	여름(7월)	W	p	ε	F	df	p	η ²	
CEC	9.69 ± 2.69	7.25 ± 1.38	6.79 ± 1.35	6.12 ± 1.30	.00	.02	.37	5.37	(3,9)	.10*	.43	-
유기물	24.00 ± 8.29	10.75 ± 5.12	12.25 ± 3.59	8.00 ± 1.16	.01	.25	.59	13.79	(3,9)	.001**	.65	유의한 쌍 없음
pH	7.05 ± 0.33	6.85 ± 0.27	7.05 ± 0.13	7.45 ± 0.10	.00	.14	.37	12.00	(3,9)	.002**	.55	겨울 < 여름*, 봄 < 여름*
EC	0.28 ± 0.15	0.63 ± 0.24	0.55 ± 0.19	0.25 ± 0.24	.02	.31	.42	8.16	(3,9)	.006**	.46	유의한 쌍 없음
N	0.12 ± 0.04	0.07 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.02	.10	.62	.44	9.80	(3,9)	.003**	.36	유의한 쌍 없음
K ⁺	0.30 ± 0.13	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.06	0.21 ± 0.06	.13	.68	.52	3.80	(3,9)	.052	.26	-
Ca ²⁺	5.90 ± 1.87	4.98 ± 1.13	4.83 ± 1.16	4.83 ± 1.23	.01	.16	.36	3.09	(3,9)	.083	.12	-
Mg ²⁺	1.03 ± 0.31	0.83 ± 0.19	0.78 ± 0.22	0.73 ± 0.19	.03	.39	.40	5.08	(3,9)	.025*	.24	유의한 쌍 없음
Na ⁺	0.03 ± 0.04	0.31 ± 0.14	0.35 ± 0.11	0.15 ± 0.14	.22	.80	.62	16.09	(3,9)	.001**	.62	가을 < 봄*, 봄 < 여름*
P	30.25 ± 13.15	33.25 ± 30.25	35.50 ± 16.66	23.50 ± 13.40	.05	.48	.41	1.16	(3,9)	.379	.07	-
염분	0.00 ± 0.00	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	.27	.84	.64	16.58	(3,9)	.001**	.63	가을 < 봄*, 봄 < 여름*

Greenhouse-Geisser(GG) 보정 적용.

*p < .05, **p < .01, η² = ηp²(편향수정 부분메타제공).

9.600mg/kg 대비 겨울(M = 29.175mg/kg)에서 유의하게 높았고(p < .05), 봄(M = 20.825mg/kg) 대비 여름(M = 31.668mg/kg)에도 유의하게 재상승하였다(p < .05). Ni는 F(3,9) = 18.432(p = .000, η² = .726)로 가장 높은 효과 크기를 보였으며, 가을(M = 2.000mg/kg) 대비 겨울(M = 11.675mg/kg)과 여름(M = 8.335mg/kg)에서 유의하게 높았다(p < .05). Zn은 F(3,9) = 15.601(p = .001, η² = .533)으로 고도로 유의하였으며, 가을(M = 64.800mg/kg)에 최저치를 기록한 후 겨울(M = 178.300mg/kg)과 여름(M = 173.330mg/kg)에 집중적으로 축적되는 양상이 확인되었으며, Bonferroni 사후검정에서 특정 쌍의 유의차는 도출되지 않았다. Cu는 F(3,9) = 8.258(p = .006, η² = .389)으로 유의하였으며, 가을(M = 16.700mg/kg) 대비 여름(M = 35.832mg/kg)의 차이만 유의한 수준으로 확인되었다(p < .05; 표 11 참조).

종합하면, 시기에 따른 토양 화학성 및 중금속의 변동성은 통계적으로 명확하게 입증되었으며, 크게 두 가지 부하 집중 시기가 존재함이 확인되었다. 첫째, 동절기(2월)에는 제설제 유입으로 인한 Na⁺ · 염분의 급증과 함께 중금속의 동반 상승이 나타나, 제설제가 단순한 삼투압 스트레스를 넘어 중금속 용출 촉진의 상관성을 확인하였다. 둘째, 하절기(7월)에는 토양 알칼리화(pH 상승)와 함께 대부분 중금속의 재상승하는 패턴이 확인되며, 중금속 농도 재상승 및 축적 경향을 통계적으로 뒷받침한다. 특히 전체 중금속 중 최고 농도를 기록한 아연(Zn)의 경우 계절에 따른 변동 폭이 가장 뚜렷하게 나타났다. 이처럼 계절별로 상이한 화학적 교란 기제가 중첩되어 작용하는 중앙가로 녹지대 토양의 특성을 고려할 때, 동절기 이후 집중 관리와 하절기 토양 산도 조절을 중심으로 한 시기별 맞춤형 유지관리 전략의 수립이 필수적임을 시사한다.

표 11. 시기에 따른 토양 중금속 반복측정 분산분석 결과

항목	시기별 M ± SD				구형성 검정			반복측정 분산분석				사후검정 (본페로니)
	가을(11월)	겨울(2월)	봄(4월)	여름(7월)	W	p	ε	F	df	p	η ²	
Cu	16.70 ± 5.84	33.33 ± 12.73	26.68 ± 13.62	35.83 ± 8.77	.01	.27	.61	8.26	(3,9)	.006**	.39	가을 < 여름*
Ni	2.00 ± 0.85	11.68 ± 3.35	9.18 ± 3.16	8.34 ± 1.92	.00	.10	.47	18.43	(3,9)	.000**	.73	가을 < 겨울, 가을 < 여름*
Pb	9.60 ± 2.68	29.18 ± 7.39	20.83 ± 12.88	31.67 ± 10.37	.01	.19	.37	19.33	(3,9)	.000**	.54	가을 < 겨울*, 봄 < 여름*
Zn	64.80 ± 27.72	178.30 ± 62.45	127.50 ± 50.64	173.33 ± 49.96	.00	.15	.47	15.60	(3,9)	.001**	.53	유의한 쌍 없음

Greenhouse-Geisser(GG) 보정 적용.

*p < .05, **p < .01, η² = ηp²(편향수정 부분메타제공)

사후검정 방향: < 낮음, > 높음; *본페로니 수정 후 p < .05

3.2.3 토양 화학성과 중금속 간의 상관성

대전광역시 4개 주요 노선 중양가로늬지대 토양 화학성 특성 및 중금속 간의 동태적 상호작용을 규명하기 위해 상관관계분석(pearson)을 실시한 결과는 다음과 같다(표 12-15 참조). 분석 결과, 4개 대상지 전반에서 양이온치환 능력(CEC)과 유기물, 질소(N)는 상호 간에 일부 유의미한 항목($p < 0.05$)을 포함하여 높은 정적(+) 상관관계를 형성하는 양상을 띠었다. 특히, 이러한 비옥도 인자군(CEC, 유기물, N)이 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 등 주요 중금속 축적량과 높은 부적(-) 상관관계를 뚜렷하게 나타냈다. 이는 식재기반 토양의 비옥도가 단순히 수목 생육을 돕는 영양 공급원을 넘어, 중금속의 축적 양상과도 상반된 흐름의 상관성이 있음을 나타낸다. 또한, 전 대상지에서 나트륨(Na^+)과 염분 지표 간에 높은 정적(+) 상관관계가 도출되어, 두 지표의 변동이 통계적으로 밀접하게 연동되어 있음을 확인하였다. 도심 중양가로늬지대 토양은 동절기 제설제 살포라는 화학적 피해에 지속적으로 노출되는 특성을 지닌다. 겨울철 토양으로 집중 유입된 나트륨(Na^+)은 식재기반 토양의 회복 탄력성의 핵심 지표일 뿐만 아니라, 수목 생육의 필수 양분 항목 대부분과 부적(-) 상관관계를 나타냈다. 이는 제설제로 인한 나트륨(Na^+)

표 12. 대덕대로 중양가로늬지대 토양 화학성 및 중금속 간 상관관계분석

측정항목	CEC	유기물	pH	EC	N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	P	염분	Cu	Ni	Pb	Zn
CEC	1														
유기물	.999**	1													
pH	-.160	-.110	1												
EC	.005	-.029	-.638	1											
N	.969*	.968*	-.149	-.187	1										
K ⁺	.989*	.995**	-.017	-.106	.966*	1									
Ca ²⁺	.993**	.998**	-.050	-.090	.971*	.999**	1								
Mg ²⁺	1.000**	.999**	-.154	.000	.969*	.990**	.994**	1							
Na ⁺	-.182	-.225	-.790	.938	-.312	-.312	-.289	-.188	1						
P	.773	.745	-.661	.106	.826	.695	.718	.770	.139	1					
염분	-.190	-.233	-.795	.931	-.316	-.320	-.297	-.196	1.000**	.141	1				
Cu	-.584	-.579	.194	.547	-.764	-.583	-.594	-.584	.447	-.769	.440	1			
Ni	-.504	-.527	-.363	.851	-.673	-.581	-.573	-.507	.854	-.385	.851	.842	1		
Pb	-.652	-.645	.258	.463	-.814	-.641	-.654	-.652	.381	-.831	.375	.994**	.806	1	
Zn	-.676	-.678	.077	.579	-.837	-.692	-.698	-.677	.538	-.745	.533	.984*	.898	.982*	1

* $p < .05$, ** $p < .01$

표 13. 둔산대로 중양가로늬지대 토양 화학성 및 중금속 간 상관관계분석

측정항목	CEC	유기물	pH	EC	N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	P	염분	Cu	Ni	Pb	Zn
CEC	1														
유기물	.935	1													
pH	-.409	-.274	1												
EC	-.249	-.288	-.768	1											
N	.978*	.982*	-.266	-.358	1										
K ⁺	.910	.932	-.005	-.592	.964*	1									
Ca ²⁺	.966*	.975*	-.196	-.426	.997**	.981*	1								
Mg ²⁺	.990**	.947	-.279	-.376	.991**	.958*	.989*	1							
Na ⁺	-.732	-.523	.002	.596	-.674	-.736	-.698	-.762	1						
P	.121	.464	.292	-.228	.311	.353	.322	.184	.340	1					
염분	-.718	-.499	.014	.579	-.653	-.713	-.677	-.745	.999**	.373	1				
Cu	-.984*	-.893	.288	.386	-.962*	-.933	-.962*	-.990**	.836	-.050	.823	1			
Ni	-.936	-.775	.289	.389	-.879	-.859	-.882	-.936	.920	.159	.914	.976*	1		
Pb	-.990**	-.966*	.442	.185	-.982*	-.898	-.966*	-.977*	.631	-.228	.614	.952*	.877	1	
Zn	-.989*	-.957*	.277	.372	-.994**	-.961*	-.993**	-.999**	.742	-.214	.724	.985*	.925	.980*	1

* $p < .05$, ** $p < .01$

표 14. 천변도시고속화도로 중앙가로녹지대 토양 화학성 및 중금속 간 상관관계분석

측정항목	CEC	유기물	pH	EC	N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	P	염분	Cu	Ni	Pb	Zn
CEC	1														
유기물	.828	1													
pH	-.769	-.287	1												
EC	.017	-.043	-.215	1											
N	.801	.969*	-.310	.204	1										
K ⁺	.159	.409	.304	-.898	.186	1									
Ca ²⁺	-.371	-.826	-.279	.000	-.823	-.439	1								
Mg ²⁺	-.005	-.562	-.603	.000	-.572	-.404	.930	1							
Na ⁺	-.407	-.518	-.006	.876	-.290	-.955*	.373	.235	1						
P	.718	.952*	-.194	.224	.992**	.191	-.880	-.666	-.259	1					
염분	-.404	-.504	.003	.883	-.275	-.952*	.352	.214	1.000**	-.242	1				
Cu	-.993**	-.839	.761	-.125	-.839	-.077	.406	.046	.318	-.764	.314	1			
Ni	-.676	-.961*	.049	.238	-.888	-.612	.896	.697	.657	-.892	.642	.672	1		
Pb	-.869	-.939	.467	-.277	-.984*	-.072	.710	.424	.220	-.958*	.207	.909	.813	1	
Zn	-.901	-.961*	.482	-.176	-.981*	-.161	.707	.407	.318	-.948	.306	.929	.848	.994**	1

* $p < .05$, ** $p < .01$

표 15. 한밭대로 중앙가로녹지대 토양 화학성 및 중금속 간 상관관계분석

측정항목	CEC	유기물	pH	EC	N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	P	염분	Cu	Ni	Pb	Zn
CEC	1														
유기물	.935	1													
pH	-.277	.054	1												
EC	-.335	-.645	-.777	1											
N	.778	.940	.385	-.843	1										
K ⁺	.920	.927	.039	-.522	.892	1									
Ca ²⁺	.738	.929	.373	-.872	.970*	.789	1								
Mg ²⁺	.978*	.979*	-.149	-.486	.851	.899	.849	1							
Na ⁺	-.635	-.865	-.466	.919	-.936	-.694	-.989*	-.769	1						
P	-.067	-.362	-.928	.873	-.658	-.401	-.594	-.164	.640	1					
염분	-.636	-.867	-.474	.923	-.941	-.703	-.990*	-.769	1.000**	.651	1				
Cu	-.887	-.714	.413	.028	-.554	-.867	-.419	-.775	.280	-.045	.288	1			
Ni	-.690	-.857	-.491	.838	-.972*	-.886	-.894	-.742	.858	.768	.868	.548	1		
Pb	-.890	-.850	.032	.397	-.807	-.984*	-.670	-.834	.560	.342	.570	.920	.828	1	
Zn	-.889	-.889	-.058	.498	-.868	-.996**	-.745	-.855	.647	.423	.657	.875	.884	.993**	1

* $p < .05$, ** $p < .01$

의 과다 유입은 토양 내 극심한 양이온 불균형과 가을철 대비 상대적인 비옥도 인자 감소와 연관되어 있음을 통계적으로 확인하였다. 이와 더불어 검출된 4종의 중금속 원소들은 대상지를 불문하고 상호 간에 정적(+) 상관관계를 나타내며 동반 변동하는 경향을 보였다. 이는 중앙가로녹지대 내 중금속들이 개별적으로 독립적인 거동을 보이지 않고 상호 밀접하게 연동되어 동반 증감하는 특성을 뚜렷하게 나타냄을 의미한다. 즉, 상습 정체로 인한 차량 배기 가스나 고속 주행으로 인한 타이어 마모 분진 등 도로 환경에서 발생하는 요인들에 상시 노출되면서, 여러 중금속이 동시에 유입되어 식재기반에 복합적인 스트레스를 가하고 있음을 시사한다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서 도시 그린인프라의 구성요소인 중앙가로녹지대 식재기반 토양을 대상으로 계절별 토양 화학성 및 중금속 변동성을 분석한 결론은 다음과 같다.

첫째, 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA) 결과, 1년에 걸친 계절적 부하 집중 양상이 통계적으로 유의하게 입증되었다. 구체적으로 2월(동절기) 및 4월(춘절기)에는 제설제 유입의 직접적 지표인 Na^+ 과 염분이 가을철 대비 유의하게 급증하였으며($p < .05$), 이와 동반하여 중금속 축적량 역시 유의하게 상승하여($p < .05$) 제설제가 단순한 화학적 스트레스를 넘어 토양 내 중금속 용출 촉진의 상관성을 확인하였다. 이어진 7월(하절기)에는 고온 건조에 따른 토양 알칼리화(「국토교통부 고시 일반식재기반 조성설계기준」 ‘하급’ 범위에 해당하는 pH 7.3-7.5 수준에 도달, $p < .05$)와 함께, 대부분의 중금속 농도가 상승하는 패턴이 확인되었다(국토교통부, 2019).

둘째, 전체 중금속 중 최고 평균 농도를 기록한 아연(Zn)은 시기에 따른 주요효과가 유의하게 나타났다. 환경 부하에 따른 높은 민감성(표준편차 최대 62.45)로 인해 사후검정(bonferroni)의 1:1쌍 간 유의차는 도출되지 않았으나, 가을철 최저치(64.80mg/kg)기록 후 2월(178.30mg/kg)과 7월(173.33mg/kg)에 3배 가까이 집중적으로 축적되는 가장 민감한 변동 폭을 보였다. 이는 아연(Zn)이 중양가로녹지대 토양 내 타 중금속 대비 가장 높은 축적량을 보이는 주된 중금속 축적 항목임을 확인하였으며, 계절별 화학 교란에 가장 취약하고 민감하게 반응하는 지표임을 통계적으로 증명한다.

셋째, 상관관계분석(Pearson) 결과, CEC, 유기물, 질소(N) 간에는 전반적으로 높은 정적(+) 상관관계가 확인되었다. 주목할 점은, 이러한 비옥도 인자군과 중금속 간에 통계적으로 부적(-) 상관관계가 확인되었다. 이는 식재기반 토양의 비옥도가 단순히 수목 생육을 돕는 영양 공급원을 넘어, 중금속의 축적 양상과도 상반된 흐름의 상관성이 있다는 점을 통계적으로 확인하였다. 또한 검출된 4종의 중금속(Cu, Ni, Pb, Zn)들은 상호 간에 높은 정적(+) 상관관계를 보이며 동반 축적 특성이 확인되었다. 다시 말해 개별적으로 독립적인 거동을 보이지 않고, 상호 밀접하게 연동되어 동반 증감하는 것이 확인되었다.

따라서 중양가로녹지대는 연중 균일한 환경이 아닌 특정 시기에 화학적으로 부하가 집중되는 현상이 발생하므로, 시기를 고려한 집중 관리가 필수적이다. 이처럼 본 연구를 통해 규명된 토양 환경의 계절별 변동 기제는 기존의 일률적인 관리 방식에서 벗어나 데이터에 기반한 대응 체계로의 전환이 필요함을 시사한다. 이러한 토양 기반의 시기별 맞춤형 유지관리는 단순한 가로수 생육기반을 넘어, 기후변화와 환경 부하에 대응하여 도시 그린인프라의 기능을 지속시키고, 궁극적으로 도시 회복탄력성을 향상시키는 핵심 동력이 된다. 특히 본 연구에서 도출된 토양 화학성과 중금속의 계절별 변화 패턴은 본 대상지의 지역적 한계를 넘어, 유사한 가로 환경을 가진 현대 도시들의 유지 관리 체계를 개선하는 데에도 폭넓게 활용될 수 있을 것이다. 이에 본 연구는 도로 환경의 시기별 교란 요인을 선제적으로 제어하고 토양 완충 능력을 지속적으로 회복시키기 위해 다음과 같은 유지관리 방안 체계를 구축하고자 한다.

먼저, 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)결과 동절기(12월-2월) 제설제 살포는 토양 내 염분 및 나트륨(Na^+)을 급격히 상승시키며, 특히 중금속인 아연(Zn)의 농도변화를 현저하게 증가시키는 경향을 보였다. 이에 대한 능동적 대응으로 해동 직후인 3월 초 토양세척(soil leaching)을 제안한다. 고압 살수차 등을 활용한 대량 관수는 축적된 나트륨 이온(Na^+)의 용출을 유도하며, 3월부터 낮 기온이 오르면 수목은 증산작용을 시작하는데, 겨울철 적은 강수량으로 인하여 역삼투압 현상으로 인하여 수목의 활력이 저하되는 것을 방지한다. 또한 상록수의 경우에는 겨울에도 증산 작용을 하므로 이른 봄 관수가 생존율을 20%-30% 높이기도 한다. 또한 석고(칼슘제)를 투입함으로써 칼슘이온이 토양 입자에 흡착된 나트륨 이온을 치환·배출하도록 촉진하는 공법이 병행되어야 한다.

춘절기(4월-6월)에는 염분 세척 후 가로식재 수목의 생육 활성기에 맞춰, 저하된 양이온치환능력(CEC)과 유기물 함량을 보강하는 단계이다. 유기물은 CEC와 높은 정적(+)상관관계를 가지며 토양의 비옥도를 결정하는 핵심 인자이다. 따라서 유기물 비료 및 토양 개량제를 살포하여 식재기반의 완충능력을 회복시키고, 질소(N)와 칼륨(K) 위주의 시비를 통해 수목의 초기 성장을 전략적으로 지원해야 한다.

하절기(7월-9월)에는 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)결과, 고온 건조로 인해 토양 수분이 증발하는 시기로 토양산도(pH)가 상승하여 알칼리화가 진행되는 특성을 보인다. 이 시기에는 중금속 축적량이 다시 상승하는 경향이 확인되었다. 먼저 토양산도의 알칼리화를 억제하기 위해 피트모스나 산성비료를 투입하거나 유허성분 비료를 시비하여 토양 산도를 조절하고, 부엽토 등 퇴비를 시비함으로써 중금속 이온이 토양 입자에 안정적으로 고정되도록 유도하여 식물체로의 이행을 최소화하도록 한다.

추절기(10월-12월)에는 동절기 피해를 최소화하기 위한 선제적 차단 단계로, 물리적 방어와 화학적 보강의 병행이 요구된다. 제설제 살포 전 설치하는 월동보호책은 본 연구 결과로는 토양의 나트륨(Na^+), 염분, 중금속 상승을 저지하는 제어 요소가 되지는 못하나, 유입량을 줄이는 직접적인 물리적 1차적 방어선의 역할이 기대된다. 이와 함께 겨울철 나트륨(Na^+) 유입 시 발생하는 식재기반 균형 저하를 방지하기 위해 양이온치환능력(CEC)을 사전에 높여두어야 한다. 이때 수목의 휴면을 방해하는 양분 위주의 비료 시비는 지양하고, 바이오차(Biochar)나 제올라이트

와 같은 다공성 토양개량제를 혼합하여 구조적인 보비력을 향상시켜 토양의 완충력을 높인다.

본 연구는 중앙가로녹지대 토양의 계절별 화학성 및 중금속 변화량을 규명하고 검증된 데이터 추이와 화학적 기제를 기반으로 선제적 관리 방안을 제안하였다. 그러나 관리 방안 적용 시 요구되는 구체적인 투입량에 대한 정량적 데이터를 제시하지 못한 점과 토양 환경 변화가 가로수의 생존율 및 생육 활력 저하에 미치는 직접적인 인과관계를 실증적으로 측정하지 못한 점의 한계가 있다. 따라서 향후 과제로는 본 연구에서 도출된 유지관리 방안을 실제 가로 현장에 적용하여 구체적인 정량적 수치를 확보하는 실증 연구가 요구된다. 아울러 1년 사계절 조사를 넘어 장기적인 모니터링을 통해 장기 누적 데이터를 확보하고 오차를 최소화함으로써, 토양 성분 변화와 가로수 생육 상태 간의 유의미한 임계점(tipping point)을 규명하는 후속 연구가 지속되어야 할 것이다. 궁극적으로 중앙가로녹지대의 지속적인 관리를 통해 기후 위기 시대에 직면한 현대 도시들의 선상 그린인프라의 건전성을 회복하고, 외부 충격에 유연하게 대응하는 도시 회복탄력성(urban resilience)을 구현하는 과학적 토대가 되기를 기대한다.

References

1. 국토교통부(2019) 고시 KDS 34 30 10: 2019. 일반식재기반 조성설계기준.
2. 김정석, 강승림(2003) 중앙분리대의 사고감소효과 분석에 관한 연구. *대한교통학회지* 21(2).
3. 김계훈, 김길용, 김정규, 사동민, 서장선, 손보균, 양재의, 엄기철, 이상은, 정광용, 정덕영, 정연태, 정종배, 현해남(2021) 토양학. 향문사.
4. 김성민, 김충언, 정명훈(2016) 불포화 인공 식재 지반의 배수 성능과 식생 가능 조건에 대한 수치해석적 분석. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 17(6): 33-41.
5. 농촌진흥청(2023) 종합검정실 분석 매뉴얼. 발간등록번호 11-1390000-005029-01.
6. 대전광역시(2024) 대전광역시 2024년도 교통조사 및 분석 보고서.
7. 박주영(2018) 도심 내 가로변 제설제가 토양과 가로수 내 중금속과 염류이온 이행성에 미치는 영향. *건국대학교 대학원 박사학위논문*.
8. 산림청(2026) 산림임업용어사전.
9. 서울기술연구원(2022) 제2회 가로수 활력도 개선을 위한 전문가 세미나 및 토론회: 가로수, 식재기반(토양)이야기.
10. 양승빈, 구분학, 박미옥, 강명수, 이은엽, 김미나, 서정영(2015) 인공지반 토양개량제 영향실험을 통한 개선방안 연구. 2015년도 (사)한국조경학회 · (사)한국환경복원기술학회 공동학술대회.
11. 토양오염공정시험기준(2018) 시료의 채취 및 조제(Sampling and Preparing of Soil Sample) ES 07130.c.
12. 한봉호,곽정인, 김홍순(2013) 가로녹지 조성 및 관리를 위한 가로환경 영향요인 분석 연구: 서울시 관리도로를 대상으로. *한국환경생태학회지* 27(2): 253-265.
13. Field, A.(2013) *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. 4th ed. SAGE Publications.
14. Fisher, R. A.(1925) *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd.
15. Kline, R. B.(2011) *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. 3rd ed. Guilford Press.
16. West, S. G., J. F. Finch, and P. J. Curran(1995) Structural equation models with nonnormal variables: Problems and remedies. In R. H. Hoyle ed., *Structural Equation Modeling: Concepts, Issues, and Applications*. Sage Publications, pp. 56-75.