

ORIGINAL ARTICLE

가로변 교통량에 따른 철쭉류 중금속 축적 및 생물지표로서의 활용 가능성 연구

박재현 · 임효인 · 조성모¹⁾ · 윤용한¹⁾ · 주진희¹⁾*

국립산림과학원 산림생명정보연구과, ¹⁾건국대학교 녹색기술융합학과

Study on Heavy Accumulation in *Rhododendron* Along Roadsides Based on Traffic Volume and Their Potential Use as Bioindicators

Jae-Hyun Park, Hyo-In Lim, Sung-Moh Cho¹⁾, Young-Han Yoon¹⁾, Jin-Hee Ju¹⁾*

Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea

¹⁾Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea

Abstract

The potential for using *Rhododendron schlippenbachii* as a bioindicator of heavy metal pollution in urban environments was evaluated. The effects of traffic volume on the heavy metal accumulation in the soils and plant tissues along the roadside areas in Chungju, South Korea, were analyzed. The study sites were classified into four urban land use types: industrial, commercial, residential, and green. The heavy metal concentrations (Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, Ni, and As) were measured in the soil and rhododendron leaf tissues and statistically analyzed. Only the Zn concentration significantly differed across land use types in both soil and plant tissues ($p < 0.05$). The results of Canonical Correlation Analysis (CCA) showed that traffic volume and Zn concentrations were strongly and positively associated ($\rho = 0.75$), with the Zn levels being considerably higher in the commercial and industrial areas characterized by heavier traffic. These findings suggest that *Rhododendron schlippenbachii* is sensitive to the Zn pollution associated with urban traffic, which could be used as a reliable bioindicator of heavy metal contamination in urban environments.

Key words : Environmental monitoring, Zinc, Bioindicator, Heavy metal sensitivity, Pollutants

1. 서론

도시 지역의 교통량 증가는 여러 요인에 의해 발생하며, 이는 가로변 토양의 중금속 오염과 밀접한 관련이 있다. 도시화와 산업화가 진행됨에 따라 차량의 수가 급증하고, 이로 인해 교통량이 증가하면서 도로 먼지와 같은 오염물질이 축적된다. 도시 지역의 도로 먼지는 교통

량과 밀접한 관련이 있으며, 특히 평균 일일 교통량 (ADT)이 증가할수록 미세먼지의 축적이 증가한다고 보고되었다(Goya-Heredia et al., 2023). 이러한 미세먼지는 도로에서 차량 운행, 가속, 그리고 타이어 마모 등의 물리적 작용에 의해 발생하며, 이는 결국 토양에 중

Received 11 April, 2025; Revised 23 April, 2025;

Accepted 28 April, 2025

*Corresponding author : Jin-Hee Joo, Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea
Phone : +82-43-840-3541
E-mail : jhkkc@kku.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.

금속이 축적되는 원인이 된다. 또한, 자동차에서 배출된 중금속이 대기 중 먼지로부터 토양으로 침적될 수 있음을 강조하였다(Rødland et al., 2023). 농경지와 산업단지 주변에서 중금속 축적이 관찰되었으며, 이는 도시 지역에서도 유사한 경향을 보일 수 있음을 시사한다. 특히 도시 가로변 지역의 토양에서 아연(Zn), 납(Pb)과 구리(Cu) 등의 평균 함량이 높게 나타났으며, 이는 도로 먼지의 영향을 반영하는 것으로 해석된다(Foroughi et al., 2024). 교통량 증가로 인한 중금속 오염은 단순히 대기 중의 오염물질이 토양으로 이동하는 과정에서만 발생하는 것이 아니라, 도시 내의 복잡한 대기 흐름과도 관련이 있다. 도시 내 고층 건물의 밀도는 대기 흐름을 복잡하게 만들어 오염물질의 확산을 촉진한다고 보고되었다(Huang et al., 2021). 이러한 대기 흐름의 변화는 교통량 증가와 함께 중금속 오염의 확산을 가속화할 수 있다. 중금속 오염은 토양의 생물학적 및 화학적 특성을 변화시키며, 이는 결국 생태계 건강에 부정적인 영향을 미친다. 첫째, 중금속 오염은 토양 미생물 군집의 기능과 구성에 변화를 일으킨다. 중금속의 총량과 가용성은 토양 미생물 군집의 기능에 중대한 영향을 미치며, 이는 생태계의 영양 순환과 분해 과정에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Xie et al., 2016). 중금속 농도가 증가함에 따라 미생물 다양성은 감소하고, 이는 토양의 생태적 기능을 저해할 수 있다. 둘째, 중금속은 식물의 성장과 발달에도 악영향을 미친다. 중금속이 농작물의 생리적 기능을 저해하며, 이는 식물의 성장 저하 및 생산성 감소로 이어질 수 있음을 보여주었다(Malkowski et al., 2019). 특히, 도시 가로수 지역에서 중금속 농도가 높을 경우, 이 지역 식물들이 중금속을 흡수해 식물체 내에 축적될 수 있으며, 이는 인간의 식생활에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Boahen., 2024). 셋째, 중금속 오염은 인간 건강에도 심각한 위협을 줄 수 있다. 중금속은 생체 내에서 축적되며, 장기적으로 신경계, 면역계 및 내분비계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 뉴욕시 커뮤니티 가든에서 납(Pb) 등의 중금속 농도가 건강에 해로운 수준에 도달할 수 있음을 경고하였다(Liu et al., 2023). 중금속 축적은 식품망을 통해 인간에게 전달되어 만성적인 건강 문제를 유발할 수 있다. 정리해 보면, 도시 지역에서의 교통량 증가는 가로변 토양의 중금속 오염을 심화시키는 주요 요인이다. 이는 대기 중 오염물질의 토양 침적 과정과 복잡한 대기 흐름의 상호작용에 기인한다. 따라서 가로변 토

양의 중금속 오염도를 파악하는 것이 도시 지역 내 오염 문제 해결을 위한 중요한 요소로 고려되어야 한다. 가로변 식물의 중금속 오염도는 도시 토양의 중금속 오염을 평가하는 중요한 지표가 될 수 있다. 도로에서 발생하는 중금속은 차량 배출가스, 도로 마모, 그리고 대기 중 오염물질이 비나 바람을 통해 토양과 식물로 침적되는 과정을 통해 주변 환경에 영향을 미친다. 이러한 과정을 통해 가로변 식물은 중금속을 흡수하여 축적하게 되며, 이는 가로변 토양의 오염 상태를 반영하는 지표로 작용할 수 있다(Altaf et al., 2021). 또한, 가로변 식물의 중금속 축적 능력을 평가한 연구들은 특정 식물들이 중금속을 효과적으로 흡수하는 능력을 가지고 있음을 보여주었으며, 이는 가로변의 중금속 오염을 모니터링하는데 유용한 정보를 제공한다. 따라서 가로변 식물의 중금속 오염도는 가로변 토양 오염도를 이해하고 도시 환경의 모니터링에 활용할 수 있는 중요한 지표로 사용될 수 있다(Cakaj et al., 2024).

결과적으로, 자동차 증가로 인한 교통량 증가는 도시 환경 악화의 중요한 요인 중 하나이며, 특히 가로변 토양과 식물의 중금속 오염과 밀접한 관계가 있다. 그러나 기존 연구는 토양의 중금속 오염에 초점을 맞춘 반면, 식물의 중금속 오염에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 이에 본 연구에서는 교통량이 많은 지역에서의 가로변 토양 중금속 축적 정도를 분석하고 교통량과의 상관관계를 규명하여, 가로변 토양 중금속 오염 지표 식물로 활용 가능한 식물 종을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 대상지 선정 및 범위

본 연구는 최근 기업도시 유치 및 도시화가 활발히 진행 중인 충청북도 충주시를 대상으로 하였다. 충주시는 우리나라의 중앙부와 동북부에 위치하며, 지리적으로 산간분지를 형성하고 있다. 남한강, 달천강, 요도천이 관통하여 수자원이 풍부한 내륙분지에 자리 잡고 있으며, 983.95 km²의 총면적을 가지고 있다. 수도권과의 접근성이 좋아 기업 및 관광도시로의 발전이 기대된다. 수리적으로는 위도 37.0136° N, 경도 127.9045° E에 위치하여 온대 계절풍 지대를 형성하고 있다. 연구를 위해 충주시의 생산지역, 상업지역, 주거지역에 위치한 교통 혼잡지 13곳(1~13)을 선정하고, 2곳(14~15)을 녹지지역으로 분류하였다(Fig. 1). 대상지 선정은 충주

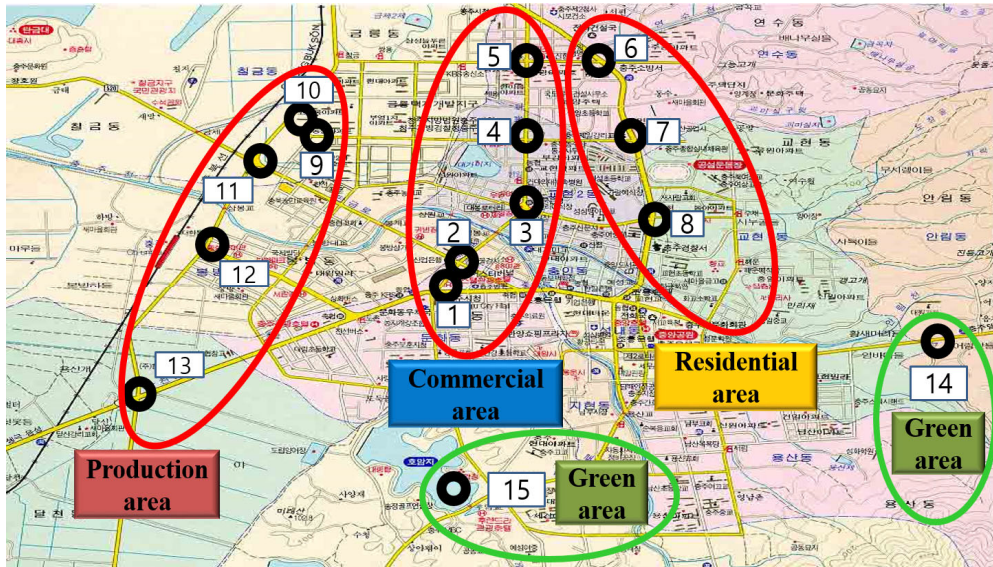


Fig. 1. Study sites.

도시기본계획의 교통량 통계를 기반으로 하였으며 (Table 1), 교통이 혼잡한 곳과 그렇지 않은 곳의 비교 분석을 위해 녹지지역인 충주댐과 호암지를 대조구로 선정하였다. 이를 통해 충주 도심의 교통량이 차도 주변 지역의 토양과 식물체 내 중금속 함량에 미치는 영향을 조사하였으며 5월, 7월, 9월에 걸쳐 총 3회에 걸쳐 토양 및 식물체를 채취하여 분석을 진행하였다.

Table 1. Traffic volume at study sites

Area	Traffic volume (vehs.)
Production	7,500 ~ 3,750
Commercial	3,750 ~ 1,875
Residential	≤ 1,875
Green	≤ 500

2.2. 대표 식물 선정

조사대상지에서 대표 식물 선정을 위해 식생조사를 진행하였다(Table 2). 주로 초본류는 잔디(*Zoysia japonica* Steud), 서양민들레(*Taraxacum officinale*) 많았고, 관목류는 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii*), 회양목(*Buxus sinica*) 이 많았다. 교목류는 소나무(*Pinus densiflora*), 은행나무(*Ginkgo biloba*)가 주로

식재되어 있었다. 위의 총 15곳의 조사지의 식생을 조사한 결과 15곳의 조사지에 공통적으로 식재된 수종은 철쭉이 유일했고, 그 결과로 철쭉을 교통 혼잡지의 중금속 대표 지표종으로 선정하였다.

2.3. 토양 시료 채취 및 분석

충주시 내 15개 대상지(교통혼잡 대상지 13곳과 대조구 2곳)에서 토양 시료를 채취하였다. 표토 15 cm 정도를 걷어낸 후 약 1 kg의 토양을 채취하여 통풍이 되는 그늘에서 2주간 건조시켰다. 건조된 토양은 2 mm 체로 쳐서 돌과 분리한 후 분석용 시료로 사용하였다. 토양 분석은 이화학적 특성(pH, EC)과 중금속 함량 측정하였다. 토양의 이화학적 특성 분석을 위해 건조한 토양 8 g에 증류수 40 ml를 넣고 30분 이상 진탕한 후, pH meter (DMS-880)를 이용하여 1분 이내에 pH를 측정하였다. EC 측정은 pH 측정 후 시료를 No.2 여지로 걸러 EC meter (106A, Orion, USA)로 측정하였다. 토양의 중금속 함량 분석은 토양오염공정시험방법(환경부, 2002)에 따라 수행되었다. 자연건조된 토양시료 8 g을 정확히 칭량하여 0.1N HCL 40 ml에 넣고 1시간 동안 진탕한 후, No.6 여지로 여과하였다. 여과된 시료는 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP-OES, Optima 5300DV, USA)를 사용하여 중금속 함량을 측정하였다.

Table 2. Vegetation table of study sites

Group	No.	Tree	Shrub	Herb
Traffic congestion area	1	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i>	<i>Taraxacum officinale</i> , <i>Trifolium repens</i>
	2	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	<i>Taraxacum officinale</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Setaria viridis</i>
	3	<i>Cryptomeria japonica</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Acer palmatum</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i>	<i>Taraxacum officinale</i> , <i>Viola mandshurica</i> , <i>Setaria viridis</i> , <i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>
	4	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	<i>Trifolium repens</i> , <i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i>
	5	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	<i>Trifolium repens</i> , <i>Setaria viridis</i> , <i>Zoysia japonica</i> Steud
	6	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	.
	7	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Trifolium repens</i>
	8	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Trifolium repens</i>
	9	<i>Zelkova serrata</i> , <i>Pinus densiflora</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i> , <i>Ilex crenata</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Plantago asiatica</i> , <i>Viola mandshurica</i> , <i>Trigonotis peduncularis</i>
	10	<i>Juniperus chinensis</i> , <i>Acer palmatum</i> , <i>Ligustrum obtusifolium</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i>	<i>Tradescantia reflexa</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Thlaspi arvense</i> , <i>Equisetum arvense</i> , <i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>
	11	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Taxus cuspidata</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud
	12	<i>Magnolia kobus</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> ,	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Androsace umbellata</i> , <i>Androsace umbellata</i> , <i>Ixeris dentata</i> , <i>Chenopodium album</i> var. <i>centrorubrum</i>
	13	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Chenopodium album</i> var. <i>centrorubrum</i> , <i>Trigonotis officinale</i> , <i>Androsace umbellata</i> , <i>Thlaspi arvense</i> , <i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>
Non congested traffic area	14	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Acer palmatum</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i> , <i>Forsythia koreana</i>	<i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Trifolium repens</i>
	15	<i>Ginkgo biloba</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus koraiensis</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Buxus sinica</i> , <i>Forsythia koreana</i> , <i>Taxus cuspidata</i>	<i>Chelidonium majus</i> var. <i>asiaticum</i> , <i>Zoysia japonica</i> Steud., <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Acorus calamus</i> var. <i>angustatus</i> , <i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>

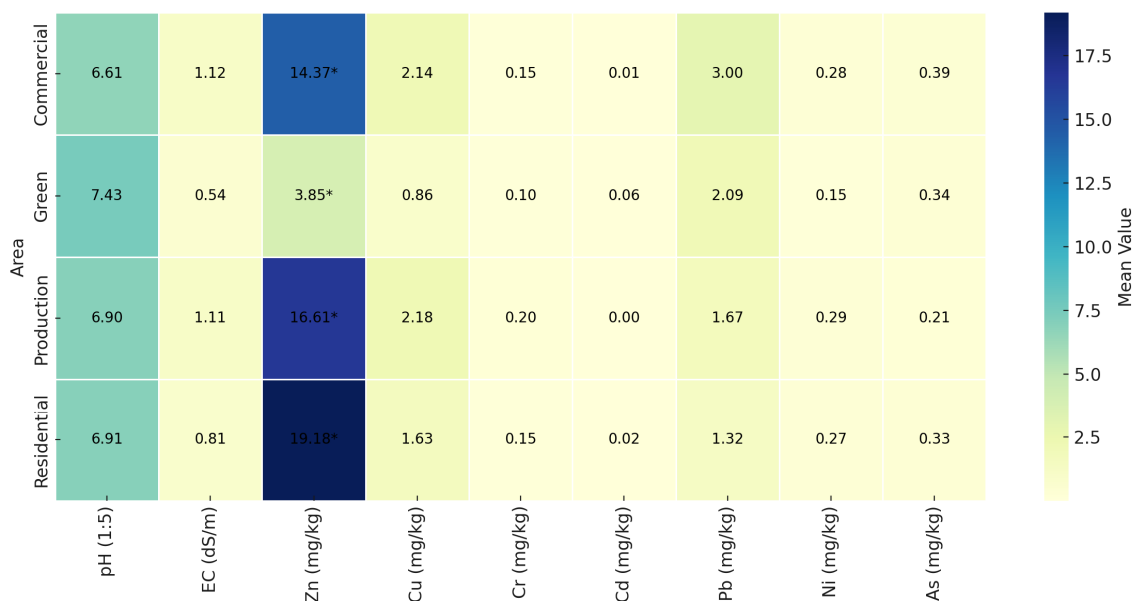


Fig. 2. Mean pH, EC, and metal concentrations in soil by area; statistical analysis was conducted using the Kruskal-Wallis test, followed by Dunn's post hoc test with Bonferroni correction; statistical significance is denoted by asterisks (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

2.4. 식물 시료 채취 및 분석

충주시 내 15개 대상지(교통혼잡 대상지 13곳과 대조구 2곳)에서 식물 잎 시료를 채취하였다. 정확한 데이터 수집을 위해 도로변으로부터 최대 3 m 이내의 범위에서 주로 잎을 채취하였다. 채취한 식물체는 흐르는 물에 표면의 이물질을 제거한 후, 통풍이 잘되는 그늘에서 2주간 건조시켰다. 건조가 완료된 식물체는 분쇄하여 분석 시료로 준비하였다. 식물체의 중금속 분석은 식물체분석법(NIAST, 2000)에 따라 수행되었다. 분석 과정은 다음과 같다: 먼저, 건조 및 분쇄한 식물체 2 g을 정확히 칭량하여 농질산(HNO_3) 10 ml와 분해액(Ternary solution: $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HClO}_4 = 10 : 1 : 4$ 비율) 20ml를 첨가하였다. 이후 전열판에서 서서히 가열하여 진한 갈색 연기가 모두 날아갈 때까지 분해를 진행하였다. 분해가 완료된 시료는 식힌 후 No.6 여지로 여과하고, 여과액을 증류수로 100 ml까지 맞추었다. 최종적으로, 준비된 분해액은 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP-OES, Optima 5300DV, USA)를 사용하여 중금속 함량을 측정하였다. 이러한 방법을 통해 잎에 축적된 중금속의 양을 분석하였다.

2.5. 통계분석

도시 지역 유형별 중금속 농도의 차이를 통계적으로 검정하고, 교통량과 토양 및 식물체 내 Zn 축적 간의 관계를 분석하기 위해 다양한 통계분석을 실시하였다. 우선, 도시 지역 유형(생산지역, 상업지역, 주거지역, 녹지지역) 간 중금속(Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, Ni, As) 농도의 유의미한 차이를 검정하기 위해 기술통계를 실시하고, Kruskal-Wallis H 검정을 통해 지역 간 통계적 유의성을 검정하였다. 또한, 교통량과 토양 및 철쭉 잎 조직 내 Zn 농도 간의 다변량 관계를 파악하기 위해 정준상관분석(Canonical Correlation Analysis, CCA)을 실시하였으며, 상관성을 확인하였다. 모든 통계분석은 Python (ver. 3.10) 환경에서 scipy, pandas, statsmodels, seaborn, 그리고 matplotlib 등 주요 통계 및 시각화 패키지를 활용하여 수행하였으며, 유의수준은 0.05로 설정하였다.

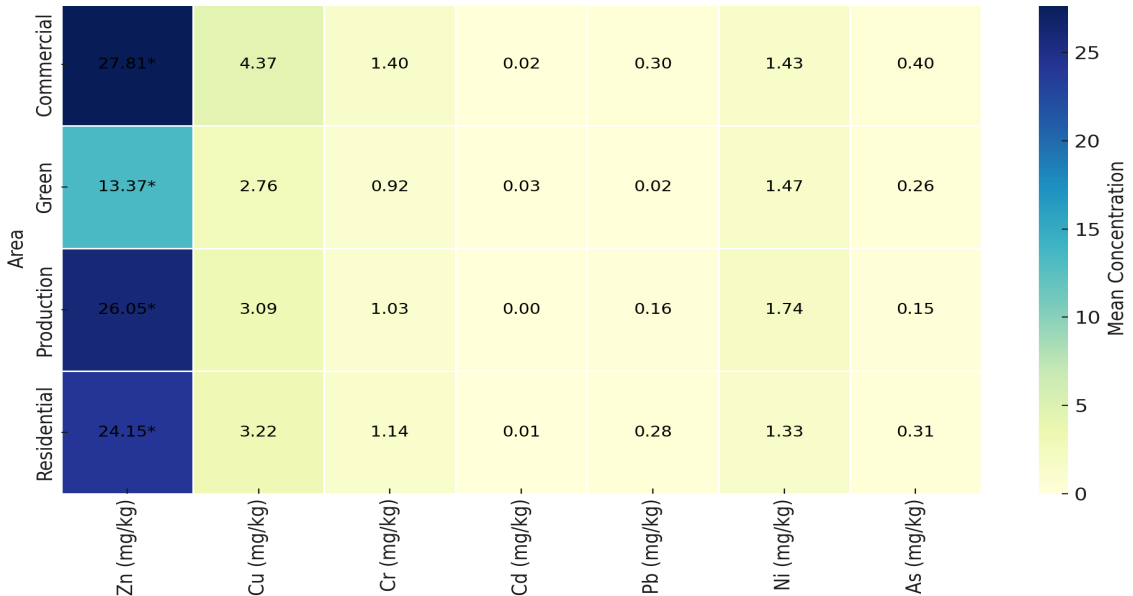


Fig. 3. Mean metal concentrations in leaves by area; statistical analysis was conducted using the Kruskal-Wallis test, followed by Dunn's post hoc test with Bonferroni correction; statistical significance is denoted by asterisks (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

3. 결과 및 고찰

3.1. 도시 지역 유형별 가로변 토양 중금속 농도와 pH 및 EC의 비교

분석 결과, 토양 내 중금속 중 Zn 농도에서만 지역 간 교통량 차이(Green < Commercial < Production < Residential)에 따른 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다($p < 0.05$), 나머지 항목(pH, EC, Cu, Cr, Cd, Pb, Ni, As)에서는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Fig. 2). 특히 대조구인 Green 지역은 Zn 농도가 Residential 지역 대비 가장 낮았으며, Commercial 및 Production 지역보다도 상대적으로 낮았다. Residential 지역에서 Zn 농도가 높게 나타난 이유는 다양한 도시 내 인위적 활동이 복합적으로 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 높은 교통량과 인구 밀도로 인해 차량에서 발생하는 타이어와 브레이크 마모 물질이 도로 주변 토양에 쉽게 축적될 가능성이 크다(Adachi & Tainosho, 2004). 또한, 도시 지역에서 광범위하게 사용되는 아연 도금된 시설물의 부식(Davis et al., 2001), 우수관 및 배수 시스템에서의 지속적인 Zn 배

출(Göbel et al., 2007), 생활 폐기물의 부적절한 관리 및 처리 과정(Wong et al., 2007), 조경 관리 시 사용되는 비료나 농약 내 함유된 Zn 등(Alloway, 2013)이 Residential 지역의 높은 Zn 농도를 야기하는 복합적인 원인으로 작용할 수 있다. 결과적으로, 도시 내 교통량과 인구 밀도가 낮은 Green 지역은 다른 지역에 비해 토양 중금속 함량이 상대적으로 낮으며, 특히 Zn 농도의 차이가 뚜렷함을 확인할 수 있다. 아울러 Residential 지역의 Zn 농도는 교통량 외에도 다양한 도시 인위 활동의 영향을 받았기 때문에, 이에 도시 환경의 중금속 오염 평가에 Zn이 중요한 지표가 될 수 있음을 시사한다.

3.2. 도시 지역 유형별 가로변 식물체 중금속 농도 비교

분석 결과, 철쭉류 잎 조직 내 Zn 농도는 지역 간 교통량 차이(Green < Residential < Commercial = Production)에 따라 통계적으로 유의미한 차이를 나타냈다($p < 0.05$)(Fig. 3). 특히 철쭉류 잎 내 Zn 농도는 교통량이 많은 Commercial 및 Production 지역에서 가장 높게 나타났으며, 이는 자동차 타이어 마모 과정에서

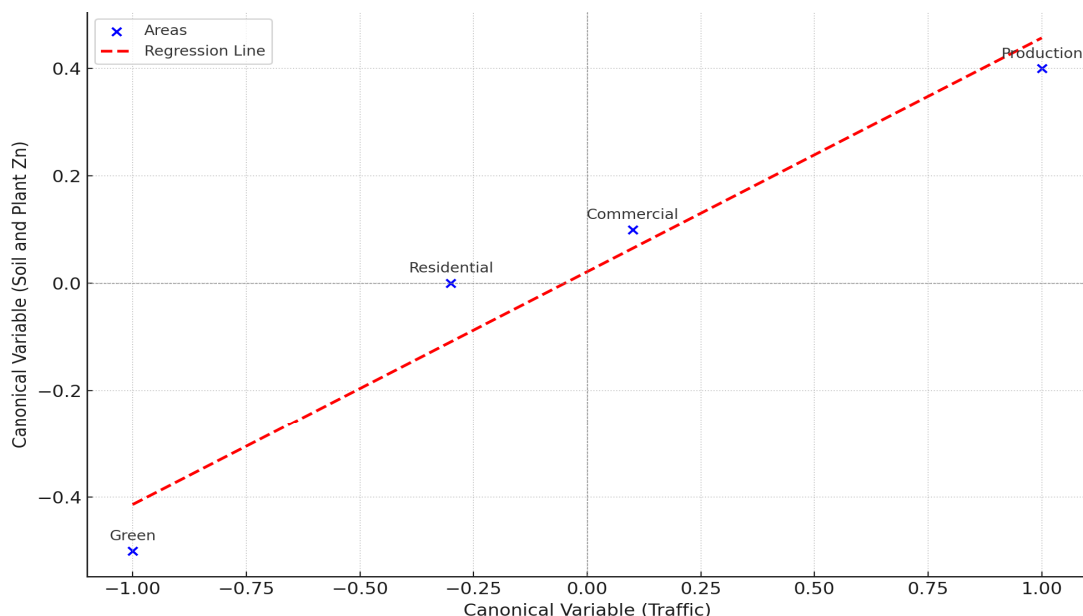


Fig. 4. A canonical correlation analysis between traffic volume and Zn concentration of soil and plant; a regression line was fitted to the canonical scores of four urban area types; statistical significance of the canonical correlation was assessed ($p < 0.001$); the canonical correlation coefficient (ρ) ranges from 0 to 1, with values closer to 1 indicating a stronger linear association between the two canonical variable sets.

배출된 Zn이 철쭉 잎에 효과적으로 축적되었기 때문으로 판단된다. 타이어 마모로 배출되는 Zn은 교통량 증가와 밀접하게 관련된 중금속으로서, 다양한 도시 지역에서 주요 오염원으로 보고된 바 있다(Adachi & Tainosho, 2004; Hjortenkrans et al., 2007). 일본 오카야마 지역에서 진행된 선행 연구에서도 철쭉 잎 조직의 Zn 농도가 도시 내 교통량과 높은 상관관계를 나타내었으며, 이는 철쭉류가 도시 환경의 중금속 오염 평가에 효과적인 생물지표로 활용될 수 있음을 제시한 바 있다(Suzuki et al., 2008). 본 연구의 결과는 이러한 선행 연구와 일치하며, 철쭉류가 Zn 축적에 민감하게 반응하여 도시 내 교통 관련 중금속 오염 모니터링에 신뢰성 있는 지표 식물로 사용될 수 있다는 점을 더욱 명확히 뒷받침한다. 한편, 철쭉 잎의 Zn 농도 지역별 순서는 토양과 다소 차이를 보였는데, 이는 철쭉이 토양뿐 아니라 직접적인 대기 침적물(Zn을 포함한 미세먼지)의 영향을 함께 받기 때문으로 판단된다. 반면, Zn 이외의 Cu, Cr, Cd, Pb, Ni, As 등 다른 중금속 농도는 지역 유형 간 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$). 이는 철쭉류가 모든 중금속에 대해 동일한 민

감성을 가지지 않으며, 특정 중금속에 대한 선택적 축적 또는 생리적 방어 메커니즘이 존재할 수 있음을 시사한다. 실제로 식물 종마다 특정 중금속에 대한 흡수 및 이동성에 차이가 있으며, 이러한 생리적 특성이 철쭉류의 중금속 축적 패턴에 영향을 줄 수 있다(Kabata-Pendias, 2011). 결과적으로 철쭉류가 Zn 축적을 통해 도시 내 교통량 차이를 명확히 반영하며, 도시 환경의 Zn 오염 평가에 우수한 생물지표가 될 수 있음을 제시한다.

3.3. 도시 지역 내 교통량과 토양 및 식물체의 Zn 농도 관계

도시 지역 내 교통량 증가가 토양 및 식물체 내 Zn 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해 정준상관분석(Canonical correlation analysis, CCA)을 수행한 결과, 교통량과 Zn 농도 간에 뚜렷한 양의 상관관계($\rho = 0.75$)가 통계적 유의성이 확인되었다(Fig. 4). 특히, 교통량이 가장 높은 Production 및 Commercial 지역에서는 토양 및 철쭉류 내 Zn 농도가 높게 나타난 반면,

교통량이 가장 낮은 Green 지역에서는 Zn 농도가 현저히 낮았다. 이러한 결과는 자동차 타이어 및 브레이크 패드의 마모로 발생한 Zn이 주변 환경에 축적된다는 선행 연구(Dadea et al., 2016; Perri et al., 2024)와 일치하며, 도시화가 진전된 지역일수록 교통 활동이 Zn 축적의 주요 원인으로 작용함을 시사한다. 또한, 특정 식물 종이 교통오염에 민감하게 반응한다는 기존 연구(Steindor et al., 2016)를 바탕으로 볼 때, 본 연구에서 분석된 철쭉류는 교통량에 따른 Zn 농도 변화를 민감하게 반영하며, 도시 교통 오염의 생물지표로서 활용 가능성이 높음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 충주시 도시 가로변에서 교통량이 토양 및 식물체 내 중금속 축적에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 분석 결과, 여러 중금속 중 Zn 만이 지역 유형에 따라 통계적으로 유의미한 차이를 나타냈으며, 특히 교통량이 많은 상업지역 및 생산지역에서 Zn 농도가 높았다. 정준상관분석 결과, 교통량과 Zn 농도 간에는 뚜렷한 양의 상관관계($\rho = 0.75$)가 확인되었다. 철쭉류(*Rhododendron schlippenbachii*)은 Zn 오염에 민감하게 반응하는 특성을 보였으며, 특히 교통량이 높은 지역에서 높은 Zn 축적을 나타내어 도시 중금속 오염을 평가하는 신뢰도 높은 생물지표로 활용 가능성을 확인하였다. 따라서 철쭉은 도시화가 진행되는 지역에서 생태계 위해성 평가 및 환경 모니터링에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Adachi, K., Tainosho, Y., 2004, Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust, *Environ. Int.*, 30(8), 1009-1017, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>.
- Altaf, R., Altaf, S., Hussain, M., Shah, R. U., Ullah, R., Ullah, M. I., et al., 2021, Heavy metal accumulation by roadside vegetation and implications for pollution control, *PLoS ONE*, 16(5), e0249147, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249147>.
- Alloway, B. J., 2013, Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (4th ed.), Springer, Dordrecht, Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>.
- Boahen, E., 2024, Heavy metal contamination in urban roadside vegetables: Origins, exposure pathways, and health implications, *Discov. Environ.*, 2, 145, <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00182-7>.
- Cakaj, A., Drzewiecka, K., Hańć, A., Lisiak, M., Ciszewska, L., Drapikowska, M., 2024, Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring, *Environ. Res.*, 256, 119222, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119222>.
- Dadea, C., Bacchiocchi, S. C., La Rocca, N., Mimmo, T., Russo, A., Zerbe, S., 2016, Heavy metal accumulation in urban soils and deciduous trees in the city of Bolzano, N Italy, *Urban For. Urban Green.*, 15, 35-42, <http://eprints.glos.ac.uk/6593>.
- Davis, A. P., Shokouhian, M., Ni, S., 2001, Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources, *Chemosphere*, 44(5), 997-1009, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00561-0).
- Foroughi, M., Weil, R. R., 2024, Soil lead, zinc, and copper in two urban forests as influenced by highway proximity, *J. Environ. Qual.*, 54(1), 275-288, <https://doi.org/10.1002/jeq2.20642>.
- Göbel, P., Dierkes, C., Coldewey, W. G., 2007, Storm water runoff concentration matrix for urban areas, *J. Contam. Hydrol.*, 91(1-2), 26-42, <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.008>.
- Goya-Heredia, A. V., Zafra-Mejía, C. A., Rondón-Quintana, H. A., 2023, Spatial analysis of heavy metal pollution in road-deposited sediments based on the traffic intensity of a megacity, *Atmosphere*, 14(6), 1033, <https://doi.org/10.3390/atmos14061033>.
- Hjortenkrans, D. S. T., Bergbäck, B. G., Häggerud, A. V., 2007, Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005, *Environmental Science & Technology*, 41, 5224-5230, <https://doi.org/10.1021/es070198o>.
- Huang, X., Gao, L., Guo, D., Yao, R., 2021, Impacts of high-rise buildings on urban airflows and pollutant dispersion under different temperature stratifications: Numerical investigations, *Atmos. Pollut. Res.*, 12(3), 100-112, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.02.001>.
- Kabata-Pendias, A., 2011, Trace elements in soils and plants (4th ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, <https://doi.org/10.1201/b10158>.
- Liu, D., Shi, Q., Liu, C., Sun, Q., Zeng, X., 2023, Effects of endocrine-disrupting heavy metals on human health, *Toxics*, 11(4), 322, <https://doi.org/10.3390/toxics11040322>.
- Małkowski, E., Sitko, K., Zieleźnik-Rusinowska, P., Gieroń, Ż., Szopiński, M., 2019, Heavy metal

- toxicity: Physiological implications of metal toxicity in plants, In: Plant Metal Interactions, Springer, Cham, Switzerland, 253-301,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-19103-0_10.
- Perri, G., Gargano, D., Randazzo, L., Calabrese, S., Brusca, L., Fuoco, I., Apollaro, C., La Russa, M. F., 2024, Nature-based options for improving urban environmental quality: using black poplar trees for monitoring heavy metals pollution in urbanized contexts, Resources, 13(6),
<https://doi.org/10.3390/resources13060085>.
- Rø dland, E. S., Heier, L. S., Lind, O. C., Meland, S., 2023, High levels of tire wear particles in soils along low traffic roads, Sci. Total Environ., 903, 16647,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166470>.
- Steindor, K., Franiel, I., Bierza, W., Pawlak, B., Palowski, B., 2016, Assessment of heavy metal pollution in surface soils and plant material in the post-industrial city of Katowice, Poland, J. Environ. Sci. Health A, 51(5), 371-379,
<https://doi.org/10.1080/10934529.2015.1120509>.
- Suzuki, K., Yabuki, Y., Ono, Y., 2008, Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan, Environ. Monit. Assess., 149, 133-141,
<https://doi.org/10.1007/s10661-008-0188-7>.
- Wong, C. S. C., Li, X., Thornton, I., 2007, Urban environmental geochemistry of trace metals, Environ. Pollut., 142(1), 1-16,
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.09.004>.
- Xie, Y., Fan, J., Zhu, W., Amombo, E., Lou, Y., Chen, L., Fu, J., 2016, Effect of heavy metals pollution on soil microbial diversity and bermudagrass genetic variation, Front. Plant Sci., 7, 755,
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00755>.
-
- Post doctor researcher. Jae-Hyun Park
 Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
 jh2344@korea.kr
 - Senior research officer. Hyo-In Lim
 Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
 iistorm@korea.kr
 - Doctoral student. Sung-Moh Cho
 Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
 rebolt81@naver.com
 - Professor. Young-Han Yoon
 Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
 yonghan7204@kku.ac.kr
 - Professor. Jin-Hee Ju
 Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
 jjhkcc@kku.ac.kr