

교통량과 대기질이 도시 공원 토양 특성에 미치는 영향

Effects of Traffic Volume and Air Quality on the Characteristic of Urban Park Soil

주선영¹ · 이현진¹ · 전주희¹ · 서인혜² · 유가영^{3*}

¹경희대학교 환경학 및 환경공학과 학사과정, ²경희대학교 환경응용과학과 박사과정, ³경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수

Sunyoung Joo¹, Hyunjin Lee¹, Juhui Jeon¹, Inhye Seo² and Gayoung Yoo^{3*}

¹Undergraduate Course, Department of Environment Science and Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 17104, Korea

²Doctoral Course, Department of Applied Environment Science, Kyung Hee University, Gyeonggi 17104, Korea

³Professor, Department of Environment Science and Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 17104, Korea

Received 10 February 2022, revised 17 March 2022, accepted 17 March 2022, published online 31 March 2022

ABSTRACT: This study aims to understand how mobile and stationary air pollution sources affect the air quality and soil properties in urban parks. We selected three sites of urban parks in Seoul as follows: Ha-neul Park in Mapo-gu (Site_M), Ill-won Eco-Park in Gangnam-gu (Site_G), and Yangjae Citizen's Forest in Seocho-gu (Site_Y), and compared the results of each site's traffic volume, air quality concentration, and soil analysis. Traffic volume was high in Site_M, followed by Site_G and Y; Site_M and G were closer to the resource recovery facility than Site_Y. Hence, we hypothesized that PM and NO₂ concentrations in the atmosphere were higher in Site_M than Site_G and Y, causing different soil nitrogen content among sites due to different atmospheric deposition. Consistent with our hypothesis, the concentrations of PM_{2.5} and NO₂ were higher in Site_M and G than Site_Y, while Site_Y had higher PM₁₀ than other sites. The soil NO₃⁻ contents showed no significant difference among three sites, whereas the soil NH₄⁺ content was extremely high in Site_Y. This high content of soil NH₄⁺ is thought to be due to acidification from excessive fertilization. Lower soil pH of Site_Y further supported the evidence of heavy fertilization in this site. Overall nitrogen dynamics implies that soil nitrogen status is more influenced by park management such as fertilization rather than atmospheric deposition. Despite of lower soil NH₄⁺ content of Site_M and G than Y, vegetation vitality looked similar among three sites. This indirectly indicates that excessive fertilizer input in urban park management needs to be reconsidered. This study showed that even if the air quality was different due to mobile and stationary sources, it did not directly affect the soil nitrogen nutrient status of the adjacent urban park.

KEYWORDS: Atmospheric nitrogen deposition, Urban air pollutant source, Urban soil

요약: 본 연구에서는 서울의 세 지점에서 이동 및 고정오염원이 대기질과 도시 공원 토양의 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 조사 대상지로는 도시에서 질소 침적의 주요 발생원인 이동 및 고정오염원의 여부에 따라 서울시 마포구의 하늘공원 (Site_M), 서울시 강남구의 일원에코파크 (Site_G), 서울시 서초구의 양재시민의 숲 (Site_Y)을 선정하였고, 각 사이트별 교통량과 대기질 농도, 토양 분석 결과를 비교하였다. 교통량은 Site_G와 Y에 이어 Site_M에서 가장 많았다. Site_M과 G는 Site_Y보다 자원회수시설과 더 가까웠다. 따라서, 본 연구에서는 PM과 NO₂ 농도가 Site_Y, G에서보다 Site_M에서 많을 것이며, 사이트마다 다른 대기 침적량에 의해 토양 질소 함량도 다를 것으로 예상했다. 예상과 동일하게 PM_{2.5}와 NO₂ 농도는 Site_M과 G에서 높았지만 PM₁₀ 농도는 Site_Y에서 약간 높았다. 식물이 주로 흡수하는 무기질소의 형태인 NO₃⁻의 함량은 세 사이트에서 유의한 차이가

*Corresponding author: gayoo@khu.ac.kr, ORCID 0000-0002-5465-1584

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

보이지 않았고, NH_4^+ 의 함량은 Site_Y에서 다른 두 지역에 비해 더 높았는데, 이는 대기 침적에 의한 결과라기 보다는 공원 관리 차원에서 질소 비료 투입에 따른 영향인 것으로 생각된다. Site_Y에서 다른 사이트보다 낮은 pH를 보인 것 또한 과도한 비료 시용으로 인해 산성화가 일어난 것으로 생각된다. 그러나 토양 내 NH_4^+ 함량이 상대적으로 적은 Site_M과 G를 포함한 모든 조사 대상지에서 식생이 건강하게 보이는 것으로 보아, 공원 관리에 있어서 과도한 비료 투입을 재고할 필요가 있음을 시사한다. 비록 이동 및 고정오염원으로 인해 대기의 PM, NO_2 등의 농도가 달랐지만 그 영향이 토양의 질소 영양 상태에 직접적 영향을 미치지 않는 수준이었다.

핵심어: 도시 대기 오염원, 대기 질소 침적, 도시 토양

1. 서 론

산업혁명 이후 인간 활동으로 인해 생물권 중의 반응성 질소가 두 배 이상 증가했으며, 대기로부터 토양으로의 질소 침적 또한 산업혁명 이전보다 열 배 가까이 증가했다 (Galloway et al. 2004). 일반적으로 질소가 토양에 다량 침적되면 토양 중 무기태 질소의 양이 증가하여 (Herai et al. 2006) 식생과 미생물의 질소 이용 가능성이 높아진다는 보고가 있다 (Aber et al. 1998). 그러나 과도한 침적이 일어나면 토양으로부터 NO_3^- -N이 침출되고 오히려 토양의 질소 보유 능력이 감소하는 등 부정적인 영향을 미칠 수도 있다는 연구 결과도 있다 (Herai et al. 2006). 또한 과도한 질소 침적은 토양 산성화를 유발하여 민감한 식물의 성장을 감소시키고 고사를 야기할 수 있다 (Cho et al. 2009, 2010). 대기 중 질소는 강산성을 띠는 HNO_3 와 같은 형태로 침적되어 토양을 직접 산성화시키거나, NH_3 와 같은 환원 질소 형태로 침적되어 미생물의 질산화 과정에 의해 H^+ 를 방출함으로써 토양 산성화를 일으킬 수 있다 (U.S. EPA 2020). 이러한 질소 침적에 따른 토양 변화는 주로 자연 생태계를 중심으로 연구가 수행되었으며, 도시 토양에 미치는 영향에 대한 이해와 경험은 아직 부족하다. 그러나 질소 침적은 도시 지역에서 도시가 아닌 지역보다 더 빈번하게 일어나며, 주로 이동 오염원과 발전소, 소각로 같은 고정 오염원이 인접한 지역에서 발생하는 NO , NO_2 , NH_3 등이 질소 침적의 원인이라고 보고되었다 (Bettez and Groffman 2013). 우리나라 국립환경과학원의 2016년 대기오염물질 배출량 산정 결과에 따르면, 수도권 지역의 NO_x 배출량은 도로이동 오염원의 기여도가 175,089톤/년으로 가장 크며 전체 NO_x 배출량 대비 약 53.9%를 차지한다. 한편 폐기물 처리의 NO_x 배출량은 3,102톤/년으로 전체 NO_x 배출량 대비 약 0.95%를 차지하며 그 기여도는 비교적 작지만, 고정 오염원과 인접한

지역은 질소 침적에 의해 영향을 받을 수 있다. 국내 교통량과 폐기물 발생량 및 소각 처리는 증가하는 추세이므로 (Kim et al. 2013), 이동 및 고정 오염원으로 인한 대기질이 인근 도시 토양에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 교통량과 고정 오염원으로부터의 거리에 따라 총 3개의 사이트를 선정하여 대기 중 미세먼지 농도와 NO_2 농도를 비교해 오염원이 대기질에 미치는 영향을 확인하고, 토양 분석을 통하여 대기질의 차이가 토양 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사 대상지 선정 및 현장 조사

조사 대상지로는 도시에서의 대기 질소 침적의 주요 발생원인 이동 및 고정 오염원의 여부에 따라 총 3개의 사이트가 선정되었다. 교통량 정보는 서울시 교통정보 시스템 (topis.seoul.go.kr)에서 제공하는 ‘2020 서울특별시 교통량 조사자료’를 참고하였다. Site_M은 서울시 마포구에 위치한 하늘공원으로, 교통량이 많으며 자원회수시설과 약 700 m 거리에 있어 고정 오염원의 영향을 받는다. Site_G는 서울시 강남구에 위치한 일원에 코파크로, 교통량이 비교적 적으며 자원회수시설과 약 700 m 거리에 있어 고정 오염원의 영향을 받는다. Site_Y는 서울시 서초구에 위치한 양재시민의 숲으로, 교통량이 많으며 자원회수시설로부터 약 5 km 이상 떨어져 있어 고정 오염원의 영향으로부터 비교적 멀다.

각 사이트 별로 이동 및 고정 오염원이 인근 지역의 대기질에 미치는 영향을 정량화 하기 위하여, 교통량 정보와 에어코리아 (air-korea.or.kr)의 대기질 농도를 수집하였다. 그리고 3개 사이트의 식생 상태를 비교하기 위하여 네이버 지도 (map.naver.com)에서 제공하

는 거리뷰 이미지를 참고하였다. 거리뷰 이미지는 현장 조사 시기가 여름철인 것을 고려하여 Site_M는 2017년 6월, Site_G와 Site_Y는 2021년 6월에 토양 채취 지점과 가까운 지점에서 촬영된 이미지로 선정하였다.

2.2 토양 시료 채취 및 분석

2021년 7월에 각 사이트를 총 3개의 구역으로 나누어 각 구역별 3~6개의 토양 시료를 채취하였다. Soil auger (2 cm diameter, AMS Inc., America) 를 이용하여 0-15 cm의 토양을 채취하였고, 2주간 자연 풍건시킨 뒤 2 mm 이하로 체친 후 토양 분석을 수행하였다.

토양의 용적 밀도는 soil auger로 채취한 토양 시료의 건조중량(g)을 채취 부피(cm^3)로 나누어 계산하였다. 토양과 증류수를 1:5로 하여 침출시킨 후 pH는 Orion StarTM A211 pH Benchtop Meter (Thermo ScientificTM)를 이용하여 측정하였고, EC는 Orion StarTM A222 Conductivity Portable Meter (Thermo ScientificTM)를 이용하여 측정하였다. TC, TN은 Automatic element analyzer (CE Instrument, Flash EA1112, Italy)를 통해 원소 분석하였다. 각 사이트의 토양 탄소 저장량 (Soil Carbon Storage, SCS)은 용적 밀도와 탄소 농도, 토양 채취 깊이를 고려하여 계산하였다 (Eq. 1).

$$SCS(\text{kg}/\text{m}^2) = BD \times C \times D \times 10 \quad (\text{Eq. 1})$$

여기에서, BD는 토양 용적 밀도 ($\text{g soil cm soil}^{-3}$), C는 탄소 농도 (g C kg soil^{-1}), D는 토양 채취 깊이 (cm), 10은 단위 보정 계수를 말한다.

NH_4^+ 농도는 5 g의 토양에 2 M KCl 20 ml를 넣고 침출시킨 후, 분석 키트인 HS-NH₃ (N)-U (Humas, Korea)와 분광광도계 (Humas, HS3300, Korea)를 이용하여 분석하였다. NO_3^- 농도는 5 g의 토양에 0.01 M CaCl_2 20 ml를 넣고 침출시킨 후, HS-NO₃ (N)-CA (Humas, Korea)와 분광광도계 (Humas, HS3300, Korea)를 이용하여 분석하였다.

2.3 통계 분석

대기질 농도와 토양 분석 결과가 각 사이트마다 유의하게 차이가 있는지 확인하기 위하여 R Studio를 이용해 one-way ANOVA (일원 분산 분석) 방식으로 P-value

로부터 유의수준 0.05 내에서 신뢰도 검증 및 통계 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조사 대상지의 교통량 및 대기질 농도 비교

각 사이트의 2020년 하루 평균 교통량은 Site_M에서 238,049대/일로 가장 많았고 이는 Site_G의 약 2.4배, Site_Y의 약 1.3배였다. 따라서 이동 오염원의 영향은 Site_M과 Site_Y에서 비슷하며, Site_G에서는 상대적으로 적었다 (Table 1).

각 사이트 별 대기질 농도를 비교한 결과, PM10 농도는 Site_Y에서 Site_M과 Site_G보다 약간 높았고 ($P < 0.1$), 이는 Site_Y가 이동 오염원의 영향을 상대적으로 많이 받았기 때문인 것으로 사료된다. PM2.5 농도는 Site_M과 Site_G에서 Site_Y보다 높았고 ($P < 0.05$), NO_2 농도 또한 Site_M과 Site_G에서 더 높았다 ($P < 0.001$) (Fig. 1).

3.2 조사 대상지의 토양 특성 비교

3개 사이트의 용적밀도는 Site_Y에서 Site_M과 Site_G보다 유의하게 높았다 (Table 2). 이는 사이트 고유의 토양특성으로 Site_Y는 조성된 지 35년이 경과된 자연형 숲 형태의 공원이기 때문으로 생각된다. Site_G는 조성된 지 5년밖에 지나지 않아 복토 등 인공적인 영향에 의한 결과일 것이다. Site_M은 조성된 지 20년이 지난 공원이긴 하지만, 자연형 숲과 연결된 공원이 아닌 매립지를 복토하여 조성한 공원이기 때문에 상대적으로 낮은 용적밀도를 갖는 것으로 판단된다. 토양의 탄소 농도는 Site_M이 가장 높았고 그 다음으로는 Site_Y, Site_G 순이었다 (Table 2). Site_M의 유의하게 높은 탄소 농도는 이 공원이 폐기물 매립지에 기반한 사실이라는 점과 연계된다. 반면, 토양 탄소 저장량 (SCS)을 계산한 결과, Site_M이 2.74 kg C m^{-2} , Site_G가 1.33 kg C m^{-2} , Site_Y가 2.48 kg C m^{-2} 로 나타났다

Table 1. Comparison of traffic volume in the survey area in 2020 (TOPIS, topis.seoul.go.kr)

Site_M	Site_G (vehicles/day)	Site_Y
238,049	97,696	187,760

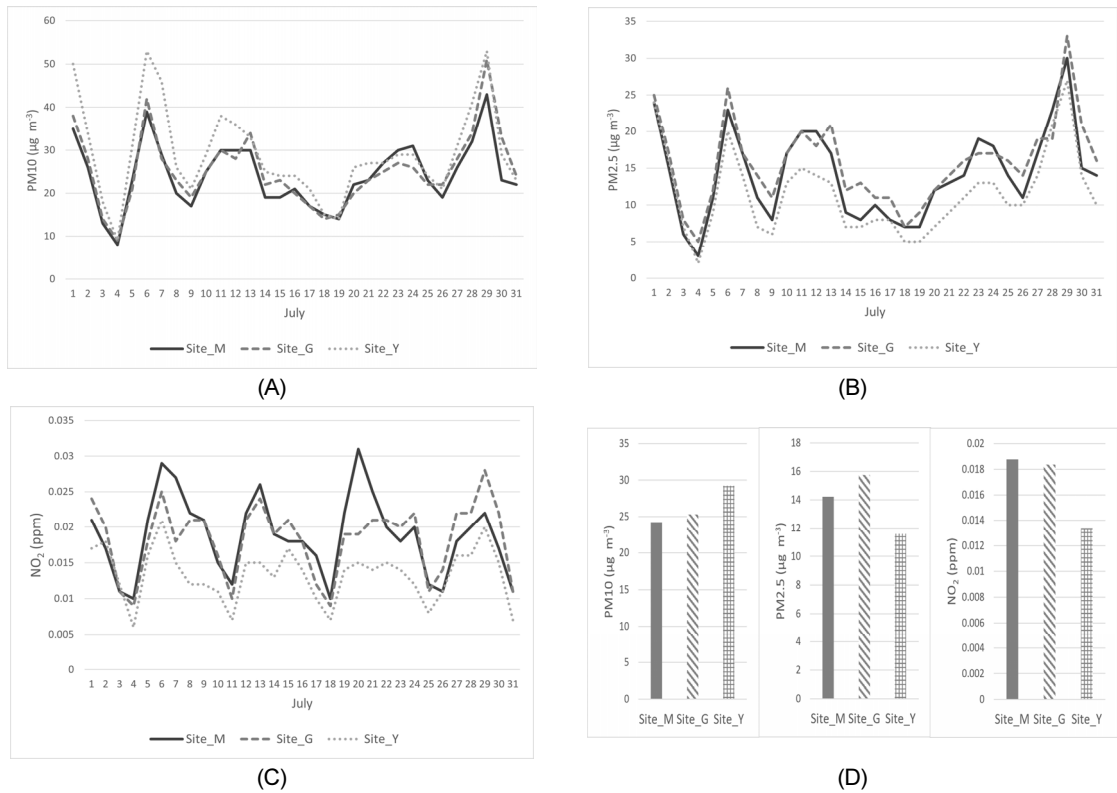


Fig. 1. Comparison of air pollutant concentration in the survey area in July 2021 (Air Korea, airkorea.or.kr). (A) PM10 concentration (B) PM2.5 concentration (C) NO2 concentration (D) Comparison of the average air pollutant concentration.

Table 2. Results of soil analysis

	Bulk Density (g cm ⁻³)	Total C (g kg soil ⁻¹)	Total N (g kg soil ⁻¹)	C/N ratio	pH	NH ₄ ⁺ (mg kg soil ⁻¹)	NO ₃ (mg kg soil ⁻¹)
Site_M	1.10 (a)	16.58 (a)	1.39 (a)	11.18 (a)	6.30 (a)	2.38 (a)	0.60 (a)
Site_G	0.95 (b)	9.32 (b)	0.93 (b)	10.87 (a)	6.23 (a)	2.66 (b)	0.70 (a)
Site_Y	1.48 (c)	11.19 (b)	0.74 (b)	14.67 (b)	5.35 (b)	25.93 (c)	0.67 (a)

(Eq. 1). 이는 Site_M과 Site_Y의 규모가 각각 약 800,000 m², 258,991 m²로 크고 관리 주체가 서울시라는 점과 관련 있을 것으로 생각된다. 비료투입이나 관개와 같은 공원의 식생 관리는 토양으로의 탄소유입을 증가시켜 평형상태의 총 탄소량을 증대시킬 수 있다 (Townsend-Small and Czimczik 2010). Site_G의 면적은 73,090 m²로 Site_M과 Site_Y보다 작고 관리 주체도 강남구(서울시 탄천물재생센터)이다. 즉, 도시 공원의 탄소 저장량은 자연적인 요인 이외에도 공원 관리 등 인위적인 요인에 따라서도 달라질 수 있음을 알 수 있었다. 토양 내 총 질소 및 C/N비도 사이트 별로 상이하게 나타났다(Table 2). Site_Y에서 Site_M과 Site_G

보다 높은 C/N비가 나타났는데, 이 사이트의 조성 년도가 오래 되어 이에 따라 토양으로 유입된 탄소량이 더 많기 때문으로 생각된다.

식물이 주로 흡수하는 무기질소의 형태인 NO₃의 함량은 세 사이트에서 유의한 차이가 보이지 않았다. 반면, NH₄⁺의 함량은 Site_M과 Site_G에 비해 Site_Y에서 매우 높았다 (Table 2). 이는 교통량 및 대기질이 인근 토양의 질소 양분 상태에 영향을 줄 것이라는 본 연구의 가설과 상반되는 결과이다. 도시 내 이동 및 고정 오염원에서 배출되는 PM10, PM2.5, NO₂ 등으로부터의 질소 침적은 토양 내 질소의 무기화 과정 등 질소순환에 유의미한 영향을 미친다고 하기는 어려워 보인다.

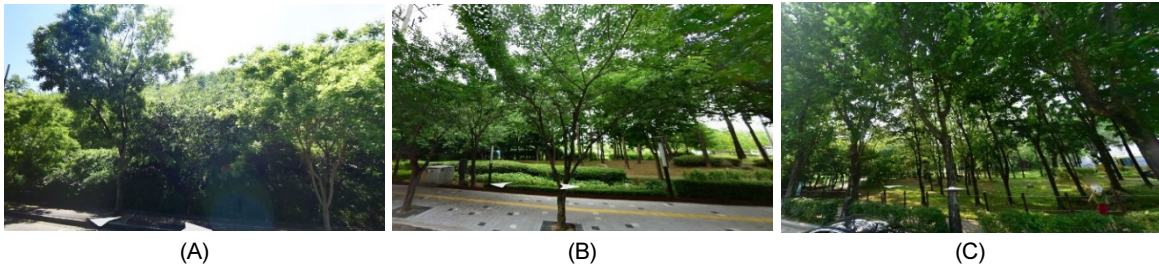


Fig. 2. The plant status of nearby soil sampling site (NAVER Map, map.naver.com). (A) Site_M (in June 2017) (B) Site_G (in June 2021) (C) Site_Y (in June 2021).

Site_Y에서 매우 높은 NH_4^+ 함량이 관찰된 것은 대기 침적에 의한 결과라기 보다는 공원 관리 차원에서의 질소 비료 투입에 따른 영향인 것으로 생각된다. Site_Y에서 Site_M과 Site_G보다 낮은 pH를 보인 것 또한 과도한 비료 사용으로 인해 산성화가 일어났기 때문으로 생각된다 (Table 2). 그러나 Site_Y의 NH_4^+ 농도가 다른 사이트보다 현저히 높았음에도 불구하고 3개 사이트의 식생 상태는 모두 크게 다르지 않고 건강했다 (Fig. 2). 이는 도시 공원 관리에 있어 과도한 비료 투입은 재고할 필요가 있으며 이는 오히려 토양의 산성화를 유발할 우려가 있음을 시사한다.

조사대상지의 대기오염 수준에서는 비록 이동 및 고정오염원으로 인해 대기의 PM, NO_2 등의 농도가 다르다 할지라도 토양의 질소 영양 상태에 직접적 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 서울의 대기 질소 침적량이 약 $24 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 로 (Ahn et al. 2014), 중국 북쪽 지방의 2012년 기준 대기 질소 침적량인 $60.6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Pan et al. 2012)에 비해 낮은 수준인 것과 관련이 있다. 토양의 질소 동태에 영향을 미치는 인자는 매우 다양한데, 상대적으로 낮은 질소 침적량은 다른 인자에 비해 현저한 영향을 미치지 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 대기 질소 침적의 주요 원인인 이동 및 고정 오염원으로부터의 거리에 따라 총 3개의 사이트를 선정하여 대기 중 미세먼지 농도와 NO_2 농도를 비교해 오염원이 대기질에 미치는 영향을 확인하고, 토양 분석을 통하여 대기질의 차이가 도시 공원 토양 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이동 및 고정오염원의 영향을 가장 많이 받는 Site_M에서 대기질 농도와

토양 질소 함량의 상관관계가 가장 클 것으로 예상하였으나, 본 연구의 가설과 달리 토양 내 NO_3^- 함량은 모든 조사대상지에서 유의한 차이가 없었으며 NH_4^+ 함량은 오히려 Site_Y에서 유의하게 높았다. Site_Y에서 관찰된 높은 NH_4^+ 함량은 대기 침적에 의한 결과라기 보다는 공원 관리 차원에서의 비료 사용에 따른 영향인 것으로 생각된다. 그러나 토양 내 NH_4^+ 함량이 상대적으로 적은 Site_M과 G를 포함한 모든 사이트에서 식생이 건강하고, Site_Y에서는 비교적 낮은 토양 pH를 보였으므로 공원 관리에 있어서 과도한 비료 투입을 재고할 필요가 있음을 시사한다. 비록 이동 및 고정오염원으로 인해 대기 중 PM, NO_2 등의 농도가 다르다 할지라도 토양의 질소 영양 상태에 직접적 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었고, 이는 서울 지역의 상대적으로 낮은 질소 침적량이 다른 다양한 인자에 비해 토양의 질소 동태에 현저한 영향을 미치지 어렵기 때문인 것으로 사료된다. 서울 지역에서의 토양 내 질소 양분 상태에 영향을 미치는 요인은 대기질과 대기 질소 침적량보다는 공원 관리 차원에서의 비료 사용과 연관된 것으로 생각되며, 도시 공원 식생 및 토양의 건강성과 비료 사용량의 연관성에 대한 후속 연구가 필요해 보인다.

References

- Aber, J., McDowell, W., Knute, N., Sittia, T., Campagnaro, T., Brundu, G., Faccoli, M., Santini, A., and Webber, B. L. 1998. Nitrogen Saturation in Temperate Forest Ecosystems hypothesis revisited. *BioScience* 48: 921–934.
- Ahn, J., Lee, S., Han, J., Choi, J., and Oh, J. 2014. Study on the characteristics of regional scale wet and dry acid deposition (I). National Institute of Environmental Research. Korea. (in Korean)
- Bettez, N.D. and Groffman, P.M. 2013. Nitrogen depo-

- sition in and near an urban ecosystem. *Environmental Science and Technology* 47: 6047–6051.
- Cho, Y., Driscoll, C.T., Johnson, C.E., and Siccama, T.G. 2010. Chemical changes in soil and soil solution after calcium silicate addition to a northern hardwood forest. *Biogeochemistry* 100: 3-20.
- Cho, Y., Driscoll, C.T. Blum, J.D. 2009. The effects of a whole-watershed calcium addition on the chemistry of stream storm events at the Hubbard Brook Experimental Forest in NH, USA. *Science of the Total Environment* 407: 5392-5401.
- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E. W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R., and Vörošsmarty, C.J. 2004. Nitrogen Cycles: past, present, and future. In *Biogeochemistry* 70: 153-226
- Herai, Y., Kouno, K., Hashimoto, M., and Nagaoka, T. 2006. Relationships between microbial biomass nitrogen, nitrate leaching and nitrogen uptake by corn in a compost and chemical fertilizer-amended regosol. *Soil Science and Plant Nutrition* 52: 186–194.
- Kim, S., Im, G., Yi, C., Lee, S., Sa, J., and Jeon, E. 2013. Development of Carbon Dioxide Emission Factor from Resource Recovery Facility. *Climate Change Research* 4: 51-61 (in Korean)
- Pan, Y.P., Wang, Y. S., Tang, G.Q., and Wu, D. 2012. Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12: 6515–6535.
- Townsend-Small, A. and Czimczik, C.I. 2010. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf. *Geophysical Research Letters* 37: 0-5
- U.S. EPA. 2020. Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen, Oxides of Sulfur and Particulate Matter Ecological Criteria (2nd External Review Draft, June 2018). Center for Public Health and Environmental Assessment Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC, USA. pp. 1-25