

Research Paper

## 도로변 녹지 유형별 미세먼지 농도 저감 효과와 이에 대한 풍속의 영향 연구

최태영\* · 강다인\*\* · 차재규\*\*\*

국립생태원 생태계서비스팀\*, 국립생태원 자연환경조사팀\*\*, 국립생태원 기후탄소연구팀\*\*\*

### Mitigation Effect on Airborne Particulate Matter Concentration by Roadside Green Space Type and Impact of Wind Speed

Tae-Young Choi · Da-In Kang · Jaegy Cha

National Institute of Ecology

**요약:** 본 연구는 도로변에 위치한 완충녹지와 근린공원에서 미세먼지 농도와 풍속을 실측하고, 이를 도로 측 측정결과와 비교분석하여 녹지 유형별 미세먼지 농도 저감 효과와 그에 대한 풍속의 영향을 파악하고자 하였다. 분석결과 도로변 녹지 유형에 따라 미세먼지 농도 저감 효과가 달랐고, 풍속의 증가는 미세먼지 농도 감소에 유의한 영향을 주었다. 식재밀도가 높은 완충녹지에서는 풍속이 낮고 내부에 미세먼지가 정체되어 미세먼지 농도가 가장 높았다. 반면 식재밀도가 상대적으로 낮은 근린공원 내 녹지지역은 풍속이 높고 미세먼지 농도가 가장 낮았다. 근린공원 내 비녹지지역은 가장 높은 풍속을 기록하여 미세먼지 확산에 유리하였으나 녹지지역보다 미세먼지 농도가 높았다. 따라서 도로변 녹지 내 미세먼지 농도 감소를 위해서는 바람 흐름이 원활한 녹지를 조성해야 하며, 높은 풍속과 수목의 저감 기능의 복합적인 작용이 미세먼지 농도 감소에 더 유리한 것으로 판단되었다. 녹지는 내부에 미세먼지를 포착·제거하여 외부 미세먼지 농도 감소에 기여한다. 도시 전체 및 도로 미세먼지 관리를 위해서는 완충녹지와 같은 도로변 녹지에서 식재밀도나 엽면적 등을 높여 미세먼지가 녹지 내에서 제거될 수 있도록 유도해야 한다. 그러나 도시민의 이용이 활발한 근린공원과 같은 녹지에서는 내부 미세먼지가 외부로 확산이 잘 될 수 있는 구조의 녹지를 조성하여 미세먼지로 인한 이용자의 피해를 최소화하는 것이 바람직하다.

**주요어:** PM<sub>10</sub>, 풍속, 완충녹지, 근린공원, 선형 관계

**Abstract:** This study measured PM<sub>10</sub> concentrations and wind speeds in buffer green spaces and neighborhood parks located along the road, and compared them with roadside measurement results to understand the effect of mitigating PM<sub>10</sub> concentrations by type of green space and the influence of wind speeds on it. As a result of the analysis, the effect of mitigating PM<sub>10</sub> concentration was different depending on the type of roadside green space, and an increase in wind speed had a

First Author: Tae-Young Choi, Tel: +82-41-950-5495, E-mail: ty\_choi2016@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-3543-1439

Corresponding Author: Jaegy Cha, Tel: +82-41-950-5490, E-mail: flow@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-1661-6841

Co-Author: Da-In Kang, Tel: +82-41-950-5655, E-mail: kangdi@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-5443-6489

Received: 18 October, 2023. Revised: 19 December, 2023. Accepted: 19 December, 2023.

significant effect on reducing  $PM_{10}$  concentration. In buffer green areas with high planting density, wind speed was low and  $PM_{10}$  stagnated inside, resulting in the highest concentration. On the other hand, green areas in neighborhood parks with relatively low planting density had high wind speeds and the lowest  $PM_{10}$  concentration. The non-green area within the neighborhood park recorded the highest wind speed, which was advantageous for the spread of  $PM_{10}$ , but the concentration was higher than that of the green area. Therefore, in order to reduce  $PM_{10}$  concentration in roadside green space, it is necessary to create green space with good ventilation, and the combined effect of green space and wind speed seems to be more advantageous in reducing  $PM_{10}$  concentration. Green spaces capture and remove PM inside, contributing to reducing the concentration of PM outside. In order to manage PM in the entire city and on roads, it is necessary to increase planting density and leaf area in roadside green spaces, such as buffer green spaces, so that PM can be removed within the green spaces. However, in green spaces such as neighborhood parks that are actively used by city residents, in order to minimize damage to users due to PM, it is desirable to create green spaces with a structure that allows PM to spread to the outside rather than stagnate inside.

**Keywords:**  $PM_{10}$ , Wind speed, Buffer green space, Neighborhood park, Linear regression

## I. 서론

미세먼지의 인체 위해성이 알려지고(Samet et al. 2000), 빈번한 고농도 미세먼지 사례가 관측되면서(Choi et al. 2017) 도시에서 미세먼지 저감 관리가 중요해지고 있다. 국내 미세먼지 저감 대책은 대부분 배출원 관리에 치중되어 있으나(MOE 2013) 이미 배출되어 공기 중에 부유하는 미세먼지의 제거를 위해서는 도시녹지의 역할이 중요하다.

도시에서 녹지는 기류를 따라 유입된 부유 미세먼지를 제거하여 녹지 외부의 도시 미세먼지 감소에 기여한다. 이러한 저감 작용은 녹지의 면적, 구조, 수종, 엽면적 등 다양한 특성(Beckett et al. 2000; Cavanagh et al. 2009; Yin et al. 2011; Saebo et al. 2012; Yang et al. 2015; Wang et al. 2022) 및 강수나 풍속 등 기상요인의 영향을 받으며(Nowak et al. 1998; Chaloulakou et al. 1999; Chae 2009), 그에 따라 녹지 내 수목의 복합적인 미세먼지 제거 기작인 차단(intercept), 침강(sedimentation), 흡착(adsorption), 흡수(intake) 등의 효과도 달라진다(Petroff et al. 2008; Janhall 2015).

따라서 도시에서 녹지를 활용한 미세먼지 관리를 위해서는 산림, 공원, 가로녹지 등 각종 녹지 유형별 특성

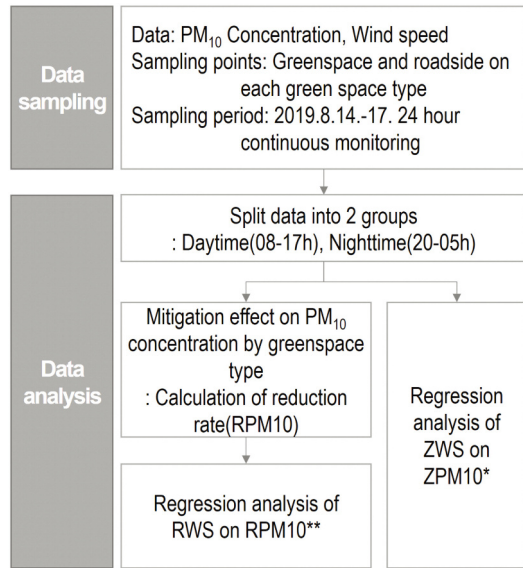
과 미기상이나 도시구조 등 복잡한 도시환경변수의 영향에 따른 미세먼지 저감 효과를 파악해야 한다. 그 중 완충녹지 등 도로변에 위치한 선형의 녹지는 도시 내 미세먼지 주요 발생원인 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하는데 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 도로 미세먼지는 자동차가 통행하며 발생하는 타이어 마모나 재비산먼지, 배기가스 등에 의해 생성된다(Kim 2010). 서울시 배출량의 40% 정도가 도로 발생량으로 보고될 정도로 도로의 배출영향은 높다(NIER 2016).

도로 환경에서 미세먼지와 녹지의 관계에 대해 현장 및 모델링을 통한 많은 해외 연구가 진행되었으나 국내 연구는 많지 않은 실정이라서 다양한 사례 연구가 지속될 필요가 있다(Bowker et al. 2007; Buccolieri et al. 2009; Jin et al. 2014; Chen et al. 2015; Hong et al. 2018). 특히 미세먼지 입자를 대기 중으로 확산시키는 풍속은 녹지의 형태나 구조에 영향을 받으므로(QUARG 1996) 다양한 녹지 특성에 따른 풍속의 영향을 파악할 필요가 있다.

이러한 측면에서 본 연구는 도로변 완충녹지와 근린공원을 대상으로 녹지 내에서 미세먼지 농도와 풍속을 현장 측정하고, 이를 도로측 측정결과와 비교분석하여 녹지 유형별 특성과 풍속에 따른 미세먼지 농도 저감 효과를 파악하고자 하였다.

## II. 연구방법

연구 수행 절차는 크게 현장 실측 자료 수집과 자료 분석 단계로 구분하였다(Figure 1). 자료 수집 단계에서는 미세먼지 농도와 풍속을 녹지측과 도로측에서 4일간 24시간 연속 측정하였다. 자료 분석 단계에서는



\* ZWS and ZPM10 mean daily standardized wind speed and PM<sub>10</sub> concentration, respectively

\*\* RWS and RPM10 refer to relative rate of wind speed (see eq.1) and relative reduction rate of PM<sub>10</sub> concentration (see eq.2), respectively

Figure 1. Flow chart of the research design

먼저 측정자료를 일별 주·야간 평균하여 기본 분석자료를 구축한 후, 세 가지 분석을 진행하였다. 첫째, 미세먼지 농도에 대한 풍속의 영향을 확인하기 위하여 표준화 변환한 풍속(ZWS)과 농도(ZPM10) 자료를 사용한 회귀분석을 실시하였다. 둘째, 녹지 유형별로 미세먼지 농도가 저감되는 효과의 정도를 확인하기 위하여 도로측 대비 녹지측에서 미세먼지 농도가 감소되는 비율인 농도감소율(RPM10)을 산출하였다. 셋째, 농도 감소율에 대한 도로측 대비 녹지측에서의 상대적 풍속 비율(RWS)의 영향을 회귀분석을 통해 파악하였다.

### 1. 연구대상지

도로변 녹지 유형별 미세먼지 농도 특성과 풍속의 관계 분석을 위해 경기도 수원시 왕복 8차선 도로인 덕영대로 변에 위치한 완충녹지와 샘내근린공원을 연구대상지로 선정하였다(Table 1; Figure 2). 덕영대로는 북서 방향에서 남동 방향으로 뻗어있고, 도로의 동측 변으로 녹지가 인접하고 있다. 세부 조사 지점은 도로 북측에서부터 남측까지 순서대로 위치하여 북측 완충녹지 a지점, 가운데 근린공원 내 b, c지점, 남측 완충녹지 d지점으로 총 4개 도로변 녹지 유형을 선정하였다.

완충녹지 a와 d유형은 녹지 폭이 약 16 m, 바닥 형이 높이 약 2 m 정도 마운딩된 형태이다. 주로 스

Table 1. Status of roadside green space type

Type	Green space width (m)	Ground type	Tree species	Shrub species	Mean height (m)	Mean bole height (m)	Tree cover (%)	Shrub cover (%)
a	16	Mound	<i>Pinus strobus</i>	<i>Ampelopsis brevipedunculata</i>	8	5	73.7	0.6
			<i>Acer palmatum</i>					
b	11	Flat	<i>Pinus strobus</i>	-	9	4	80.8	0
			<i>Acer buergerianum</i>					
			<i>Ulmus davidiana var. japonica</i>					
c	45	Flat	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Hibiscus syriacus</i>	13	7	53.7	0.6
			<i>Pinus strobus</i>					
			<i>Acer buergerianum</i>					
d	16	Mound	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	<i>Ampelopsis brevipedunculata</i>	10	5	51.3	0.6
			<i>Pinus strobus</i>					
			<i>Acer palmatum</i>					

트로브잣나무와 단풍나무로 구성된 교목층과 아교목층 수목이 밀도 높게 식재되어 있다. 두 지점 모두 배후 아파트단지 녹지가 연결된 형태로 전체적인 녹지는 더 넓다. 가운데 위치한 근린공원 b유형은 공원 내 이용을 위한 넓은 비식재 공간이며 공원 경계부 녹지로 둘러싸여 있다. b유형 덕영대로측 경계부 녹지 폭은 약 11 m, 지형은 마운딩이 높지 않은 평지에 가까운 형태이다. 식재수목은 스트로브잣나무, 중국단풍 등이다. 근린공원 c유형은 덕영대로변에서 이어진 넓은 녹지 공간으로 녹지 폭 약 45 m, 지형은 b유형과 같은 형태이다. 대로측 경계부에 b유형 경계부와 이어진 유사한 구조의 녹지가 분포하고, 공원 중심부 쪽에는 수고가 높고 하층이 비어있는 소나무 교목층이 분포한다.

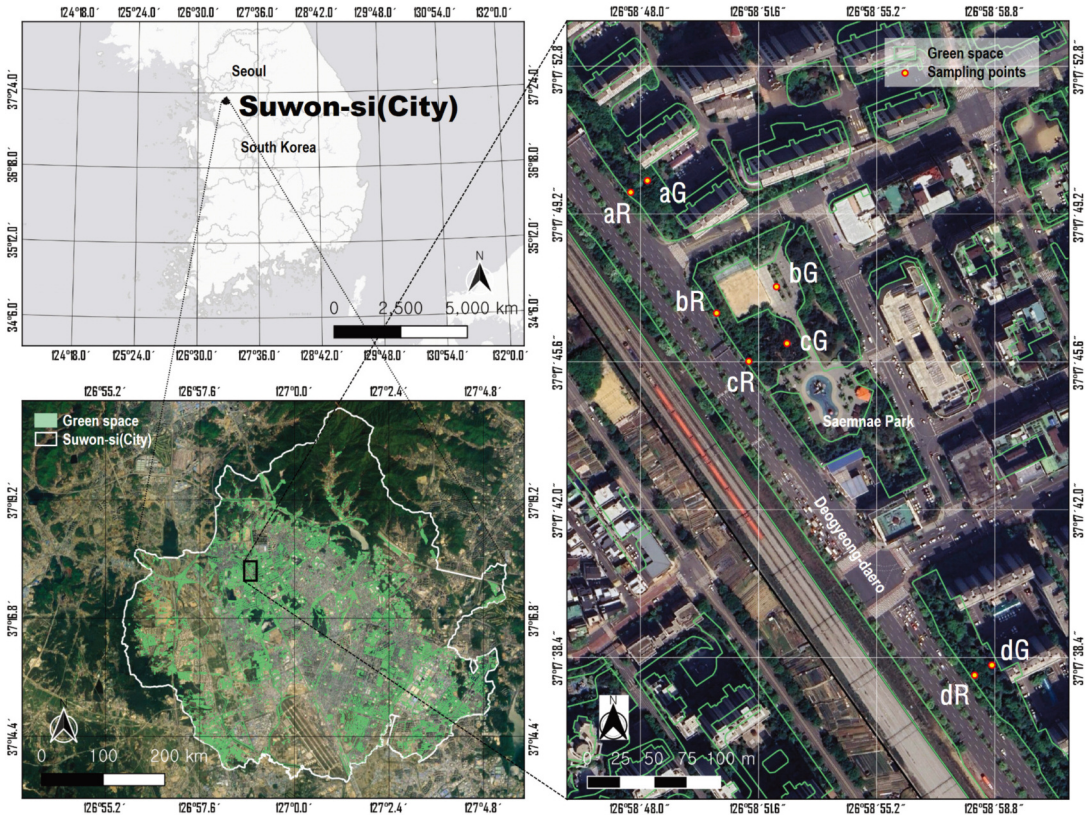
요약하면, 연구대상지는 식재밀도가 높은 완충녹지가 2개소, 경계부가 녹지로 둘러싸인 근린공원 내

비녹지 지역 1개소, 교목층 소나무가 주로 식재된 근린공원 내 녹지지역 1개소로 구성된다. 한편 조사시기인 8월은 수목의 잎 성장이 완성되어 엽면적이 최대로 형성된 시기이며, 꽃가루에 의한 먼지 유발요인도 없어 녹지에 의한 미세먼지 저감 효율이 높을 것으로 판단된다.

## 2. 미세먼지 농도 및 풍속 실측 방법

도로변 녹지 내 미세먼지 농도와 풍속 실측을 위해 각 녹지 유형별 내부 측정지점 4개소(aG, bG, cG, dG)를 선정하였다. 그리고 이를 도로측 측정결과와 비교 분석하기 위해 각 측정지점별 최근접한 대로측 경계에 도로측 측정지점 4개소(aR, bR, cR, dR)를 선정하였다. 측정지점간의 이격거리는 녹지 유형 a, b, c, d 순으로 각각 15 m, 45 m, 30 m, 15 m이었다.

미세먼지 농도는 광산란법 방식으로 측정하는



Type a-d: Roadside green space type (see Table 1), Point G, R: Measurement point on (G) green space, (R) roadside

Figure 2. Study area and location of sampling points

Table 2. Status of daily humidity and PM<sub>10</sub> concentration

		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4
Humidity (%)*		61.8	73.0	75.5	79.3
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Study site	28.7	6.8	17.0	35.8
	Cheoncheon-dong**	33.0	10.7	23.7	34.7
	Sinpung-dong**	27.7	8.8	21.8	33.1

\* Data from weather station operated by KMA in Suwon-si

\*\* Urban measuring station operated by AIRKOREA

Nova PM Sensor SDS011을 사용하여 PM<sub>10</sub> 농도를 측정하였다. 풍속은 ADS-WS1 Weather Station (Harsono et al, 2022)을 사용하여 측정하였다. 성인 호흡 높이를 고려한 지상 약 1.5 m 높이에 미세먼지 농도와 풍속 측정 장비를 한 세트르 설치하였고, 총 8 개소 측정지점의 동시간대 측정결과를 4일간 연속 취득하였다. 동시 측정된 PM<sub>10</sub> 농도와 풍속 값을 시간당 평균 자료로 변환하였고, 각 측정 일당 주간(8~17시) 시간대와 야간(20~5시) 시간대로 구분하여 자료를 구축하였다.

미세먼지를 측정한 Nova SDS011 센서는 최근까지 다수의 연구를 통해 양호한 데이터 품질이 확인되었다(Jayarathne et al, 2020; Mei et al, 2020; Božilov et al, 2022). 일례로 Liu et al, 2019의 연구에서 높은 센서간 상관성( $r > .97$ )과 국가 표준 데이터와의 선형성( $R^2 = .55 \sim .71$ )이 확인되었다. 다만 광산란식 센서의 특성상 높은 습도(RH > 80%)에는 취약할 수 있었다. 본 연구의 측정일별 습도는 61.8~79.3% 범위로 다소 높은 편이었으나(기상청 수원시 측정소 기준, 연구대상지와 4.4 km 이격), 현장 실측한 일별 평균 PM<sub>10</sub> 농도는 연구대상지 주변에 위치한 도시대기 측정망(천천동 측정소 0.4 km 이격, 신평동 측정소 2.9 km 이격)의 공식 측정결과와 유사한 경향을 나타내어 습도의 영향이 크지 않았던 것으로 판단되었다.

### 3. 지점별 미세먼지 농도와 풍속의 관계 분석

지점별 미세먼지 농도에 대한 풍속의 영향을 파악하기 위하여 각 측정지점별 풍속을 독립변수로 하고 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 선형 관계(Ordinary least squares regression)를 분석하였다. 분석 자료는 총 4일간 측정된 일별 측정 결과를 통합

하여 분석하기 위해 8개 지점별 일별 주야간의 미세먼지 농도 및 풍속의 평균값을 일별 표준화된 값으로 변환하여 사용하였다. 지점별 측정값이 전체적으로 유사하게 증감하는 추세적 변화를 나타내고 있어 측정일간 발생하는 시계열적 편차를 제거하기 위해 표준화가 필요하였다.

### 4. 녹지 유형별 미세먼지 농도 감소율 분석

도로변 녹지 유형별로 측정된 녹지 내 미세먼지 농도가 도로측 미세먼지 농도와 비교하여 감소되는 비율을 나타내는 농도 감소율을 Eq.1과 같이 계산하였다. 농도 감소율이 양수이고, 그 값이 클수록 도로측 대비 녹지측의 상대적인 농도가 더 낮다. 미세먼지 농도 자료는 4개 녹지유형별 시간별 측정값을 측정일별 주야간 평균하여 사용하였다.

$$RPM10 = \frac{RoC - GrC}{RoC} \quad (1)$$

RPM10: Relative Reduction Rate of PM<sub>10</sub> Concentration

RoC: Roadside PM<sub>10</sub> Concentration

GrC: Green area PM<sub>10</sub> Concentration

### 5. 녹지유형별 미세먼지 농도감소율과 상대풍속의 관계 분석

도로변 녹지 유형별 미세먼지 농도 감소에 대한 풍속의 영향을 파악하기 위해 도로측 풍속 대비 녹지측의 상대풍속과 미세먼지 농도감소율의 선형 관계(Ordinary least squares regression)를 분석하였다. 상대풍속은 도로측 풍속 대비 녹지측 풍속의 상대적인 차이 비율을 나타낸 값으로 계산 방법은 Eq.2와 같다. 상대풍속이 양수이고, 그 값이 클수록 도로측 대비 녹지측의 상대적인 풍속이 더 높다. 분석 자료

는 측정일별 주야간 평균 풍속을 사용하여 산출한 녹지 유형별 상대풍속과 앞선 분석에 사용된 녹지유형별 농도감소율 자료를 사용하였다.

$$RWS = \frac{GrWS - RoWS}{RoWS} \quad (2)$$

RWS: Relative rate of wind speed  
 RoWS: Roadside wind speed  
 GrWS: Green area wind speed

### III. 결과 및 고찰

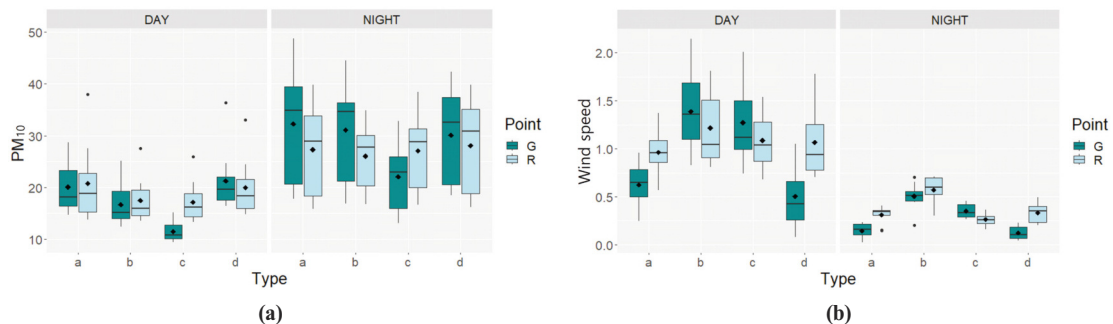
#### 1. 미세먼지 농도 및 풍속 현황

4일간 측정된 8개 지점별 미세먼지 농도(PM<sub>10</sub>)와 풍속을 주간(8~17시)과 야간(20~5시) 시간대로 구분하여 제시하였다(Figure 3). 미세먼지 농도는 전체적으로 주간에 낮고, 야간에 높았다. 녹지 유형별로는 완충녹지 유형인 a, d의 농도가 높고, 근린공원 유형인 b, c의 농도가 낮은 경향이 있었다.

도로측(R)과 비교하여 녹지측(G)의 농도는 주간에 더 낮고, 야간에 더 높은 경향을 나타내었다. 근린공원 내 소나무숲 위주로 구성된 c유형의 녹지측(cG)은 전체 측정지점 중 가장 낮은 농도를 기록하였다. 완충녹지인 d유형의 녹지측(dG)은 주야간 모두 도로측(dR)보다 농도가 높았다. 근린공원 내 비녹지 지역인 b유형 녹지측(bG)은 야간에 주변 완충녹지 유형 녹지측과 유사한 수준의 높은 농도가 확인되어 c유형의 낮은 농도 경향과는 차이가 있었다.

풍속은 전체적으로 주간에 높고, 야간에 낮았다. 녹지 유형별로는 근린공원 유형인 b, c의 풍속이 높고, 완충녹지 유형인 a, d에서 낮은 경향이 있었다. 주간에 도로측 전체지점은 유사한 풍속 범위가 기록된 반면 녹지측 풍속은 근린공원 유형에서 도로측보다 높았고, 완충녹지 유형에서 도로측보다 낮았다. 야간에도 완충녹지 유형은 녹지측 풍속이 도로측보다 낮았고, 근린공원 c유형의 녹지측 풍속이 도로측보다 높아 주간과 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나 근린공원 b유형의 야간 풍속은 도로측보다 낮아 주간과 반대의 결과를 확인하였다.

주간에 전체적인 낮은 미세먼지 농도와 높은 풍속, 반대로 야간에 높은 미세먼지 농도와 낮은 풍속이 확인되어 미세먼지 농도와 풍속은 음의상관의 관계성이 있을 것으로 판단되었다. 이러한 주야간의 농도 차이에 대하여 Liu et al. 2015는 낮시간에 낮은 미세먼지 농도는 높은 기온, 낮은 상대습도, 강한 바람의 영향이라 하였고, Wu et al. 2007은 정오에 미세먼지 농도가 낮고, 새벽과 저녁에는 높았으며, 높은 농도는 출퇴근 시간대 교통량 증가 및 야간의 대기 안정으로 인한 먼지 확산 감소가 원인이라고 하였다. 본 연구에서 미세먼지를 유발하는 차량 통행량(Hoek et al. 2008; Jung 2022)은 고려하지 못하였으나, 일반적으로 주간에 차량 통행이 더 많다고 볼 때 주간 미세먼지 농도가 더 높아야 하지만 측정 결과는 야간이 더 높았기 때문에 차량 통행량의 영향은 낮은 것으로 판단된다.



Type a~d: Roadside green space type, Point G, R: Measurement point on (G) green space, (R) roadside (see Table 1 and Figure 2)  
 Figure 3. Boxplot of (a) PM<sub>10</sub> concentration (µg/m<sup>3</sup>) and (b) wind speed (m/s) during daytime and nighttime by measurement point

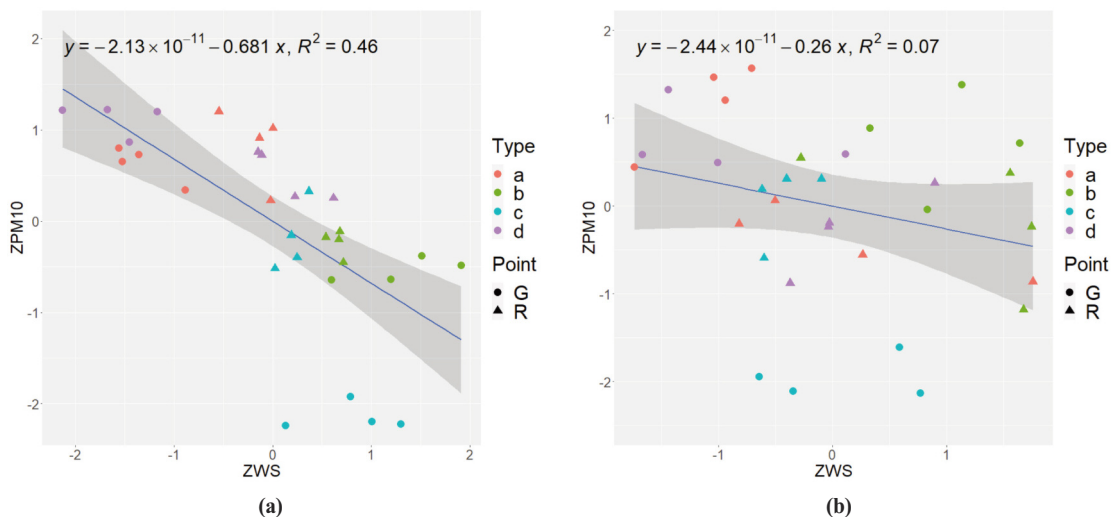
완충녹지 유형(a, d)에서 녹지축(G) 미세먼지 농도는 주야간 모두 상대적으로 높은 경향을 확인하였다. 이는 완충녹지에 밀도 높게 식재된 수목으로 인해 미세먼지가 녹지 내부에 정체된 영향으로 판단되며, 같은 이유로 풍속도 낮은 것으로 판단된다.

교목층 소나무 위주로 구성된 근린공원 c유형 녹지축은 낮은 미세먼지 농도와 높은 풍속을 기록하였는데, 바람이 잘 통하는 상대적으로 낮은 식재밀도와 높은 지하도가 측정지점의 낮은 미세먼지 농도를 형성하는데 유리하였을 것으로 판단된다. 근린공원 내 비녹지지역인 b유형 녹지축은 바람 흐름을 방해하는 장애물이 없어 주야간 모두 가장 높은 풍속을 기록하였으나 미세먼지 농도는 녹지지역인 c유형보다 높았다. 따라서 높은 풍속과 통기성이 좋은 녹지구조의 복합적 작용이 녹지 내 미세먼지 농도 감소에 조금 더 유리할 것으로 추정된다. 이는 도로 환경에서 조밀한 수관 밀도가 고농도를 유발하며(Gromke et al, 2008; Salim et al, 2011), 공기 중 농도 개선은 일정 수준 이하(60~70%)의 가로수 수관 밀도에서 효과적이라는 선행연구와 유사한 결과이다(Jin et al, 2014; Wang et al, 2020).

## 2. 지점별 미세먼지 농도와 풍속의 관계

측정지점별 풍속이 미세먼지 농도에 끼치는 영향에 대한 선형관계를 분석하여 그래프로 제시하였다(Figure 4). 주간 분석결과 지점별 풍속은 미세먼지 농도에 유의한 영향을 주었다( $p < .001$ ). 회귀계수(B)는  $-0.681$ 로 풍속의 증가는 미세먼지 농도 감소에 영향을 주었고, 설명력( $R^2$ )은  $0.464$ 이었다. 이는 다수의 연구에서 밝힌 풍속과 미세먼지 농도의 음의 상관관계를 뒷받침하는 결과이며(QUARG 1996; Cichowicz et al, 2020), 최근 한국 수도권 대상 연구에서 보고된 상관계수( $r = -.86$ ,  $R^2 = .74$ ) 보다는 낮고(Kim et al, 2017), 중국 동북부에서 연구된 상관계수( $r = -.50$ ,  $R^2 = .25$ ) 보다는 높았다(Zhao et al, 2013).

산점도를 보면 근린공원 녹지 b, c유형이 도로측과 녹지축 모두 높은 풍속과 낮은 미세먼지 농도 범위에 분포하였다. 특히 c유형 녹지축의 낮은 미세먼지 농도와 b유형 녹지축의 높은 풍속이 두드러졌다. 완충녹지인 a, d유형은 전반적으로 낮은 풍속과 높은 미세먼지 농도 범위에 분포하였다. 특히 두 유형 모두 녹지축이 낮은 풍속 범위에 분포한 것이 특징이었다. 일반적으로 도로 환경에서 수목은 풍속을 낮추는 요인이며(Gromke et al, 2008), 본 연구에서도 식재



(a) Daytime, (b) Nighttime, Type a~d: Roadside green space type, Point G, R: Measurement point on (G) green space, (R) roadside (see Table 1 and Figure 2)

Figure 4. Result of a linear regression analysis between standardized  $PM_{10}$  concentration (ZPM10) and wind speed (ZWS)

Table 3. Relative Reduction Rate of PM<sub>10</sub> concentration on each measurement day by green space type

Type		a	b	c	d
Day	1	0.08	0.07	0.38	-0.14
	2	0.09	0.05	0.42	-0.23
	3	-0.08	0.05	0.30	-0.06
	4	0.05	0.04	0.31	-0.02
Night	1	-0.24	-0.41	0.18	-0.05
	2	-0.18	-0.02	0.29	-0.20
	3	-0.15	-0.02	0.16	-0.11
	4	-0.11	-0.06	0.18	-0.06

Type a~d: Roadside green space type (see Table 1 and Figure 2)

밀도가 높은 완충녹지에서는 수목이 공기 순환을 방해하여 풍속이 낮았고, 수목이 없는 비식재지역(b유형)에서는 가장 높은 풍속이 기록되었다. 높은 풍속은 미세먼지를 대기 중으로 확산하는데 유리하므로 도로변 녹지 내 미세먼지 농도 감소를 위해서는 높은 풍속 발생에 유리한 녹지구조 구성이 필요할 것으로 판단되었다.

야간 분석결과 풍속은 미세먼지 농도에 유의한 영향을 주지 못하였다( $p=.15$ ). 산점도를 보면 주간과 야간과 비교해서 점들이 전체적으로 넓게 흩어져 있고, 녹지 유형별 지점별로도 분포 경향이 뚜렷하지 않았다. 풍속 실험 결과(Figure 3(b))를 보면 야간 풍속은 측정지점 전체적으로 매우 낮은 수준으로 야간에 매우 약하게 부는 바람이 미세먼지 농도에 영향을 주기 어려웠을 것으로 보이며, 그로 인해 풍속과 미세먼지 농도간 관계성이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

### 3. 녹지 유형별 미세먼지 농도 감소율

4개 녹지 유형별로 측정일별 주야간 도로측 대비 녹지측 미세먼지 농도의 상대적인 감소비율을 산출하였다(Table 3). 측정일에 관계없이 대체로 주간은 양의 값, 야간은 음의 값을 띄어 주간에는 녹지측의 상대적인 농도가 낮고, 야간에는 높은 경향을 확인하였다. 다만 주간에 a유형 3일차와 d유형 전체가 음의 값을 나타내 주간에도 녹지측의 농도가 도로측보다 높았고, 야간에 c유형 전체가 양의 값을 나타내 야간에도 녹지측의 농도가 도로측보다 낮았다.

전체적으로 근린공원 내 녹지인 c유형의 감소율 수

치가 가장 높았는데, 통기성 좋은 녹지와 높은 풍속(Figure 3(b))이 미세먼지 농도를 낮추는 요인인 것으로 판단된다. 반면, 근린공원 내 비녹지지역인 b유형의 감소율은 주간에 낮은 양의 값, 야간에 음의 값을 나타내어 높은 풍속만으로는 미세먼지 농도 감소 효과가 다소 떨어지는 것으로 판단되었다. 이와 관련하여 Wang et al. 2020은 가로수 수관 밀도 35 %에서 농도 감소율이 가장 높았고, 70 %미만까지 양의 감소율을 나타내어 가로수가 없는 도로와 비교해 가로수가 있을 때 농도 감소 효과가 높음을 제시한 바 있다.

완충녹지인 a, d유형은 전반적으로 감소율이 낮거나 음의 값의 수치가 높게 나타나 녹지측 미세먼지 농도가 상대적으로 높은 편이었는데, 완충녹지에 밀도 높게 식재된 수목으로 인해 녹지 내부에 미세먼지가 정체되어 공기 중 미세먼지 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 이와 관련하여 수관 밀도가 증가할수록 PM<sub>10</sub> 농도가 증가하였다고( $R^2=.671$ ) 연구된 바 있으며(Wang et al. 2020), 이는 높은 수관 밀도에 따른 식생 표면적, 엽면적의 증가는 미세먼지 제거율을 높인다는 보고와 같이(Freer-Smith et al. 2005; Bowker et al. 2007) 녹지 내에서 정체된 미세먼지가 수목의 저감기작에 의해 제거되어 녹지 외부 농도 개선에 기여한 것으로 볼 수 있다.

### 4. 녹지유형별 미세먼지 농도감소율과 상대 풍속의 관계

녹지 유형별 상대풍속이 미세먼지 농도 감소율에 끼치는 영향에 대한 선형관계를 분석하여 그래프로



제시하였다(Figure 5). 주간 분석결과 녹지 유형별 상대풍속은 미세먼지 농도감소율에 유의한 영향을 주었다( $p < .01$ ). 회귀계수(B)는 0.324로 녹지측에서 상대풍속의 증가는 미세먼지 농도감소율 증가에 영향을 주었고, 설명력( $R^2$ )은 0.521이었다.

야간 분석결과 녹지 유형별 상대풍속은 미세먼지 농도감소율에 유의한 영향을 주었다( $p < .05$ ). 회귀계수(B)는 0.194로 녹지측에서 상대풍속의 증가는 미세먼지 농도감소율 증가에 영향을 주었고, 설명력( $R^2$ )은 0.364이었다.

주야간 모두 도로측과 비교하여 녹지측에서 상대적인 풍속이 높을수록 녹지측의 상대적인 미세먼지 농도가 낮아지는 것으로 파악되었다. 따라서 도로변 녹지에서 바람이 잘 불 수 있는 환경을 조성하는 것이 녹지 내 미세먼지 농도를 낮추는데 유리한 것으로 판단된다. 이러한 풍속의 영향력은 주간에 더 강하고, 야간에 약하게 나타났다. 이는 지점별 분석에서 야간에 풍속의 영향이 유의하지 않았던 것처럼 야간에 매우 약하게 부는 바람이 원인일 것으로 판단된다.

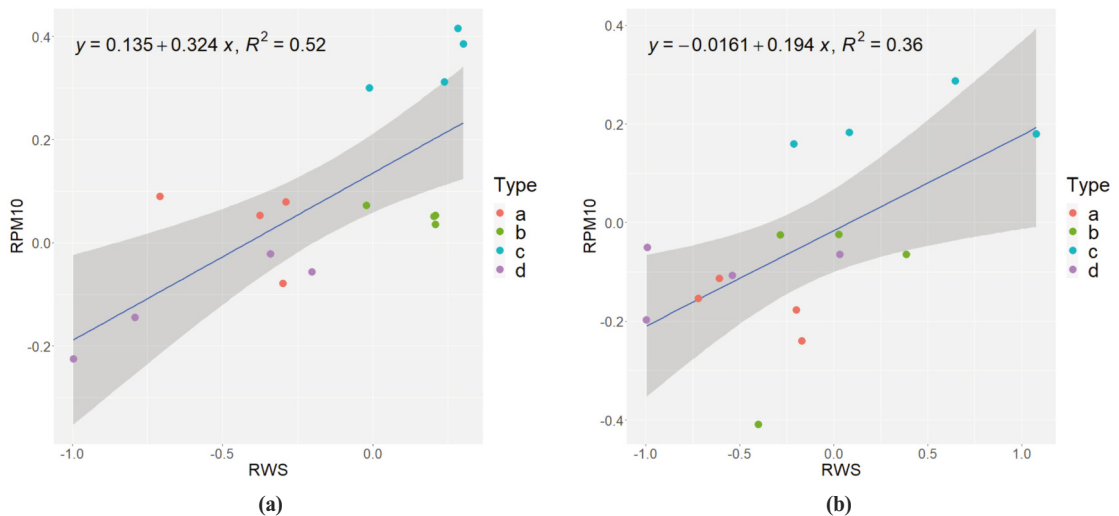
산점도를 보면 완충녹지 유형은 상대적인 풍속이 낮고 농도 감소율도 낮은 범위에 몰려 있고, 근린공원 비녹지지역은 상대 풍속은 높은 편이지만 농도 감

소율이 중간 범위이며, 근린공원 녹지지역은 높은 상대 풍속과 높은 농도 감소율을 나타내고 있다. 이러한 녹지 유형별 차이는 녹지 유무와 식재 밀도에 따른 풍속의 작용에 의한 것으로 해석된다. 특히 통기성이 좋은 녹지에서 비녹지지역보다 미세먼지 감소 효과가 높은 것은 주목된다. 향후에는 관련 연구(Jin et al, 2014; Wang et al, 2020)에서 제시한 바와 같이 도로변 미세먼지 농도 개선을 위한 최적의 식재 밀도 등 구체적인 식재 기준을 제안할 수 있는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 연구는 도로변에 위치한 완충녹지와 근린공원을 대상으로 녹지측과 도로측에서 측정된 미세먼지 농도와 풍속을 비교분석하여 도로변 녹지 유형에 따른 미세먼지 농도 저감 효과와 그에 대한 풍속의 영향을 확인하고자 하였다. 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 미세먼지 농도와 풍속 실측 결과 주간에 낮은 미세먼지 농도와 높은 풍속, 야간에 높은 미세먼지 농도와 낮은 풍속을 기록하여 풍속과 미세먼지 농도가



(a) Daytime, (b) Nighttime, Type a~d: Roadside green space type, Point G, R: Measurement point on (G) green space, (R) roadside (see Table 1 and Figure 2)

Figure 5. Result of a linear regression analysis between relative rate of wind speed (RWS) and Relative Reduction Rate of  $PM_{10}$  Concentration (RPM10)

관계성을 보였다. 이는 선행연구와 유사한 결과로 야간에 안정된 대기는 미세먼지를 정체시킨다(Wu et al. 2007; Liu et al. 2015).

2) 식재밀도가 높은 도로변 완충녹지에서는 전반적인 높은 미세먼지 농도와 낮은 풍속이 확인되었다. 상대적으로 식재밀도가 낮은 도로변 근린공원에서는 전반적인 낮은 미세먼지 농도와 높은 풍속을 기록하였다. 이는 풍속이 더 강했던 근린공원 내 비녹지지역보다 더 낮은 농도이었다. 관련 연구에 따르면 높은 수목 밀도는 공기 중 미세먼지 농도를 높이지만(Gromke et al. 2008; Salim et al. 2011), 통기성 좋은 적정 밀도의 녹지(60~70 % 이하 수관밀도)는 비녹지보다 미세먼지 농도 감소에 효과적이었다(Jin et al. 2014; Wang et al. 2020).

3) 측정지점별 풍속과 미세먼지 농도의 선형관계 분석 결과 주간에 풍속의 증가는 미세먼지 농도 감소에 유의한 영향을 주었다. 낮은 풍속을 기록한 야간은 유의성이 인정되지 않았다. 풍속과 미세먼지 농도의 음의 상관관계는 다수의 연구에서 지속적으로 보고되었다(Zhao et al 2013; Kim et al. 2017; Cichowicz et al. 2020).

4) 녹지유형별 도로측 대비 녹지측에서 미세먼지 농도의 감소율은 대체로 주간에 높고 야간에 낮았으며, 이는 야간 대기 안정으로 인한 먼지 정체 영향으로 해석된다(Wu et al. 2007). 단, 도로변 완충녹지는 높은 수관 밀도로 인한 먼지 정체로 주야간 모두 감소율이 낮은 경향이었다. 정체된 미세먼지는 녹지에서 제거되어 녹지 외부 미세먼지 농도 개선에 기여한다(Freer-Smith et al. 2005; Bowker et al. 2007). 상대적으로 낮은 수관 밀도인 도로변 근린공원 내 녹지는 주야간 모두 비녹지에 비해 농도 감소율이 높아, 관련 연구에서와 같이 통기성 좋은 녹지가 비녹지보다 미세먼지 감소에 효과적이었다(Wang et al. 2020).

5) 녹지유형별 상대풍속과 미세먼지 농도 감소율의 선형관계 분석 결과 주야간 모두 도로측과 비교하여 녹지측에서 상대적인 풍속이 강할수록 녹지측의 상대적인 미세먼지 농도가 낮아지는 것을 확인하였다. 풍속의 영향력은 주간에 더 강했다. 녹지 내 미세먼지

농도 감소를 위해서는 바람이 잘 불 수 있는 녹지 구조 조성이 필요하며, 향후 관련 연구(Jin et al. 2014; Wang et al. 2020)에서 제시된 식재 밀도 등 녹지 구조 조성 기준 제안을 위한 후속 연구가 필요하다.

본 연구를 통해 도로변 녹지 유형별로 다른 미세먼지 저감 효과와 그에 대한 풍속의 영향을 확인하였다. 녹지는 여러 저감 기작을 통해 미세먼지를 제거하고, 바람은 도시에 부유하는 미세먼지를 대기 중으로 확산하여 도시 전체 미세먼지 농도 감소에 영향을 준다. 특히 바람에 의한 확산과 수목의 미세먼지 저감 기능이 복합적으로 작용할 때 미세먼지 농도 감소 효과도 높은 것으로 판단되었다. 따라서 시민 이용이 활발한 도로변 녹지에서는 미세먼지 감소를 위해 바람 흐름이 원활한 녹지 조성이 필요할 것으로 판단된다.

한편 식재 밀도가 높아 바람 흐름이 방해되는 완충 녹지에서는 내부에 정체된 미세먼지로 인해 농도가 높았다. 이는 녹지 내 정체된 미세먼지가 수목의 저감 기작에 의해 제거되면서 도시 전체 차원의 미세먼지를 감소시킨다는 측면에서 긍정적으로 볼 수 있다. 따라서 도시 전체 및 도로 미세먼지 관리를 위해 도로변 녹지의 식재밀도나 엽면적 등의 양적 확대가 필요하다.

본 연구는 복잡한 도로 환경을 대상으로 한 하나의 사례 연구로서 향후 다양한 녹지 유형과 풍향, 강수 등 기상요인, 수목의 세부적 특성이나 계절적 효과 등 다양한 환경 변수를 반영한 연구가 계속된다면 도시 녹지를 활용한 효과적인 미세먼지 관리에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

## 사사

본 논문은 국립생태원 '생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원체계 수립(NIE-고유연구-2023-03)'의 지원을 받아 수행되었으며, 한국환경생태학회 학술대회논문집 29(2)에 일부 소개된 내용을 수정 및 발간 전시했습니다.

## References

- Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylor G. 2000. Particulate pollution capture by urban trees; effect of species and windspeed, *Global change biology*, 6(8); 995-1003.
- Buccolieri R, Gromke C, Di Sabatino S, Ruck B. 2009. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons, *Sci. of the Total Environ.*, 407(19); 5247-5256.
- Bowker GE, Baldauf R, Isakov V, Khlystov A, Petersen W. 2007. The effects of roadside structures on the transport and dispersion of ultrafine particles from highways, *Atmos. Environ.*, 41(37); 8128-8139.
- Božilov A, Tasić V, Živković N, Lazović I, Blagojević M, Mišić N, & Topalović D. 2022. Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9); 595.
- Cavanagh JAE, Zawar-Reza P, Wilson JG. 2009. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanized native forest patch, *Urban forestry & Urban greening*, 8(1); 21-30.
- Chae HJ. 2009. Effect on the PM<sub>10</sub> Concentration by Wind Velocity and Wind Direction, *J. Environ. Sanit. Eng.*, 24(3); 37-54. [Korean Literature]
- Chaloulakou A, Kassomenos P, Spyrellis N, Demokritou P, Koutrakis P. 2003. Measurements of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particle concentrations in Athens, Greece. *Atmos. Environ.*, 37(5); 649-660.
- Chen J, Yu X, Sun F, Lun X, Fu Y, Jia G, Zhang Z, Liu X, Mo L, Bi H. 2015. The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) at shelterbelt site in Beijing, *Atmosphere*, 6; 650-676.
- Choi YJ, Park JK, Jung WS. 2017. Synoptic Meteorological Classification of the Days on Which Asthma Deaths Occurred Due to High PM<sub>10</sub> Concentrations in Seoul, *J. Environ. Sci. Int.*, 26(2); 159-172. [Korean Literature]
- Cichowicz R, Wielgoński G, Fetter W. 2020. Effect of wind speed on the level of particulate matter PM<sub>10</sub> concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant, *J. Atmos. Chemistry*, 77(1-2).
- Freer-Smith PH, Beckett KP, Taylor G. 2005. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupre', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment, *Environ. pollut.*, 133(1); 157-167.
- Gromke C, Buccolieri R, Di Sabatino S, Ruck B. 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-evaluation of CFD data with experimental data, *Atmos. Environ.*, 42(37); 8640-8650.
- Harsono SD, YH NS, Ardinal R. 2022. Implementation Automatic Packet Reporting System (APRS) for Weather Station, *Spektral*, 3(1); 88-92.
- Hoek G, Beelen R, De Hoogh K, Vienneau D, Gulliver J, Fischer P, Briggs D. 2008. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution, *Atmos. environ.*, 42(33); 7561-7578.
- Hong S, Kang R, An M, Kim J, Jung E. 2018. Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and

- Public Openspace in front of Building Site: Case of Openspace of Busan City hall in Korea, *Korean J. Environ. Ecol.*, 32(3); 323-331. [Korean Literature]
- Janhall S. 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution-Deposition and dispersion, *Atmos. Environ.*, 105; 130-137.
- Jayaratne R, Liu X, Ahn KH, Asumadu-Sakyi A, Fisher G, Gao J, ... & Morawska L. 2020. Low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors: An assessment of their suitability for various applications, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(3); 520-532.
- Jin S, Guo J, Wheeler S, Kan L, Che S. 2014. Evaluation of impacts of trees on PM<sub>2.5</sub> dispersion in urban streets, *Atmos. Environ.*, 99; 277-287.
- Jung DY. 2022. A Model for Estimating Near-road Particle Matter Concentrations – Based on Historical Data for Traffic, Meteorology, Background Concentration –, J. Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23(11); 897-907. [Korean Literature]
- Kim YP. 2010. Analysis of the trend of atmospheric PM<sub>10</sub> concentration over the Seoul Metropolitan Area between 1999 and 2008, *J. Environ. Impact Assessment*, 19(1); 59-74. [Korean Literature]
- Kim HC, Kim S, Kim BU, Jin CS, Hong S, Park R, ... & Stein A. 2017. Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific reports*, 7(1); 4710.
- Liu X, Yu X, Zhang Z. 2015. PM<sub>2.5</sub> concentration differences between various forest types and its correlation with forest structure. *Atmosphere*, 6(11); 1801-1815.
- Liu HY, Schneider P, Haugen R, Vogt M. 2019. Performance assessment of a low-cost PM<sub>2.5</sub> sensor for a near four-month period in Oslo, Norway, *Atmosphere*, 10(2); 41.
- Mei H, Han P, Wang Y, Zeng N, Liu D, Cai Q, ... & Tang X. 2020. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in Beijing, *Sensors*, 20(16); 4381.
- MOE (Ministry of Environment). 2013. Basic Plan on the 2nd stage Metropolitan Area Air Quality Management, Ministry of Environment, 1107. [Korean Literature]
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2016. Annual report of air quality in Korea 2015, National Institute of Environmental Research, 1-362. [Korean Literature]
- Nowak DJ, McHale PJ, Ibarra M, Crane D, Stevens J, Luley C. 1998. Modeling the effects of urban vegetation on air pollution, *Air pollution modeling and its application XII*, Springer Boston MA, 399-407.
- Petroff A, Mailliat A, Amielh M, Anselmet F. 2008. Aerosol dry deposition on vegetative canopies, Part I: review of present knowledge, *Atmos. Environ.*, 42(16); 3625-3653.
- Quality of Urban Air Review Group. 1996. Airborne particulate matter in the United Kingdom, Vol. 3, The Department.
- Salim SM, Cheah SC, Chan A. 2011. Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES, *Building and Environ.*, 46(9); 1735-1746.
- Samet JM, Dominici F, Currier FC, Coursac I, Zeger SL. 2000. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities 1987-1994, *New England J. medicine*, 343(24); 1742-1749.
- Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW. 2012. Plant species differences in particulate matter

- accumulation on leaf surfaces, *Sci. the Total Environ.*, 427; 347-354.
- Wang X, Teng M, Huang C, Zhou Z, Chen X, Xiang Y. 2020. Canopy density effects on particulate matter attenuation coefficients in street canyons during summer in the Wuhan metropolitan area, *Atmos. Environ.* 240; 117739.
- Wang F, Sun B, Zheng X, Ji X. 2022. Impact of block spatial optimization and vegetation configuration on the reduction of PM<sub>2.5</sub> concentrations: A roadmap towards green transformation and sustainable development, *Sustainability*, 14(18); 11622.
- Wu Z, Wang C, Xu J. 2007. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer, *Journal-Tsinghua University*, 47(12); 2153.
- Yang J, Chang Y, Yan P. 2015. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM<sub>2.5</sub> pollution, *Atmos. pollut. research*, 6(2); 267-277.
- Yin S, Shen Z, Zhou P, Zou X, Che S, Wang W. 2011. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China, *Environ. Pollut.*, 159; 2155-2163.
- Zhao H, Che H, Zhang X, Ma Y, Wang Y, Wang H, Wang Y. 2013. Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China, *Atmos. Pollut. Research*, 4(4); 427-434.