

논문

# 도시지역 공원 수목 분포에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 오염도 특성 변화 분석

## Analysis of the Distribution of Fine Particulate Matter (PM-2.5) Pollution according to Types of Urban Forest Park

김지태, 엄권욱, 여상구, 조희지, 우수영<sup>1)</sup>, 이종규<sup>1)</sup>, 동종인\*

서울시립대학교 환경공학부, <sup>1)</sup>서울시립대학교 환경원예학과

Jitae Kim, Kwon-wook Eom, Sang-gu Yeo, Hee-ji Cho, Su Young Woo<sup>1)</sup>, Jong Kyu Lee<sup>1)</sup>, Jong-in Dong\*

Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea

접수일 2023년 3월 16일  
수정일 2023년 4월 4일  
채택일 2023년 4월 12일

Received 16 March 2023  
Revised 4 April 2023  
Accepted 12 April 2023

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)2-6490-2853  
E-mail : jidong@uos.ac.kr

**Abstract** There have been several research results on the effects of urban forests on the reduction of atmospheric air pollutants including fine particulate matter due to their adsorption or filtering mechanism as well as excluding air pollution sources in those area. This study was intended to figure out these effects specifically in Seoul, a large urbanized metropolitan area. This study investigated the distribution characteristics of PM-2.5 according to the greenery ratio of urban areas and the topographic features of urban forests. Three urban fields including two mountainous and one flat were selected for the characterization. The obtained field concentrations were compared with data from the national stations and modelling (AERMOD). The results showed that residential areas with relatively high greenery ratio had around 18% lower PM-2.5 concentration. The PM-2.5 concentration measured in mountainous urban forests was significantly lower than those of the national air pollution monitoring stations and similar to that of AERMOD modeling prediction. In flat urban forest, there was no significant difference when compared with mountainous urban forests, but it was 1~2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  lower than that of the national air pollution monitoring stations. These results demonstrate that both mountainous and flat urban forests can influence local PM-2.5 concentration regardless of topographical features. Therefore, the composition of green spaces in urban areas could be utilized to reduce PM-2.5 pollution in urban environment.

**Key words:** PM-2.5, Urban forest, Dispersion modelling, Green adsorption

### 1. 서론

우리나라에서는 최근 대기 중 고농도 미세먼지 사례가 꾸준히 발생하고 있으며 이에 대한 사회적 관심이 고조되고 있다. 미세먼지란 대기 중에 존재하는 입자상 오염물질이며 입径의 크기에 따라 미세먼지(PM-10)와 초미세먼지(PM-2.5)로 구분하며, 작은 입자일수록 호흡기 등 인체에 더욱 깊숙이 침투하여 악영향을 미친다. 미세먼지의 대기 중 농도가 증가함에

따라 천식, 폐렴 등과 같은 호흡기 질환으로 인한 입원율이 상승한다는 연구 결과도 발표되어 있다(Qiu *et al.*, 2014; Sheppard *et al.*, 1999). 이에 따라 정부에서는 미세먼지 배출원 규제, 예보 시스템 구축, 비상저감조치 운영 등과 같은 다양한 정책을 시행하여 미세먼지로 인한 피해를 줄이고자 노력하고 있으나, 주로 산업단지 등 대형 배출 시설 위주여서 시민 생활권과는 거리가 있다. 이에 산림청에서는 시민 생활권 내 미세먼지 저감과 쾌적한 환경조성을 위하여 차단숲,

저감숲, 바람길숲 등과 같은 미세먼지 저감 도시숲 모델을 개발하여 도심지에 적용하고 있다(NIFS, 2019).

수목에 의한 PM-2.5 저감에 관한 연구는 국내외 많은 연구자에 의하여 진행되었다. Gomišček *et al.* (2004)은 PM-2.5 중 입경이  $1\ \mu\text{m}$  이하인 PM-1의 비율이 약 70% 정도라는 결과를 보고하였으며, 이러한 매우 작은 입자들은 자연 침강에 의한 제거가 어려운 특성이 있다. 그러나 수목이 대기 중에서 확산하는 미세먼지의 이동을 방해하는 필터 역할을 함으로써 대기 중 입자 제거의 중요한 메커니즘인 건성침적(dry deposition)에 의한 제거를 기대할 수 있다(Räsänen *et al.*, 2014). 특히, Yin *et al.* (2019)은 미립자가 수목의 잎 표면에 충돌할 때 입자 간의 응집과 건성침적이 발생한다는 것을 확인하였다. 또한 수목의 잎에 형성되어 있는 왁스층과 잎의 표면층을 조사한 Mo *et al.* (2015)의 연구 결과에서는 미세먼지의 흡수 및 흡착량이 높은 것을 확인하였으며, Zhang *et al.* (2015)은 잎의 형태에 따라 미세먼지의 흡착량이 달라진다는 것을 보고한 바 있다.

이와 같은 숲 및 수목의 미세먼지 저감 효과를 기초

로 하여, 본 연구에서는 도심지에서의 녹지 비율 특성과 도시숲의 지형(산지/평지)에 따른 PM-2.5 오염도 분포 특성에 관한 연구를 진행하였다. 또한 각 특성에 따른 실측 결과를 대기확산모델(AERMOD) 결과와 비교·분석하여 도시숲 내 수목이 PM-2.5 오염도에 미치는 영향을 분석하여 보았다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 대상지역 선정

본 연구에서는 도로변 및 도시대기의 미세먼지 농도와 비교할 수 있도록 도심지에 있는 도시숲을 연구 대상으로 검토하였다. 미세먼지 농도는 측정소의 위치, 주변 도로의 교통량, 토지 이용 현황 등과 같은 요인의 복합적 영향에 의하여 변화하지만, 대규모 녹지 지역은 타지역과 비교하여 상대적으로 낮게 나타나는 경향이 있다(SI, 2018). 이러한 점을 고려하여 PM-2.5의 오염도가 상대적으로 높고 도심지 내에 위치하고 있는 서울특별시 동대문구 내 도시숲을 연구 대상지

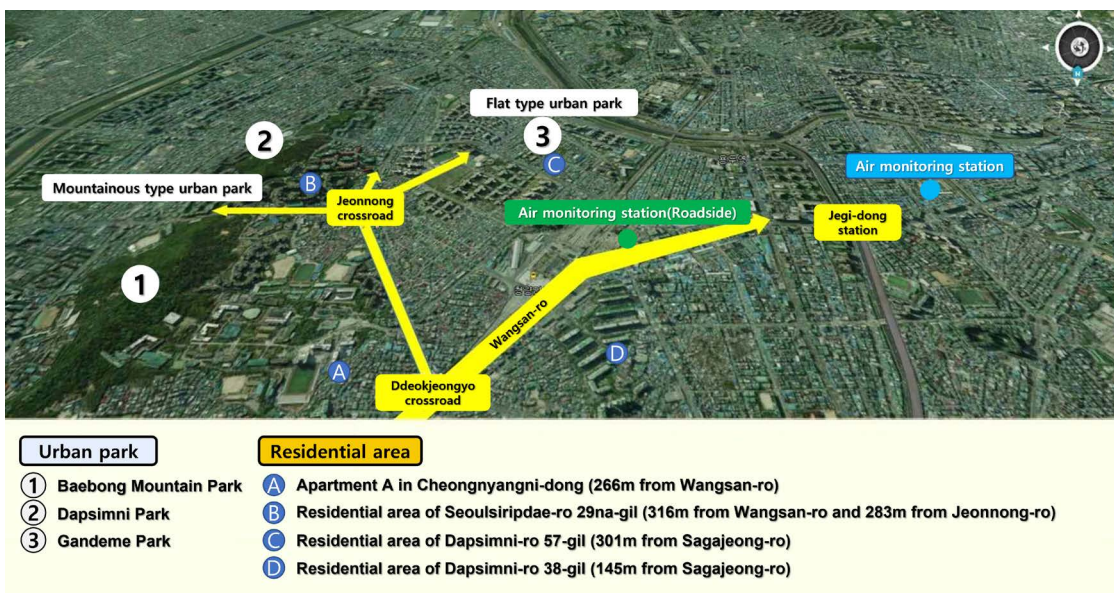


Fig. 1. Test fields of urban forests and residential areas for measurement of PM-2.5.

로 선정하고자 하였다.

동대문구 내 여러 도시숲 중에서 수목에 의한 미세먼지 저감 효과를 확인하기 위한 연구 대상지를 선정하기 위하여 선정기준을 설정하였다. 첫 번째는 Choi *et al.* (2018)의 토지이용현황 및 산림 비율에 따라 미세먼지 오염도 및 농도가 낮다는 연구 결과를 바탕으로 주변 환경과 녹지면적 등에 따른 PM-2.5 농도의 비교 가능 여부를 설정하였다. 두 번째는 도시숲의 PM-2.5 농도 차이의 원인이 수목의 영향인지 지형의 영향인지 판단하기 위하여 산림구조(지형)에 의한 PM-2.5 농도 비교 가능 여부를 설정하였다. 선정기준에 따라 최종 연구 대상지로 선정된 도시숲은 배봉산/답십리 근린공원(산지형), 간데메공원(평지형)이며, 비교 분석을 위한 대상 도시숲 주변 주거지역 4곳을 포함한 모든 연구 대상지 정보를 그림 1에 지도로 나타내었다.

배봉산과 답십리 근린공원은 산림 조성에 인공적인 수목의 식재가 없는 자연 상태의 숲으로 천연림으로 분류된다. 그림 2에는 주요 수종 파악을 위하여 수집한 동대문구 임상도(1:5000)를 나타내었으며, 두 근린공원의 주요 수종은 공원 내 지역별로 기타참나무류(NQQ-24C)와 침활혼효림(NMM-24C)으로 나타났다. 기타참나무류 또는 침활혼효림으로 분류된 지점은 각각 참나무류 또는 침엽수림 및 활엽수림의 수관 점유면적 및 입목본수 비율이 75% 이상인 임분을 의미하며, 기타참나무류 지역에서는 신갈나무, 상수리나무 등이 분포하고 있었고, 침활혼효림 지역에서는 아까시나무 등이 분포하고 있었다. 간데메공원은 지역 내 유희부지를 공원으로 만든 인공 도시숲이며 동대문구 답십리동 주택밀집지역에 위치하여 인근 주민들에게 조정시설 및 운동시설로 제공되고 있다. 간데메공원에 대한 임상도 자료의 부족으로 추가적인 조사를 시행한 결과, 공원 내 주요 수종은 소나무였으며 미세먼지 저감 능력이 좋은 상록수인 섬잣나무 및 계수나무 외 관목과 함께 36종의 수목이 식재되어 있었다.



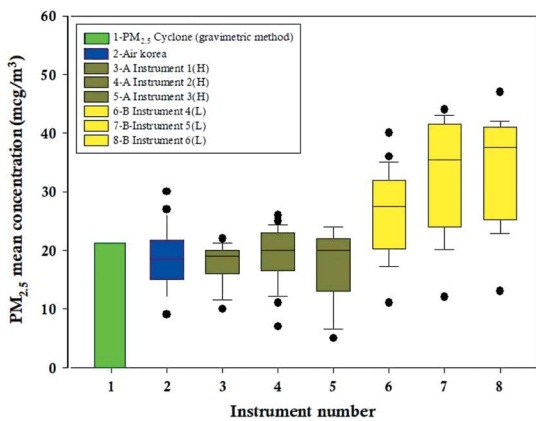
Fig. 2. Forest distribution map of Baebong Mountain and Dapsimni park.

## 2.2 PM-2.5 오염도 측정 기기

연구 대상지에서의 PM-2.5 측정을 위하여 두 종류(A, B)의 광산란 방식에 의한 측정기기를 사용하였다. 먼저 측정기기의 측정값에 대한 신뢰도를 판단하기 위하여 연구 대상지 중 대기오염측정망에서 가장 가까운 주거지(그림 1(C))에서 사전 테스트를 진행하였으며, 사전 테스트는 동일 지점에서 각각 3개의 A 기기 및 B 기기를 거치하여 24시간 동안 진행하였다. 광산란 방식의 측정기기와 PM-2.5 cyclone을 사용한 중량농도법으로 동시에 측정하여 결과값을 비교하였으며, 이를 한국환경공단의 대기오염측정망 데이터와 비교한 결과를 표 1과 그림 3에 나타내었다. A 측정기의 신뢰도는 대기오염측정망 데이터 및 중량농도법을 기준으로 약 10% 내외의 오차를 보였으나, B 측정기는 최대 68%의 오차를 보여 측정값의 정확성이 매우 떨어졌다. 또한 A 측정기의 PM-2.5 측정 결과는 대기오염측정망 결과와 0.66~0.83의 상관계수를 보였고, B 측정기의 결과는 0.7 이상의 상관계수를 나타내었

**Table 1.** Evaluation of measurement reliability.

	1- Gravimetric method	2- National station	3-A Equipment	4-A Equipment	5-A Equipment	6-B Equipment	7-B Equipment	8-B Equipment
Concentration of PM-2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	19.96	17.92	19.08	17.77	26.71	32.39	33.46	20.79
Relative error with gravimetric method	4%	14%	8%	15%	28%	55%	60%	-
Correlation coefficient with national station	-	0.72	0.77	0.66	0.83	0.74	0.71	-

**Fig. 3.** Comparison of PM-2.5 concentration between measuring instruments.

다. 이에 따라 본 연구에서는 A 측정기 3대를 사용하여 각 연구 대상지의 지표면에 설치하여 연구를 진행하였다. 광산란 방식에 의한 측정기기는 중량법 또는 베타선법에 비하여 신뢰도가 낮은 간이 측정방식의 기기이므로 성능 유지관리를 위하여 기기의 오차 확인을 위한 측정과 영점 교정 등을 주기적으로 실시하여 연구에 활용하였다.

### 2.3 대기확산모델링

국내에서는 도로 영향 예측을 위하여 선오염원 적용 모델 중 AERMOD와 CALINE3를 많이 사용하고 있다. 그러나 CALINE3는 지형과 1 m/s 이하의 저풍속에 대해 고려를 하지 못하는 단점으로 인하여 AERMOD에 비하여 실측치와의 상관성이 상대적으

로 떨어진다(Kim *et al.*, 2018). 이에 본 연구에서는 미국 EPA와 환경부의 권장 모델로 사용되고 있는 대기 확산모델인 AERMOD를 사용하였다. AERMOD는 대기 중 공간이 균일하다는 가정을 바탕으로 만들어진 ISC3를 기초로 하여 그 한계점을 보완한 Gaussian Plume 식을 사용하여 점, 선, 면 등 다양한 오염원과 복잡한 지형에 대한 계산이 가능하도록 개발되었으며, Building wake effect, Stack up downwash 등과 같은 세부적인 모델 수행도 가능하다. AERMOD는 대기경계층 상사이론(Similarity theory)을 이용하여 고도별 연기확산계수 및 풍속을 모델 수행에 반영할 수 있도록 개정된 모델이다(KEI, 2005a). AERMOD의 기본 방정식은 다음과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{QVD}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (1)$$

$$C(x, y, z)_{total} = \gamma C(x, y, z)_{PRIME} + \gamma C(x, y, z)_{AERMOD} \quad (2)$$

$$\gamma = \exp\left[\frac{-(x-\sigma_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[\frac{-(y-\sigma_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \exp\left[\frac{-(z-\sigma_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (3)$$

여기서, C는 수용지점 오염물질 농도, x는 풍하방향 거리, y는 x축에 직각인 풍횡방향 거리, z는 연직방향 거리, Q는 배출원의 오염물질 배출량, U는 배출원에서의 대기 풍속, V는 수직확산항, D는 단순일차반응에 의한 오염물질 감쇄항,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ 는 x, y, z 방향의 연

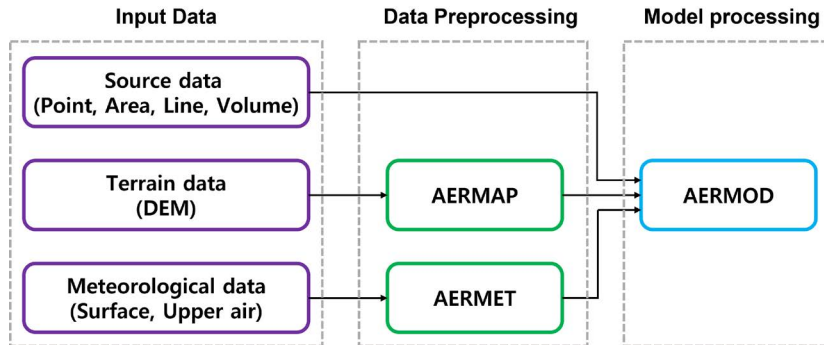


Fig. 4. Schematic of AERMOD process.

Table 2. Total emission of PM-2.5 of Dongdaemun-gu in 2011 (NAEIRC, 2013). (unit: kg/yr)

Total	Non-industry	Manufacturing industry	Energy transport and storage	Solvent use	Road transport	Non-road transport	Waste disposal	Agriculture	Other surface-pollutant source
42,594 (100%)	5,652 (13.3%)	32 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	25,365 (59.6%)	10,387 (24.4%)	0 (0%)	0 (0%)	1,158 (2.7%)

기확산 계수이다.

AERMOD는 모델 수행을 위한 AERMOD와 함께 입력자료의 전처리를 위한 AERMET (기상자료 전처리) 및 AERMAP (지형자료 전처리)으로 구성되어 있으며 (US EPA, 2004), AERMOD 모델의 진행 방식은 그림 4와 같다. AERMOD에서는 실제 지형의 높낮이 즉, 고도에 대한 반영이 가능하지만 녹지 등과 같은 특수한 지역적 특성은 반영되지 않는다는 한계점이 있으므로 이러한 부분이 오차의 요인이 될 수 있다.

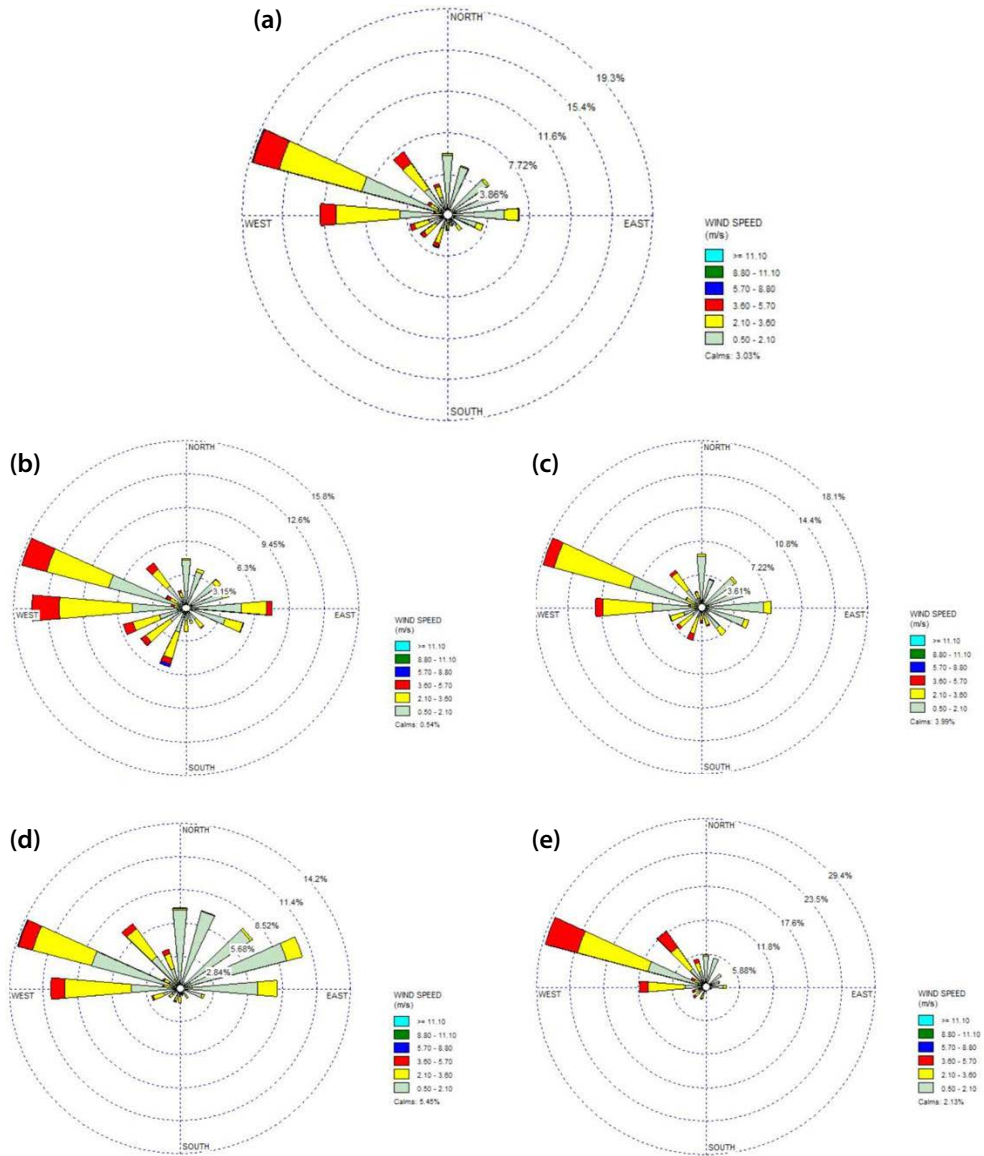
#### 2. 4 대기확산모델링 입력자료

AERMOD 모델에 사용하기 위한 PM-2.5 배출 농도 산정을 위한 배출원을 조사하였다. 표 2에서 나타난 바와 같이 국가미세먼지정보센터의 대기오염물질 배출량 (2011) 자료를 검토한 결과, 동대문구 PM-2.5 배출량 중 가장 큰 영향을 미치는 오염원은 도로이동 오염원이 가장 중요한 배출원으로 나타났으며 다른 배출원의 경우, 연구 대상지에 직접적인 영향이 적은 분야로 판단되었다. 이에 AERMOD 모델을 위한 PM-

2.5 배출원으로 도로이동오염원을 선정하였다. 도로 이동오염원의 배출량 계산을 위하여 서울시 동대문구 차량 등록자료 (2019)와 과거 교통량 조사자료를 바탕으로 최종 교통량자료로 결정하였다. 연구 대상지 인근의 주요 도로인 전농동사거리 및 청량리사거리의 교통량을 사용하여 PM-2.5 배출량을 산정하기 위하여 자동차 규모별 및 연료별 등록현황에 의한 비율을 계산하여 배출계수에 적용하였다.

AERMOD 모델의 지형 전처리 프로그램인 AERMAP으로 NASA에서 공개하고 있는 지형자료를 가공한 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission 3, Global ~90 m)를 사용하여 고도 지형자료를 입력하였다. 연구 대상지와 선오염원을 포함하는 범위를 청량리역을 중심 ( $X_{UTM}$ : 327674.99,  $Y_{UTM}$ : 4161101.09)으로 3.5 km × 3.5 km의 면적을 X, Y축으로 90 m 간격으로 40개의 구간으로 분할하여 지형자료를 적용하였다.

기상청에서 제공하는 2018년 기상자료를 가공하여 AERMOD에 입력하였다. 지상기상관측지점은 서울



**Fig. 5.** Windrose of (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter in 2018 of Seoul reported from Korea Meteorological Administration.

(SF\_ID: 43108, 해발고도 (H) = 85.7 m)이며 고층기상 관측지점은 서울에서 가장 가까운 오산(UA\_ID: 00047122) 고층기상대의 관측자료를 사용하였으며, 지상기상자료를 사용한 계절별 및 연 주풍향은 그림 5와 같다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 주변 토지 이용 형태에 따른 PM-2.5 오염도 영향 분석

도심지에 위치한 공원의 수목은 자체적인 오염물질 흡수 제거 기능은 작지만, 상대적으로 다른 지역보다

오염물질의 배출원이 적고 해당 지역 또는 주변 지역에 원활한 기류 소통을 촉진하는 친환경적인 토지 이용 형태를 가짐으로써 대기환경의 악화를 억제하는 효과가 있다는 보고가 있다(KEI, 2005b). 이에 따라 본 연구에서는 주변 환경의 녹지 비율에 따른 2곳의 PM-2.5 측정지역을 선정 및 실측을 진행하였고, 그 결과를 인근의 도로변 대기오염측정망의 자료와 비교하였다. 측정지역 1은 주택밀집지역과 일반상업지역이 혼합되어 공원 또는 산림이 부족하여 녹지 비율이 매우 낮은 지역이며, 측정지역 2는 배봉산과 인접한 지역으로 녹지 비율이 상대적으로 높은 환경을 구성하고 있다.

그림 6에서 PM-2.5 농도 비교 결과를 확인해 보면, 도로의 영향을 직접적으로 받는 도로변 대기오염측정망의 결과가 가장 높게 나타났으며, 주요 도로에서 200 m 이상 떨어진 곳에 위치한 실측지역의 PM-2.5 농도는 측정지역 1이 측정지역 2보다 평균적으로 약 22% 정도 높은 값을 보였다. 녹지 비율이 높은 측정지역 2는 도로변 대기오염측정망의 결과에 비하여 평균 42%의 차이를 보였으며 측정지역 1과는 평균 20%의 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 토지이용도에 따라 오염물질의 발생량 억제와 수목의 저감 효과 등의 영향에 의한 것으로 판단된다. 특히, 측정지역 1은 주요 배출원인 도로 외에도 상업지역으로부터 배출되는 오

염의 영향이 있을 것으로 예상되며 측정지역 2의 경우 상대적으로 배출원이 적은 주택지역이며 측정지역 1에 비하여 높은 녹지 비율이 영향을 미친 것으로 사료된다.

### 3.2 지형에 따른 PM-2.5 오염도 분석

수목의 오염물질 저감 효과에 의하여 수목이 밀집된 도시숲은 도심지에서 상대적으로 낮은 PM-2.5 농도를 보일 것이라는 가정을 확인하고자 연구 대상으로 선정된 산지형 도시숲 2곳과 인근의 주거지역에서 PM-2.5 실측을 진행하였으며, 이를 대기오염측정망 결과와 비교·분석한 결과를 그림 7에 나타내었다.

산지형 도시숲인 배봉산과 답십리 근린공원의 일 평균 PM-2.5 농도 실측 결과는 도로변 및 도시대기 대기오염측정망 결과보다 낮은 경향성을 확인하였으며 일 최댓값에서도 도시숲의 농도가 낮게 나타났다. 도시숲 인근 주거지역의 PM-2.5 농도는 일 평균값이 대기오염측정망 결과보다 대체로 낮게 나타났으나 더 높은 날도 있었으며 시간 평균값에서는 대기오염측정망보다 높은 농도를 보이기도 하는 등 도시숲 측정 결과와 같은 눈에 띄는 농도의 경향성을 발견하지 못하였다. 이는 도시숲의 수목과 같은 직접적인 PM-2.5 차단 효과가 없기 때문에 다양한 배출원과 기상 상황 등과 같은 여러 요인으로부터 받는 영향 때문으로 판단된다.

입목의 밀도가 밀하고 다양한 수고로 분포되어 있으며 넓은 수관부에 의한 캐노피를 이루고 있는 산지형 도시숲에서의 PM-2.5 농도가 수목에 의한 대기 중 미세먼지 차단과 흡수 및 흡착 효과에 의하여 상대적으로 낮은 농도를 나타내는 것인지를 확인하기 위하여 캐노피 효과를 기대하기 어려운 공원 중심에서 PM-2.5 농도 측정을 진행하였다. 측정 결과에서는 캐노피 효과가 없음에도 도로변 및 도시대기 대기오염측정망 PM-2.5 농도 결과보다 낮은 경향성을 유지하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 산지형 도시숲의 지형적 특성 즉, 고도가 높은 지형이 PM-2.5 농도에 영향을 미치는 것으로 추정되며, 수목의 오염물질 저감

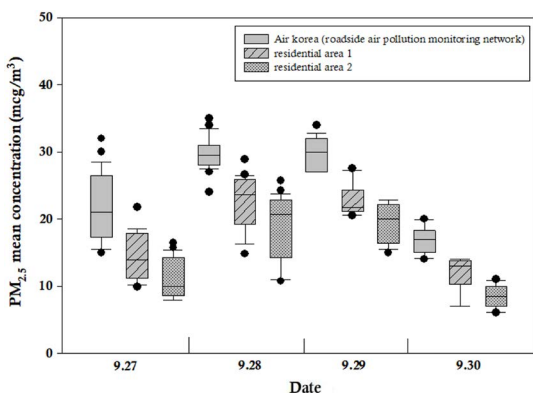
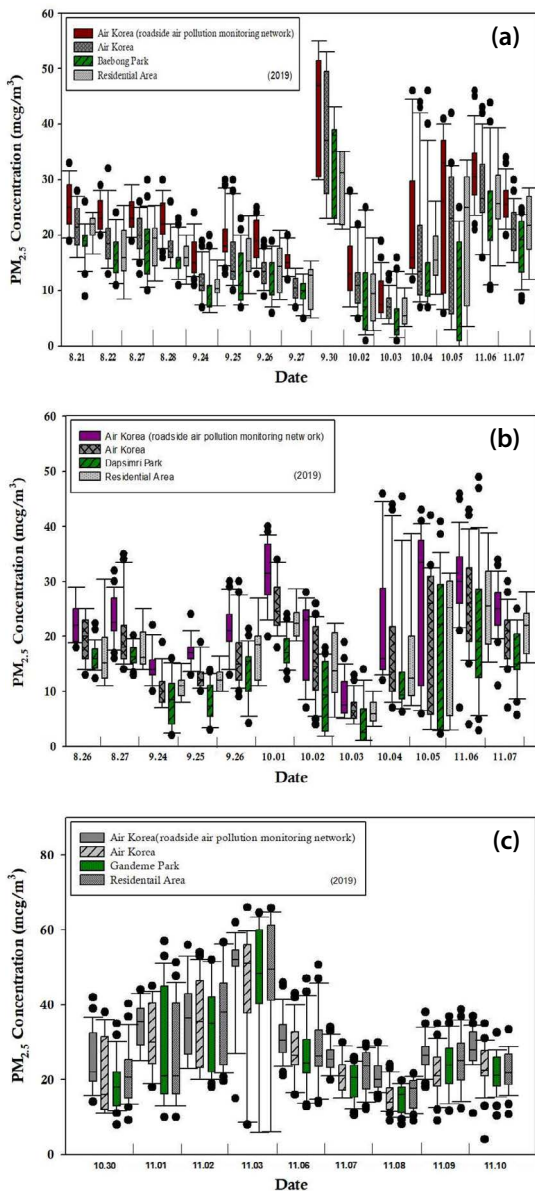


Fig. 6. Concentration of PM-2.5 according to the surrounding environment (green area ratio).



**Fig. 7.** PM-2.5 concentration measured at (a) Baebong Mountain, (b) Dapsimni park, and (c) Gandeme park located at residential area.

능력과 함께 지형적 특성에 대한 분석이 필요하다고 판단된다.

산지형 도시숲에서의 PM-2.5 농도가 지형적 특성에 영향을 받는다고 가정한다면 평지형 도시숲에서는

지형의 영향을 최소화하고 수목의 영향에 대한 추측이 가능할 것으로 판단하였으며, 이에 따라 평지형 도시숲인 간데메공원에서 PM-2.5 농도 측정 결과를 검토하였다. 평지형 도시숲의 PM-2.5 농도 측정 결과는 산지형 도시숲과 같이 대기오염측정망 자료와 비교하여 낮은 경향성을 보였으나 일 평균 농도값에서 1~2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 차이로 저감 폭이 크지 않았다. 평지형 도시숲은 수목의 식재 밀도가 산지형 도시숲에 비하여 낮고, 인근 1 km 이내에 주택지, 상업 혼합지, 업무 시설지 등이 분포하고 있으며 첨두시간대 교통량의 변화 등과 같은 다양한 오염원의 영향에 의하여 일 평균값의 차이가 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 그러나 Qiu *et al.* (2018)은 면적이 2 ha 이하인 녹지에서는 PM-2.5 농도에 큰 차이를 보이지 않는 점을 지적하였는데, 간데메공원은 면적이 약 1.5 ha (15,180  $\text{m}^2$ )로 작은 면적에도 불구하고 일 평균 농도에서 상대적으로 약간 낮은 경향성을 보이고 있었다. 따라서 도시숲의 수목에 의한 PM-2.5 저감이 일정 부분 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.3 실측 결과와 모델링 결과 비교

본 연구에서 진행한 AERMOD 모델링 결과를 대기 오염측정망 자료와 함께 주변의 토지 이용 형태에 따른 PM-2.5 오염도 실측 결과와 도시숲별 PM-2.5 농도 실측 결과의 일 평균값을 비교 분석하였다.

그림 8(a)에서 주변 토지 이용 형태에 따른 녹지 비율별 PM-2.5 농도 실측값과 AERMOD 모델링 결과를 비교해 보면, 도로변 대기오염측정망의 값과 모델 예측값이 거의 일치하고 있었다. 반면에 녹지 비율이 적은 주거지역 1과 녹지 비율이 높은 주거지역 2에서는 모델 예측값이 실측값보다 크게 나타났으며, 주거지역 2에서 더욱 큰 차이를 보였다. 이는 AERMOD에서 고려되지 않은 녹지 등과 같은 지역별 토지 이용 상태에 따른 PM-2.5 저감량이 실측값에 반영되어 나타난 결과로 판단된다.

도시숲 PM-2.5 실측값과 모델링 예측값을 비교해 보면 전체적으로 유사한 결과를 보였으며 특히, 평지



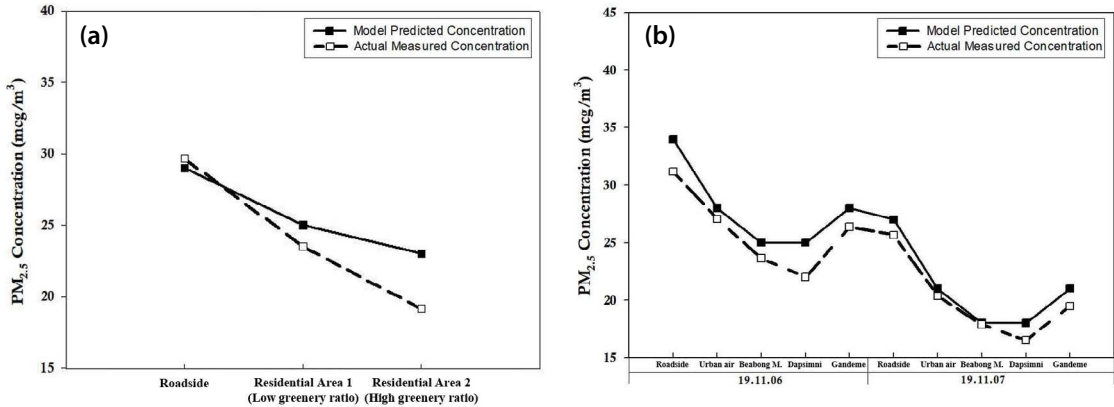


Fig. 8. Comparison of daily average concentration of PM-2.5 by (a) green area ratio and (b) different urban forests.

형 도시숲과 비교하여 산지형 도시숲에서 PM-2.5 농도가 낮은 경향을 보였다. 이는 산지형 도시숲의 지형적 특성과 수목의 밀도 등과 같은 녹지 조성 형태의 영향이 있는 것으로 판단된다. 산지형 도시숲에서의 예측값과 실측값 사이의 차이는 매우 비슷할 것으로 예상하였으나, 실제 결과에서는 배봉산 공원보다 답십리 공원에서 조금 더 큰 차이를 보였다. 이는 답십리 공원이 배봉산 공원보다 수목의 밀집도가 높고 그 가운데에서 측정이 이루어짐으로써 AERMOD에서 처리하지 못하는 수목에 의한 PM-2.5 감소 효과가 반영된 결과로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도심지의 수목이 주변 지역의 PM-2.5 농도 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 도시숲 및 인근 주거지역을 대상으로 PM-2.5 실측을 진행하였다. 또한 실제 지형과 기상자료가 반영된 AERMOD 대기확산모델링을 사용하여 PM-2.5 농도를 예측하고 실측 결과와 비교·분석한 결과를 바탕으로 수목의 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 주변 환경의 녹지 비율에 따른 일 평균 PM-2.5에 대한 실측값과 예측값은 녹지 비율이 상대적으로

낮은 주거지역 1에서 녹지 비율이 상대적으로 높은 주거지역 2보다 높은 결과를 나타내었으며 경향성이 일치하고 있었다. 이로 인하여 주거지역 인근의 녹지 비율이 PM-2.5 농도 저감에 일정한 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있었다. 모델 예측값과 실측값의 비교 결과 녹지 비율이 높은 주거지역 2의 차이가 더욱 크게 나타났으며 이는 AERMOD에서 고려되지 않은 토지 이용 상태에 따른 PM-2.5에 대한 영향이 반영된 결과로 판단된다.

② 산지형 도시숲에서 실시한 PM-2.5 실측 결과에서는 도로변 및 도시대기 대기오염측정망과 비교하여 도시숲에서의 PM-2.5 농도가 뚜렷하게 낮은 경향성을 나타내었다. 모델링 예측값과 비교·분석한 결과에서는 전체적으로 유사한 경향을 나타내었으며 이에 PM-2.5 농도가 지형에 어느 정도 영향을 받을 수 있는 것으로 보인다. 지형의 영향을 최소화하여 수목의 PM-2.5 저감 여부를 확인하기 위하여 평지형 도시숲에서 PM-2.5 실측을 진행하였으며, 산지형 도시숲에 비하여 뚜렷한 차이는 보이지 않았으나 대기오염측정망 자료와 비교하여 일 평균 1~2 µg/m<sup>3</sup> 정도 낮은 경향을 보였다. 이에 면적이 2ha 이하인 작은 공원이라도 도시숲을 조성함으로써 주변 지역의 PM-2.5 농도 분포에 어느 정도 영향을 줄 수 있다고 판단된다.

③ 산지형 및 평지형 도시숲은 지형에 상관없이 도시

지역의 지역별 PM-2.5 농도에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 수목의 분포는 도심지의 PM-2.5 오염도에 영향인자가 될 수 있을 것으로 판단된다. 산지형 도시숲에 비하여 효율성은 낮지만, 도심지 내 평지에 넓게 조성된 녹지는 오염도 발생의 억제와 차단을 통하여 주변 지역의 PM-2.5 농도 분포에 대하여 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 결과를 고려할 때 도심지의 녹지 조성 시 지형, 식생 밀도, 수목의 형태 등과 같은 영향인자를 반영하여 PM-2.5 농도 저감 측면에서 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청 (한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 (2022430A00-2324-0802)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Choi, T.Y., Moon, H.G., Kang, D.I., Cha, J.G. (2018) Analysis of the Seasonal Concentration Differences of Particulate Matter According to Land Cover of Seoul - Focusing on Forest and Urbanized Area -, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(6), 635-646. <https://doi.org/10.14249/EIA.2018.27.6.635>
- Gomišček, B., Hauck, H., Stopper, S., Preining, O. (2004) Spatial and Temporal Variations of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and Particle Number Concentration During the AUPHEP-project, *Atmospheric Environment*, 38(24), 3917-3934. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.056>
- Kim, J.H., Park, S.H., Chang, Y.Y. (2018) A Study on Prediction Model Conformity of Line Source in Urban Area, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 18(4), 511-521. <https://doi.org/10.33768/ksue.2018.18.4.511>
- Korea Environment Institute (KEI) (2005a) The application of air quality models on environment impact assessment. [https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800044128&dbt=TRKO&rn=Korea Environment Institute \(KEI\) \(2005b\) Impacts of Green Spaces on Air Quality](https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800044128&dbt=TRKO&rn=Korea%20Environment%20Institute%20(KEI)%20(2005b)%20Impacts%20of%20Green%20Spaces%20on%20Air%20Quality). [https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800034865&dbt=TRKO&rn=](https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800034865&dbt=TRKO&rn=View.do?cn=TRKO201800034865&dbt=TRKO&rn=)
- Mo, L., Ma, Z., Xu, Y., Sun, F., Lun, X., Liu, X., Chen, J., Yu, X. (2015) Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China, *PLOS ONE*, 10(10), e0140664. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140664>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIRC) (2013) Air Pollutant Emissions Statistics for 2011. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=10&articleId=121&boardId=10&menuId=32&currentPageNo=1>
- National Institute of Forest Science (NIFS) (2019) Urban Forest Creation and Management Guidelines. [https://www.forest.go.kr/kfswb/cmm/fms/FileDown.do?jsessionid=rmpSgSkvSft7rL4c7gEEqwrbcqFRrvw46CxKMNJrcuwTuDnvJFLmhw3wQh3k8s1N.frswas01\\_servlet\\_engine5?atchFileId=FILE\\_000000020026462&fileSn=0&dwdldHistYn=N&bbsld=BBSMSTR\\_1069](https://www.forest.go.kr/kfswb/cmm/fms/FileDown.do?jsessionid=rmpSgSkvSft7rL4c7gEEqwrbcqFRrvw46CxKMNJrcuwTuDnvJFLmhw3wQh3k8s1N.frswas01_servlet_engine5?atchFileId=FILE_000000020026462&fileSn=0&dwdldHistYn=N&bbsld=BBSMSTR_1069)
- Qiu, H., Tian, L.W., Pun, V.C., Ho, K.F., Wong, T.W., Yu, I.T. (2014) Coarse Particulate Matter Associated with Increased Risk of Emergency Hospital Admissions for Pneumonia in Hong Kong, *Thorax*, 69(11), 1027-1033. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2014-205429>
- Qiu, L., Liu, F., Zhang, X., Gao, T. (2018) The Reducing Effect of Green Spaces with Different Vegetation Structure on Atmospheric Particulate Matter Concentration in Baoji City, China, *Atmosphere*, 9(9), 332. <https://doi.org/10.3390/atmos9090332>
- Räsänen, J.V., Holopainen, T., Joutsensaari, J., Pasanen, P., Kivimäenpää, M. (2014) Particle Capture Efficiency of Different-aged Needles of Norway Spruce under Moderate and Severe Drought, *Canadian Journal of Forest Research*, 44(7), 831-835. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0068>
- Sheppard, L., Levy, D., Norris, G., Larson, T.V., Koenig, J.Q. (1999) Effects of Ambient Air Pollution on Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994, *Epidemiology*, 10(1), 23-30. <https://doi.org/10.1097/00001648-199901000-00006>
- The Seoul Institute (SI) (2018) Evaluation on the Reduction Effect of Particulate Matter through Green Infrastructure and Its Expansion Plans. [https://www.si.re.kr/si\\_download/62138/24999](https://www.si.re.kr/si_download/62138/24999)
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2004) AERMOD: Description of model formulation. <https://gaftp.epa.gov>

gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/  
aermod\_mfd\_454-R-03-004.pdf

- Yin, S., Lyu, J., Zhang, X., Han, Y., Zhu, Y., Sun, N., Sun, W., Liu, C. (2019) Coagulation Effect of Aero Submicron Particles on Plant Leaves: Measuring Methods and Potential Mechanisms, *Environmental Pollution*, 257, 11361. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113611>
- Zhang, W.K., Wang, B., Niu, X. (2015) Study on the Adsorption Capacities for Airborne Particulates of Landscape Plants in Different Polluted Regions in Beijing (China), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9623-9638. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809623>

## Authors Information

- 김지태 (서울시립대학교 환경공학부 연구원)  
(najitae82@gmail.com)
- 엄권옥 (서울시립대학교 환경공학부 연구원)  
(adonis7474@naver.com)
- 여상구 (서울시립대학교 환경공학부 박사과정)  
(aoito@naver.com)
- 조희지 (서울시립대학교 환경공학부 석사과정)  
(joeheeji@korea.kr)
- 우수영 (서울시립대학교 환경원예학과 교수)  
(wsy@uos.ac.kr)
- 이종규 (서울시립대학교 환경원예학과 연구원)  
(gpl90@naver.com)
- 동종인 (서울시립대학교 환경공학부 교수)  
(jidong@uos.ac.kr)