

가로녹지 유형이 보행공간의 초미세먼지에 미치는 영향 분석*

- 미기후 시뮬레이션을 활용하여 -

김신우¹⁾ · 이동근²⁾ · 배채영³⁾

¹⁾ 서울대학교 대학원 생태조경 · 지역시스템공학부 학생 ·

²⁾ 서울대학교 조경 · 지역시스템공학부 교수 ·

³⁾ 서울대학교 협동과정 조경학 및 융합전공 스마트시티 글로벌 융합 연구원

Analysis of the effect of street green structure on PM2.5 in the walk space*

- Using microclimate simulation -

Kim, Shin-Woo¹⁾ · Lee, Dong-Kun²⁾ and Bae, Chae-Young³⁾

¹⁾ Graduate School of Seoul National University Seoul, South Korea, Student,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea, Professor,

³⁾ Interdisciplinary program in Landscape Architecture & Integrated major in smart city global convergence, Seoul National University, Seoul, South Korea, Student.

ABSTRACT

Roadside greenery in the city is not only a means of reducing fine dust, but also an indispensable element of the city in various aspects such as improvement of urban thermal environment, noise reduction, ecosystem connectivity, and aesthetics. However, in studies dealing with the effect of reducing fine dust through trees in existing urban spaces, microscopic aspects such as the adsorption effect of plants were dealt with, structural changes such as the width of urban buildings and streets, and the presence or absence of trees, Impact studies that reflect the actual form of In this study, the effect of greenery composition applicable to urban space on PM2.5 was simulated through the

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2019002760002)

First author : Kim, Shin-Woo, Graduate School of Seoul National University, Student, Room 9211, Bldg. 200, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : sw99826@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong-Kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Professor, Bldg. 200, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Received : 28 July, 2021. **Revised** : 27 August, 2021. **Accepted** : 24 August, 2021.

microclimate epidemiologic model ENVI-met, and field measurements were performed in parallel to verify the results. In addition, by analyzing the results of fine dust background concentration, wind speed, and leaf area index, the sensitivity to major influencing variables was tested. As a result of the study, it was confirmed that the fine dust reduction effect was the highest in the case with a high planting amount, and the reduction effect was the greatest at a low background concentration. Based on this, the cost of planting street green areas and the effect of reducing PM2.5 were compared. The results of this study can contribute as a basis for considering the effect of pedestrian space on air quality when planning and designing street green spaces.

Key Words : *street tree layout scenarios, Street canyon, PM2.5, ENVI-met model, Microscale simulations*

I. 서 론

미세먼지는 기후변화로 인해 계절풍의 약화, 대기의 안정으로 인한 정체 현상으로 국가 내 고농도 미세먼지 발생일을 지속적으로 증가시키고 있다. 초미세먼지(PM2.5)는 작은 입자의 물질로 신체의 깊숙이 침투하여 조기 사망, 알레르기, 심혈관 및 호흡기 질환, 심장질환 등을 높이는 등 위험성을 가지고 있다 (Kong et al., 2012; Gehring et al., 2013). 초미세먼지를 포함한 대기오염 물질의 85%가 자동차 배출가스에 의한 것으로 (Kim, 2003), 도로에서 발생한 오염원은 금속성 물질을 다수 함유하여 (Zhang et al., 2017) 시민 건강에 부정적 영향이 우려된다.

수목은 미세먼지 저감의 역할 뿐만 아니라 온도저감 (Jo et al., 2003), 이산화탄소 흡수(Park and Kang, 2009), 소음감소(Park and Kim, 1995) 등 환경 조절 기능 뿐만 아니라 도시민의 정서 증진효과(Lee, 2007) 또한 가지고 있어 도시공간에서는 중요하다. 도시의 녹지 정책수립 시 이러한 여러 가지 환경 조절 기능을 고려하게 되는데, 이 중 미세먼지 저감과 관련하여서는 수목이 공기를 정화한다는 보편적인 지식을 바탕으로 오염지에 수목 식재를 제시한다 (Vos et al., 2013). 도시 내 수목에 의한 미세먼지 제거는 미국 내

연간 711,000톤(t)으로, 약 0.2-1.0%를 제거(Nowak et al., 2006)하여 공기질을 개선하는 효과 (Irga et al., 2015 ; Tallis et al., 2011)를 보인다. 반면, 일부 연구에서는 수목이 도시 협곡 내 풍속을 감소시키며, 난류를 조정하여 도시협곡 내 환기를 악화(Gromke and Blocken, 2015 ; Raupach et al., 1996)시키기도 한다. 선행연구의 수목의 미세먼지 저감 효과에 대해 다양하고 상반된 결과를 보여주어 이러한 결과를 일반화하기 어려웠다. 특히, 대기환경은 배출, 배경농도, 기상조건, 도시 속성의 형태 간의 상호작용에 따른 변동성이 크기 때문에 이를 모두 고려하는 것은 복잡한 문제이다(Jeanjean et al., 2016; Santiago et al., 2017; Buccolieri et al., 2011; Vos et al., 2013).

도로변의 미세먼지 저감과 관련하여 수목 뿐만 아니라 건물 높이 변화 (Hang et al., 2012; Hong 2020), 거리 협곡의 종횡비 (Barlow et al., 2004) 등 도시 형태 및 구조에 따른 영향을 분석한 연구도 다수 추진되었는데, 이들 연구는 주로 가상공간에 대한 대기 흐름을 분석함으로써 도시 협곡에서 수목이 삭제되고, 협곡이 깊어 환기가 잘되는 환경이 미세먼지 저감에 용이 (Hong et al., 2017)하다는 결과적으로 환기효과에 주목하였다. 하지만 도시의 물리적 변화를 다룬 연구의 결과는 이미 도시개발이 이루어진

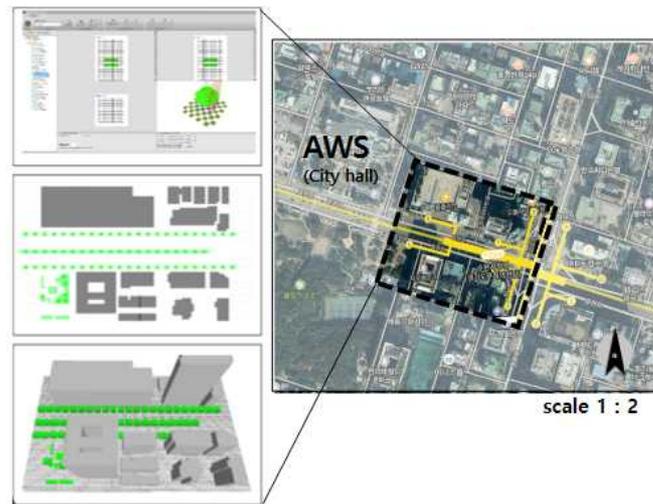


Figure 1. Study area

기존 공간에 반영하기 어렵다는 제한점이 있다.

도시 형태 및 구조 개선과 같은 복잡한 과정이 아닌 도심 가로녹지의 구조의 변화만으로 미세먼지 저감을 도출하여 정량화할 수 있는 것은 도시생태계 건강성 증진과 시민의 건강 영향에 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 도시 미기후 시뮬레이션 모델을 사용하여 가로녹지 유형과 주요 영향변수에 대한 초미세먼지 저감 효과를 확인하고자 하였다. 결과의 정확도를 검증하기 위해 실제 교통량이 많은 대로변을 대상지로 설정하였으며 현장 측정을 병행하였다. 전체 연구과정은 (1) 시뮬레이션 모델 구성 및 측정 데이터 기반 검증, (2) 국내 매뉴얼을 고려한 가로녹지 유형 설정, (3) 가로녹지 유형 별 초미세먼지 저감 효과 분석, (4) 주요 영향변수에 따른 효과 차이 분석 및 식재 비용과 효과 비교로 구성하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상지

연구 대상지인 수원시는 미세먼지 저감 숲 조성매뉴얼(Suwon City, 2019)을 출간하는 등 미

세먼지에 대한 관심이 높은 지자체이다. 수원시청 앞의 11차선으로 이루어진 대로변이며, 출퇴근 차량이 가장 집중되는 지역으로 도로변의 미세먼지 저감 정도를 분석하기 적합하다. 또한, 상업지역으로 고층건축물의 밀집지역이며 다수의 유동인구가 발생하여 보행자에 대한 미세먼지 위험성이 높은 지역이기도 하다. 그림 1은 연구 대상지의 개요이다.

2. 미기후 역학 모델

본 연구에서는 도시 미기후 시뮬레이션을 위해 1998년 독일 Bochum University의 Michael Bruse가 개발한 3차원 미기후 모형 ENVI-met을 이용하였다. ENVI-met은 도시 환경 내에서 지표면과 초목의 구성에 따른 대기흐름 분포를 파악할 수 있는 모델링 프로그램으로 다양한 시뮬레이션 모델 중 가장 구체적인 식생 모듈을 갖추었고, LAD(Leaf Area Density, 잎면적지수), 수고, 환경물리량 등의 변수 구축을 통해 실제 수행과 가장 유사하게 구성할 수 있어 조경 건축의 미기후 시뮬레이션 연구에 다수 활용된 바 있다. 이러한 시뮬레이션 연구는 구현하기 전 계획의 전후 분석을 통해 타당성을 제시할 수 있을 뿐만

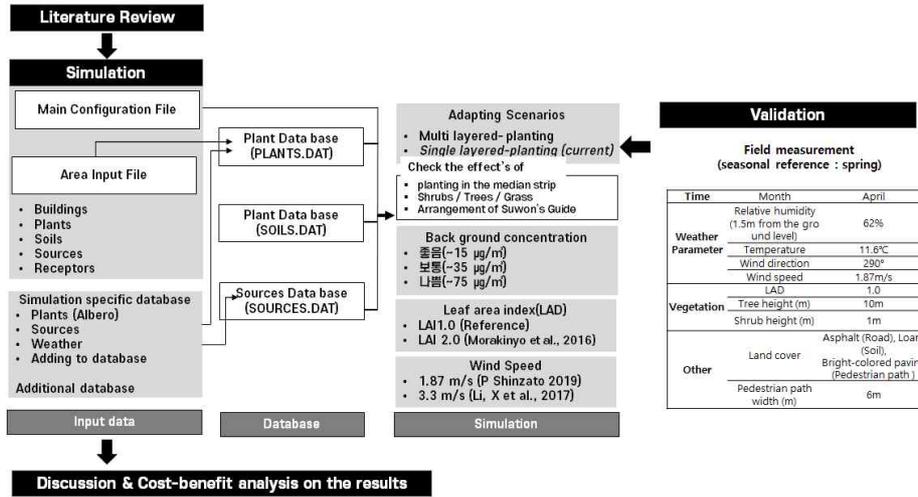


Figure 2. Study flow

아니라, 매개변수 조정의 편리성과 제어의 용이, 측정실험에 비해 시간과 비용의 절감으로 다양한 연구에서 사용되고 있다 (Guo et al., 2018).

3. 시뮬레이션 구성

1) 도메인 설정 및 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 구동 시 모델의 도메인은 수원시 청 일대의 총 11차선의 대로를 포함한 200m × 150m × 80m이며, 격자 셀 하나당 크기는 2m × 2m로 구성하였다. 대상지는 실측과 인공위성지도 및 지적도를 사용하여 Auto CAD(ver. 2020)에서 평면도를 작성했다. 건물의 평균 높이는 약 30m였고, 11차선인 효원로의 너비는 34m, 보행로는 가로수가 식재되어 있는 보도를 포함

하여 6m로 구성하였다.

도메인의 교목은 대상지의 가로수인 은행나무를 구현하기 위해 ENVI-met에 내장된 수종식(Manual) 편집도구인 Albero를 통해 프로그램에서 원하는 기존의 수목 3D 모형을 활용하였다.

수목의 잎이 개화하고, 미세먼지가 높은 시기인 봄을 대상으로 시뮬레이션하였다(기상청 2011~2020년의 봄철 평균 기상조건). 국내의 평균 도심 가로수 높이인 10m를 일관적으로 적용하였고 (Sung, 2003), 기본적인 엽면적밀도는 1.0으로 설정하였다(Berardi et al., 2016; Moradpour et al., 2017). 교목의 식재 간격은 가로수 조성 및 관리규정 고시의 식재 기준에 따라 일렬 또는 2열의 다

Table 1. Input parameters in the simulation

Time	Month	April
Weather Parameter	Relative humidity (1.4m from the ground level)	62%
	Temperature	11.6°C
	Wind direction	290°
	Wind speed	1.87m/s
Vegetation	LAD	1.0
	Tree height (m)	10m
	Shrub height (m)	1m
Others	Land cover	Asphalt (Road), Loam (Soil), Bright-colored paving (Pedestrian path)
	Pedestrian path width (m)	6m

층 배치를 적용할 수 있고, 8m로 지정하였다. 또한, 관목의 경우 실험대상지의 중앙교차로에서의 측정을 통해 1m의 높이를 적용하였다(표1).

2) 식재유형 별 시나리오 설정

‘가로수 조성 관리 매뉴얼(Korea Forest Service, 2020)의 가로띠녹지 조성모델에 따라 5m 이상의 보도폭의 경우 ‘지피형’, ‘관목군식형’, ‘다층식재형’, ‘가로공원형’의 4가지 유형의 띠녹지를 조성할 수 있고, 기본적인 가로수의 형태인 교목은 식재간격이 8m로 이루어져 있다. 본 연구에서는 실제 지자체에서 고려하는 식재 유형을 고려하기 위해 해당 매뉴얼에서 제시하는 교목 및 띠녹지 식재 방법과 수원시의 ‘미세먼지 저감 도시숲 조성 매뉴얼(Suwon City, 2019)’의 가로녹지 식재 기법에 따른 배열을 참고하여 총 4가지의 식재 유형을 구성하였다.

(1) 시나리오 TG (교목 + 초지)

연구 대상지의 현재 식재 배치로, 도로변에는 단일 식재의 가로수가 식재되어 있고, 중앙분리대는 단일의 가로수와 초지의 식재가 혼합되어 있으며 교목은 단일 수종으로 식재되어 있다.

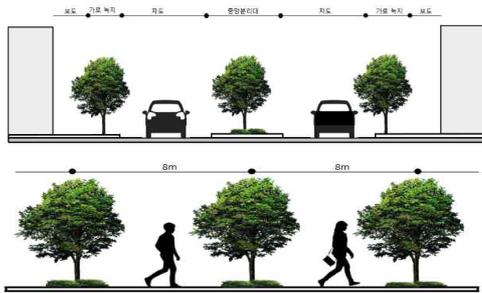


Figure 3. TG Scenario

(2) 시나리오 TT (교목 +교목)

첫번째 시나리오인 TG와 마찬가지로 가로녹지가 단일 식재로 구성되어있고, 중앙분리대의 초지를 제외함으로써 식재비용 절감과 관목의 저감 효과를 확인하기 위함이다.

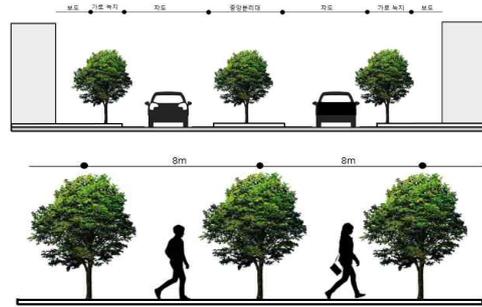


Figure 4. TT Scenario

(3) 시나리오 MSMS (계단형 식재 반복)

키가 큰 교목을 배경으로 식재 후 큰 관목 혹은 소교목을 하부에 식재하여, 앞쪽에 지피 식물을 식재하여 가로수 조성 매뉴얼의 띠녹지 중 다층 식재형에 해당하는 배치이다. 이는 수목의 식재간격이 조밀하여 밀폐도가 높아 오염된 공기의 확산을 차단하고, 식재지의 수목의 연결성이 돋보이는 형태로, 주 풍향과 도로방향이 일치할 경우 도심 확산을 차단하기 위한 식재 방안이다.

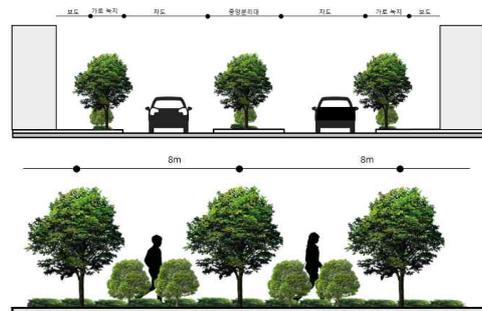


Figure 5. MSMS Scenario

(4) 시나리오 MPMP (복합식재형 반복)

MSMS 시나리오와 같이 교목을 배경으로 하고, 관목 또는 소교목 위주의 군락 형태로 조합하는 방식이다. 지피 식물을 식재하는 다층 식

채형으로 조성된 군락 사이의 일정한 틈을 통해 공기가 도시 외부로 배출되도록 하여 공기정체 문제를 도심 밖으로 배출하여 개선하는 것으로, 주풍향과 도로가 수직이거나 큰 각도를 이룰 경우 풍속의 약화로 생기는 공기정체를 개선하기 위한 형태이다.

MPMP 형태와 MSMS 형태는 교목 및 관목의 수관폭이 동일하고, 층위의 구성방식의 유사성이 높다. 다만, 관목의 식재에 있어 MPMP는 수간 거리를 4m로 설정하고, MSMS는 2m로 설정함으로써 공기 확산 측면에서 상이한 결과를 야기할 것을 전제로 시나리오를 설정하였다.

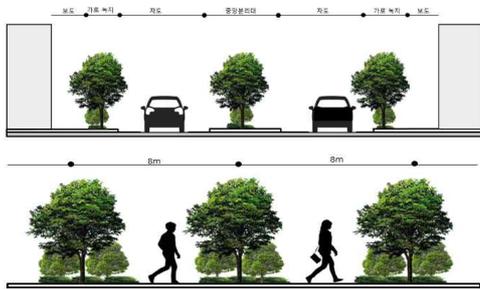


Figure 6. MPMP Scenario

3) 주요 영향변수 설정

동일한 식재 유형에 대한 주요 영향변수 별 효과 차이를 분석하기 위해 국내 미세먼지 배경농도 기준에 따른 변화를 확인하였고, 기상변수 중 미세먼지에 가장 영향을 많이 주는 풍속의

변화 (Li et al., 2017), 수목의 활력도, 전정에 의한 변화가 가능한 가로수 LAD(Morakinyo et al., 2016)에 따른 변화를 산정하였다.

국내의 초미세먼지(PM2.5) 배경농도의 분류 기준은 ‘ 좋음(~15µg/m³)’, ‘ 보통(~35µg/m³)’과 ‘ 나쁨(~75µg/m³)’으로 구분하고 있다. 현재 수원시의 연평균 미세먼지 농도는 21µg/m³으로 국내 초미세먼지(PM2.5)환경 기준 15µg/m³대비 약 40%가 높은 수준으로(Suwon City, 2020), 이러한 농도는 대기환경 기준에서 ‘ 보통(~25µg/m³)’에 해당하고, 봄철(3~5월)에는 23µg/m³(Suwon City, 2021)으로 더욱 높은 배경 농도를 보인다.

Li et al.(2017)에서는 풍속이 3m/s가 미세먼지와 의 임계점이며, 이를 기준으로 미세먼지에 대한 음의 상관관계가 있음을 밝혔다. 이에 따라 국내 풍속 분류의 ‘산들바람’에 해당하여 ‘나뭇잎과 가는 가지가 흔들리고 깃발이 가볍게 날리는 정도’인 3.4m/s를 설정하여, 현재 봄철 평균 풍속인 1.87m/s의 풍속의 상황에서와 비교하였다.(그림10, 그림11), 또한, 이러한 풍속의 기상조건하에서 보행로의 저감효과를 산출했다. 또한, 수목에 대한 전정을 중단하거나, 수목의 건강을 높임으로써 LAD의 증대 가능성은 높아진다. 선행연구에 따라 LAD 변화를 1.0(Berardi 2016; Moradpour et al., 2017)과 이를 높인 2.0(Morakinyo et al., 2016)으로 변경을 통해 분석하였다.

No	변수 명	환경변수 변화				배경	LAD	풍속	시나리오명
		TG	TT	MPMP	MSMS				
1	수목 식재					좋음 (~15µg/m³)	1	1.87	LC
							1	3.4	LW
2	배경농도	좋음 (~15µg/m³)	보통 (~35µg/m³)	나쁨(~75µg/m³)		보통 (~35µg/m³)	2	1.87	LL
							1	1.87	MC
3	풍속					나쁨 (~75µg/m³)	1	3.4	MW
							2	1.87	ML
4	LAD						1	1.87	HC
							1	3.4	HW
							2	1.87	HL

Table 2. Setting environmental variables utilized in research scenarios

봄철의 평균 날씨를 기준으로 한 가로수 식재 유형의 효과를 녹지 공간에서 PM 제거율(%) 산정식을 활용하여 분석하였다(Chen et al., 2017; Li et al., 2017). 차량의 유입이 다수 이루어지는 출퇴근 시간인 8:00~20:00를 포함하는 12시간을 시뮬레이션하였다.

$$W = (C_0 - Cx) / C_0 \times 100 \%$$

(Chen et al., 2017)

W : 녹지 공간에서 PM 제거율 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 C_0 : 제어 영역($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 Cx : 녹지(가로공간)공간에서 저감률 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Table 3. Equation for PM depletion rate

III. 결과 및 고찰

1. ENVI-met 모델링과 현장측정 비교

ENVI-met 모델에 의해 시뮬레이션 결과에 대한 정확성을 검증하기 위해 실험구를 시뮬레이션 값, 대조군을 측정값으로 하여 두 값 간의 유사성을 확인하였다. 2021년 5월 30~31일에 걸쳐 수원시청 인근 대로 변을 대상으로 초미세먼지 농도, 기상조건을 측정하였고, 교통 데이터는 수원시교통시스템의 데이터를 활용하였다. 시간은 오전 8시부터 오후 3시 사이에 수행하였다. 제한된 장비 여건으로 북서풍의 영향이 클 것으로 보이는 남단의 보행로를 주요 대상으로

하여, 중앙분리대 및 남쪽 도로, 보행로에 AEROCET831 장비를 3가지 위치에서 10분 간격으로 측정하였다. 이를 반복하여, 각 기구당 42개의 측정 값이 측정되었다. 이와 더불어, Kestrel 4500 휴대용 기상 측정기를 사용하여 5분간격으로 지역의 기상정보(기온, 상대습도, 풍속, 풍향)의 정보를 얻었다. 모든 기기는 보행자의 호흡 높이인 1.4m에 장착하여 측정하였고(Deng et al., 2019; Miao 2020), 측정 된 값과 시뮬레이션을 통해 도출된 값을 전체적인 평균 값의 비교하였다.

그림 7에서 보이는 바와 같이 시뮬레이션을 통한 결과와 측정을 통한 값은 중앙분리대, 가로 녹지, 보행로 각 위치에서 각각 비슷한 양상을 보였고(오전 8시부터 오후3시의 평균) 출근 시간인 8~9시 사이에는 다수의 차량의 난류 생성으로 다소 불규칙했으나, 차량이 조금씩 감소하는 9시 이후에는 시뮬레이션 구현과 더욱 유사해졌다.

2. 시나리오별 미세먼지 저감효과

1) 배경농도 수준에 따른 식재유형 별 미세먼지 저감효과

모든 배경농도 조건에서 밀폐도가 높은

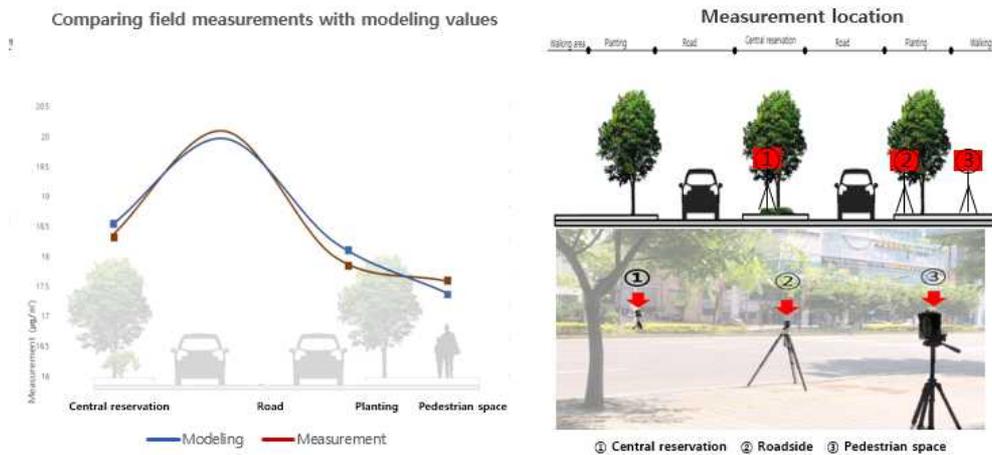


Figure 7. Comparing field Measurements and Modeling Values, Measurement Location

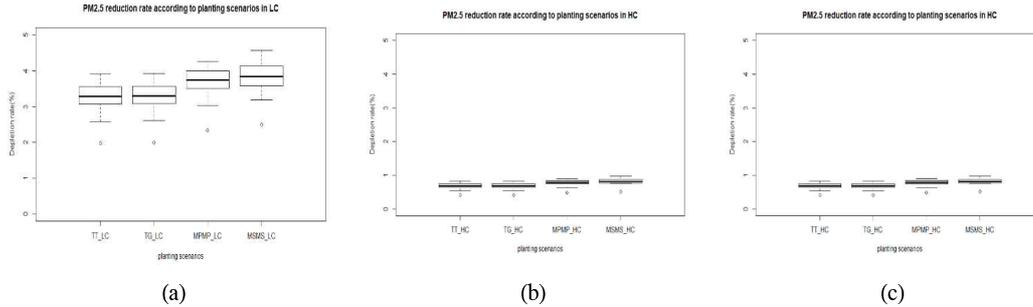


Figure 8. 배경농도 수준(a) ‘좋음(~15µg/m³)’, (b) ‘보통(~35µg/m³)’, (c) ‘나쁨(~75µg/m³)’에 따른 식재유형 별 보행로 미세먼지 저감효과(%)

‘MSMS’ 유형이 가장 큰 저감효과를 보였으며, 특히 배경농도 ‘좋음’일 때 약 3.78%(0.65µg/m³)로 가장 높은 효과를 보였다. ‘MPMP’ 유형도 약 3.65%로 ‘MSMS’와 거의 유사한 효과를 보였다. 현재 가로녹지 형태인 ‘TG’ 유형은 약 3.22%, ‘TT’ 유형은 3.20%의 저감 효과를 보여 식재량에 따른 차폐 효과가 주로 영향을 미친 것으로 나타났다. ‘TG’는 ‘TT’ 유형과 비교할 때 중앙분리대에 관목과 교목이 함께 배치된 유형인데, 제거율을 매우 유사하게 도출되어 관목의 효과가 보행로까지 미치지 않는 것으로 보인다.

배경농도 별로는 ‘좋음(~15µg/m³)’ 조건에서 평균 3.46%의 저감 효과를 도출했고, 배경농도 ‘보통(~35µg/m³)’과 ‘나쁨(~75µg/m³)’ 조건에서 각각 1.52%, 0.73%로 도출되어 모든 식재 형태에서 배경농도가 높아질수록 녹지의 효과는 낮

아지는 패턴을 보였다. 또한, 배경농도가 높아질수록 식재유형 별 효과의 차이도 뚜렷하지 않음을 확인하였다 (그림 8).

2) 풍속 및 LAD 변화에 따른 식재유형 별 미세먼지 저감효과

모든 배경농도 조건에서 풍속 변화별 결과값을 도출했을 때도 ‘MSMS’>‘MPMP’>‘TG’>‘TT’ 유형의 동일한 순서대로 저감 효과를 보였다. 평균 풍속에 비해 증가된 풍속일 때 모든 배경농도 조건에서 미세먼지 저감효과는 약 0.37~1.76% 감소했다 (그림 9).

수목에 대한 전정을 중단하거나, 수목의 활력도를 높이는 것은 LAD가 증대될 수 있다(Kim et al., 1999). LAD의 증대는 평균 LAD인 시나리오와 비교할 때 모든 배경농도 조건에서 미세

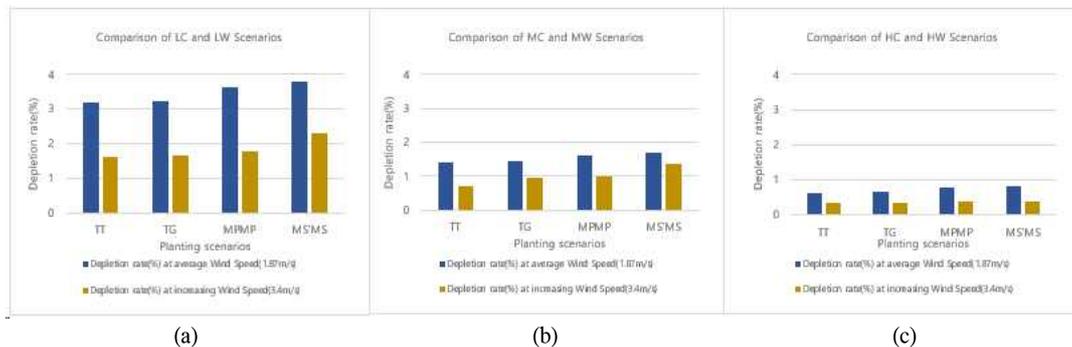


Figure 9. 평균의 풍속(1.87m/s)의 제거율과 증가된 풍속(3.4m/s)의 비교 (a) ‘좋음(~15µg/m³)’, (b) ‘보통(~35µg/m³)’, (c) ‘나쁨(~75µg/m³)’

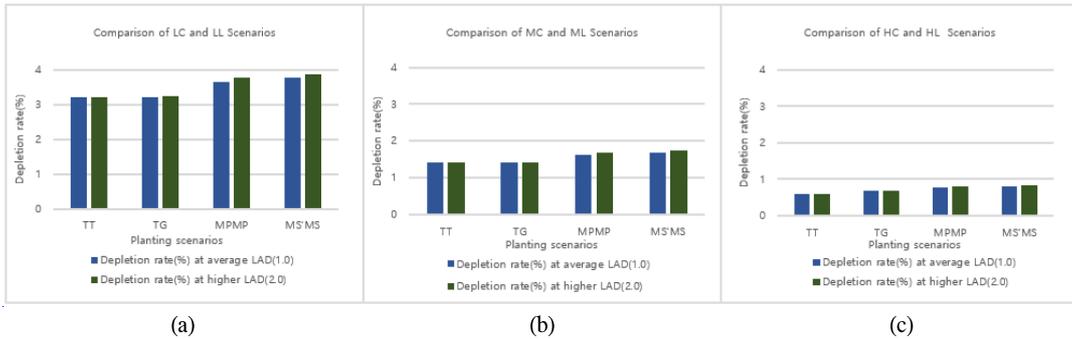


Figure 10. 평균의 LAD(1.0)의 제거율과 증가된 LAD(2.0) 제거율의 비교
 (a) ‘좋은(~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)’, (b) ‘보통(~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)’, (c) ‘나쁨(~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)’

먼지 저감효과를 약 0.05~0.001%를 높이는 것으로 나타나 풍속 케이스에 비해 큰 효과 차이를 보이지는 않았다(그림 10).

공간에서의 오염물질 분포를 보기 위해 모델 내 Leonardo 기능을 통해 Y-Z의 단면도를 확인한 결과(그림11), 식재량이 많아질수록 보행로로 오염물이 오는 것을 막아 도로에서 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 가로녹지의 차폐효

과로 인해 오염물이 상승하는 흐름을 보이며, 식재량이 많은 ‘MPMP’, ‘MSMS’ 유형에서(그림 11. III - (c),(d))에서 그 효과가 더욱 뚜렷해 보였다. 또한, 북서풍에의 영향으로 남쪽(94~96m지점)의 가로 녹지에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

증가된 풍속 시나리오를 평균의 시나리오와 LAD를 증가시킨 시나리오의 단면도와 비교하여 볼 때(그림 11. II), 바람의 영향으로 인해 오

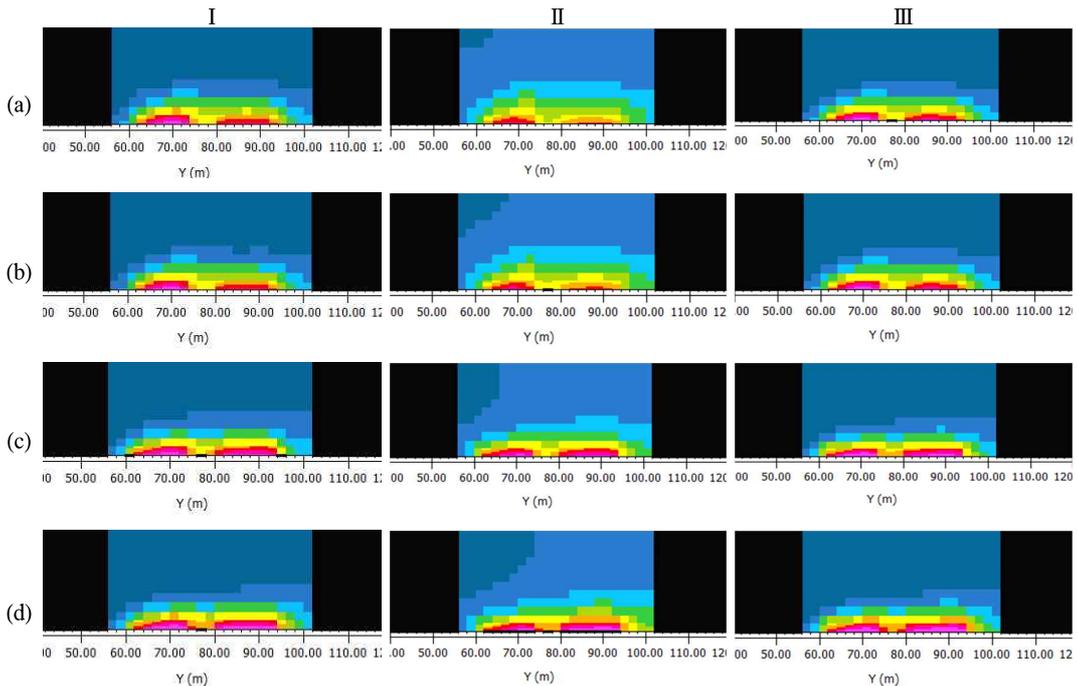


Figure 11. I. 평균의 시나리오 II. 증가된 풍속 시나리오 III. 증가된 LAD 시나리오에서의 단면도('Y'-Z)
 가로녹지 : 60~62m, 94~96m, 보행로 : 56~60m, 96~102, 중앙분리대 : 76~78m, 도로 : 62~74m, 80~94m

염분이 주변지로 넓게 확산되고 있음을 확인할 수 있었다. 풍속의 증가로 오염물질이 가로녹지를 빠르게 통과하여 보행공간으로 확산되어 공간 간의 차이가 감소한 것으로 보인다.

3) 식재 비용과 효과 비교

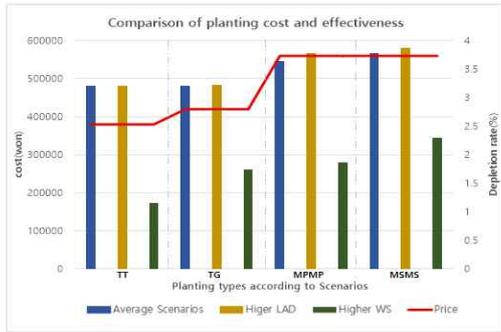


Figure 12. 식재 비용과 ‘좋음(~15µg/m³)’ 배경농도에 서 식재의 미세먼지 제거율(%)

Table 4. 식재 유형에 따른 식재 비용

식재 유형	가로공간	중앙분리대	단위 면적당 평균 식재 비용(원/m²)
TT	190,000	190,000	380,000
TG	210,000	210,000	420,000
MPMP	330,000	230,000	560,000
MSMS	330,000	230,000	560,000

토지 활용에 대한 기회비용이 높은 도시에서는 다양한 유형의 생태계 조성으로 인한 효과는 상이하다. 그 중 가로수는 그 기능을 극대화하도록 하는 수종 및 조성 유형에 대한 관심이 높다. (Kim et al., 2014)

현재 대상지에서는 국내 가로수의 약 20%로 가장 많이 식재되어있는 은행나무가 식재(Korea Forest Service, 2014)되어 있어 이를 기준으로 하여 시나리오의 식재유형을 구했었을때, 각각의 비용(한국조경수협회, 미세먼지 저감숲 가이드)과 12시간 평균 저감(%)효과를 비교했다(그림 12).

식재량에 따라 산정된 TT유형은 380,000원(원/m²)으로 최대 식재량인 MSMS유형의

560,000원(원/m²)과 비교하였을 때 비용은 130%이상 증가되었으나(표 4), 저감효율(%)은 약 120~200% 증가하였다.

평균 풍속과 평균 LAD 환경에서는 최소 효율이었던 TT와 MSMS는 약 118%, LAD를 높인 시나리오에서는 120%, 풍속을 높인 시나리오에서는 약 200%로 증가하였다. TG유형은 TT유형에서 초지의 증가 형태로, 모델의 각 셀(2m × 2m) 내 잔디(30cm×30cm)가 약 50개 포함을 기준으로 산정하였을 경우, 단위 면적 당 20,000원(원/m²)의 증가 비용이 있을 것으로 산정하였다.

저감효율은 약 0.58~1.14%의 차이가 나는데 비해 단위면적당(원/m²) 비용은 180,000원이 늘어나는 것으로 비용 대비 효율이 가장 높은 시나리오는 TT 시나리오로 교목의 식재만으로도 어느정도의 효과를 이룰 수 있는 것으로 보인다. 그러나, 식재량을 높일 수 있는 다층의 식재 기법은 미세먼지 뿐만 아니라 생물다양성 증가(Sinclair et al., 2005), 도심 내 녹지 연결(SaGong et al., 2007; Ahn et al., 2014), 열섬완화(kwon et al., 2019) 등 다양한 기능을 높일 수 있으므로 미세먼지 외의 다양한 환경의 기능을 고려한다면 식재량을 높이는 것은 가로 녹지의 작은 공간에서 환경의 높은 효율을 갖는다.

3. 연구 한계 및 발전사항

연구 결과 초미세먼지 제거율(%)은 MSMS>MPMP>TG>TT로 식재량이 많아짐에 따라 효과가 높아졌고, 유사한 식재량을 가진 유형 MSMS와 MPMP, TG와 TT 간 유사한 효과를 보여 식재의 배치에 대해서는 큰 차이를 보이지 못하였고, 현재 식재 유형에 해당하는 TG유형의 중앙분리대의 초지는 TT 유형과 비교했을 때 보행로에 효과가 거의 보이지 못했다. 또한, 모든 유형에서 ‘좋음(~15µg/m³)’에서 ‘나쁨(~75µg/m³)’로 배경농도가 높아질수록 모든 시나리오에서 효과는 감소하여 수목이 가질 수 있는 흡착량에 임계

값(Chen et al., 2017)이 있음을 알 수 있었다. 이는 수목의 잎에 대한 흡착량 실험 등의 연구를 통해 보완되어야 할 것이다. 또한, 시뮬레이션 결과에 대한 현장 실측 값 간의 비교 과정에서 출퇴근 시간 등 혼잡시간의 경우 일부 오류 값을 나타나기도 하였으나, 이를 제외한 대체적인 시간에서는 유사한 경향을 보였다.

풍속을 높이는 것은 도로변의 초미세먼지가 가로녹지를 빠르게 통과하도록 하여 전후의 농도가 비슷한 흐름이 생기도록 하였고, LAD를 높이는 것은 약간 증가된 저감효과를 나타냈으나 유의미한 차이는 보이지 않았다. 전체적으로 배경농도가 ‘나뭇(~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)’의 경우에는 각 유형 간의 효과 차이가 거의 없었다. 전체 시나리오 중 가장 높은 효과를 볼 수 있는 조건은 LAD가 높고, 식재량이 가장 높은 MSMS시나리오(3.87%)였다. 그러나, 수목의 간격을 둔 MPMP 시나리오와 차이를 거의 보이지 않아 공극의 효과는 확인할 수 없었다. 모든 시나리오의 제거율(%)은 약 0.5~3.87%의 사이 값에 머물러 도로변의 보행로에서는 가로 녹지의 미세먼지 저감의 기능은 효과성이 탁월한 것으로 보이지 않는다.

선행 연구에서는 이러한 도시 공간의 중규모 크기(meso scale)에서 오염물질 등의 흐름과 저감을 확인하기 위해, 보고자 하는 대상지의 도메인의 크기를 대상지의 배수가 되는 규모로 설정하여 구성하였다. 다양한 기존 연구들에서 제시하는 도메인의 크기는 상이(Karttunen 2020; Hong 2017; Buccolieri et al., 2020)하고, 이에 따라 오염물질의 흐름이 민감하게 반응한 것으로 보였다. 이에 따라 향후 연구에서는 이에 대한 민감도 분석이 진행되어 실제 보고자하는 대상물과의 비교를 통해 정확도가 더욱 향상 되어야 할 것이다.

도시에서 수목은 온도저감, 소음 감소, 미세먼지 저감 등 다양한 효과를 도출한다. 이 중 본 연구에서는 ‘국내 가로수 조성 관리 매뉴얼’과 ‘미세먼지 저감 도시숲 조성 매뉴얼’을 활용하여 실제 대상지에 적용이 가능한 가로수의 변화를 통해 수원시의 대로변에서 보행자의 오염물에 대한 영향을 시뮬레이션 하였다. 또한 국내에서 다루고 있는 배경농도의 분류와 환경변수(풍속, LAD)변경을 통해 가로녹지 시나리오에 따른 영향도 검토하였다.

본 연구는 도시 내 도로변에서 식재 유형에 따른 초미세먼지 저감 효과를 보행자의 측면에서 검토한 연구로, 녹지량이 높은 식재 유형은 가로수의 흡착과 공기의 흐름을 막는 것을 통해 저감효과를 가질 수 있음을 확인할 수 있었다.

가로수는 미세먼지 뿐만 아니라 다른 많은 조건을 고려하여 계획 및 설계되기 때문에 본 연구결과가 직접적으로 고려될 수 있는 사항은 아니다. 하지만 미세먼지 문제는 최근 시민의 관심이 높은데 반해, 대기환경의 특성 상 도시 구조, 기상환경 등 매우 다양한 요소에 영향을 받아 시공간적으로 다양한 분포를 보이기 때문에 예측이 어려워 근거자료가 충분히 제시되지 못하고 있다. 이에 본 연구의 결과는 가로녹지의 미세먼지 저감 효과에 대한 기초자료를 축적하는데 기여할 것으로 예상된다.

또한, 본 연구는 전 세계적으로 대유행인 COVID-19에 의한 여파로 낮아진 미세먼지 농도를 고려하지는 못함에 따라 이를 일반적인 봄 기간에 대한 결과로 제시하기에는 한계가 있으나, 여러 배경농도 수준 및 기타 영향변수에 따른 결과를 다루었다는데 의의를 가질 것으로 사료된다.

References

Ahn YJ, Lee DK, Kim HG and Mo JW. 2014. Applying

IV. 결 론

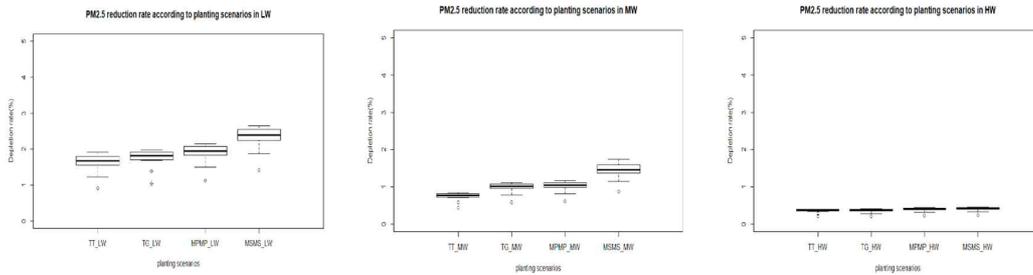
- Connectivity Analysis for Prioritizing Unexecuted Urban Parks in Sungnam. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 17(3): pp. 75-86.
- Barlow, J. F., Harman, I. N., & Belcher, S. E. (2004). Scalar fluxes from urban street canyons. Part I: Laboratory simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), 369-385. J. Hang, Y. Li, M. Sandberg, R. Buccolieri, S.D. Sabatino
- Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217-229.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied energy*, 115, 411-428.
- Buccolieri, R., Gatto, E., Manisco, M., Ippolito, F., Santiago, J. L., & Gao, Z. (2020). Characterization of urban greening in a district of Lecce (Southern Italy) for the analysis of CO2 storage and air pollutant dispersion. *Atmosphere*, 11(9), 967.
- Buccolieri, R., Salim, S. M., Leo, L. S., Di Sabatino, S., Chan, A., Ielpo, P., ... & Gromke, C. (2011). Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. *Atmospheric Environment*, 45(9), 1702-1713.
- Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter (PM 2.5). *Scientific Reports*, 7(1), 1-11.
- Deng, S., Ma, J., Zhang, L., Jia, Z., & Ma, L. (2019). Microclimate simulation and model optimization of the effect of roadway green space on atmospheric particulate matter. *Environmental Pollution*, 246, 932-944.
- Gromke, C., & Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 196, 176-184.
- Gromke, C., & Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 196, 176-184.
- Guo, X. H., Dai, F., & Bi, S. B. (2018). Simulation Study and Evaluation the Impact of Road Greenbelt Layout on Particulate Matter Dispersion and Removal. *China Landscape Architecture* 25 (12): 75-80. In *Chinese with English abstract*.
- Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, 56, 346-360.
- Hong, B., Lin, B., & Qin, H. (2017). Numerical investigation on the effect of avenue trees on PM2.5 dispersion in urban street canyons. *Atmosphere*, 8(7), 129.
- Hong, S. H. (2020). The effect of the green space in roadside and building height on the mitigation of concentration of particulate matters. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 34(5), 466-482.
- In *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference* (pp. 69-70). The Korean Institute of Landscape Architecture.
- Irga, P. J., Burchett, M. D., & Torpy, F. R. (2015). Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment?.

- Atmospheric Environment, 120, 173-181.
- Jeanjean, A. P., Monks, P. S., & Leigh, R. J. (2016). Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric Environment*, 147, 1-10.
- Jo, H. K., Y. H. Cho and T. W. Ahn(2003) Effects of urban greenspace on improving atmospheric environment: Focusing on Jung-gu in Seoul. *Environmental Research* 20: 114-121.
- Karttunen, S., Kurppa, M., Auvinen, M., Hellsten, A., & Järvi, L. (2020). Large-eddy simulation of the optimal street-tree layout for pedestrian-level aerosol particle concentrations—A case study from a city-boulevard. *Atmospheric Environment: X*, 6, 100073.
- Kim, J. S., & Lee, D. K.(2014) Cost-Benefit Analysis for Planting Type of Street Trees. *J. Korean Env. Res. Tech*, 17(6), 29-37.
- Kim, T. S.(2003) The Effect of Green Buffers in Urban Residential Areas for Reducing Air Pollution. Master's Thesis, Hanyang University. Korea. pp. 76
- Kim, Y. S., Shin, H. T., Lee, Y. H., & Park, Y. C., (1999) Conditions of the Pruned Parts of the Large Branches in Taegu. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 13(2), 160-166.
- Kong, S. Y., H. J. Bae, D. O. Yun, S. P. Hong and H. Y. Park(2012) A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea I. Korea Environment Institute. pp. 191.
- Kwon, Y. J., Lee, D. K., & Ahn, S, K.(2019) Urban Street Planting Scenarios Simulation for Micro-scale Urban Heat Island Effect Mitigation in Seoul. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(1), 23-34.
- Lee, S. H.(2007) A Comparison of the Models for explaining the Emotion-Improving Effects of the Index of Greenness. *The Korean Journal of Health Psychology*, 12(1) 189-217
- Li, X., Chen, X., Yuan, X., Zeng, G., León, T., Liang, J., ... & Yuan, X. (2017). Characteristics of particulate pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) and their spacescale-dependent relationships with meteorological elements in China. *Sustainability*, 9(12), 2330.
- Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Bu, R., Qi, L., He, X., & Chen, W. (2020). How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: An in-situ investigation. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102042
- Moradpour, M., Afshin, H., & Farhanieh, B. (2017). A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree planting. *Atmospheric Pollution Research*, 8(2), 253-266.
- Morakinyo, T. E., Lam, Y. F., & Hao, S. (2016). Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of environmental management*, 182, 595-605.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban forestry & urban greening*, 4(3-4), 115-123.
- Park, D. G. and Y. S. Kim(1995) Noise attenuation by vegetation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 23(2):205-211.
- Park, E. J. and K. I. Kang(2009) Quantification of CO₂ Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration. Gyeonggi Research Institute. pp. 15
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., & Brunet, Y. (1996).

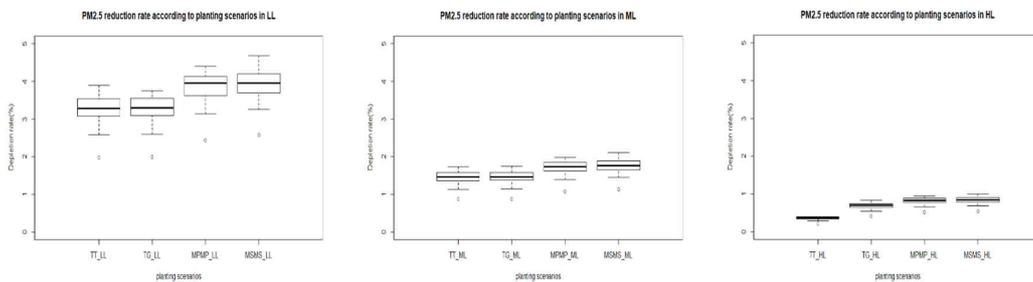
- Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. In *Boundary-layer meteorology 25th anniversary volume, 1970-1995* (pp. 351-382). Springer, Dordrecht.
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., & Brunet, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. In *Boundary-layer meteorology 25th anniversary volume, 1970-1995* (pp. 351-382). Springer, Dordrecht.
- SaGong JH, Ra JH and Cho HJ. 2007. Selection of the priority order for additional green spaces for urban park and green network. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*. 34(6): pp. 10-21.
- Santiago, J. L., Martilli, A., & Martin, F. (2017). On dry deposition modelling of atmospheric pollutants on vegetation at the microscale: Application to the impact of street vegetation on air quality. *Boundary-layer meteorology*, 162(3), 451-474.
- Sinclair, K. E., Hess, G. R., Moorman, C. E., & Mason, J. H. (2005). Mammalian nest predators respond to greenway width, landscape context and habitat structure. *Landscape and urban planning*, 71(2-4), 277-293.
- Sung H-C. 2003. A Study on the Present Status of Urban Roadside Trees by Major Road Types: Focusing on 7 cities in Kyonggi Province, *Journal of Korea Planning Association*. 38(3): 245-257.
- Sung H-C. 2003. A Study on the Present Status of Urban Roadside Trees by Major Road Types: Focusing on 7 cities in Kyonggi Province, *Journal of Korea Planning Association*. 38(3): 245-257. [Korean Literature]
- Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., & Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 129-138.
- The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas *Build. Environ.*, 56 (2012), pp. 346-360
- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?. *Environmental pollution*, 183, 113-122.
- Zhang J, Y. J. Zhang, X. Z. Fang, F. H. Li, L. Wu, and H. J. Mao (2017) Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM_{2.5} Fraction of Road Dust. *Huanjing Kexue* 38(10): 4071-4076.
- Gehring, U., Gruzieva, O., Agius, R. M., Beelen, R., Custovic, A., Cyrys, J., ... & Brunekreef, B. (2013). Air pollution exposure and lung function in children: the ESCAPE project. *Environmental health perspectives*, 121 (11-12), 1357-1364.
- Urban Forest Landscape Department of Korea Forest Service. 2020. [Urban Forest] Roadside Tree Creation Management Manual. Research report to Korea Forest Service. (in Korean)
- Park greenery office of Suwon City. 2019. Fine Dust Reduction Urban Forest Creation Manual in Suwon City. Research report to Suwon City. (in Korean)
- Department of Climate and Atmosphere in Suwon. 2021. Suwon air environment analysis report. Research report to Suwon City. (in Korean)
- Environmental authorities of Suwon City. 2020. https://www.suwon.go.kr/web/safesuwon/air/pages/PD_info04.do#none. Research report to

Suwon City. (in Korean)

Appendix



(a) 상승된 풍속에서 배경 농도별 식재 유형에 따른 보행로 미세먼지 제거율(%)
 (a) '좋은($\sim 15\mu\text{g}/\text{m}^3$)', (b) '보통 좋음($\sim 35\mu\text{g}/\text{m}^3$)', (c) '나쁨(좋은 $\sim 75\mu\text{g}/\text{m}^3$)'



(a) 증가된 LAD에서 배경 농도별 식재 유형에 따른 보행로 미세먼지 제거율(%)
 (a) '좋은($\sim 15\mu\text{g}/\text{m}^3$)', (b) '보통 좋음($\sim 35\mu\text{g}/\text{m}^3$)', (c) '나쁨(좋은 $\sim 75\mu\text{g}/\text{m}^3$)'