

전산유체역학을 이용한 도로 식재 배치 유형에 따른 미세먼지 저감 분석

이승헌^{1†} · 김찬민^{2†} · 김락우^{3,4*}

¹국립공주대학교 농공학과 석사과정, ²국립공주대학교 스마트팜공학과 학사과정, ³국립공주대학교 스마트팜공학과 조교수, ⁴국립공주대학교 산업개발연구소 수석연구원

Analysis of Fine Dust Reduction according to Road Planting Arrangement Type Using Computational Fluid Dynamics

Seung-Hun Lee^{1†}, Chan-Min Kim^{2†}, and Rack-Woo Kim^{3,4*}

¹MS Student, Department of Agriculture Engineering, Yesan 32439, Kongju National University

²Undergraduate Student, Department of SmartFarm Engineering, Yesan 32439, Kongju National University

³Assistant Professor, Department of SmartFarm Engineering, Yesan 32439, Kongju National University

⁴Chief Researcher, Industrial Development Institute, Yesan 32439, Kongju National University

Abstract. The importance of urban green space creation is increasingly recognized as the most realistic and efficient approach for fine dust mitigation in urban areas. Particularly considering the characteristics of domestic cities, the application of buffer green spaces along roads can maximize the efficiency of fine dust reduction without the need for separate green space creation. Accordingly, this study analyzed the fine dust mitigation effects based on the types of plantings in the central dividers and roadside trees in Jeonju City, Jeollabuk-do. To do this, we controlled various external variables of urban space and considered the planting arrangement types in the central dividers, carrying out the analysis using a CFD simulation. The simulation results confirmed that the central dividers with plantings demonstrated more effective ultrafine dust reduction than those without. Moreover, the arrangement of roadside trees showed a greater ultrafine dust reduction effect when adopting a multilayered structure compared to a single layer. Based on these findings, we concluded that installing both trees and shrubs simultaneously in the central dividers and along roads was effective for ultrafine dust mitigation. On this basis, we quantified the dust reduction effects of plants in urban street environments and proposed planting guidelines for roadside green spaces to improve air quality.

Additional key words: CFD simulation, fine dust mitigation, planting guidelines, tree, urban green spaces

서 론

미세먼지란 탄소성분(유기탄소, 원소탄소), 이온성분(황산염, 질산염, 암모늄) 등으로 구성된 물질로 눈에 보이지 않을 정도로 입자가 작은 먼지를 말한다. 미세먼지는 입자의 지름이 10 μg 이하인 미세먼지(PM-10)와 지름이 2.5 μg 이하인 초미세먼지(PM-2.5)로 구분된다. 미세먼지의 발생 원인으로는 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분되나, 연료 연소, 자동차, 발전 시설 등에서 배출되는 물질과 같은 인위적 원인이 미세먼지의 주요 발생 원인으로 보고되고 있다(ME, 2016). 미세먼지의 발생은 호흡기 질환 등 인체에 각종 질병을 유발하며

산성비로 인한 토양의 산성화 등 농작물과 생태계, 반도체 산업과 자동차 산업 그리고 비행기와 여객선 등의 운항 제한 등 산업활동에도 악영향을 미친다(Song, 2020).

2013년 세계보건기구에서 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하는 등 전 세계의 미세먼지에 대한 관심이 대두되고 있는 가운데, 우리나라는 매년 연평균 미세먼지 농도를 주요국에 비해 높은 수치를 기록하고 있어 미세먼지 저감 대책이 필요하다는 목소리가 나오고 있다(Song 등, 2019). 정부는 도시 지역의 미세먼지 저감을 위해 노후 발전소 운행중단, 수도권 지역의 경유차 운행 제한, 차량5부제 실시 등 다양한 정책을 수행하고 있지만 효과가 미비하고 일시적이며 이미 발생된 2차 미세먼지를 저감하기에는 한계가 있다. 또한, 국제사회의 동향과 기후정책의 방향성 등을 고려하였을 때 중장기적인 관점에서 환경친화적인 방안의 접근이 필요하다(Kim 등, 2017).

미세먼지 저감을 위한 환경친화적인 방안으로는 대체에너지

†These authors contributed equally to this work

*Corresponding author: rwkim@kongju.ac.kr

Received June 29, 2023; Revised August 14, 2023;

Accepted September 18, 2023

지 개발, 녹지 조성 등이 있지만 그중, 현재 가장 현실적이고 효율적인 방법인 도시 지역의 녹지 조성이다(Jo 등, 2015). 국내 도시 특성상 도로변에 녹지를 조성할 경우 대기 중에 떠다니는 미세먼지나 차량에서 발생한 미세먼지가 도로변 가로수에 흡착돼 미세먼지 저감에 효과적이다. 도시 도로변의 경우 미세먼지 발생원이 많이 분포하고 있고 도로변 인근에는 대부분 아파트, 주택 등 거주 지역이 위치해 있어 최적의 식재를 선정해 완충녹지를 조성하면 시민들의 생활에 직접적인 효과를 기대할 수 있다(Lee 등, 2019).

하지만, 미세먼지는 대기 중에 부유하며 존재하고 지역별 미세먼지 농도 차이와 식재 배치 차이로 인해 때문에 미세먼지 농도 현장 측정 및 대기 중 이동 경로에 대해 예측과 도로 식재 배치 유형별 미세먼지 저감효과에 대한 규명이 어려운 실정이다.

전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)과 같은 공기 유동 시뮬레이션은 물리 법칙을 해석하여 유체의 공기역학적 흐름을 예측하고 가시화하는 것이 가능하다. 해외에서는 전산유체역학 기법을 활용하여 미세먼지 저감효과 분석 연구가 활발히 이루어지고 있다. Koch 등(2019)의 연구에서는 현장 실험과 CFD 시뮬레이션을 활용하여 다양한 품종의 식물에 대해 공기역학적 특성을 분석하였으며 Qin 등(2020)의 연구에서는 식물이 미세먼지 농도에 미치는 영향력을 파악하기 위해 CFD 시뮬레이션을 활용하여 길가에 식재된 가로수의 미세먼지 저감률을 확인하였다. 이처럼 CFD 시뮬레이션은 다양한 환경 및 식재 배치 유형별 조건을 인위적으로 조절 및 공기유동을 가시화가 가능하여 식재 배치 유형별 미세먼지 저감효과 분석을 위해 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 도로 중앙분리대와 가로수의 식재 유형별로 미세먼지 농도변화 및 미세먼지 저감효과를 분석하였다. CFD 시뮬레이션을 이용하여 도로 중앙분리대와 가로수의 식재 유형에 따른 모델링을 진행하고 외부 풍향, 풍속, 식재 유형에 따른 미세먼지의 저감효과를 비교하였다. 또한, 도시 가로환경에서 식물에 의한 미세먼지 저감의 정량적 효과를 구명하고 대기환경 개선을 위한 가로녹지 식재의 가이드라인을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 대상 지역 및 대상 시설

대상 지역은 전라북도 전주시 일대로 대상 지역의 기상자료는 전주기상지청의 기상자료를 이용하였다. CFD 시뮬레이션의 원활한 해석을 위해 1월부터 12월까지 미세먼지가 많이 발생하는 시기를 분석하였으며, 가장 미세먼지 농도가 안 좋은 시기의 2011 - 2020년의 평균기온을 분석하여 CFD 시뮬

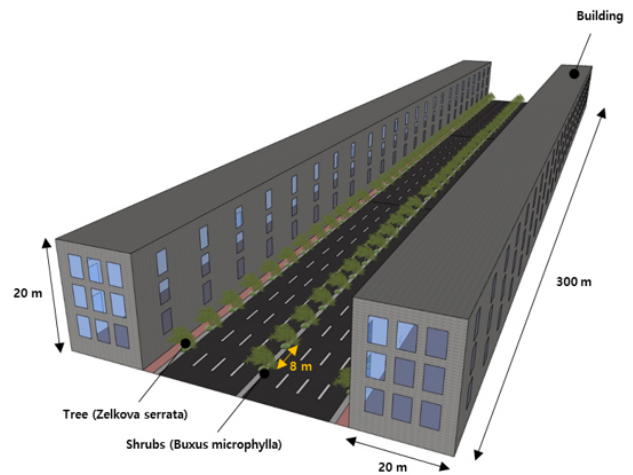


Fig. 1. Schematic diagram of the target structure and street trees.

레이션 상의 평균 기온으로 입력하였다. 또한, 본 연구에서는 최근 5년간(2017년~2021년) 3월 미세먼지 농도 데이터를 분석하여 상위 5%에 해당하는 데이터 평균값을 적용하였다.

미세먼지 데이터는 전주시 완산구 서신동 측정소의 미세먼지 측정 데이터를 사용하였다. 서신동 측정소는 본 연구 대상인 전주시에 속하고 있으며, 본 연구 목적과 지형적 특성이 유사한 곳에 위치하고 있어 본 연구에 가장 적합한 데이터를 사용할 수 있다. 하루동안 초미세먼지 농도 편차는 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $168\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 편차가 나타나기 때문에 데이터의 정확성을 고려하여 시간별 데이터를 이용하였다.

대상 구조물의 경우 Fig. 1과 같이 도로 단면 구조는 건물 높이 20m, 보도 3m, 녹지 1m, 3.5m 폭의 4차선 도로를 모델링을 진행하였으며, 다층식재구조는 교목 높이 7m, 관목높이 1m로 설계하였다. 교목 간의 폭은 산림청 가로수 조성·관리 매뉴얼 식재 가로수 기준에 따라서 8m를 기준으로 CFD 시뮬레이션 상 Geometry로 설계하였다.

2. 대상 가로수 식재특성

기존의 선행연구들에서는 식물 잎의 특징이 미세먼지 저감에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Weikang 등, 2017; Hwang, 2012). 또한 식물의 흡수 기작뿐 아니라 식물체의 잎을 통한 미세먼지가 저감된다(Ryan 등, 2016; Colleen 등, 2017; Robert 등, 2013). 즉, 미세먼지 저감을 위한 가로수를 선정하기 위해서는 대상 식재 선정이 중요하다.

2019년 산림청 국립산림과학원의 연구에서는 산림청 권장 주요 수림 중 수목의 생물리적 특성(수관구조, 잎의 복잡성, 잎 크기, 잎 표면특성 등)을 기반으로 미세먼지 저감효과를 분석해 미세먼지 저감수종을 우수, 양호, 권장으로 구분해 제시

하는 데, 그중 느티나무는 낙엽수 교목 중 우수 수종 중 하나로 지정되었다(NIFOS, 2018). 이에 본 연구에서는 실험대상의 식재로 이용될 교목으로 느티나무를 선정하였다.

여러 종류의 관목 중 회양목은 2018년 산림청 국립산림과학원의 연구결과의 미세먼지 저감수종 제시 목록에서도 회양목은 우수한 등급으로 분류되었으며(NIFOS, 2018), 회양목은 관목 중에서도 상대적으로 엽면적지수가 높아 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 판단된다(Neinavaz 등, 2016). 이에 본 연구에서는 회양목을 실험대상의 관목으로 선정하였다.

3. 식재 설계 및 항력계수

도시 외부공간의 미세먼지 저감효과에 영향을 미치는 중앙 분리대 및 가로수 배치의 기준을 마련하기 위해서는 먼저 식재에 의한 방풍 효과를 분석하여야 하며, 이를 위해선 식재의 공력 저항 특성을 필요로 한다. 본 연구에서는 느티나무와 회양목의 공력 저항값을 검증된 선행연구의 측정 결과를 사용하였다.

식재에 의한 압력의 감소는 다양한 인자들로 설명될 수 있지만, 수치해석 분야에서는 일반적으로 두 가지 식으로 표현될 수 있다. 여기서, Δp 는 다공성 매체의 전·후 지점에서의 압력 차(Pa), Δx 는 다공성 매체의 두께(m), μ 는 절대점성계수($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$), α 는 공기 투과성, C_2 는 내부 저항 인자, ρ 는 공기 밀도(kg/m^3)이다.

① Darcy-Forchheimer 방정식에 대한 식재의 투과성(α)과 관성 저항 계수(C_2)

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (1)$$

μ : 공기의 점성 계수($1.5 \times 10^{-4} \text{ kg/m/s}$)

② 급수 형태 방정식에 대한 계수 C_0, C_1

$$\Delta p = - C_0 |v| + C_1 v \quad (2)$$

두 식 모두 식재 전후의 압력 차를 유속에 대한 식으로 표현하고 있다. 첫 번째의 Darcy-Forchheimer 방정식의 접근 방법은 식재에 의한 압력 감소를 유속에 대한 2차 함수로 표현하고 있으며, 두 번째의 급수 형태 방정식의 접근 방법은 식재에 의한 압력 감소를 유속의 거듭제곱 함수로 표현하고 있다.

다공성 매체를 통한 층류 흐름에서 압력 강하는 일반적으로 속도에 비례하고 상수 C_2 는 0으로 가정할 수 있다. 따라서 다

공성 매체 모델은 Darcy의 법칙으로 축소된다.

$$\Delta p = - \frac{\mu}{\alpha} v \quad (3)$$

또는, 유속이 매우 빠르거나 Reynolds 수(Re)가 5,000보다 큰 경우 Darcy의 식을 무시할 수 있기 때문에 다공성 매체 모델은 Forchheimer 법칙으로 축소된다(Hong 등, 2008).

$$\Delta p = - C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v \quad (4)$$

본 연구에서는 식재의 레이놀즈수가 5,000 이상이라 가정하고 식 (4)의 접근 방법을 이용하여 분석하였으며, 느티나무와 회양목의 관성 저항 계수(C_2)를 결정하기 위하여 다양한 선행연구를 검토하였다. 하지만 대부분의 선행연구에서는 관성 저항 계수(C_2)값이 아닌 현장실험이나 풍동 시험에서 항력 계수(C_D)만을 결정하였다. 따라서 관성 저항 계수(C_2)와 항력 계수(C_D)의 관계를 명확히 하였다.

식재로 인한 압력의 변화는 엽면적밀도(L_{ad}), 항력 계수(C_D) 및 풍속을 사용하여 표현할 수 있다. 또한 엽면적밀도는 엽면적지수(LAI)와 나무높이(h)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$C_2 = 2 \times L_{ad} \times C_D \quad (5)$$

$$L_{ad} = \frac{LAI}{h} \quad (6)$$

$$C_2 = 2 \times \frac{LAI}{h} \times C_D \quad (7)$$

관성 저항 계수(C_2)는 식 (5)~(7)을 통해 항력 계수(C_D)와 엽면적지수(LAI)와 나무높이(h)를 사용하여 계산할 수 있다.

다양한 선행연구에서 느티나무와 회양목의 엽면적지수(LAI)와 항력 계수(C_D)를 조사하여 CFD 시뮬레이션에 입력하였다(Kim 등, 2020; Zheng 등, 2020; Neinavaz 등, 2016; Hui 등, 2010).

4. 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)

본 연구에서는 보편적으로 사용되며 다양한 장점을 지닌 유한체적법을 기반으로 도심의 도로 영역 내외부에서의 각 셀에 대하여 Navier-Stokes 방정식의 Reynolds 이론의 개념을 계산하는 CFD 시뮬레이션 기법을 사용하였다. CFD 시뮬레이

선은 유동 현상을 지배하는 편미분 방정식의 해를 수치적으로 계산하는 방법으로 기계, 환경, 화학, 항공, 우주 등 전반적인 공학 분야에서 다양하게 사용되고 있다.

현장실험이나 풍동실험과 비교하여 경제적으로 유리하며 변수 조절이 자유로운 장점이 있어 최근 농업 분야에서 농업 시설의 열 환경 및 환기 분석 등에 다양하게 활용하고 있다. 본 연구에서 사용한 CFD 시뮬레이션 기법의 해석 방법은 크게 세 가지로 구분된다. 모델의 외형을 설계하고 분석 대상 영역의 격자망을 구성하는 전처리 단계, 설계된 모델의 계산영역(Computational Domain)으로 수치해석 기법에 의거하여 방정식을 이산화하고 풀이하는 주 연산 과정과 시뮬레이션 결과를 가시적으로 분석하는 후처리 과정으로 나눌 수 있다.

연산을 수행하는 메인 모듈로는 FLUENT(ver 19.0., ANSYS Inc., USA)를 사용하였다. FLUENT는 C++ 언어를 기반으로 만들어졌으며 동적인 메모리 할당과 효율적인 데이터 구조와 유연한 계산 제어를 가능하게 제작된 CFD 기반의 컴퓨터 모델링 및 분석 툴이다. 또한 Client/Server 구조를 사용하여 여러 대의 컴퓨터를 사용하여 동시에 작업을 수행할 수 있어 현대의 복잡하고 대규모적인 계산 문제들을 해결할 수 있는 능력을 가지고 있다.

5. CFD 모델 설계 및 해석 조건

5.1 식재를 통한 미세먼지 저감 모의를 위한 CFD 모델 설계

Geometry는 설계 기준에 나와 있는 정보를 바탕으로 건물의 폭, 높이, 길이는 각각 20m, 20m, 200m로, 도로의 폭과 길이는 37m, 140m로 설계하였다. 식재 중 교목의 지름은 5m, 높이 7m, 간격 8m, 교목의 수관은 반지름이 2.5m인 구 형태로 모델링하였다. 관목의 경우 가로 1m, 높이 1m로 가로수와 중앙분리대를 따라 늘어지게 직사각형 형태로 설계하였다. 교목은 가로수와 중앙분리대를 따라 17그루씩 총 51그루로 설계하였으며 관목은 가로수와 중앙분리대를 따라 길게 늘어지게 총 3그루를 모델링하였다.

계산 영역은 건물의 풍하중을 수치적으로 예측하는 선행연구 중에서 일본 건축학회의 풍하중 기준에 기여한 Yoshihide 등(2018)과 Tetsuro 등(2008)의 연구결과에 따라, Fig. 2와 같이 풍하중 길이를 20H로 도로에 작용하는 풍압 계수는 풍하중 길이와 관계없이 거의 일정한 값을 갖게 설계하였다. 또한, 계산 영역의 측면 길이는 건물의 외부 가장자리에서 약 5H 이상 확장되어야 하기 때문에 측면 길이, 높이 길이, 후류 길이는 각각 5H, 5H, 3H로 설정하였다.

격자 사이즈는 정확도와 연산의 경제성을 동시에 고려하여 관목은 0.4m, 교목은 0.6m, 도메인의 경우는 Sweep Method를 사용하여 1.2m에서 1.5m로 점차 커지게 설계하였다. 본

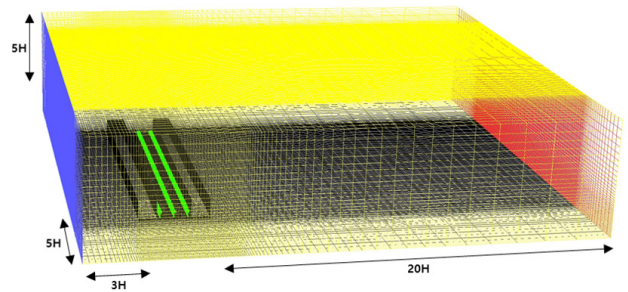


Fig. 2. CFD Simulation model grid design.

Table 1. Design conditions for simulation models.

Setting of model	
Solver	Pressure based
	Implicit formulation
	Unsteady state analysis
Turbulence model	3D simulation
Turbulence model	Realizable $k-\epsilon$ model
Wind environment profile	Velocity inlet, User-Defined-Function (C code)
Tree	Porous media
Domain	Symmetry

연구에서는 검증된 방법론을 사용하여 시뮬레이션 모델의 설계를 진행하였으며 실제 도심지에 식재를 조건에 맞게 설치하고 풍향, 풍속에 따른 미세먼지량을 측정하여 데이터를 확보하는 데 제한이 있기에 시뮬레이션을 활용하여 분석을 진행하였다.

또한, 실제 전주지역의 기상데이터를 활용하여 분석을 진행하였기 때문에 충분한 입력자료로 구축되었다고 판단된다. 사용된 시뮬레이션 모델의 설계 조건은 Table 1과 같으며, CFD 시뮬레이션에서 전주 지역의 풍환경과 동일한 풍환경을 조성하기 위해 Richards 등(1989)의 연구에 따라 평균 풍속과 난류에너지 및 소산율에 대한 프로파일을 적용하였다.

또한, 식재를 통한 미세먼지 농도 저감 모의를 위한 CFD 모델의 설계를 위해 공간적 및 시간적 농도 프로파일 측면에서 실제 경과를 가장 적절하고 근접하게 예측할 수 있는 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였다(CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles).

5.2 해석조건

해석조건으로 풍속은 1m/s, 4m/s, 7 m/s로 3가지 풍속으로 선정하여 최저 풍속부터 최대 풍속까지 고려할 수 있도록 선정하였다. 풍향은 Fig. 3과 같이 건물 방향에 수직으로 들어오

는 바람(풍향0°)와 비스듬히 들어오는 바람(풍향45°)를 해석 조건으로 선정하였다. 공기 유동에 따라 공기 중에 떠다니는 초미세먼지(PM-2.5)와 도로에서 떠오르는 부유먼지들을 고려하여 교목과 관목 두 가지 식재를 선정하였으며, 가장 경제

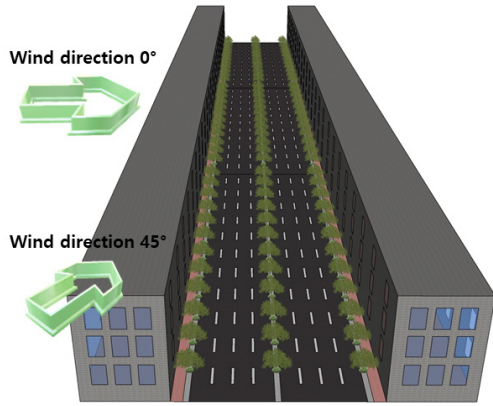


Fig. 3. CFD simulation wind direction settings.

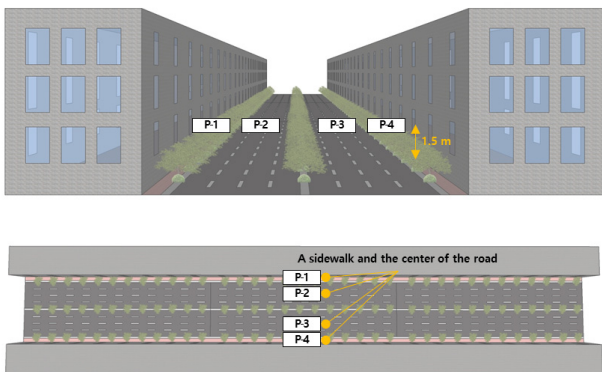


Fig. 4. Measurement point of fine dust concentration for quantitative analysis.

적이고 효율적인 식재 배치 조건을 찾기 위해 중앙분리대에 설치한 경우와 가로수로 설치한 경우, 중앙분리대에 설치하지 않은 경우를 식재 특성에 따라 선정하였다.

본 연구에서는 도시 가로수 및 중앙분리대의 식재를 통한 미세먼지 저감 모의를 위한 해석조건은 다음 Table 2과 같이 풍속 3 Case(1m/s, 4m/s, 7m/s), 풍향 2 Case(0°, 45°), 식재의 배치에 따라 6 Case(중앙분리대 교목·가로수 교목, 중앙분리대 교목·가로수 교목+관목, 중앙분리대 교목+관목·가로수 교목, 중앙분리대 교목+관목·가로수 교목+관목, 중앙분리대 없음·가로수 교목, 중앙분리대 없음·가로수 교목+관목)로 총 36 Case를 선정하였다.

본 연구에서는 미세먼지 농도의 정량적 분석을 수행하기 위하여 Fig. 4와 같이 중앙 단면의 1.5m 높이 총 4가지 측정 지점에서 미세먼지 농도 데이터를 추출하였다. 4가지 측정점은 풍상측 보도(P-1), 풍상측 도로(P-2), 풍하측 도로(P-3), 풍하측 보도(P-4) 지점이다. 또한 식재가 설치된 영역의 1.5m 높이에서의 단면의 미세먼지 농도를 추출하여 정성적 분석을 수행하였다. 또한, CFD 해석에서 식재를 통한 미세먼지 저감효과를 나타내기 위해 FLUENT상에서 미세먼지가 porous zone을 통과할 때 미세먼지의 농도가 50% 감소하도록 설정하였다.

결과 및 고찰

1. 기상데이터 분석

본 연구에서는 CFD 분석을 위해 필요한 기상데이터를 분석하였다. 월별 황사 일수, 풍속 및 풍향, 평균 기온을 분석하여 CFD 해석 조건 및 설계를 진행하였다. 2011-2020년 월별 황사 일수를 분석한 결과 3월과 5월이 18일, 11월이 11일, 4월이 10일로 3, 5월이 황사 일수가 가장 많이 나타났으며, 이 결

Table 2. Cases for analysis of CFD simulation model.

	Conditions			Case
Wind speed	1 m/s, 4 m/s, 7 m/s			3
Wind direction	0°, 45°			2
Street and medians planting type conditions	Type	Median planting	Street	6
	Type-1	Tree	Tree	
	Type-2	Tree	Tree + shrub	
	Type-3	Tree + Shrub	Tree	
	Type-4	Tree + Shrub	Tree + shrub	
	Type-5	x	Tree	
	Type-6	x	Tree + shrub	
Total case				36

과를 바탕으로 3월, 5월에 황사가 빈번하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Park 등(2010)에 따르면 대기 오염물질의 변동 크기와 농도가 봄> 겨울> 가을> 여름 순으로 높다고 제시하고 있다. 미세먼지(PM-10)과 초미세먼지(PM-2.5)의 농도가 높은 달은 3월이며, 월간 황사 일수가 많은 월 또한, 3월이다. 따라서 봄의 대기오염도, 대기 오염물질의 농도가 높다는 결과를 반영하여 CFD 시뮬레이션에 적용할 데이터를 3월의 전주 기상 데이터로 선정하였다.

또한, 정확한 CFD 해석을 위해서는 공기, 도로 온도에 의한 대류현상 또한 고려해야 하므로 대상 지역의 기온을 입력해야 정상적인 유동 해석이 가능하다. 따라서 2011-2020년의 3월 평균 기온을 분석하였다. 분석 결과 10년치 3월 평균 기온은 7.2°C로 나타났으며 CFD 시뮬레이션에 온도 조건을 구현하였다.

2. 초미세먼지 농도

초미세먼지 농도 시간별 데이터 분석 결과 농도가 선형적으로 상승하다 급격하게 상승하는 구간이 존재하는데, 이 구간은 미세먼지 농도가 너무 높고 발생빈도도 낮아 식재의 미세먼지 흡착도를 감안하더라도 미세먼지 저감효과가 미비할 것으로 판단되며 발생빈도 또한 낮기 때문에 상위 5%에 해당하는 데이터 값의 4년 평균을 내어 본 연구에 적용하였다.

초미세먼지 데이터에서 도출한 상위 5%의 초미세먼지(PM-2.5) 농도 값은 Table 3와 같이 2017년 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2018년 99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2019년 148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평균 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 값이 도출되었다. 2020년 데이터는 전주 서신동 측정소 미세먼지 측정기기의 시험 운전으로 인한 데이터가

없어 제외하였다.

3. 초미세먼지 농도 결과

3.1 CFD 시뮬레이션을 통한 초미세먼지 농도 결과(풍향 0°)

Fig. 5, 6, 7을 보면, 풍속이 증가할수록 초미세먼지 농도는 증가하는 경향이 나타났다. 가로수 배치가 단층구조인 Type-1, 3, 5의 경우 다른 Type에 비해 초미세먼지 농도가 높게 나타났다. Type-5, 6의 경우는 중앙분리대에 식재가 없고, 가로수에 단층구조와 다층구조의 배치에 따라 초미세먼지 농도의 변화의 폭이 매우 높게 나타났다. 이는 중앙분리대에 식재가 없어도 가로수에 다층구조를 설치한다면 보도쪽에서는 초미세먼지 저감효과를 볼 수 있는 것으로 사료된다.

중앙분리대에 식재를 배치를 고려하지 않은 Type-5, 6은 다른 Type보다 초미세먼지 농도가 높게 나타났으며, 중앙분리대에 식재를 배치하지 않고 가로수 식재가 다층일 때 초미세먼지 농도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 가로수에 다층구조의 식재를 배치하는 것이 초미세먼지 농도를 저감하는 데 효과적이라고 판단된다.

또한, Type-4의 모든 지점별 초미세먼지 농도값이 가장 낮게 나타나는데, 이는 가로수 및 중앙분리대와 가로수에 다층구조로 식재를 배치하는 것이 초미세먼지 저감에 가장 효과적인 방법이라 판단된다. Fig. 5에서 지점 P-1, P-2, P-3의 결과값을 보면 Type-2, 4, 6에서 가로수에 다층구조로 식재를 배치한 것과 달리 중앙분리대에만 다층구조로 식재를 배치한 Type-3에서 P-4에서는 높은 결과값을 보이지만 중앙분리대와 가까운 P-3을 기점으로 Type-2, 4, 6에서와 같이 낮은 초미세먼지 농도를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서 Type-3의 경우 지점별 초미세먼지 평균 농도는

Table 3. Ultrafine dust measurement data in the target area for the last 5 years (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Concentration	Year				Average
	2017	2018	2019	2021	
1%	124	135	220	136	154
2%	106	115	209	118	137
3%	97	107	160	87	113
4%	87	102	152	80	105
5%	82	99	148	75	101
6%	79	95	143	72	97
7%	78	90	138	71	94
8%	78	86	133	69	92
9%	73	84	127	67	88
10%	72	82	122	65	85

60.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고 Type-4의 경우에는 지점별 초미세 먼지 평균 농도는 20.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 초미세먼지 농도값의 차이가 크다. 이는 중앙분리대 배치가 다층구조일지라도, 가로수 배

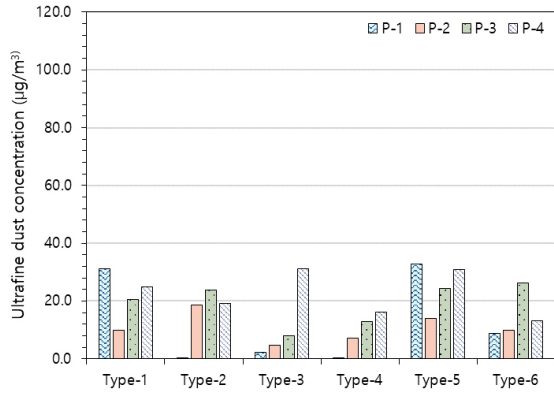


Fig. 5. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 1 m/s).

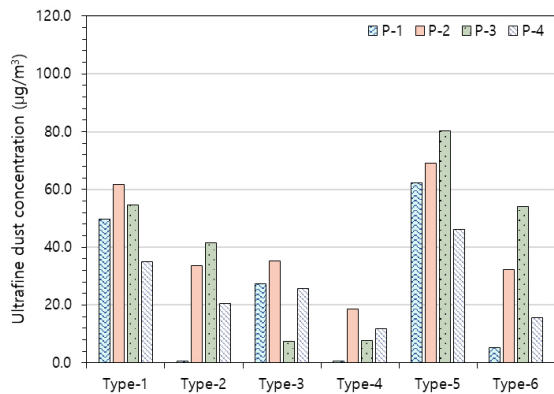


Fig. 6. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 4 m/s).

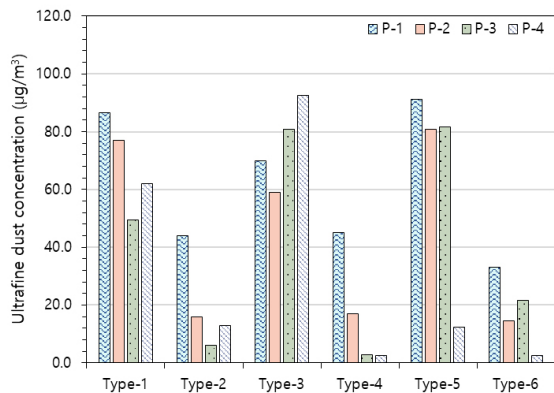


Fig. 7. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 7 m/s).

치가 단층구조일 때 초미세먼지 평균 농도가 높게 나타났고, 다층구조일 때 낮게 나온 것을 확인하였다. 따라서 중앙분리대 배치만 다층구조일 때 초미세먼지 저감효과는 낮은 것으로 판단된다.

초미세먼지 농도 저감효과가 두드러지게 나타난 Type-4의 결과를 다른 유형들과 비교해보면 도로에서 초미세먼지를 저감하려면 가로수와 중앙분리대에 교목과 관목을 동시에 설치하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.2 CFD 시뮬레이션을 통한 초미세먼지 농도 결과(풍향 45°)

Fig. 8, 9, 10과 풍향이 0°일 때를 비교하면, 풍향이 45°일 때 풍향이 0° Case에 비해 풍속이 증가할수록 초미세먼지 농도는 증가하는 경향이 나타났다. 이는 풍향이 0°일 경우 건물이 바람을 막아 초미세먼지 농도가 낮게 나타났으며, 풍향이 90°에 가까워질수록 건물이 초미세먼지의 저감에 미치는 영향력이 감소하여 초미세먼지 농도는 증가할 것으로 판단된다.

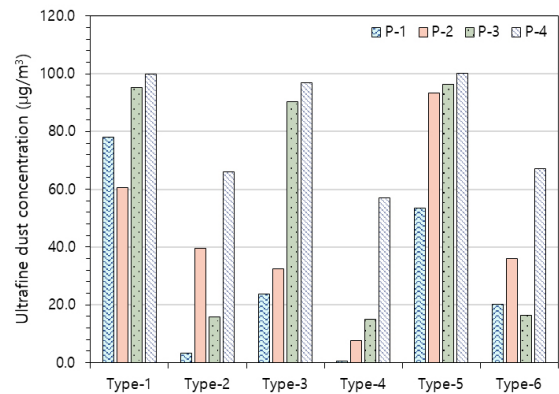


Fig. 8. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 1 m/s).

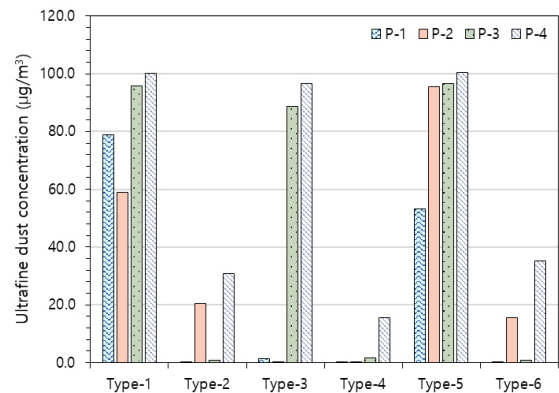


Fig. 9. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 4 m/s).

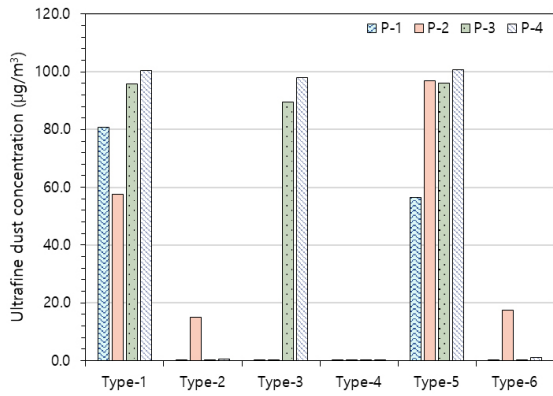


Fig. 10. Results of ultrafine dust concentration according to the planting of street and median planting (wind speed 7 m/s).

초미세먼지 농도 차이가 급격한 Fig. 10을 보면, 유형마다 지점별로 초미세먼지의 농도가 조금씩 상이한 형태를 보이긴 하지만 전체적으로 Type-1, 3, 5에서 높은 초미세먼지 농도를 보이며 Type-2, 4, 6에서 상대적으로 매우 적은 초미세먼지 농도가 나타났다.

유형별로 구조를 비교해 보았을 때 Type-1, 3, 5는 가로수 배치가 단층구조(교목)이며 Type-2, 4, 6은 가로수 배치가 다층구조(교목+관목)인 것을 확인할 수 있었으며 이는, 도로변 가로수 배치가 단층구조일 때보다 다층구조일 때 초미세먼지 농도 저감이 효과적인 것으로 분석된다.

P-1의 값을 보면 Type-1, 5를 제외한 모든 유형에서 초미세먼지 농도가 낮게 나타나는 걸 확인할 수 있는데 Type-2, 4는 중앙분리대의 존재와 가로수의 다층구조의 영향으로 초미세먼지 농도가 낮게 나온 것으로 분석된다. Type-6의 경우 중앙분리대가 존재하지 않음에도 초미세먼지 농도가 매우 저감된 것에 반면, Type-1의 경우 중앙분리대가 존재함에도 초미세먼지 농도가 높은 것을 보았을 때 P-1 지점에서는 중앙분리대 유무의 영향보다 가로수 배치의 형태 형태의 종류가 초미세먼지 농도 저감에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

P-2의 결과값은 Type-2, 6을 제외하고 P-1의 그래프와 전반적으로 비슷한 수치를 보이는데 Type-6은 풍향 45°의 영향으로 바람이 P-4 지점에서 P-1 지점방향으로 유입돼 상대적으로 오른쪽인 P-2의 농도가 P-1보다 높은 것으로 판단된다.

P-3, 4의 그래프는 수치가 비슷하게 나타났으며 Type-2, 4, 6이 Type-1, 3, 5보다 초미세먼지 농도가 적게 나타난다. 이는 가로수 배치의 영향 때문인 것으로 보이며 단층구조일 때보다 다층구조일 때 초미세먼지 저감효과가 더 큰 것으로 판단된다.

풍향이 45°이고 풍속이 7 m/s일 때의 초미세먼지 저감 농도를 종합적으로 고찰하였을 때 전반적으로 중앙분리대의 유무,

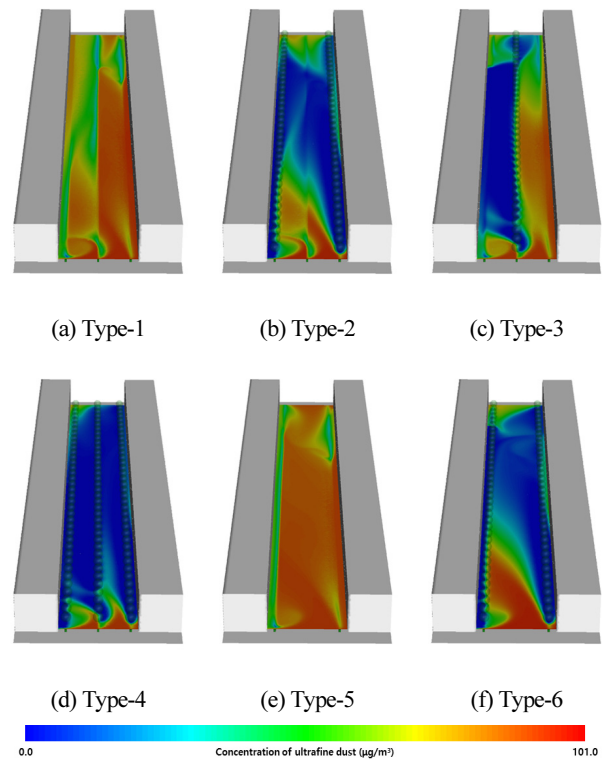


Fig. 11. Contour of ultrafine dust concentration by planting of street and median planting (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$). (Wind speed 4 m/s, wind direction 45°).

가로수 배치 차이의 영향으로 초미세먼지 농도의 수치가 상이한 것으로 판단된다. 중앙분리대가 없을 때보다 중앙분리대가 있을 때 초미세먼지 저감효과가 더 큰 것으로 분석되며, 가로수 배치는 단층구조일 때보다 다층구조일 때 초미세먼지 저감효과가 더 큰 것으로 사료된다.

풍향 및 풍속의 관계없이 Type-2, 4, 6의 초미세먼지 농도 그래프를 보면 차이가 확연하지 않은 것을 알 수 있다. 하지만 관측 지점이 있는 1.5m 높이의 초미세먼지 단면 Contour를 보았을 때 Fig. 11과 같이 Type-4와 다른 Type을 비교하였을 때 초미세먼지 집적도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

풍향이 0°, 45°, 풍속 1, 4, 7m/s인 경우 초미세먼지 농도를 분석 결과 중앙분리대의 유무, 가로수 배치의 유형에 따라서 초미세먼지 농도가 상이하게 나타난 것으로 보인다. 또한, 풍향이 45°일 때보다 0°일 때 초미세먼지의 농도 분포가 낮게 나타났으며 풍속이 강할수록 유형별 초미세먼지 농도의 편차가 큰 것으로 나타났다. 지점별 수치상의 차이는 있지만 대부분의 경우 중앙분리대가 있을 때, 가로수 배치가 다층구조인 Type-4일 때 초미세먼지의 저감효과가 큰 것으로 분석되었다.

최종적으로 도로에서 초미세먼지를 효과적으로 저감하려면 중앙분리대에 식재가 있는 것이 더 유리할 것으로 보이며 가로수에 교목과 관목을 동시에 설치하는 것이 바람직하다고 판단된다. 중앙분리대 또한 교목과 관목을 동시에 설치한다면 교목만 설치했을 때와 비교하여 초미세먼지 저감효과를 보이기 때문에 가로수에 다층구조와 함께 중앙분리대에도 다층구조로 식재를 배치한다면 보다 효율적인 초미세먼지 저감에 효과를 보일 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 선행연구 및 문헌조사를 통해 미세먼지 저감에 효과적일 것으로 판단되는 식재를 선정하고 CFD를 이용하여 다양한 환경 조건에서 중앙분리대, 가로수의 식재 배치 유형에 따른 미세먼지 저감효과를 분석하였다. 또한, 검증 및 분석 방법론을 적용하여 미세먼지 저감 농도를 효과적으로 예측하였고 미세먼지 저감을 위한 최적의 식재 구조를 제시하였다.

이에 본 연구는 도시 대기환경 개선을 위한 가로녹지 식재 기준(가이드라인) 마련에 효과적으로 이용될 것으로 판단되며 향후 도시 도로변 미세먼지 저감 연구 진행에 선행연구의 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서 활용된 기상 데이터는 기상청 자료를 이용한 것으로, 대상 지역에서 직접 실측을 통해 얻은 데이터가 아니기 때문에 데이터의 신뢰성에 제한을 둘 수 있다는 한계점이 있다.

또한, 중앙분리대와 가로수 배치의 경우 다양한 유형별로 분석하였으나 식재 종류는 단일 식재로만 적용하였다는 한계점이 있다. 이에 현장 데이터 확보 및 실증을 통한 모델의 신뢰도 향상과 다양한 식재들을 적용한 미세먼지 저감효과 분석에 대한 연구가 추가로 진행되어야 할 필요성이 있다고 판단된다.

적요

미세먼지 저감을 위한 가장 현실적이고 효율적인 방법은 도시 지역의 녹지 조성으로 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 국내 도시 특성상 도로변에 녹지를 조성할 경우 별도의 녹지 조성없이 대기 중에 떠다니는 미세먼지나 차량에서 발생한 미세먼지가 도로변 가로수에 흡착돼 미세먼지 저감에 효과적이다. 하지만, 미세먼지는 대기 중에 부유하며 존재하고 지역별 미세먼지 농도 차이와 식재 배치 차이로 인해 때문에 미세먼지 농도 현장 측정 및 대기 중 이동 경로에 대해 예측과 도로 식재 배치 유형별 미세먼지 저감효과에 대한 규명이 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 이용하여 도로 중앙분리대와 가로수의 식재 유형별로 미세먼지 농도변화 및 미세먼지 저감효과를 분석하였다. 분석 결과 미세먼지 저감을 위해서는 중앙분리대에 식재가 있는 것이 미세먼지 저감 효과가 탁월할 것으로 보이며 가로수에 교목과 관목을 동시에 설치하는 것이 바람직하다고 판단된다. 본 결과를 바탕으로 도시 대기환경 개선을 위한 가로녹지 식재 기준(가이드라인) 마련에 효과적으로 이용될 것으로 판단되며 향후 도시 도로변 미세먼지 저감 연구 진행에 선행연구의 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

추가주제어: CFD 시뮬레이션, 미세먼지 저감, 식재 배치 기준, 식재, 도시 녹지 조성

Literature Cited

- Colleen F. 2017, Interception of particulate matter by street tree leaves in an inland valley community of southern California. PhD Dissertation, California State Polytechnic Univ., USA.
- Hong S.W. 2008, Analytical comparison on ventilation efficiencies of naturally-ventilated multi-spant greenhouse and development of crop model using CFD technology. MS Dissertation, Seoul National Univ., Korea.
- Hui E.Q., X.E. Hu, C.B. Jiang, and Z.D. Zhu 2010, A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. *J Hydrodyn B* 22:329-337. doi:10.1016/S1011-6058(09)60062-7
- Hwang H.J. 2012, Characteristics of soot aerosol removal according to tree species. MS Dissertation, Hanyang Univ., Korea.
- Jo H.K., and H.M. Park 2015, Effects and improvement of carbon reduction by greenspace establishment in Riparian zones. *J Korean Inst Landsc Archit* 43:16-24. (in Korean) doi:10.9715/kila.2015.43.6.016
- Kim B.G., W.S. Lee, H.I. Jo, and B.G. Lee 2020, Making primary policies for reducing particulate matter. *J Soc e-Bus Stud* 25:109-121. (in Korean) doi:10.7838/jsebs.2020.25.1.109
- Kim D.Y., B.M. Yoon, and I.A. Choi 2017, Proposal for ordinance of atmospheric environment management in Gyeonggi-do. *Gyeonggi Res Inst* 1-122. (in Korean)
- Koch K., R. Samson, and S. Denys 2019, Aerodynamic characterisation of green wall vegetation based on plant morphology: An experimental and computational fluid dynamics approach. *Biosyst Engin* 178:34-51. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.10.019
- Lee E.Y., E.J. Yoon, M.N. Kim, and E.Y. Lee 2019, Improvement of green buffer zone function for reduction of particulate matters in urban area. Land and Housing Institute (LHI),

- Korea Land & Housing Corporation (LH). pp 1-166. (in Korean)
- Ministry of Environment (ME) 2016, If you know it right away, you can see it. What is the fine dust. ME, Daegu, Korea. (in Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFOS) 2018, Urban forest creation and management guidelines for fine dust reduction. NIFOS, Seoul, Korea. (in Korean)
- Neinavaz E., A.K. Skidmore, R. Darvishzadeh, and T. Groen 2016, Retrieval of leaf area index in different plant species using thermal hyperspectral data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 119:390-401. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.07.001
- Park J.S., C.H. Kim, J.J. Lee, J.H. Kim, E.H. Hwang, and S.D. Kim 2010, A study on chemical composition of fine particles in the Sungdong Area, Seoul, Korea. *J Korean Soc Urban Environ* 10:293-303. (in Korean)
- Qin H., B. Hong, B. Huang, X. Cui, and T. Zhang 2020, How dynamic growth of avenue trees affects particulate matter dispersion: CFD simulations in street canyons. *Sustain Cities Soc* 61:102331. doi:10.1016/j.scs.2020.102331
- Richards P.J. 1989, Computational modelling of wind flow around low-rise buildings using PHOENICS. AFRC Institute of Engineering Research Buildings and Livestock Div., Scotland.
- Robert P., H. Gawrońska, M. Wrochna, S.W. Gawroński, and A. Sæbø 2013, Particulate matter on foliage of 13 woody species: Deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. *Int J Phytoremed* 15:245-256. doi:10.1080/15226514.2012.694498
- Ryan J.L., C. McArthur, and D.F. Hochuli 2016, Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban For Urban Green* 20:249-253. doi:10.1016/j.ufug.2016.09.008
- Song C.K. 2019, Fine dust status and air quality forecast. *Energy Focus* 16:6-11. (in Korean)
- Song M.J. 2020, Global warming and fine dust issues and energy data utilization. HelloT. Available via <https://www.hellot.net/news/article.html?no=49521> (in Korean)
- Tetsuro T., N. Kojiro, and K. Koji 2008, AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. *J Wind Engin Ind Aerodyn* 96(10-11):1974-1984. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.020
- Weikang Z., B. Wang, and X. Niu 2017, Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing. *Forests* 8:92. doi:10.3390/f8030092
- Yoshihide T., M. Akashi, Y. Ryuichiro, K. Hiroto, N. Tsuyoshi, Y. Masaru, and S. Taichi 2008, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J Wind Engin Ind Aerodyn* 96(10-11):1749-1761. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.058
- Zheng S.L., J.M. Guldmann, Z. Liu, and L. Zhao 2020, Predicting the influence of subtropical trees on urban wind through wind tunnel tests and numerical simulations. *Sustain Cities Soc* 57:102116. doi:10.1016/j.scs.2020.102116